



## دستور کار آزمایشگاه سیستم‌های کنترل خطی

دکتر صباحی

دکتر نیکدل



---

## فهرست مطالب

۱.....	مقدمه‌ای از نحوه انجام آزمایش‌ها
۲.....	پیش‌آزمایش.....
۳.....	آزمایش ۱: اتصال سیستم‌ها به یکدیگر و بدست آوردن سیستم معادل.....
۸.....	آزمایش ۲: بررسی پاسخ سیستم‌های مرتبه اول.....
۹.....	آزمایش ۳: بررسی پاسخ سیستم‌های مرتبه دوم.....
۱۱.....	آزمایش ۴: پاسخ سیستم‌های مختلف به ورودی پله.....
۱۳.....	آزمایش ۵: مکان هندسی ریشه‌ها.....
۱۵.....	آزمایش ۶: پاسخ فرکانسی.....
۱۷.....	آزمایش ۷: اثر افزودن قطب به سیستم حلقه باز.....
۱۸.....	آزمایش ۸: اثر افزودن صفر به سیستم حلقه باز.....
۱۹.....	آزمایش ۹: اثر افزودن صفر و قطب به سیستم حلقه بسته.....
۲۰.....	آزمایش ۱۰: طراحی جبران‌ساز به روش مکان هندسی ۱.....
۲۲.....	آزمایش ۱۱: طراحی جبران‌ساز به روش مکان هندسی ۲.....
۲۳.....	آزمایش ۱۲: بررسی پاسخ فرکانسی و طراحی جبران‌ساز در حوزه فرکانس.....
۲۴.....	آزمایش ۱۳: طراحی کنترلر PD.....
۲۶.....	آزمایش ۱۴: طراحی جبران‌سازی پیش‌فاز-پس‌فاز و کنترلر PID.....
۲۸.....	ضمیمه ۱: مقدمه‌ای از نصب و تحلیل ارکد.....
۳۸.....	ضمیمه ۲: برخی از دستورات کاربردی متلب در کنترل.....
۴۰.....	ضمیمه ۳: راهنمای اتصالات آی سی LM324.....

## مقدمه‌ای از نحوه انجام آزمایش‌ها

این دستورکار سرفصل‌های اصلی درس سیستم‌های کنترل خطی را به صورت کامل پوشش می‌دهد. پیش از انجام آزمایش‌ها لازم است نکات زیر در نظر گرفته شوند:

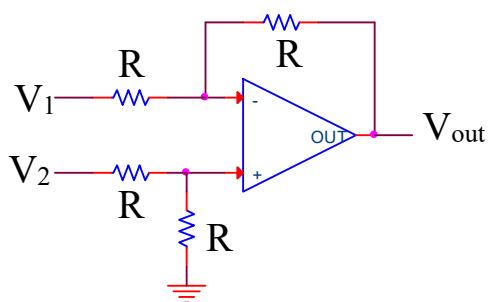
(۱) هر آزمایش متشکل از سه بخش طراحی مدار، شبیه‌سازی و بررسی نتایج مدار عملی است. لازم است دو بخش طراحی و شبیه‌سازی بصورت کامل برای هر آزمایش در قالب پیش‌گزارش‌کار تهیه و پیش از شروع آزمایش تحویل داده شوند. ابزارهای مورد استفاده در شبیه‌سازی نرم افزارهای متلب و ارکد هستند. جهت کسب اطلاعات بیشتر در مورد این نرم افزارها می‌توانید به ضمیمه‌های ۱ و ۲ مراجعه نمایید.

(۲) المان‌های مورد نیاز جهت طراحی مدار مربوط به هر آزمایش عبارتند از: مقاومت، خازن و آپ‌امپ. در کلیه آزمایش‌ها، مقدار خازن را برابر ۱۰ میکروفاراد و آپ‌امپ را از نوع LM324 در نظر بگیرید. جزییات نحوه اتصال و تغذیه آی سی LM324 در ضمیمه ۳ موجود است.

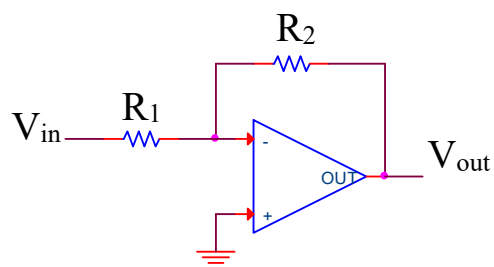
(۳) پس از انجام مراحل طراحی و شبیه‌سازی در قالب پیش‌گزارش‌کار، آزمایش با بستن مدار مربوطه و مشاهده و تحلیل نتایج آن بصورت عملی در آزمایشگاه انجام شده، نتایج نهایی در قالب گزارش‌کار هر آزمایش تحویل داده خواهند شد.

## پیش‌آزمایش

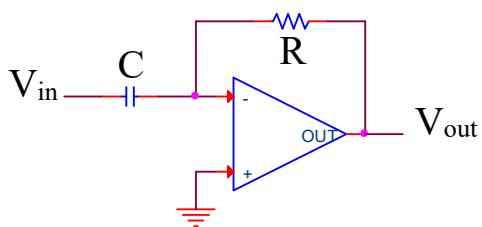
تابع تبدیل مدارهای آپ‌امپی زیر را در حوزه لاپلاس بدست آورید.



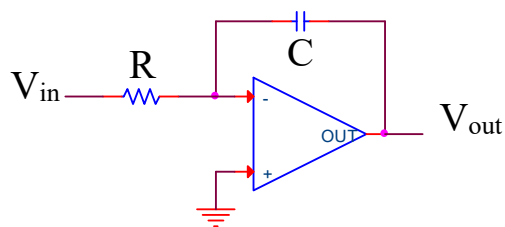
(۲)



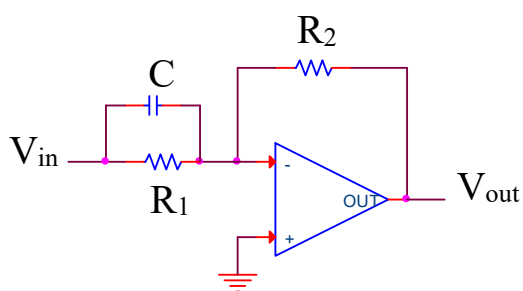
(۱)



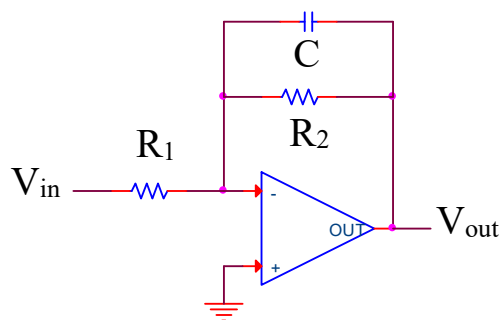
(۴)



(۳)



(۶)



(۵)

## آزمایش ۱: اتصال سیستم‌ها به یکدیگر و بدست آوردن سیستم معادل

مدل ریاضی سیستم‌های دینامیکی یک مجموعه معادله است که رفتار دینامیکی سیستم را به خوبی نمایش می‌دهد. ذکر این نکته مهم است که مدل ریاضی سیستم برای یک سیستم معین یکتا نیست. رفتار دینامیکی سیستم‌های مکانیکی، الکترونیکی، حرارتی و ... را می‌توان برحسب معادلات دیفرانسیل توصیف کرد. در کنترل خطی فرض بر این است که اصل علیت بر سیستم‌های مورد نظر حاکم است.

مدل‌های ریاضی شکل‌های متفاوتی دارند این که برای یک سیستم چه مدلی مناسب است به خود سیستم بستگی دارد. به طور مثال برای تحلیل پاسخ گذرا یا پاسخ فرکانسی تابع تبدیل مناسب‌تر است. دریافتن مدل ریاضی باید مصالحه‌ای بین سادگی مدل و دقت نتایج تحلیل صورت پذیرد. در مواردی که مدل ریاضی خطای فاحشی دارد، باید نظریه کنترل مقاوم به کار رود.

الف) برای تعریف یک سیستم در متلب سه‌راه وجود دارد. تابع زیر را در نظر بگیرید و با سه روش زیر آن را تعریف کنید:

$$sys = \frac{s + 1}{s^2 + 4s + 4}$$

روش اول:

$$sys1 = tf([ \text{ضرایب مخرج} ], [ \text{ضرایب صورت} ])$$

روش دوم :

تعریف متغیر لاپلاس به صورت  $s = tf('s')$ ، سپس نوشتن مستقیم سیستم به زبان متلب

$$sys1 = (s + 1)/(s^2 + 4 * s + 4)$$

روش سوم:

با داشتن صفرها و قطب‌های سیستم

$$sys1 = zpk([ \text{صفرها} ], [ \text{قطب‌ها} ], [ \text{بهره} ])$$

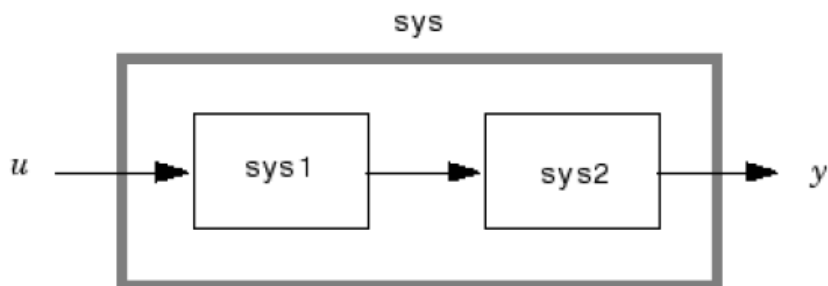
با هر سه روش به جواب یکسانی می‌رسیم.

