



دانشگاه صنعتی امیر کبیر
(پلی تکنیک تهران)

پروژه درس ارتعاشات

موضوع: بررسی سیستم تعلیق کامیون

نگارش: نیوشا تحصیلی

استاد: حامد غفاری

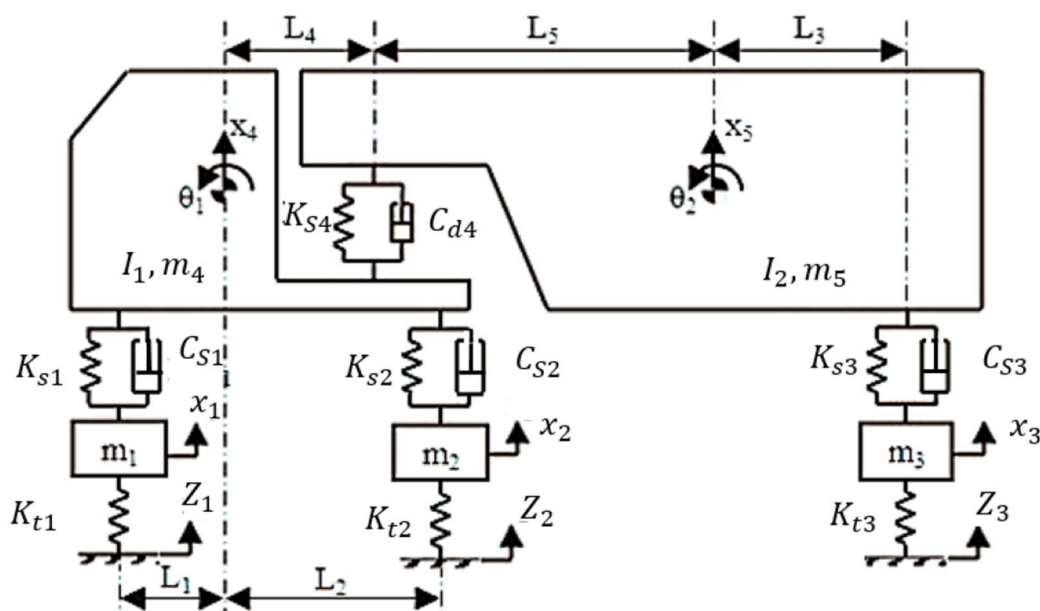
تدریس یار: فاطمه کریمی - علی مجیبی

فهرست مطالب

۲.....	مقدمه
۳.....	مشخصات سیستم
۴.....	درجات آزادی.....
۵.....	استخراج معادلات دینامیکی
۷.....	نتایج معادلات دینامیکی
۱۰.....	تحلیل جا به جایی جرم ۴ در اثر عبور از موانع
۱۹.....	نمودار ماکزیمم شتاب بر حسب سرعت

مقدمه:

برای تحلیل و بررسی حرکت یک کامیون مدل های گوناگونی ارائه شده است که هر کدام برای هدف معینی توسعه یافته اند. یکی از مدل های کاربردی که برای طراحی کنترلر سیستم تعلیق کامیون ارائه شده است را در شکل ۱ مشاهده میکنید. لاستیک، سیستم کمک فنر هر چرخ و بدنه کامیون با استفاده از سه عنصر جرم، فنر و دمپر مدل شده اند. هدف از این مطالعه، بررسی ارتعاشات یک کامیون و راحتی سرنشین آن است. بدین منظور ابتدا بایستی معادلات دینامیک سیستم نشان داده شده در شکل ۱ استخراج شوند. در گام بعدی به بررسی حرکت کامیون بر روی موانع مختلف روی جاده پرداخته میشود. اثر حرکت کامیون بر روی جاده به صورت تحریک های پایه ای که به سیستم وارد میشوند بررسی میشود. در نهایت برای بررسی راحتی سرنشین شتاب حرکت سرنشین بررسی میگردد. میتوان اثر وجود سرنشین را به کمک سه المان جرم، فنر، دمپر مدل کرد، اما برای سادگی حرکت سرنشین را همان حرکت مختصات x 4 در نظر میگیریم. مشخصات کامیون مورد بررسی در جدول ۱ داده شده است.

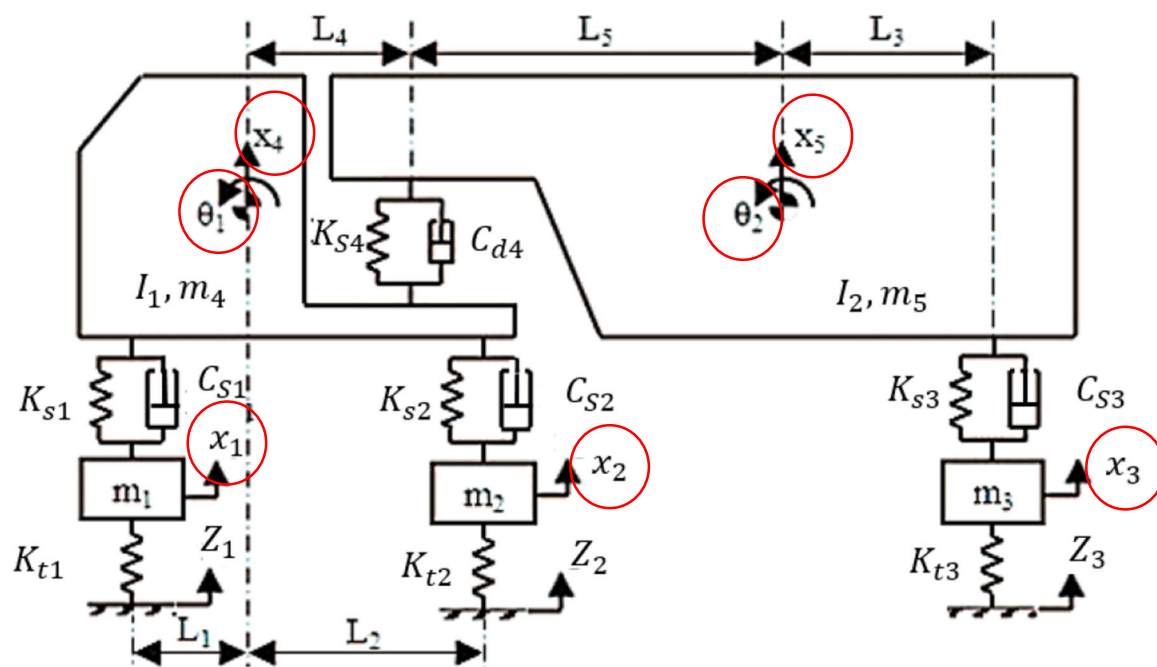


مشخصات سیستم: در جدول زیر آورده شده است:

Parameter	Value	Parameter	Value
m_1	270 kg	K_{t1}	847000 N/m
m_2	520 kg	K_{t2}	2000000 N/m
m_3	340 kg	K_{t3}	2000000 N/m
m_4	4400 kg	K_{s1}	300000 N/m
m_5	12500 kg	K_{s2}	967430 N/m
L_1	1.2 m	K_{s3}	155800 N/m
L_2	4.8 m	K_{s4}	20000000 N/m
L_3	4 m	C_{d4}	200000 Ns/m
L_4	4.134 m	C_{s1}	10000 Ns/m
L_5	6.973 m	C_{s2}	27627 Ns/m
I_1	18311 kg m ²	C_{s3}	44506 Ns/m
I_2	251900 kg m ²		

درجات آزادی:

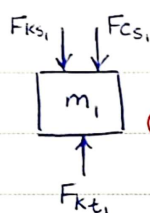
مدل صفحه ای که از کامیون ارائه شده دارای ۷ درجه آزادی شامل درجات آزادی دورانی و خطی $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, \theta_1, \theta_2$ می باشد که در شکل زیر مشخص شده اند:



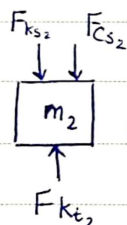
استخراج معادلات دینامیکی:

معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم از دو روش نیوتن-اوایلر و لاگرانژ با فرض دوران های کوچک برای سیستم استخراج میشوند.

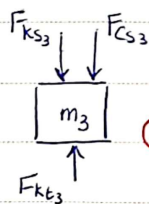
در این گزارش به بررسی معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم به روش نیوتن-اوایلر میپردازیم:



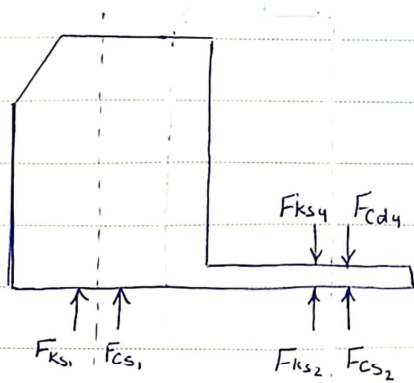
$$\textcircled{1} \quad m_1 \ddot{x}_1 - k_{t1} (z_1 - x_1) + k_{s1} (x_1 - x_4 + l_1 \theta_1) + c_{s1} (\dot{x}_1 - \dot{x}_4 + l_1 \dot{\theta}_1) = 0$$



$$\textcircled{2} \quad m_2 \ddot{x}_2 - k_{t2} (z_2 - x_2) + k_{s2} (x_2 - x_4 - l_2 \theta_1) + c_{s2} (\dot{x}_2 - \dot{x}_4 - l_2 \dot{\theta}_1) = 0$$

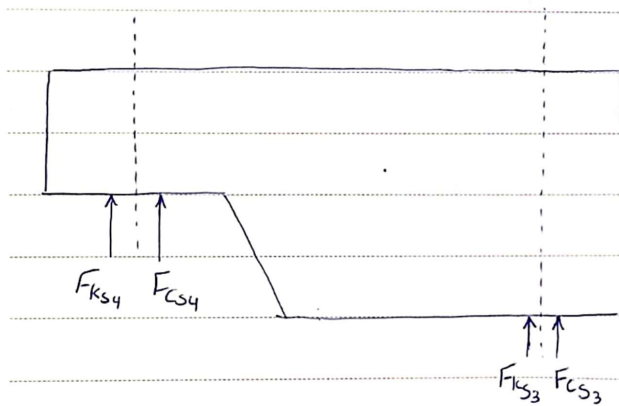


$$\textcircled{3} \quad m_3 \ddot{x}_3 - k_{t3} (z_3 - x_3) + k_{s3} (x_3 - x_5 - l_3 \theta_2) + c_{s3} (\dot{x}_3 - \dot{x}_5 - l_3 \dot{\theta}_2) = 0$$



$$\begin{aligned}
 \textcircled{4} \quad m_4 \ddot{x}_4 &- k_{s1} (x_1 - x_4 + l_1 \theta_1) - c_{s1} (\dot{x}_1 - \dot{x}_4 + l_1 \dot{\theta}_1) \\
 &- k_{s2} (x_2 - x_4 + l_2 \theta_1) - c_{s2} (\dot{x}_2 - \dot{x}_4 + l_2 \dot{\theta}_1) \\
 &+ k_{s4} (x_4 + l_4 \theta_1 - x_5 + l_5 \theta_2) + c_{d4} (\dot{x}_4 + l_4 \dot{\theta}_1 - \dot{x}_5 + l_5 \dot{\theta}_2) = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \textcircled{5} \quad I_1 \ddot{\theta}_1 &- k_{s2} (x_2 - x_4 - l_2 \theta_1) l_2 - c_{s2} (\dot{x}_2 - \dot{x}_4 - l_2 \dot{\theta}_1) l_2 \\
 &+ k_{s1} (x_1 - x_4 + l_1 \theta_1) l_1 + c_{s1} (\dot{x}_1 - \dot{x}_4 + l_1 \dot{\theta}_1) l_1 \\
 &+ k_{s4} (x_4 + l_4 \theta_1 - x_5 + l_5 \theta_2) l_4 + c_{d4} (\dot{x}_4 + l_4 \dot{\theta}_1 - \dot{x}_5 + l_5 \dot{\theta}_2) l_4 = 0
 \end{aligned}$$



