

# طراحی هدایت بهینه مقاوم و کنترلر پیش بین مدل ربات هوایی تکبال با الهام از دانه درخت افرا

ایمان شفیعی نژاد\*

۱- استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری، تهران، ایران  
(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۹)

## چکیده

این پژوهش به طراحی و توسعه ربات هوایی تکبال الهام گرفته از دانه درخت افرا اختصاص دارد. هدف، ارائه سامانه‌ای کارآمد برای مأموریت‌های دقیق با قابلیت‌های خودکار است. ربات با بهره‌گیری از حسگرهای پیشرفته، دوربین‌های هوشمند و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، توانایی پرواز استوانه‌ای پایدار، حرکت در فضاهای محدود و جمع‌آوری داده‌های دقیق را دارد. معادلات دینامیکی سامانه استخراج و با روش شبه‌طیفی، استراتژی کنترل بهینه تدوین شد. برای پایداری در برابر اغتشاشات محیطی مانند بادهای جانبی، سیستم هدایت بهینه مقاوم مبتنی بر مدل عصبی-فازی طراحی گردید. همچنین، کنترلر پیش‌بین برای پیش‌بینی حالت‌های آینده و بهینه‌سازی ورودی‌ها در زمان واقعی توسعه یافت. این ترکیب توانست دقت و پایداری سامانه را در شرایط سخت تضمین کند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد این ربات با مصرف انرژی بهینه و مقاومت بالا، گزینه‌ای مناسب برای عملیات حساس مانند جست‌وجو و نجات است. این تحقیق گامی مؤثر در توسعه سامانه‌های هوایی هوشمند و پایدار محسوب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ربات هوایی، تک بال، هدایت بهینه مقاوم، سامارا، کنترلر پیش بین مدل

## Designing optimal Robust Guidance and Model Predictive controller for Mono-Wing Aerial Robot by the Maple Seed Tree Inspired

Iman Shafieenejad

### Abstract

This research concentrates on the design and development of a single-rotor aerial robot inspired by the maple seed. The objective is to provide an efficient system for precise missions with autonomous capabilities. The robot, equipped with advanced sensors, intelligent cameras, and artificial intelligence algorithms, is capable of stable cylindrical flight, navigation in confined spaces, and accurate data collection. The system's dynamic equations were extracted, and an optimal control strategy was formulated using the pseudospectral method. To ensure robustness against environmental disturbances such as crosswinds, a robust optimal guidance system based on a neuro-fuzzy model was designed. Additionally, a model predictive controller (MPC) was developed to predict future states and optimize inputs in real-time. This combination ensured the system's accuracy and stability under challenging conditions. Simulation results demonstrated that this robot, with its optimal energy consumption and high resilience, is a suitable option for sensitive operations such as search and rescue. This research represents a significant step forward in the development of intelligent and sustainable aerial systems.

**Key words:** Aerial Robot, Mono-wing, Robust Optimal Guidance, samara, Model Predictive Controller (MPC)

## مقدمه

درخت افرا با گونه‌های مختلف در اکثر مناطق جهان یافت می‌شود. پس از رسیدن، دانه‌های آن، از درخت جدا شده و هنگام سقوط، حرکت چرخشی خاصی را به نمایش می‌گذارد که باعث حرکت افقی و دور شدن از درخت می‌شود. دانه‌های افرا دارای یک توده متمرکز در مرکز و بال‌هایی هستند که فاصله زیادی از مرکز ثقل دارند. این بال‌ها از نزدیک به هسته به تدریج پهن تر شده و در انتها به یک نقطه تیز ختم می‌شوند. سرعت جریان هوا از مرکز به سمت شعاع بال‌ها افزایش می‌یابد، که این باعث تولید نیروی بالابر بیشتری می‌شود. همچنین در نزدیکی انتهای بال‌ها، ضخامت سطح باعث ایجاد گردابه‌های کوچک می‌شود. با کاهش ضخامت بال در نوک، نیروی درگ کمتر می‌شود.

اگر به دقت به بال‌ها (برگ‌ها) نگاه شود، رگبرگ‌هایی دیده خواهد شد که در قسمت جلویی بال که جدایش هوا اتفاق می‌افتد، متمرکز شده‌اند. این بافت ناهموار باعث ایجاد آشفتگی مناسبی در هوا شده و وزن و زاویه حمله بال را بهبود می‌بخشد. در سال‌های اخیر، نوآوری‌های جدیدی در زمینه پرواز وسایل هوایی کوچک با الهام از طبیعت به وجود آمده است. این سیستم‌ها که دارای قابلیت مانور بسیار بالایی هستند، برای پرواز در محیط‌های محدود و ایده‌آل طراحی شده‌اند. مأموریت‌های شناسایی معمولاً نیازمند سطح بالایی از خودمختاری به دلیل پویایی سریع سیستم و محدودیت‌های ارتباطی در محیط‌های عملیاتی خاص (مانند مناطق کوهستانی، صخره‌ها و ساختمان‌ها) هستند.

توسعه یک مدل فضای حالت برای دینامیک سیستم در شرایط پرواز تعادلی می‌تواند فرآیند طراحی کنترلر مشاهده‌گر را برای افق‌های آینده این حوزه تسهیل کند. در پهپادهای کوچک، کشورهای پیشرو استانداردهایی را تدوین کرده‌اند. مناسب‌ترین گزینه‌ها برای پرنده‌های این حوزه شامل بال‌های ثابت، بال‌های چرخشی و بالزن‌ها هستند. پرنده‌های بال ثابت به دلیل سرعت، سادگی و دینامیک شناخته‌شده خود مزیت دارند،

اما پرواز رو به جلو آن‌ها باعث محدودیت در عملکردشان در محیط‌های همراه با اغتشاش می‌شود. این محدودیت‌ها را می‌توان با استفاده از پرنده‌های چرخشی و بالزن‌ها بهبود بخشید. مدل‌های دینامیکی خطی میکرو بالگردها توسط کونروی [۱] و با استفاده از ابزار شناسایی سیستم توسط تیسچلر و رمپل [۲] و متلر [۳] شرح داده شده‌اند.