با یکی از روش‌های بالا دو سیستم زیر را تعریف کنید:

$$sys1 = \frac{s + 1}{s^2 + 2s + 3}$$

$$sys2 = \frac{s + 1}{s^3 + 4s + 5}$$

ب) برای بدست آوردن سیستم سری معادل از دو روش زیر می‌توان استفاده نمود:



روش ۱:

$$sys = sys1 * sys2$$

روش ۲:

$$sys = series(sys1, sys2)$$

برای نمایش صفر و قطب تابع تبدیل سری از دستور زیر استفاده نمایید

$$pzmap(\text{سیستم})$$

اگر بخواهیم مقادیر صفر و قطب را بدست آوریم، از دستور زیر استفاده می‌کنیم:

$$[p, z] = pzmap(\text{سیستم})$$

برای تعیین پایدار یا ناپایداری سیستم، از دستور زیر استفاده می‌کنیم:

$$isstable(sys)$$

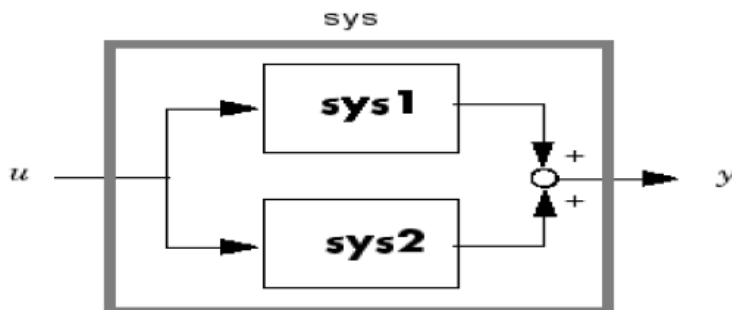
برای بدست آوردن بهره DC از دستور زیر استفاده می‌کنیم:

$$dcgain(sys)$$

ضریب میرایی و فرکانس طبیعی نیز با دستور زیر بدست می‌آید:

$$damp(sys)$$

ج) برای بدست آوردن سیستم موازی معادل از دو روش زیر می‌توان استفاده نمود:



روش ۱:

$$sys = sys1 + sys2$$

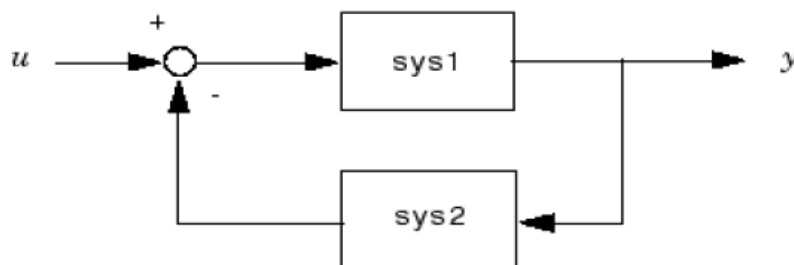
روش ۲:

$$sys = parallel(sys1, sys2)$$

برای این سیستم معادل صفر و قطب را نمایش داده و همچنین مقادیرشان را بیابید.

آیا سیستم پایدار است؟ بهره DC سیستم را بیابید. ضریب میرایی و فرکانس طبیعی را بدست آورید.

(د) برای بدست آوردن سیستم فیدبکی معادل از دو روش زیر می‌توان استفاده نمود:



$$sysf = feedback(sys1, sys2)$$

اگر سیستم فیدبک مثبت داشته باشد از دستور زیر استفاده می‌کنیم:

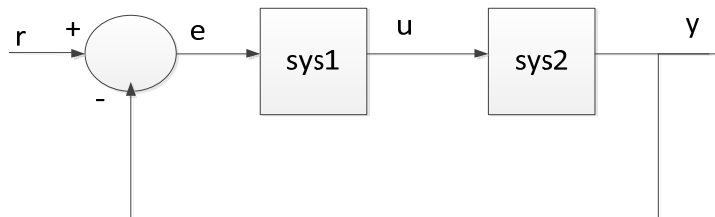
$$sysfp = feedback(sys1, sys2, 1)$$

برای این سیستم معادل هر دو فیدبک مثبت و منفی صفر و قطب را نمایش داده و همچنین مقادیر صفر و قطب را بیابید. آیا سیستم پایدار است؟ بهره DC سیستم را بیابید. ضریب میرایی و فرکانس طبیعی را بدست آورید.

(د) برای سیستم‌های پیچیده‌تر از دستور connect استفاده می‌شود. به این صورت که ابتدا ورودی و خروجی هر یک را نام‌گذاری می‌کنیم و سپس بلوک‌های جمع‌کننده و سیگنال‌های ورودی و خروجی را به کمک دستور sumblk تعریف می‌کنیم و سپس از دستور connect به‌صورت زیر استفاده می‌کنیم.

(خروجی‌ها، ورودی‌ها، ...، سیستم ۲، سیستم ۱) = connect سیستم

به‌عنوان مثال، سیستم زیر را در نظر بگیرید:



```

sys1.InputName = ' e';
sys1.outputName = ' u';
sys2.InputName = ' u';
sys2.outputName = ' y';
Sum = sumblk('e = r - y');

```

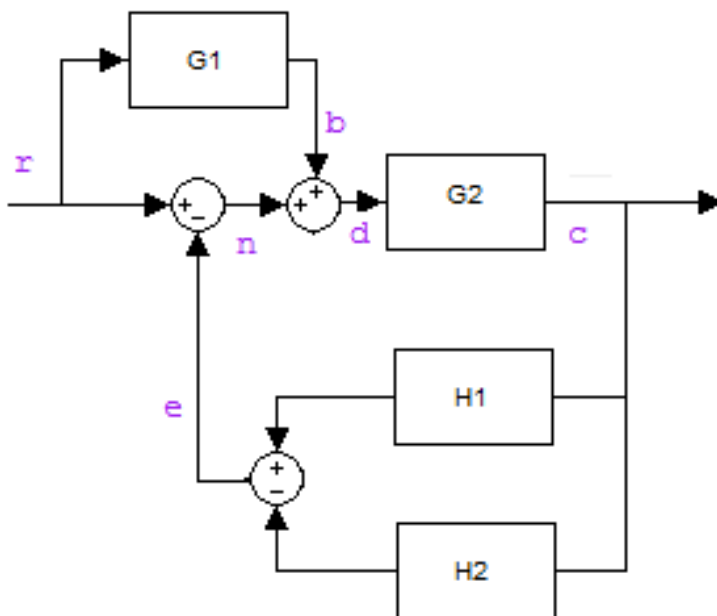


```
ClosedLoop=connect(sys1,sys2,Sum,'r','y')
sys3 = tf(ClosedLoop)
```

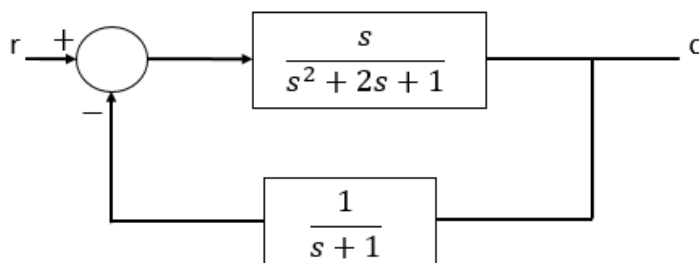
حالا برای سیستم زیر تابع تبدیل معادل را بدست آورید:

$$G1 = \frac{1}{s+1}, G2 = \frac{10}{s/10+1}$$

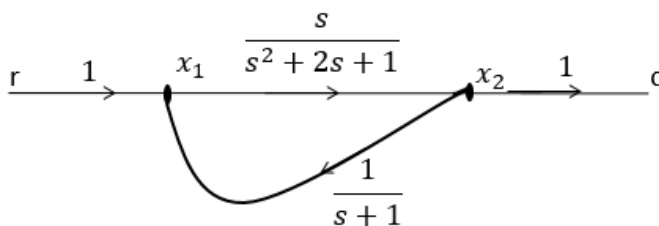
$$H1 = \frac{1}{s}, H2 = \frac{s}{s+3}$$



ه) یافتن مدار معادل با استفاده از قاعده میسون: سیستم زیر را در نظر بگیرید:



فلوگراف آن را رسم نمایید.



حالا این فلوگراف را به زبان متلب ۲۰۱۸ بیان می‌کنیم:

```
syms x1 x2 r s
```

---

```
S = solve (x1 - r - 1/(s + 1) * x2, x1 - s/(s^2 + 2 * s + 1) * x1);  
c = S.x2'  
pretty(c)
```

## آزمایش ۲: بررسی پاسخ سیستم‌های مرتبه اول

الف) تابع تبدیل حلقه بسته  $G(s) = \frac{4}{s+4}$  را در نظر گرفته، رابطه خروجی را به ورودی پله واحد در حوزه زمان بدست آورید.

ب) مقدار نهایی و ثابت زمانی پاسخ سیستم را بدست آورید.

ج) مدار را بصورت عملی بسته و نتایج فوق را مشاهده و اندازه‌گیری نمایید.

د) با در نظر گرفتن  $G(s) = \frac{k}{s+a}$ ، مقدار  $k$  و  $a$  را بگونه‌ای تعیین کنید که ثابت زمانی ۳ ثانیه و مقدار نهایی ۱/۵ باشد. پاسخ خود را بصورت عملی مشاهده کنید.

### آزمایش ۳: بررسی پاسخ سیستم‌های مرتبه دوم

الف) در تابع تبدیل حلقه بسته مرتبه دوم  $G(s) = \frac{b}{s^2 + as + b}$ ،  $a$  و  $b$  را بگونه‌ای بدست آورید که زمان نشست با معیار دو درصد ۴ ثانیه و پاسخ در حالت میرایی بحرانی قرار گیرد. مدار عملی را بسته و پاسخ را با نتایج مورد انتظار مقایسه کنید.

ب) مقادیر  $a$  و  $b$  را بگونه‌ای تغییر دهید که زمان نشست تغییر نکند ولی پاسخ فوق میرا ( $\xi = 1.1$ ) و زیرمیرا گردد. برای حالت فوق میرا و یک مقدار دلخواه از حالت زیرمیرا مقادیر پارامترهای  $M_p$ ،  $t_p$ ،  $t_s$  و  $t_r$  را بدست آورید و نتایج عملی آن‌ها را نیز تجربه کنید.

تذکره: بهتر است برای یافتن زمان نشست با معیار دو درصد پاسخ میرای بحرانی از رابطه  $\frac{5.83}{\xi \omega_n}$  و برای

سیستم فوق میرا از رابطه  $\frac{3.172}{\omega_n \sqrt{\xi^2 - 1}}$  استفاده کنید.

ج) برای بررسی اثر تغییر پارامتر میرایی  $\xi$  روی پاسخ پله سیستم حلقه بسته در حضور فرکانس طبیعی سیستم، مقدار  $\omega_n$  را ثابت برابر با ۳ در نظر بگیرید و مقدار  $\xi$  را از ۰ تا ۱ با گام ۰.۱ تغییر دهید و نمودار تابع تبدیل حلقه بسته متناظر زیر را با استفاده از متلب رسم نمایید. این نمودار در کتاب اگاتا و سایر کتاب‌های پایه‌ای کنترل موجود می‌باشد.

$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

برای هر بخش جدول زیر را کامل نموده، نتیجه‌گیری کنید.

