



دانشگاه صنعتی شریف  
دانشکده مهندسی هوافضا

پروژه کارشناسی  
مهندسی کنترل

عنوان:

کنترل وضعیت سه درجه آزادی استند چهارپره به روش  
کنترل کننده مربعی خطی مبتنی بر بازی دیفرانسیلی

نگارش:

علی بنی اسد

استاد راهنما:

دکتر نوبهاری

۱۴۰۱ تیر

اللهُ أَكْبَرُ

## سپاس

از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر نوبهاری که با کمک‌ها و راهنمایی‌های بی‌دriegشان، بنده را در انجام این پروژه یاری داده‌اند، تشکر و قدردانی می‌کنم.

## چکیده

در این پژوهش از یک روش مبتنی بر تئوری بازی<sup>۱</sup> استفاده شده است. در این روش سیستم و اغتشاش دو بازیکن اصلی در نظر گرفته شده است. هر یک از دو بازیکن سعی می‌کنند امتیاز خود را با کمترین هزینه افزایش دهند که در اینجا، وضعیت استند امتیاز بازیکن‌ها در نظر گرفته شده است. در این روش انتخاب حرکت با استفاده از تعادل نش<sup>۲</sup> که هدف آن کم کردن تابع هزینه با فرض بدترین حرکت دیگر بازیکن است، انجام می‌شود. این روش نسبت به اغتشاش ورودی مقاوم است. همچنین نسبت به عدم قطعیت مدلسازی مقاومت مناسبی دارد. از روش ارائه شده برای کنترل یک استند سه درجه آزادی چهارپره که به نوعی یک آونگ معکوس نیز هست، استفاده شده است. برای ارزیابی عملکرد این روش ابتدا شبیه‌سازی‌هایی در محیط سیمولینک انجام شده است و سپس، با پیاده‌سازی آن صحت عملکرد آن تایید شده است.

**کلیدواژه‌ها:** چهارپره، بازی دیفرانسیلی، تئوری بازی، تعادل نش، استند سه درجه آزادی، مدل‌بنا، تنظیم‌کننده مربعی خطی

---

<sup>1</sup>Game Theory

<sup>2</sup>Nash Equilibrium

# فهرست مطالب

۱	.....	۱-۰ خطی‌سازی
۱	.....	۱-۱-۰ فرم خطی فضای حالت چهارپره
۴	.....	۲-۱-۰ فرم خطی فضای حالت کانال‌های چهارپره
۸	.....	۱ شبیه‌سازی در محیط سیمولینک
۸	.....	۱-۱ طراحی مبتنی بر مدل
۹	.....	۲-۱ شبیه‌سازی استند سه درجه آزادی در محیط سیمولینک
۱۱	.....	۳-۱ شبیه‌سازی کانال‌های مختلف استند سه درجه آزادی در محیط سیمولینک
۱۱	.....	۱-۳-۱ شبیه سازی کانال رول در محیط سیمولینک
۱۳	.....	۲-۳-۱ شبیه سازی کانال پیچ در محیط سیمولینک
۱۵	.....	۳-۳-۱ شبیه سازی کانال یاو در محیط سیمولینک
۱۶	.....	۴-۳-۱ شبیه سازی کانال رول-پیچ در محیط سیمولینک
۱۸	.....	۴-۱ اصلاح پارامترهای استند چهارپره در شبیه‌سازی حلقه باز
۱۹	.....	۱-۴-۱ تخمین پارامترهای کانال رول موتور خاموش
۱۹	.....	۲-۴-۱ تخمین پارامترهای کانال رول
۲۰	.....	۳-۴-۱ تخمین پارامترهای کانال پیچ موتور خاموش
۲۱	.....	۴-۴-۱ تخمین پارامترهای کانال پیچ

۲۲	.....	۵-۴-۱	تخمین پارامتر کanal یاو
۲۳	.....	۶-۴-۱	تخمین پارامتر کanal های رول-پیچ
۲۴	.....	۷-۴-۱	تخمین پارامتر کanal های رول-پیچ-یاو
۲۵	.....	۵-۱	شبیه‌سازی استند سه درجه آزادی در حضور کنترل کننده
۲۶	..... LQR	۱-۵-۱	شبیه‌سازی کanal رول استند سه درجه آزادی در حضور کنترل کننده
۲۶	..... LQDG	۲-۵-۱	شبیه‌سازی کanal رول استند در حضور کنترل کننده
۲۷	..... LQIDG	۳-۵-۱	شبیه‌سازی کanal رول استند در حضور کنترل کننده
۲۸	..... LQIDG	۴-۵-۱	شبیه‌سازی کanal رول-پیچ استند در حضور کنترل کننده
۳۰	..... LQIDG	۵-۵-۱	شبیه‌سازی سه درجه آزادی استند در حضور کنترل کننده
۳۱	.....	۶-۱	پیاده‌سازی کنترل کننده بر رویه استند سه درجه آزادی
۳۲	..... LQR	۱-۶-۱	پیاده‌سازی کنترل کننده LQR بر رویه کanal پیچ
۳۳	..... LQDG	۲-۶-۱	شبیه‌سازی کanal رول استند در حضور کنترل کننده
۳۴	..... LQIDG	۳-۶-۱	شبیه‌سازی کanal رول استند در حضور کنترل کننده
۳۵	..... LQIDG	۴-۶-۱	شبیه‌سازی کanal رول-پیچ استند در حضور کنترل کننده
۳۶	..... LQIDG	۵-۶-۱	شبیه‌سازی سه درجه آزادی استند در حضور کنترل کننده

# فهرست شکل‌ها

۹	.....	۱-۱ دیاگرام V [۱۵]
۱۰	۱-۲ مدل استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌های مدل	
۱۰	۱-۳ مدل استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌های مدل	
۱۱	۴-۱ نمایی از داخل بلوک Quad System	
۱۲	۵-۱ مدل کanal رول استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌ها	
۱۲	۶-۱ مدل کanal رول استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌ها	
۱۳	۷-۱ نمایی از داخل بلوک Quad System	
۱۳	۸-۱ مدل کanal رول استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌ها	
۱۴	۹-۱ مدل کanal رول استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌ها	
۱۴	۱۰-۱ نمایی از داخل بلوک Quad System	
۱۵	۱۱-۱ مدل کanal رول استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌ها	
۱۵	۱۲-۱ مدل کanal یاو استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌ها	
۱۶	۱۳-۱ نمایی از داخل بلوک Quad System	
۱۶	۱۴-۱ مدل کanal رول-پیچ استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌ها	
۱۶	۱۵-۱ مدل کanal رول-پیچ استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌ها	
۱۷	۱۷-۱	

۱۷	نمایی از داخل بلوک Quad System	۱۶-۱
۱۸	نماد جعبه‌ابزار Parameter Estimator در سیمولینک	۱۷-۱
۱۸	جعبه‌ابزار Parameter Estimator	۱۸-۱
۱۹	مقایسه وضعیت استند در آزمایش دوم و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال رول موتور خاموش	۱۹-۱
۲۰	مقایسه وضعیت استند در آزمایش چهارم و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال رول	۲۰-۱
۲۱	مقایسه وضعیت استند در آزمایش اول و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال پیچ موتور خاموش	۲۱-۱
۲۲	مقایسه وضعیت استند در آزمایش اول و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال پیچ	۲۲-۱
۲۲	مقایسه وضعیت استند در آزمایش دوم و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال یا و	۲۳-۱
۲۴	مقایسه وضعیت استند در آزمایش چهارم و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال رول-پیچ	۲۴-۱
۲۵	مقایسه وضعیت استند در آزمایش چهارم و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال رول-پیچ-یا و	۲۵-۱
۲۶	عملکرد LQR در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)	۲۶-۱
۲۷	عملکرد LQDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)	۲۷-۱
۲۸	عملکرد LQIDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)	۲۸-۱
۲۹	عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)	۲۹-۱
۲۹	فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)	۳۰-۱
۳۰	عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)	۳۱-۱
۳۱	فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)	۳۲-۱
۳۲	عملکرد LQR در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)	۳۳-۱
۳۲	فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)	۳۴-۱

۳۳	۳۵-۱ عملکرد LQDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)
۳۴	۳۶-۱ فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)
۳۴	۳۷-۱ عملکرد LQIDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)
۳۴	۳۸-۱ فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)
۳۵	۳۹-۱ عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)
۳۶	۴۰-۱ فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)
۳۷	۴۱-۱ عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)
۳۸	۴۲-۱ فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)

# فهرست جداول

## ۱-۰ خطی‌سازی

در این قسمت، با استفاده از فرم فضای حالت استخراج شده در بخش ۲-۱-۰ ابتدا صورت کلی فرم فضای حالت چهارپره محاسبه شده است. سپس، در بخش ۲-۱-۰ فرم فضای حالت برای هر کanal به صورت جداگانه بیان شده است.

## ۱-۱-۰ فرم خطی فضای حالت چهارپره

در این قسمت با توجه به معادلات فضای حالت بدست آمده، چهارپره حول نقطه کار خطی‌سازی می‌شود. به این منظور، نقطه کار به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$\boldsymbol{x}^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\omega}^* = \begin{bmatrix} 2000 & 2000 & 2000 & 2000 \end{bmatrix}^T \text{RPM} \quad (2)$$

که  $\boldsymbol{x}^*$  بردار حالت تعادلی و  $\boldsymbol{\omega}^*$  بردار ورودی حالت تعادلی است. برای خطی‌سازی از بسط تیلور استفاده شده است.

$$\delta \dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A} \delta \boldsymbol{x} + \boldsymbol{B} \delta \boldsymbol{\omega} \quad (3)$$

: که

$$A = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x^*} \quad (4)$$

$$B = \left. \frac{\partial f}{\partial \omega} \right|_{\omega^*} \quad (5)$$

ماتریس‌های  $A$  و  $B$  مطابق روابط (۶) تا (۱۳) محاسبه می‌شوند.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1} & \frac{\partial f}{\partial x_2} & \frac{\partial f}{\partial x_3} & \frac{\partial f}{\partial x_4} & \frac{\partial f}{\partial x_5} & \frac{\partial f}{\partial x_6} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} = \begin{bmatrix} x_5 \cos(x_1) \tan(x_2) - x_6 \sin(x_1) \tan(x_2) \\ -x_6 \cos(x_1) - x_5 \sin(x_1) \\ \frac{x_5 \cos(x_1) - x_6 \sin(x_1)}{\cos(x_2)} \\ A_1 \cos(x_1) \cos(x_2) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_2} = \begin{bmatrix} \frac{x_6 \cos(x_1)}{\cos(x_2)^2} + \frac{x_5 \sin(x_1)}{\cos(x_2)^2} \\ 0 \\ \frac{\tan(x_2) (x_6 \cos(x_1) + x_5 \sin(x_1))}{\cos(x_2)} \\ -A_2 \sin(x_1) \sin(x_2) \\ B_1 \cos(x_2) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_3} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x_4} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ B_2 x_6 + B_4 (\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4) \\ C_1 x_5 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x_5} = \begin{bmatrix} \sin(x_1) \tan(x_2) \\ \cos(x_1) \\ \frac{\sin(x_1)}{\cos(x_2)} \\ A_2 x_6 + A_4 (\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4) \\ 0 \\ C_1 x_4 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x_6} = \begin{bmatrix} \cos(x_1) \tan(x_2) \\ -\sin(x_1) \\ \frac{\cos(x_1)}{\cos(x_2)} \\ 0 \\ B_2 x_4 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_4 x_5 & 2 A_3 \omega_2 - A_4 x_5 & A_4 x_5 & -2 A_3 \omega_4 - A_4 x_5 \\ 2 B_3 \omega_1 + B_4 x_4 & -B_4 x_4 & B_4 x_4 - 2 B_3 \omega_3 & -B_4 x_4 \\ 2 C_2 \omega_1 & -2 C_2 \omega_2 & 2 C_2 \omega_3 & -2 C_2 \omega_4 \end{bmatrix} \quad (13)$$

## ۲-۱-۰ فرم خطی فضای حالت کانال‌های چهارپره

در این قسمت، با توجه به فضای حالت بدست آمده در بخش ۹، چهارپره حول نقطه کار خطی‌سازی می‌شود. برای ساده‌سازی، ورودی مسئله را از سرعت دورانی به نیروهای تاثیرگذار در مودهای رول، پیچ و یا و تغیر داده شده‌است. این کار باعث می‌شود که مسئله از چند ورودی و چند خروجی به سه مسئله یک ورودی و یک خروجی تبدیل شود. نیروها به فرم رابطه (۱۴) تعریف می‌شوند.

$$u_1 = \omega_2^2 - \omega_4^2, \quad u_2 = \omega_1^2 - \omega_3^2, \quad u_3 = \omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2 \quad (14)$$

با توجه به اینکه سه نیرو در نظر گرفته شده و مسئله نیاز به چهار خروجی (سرعت دورانی موتورها) دارد یک نیروی دیگر نیز در نظر گرفته می‌شود که به فرم رابطه (۱۵) است و مقدار آن به صورت ثابت و برابر با سرعت دورانی تمام پره‌ها در دور نامی یعنی  $3 RPM^{3}$  در نظر گرفته شده‌است.

$$u_4 = \omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2 \quad (15)$$

در ادامه روابط (۱۴) و (۱۵) را در فضای حالت سیستم جایگزین می‌کنیم و برای سادگی قسمت‌های  $(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4)$  را از معادلات حذف می‌کنیم:

فضای حالت جدید:

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} x_4 + x_5 \sin(x_1) \tan(x_2) + x_6 \cos(x_1) \tan(x_2) \\ x_5 \cos(x_1) - x_6 \sin(x_1) \\ (x_5 \sin(x_1) + x_6 \cos(x_1)) \sec(x_2) \\ A_1 \cos(x_2) \sin(x_1) + A_2 x_5 x_6 + A_3 u_1 \\ B_1 \sin(x_2) + B_2 x_4 x_6 + B_3 u_2 \\ C_1 x_4 x_5 + C_2 u_3 \end{bmatrix} \quad (16)$$

بردار ورودی جدید به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\mathbf{u} = [u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4]^T \quad (17)$$

<sup>3</sup>Revolutions Per Minute

برای خطی سازی از بسط تیلور استفاده شده است.

$$\delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \delta \mathbf{u} \quad (18)$$

$$\mathbf{x}^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (19)$$

$$\mathbf{u}^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 4 \times 2000^2 \end{bmatrix}^T \quad (20)$$

$$\mathbf{A} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}^*} \quad (21)$$

$$\mathbf{B} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{u}^*} \quad (22)$$

روابط بالا به فرم چند سیستم یک ورودی و چند خروجی نوشته شده است. آن را به یک ورودی و یک خروجی تبدیل می‌کنیم.

