



# ساخت سه درجه آزادی اول

## universal-UR5

فروغ افخمی ۹۸۲۳۰۰۶

علی بهمنیار ۹۸۲۳۰۱۸

سینا ربیعی ۹۸۲۳۰۳۵

سمیرا سلجوقی ۹۸۲۳۰۴۸

دکتر شریفی

زمستان ۱۴۰۰

## فهرست

۳

اهداف و فرآیند پروژه

۴

انتخاب نحوه فیدبک و actuator

۵

انتخاب موتور

۶

طراحی اجزای ربات در Solidworks

۷

پرینت سه بعدی و برش لیزری لینک ها و صفحات

۸

بخش مکانیکی پروژه

۸

شفت

۹

کوپلینگ

۹

بلبرینگ

۱۰

انواع پیچ و مهره و واشر

۱۱

مراحل ساخت ربات

۱۲

بخش طراحی کنترلر پروژه

۱۲

مراحل طراحی کنترل کننده

۱۳

نحوه عملکرد Anti-wind up

۱۳

به دست آوردن ضرایب کنترل کننده

## اهداف و فرآیند پروژه

ربات پروژه ما ربات سری ۶ درجه آزادی UR5 از شرکت universal است که در پروژه اول درس به شبیه سازی کامل آن در متلب پرداختیم و در پروژه عملی به ساخت ربات با ۳ درجه آزادی اول آن می پردازیم و در ادامه با استفاده از کنترلر error-based آن را کنترل می کنیم.

مراحل این پروژه به شرح زیر می باشد:

- انتخاب نوع موتور مناسب و نحوه فیدبک گرفتن
- طراحی کامل اجزا و قسمت های ربات در نرم افزار solidworks
- پرینت سه بعدی قطعات
- خرید موتور ها و تجهیزات مورد نیاز
- ساخت ربات براساس طراحی
- برقراری ارتباط متلب با آردوینو
- ایجاد یک کنترل کننده error\_based

## انتخاب نحوه فیدبک و actuator

برای کنترل موقعیت بازوی ربات، می‌بایست از یک سیستم کنترلی حلقه بسته استفاده شود، برای ایجاد این سیستم به یک فیدبک از موقعیت بازو نیازمندیم، برای ایجاد این فیدبک می‌توانیم از روش‌های زیر استفاده کنیم:

### ۱. انکودر چرخشی افزایشی (Rotary Incremental Encoder)

این نوع از انکودرها به ازای هر دور موتور تعدادی پالس روی دو فاز مختلف ایجاد می‌کنند، با شمارش تعداد این پالس‌ها می‌توان میزان چرخش موتور را تعیین کرد و با توجه به اختلاف فاز میان دو فاز می‌توان جهت چرخش را مشخص نمود، این نوع فیدبک اما به صورت نسبی است به این معنا که تنها می‌توان میزان تغییر موقعیت موتور را با استفاده از آن به دست آورد و موقعیت موتور را به صورت مطلق نمی‌توان در اختیار داشت. در این روش میزان تغییر موقعیت موتور به صورت دقیق به دست می‌آید و این روش نسبت به نویز تا حد خوبی مقاوم است.

### ۲. پتانسیومتر (Potentiometer)

با استفاده از یک پتانسیومتر متصل به شفت موتور می‌توان موقعیت شفت را با استفاده از تقسیم ولتاژ میان مقاومت‌ها به صورت مطلق به دست آورد. با این که این روش موقعیت مطلق شفت را به ما می‌دهد و از این نظر مناسب‌تر است اما دارای دقت کمی است و از آن جا که عملاً موقعیت موتور می‌بایست به صورت آنالوگ مورد خوانش قرار گیرد این روش در برابر نویز حساسیت بیشتری دارد.