$$\textcircled{6} \quad m_5 \ddot{x}_5 - k_{s3}(x_3 - x_5 - l_3 \theta_2) - c_{s3}(\dot{x}_3 - \dot{x}_5 - l_3 \dot{\theta}_2) - k_{s4}(x_4 + l_4 \theta_1 - x_5 + l_5 \theta_2) - c_{d4}(\dot{x}_4 + l_4 \dot{\theta}_1 - \dot{x}_5 + l_5 \dot{\theta}_2) = 0$$

$$\textcircled{7} \quad I_2 \ddot{\theta}_2 + k_{s4}(x_4 + l_4 \theta_1 - x_5 + l_5 \theta_2)l_5 + c_{d4}(\dot{x}_4 + l_4 \dot{\theta}_1 - \dot{x}_5 + l_5 \dot{\theta}_2)l_5 - k_{s3}(x_3 - x_5 - l_3 \theta_2)l_3 - c_{s3}(\dot{x}_3 - \dot{x}_5 - l_3 \dot{\theta}_2)l_3 = 0$$

نتایج معادلات دینامیکی:

ماتریس اینرسی:

$$M = \begin{bmatrix} m1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I2 \end{bmatrix};$$

ماتریس سختی:

```
K=[kt1+ks1 0 0 -ks1 0 ks1*11 0;
    0 kt2+ks2 0 -ks2 0 -ks2*12 0;
    0 0 kt3+ks3 0 -ks3 0 -ks3*13;
    -ks1 -ks2 0 ks1+ks2+ks4 -ks4 -ks1*11+ks2*12+ks4*14 ks4*15;
    0 0 -ks3 -ks4 ks3+ks4 -ks4*14 ks3*13-ks4*15;
    ks1*11 -ks2*12 0 -ks1*11+ks2*12+ks4*14 -ks4*14 ks2*12^2+ks4*14^2+ks1*11^2 ks4*15*14;
    0 0 -ks3*13 ks4*15 -ks4*15+ks3*13 ks4*14*15 ks4*15^2+ks3*13^2];
```

ماتریس دمپینگ:

```
C=[cs1 0 0 -cs1 0 cs1*11 0;
    0 cs2 0 -cs2 0 -cs2*12 0;
    0 0 cs3 0 -cs3 0 -cs3*13;
    -cs1 -cs2 0 cs1+cs2+cd4 -cd4 -cs1*11+cs2*12+cd4*14 cd4*15;
    0 0 -cs3 -cd4 cs3+cd4 -cd4*14 cs3*13-cd4*15;
    cs1*11 -cs2*12 0 cs2*12-cs1*11+cd4*14 -cd4*14 cs2*12^2+cs1*11^2+cd4*14^2 cd4*15*14;
    0 0 -cs3*13 cd4*15 -cd4*15+cs3*13 cd4*14*15 cd4*15^2+cs3*13^2];
```

و با جایگذاری مقادیر داریم:

ماتریس اینرسی:

M =

270	0	0	0	0	0	0
0	520	0	0	0	0	0
0	0	340	0	0	0	0
0	0	0	4400	0	0	0
0	0	0	0	12500	0	0
0	0	0	0	0	18311	0
0	0	0	0	0	0	251900

ماتریس سختی و ماتریس دمپینگ:

K =

1.0e+08 *

0.0115	0	0	-0.0030	0	0.0036	0
0	0.0297	0	-0.0097	0	-0.0464	0
0	0	0.0216	0	-0.0016	0	-0.0062
-0.0030	-0.0097	0	0.2127	-0.2000	0.8696	1.3946
0	0	-0.0016	-0.2000	0.2016	-0.8268	-1.3884
0.0036	-0.0464	0	0.8696	-0.8268	3.6452	5.7653
0	0	-0.0062	1.3946	-1.3884	5.7653	9.7495

C =

1.0e+07 *

0.0010	0	0	-0.0010	0	0.0012	0
0	0.0028	0	-0.0028	0	-0.0133	0
0	0	0.0045	0	-0.0045	0	-0.0178
-0.0010	-0.0028	0	0.0238	-0.0200	0.0947	0.1395
0	0	-0.0045	-0.0200	0.0245	-0.0827	-0.1217
0.0012	-0.0133	0	0.0947	-0.0827	0.4069	0.5765
0	0	-0.0178	0.1395	-0.1217	0.5765	1.0437

توان دوم فرکانس طبیعی:

omega2 =

1.0e+04 *

2.9934	0	0	0	0	0	0
0	0.4272	0	0	0	0	0
0	0	0.5703	0	0	0	0
0	0	0	0.6342	0	0	0
0	0	0	0	0.0182	0	0
0	0	0	0	0	0.0064	0
0	0	0	0	0	0	0.0020

فرکانس های طبیعی:

omega =

173.0150	0	0	0	0	0	0
0	65.3636	0	0	0	0	0
0	0	75.5196	0	0	0	0
0	0	0	79.6380	0	0	0
0	0	0	0	13.4986	0	0
0	0	0	0	0	8.0291	0
0	0	0	0	0	0	4.4925

شکل مودها:

U =

0.0057	0.9998	-0.0050	0.0000	0.1472	0.3036	0.0055
-0.2922	0.0037	0.9998	-0.0025	-0.6946	0.0324	0.0127
-0.0016	-0.0000	0.0043	1.0000	0.0173	-0.0026	0.1107
0.6554	-0.0169	0.0056	0.0001	0.0185	0.9342	0.0245
-0.2202	0.0002	-0.0155	-0.0020	-0.5213	0.0564	0.9841
0.6563	0.0041	-0.0008	0.0002	-0.4336	-0.1741	0.0030
0.0762	-0.0001	0.0054	-0.0004	0.1884	-0.0230	0.1357

باتوجه به شکل مودها هر مود شامل $n-1$ گره ارتعاشی میباشد.