## مود رول

$$\mathbf{A}_{roll} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ A_1 \cos(x_1) & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\mathbf{B}_{roll} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} \\ \frac{\partial f_4}{\partial u_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ A_3 \end{bmatrix} \quad (24)$$

مود پیچ

$$\mathbf{A}_{pitch} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_5}{\partial x_2} & \frac{\partial f_5}{\partial x_5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ B_1 \cos(x_1) & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\mathbf{B}_{pitch} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_2}{\partial u_2} \\ \frac{\partial f_5}{\partial u_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_3 \end{bmatrix} \quad (26)$$

مود یا و

$$\mathbf{A}_{yaw} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_6}{\partial x_3} & \frac{\partial f_6}{\partial x_6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{B}_{yaw} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_3}{\partial u_3} \\ \frac{\partial f_6}{\partial u_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ C_2 \end{bmatrix} \quad (28)$$

استخراج سرعت دورانی پرهای از نیروها

چهار معادله و چهار مجهول به صورت زیر است.

$$\begin{aligned} u_1 &= \omega_2^2 - \omega_4^2 \\ u_2 &= \omega_1^2 - \omega_3^2 \\ u_3 &= \omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2 \\ u_4 &= \omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2 \end{aligned} \quad (29)$$

جواب معادلات (۲۹) به صورت رابطه (۳۰) بدست می‌آید.

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{u_4 + u_3 + 2u_2}{4}}$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{u_4 - u_3 + 2u_1}{4}} \quad (30)$$

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{u_4 + u_3 + 2u_2}{4}}$$

$$\omega_4 = \sqrt{\frac{u_4 - u_3 - 2u_1}{4}}$$

# فصل ۱

## شبیه‌سازی در محیط سیمولینک

سیمولینک<sup>۱</sup> یک ابزار شبیه‌سازی همراه با نرم‌افزار متلب است. با استفاده از سیمولینک می‌توان رفتار یک سیستم را بدون نیاز به ساخت آن را تحلیل نمود. در نتیجه با استفاده از سیمولینک می‌توان علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه و زمان به بررسی تأثیر اغتشاشات یا سایر عوامل ورودی بر عملکرد یک سیستم پرداخت. همچنین شبیه‌سازی سیستم‌ها این توانایی را در اختیار می‌گذارد تا عکس العمل یک سیستم در صورت تغییر پارامترهای ورودی آن به خوبی شناخته شود. سیمولینک به صورت یک کتابخانه در نرم‌افزار متلب<sup>۲</sup> عرضه شده است که شبیه‌سازی توسط بلوک‌های این کتابخانه به صورت دیاگرام‌های بلوکی انجام می‌شود.

### ۱-۱ طراحی مبتنی بر مدل

مراحل طراحی و پیاده‌سازی براساس دیاگرام ۷ (۱-۱) طی می‌شود. با توجه به این دیاگرام، ابتدا سامانه دینامیکی در محیط نرم‌افزاری مدل‌سازی و کنترل‌کننده طراحی می‌شود. سپس، عملکرد کنترل‌کننده با استفاده از شبیه‌سازی نرم‌افزاری<sup>۳</sup> بررسی شده و اشکالات اولیه موجود برطرف می‌شود. در گام بعد، به منظور بررسی اثر نامعینی‌ها، ساده‌سازی‌ها و اشتباهات مدل‌سازی بر عملکرد کنترل‌کننده، شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه پلت<sup>۴</sup> انجام می‌شود. پس از تایید عملکرد کنترل‌کننده به صورت نرم‌افزاری، کد آن به کمک ابزار تولید خودکار

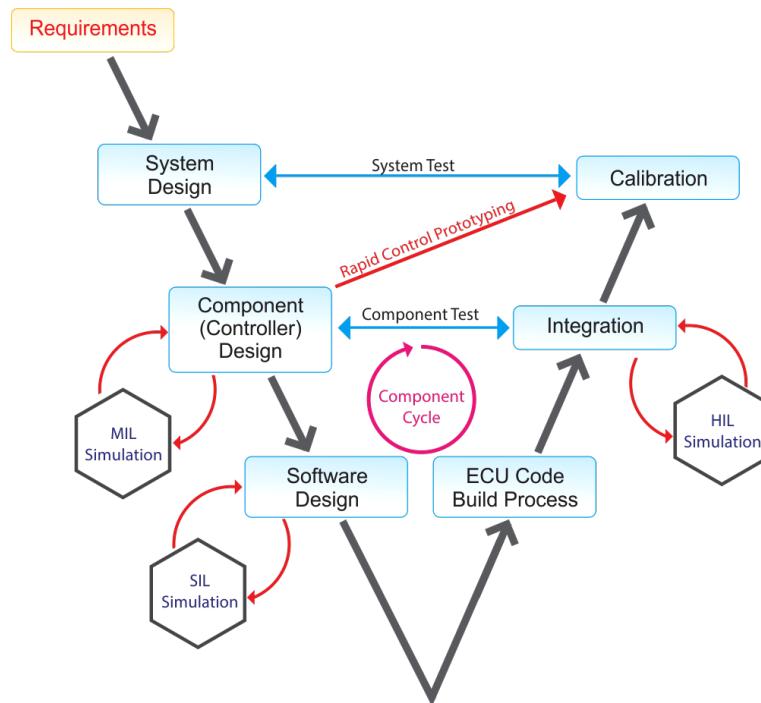
<sup>1</sup>Simulink

<sup>2</sup>MATLAB

<sup>3</sup>MIL (Model In the Loop)

<sup>4</sup>RCP (Rapid Control Prototyping)

کد نرم‌افزار سیمولینک تولید و روی آردوینو<sup>۵</sup> پیاده‌سازی می‌شود. در این حالت، سخت‌افزار کنترل‌کننده (برد آردوینو) مدل در حلقه شبیه‌سازی قرار می‌گیرد. در مرحله نهایی، برد آردوینو به پلتینت حقیقی (استند سه درجه آزادی) وصل شده، به صورت زمان‌حقیقی<sup>۶</sup> خروجی حسگر را دریافت و فرمان‌کنترلی را به پلتینت اعمال می‌کند.



شکل ۱-۱: دیاگرام V [۱۵]

## ۲-۱ شبیه‌سازی استند سه درجه آزادی در محیط سیمولینک

در این بخش به بررسی و شبیه‌سازی مدل دینامیکی استند سه درجه آزادی پرداخته شده است. در بخش ؟؟ فرم فضایی حالت استند چهارپره استخراج شد. در شبیه‌سازی نیز از همین روابط استخراج شده، استفاده شده است. مدل شبیه‌سازی شده از استند (شکل ۲-۱) دارای چهار ورودی سرعت دورانی موتورها و دارای سه خروجی زوایایی رول ( $\phi$ )، پیچ ( $\theta$ )، یاو ( $\psi$ ) و سه سرعت زاویه‌ای  $p$ ,  $q$  و  $r$  است.

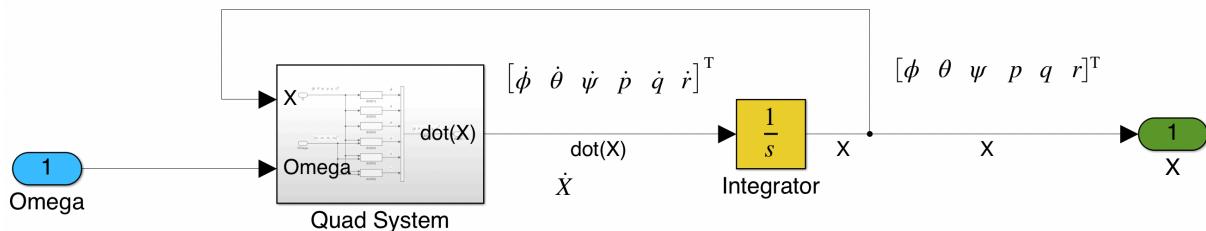
<sup>5</sup>Arduino

<sup>6</sup>Real-Time



شکل ۱-۲: مدل استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌های مدل

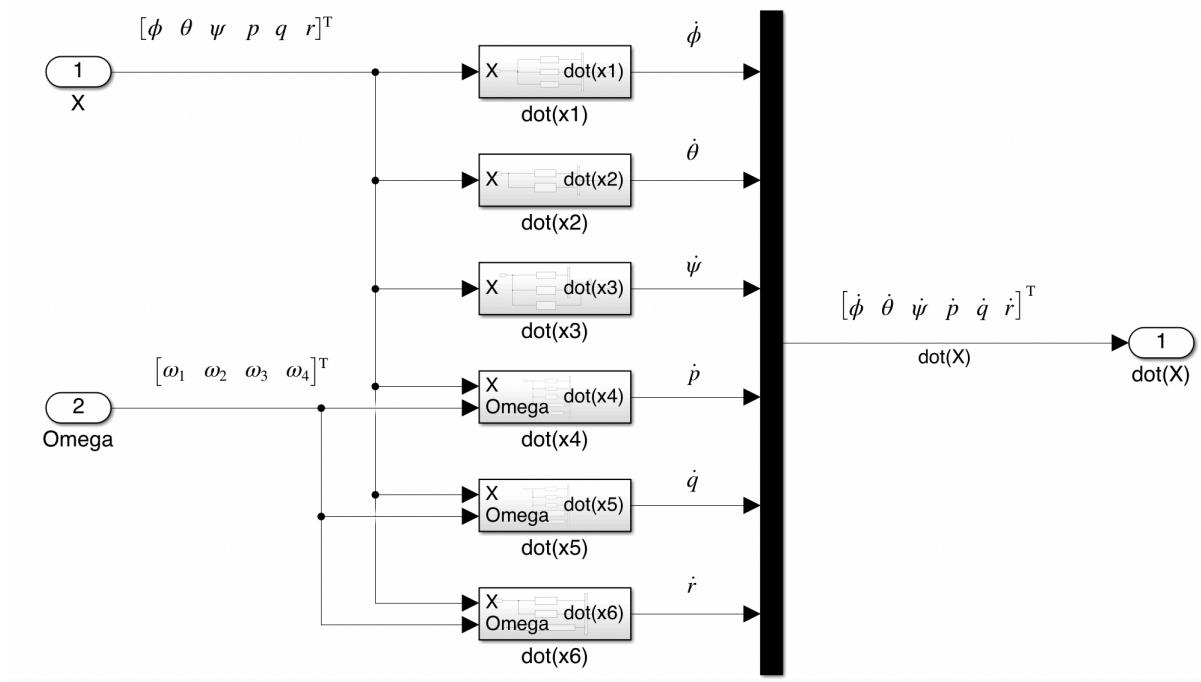
نمایی از داخل بلوک Quacopter 3DOF Nonlinear System در شکل ۳-۱ آورده شده است.



شکل ۱-۳: مدل استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌های مدل

خروجی بلوک Quad System،  $\dot{X}$  است. با استفاده از بلوک انتگرال‌گیر (بلوک زرد رنگ در شکل ۳-۱) از خروجی بلوک بر اساس شرایط اولیه استند انتگرال گرفته می‌شود و وضعیت استند (زاویه‌های رول ( $\phi$ )، پیچ ( $\theta$ )، یاو ( $\psi$ ) و سرعت‌های زاویه‌ای  $p$ ,  $q$  و  $r$ ) را خروجی می‌دهد.

در داخل بلوک Quad System، شش بلوک دیگر قرار دارد که تعدادی از آن‌ها دارای ورودی  $X$  و تعدادی دیگر دارای ورودی  $\dot{X}$  هستند. مجموع خروجی این شش بلوک  $\dot{X}$  است که در توضیحات بلوک Quad System، نیز به آن اشاره شد. نمایی از داخل بلوک Quad System در شکل ۴-۱ آورده شده است.



شکل ۱-۴: نمایی از داخل بلوک Quad System

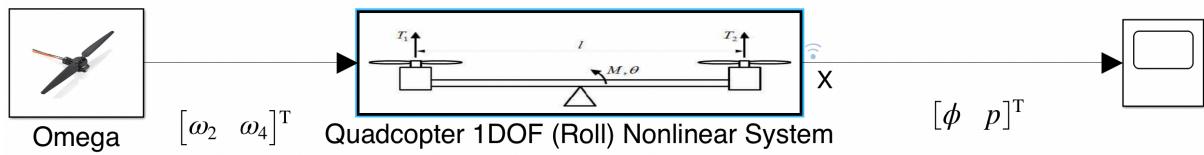
### ۳-۱ شبیه‌سازی کانال‌های مختلف استند سه درجه آزادی در محیط سیمولینک

در بخش (۲-۱) به شبیه‌سازی سه درجه آزادی استند چهارپره پرداخته شد. در این بخش به شبیه‌سازی کانال‌های رول، پیج، یاو و رول-پیچ پرداخته می‌شود. برای شبیه‌سازی یک کانال فرض شده است سایر کانال‌ها بسته شده‌اند و هیچگونه حرکتی در این کانال‌ها وجود ندارد.