### ۳. انکودر چرخشی مطلق (Absolute Rotary Encoders)

انکودرهای مطلق با قابلیت خوانش دیجیتال که دقت بسیار مطلوبی را فراهم می‌کنند اما قیمت بسیار بالایی دارند. در نهایت با توجه به محدودیت‌های فیزیکی و مالی استفاده از روش دوم یعنی پتانسیومتر ترجیح داده شد، در این روش با هزینه‌ی کم می‌توانیم موقعیت شفت موتور را به صورت مطلق در اختیار داشته باشیم اما از طرف دیگر سیستم حساس به نویز خواهد بود و همچنین پتانسیومتر استفاده شده دارای حدوداً ۱۰ تا ۱۵ درجه **dead zone** می‌باشد، به این معنا که در این ناحیه خروجی ثابت مانده و با تغییر موقعیت شفت موتور سیستم قادر به تشخیص این تغییر نخواهد بود.

برای خواندن موقعیت موتور با استفاده از پتانسیومتر به واسطه‌ی برد آردوینو (Arduino Mega)، از واحد ADC میکروکنترلر ATmega2560 استفاده می‌کنیم، این واحد ADC دارای دقت 10 بیتی است بنابراین می‌توانیم به صورت تئوری موقعیت موتور را با دقت  $360/1024$  یعنی 0.351 درجه در اختیار داشته باشیم، اما نویز و **dead zone** باعث می‌شوند تا در عمل دقت کمتری داشته باشیم.

برای ایجاد نیروی محرکه می‌توانیم از انواع موتورهای الکتریکی استفاده کنیم که موتورهای DC ساده‌ترین آن‌ها می‌باشند، در موتورهای DC، با تعیین جهت جریان عبوری از موتور می‌توان جهت چرخش موتور را تعیین کرد.

برای کنترل توان تحویلی به موتور و نتیجتاً سرعت و گشتاور موتور نیز می‌توان از پالس PWM با Duty cycle متغیر استفاده کرد.

برای کنترل جهت جریان عبوری از موتور می‌توان از مدار H-Bridge استفاده کرد، با استفاده از این مدار می‌توان جهت جریان عبوری از موتور را با ولتاژ مناسب موتور کنترل کرد.

آی‌سی L298 شرکت STMicroelectronics دارای دو مدار H-Bridge می‌باشد که برای استفاده‌ی بیان شده بسیار مناسب می‌باشد.

## انتخاب موتور

موتور مورد نظر برای این پروژه سروو موتور MG 996R دنده فلزی ۳۶۰ درجه دارای پتانسیومتر است. این موتور دارای مشخصات زیر می‌باشد که مقدار گشتاور، ابعاد و جرم آن برای پروژه مناسب می‌باشد. با توجه به نکات ذکر شده در بالا موتور MG996R گزینه مناسبی است زیرا در درون خود دارای فیدبک موقعیت از نوع پتانسیومتر نیز می‌باشد. برای کنترل این موتور، اتصال موتور به برد خود را قطع کرده ایم و از خروجی پتانسیومتر فیدبک می‌گیریم.

### Basic Information:

Modulation: Digital

Torque: 4.8V: 130.5 oz-in (9.40 kg-cm)

6.0V: 152.8 oz-in (11.00 kg-cm)

Speed: 4.8V: 0.19 sec/60°

6.0V: 0.15 sec/60°

Weight: 1.94 oz (55.0 g)

Dimensions: Length: 1.60 in (40.7 mm)

Width: 0.78 in (19.7 mm)

Height: 1.69 in (42.9 mm)