یکی از چالش‌های مهم در مدل‌سازی دینامیک پرواز پهپادهای تک‌بال، به‌ویژه در ابعاد کوچک، کمبود اطلاعات کافی در زمینه آیرودینامیک جریان‌هایی با عدد رینولدز پایین است. همچنین، این پرنده‌ها به دلیل کم بودن اینرسی، به شدت تحت تأثیر تندبادها قرار می‌گیرند و حساسیت بالایی نسبت به اغتشاشات محیطی دارند. این پیچیدگی‌ها را می‌توان با شناسایی یک مدل خطی که رفتار سیستم را در پاسخ به نیروهای کنترلی توصیف می‌کند، کاهش داد. بنابراین یکی از اهداف این پژوهش، توصیف دینامیک پرواز و طراحی سیستم کنترل برای پهپاد میکرو تک‌بال چرخان است که از طبیعت و به‌ویژه از دانه‌های درخت افرا یا سامارا الهام گرفته است. با توجه به تازگی موضوع، در سال‌های اخیر تحقیقات بسیاری در حوزه تئوری و فناوری این وسیله پرنده انجام شده است. در اولریش، پاینز و جراردی برآورد خطا و شناسایی از مدل دینامیکی وسیله را با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده توسط سیستم ردیابی بصری ارائه کردند و با استفاده از یک پاسخ مبتنی بر سیستم شناسایی فرکانس بسته در ارتش ایالت متحده واقع در مافت فیلد کالیفرنیا، توسعه داده شده است. شناسایی سیستم بر اساس دامنه فرکانس برای مدل‌های خطی معتبر بوده و برای آشفتگی‌های کوچک در شرایط تریم شده محدود است. ساختار مدل بر اساس کاهش دینامیک طولی از یک هلیکوپتر در شرایط شناوری (هاور کردن) به یک سیستم خطی توسط مشتقات پایداری بنا شده است در نطالع‌ه ای توسط روزن و همکاران انجام شده است [۵]. علاوه بر این، سارریس و همکاران مدل خطی ارائه‌شده را با پیاده‌سازی یک کنترلر خطی با بازخورد و استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده

توسط سیستم ردیابی بصری ارزیابی کردند. در این تحقیق، عملکرد مدل در شرایط آزمایشی مختلف مورد تأیید قرار گرفت [۶]. در ادامه، نیوکام و همکاران تلاش‌های گسترده‌ای در آزمایشگاه دانشگاه مریلند برای درک دینامیک حاکم بر سامانه تک‌بال سامارا انجام دادند. این پژوهش بر شناخت ویژگی‌های آیرودینامیکی و دینامیکی این سامانه متمرکز بوده و نقش مهمی در توسعه وسایل هوایی کوچک و خودکار داشت [۷].

جیمسون و همکارانش در آزمایشگاه شرکت نظامی آمریکا، لاکهید مارتین بر روی طراحی سامانه هوایی روتورکرفت تک‌بال سامارای کار کردند. نتایج این طراحی بدین صورت بود که وزن این سامانه حدود ۱۰ گرم بوده و برای مدت زمان ۲۰ دقیقه به شعاع ۱ کیلومتر با سرعتی برابر ۵-۱۰ متر بر ثانیه پرواز می‌کرد. شایان ذکر است وزن خود وسیله حدود ۸ گرم و وزن دوربین نصب شده در آن حدود ۲ گرم بوده، لذا وزن کلی سامانه فوق به ۱۰ گرم می‌رسد [۸]. همچنین آقای یانگر به آنالیز و طراحی سیستم‌های پیشران ملخ دار برای میکرو پهباد تک‌بال سامارای پرداخت که در نمونه اولیه این سامانه از این سیستم‌های پیشران الکتریکی به صورت ملخ‌های نصب شده در نوک بال، برای بهبود نیروی پیشران استفاده شده است لذا در اصل این گروه تحقیقی بر روی ملخ این ربات کار کردند [۹]. در پژوهشی، عباداللهی و همکاران روشی جدید برای طراحی قانون هدایت جهت ردیابی یک هدف پرنده متحرک بر پایه کنترل مدل پیش‌بین مقاوم ارائه کردند. آن‌ها معادلات حرکتی را با استفاده از معادلات غیرخطی سینماتیکی بیان کرده و از نامعادلات ماتریسی خطی برای بهینه‌سازی تابع هزینه و استخراج سیگنال کنترلی استفاده نمودند [۱۰]. دو و اسمیت چارچوب کنترلی جدیدی برای به حداکثر رساندن برد گلاید وسایل هوایی بدون سرنشین توسط دو و اسمیت طراحی شد. این چارچوب از معماری یادگیری تقویتی بهره می‌برد و هدف آن بهبود عملکرد وسیله هوایی در شرایط مختلف محیطی است. روش پیشنهادی آن‌ها توانایی سازگاری و بهینه‌سازی لحظه‌ای در برابر تغییرات محیطی را

ارائه می‌دهد [۱۱] واسکز و گارسیا در یک پژوهش الگوریتمی تکراری برای کنترل پیش‌بین مدل وسایل هوایی بدون سرنشین ارائه کردند. این الگوریتم سیگنال‌های کنترلی بهینه را برای هدایت وسیله هوایی تولید کرده و از رویکردی تکراری برای بهینه‌سازی عملکرد وسیله در شرایط مختلف بهره بردند. هدف اصلی پژوهش آنان دستیابی به دقت و پایداری بالاتر در هدایت مسیرهای پیچیده بود [۱۲]. روزا و لویز در یک مطالعه به طراحی و پیاده‌سازی کنترل پیش‌بین مدل برای وسایل هوایی بدون سرنشین پرداختند. روش پیشنهادی آن‌ها شامل مدل‌سازی دقیق، طراحی کنترلر و پیاده‌سازی یک سیستم پیش‌بین برای دنبال کردن مسیرهای از پیش تعیین شده است. این رویکرد توانایی مدیریت تغییرات محیطی و دقت در مسیر را تضمین می‌کند [۱۳].

با توجه به کاربردهای گسترده سامانه تک‌بال در هر دو حوزه نظامی و غیرنظامی، بررسی دقیق و تخصصی این موضوع ضروری به نظر می‌رسد. تاکنون، هدایت و کنترل این سامانه‌ها عمدتاً مبتنی بر استفاده از رادیوکنترل‌ها بوده است. با این حال، این مقاله با هدف ارائه رویکردی نوین، به طراحی سامانه تک‌بال و ارتقای قابلیت‌های خودکار آن از طریق پیاده‌سازی هدایت بهینه مقاوم و کنترلر پیش‌بین مدل<sup>۱</sup> می‌پردازد. این پژوهش، با بهره‌گیری از اصول علمی و به صورت گام‌به‌گام، طراحی سامانه، استخراج معادلات دینامیکی مرتبط با هدایت و کنترل خودکار آن را مورد بررسی قرار داده است. نتایج این تحقیق می‌تواند افق جدیدی را در توسعه سامانه‌های هوایی هوشمند و خودران با ابعاد کوچک ترسیم کرده و به عنوان پایه‌ای مستحکم برای پیشرفت در این حوزه عمل کند.