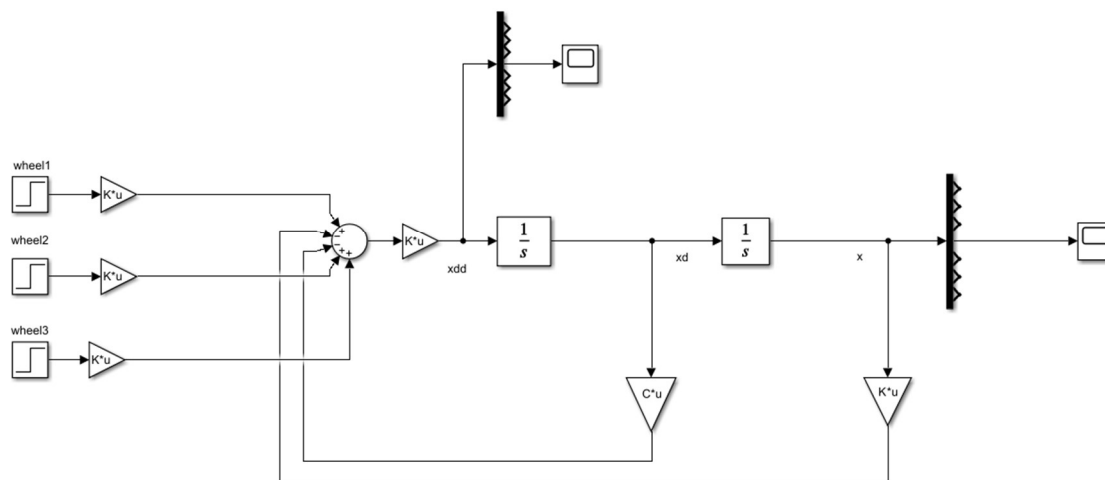
تحلیل جا به جایی جرم ۴ در اثر عبور از موانع:

با توجه به اینکه سیستم تعلیق خودرو عمدتاً برای راحتی سرنشین های آن خودرو طراحی میشود، بنابراین در یک کامیون باید جا به جایی محل نشستن راننده یعنی جرم ۴ بررسی شود. در ادامه دو مانع مختلف برای تحلیل در نظر گرفته شده:

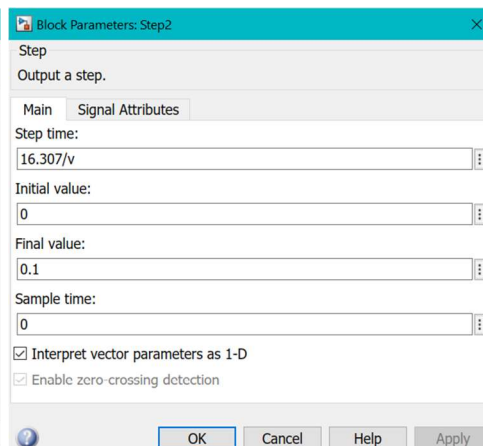
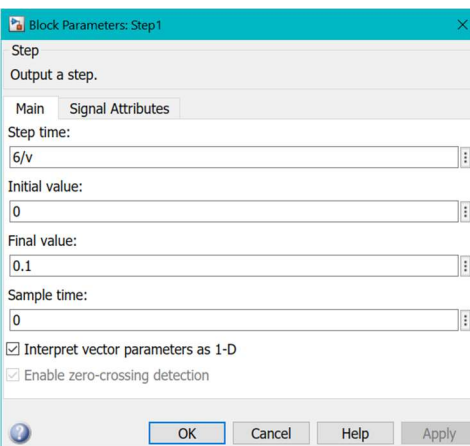
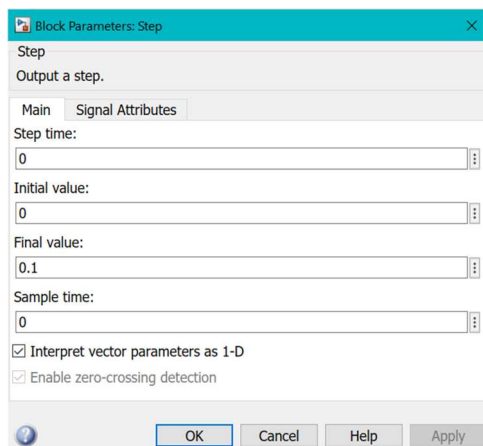
عبور کامیون از پله:

ارتفاع پله در این شبیه سازی ۱۰cm فرض شده است:

مدل Simulink:

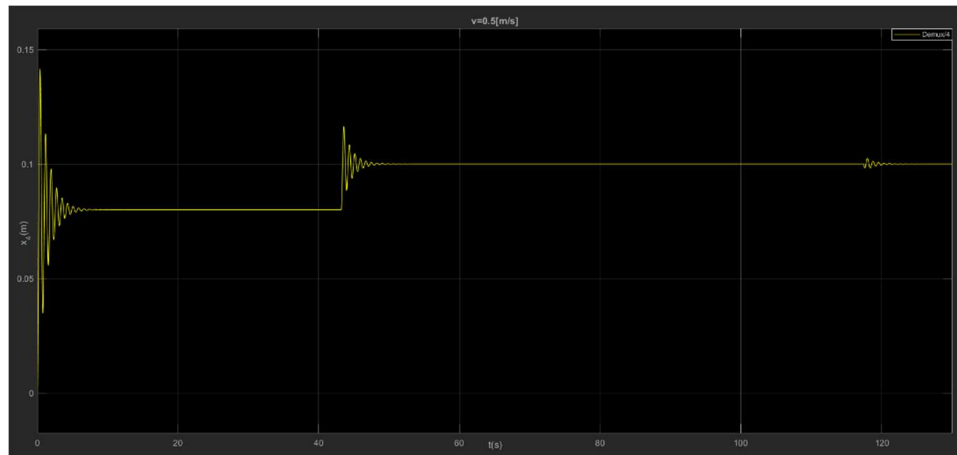


هنگامی که کامیون به یک ناهمواری به صورت پله میرسد در واقع ابتدا چرخ اول به پله رسیده، سپس چرخ دوم و در آخر چرخ سوم. بنابراین اگر فرض کنیم چرخ اول در لحظه صفر به این پله رسیده، لحظه ای که چرخ دوم به این پله میرسد به صورت حاصل تقسیم فاصله چرخ اول و دوم بر سرعت حرکت کامیون است و لحظه ای که چرخ سوم به پله میرسد به صورت حاصل تقسیم فاصله سوم از چرخ اول تقسیم بر سرعت حرکت کامیون است. بنابراین داریم:



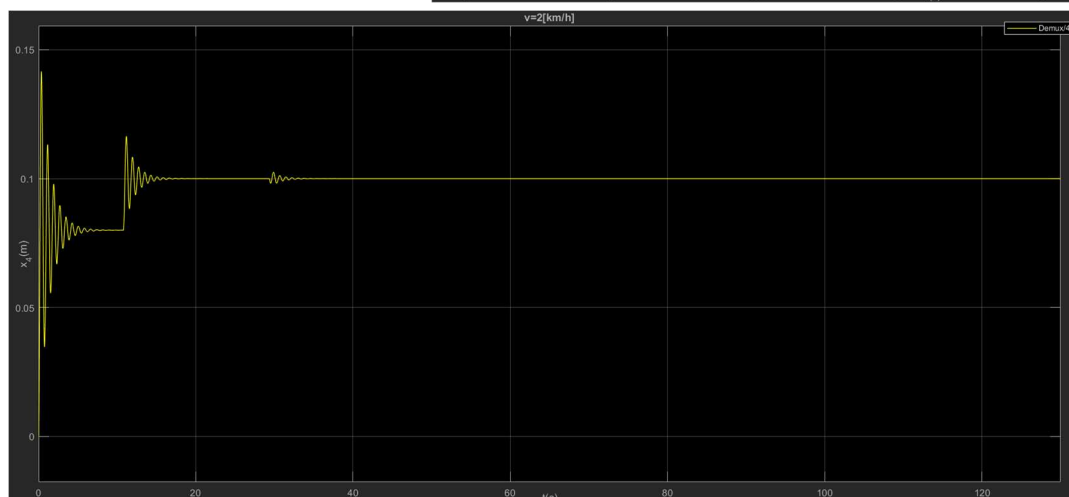
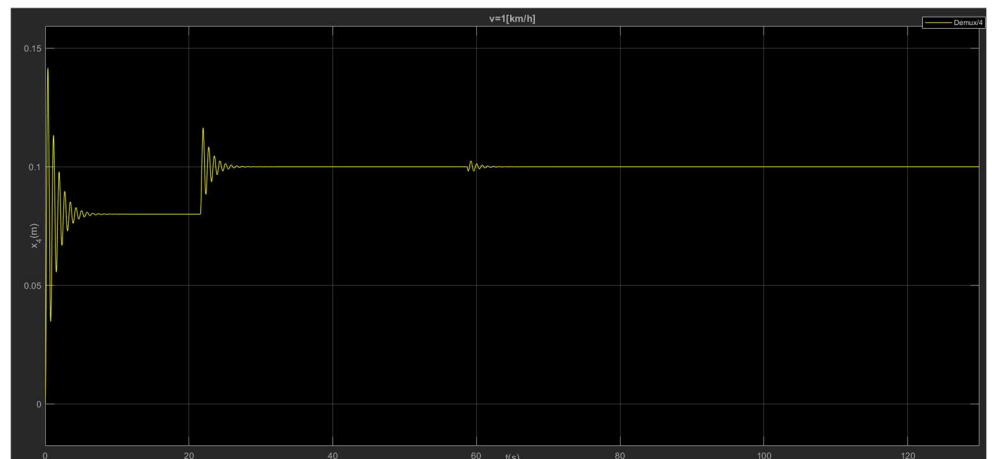
به صورت دستی مقادیر مختلف سرعت طبق جدول زیر وارد شده است:

$v(\frac{km}{h})$	0.5	1	2	10	20	40	80
-------------------	-----	---	---	----	----	----	----

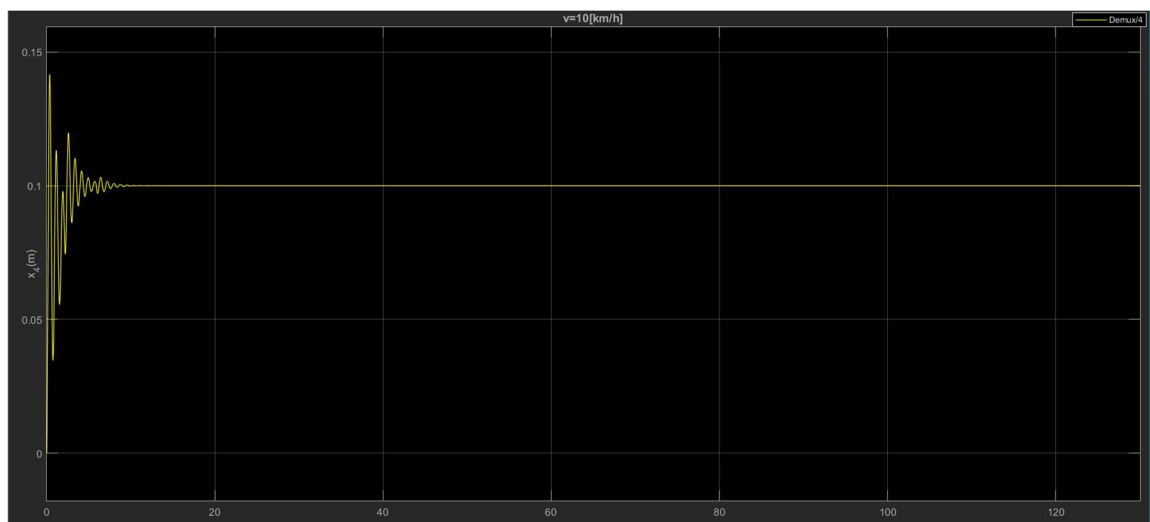


سرعت ۰.۵[km/h]

