



دانشگاه صنعتی شریف

آزمایشگاه سخت افزار

گروه ۱

گزارش نهایی پروژه

سامانه کنترل دریچه گاز الکترونیکی

علی هاشم آبادی - ۹۷۱۰۶۳۱۳



بسم خدا

# فهرست مطالب

۱	مقدمه.....
۲	دیتاشیت محصول.....
۳	معماری سیستم.....
۸	راه اندازی و راهنمای کاربر.....
۱۷	PWM.....
۱۸	H-Bridge.....
۱۹	القاگر.....
۲۱	موتور DC.....
۲۲	گشتاور.....
۲۳	کنترلر PI.....
۲۴	Inertia.....

۲۵.....	فنر و Damper
۲۶.....	طراحی و پیاده‌سازی
۲۶.....	طراحی کنترلر PI
۳۰.....	طراحی موتور DC
۳۴.....	طراحی بدنه دریچه گاز
۳۵.....	تست
۵۰.....	کد برنامه
۵۳.....	قیمت
۵۴.....	جمع‌بندی

## فهرست تصاویر \*

۳.....	معماری سیستم.....
۴.....	معماری کنترلر PI.....
۵.....	معماری موتور DC.....
۶.....	معماری دریچه گاز.....
۸.....	محیط نرم افزار.....
۹.....	کتابخانه و فایل ها.....
۱۰.....	Simulation Setup.....
۱۱.....	Plotting Window.....
۱۲.....	نمایش خروجی.....
۱۳.....	OpenModelica Blocks.....
۱۴.....	Icon View.....

\* تصاویر بخش تست و کد ذکر نشده اند. برای مشاهده این تصاویر به فصل تست و کد برنامه مراجعه کنید

۱۵.....Diagram View

۱۵.....Text View

۱۶.....Documentation View

## مقدمه

واحدهای کنترلی در دنیای امروز بسیار حائز اهمیت هستند، مخصوصاً در داخل خودروها. یکی از مهمترین واحدهای کنترلی درون خودرو که به طور دقیق تر، درون موتور قرار دارد، کنترل دریچه گاز نام دارد. دریچه گاز، جریان سوخت و هوا را از خود عبور میدهد و واحد کنترلی آن، بر روی سرعت و کنترل بر موتور موثر میباشد. طراحی چنین محصولاتی در دنیای واقعی، سخت و پرهزینه بوده و به سبب حساسیت بالای سامانه، هر اشکالی میتواند باعث ایجاد هزینه‌های فراتر از مادیات بشود. به همین دلیل، از ابزار آپن‌مدلیکا<sup>۱</sup> برای شبیه‌سازی این سامانه استفاده خواهیم کرد. شبیه‌سازی کم‌هزینه، بی‌خطر بوده و تا حد قابل قبولی، نتایج مناسبی در اختیار ما قرار می‌دهد. ابزار آپن‌مدلیکا از زبان شی‌گرای مدلیکا<sup>۲</sup> استفاده می‌کند که یک زبان مخصوص شبیه‌سازی می‌باشد.

برای کنترل دریچه گاز، میبایست سامانه را به صورت دور بسته<sup>۳</sup> طراحی نمود؛ یعنی خروجی سامانه باید به عنوان فیدبک در ورودی استفاده گردد تا کنترل سامانه راحت‌تر باشد.

در ادامه، مستندی دقیق از پروژه در اختیار شما قرار خواهد گرفت.

## دیتاشیت محصول

ولتاژ ورودی (پدال گاز)	حداکثر ۵ ولت
Proportional Gain	۱۶
Integral Gain	۸
فرکانس PWM	۱۰۰۰ هرتز
ضریب القایگر	۱ H
ثابت inertia	۰,۲ Kg.m <sup>2</sup>
ثابت Damper	۱ N.m.s/rad
ثابت فنر	۵ N.m/rad
دمای H-bridge	۲۰ C <sup>0</sup> ثابت فرض شده است

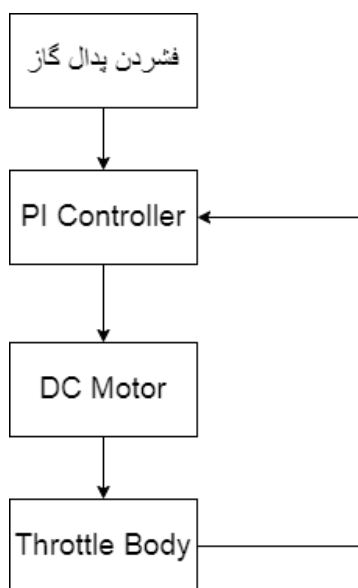
سایر موارد به صورت دیفالت خود ابزار اپنمدلیکا باقی مانده است. ورژن اپنمدلیکا استفاده شده در این پروژه، 1.20.0 می باشد.



## معماری سیستم

سیستم کنترل دریچه گاز الکترونیکی از سه بخش مختلف تشکیل شده است:

- کنترلر PI
- موتور DC
- بدنه دریچه گاز

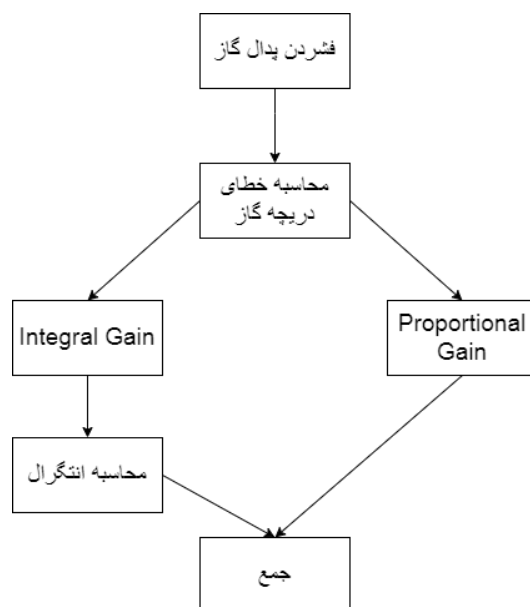


شکل ۱-۳: معماری سیستم

پدال گاز به عنوان یکی از ورودی‌های سامانه می‌باشد. از آنجا که سامانه به صورت دور بسته طراحی شده است، خروجی سامانه به صورت فیدبک به عنوان ورودی دوم استفاده می‌شود.

این کار باعث کنترل بهتر سامانه می‌شود.

بخش کنترلر PI به صورت زیر است:



شکل ۲-۳: معماری کنترلر PI

$$u(t) = Kp * e(t) + Ki \int_0^t e(x)dx$$

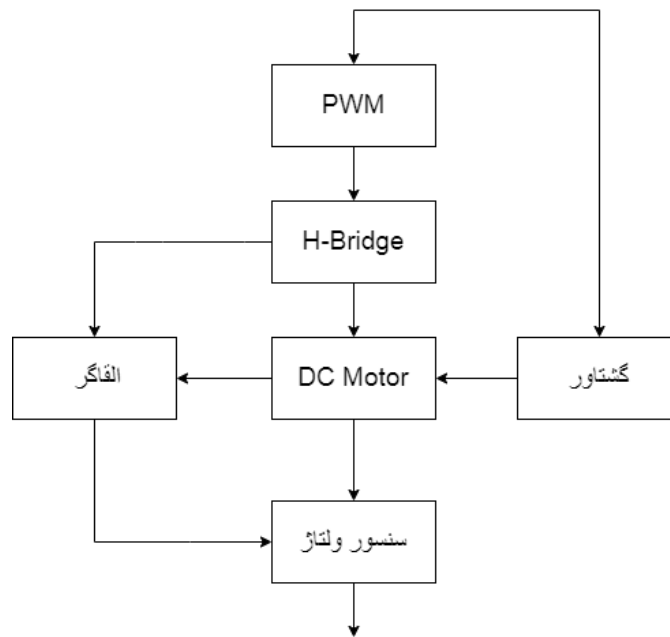
ورودی این بخش، ولتاژ پدال و ولتاژ دریچه گاز است که به عنوان فیدبک مورد استفاده قرار می‌گیرد. ابتدا نیاز داریم تا اختلاف یا

ارور میان ولتاژ پدال و ولتاژ دریچه گاز را به دست آوریم که نام آن را  $e(t)$  می‌گذاریم.

یک  $K_p$  داریم که ضریب ارور ماست و به آن ضریب تناسبی<sup>۱</sup> میگویند.

همچنین از ارور میان ولتاژ پدال و ولتاژ دریچه گاز، در واحد زمان انتگرال گرفته میشود و در یک  $K_i$  ضرب میشود که به آن ضریب انتگرال<sup>۲</sup> میگویند.

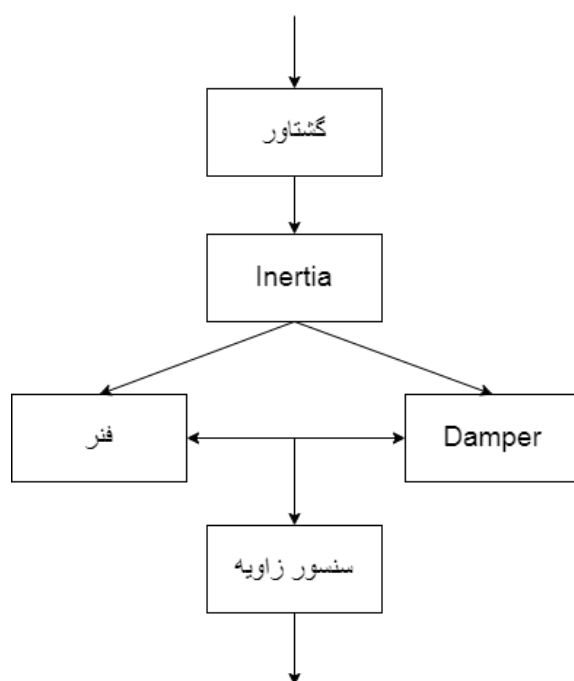
حاصل جمع دو مقدار بالا، خروجی کنترلر  $PI$  ما خواهد شد و به عنوان ورودی به موتور  $DC$  می‌رود. معماری موتور  $DC$  به صورت زیر است:



شکل ۳-۳: معماری موتور  $DC$

ورودی هم به PWM داده میشود و هم به گشتاور متصل به موتور DC. خروجی PWM به سمت پل اچ<sup>۱</sup> رفته و یک سر پل اچ به القاگر متصل است و سر دیگر آن به موتور DC. سر دیگر موتور DC به القاگر متصل شده و سپس به کمک یک سنسور، ولتاژ تولیدی را به دست آورده و به عنوان خروجی مشخص میکنیم و آنرا به عنوان ورودی به دریچه گاز تحویل می‌دهیم.

معماری بدنه دریچه گاز به صورت زیر است:



شکل ۴-۳: معماری دریچه گاز

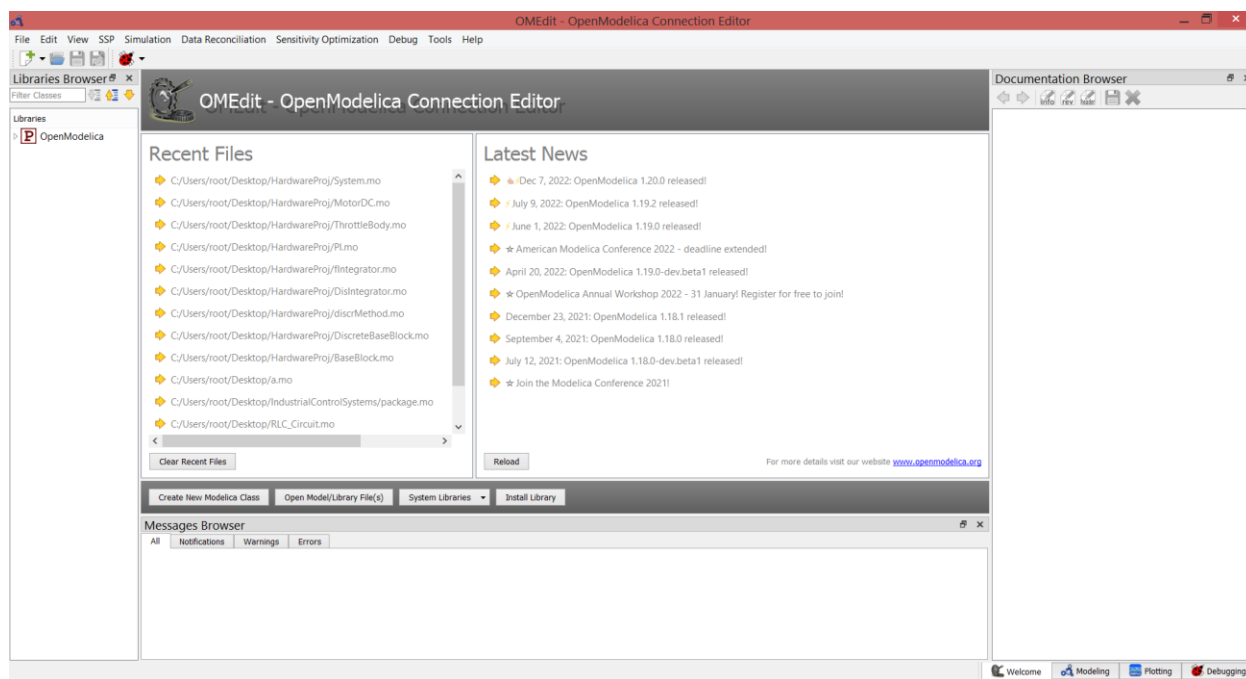
بدنه دریچه گاز متشکل است از فنر و اینرسی<sup>۱</sup> و گشتاور و دمپر<sup>۲</sup> که به طریقه بالا متصل شده‌اند. یک سنسور قرار دادیم تا زاویه دریچه مشخص شود. سپس ولتاژ نهایی را به صورت فیدبک به عنوان ورودی دوم کنترلر PI مشخص می‌کنیم تا سامانه دور بسته ما تکمیل شود.

## راهنمایی و راهاندازی کاربر

ابتدا نیاز به نصب برنامه این مدلیکا داریم.

این ابزار به صورت رایگان و متن باز در دسترس است. با مراجعه به [وبسایت](#) داده شده، امکان دانلود آن وجود دارد.

پس از نصب برنامه که بسیار آسان است، نرم افزار را باز کنید. با محیط زیر روبرو می شوید.



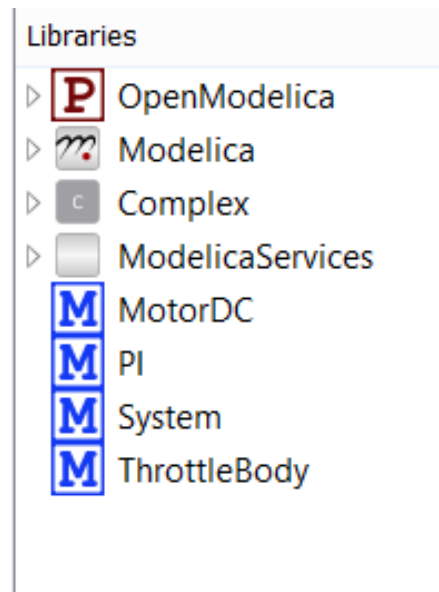
شکل ۱-۴: محیط نرم افزار

ابتدا باید کتابخانه مدلیکا که مخصوص خود نرم افزار هست را ایمپورت کنیم.

File => System Libraries => Modelica => 4.0.0

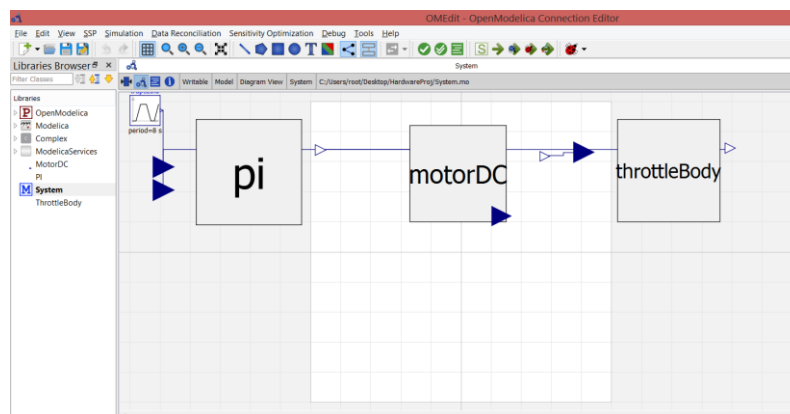
بعد از ایمپورت شدن کتابخانه، فایل‌های مرتبط با پروژه را باز کنید.