#### دانه درخت افرا و ربات هوایی الهام گرفته شده

در این مقاله به یک مدل طراحی شده به اسم تک‌بال پرداخته شده که طراحی مدل فوق ایده‌ای الهام گرفته شده از دانه درخت افرا است. دانه درخت افرا، به دلیل برگ‌های پيچان خود دارای

<sup>1</sup> MPC (Model Predictive Control)

**شکل ۱- برگ و دانه درخت افرا**

در این طرح، به این برگ یک ملخ اضافه شده است که فرآیند پیچیدن و فرود این برگ را معکوس کرده و به صعود و پیچیدن تبدیل می‌کند. در گام نخست از شروع فرآیند طراحی، به جمع‌آوری اطلاعاتی از این طرح پرداخته شد و در نهایت یک مدل از آن طراحی شده است.

**فرآیند طراحی**

در فرآیند طراحی مراحل زیر مد نظر بوده است.

۱. گردآوری ایده‌ها و مفاهیم: در این مرحله، مفاهیم و ایده‌های مختلفی جمع‌آوری می‌شوند که ممکن است برای حل مسئله مورد نظر یا ایجاد محصولی مناسب باشند.
  ۲. ارزیابی و انتخاب ایده‌ها: پس از گردآوری ایده‌ها، این ایده‌ها بررسی شده و از لحاظ امکان‌پذیری فنی، مالی، و موارد دیگر ارزیابی می‌شوند. سپس ایده‌های مناسب انتخاب می‌شوند.
  ۳. تجسم و ایجاد مدل‌های مفهومی: ایده‌های انتخاب شده به شکل مدل‌ها و نمونه‌های اولیه یا مفهومی شکل داده می‌شوند تا بیانگر آنچه که می‌تواند در آینده ایجاد شود، باشند.
  ۴. آزمایش و بازخورد: مدل‌ها و نمونه‌های مفهومی ساخته شده مورد آزمایش و بازخورد قرار می‌گیرند تا از عملکرد و کارایی آنها در مقابل نیازها و اهداف انتظاری اطمینان حاصل شود.
  ۵. توسعه و پیشروی به مراحل بعدی: پس از آزمایش‌ها و بازخوردهای لازم، ایده‌های مفهومی که قابلیت پیشروی دارند، برای مراحل بعدی طراحی و توسعه انتقال داده می‌شوند.
- طراحی مفهومی و طراحی اولیه مرحله مهمی در فرآیند طراحی محصولات و راه‌حل‌های مهندسی است که اساساً تعیین‌کننده‌ی شکل و مسیر پیش روی تحقیق فوق بوده است. در شکل ۳ درخت واره پهباد تکبال خودران نشان داده شده است.
- در ادامه، جدول محاسبات وزن سیستم، ممان اینرسی سیستم، حجم و .... به کمک نرم افزار کتیا آورده شده است. بر اساس طراحی صورت گرفته ابعاد  $۷۵,۶۵ * ۸۹۲,۸۹ * ۵۴۱,۴۲$  میلی‌متر ( بر اساس جدول ۱) مد نظر قرار گرفته شده است. برای مدلسازی این طرح از نرم افزار مدلسازی کتیا استفاده شده است.

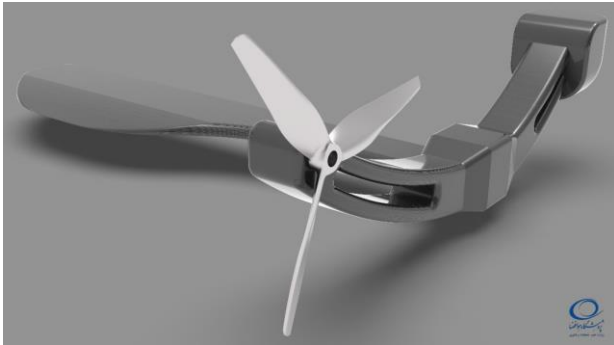
ارگونومی خاص و دانه‌ای که در انتهای خود دارد، در هنگام افتادن از ارتفاع، به دور خود می‌پیچد و پایین می‌آید. به عنوان مثال، رد این پیچش و فرود را می‌توان به شکل ظاهری یک فنر تشبیه کرد (شکل (۱)).

ربات هوایی مونوکوپتر تکبال با سایر ربات‌های هوایی مانند کوادروتورها تفاوت‌های اساسی در طراحی، دینامیک پرواز، و کاربرد دارد. برخلاف کوادروتورها که از چهار موتور و پروانه برای تولید نیروی لیفت و کنترل حرکت استفاده می‌کنند، مونوکوپتر تکبال از یک بال و یک موتور پیشران بهره می‌برد که حرکت آن را به شکل آیرودینامیکی پایدار می‌کند. این طراحی منحصربه‌فرد باعث ساده‌تر شدن ساختار مکانیکی و کاهش تعداد قطعات متحرک می‌شود. در نتیجه، مونوکوپترهای تکبال به وزن کمتر و مصرف انرژی پایین‌تر دست می‌یابند.

