



دانشکده مهندسی برق

طراحی، ساخت و کنترل سیستم چهارپره

پروژه پایانی کارشناسی در رشته مهندسی برق گرایش کنترل

نگار احسانی گرگری

پوریا مرتضی آقا

استاد راهنما: دکتر محمد فرخی

زمستان ۱۴۰۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

چکیده

کنترل موقعیت و وضعیت چهارپره همواره از مسائل مهم در علم کنترل بوده است. چهارپره شامل بخش‌های مکانیکی، الکتریکی، الکترونیکی و الگوریتم‌های کنترلی می‌باشد که آن را در راستای قرارگرفتن در وضعیت و موقعیت مناسب هدایت می‌کند. در این راستا، قطعات مکانیکی و الکترونیکی لازم برای ساخت سیستم تهیه گردید و ساختار مکانیکی چهارپره به وسیله موتورهای که با استفاده از کاراندازها کنترل می‌شوند، به حرکت درمی‌آید. پس از اتصال برد اصلی، چهارپره هم‌زمان قابلیت کنترل از طریق کامپیوتر را داشته و اطلاعات را به وسیله وای‌فای¹ برای کامپیوتر ارسال می‌کند. درگام بعدی، پس از تست بخش‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری طراحی کنترل‌کننده PID انجام شده‌است. به این منظور ضرایب کنترل‌کننده با استفاده از روش‌هایی همچون زیگلر-نیکلز و کنترل فازی تعیین و آزمایش شده‌است. در مرحله اول کنترل‌کننده مناسب برای کنترل زوایای چهارپره طراحی شد و پس از کنترل مناسب زاویه در مرحله بعدی ارتفاع چهارپره کنترل گردید. نتایج آزمایشگاهی عملکرد مناسب چهارپره را نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: چهارپره، کنترل‌کننده PID، ژيروسکوپ، حسگر شتاب‌سنج، شبیه‌سازی، منطق فازی

¹ WIFI

تأییدیه هیئت داوران جلسه دفاع از پایان نامه / رساله

نام دانشکده: دانشکده مهندسی برق

نام دانشجویان: نگار احسانی گرگری – پوریا مرتضی آقا

عنوان پایان نامه/ رساله: طراحی، ساخت و کنترل سیستم چهارپره

تاریخ دفاع:

رشته: مهندسی برق

گرایش: کنترل

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضا
۱	استاد راهنما	محمد فرخی	استاد	علم و صنعت ایران	
۲	استاد مدعو داخلی			علم و صنعت ایران	

تأییدیه صحت و اصالت نتایج

باسمه تعالی

اینجانبان نگار احسانی گرگری و پوریا مرتضی آقا به شماره دانشجویی ۹۶۴۱۱۰۱۹-۹۶۴۱۳۰۵۴ دانشجوی رشته مهندسی برق مقطع تحصیلی کارشناسی تأیید می‌نمایم که کلیه‌ی نتایج این پایان‌نامه/رساله حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی ...) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض در خصوص احقاق حقوق مكتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسئولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسئولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی:

امضا و تاریخ:

مجوز بهره برداری از پایان نامه

بهره برداری از این پایان نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می شود، بلامانع است:

- ☐ بهره برداری از این پایان نامه / رساله برای همگان بلامانع است.
- ☐ بهره برداری از این پایان نامه / رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.
- ☐ بهره برداری از این پایان نامه / رساله تا تاریخ ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما:

تاریخ:

امضا:

تقدیم به خانواده‌های عزیزمان

تشکر و تقدیر

در پایان این پروژه از استاد فرزانه و گرانقدر، جناب آقای دکتر محمد فرخی نهایت تشکر را داریم که با راهنمایی‌های ارزشمند خود ما را در راستای انجام پروژه همراهی فرمودند.

فصل یک: مقدمه.....	۱
۱-۱- تاریخچه.....	۲
۱-۲- چهارپره.....	۳
۱-۳- مزایا و معایب.....	۴
۱-۴- کاربردها.....	۵
۱-۵- شمای کلی از چهارپره.....	۷
۱-۶- پیکربندی پایان نامه.....	۷
فصل ۲: ساختمان مکانیکی و الکترونیکی چهارپره.....	۹
۱-۲- مقدمه.....	۱۰
۲-۲- بدنه.....	۱۰
۳-۲- موتورها.....	۱۱
۴-۲- کارانداز.....	۱۲
۵-۲- حسگر ژيروسکوپ.....	۱۳
۶-۲- باتری.....	۱۴
۷-۲- برد رزبری پای.....	۱۵
۸-۲- حسگر آلتراسونیک.....	۱۶
فصل ۳: مدل سازی.....	۱۸
۱-۳- مقدمه.....	۱۹
۲-۳- ساختار مکانیکی.....	۱۹
۳-۳- زیرتحریک بودن سیستم.....	۲۲
۴-۳- مدل سازی.....	۲۳
فصل ۴: شبیه سازی و کنترل.....	۲۶
۱-۴- مقدمه.....	۲۷
۲-۴- بلوک دیاگرام سیستم.....	۲۷
۳-۴- کنترل کننده PID.....	۲۸
۱-۳-۴- تنظیم پارامترهای کنترل کننده به روش زیگلر- نیکلز.....	۲۹
۲-۳-۴- طراحی کنترل کننده به روش فازی.....	۳۲

۴۰	..... حسگر	۴-۴-۴
۴۱	..... MPU9250 مدل حسگرژیروسکوپ	۴-۴-۱
۴۱	..... فیلترکالمن	۴-۴-۱-۱
۴۳	..... فیلتر کامپلمنتری	۴-۴-۱-۲
۴۳	..... حسگر آلتراسونیک	۴-۴-۲
۴۴	..... مدولاسیون پهنای پالس (PWM)	۴-۵
۴۸	..... فصل ۵: نتایج عملی	
۴۹	..... مقدمه	۵-۱
۴۹	..... عملکرد حسگر	۵-۲
۵۴	..... کنترل زاویا به کمک کنترل کننده فازی	۵-۳
۶۱	..... کنترل ارتفاع	۵-۴
۸۸	..... فصل ۶: جمع بندی و پیشنهادات	
۸۹	..... چالش ها و مشکلات	۶-۱
۸۹	..... جمع بندی و پیشنهادات	۶-۲
۹۱	..... مراجع	

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: شمای کلی یک چهارپره..... ۳
- شکل ۱-۲: بلوک دیاگرام چهارپره..... ۷
- شکل ۱-۳: تصویری از بدنه استفاده شده در چهارپره..... ۱۰
- شکل ۲-۱: تصویری از موتور استفاده شده در چهارپره..... ۱۱
- شکل ۲-۲: تصویری از کارانداز استفاده شده در چهارپره..... ۱۲
- شکل ۲-۳: تصویری از نحوه متصل کردن کارانداز..... ۱۲
- شکل ۲-۴: تصویری از حسگر استفاده شده در چهارپره..... ۱۳
- شکل ۲-۵: تصویری از باتری استفاده شده در چهارپره..... ۱۴
- شکل ۲-۶: برد رزبری پای 3b plus..... ۱۵
- شکل ۲-۷: حسگر آلتراسونیک HC-SR04..... ۱۶
- شکل ۲-۸: شماتیک مدار حسگر آلتراسونیک..... ۱۷
- شکل ۳-۱: ساختار چهارپره..... ۱۹
- شکل ۳-۲: نیروی بالابر..... ۲۰
- شکل ۳-۳: حرکت رول..... ۲۰
- شکل ۳-۴: حرکت پیچ..... ۲۱
- شکل ۳-۵: حرکت یاو..... ۲۱
- شکل ۳-۶: نمودار نیروها و شتابها در حرکت رول..... ۲۲
- شکل ۴-۱: بلوک دیاگرام سیستم چهارپره..... ۲۷
- شکل ۴-۲: سیستم حلقه بسته با کنترل کننده PID..... ۲۸
- شکل ۴-۳: شبیه سازی زاویه رول با کنترل کننده PID به روش زیگلر - نیکلز..... ۳۰
- شکل ۴-۴: شبیه سازی زاویه پیچ با کنترل کننده PID به روش زیگلر - نیکلز..... ۳۰
- شکل ۴-۵: شبیه سازی زاویه یاو با کنترل کننده PID به روش زیگلر - نیکلز..... ۳۱
- شکل ۴-۶: شبیه سازی ارتفاع با کنترل کننده PID به روش زیگلر - نیکلز..... ۳۱
- شکل ۴-۷: کنترل کننده فازی..... ۳۲

شکل ۴-۸: ساختار FLC	۳۳
شکل ۴-۹: ساختار کلی سیستم فازی	۳۳
شکل ۴-۱۰: توابع عضویت ورودی سیستم فازی	۳۴
شکل ۴-۱۱: توابع عضویت خروجی سیستم فازی	۳۴
شکل ۴-۱۲: شبیه سازی زاویه رول با کنترل کننده PID به روش فازی	۳۵
شکل ۴-۱۳: شبیه سازی زاویه پیچ با کنترل کننده PID به روش فازی	۳۶
شکل ۴-۱۴: شبیه سازی زاویه یاو با کنترل کننده PID به روش فازی	۳۶
شکل ۴-۱۵: شبیه سازی ارتفاع با کنترل کننده PID به روش فازی	۳۷
شکل ۴-۱۶: بلوک دیاگرام سیستم با کنترل آبشاری	۳۷
شکل ۴-۱۷: زاویه پیچ ۱۰ درجه	۳۸
شکل ۴-۱۸: زاویه رول ۱۵ درجه	۳۸
شکل ۴-۱۹: ارتفاع	۳۹
شکل ۴-۲۰: ارتفاع	۳۹
شکل ۴-۲۱: زاویه رول	۴۰
شکل ۴-۲۲: زاویه پیچ	۴۰
شکل ۴-۲۳: فرآیند بازگشتی الگوریتم فیلتر کالمن	۴۲
شکل ۴-۲۴: نمودار ولتاژ موتور بر حسب دوره کاری در فرکانس ۱۰۰ هرتز	۴۵
شکل ۴-۲۵: نمودار ولتاژ موتور بر حسب دوره کاری در فرکانس ۴۰۰ هرتز	۴۵
شکل ۴-۲۶: نمودار ولتاژ موتور بر حسب دوره کاری در فرکانس ۴۰۰ هرتز بعد از کالیبراسیون	۴۶
شکل ۵-۱: زاویه رول نشان داده شده توسط حسگر	۴۸
شکل ۵-۲: زاویه پیچ نشان داده شده توسط حسگر	۴۹
شکل ۵-۳: بلوک دیاگرام ترکیب داده هایژیروسکوپ و شتاب سنج	۵۰
شکل ۵-۴: زاویه رول به دست آمده از شتاب سنج	۵۰
شکل ۵-۵: زاویه پیچ به دست آمده از شتاب سنج	۵۱
شکل ۵-۶: سرعت زاویه ای در راستای زاویه پیچ به دست آمده ازژیروسکوپ	۵۱
شکل ۵-۷: سرعت زاویه ای در راستای زاویه رول به دست آمده ازژیروسکوپ	۵۲
شکل ۵-۸: زاویه رول پس از ترکیب داده های حسگر به وسیله فیلتر کالمن	۵۲

- شکل ۵-۹: زاویه پیچ پس از ترکیب داده‌های حسگر به وسیله فیلتر کالمن..... ۵۳
- شکل ۵-۱۰: زاویه رول با اعمال فیلتر کامپلمنتی..... ۵۳
- شکل ۵-۱۱: زاویه پیچ با اعمال فیلتر کامپلمنتی..... ۵۴
- شکل ۵-۱۲: زاویه رول..... ۵۵
- شکل ۵-۱۳: زاویه پیچ..... ۵۵
- شکل ۵-۱۴: ضریب تناسبی کنترل کننده فاز برای زاویه رول..... ۵۶
- شکل ۵-۱۵: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فاز برای زاویه رول..... ۵۶
- شکل ۵-۱۶: ضریب تناسبی کنترل کننده فاز برای زاویه پیچ..... ۵۷
- شکل ۵-۱۷: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فاز برای زاویه پیچ..... ۵۷
- شکل ۵-۱۸: سیگنال کنترلی U2..... ۵۸
- شکل ۵-۱۹: سیگنال کنترلی U3..... ۵۸
- شکل ۵-۲۰: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۱..... ۵۹
- شکل ۵-۲۱: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۲..... ۵۹
- شکل ۵-۲۲: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۳..... ۶۰
- شکل ۵-۲۳: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۴..... ۶۰
- شکل ۵-۲۴: کنترل ارتفاع چهارپره..... ۶۱
- شکل ۵-۲۵: زاویه‌های چهارپره در ارتفاع ۳۰ سانتی متر..... ۶۲
- شکل ۵-۲۶: ضریب تناسبی کنترل کننده فاز برای ارتفاع..... ۶۲
- شکل ۵-۲۷: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فاز برای ارتفاع..... ۶۳
- شکل ۵-۲۸: ضریب انتگرال گیر کنترل کننده فاز برای ارتفاع..... ۶۳
- شکل ۵-۲۹: ضریب تناسبی کنترل کننده فاز زاویه رول..... ۶۴
- شکل ۵-۳۰: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فاز زاویه رول..... ۶۴
- شکل ۵-۳۱: ضریب تناسبی کنترل کننده فاز زاویه پیچ..... ۶۵
- شکل ۵-۳۲: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فاز زاویه پیچ..... ۶۵
- شکل ۵-۳۳: سیگنال کنترلی U1..... ۶۶
- شکل ۵-۳۴: سیگنال کنترلی U2..... ۶۶
- شکل ۵-۳۵: سیگنال کنترلی U3..... ۶۷

شکل ۵-۳۶: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۱.....	۶۷
شکل ۵-۳۷: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۲.....	۶۸
شکل ۵-۳۸: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۳.....	۶۸
شکل ۵-۳۹: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۴.....	۶۹
شکل ۵-۴۰: کنترل ارتفاع چهارپره.....	۶۹
شکل ۵-۴۱: زاویه رول.....	۷۰
شکل ۵-۴۲: زاویه پیچ.....	۷۰
شکل ۵-۴۳: ضریب تناسبی کنترل کننده فازي برای ارتفاع.....	۷۱
شکل ۵-۴۴: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فازي برای ارتفاع.....	۷۱
شکل ۵-۴۵: ضریب انتگرال گیر کنترل کننده فازي برای ارتفاع.....	۷۲
شکل ۵-۴۶: ضریب تناسبی کنترل کننده فازي زاویه رول.....	۷۲
شکل ۵-۴۷: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فازي زاویه رول.....	۷۳
شکل ۵-۴۸: ضریب انتگرال گیر کنترل کننده فازي زاویه رول.....	۷۳
شکل ۵-۴۹: ضریب تناسبی کنترل کننده فازي زاویه پیچ.....	۷۴
شکل ۵-۵۰: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فازي زاویه پیچ.....	۷۴
شکل ۵-۵۱: ضریب انتگرال گیر کنترل کننده فازي زاویه پیچ.....	۷۵
شکل ۵-۵۲: سیگنال کنترلي U1.....	۷۵
شکل ۵-۵۳: سیگنال کنترلي U2.....	۷۶
شکل ۵-۵۴: سیگنال کنترلي U3.....	۷۶
شکل ۵-۵۵: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۱.....	۷۷
شکل ۵-۵۶: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۲.....	۷۷
شکل ۵-۵۷: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۳.....	۷۸
شکل ۵-۵۸: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۴.....	۷۸
شکل ۵-۵۹: کنترل ارتفاع چهارپره.....	۷۹
شکل ۵-۶۰: زاویه پیچ چهارپره.....	۷۹
شکل ۵-۶۱: زاویه رول چهارپره.....	۸۰
شکل ۵-۶۲: ضریب تناسبی کنترل کننده فازي برای ارتفاع.....	۸۰

- شکل ۵-۶۳: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فاز ی برای ارتفاع..... ۸۱
- شکل ۵-۶۴: ضریب انتگرال گیر کنترل کننده فاز ی برای ارتفاع..... ۸۱
- شکل ۵-۶۵: ضریب تناسبی کنترل کننده فاز ی زاویه رول..... ۸۲
- شکل ۵-۶۶: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فاز ی زاویه رول..... ۸۲
- شکل ۵-۶۷: ضریب تناسبی کنترل کننده فاز ی زاویه پیچ..... ۸۳
- شکل ۵-۶۸: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فاز ی زاویه پیچ..... ۸۳
- شکل ۵-۶۹: سیگنال کنترلی U1..... ۸۴
- شکل ۵-۷۰: سیگنال کنترلی U2..... ۸۴
- شکل ۵-۷۱: سیگنال کنترلی U3..... ۸۵
- شکل ۵-۷۲: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۱..... ۸۵
- شکل ۵-۷۳: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۲..... ۸۶
- شکل ۵-۷۴: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۳..... ۸۶
- شکل ۵-۷۵: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۴..... ۸۷

فهرست جداول

جدول ۱-۲: مشخصات موتور ۸۵۰kv استفاده شده در چهارپره.....	۱۱
جدول ۲-۲: مشخصات باتری Tattu.....	۱۴
جدول ۳-۲: مشخصات برد رزبری پای.....	۱۶
جدول ۴-۲: مشخصات حسگر HC-SR04.....	۱۷
جدول ۱-۴: تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID.....	۲۹
جدول ۲-۴: ضرایب محاسبه شده.....	۲۹
جدول ۴-۴: جدول قواعد فازی.....	۳۵
جدول ۵-۴: بازه کاری درایورها در فرکانسهای مختلف.....	۴۴

فصل ۱: مقدمه

۱-۱- تاریخچه

طراحی و تولید اولین مولتی روتورها به سال ۱۹۰۷ میلادی برمی گردد که لویی^۱ و همکارانش در پروژه‌ای یک چهارپره^۲ را ساخته و آن را مورد آزمایش قرار دادند هرچند این پروژه با شکست همراه شد و آن‌ها نتوانستند پرنده را در آسمان ثابت نگاه دارند اما مهم موفقیت آن‌ها در طراحی و شروع این قضیه بود. در سال ۱۹۲۰ یک مهندس فرانسوی دیگر اولین بالگرد چهارپره را اختراع کرد و مسافت ۳۶۰ متر را پیمود. در همان سال، وی توانست با چهارپره خود مسافت ۱ کیلومتر را در مدت ۷ دقیقه و چهل ثانیه پرواز کند. پس از آن یک هلیکوپتر چهارروتورهی آمریکایی اولین پرواز خود را در ۱۸ دسامبر ۱۹۲۲ انجام داد. در اواخر سال ۲۰۰۰ میلادی پیشرفت در الکترونیک باعث ساخت کنترل کننده‌های سبک پرواز ارزان، شتاب سنج (حسگر اینرسی)^۳، سیستم موقعیت‌یابی جهانی و دوربین‌ها شد. این باعث شد که پیکربندی چهارپره برای وسایل نقلیه کوچک هواپیماهای بدون سرنشین محبوب شود و این دستگاه‌ها به سرعت فراگیر شوند.

قدمت این محصول تقریباً یک قرن است و از گذشته تلاش‌ها و پیگیری‌های بی وقفه‌ای برای طراحی و تولید آن انجام شده است و امروزه چندپره‌ها به نمونه‌های کاملی که در دسترس است، مبدل گشته است. از این‌رو، این ربات‌های متحرک اهمیت فوق‌العاده‌ای یافته‌اند. در بسیاری از موارد، وسایل نقلیه زمینی محدودیت‌های ذاتی دارند که نمی‌توانند به اهداف مطلوب با توجه به محیطی که در آن قرار دارند، برسند. در چنین مواردی وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین یک راه حل طبیعی به نظر می‌رسد.

امروزه انواع مختلفی از پرنده‌های بدون سرنشین^۴ در ابعاد مختلف و برای کاربردهای مختلف ساخته می‌شوند و در سطح وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای مواردی که ارتفاع بسیار زیاد و یا سرعت بسیار بالا مورد نیاز نمی‌باشد، پرنده‌های بدون سرنشین با بال‌های گردان نسبت به پرنده‌هایی با بال‌های ثابت اولویت دارند. مزیت بزرگ این پرنده‌ها نسبت به نوع با بال‌های ثابت این است که در هنگام فرود و بلندشدن نیاز به فضای کمتری دارند؛ لیکن کنترل آن‌ها با چالش‌های بیشتری مواجه است.

وسایل پرنده را از چندین نظر مانند اصول پرواز و نوع پیش‌روندگی، تعداد موتورها، ساختار شکلی، کاربرد و غیره می‌توان دسته بندی کرد. چندپره‌ها بر اساس تعداد موتور به گروه‌های ریزتری تبدیل می‌شوند

¹ Louis

² quadrotor

³ Inertial Measurement Unit (IMU)

- سینگل کوپتر^۱ (تک موتور)

- دوال کوپتر^۲ (دو موتور)

- تری کوپتر^۳ (سه موتور)

- کواد کوپتر^۴ (چهار موتور)

- هگزا کوپتر^۵ (شش موتور)

- اکتا کوپتر^۶ (هشت موتور)

- مولتی روتور^۷ (بیش از هشت موتور)

۱-۲- چهارپره

در این پروژه، پرنده بدون سرنشین با چهار موتور معرفی شده است که یک بالگرد با ۴ ملخ (دو جفت ملخ که در خلاف هم می چرخند) می باشد (شکل ۱-۱). در این ربات هوایی، چهار موتور بر روی ۴ بازو و به فاصله یکسانی از هم قرار گرفته اند.



شکل ۱-۱: شمای کلی یک چهارپره

¹ Single Copter

² Dual Copter

³ Tri Copter

⁴ Quad Copter

⁵ Hexa Copter

⁶ Octo Copter

⁷ Multicopter

چهارپره‌ها متداول‌ترین نوع از مولتی‌روتورها هستند و به دلیل پایداری بسیار عالی در هنگام پرواز و از طرفی اصطکاک کم و کم‌مصرف بودن آن‌ها و آسان‌تر بودن ساخت و کنترل آن‌ها نسبت دیگر مولتی‌روتورها از محبوبیت خاصی برخوردار هستند.

چهارپره‌ها به دو ساختار متداول H و X ساخته می‌شوند. در چهارپره‌های نوع H موتورهای کناری هم‌جهت می‌چرخند و در چهارپره‌های نوع X، موتورهای روبه‌رو یک جهت می‌چرخند [۱]. به‌طور کلی، چهارپره‌ها با ساختار X به دلیل دید و ایجاد پایداری بیشتر متداول‌تر است. چهارپره دارای چهار موتور با سرعت قابل تنظیم است. تغییرات ارتفاع متناسب با تغییر سرعت هم‌زمان چهار موتور می‌باشد. با افزایش هم‌زمان سرعت هر چهار موتور، چهارپره بالا می‌رود و برای کاهش ارتفاع باید به طور هم‌زمان سرعت هر چهار موتور را کاهش داد. تغییرات زاویه پیچ^۱ متناسب با تغییر سرعت در موتورهای جلو و عقب چهارپره می‌باشد و تغییرات زاویه رول^۲ متناسب با تغییر سرعت موتورهای سمت راست و چپ می‌باشد و در آخر تغییرات زاویه یاو^۳ متناسب با تغییر سرعت در موتورهای راست گرد و چپ گرد می‌باشد.

چهارپره‌ها به طور ذاتی ناپایدار هستند به همین دلیل طراحی کنترل‌کننده برای پایداری آن‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار است.

۱-۳- مزایا و معایب

با وجود مزایای بسیار سیستم چهارپره، این سیستم‌ها معایبی نیز دارند که در ادامه به مزایا و معایب چهارپره‌ها اشاره شده است.

مزایا:

- قابلیت استفاده در محیط‌های پرخطر
- نصب و استفاده نسبتاً راحت
- قابلیت مانورپذیری بالا
- امکان تعامل با محیط

^۱ Pitch

^۲ Roll

^۳ Yaw

معایب:

- به دلیل استفاده از چهار موتور مصرف توان بالاست در نتیجه مداومت پروازی پایین دارد.

- هزینه بالا

- نیاز به سیستم‌های الکتریکی بیشتر (مانند حسگرها)

- الگوریتم کنترلی پیچیده

- عملکرد نامطلوب در محیط‌هایی با شرایط سخت (وزش باد شدید و ...)

۱-۴- کاربردها

سیستم چهارپره کاربردهای گوناگونی دارد که از آن جمله می‌توان به جمع‌آوری آمار و اطلاعات مفید در امداد و نجات در هنگام سوانح طبیعی از قبیل زلزله، سیل و آتش‌سوزی اشاره کرد. یکی از مهم‌ترین کاربردهای این سیستم‌ها تصویربرداری هوایی به منظور تهیه عکس و فیلم می‌باشد. همچنین از چهارپره برای دسترسی به نقاط پرخطر و صعب‌العبور مانند معادن استفاده می‌شود. علاوه بر کاربردهای گفته‌شده چهارپره‌ها کاربردهای گوناگونی مانند حمل بار، پایش خطوط گاز و برق، سم‌پاشی، نقشه‌برداری هوایی دارند که در ادامه به توضیح مختصری درباره این کاربردها می‌پردازیم.

● امداد و نجات

یکی از کاربردهای مهم چهارپره امداد و نجات می‌باشد. در بسیاری از سوانح و بلایای طبیعی امروزه از چهارپره‌ها برای جمع‌آوری آمار و اطلاعات مهمی پیرامون آن موضوع استفاده می‌شود. بی‌شک در بسیاری از مسیرها و راه‌های صعب‌العبور حضور انسان غیرممکن است لذا با ارسال یک چهارپره می‌توان اطلاعات مفیدی را دریافت کرد. این زمینه روزبه‌روز در حال ارتقاء و پیشرفت است و بی‌شک در آینده‌ای نه چندان دور حضور محصولات پروازی امداد رسان، بیشتر خواهد شد [۲].

● مأموریت در محیط‌های آلوده

اولین مأموریت‌ها در محیط‌های آلوده‌ی پرنده‌های بدون سرنشین به سال‌های ۱۹۴۶ تا ۱۹۴۸ میلادی برمی‌گردد که پرنده‌های بدون سرنشین درون ابرهای هسته‌ای پرواز کرده و پس از انفجار بمب نمونه‌هایی از آن را جمع‌آوری می‌کردند. استفاده از سیستم‌های بدون سرنشین احتمال موفقیت مأموریت را افزایش و خطر احتمالی برای نیروها را کاهش می‌دهد [۳].

● عکاسی و فیلم برداری هوایی

پرکاربردترین کاربردهای چهارپره تصویربرداری هوایی است. به کمک دوربین‌های موجود بر روی یک چهارپره حرفه‌ای می‌توان عکس و فیلم‌های بسیار زیبایی را ثبت و ضبط کرد. اغلب چهارپره‌های حرفه‌ای مجهز به دوربین‌های بسیار باکیفیتی هستند که می‌توان از آن‌ها برای ساخت مستند، کلیپ، ویدئو، تبلیغات و تیزر، پایش و ... استفاده کرد. امروزه در بسیاری از فیلم‌های تلویزیونی و سینمایی بی شک تصاویری به صورت هوایی وجود دارد و این برای مخاطب بسیار جذاب است.

● سم‌پاشی

سم‌پاشی یکی از جدیدترین کاربردهای چهارپره در صنعت کشاورزی می‌باشد. با استفاده از یک پهپاد سم‌پاش می‌توان با سرعتی بسیار بالاتر از نیروی انسانی و با هزینه‌ای بسیار کمتر از سم‌پاشی توسط هواپیما این مسئله رو انجام داد. از دیگر کاربردهای چهارپره در صنعت کشاورزی می‌توان به مسئله زمین‌شناسی و شناسایی آفات اشاره کرد که خود موضوع بسیار مهمی در این صنعت می‌باشد.

● ماموریت‌های خطرناک

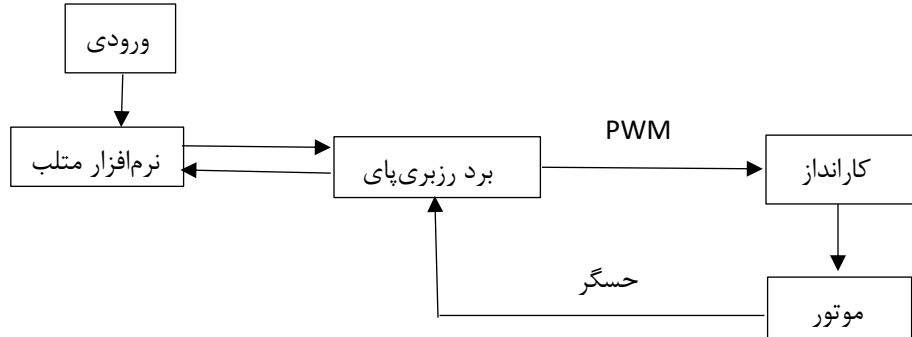
استفاده از سیستم‌های بدون سرنشین در ماموریت‌های خطرناک هزینه‌های انسانی را در صورت عدم موفقیت مأموریت کاهش می‌دهد. به طور کلی کاهش خطر و اطمینان بیشتر از موفقیت مأموریت دو محرک عمده برای تداوم استفاده از این سیستم‌های بدون سرنشین است.

● نقشه‌برداری هوایی

یکی از امور بسیار کاربرد در صنعت چهارپره‌ها موضوع نقشه‌برداری هوایی است. نقشه‌برداری هوایی یکی از کارهایی بوده است که در گذشته و هم‌اکنون توسط ماهواره‌ها صورت می‌گرفت. اما امروز با وجود چهارپره‌های حرفه‌ای در این صنعت می‌توان به راحتی بیش از پیش اقدام به نقشه‌برداری هوایی نمود. استفاده از چهارپره‌ها برای کار نقشه‌برداری هوایی نه تنها باعث اجرای سریع این‌گونه پروژه‌ها می‌گردد بلکه می‌توان با هزینه‌ای بسیار کمتر این کار را انجام داد.

۱-۵- شمای کلی از چهارپره

ساختار این چهارپره شامل بدنه و بازوها و اتصالات، موتورها، کارانداز^۱ها، برد رزبری پای، حسگر ژيروسکوپ و آلتراسونیک می باشد.



شکل ۱-۲: بلوک دیاگرام چهارپره

بلوک دیاگرام شکل ۱-۲ شمای کلی از عملکرد یک چهارپره را نشان می دهد. چهارپره با دریافت اطلاعات از کامپیوتر (به عنوان مثال، نرم افزار متلب) و با استفاده از ارتباط سریال، اطلاعات را به سخت افزار (مثلا برد رزبری پای) می فرستد. به جای برد رزبری پای می توان از هر برد دیگری که قابلیت دریافت و ارسال اطلاعات به شکل سریال و همچنین فرکانس مناسب برای پردازش اطلاعات و تعداد مناسب پایه های ورودی-خروجی^۲ را داشته باشد، استفاده کرد. موقعیت و زاویه سنجیده شده توسط حسگرها از طریق ارتباط وای فای برد به متلب فرستاده می شود.

۱-۶- پیکربندی پایان نامه

در این قسمت به توضیح کلی در مورد آنچه در فصل های بعدی آمده است می پردازیم. در فصل اول به توضیح کلی در مورد تاریخچه ربات های پرنده و چهارپره پرداخته خواهد شد. با توجه به مروری که بر تاریخچه شد، می توان گفت برای کنترل چهارپره ابتدا باید مدل ریاضی سیستم که خود شامل پارامترهای فیزیکی است، شناخته شود و سپس روش کنترلی مناسب برای کنترل سیستم انتخاب گردد. در فصل دوم ساختمان مکانیکی و الکتریکی چهارپره شامل برد و حسگرهای استفاده شده معرفی می گردند و سپس در فصل سوم به مدل سازی ریاضی سیستم به منظور فراهم کردن امکان شبیه سازی به طور مختصر پرداخته می شود. در فصل چهارم به

¹ Driver

² IO

شبیه‌سازی و کنترل چهارپره پرداخته شده است. در فصل پنجم نیز نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی صورت گرفته بر چهارپره گزارش می‌شود و در آخر جمع‌بندی و نتیجه‌گیری به همراه پیشنهاداتی برای ادامه کار گنجانده شده است.

فصل ۲:

ساختمان مکانیکی و الکترونیکی چهارپره

۲-۱- مقدمه

چهارپره شامل یک بدنه با چهار بازو می‌باشد که به هر بازو یک موتور متصل شده‌است. موتورها از نوع بدون جاروبک^۱ هستند. مدار و سیستم الکترونیکی چهارپره موجب حرکت سیستم می‌شود. به طور کلی چهارپره از ۴ موتور بدون جاروبک و ۴ درایور و باتری تشکیل شده‌است. سایر تجهیزات به کاررفته شامل برد رزبری پای و حسگرشتاب‌سنج و ژيروسکوپ می‌باشد. در این فصل به بررسی تجهیزات مکانیکی و الکترونیکی به کاررفته در چهارپره می‌پردازیم.

۲-۲- بدنه

بدنه انتخاب شده مدل S500 می‌باشد. این بدنه شامل چهار بازو با طول ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد (شکل ۲-۱) که می‌توان کاراندازها را بر روی آن قرارداد. در انتهای هر بازو یک موتور قرار گرفته که موتورها به کاراندازها متصل شده‌اند. جنس بدنه از پلاستیک مرغوب و فایبرگلاس می‌باشد که موجب استحکام و سبکی چهارپره می‌شود.



شکل ۲-۱: تصویری از بدنه استفاده شده در چهارپره

¹ Brushless

۲-۳- موتورها

برای ساخت این چهارپره از چهار موتور بدون جاروبک استفاده شده است که این موتورها به کاراندازها متصل می‌شوند. مدل انتخاب شده موتور EMAX 2808 850KV است (شکل ۲-۲) که دارای سه سیم است و این سه سیم به درایور وصل می‌شوند. این موتورها به دلیل جریان کشی کم نسبت به رانش آن و همچنین وزن کم مورد توجه قرار گرفته‌اند. وزن این موتور ۶۰ گرم است و قطر محور آن ۴ میلی‌متر است. به منظور تغذیه این موتورها از باتری لیتیوم پلیمر استفاده شده است. جدول ۲-۱ مشخصات موتورها را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲: تصویری از موتور استفاده شده در چهارپره [۴].

جدول ۲-۱: مشخصات موتور ۸۵۰ kV استفاده شده در چهارپره

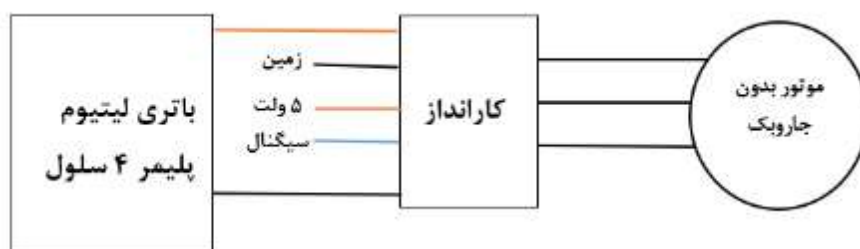
طول	۲۵ میلی متر
قطر	۳۵ میلی متر
تعداد سل‌ها	۳ سل
شفت	۴ میلی متر
وزن	۶۰ گرم

۲-۴- کارانداز

برای ساخت این چهارپره از چهار کارانداز استفاده شده است که موتورها به آن‌ها متصل می‌شوند. مدل انتخاب شده کارانداز از نوع sky 30A است که دارای دو سیم ورودی برای متصل کردن به باتری است و سه سیم خروجی برای متصل کردن به موتور است. همچنین سه سیم دیگر نیز در این کاراندازها وجود دارد که یکی از آن‌ها زمین و دیگری ۵ ولت و دیگری سیگنال است که در این پروژه از سیگنال PWM استفاده شده است. جریان خروجی برای این کارانداز ۳۰ آمپر، بازه ولتاژ ورودی آن بین ۴ تا ۱۶ ولت، ابعاد آن ۴۵×۲۴×۸ میلی‌متر، و وزن آن ۸۰ گرم است. از این کاراندازها برای موتورهای بدون جاروبک استفاده می‌شود. در شکل ۲-۳ تصویری از کارانداز و در شکل ۲-۴ نحوه متصل کردن آن مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۳: تصویری از کارانداز استفاده شده در چهارپره [۴]



شکل ۲-۴: تصویری از نحوه متصل کردن کارانداز

۲-۵- حسگر ژيروسکوپ

برای ساخت این چهارپره از حسگر اینرسی MPU9250 جهت تعیین وضعیت چهارپره استفاده شده است. این حسگر دارای شتابسنج و ژيروسکوپ و قطب‌نما می‌باشد. مشخصات ژيروسکوپ آن به صورت زیر است:

۱- خروجی دیجیتال برای سه محور X, Y و Z در گستره قابل برنامه‌ریزی ± 250 , ± 500 , ± 1000 و ± 2000 درجه بر ثانیه.