#### ۱-۳-۱ شبیه سازی کانال رول در محیط سیمولینک

در بخش (۲-۱-۰) فرم فضایی حالت کانال‌های مختلف استند چهارپره بدست آمد در این بخش فرم فضای حالت کانال رول در سیمولینک شبیه‌سازی می‌شود. مدل شبیه‌سازی شده از استند (شکل ۱-۵) دارای دو ورودی سرعت دورانی موتورهای دو و چهار و دارای یک خروجی زاویه‌ی رول ( $\phi$ ) و سرعت زاویه‌ای  $p$

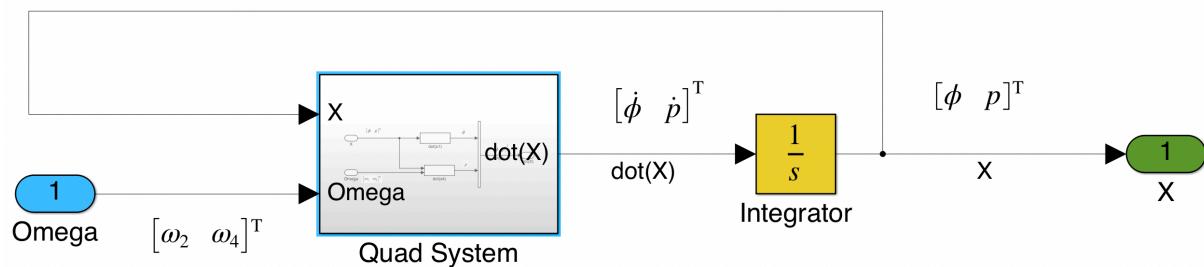
است.



شکل ۱-۵: مدل کanal رول استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌ها

نمایی از داخل بلوک Quacopter 1DOF (Roll) Nonlinear System در شکل (۶-۱) آورده شده

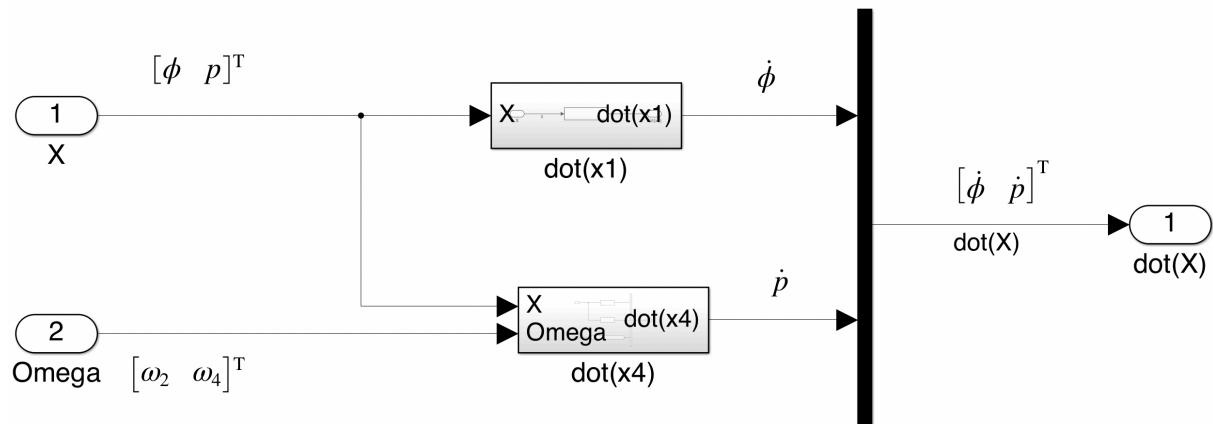
است.



شکل ۱-۶: مدل کanal رول استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌ها

بلوک Quad System،  $\dot{X}$  را به عنوان خروجی می‌دهد. با استفاده از بلوک انتگرالگیر (بلوک زرد رنگ) در شکل (۶-۱) از خروجی آن بر اساس شرایط اولیه استند انتگرال گرفته می‌شود و خروجی مورد نیاز (زاویه رول ( $\phi$ ) و سرعت زاویه‌ای ( $p$ ) را می‌دهد.

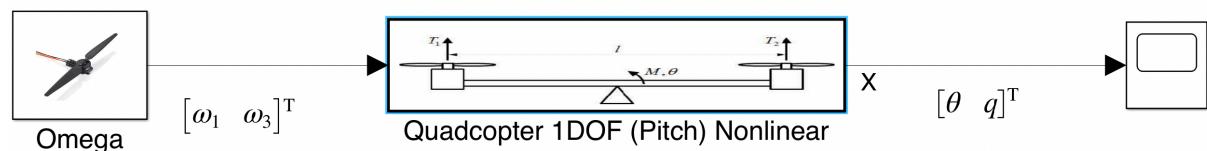
داخل بلوک Quad System، دو بلوک دارد که یکی از آن‌های دارای ورودی  $X$  و دیگری دارای ورودی  $\omega$  هستند. مجموع خروجی این دو بلوک  $\dot{X}$  است که برای بلوک Quad System، نیز اشاره شد. نمایی از داخل بلوک Quad System در شکل (۷-۱) آورده شده است.



شکل ۱-۷: نمایی از داخل بلوک Quad System

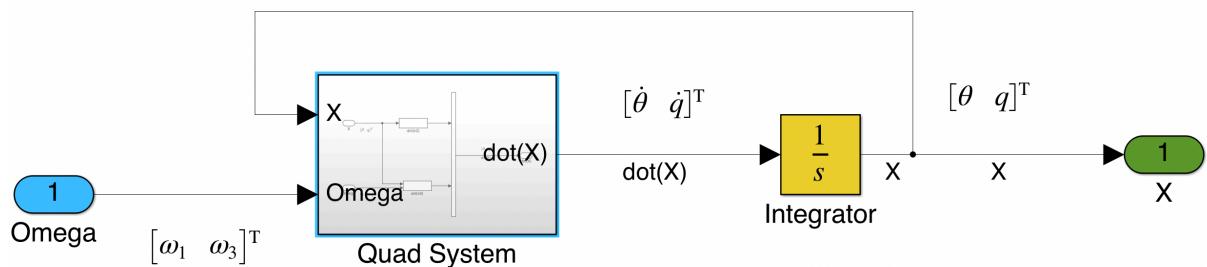
### ۲-۳-۱ شبیه سازی کانال پیچ در محیط سیمولینک

در بخش (۲-۱-۰) فرم فضایی حالت کانال‌های مختلف استند چهار پره بدست آمد در این بخش فرم فضایی حالت کانال پیچ در سیمولینک شبیه‌سازی می‌شود. مدل شبیه‌سازی شده از استند (شکل ۸-۱) دارای دو ورودی سرعت دورانی موتورهای یک و سه و دارای یک خروجی زاویه‌ی پیچ ( $\theta$ ) و سرعت زاویه‌ای  $q$  است.



شکل ۱-۸: مدل کانال رول استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌ها

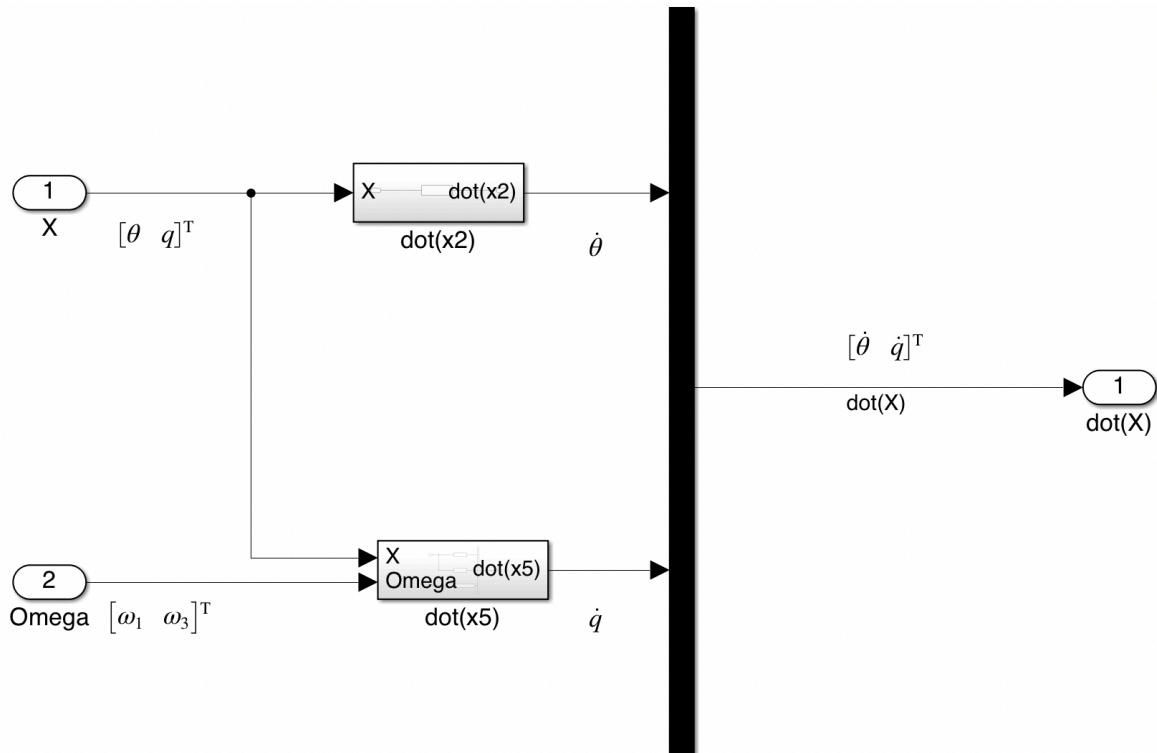
نمایی از داخل بلوک Quacopter 1DOF (Pitch) Nonlinear System در شکل (۹-۱) آورده شده است.



شکل ۱-۹: مدل کاتال رول استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌ها

بلوک Quad System،  $\dot{X}$  را به عنوان خروجی می‌دهد. با استفاده از بلوک انتگرالگیر (بلوک زرد رنگ) در شکل (۹-۹) از خروجی آن بر اساس شرایط اولیه استند انتگرال گرفته می‌شود و خروجی مورد نیاز (زاویه پیچ ( $\theta$ ) و سرعت زاویه‌ای ( $q$ ) را می‌دهد.

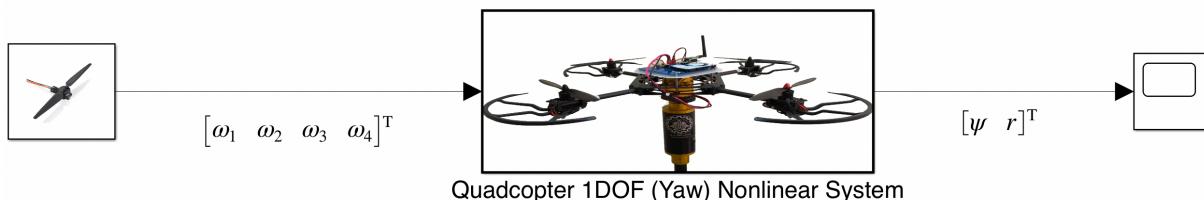
داخل بلوک Quad System، دو بلوک دارد که یکی از آن‌های دارای ورودی  $X$  و دیگری دارای ورودی  $\omega$  هستند. مجموع خروجی این دو بلوک  $\dot{X}$  است که برای بلوک Quad System، نیز اشاره شد. نمایی از داخل بلوک Quad System در شکل (۱۰-۱) آورده شده است.



شکل ۱-۱۰: نمایی از داخل بلوک Quad System

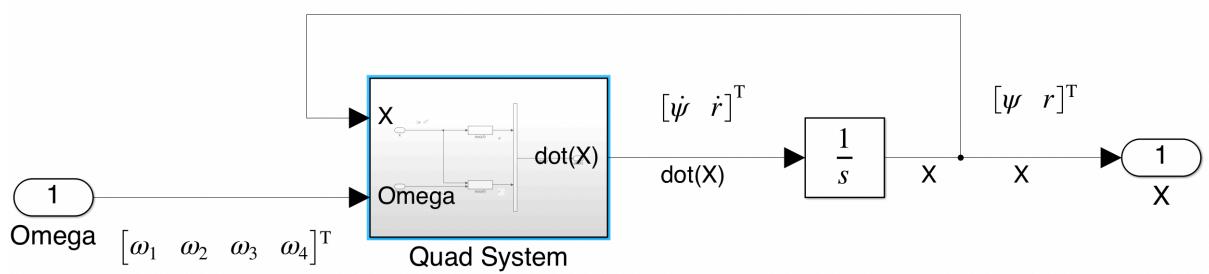
### ۳-۳-۱ شبیه سازی کanal یاو در محیط سیمولینک

در بخش (۲-۱-۰) فرم فضای حالت کانال های مختلف استند چهار پره بدست آمد در این بخش فرم فضای حالت کانال رول در سیمولینک شبیه سازی می شود. مدل شبیه سازی شده از استند (شکل ۱۱-۱) دارای چهار ورودی سرعت دورانی موتورها و دارای یک خروجی زاویه رول ( $\psi$ ) و سرعت زاویه ای  $r$  است.