File => Open Model/Library File



شکل ۲-۴: کتابخانه و فایل‌ها

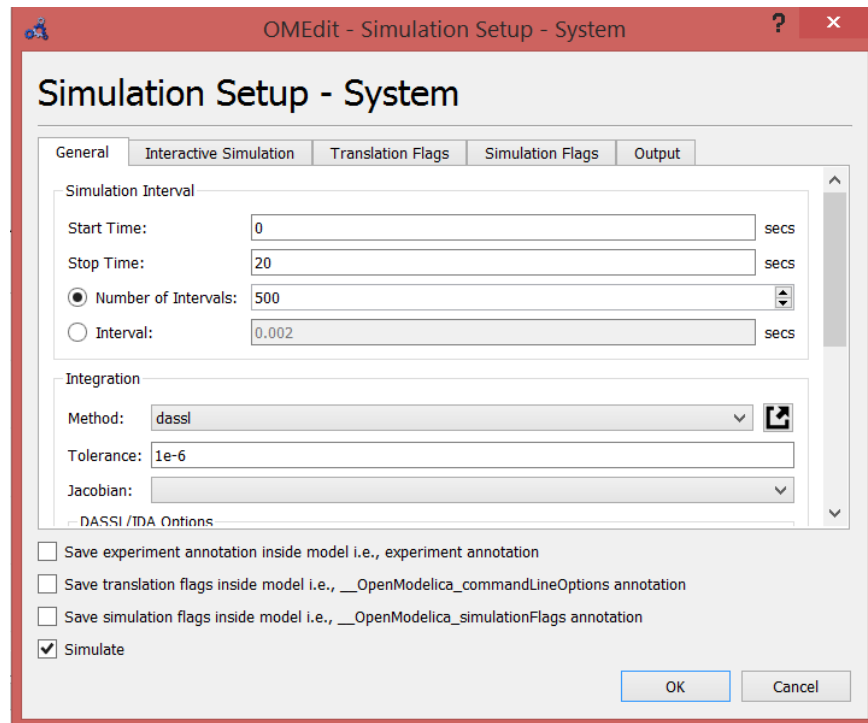
در پنجره گوشه صفحه، موارد بالا باید موجود باشند. سپس روی **System** کلیک راست کرده و گزینه **Open Class** را بزنید.



شکل ۳-۴: شکل سیستم در این مدلیک

حال نحوه اجرای شبیه‌سازی را آموزش می‌دهیم.

در پنجره بالا، علامت  یا **Simulation Setup** را بزنید.



شکل ۴-۴: *Simulation Setup*

در این پنجره، می‌توانید تنظیمات شبیه‌سازی را مشخص کنید؛ از جمله زمان شروع و پایان،.....

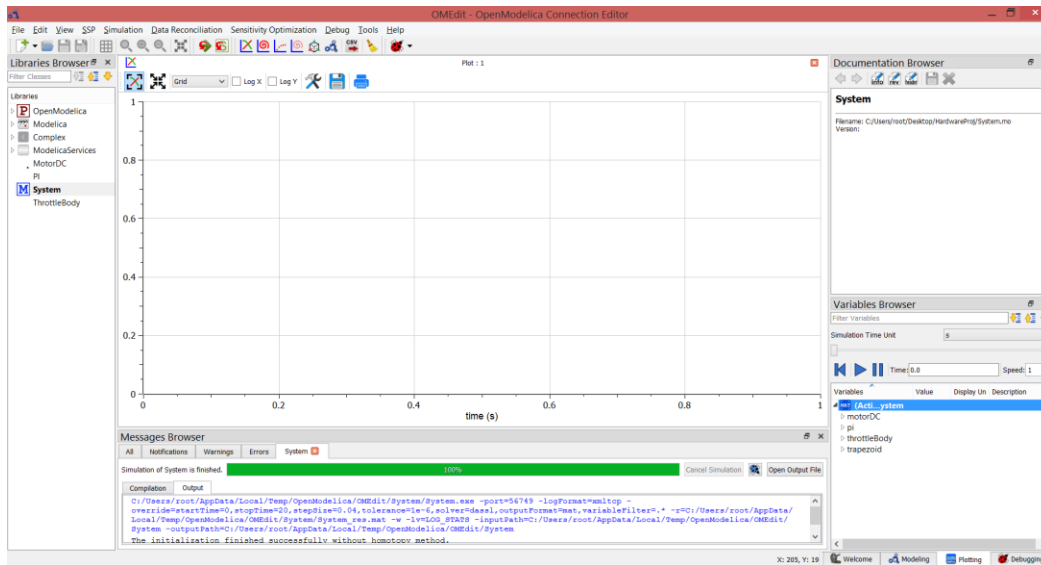
مطمئن باشید که تیک **Simulate** در انتهای پنجره فعال باشد تا علاوه بر کامپایل، شبیه‌سازی نیز انجام شود. بعد از کلیک بر

**Ok**، وارد صفحه جدیدی با نام **Plotting** می‌شوید و برنامه در حال کامپایل و شبیه‌سازی است.

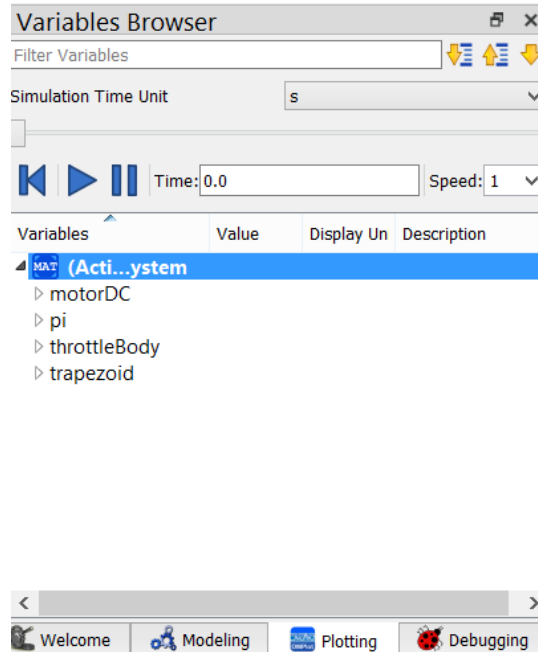
بسته به زمان شبیه‌سازی و پیچیدگی برنامه، کامپایل و شبیه‌سازی ممکن است طولانی شود.



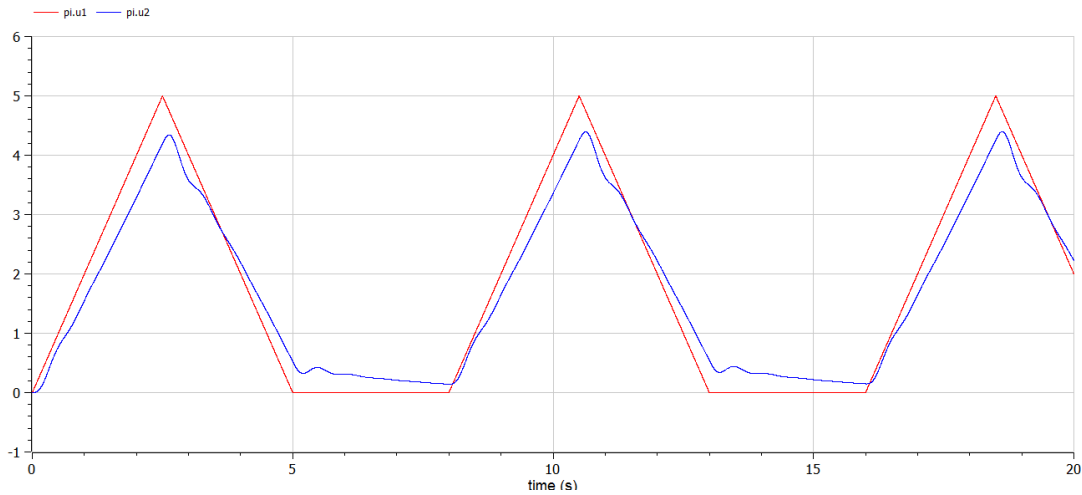
پس از اتمام کامپایل و شبیه‌سازی، در سمت راست، گوشه پایین صفحه، خروجی‌های هر بخش نمایش داده می‌شوند.



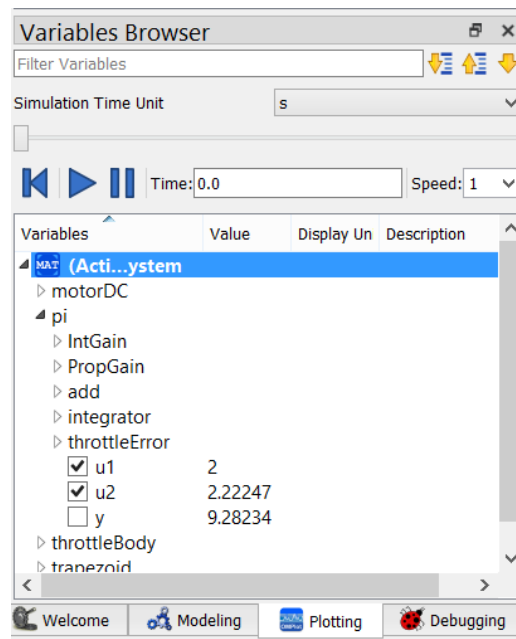
شکل ۵-۴: پنجره Plotting



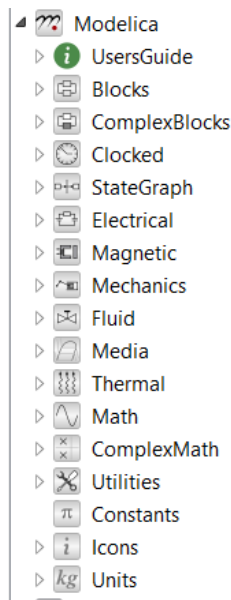
این صفحه، صفحه **Plotting** بوده که خروجی‌های انتخابی شما را رسم می‌کند و در نمودار روبرویتان قابل مشاهده خواهد بود. به عنوان مثال برای نمایش ولتاژ پدال و ولتاژ خروجی، بر سه‌گوش کنار **PI** کلیک کرده و سپس مربع کنار **u1** و **u2** را فعال کنید (بسته به نوع برنامه و زمان شبیه‌سازی، ممکن است تیک‌دار کردن مربعات طول بکشد)



شکل ۶-۴: نمایش خروجی



خودتان نیز می‌توانید به بلوک‌های کتابخانه دسترسی داشته باشید. بر فلش کنار مدلیکا کلیک کنید و خانواده‌های مختلفی از بلوک‌ها در دسترس شما خواهد بود. هر بلوکی را می‌توانید به صورت Drag&Drop در برنامه اضافه کنید و با کلیک راست بر هر کدام و زدن گزینه Open Class می‌توانید بلوک را با جزئیات بیشتر مشاهده کنید.



شکل ۷-۴: بلوک‌های این مدلیکا

هر بلوکی که با Open Class باز می‌کنید، با چهار نوع دید مختلف می‌توانید آن را مشاهده کنید. به عنوان مثال بلوک Integrator را در نظر بگیرید. این بلوک را می‌توانید از بخش زیر پیدا کنید:

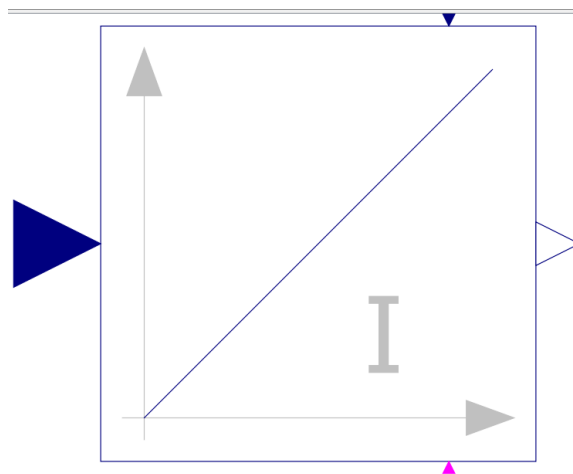
Modelica => Blocks => Continuous => Integrator



شکل ۸-۴: انواع دیدها

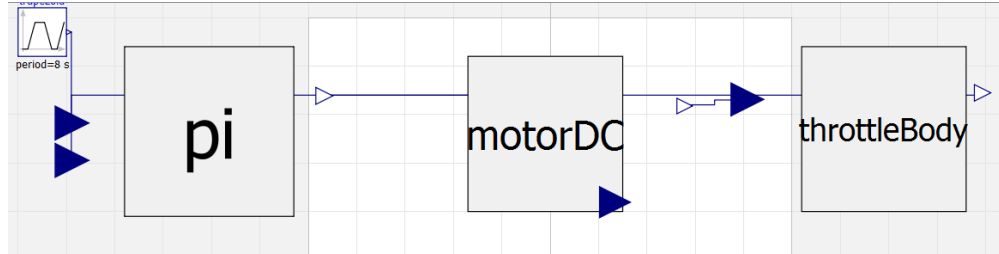
چهار نوع دید مختلف در هر مدلی وجود دارد. از سمت چپ توضیح می‌دهیم.

شکل اول، **Icon View** نام دارد و صرفاً شکل بلوک را نشان می‌دهد.



شکل ۹-۴: **Icon View**

شکل دوم، **Diagram View** نام دارد. اگر بلوک اجزای داخلی داشته باشد، یعنی خودش از یکسری بلوک دیگر تشکیل شده باشد، آن بلوک‌ها را نمایش می‌دهد. در **Integrator** بخش **Diagram View** نداریم اما مثلاً در بلوک **System** که آن را ران کردیم، **Diagram View** به صورت زیر است.



شکل ۱۰-۴: Diagram View

شکل سوم، Text View نام دارد و کد آن بلوک به زبان مدلیکا را نمایش می‌دهد. به عنوان مثال Text View بلوک Integrator به صورت زیر است:

```

8 block Integrator "Output the integral of the input signal with optional reset"
9   import Modelica.Blocks.Types.Init;
10  parameter Real k(unit="1")=1 "Integrator gain";
11  parameter Boolean use_reset = false "= true, if reset port enabled"
12  annotation(Evaluate=true, HideResult=true, choices(checkBox=true));
13  parameter Boolean use_set = false "= true, if set port enabled and used as reinitialization value
when reset"
14  annotation(Dialog(enable=use_reset), Evaluate=true, HideResult=true, choices(checkBox=true));
15
16  /* InitialState is the default, because it was the default in Modelica 2.2
17  and therefore this setting is backward compatible
18  */
19  parameter Init initType=Init.InitialState
20  "Type of initialization (1: no init, 2: steady state, 3,4: initial output)"
21  annotation(Evaluate=true, ...);
22  parameter Real y_start=0 "Initial or guess value of output (= state)"
23  annotation (Dialog(group="Initialization"));
24  extends Interfaces.SISO(y(start=y_start));
25  Modelica.Blocks.Interfaces.BooleanInput reset if use_reset "Optional connector of reset signal"
26  annotation(Placement( ... ));
30  Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput set if use_reset and use_set "Optional connector of set
signal" annotation(Placement( ... ));
35  protected
36  Modelica.Blocks.Interfaces.BooleanOutput local_reset annotation(HideResult=true);
37  Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput local_set annotation(HideResult=true);
38
39  initial equation
40  if initType == Init.SteadyState then
    
```

شکل ۱۱-۴: Text View

و شکل آخر، Documentation View نام دارد که مستندی از بلوک مورد نظر است. به عنوان مثال مستند بلوک Integrator به صورت زیر است:

## Modelica.Blocks.Continuous.Integrator

### Information

This block computes output **y** as *integral* of the input **u** multiplied with the gain **k**:

$$y = \frac{k}{s} u$$

It might be difficult to initialize the integrator in steady state. This is discussed in the description of package [Continuous](#).