۲- نمونه‌گیری داده‌ها به صورت ۱۶ بیتی

۳- دارای فیلتر قابل برنامه‌ریزی دیجیتال

۴- جریان مصرفی بسیار ناچیز در محدوده ۵ میکروآمپر تا ۳.۶ میلی‌آمپر

و مشخصات شتابسنج آن به صورت زیر است:

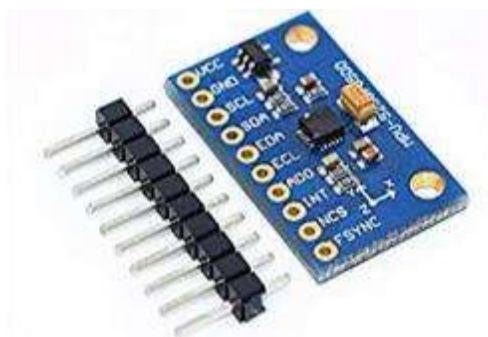
۱- خروجی دیجیتال برای سه محور X, Y و Z در گستره قابل برنامه‌ریزی ± 2 , ± 4 , ± 8 و ± 16 متر بر مجذور ثانیه.

۲- نمونه‌گیری داده‌ها به صورت ۱۶ بیتی

۳- جریان مصرفی در حدود ۵۰۰ میکروآمپر

۴- تشخیص ضربه و وقفه‌های در حال برنامه‌ریزی

در شکل ۲-۵ تصویر از این حسگر مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۵: تصویر از حسگر استفاده‌شده در چهارپره

۲-۶- باتری

برای ساخت این چهارپره از یک باتری لیتیوم پلیمر استفاده شده است. این باتری‌ها با میلی آمپر ساعت‌های مختلف عرضه می‌شوند و هرچه میلی آمپر ساعت آن بیشتر باشد مدت زمان پرواز افزایش می‌یابد. ولتاژ هر سلول از باتری‌های لیتیوم پلیمر ۳.۷ ولت است و بنابراین باتری با ۴ سلول ولتاژ ۱۴.۸ ولت دارد که باتوجه به موتورهای بهترین باتری برای استفاده در این پروژه است. باتری استفاده شده ظرفیت ۳۷۰۰ میلی آمپر ساعت را دارا می‌باشد. در شکل ۲-۶ تصویری از این باتری مشاهده می‌شود.



مشخصات باتری استفاده شده در جدول ۲-۲ بیان شده است.

جدول ۲-۲: مشخصات باتری Tattu

ولتاژ	۱۴.۸ ولت
ظرفیت	۳۷۰۰ میلی آمپر ساعت
ظرفیت دشارژ پیوسته	۴۵ C
ابعاد	۱۴۹×۲۷×۴۳ میلی متر
وزن	۳۴۷ گرم

۷-۲- برد رزبری پای

رزبری پای سخت افزار مبتنی بر ARM است که دارای قدرت پردازش و سرعت مناسب جهت انجام بسیاری از امور می باشد (شکل ۷-۲). این برد مانند یک کامپیوتر خیلی کوچک عمل می کند و دارای پردازنده و قطعات کنترل ورودی و خروجی است و می توان آن را به عنوان یک مادربورد^۱ بسیار کوچک در نظر گرفت. این برد با استفاده از حافظه SD خود راه اندازی می شود. این دستگاه با کابل میکرو USB تغذیه شده و می تواند با استفاده از کابل تصویر ویدئو و یک پورت سوزنی، خروجی صدا و تصویر داشته باشد و یا با استفاده از کابل HDMI تصویری با کیفیت ارائه دهد. چهار درگاه USB نیز برای آن در نظر گرفته شده که می توان از آن برای ارتباطات مختلف استفاده کرد. از درگاه های USB برای صفحه کلید، ماوس، شبکه بی سیم و کلید دستگاه ها با پشتیبانی از درگاه مذکور می توان استفاده کرد. همچنین این برد مجهز به پورت micro SD برای بارگیری سیستم عامل و ذخیره سازی داده ها نیز می باشد از آن جایی که بردهای رزبری پای دارای پردازنده ARMv7 هستند می توانند طیف گسترده ای از عملیات را بدون مشکل اجرا کنند. بنابراین سیستم عامل لینوکس یا ویندوز را در این بردها به راحتی می توان نصب کرد. ویژگی منحصر به فرد این برد این است که می تواند به سادگی به دستگاه های الکترونیکی دیگر متصل شده و با آنها در تعامل باشد و به تبادل اطلاعات با آنها بپردازد. به همین منظور در این پروژه از یک برد رزبری پای مدل 3b+ استفاده شده است. در جدول ۲-۳ مشخصات این برد آورده شده است.



شکل ۷-۲: برد رزبری پای 3b+

^۱ Motherboard

جدول ۲-۳: مشخصات برد رزبری پای

نوع میکروکنترل کننده	BCM2837B0 Cortex-A53
ولتاژ ورودی	۵ ولت
تعداد پایه‌های ورودی خروجی	۴۰
حافظه	1GB LPDDR2 SDRAM
جریان ورودی	۲.۵ آمپر
سرعت پردازنده	۱.۴ گیگاهرتز
دمای کاری	۵۰- درجه سانتی‌گراد
ابعاد	۸۵×۵۶×۱۷ میلی‌متر

۲-۸- حسگر فراصوت (حسگر آلتراسونیک)

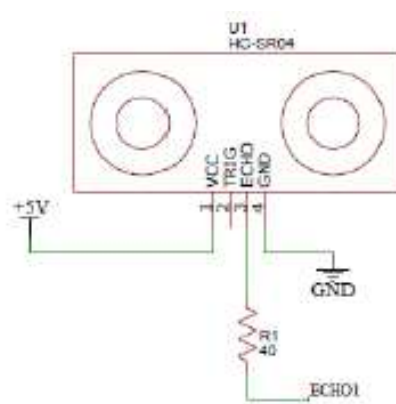
در این پروژه از حسگر فراصوت برای تشخیص فاصله تا موانع استفاده می‌شود. نحوه کار این حسگر به این صورت است که ابتدا فرستنده حسگر موج فراصوت ارسال می‌کند. این موج هنگام برخورد با مانع بازتاب شده و توسط گیرنده حسگر دریافت می‌شود. مدت زمان بازگشت موج صوتی برای اندازه‌گیری فاصله استفاده می‌شود. حسگر فراصوت HC-SR04 از رایج‌ترین حسگرهای فراصوت است که در این پروژه نیز از آن استفاده شده است و بازه کاری آن ۲ تا ۴۰۰ سانتی‌متر است (شکل ۲-۸). از پایه‌های trig و echo برای فرمان فرستادن و دریافت کردن سیگنال بازگشتی موج استفاده می‌شود. در جدول ۲-۴ مشخصات حسگر فراصوت HC-SR04 آورده شده است. در شکل ۲-۹ نیز شماتیک مدار حسگر آلتراسونیک دیده می‌شود.



شکل ۲-۸: حسگر آلتراسونیک HC-SR04

جدول ۲-۴: مشخصات حسگر HC-SR04

ولتاژ کاری	۵V DC
جریان کاری	۱۵ mA
بازه کاری	۲-۴۰۰ cm
رزولوشن	۰.۳cm
زاویه قابل اندازه گیری	۱۵ Degrees
فرکانس کاری	۴۰ Hz
ابعاد	۱۵*۲۰*۴۵mm



شکل ۲-۹: شماتیک مدار حسگر آلتراسونیک

فصل ۳: مدل سازی

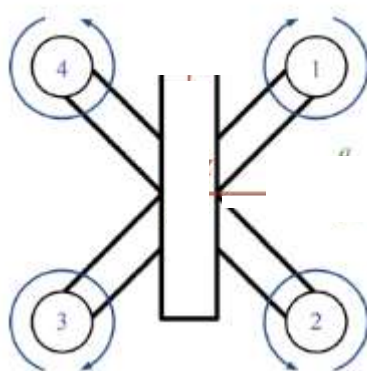
۳-۱- مقدمه

مدل سازی اولین گام در طراحی کنترل کننده برای هر سیستم کنترلی است. بنابراین داشتن مدل دینامیکی ریاضی سیستم برای طراحی کنترل کننده نیاز اساسی می باشد. مدل پرنده بدون سرنشین همواره دارای عدم قطعیت هایی می باشد. هرچه مدل ساده تر باشد، فرآیند طراحی کنترل کننده پیچیده تر خواهد شد و مدل با جزئیات بیشتر منجر به طراحی کنترل کننده دقیق تر خواهد شد. تاکنون محققان بسیاری از راه های مختلف و با تاکید بر جزئیات متفاوتی کار مدل سازی را برای چهارپره انجام داده اند. اما مدل سازی با همه جزئیات آن بسیار پرهزینه است و نیاز به تجهیزاتی مانند تونل باد و یا ادوات سخت افزار در حلقه دارد. در این فصل به بررسی مدل چهارپره و معادلات فضای حالت آن می پردازیم.

۳-۲- ساختار مکانیکی

قبل از ارائه معادلات توصیف کننده سیستم که رفتار چهارپره را مشخص می کند، ابتدا نگاهی گذرا به ساختار مکانیکی و نحوه تغییر جهت و موقعیت با توجه به تغییر در سرعت موتورها خواهیم داشت. چهارپره دارای چهار موتور مستقل با سرعت متغیر که قابل تنظیم هستند، می باشد و کنترل زوایا و موقعیت این سیستم با کنترل سرعت موتورها قابل دسترسی می باشد.

موتورهای روبه رو هم در یک جهت می چرخند به عبارتی موتورهای جلو و عقب در خلاف جهت موتورهای راست و چپ می چرخند. این موتورها را به ترتیب در شکل ۳-۱ با شماره های ۱ تا ۴ نشان می دهیم.



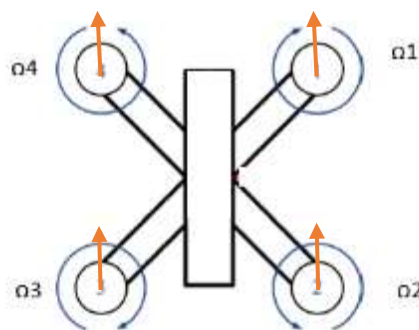
شکل ۳-۱: ساختار چهارپره

در حالت معلق بودن مجموع نیروهای تولیدی در ۴ موتور باید به اندازه‌ای باشد که بر نیروی وزن غلبه کند و هر چهار موتور با سرعت یکسان بچرخند. در این حالت رابطه زیر بین سرعت‌ها برقرار است

$$\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega_3 = \Omega_4 \quad (1-3)$$

که در آن Ω_i سرعت موتور i ام می‌باشد.

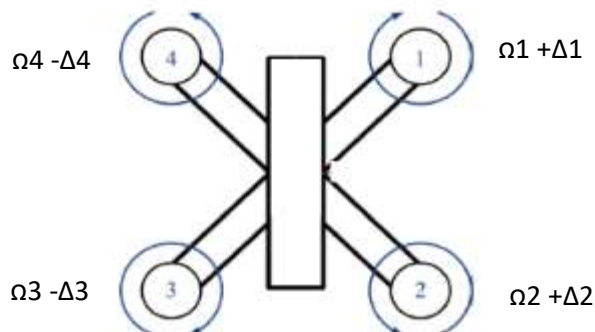
تغییرات ارتفاع با تغییر سرعت همزمان در هر چهار موتور به یک اندازه، متناسب است. شکل ۲-۳ نیروبالابر را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳: نیروی بالابر

• حرکت رول

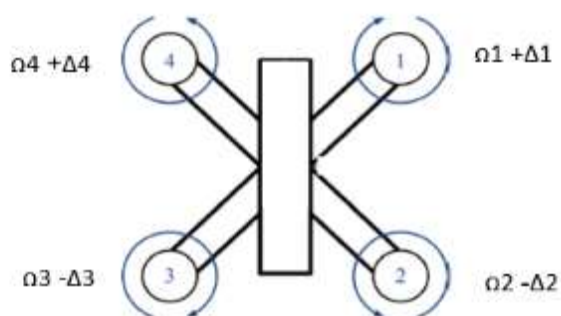
برای ایجاد زاویه رول مثبت موتور شماره یک و دو با سرعت بیشتری نسبت به موتور شماره سه و چهار باید بچرخند. شکل ۳-۳ سرعت و جهت چرخش موتورها در حرکت رول را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۳: حرکت رول

• حرکت پیچ

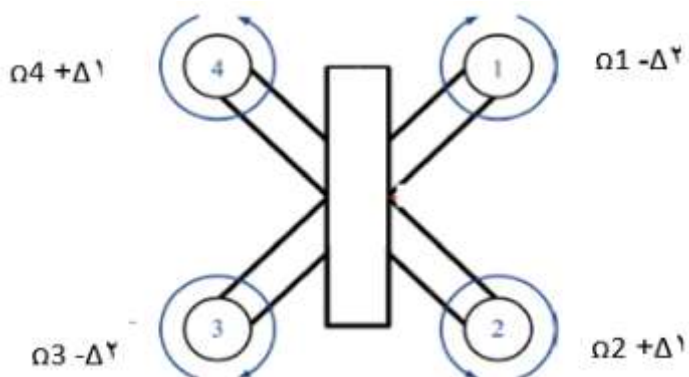
برای ایجاد زاویه پیچ مثبت موتور شماره یک و ۴ با سرعت بیشتری نسبت به موتور شماره دو و سه باید بچرخند. شکل ۳-۴ سرعت و جهت چرخش موتورها در حرکت پیچ را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۴: حرکت پیچ

• حرکت یاو

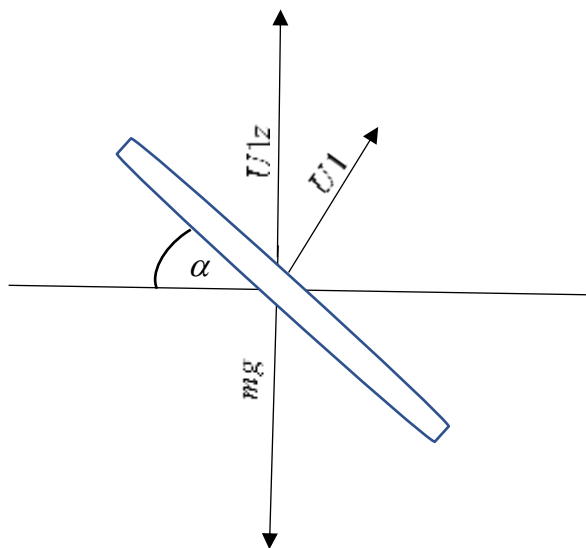
تغییرات یاو متناسب با تغییرات سرعت در جفت موتورهای راست‌گرد و چپ‌گرد می‌باشد. شکل ۳-۵ سرعت و جهت چرخش موتورها در حرکت یاو را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۵: حرکت یاو

۳-۳- زیر تحریک بودن سیستم

اگر تعداد عملگرهای یک سیستم از تعداد درجات آزادی آن کمتر باشد، به آن سیستم زیر تحریک مکانیکی می‌گویند. چهارپره یک ربات پرنده بدون سرنشین است که دارای شش درجه آزادی است، ولی تنها چهار عملگر دارد. از ترکیب نیروها و گشتاورهای تولید شده به وسیله عملگرهای آن چهار ورودی کنترلی مستقل تعریف شده است. در سیستم‌های زیر تحریک شونده برای دستیابی به حرکت در راستای درجات آزادی که در آن راستاها عملگر وجود ندارد، باید از آثار حرکات در راستاهایی که عملگر وجود دارد، استفاده کرد. مثلاً هرگاه سیستم زاویه رول به اندازه α داشته باشد به شرطی که زاویه پیچ و یاء صفر باشد، در صورتی که نیروهای حاصل از چرخش روتورها بتوانند بر نیروی گرانش غلبه کنند، سیستم دارای شتابی برابر با $g \times \tan(\alpha)$ در راستای طولی خواهد بود [۵].



شکل ۳-۶: نمودار نیروها و شتاب‌ها در حرکت رول

با توجه به تجزیه برداری نیروها که در شکل ۳-۶ نشان داده شده است، می‌توان رابطه بین نیروها و شتاب‌ها را به صورت زیر به دست آورد

$$U_{1x} = U_1 \times \sin(\alpha) \quad (۳-۲)$$

که در آن U_{1x} تجزیه برداری U_1 در راستای محور x و U_1 نیروی حاصل از چرخش روتورها و α زاویه رول می باشد. همچنین

$$U_{1y} = U_1 \times \cos(\alpha) \quad (3-3)$$

که در آن U_{1y} تجزیه برداری U_1 در راستای محور y و U_1 نیروی حاصل از چرخش روتورها و α زاویه رول می باشد و

$$a_x = g \times \tan(\alpha) \quad (4-3)$$

که در آن a_x شتاب در راستای محور x و g شتاب گرانش زمین است و α زاویه رول می باشد. بنابراین برای دستیابی به حرکات عرضی باید زاویه رول و برای دستیابی به حرکات طولی باید زاویه پیچ را تغییر داد. اما برای تغییر ارتفاع نیازی به تغییر زوایا نیست بلکه به طور مستقیم با نیروی کنترلی موجود در راستای z می توان ارتفاع را تغییر داد.

۳-۴- مدل سازی

برای مدل سازی سیستم چهارپره در صورت صفر در نظر گرفتن اغتشاشات خارجی، اصطکاک و نیروها و تکانه های آیرودینامیکی می توان مدل را به صورت زیر بیان کرد [۶]

$$\dot{x} = \left\{ \begin{array}{l} \ddot{\phi} = \dot{\psi} \dot{\theta} \left(\frac{I_{xx} - I_{zz}}{I_{xx}} \right) + \dot{\theta} \left(\frac{J}{I_{xx}} \right) \Omega + \frac{U_2}{I_{xx}} \\ \ddot{\theta} = \dot{\psi} \dot{\phi} \left(\frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \right) - \dot{\phi} \left(\frac{J}{I_{yy}} \right) \Omega + \frac{U_3}{I_{yy}} \\ \ddot{\psi} = \dot{\theta} \dot{\phi} \left(\frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \right) + \frac{U_4}{I_{zz}} \\ \ddot{z} = g - (\cos \phi \cos \theta) \frac{U_1}{m} \\ \ddot{x} = (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) \frac{U_1}{m} \\ \ddot{y} = (\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi) \frac{U_1}{m} \end{array} \right. \quad (5-3)$$

که در آن $\ddot{\phi}$ و $\ddot{\theta}$ به ترتیب شتاب زاویه ای حول محورهای z ، x ، y می باشد و $\dot{\psi}$ ، $\dot{\phi}$ و $\dot{\theta}$ به ترتیب بیانگر سرعت زاویه ای حول محورهای z ، x ، y می باشد. علاوه بر آن، ψ ، ϕ و θ زاویه یاء، رول و پیچ را نشان می دهند.

همچنین \ddot{x} ، \ddot{y} ، \ddot{z} شتاب در راستای محور x ، y ، z را نشان می‌دهند. همچنین، I_{xx} ، I_{yy} ، I_{zz} ممان اینرسی در راستای محور x ، y ، z می‌باشد. J بیانگر لختی سیستم است. U_1 ، U_2 ، U_3 ، U_4 سیگنال‌های کنترلی هستند. m و g جرم و شتاب گرانشی را نشان می‌دهد که رابطه آن‌ها به صورت زیر است

$$\begin{aligned} U_1 &= b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ U_2 &= b(-\Omega_2^2 + \Omega_4^2) \\ U_3 &= b(\Omega_1^2 + \Omega_3^2) \\ U_4 &= d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \end{aligned} \quad (6-3)$$

که در آن b و d ضرایب ثابت هستند و Ω_i سرعت موتور شماره i می‌باشد. این مدل در طراحی کنترل‌کننده‌هایی مفید است که از داده‌های حسگر اینرسی که در چهارچوب بدنه اطلاعات را می‌دهند، استفاده می‌کنند.

برای خطی‌سازی سیستم فوق، نقاط تعادل را به صورت زیر در نظر می‌گیریم [۷]:

$$\begin{aligned} \theta = \psi = \phi = \dot{\theta} = \dot{\psi} = \dot{\phi} = \ddot{\theta} = \ddot{\psi} = \ddot{\phi} &= 0 \\ \dot{x} = \dot{y} = \dot{z} = \ddot{x} = \ddot{y} = \ddot{z} &= 0 \\ V_h = V_1 = V_2 = V_3 = V_4 & \\ \Omega_h = \Omega & \\ \dot{\Omega} = \ddot{\Omega} = 0 & \end{aligned} \quad (7-3)$$

که در آن V_h سرعت شناوربودن^۱ و Ω_h سرعت شناوربودن می‌باشد.

بعد از خطی‌سازی سیستم ماتریس‌های فضای حالت به فرم زیر به دست می‌آیند:

● ماتریس‌های فضای حالت برای زوایا:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{I_{xx}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_{yy}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{I_{zz}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} \quad (8-3)$$

¹ Hovering

که در آن x_1 زاویه رول و x_2 سرعت زاویه‌ای در راستای محور x ، x_3 زاویه پیچ و x_4 سرعت زاویه‌ای در راستای محور y ، x_5 زاویه یاو و x_6 سرعت زاویه‌ای در راستای محور z می‌باشد.

● ماتریس فضای حالت برای ارتفاع برابر است با

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{11} \\ \dot{x}_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} [U_z] \quad (9-3)$$

که در آن x_{11} بیانگر ارتفاع می‌باشد و x_{12} سرعت در راستای محور z می‌باشد.

● ماتریس فضای حالت برای موقعیت برابر است با

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{U_1}{m} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{U_1}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \end{bmatrix} \quad (10-3)$$

که در آن x_7 بیانگر x ، x_8 بیانگر سرعت در راستای محور x و x_9 بیانگر y و x_{10} سرعت زاویه‌ای در راستای محور y است.

در بسیاری از موارد، در زیرسیستم دورانی می‌توان از جملات اول و دوم سمت راست رابطه (5-3) که مقدار آن‌ها در مقایسه با جمله سوم بسیار کوچک است، صرف‌نظر کرد و مدل را به‌صورت زیر بیان نمود:

$$\dot{x} = \left\{ \begin{array}{l} \ddot{\phi} = \frac{U_2}{I_{xx}} \\ \ddot{\theta} = \frac{U_3}{I_{yy}} \\ \ddot{\psi} = \frac{U_4}{I_{zz}} \\ \ddot{z} = g - (\cos \phi \cos \theta) \frac{U_1}{m} \\ \ddot{x} = (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) \frac{U_1}{m} \\ \ddot{y} = (\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi) \frac{U_1}{m} \end{array} \right. \quad (11-3)$$

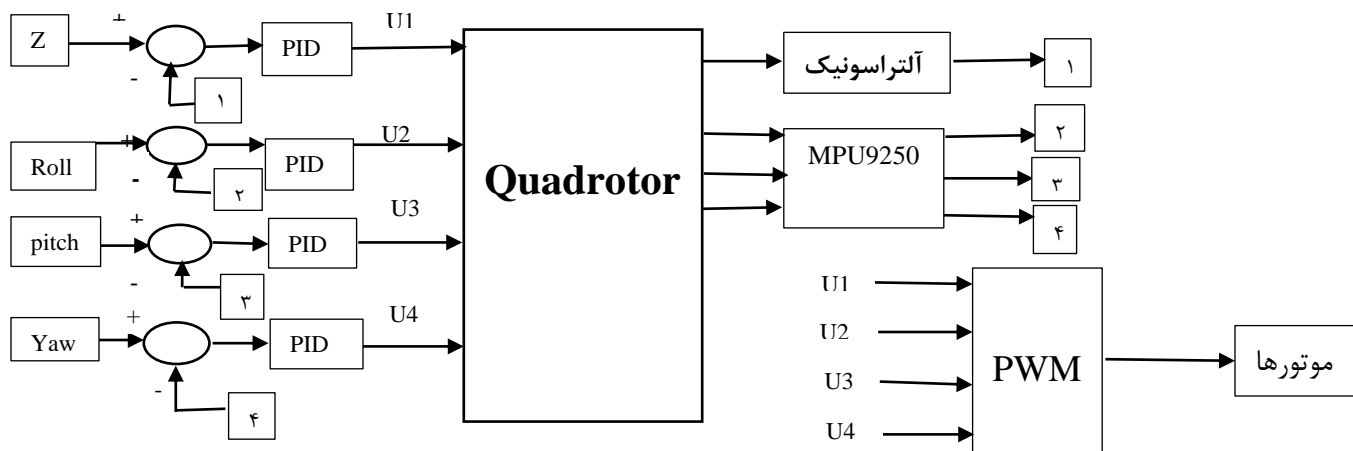
فصل ۴ : شبیه سازی و کنترل

۴-۱- مقدمه

در این فصل به شبیه‌سازی سیستم چهارپره و بررسی الگوریتم‌های کنترلی مختلف به منظور کنترل سیستم چهارپره پرداخته شده است. برای کنترل چهارپره به دو حلقه کنترلی نیاز داریم: (۱) حلقه داخلی که به منظور کنترل وضعیت در نظر گرفته شده و (۲) حلقه بیرونی که برای کنترل موقعیت طراحی می‌شود. در این فصل ابتدا به بررسی کنترل کننده PID پرداخته شده است، سپس با توجه به محدودیت‌های عملی سعی شده کنترل کننده متناسب با وضعیت چهارپره طراحی شود. برای این کار ابتدا از الگوریتم زیگلر- نیکلز استفاده شده و سپس به شکل عملی تست شده‌اند و ثابت‌های کنترلی بر روی مقادیر مناسب تنظیم شده‌اند. همچنین در این فصل به منظور کنترل بهتر سیستم از کنترل کننده فازی نیز استفاده شده است که در ادامه به طور مفصل به آن می‌پردازیم.

۴-۲- بلوک دیاگرام سیستم

در این پروژه به کنترل موقعیت و وضعیت سیستم چهارپره پرداختیم که در شکل ۴-۱ بلوک دیاگرام سیستم ملاحظه می‌شود. به طور کلی نحوه کنترل سیستم بدین صورت است که برای زوایا و ارتفاع مقدار مرجع تعیین می‌شود و سیگنال خطا حاصل از اختلاف مقدار مرجع و مقدار اندازه‌گیری شده به کنترل کننده داده می‌شود. سیگنال کنترلی U_1 تا U_4 وارد چهارپره می‌شود (روابط آن در فصل پیشین بیان شد). سپس زوایا و ارتفاع توسط ژيروسکوپ و حسگر آلتراسونیک اندازه‌گیری شده و توسط مسیریاب بازگردانده می‌شوند. در قسمت‌های بعدی به طور مفصل در مورد عملکرد هر یک از بخش‌های معرفی شده در شکل ۴-۱ بحث خواهیم کرد.



شکل ۴-۱: بلوک دیاگرام سیستم چهارپره

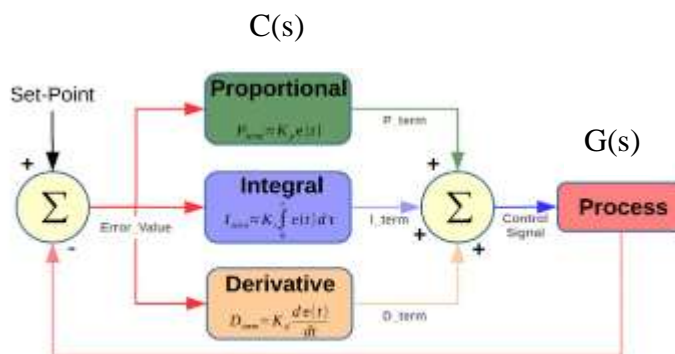
۴-۳- کنترل کننده PID

کنترل کننده PID روشی متداول است که به طور گسترده در سیستم‌های صنعتی و آزمایشگاهی از آن استفاده می‌شود. روش‌های کنترلی با کنترل کننده PID اغلب بر اساس کنترل خطی بنا شده‌اند. البته گاهی ممکن است به دلیل اشباع سیگنال کنترلی یا سایر محدودیت‌های عملی، عملکرد واقعی این کنترل کننده‌ها غیر خطی شود.

کنترل کننده PID دارای سه ضریب تناسبی، انتگرال گیر و مشتق گیر می‌باشد. این ضرایب بیانگر میزان اثر هریک از جملات بر سیگنال کنترلی می‌باشد. معادله زیر بیانگر رابطه بین سیگنال کنترلی و خطای لحظه‌ای می‌باشد

$$e(t) = K_P e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (۴-۱)$$

مقدار خطا در هر لحظه بیانگر اختلاف میان مقدار مطلوب و مقدار واقعی سیستم در آن لحظه می‌باشد. در معادله فوق K_P ضریب تناسبی، K_i ضریب انتگرال گیر و K_d ضریب مشتق گیر می‌باشد. اگر کنترل کننده را با $C(s)$ و مدل سیستم در حوزه لاپلاس را با $G(s)$ نمایش دهیم آنگاه سیستم کنترلی حلقه بسته به صورت شکل ۴-۲ خواهد بود.



شکل ۴-۲: سیستم حلقه بسته با کنترل کننده PID [۱۰]

از جمله تناسبی برای افزایش سرعت و کاهش خطای کنترل کننده استفاده می‌شود. جمله انتگرال گیر خطای حالت ماندگار را کاهش می‌دهد ولی افزایش بیش از اندازه آن موجب ناپایداری سیستم و افزایش نوسان می‌شود. جمله مشتق گیر پایداری و پاسخ حالت گذرا را بهبود می‌بخشد. افزایش این جمله موجب حساسیت زیاد به نویز و تقویت آن می‌گردد.

۴-۳-۱- تنظیم پارامترهای کنترل کننده به روش زیگلر- نیکلز

برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID روش‌های مختلفی وجود دارد. در این پروژه به منظور تنظیم ضرایب به روش زیگلر- نیکلز پرداخته شده است. در این الگوریتم، ابتدا ضریب انتگرال گیر و مشتق گیر صفر می‌شود و ضریب تناسبی را افزایش داده تا پاسخ سیستم نوسانی مانا شود. به این مقدار ضریب تناسبی K_C (ضریب تناسبی بحرانی) گویند. دوره تناوب نوسان سیستم در وضعیت بحرانی اندازه‌گیری شده و با T_c نمایش داده می‌شود.

بعد از صفر کردن پارامترهای انتگرال گیر و مشتق گیر و افزایش ثابت تناسبی تا حد بحرانی، مقادیر K_C و T_c به دست می‌آیند. سپس از جدول ۴-۱ به منظور محاسبه ضرایب کنترل کننده استفاده می‌کنیم و ضرایب برای زاویه‌ها و موقعیت مطابق جدول ۴-۲ به دست می‌آید.

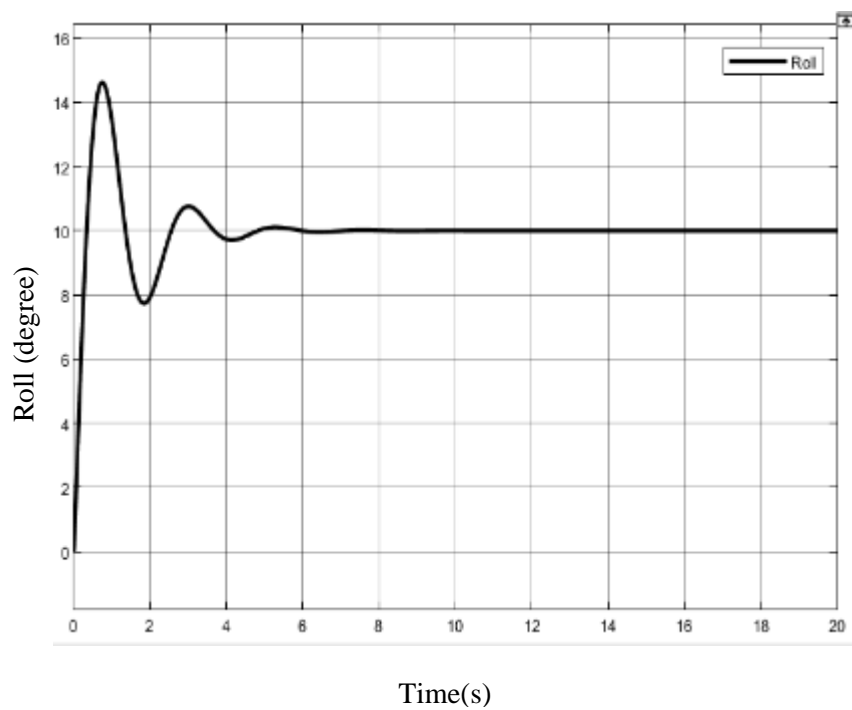
جدول ۴-۱: تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID

کنترل کننده	$\frac{T_d}{T_c}$	$\frac{T_i}{T_c}$	$\frac{K_p}{K_c}$
P	-	-	۰.۵
PI	-	۰.۸	۰.۴
PID	۰.۱۲۵	۰.۵	۰.۶

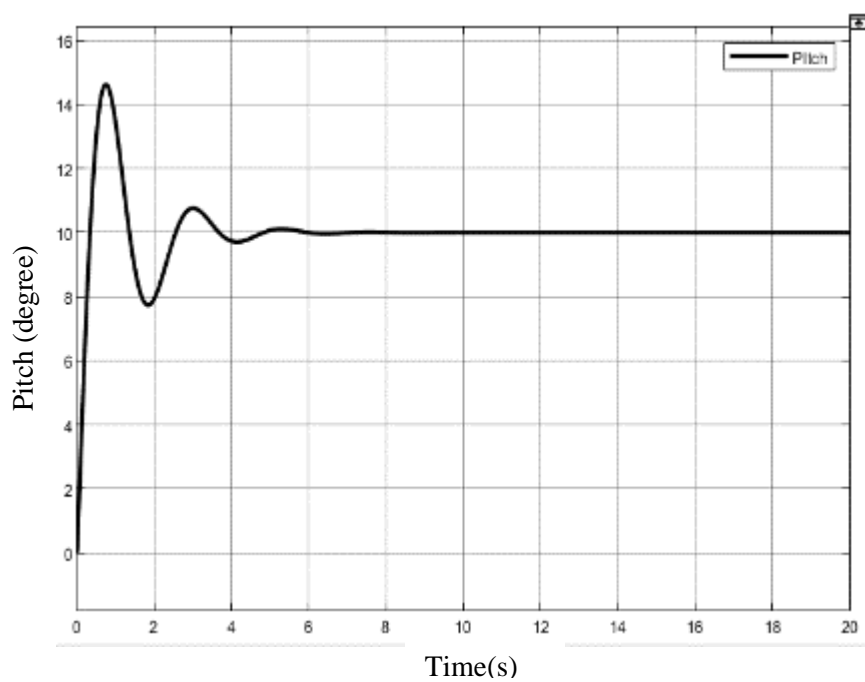
جدول ۴-۲: ضرایب محاسبه شده

	K_c	T_c	K_p	K_d	K_i
Roll	۱	۱.۴۵	۰.۶	۰.۱۸۱	۰.۷۲۵
Pitch	۱	۱.۴۵	۰.۶	۰.۱۸۱	۰.۷۲۵
yaw	۵	۰.۶	۳	۰.۰۷۵	۰.۳
height	۱۰	۳.۵	۶	۰.۴۴	۱.۷۵

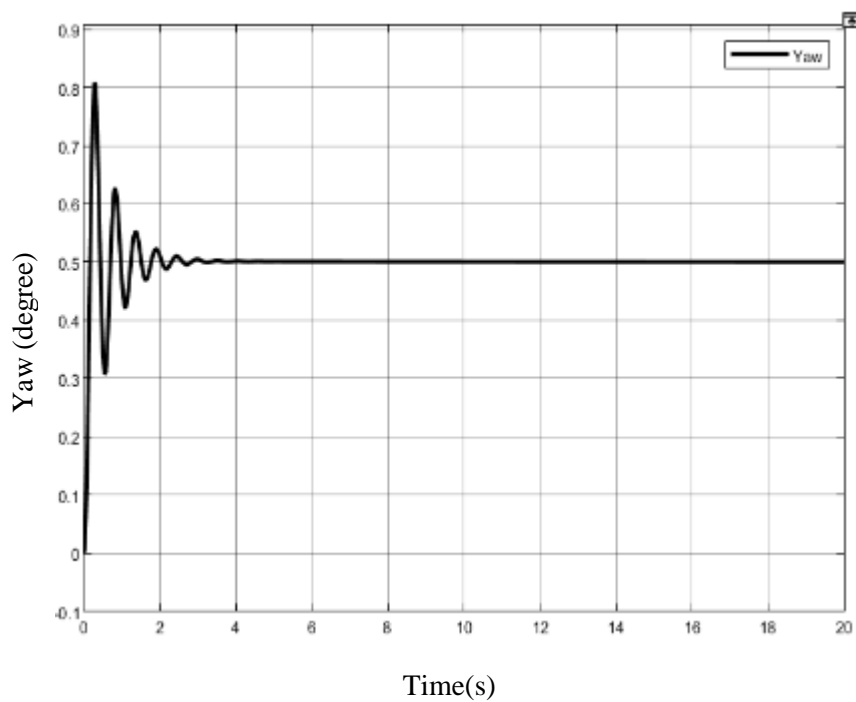
پس از به دست آوردن ضرایب کنترل کننده نتایج شبیه‌سازی به صورت شکل‌های ۴-۳، ۴-۴، ۴-۵، ۴-۶ به دست می‌آیند.