$\xi$	$t_r$	$t_s$	$t_p$	$M_p$	$t_d$	$e_{ss}$

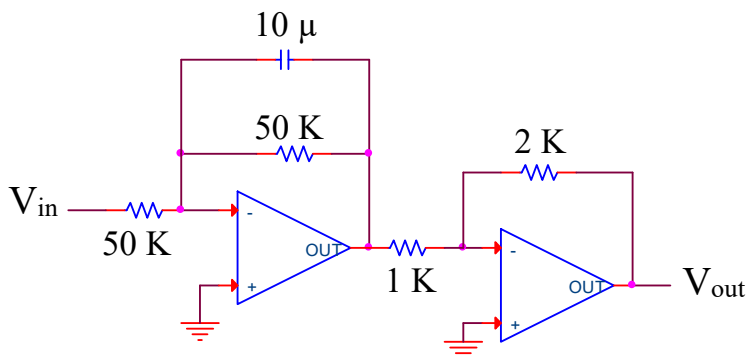
همچنین، با ثابت نگه‌داشتن مقدار  $\xi$  در حد 0.2 و تغییر مقدار  $\omega_n = [7, 15, 100]$  جدول زیر را تکمیل و نتایج را تحلیل نمایید.

$\omega_n$	$t_r$	$t_s$	$t_p$	$M_p$	$t_d$	$e_{ss}$

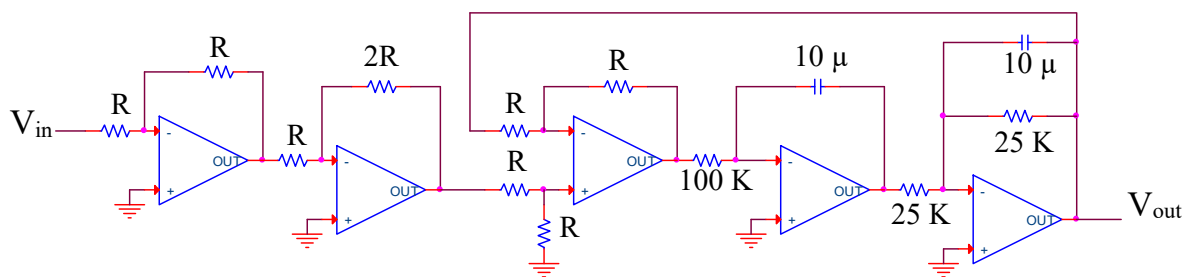
## آزمایش ۴: پاسخ سیستم‌های مختلف به ورودی پله

الف) مدارهای زیر را بسته، پاسخ پله آن‌ها را بصورت عملی مشاهده نمایید. تابع تبدیل خروجی به ورودی را برای هر کدام بدست آورید.

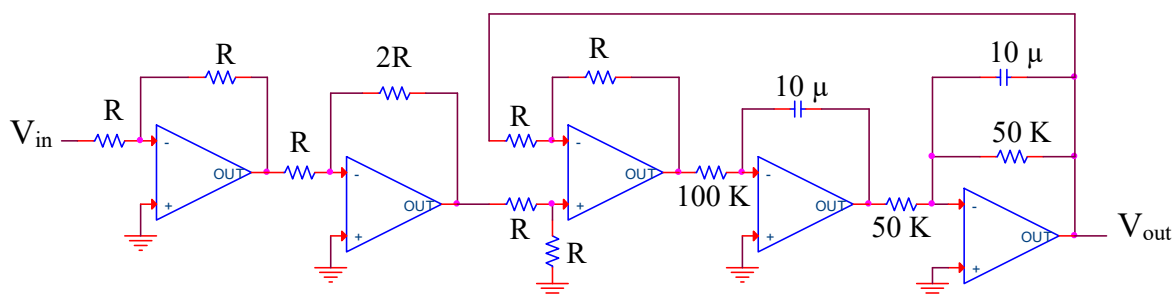
ب) تفاوت پاسخ این چهار سیستم در چیست و چگونه می‌توان از روی پاسخ پله، این سیستم‌ها را از هم تفکیک کرد؟



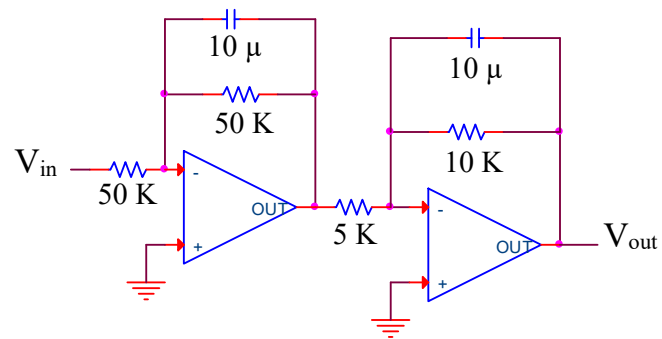
(۱)



(۲)



(۳)



(۴)

## آزمایش ۵: مکان هندسی ریشه‌ها

الف) سیستم زیر را در محیط متلب تعریف کنید و با استفاده از دستور rlocus مکان هندسی را رسم نمایید.

$$G(s)H(s) = \frac{s^2 + 2s + 4}{(s + 4)(s^2 + 1.4s + 1)(s + 6)}$$

ب) آیا سیستم پایدار است؟ با استفاده از دستور isstable پاسختان را بررسی نمایید.

ج) برای درجه‌بندی نمودار برای یک یا چند  $\zeta$  خاص و یا یک یا چند  $\omega_n$  خاص می‌توان از دستور ( $\omega_n$  نظر  $[\zeta]$ ,  $\zeta$  مورد نظر  $[\omega_n]$ ) استفاده نمود.

۱) قطب‌های حلقه بسته سیستم را به ازای  $\zeta = 0.7$  بیابید. برای این کار از دستور sgrid استفاده کنید.

۲) سپس با استفاده از دستور rlocfind این قطب‌های متناظر را بدست آورید. محل برخورد مکان هندسی با محور موهومی را نیز تعیین کنید.

د) تعامد مکان هندسی ریشه‌ها و مکان هندسی بهره ثابت را برای سیستم زیر نشان دهید (بهره ثابت را مقدار ۶ در نظر بگیرید):

$$G(s)H(s) = \frac{k(s^2 + 2s + 4)}{(s + 4)(s^2 + 1.4s + 1)(s + 6)}$$

ه) با استفاده از دستور pade تأخیری به اندازه 1.5 و با پنج جمله تعریف کرده و سیستم تاخیردار delay را تعریف کنید. سپس این میزان تأخیر را در سیستم اصلی وارده نموده و پاسخ پله سیستم بدون تأخیر و با تأخیر را بدست آورده و باهم از لحاظ مشخصات زمانی مقایسه نمایید و جدول زیر را تکمیل نمایید.

سیستم	$t_r$	$t_s$	$t_p$	$M_p$	$t_d$	$e_{ss}$
بدون تأخیر						
با تأخیر						

سپس، مکان هندسی هر دو سیستم را بدست آورده و مقایسه کنید.

و) سیستم ساده زیر را تعریف کنید.

$$sys = \frac{1}{(s + 1)}$$



- (۱) به این سیستم یک قطب  $s + 2$  اضافه کنید. مکان هندسی چه تغییری می‌کند؟
- (۲) حالا به سیستم حاصل یک قطب دیگر در  $s + 3$  اضافه کنید. مکان هندسی چه تغییری می‌کند؟
- (۳) حالا به سیستم حاصل یک صفر در  $s + 5$  اضافه کنید. مکان هندسی چه تغییری می‌کند؟
- (۴) حالا در سیستم حاصل محل صفر را به  $s + 2.5$  تغییر دهید. مکان هندسی چه تغییری می‌کند؟
- (۵) سپس در سیستم حاصل محل صفر را به  $s + 1.5$  تغییر دهید. مکان هندسی چه تغییری می‌کند؟
- (۶) چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟
- (۷) مکان هندسی دو سیستم زیر را بدست آورید و نتیجه را توجیه کنید.

$$sys1 = \frac{-2s+1}{3s^2+s}, \quad sys2 = \frac{2s-1}{3s^2+s}$$

## آزمایش ۶: پاسخ فرکانسی

منظور از پاسخ فرکانسی، پاسخ حالت ماندگار سیستم به ورودی سینوسی است.

الف) سیستم زیر را در محیط متلب تعریف کنید.

$$sys = \frac{5(s + 1)}{s(1 + 0.5s)(1 + \frac{0.6}{50}s + (\frac{s}{50})^2)}$$

تذکر: نمودار بود، دامنه و زاویه فاز پاسخ فرکانسی را رسم می‌کند. اگر دستور bode بدون آرگومان سمت چپ به متلب داده شود نمودار بود رسم می‌شود و روی نمودار هر جا کلیک کنید فرکانس و زاویه را می‌دهد.

bode(sys)

۱) روی نمودار کلیک راست کنید و با استفاده از تب Characteristics/All Stability Margins حد فاز و حد بهره را بدست آورید.

۲) با استفاده از دستور زیر دوباره حد فاز و حد بهره را بدست آورید؟

$$[Gm, Pm, wg, wc] = margin(sys)$$

تذکر: حد بهره‌ها باهم متفاوت‌اند. زیرا دستور bode حد بهره را به صورت دسی‌بل می‌دهد. با استفاده از دستور زیر می‌توان حد بهره  $Gm$  را دسی‌بل نمود.

$$Gmdb = mag2db(Gm)$$

۳) حالا سیستم مرتبه دوم با  $\omega_n = 2$  و تغییرات  $\xi$  از 0.1 تا 1 با گام 0.1 رسم کنید تا یک شکل استاندارد کتاب اوگاتا را بدست آورید.

۴) تأخیری به‌اندازه 1.5 تا پنج جمله به سیستم اعمال نموده و نمودار بود سیستم تأخیردار را رسم نموده و با سیستم بدون تأخیر مقایسه کنید. حد فاز و حد بهره را بدست آورید.

ب) نمودار نایکوئیست نمودار دامنه برحسب فاز در مختصات قطبی است. دستور `nyquist` بدون آرگومان سمت چپ، نمودار نایکوئیست سیستم را روی صفحه رسم می‌کند.

`nyquist(sys)`

۱) نایکوئیست سیستم بالا را در متلب رسم کنید و پایداری سیستم حلقه بسته را با روش نایکوئیست بررسی کنید. آیا سیستم پایدار است؟ پاسخ خودتان را با دستور `isstable` تأیید کنید.