Motor Type: 3-pole

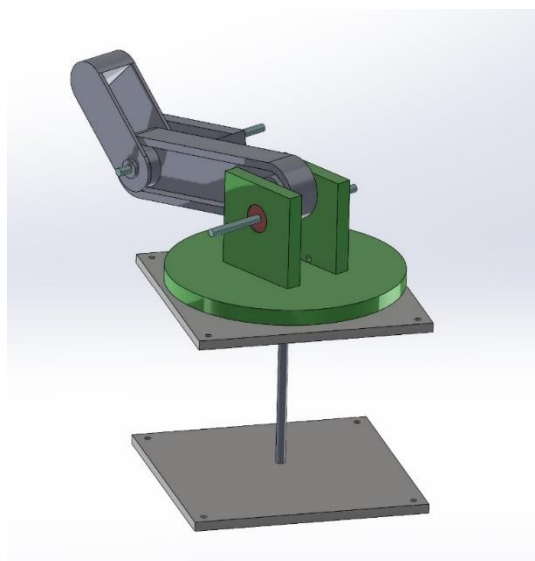
Gear Type: Metal



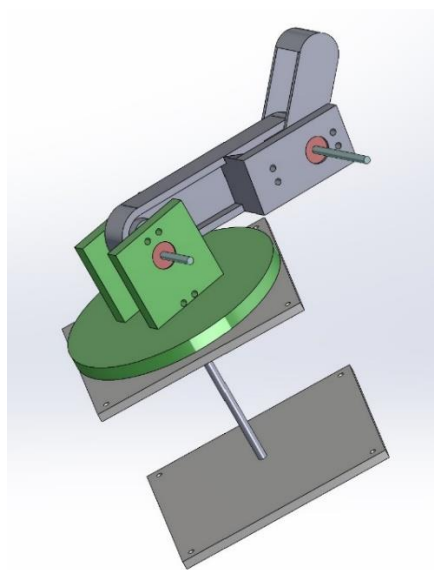
شکل ۱: سرو موتور MG996R به همراه دیتاشیت خلاصه

## طراحی اجزای ربات در Solidworks

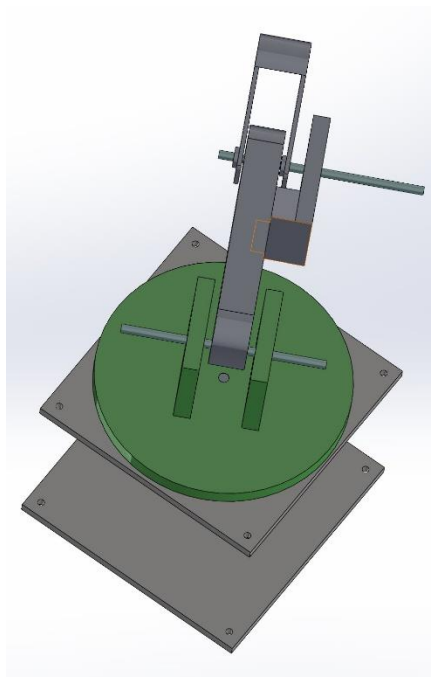
با استفاده از نرم افزار solidworks قسمت های مختلف ربات را با جزئیات کامل طراحی می کنیم. این طراحی شامل یک بیس برای ربات است که موتور اول زیر آن قرار می گیرد. در ادامه آن نیز لینک های دوم و سوم قرار می گیرند. همچنین محل قرار گیری بلبرینگ ها، شفت ها و سایر اتصالات نیز به طور دقیق مشخص می شوند.