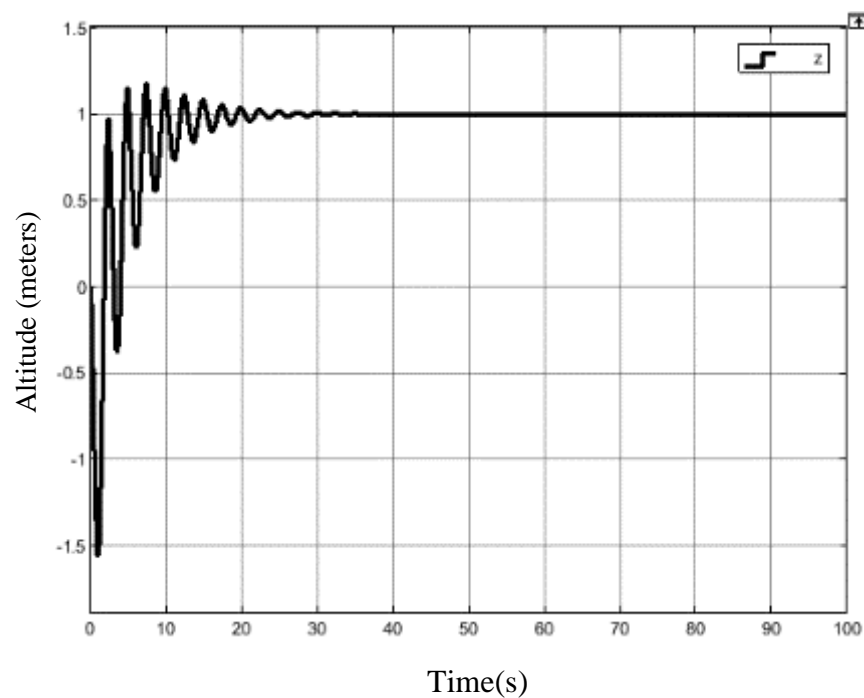
شکل ۴-۳: شبیه سازی زاویه رول با کنترل کننده PID به روش زیگلر - نیکلز



شکل ۴-۴: شبیه سازی زاویه پیچ با کنترل کننده PID به روش زیگلر - نیکلز



شکل ۴-۵: شبیه سازی زاویه یاو با کنترل کننده PID به روش زیگلر - نیکلز



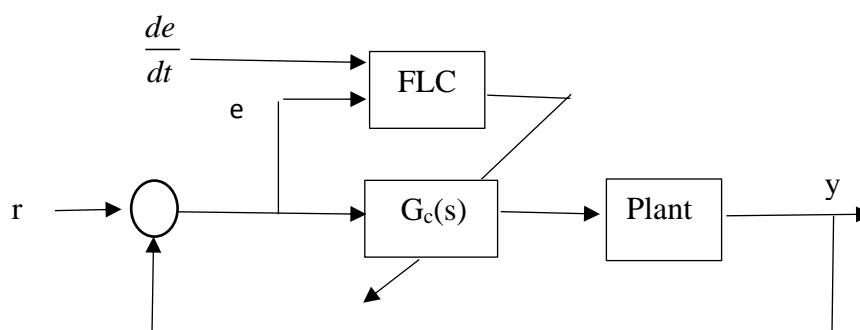
شکل ۴-۶: شبیه سازی ارتفاع با کنترل کننده PID به روش زیگلر - نیکلز

۴-۳-۲- طراحی کنترل کننده به روش فازی

بسیاری از فرآیندهای صنعتی که با اپراتورهای انسانی کنترل می شوند، نمی توانند از روش های کنترلی رایج برای خودکار شدن بهره ببرند، زیرا عملکرد این کنترل کننده ها نسبت به اپراتورها مناسب نیست. یکی از دلایل این امر آن است که کنترل کننده های خطی که اغلب در کنترل سنتی مورد استفاده قرار می گیرند، برای سیستم های غیرخطی مناسب نیستند. دلیل دیگر این است که انسان اطلاعات مختلفی را جمع آوری و استراتژی های کنترل را باهم ترکیب می کند که نمی توان آنها را در یک قانون کنترل تحلیلی تنها جمع کرد.

اصل اساسی کنترل دانش بنیان (خبره)، ثبت و پیاده سازی تجربه و دانش موجود خبره ها (اپراتورهای فرآیند) است. یک نوع خاص کنترل دانش بنیان کنترل قاعده محور فازی است که در آن، کنش های کنترلی متناسب با شرایط خاص سیستم اند و براساس قواعد اگر-آنگاه فازی توصیف شده اند.

در طراحی کنترل کننده کلاسیک مشاهده کردیم که خطای لحظه ای وارد کنترل کننده می شود و با توجه به پارامترهای کنترل کننده، سیگنال کنترلی تولید می شود اما در طراحی کنترل کننده فازی سیگنال خطا و مشتق آن وارد بلوک فازی شده و با تغییر پارامترهای کنترل کننده در هر لحظه سیگنال کنترلی مناسب را تولید می کند. شکل ۴-۷ نمایی کلی از یک کنترل کننده خطی با ناظر فازی را نمایش می دهد.



شکل ۴-۷: کنترل کننده خطی با ناظر فازی

ساختار بلوک FLC^1 به صورت شکل ۴-۸ می باشد که خطا و مشتق خطا را گرفته و ضرایب K_p' و K_d' و α را محاسبه می کند.

¹ Fuzzy Logic Controller



شکل ۴-۸: ساختار FLC

که K_p' و K_d' مقادیر نرمالایز شده هستند و از روابط زیر محاسبه می‌شوند

$$K_p' = \frac{K_p - K_p \min}{K_p \max - K_p \min} \quad (۴-۲)$$

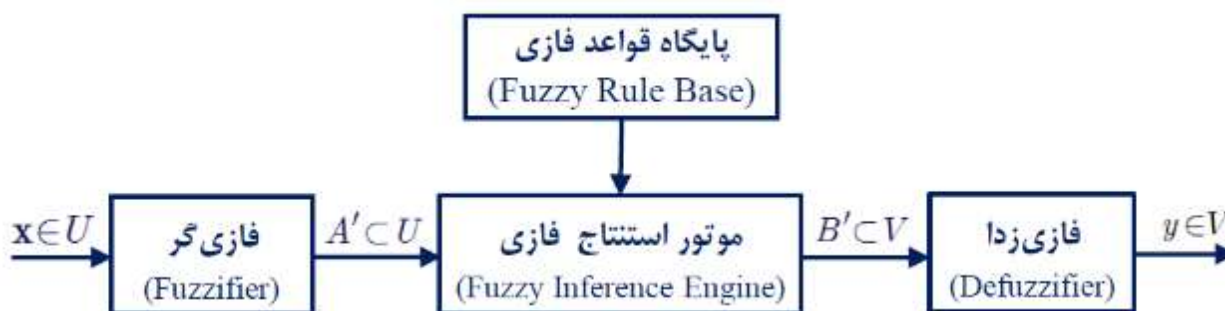
که در آن $K_p \min$ حد پایین ضریب تناسبی می‌باشد که مقدار آن ۳ و $K_p \max$ حد بالای ضریب تناسبی است که مقدار آن برابر ۱۰ می‌باشد.

$$K_d' = \frac{K_d - K_d \min}{K_d \max - K_d \min} \quad (۴-۳)$$

که در آن $K_d \min$ حد پایین ضریب مشتق‌گیر می‌باشد که مقدار آن ۱ و $K_d \max$ حد بالای ضریب مشتق‌گیر است که مقدار آن برابر ۷ می‌باشد. رابطه α نیز به صورت زیر است [۹]

$$\alpha = \frac{K_p^2}{K_i \cdot K_d} \quad (۴-۴)$$

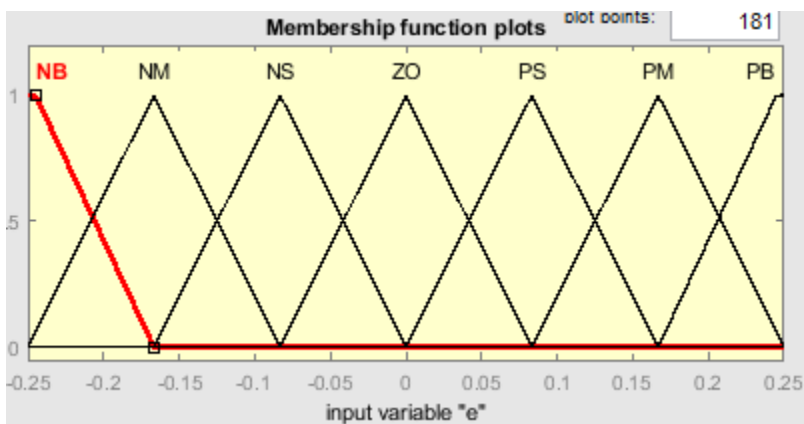
در شکل ۴-۹ شمای کلی سیستم فازی مشاهده می‌شود که از توابع عضویت مثلثی برای ورودی سیستم فازی، توابع عضویت مثلثی برای خروجی سیستم فازی، موتور استنتاج فازی، موتور ضرب ممدانی، فازی‌گر تکین و فازی‌زدای میانگین مرکز استفاده شده است.



شکل ۴-۹: ساختار کلی سیستم فازی

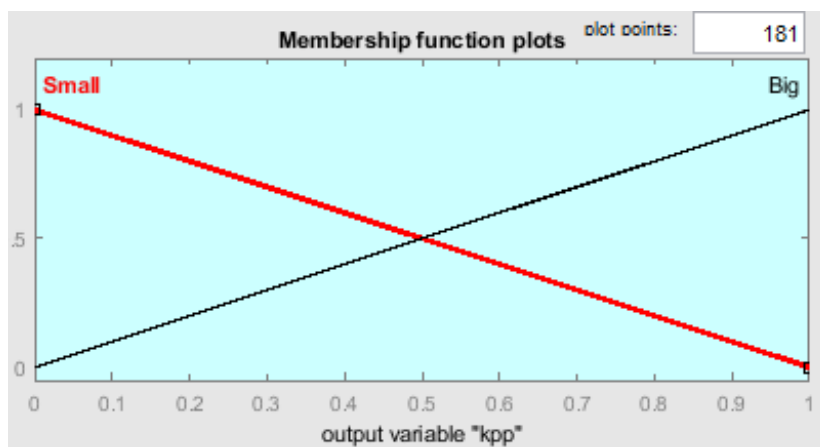
سپس به تعریف توابع عضویت برای خطا و مشتق خطا می‌پردازیم. توابع عضویت می‌توانند به صورت مثلثی، گوسی و یا دوزنقه‌ای باشند.

در اینجا توابع عضویت مثلثی هستند و در بازه -0.25 تا 0.25 در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۴-۱۰ توابع عضویت ورودی سیستم فازی نشان داده شده‌است.



شکل ۴-۱۰: توابع عضویت ورودی سیستم فازی

خروجی‌ها که ضرایب کنترل کننده PD هستند توابع عضویت مثلثی انتخاب شده‌است و در بازه -1 تا 1 است. در شکل ۴-۱۱ توابع عضویت خروجی سیستم فازی نشان داده شده‌است.



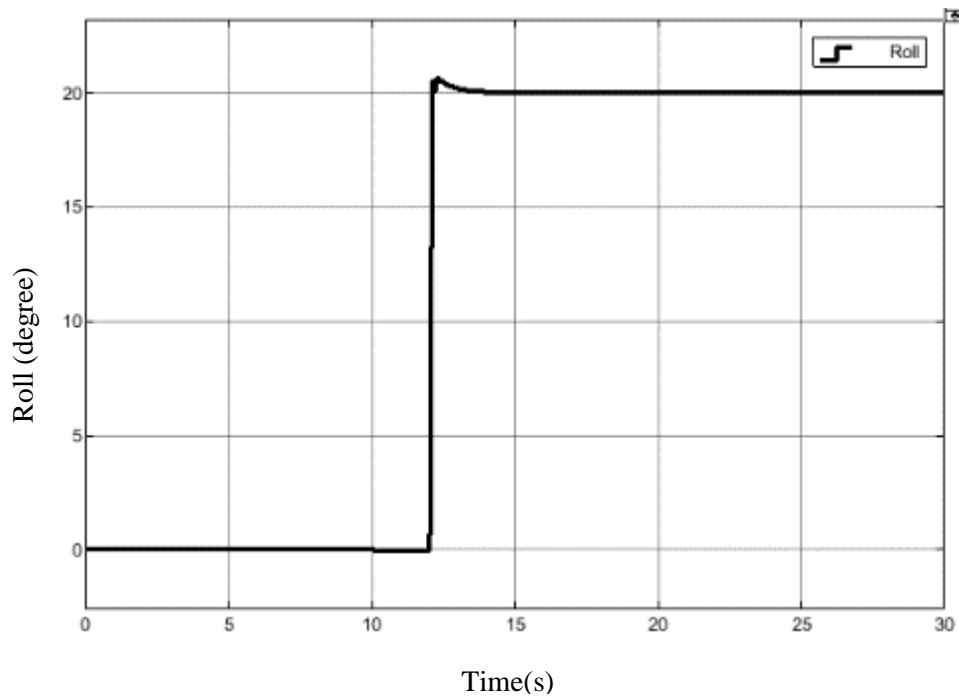
شکل ۴-۱۱: توابع عضویت خروجی سیستم فازی

برای قواعد سیستم فازی نیز ۴۹ قاعده در نظر گرفته شده‌است که به صورت جدول ۴-۴ است.

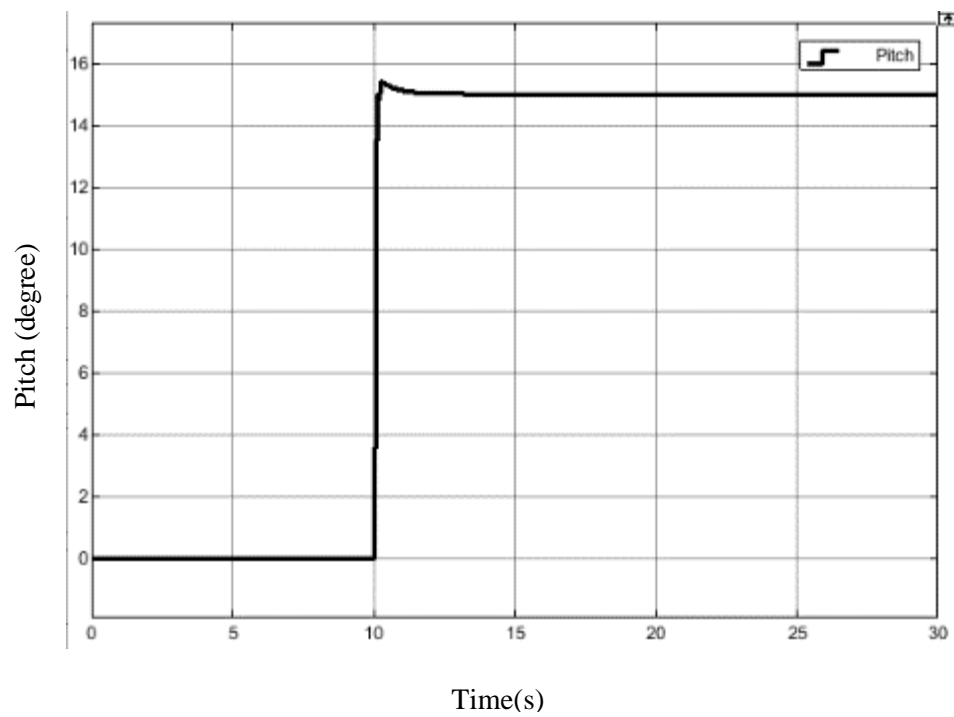
جدول ۴-۴: جدول قواعد فازی

		$\dot{e}(t)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e(t)$	NB	B	B	B	B	B	B	B
	NM	S	B	B	B	B	B	S
	NS	S	S	B	B	B	S	S
	ZO	S	S	S	B	S	S	S
	PS	S	S	B	B	B	S	S
	PM	S	B	B	B	B	B	S
	PB	B	B	B	B	B	B	B

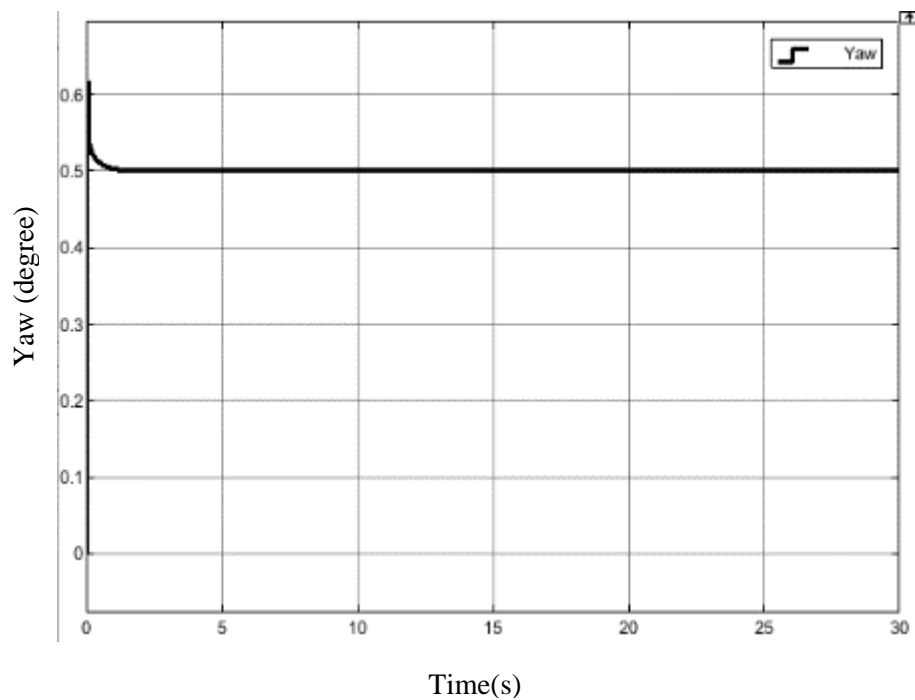
پس از تعیین حدبالا و حدپایین ضرایب کنترل کننده PID، نتایج شبیه سازی به صورت شکل های ۴-۱۲، ۴-۱۳، ۴-۱۴، ۴-۱۵ به دست می آیند:



شکل ۴-۱۲: شبیه سازی زاویه رول با کنترل کننده PID به روش فازی

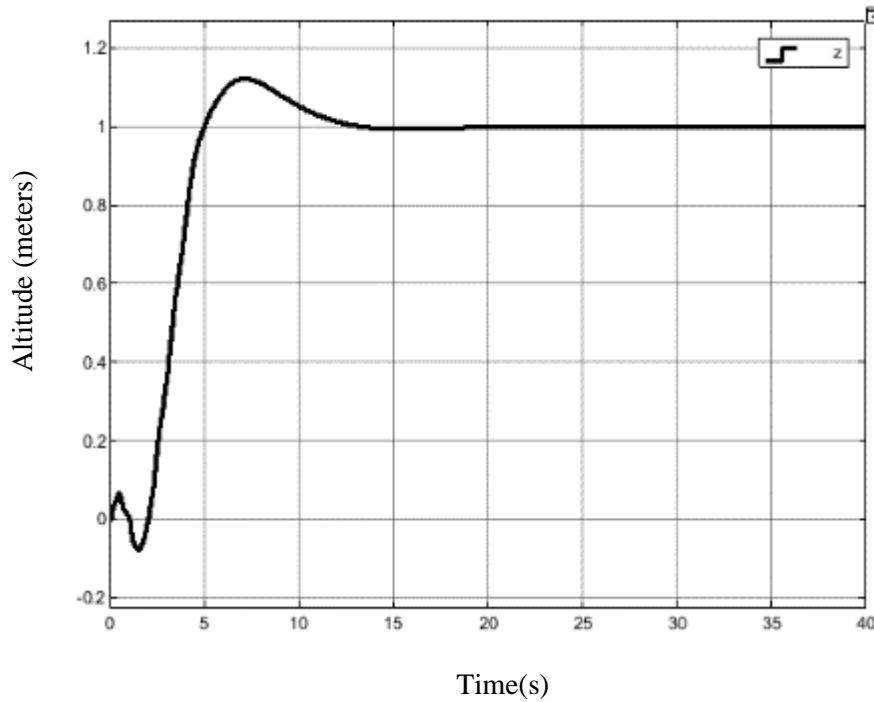


شکل ۴-۱۳: شبیه سازی زاویه پیچ با کنترل کننده PID به روش فازی



شکل ۴-۱۴: شبیه سازی زاویه یاو با کنترل کننده PID به روش فازی

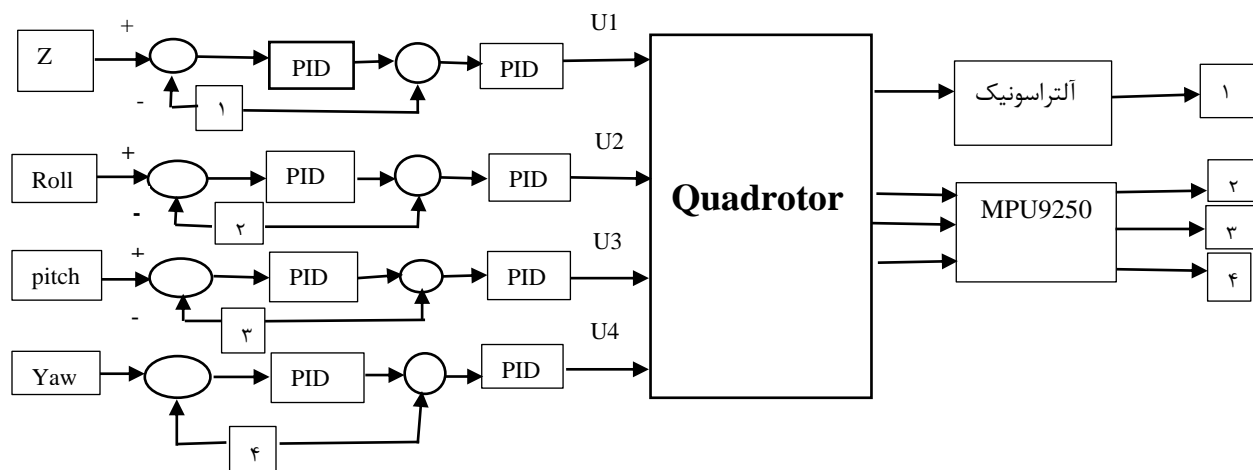
برای ارتفاع نیز، شبیه‌سازی به صورت زیر است. در اینجا محدوده خطا و مشتق خطا بین ۱- تا ۱ در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۱۵: شبیه سازی ارتفاع با کنترل کننده PID به روش فازی

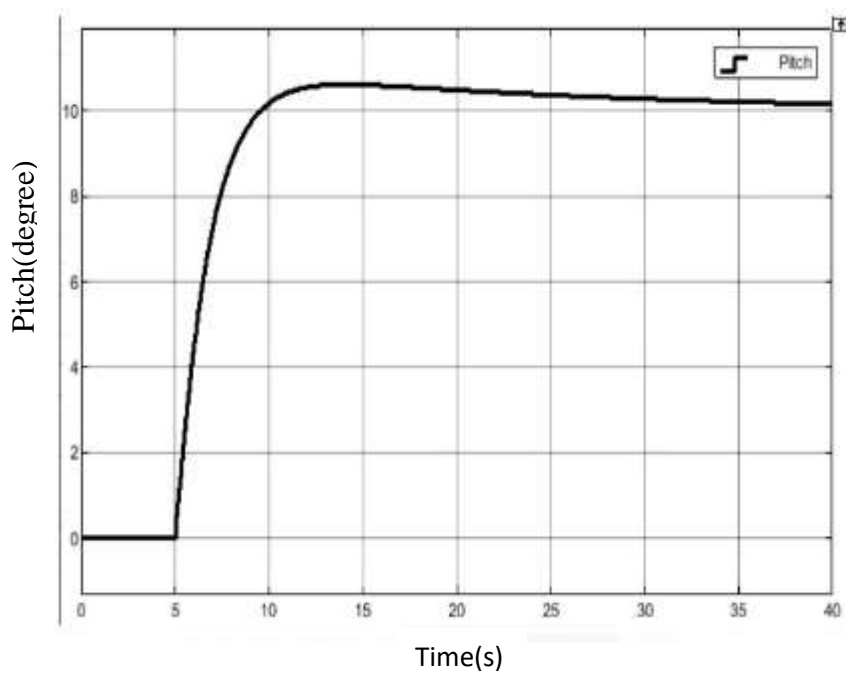
به منظور بهبود عملکرد سیستم از روش کنترل آبشاری استفاده کردیم که بلوک دیاگرام آن در شکل ۴-۱۶

مشاهده می کنید. [۱۰]

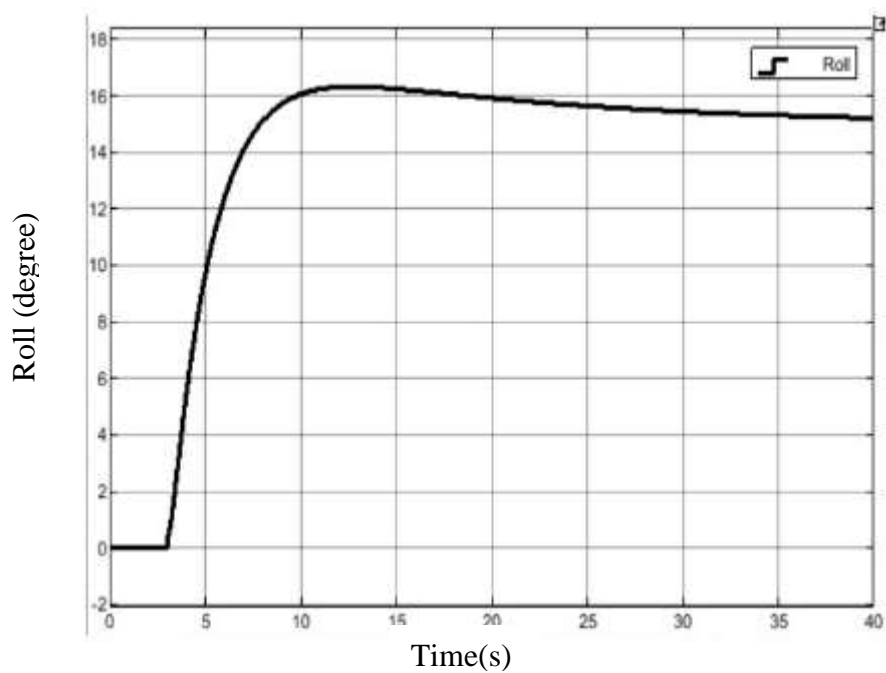


شکل ۴-۱۶: بلوک دیاگرام سیستم با کنترل آبشاری

پس از طراحی کنترل کننده آبخاری مطابق بلوک دیاگرام شکل ۱۶-۴ زوایا به صورت شکل های ۱۷-۴ و ۱۸-۴ خواهند شد.

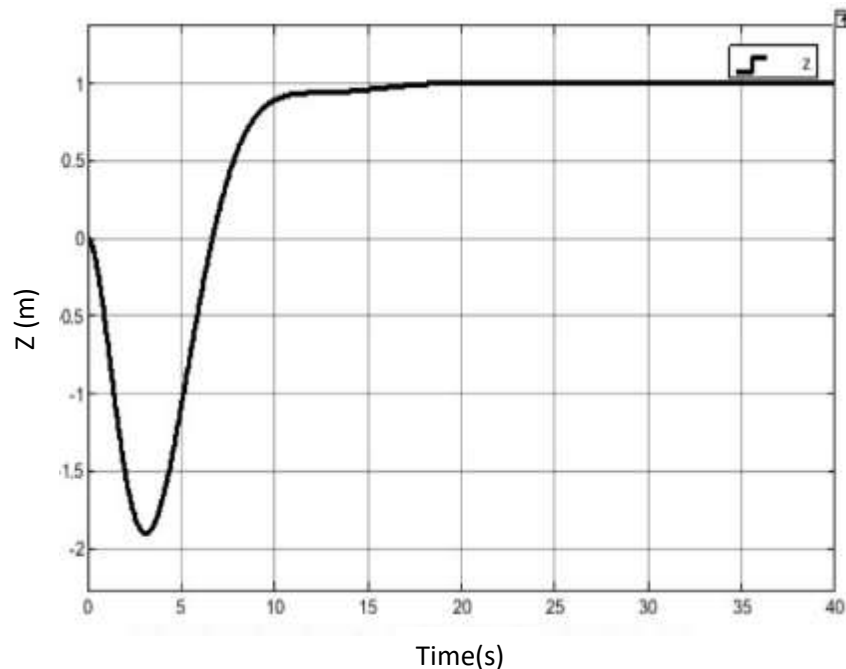


شکل ۱۷-۴: زاویه پیچ ۱۰ درجه



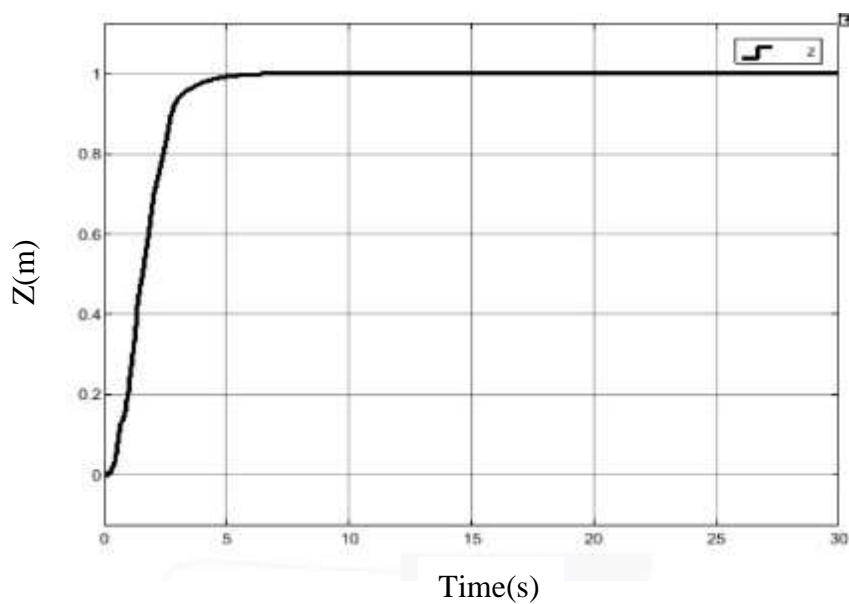
شکل ۱۸-۴: زاویه رول ۱۵ درجه

کنترل آبخاری برای ارتفاع، شکل ۱۹-۴ را نتیجه می دهد.

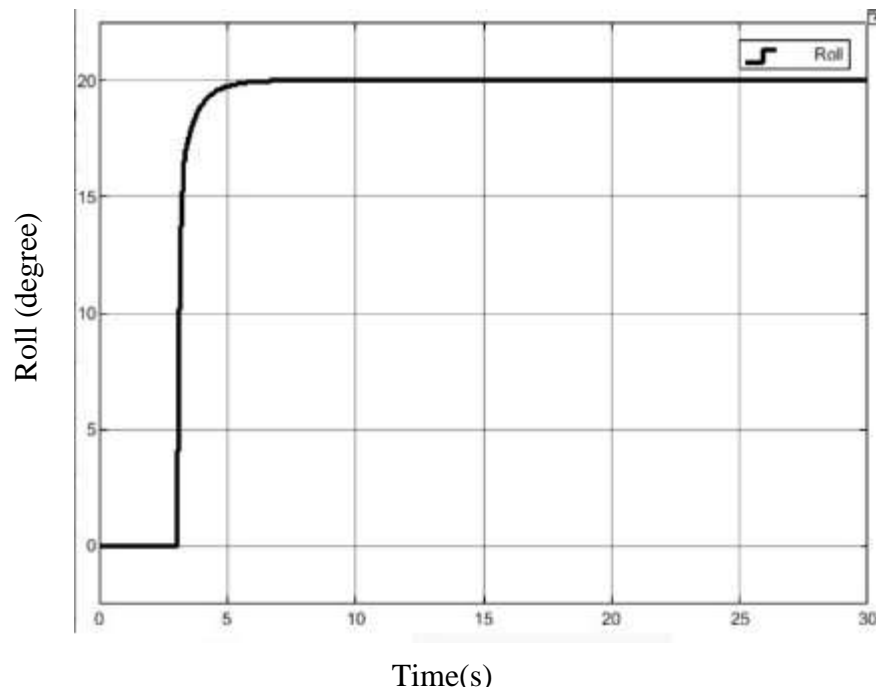


شکل ۴-۱۹: ارتفاع

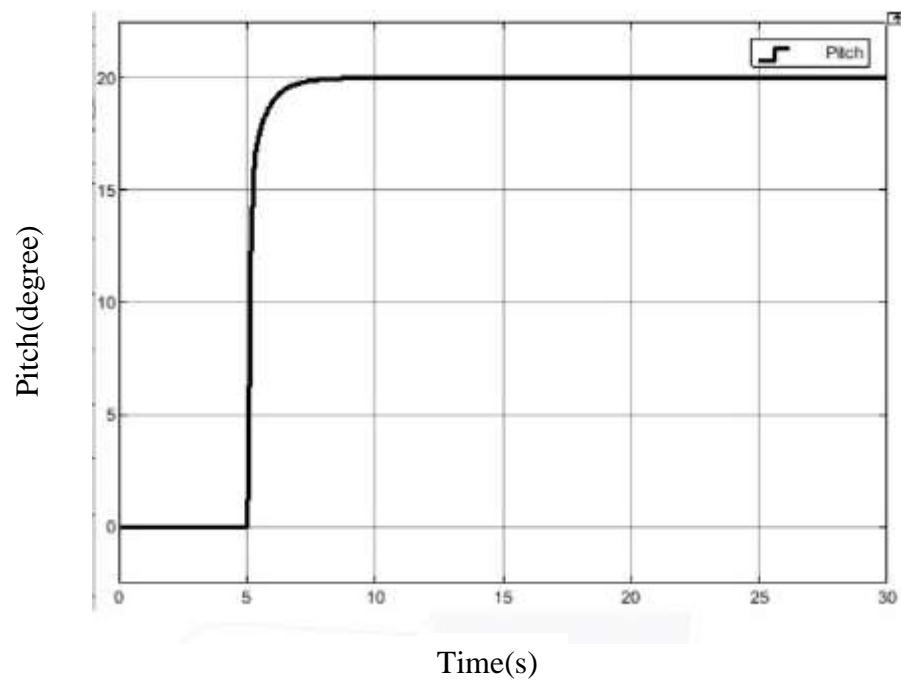
همانطور که در شکل ۴-۱۹ مشاهده می‌کنید این کنترل‌کننده نتیجه خوبی نمی‌دهد و فروجهش زیادی دارد. در روش کنترل آشاری مشاهده کردیم که در صورت استفاده از دو کنترل‌کننده PID معمولی نتایج به چه شکل است. به منظور بهتر کردن نتایج فوق کنترل‌کننده حلقه داخلی را از نوع کنترل‌کننده فازی قراردادیم. نتایج به صورت شکل‌های ۴-۲۰، ۴-۲۱ و ۴-۲۲ است.