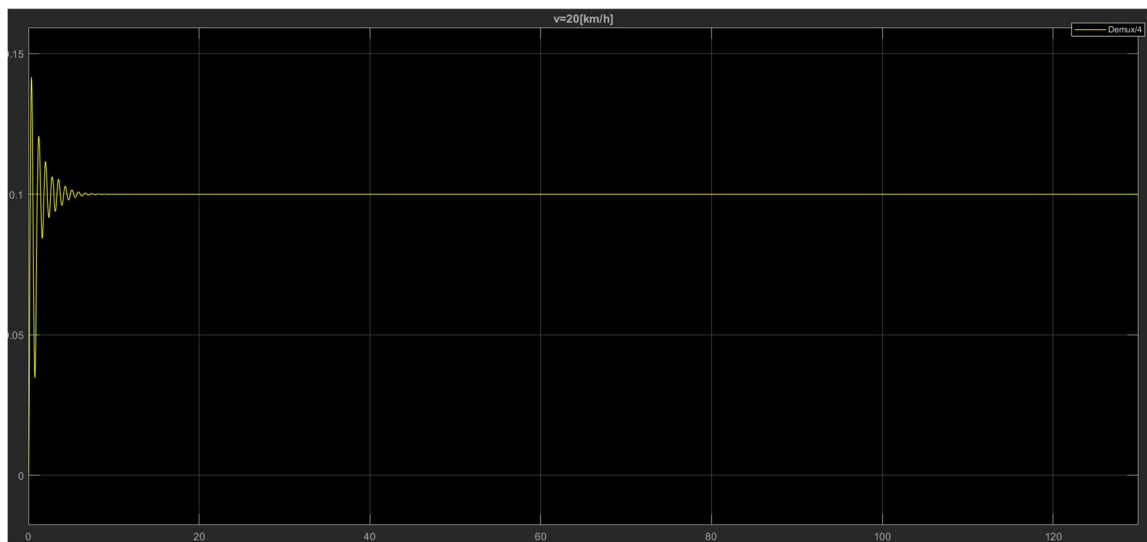
سرعت ۱[km/h]



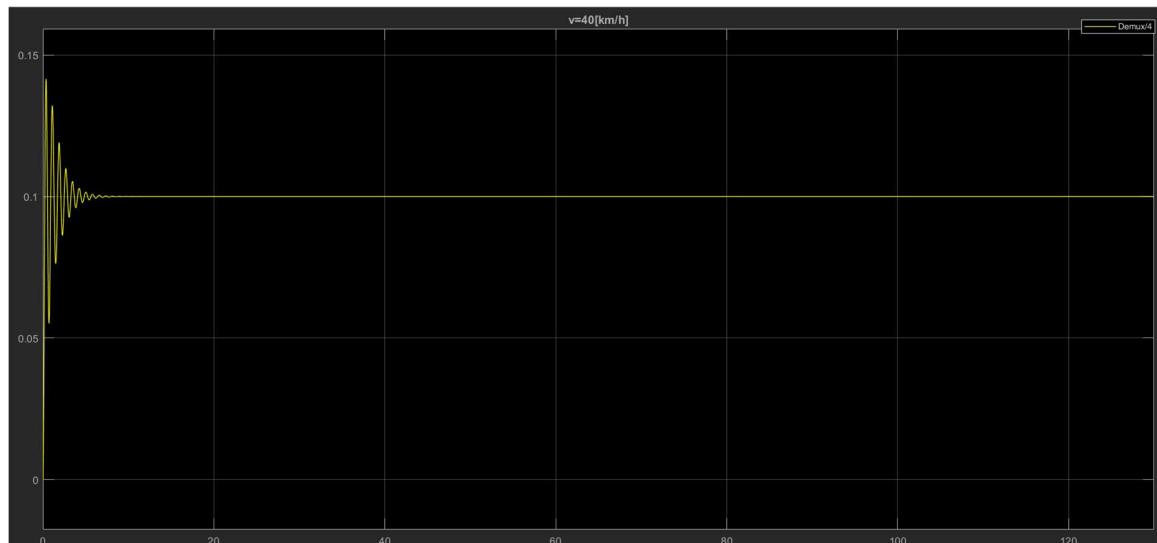
سرعت ۲[km/h]



سرعت
۱۰[km/h]



سرعت ۲۰[km/h]



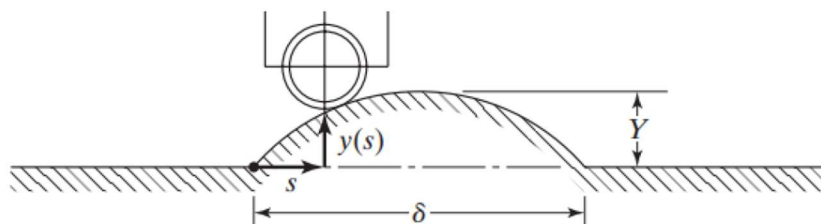
سرعت ۴۰[km/h]