شکل ۲: نمای ربات طراحی شده در Solidworks



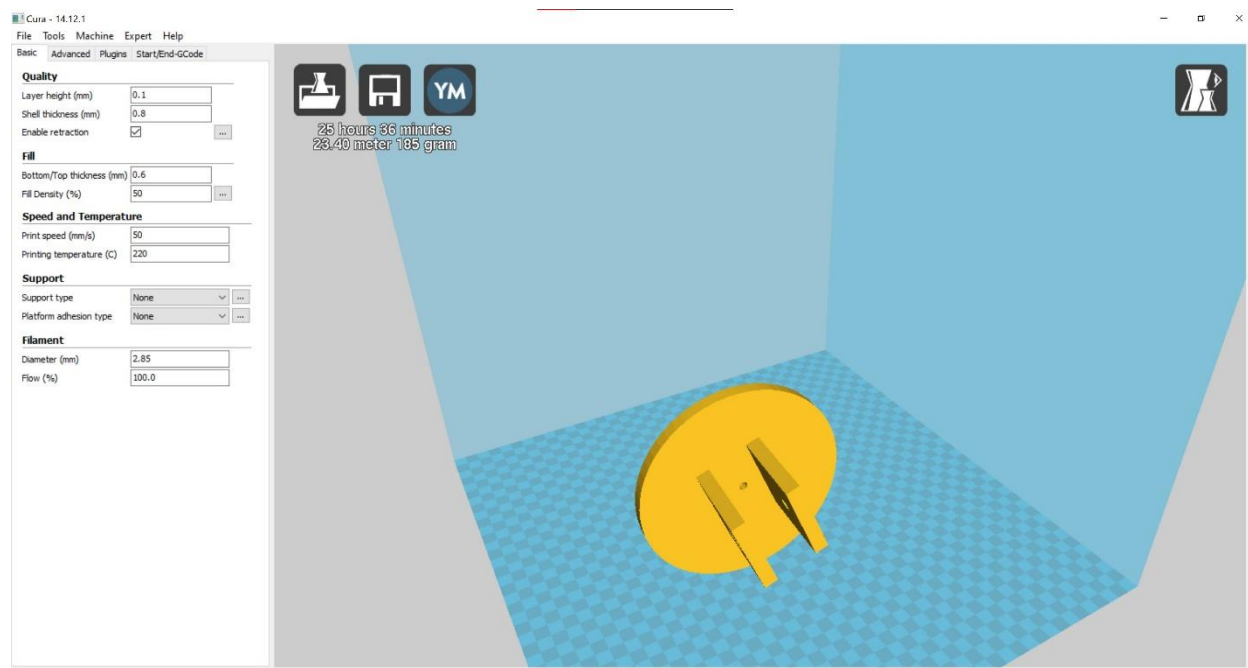
شکل ۳: نمای ربات طراحی شده در Solidworks



شکل ۴: نمای ربات طراحی شده در Solidworks

## پرینت سه‌بعدی و برش لیزری لینک‌ها و صفحات

پس از کامل شدن طراحی ربات در نرم افزار solidworks، لینک‌های مورد نظر را در نرم افزار Cura انتخاب کرده و درصد خلوص قطعات و ابعاد آن‌ها را نهایی می‌کنیم. مدت زمانی که پرینت هر قطعه طول می‌کشد نیز قابل مشاهده است که با درصد خلوص قطعه ارتباط دارد. همچنین جهت تسریع در کار، قطعات بیس ربات را به صورت پلکسی لیزر می‌کنیم.



شکل ۵: نمای نرم‌افزار Cura و مدت زمان مورد نیاز برای پرینت یکی از لینک‌ها

## بخش مکانیکی پروژه

تجهیزات مکانیکی استفاده شده

۱. شفت
۲. کوپلینگ
۳. بلبرینگ
۴. انواع پیچ و مهره و واشر

### شفت

به سه عدد شفت هارد کروم به قطر ۵ میلی متر نیاز داریم تا موتورها را به لینک ها متصل کنیم. شفت های تهیه شده ساخت چین و دارای مشخصات زیر هستند:



مشخصات محصول	
جنس:	CF۵۳ , C۵۵E
سایر ویژگی ها	سختی سطحی: ۹۲HRC
سایر ویژگی ها	استاندارد نئورانس: استاندارد ISO ۹۸ برابر با ۰/۰۹ میکرومتر
سایر ویژگی ها	ضخامت لایه کروم: ۵(۰/۰۳)
سایر ویژگی ها	نوع: هارد کروم
قطر شفت و متعلقات (میلیمتر)	۵
Q18	۳ گرم

شکل ۶: شفت هارد کروم ۵ میلی متر



## کوپلینگ

به سه عدد کوپلینگ ۵ به ۶ میلی متر نیاز داریم که دارای مشخصات زیر هستند:



### مشخصات محصول

مدل	تایت
قدرت شفت	۵۶۶ میلی متر
قطر خارجی	۹ میلی متر
جنس	برنج
طول	۲۵ میلی متر

شکل ۷: کوپلینگ ۵ به ۶ برنجی

## بلبرینگ

به شش عدد بلبرینگ شیار عمیق فلنج دار نیاز داریم که دارای مشخصات زیر هستند:

### مشخصات محصول

مدل	FPR5ZZ
نوع بلبرینگ شیار عمیق	فلنج دار
عرض بلبرینگ شیار عمیق (میلی متر)	۵
قطر داخلی بلبرینگ شیار عمیق (میلی متر)	۵
قطر خارجی بلبرینگ شیار عمیق (میلی متر)	۱۶



شکل ۸: بلبرینگ قطر ۵ میلی متر

## انواع پیچ و مهره و واشر

برای اتصال صفحات مربعی بیس به پیچ متری با قطر ۴ میلی متر (M4) نیاز داریم که به اندازه یک متر تهیه شده.