شکل ۴-۲۰: ارتفاع



شکل ۴-۲۱: زاویه رول



شکل ۴-۲۲: زاویه پیچ

۴-۴ حسگر

حسگر یک وسیله‌ی الکتریکی است که برای محاسبه‌ی برخی پارامترهای فیزیکی مانند فشار، فاصله، دما و غیره استفاده می‌شود. خروجی یک حسگر الکتریکی سیگنالی آنالوگ یا دیجیتال است که برای پردازش‌های

مورد نیاز به سخت افزار یا نرم افزار مناسب منتقل می شود. هر حسگر باتوجه به ساختار و پارامتر فیزیکی که اندازه گیری می کند، اصول کار متفاوتی دارد. اما ویژگی مشترک همه حسگرها این است که یک پارامتر فیزیکی را به سیگنال الکتریکی تبدیل می کنند. در این پروژه نیز برای اندازه گیری زاویه و فاصله از حسگرهای ژيروسکوپ و آلتراسونیک استفاده شده است که در ادامه به آن ها می پردازیم.

۴-۴-۱- حسگر ژيروسکوپ مدل MPU9250

برای اندازه گیری زاویای چهارپره از حسگر ۹ محوره MPU9250 استفاده کردیم. این حسگر سرعت زاویه ای را محاسبه می کند و برای به دست آوردن زاویه باید از سرعت زاویه ای اندازه گیری شده انتگرال گرفت. به همین منظور برای محاسبه دقیق زاویه ها ابتدا بایاس حسگر در هر راستا را با میانگین گیری محاسبه می کنیم و برای انتگرال گیری از میانگین پنجره ای و روش دوزنقه ای استفاده کردیم. شتاب سنج و ژيروسکوپ در حضور عوامل تولید نویز مانند موتورهای رفتار مطلوبی از خود نمایش نمی دهند و پاسخ آنها به شدت دارای نویز خواهد بود. به همین دلیل نیاز به استفاده از فیلتر، ضروری خواهد بود. در ادامه به توضیح مختصر در مورد فیلترهای قابل استفاده و نحوه عملکرد آنها می پردازیم.

۴-۴-۱-۱- فیلتر کالمن

فیلتر کالمن مجموعه ای از معادلات ریاضی بازگشتی است که از آن برای تخمین متغیرهای حالت فرآیندها استفاده می شود به طوری که میانگین مربعات خطای تخمین را کمینه می کند. این فیلتر از جنبه های مختلفی قدرتمند است. برای مثال می تواند تخمینی از گذشته، حال و حتی آینده حلت ها انجام دهد، حتی زمانی که ماهیت دقیق سیستم معلوم نباشد. همچنین از این فیلتر می توان برای کاهش نویز و ترکیب داده های حسگری نیز استفاده کرد. فیلتر کالمن در فرم های مختلف، به عنوان ابزار اساسی برای تجزیه و تحلیل و حل کلاس گسترده ای از مسائل تخمین بکار می رود. این فیلتر به وسیله انتشار میانگین و کوواریانس حالت در زمان عمل می کند.

روش استنتاج فیلتر کالمن شامل مراحل زیر است:

- (۱) با توصیف ریاضی از دینامیک سیستم شروع می شود که هدف، تخمین حالت های آن می باشد.
- (۲) براساس سیستم دینامیکی که انتشار میانگین و کوواریانس حلت ها را بیان می کند، معادلات آن در کامپیوتر پیاده سازی می شود. این فرم معادلات، اساس استنتاج فیلتر کالمن است زیرا:

الف. میانگین حالت، بیانگر تخمین حالت فیلترکالمن است.

ب. کوواریانس حالت، بیانگر کوواریانس تخمین حالت فیلترکالمن است.

۳) هربار که اندازه‌گیری جدیدی صورت گیرد، میانگین و کوواریانس حالت بروزرسانی می‌شود.

معادلات فیلترکالمن از دو قسمت معادلات بروزرسانی زمانی و معادلات پیش‌بینی تشکیل می‌شود. درواقع فیلترکالمن با شرایط اولیه‌ای شروع بکار می‌کند و سپس از طریق دینامیک سیستم به پیش‌بینی تخمین حالت و از طریق اندازه‌گیری‌های نویزی، به تصحیح پیش‌بینی خود می‌پردازد. شکل ۴-۲۳ فرآیند بازگشتی الگوریتم فیلترکالمن برای تخمین حالت‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۳: فرآیند بازگشتی الگوریتم فیلترکالمن

مدل حسگر و مشاهدات به صورت رابطه (۴-۵) می‌باشد

$$\begin{aligned} X_k &= AX_{k-1} + Bu_k + W_k \\ Y_k &= CX_{k-1} + V_k \end{aligned} \quad (4-5)$$

که در آن W_k نویز فرآیند، V_k نویز اندازه‌گیری، X_k متغیرهای حالت سیستم، Y_k خروجی سیستم و A ، B ، H ماتریس‌های سیستم می‌باشد. معادلات پیش‌بینی، بروزرسانی به صورت رابطه (۴-۶) و رابطه (۴-۷) است [۱۱]

$$\begin{cases} \bar{X}_k = AX_{k-1} + Bu_k \\ \bar{P}_k = AP_{k-1}A^T + Q \\ K_k = \bar{P}_k H_k^T (H_k \bar{P}_k H_k^T + R_k)^{-1} \end{cases} \quad (4-6)$$

که در آن Q کوواریانس نویز فرآیند، P_k ماتریس کوواریانس، \bar{P}_k پیش‌بینی ماتریس کوواریانس و \bar{x}_k پیش‌بینی متغیرهای حالت سیستم می باشد.

$$\begin{aligned} K_k &= \frac{\bar{P}_k C^T}{C \bar{P}_k C^T + R} \\ x_k &= \bar{x}_k + K_k (y_k - C \bar{x}_k) \\ P_k &= (I - K_k C) \bar{P}_k \end{aligned} \quad (7-4)$$

که در آن R کوواریانس نویز اندازه‌گیری و K_k بهره کالمن می‌باشد. با قراردادن مقدار مناسب R و Q می‌توان نویز را تا حد قابل قبولی کاهش داد.

۴-۱-۲- فیلتر کامپلمنتی

فیلتر کامپلمنتی فیلتری است که سیگنال‌های ژيروسکوپ را با سیگنال‌هایی از شتاب‌سنج باهم ترکیب می‌کند. ژيروسکوپ دارای دریفت^۱ می‌باشد و شتاب‌سنج نویز بسیار زیادی می‌گیرد بنابراین این فیلتر به نوعی سیگنال‌های شتاب‌سنج را از فیلتر پایین‌گذر و سیگنال‌های ژيروسکوپ را از فیلتر بالاگذر عبور می‌دهد تا سیگنال مناسبی به دست آید. رابطه (۸-۴) بیانگر معادله این فیلتر می‌باشد:

$$Angle = \alpha \times \text{gyroscope_angle} + (1 - \alpha) \times \text{accelerometer} \quad (8-4)$$

مقدار $\alpha = 0.02$ بهترین پاسخ را نتیجه می‌دهد.

۴-۴-۲- حسگر فراصوت

حسگر آلتراسونیک یکی از حسگرهای بدون تماس است. این حسگر به امواج صوتی حساس بوده و ساختار آن از یک منبع ارسال‌کننده صوت و یک گیرنده تشکیل شده است. امواج پس از برخورد به یک مانع منعکس شده و به طرف حسگر برمی‌گردند. مدت زمانی که طول می‌کشد امواج بازتاب‌شده به حسگر برگردد را با t نمایش می‌دهیم. سرعت این امواج با سرعت صوت (۳۴۳m/s) برابر است بنابراین فاصله از رابطه (۹-۴) محاسبه می‌گردد

¹ Drift

$$x = \frac{1}{2} V t \quad (9-4):$$

که در آن x فاصله از سطح، V سرعت و t زمان را نشان میدهد.

در این پروژه برای اندازه‌گیری ارتفاع چهارپره از یک حسگر آلتراسونیک استفاده کردیم. بدین صورت که ارتفاع چهارپره در هر لحظه توسط حسگر آلتراسونیک اندازه‌گیری می‌شود. از TCP/IP برای ارتباط بین نرم‌افزار پایتون و متلب برای ارسال داده استفاده کردیم.

۴-۵- مدولاسیون پهنای پالس (PWM)

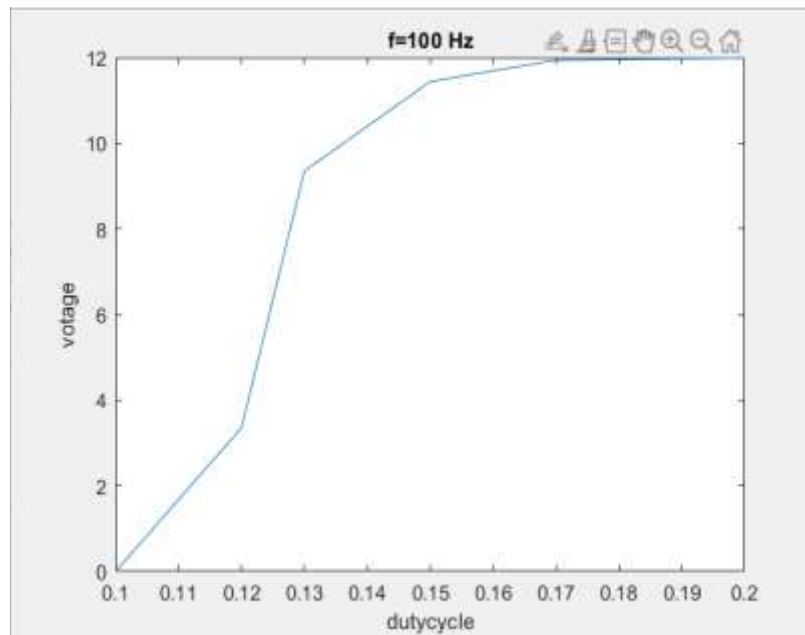
مدولاسیون پهنای پالس روشی برای تنظیم توان الکتریکی داده‌شده به بار، با تغییر دادن زمان قطع و وصل شدن منبع توان به بار (در هر سیکل) است. بخش اصلی PWM، یک سیگنال کنترلی به شکل موج مربعی (پالس) است، به‌طوری‌که دوره کاری (Duty cycle) پالس‌ها، در هر دوره‌ی تناوب موج، قابل تنظیم است. دوره‌ی کاری، نسبت مدت High بودن موج مربعی به دوره‌ی تناوب آن است، و برحسب درصد بیان می‌شود. در واقع این سیگنال، قطع و وصل شدن منبع توان به بار را تعیین می‌کند.

کاراندازه‌های استفاده‌شده در این پروژه از نوع Sky30A هستند که فرکانس کاری آن‌ها بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ هرتز می‌باشد. دوره کاری آن‌ها در فرکانس‌های مطرح شده به صورت جدول ۴-۵ است:

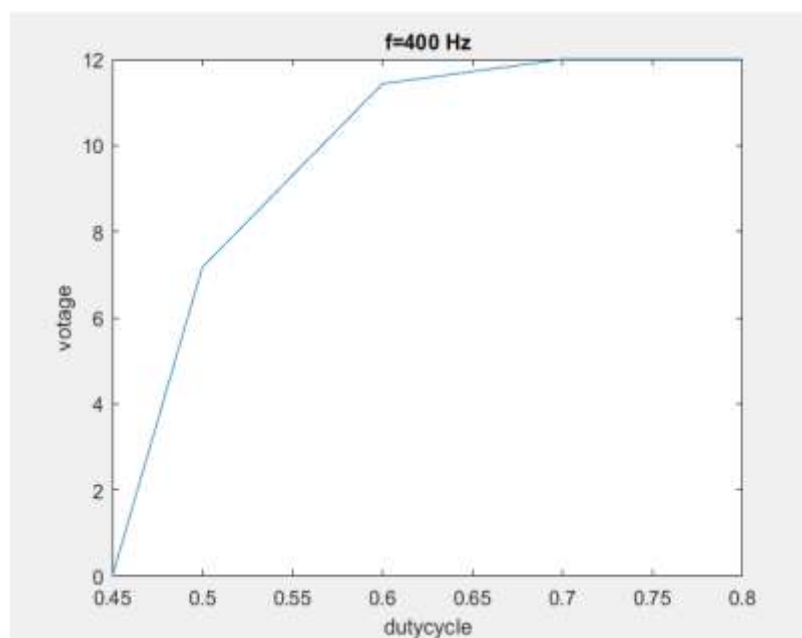
جدول ۴-۵: بازه کاری درایورها در فرکانس‌های مختلف

فرکانس	دوره کاری
۱۰۰ Hz	۰.۱۰-۰.۲۰
۲۰۰ Hz	۰.۲۰-۰.۴۰
۴۰۰ Hz	۰.۴۵-۰.۸۰

شکل‌های ۴-۲۴ و ۴-۲۵ نمودار ولتاژ موتورها در بازه‌ی کاری فرکانس مربوطه نمایش می‌دهد.



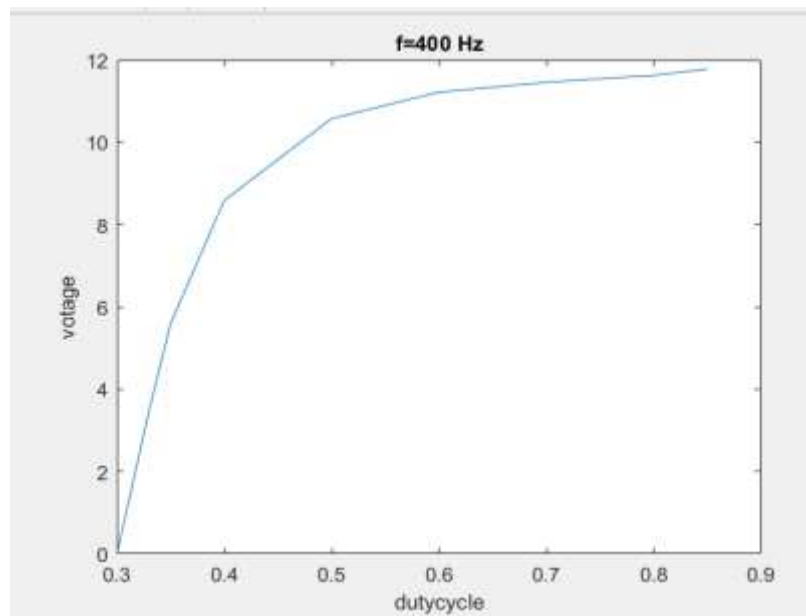
شکل ۴-۲۴: نمودار ولتاژ موتور برحسب دوره کاری در فرکانس ۱۰۰ هرتز



شکل ۴-۲۵: نمودار ولتاژ موتور برحسب دوره کاری در فرکانس ۴۰۰ هرتز

همان‌طور که در شکل‌های ۴-۲۴ و ۴-۲۵ مشاهده می‌شود، بازه‌های کاری فوق برای کنترل چهارپره مناسب نمی‌باشد زیرا به ازای تغییرات کم در بازه کاری، ولتاژ داده شده به موتور تغییر چشمگیری دارد. بنابراین باید بازه کاری کاراندازها افزایش یابد. به منظور افزایش بازه کاری آنها، کاراندازها را کالیبره کردیم. پس از کالیبره کردن

درایورها، بازه کاری آنها افزایش یافته و مقداری بین ۰.۳۰ تا ۰.۸۵ را به خود می‌گیرد. شکل ۴-۲۶ نمودار ولتاژ موتورها برحسب بازه کاری آنها در فرکانس ۴۰۰ هرتز را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۶: نمودار ولتاژ موتور برحسب دوره کاری در فرکانس ۴۰۰ هرتز بعد از کالیبراسیون

PWM داده شده به موتورهای در کنترل زاویه رول از رابطه زیر محاسبه می‌شوند [۱۲]:

$$\begin{aligned}
 PWM\ 1 &= U_1 + U_2 - U_3 - U_4 \\
 PWM\ 2 &= U_1 + U_2 + U_3 + U_4 \\
 PWM\ 3 &= U_1 - U_2 + U_3 - U_4 \\
 PWM\ 4 &= U_1 - U_2 - U_3 + U_4
 \end{aligned}
 \tag{۴-۱۰}$$

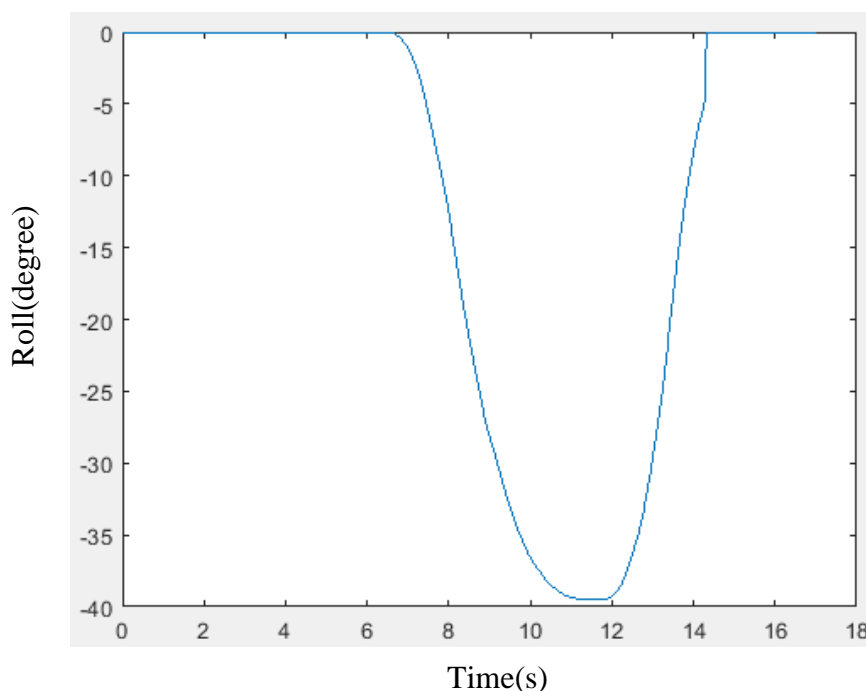
فصل ۵: نتایج عملی

۵-۱- مقدمه

در فصل‌های گذشته ساختمان مکانیکی و الکتریکی سیستم چهارپره و همچنین مدل‌سازی و طراحی کنترل‌کننده را بررسی کردیم. در این فصل به ارائه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی پرداخته خواهد شد. در این بخش ابتدا به بررسی حسگرها در حضور موتورها و روش‌های کاهش نویز می‌پردازیم. سپس زوایا سیستم را کنترل می‌کنیم. در مرحله بعد ارتفاع سیستم را به کمک کنترل‌کننده فازی کنترل می‌کنیم و نتایج را تحلیل می‌کنیم.

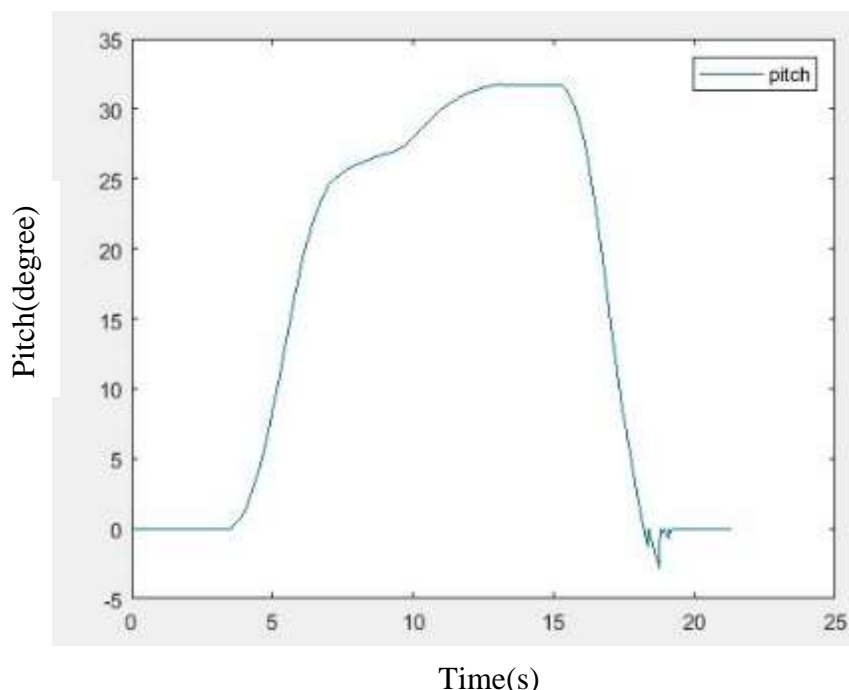
۵-۲- عملکرد حسگر

همانطور که در فصل قبل گفته شد، برای به دست آوردن زاویه‌ی دقیق حسگر در محیط متلب از انتگرال‌گیری به روش دوزنقه‌ای و میانگین‌گیری پنجره‌ای استفاده کردیم که نتایج عملی خوبی را نشان می‌دهد (شکل ۵-۱). در شکل ۵-۱ زاویه رول ۴۰- درجه در نظر گرفته شده است.



شکل ۵-۱: زاویه رول نشان داده شده توسط حسگر

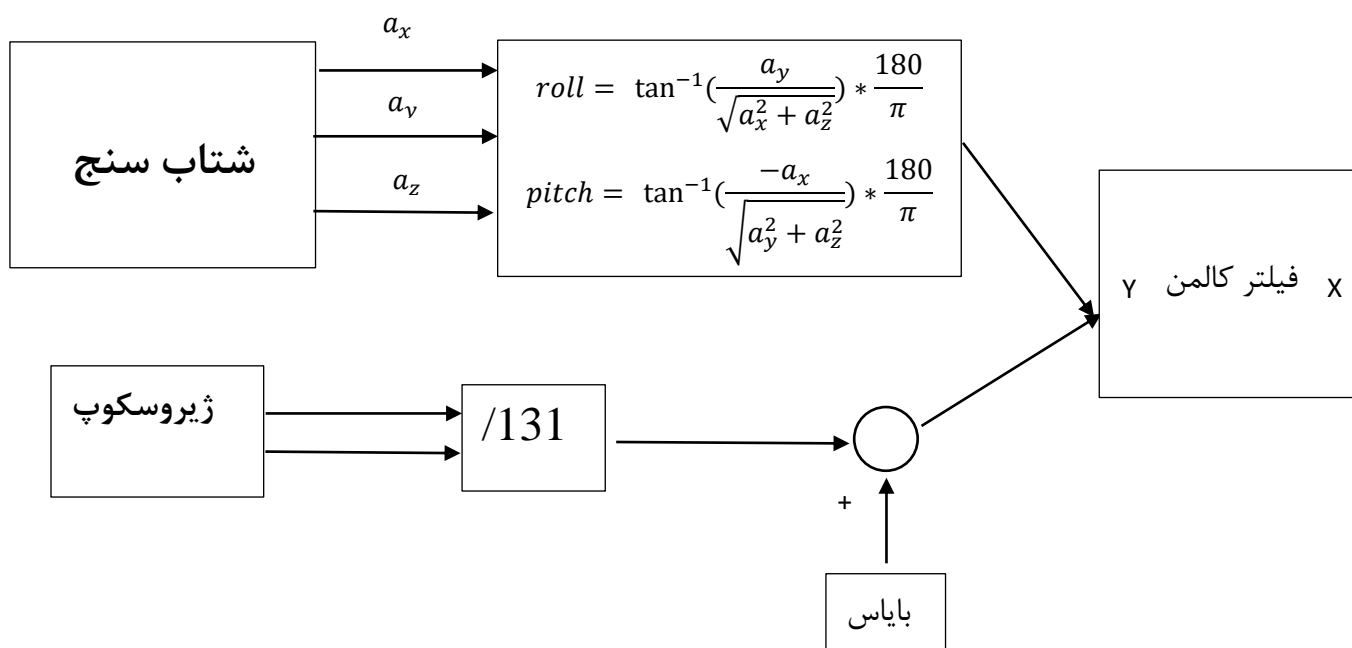
شکل ۵-۲ زاویه پیچ ۳۰ درجه را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲: زاویه پیچ نشان داده شده توسط حسگر

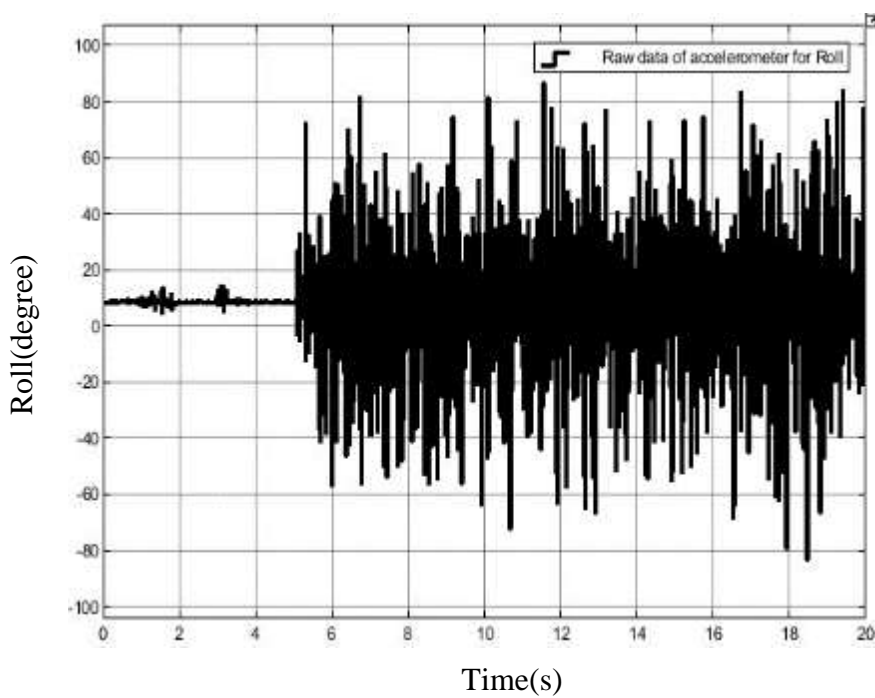
همانطور که در شکل ۵-۱ و شکل ۵-۲ نشان داده شده، حسگر در حالت عادی عملکرد مطلوبی دارد. اما در صورت روشن کردن موتورهای و یا حرکت ناگهانی حسگر، روش ارائه شده توانایی محاسبه دقیق زاویه را دارا نمی‌باشد. به عبارتی نویز زیاد موتورهای و همچنین تغییر ناگهانی سرعت چهارپره موجب خراب شدن داده‌های به دست آمده می‌شود. به همین دلیل برای از بین بردن نویز و ضربه وارد شده به سیستم از فیلتر کالمن و فیلتر کامپلمنتی استفاده کردیم.

همانطور که قبلاً اشاره شد فیلتر کالمن برای کاهش نویز و ترکیب داده‌های حسگری استفاده می‌شود. به همین دلیل در این پروژه از فیلتر کالمن استفاده کردیم و داده‌های حاصل از ژيروسکوپ و شتاب‌سنج را برای به دست آوردن زاویه باهم ترکیب کردیم. بلوک دیاگرام شکل ۵-۳ نحوه ترکیب داده‌های ژيروسکوپ و شتاب‌سنج را نشان می‌دهد. از داده‌های شتاب‌سنج مطابق رابطه ذکر شده در بلوک دیاگرام شکل ۵-۳ زاویه رول و پیچ محاسبه شده و از سوی دیگر داده‌های ژيروسکوپ نیز با بایاس ثابتی جمع شده و هر دو داده به عنوان ورودی وارد فیلتر کالمن شده و پس از ترکیب داده‌ها، نویز خروجی کاهش یافته و داده‌هایی با دقت بالا به دست می‌آید.

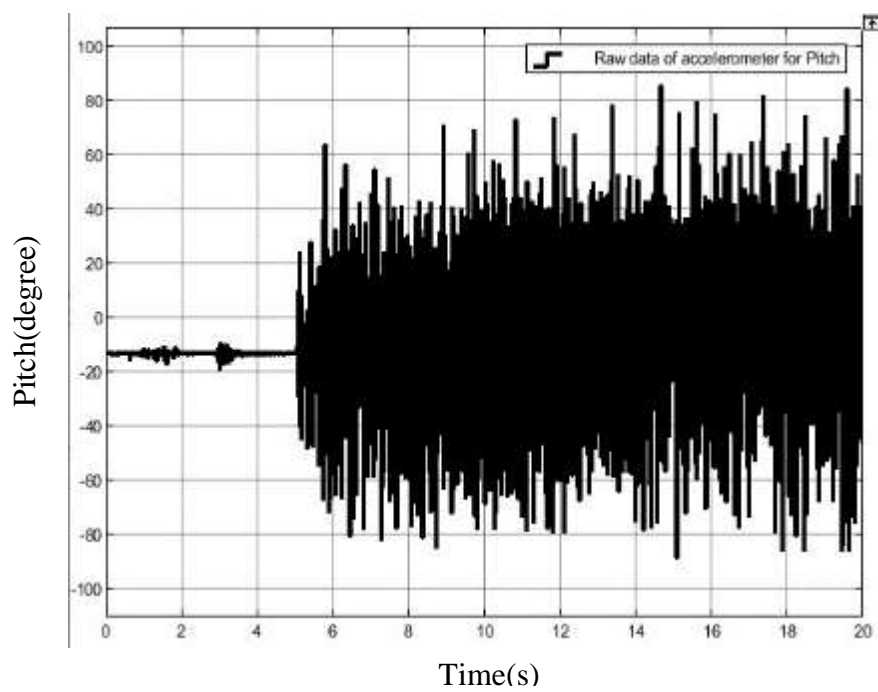


شکل ۵-۳: بلوک دیاگرام ترکیب داده‌های ژيروسکوپ و شتاب‌سنج

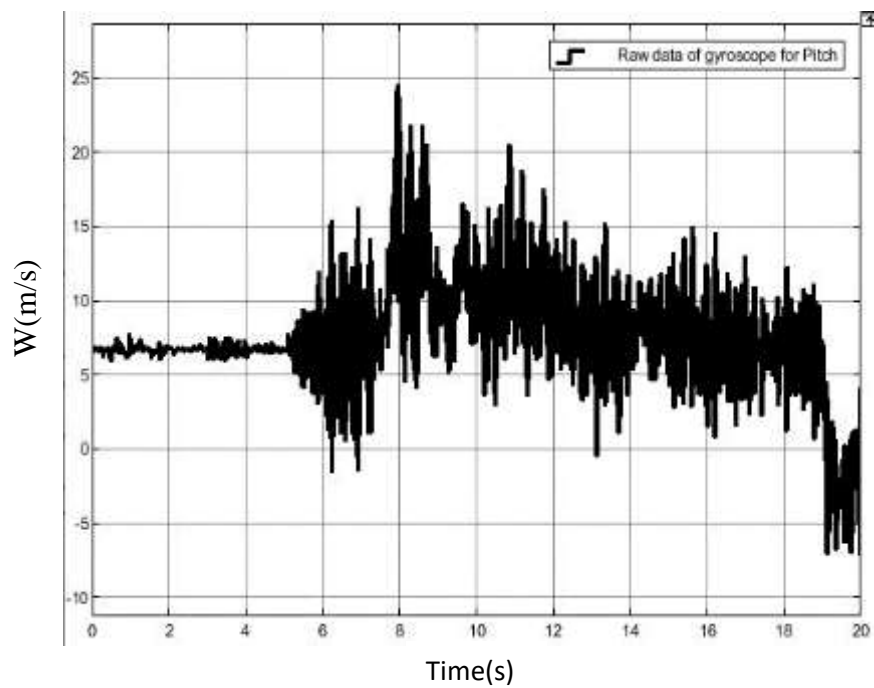
در ادامه داده‌های خام به‌دست آمده از شتاب‌سنج و ژيروسکوپ و فیلتر کالمن را مشاهده می‌کنید.