شکل ۱۱-۱: مدل کانال رول استند چهارپره شبیه سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی ها

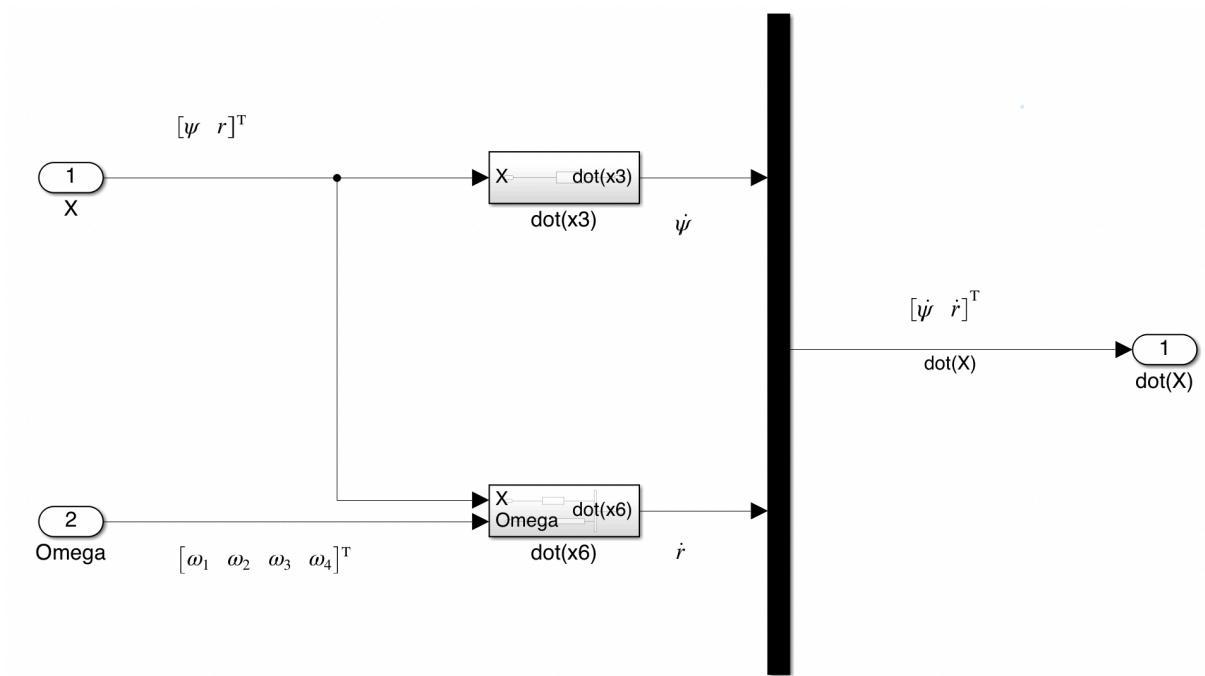
نمایی از داخل بلوک Quacopter 1DOF (Yaw) Nonlinear System در شکل ۱۲-۱ آورده شده است.



شکل ۱۲-۱: مدل کانال یاو استند چهارپره شبیه سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی ها

بلوک Quad System،  $\dot{X}$  را به عنوان خروجی می دهد. با استفاده از بلوک انگرال گیر (بلوک زرد رنگ) در شکل ۱۲-۱ از خروجی آن بر اساس شرایط اولیه استند انگرال گرفته می شود و خروجی مورد نیاز (زاویه های یاو ( $\psi$ ) و سرعت زاویه ای ( $r$ ) را می دهد.

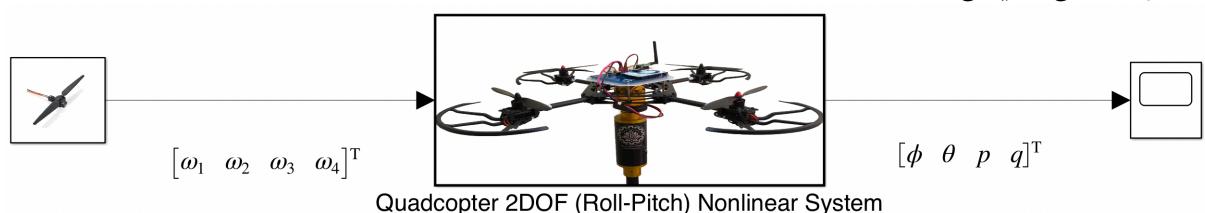
داخل بلوک Quad System، دو بلوک دارد که یکی از آن های دارای ورودی  $X$  و دیگری دارای ورودی  $X$  و  $\omega$  هستند. مجموع خروجی این دو بلوک  $\dot{X}$  است که برای بلوک Quad System، نیز اشاره شد. نمایی از داخل بلوک Quad System در شکل ۱۲-۱ آورده شده است.



شکل ۱۳-۱: نمایی از داخل بلوک Quad System

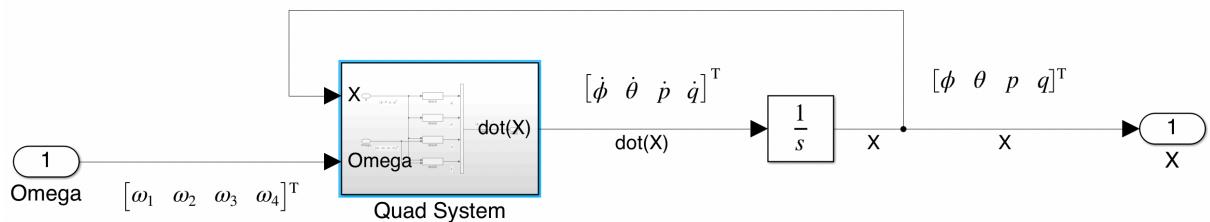
### ۴-۳-۱ شبیه سازی کanal رول-پیچ در محیط سیمولینک

در بخش ۲-۱-۰ فرم فضای حالت کانال‌های مختلف استند چهار پره بدست آمد در این بخش فرم فضای حالت کانال رول در سیمولینک شبیه‌سازی می‌شود. فرم فضای حالت استند چهار پره استخراج شد. در شبیه‌سازی نیز از همین روابط استخراج شده استفاده شده است. مدل شبیه‌سازی شده از استند (شکل ۱۴-۱) دارای چهار ورودی سرعت دورانی موتورها و دارای دو خروجی زوایای رول ( $\phi$ ) و پیچ ( $\theta$ ) دو سرعت‌های زاویه‌ای  $p$  و  $q$  است.



شکل ۱۴-۱: مدل کانال رول-پیچ استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌ها

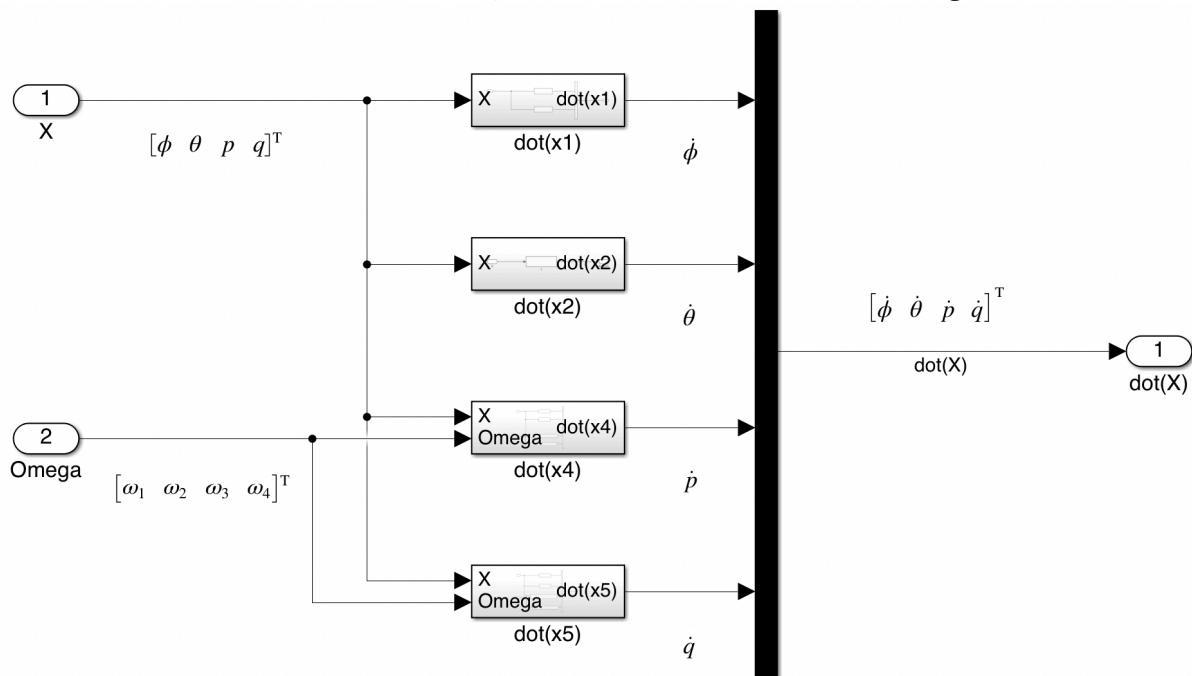
نمایی از داخل بلوک Quacopter 3DOF Nonlinear System در شکل ۱۵-۱ آورده شده است.



شکل ۱۵-۱: مدل کanal رول-پیچ استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌ها

بلوک Quad System،  $\dot{X}$  را به عنوان خروجی می‌دهد. با استفاده از بلوک انتگرال‌گیر (بلوک زرد رنگ) در شکل ۱۵-۱ از خروجی آن بر اساس شرایط اولیه استند انتگرال گرفته می‌شود و خروجی مورد نیاز (زاویه‌های رول ( $\phi$ ) و پیچ ( $\theta$ ) و سرعت‌های زاویه‌ای  $p$  و  $q$ ) را می‌دهد.

داخل بلوک Quad System، چهار بلوک دارد که بعضی از آن‌های دارای ورودی  $X$  و بعضی از آن‌های دارای ورودی  $X$  و  $\omega$  هستند. مجموع خروجی این شش بلوک  $\dot{X}$  است که برای بلوک Quad System نیز اشاره شد. نمایی از داخل بلوک Quad System در شکل ۱۶-۱ آورده شده است.



شکل ۱۶-۱: نمایی از داخل بلوک Quad System

## ۴-۱ اصلاح پارامترهای استند چهارپره در شبیه‌سازی حلقه باز

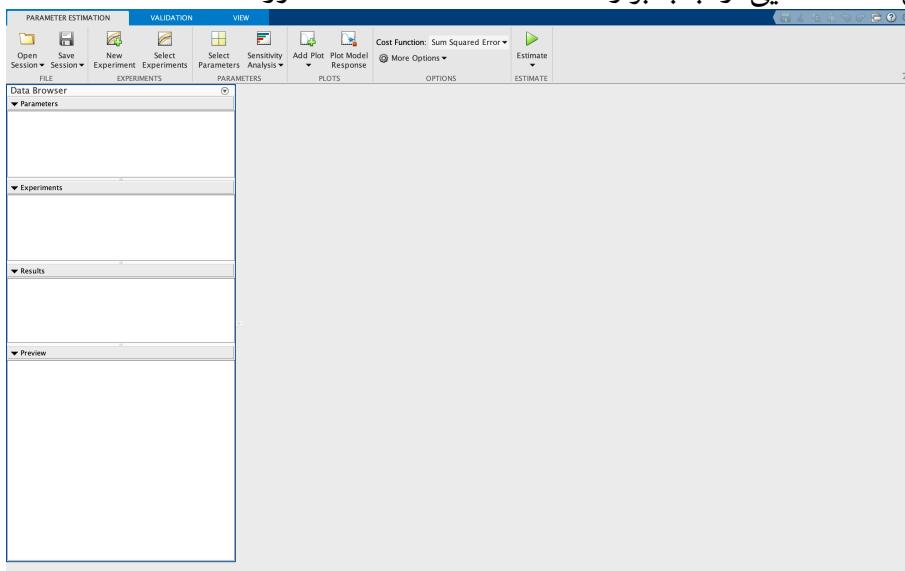
در بخش ۲-۱ شبیه‌سازی استند چهارپره انجام شد و در بخش ۳-۱ کانال‌های مختلف استند سه درجه آزادی چهارپره شبیه‌سازی شد. در این بخش با استفاده از شبیه‌سازی کانال‌های مختلف چهارپره در محیط سیمولینک و داده‌های خروجی از استند چهارپره، پارامترهای استند چهارپره اصلاح می‌شوند.

برای اصلاح پارامترهای استند چهارپره از جعبه‌ابزار Parameter Estimator موجود در سیمولینک استفاده شده است. این جعبه ابزار با استفاده از داده‌های وضعیت استند در واقعیت و داده‌های وضعیت استند در شبیه‌سازی سیمولینک، اقدام به اصلاح پارامترها می‌کند، به صورتی که وضعیت استند در شبیه‌سازی تا حد ممکن به وضعیت استند در واقعیت نزدیک کند.



شکل ۱۷-۱: نماد جعبه‌ابزار Parameter Estimator در سیمولینک

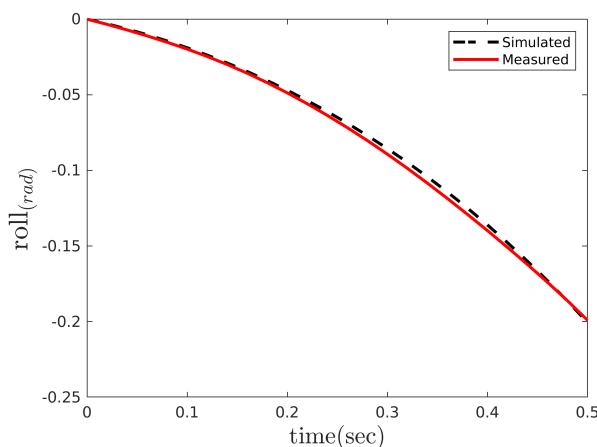
در شکل ۱۸-۱ نمایی از جعبه‌ابزار Parameter Estimator آورده شد است.



شکل ۱۸-۱: جعبه‌ابزار Parameter Estimator

## ۱-۴-۱ تخمین پارامترهای کanal رول موتور خاموش

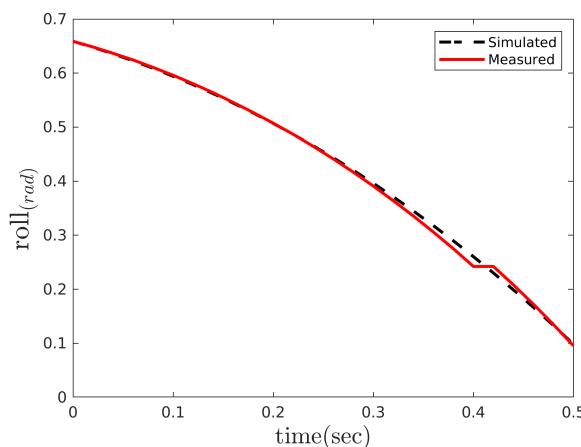
برای اصلاح پارامترهای رول چندین آزمایش انجام شد و با استفاده از داده‌های ثبت شده از وضعیت استند در کanal رول و جعبه‌ابزار Parameter Estimator، پارامترهای کanal رول اصلاح شدند. برای انجام آزمایش استند از شرایط اولیه مختلف با موتور خاموش رها شد و از خروجی سنسور داده برداری شد. سپس، مدل و داده‌های ثبت شده‌ی سنسور (وضعیت استند در کanal رول) به جعبه‌ابزار Parameter Estimator داده شد. وضعیت کanal رول استند در شبیه‌سازی و واقعیت بعد از اصلاح پارامترهای کanal رول در شکل‌های  $\text{؟؟؟}$ ،  $\text{؟؟؟}$  و  $\text{؟؟؟}$  مقایسه شده است.