۲) برای سیستم‌های زیر نایکوئیست را رسم کنید و نتایج را تحلیل کنید.

$$\text{sys1} = \frac{2(s + 2)}{s^2 + 2s + 7}$$

$$\text{sys1} = \frac{2(s - 2)}{s^2 + 2s + 7}$$

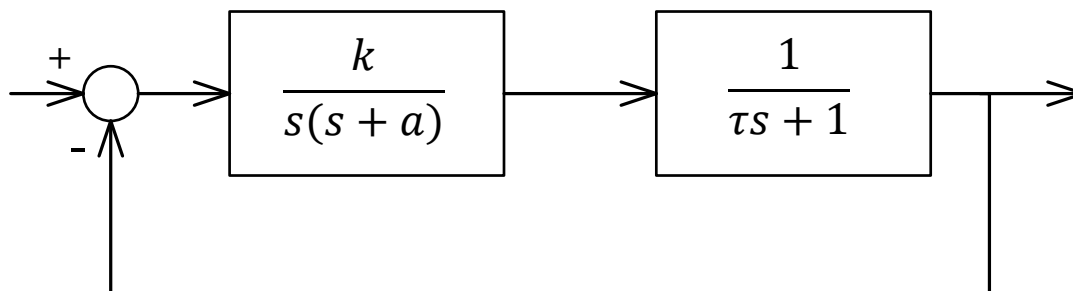
ج) نمودار نیکولز نمودار لگاریتم دامنه برحسب فاز می‌باشد. دستور `nichols` بدون آرگومان سمت چپ نمودار نیکولز سیستم را روی صفحه رسم می‌کند.

`nichols(sys)`

د) برای یافتن پاسخ فرکانسی در یک فرکانس خاص از دستور `evalfr` می‌توان استفاده نمود. برای یافتن پاسخ فرکانسی در چند فرکانس مختلف می‌توان از دستور `freqresp` به‌صورت زیر استفاده نمود:

$$H = \text{freqresp}(\text{sys}, w)$$

## آزمایش ۷: اثر افزودن قطب به سیستم حلقه باز



الف) در سیستم فوق با فرض  $\tau = 0$ ،  $a$  و  $k$  را بگونه‌ای بدست آورید که پاسخ سیستم حلقه بسته دارای فراجهش ۲۰٪ و زمان نشست با معیار دو درصد ۴ ثانیه باشد ( $k > 0$ ).

ب) مدار عملی را بسته و نحوه عملکرد مدار را با نتایج تئوری مقایسه کنید.

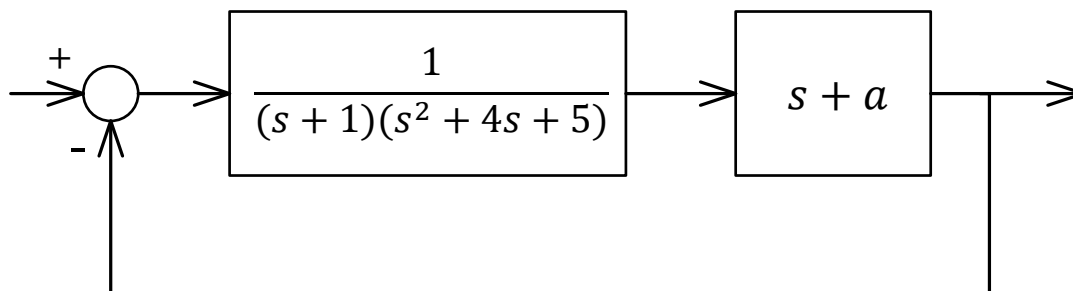
ج) با فرض  $\tau \neq 0$ ، بازای مقادیر  $a$  و  $k$  بدست آمده در (الف)، محدوده  $\tau$  را برای پایداری سیستم حلقه بسته بدست آورید.

د) برای  $\tau = 0.1$ ،  $\tau = 0.5$ ،  $\tau = 1$  و  $\tau = 5$  پاسخ پله سیستم حلقه بسته را بصورت عملی با هم مقایسه کنید و اثر افزودن قطب به سیستم حلقه باز و تغییرات  $\tau$  را بررسی و دلایل آن را بیان کنید.

ه) با رسم مکان هندسی، اثر افزودن و تغییر مکان قطب حلقه باز را بر روی مکان هندسی سیستم بررسی کنید.

تذکره: جهت رسم درست پاسخ پله در متلب، به ویژه در حالت ناپایدار، بهتر است زمان نمونه برداری کوچکتر از حالت پیش فرض دستور step در نظر گرفته شود.

## آزمایش ۸: اثر افزودن صفر به سیستم حلقه باز



الف) با فرض  $a \neq 0$ ، محدوده  $a$  را برای پایداری سیستم حلقه بسته بدست آورید.

ب) پاسخ پله را برای مقادیر مختلف  $a = 0.2$ ،  $a = 0.5$ ،  $a = 5$ ،  $a = 10$  و  $a = 20$  بصورت عملی با هم مقایسه کنید و اثر افزودن صفر به سیستم حلقه باز و تغییرات  $a$  را بررسی و دلایل آن را بیان کنید.

ج) مدار فوق را در نظر گرفته و با رسم مکان هندسی سیستم بدون افزودن صفر و پس از آن، اثر افزودن و تغییر مکان صفر حلقه باز  $s = -a$  را بر روی مکان هندسی سیستم بررسی کنید.

تذکره: در این آزمایش، دامنه سیگنال پله ورودی را برابر ۵ ولت در نظر بگیرید.

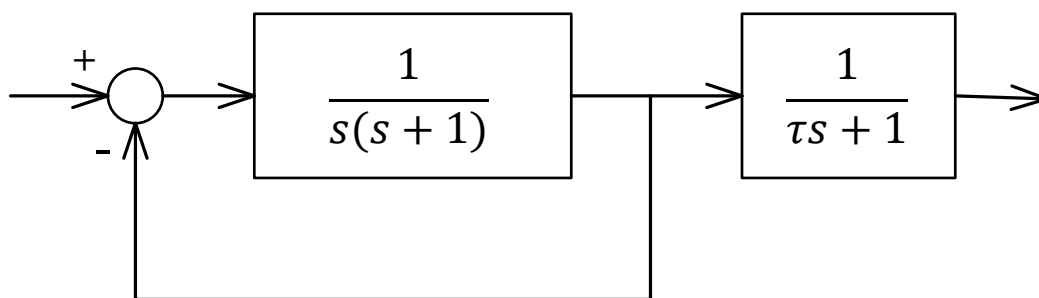
## آزمایش ۹: اثر افزودن صفر و قطب به سیستم حلقه بسته

اثر افزودن قطب به سیستم حلقه بسته:

سیستم زیر را در نظر گرفته و اثر افزودن قطب به سیستم حلقه بسته را در پاسخ پله سیستم مورد بررسی

قرار دهید. بدین منظور رفتار سیستم را برای  $\tau = 0$ ,  $\tau = 0.2$ ,  $\tau = 0.5$ ,  $\tau = 2$ , و  $\tau = 5$

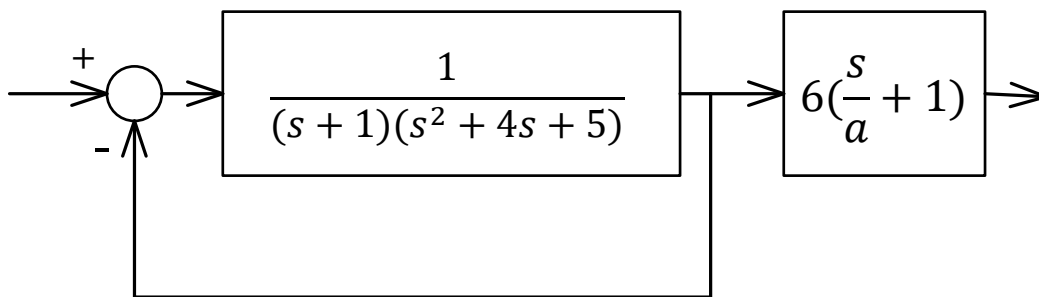
تحلیل و نتایج تئوری خود را با نتایج عملی مقایسه کنید.



اثر افزودن صفر به سیستم حلقه بسته:

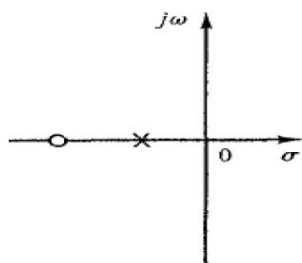
برای سیستم شکل زیر، اثر افزودن صفر را مورد بررسی قرار دهید. بدین منظور پاسخ پله سیستم را برای

$a = 0.2$ ,  $a = 0.5$ ,  $a = 1.5$  و  $a = 10$  تحلیل و نتایج تئوری را با نتایج عملی مقایسه کنید.

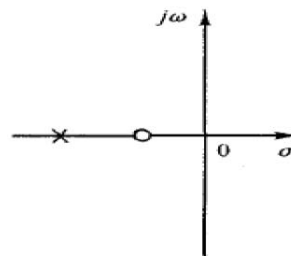


## آزمایش ۱۰: طراحی جبران‌ساز به روش مکان هندسی ۱

اساس طراحی به روش مکان هندسی ریشه‌ها، افزودن قطب و صفر به تابع تبدیل حلقه باز است به نحوی که مکان هندسی ریشه‌ها تغییر کرده و از محل قطب‌های حلقه بسته مطلوب بگذرد. ویژگی طراحی به روش مکان هندسی ریشه‌ها این است که این رهیافت بر این فرض مبتنی است که سیستم حلقه بسته یک زوج قطب حلقه بسته‌ی غالب دارد.



شکل ۲. آرایش صفر و قطب برای جبران‌ساز پس‌فاز



شکل ۱. آرایش صفر و قطب برای جبران‌ساز پیش‌فاز

الف) تابع تبدیل زیر را تعریف کنید

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 0.8s}$$

سپس دستور نمایش ابزار sisotool را اجرا کنید:

sisotool(G)

زمان نشست سیستم چقدر است؟

می‌خواهیم جبران‌سازی طراحی کنیم که زمان نشست سیستم را به کمتر از ۴ ثانیه برسد. بر روی مکان هندسی کلیک راست کرده و از قسمت Design Requirement بر روی new کلیک می‌کنیم و محدودیت زمان نشست را اعمال می‌کنیم. برای اینکه زمان نشست کمتر از ۴ ثانیه شود، می‌بایست قطب‌های حلقه بسته سیستم (مربعات صورتی رنگ) از قسمت زرد رنگ خارج شوند. بدین منظور یک صفر حقیقی اضافه می‌کنیم که باعث می‌شود سیستم ناسره شود، پس یک قطب نیز در مکان‌های دورتر از صفر نسبت به محور موهومی اضافه می‌کنیم. اکنون با جابه‌جایی قطب‌های حلقه بسته آن‌ها را از قسمت زرد رنگ خارج می‌کنیم. پاسخ پله را نیز بررسی می‌کنیم تا ببینیم زمان نشست کمتر از ۴ ثانیه شده است.

ب) فرایند فوق را برای درصد فراجهدش کمتر از ۱۵٪ تکرار کنید.