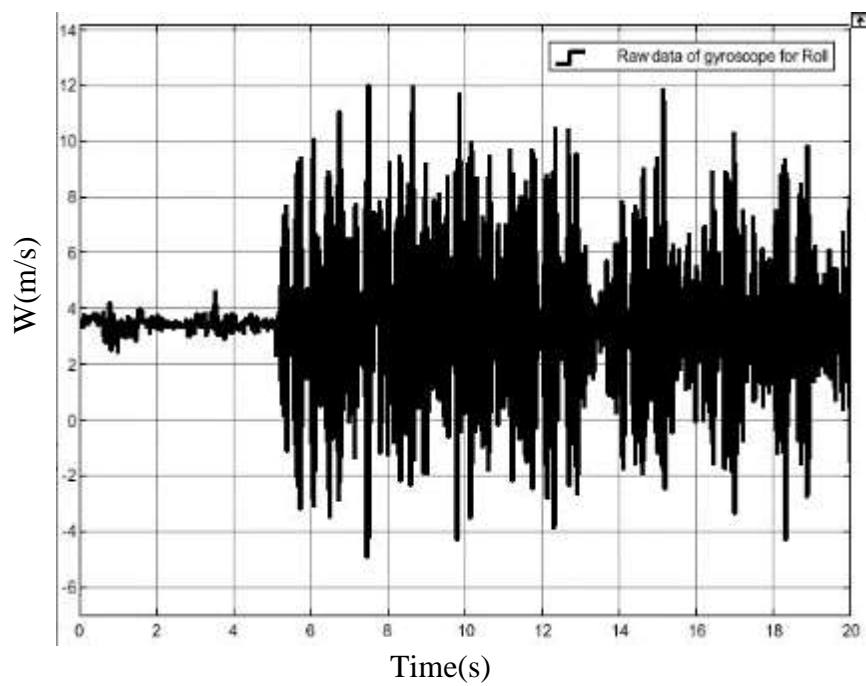
شکل ۵-۴: زاویه رول به‌دست آمده از شتاب‌سنج



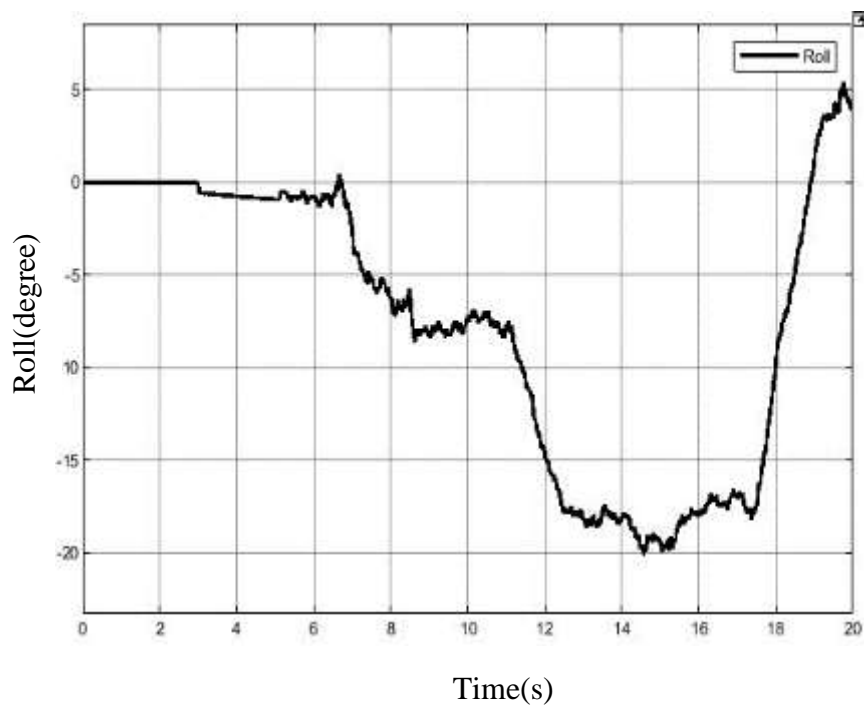
شکل ۵-۵: زاویه پیچ به دست آمده از شتابسنج



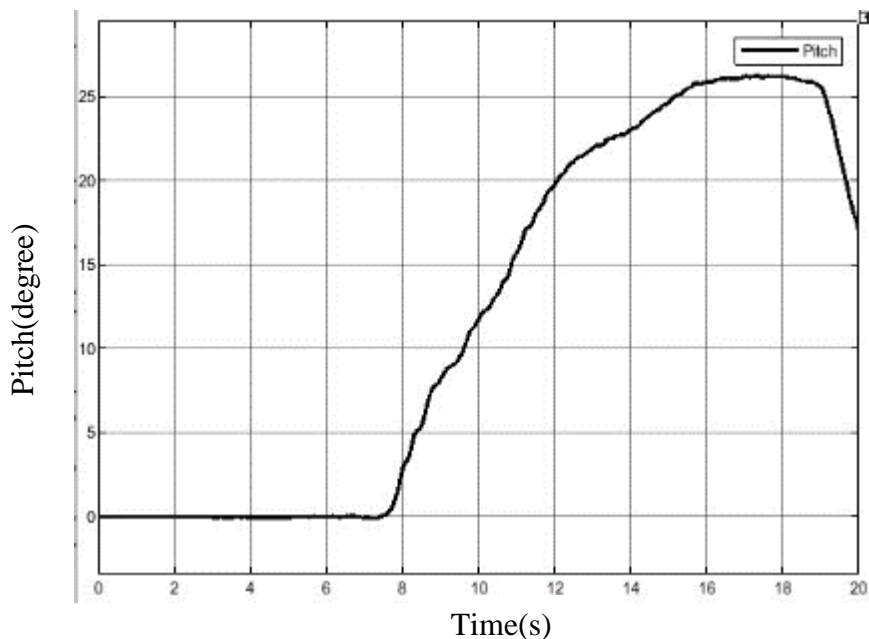
شکل ۵-۶: سرعت زاویه‌ای در راستای زاویه پیچ به دست آمده از ژيروسکوپ



شکل ۵-۷: سرعت زاویه‌ای در راستای زاویه رول به‌دست آمده از ژيروسکوپ



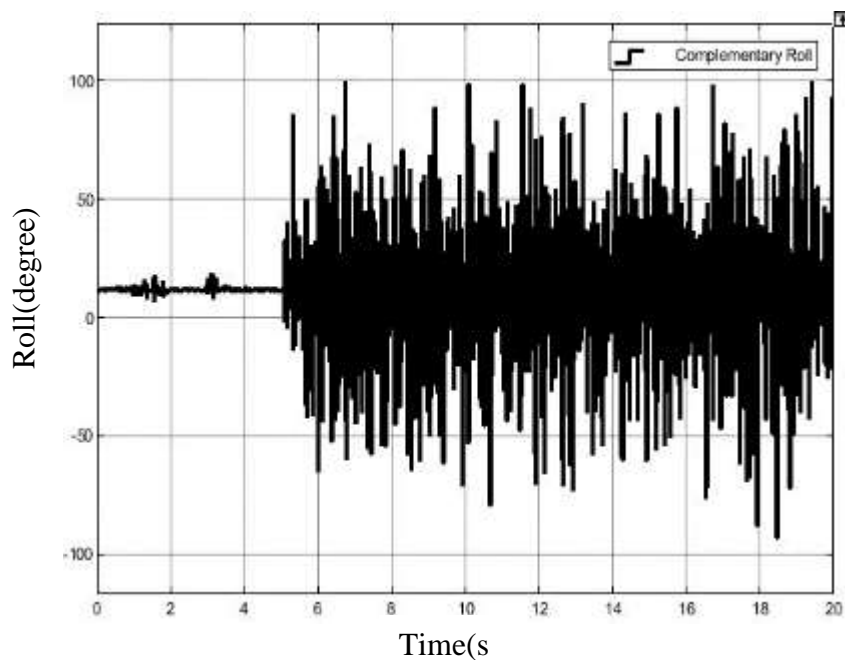
شکل ۵-۸: زاویه رول پس از ترکیب داده‌های حسگر به وسیله فیلتر کالمن



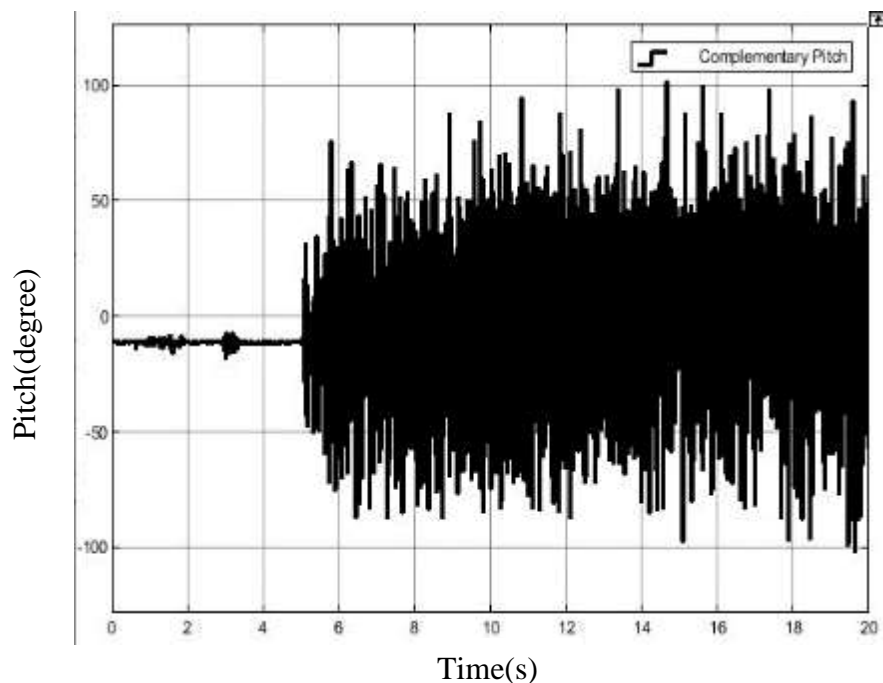
شکل ۵-۹: زاویه پیچ پس از ترکیب داده‌های حسگر به وسیله فیلتر کالمن

همانطور که در شکل‌های ۵-۸ و ۵-۹ دیده می‌شود از ثانیه ۵ به بعد که موتورهای روشن می‌شوند فیلتر کالمن به خوبی نویز را کاهش می‌دهد و زاویه را با دقت بالایی نمایش می‌دهد.

فیلتر کامپلمنتی نوع دیگری از فیلتر است که توانایی کاهش نویز را دارد برای مقایسه عملکرد دو فیلتر، زاویه رول و پیچ را پس از اعمال فیلتر کامپلمنتی به دست‌آوردیم که در شکل‌های ۵-۱۰ و ۵-۱۱ نمایش دادیم.



شکل ۵-۱۰: زاویه رول با اعمال فیلتر کامپلمنتی

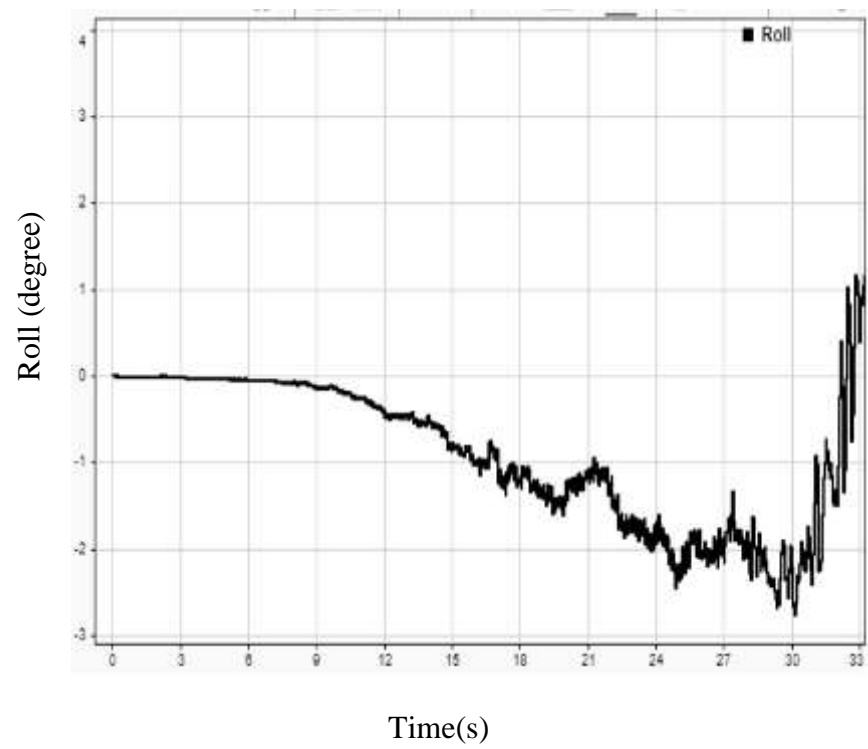


شکل ۵-۱۱: زاویه پیچ با اعمال فیلتر کامپلمنتری

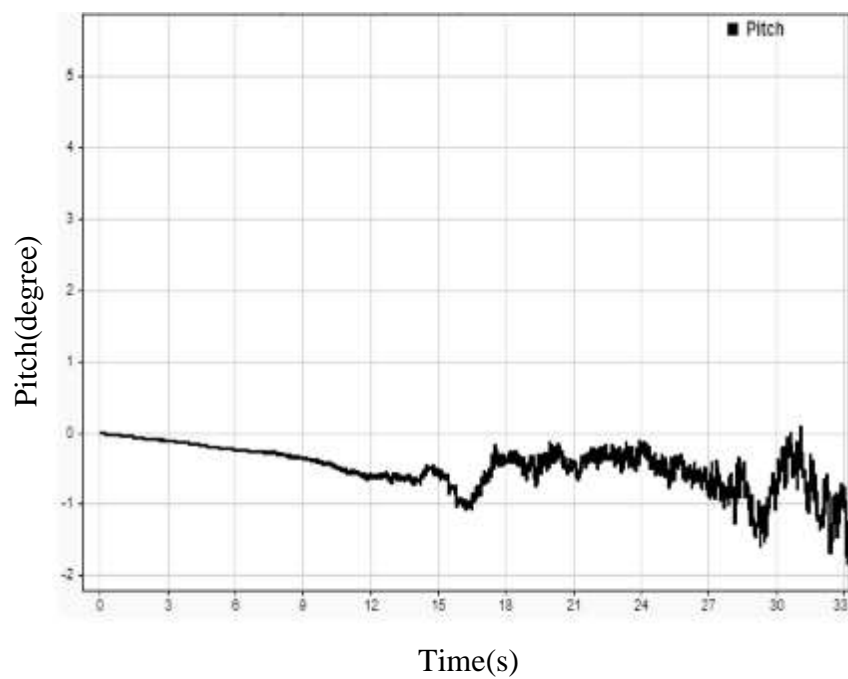
با مقایسه عملکرد فیلتر کالمن و فیلتر کامپلمنتری نتیجه می‌گیریم که فیلتر کامپلمنتری عملکرد مطلوبی ندارد. اما در نقطه مقابل فیلتر کالمن نویز موتورها را تا حد بسیار خوبی کاهش داده و زوایا را با دقت بالا نمایش می‌دهد.

۵-۳- کنترل زوایا به کمک کنترل کننده فازی

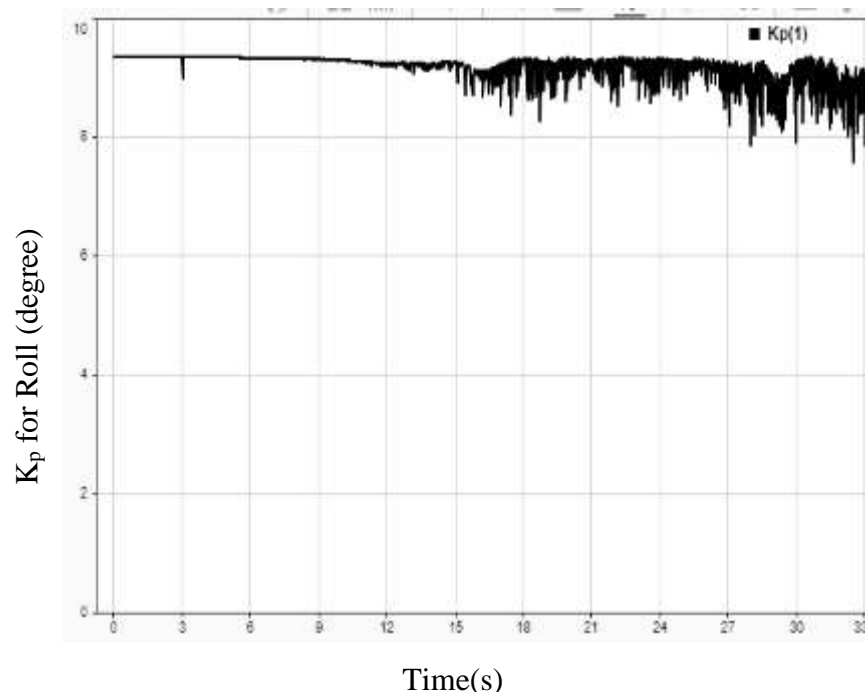
در این قسمت برای کنترل زوایه‌ها از کنترل کننده PD فازی استفاده کردیم. زاویه رول و پیچ مطلوب صفر در نظر گرفته شده است. شکل ۵-۱۲ و شکل ۵-۱۳ به ترتیب زاویه رول و پیچ به دست آمده به کمک کنترل کننده فازی را نشان می‌دهد. از دو شکل نتیجه می‌گیریم که کنترل کننده PD فازی برای کنترل زاویه عملکرد بسیار خوبی دارد. خطا این زوایا در حدود ۲-۳ درجه می‌باشد که این موضوع نشانگر عملکرد مطلوب کنترل کننده طراحی شده است. ضریب تناسبی و مشتق‌گیر برای کنترل زاویه رول و پیچ نیز در شکل‌های ۵-۱۴، ۵-۱۵ و ۵-۱۶ و ۵-۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۲: زاویه رول

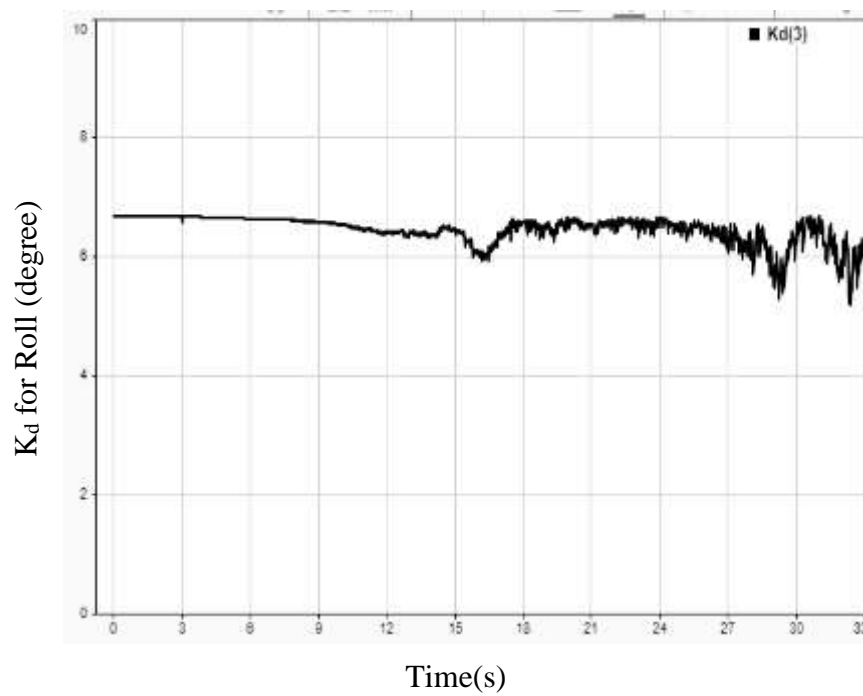


شکل ۵-۱۳: زاویه پیچ

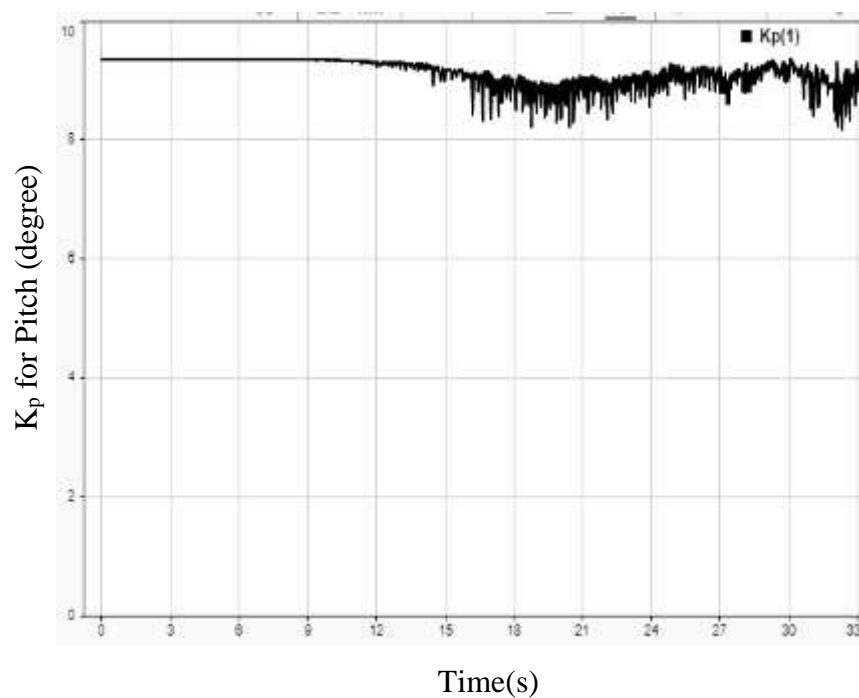


شکل ۵-۱۴: ضریب تناسبی کنترل کننده فازی برای زاویه رول

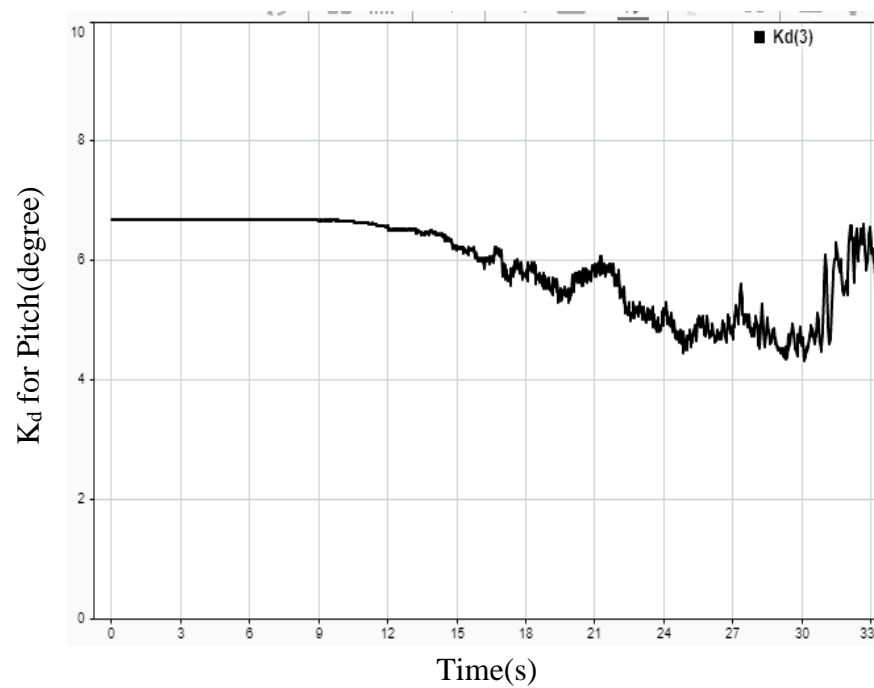
:



شکل ۵-۱۵: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فازی برای زاویه رول

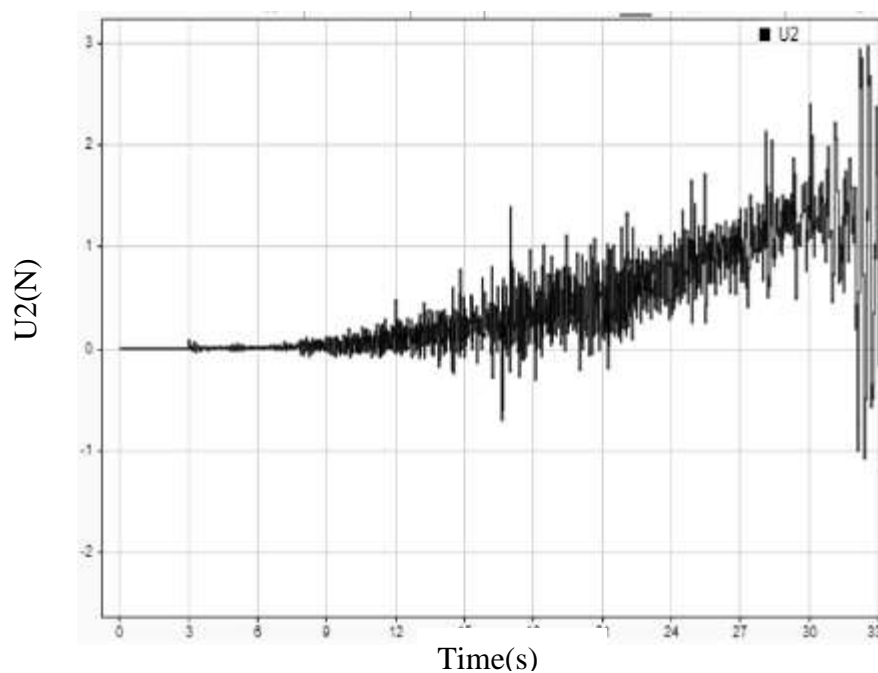


شکل ۵-۱۶: ضریب تناسبی کنترل کننده فازی برای زاویه پیچ

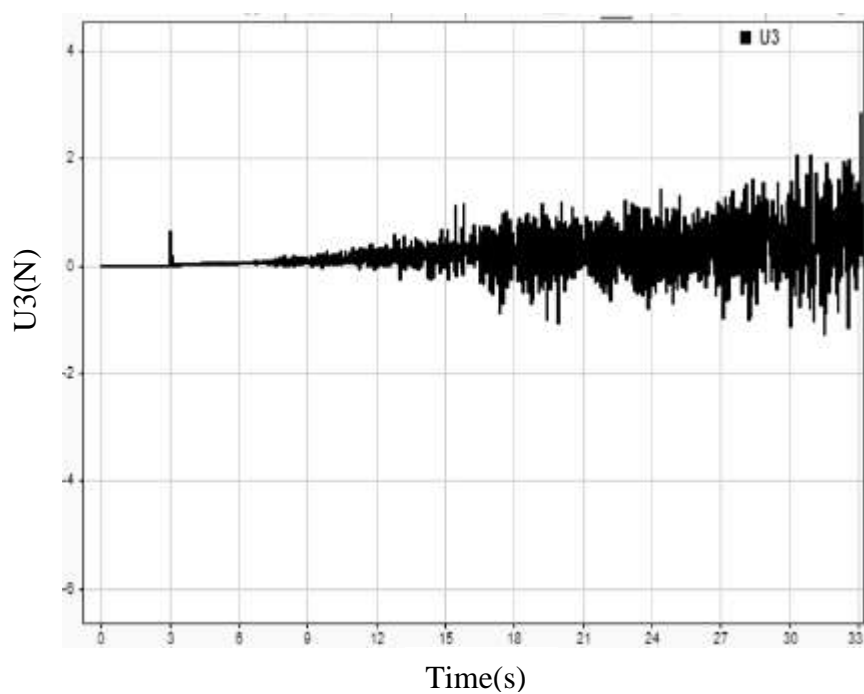


شکل ۵-۱۷: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فازی برای زاویه پیچ

سیگنال کنترلی مربوط به زاویه رول و پیچ در شکل های ۵-۱۸ و ۵-۱۹ نشان داده شده است.

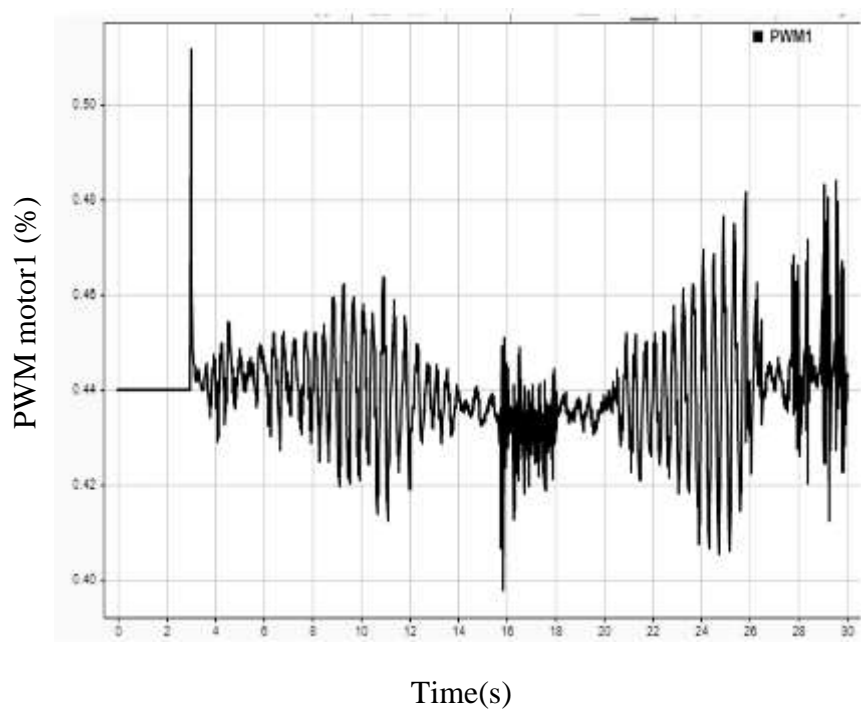


شکل ۵-۱۸: سیگنال کنترلی U_2

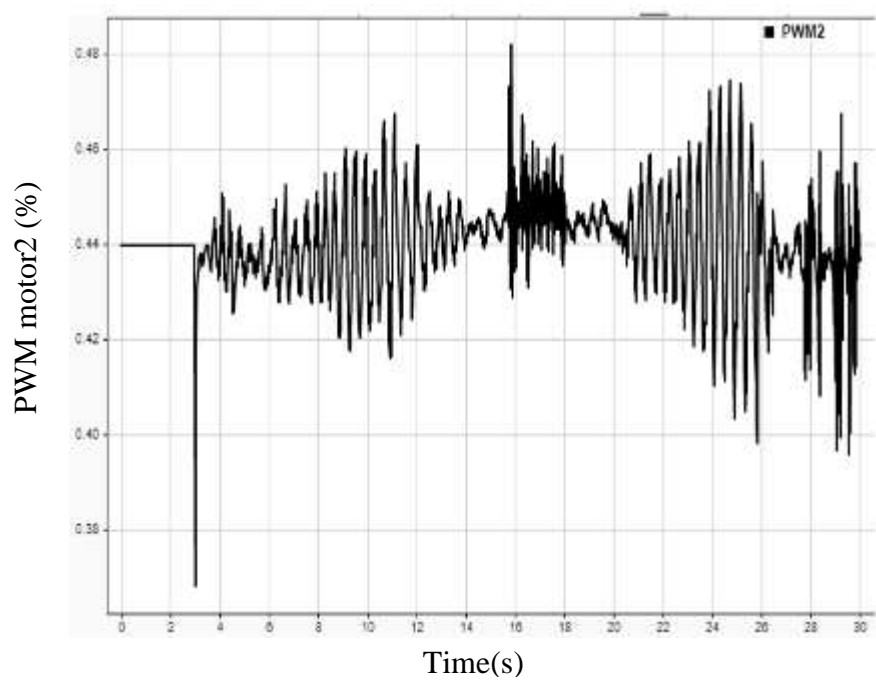


شکل ۵-۱۹: سیگنال کنترلی U_3

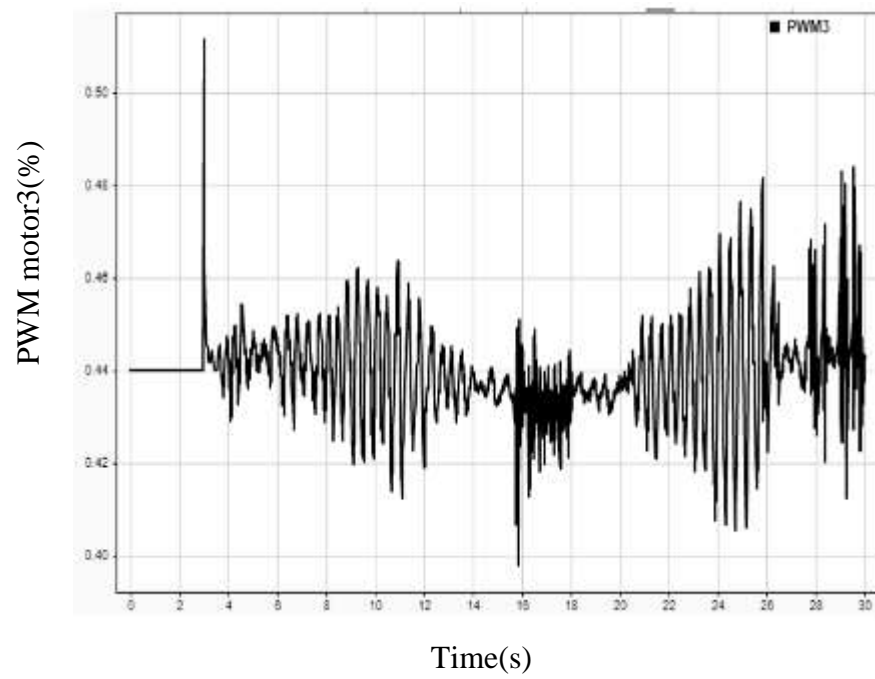
سیگنال مدولاسیون پهنای پالس برای هرموتور در شکل‌های ۵-۲۰، ۵-۲۱، ۵-۲۲ و ۵-۲۳ نشان داده شده است.



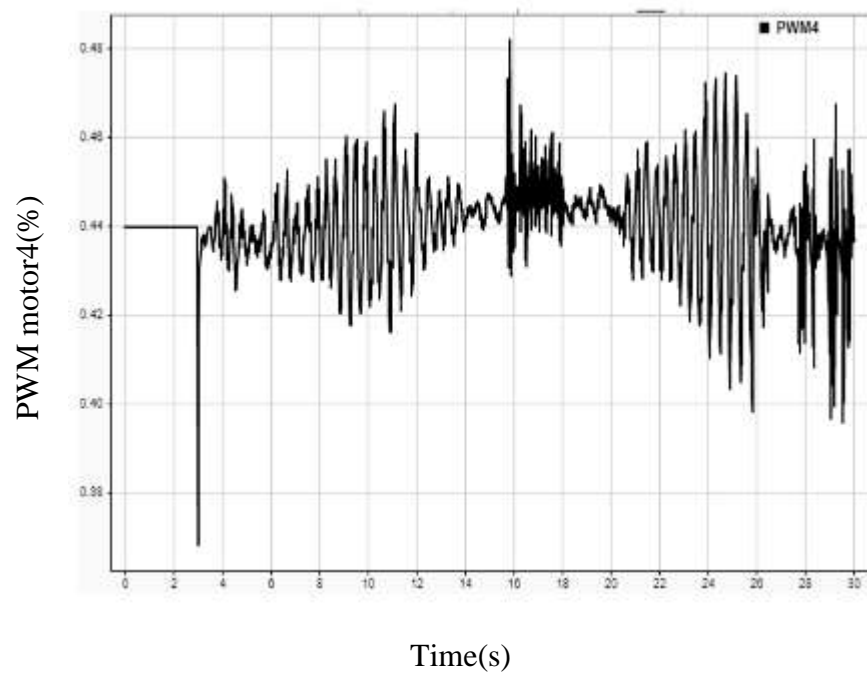
شکل ۵-۲۰: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۱



شکل ۵-۲۱: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۲



شکل ۵-۲۲: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۳

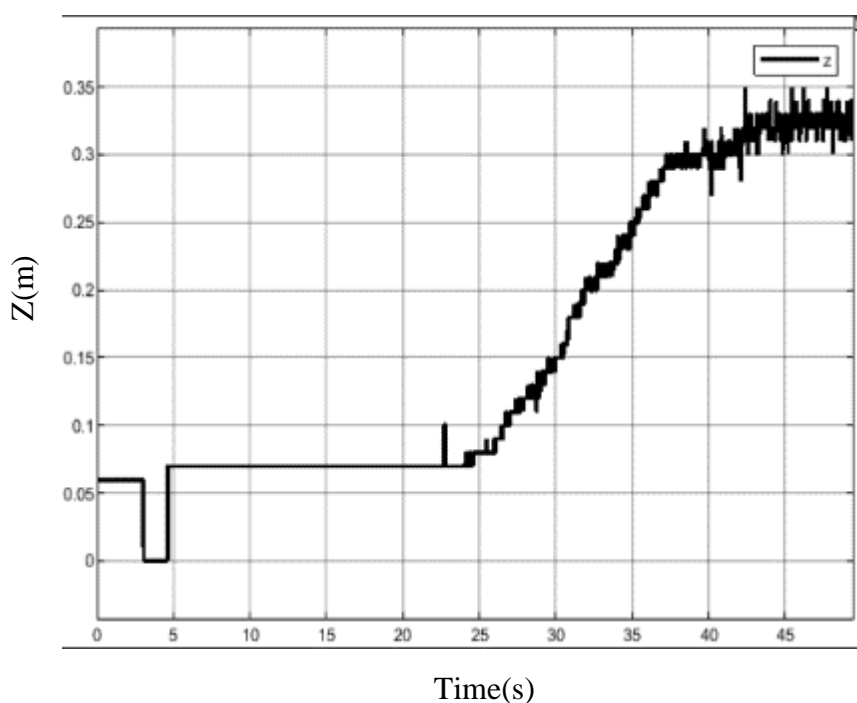


شکل ۵-۲۳: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۴

۵-۴- کنترل ارتفاع

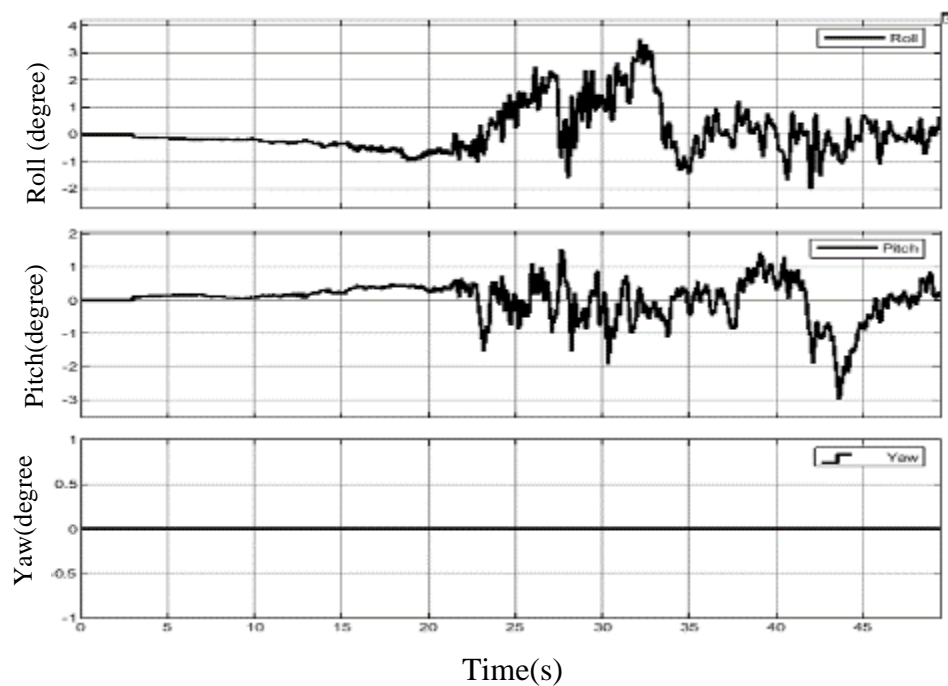
در قسمت‌های قبل به کنترل زاویه‌های سیستم پرداختیم و توانستیم هم به روش کنترل فازی هم به روش زیگلر-نیکلز کنترل کننده مناسب برای زاویه‌ها طراحی کنیم. در این قسمت ارتفاع چهارپره را به کمک کنترل کننده PID فازی طراحی شده، کنترل کردیم.