همچنین برای سایر اتصالات از پیچ و مهره و واشر به قطر ۴ میلی متر به مقدار لازم استفاده می کنیم.



پیچ متری M۴ آهنی



پیچ دو سو - چهار سو آهنی سایز M۴



واشر فنری فلزی سایز M۴



مهره شش گوش فلزی ساده سایز M۴

شکل ۹: پیچ و مهره‌های استفاده شده

## مراحل ساخت ربات

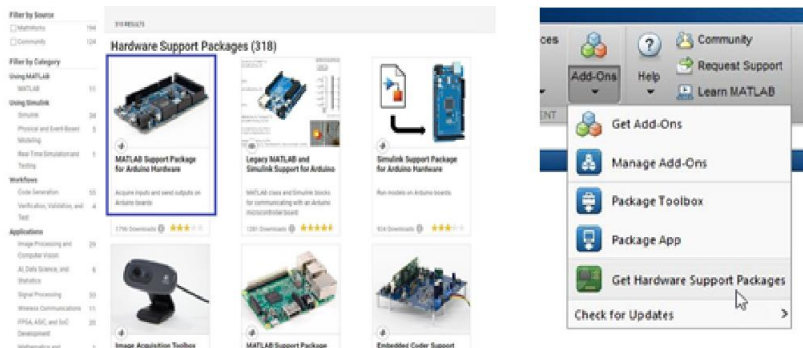
شفته‌ها و پیچ‌متری‌ها در ابعاد خاصی موجود هستند در نتیجه آن‌ها را به اندازه‌های مورد نیازمان با فرز و تیغه‌اره برش می‌دهیم. در ادامه برای پرس کردن شفته‌ها و بلبرینگ‌ها به دلیل اینکه در پرینت قطعات حدود ۰,۳-۰,۱ میلی‌متر امکان خطا دارند، می‌توان در صورت نیاز از سمباده یا چسب (برای از بین بردن لقی) استفاده کرد.

ارتفاع لینک اول را نسبت به بیس با پیچ متری‌های ۲۵ سانتی‌متر تنظیم می‌کنیم. در نهایت نیز لینک‌ها را مطابق با طراحی انجام شده در Solidworks به یکدیگر متصل می‌کنیم.

## بخش طراحی کنترلر پروژه

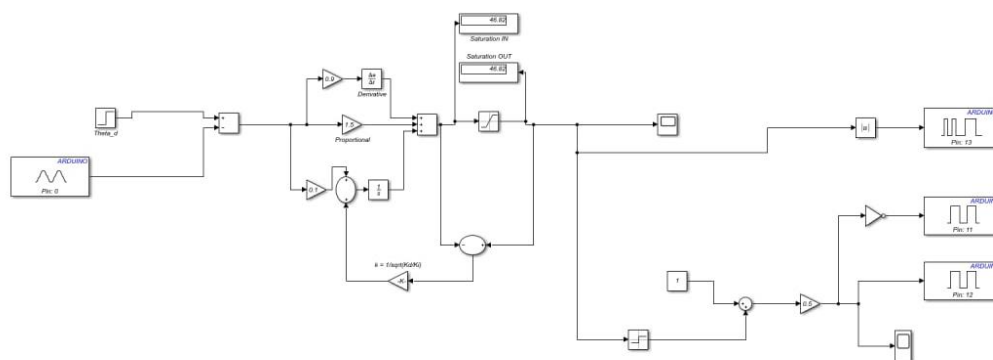
### مراحل طراحی کنترل کننده

می‌خواهیم یک کنترل کننده `error_based` برای ربات با استفاده از MATLAB Simulink طراحی کنیم. به این منظور ابتدا لازم است تا دو پکیج `MATLAB support package for Arduino` و `support` Simulink package for Arduino را نصب کرده و سپس از بلوک‌های موجود در آن برای برنامه‌ریزی برد استفاده می‌شود.