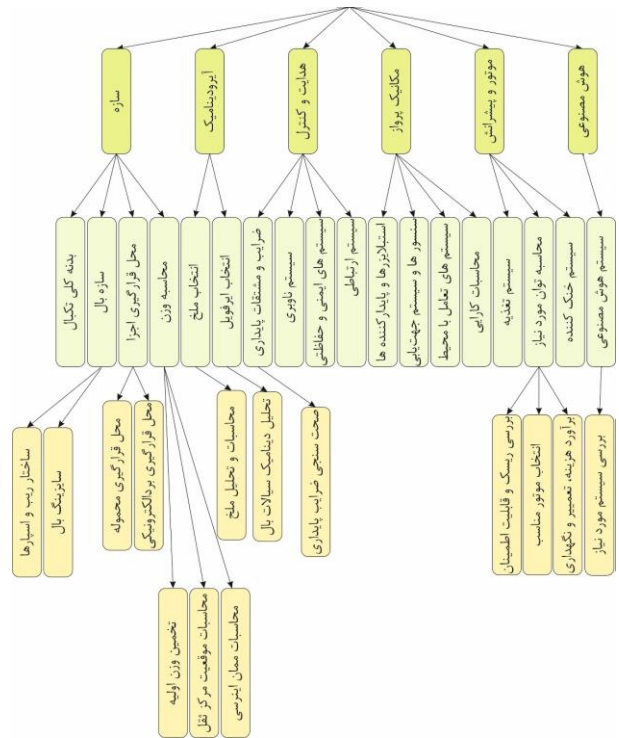
از جمله مزایای مهم مونوکوپترهای تکبال نسبت به کوادروتورها می‌توان به کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری به دلیل طراحی ساده‌تر اشاره کرد. این ربات‌ها به دلیل مصرف انرژی بهینه، برای مأموریت‌های بلندمدت یا پرواز در محیط‌هایی با منابع انرژی محدود مناسب‌تر هستند. علاوه بر این، مونوکوپترهای تکبال می‌توانند در شرایط محیطی سخت‌تر، مانند بادهای متغیر یا مناطق پرتراکم، عملکرد پایدارتری داشته باشند. ساختار ساده و سبک آنها همچنین امکان حمل محموله‌های خاص در مأموریت‌های شناسایی، نجات، یا پایش محیطی را فراهم می‌کند. این ویژگی‌ها، مونوکوپترهای تکبال را به گزینه‌ای جذاب برای کاربردهای خاص، به‌ویژه در محیط‌هایی که چابکی و مصرف انرژی پایین اهمیت دارند، تبدیل کرده است.



(۶) نمای طراحی شده از دو زاویه جانبی متفاوت آورده شده است.



شکل ۲- نمونه رندر گرفته شده از تک بال و ملخ به کار رفته در این مدل

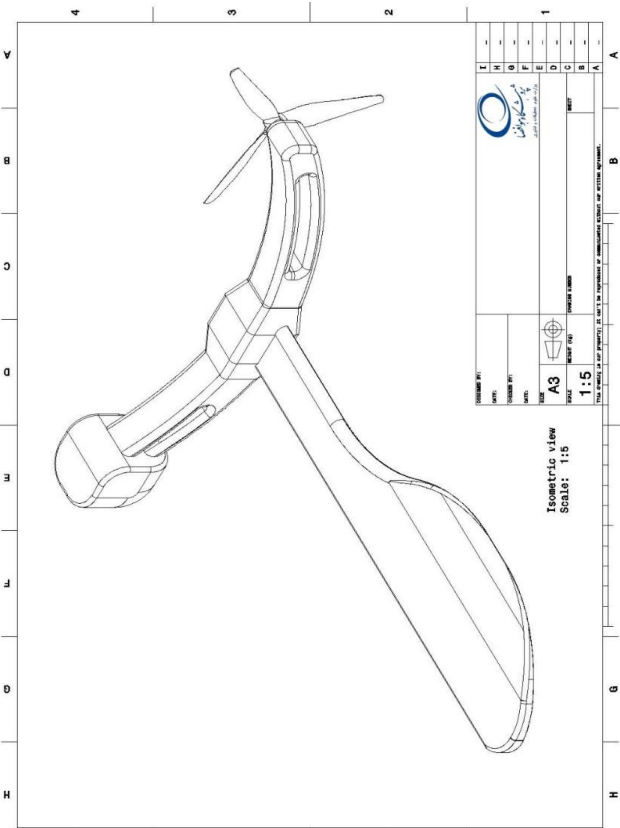


شکل ۲ - درخت محصول ربات تکبال

جدول ۱ - محاسبات وزن و ممان اینرسی پهناد تک بال

Mass:	3 194.67	grams
Volume:	331712.48	cubic millimeters
Surface area:	143345.01	square millimeters
Center of mass:	X = 75.65(millimeters)	
	Y = 892.89 (millimeters)	
	Z = 541.42(millimeters)	
Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square millimeters) Taken at the center of mass:	$I_x = (0.91, 0.28, -0.32)$	$P_x = 506691931.00$
	$I_y = (-0.42, 0.51, -0.75)$	$P_y = 531640348.73$
	$I_z = (-0.04, 0.81, 0.58)$	$P_z = 622858532.15$
Moments of inertia: (grams * square millimeters) Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system. (Using positive tensor notation.)		
$I_{xx} = 511286527.98$	$I_{yy} = 9443615.88$	$I_{zz} = -4922168.39$
$I_{xy} = 9443615.88$	$I_{yy} = 590174930.76$	$I_{yz} = -45203947.88$
$I_{zx} = -4922168.39$	$I_{zy} = -45203947.88$	$I_{zz} = 559729353.15$
Moments of inertia: (grams * square millimeters) Taken at the output coordinate system. (Using positive tensor notation.)		
$I_{xx} = 18404027042.89$	$I_{yy} = 1830023994.80$	$I_{zz} = 1343876139.53$
$I_{xy} = 1830023994.80$	$I_{yy} = 7217754549.19$	$I_{yz} = 8513289921.40$
$I_{zx} = 1343876139.53$	$I_{zy} = 8513289921.40$	$I_{zz} = 12398728537.53$

در گام نخست برای مدل کردن طرح فوق، از بال یا برگ این مدل شروع شده و طبق نتایج به دست آمده از محاسبات بال، ایرفویل NACA 1422 برای این طرح در نظر گرفته شده است. در نهایت مدل اولیه طراحی شده در شکل (۲) آورده شده است. همچنین در شکل (۳) نمای ایزومتریک ربات تک بال طراحی شده نشان داده شده است. در ادامه در شکل (۴) زیر بخش های ربات هوایی تک بال آورده شده است. شکل های (۵) و



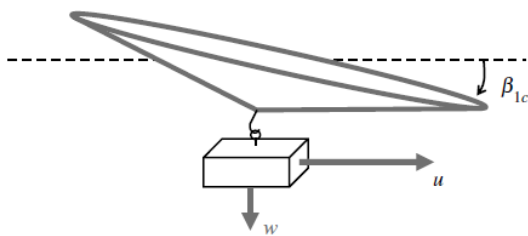
شکل ۳- نمای ایزومتریک نقشه گیری شده از تک بال در مقیاس ۱ به ۵

### رفتار و معادلات دینامیکی ریزپرنده سامارای

به منظور ساده کردن توصیف دینامیکی وسیله، فرض می شود که به واسطه حرکت نوک بال در هر دور دیسک صفحه ای وجود دارد که به آن تی پی پی<sup>۲</sup> می گویند. به منظور تشریح دینامیک ربات تکبال فرض می شود که یک جسم صلب مجازی به مرکز دیسک از طریق یک لولای مجازی متصل شده است. مرکز ثقل جسم صلب مجازی دقیقاً زیر مرکز دیسک است. هیچ گونه گشتاور آیرودینامیکی از طریق لولای موهومی امکان انتقال ندارد [۱۴-۱۸].