برای کنترل ارتفاع از کنترل کننده PD فازی استفاده کردیم. ارتفاع مطلوب ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است و زاویه‌های مطلوب نیز صفر قرار داده شده‌اند. در این قسمت زاویه‌ها را با طراحی کنترل کننده PD فازی کنترل کردیم. در شکل ۵-۲۴ مشاهده می‌کنید که چهارپره با دقت خوبی در ارتفاع مورد نظر قرار گرفته است.



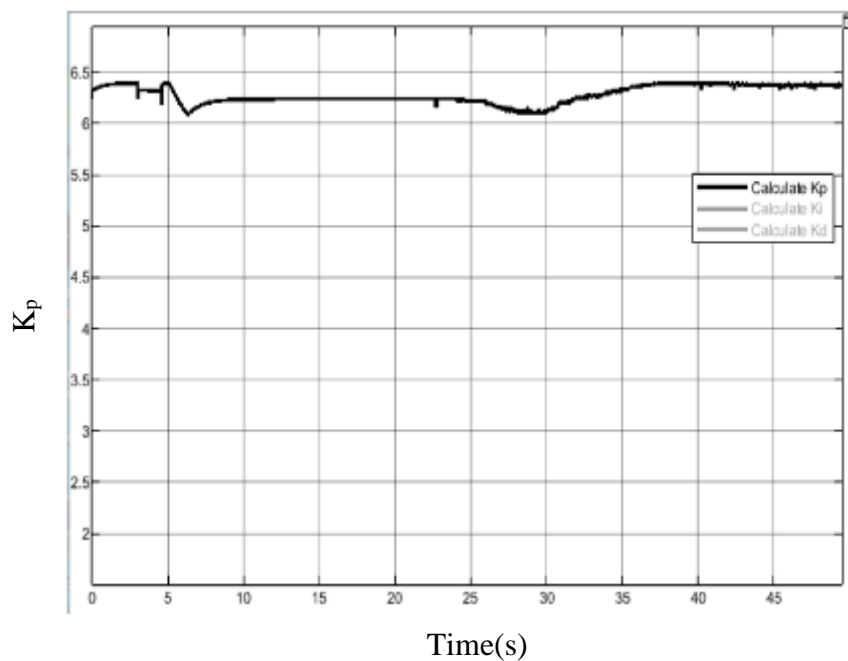
شکل ۵-۲۴: کنترل ارتفاع چهارپره

با توجه به شکل ۵-۲۴ نتیجه می‌گیریم که کنترل کننده PID برای کنترل ارتفاع عملکرد مطلوبی دارد. با توجه به شکل ۵-۲۵ نتیجه می‌شود چهارپره پس از رسیدن به ارتفاع مطلوب زاویه را نیز به خوبی کنترل کرده است.



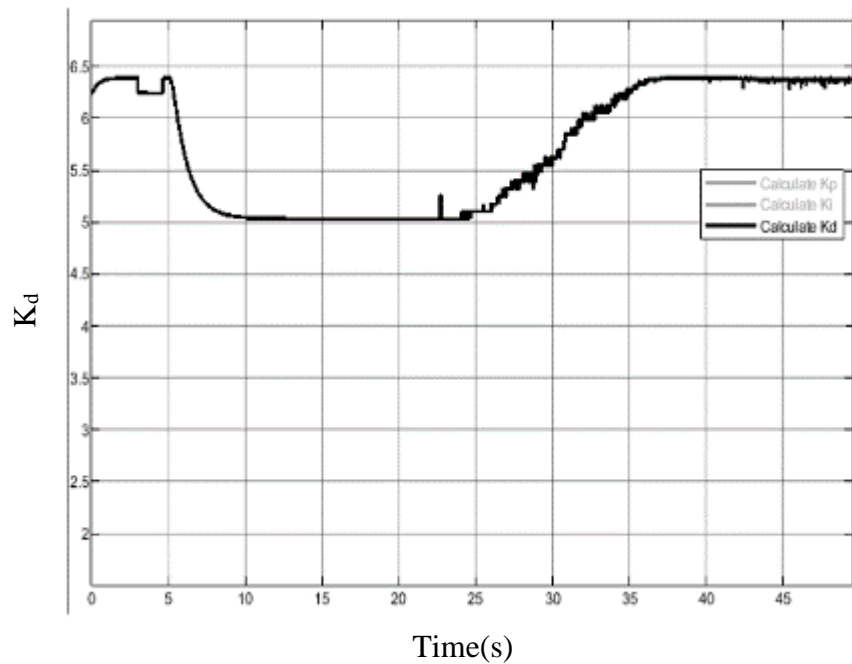
شکل ۵-۲۵: زاویه‌های چهارپره در ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر

در شکل ۵-۲۶ تغییرات ضریب تناسبی کنترل‌کننده PID فازی طراحی شده برای ارتفاع را مشاهده می‌کنید. که مقداری در بازه ۶ - ۶.۵ را شامل می‌شود.



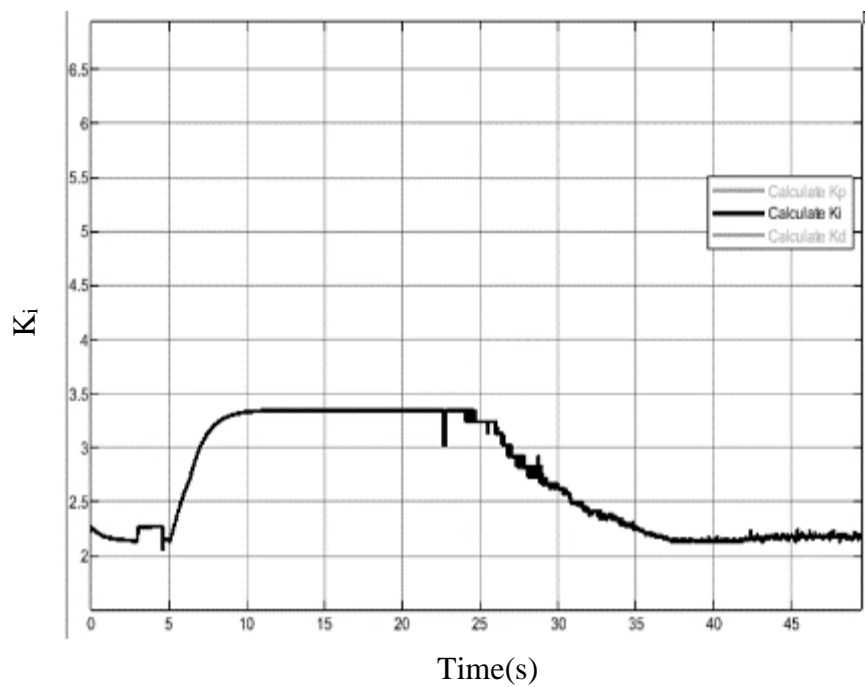
شکل ۵-۲۶: ضریب تناسبی کنترل‌کننده فازی برای ارتفاع

همچنین ضریب مشتق گیر در این کنترل کننده مطابق شکل ۲۷-۵ می باشد.



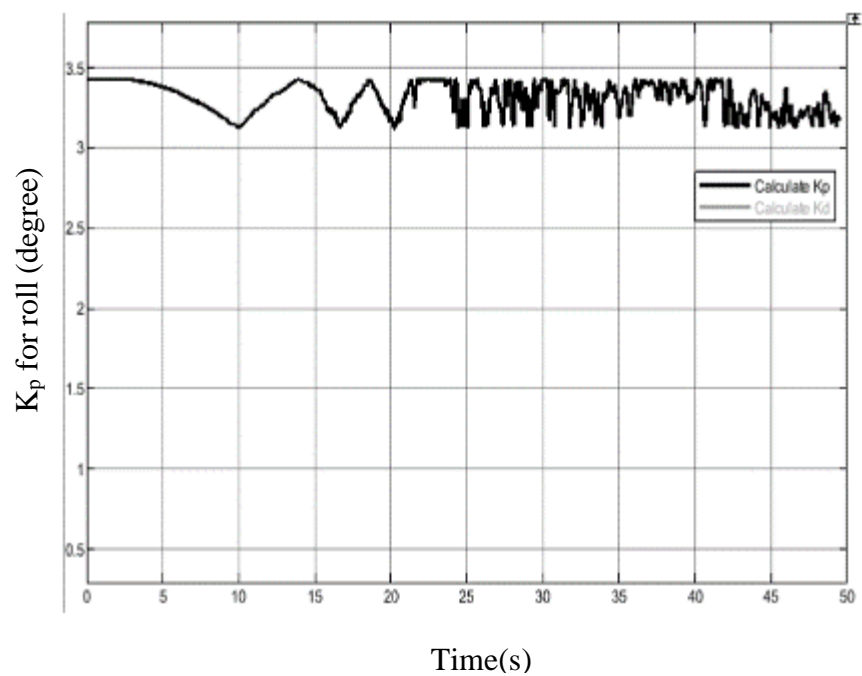
شکل ۲۷-۵: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فازی برای ارتفاع

همچنین ضریب انتگرال گیر این کنترل کننده در شکل ۲۸-۵ نشان داده شده است.

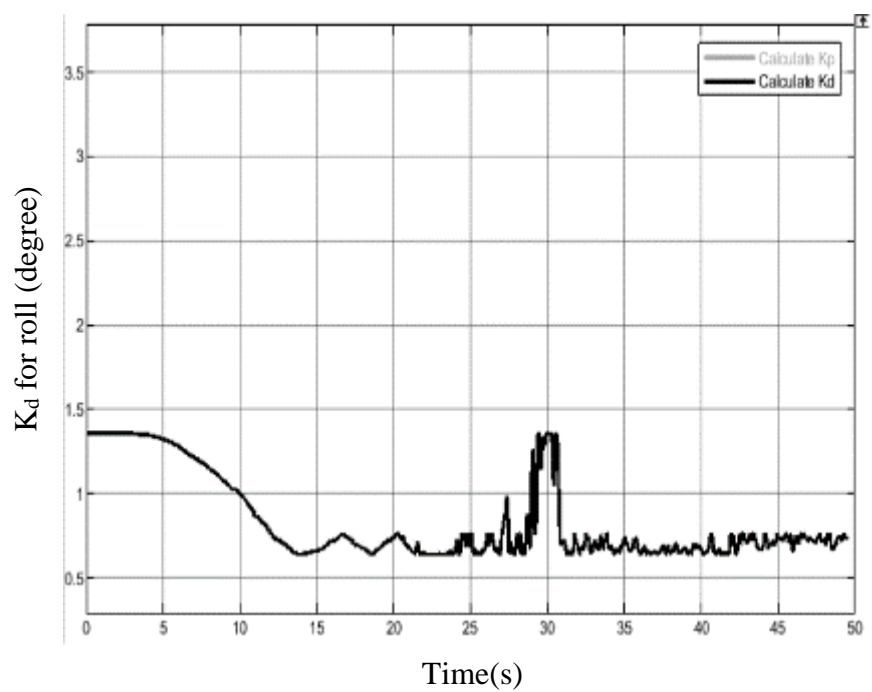


شکل ۲۸-۵: ضریب انتگرال گیر کنترل کننده فازی برای ارتفاع

ضرایب کنترل کننده فازی طراحی شده برای زاویه رول مطابق شکل های ۲۹-۵ و ۳۰-۵ می باشد.

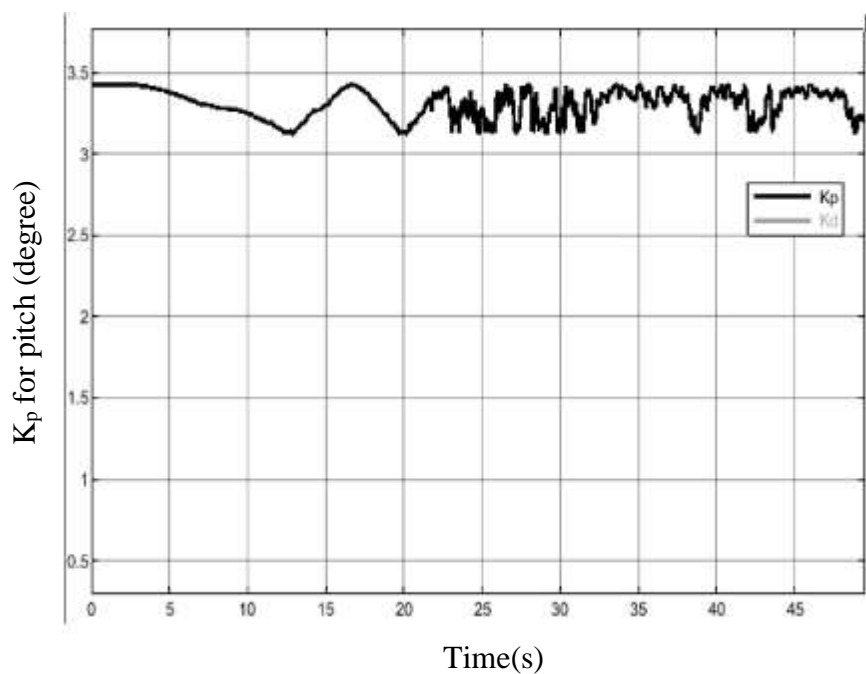


شکل ۵-۲۹: ضریب تناسبی کنترل کننده فازی زاویه رول

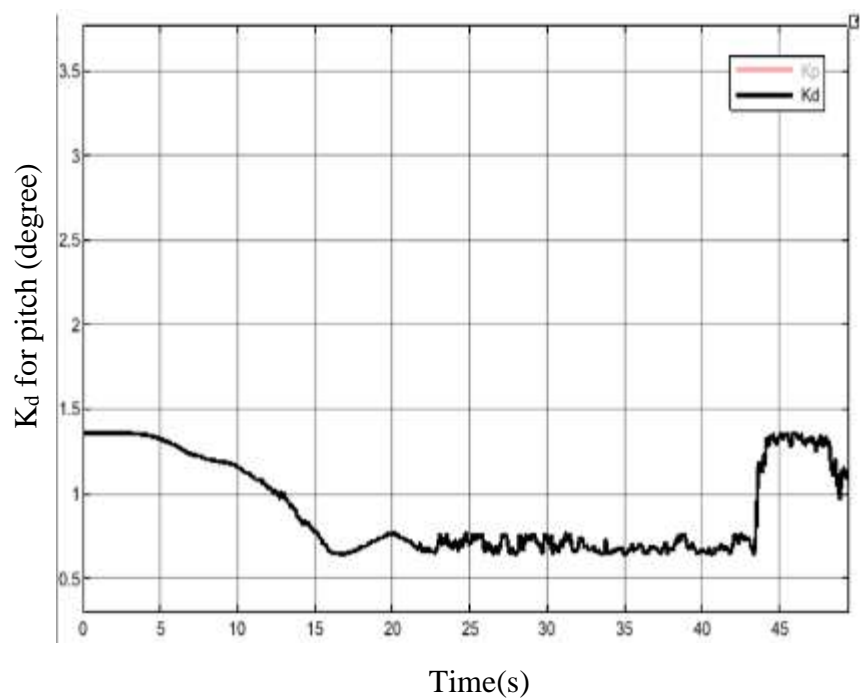


شکل ۵-۳۰: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فازی زاویه رول

ضرایب کنترل کننده فازی طراحی شده برای زاویه پیچ مطابق شکل های ۳۱-۵ و ۳۲-۵ می باشد.

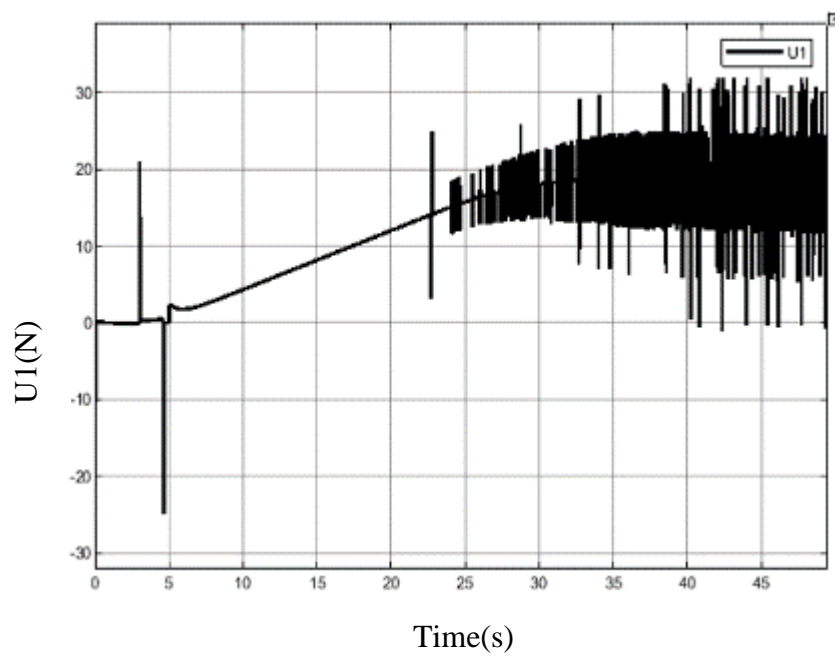


شکل ۳۱-۵: ضریب تناسبی کنترل کننده فازی زاویه پیچ

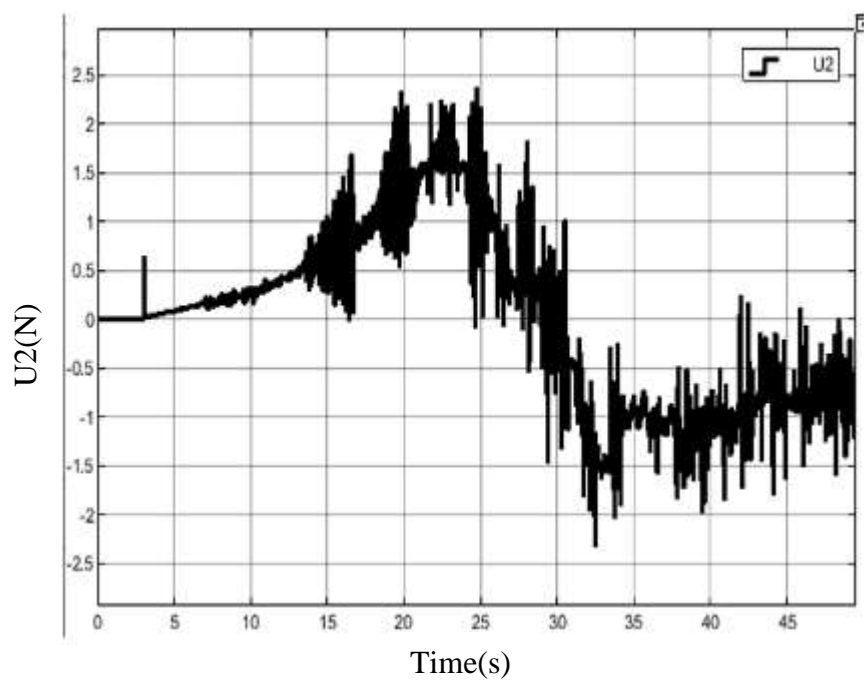


شکل ۳۲-۵: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فازی زاویه پیچ

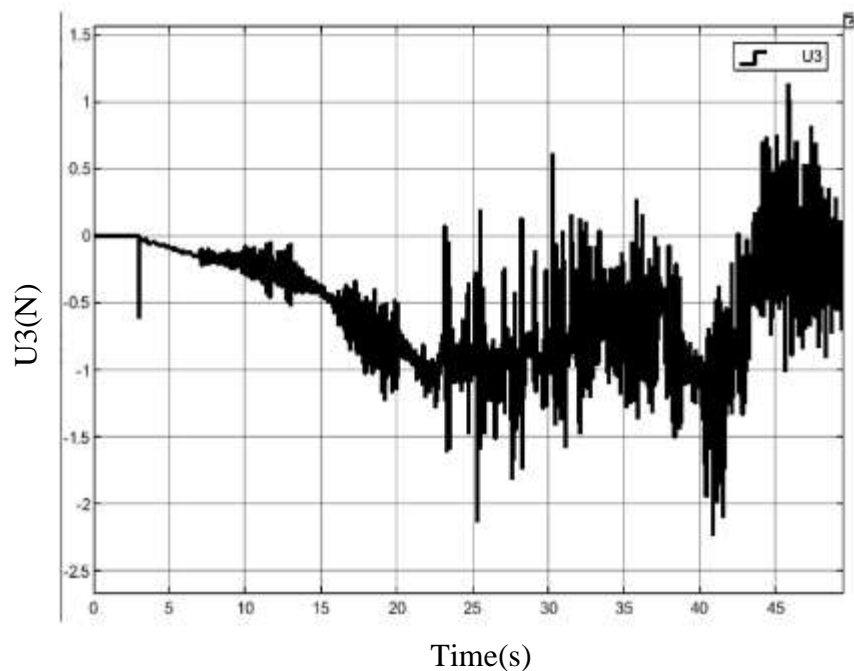
سیگنال کنترلی‌های مربوط به ارتفاع و زوایا مطابق شکل‌های ۳۳-۵، ۳۴-۵ و ۳۵-۵ می‌باشند.



شکل ۳۳-۵: سیگنال کنترلی U_1

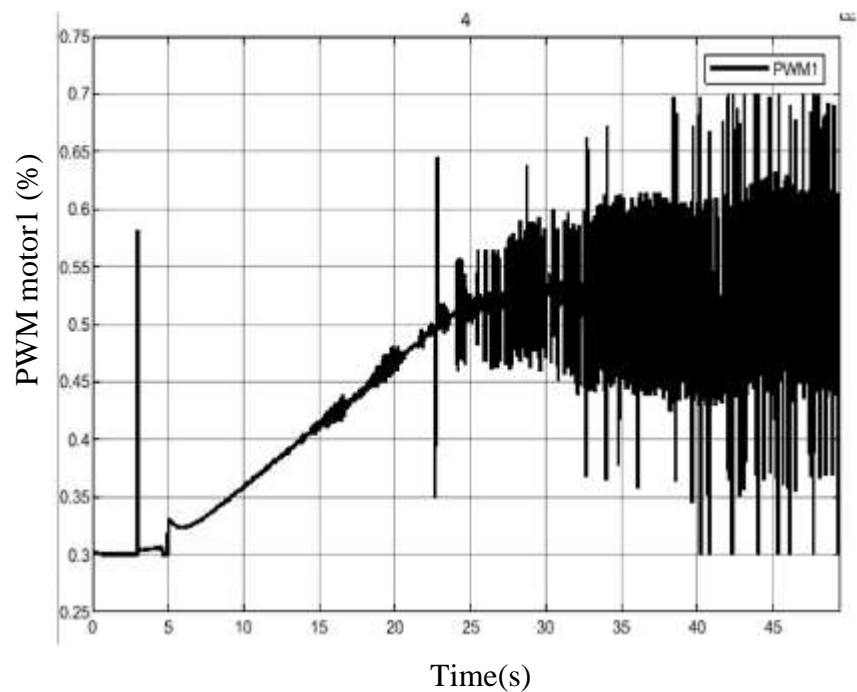


شکل ۳۴-۵: سیگنال کنترلی U_2

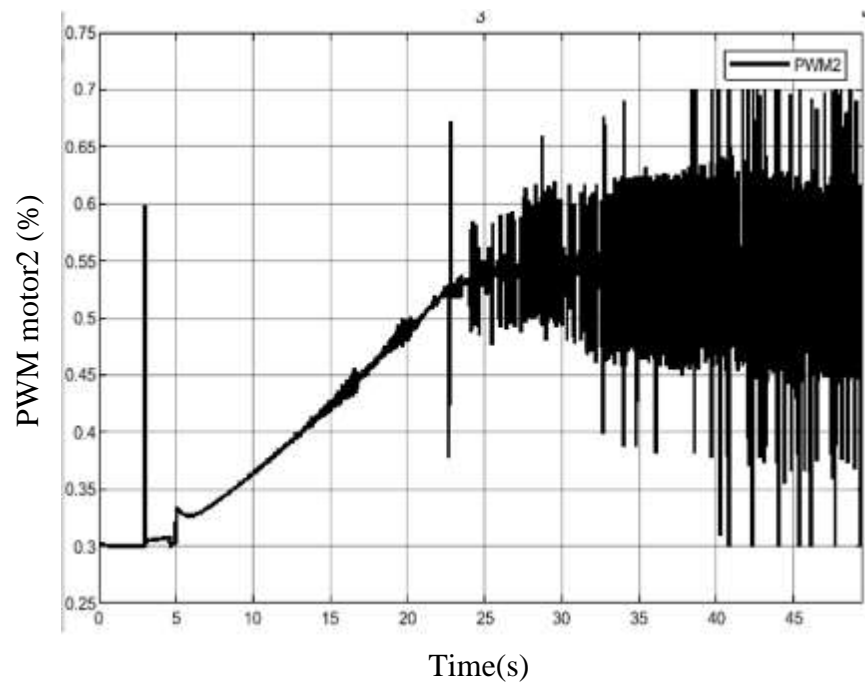


شکل ۵-۳: سیگنال کنترلی U_3

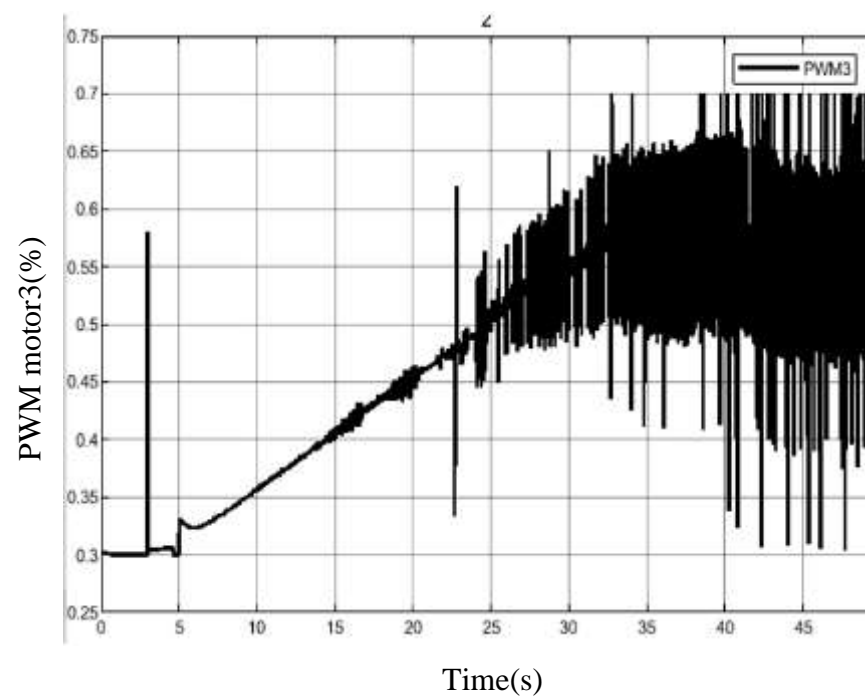
سیگنال مدولاسیون پهنای پالس برای هر موتور در شکل‌های ۵-۳۶، ۵-۳۷، ۵-۳۸ و ۵-۳۹ نشان داده شده است.



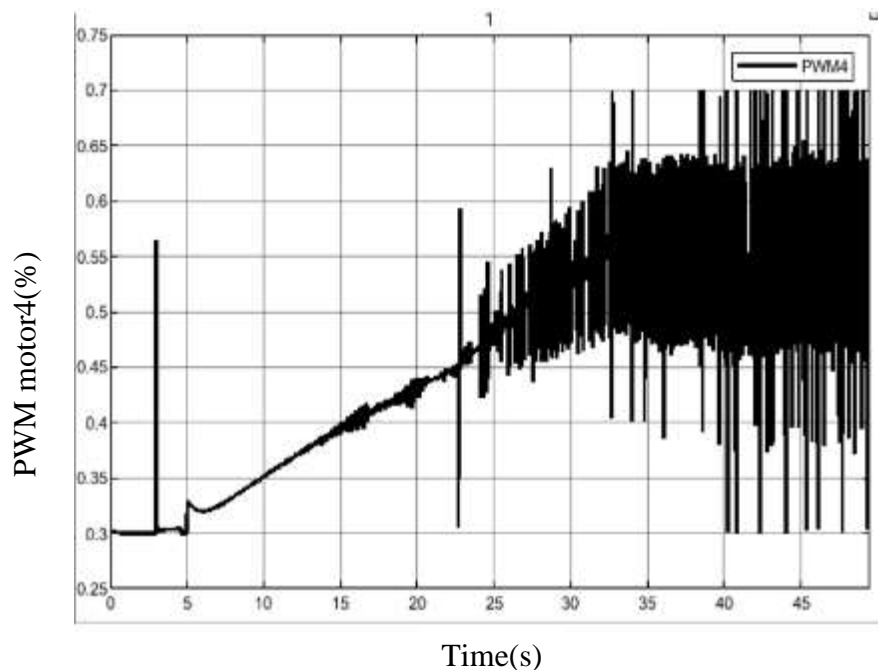
شکل ۵-۳۶: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۱



شکل ۵-۳۷: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۲

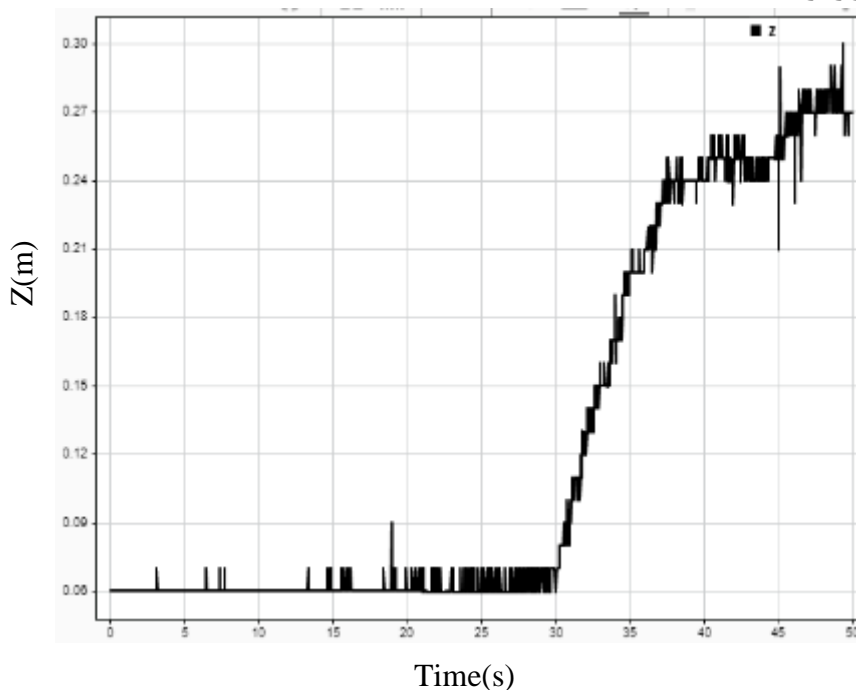


شکل ۵-۳۸: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۳



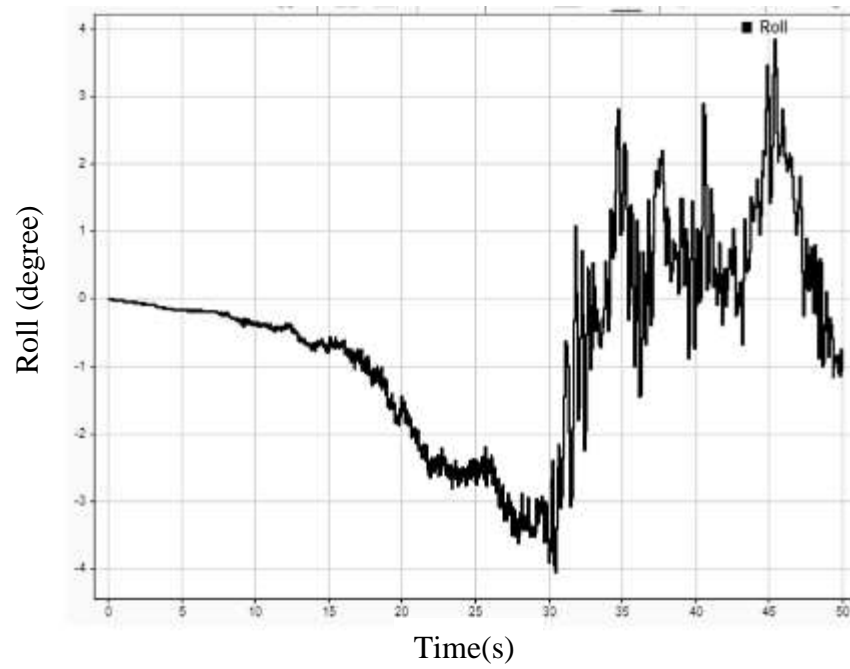
شکل ۵-۳۹: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۴

به منظور مقایسه کنترل کننده‌ها بار دیگر ارتفاع و زوایا را به کمک کنترل کننده PID فازی کنترل کردیم. در این قسمت ارتفاع مطلوب ۲۵ سانتی متر در نظر گرفته شده است و در شکل ۵-۴۰ مشاهده می شود که چهارپره به خوبی در ارتفاع مورد نظر قرار گرفته است.

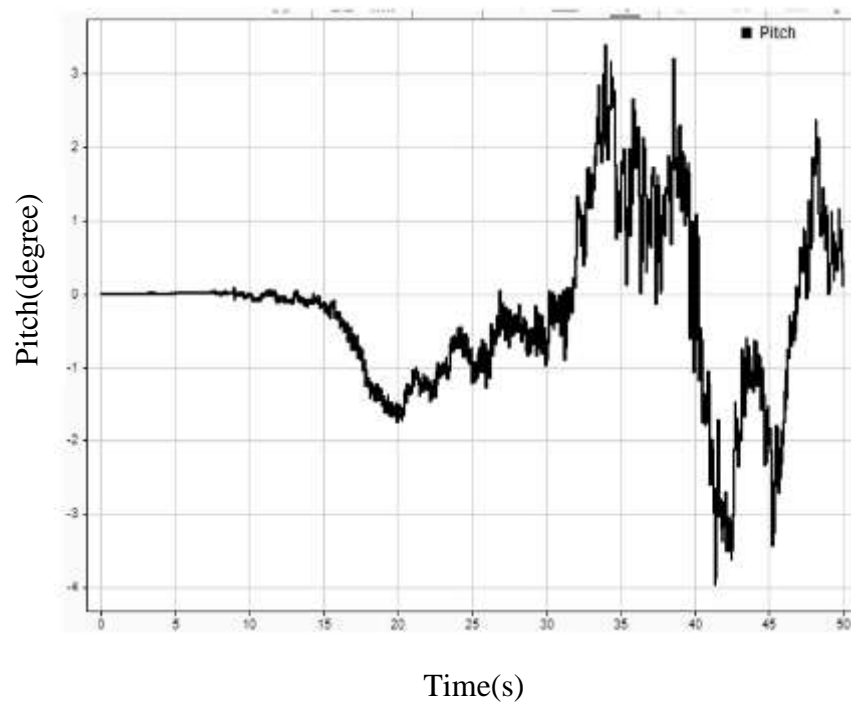


شکل ۵-۴۰: کنترل ارتفاع چهارپره

زاویه رول و پیچ مرجع صفر در نظر گرفته شده است که در شکل های ۵-۴۱ و ۵-۴۲ نتیجه را مشاهده می کنید.