If the *reset* port is enabled, then the output **y** is reset to *set* or to *y\_start* (if the *set* port is not enabled), whenever the *reset* port has a rising edge.

Filename: E:/Hardware/lib/omlibrary/Modelica  
4.0.0/Blocks/Continuous.mo  
Version: 4.0.0, 2020-06-04

شکل ۱۲-۴: Documentation View

در ادامه به توضیح بلوک‌های مورد استفاده از کتابخانه مدلیکا در پروژه می‌پردازیم تا با نوع کار سامانه آشنا شویم.

## PWM

مدولاسیون پهنای پالس یا PWM روشی برای تنظیم توان الکتریکی بار، با تغییر دادن زمان قطع و وصل شدن منبع توان به بار در هر سیکل است.

مدولاسیون پهنای پالس، در مهندسی الکترونیک و کنترل، کاربردهای گوناگونی دارد.

بخش اصلی PWM، یک سیگنال کنترلی به شکل موج مربعی (پالس) است، به طوری که دوره کاری پالس‌ها، در هر دوره تناوب موج (هر سیکل)، قابل تنظیم است. دوره کاری، نسبت مدت High بودن موج مربعی به دوره تناوب آن است، و بر حسب درصد بیان می‌شود. در واقع این سیگنال، قطع و وصل شدن منبع توان به بار را تعیین می‌کند (با کنترل باز و بسته شدن یک سوئیچ الکترونیکی).

مثلاً اگر دوره کاری موج مربعی، ۴۰٪ باشد، در ۴۰٪ هر دوره تناوب، بار به منبع توان وصل است و در باقی آن، قطع می‌شود. در این حالت، متوسط توان بار، ۴۰٪ توان منبع خواهد بود.

اگر یک میکروکنترلر با تغذیه ۵ ولت ( $V_{CC}$ ) سیگنال PWM با دوره کاری ۵۰٪ تولید کند، متوسط موج مربعی تولیدشده، برابر نصف  $V_{CC}$  یا ۲٫۵ ولت خواهد بود. به طور کلی، اگر دوره کاری با D نشان داده شود، متوسط ولتاژ، برابر با  $V_{CC}D$ ، و RMS آن، برابر با  $V_{CC}(D)^{0.5}$  می‌شود.

## H-Bridge

پل اچ یا H-bridge، نوعی مبدل است که در مدارات الکترونیکی یا الکترونیک قدرتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از خصوصیات مبدل تمام پل این است که ولتاژ و جریان خروجی آن، می‌تواند دارای هر جهت جریان یا پلاریته ولتاژی باشد. این مدارها عموماً در رباتیک و دستگاه‌های دیگر برای راه‌اندازی موتور در جهت مستقیم و معکوس استفاده می‌شوند. پل‌های اچ به صورت تراشه در دسترس هستند. همین‌طور می‌توان آن‌ها را با قطعات جدا از هم نیز ساخت.

از کاربردهای این مبدل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تغذیه موتورهای جریان مستقیم و کنترل‌کننده‌های موتور
- تبدیل جریان مستقیم به جریان متناوب تک‌فاز (Inverter)
- تبدیل جریان مستقیم به جریان متناوب فرکانس بالا



## القاگر

القاگر یک قطعه الکترونیکی، غیرفعال و معمولاً دو-پایانه‌ای است که به آن پیچه یا سیم‌پیچ یا سلف نیز می‌گویند. القاگر، در برابر تغییرهای جریان الکتریکی مقاومت می‌کند. این افزاره معمولاً از رسانایی مانند یک سیم که به صورت سیم‌پیچ درآمده است و به دور هسته‌ای از جنس آهن یا کربن خاص تشکیل می‌شود.

هنگامی که جریان الکتریکی از القاگر بگذرد، میدان مغناطیسی درونش ایجاد می‌شود و انرژی در این میدان مغناطیسی موقت ذخیره می‌شود. وقتی شدت جریان الکتریکی تغییر کند، میدان مغناطیسی متغیر با زمان، ولتاژی را در رسانا القا می‌کند و بر اساس قانون القای الکترومغناطیسی فارادی، این ولتاژ مانع از تغییر جریانی می‌شود که در القاگر قرار داشت؛ بنا بر قانون لِنز، مسیر یک نیروی محرکه الکتریکی (emf) مخالف مسیر جریانی است که آن را سبب شده است.

مشخصه اصلی القاگر، القاوری است که یکایش در دستگاه بین‌المللی یکاها (SI)، هنری است و با (H) نمایانده می‌شود؛ که به نام جوزف هنری، دانشمند و مهندس آمریکایی سده نوزدهم میلادی، نامگذاری شده است.

بیشتر القاگرها هسته‌ای مغناطیسی، ساخته‌شده از آهن دارند که سیم‌پیچ به دور آن‌ها بسته می‌شود و باعث افزایش میدان مغناطیسی و القاوری می‌شود.

---

مقاومت‌ها، خازن‌ها و القاگرها از عناصر خطی و غیرفعال تشکیل دهنده مدارهای الکترونیکی هستند. از القاگرها به‌طور گسترده در سامانه‌هایی که با جریان متناوب کار می‌کنند، استفاده می‌شود.

از القاگرها برای جلوگیری از عبور سیگنال با فرکانس زیاد نیز استفاده می‌شود؛ زیرا القاگر، جریان مستقیم را می‌گذراند، اما مانع از گذر جریان متناوب با فرکانس زیاد می‌شود. القاگرهایی که به این منظور طراحی شده‌اند، چوک نامیده می‌شوند. از دیگر کاربردهای القاگر می‌توان به استفاده از آن‌ها در فیلترهای الکترونیکی برای جداسازی سیگنال‌ها با بسامدهای گوناگون و در مدارهای تیونر (تنظیم کننده) گیرنده‌های رادیو و تلویزیون نام برد.

## موتور DC

موتور DC یا جریان مستقیم، موتور الکتریکی است که با جریان مستقیم کار می‌کند. این موتور، انرژی الکتریکی جریان مستقیم را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند.

همه موتورهای جریان مستقیم به یک مکانیسم داخلی (مکانیکی یا الکترونیکی) برای تغییر مداوم جهت جریان در آرمیچر موتور نیاز دارند. به این مکانیسم، کوموتاسیون می‌گویند.

اکثر موتورهای DC حرکت چرخشی دارند، به جز موتورهای خطی که حرکت خطی دارند (نمی‌چرخند).

موتورهای DC دارای گشتاور راه‌اندازی بالا و قابل تغییر هستند و کاربرد بسیاری در صنعت دارند. سرعت موتور DC با روش‌های مختلفی قابل کنترل است؛ از جمله با تغییر ولتاژ تغذیه (مثلاً به روش PWM)، یا تغییر جریان سیم‌پیچ‌های موتور.

موتورهای DC با ابعاد کوچک در ابزارآلات برقی و لوازم برقی خانگی، اسباب‌بازی‌ها ... و با ابعاد بزرگ در آسانسورها، خودروهای الکتریکی، بالابرها و در کارخانه‌های نورد لوله و فولاد استفاده می‌شوند. همچنین این موتورها در کاربردهای صنعتی که به کنترل دقیق سرعت و گشتاور نیاز دارند، استفاده‌های فراوان دارند.

## گشتاور

گشتاور نیرو عاملی است که باعث دَوَران یا چرخش جسم می‌شود، همان‌گونه که نیرو باعث حرکت جسم می‌شود. به عبارت دیگر، اثر گشتاور در حرکت چرخشی، مانند اثر نیرو در حرکت انتقالی است.

برای مثال، برای باز کردن در، نیرویی از راه دستگیره (عمود بر در) به آن وارد می‌کنیم تا در به دور محور چرخش (لولا)، بگردد. اگر نیرو به لولا نزدیکتر باشد یا زاویه نیرو با در کمتر از  $90^\circ$  درجه باشد، باید نیروی بیشتری نسبت به حالت قبل به در وارد کنیم تا در به مانند قبل بگردد. پس گشتاور نیرو هم با مقدار نیرو و زاویه اعمال آن و هم با فاصله آن از محور چرخش رابطه مستقیم دارد.

گشتاور از رابطه  $\mathbf{r} \times \mathbf{F}$  به دست می‌آید که در آن،  $r$  فاصله نقطه وارد شدن نیرو تا تکیه‌گاه، یا فاصله تا مرکز جرم جسم است.

گشتاور، کمیت بُرداری است. یکای آن در سامانه استاندارد بین‌المللی یکاها، نیوتن متر است.

## کنترلر PI

کنترلر PI از رایج‌ترین نمونه‌های الگوریتم کنترل بازخوردی است که در بسیاری از فرایندهای کنترلی نظیر کنترل سرعت موتور DC، کنترل فشار، کنترل دما و... کاربرد دارد. کنترل‌کننده PI مقدار «خطا» بین خروجی فرایند و مقدار ورودی مطلوب (setpoint) محاسبه می‌کند. هدف کنترل‌کننده، به حداقل رساندن خطا با تنظیم ورودی‌های کنترل فرایند است.

ضریب  $K_p$  سرعت سیستم را افزایش می‌دهد و خطای دائم را تا حدودی کاهش می‌دهد (اما صفر نمی‌کند). افزودن جمله انتگرالی (ضریب  $K_i$ ) خطای حالت دائم را صفر می‌کند، اما مقدار زیادی نوسانات ناخواسته (overshoot) به پاسخ گذرا اضافه می‌نماید.

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i \int_0^t e(x) dx$$

## Inertia

اینرسی یا لختی یا Inertia خاصیتی از یک جسم است که در برابر تغییر سرعت یا تغییر جهت حرکت جسم مقاومت می‌کند.

هر چه جرم یک جسم بیشتر باشد لختی آن بیشتر است. به قانون اول نیوتون قانون لختی نیز گفته می‌شود.

تمایل اجسام به حفظ حالت قبلی را لختی گویند.

قانون اول نیوتن می‌گوید هرگاه شی با سرعت ثابت در مسیری در حال حرکت باشد تا مادامی که نیروی خارجی به آن وارد نشود به حرکت خود در همان مسیر ادامه خواهد داد. توجه کنید که حرکت دایره‌ای یکنواخت، شتابدار است و بردار سرعت دائم تغییر می‌کند.

اینرسی، یا نیروی ذاتی ماده، قدرت مقاومتی است که با آن هر جرمی، به همان اندازه که آن توان در آن نهفته‌است، برای حفظ وضعیت کنونی خود تلاش دارد، چه این حالت، وضعیت سکون، یا حالت حرکت یکنواخت رو به جلو در یک خط مستقیم باشد.

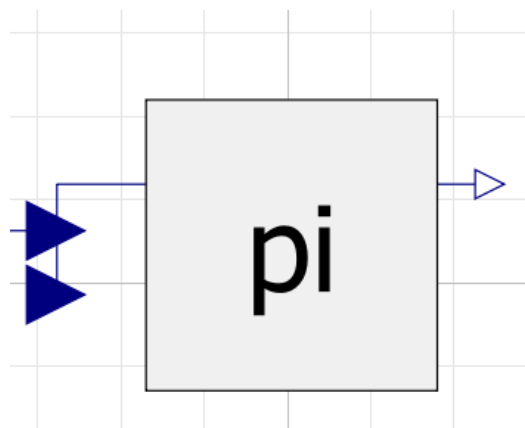
## فنر و Damper

برای جلوگیری از دریافت مستقیم ضربه، از فنر استفاده می‌شود. ضربه مستقیم آسیب جدی به سیستم وارد میکند و به همین دلیل حتما باید از فنر استفاده بشود.

اما Damper خودش کنترل کننده فنر است. درواقع فنر، ضربه را کنترل می‌کند و Damper نوسان را. این باعث می‌شود که فنر در نرود و کنترل سیستم از دست خارج نشود.

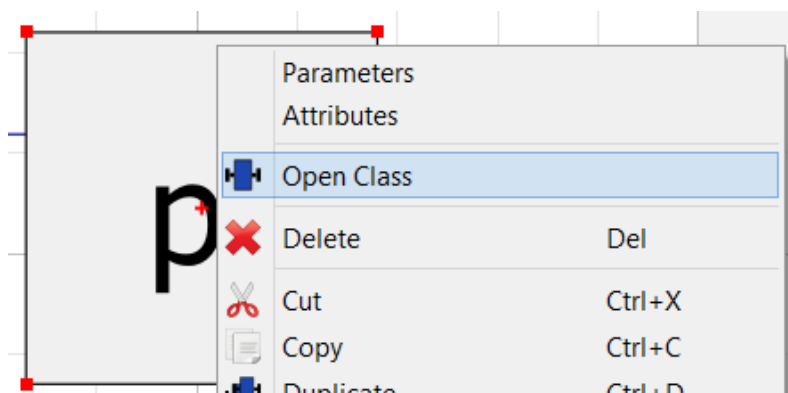
## طراحی و پیاده‌سازی

نرم‌افزار اپن‌مدلیکا و کتاب‌خانه آن؛ و زبان مدلیکا در طراحی مورد استفاده قرار گرفته است. ابتدا طراحی PI آغاز شد.

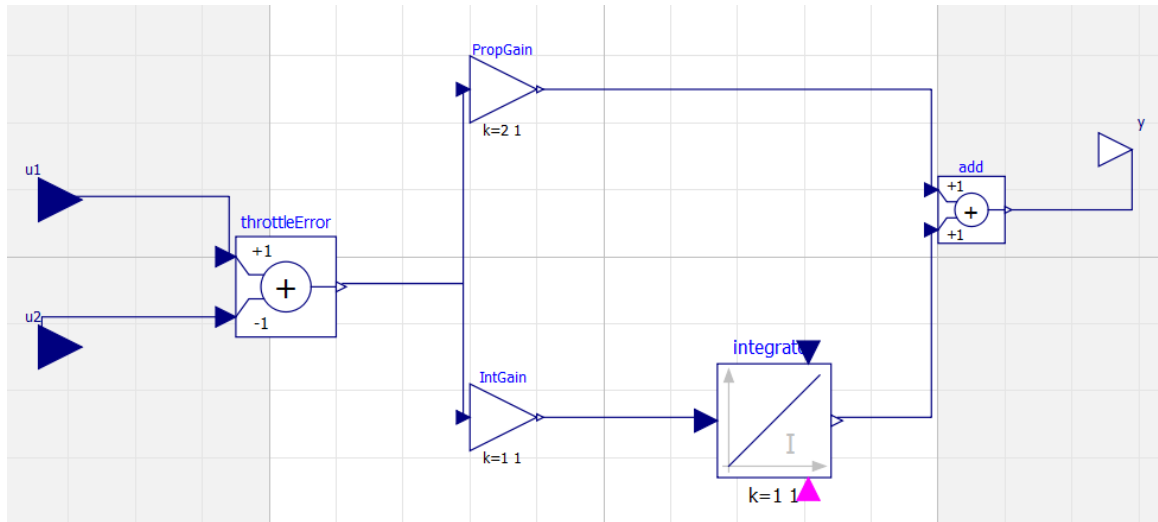


شکل ۱-۵: بلوک PI

با کلیک راست روی بلوک و انتخاب گزینه Open Class، وارد بلوک PI و طراحی آن می‌شویم.