شکل ۱-۱۹: مقایسه وضعیت استند در آزمایش دوم و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کanal رول موتور خاموش

## ۲-۴-۱ تخمین پارامترهای کanal رول

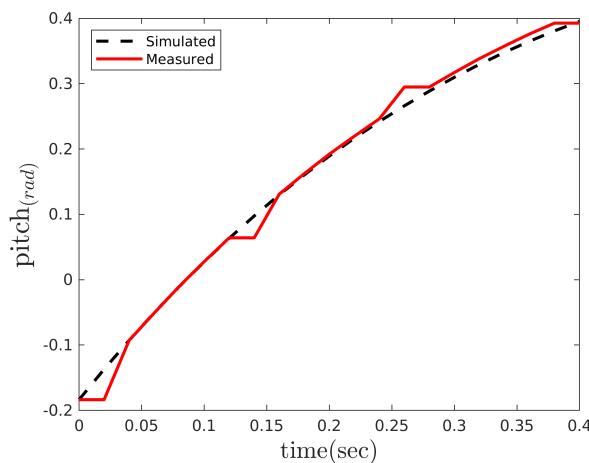
برای اصلاح پارامترهای رول چندین آزمایش انجام شد و با استفاده از داده‌های ثبت شده از وضعیت استند در کanal رول و جعبه‌ابزار Parameter Estimator، پارامترهای کanal رول اصلاح شدند. برای انجام آزمایش هر یک از موتورهای دو و چهار با دور مختلف شروع به حرکت کردند و از خروجی سنسور داده برداری شد. سپس، مدل و داده‌های ثبت شده‌ی سنسور (وضعیت استند در کanal رول) به جعبه‌ابزار Parameter Estimator داده شد. وضعیت کanal رول استند در شبیه‌سازی و واقعیت بعد از اصلاح پارامترهای کanal رول در شکل‌های  $\text{؟؟؟}$ ،  $\text{؟؟؟}$  و  $\text{؟؟؟}$  مقایسه شده است.



شکل ۱-۲۰: مقایسه وضعیت استند در آزمایش چهارم و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کanal رول

### ۳-۴-۱ تخمین پارامترهای کanal پیچ موتور خاموش

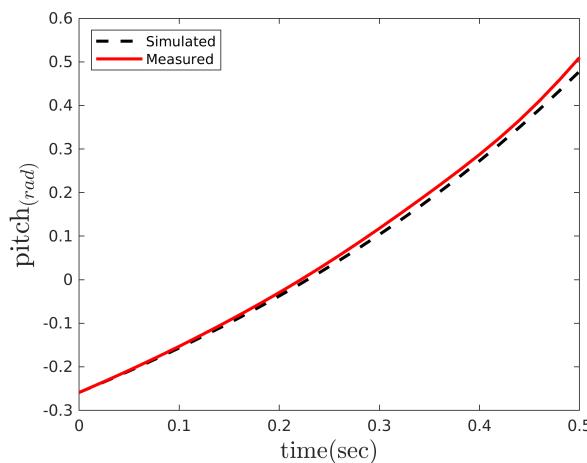
برای اصلاح پارامترهای پیچ چندین آزمایش انجام شد و با استفاده از داده‌های ثبت شده از وضعیت استند در کanal پیچ و جعبه‌ابزار Parameter Estimator، پارامترهای کanal پیچ اصلاح شدند. برای انجام آزمایش استند از شرایط اولیه مختلف با موتور خاموش رها شد و از خروجی سنسور داده برداری شد. سپس، مدل و داده‌های ثبت شده‌ی سنسور (وضعیت استند در کanal پیچ) به جعبه‌ابزار Parameter Estimator داده شد. وضعیت کanal پیچ استند در شبیه‌سازی واقعیت بعد از اصلاح پارامترهای کanal پیچ در شکل‌های ۲۱-۱ و ۲۱-۲ مقایسه شده است.



شکل ۱-۲۱: مقایسه وضعیت استند در آزمایش اول و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کanal پیچ موتور خاموش

#### ۴-۴-۱ تخمین پارامترهای کanal پیچ

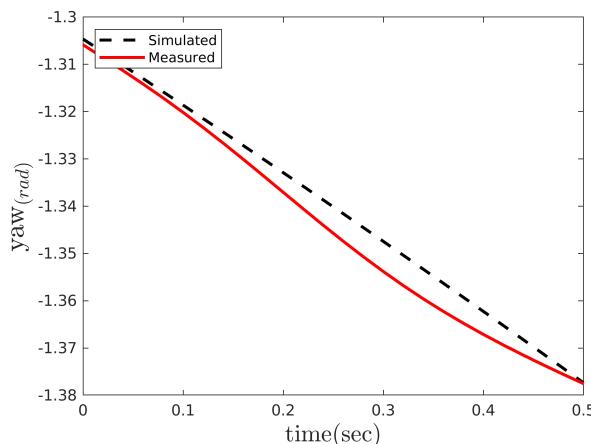
برای اصلاح پارامترهای پیچ چندین آزمایش انجام شد و با استفاده از داده‌های ثبت شده از وضعیت استند در کanal پیچ و جعبه‌ابزار Parameter Estimator، پارامترهای کanal پیچ اصلاح شدند. برای انجام آزمایش هر یک از موتورهای دو و چهار با دور مختلف شروع به حرکت کردند و از خروجی سنسور داده برداری شد. سپس، مدل و داده‌های ثبت شده‌ی سنسور (وضعیت استند در کanal پیچ) به جعبه‌ابزار Parameter Estimator داده شد. وضعیت کanal پیچ استند در شبیه‌سازی و واقعیت بعد از اصلاح پارامترهای کanal پیچ در شکل‌های ۲۲-۱، ۲۲-۲، و ۲۲-۳ مقایسه شده است.



شکل ۱-۲۲: مقایسه وضعیت استند در آزمایش اول و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کanal پیچ

#### ۱-۴-۵. تخمین پارامتر کانال یاو

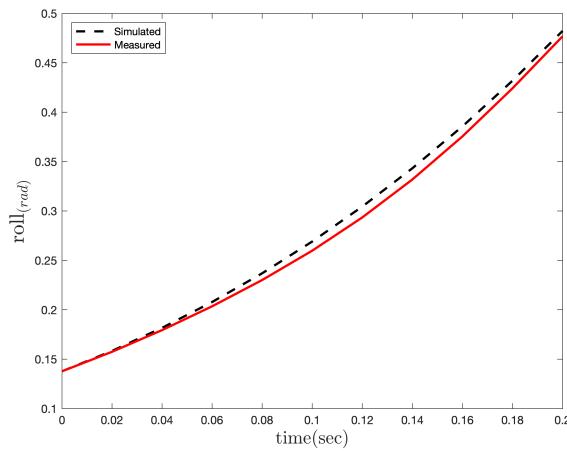
برای اصلاح پارامترهای یاو چندین آزمایش انجام شد و با استفاده از داده‌های ثبت شده از وضعیت استند در کانال پیچ و جعبه‌ابزار Parameter Estimator پارامترها اصلاح شدند. برای آزمایش یاو همهی موتورها با دور مختلف شروع به حرکت کردند و از خروجی سنسور داده برداری شد. سپس، مدل و پارامترهای داده‌های ثبت شدهی سنسور (وضعیت استند در کانال یاو) به جعبه‌ابزار Parameter Estimator داده شد. نتایج آزمایش‌های کانال یاو بعد از اصلاح پارامترها در شکل ۱-۲۳ و ۱-۲۴ آورده شده است.



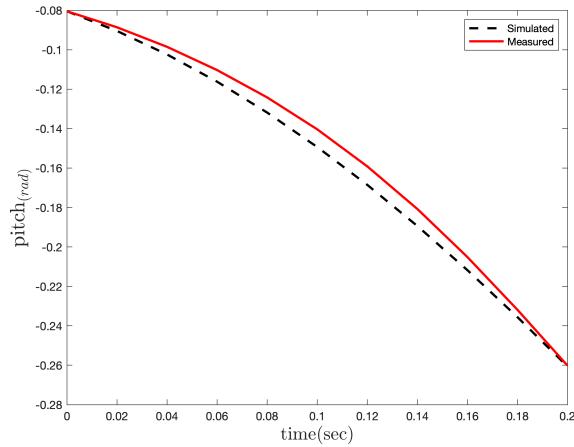
شکل ۱-۲۳: مقایسه وضعیت استند در آزمایش دوم و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال یاو

## ۶-۴-۱ تخمین پارامتر کانال‌های رول-پیچ

برای اصلاح پارامترها رول-پیچ چندین آزمایش انجام شد و با استفاده از داده‌های ثبت شده از وضعیت استند در کanal رول-پیچ و جعبه‌ابزار Parameter Estimator پارامترهای کanal رول-پیچ اصلاح شدند. برای آزمایش تمامی موتورها با دور مختلف شروع به حرکت کردند و از خروجی سنسور داده برداری شد. سپس، مدل و داده‌های ثبت شده سنسور (وضعیت استند در کanal رول-پیچ) به جعبه‌ابزار Parameter Estimator داده شد. وضعیت کanal رول-پیچ استند در شبیه‌سازی واقعیت بعد از اصلاح پارامترهای کanal رول-پیچ بعد در شکل‌های (۲۴-۱، ۲۴-۲، ۲۴-۳) آورده شده است.



(ا) تغییرات زاویه رول



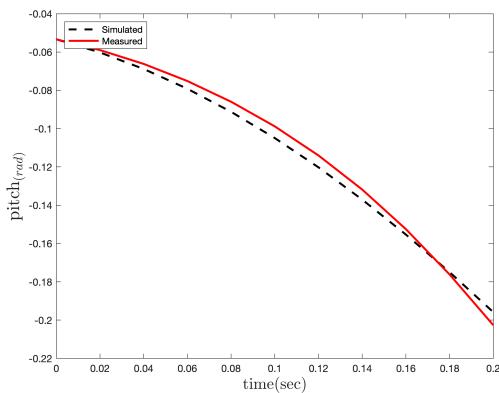
(ب) تغییرات زاویه پیچ

شکل ۱-۲۴: مقایسه وضعیت استند در آزمایش چهارم و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کanal رول-پیچ

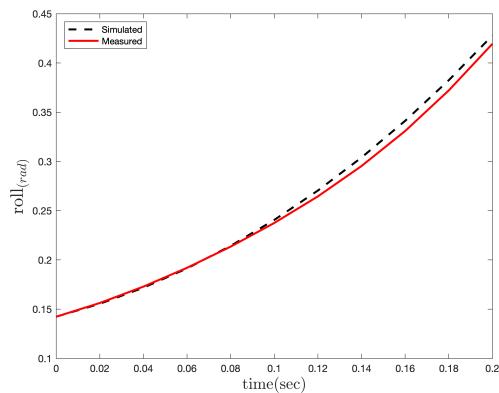
#### ۷-۴-۱ تخمین پارامتر کانال‌های رول-پیچ-یاو

برای اصلاح پارامترها رول-پیچ چندین آزمایش انجام شد و با استفاده از داده‌های ثبت شده از وضعیت استند در کanal رول-پیچ-یاو و جعبه‌ابزار Parameter Estimator پارامترهای کanal رول-پیچ-یاو اصلاح شدند. برای آزمایش تمامی موتورها با دور مختلف شروع به حرکت کردند و از خروجی سنسور داده برداری شد.

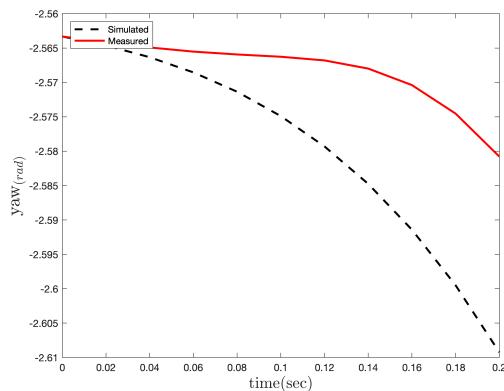
سپس، مدل و داده‌های ثبت شده سنسور (وضعیت استند در کanal رول-پیج-یاو) به جعبه ابزار Parameter Estimator داده شد. وضعیت کanal رول-پیج-یاو استند در شبیه‌سازی و واقعیت بعد از اصلاح پارامترهای کanal رول-پیج-یاو بعد در شکل‌های (۲۵-۱، ۹۹، ۹۹، ۹۹، ۹۹، ۹۹) آورده شده است.