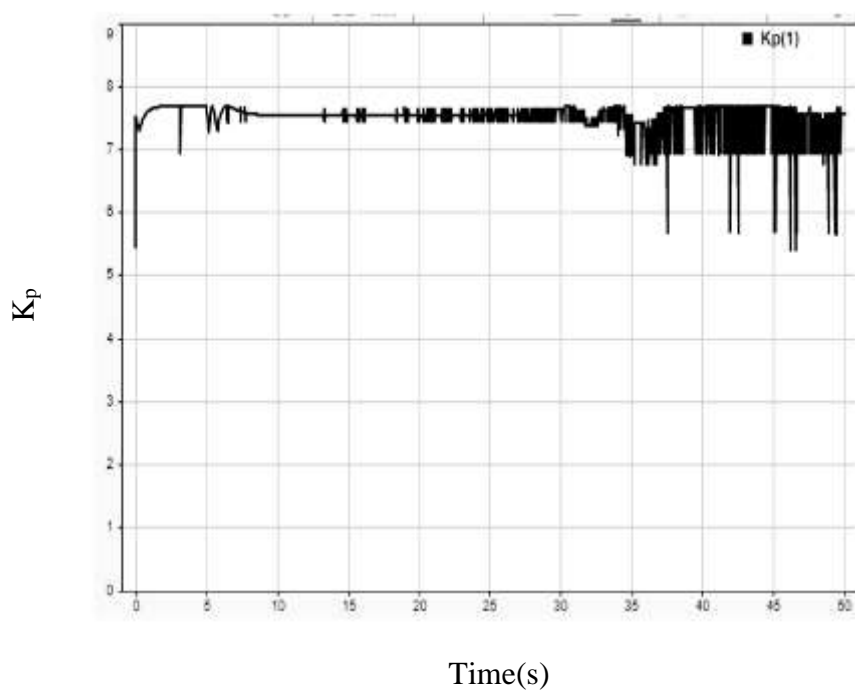


شکل ۵-۴۱: زاویه رول



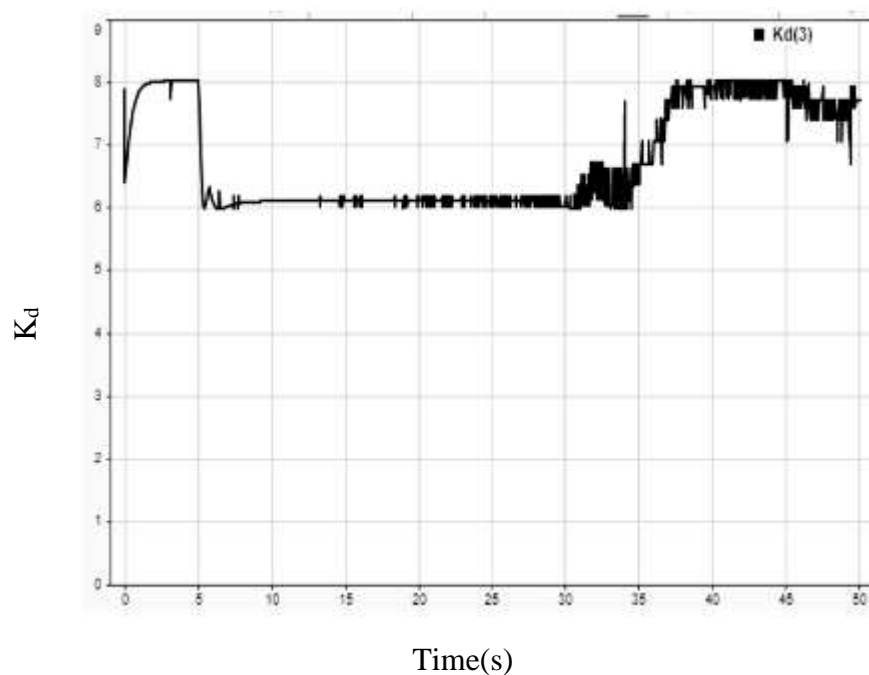
شکل ۵-۴۲: زاویه پیچ

در شکل ۴۳-۵ تغییرات ضریب تناسبی کنترل کننده PID فازی طراحی شده برای ارتفاع را مشاهده می کنید. که مقداری در بازه ۵.۵ - ۸ را شامل می شود.



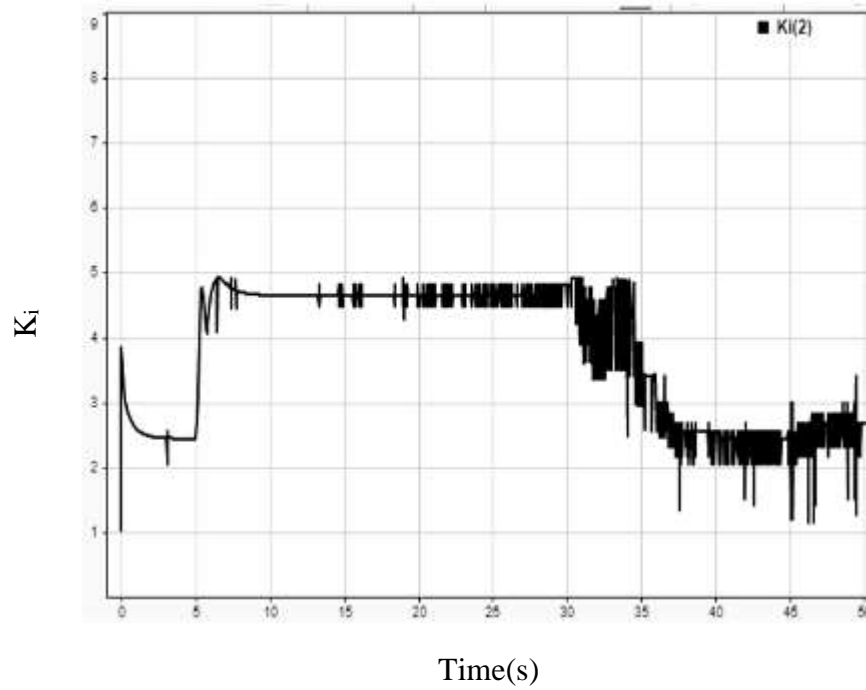
شکل ۴۳-۵: ضریب تناسبی کنترل کننده فازی برای ارتفاع

همچنین ضریب مشتق گیر در این کنترل کننده مطابق شکل ۴۴-۵ می باشد.



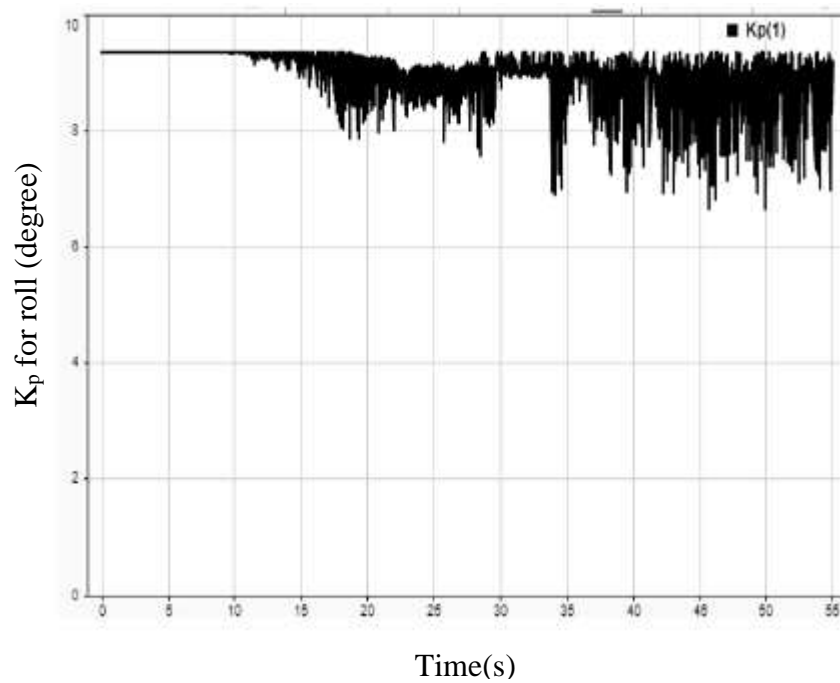
شکل ۴۴-۵: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فازی برای ارتفاع

همچنین ضریب انتگرال گیر این کنترل کننده در شکل ۴۵-۵ نشان داده شده است.

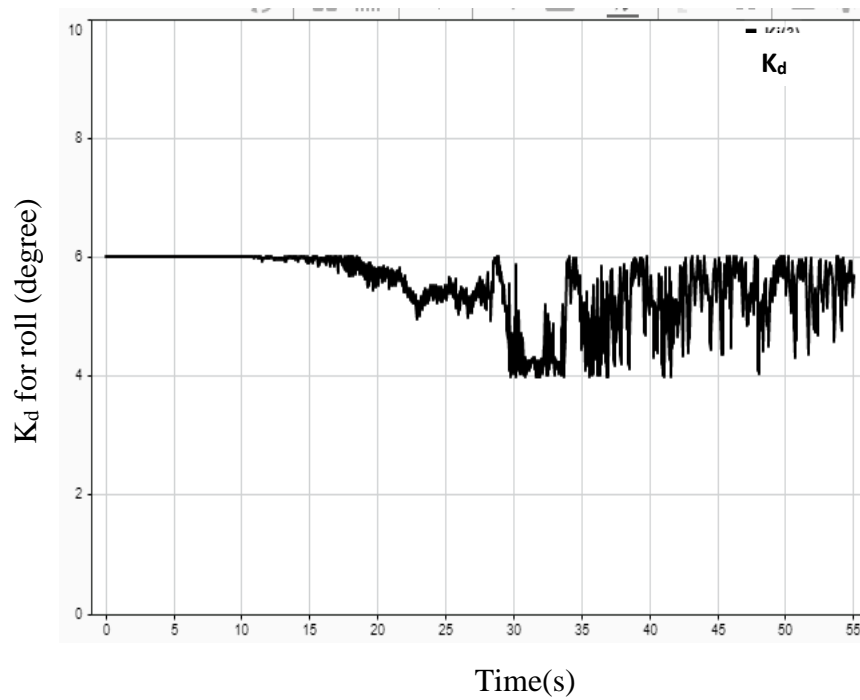


شکل ۴۵-۵: ضریب انتگرال گیر کنترل کننده فازی برای ارتفاع

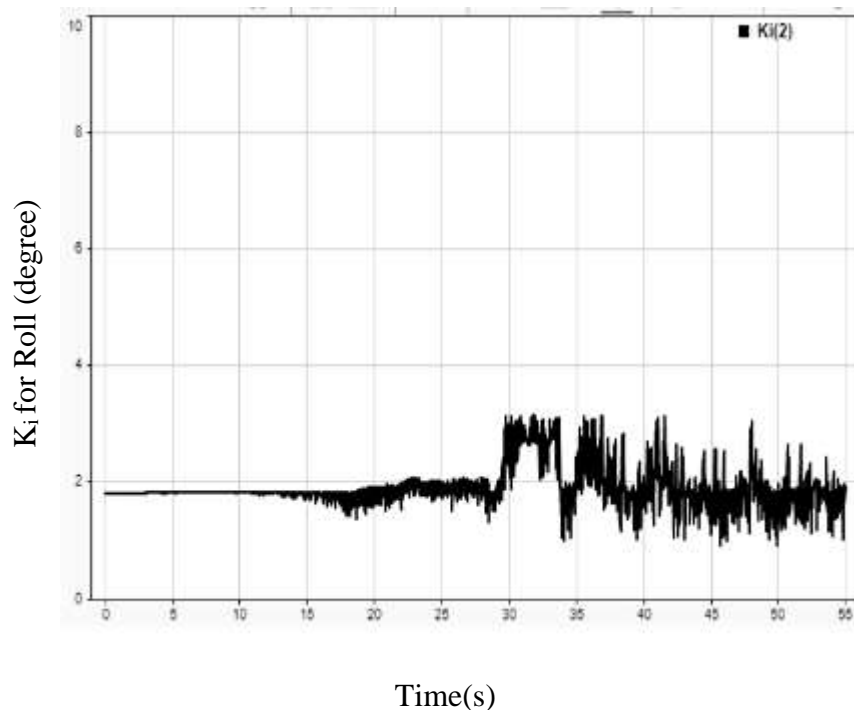
ضرایب کنترل کننده فازی طراحی شده برای زاویه رول مطابق شکل های ۴۶-۵ و ۴۷-۵ و ۴۸-۵ می باشد.



شکل ۴۶-۵: ضریب تناسبی کنترل کننده فازی زاویه رول

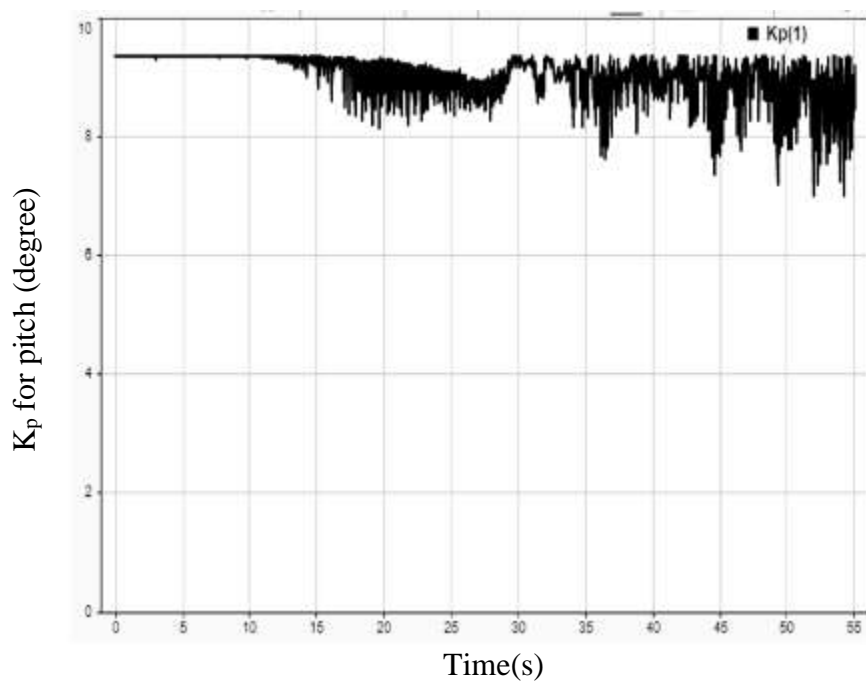


شکل ۵-۴۷: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فازی زاویه رول

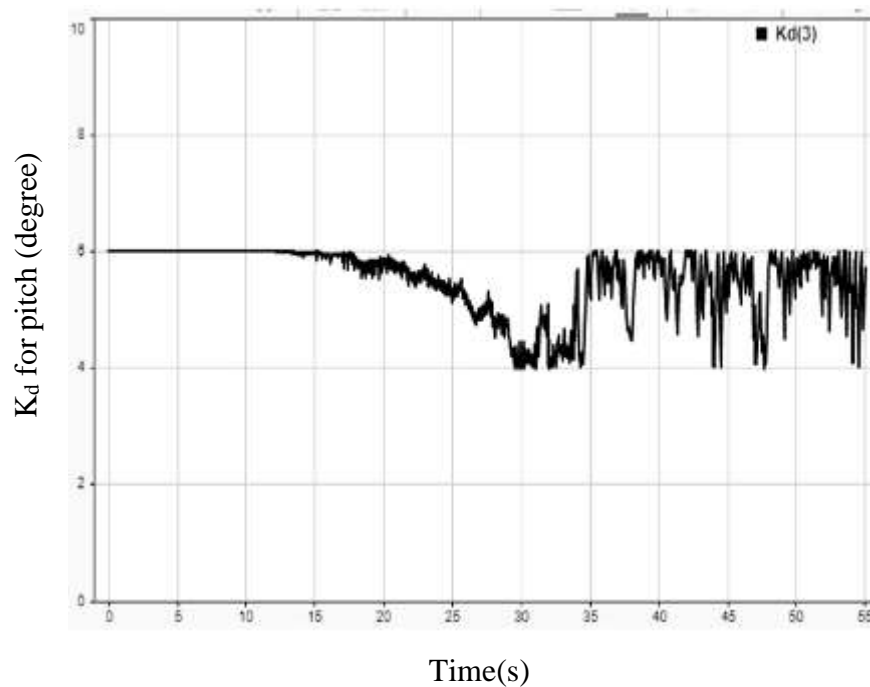


شکل ۵-۴۸: ضریب انتگرال گیر کنترل کننده فازی زاویه رول

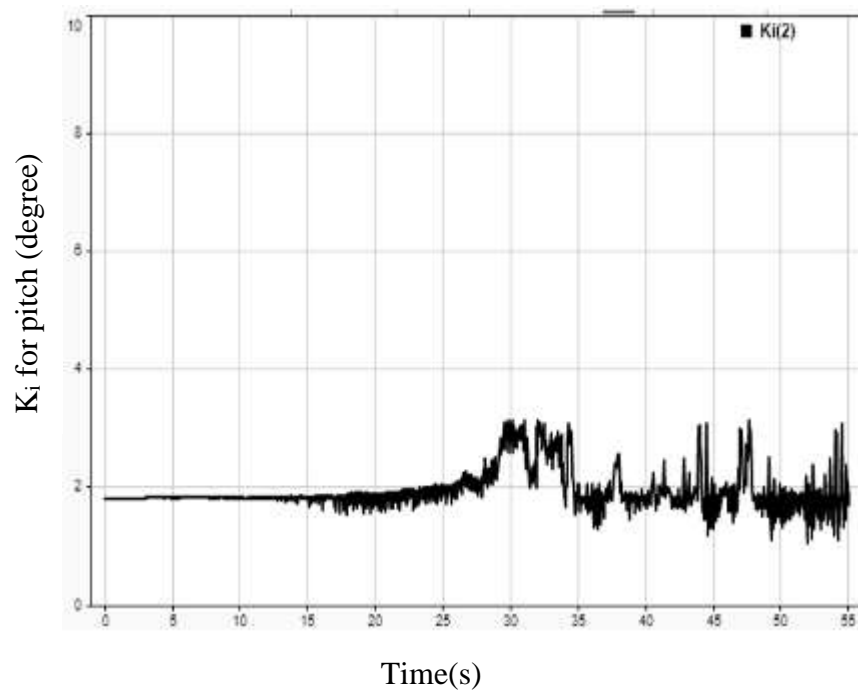
ضرایب کنترل کننده فازی طراحی شده برای زاویه پیچ مطابق شکل های ۵-۴۹، ۵-۵۰ و ۵-۵۱ می باشد.



شکل ۵-۴۹: ضریب تناسبی کنترل کننده فازی زاویه پیچ

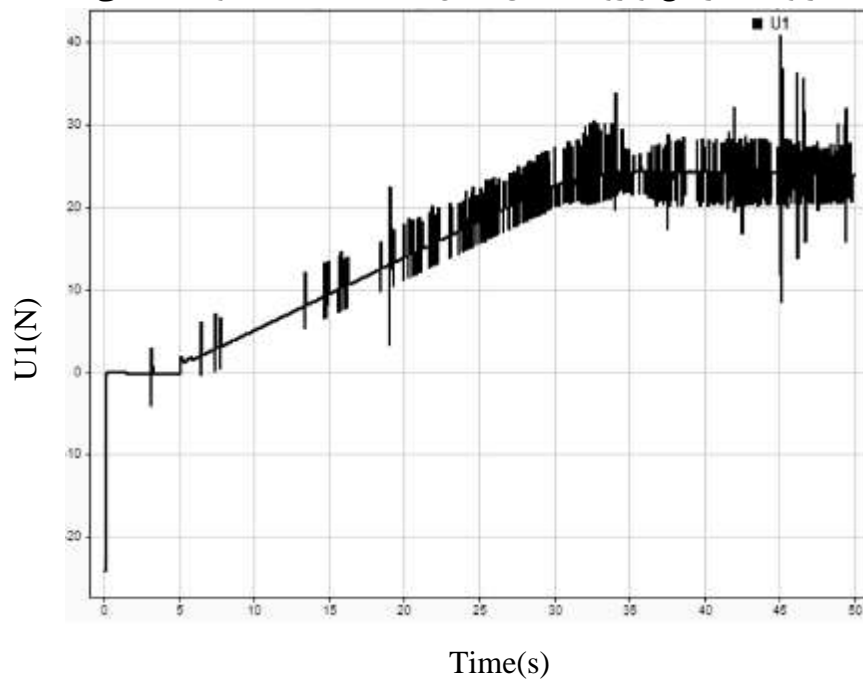


شکل ۵-۵۰: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فازی زاویه پیچ

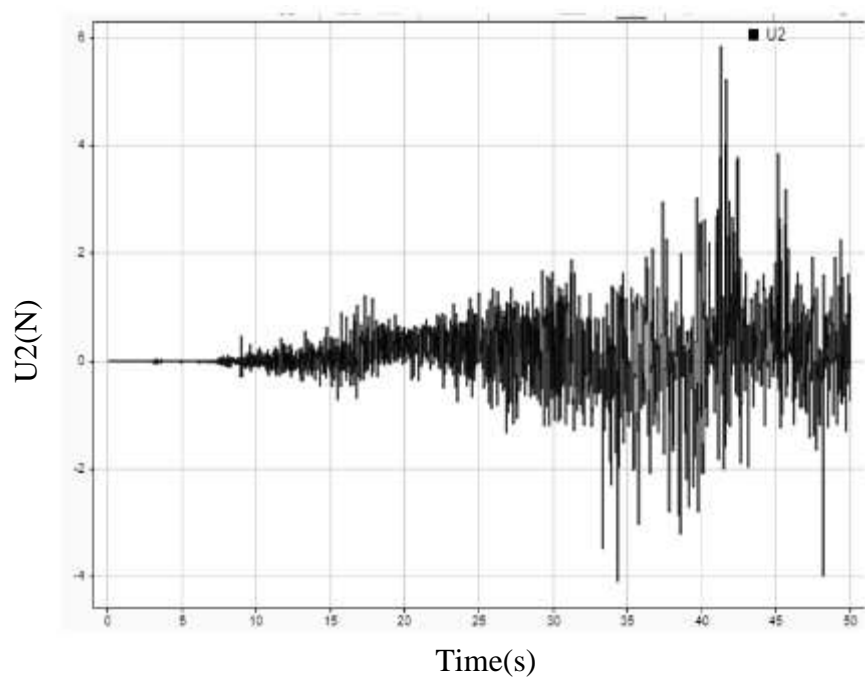


شکل ۵-۵۱: ضریب انتگرال گیر کنترل کننده فازی زاویه پیچ

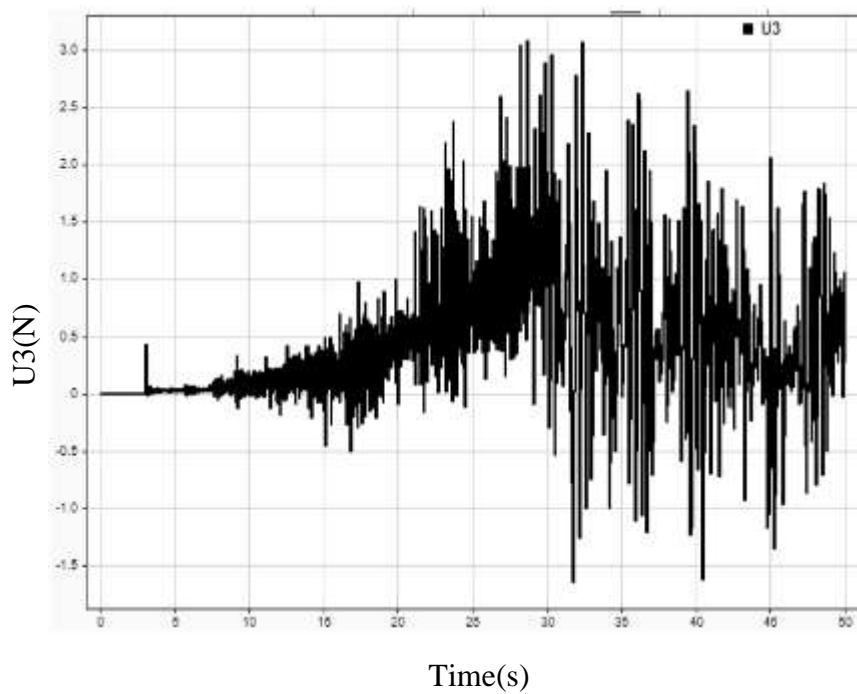
سیگنال کنترلی‌های مربوط به ارتفاع و زوایا مطابق شکل‌های ۵-۵۲، ۵-۵۳ و ۵-۵۴ می‌باشند.



شکل ۵-۵۲: سیگنال کنترلی U_1

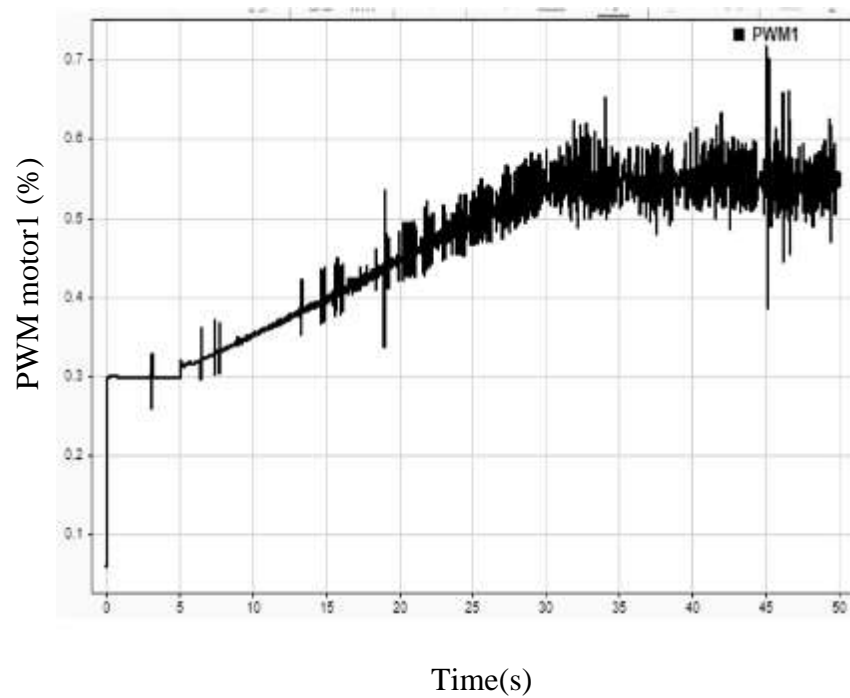


شکل ۵-۵۳: سیگنال کنترلی U_2

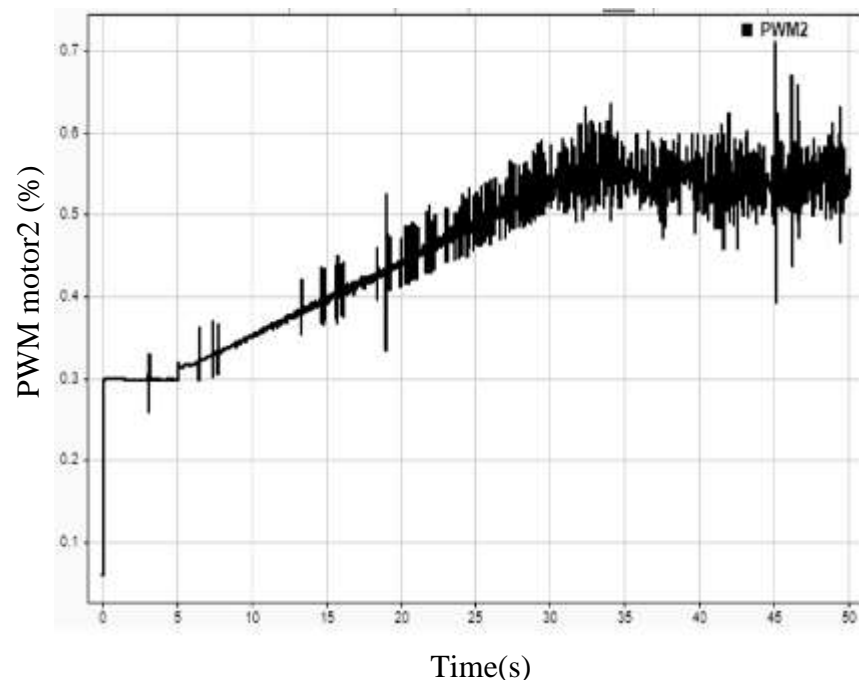


شکل ۵-۵۴: سیگنال کنترلی U_3

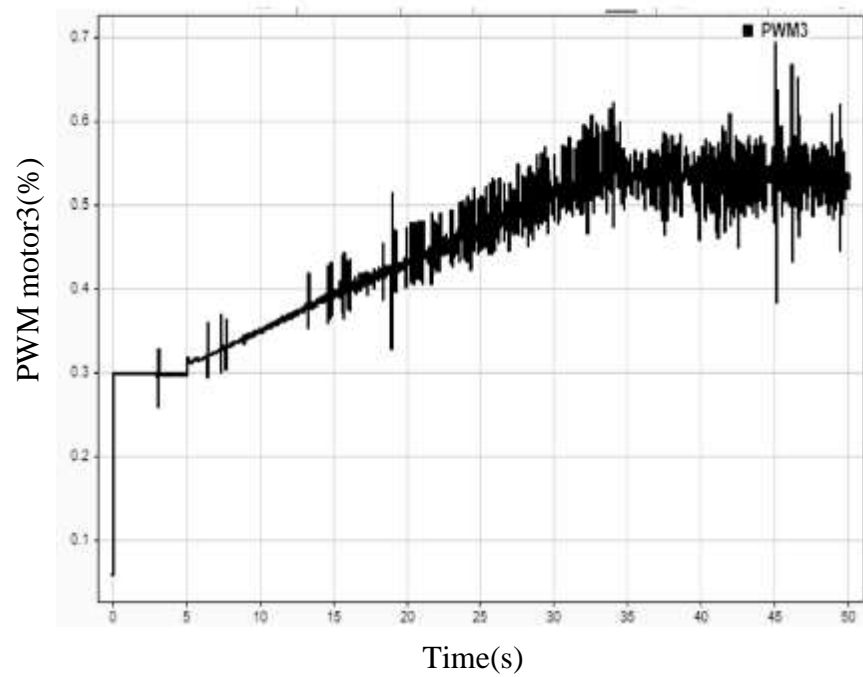
سیگنال مدولاسیون پهنای پالس برای هر موتور در شکل های ۵-۵۵، ۵-۵۶، ۵-۵۷ و ۵-۵۸ نشان داده شده است.



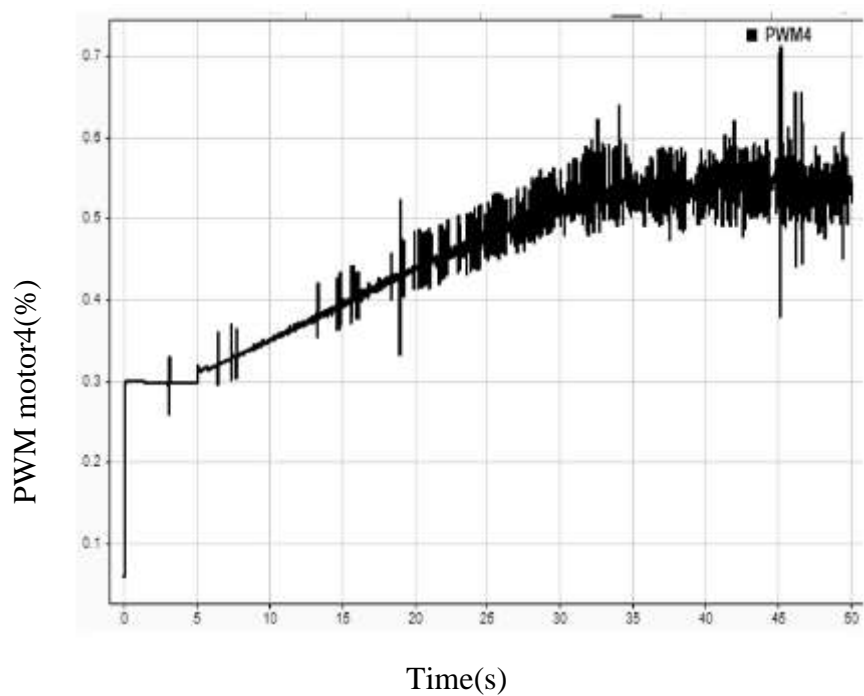
شکل ۵-۵۵: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۱



شکل ۵-۵۶: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۲

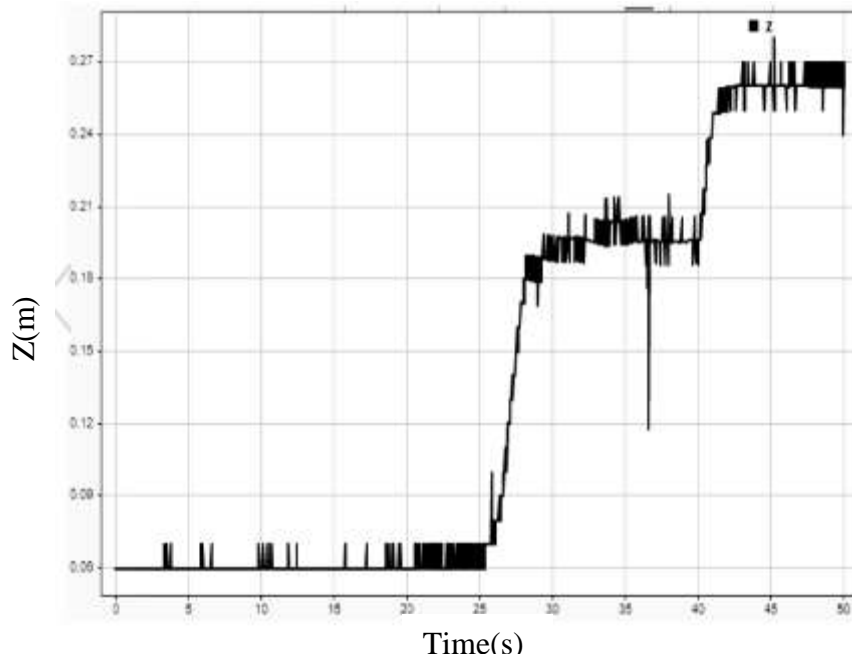


شکل ۵-۵۷: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۳

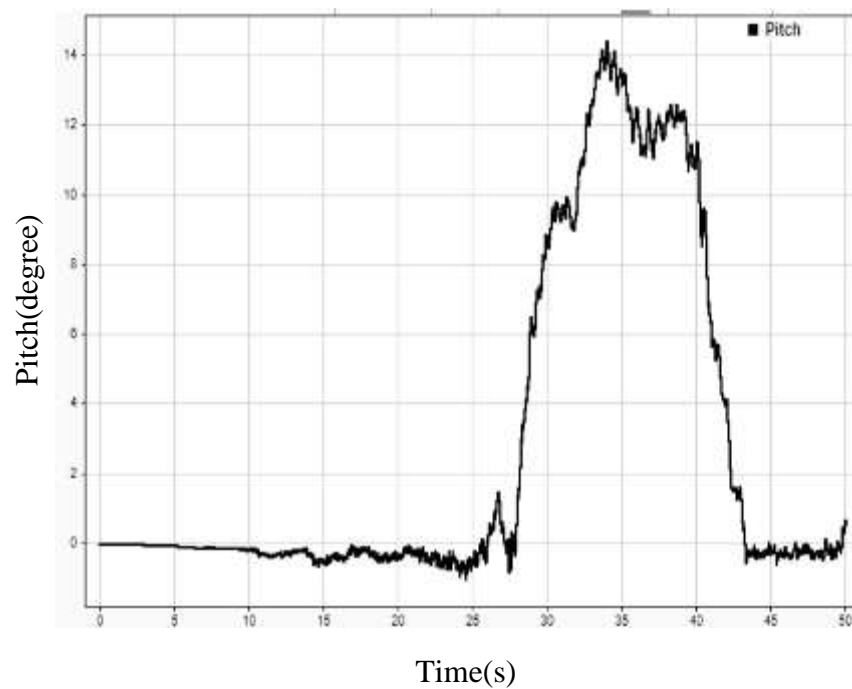


شکل ۵-۵۸: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۴

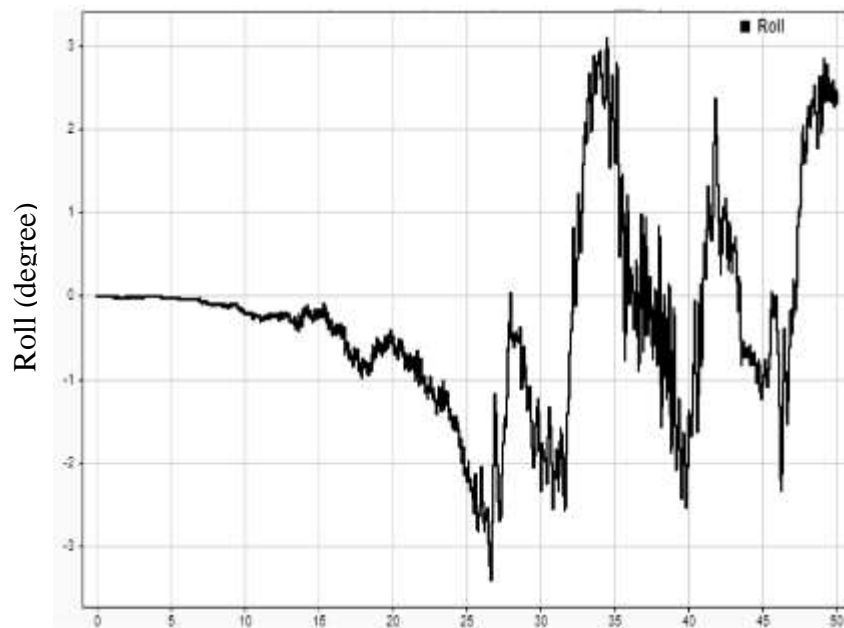
در این قسمت ابتدا چهارپره تا ارتفاع ۲۰ سانتی متر بالا رفته و در آن ارتفاع زاویه ۱۲ درجه را نگه داشته است سپس زاویه را به صفر برگردانده و تا ارتفاع ۳۰ سانتی متر بالا رفته است. ارتفاع و زاویه چهارپره در شکل های ۵-۵۹، ۵-۶۰ و ۵-۶۱ نشان داده شده است.