شکل ۲-۵: داخل بلوک PI

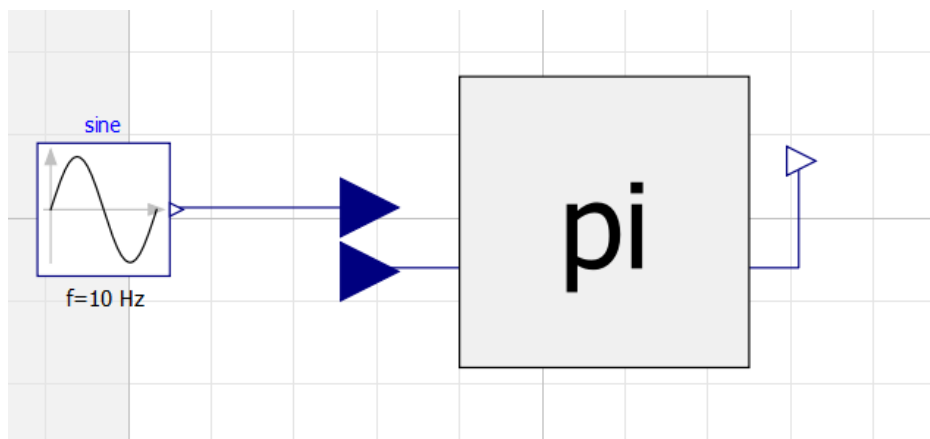
دو ورودی داریم و آن را به یک جمع‌کننده متصل کردیم. در جمع‌کننده قابلیت تعریف ضریب وجود دارد. پس ضریب یکی از ورودی‌ها را برابر منفی یک می‌گذاریم تا مقدار دو ورودی از یکدیگر کم بشود. اسم این جمع‌کننده بخصوص را **ThrottleError** گذاشتیم تا نمایان‌گر این باشد که خروجی، همان  $e(t)$  است.

سپس  $e(t)$  را به دو ضریب مختلف متصل می‌کنیم. یکی با نام **PropGain** که همان ضریب تناسبی ماست و دیگری با نام **IntGain** که همان ضریب انتگرال ماست.

سپس خروجی ضریب انتگرال به یک انتگرال‌گیر وصل می‌شود و در ادامه خروجی آن، به سمت یک جمع‌کننده می‌رود که دیگر ورودی آن همان  $K_p * e(t)$  می‌باشد.

حاصل نهایی، خروجی **PI** است.

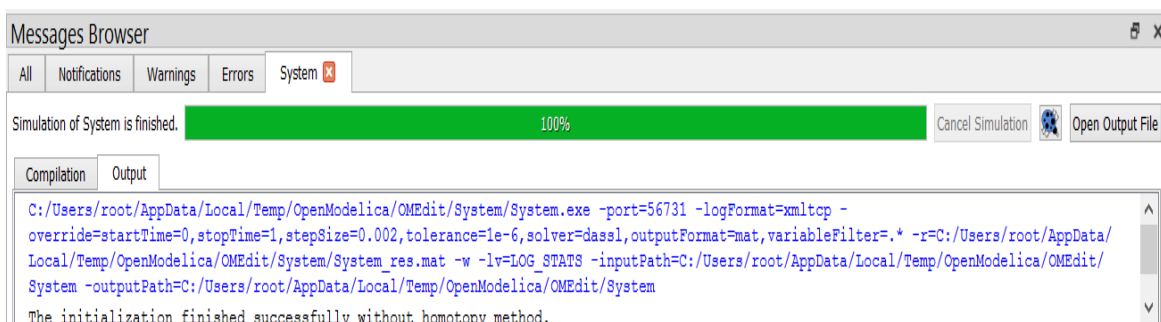
هر بخشی از سیستم، جدا جدا تست شد اما تست کردن ما، صرفاً برای اطمینان حاصل کردن از درستی اتصالات بوده و تست نهایی که هر سه بخش تکمیل است، منطق درستی دارد. اما به هر حال، تست بخش کنترلر PI به صورت زیر انجام شد:



شکل ۳-۵: اتصال ورودی برای تست PI

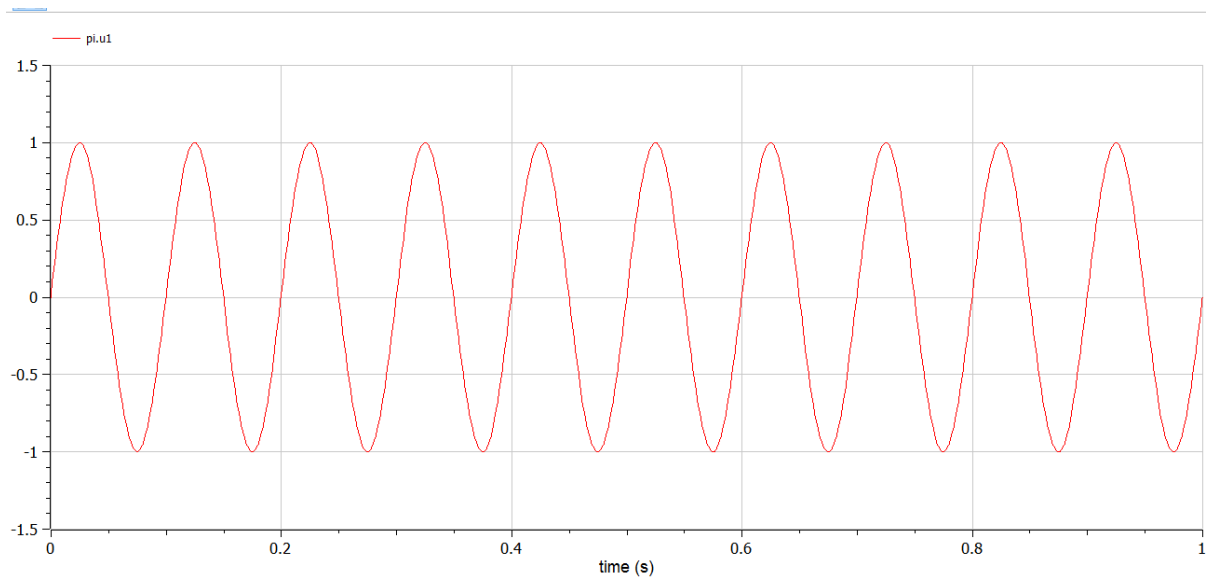
خروجی به ورودی متصل شده است؛ و ورودی دیگر را هر چیزی می‌توانیم بگذاریم. به عنوان مثال یک تابع سینوسی را به ورودی داده‌ایم.

مدل را کامپایل و سپس شبیه‌سازی می‌کنیم. اگر موفقیت آمیز باشد، این پنجره را خواهیم دید.



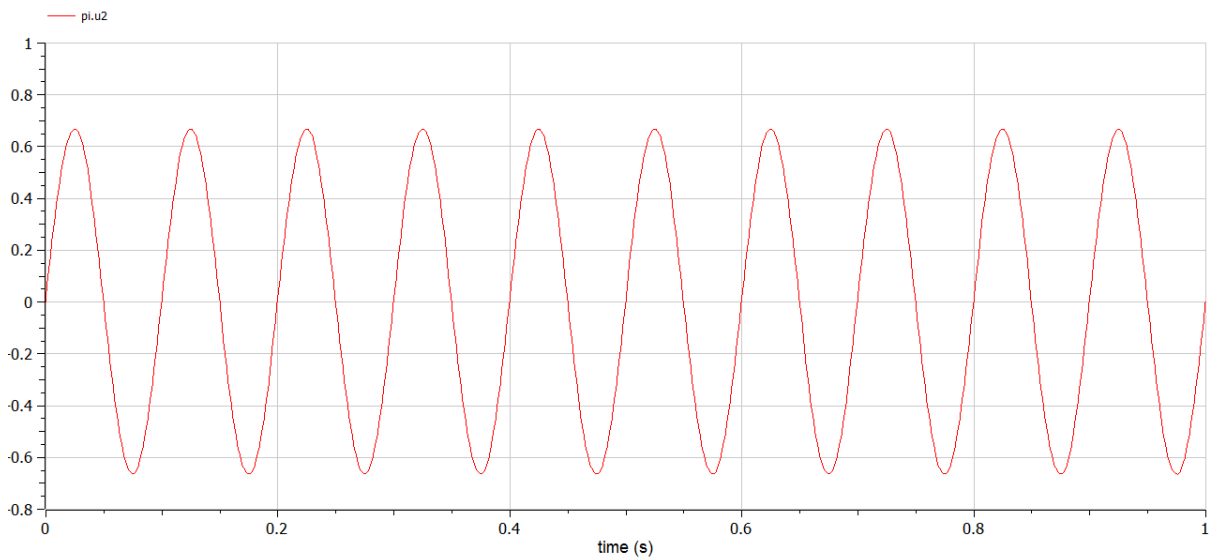
شکل ۴-۵: موفقیت آمیز بودن شبیه‌سازی

ورودی اول که به صورت سینوسی دادیم، به شکل زیر است:



شکل ۵-۵: ورودی سینوسی

ورودی دوم که به صورت فیدبک داده بودیم، از صفر شروع شده و به صورت زیر ادامه میابد:



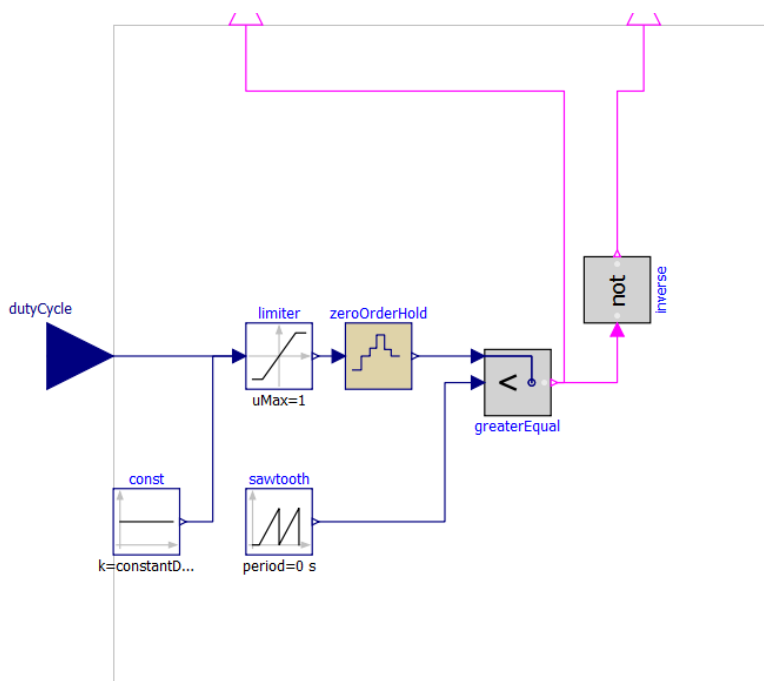
شکل ۵-۶: فیدبک

مشخصا در این نوع تست، ورودی دوم مقدار برابری با خروجی PI دارد چون به همدیگر مستقیم متصل است.

اما متوجه شدیم که PI درست کار می‌کند. در ادامه که بخش‌های دیگر طراحی شوند و به هم متصل شوند، خروجی PI بهتر قابل درک خواهد بود.

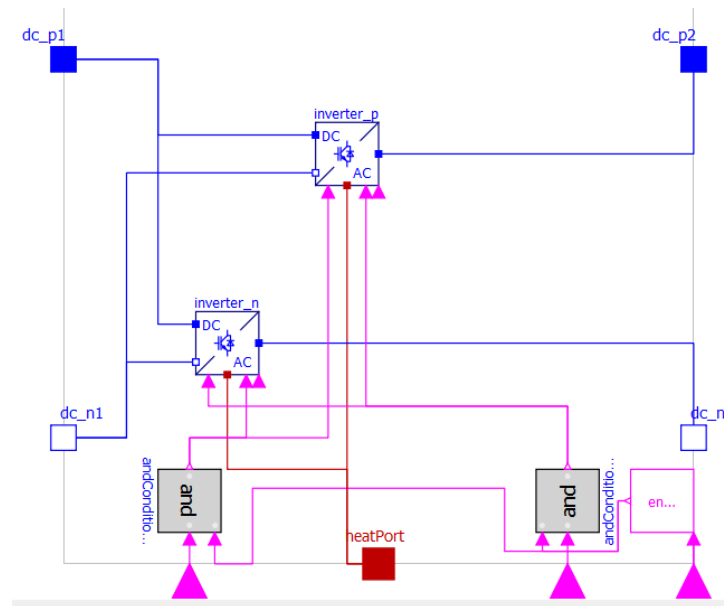
پس به طراحی موتور DC می‌پردازیم.

ابتدا به یک قطعه‌ای نیاز داریم با نام **Pulse Width Modulation** یا به اختصار **PWM**. این قطعه برای کنترل قدرت استفاده می‌شود به این صورت که سیگنالی که دریافت می‌کند را تکه تکه می‌کند و به صورت گسسته تحویل می‌دهد. درواقع انگار خروجی به صورت دیجیتال خواهد بود. این قطعه در این مدلیکا موجود است و به صورت زیر طراحی شده است.



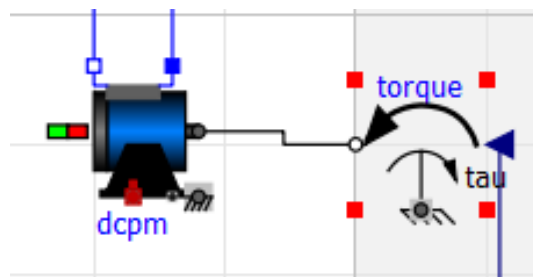
شکل ۷-۵: داخل بلوک PWM

برای کنترل جهت/قطبیت و سرعت موتور DC از قطعه‌ای با نام پل اچ استفاده می‌شود که شکل مدارش شبیه حرف H است. این قطعه نیز در این مدل‌یکا موجود است و به صورت زیر طراحی شده است.



شکل ۸-۵: داخل بلوک پل اچ

در انتها نیز یک موتور DC می‌خواهیم که به آن یک Torque یا گشتاور یا نیروی پیچشی متصل است و این نیروی پیچشی قدرت موتور را مشخص میکند.



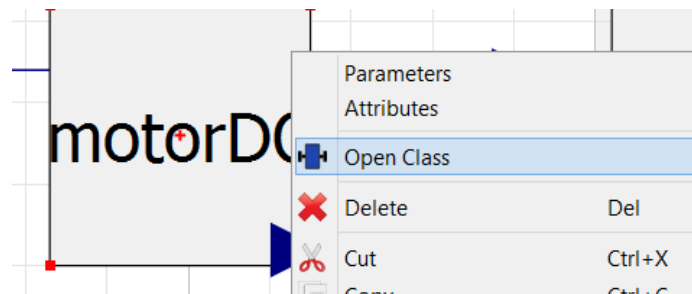
شکل ۹-۵: گشتاور و موتور DC

در بخش قبل کنترلر PI را طراحی کردیم. ورودی به DC Motor باید از جنس ولتاژ باشد. پس خروجی کنترلر PI که به عنوان ورودی به DC Motor داده می‌شود، باید به ولتاژ تبدیل شود. از قطعه‌ای با نام signalVoltage استفاده می‌کنیم که یک سیگنالی را ورودی می‌گیرد و خروجی را به صورت ولتاژ تحویل می‌دهد. حال ولتاژی که داریم را به PWM متصل کرده تا خروجی دیجیتال دریافت کنیم و سپس آن را به پل اچ خود متصل می‌کنیم.