ج) همین فرایند را برای سیستم

$$G(s) = \frac{1}{s(s+4)(s+7)}$$

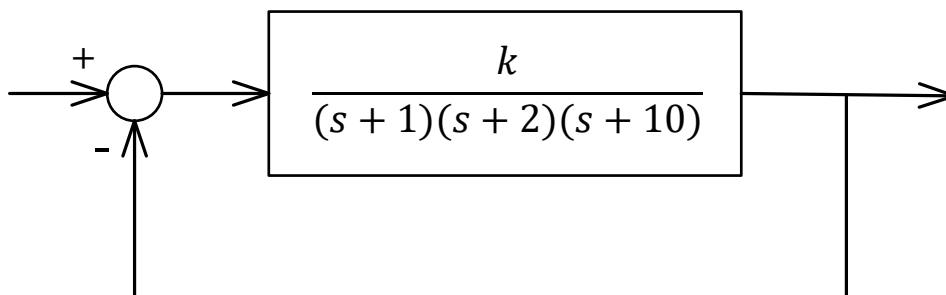
با محدودیت‌های  $Mp < 20\%$  ,  $t_s < 2$  تکرار نمایید و جبران‌ساز را مشخص کنید.

د) جبران‌ساز پس فازی برای سیستم بالا طراحی کنید که خطای ماندگار نسبت به شیب برابر با 0.1 باشد.



## آزمایش ۱۱: طراحی جبرانساز به روش مکان هندسی ۲

الف) مکان هندسی ریشه‌های سیستم حلقه بسته زیر را رسم کنید ( $k > 0$ ).



ب) در سیستم فوق  $k$  را ۱) با استفاده از مکان هندسی رسم شده در متلب ۲) به روش محاسباتی؛

بگونه‌ای پیدا کنید که پاسخ پله سیستم دارای فراجش  $\% ۱۶/۳$  باشد.

ج) بازای  $k$  بدست آمده پاسخ پله را بصورت عملی و تئوری بدست آورید.

د) با استفاده از طراحی جبرانساز، پاسخ سیستم حلقه بسته را بگونه‌ای تغییر دهید که زمان نشست و

میزان فراجش  $\% ۵۰$  کاهش یابد.

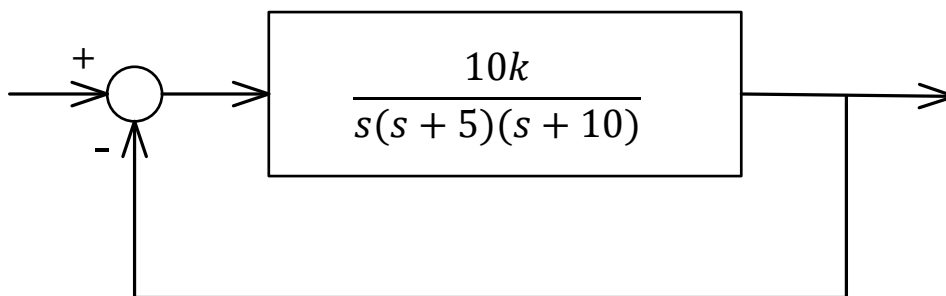
ه) پاسخ سیستم جبران شده را بصورت عملی مشاهده کنید.

تذکر: در ب-۱ می‌توانید پس از رسم مکان هندسی در متلب، از منوی Tools گزینه Data Cursor

استفاده کرده، نقطه با بهره مورد نظر را بصورت تقریبی بر روی شکل بیابید.

## آزمایش ۱۲: بررسی پاسخ فرکانسی و طراحی جبران‌ساز در حوزه فرکانس

سیستم زیر را در نظر بگیرید.



الف) مقدار بهره را بگونه‌ای انتخاب نمایید که فرکانس گذر از صفر  $20 \text{ rad/sec}$  باشد.

ب) حد فاز و حد بهره را محاسبه کنید و آن را با نتایج شبیه‌سازی (بود و ناپکوئیست) مقایسه کنید.

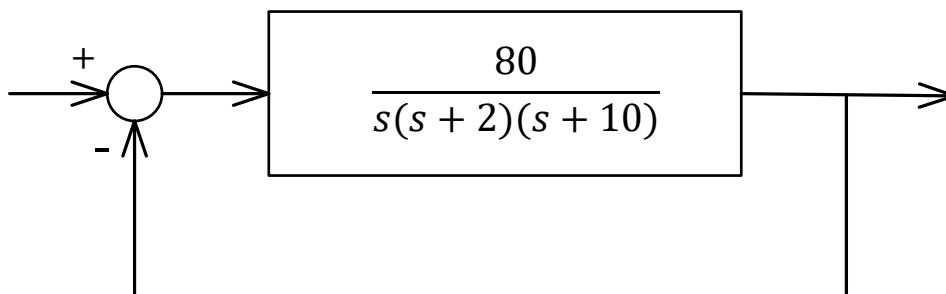
ج) پاسخ پله را بصورت تئوری و عملی بدست آورید.

د) جبران‌سازی طراحی نمایید که حد فاز به  $50^\circ$  برسد. سپس بخش‌های ب و ج را برای سیستم جبران‌سازی

شده تکرار نمایید.

## آزمایش ۱۳: طراحی کنترلر PD

سیستم زیر را در نظر بگیرید.



الف) اگر برای سیستم فوق از یک کنترلر P استفاده کنیم،

- ۱) اثر افزودن این کنترلر به سیستم چیست؟
- ۲) تغییرات P چه تاثیری روی پاسخ حلقه بسته دارد؟
- (تاثیر افزودن و تغییر هر یک از کنترلرهای I و D را نیز بصورت مجزا بررسی کنید.)
- ۳) محدوده P برای پایداری را بدست آورید و با توجه به این محدوده، مشخص کنید بازای چه مقدار این پارامتر کمترین زمان صعود حاصل می‌شود.
- ۴) بازای کدام مقدار P با توجه به محدوده پایداری، پاسخ پله سیستم بیشترین فراجهش را دارد؟
- ۵) پاسخ پله را با مقادیر مختلف P در محدوده پایداری بصورت تئوری و عملی مشاهده نمایید و درستی نتایج ۳ و ۴ را نشان دهید.

ب) اگر در سیستم فوق به جای P از PD استفاده کنیم،

- ۱) اثر افزودن این کنترلر به سیستم چیست؟
- ۲)  $k_p$  و  $k_d$  را بگونه‌ای انتخاب کنید که پاسخ سیستم دارای فراجهش ۲۰٪ و زمان نشست ۴ ثانیه گردد (به دو روش طراحی دستی و نیز استفاده از رابط pidtool متلب).

---

۳) با فرض  $k_p$  ثابت طراحی شده، اثر تغییرات  $k_d$  را در بازه 0.2 تا 4 برابر مقدار بدست آمده آن در

ب-۲، بر روی پاسخ بدست آورید.

۴) با فرض  $k_d$  ثابت طراحی شده، اثر تغییرات  $k_p$  را در بازه 0.2 تا 4 برابر مقدار بدست آمده آن در

ب-۲، بر روی پاسخ بدست آورید.

ج) تمامی مراحل فوق را بصورت مدار عملی بسته و نتایج را بررسی کنید.

## آزمایش ۱۴: طراحی جبران‌ساز پیش‌فاز-پس‌فاز و کنترلر PID

برای سیستم زیر



الف) با فرض  $G(s) = \frac{0.2}{s(s+1)}$  جبران‌ساز پیش‌فاز-پس‌فازی طراحی نمایید که با در نظر گرفتن ورودی پله واحد، زمان نشست ۴ ثانیه و فراجهش پاسخ برابر ۲۵٪ باشد و خطای پاسخ سیستم بازای ورودی شیب واحد برابر ۰/۲ باشد. طراحی را به دو روش زیر انجام دهید:

۱) صفر جبران‌ساز پیش‌فاز را روی قطب سیستم  $s = -1$  قرار داده، جبران‌ساز پیش‌فاز-پس‌فاز را طراحی و نتایج را تحلیل کنید. ایراد قرارگیری صفر جبران‌ساز بر روی قطب سیستم چیست؟

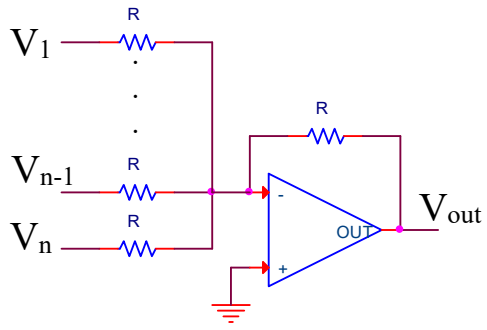
۲) مجدداً جبران‌ساز را بدون قرارگیری صفر پیش‌فاز در  $s = -1$  و به روش نیمساز طراحی کنید.

ب) با فرض  $G(s) = \frac{30}{(s+2)(s+4)(s+5)}$  به روش زیگلر-نیکولز یک کنترلر PID برای سیستم طراحی کرده، پاسخ پله را مشاهده نمایید.

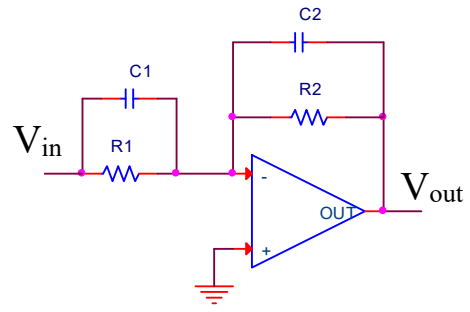
ج) مراحل الف و ب را بصورت عملی بسته، با نتایج شبیه‌سازی بخش مربوطه مقایسه کنید.

(راهنمایی: بصورت کلی برای هر یک از جبران‌سازهای پیش‌فاز یا پس‌فاز می‌توانید از مدار ۱ بصورت شکل

زیر نیز استفاده کنید. همچنین جهت جمع سیگنال‌های مختلف می‌توان از مدار ۲ استفاده نمود.)



(۲)



(۱)

## ضمیمه ۱: مقدمه‌ای از نصب و تحلیل ارکد

ارکد نرم افزار تحلیلی بسیار قدرتمندی است که نتایج حاصل از تحلیل مدارهای شبیه سازی شده با آن، به نتایج سیستم عملی بسیار نزدیک هستند و به همین دلیل از آن در طراحی‌های مهندسی بصورت گسترده استفاده می‌شود. در این بخش ابتدا نحوه نصب و سپس محیط این نرم افزار بصورت اجمالی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تذکر: توجه کنید که نحوه نصب و نیز نحوه اجرای برنامه توضیح داده شده در این بخش مربوط به ورژن 16.5 ارکد می‌باشد و برای ورژن‌های دیگر، لازم است از دستورالعمل مربوط به آن‌ها پیروی کنید.