شکل ۵-۵۹: کنترل ارتفاع چهارپره



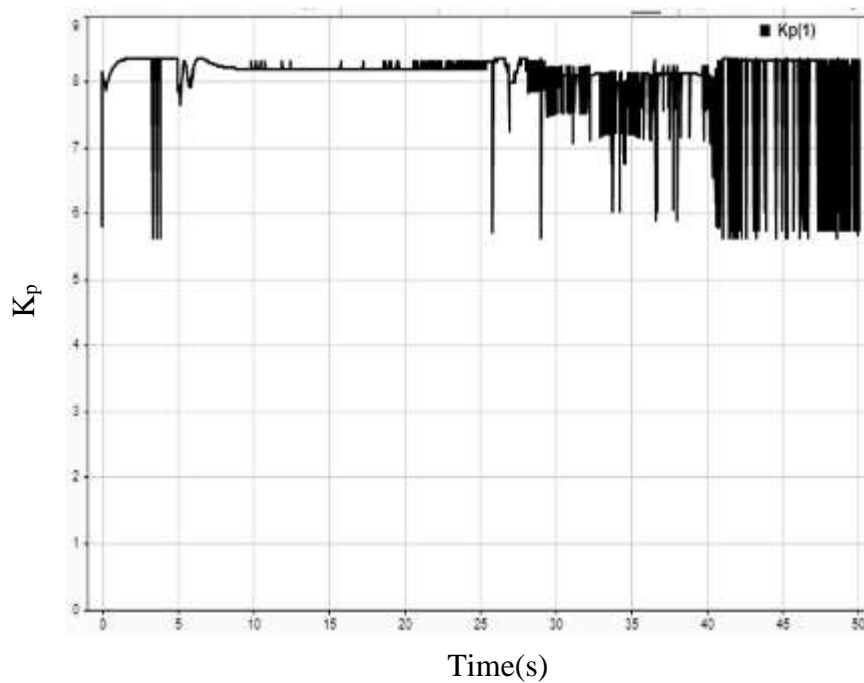
شکل ۵-۶۰: زاویه پیچ چهارپره



شکل ۵-۶۱: زاویه رول چهارپره

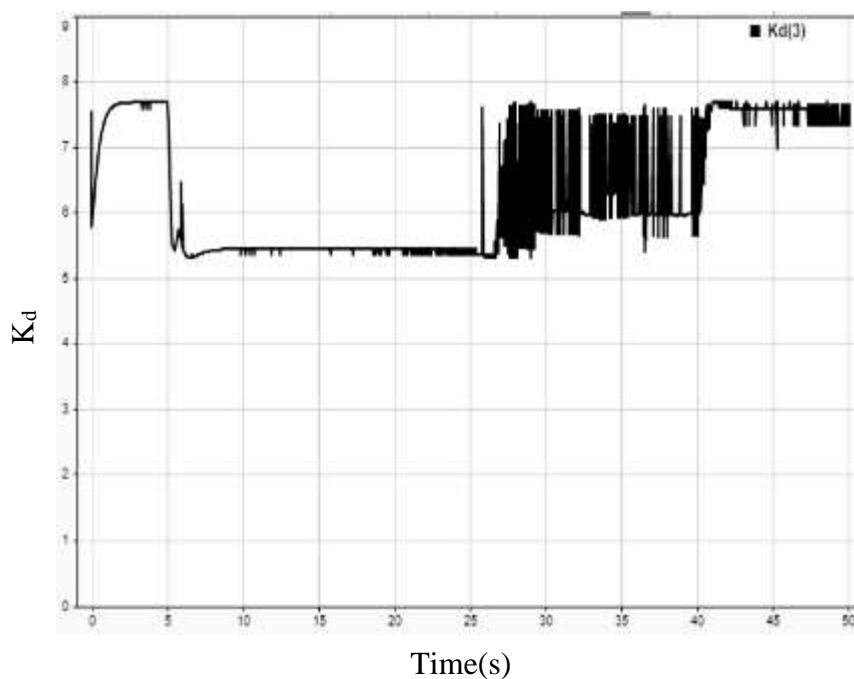
از شکل‌های ۵-۵۹، ۵-۶۰ و ۵-۶۱ نتیجه می‌شود هر سه کنترل‌کننده عملکرد مطلوبی دارد.

در شکل ۵-۶۲ تغییرات ضریب تناسبی کنترل‌کننده PID فازی طراحی شده برای ارتفاع را مشاهده می‌کنید. که مقداری در بازه ۵.۵ – ۸.۵ را شامل می‌شود.



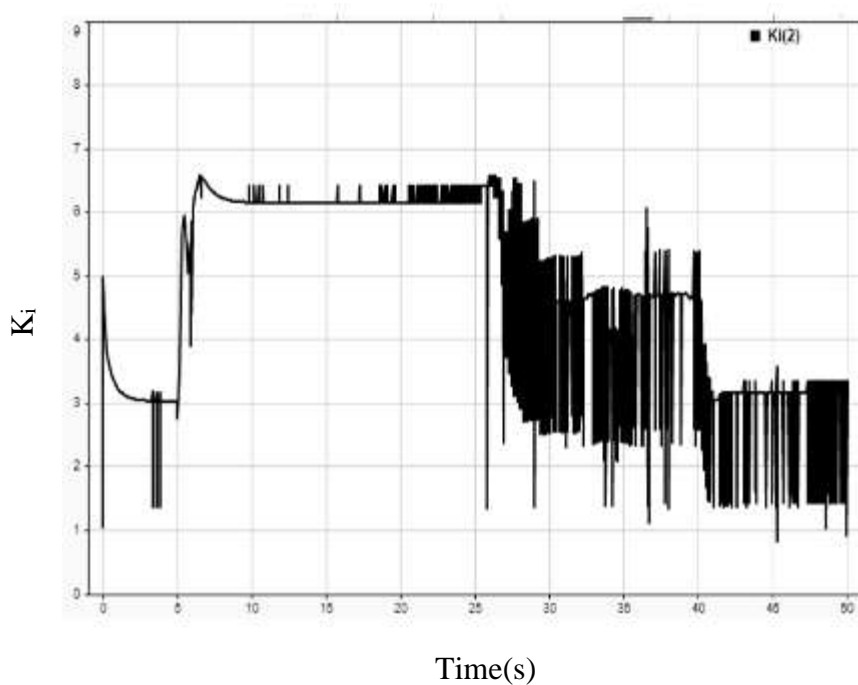
شکل ۵-۶۲: ضریب تناسبی کنترل‌کننده فازی برای ارتفاع

همچنین ضریب مشتق گیر در این کنترل کننده مطابق شکل ۵-۶۳ می باشد.



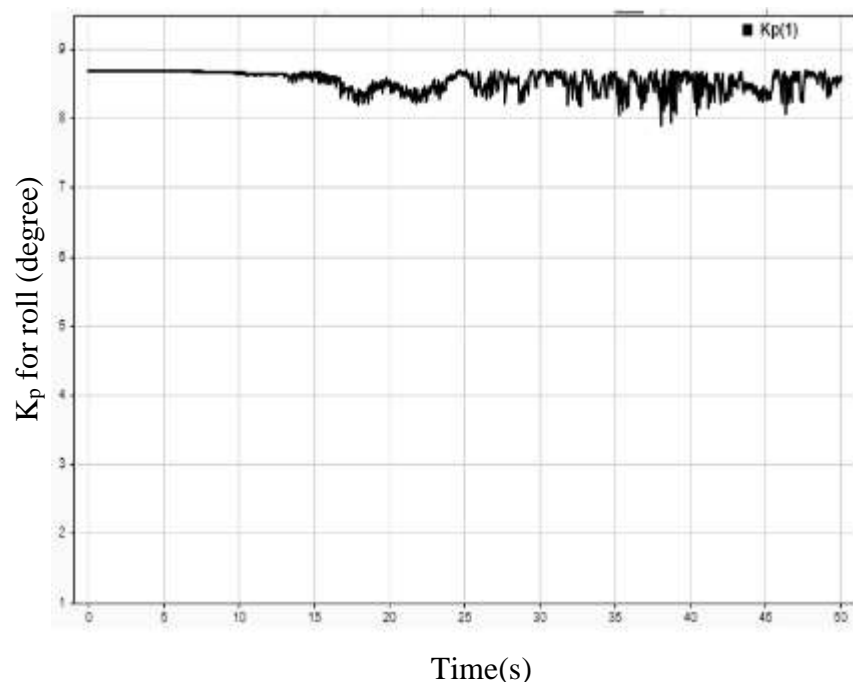
شکل ۵-۶۳: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فازی برای ارتفاع

همچنین ضریب انتگرال گیر این کنترل کننده در شکل ۵-۶۴ نشان داده شده است.

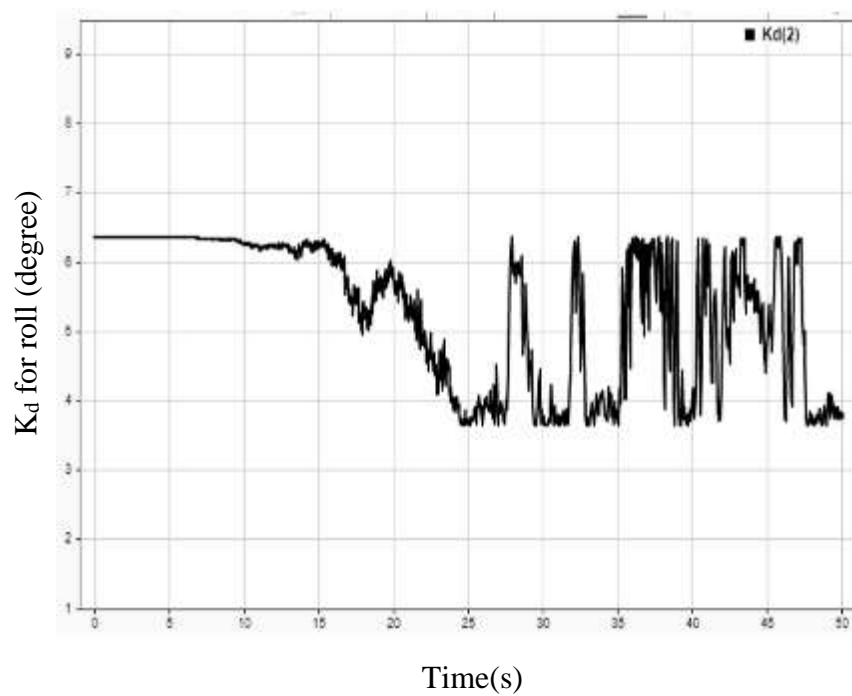


شکل ۵-۶۴: ضریب انتگرال گیر کنترل کننده فازی برای ارتفاع

ضرایب کنترل کننده فازی طراحی شده برای زاویه رول مطابق شکل های ۵-۶۵ و ۵-۶۶ می باشد.

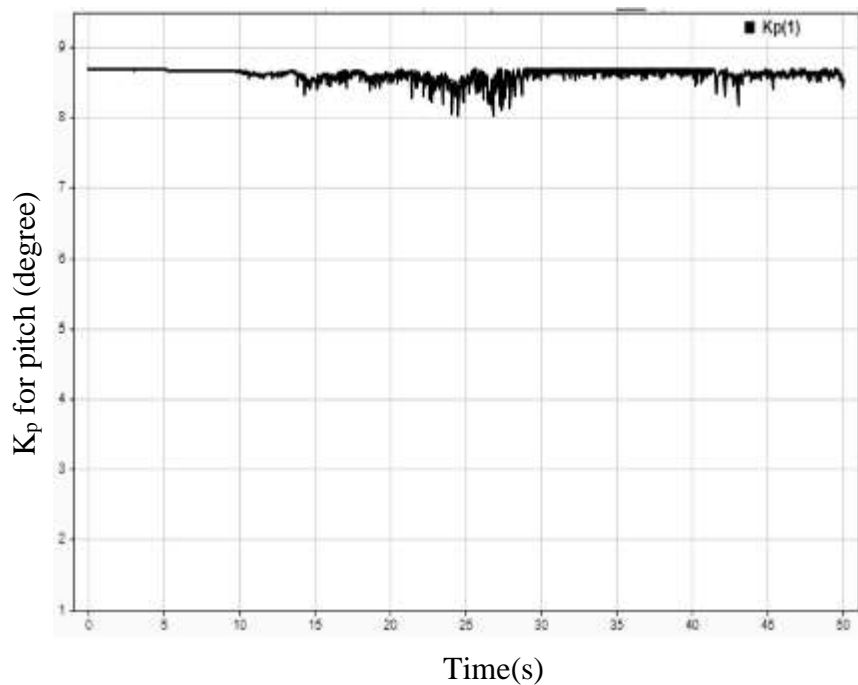


شکل ۵-۶۵: ضریب تناسبی کنترل کننده فاز ی زاویه رول

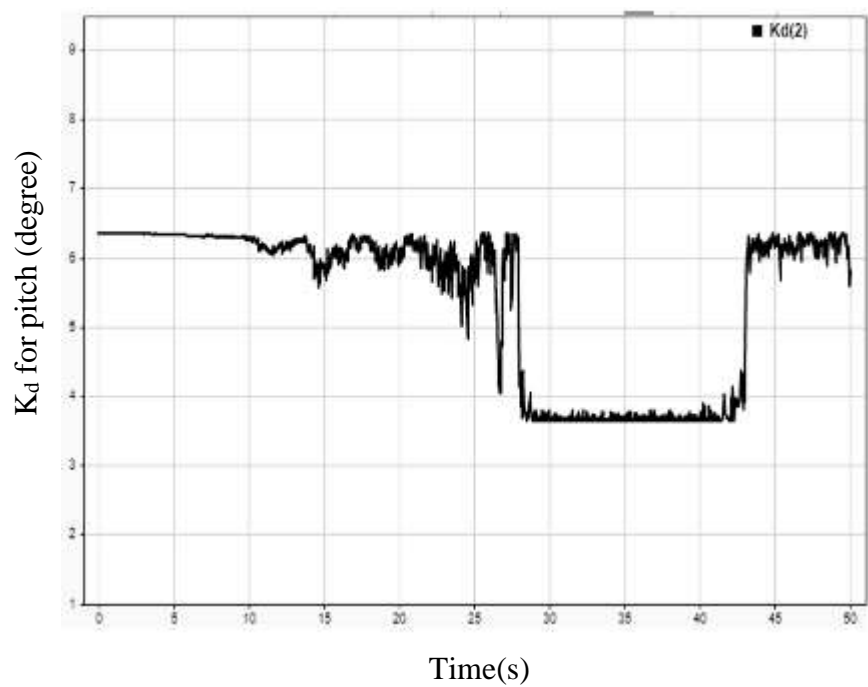


شکل ۵-۶۶: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فاز ی زاویه رول

ضرایب کنترل کننده فازی طراحی شده برای زاویه پیچ مطابق شکل‌های ۶۷-۵ و ۶۸-۵ می باشد.

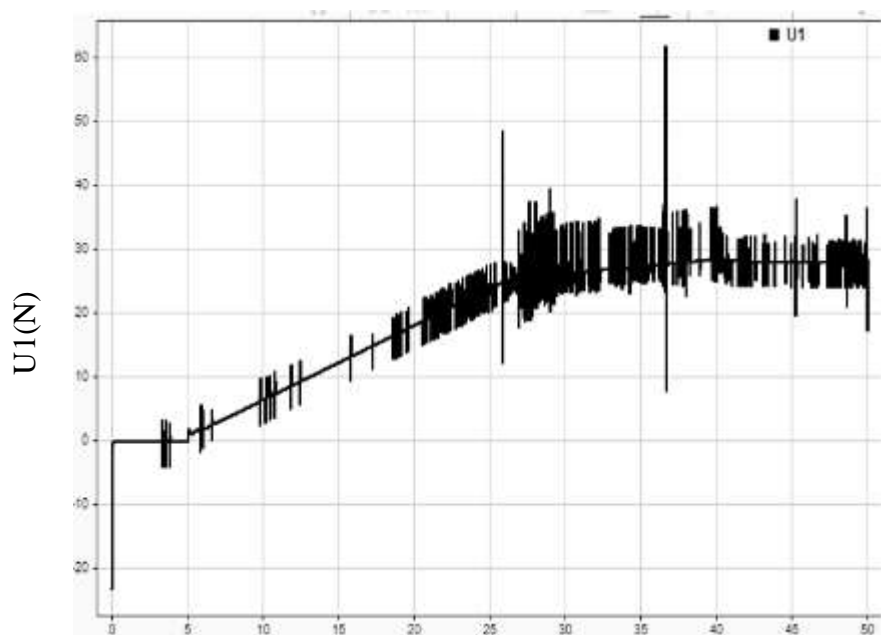


شکل ۶۷-۵: ضریب تناسبی کنترل کننده فازی زاویه پیچ

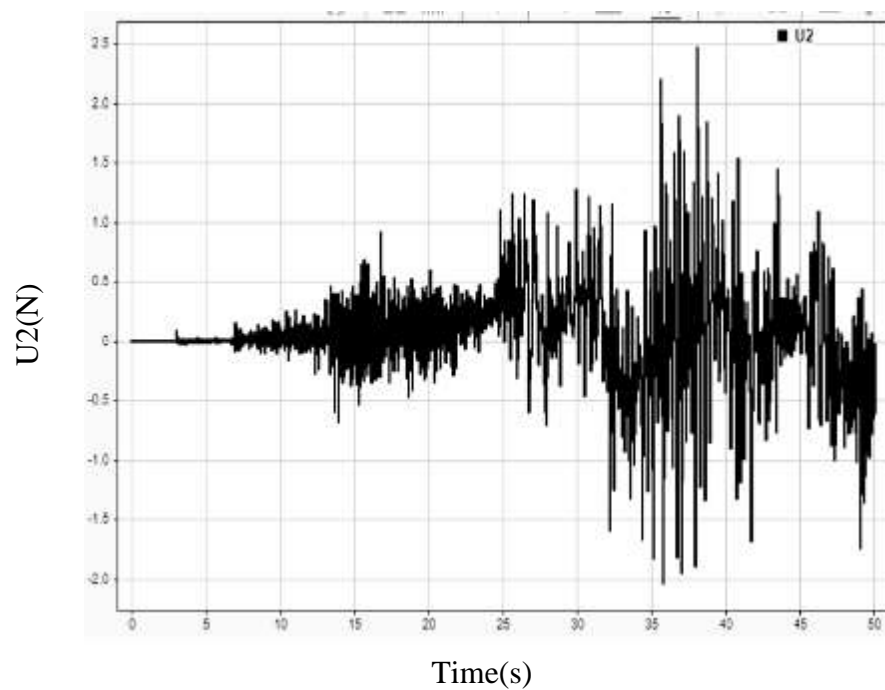


شکل ۶۸-۵: ضریب مشتق گیر کنترل کننده فازی زاویه پیچ

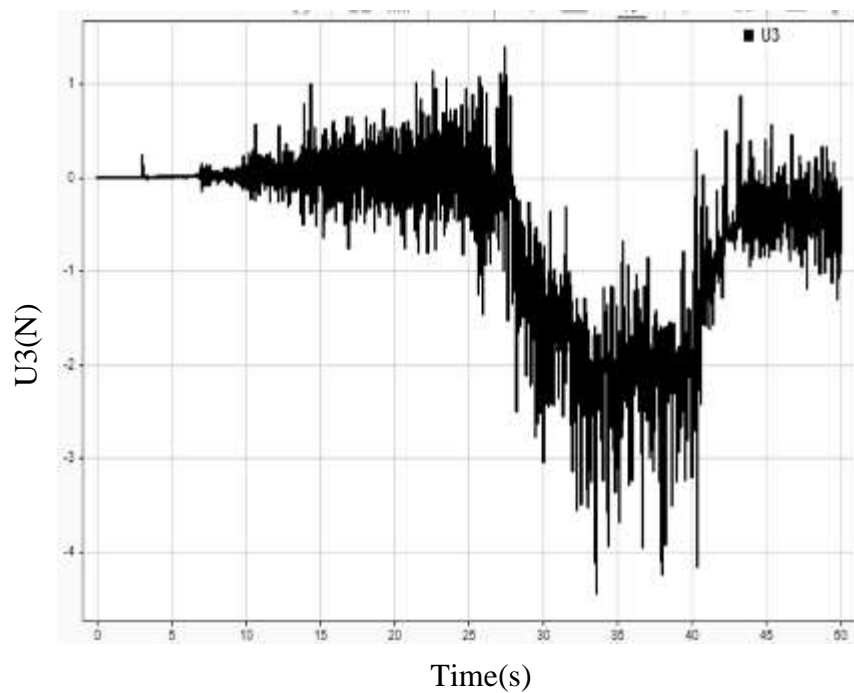
سیگنال کنترلی‌های مربوط به ارتفاع و زوایا مطابق شکل‌های ۵-۶۹ و ۵-۷۱ می‌باشند.



شکل ۵-۶۹: سیگنال کنترلی $U1$

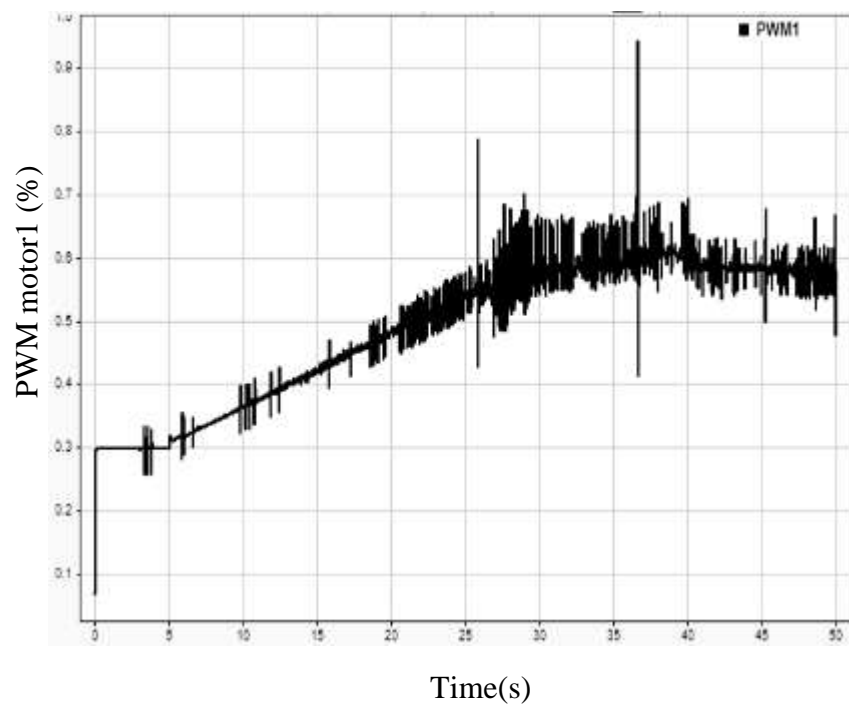


شکل ۵-۷۰: سیگنال کنترلی $U2$

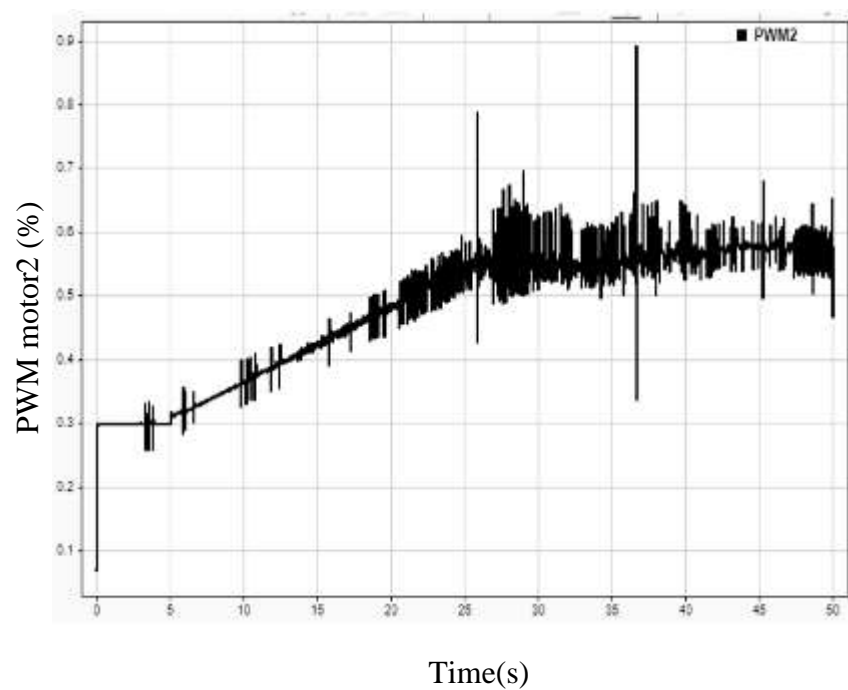


شکل ۵-۷۱: سیگنال کنترلی U_3

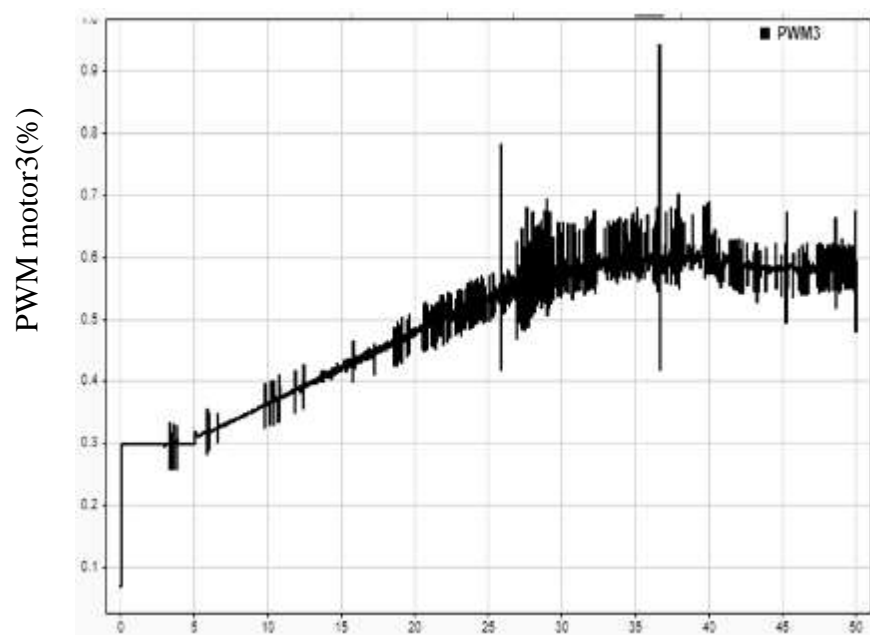
سیگنال مدولاسیون پهنای پالس برای هر موتور در شکل‌های ۵-۷۲، ۵-۷۳، ۵-۷۴ و ۵-۷۵ نشان داده شده است.



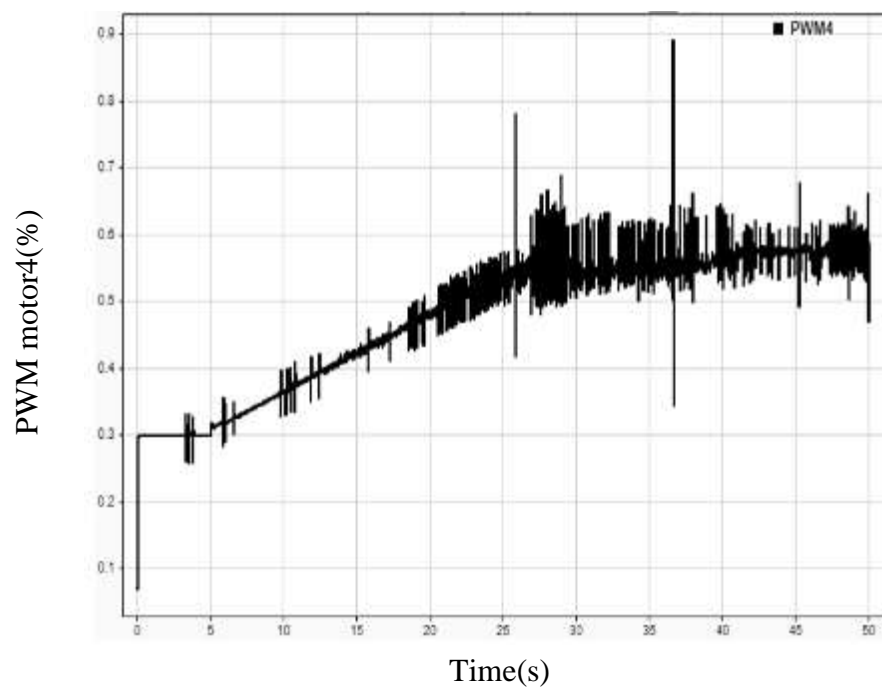
شکل ۵-۷۲: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۱



شکل ۵-۷۳: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۲



شکل ۵-۷۴: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۳



شکل ۵-۷۵: سیگنال مدولاسیون پهنای پالس موتور ۴

فصل ۶: جمع‌بندی و پیشنهادات

۶-۱- چالش‌ها و مشکلات

ساخت این چهارپره با مشکلاتی همراه بوده است که در ادامه به آنها می‌پردازیم. موتورهای استفاده شده در این سیستم دارای ولتاژ ۱۴.۸ ولت هستند و جریان بالایی نیاز دارند. به همین دلیل باتری‌های معمولی پاسخگو نیاز سیستم نمی‌باشند و باید از باتری‌های لیتیوم پلیمر استفاده کرد. این باتری‌ها عمر کوتاه و قیمت نسبتاً زیادی دارند به همین دلیل استفاده از آنها موجب افزایش هزینه‌ها می‌شود.

هم‌چنین حسگرهای استفاده شده دقت بسیار کمی دارند و نویز بسیار زیادی می‌گیرند. بنابراین برای به‌دست آوردن زوایای دقیق نیاز به استفاده از الگوریتم و فیلترهای پیچیده همانند فیلتر کالمن وجود دارد. در صورت عدم استفاده از این فیلترها باید حسگرهایی با دقت بیشتر خریداری شوند که این حسگرها قیمت بسیار بالایی دارند.

۶-۲- جمع‌بندی و پیشنهادات

در این فصل نتایج عملکرد چهارپره ساخته شده، مشاهده شد. در ابتدا زاویه‌های سیستم با کنترل کننده فازی PD سپس با استفاده از کنترل کننده فازی PID کنترل شد. مشاهده کردیم در صورت استفاده از کنترل کننده PD فازی برای زاویه‌ها عملکرد بهتری حاصل می‌شود. برای کنترل ارتفاع نیز مشاهده کردیم که کنترل کننده فازی به دلیل تنظیم ضرایب در هر لحظه عملکرد بهتری دارد.

چهارپره ساخته شده در عمل پرواز موفق داشت. در راستای بهبود ربات ساخته شده، پیشنهادات زیر مطرح می‌شوند.

باتوجه به اینکه پارامترهای سیستم (مثل ولتاژ باتری که اثر قابل توجهی روی پاسخ موتورها دارد) در حین پرواز تغییر می‌کند، پیشنهاد می‌شود که برای کنترل این ربات از کنترل کننده‌های تطبیقی استفاده شود.

در نظریات تئوری ممکن است از برخی از عوامل صرف نظر شده باشد که در عمل قابل چشم‌پوشی نباشد، بنابراین بهتر است باتوجه به واقعیت روابطی که از آنها نظریه‌ها به‌دست آمده را اصلاح کنیم.

برای پرواز چهارپره کالیبراسیون دقیق حسگراینرسی نیاز است بنابراین پیشنهاد می‌شود که با میز سه درجه آزادی حسگرها به‌طور دقیق کالیبره‌شوند یا اینکه از حسگرهای کنترل وضعیت بهتری برای کنترل چهارپره استفاده‌شود.

اثر پره در تولید نیرو پیشران بسیار مؤثر است. پیشنهاد می‌شود که پره‌های متفاوت آزمایش‌شده و بهینه‌ترین پره انتخاب‌شود.

مراجع

- [1] <https://www.charkhdande.com/what-is-a-quadcopter>, 2022.
- [2] <https://www.jahanrc.com/blog/usage-drone>, 2022.
- [۳] م.کیا، «طراحی، شبیه‌سازی و ساخت ربات پرنده کوادکوپتر»، پایان‌نامه کارشناسی، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی برق، تهران، ایران، ۱۳۹۱.
- [4] <https://www.modeliran.com/products>, 2022.
- [۵] م.محمدی، «مدلسازی، شناسایی سیستم و کنترل تطبیقی کوادروتور»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی برق، تهران، ایران، ۱۳۹۰.
- [6] K. Benzaid, N. Mansouri and O. Labbani-Igbida, "Robust trajectory tracking control of a quadrotor UAV," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Systems and Control*, Algiers, Algeria, 2013.
- [7] E. Okyere¹, A. Bousbaine¹, G. T. Poyi¹, A. K. Joseph¹, J. M. Andrade, "LQR controller design for quad-rotor helicopters," *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 17, pp. 4003-4007, 2019.
- [8] <https://microcontrollerslab.com/pid-controller-implementation-using-arduino>, 2022.
- [9] L. X. Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice Hall, New Jercy, USA, 1997.
- [10] B. J. Njinwoua and A. V. Wouwer, "Cascade attitude control of a quadcopter in presence of motor asymmetry," *IFAC-Papers Online*, vol. 51, no. 4, pp. 113-118, 2018.
- [۱۱] ا.ملکوتی خواه، «ناوبری ربات‌های همکار چرخ‌دار زمینی در انبارهای خودگردان به کمک یادگیری تقویتی و فیلتر کالمن»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی برق، تهران، ایران، ۱۴۰۰.
- [12] A. Astudillo, P. Munoz, F. Alvarez and E. Rosero, "Altitude and attitude cascade controller for a smartphone-based quadcopter," *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, Miami, FL, USA, 2017.