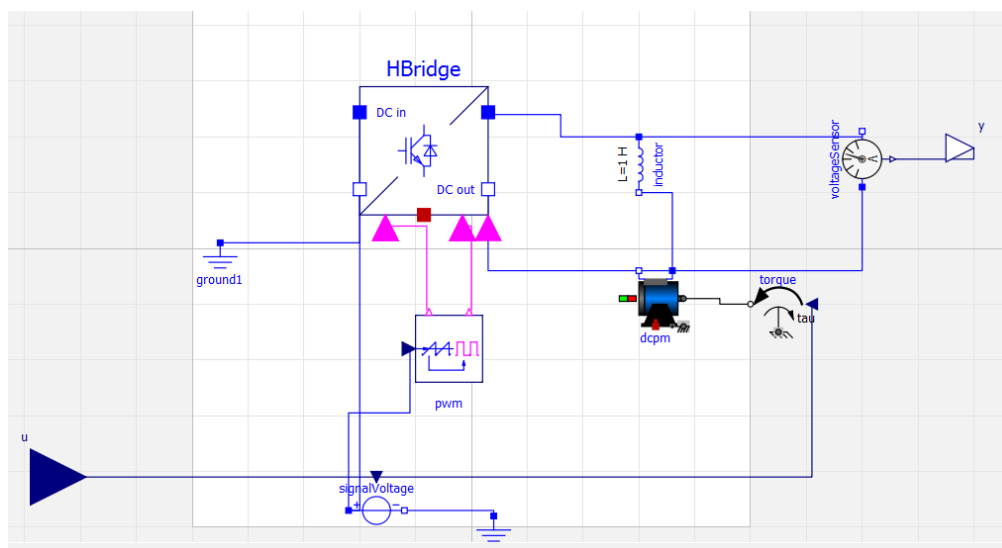
چالشی در اینجا به وجود آمد. اینکه کدام پورت به کدام پورت در قطعات باید متصل شود کمی گنگ بود اما خوشبختانه در خود اپن‌مدلیکا چندین مثال وجود داشت و مانند همان نیز اتصالات را انجام دادیم. همچنین قطعه پل اچ نیاز به اتصال به یک ولتاژ ثابت را داشت که آن نیز انجام شد.

چالش بعدی اتصال گشتاور و موتور و پل اچ بود. و موضوع چالش نیز باز چگونگی اتصالات بود که آن هم با مثال‌های موجود در اپن‌مدلیکا و کمک از آن انجام شد. اما در تمام مثال‌ها یک قطعه دیگر نیز به کار گرفته شده بود که در [ویدیویی](#) که برای پروژه رفرنس داده شده بود، استفاده نشده بود. آن قطعه، القاگر یا Inductor بود. همانطور که میدانیم، القاگر یک قطعه ذخیره‌کننده انرژی است. در اغلب مدارها استفاده می‌شود و در مثال‌های اپن‌مدلیکا نیز استفاده شده بود. به همین دلیل در طراحی خود نیز از القاگر استفاده کردیم.

سپس یک سنسور اندازه‌گیری ولتاژ قرار دادیم تا به عنوان خروجی از DC Motor خارج شود به سمت دریچه گاز برود.



بلوک مورد نظر با نام motorDC در مدل System قرار داده شده است. اگر Open class را انتخاب کنید، با طراحی‌ای که انجام دادیم مواجه خواهید شد.



شکل ۱۰-۵: داخل بلوک motorDC

و اما طراحی بدنه دریچه گاز:

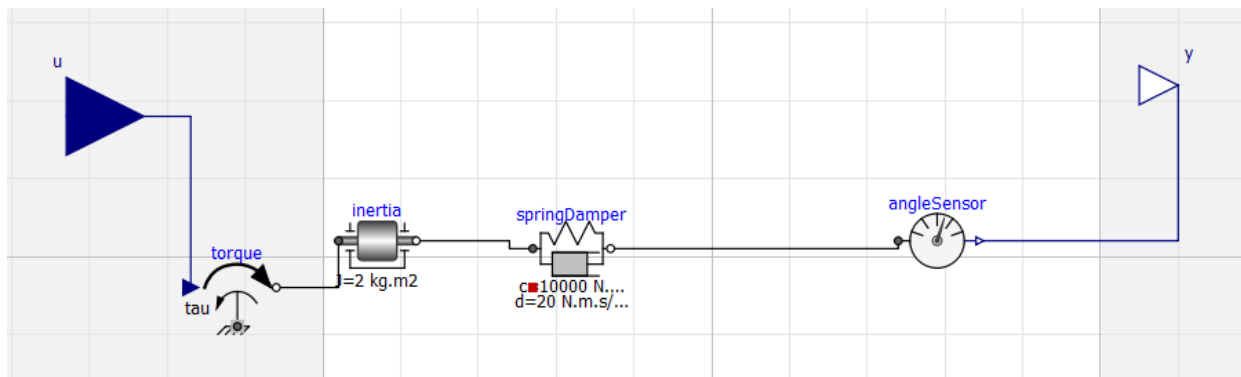
بدنه Throttle یا دریچه گاز، طبق [فرنیسی](#) که داده شد، شامل اجزای زیر است:

فنر – دمپر – قطعه‌ای با نام hard stop – اینرسی – سنسور تشخیص زاویه.

مشکل این است که قطعه‌ای با نام Hard Stop در این مدلیکا وجود ندارد.

به همین دلیل طراحی این بخش صرفاً بدون Hard Stop بوده و همچنین چالش دیگر، نحوه اتصالات بوده و همچنین اعدادی

که به عنوان پارامتر باید به فنر و دمپر و ... داد.



این شکل در ادامه تغییر خواهد کرد (به سبب تست)

همچنین برخلاف [فرنیسی](#)، طبق مثال‌هایی که در این مدلیکا مشاهده شد، همواره به اینرسی یک گشتاور متصل بوده. در ادامه تمام

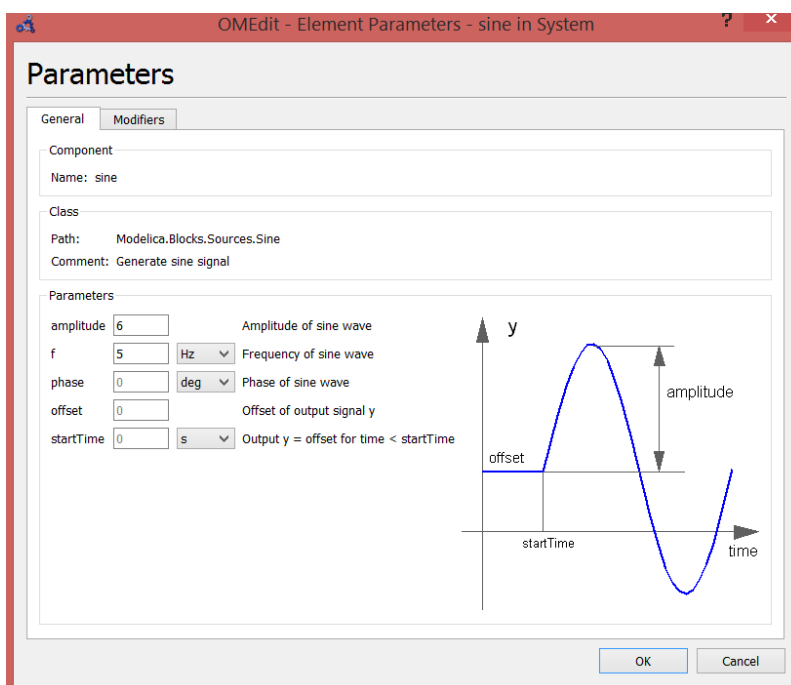
بخش‌ها به هم متصل شده و تست گرفته خواهد شد.



## تست

## تست اول:

ورودی به صورت سینوسی با فرکانس ۵ هرتز و amplitude برابر ۶ است.



شکل ۱-۶: تنظیمات ورودی سینوسی

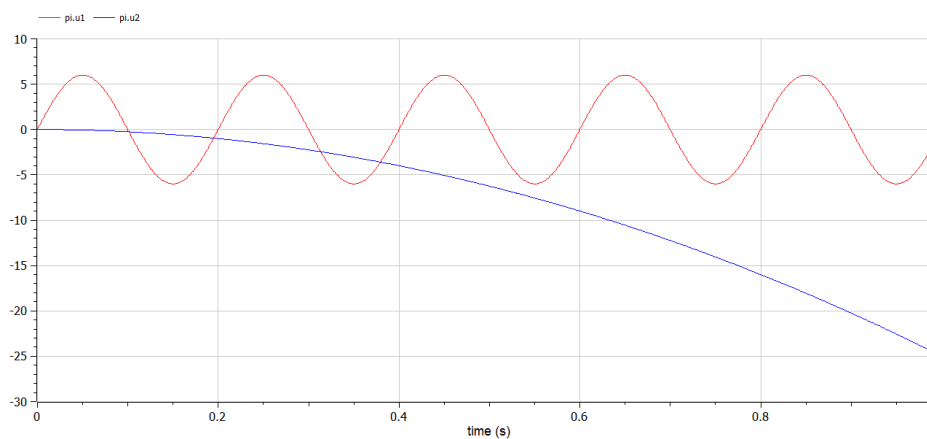
درون مدل PI، نیاز به دادن دو نوع مقدار داریم. ضریب تناسبی و ضریب انتگرال. اولی را برابر دو و دومی را برابر یک قرار دادیم.

درون مدل motorDC، یک ولتاژ ثابتی به پل اچ متصل است که مقدار آن را 100V قرار دادیم.

همچنین به گشتاور متصل به موتور، یک ورودی سینوسی مشابه به پدال گاز متصل است. درون مدل ThrottleBody، پارامتر

اینرسی با عنوان moment of inertia را برابر  $J = 2 \text{ kg.m}^2$  قرار دادیم و همچنین یک فنر و دمپر داریم.

در فنر، ثابت فنر را برابر  $c = 10000 \text{ N.m/rad}$  قرار داده و ثابت دمپر را برابر  $d = 20 \text{ N.m.s/rad}$ .



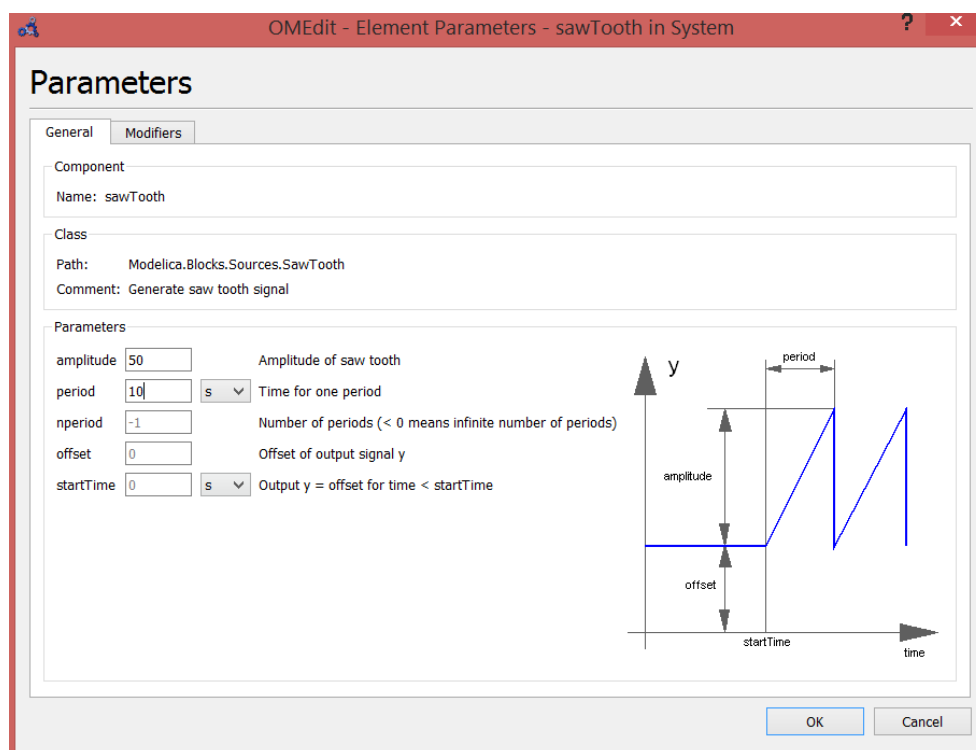
شکل ۲-۶: نتیجه تست اول

نمودار تست به شکل بالاست. خط نارنجی، ورودی پدال و خط آبی زاویه دریچه گاز است.

ولتاژ ورودی (پدال گاز)	به صورت مثلثی و ولتاژ حداکثر ۶ ولت
Proportional Gain	۲
Integral Gain	۱
ضریب القایگر	۱ H
ثابت inertia	۲ $\text{Kg.m}^2$
ثابت Damper	۲۰ $\text{N.m.s/rad}$
ثابت فنر	۱۰۰۰۰ $\text{N.m/rad}$

## تست دوم:

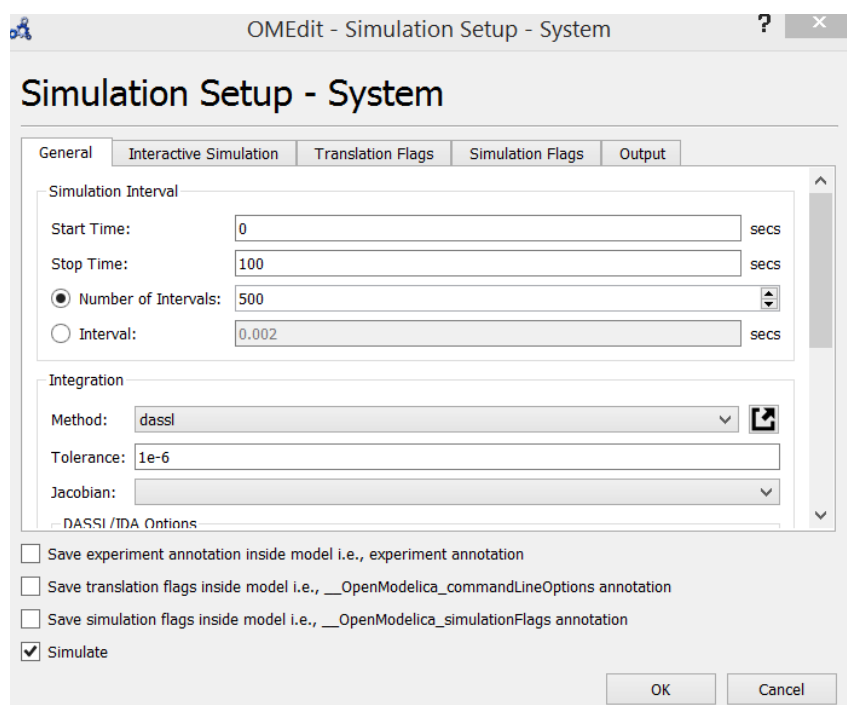
ورودی پدال شبیه یک ورودی به صورت مثلثی است. در این مدلیکا چنین تابعی را یافتیم با نام SawTooth که شبیه اره و دندان است.



شکل ۳-۶: تنظیمات ورودی اره‌ای

متغیرهای آن یعنی amplitude را برابر ۵۰ و دوره را برابر ۱۰ گذاشتیم.

همچنین زمان شبیه‌سازی آزمایش را ۱۰۰ ثانیه گذاشتیم به صورت زیر:



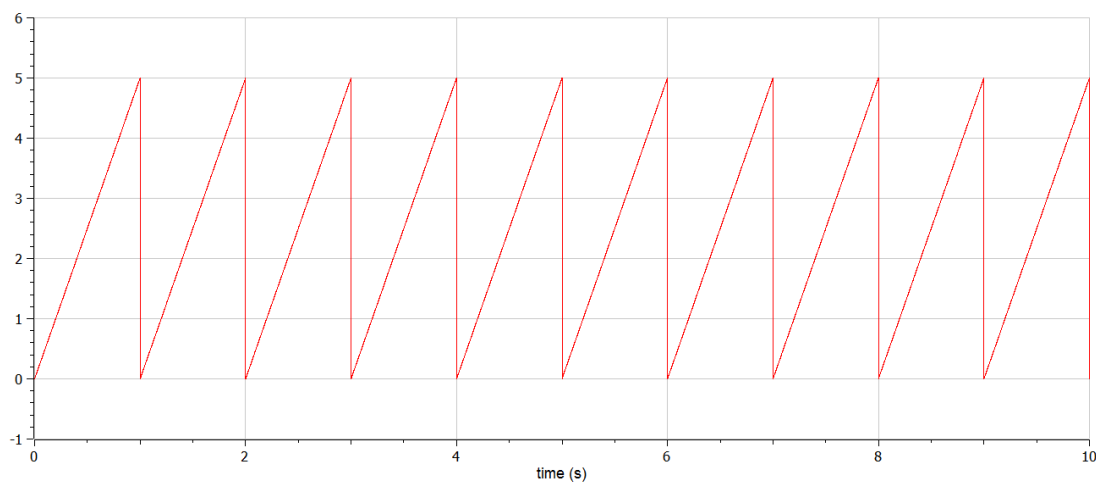
شکل ۴-۶: تنظیمات شبیه‌سازی

سایر موارد را دست‌نمیزنیم تا مشاهده کنیم چه جاهایی نیاز به تغییر دارد. پس نمودار ورودی و خروجی:

متأسفانه کامپایل و ران کردن آن بسیار طول کشید و جواب نداد. زمان خیلی زیاد، بسیار کند اجرا می‌شود. علت شکست این تست به این دلیل است.