(ب) تغییرات زاویه پیج



(ا) تغییرات زاویه رول



(ج) تغییرات زاویه یاو

شکل ۱-۲۵: مقایسه وضعیت استند در آزمایش چهارم و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کanal رول-پیج-یاو

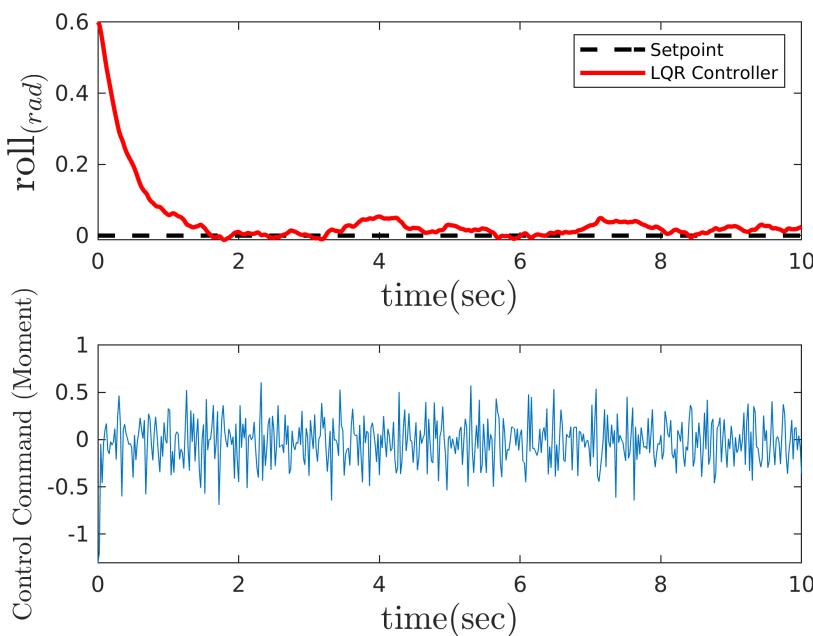
## ۱-۵ شبیه‌سازی استند سه درجه آزادی در حضور کنترل‌کننده

در بخش‌های ۹۹ و ۹۹ کنترل‌کننده خطی مبتنی بر بازی دیفرانسیلی LQIDG و LQDG معرفی شد. در این بخش، ابتدا چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQR و سپس در حضور کنترل‌کننده‌های LQDG و

شبیه‌سازی می‌شود.

### ۱-۵-۱ شبیه‌سازی کanal رول استند سه درجه آزادی در حضور کنترل‌کننده LQR

در بخش ۱-۳-۱ شبیه‌سازی کanal رول استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQR پرداخته می‌شود. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی LQR از روش [۱۶] TCACS استفاده شده است.

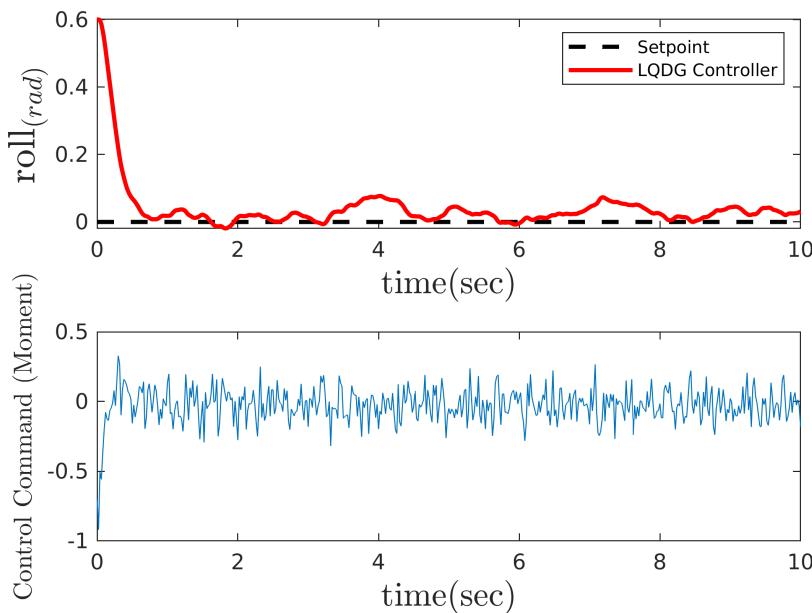


شکل ۱-۲۶: عملکرد LQR در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)

بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۱-۲۶-۱)، کanal رول در حضور کنترل‌کننده LQR در حدود پنج ثانیه به تعادل می‌رسد اما دارای خطای ماندگار است.

### ۲-۵-۱ شبیه‌سازی کanal رول استند در حضور کنترل‌کننده LQDG

در بخش ۱-۳-۱ شبیه‌سازی کanal رول استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQDG در بخش ۲-۳-۱ بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی LQDG از روش [۱۶] TCACS استفاده شده است.

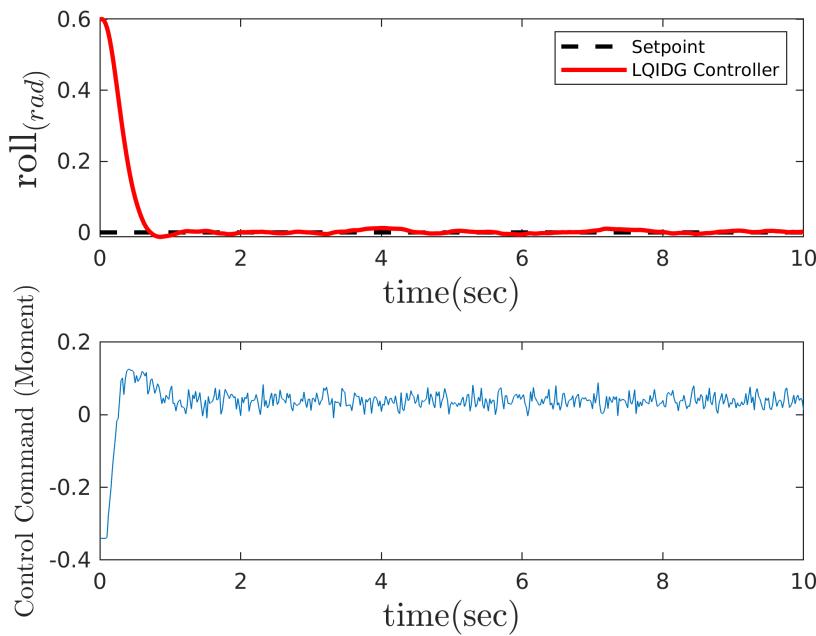


شکل ۱-۲۷-۱: عملکرد LQDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)

بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۱-۲۷-۱)، کanal رول در حضور کنترل‌کننده LQDG در کمتر از پنج ثانیه به تعادل می‌رسد اما دارای خطای مانگار است ولی خطای مانگار آن نسبت به کنترل‌کننده بخش ۱-۵-۱ کمتر است. به دلیل خطای مانگار، در بخش انتگرال‌گیر به کنترل‌کننده اضافه می‌شود تا خطای مانگار استند را کم کند.

### ۳-۵-۱ شبیه‌سازی کanal رول استند در حضور کنترل‌کننده LQIDG

در بخش ۱-۳-۱ شبیه‌سازی کanal رول استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQIDG در بخش ۱-۴-۱ بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی LQIDG از روش TCACS [۱۶] استفاده شده است.

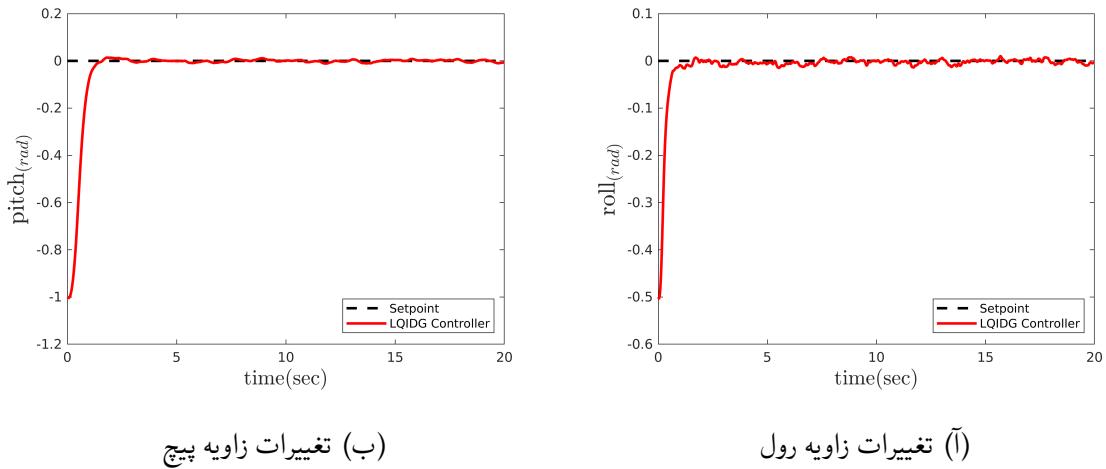


شکل ۱-۲۸: عملکرد LQIDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)

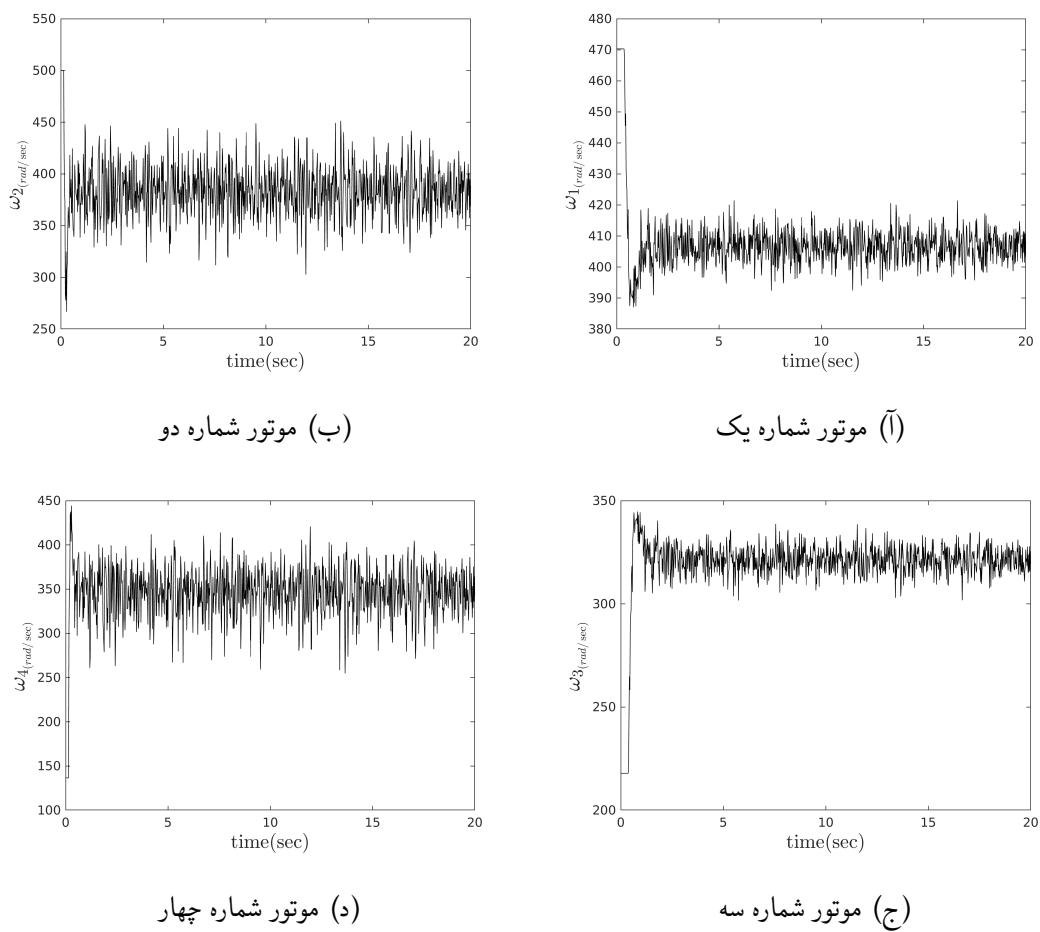
بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۱-۲۸)، کanal رول در حضور کنترل‌کننده LQIDG در حدود پنج ثانیه به تعادل می‌رسد و خطای ماندگار آن در حدود صفر است.

#### ۴-۵-۱ شبیه‌سازی کanal رول-پیچ استند در حضور کنترل‌کننده LQIDG

در بخش ۴-۳-۱ شبیه‌سازی کanal رول استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQIDG در بخش ۴-۳-۱ بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی LQIDG از روش TCACS [۱۶] استفاده شده است.



شکل ۱-۲۹: عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)

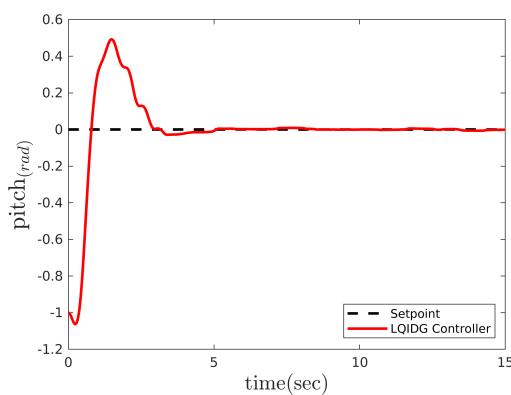


شکل ۱-۳۰: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)

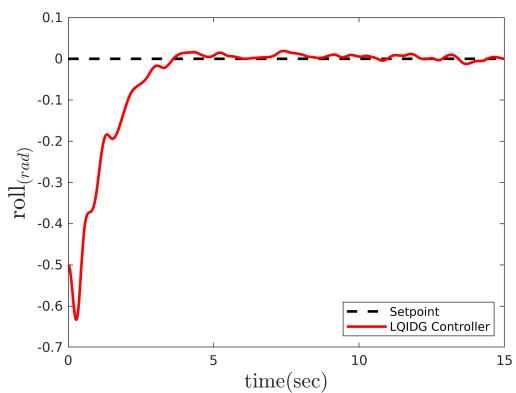
بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۲۹-۱)، کanal رول در حضور کنترل‌کننده LQIDG در حدود پنج ثانیه و کanal پیچ در حدود هشت ثانیه به تعادل می‌رسد و خطای ماندگار آن در حدود صفر است.

### ۵-۵-۱ شبیه‌سازی سه درجه آزادی استند در حضور کنترل‌کننده LQIDG

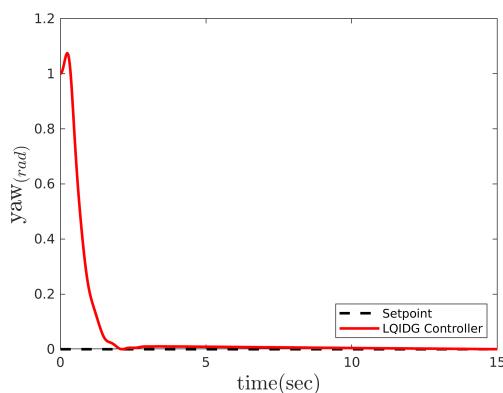
در بخش ۲-۱ شبیه‌سازی سه درجه آزادی استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQIDG در بخش‌های ۲۹ و ۳۰ بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی LQIDG از روش TCACS [۱۶] استفاده شده است.