شکل ۱۰: تصاویر محیط اضافه کردن پکیج آردینو در Simulink

بعد از آنکه موفق شدیم ارتباط متلب با برد آردینو را برقرار کنیم، بلوک دیاگرام کنترلر `error_based` که مطابق شکل زیر می‌باشد را طراحی می‌کنیم:



شکل ۱۱: بلوک دیاگرام کنترلر `error_based`

در ورودی مقدار زاویه مورد نظر (`desired`) داده شده و از پین آنالوگ آردینو متصل به پتانسیومتر فیدبک گرفته می‌شود. در ادامه کنترلر شامل ضریب تناسبی (`proportional`)، قسمت مشتق‌گیر و بخش انتگرال‌گیر به همراه `anti-windup` است که نحوه عملکرد بخش انتگرال‌گیر به همراه `anti-windup` در ادامه شرح داده می‌شود. همچنین در انتهای بلوک دیاگرام مقدار مطلق خروجی کنترلر به بلوک `PWM` میکروکنترلر داده می‌شود تا همانطور که در قسمت‌های قبلی شرح داده شد توان تحویلی به موتور به صورت مناسب کنترل گردد.

همچنین برای تعیین جهت چرخش موتور متناسب با علامت خروجی کنترلر، خروجی پین‌های متصل به درایور موتور (L298) با استفاده از واحد خروجی دیجیتال میکروکنترلر تعیین می‌گردد.

### نحوه عملکرد Anti-wind up

در بسیاری از فرآیندها فرمان کنترل کننده از سقف اشباع بالاتر می‌رود و چون کنترل کننده‌ها دارای محدودیت می‌باشند در عمل حلقه فیدبک کارایی خود را از دست می‌دهد.

عاملی که بیشترین تاثیر در به اشباع رفتن کنترل کننده دارد ترم انتگرال گیر می‌باشد. بخاطر عمل انتگرال گیری، خطا روی هم انباشته شده و ممکن است از حد اشباع عبور کند. به این فرآیند جمع‌شوندگی یا Windup گفته می‌شود.

اگر جلوی جمع‌شوندگی گرفته نشود چون زمان زیادی نیاز است تا خطای منفی جمع گردد و اثر جمع‌شوندگی را از بین ببرد پاسخ سیستم خیلی کند شود و ناپایدار می‌شود. در این حالت کنترل کننده نمی‌تواند ورودی را دنبال کند.

روش‌های زیادی برای جلوگیری از جمع‌شوندگی (Anti-wind up) ارائه شده‌است که به دو صورت آنالوگ و دیجیتال قابل پیاده‌سازی می‌باشد.

ایده اصلی تمام روش‌های Anti-windup این است که زمانی که کنترل کننده به اشباع می‌رود، چون انتگرال گیری از خطا تاثیری ندارد پس بهتر است که انتگرال گیر خاموش شود. بصورت دیجیتالی کافی است که اگر مقدار خروجی کنترل کننده از ماکزیمم خود بیشتر شد مقدار انتگرال گیر را صفر کنیم.