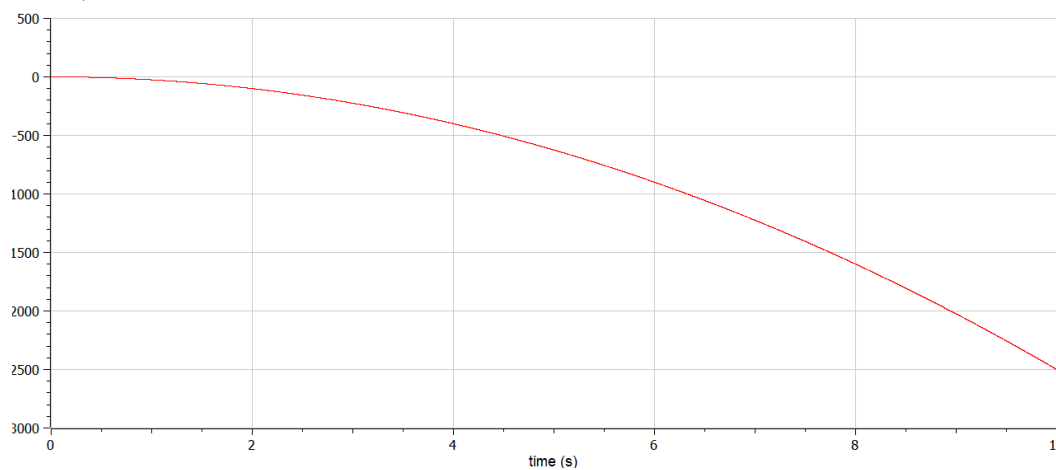
## تست سوم:

ورودی را با amplitude برابر ۵ و دوره برابر ۱ میگذاریم و شبیه‌سازی را به مدت ۱۰ ثانیه انجام می‌دهیم. ورودی و خروجی:



شکل ۵-۶: ورودی در تست سوم

ورودی به صورت بالاست اما خروجی تغییری نکرد:

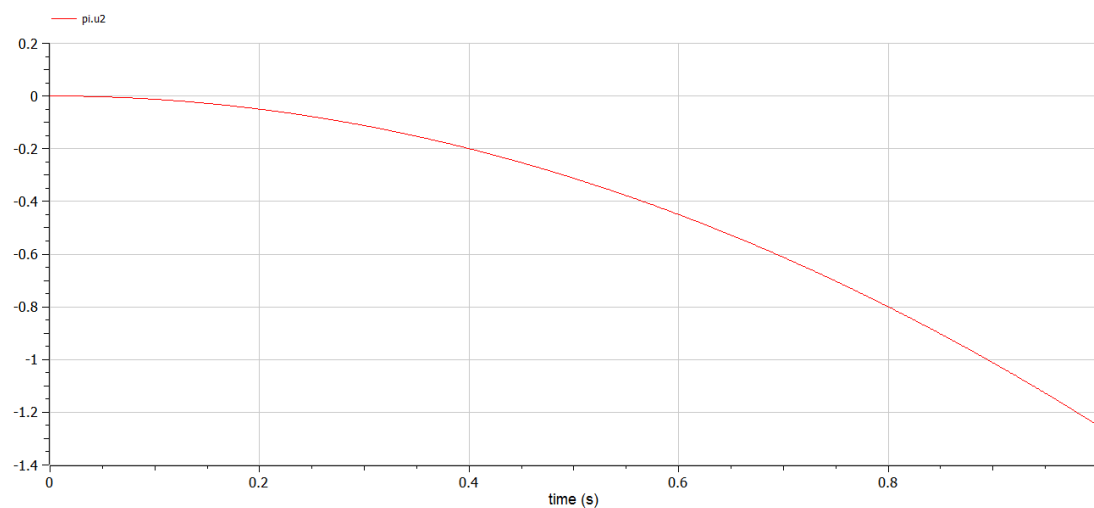


شکل ۶-۶: خروجی در تست سوم

پس مشخص شد که مشکل از ورودی نیست و باید سایر متغیرها را تغییر داد.

### تست چهارم:

گفتیم به پل اچ یک ولتاژ ثابت ۱۰۰ ولتی متصل است. مقدار آن را ۵ ولت کردیم. تغییری ایجاد نشد جز اینکه انگار این ولتاژ ثابت، amplitude خروجی را مشخص میکند؛ چونکه صرفاً خروجی  $1/20$  شد.



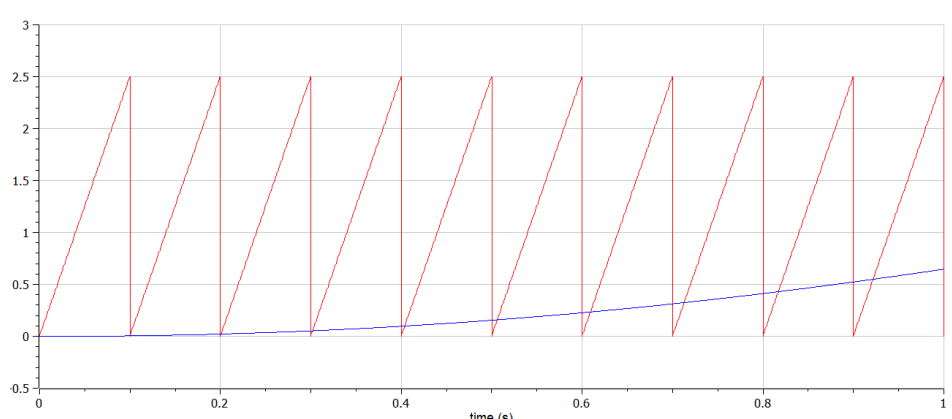
شکل ۷-۶: خروجی تست چهارم

در ادامه چندین تست انجام شد (حدود ۷ تست) و همگی ماهیتی یکسان داشتند و یکسری تغییرات در تست بعدی یعنی تست دوازدهم انجام شد.

## تست دوازدهم:

ورودی اره‌ای را با  $\text{amplitude}$  برابر ۲,۵ و دوره برابر ۰,۱ دادیم. همچنین گشتاور درون  $\text{motorDC}$  که یک ورودی نیاز داشت را به خروجی  $\text{PI}$  متصل کردیم. علت آن این است که حس کردیم خروجی  $\text{PI}$  باید به نوعی به طور مستقیم به موتور  $\text{DC}$  نیز تاثیر بگذارد. به هر حال می‌توانستیم هر نوع ورودی‌ای بدهیم.

با این کار، خروجی اینبار تغییر یافت. نمودار ورودی و خروجی به شکل زیر است. ورودی به رنگ نارنجی و خروجی به رنگ آبی:

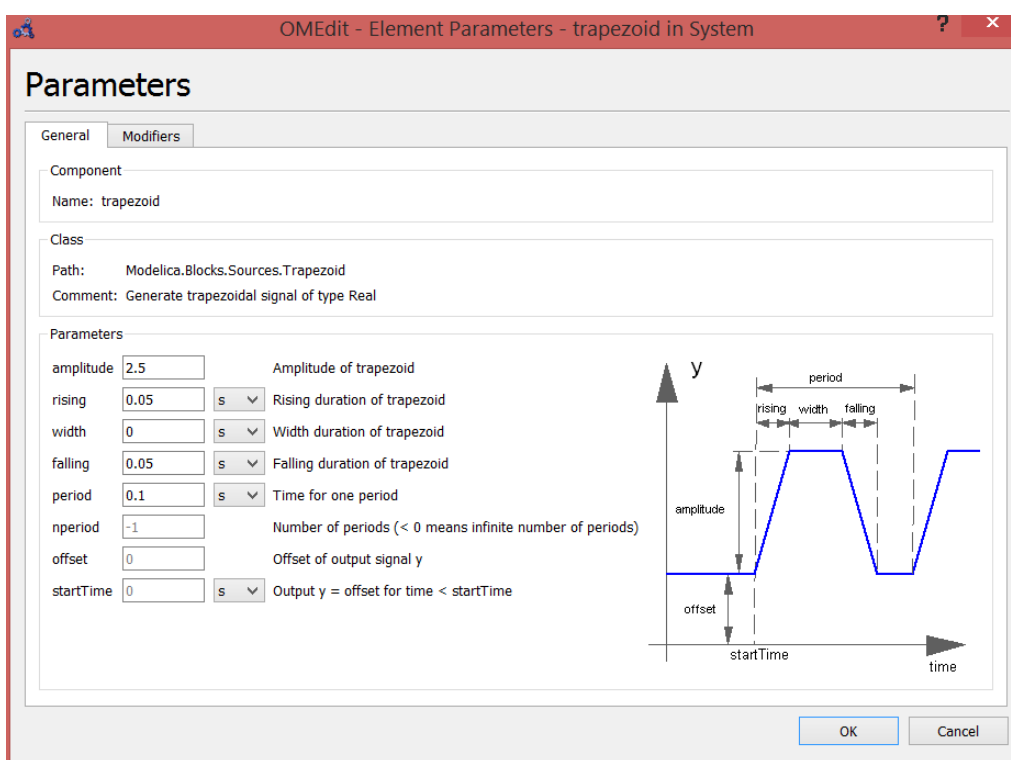


ولتاژ ورودی (پدال گاز)	به صورت اره‌ای و ولتاژ حداکثر ۲,۵ ولت
Proportional Gain	۲
Integral Gain	۱
ضریب القایگر	۱ H
ثابت inertia	۲ $\text{Kg.m}^2$
ثابت Damper	۲۰ $\text{N.m.s/rad}$
ثابت فنر	۱۰۰۰۰ $\text{N.m/rad}$

## تست سیزدهم:

ورودی پدال را در آزمایشات قبلی به صورت مثلث قائم الزاویه یا اره‌ای میدادیم اما باید متساوی الساقین باشد. در این مدلیکا چنین تابعی نداریم ولی یک راهکاری پیدا شد.

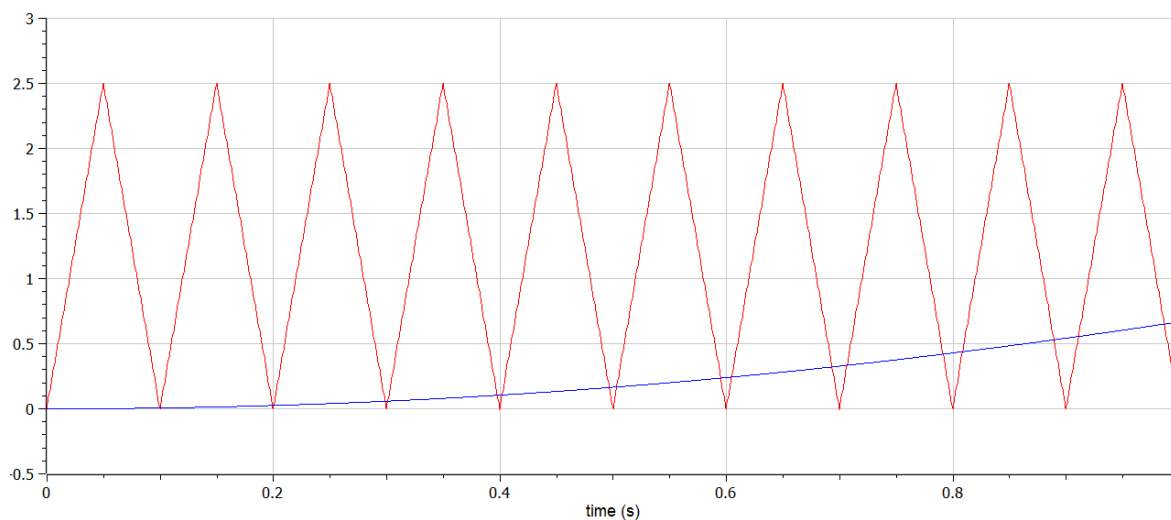
ورودی را به صورت Trapezoid تعریف کردیم، اما مدت زمان پهنای Trapezoid را برابر صفر قرار داده تا عملاً یک مثلث تشکیل شود.



شکل ۸-۶: تنظیمات ورودی تست ۱۳



ورودی مثلثی و سایر موارد را تغییر ندادیم. خروجی به شکل زیر است. ورودی با رنگ نارنجی و خروجی به رنگ آبی:

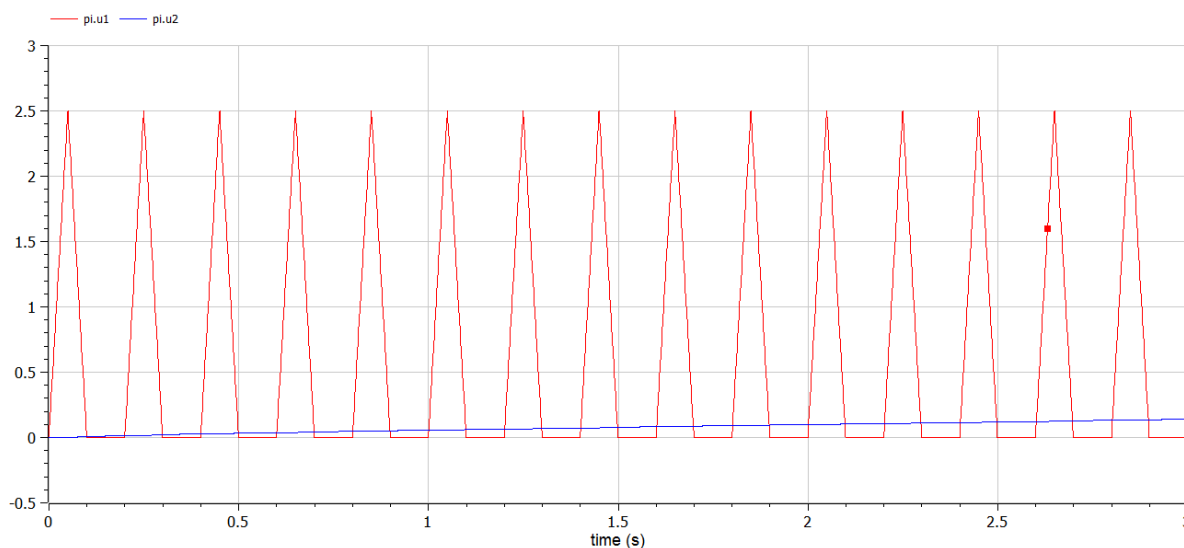


خروجی با تست قبلی تفاوتی نکرد.

چندین تست انجام شد و به نتایج زیر رسیدیم:

ضریب تناسبی را برابر ۲,۵ و ضریب انتگرال را برابر ۸ قرار می‌دهیم. همچنین در تست‌ها متوجه شدیم که مشکل اینکه خروجی تا بی‌نهایت در حال زیاد شدن است، از طراحی بدنه درپچه است. بنابر دلایلی، هر نوع ورودی‌ای که وارد بدنه می‌شود، همواره تا بی‌نهایت زیاد می‌شود. از آنجا که طراحی شبیه مدل سیمولینک انجام شد، احتمال دادیم که این مدلیکا جور دیگری سیستم را شبیه‌سازی میکند.