(ب) تغییرات زاویه پیچ

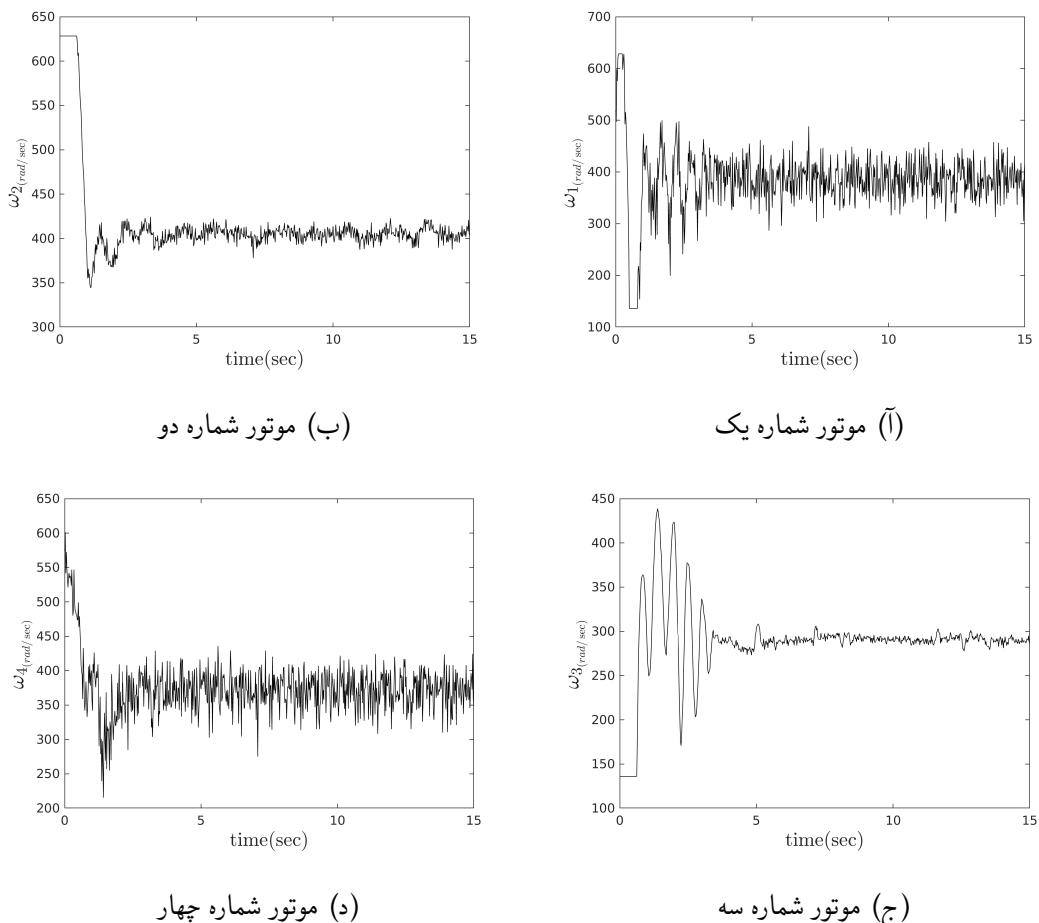


(ا) تغییرات زاویه رول



(ج) تغییرات زاویه یاو

شکل ۱-۳۱: عملکرد کنترل زاویه رول، پیچ و یاو (تعقیب ورودی صفر)



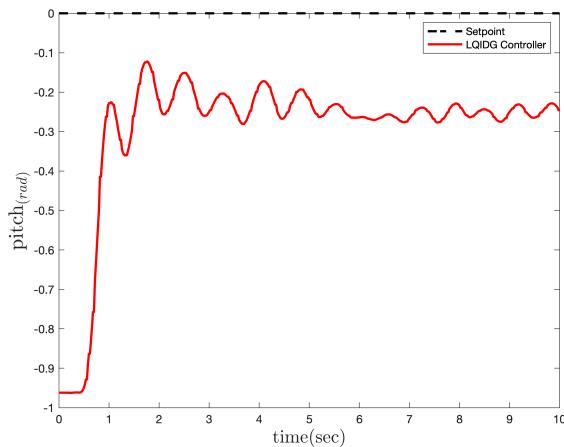
شکل ۱-۳۲-۱: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)

## ۱-۶ پیاده‌سازی کنترل کننده بر رویه استند سه درجه آزادی

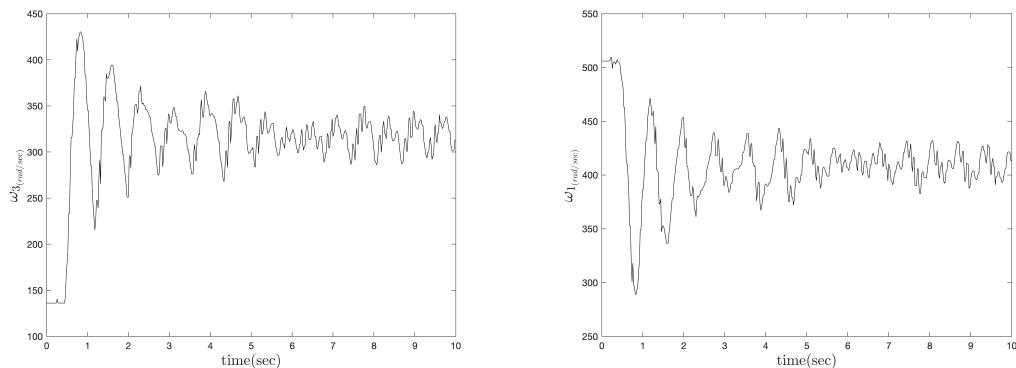
؟؟ و ？؟ کنترل کننده خطی مبتنی بر بازی دیفرانسیلی در حالت حلقه باز و حلقه بسته معرفی شد. در بخش ۳-۶-۱، ۴-۶-۱ و ۵-۵-۱ ابتدا کنترل کننده LQR و سپس کنترل کننده های LQDG و LQIDG در بخش های ۲-۶-۱، ۴-۶-۱ و ۵-۵-۱ شبیه سازی شدند. در این بخش به پیاده سازی کنترل کننده LQR و سپس کنترل کننده های LQDG و LQIDG پرداخته خواهد شد.

## ۱-۶-۱ پیاده‌سازی کنترل کننده LQR بر رویه کanal پیچ

در بخش ۱-۳-۱ شبیه‌سازی کanal رول استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل کننده LQR پرداخته می‌شود. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی از روش TCACS [۱۶] استفاده شده است.



شکل ۱-۳۳-۱: عملکرد LQR در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)



(ب) موتور شماره سه

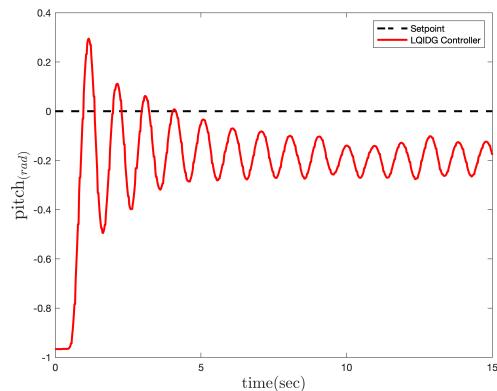
(آ) موتور شماره یک

شکل ۱-۳۴-۱: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)

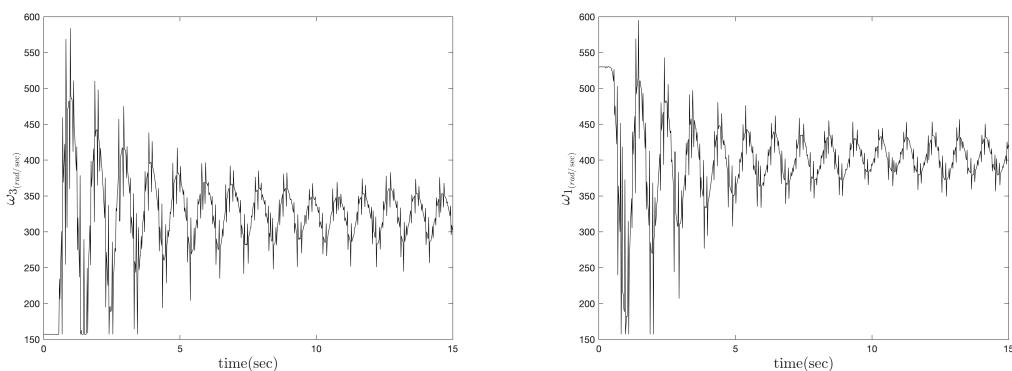
بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۱-۶-۱)، کanal رول در حضور کنترل کننده LQR در حدود پنج ثانیه به تعادل می‌رسد اما دارای خطای ماندگار است.

## ۲-۶-۱ شبیه‌سازی کanal رول استند در حضور کنترل‌کننده LQDG

در بخش شبیه‌سازی کanal رول استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQDG در بخش‌های [۲۲](#) و [۲۳](#) بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی از روش [TCACS ۱۶](#) استفاده شده است.



شکل ۱-۳۵-۱: عملکرد LQDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)



(ب) موتور شماره سه

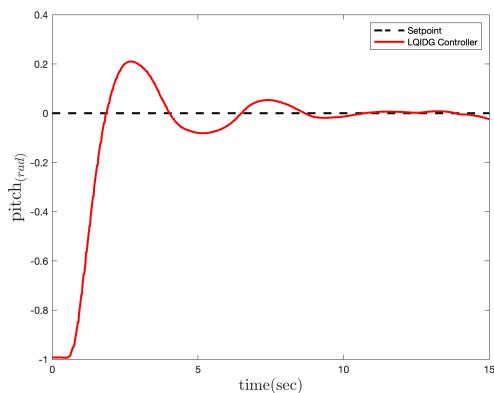
(ا) موتور شماره یک

شکل ۱-۳۶-۱: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)

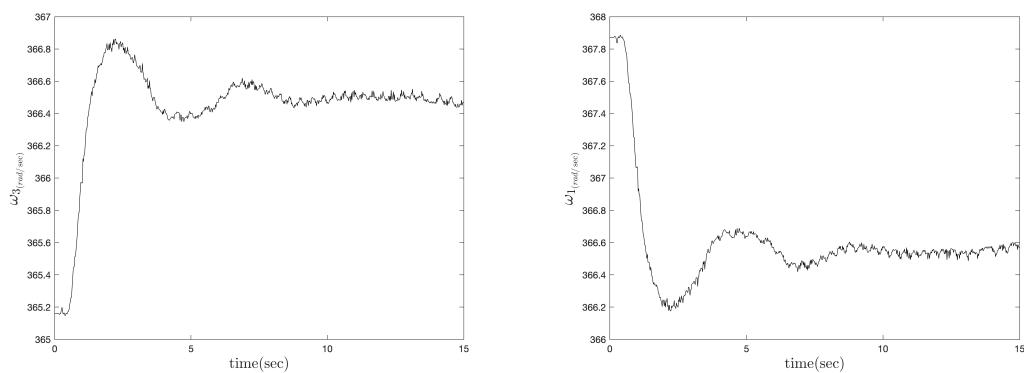
بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل [۲۲](#))، کanal رول در حضور کنترل‌کننده LQDG در کمتر از پنج ثانیه به تعادل می‌رسد اما دارای خطای ماندگار است ولی خطای مانگار آن نسبت به کنترل‌کننده بخش [۲۳](#) کمتر است. به دلیل خطای ماندگار، در بخش انگرال‌گیر به کنترل‌کننده اضافه می‌شود تا خطای مانگار استند را کم کند.

### ۱-۶-۱ شبیه‌سازی کanal رول استند در حضور کنترل‌کننده LQIDG

در بخش ۱-۳-۱ شبیه‌سازی کanal رول استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQDG در بخش‌های ۲ و ۳ بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی از روش TCACS [۱۶] استفاده شده است.