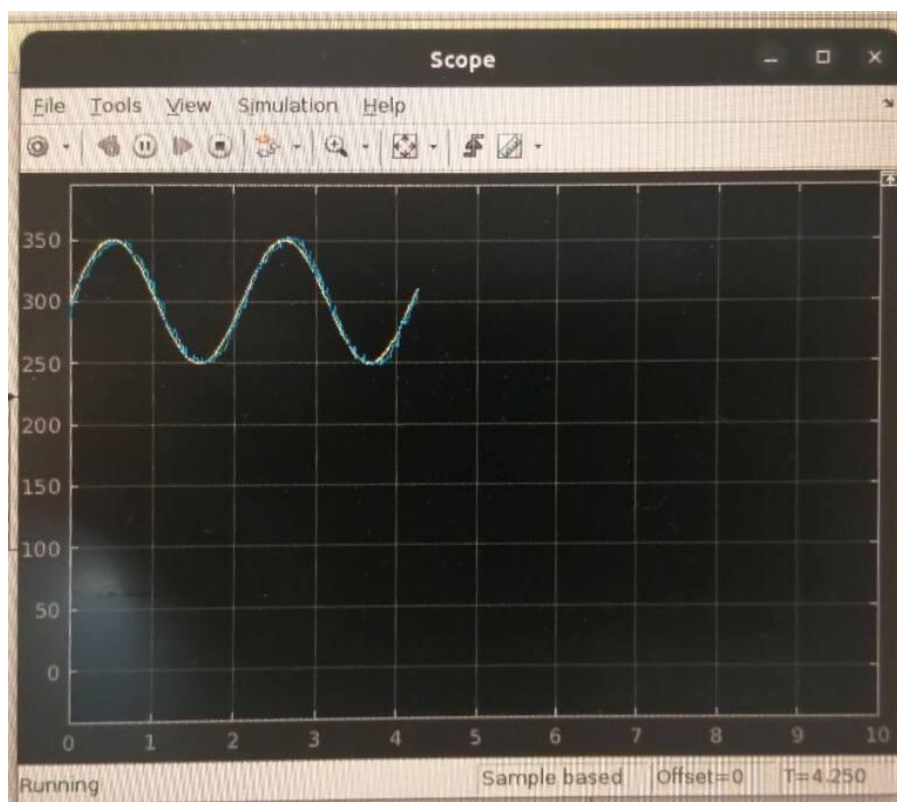
### به دست آوردن ضرایب کنترل کننده

پس از تکمیل بلوک دیاگرام اتصالات موتور، درایور، منبع تغذیه و برد آردوینو را برقرار کرده و سپس با تست کردن بر روی موتور و مشاهده رفتار آن به ازای مقادیر مختلف ضرایب کنترل کننده، سعی می‌کنیم تا بهترین ضرایب را به دست آوریم، به طوری که سرعت موتور و خطای حالت دائم آن مناسب باشد و اورشوت ناچیزی داشته باشد.

در این کنترلر ابتدا ضریب تناسبی را تنظیم می‌کنیم تا پاسخ سیستم با سرعت مناسب به مقدار مطلوب برسد. اما پس از تنظیم این ضریب، سیستم نوسان و اورشوت پیدا خواهد کرد که برای از بین بردن نوسانات، ضریب مشتق گیر و برای کاهش خطای حالت دائم ضریب انتگرال گیر را تنظیم می‌کنیم.

با مشاهده نحوه عملکرد پتانسیومتر و موتور و با تنظیم و تست ضرایب مختلف و با در نظر گرفتن ناحیه مرده (Dead zone) موتور و پتانسیومتر و ناحیه اشباع می‌توان ضرایب کنترلر را به نحوی به دست آورد تا ربات زاویه یا ترجیحاً توری مورد نظر را با سرعت مناسب و با اورشوت ناچیز به صورت پایدار دنبال کند.

همانطور که ذکر شد خروجی پتانسیومتر می‌بایست به صورت آنالوگ نمونه‌برداری شود و در نتیجه حساسیت به نویز به در این سیستم قابل توجه خواهد بود که عدم وجود مدار چاپی (PCB) و اتصالات بلند نیز این مسأله را تشدید خواهد کرد. بنابر دلایل بیان شده، نیاز است که از فیلتر در ورودی فیدبک استفاده کنیم. در غیر این صورت، به دلیل وجود ترم مشتق‌گیر در کنترلر، نویز موجود در سیستم تقویت شده و همچنین تأخیر در سیستم نیز نمود بیش‌تری پیدا می‌کند و باتوجه به نکات ذکر شده امکان استفاده از مد Tracking وجود نخواهد داشت.



شکل ۱۲: خروجی Simulink برای دنبال کردن یک موج سینوسی

موج زرد رنگ مربوط به سیگنال ورودی (desired) است که می‌خواهیم دنبال کنیم و موج آبی، موقعیت شفت در عمل را نشان می‌دهد.