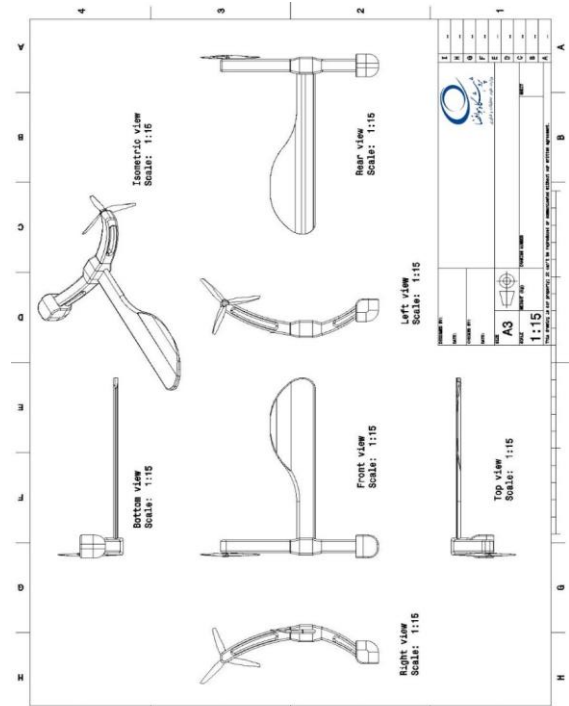
دینامیک موقعیت و سمت گیری وسیله به دو قسمت تقسیم می شود:

الف) دینامیک روتور که توصیف کننده حرکت کل سامانه است.  
 ب) دینامیک مکانی ربات که با استفاده معادلات حرکت انتقالی. برای حرکت یک جرم نقطه ای به وسیله نیروهای اعمالی بر صفحه روتور به دست می آید.

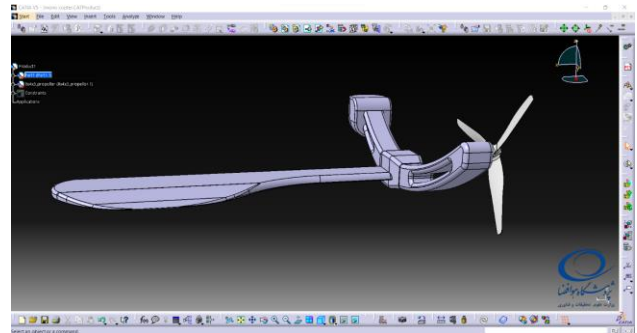


شکل ۷- مدل کردن تکبال به روتور و یک جسم فرضی لولاشده

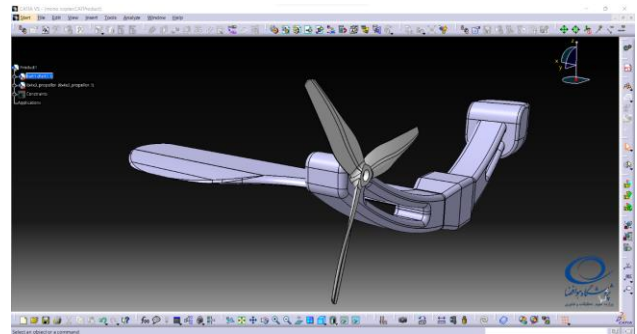
پرواز پیشروی وسیله در یک دستگاه بدون چرخش که به جسم صلب مجازی متصل است فرموله می شود. جهت بردار سرعت پیشروی  $u$  به صورت تصویر بردار سرعت به روی صفحه  $x-y$  تعریف می شود، چرا که انتقال تنها در جهت  $u$  اتفاق می افتد. سرعت بالا رفتن هم در جهت محور  $i_z$  است. زوایای حمله ( $\alpha$ ) و مسیر ( $\gamma$ ) که با هم برابر و مخالف هم هستند در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۴- نمای زیر بخش های از تک بال در مقیاس ۱ به ۱۵



شکل ۵- نمای پشت تک بال از صفحه طراحی نرم افزار کتیا



شکل ۶- نمای جلو تک بال از صفحه طراحی نرم افزار کتیا

<sup>2</sup> Tip Path Plane

است. مجموعه معادلات پیشنهادی در دو دسته اصلی تنظیم شده‌اند: دسته اول شامل سه معادله سینماتیکی است که حرکت سامانه را در فضای سه‌بعدی توصیف می‌کند، و دسته دوم به بررسی اثر نیروهای آیرودینامیکی مانند پسا، برا و پیشران می‌پردازد. همچنین، فرض شده که اندازه سرعت در این معادلات ثابت باقی می‌ماند. در بخش پایانی، معادلات حرکت سیستم تک‌بال با در نظر گرفتن تأثیرات خطی باد جانبی مورد بحث قرار گرفته است. لذا معادلات زیر بیانگر رفتار دینامیکی ۶ درجه آزادی ربات هوایی تک بال است [۱۹-۲۱].

$$\frac{dx}{dt} = V \cos(\varphi) \cos(\psi) + u \quad (1)$$

$$\frac{dy}{dt} = V \cos(\varphi) \sin(\psi) + v \quad (2)$$

$$\frac{dz}{dt} = V \sin(\varphi) + w \quad (3)$$

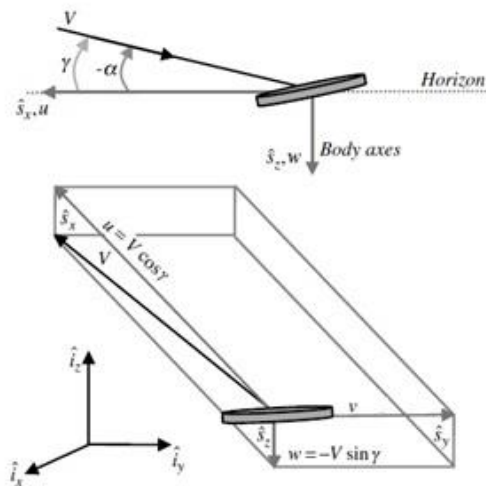
$$\frac{dV}{dt} = \frac{(T-D)}{m} - g \sin(\varphi) \quad (4)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{(L \cos(\sigma) - mg \cos(\varphi))}{mV} \quad (5)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{L \sin(\sigma)}{mV \cos(\varphi)} \quad (6)$$