### نصب نرم افزار ارکد:

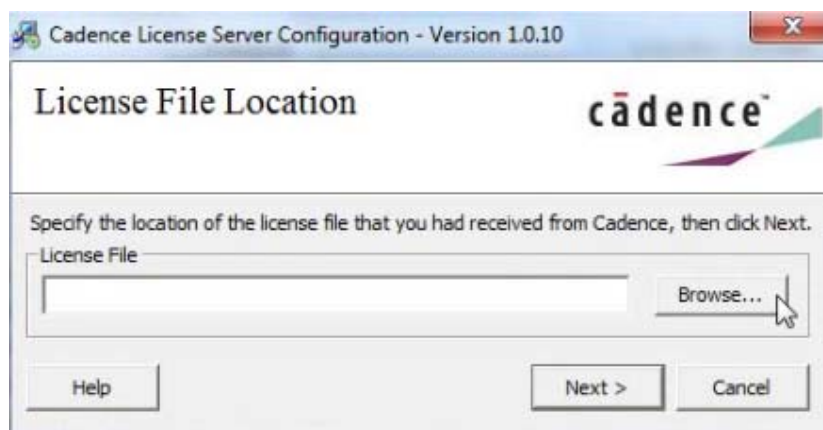
۱) با اجرای فایل autorun پنجره زیر ظاهر خواهد شد.



بر روی گزینه آموزش نصب OrCAD 16.5 کلیک کنید تا پنجره زیر باز شود.

Name	Date modified	Type	Size
Win 7	7/16/2011 12:25 PM	File folder	
Win XP	7/16/2011 12:25 PM	File folder	
www.jordan-soft.com	12/11/2008 1:32 PM	Text Document	1 KB

با توجه به سیستم عامل مورد استفاده پوشه مربوط را باز کنید. توجه کنید که نحوه نصب ارکد برای ویندوزهای ۷، ۸ و ۱۰ یکسان است. در پوشه مربوطه فایل تصویری آموزش گام به گام نصب نرم افزار موجود است. حداقل امکان مسیر نصب فایل را تغییر ندهید. دقت کنید که در مراحل ابتدایی نصب، در صورت ظاهر شدن پنجره License بصورت شکل زیر، آن را تا انتهای نصب نبندید. در غیر اینصورت ممکن است برخی امکانات ارکد بصورت محدود فعال شوند.



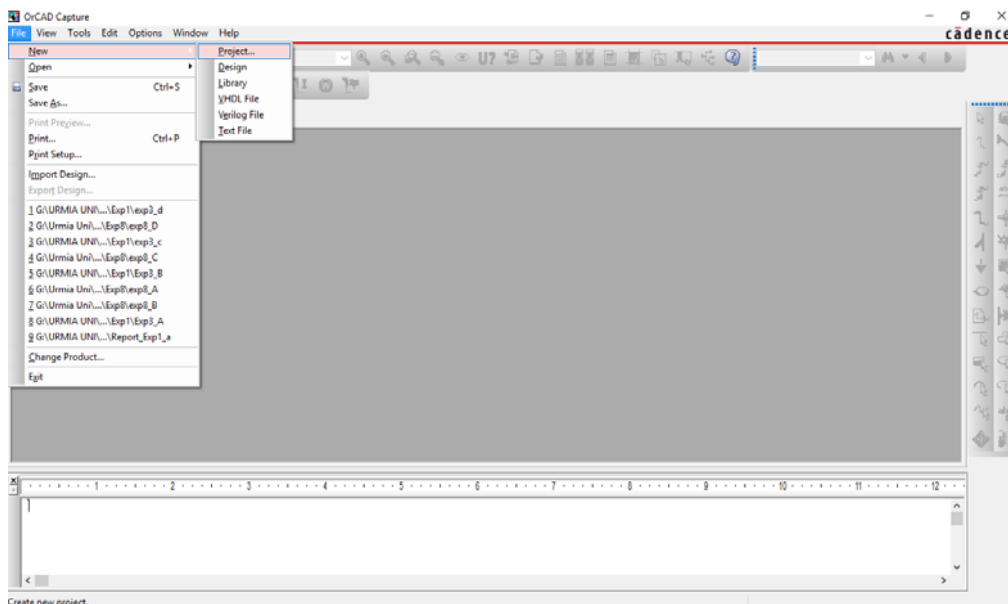
همچنین در صورت مواجه شدن با پیغام نصب Microsoft .Net framework آن را نادیده گرفته و گزینه skip را بزنید. در انتها فایل OrCAD Capture را اجرا نمایید. شبیه سازی‌ها در این محیط انجام خواهند شد.

**شبیه سازی مدار در محیط کار نرم افزار ارکد:**

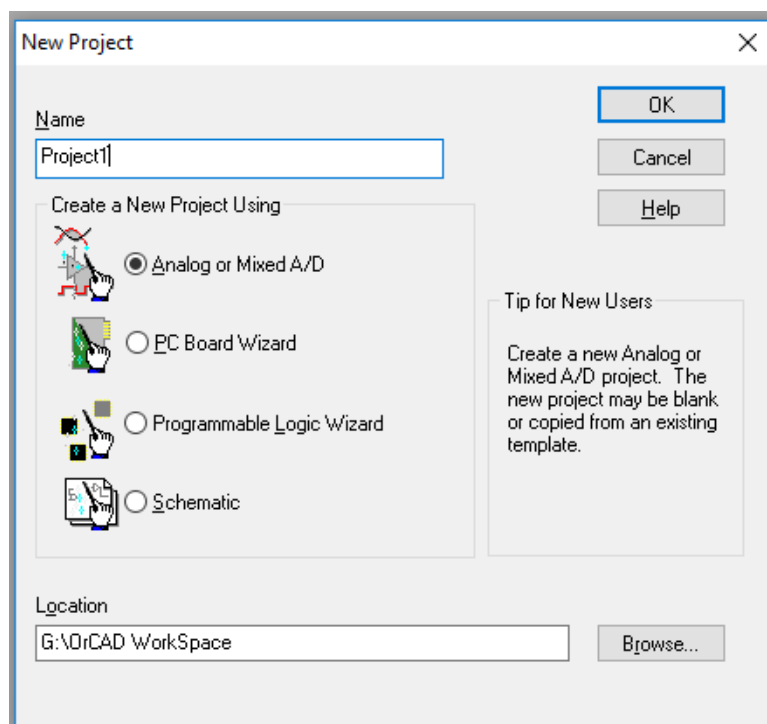
(۱) ایجاد پروژه جدید:



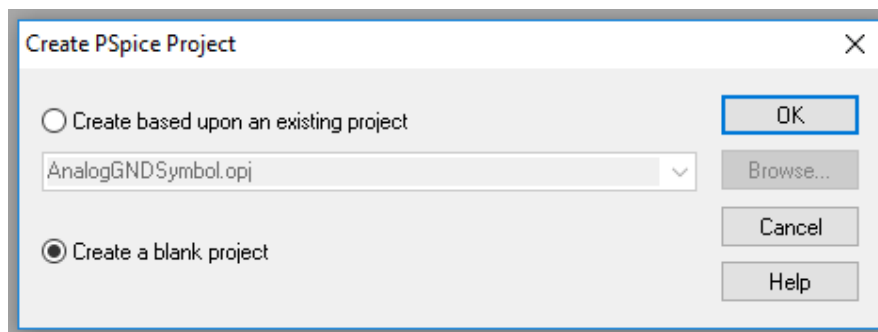
پس از اجرای فایل OrCAD Capture و باز شدن محیط شبیه سازی، از منوی فایل، گزینه New/Project را مطابق شکل زیر انتخاب کنید.



مطابق شکل زیر در پنجره ظاهر شده نام و آدرس فایل‌ای که قصد ایجاد آن را دارید وارد کنید. توجه کنید که گزینه Analog or Mixed A/D انتخاب شده باشد.

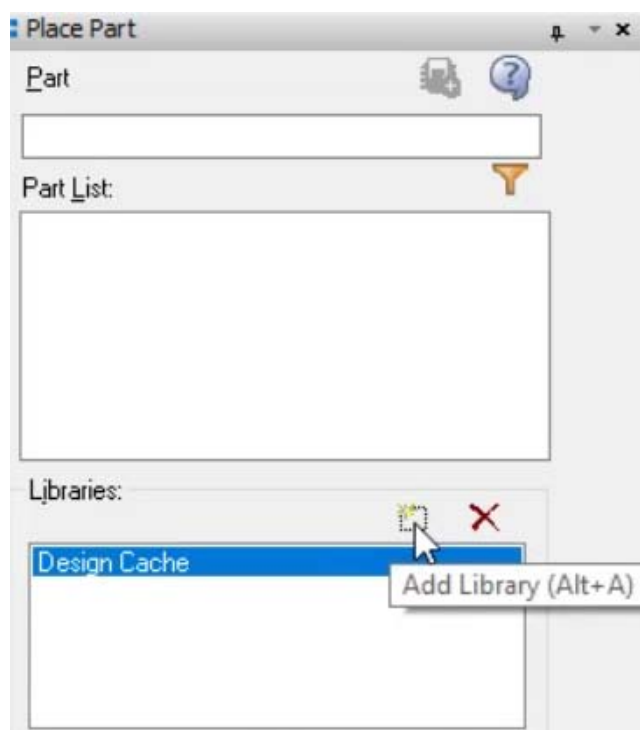


پس از تایید نام و آدرس در پنجره‌ای که به شکل زیر ظاهر می‌شود گزینه Create a blank project را انتخاب کنید.



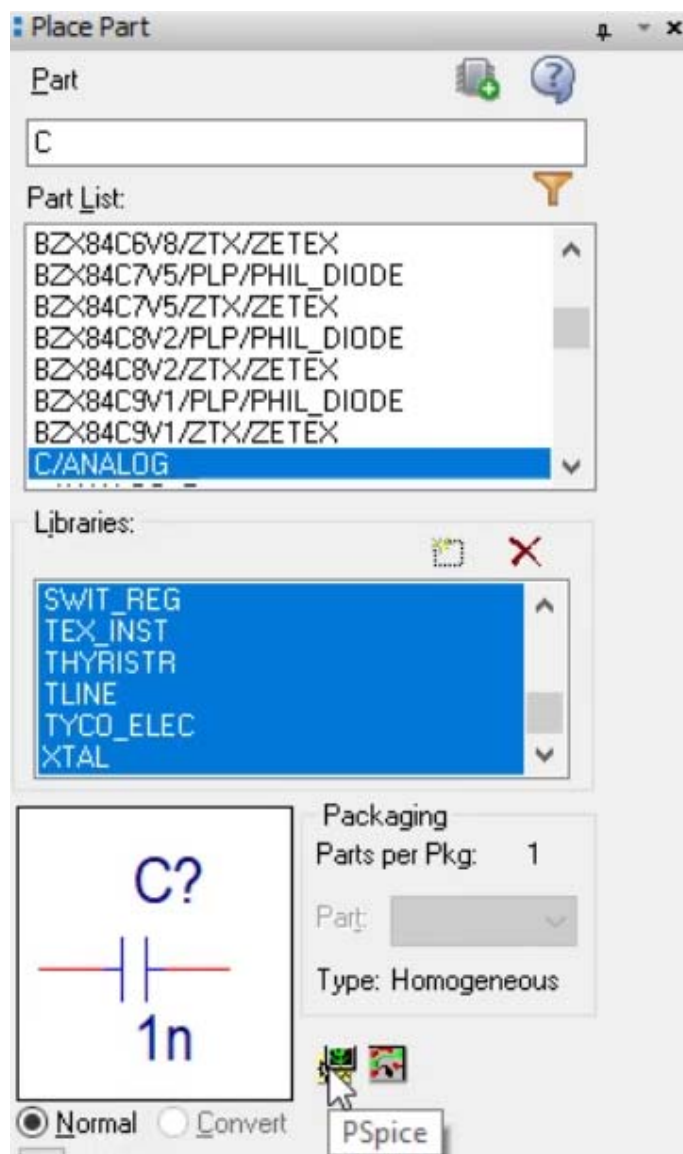
(۲) افزودن کتابخانه‌ها:

پیش از شروع شبیه سازی لازم است کتابخانه‌های مختلف به نرم افزار اضافه شوند. به این منظور از منوی Place گزینه Part و یا آیکون Place Part در نوار ابزار سمت راست صفحه را انتخاب کنید تا پنجره Place Part بصورت شکل زیر در سمت راست صفحه باز شود.