شکل ۱-۳۷-۱: عملکرد LQIDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)



(ب) موتور شماره سه

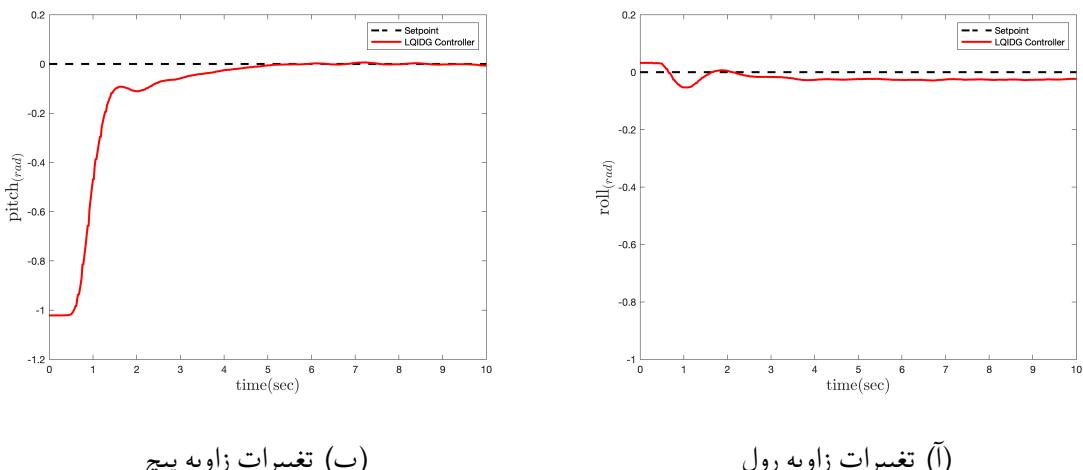
(ا) موتور شماره یک

شکل ۱-۳۸-۱: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)

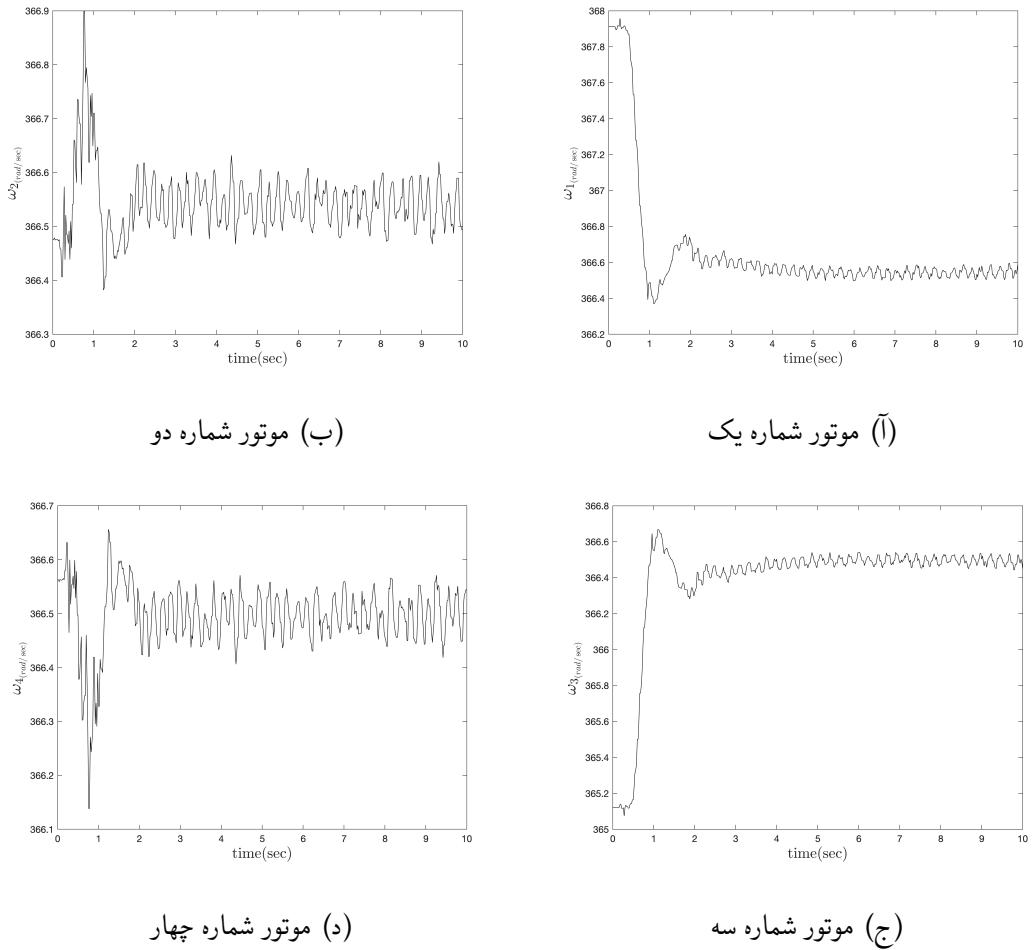
بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۲)، کanal رول در حضور کنترل‌کننده LQIDG در حدود پنج ثانیه به تعادل می‌رسد و خطای ماندگار آن در حدود صفر است.

## ۴-۶-۱ شبیه‌سازی کanal رول-پیچ استند در حضور کنترل‌کننده LQIDG

در بخش ۴-۳-۱ شبیه‌سازی کanal رول استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQIDG در بخش‌های ۲ و ۳ بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی از روش TCACS [۱۶] استفاده شده است.



شکل ۱: عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)

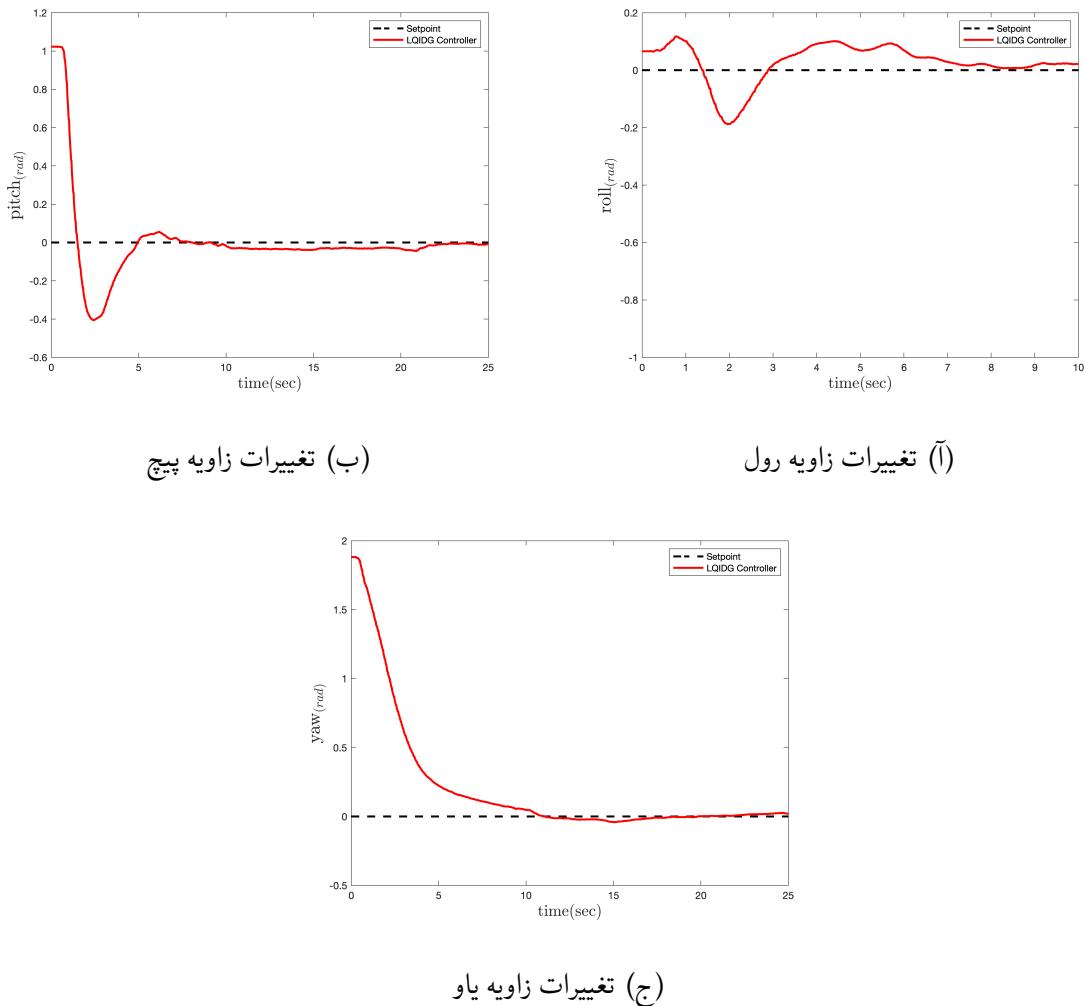


شکل ۱-۴۰: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)

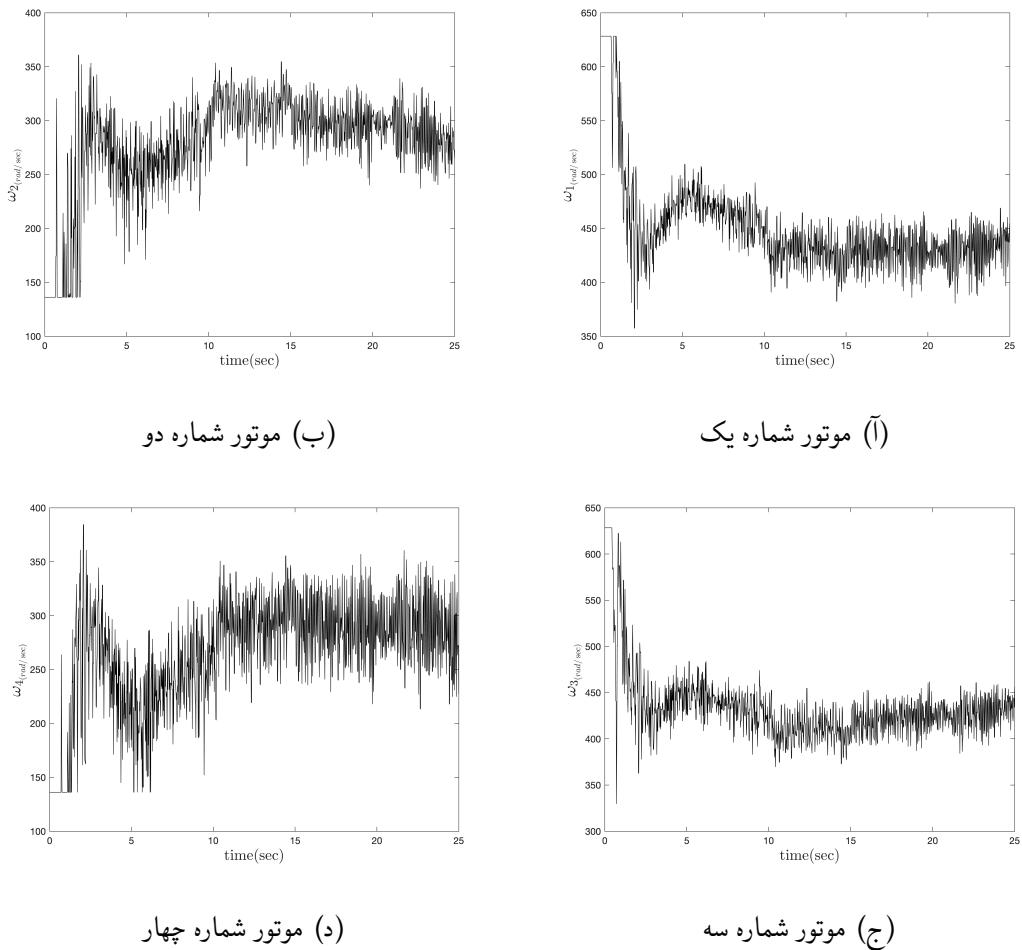
بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۱-۴۰)، کanal رول در حضور کنترل کننده LQIDG در حدود پنج ثانیه و کanal پیچ در حدود هشت ثانیه به تعادل می‌رسد و خطای ماندگار آن در حدود صفر است.

## ۱-۶-۵ شبیه‌سازی سه درجه آزادی استند در حضور کنترل کننده LQIDG

در بخش ۱-۶-۵ شبیه‌سازی کanal رول استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل کننده LQIDG پرداخته می‌شود. کنترل کننده LQDG در بخش‌های ۱-۶-۴ و ۱-۶-۶ بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی از روش TCACS [۱۶] استفاده شده است.



شکل ۱-۱: عملکرد کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)



شکل ۱-۴۲: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)

بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۱-۴۲)، کanal رول در حضور کنترل کننده LQIDG در حدود پنج ثانیه و کanal پیچ در حدود هشت ثانیه به تعادل می‌رسد و خطای ماندگار آن در حدود صفر است.

# مراجع

- [1] L. Sprekelmeyer. *These We Honor: The International Aerospace Hall of Fame*. 2006.
- [2] M. J. Hirschberg. A perspective on the first century of vertical flight. *SAE Transactions*, 108:1113–1136, 1999.
- [3] T. Lee, M. Leok, and N. H. McClamroch. Geometric tracking control of a quadrotor uav on  $\text{se}(3)$ . In *49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 5420–5425, 2010.
- [4] <http://gcrc.sharif.edu>. 3dof quadcopter, 2021. [Online; accessed November 2, 2021], Available at <https://cutt.ly/yYMvhYv>.
- [5] wired. the physics of drones, 2021. [Online; accessed June 8, 2021], Available at <https://www.wired.com/2017/05/the-physics-of-drones/>.
- [6] nobelprize.org. Jean tirole, 2021. [Online; accessed October 17, 2021], Available at <https://www.nobelprize.org/prizes/economic-sciences/2014/tirole/facts/>.
- [7] B. Djehiche, A. Tcheukam, and H. Tembine. Mean-field-type games in engineering. *AIMS Electronics and Electrical Engineering*, 1(1):18–73, 2017.
- [8] W. L. Brogan. *Modern control theory*. 1974.
- [9] J. Engwerda. Linear quadratic differential games: An overview. *Advances in Dynamic Games and their Applications*, 10:37–71, 03 2009.
- [10] P. Abeshtan. Attitude control of a 3dof quadrotor stand using intelligent backstepping approach. *MSc Thesis (PhD Thesis)*, 2016.

- [11] P. Zipfel. *Modeling and Simulation of Aerospace Vehicle Dynamics*. AIAA education series. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000.
- [12] A. Sharifi. Real-time design and implementation of a quadcopter automatic landing algorithm taking into account the ground effect. *MSc Thesis (PhD Thesis)*, 2010.
- [13] M. A. A. Bishe. Attitude control of a 3dof quadrotor stand using a heuristic nonlinear controller. January 2018.
- [14] E. Norian. Design of status control loops of a laboratory quadcopter mechanism and its pulverizer built-in using the automatic tool code generation. *MSc Thesis (PhD Thesis)*, 2014.
- [15] Model-based design, 2021. [Online; accessed December 16, 2021], Available at <https://www.pngegg.com/en/png-xdlhx>.
- [16] A. Karimi, H. Nobahari, and P. Siarry. Continuous ant colony system and tabu search algorithms hybridized for global minimization of continuous multi-minima functions. *Computational Optimization and Applications*, 45(3):639–661, Apr 2010.



Sharif University of Technology  
Department of Aerospace Engineering

Bachelor Thesis

## **LQIDG Controller for 3DOF Quadcopter Stand**

By:

**Ali BaniAsad**

Supervisor:

**Dr. Nobahari**

July 2022