که در معادلات بالا  $\varphi$  و  $\psi$  بیانگر زوایای حرکتی در فضای سه بعدی سامانه هستند. همچنین  $V$  بیانگر سرعت سامانه است و  $L$  و  $D$  به ترتیب بیانگر نیروهای پیشران، برآ و پسا هستند. همچنین  $u$  و  $v$  و  $w$  بیانگر سرعت‌های بی بعد شده باد جانبی در سه راستا اصلی هستند. همچنین زوایای  $\alpha$  و  $\sigma$  به ترتیب بیانگر زاویه حمله و بنک<sup>۳</sup> هستند.

برای حل مسئله کنترل بهینه فوق به جهت طراحی مسیر بهینه از روش شبه طیفی استفاده شده است. در ادامه معیار بهینگی و همچنین معیار نهایی آورده شده است. معیار بهینگی مسئله فوق به صورت کمترین زمان و ارضای شرایط انتهایی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۸ - تعریف زوایای حمله و لغزش جانبی نسبت به مولفه‌های سرعت

### حرکت انتقالی

در طراحی مسیر و انتقال ربات هوایی تک‌بال، هدف اساسی ایجاد مسیری بهینه است که هم بهینه‌سازی مصرف انرژی و زمان را تضمین کند و هم به نیازهای مانورپذیری پاسخ دهد. این مسیر باید با در نظر گرفتن محدودیت‌های فیزیکی ربات، از جمله محدودیت‌های دینامیکی، محدوده پروازی و سرعت، به شکلی دینامیکی طراحی شود. برای رسیدن به این هدف، معمولاً از روش‌های بهینه‌سازی حرکت استفاده می‌شود، از جمله الگوریتم‌های جستجو و بهینه‌سازی بر مبنای نمودارهای زمانی. این تکنیک‌ها با استفاده از مدل‌های دینامیکی ربات ترکیب می‌شوند تا مسیری انتقالی ایجاد شود که ربات را به شکل بهینه به سمت هدف هدایت کند.

برای تحلیل دقیق‌تر یک سیستم دینامیکی و شناخت جامع‌تر از رفتار حرکتی آن، لازم است که از یک مجموعه معادلات برای شبیه‌سازی حرکت سامانه استفاده شود تا ویژگی‌های پیچیده‌تر سامانه تک‌بال را به خوبی توصیف کند. در این مرحله، یک سیستم دینامیکی که نیروهای وارد بر سامانه را نیز در نظر می‌گیرد، مورد مطالعه قرار گرفته است. برخلاف پژوهش‌های پیشین که به بررسی سیستم تک‌بال به صورت سه‌بعدی نپرداخته‌اند و تأثیرات باد جانبی را نادیده گرفته‌اند، این تحقیق به صورت نوآورانه این عوامل را وارد مدل‌سازی کرده

<sup>3</sup> Bank angle

است و درجه چندجمله‌ای‌ها متغیر است. به عبارتی درجه چندجمله‌ای‌ها که فرآیند بسط دادن توسط آن‌ها صورت می‌گیرد پویا هستند که از مزایای این روش است. به صورت مرسوم در روش‌های شبه‌طیفی از توابع و نقاط چپیش<sup>۶</sup> به عنوان توابع پایه و گره‌های هم‌گذاری استفاده می‌شود.

### روش شبه طیفی لژاندر- گاووس- لوباتو

در این روش متغیرهای حالت به صورت زیر توسط چندجمله‌ای‌های لاگرانژ بسط داده می‌شوند.

$$x(\tau) = \sum_{i=1}^K x(\tau_i) L_i(\tau) \quad (9)$$

در بسط متغیر حالت نقاط  $[\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_k]$  تعداد  $K$  گره مطرح در این روش است. همچنین در قدم بعد تابع هزینه یا همان معیار بهینگی به صورت زیر بسط داده می‌شود.

$$J = \frac{t_f - t_0}{2} \sum_{i=1}^k \Omega_i^{LGL} g[x(\tau_i), u(\tau_i), \tau_i] \quad (10)$$

که در رابطه بالا  $\Omega_i^{LGL}$  ضرایب وزنی تخمین انتگرال لژاندر- گاووس- لوباتو است.

$$L_j(t) = \prod_{i=1, i \neq j}^k \frac{t - t_i}{t_j - t_i} \quad (11)$$

### روش شبه طیفی لژاندر- گاووس<sup>۷</sup>

اختلاف این روش با روش الف در انتخاب نقاط گره است. در این روش نقاط گره به صورت مقابل  $\tau_0 = -1, \tau_1 > -1, \tau_k < 1, \tau_{k+1} = 1$  بیان می‌شوند. تنها تفاوت در معیار بهینگی ضرایب وزنی است. در بیان مشتق متغیر حالت که هم در این بخش مطرح است و هم در بخش الف به آن اشاره شده است، به صورت زیر بیان می‌شود.

$$DX = D_0 X_0 + D_1 X = \frac{t_f - t_0}{2} F \quad (12)$$

که در آن بردارهای بالا به صورت زیر بیان می‌شود.

$$J_{tot} = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} (x_{if}^a - x_{if}^n)^2 + \int_0^{t_f} dt \quad (7)$$

که بخش ترمینال یا انتهایی معیار بهینگی فوق معادل زیر است.

$$J_{terminal} = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} (x_{if}^a - x_{if}^n)^2 = \frac{1}{2} (x_f^a - x_f^n)^2 + \frac{1}{2} (y_f^a - y_f^n)^2 + \frac{1}{2} (z_f^a - z_f^n)^2 \quad (8)$$

در عبارت ریاضی بالا  $x_f^a$  بیانگر مقدار متغیر حالت در انتها بر اساس نتایج حاصل از الگوریتم ارائه شده است. همچنین  $x_f^n$  بیانگر مقدار متغیر حالت به صورت پیش‌فرض است که باید به آن مکان، سامانه بر اساس یک مسیر بهینه برسد.