در این پنجره بر روی گزینه Add Library کلیک کنید و از مسیر نصب فایل، کلیه کتابخانه‌های موجود در پوشه pspice را با کلیدهای ctrl+A انتخاب و اضافه نمایید. در صورت عدم تغییر مسیر نصب و انتخاب درایو C، مسیر پوشه مورد نظر بصورت زیر خواهد بود:

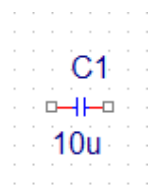
C:\Cadence\SPB\_16.5\tools\capture\library\pspice



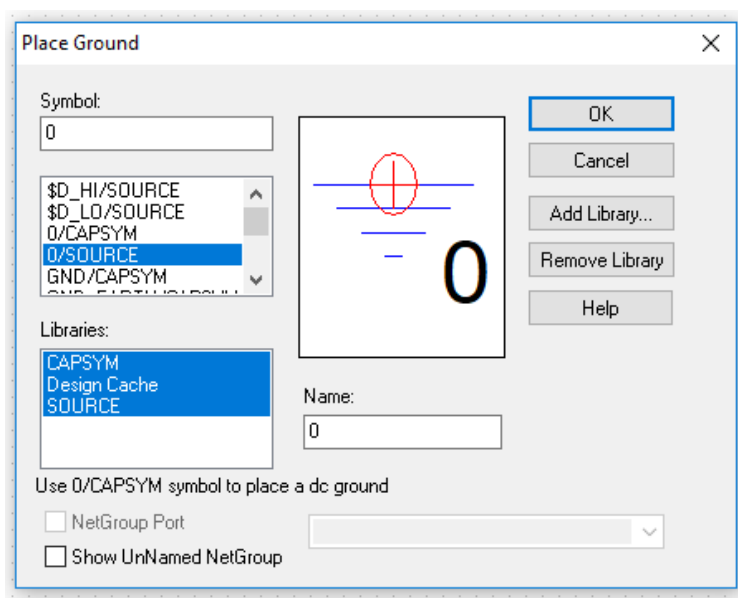
۳) اضافه کردن المان‌ها به مدار:

جهت اضافه کردن المان‌ها به محیط شبیه‌سازی، کافی است هر کدام از آن‌ها را در پنجره Part شکل فوق جستجو کنید تا لیستی از المان‌های مرتبط در پنجره Part List ظاهر شود. به عنوان مثال مطابق شکل فوق، برای جستجوی خازن کاپیست کلمه C را در پنجره Part وارد نمایید و از لیست، المان مورد نظر را انتخاب و با دبل کلیک آن را به محیط شبیه‌سازی اضافه نمایید.

تذکر: هنگام انتخاب هر یک از قطعات مدار توجه داشته باشید که گزینه PSpice مطابق شکل فوق در کنار نماد المان موجود باشد. در غیر اینصورت هنگام شبیه‌سازی با خطا مواجه خواهید شد.

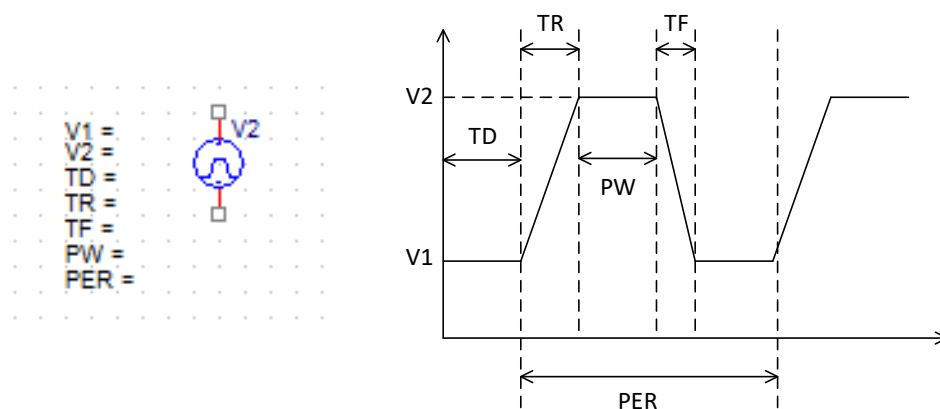


بصورت مشابه برای یافتن منبع ولتاژ مستقیم، مقاومت و آپ‌امپ کافی است به ترتیب Vdc، R و LM324 را جستجو کنید و با دبل کلیک بر روی المان مورد نظر در Part List آن را به محیط شبیه‌سازی اضافه کنید. مقادیر هر المان را می‌توان پس از افزودن آن به محیط شبیه‌سازی با دبل کلیک بر روی مقدار تغییر داد. به عنوان مثال شکل فوق یک خازن ۱۰ میکروفاراد را نمایش می‌دهد.




در تمامی تحلیل‌ها نیاز است که المان زمین را به مدار اضافه کنیم. برای این کار از منوی Place گزینه Ground را انتخاب نمایید و یا بر روی آیکن Place ground از نوار ابزار سمت راست کلیک کنید. سپس از پنجره ظاهر شده بصورت شکل فوق المان SOURCE/0 را به مدار اضافه کنید.

یکی دیگر از المان‌هایی که در شبیه سازی مدارها به آن نیاز خواهید داشت، منبع تولید کننده شکل موج مربعی است که از آن می‌توان به عنوان ورودی پله استفاده نمود. می‌توانید این المان را با جستجوی عبارت Vpulse در کتابخانه بیابید. شکل زیر این منبع را به همراه پارامترهای آن نشان می‌دهد. با دبل کلیک بر روی هر یک از پارامترها می‌توانید آن را مقداردهی عددی نمایید.

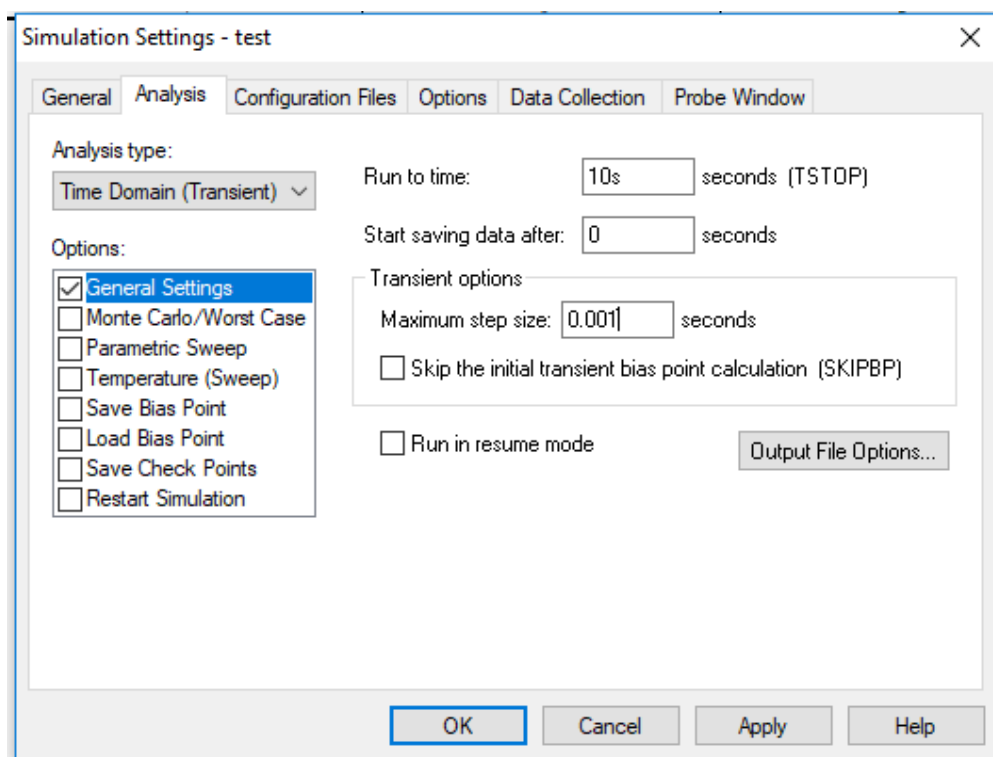


(۴) سیم بندی مدار:

پس از افزودن المان‌ها به مدار از طریق منوی Place گزینه Wire و یا با انتخاب آیکن Place wire از نوار ابزار سمت راست می‌توان سیم بندی مدار را انجام داد. توجه کنید که اگر در هنگام سیم بندی علامت  ظاهر شد، خطایی در سیم بندی آن نقطه در حال رخ دادن است و در صورت عدم اصلاح، شبیه سازی به درستی اجرا نخواهد شد.




(۵) ایجاد پروفایل شبیه سازی:

برای اجرای برنامه و مشاهده خروجی، ابتدا لازم است که یک پروفایل شبیه سازی ایجاد کنید. به این منظور از منوی PSpice گزینه New Simulation Profile را انتخاب و یا بر روی آیکون New Simulation Profile در نوار ابزار بالای صفحه کلیک کنید. در پنجره ظاهر شده نامی برای پروفایل شبیه سازی انتخاب کرده، گزینه Create را بزنید. در صورت ظاهر شدن پنجره Cadence Product Choice گزینه PSpice A/D را انتخاب کنید. در نهایت پنجره زیر ظاهر خواهد شد. در این پنجره زمان اجرا و زمان نمونه برداری را وارد نمایید. به عنوان مثال در شکل زیر زمان اجرا ۱۰ ثانیه و زمان نمونه برداری ۰/۰۰۱ ثانیه است.