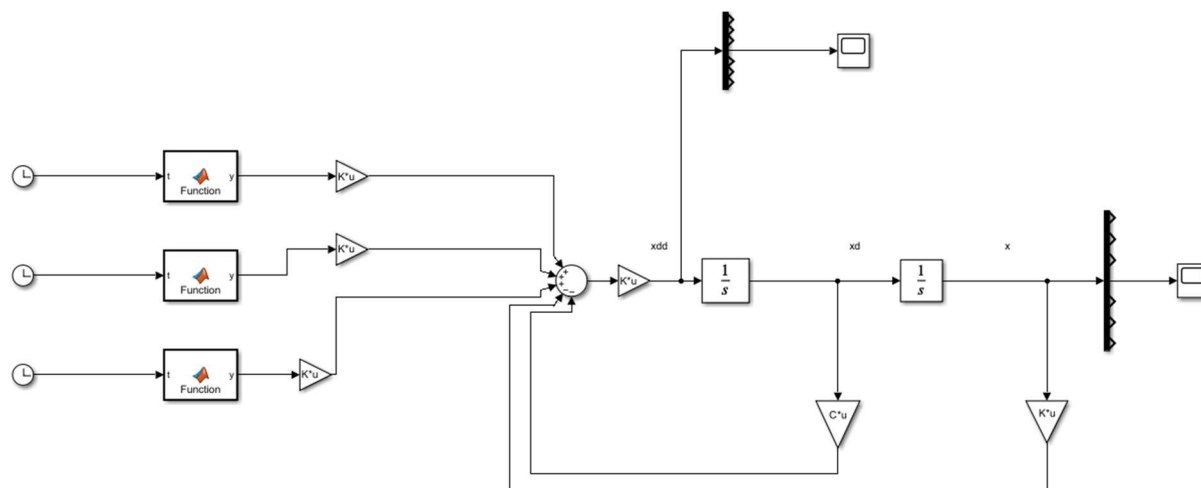


سرعت
۸۰[km/h]

تحلیل: باتوجه به نمودار ها قسمت اول نمودار تحریک و دمپینگ چرخ اول ، قسمت دوم برای چرخ دوم و قسمت سوم برای چرخ سوم را نشان میدهد. میدانیم ابتدا چرخ اول به پله میرسد (نمودار یک جامپ به سمت بالا دارد) سپس چرخ دوم و در آخر چرخ سوم. با توجه به نمودار ها با افزایش سرعت فاصله زمانی بین تحریک چرخ ها در حال کاهش است که این موضوع به ازای سرعت های ۰.۵-۱-۲ کاملاً واضح است. از نمودار ی که برای سرعت 10 m/s رسم شده میتوانیم مشاهده کنیم که فاصله دو تحریک متوالی بشدت کم شده و عملاً ادغام میشوند در واقع قبل از اینکه تحریک و دمپینگ چرخ اول کامل شود به دلیل زیاد بودن سرعت بلافاصله دوباره سرنشین تحریک میشود. به همین ترتیب برای سرعت های بالاتر هم میتوانیم بگوییم که سیستم فرصت پاسخ دهی پیدا نکرده ، قبل از کامل شدن تحریک و دمپینگ دوباره تحریک میشوند، و اثر تحریک و دمپینگ چرخ دوم و سوم با اثر تحریک چرخ اول ادغام شده است و دیگر قابل مشاهده نیستند. به طور کلی مقدار تحریک چرخ اول از چرخ دوم و سوم بیشتر است و چرخ سوم بدلیل فاصله زیاد از کابین و متصل نبودن به آن جامپ ندارد و کمتر تحریک شده است در واقع جا به جایی سینماتیکی کابین را حس نمیکند.

عبور کامیون از دست انداز: این دست انداز سینوسی شکل تعریف شده و طول آن 30 cm و ارتفاع آن 5 cm در نظر گرفته شده است.





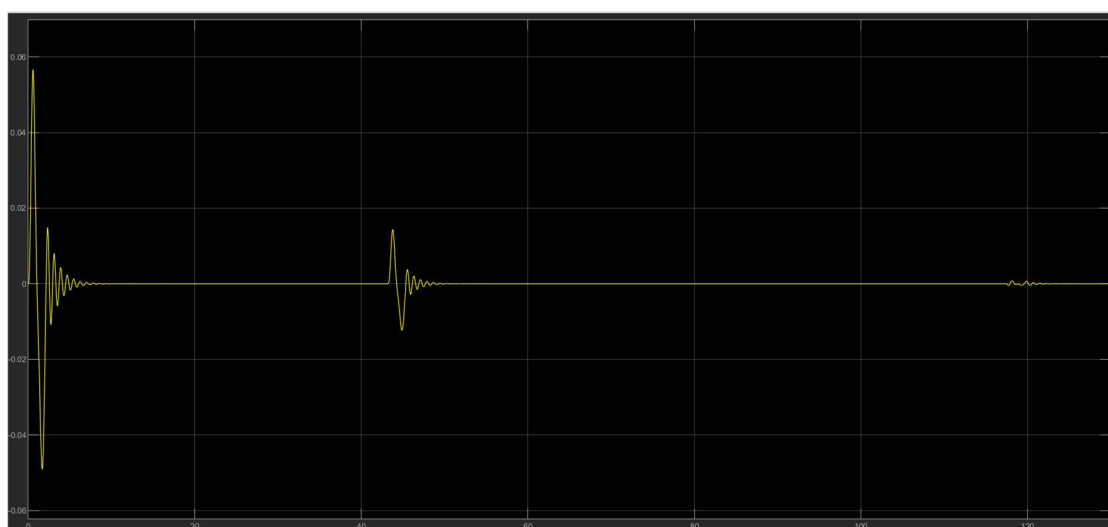
به طور مشابه برای تحریک هر یک از سه چرخ تابعی تعریف میکنیم که بازه زمانی تحریک هر یک متفاوت و متناسب فاصله شان از چرخ اول به عنوان مبدا زمانی است بنابراین داریم:

```
function y = Function(t)
if t>=0 && t<=0.30/v
y = 0.05*sin((2*pi*v)/0.30)*t);
else y=0;
end
```

```
function y = Function(t)
if t>=(6/v) && t<=(6/v)+(0.30/v)
y = 0.05*sin((2*pi*v)/0.30*(t-6/v));
else y=0;
end
```