شرایط مرزی مسئله به صورت  $x_0(t_0) = y_0(t_0) = z_0(t_0) = 0(m)$  در نظر گرفته می‌شود. همچنین میزان سرعت سامانه را ثابت در نظر گرفته و معادل  $V=5(m/s)$  فرض می‌گردد. در ادامه شرایط مرزی در انتها برای مسئله فوق به صورت  $x_f(t_f) = 15(m), y_f(t_f) = 15(m), z_f(t_f) = 15(m)$  مدنظر قرار می‌گیرد.

### روش شبه طیفی

در این مقاله از روش شبه طیفی<sup>۴</sup> که از روش‌های رایج و قدرتمند حل مسائل کنترل بهینه بوده مورد استفاده قرار گرفته است. در واقع روش شبه طیفی را می‌توان یک روش هم‌گذاری متعامد سراسری<sup>۵</sup> دانست. این روش بر مبنای بسط متغیرهای حالت و کنترل و گسسته‌سازی‌ها است. بر خلاف روش‌های محلی هم‌گذاری که درجه چند جمله‌ای که سیستم توسط آن بسط داده می‌شود که درجه چند جمله‌ای ثابت و تعداد گره‌ها متفاوت است، در روش‌های شبه‌طیفی (سه روش مرسوم آن بحث خواهد شد) تعداد گره‌های ایجاد شده در مسئله ثابت

<sup>6</sup> Chebyshev

<sup>7</sup> Legendre- Gauss, Pseudo-spectral method (GPM)

<sup>4</sup> Pseudo-spectral method

<sup>5</sup> Global orthogonal collocation method

شرح اجمالی از سه روش شبه طیفی پرداخته شود. در این راستا برای استفاده از روش شبه طیفی در این مقاله از مدل گره‌های لژاندر- گاووس استفاده می‌شود.

در ادامه نتایج حاصل از شرایط مرزی و معیار بهینگی در نظر گرفته شده در مقایسه با شرایط تحت اغتشاشات مورد بررسی قرار گرفته است. روش شبه طیفی برای حل مسائل کنترل بهینه به دلایل متعددی انتخاب می‌شود. این روش مبتنی بر استفاده از توابع پایه‌ای چون چندجمله‌ای‌های چبیشف یا لگندر و گره‌های خاص (مانند گره‌های چبیشف-گوس یا لگندر-گوس) است که منجر به دقت بالا و کارایی محاسباتی می‌شود. در ادامه، دلایل انتخاب این روش و مزایای آن نسبت به روش‌های دیگر ارائه می‌شود.

دلایل انتخاب روش شبه طیفی

۱. دقت بالا در تقریب مسائل دینامیکی

روش‌های شبه طیفی از توابع پایه‌ای چندجمله‌ای درجه بالا استفاده می‌کنند که می‌توانند پاسخ‌های دقیق تری را در مسائل دینامیکی با تغییرات سریع یا پیچیدگی‌های غیرخطی ارائه دهند.

این روش به‌طور خاص برای مسائل کنترل بهینه که شامل دینامیک غیرخطی و قیود پیچیده هستند، مناسب است.

۲. کارایی محاسباتی

با استفاده از تعداد کمتری از نقاط گسسته‌سازی (گره‌های شبه طیفی)، می‌توان به دقتی مشابه یا بالاتر از روش‌های دیگر (مانند روش‌های تفاضل محدود یا اجزای محدود) دست یافت.

این ویژگی باعث کاهش حجم محاسبات و افزایش سرعت حل مسئله می‌شود.

۳. قابلیت حل مستقیم

روش‌های شبه طیفی به‌طور مستقیم مسئله کنترل بهینه را به یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی<sup>۹</sup> تبدیل می‌کنند. این فرآیند مستقیم به کاهش پیچیدگی و خطاهای ممکن در تبدیل کمک می‌کند.

$$X_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix}; \quad X = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$$F = \begin{bmatrix} F(x_1, u_1, \tau_1) \\ \vdots \\ F(x_k, u_k, \tau_k) \end{bmatrix}$$

که هر سطر از بردارهای  $X_0$  و  $X$  متناظر با مقدار متغیر حالت در گره ابتدایی و یا  $K$  گره داخلی به ترتیب هستند.

### روش شبه طیفی لژاندر- گاووس- رادو<sup>۸</sup>

این روش بر اساس در نظر گرفتن مسائل زمان انتهایی نامتناهی است. در این روش ابتدا بازه  $[0, \infty]$  با استفاده از تبدیل بیان شده در زیر به حوزه  $[-1, 1]$  نگاشت می‌شود.

$$t = \frac{1+\tau}{1-\tau} \quad (14)$$

بسط متغیر حالت مانند روش‌های الف و ب است اما معیار بهینگی در آن به فرم زیر بیان می‌شود.

$$J = \sum_{i=1}^k \frac{1}{(1-\tau_i)^2} w_i^{LGR} g[x(\tau_i), u(\tau_i), \tau_i] \quad (15)$$

چنانکه بحث شد  $w_i^{LGR}$  ضرایب وزنی تخمین انتگرال است. همچنین معادلات دیفرانسیلی مطرح در یک مسئله کنترل بهینه به گونه زیر مطرح می‌شوند.

$$D^{LGR} \lambda^{LGR} = \text{diag}\left(\frac{1}{(1-\tau_i)^2}\right) F^{LGR} \quad (16)$$

که در آن بردارهای مطرح شده در بالا به فرم زیر بیان می‌شود.

$$X^{LGR} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix}; \quad F^{LGR} = \begin{bmatrix} F(x_1, u_1, \tau_1) \\ \vdots \\ F(x_k, u_k, \tau_k) \end{bmatrix} \quad (17)$$

شایان ذکر است چنانچه بحث شد روش فوق در مسائل زمان انتهایی نامتناهی است، و نقاط گره لژاندر- گاووس- رادو شامل نقطه پایانی نیستند. همچنین ماتریس مشتق بالا دارای درمینیان صفر است. سعی شد که در بخش الف و ب و ج به

<sup>9</sup> Nonlinear Programming (NLP)

<sup>8</sup> Legendre- Gauss- radau

واقعی سیستم و محیط به روزرسانی شود. سیستم عصبی-فازی و نحوه عملکرد آن سیستم عصبی-فازی ترکیبی از منطق فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی است که از مزایای هر دو روش بهره می‌برد. منطق فازی با استفاده از قواعد "اگر-آنگاه" و توابع عضویت، توانایی مدل‌سازی عدم قطعیت و پیچیدگی‌های غیرخطی را دارد. در مقابل، شبکه‌های عصبی مصنوعی قابلیت یادگیری و تطبیق خودکار با داده‌های ورودی را ارائه می‌دهند. در این سیستم، ابتدا داده‌های ورودی فازی‌سازی می‌شوند و به مقادیر فازی تبدیل می‌گردند. سپس این مقادیر بر اساس قوانین فازی ارزیابی شده و خروجی نهایی پس از غیرفازی‌سازی، به صورت یک سیگنال قطعی برای کنترل یا هدایت تولید می‌شود. علاوه بر این، شبکه عصبی وظیفه بهینه‌سازی خودکار پارامترهای سیستم فازی مانند توابع عضویت و قوانین را بر عهده دارد.