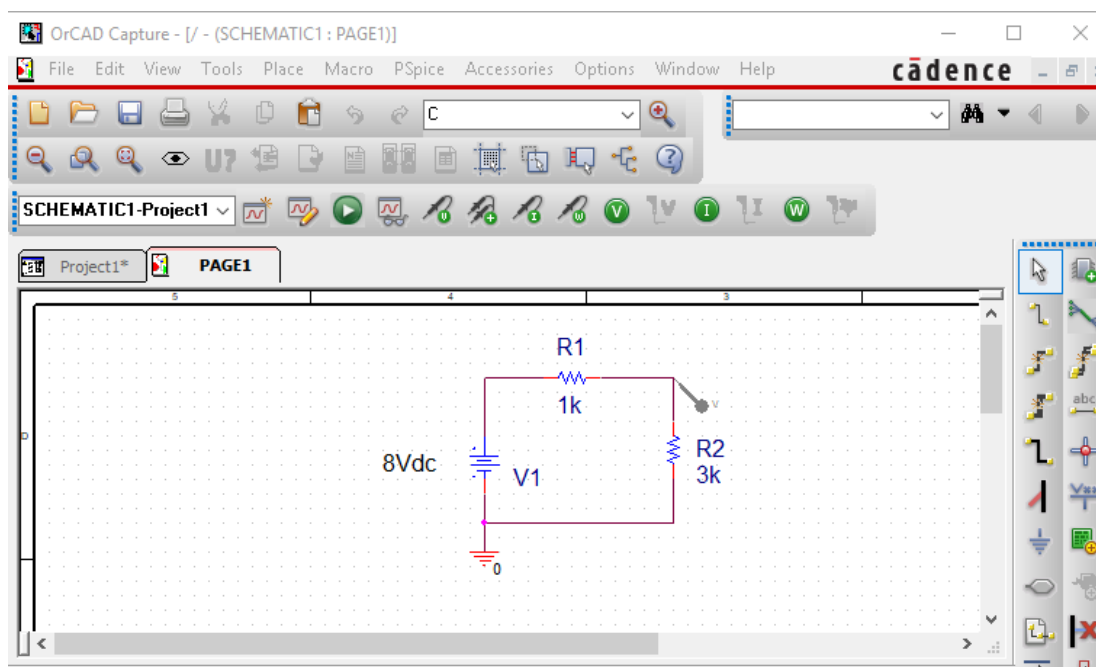


(د) مشاهده خروجی:

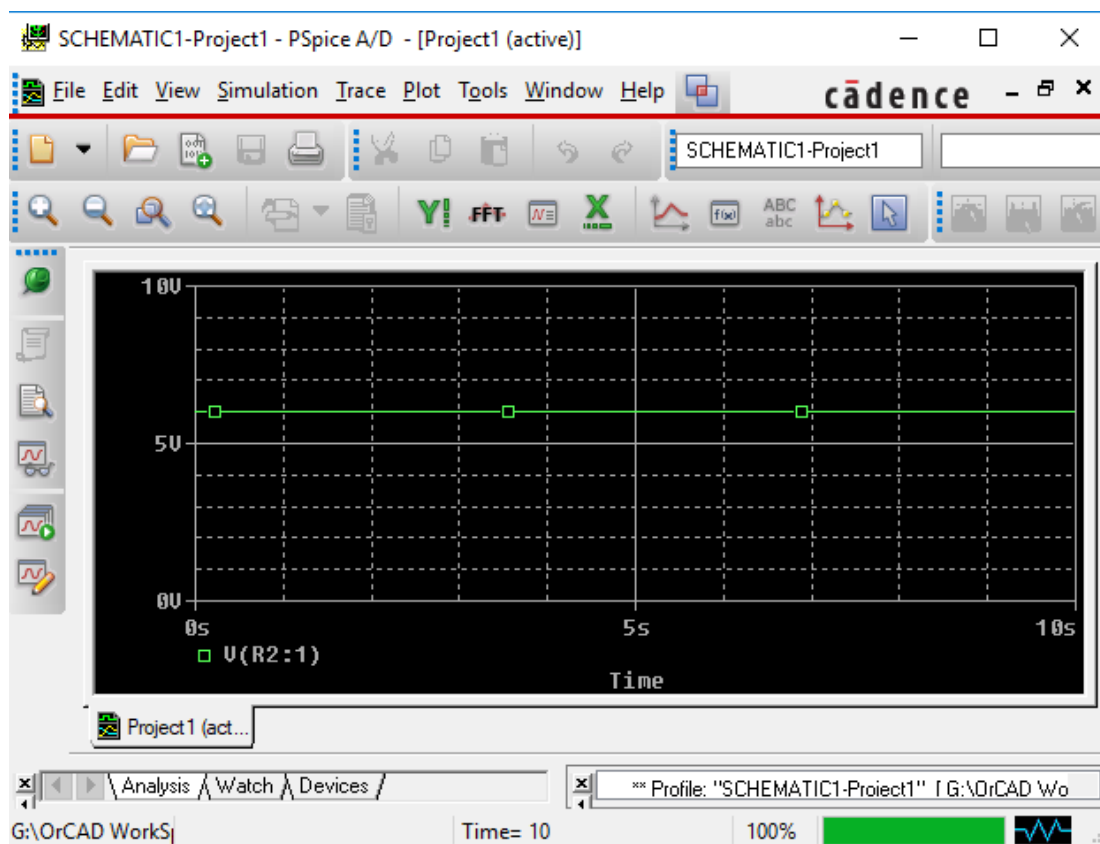
گزینه‌های لازم جهت مشاهده خروجی مدار بصورت عددی یا به شکل منحنی، در نوار ابزار بالای صفحه یا از طریق منوی PSpice گزینه Markers در دسترس هستند. جدول زیر کاربرد هر یک از این آیکون‌ها را نمایش می‌دهد.

					آیکون
اجرای برنامه	نمودار جریان شاخه متصل	نمودار ولتاژ گره متصل	مقدار عددی جریان شاخه‌ها	مقدار عددی ولتاژ شاخه‌ها	عملکرد

برای آشنایی با اجرای برنامه، فرض کنید یک مدار ساده تقسیم ولتاژ به شکل زیر داریم و قصد داریم ولتاژ دو سر مقاومت  $R_2$  را به صورت نمودار مشاهده نماییم.



کافی است پروب ولتاژ را مطابق شکل فوق روی گره مقاومت مورد نظر متصل کنیم و سپس بر روی آیکون اجرای برنامه کلیک کنیم. صفحه پروفایل شبیه سازی باز شده، نمودار خروجی نمایش داده می‌شود.





## ضمیمه ۲: برخی از دستورات کاربردی متلب در کنترل

نرم افزار متلب امکان شبیه سازی سیستم‌های مختلف را بصورت کد دستوری در محیط m-file و نیز شبیه سازی بلوکی در محیط سیمولینک فراهم می‌سازد. در ادامه برخی از کاربردی‌ترین دستورات متلب برای درس آزمایشگاه سیستم‌های کنترل خطی مطرح می‌شوند. جهت آشنایی بیشتر با نحوه استفاده و کاربرد هر یک از این دستورات کافی است به راهنمای بسیار جامع نرم افزار متلب، مراجعه نمایید.

تذکره: می‌توان از دو دستور help و doc جهت مشاهده راهنمای هر تابع یا دستور تعریف شده در متلب استفاده نمود. help راهنما را بصورت خلاصه در command window نشان می‌دهد و doc در صفحه‌ای مجزا ساختار دستور مورد نظر را به همراه مثال‌هایی از نحوه استفاده با جزییات بیشتری نسبت به help نمایش می‌دهد. به عنوان مثال برای آشنایی با دستور plot (رسم منحنی‌ها) کافی است یکی از دو دستور زیر را در command window اجرا کنیم.

```
>> help plot
```

```
>> doc plot
```

فهرست دستورات پرکاربرد متلب در آزمایشگاه سیستم‌های کنترل خطی:

دستور	کاربرد
plot	رسم منحنی در حالت کلی
subplot	رسم چند منحنی بصورت مجزا در یک شکل
hold on	دستور کمکی جهت رسم چند منحنی بر روی یک شکل
title	ایجاد عنوان برای منحنی
legend	ایجاد برچسب راهنمای منحنی‌های مختلف در یک شکل
xlabel	ایجاد برچسب برای محور X
ylabel	ایجاد برچسب برای محور Y
tf	ایجاد تابع تبدیل
zpk	تعریف تابع تبدیل با قطب، صفر و بهره
pole	یافتن قطب‌های تابع تبدیل

<b>zero</b>	یافتن صفرهای تابع تبدیل
<b>series</b>	سری کردن دو تابع تبدیل
<b>parallel</b>	موازی کردن دو تابع تبدیل
<b>feedback</b>	بستن حلقه فیدبک
<b>step</b>	رسم (بدست آوردن دیتای) پاسخ پله سیستم
<b>stepinfo</b>	بدست آوردن مشخصات پاسخ پله
<b>impulse</b>	شبیه سازی پاسخ ضربه سیستم
<b>lsim</b>	شبیه سازی سیستم با ورودی دلخواه
<b>lsiminfo</b>	بدست آوردن مشخصات پاسخ سیستم با ورودی دلخواه
<b>gensig</b>	تولید سیگنال دلخواه
<b>rlocus</b>	رسم مکان هندسی ریشه‌ها
<b>nyquist</b>	رسم منحنی نایکوئیست
<b>bode</b>	رسم (بدست آوردن دیتای) منحنی بود (فاز و اندازه)
<b>bodemag</b>	رسم منحنی اندازه بود
<b>nichols</b>	رسم منحنی نیکولز
<b>margin</b>	بدست آوردن حدبهره و فاز و فرکانس‌های مرتبط با آن‌ها
<b>sisotool</b>	بازار گرافیکی تحلیل و طراحی جبران‌ساز برای سیستم
<b>pid</b>	ایجاد کنترلر PID با ضرایب مشخص
<b>pidstd</b>	دستور دیگری جهت ایجاد PID با ضرایب مشخص
<b>pidtune</b>	یافتن ضرایب کنترلرهای هم خانواده PID برای سیستم به صورت عددی
<b>pidtool</b>	تنظیم ضرایب کنترلر PID برای سیستم به صورت گرافیکی

## ضمیمه ۳: راهنمای اتصالات آی سی LM324

تغذیه آپ امپ:

۳ تا ۳۰ ولت قابل اعمال است اما بهتر از مقادیر میانی یعنی ۱۰ یا ۱۵ ولت استفاده شود.

اتصالات آی سی:

هر آی سی LM324 حاوی چهار آپ امپ بصورت شکل زیر است (نمای فوقانی آی سی).

### PIN CONNECTIONS