فتر و دمپر را بعد از چند تست متوجه شدیم که اگر یک سر آن به یک محیط ثابت متصل باشد، خروجی قابل قبول‌تر است. همچنین ثابت فتر را برابر ۱۰۰ گذاشتیم. همچنین ورودی را مثلث‌هایی با فاصله از هم گذاشتیم. شکل به صورت زیر است. ورودی به رنگ نارنجی و خروجی به رنگ آبی:



شکل ۹-۶: نتیجه این تست

مشخص است که خروجی یک حدی در بالا دارد و مانند خروجی قبل نیست. حال باید متغیرها را دوباره عددگذاری‌های مختلف کرد تا شکل بهتری دربیاید.

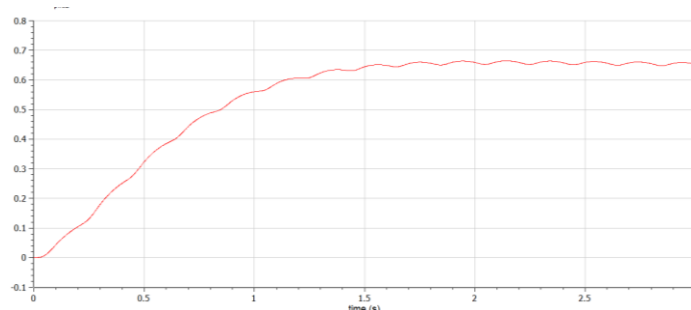
ولتاژ ورودی (پدال گاز)	به صورت مثلثی و ولتاژ حداکثر ۲.۵ ولت
Proportional Gain	۲.۵
Integral Gain	۸
ضریب القایگر	۱ H
ثابت inertia	۲ Kg.m <sup>2</sup>
ثابت Damper	۲۰ N.m.s/rad
ثابت فنر	۱۰۰ N.m/rad

## تست بعدی:

۱۶	Proportional Gain
۱۰ N.m/rad	ثابت فنر
۱۰ N.m.s/rad	ثابت دمپر

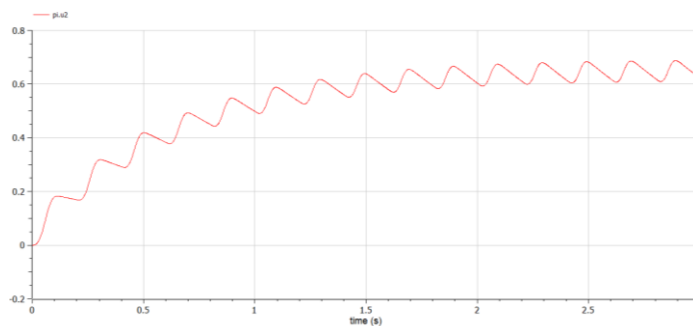
Prop gain را برابر ۱۶ و int gain را برابر ۸. همچنین ثابت فنر برابر ۱۰ و ثابت دمپر برابر ۱۰. برای درک بهتر خروجی، فقط

خروجی را نمایش می‌دهیم که دوباره شکل قابل قبول‌تری به خود گرفت

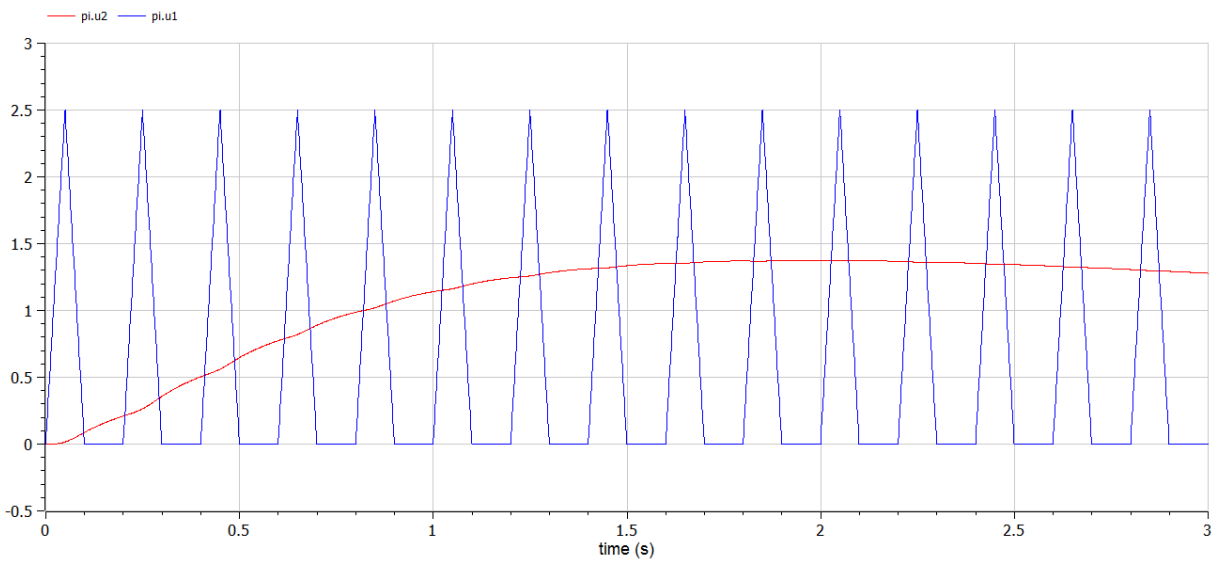


این شکل به دقت خروجی ویدیو [رفرنس](#) نیست اما قابل مشاهده است که صرفاً متغیرهای عددی همانند ثابت فنر یا Prop Gain مناسبی نیاز است تا شکل بهتر شود؛ وگرنه منطق سیستم درست است.

در شکل بعدی، ثابت inertia را از ۲ به ۰.۱ تغییر دادیم و خروجی به این شکل شد:

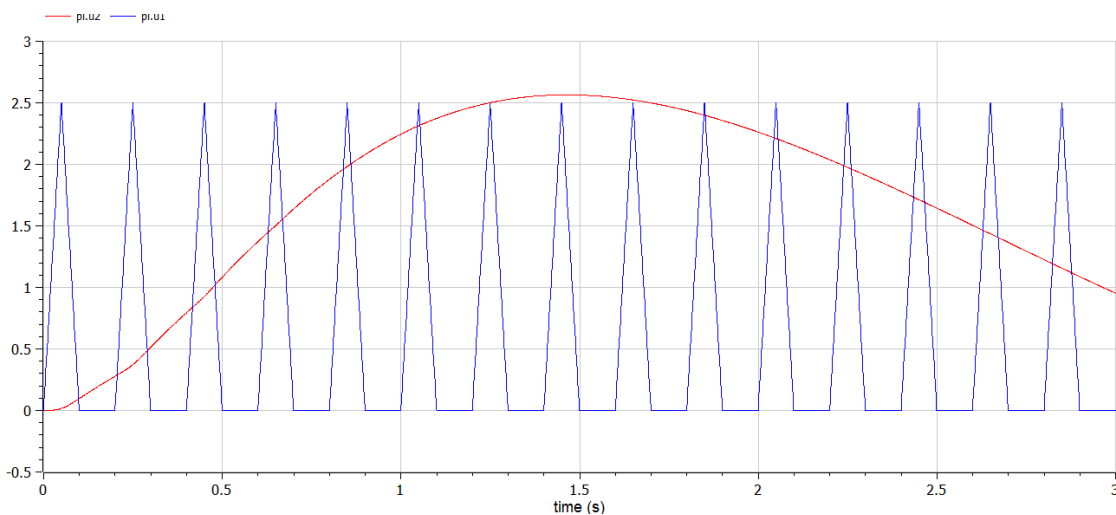


## تست بعدی:

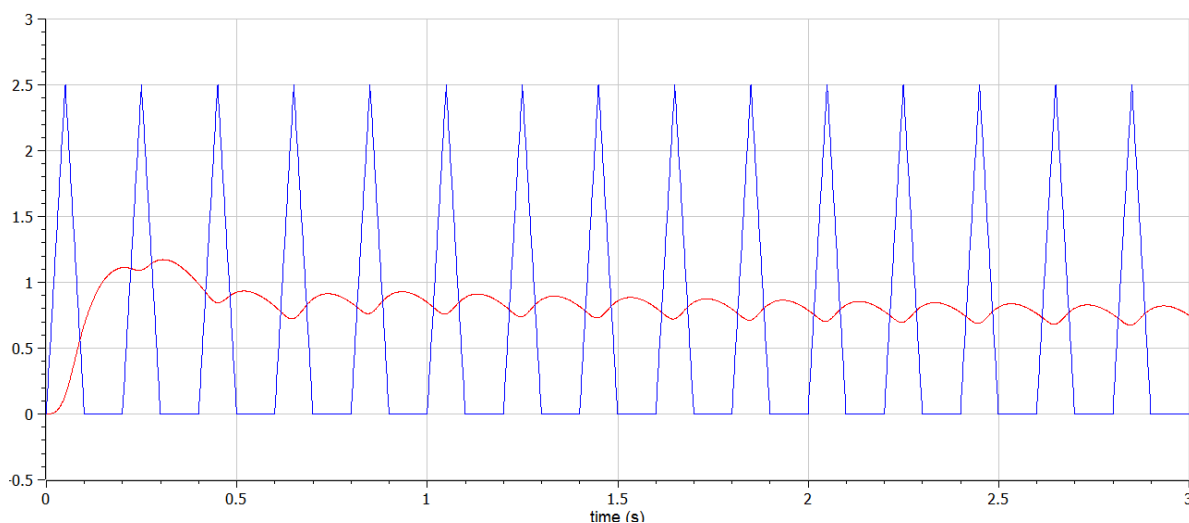


با چندین تغییر در متغیرها و چندین تست مختلف، شکل بالا به وجود آمد. به مرور زمان حتی خروجی کم نیز شد. در این مثال ثابت فنر و inertia برابر 1 و ثابت damper برابر 5 است.

اگر ثابت damper هم 1 بگذاریم، شکل به صورت زیر میشود:



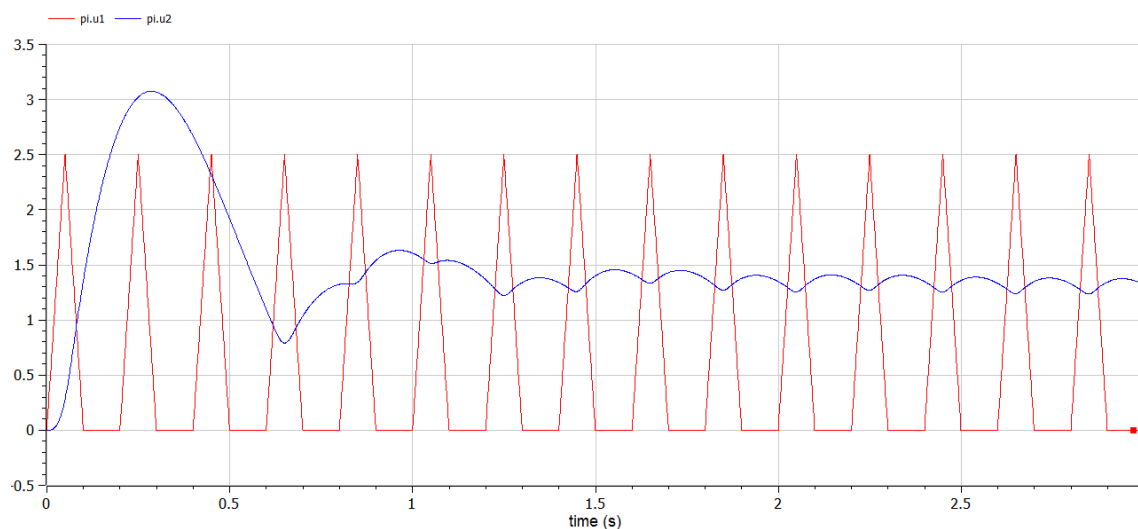
این شکل خوبی ست چون خروجی میخواستیم از ورودی هم بالا بزند ولی کم کم در همان حوالی ماکسیموم ورودی باقی بماند. این شکل ولی به مرور زمان در حال کاهش است پس باید دوباره متغیرها را عوض کنیم.



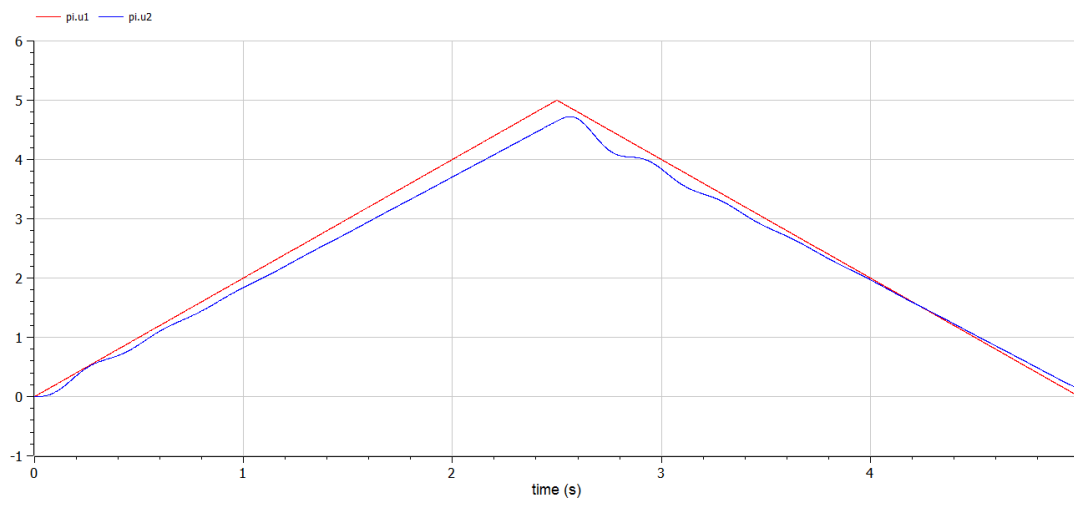
ثابت فنر 5 و ثابت inertia 0.1 و شکل به صورت بالا در آمد.

بعد از ده ها تست، نزدیک ترین شکل به شکل ویدیو [رفرنس](#) را به دست آوردیم. Int gain برابر 5 و prop gain برابر 60 و ثابت فنر برابر 5 و ثابت inertia برابر 0.2 و ثابت damper برابر 1 گذاشته شده است. شکل به صورت زیر است. ورودی با رنگ نارنجی و خروجی با رنگ آبی:

۶۰	Proportional Gain
۵	Integral Gain
۵ N.m/rad	ثابت فنر
۰.۲ Kg.m <sup>2</sup>	ثابت inertia

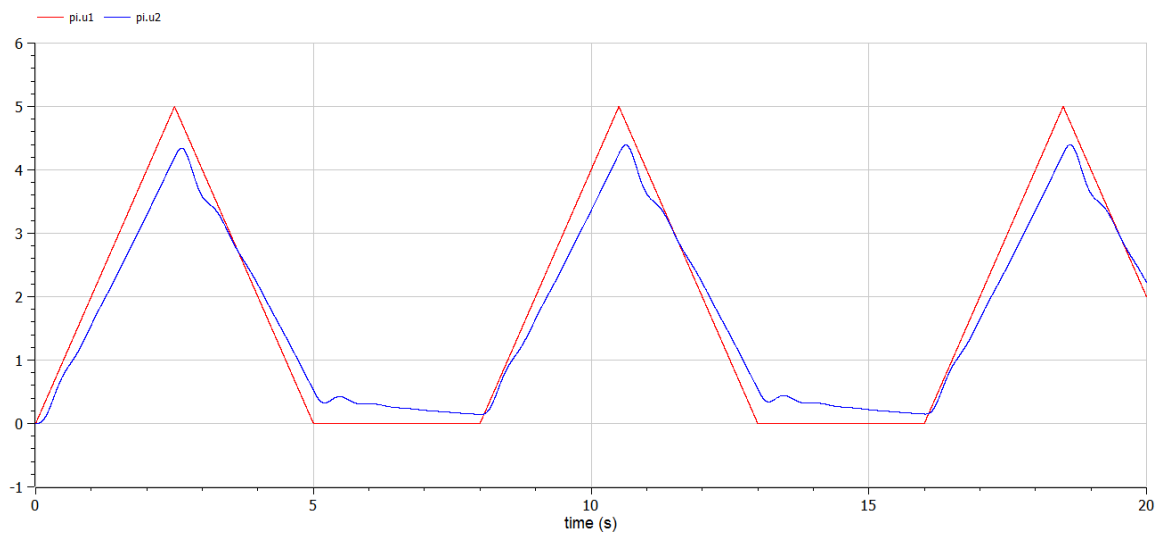


اما یک مشکلی داشتیم. باید شبیه‌سازی مثل دنیای واقعی باشد. نمیتوانیم به این سرعت با روی پدال بگذاریم و برداریم. پس زمان شبیه‌سازی را بیشتر کردیم و بین فشار دادن گاز فاصله انداختیم. اما قبل از آن تست بالا را با فشردن یکبار پدال تست کردیم و ولتاژ ماکزیموم را برابر ۵ ولت قرار دادیم.