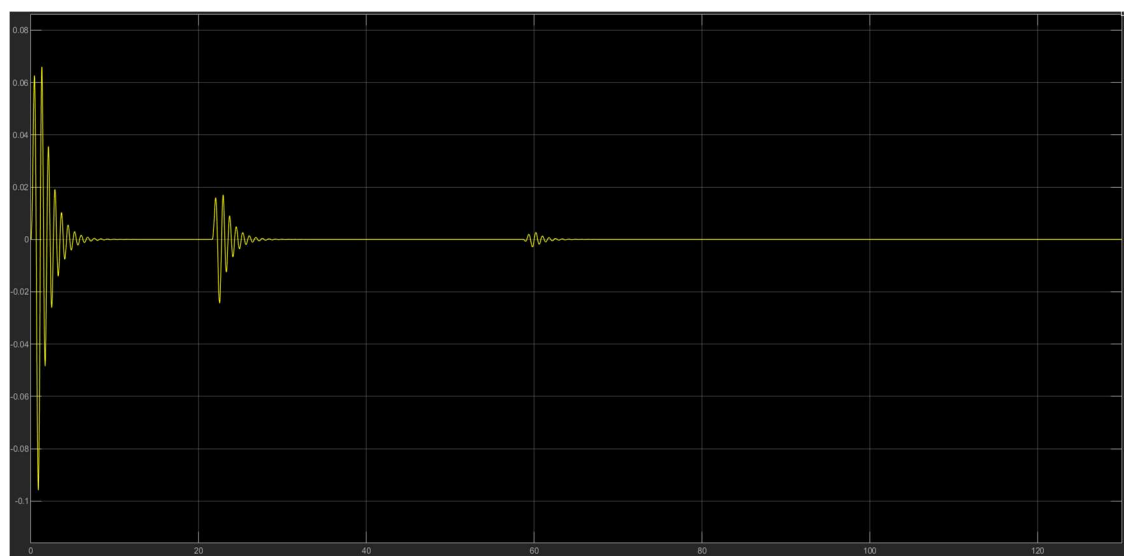
```
function y = Function(t)
if t>=16.307/v && t<=(16.307/v)+(0.30/v)
y = 0.05*sin((2*pi*v)/0.3*(t-16.307/v));
else y=0;
end
```

سرعت ها بصورت دستی وارد شده و برای نتایج آنها داریم:



سرعت
۰.۵[km/h]

سرعت ۱[km/h]



سرعت
۲[km/h]



سرعت
۱۰[km/h]





سرعت
۲۰[km/h]



سرعت
۴۰[km/h]



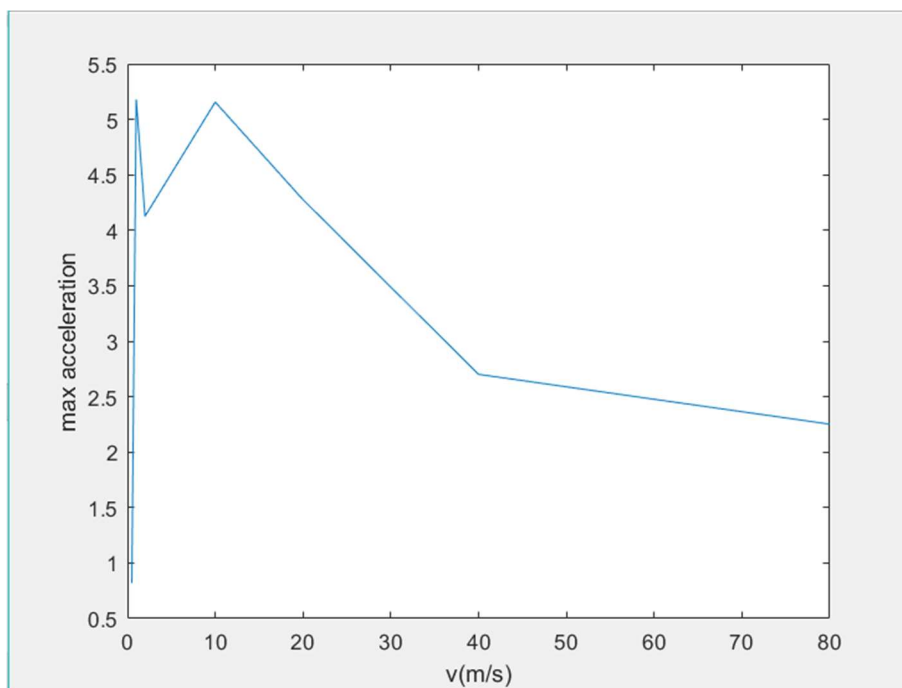
سرعت
۸۰[km/h]

تحلیل: همانند ناهمواری پله برای این ناهمواری که به صورت یک دست انداز است موارد مشابه صادق است به اینصورت با افزایش سرعت سیستم فرصت پاسخ دهی پیدا نکرده، قبل از کامل شدن تحریک و دمپینگ چرخ اول، چرخ دوم و سوم تحریک میشوند، و اثر تحریک و دمپینگ چرخ دوم و سوم با اثر تحریک چرخ اول ادغام شده است و دیگر قابل مشاهده نیستند. به طور کلی مقدار تحریک چرخ اول از چرخ دوم و سوم بیشتر است زیرا زودتر تحریک شده و فاصله اش از مرکز جرم کابین راننده کمتر است و چرخ سوم بدلیل فاصله زیاد از کابین و متصل نبودن به آن جامپ ندارد و کمتر تحریک شده است و در واقع جا به جایی سینماتیکی کابین را حس نمیکند.

مقایسه نتایج: از تفاوت های این دو مانع میتوان به دامنه ارتعاشی و ماکزیمم جا به جایی آنها به ازای سرعت های مختلف اشاره کرد. همچنین در تحریک دست انداز از نقطه صفر چرخ اول بعد از تحریک شدن به صفر مکان خود مجدد باز میگردد تا چرخ دوم هم تحریک شوند اما در پله یک جامپ به اندازه ارتفاع پله یعنی ۱۰cm داریم و پس از آن چرخ دوم تحریک میشود.

نمودار ماکزیمم شتاب بر حسب سرعت:

برای مانعی که مشابه یک دست انداز است:



برای مانع پله: به طور عجیبی یکسان بود شتاب ماکزیمم!!

بنابراین به طور کلی تحلیلی برای این بخش سوال ندارم.