این شکل درستی است و نشان داد که مشکل از سریع فشردن و رها کردن پدال است.

آخرین تست ما به صورت زیر است و متغیرها از دیتاشیت ابتدای سند قابل مشاهده می باشد.

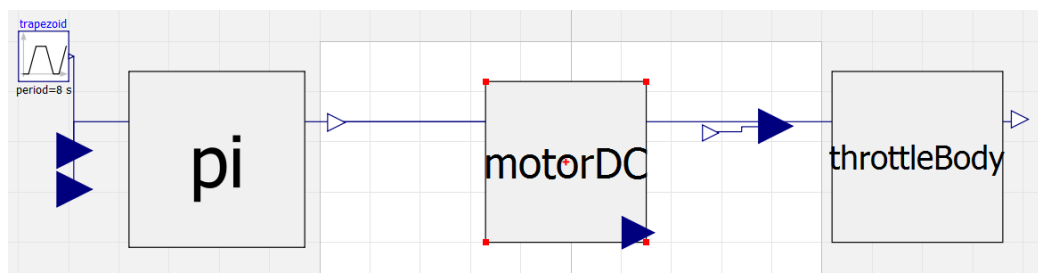


ولتاژ ورودی (پدال گاز)	حداکثر ۵ ولت
Proportional Gain	۱۶
Integral Gain	۸
ضریب القایر	۱ H
ثابت inertia	۰,۲ Kg.m <sup>2</sup>
ثابت Damper	۱ N.m.s/rad
ثابت فنر	۵ N.m/rad

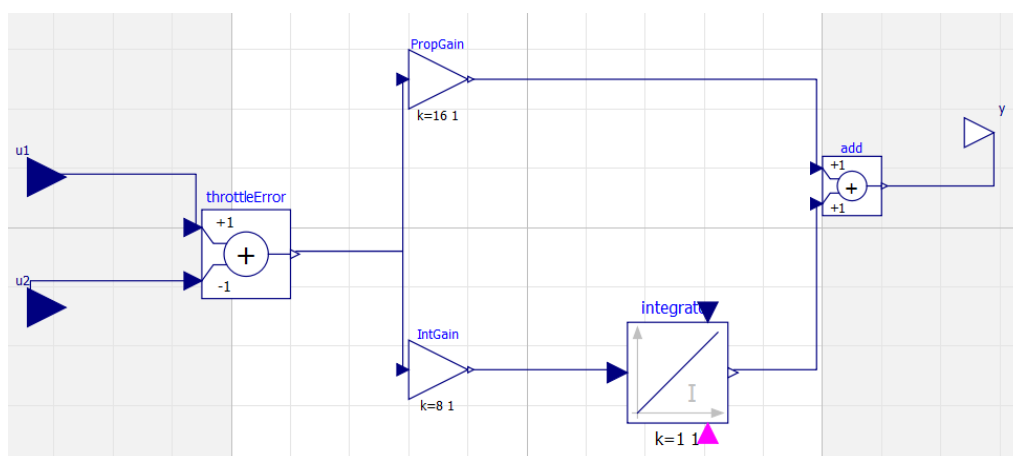
## کد برنامه

کد برنامه کنترل دریچه گاز الکترونیکی که به زبان مدلیکا نوشته شده است، در [گیت‌هاب](#) در دسترس عموم قرار گرفته است.

ورژن نهایی سامانه را در این بخش نشان خواهیم داد.

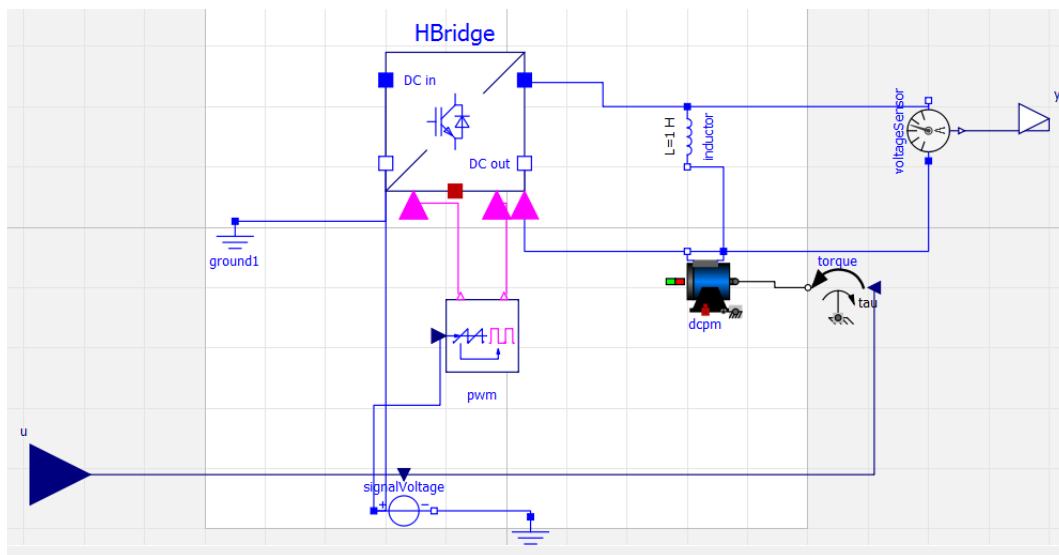


شکل ۷-۱: ورژن نهایی سامانه (سیستم)

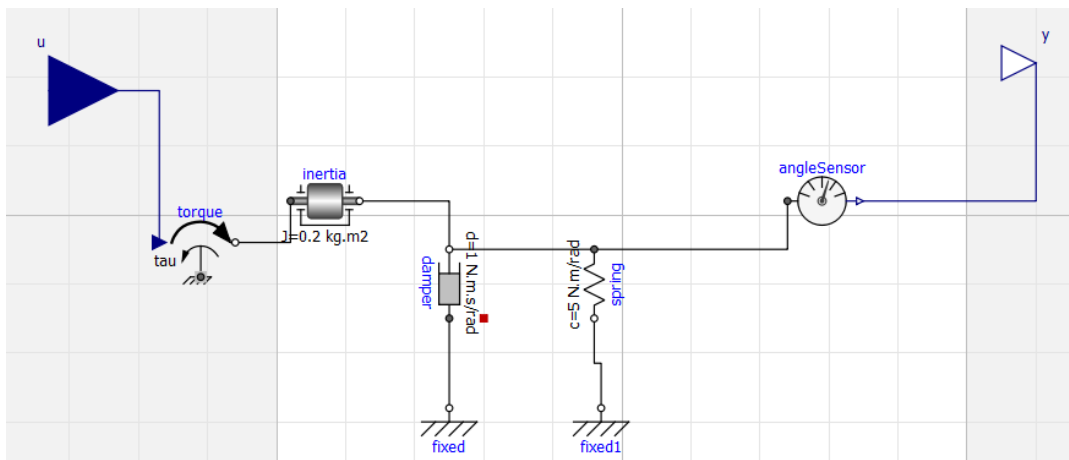


شکل ۷-۲: ورژن نهایی کنترلر PI

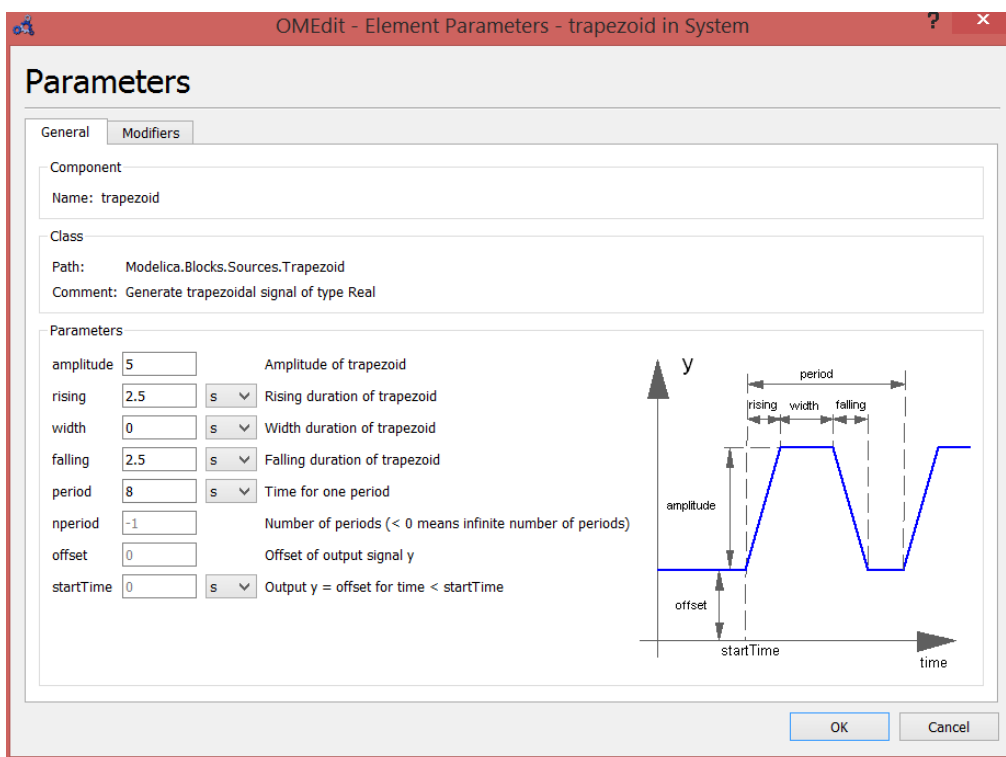




شکل ۳-۷: ورژن نهایی موتور DC



شکل ۴-۷: ورژن نهایی بدنه درجه گاز



شکل ۵-۷: تنظیمات پدال گاز

## قیمت

این بخش اهمیت و مزیت شبیه‌سازی را نشان خواهد داد. در دنیای واقعی، ساخت چنین سامانه‌ای و تست و آزمایش آن، فوق‌العاده گران و زمان‌بر می‌شود. با نرم‌افزار اپن‌مدلیکا که خود رایگان و متن‌باز است، میتوانیم هر سامانه‌ای که می‌خواهیم را تا حد قابل قبولی طراحی کنیم. تنها هزینه‌ای که این پروژه می‌تواند برای شما داشته باشد، هزینه داندلود نرم‌افزار بوده که نسبت به طراحی چنین پروژه‌ای در دنیای واقعی، بسیار بسیار ناچیز است.

جدا از هزینه مالی، هزینه زمانی شما هم تا حد خوبی کاهش میابد. البته این هزینه زمانی کم، بدی هم دارد. نتیجه شبیه‌سازی قطعا با واقعیت فرق دارد ولی یک دید کلی به شما خواهد داد. ممکن است بعضی موارد را نتوان شبیه‌سازی کرد (به دلیل امکانات ناکافی شبیه‌ساز یا ...). به عنوان مثال، این پروژه نیازمند قطعه‌ای با نام **Hard Stop** بود اما چنینی قطعه‌ای در اپن‌مدلیکا موجود نبود. اما به طور کلی، استفاده از شبیه‌سازی کاملا ارزشش را دارد.

راه‌حل مشکل بالا، استفاده از شبیه‌سازهای قوی‌تر است. حتی اگر این شبیه‌سازها رایگان نباشند، همچنان ارزان‌تر از ساخت سامانه در دنیای واقعی تمام می‌شود.

## جمع‌بندی

در این پروژه به طراحی سامانه کنترل دریچه گاز پرداختیم. از آنجا که طراحی چنین سامانه‌ای در دنیای واقعی، هزینه مالی و زمانی زیادی دارد و امکان تست و خطا تا حدی کم است، از نرم‌افزار این‌مدلیکا استفاده شد. این نرم‌افزار، مخصوص شبیه‌سازی بوده و از زبان مدلیکا استفاده می‌کند.

این پروژه نیازمند درک نحوه کار دریچه گاز و همچنین نحوه طراحی یک شبیه‌سازی از آن با کمک این‌مدلیکا می‌باشد.

سامانه کنترل دریچه گاز الکترونیکی از سه بخش تشکیل شده است: ۱- کنترلر PI ۲- موتور DC ۳- بدنه دریچه گاز

برای کنترل بهتر روی سامانه، پروژه به صورت دور بسته طراحی شد. درواقع خروجی بدنه دریچه گاز به عنوان فیدبک به ورودی داده می‌شود. ورودی دیگر، طبیعتاً پدال گاز است.

با شبیه‌ساز این‌مدلیکا ضمن طراحی پروژه، نمودار ورودی و خروجی آن را نیز می‌توان مشاهده نمود.

با کمک **Simulation Setup**، هر نوع شبیه‌سازی مدنظر شما قابل پیاده‌سازی است و می‌توان با تغییر متغیرات، سامانه را **Re-Simulate** کرد و نتایج جدید را در نمودار مشاهده کرد.

ورژن این‌مدلیکای استفاده شده ۱,۲۰,۰ می‌باشد.

در بخش کنترلر PI، با ضریب تناسبی سرعت سیستم را مشخص می‌کنیم و با ضریب انتگرال خطای دائمی که به سبب ضریب تناسبی به وجود می‌آید را از بین می‌بریم اما ضریب انتگرال باعث ایجاد نوسان می‌شود. ارتباط این دو ضریب که بر سرعت و نوسان سامانه موثر هستند، بر دقت سامانه نیز اثر می‌گذارند. به همین دلیل با تست و خطا به دنبال یافتن ضرایبی مناسب می‌گردیم.

در تست‌های انجام گرفته، به این نتیجه رسیدیم که باید ورودی پدال به صورت مثلثی باشد و فاصله و زمان لازم برای فشردن پدال نیز باید در نظر گرفته شود

همچنین اعداد به دست آمده همچون ثابت فتر، جنبه محاسباتی نداشته و صرفاً از تست فراوان و رسیدن به شکل موردنظر به

---

دست آمده است.

از آنجا که نحوه اتصالات و برخی بلوک‌ها با سایر نرم‌افزارهای شبیه‌سازی متفاوت است، ممکن است نتایج مشابهی با سایر نرم‌افزارها به دست نیاید. همچنین برخی بلوک‌ها مانند **hard stop** که در سیمولینک موجود است، در اپن‌مدلیکا وجود ندارد و مشخصاً در طراحی سامانه ما به کار نرفته است.

طبیعتاً این سامانه طراحی شده، یک دید اولیه‌ای به شما خواهد داد اما بسیار جای بهبود یافتن دارد. می‌توانید با محاسبات دقیق، ضرایب را به دست آورید و حتی بلوک‌هایی بیابید تا خودتان بخش **Hard Stop** را طراحی کنید. شاید هم شما نیز با روش تست و خطا، ضرایب بهتری برای سامانه پیدا کنید.

برای آشنایی بیشتر با این پروژه و محیط اپن‌مدلیکا و نحوه کار با آن می‌توان به [ویدیو](#) مشخص شده مراجعه نمود. این ویدیو توسط تیم طراح این پروژه ضبط شده است و به زبان انگلیسی می‌باشد.

همچنین فایل‌های مرتبط با پروژه نیز همانطور که قبلاً ذکر شد در [گیت‌هاب](#) پروژه قابل دسترسی است.