نقش سیستم عصبی-فازی در هدایت مقاوم در ربات‌های هوایی، هدایت مقاوم به معنای توانایی سیستم برای تطبیق با شرایط متغیر محیطی و مقابله با عدم قطعیت‌ها است. سیستم عصبی-فازی با ترکیب توانایی‌های یادگیری و مدیریت عدم قطعیت، این نیاز را برآورده می‌سازد. این سیستم با شناسایی و مدل‌سازی دقیق اختلالات خارجی نظیر باد، تغییرات وزن، یا نویز سنسورها، پایداری مسیر هدایت را تضمین می‌کند. همچنین با اصلاح و تطبیق قوانین فازی در شرایط دینامیکی مختلف، مسیرهای بهینه را برای حرکت ربات پیشنهاد می‌دهد. این ویژگی باعث می‌شود ربات بتواند در محیط‌های پیچیده و ناشناخته به صورت کارآمد عمل کند.

مزایای سیستم عصبی-فازی برای هدایت ربات:

یکی از مزایای مهم سیستم عصبی-فازی، توانایی کاهش اثرات عدم قطعیت و خطا در ورودی‌ها است. این سیستم با ترکیب قوانین فازی و توانایی یادگیری شبکه عصبی، می‌تواند تغییرات محیطی را شناسایی کرده و با تنظیم پارامترهای خود، هدایت ربات را در برابر اختلالات مقاوم کند. علاوه بر این، قابلیت مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی و پیچیده باعث می‌شود که این روش در هدایت و کنترل ربات‌های هوایی تکبال یا

۴. پشتیبانی از قیود پیچیده

این روش توانایی مدل‌سازی دقیق قیود مختلف، از جمله قیود بر مسیر، ورودی کنترل، و متغیرهای حالت را دارد.

مزایای روش شبه‌طیفی نسبت به روش‌های دیگر

۱. مزیت نسبت به روش‌های تفاضل محدود

در حالی که روش‌های تفاضل محدود بر اساس گسسته‌سازی یکنواخت هستند، روش شبه‌طیفی با انتخاب گره‌های غیر یکنواخت (مانند گره‌های چبیشف-گوس) دقت بسیار بالاتری در نزدیکی نقاط بحرانی (مانند نقاط مرزی) ارائه می‌دهد.

۲. مزیت نسبت به روش‌های اجزای محدود

روش اجزای محدود نیازمند تقسیم‌بندی دامنه به چندین زیرمسئله است که ممکن است باعث افزایش پیچیدگی محاسباتی شود. اما در روش شبه‌طیفی، دامنه به صورت یکپارچه حل می‌شود و نیازی به تقسیم دامنه نیست.

۳. دقت بالاتر در درجه‌های پایین گسسته‌سازی

برای مسائل با تعداد نقاط گسسته‌سازی محدود، روش شبه‌طیفی دقت بیشتری در مقایسه با سایر روش‌ها ارائه می‌دهد.

۴. کاهش اثر خطاهای تجمعی

استفاده از گره‌های خاص و توابع پایه‌ای مناسب باعث می‌شود که اثر خطاهای عددی در طول محاسبات به حداقل برسد.

۵. مناسب برای مسائل با مقیاس بزرگ

به دلیل کاهش تعداد گره‌های مورد نیاز، این روش برای مسائل کنترل بهینه در مقیاس بزرگ (مانند کنترل ماهواره‌ها یا سیستم‌های هوایی) مناسب است [۲۲-۲۵].

### بررسی پایداری حرکت انتقالی مقاوم

در طراحی مسیر بهینه حلقه بسته، هدف اصلی این است که با استفاده از کنترل بهینه، ربات هوایی را به شکلی هدایت کنیم که به تغییرات محیطی و اغتشاشات خارجی مقاوم باشد. در این روش، از رویکرد کنترل بهینه همراه با سیستم‌های تطبیقی استفاده می‌شود تا در هر لحظه، مسیر بهینه با توجه به شرایط

چندپره بسیار موثر باشد. سیستم عصبی-فازی همچنین نیاز به مدل سازی دقیق دینامیک ربات را کاهش داده و از داده های محیطی برای بهبود عملکرد استفاده می کند.

کاربردهای سیستم عصبی-فازی در ربات های هوایی

سیستم عصبی-فازی در هدایت و کنترل ربات های هوایی در مأموریت های پیچیده کاربردهای متنوعی دارد. بهینه سازی مسیر پرواز برای کاهش مصرف انرژی، مدیریت موانع در محیط های ناشناخته، و هدایت ربات در شرایط نامطلوب مانند بادهای شدید، از جمله این کاربردها هستند. این سیستم با استفاده از الگوریتم های تطبیقی و توانایی بهینه سازی بلادرنگ، مسیری کارآمد و امن برای ربات تضمین می کند. در نتیجه، استفاده از سیستم عصبی-فازی منجر به افزایش کارایی و قابلیت اطمینان ربات های هوایی در مأموریت های دشوار می شود.

برای مقاوم کردن پاسخ این سیستم، از مدل فازی-عصبی تاکاگی-سوجنو-کانگ<sup>۱۰</sup> استفاده شده است. این مدل به دلیل ساختار هیبریدی و ترکیب منطق فازی و شبکه های عصبی، قادر است تا به صورت بلادرنگ رفتار سیستم را پیش بینی کرده و اصلاحات لازم را برای حفظ عملکرد بهینه اعمال کند. با استفاده از این روش، ربات در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت های محیطی مقاوم بیشتری نشان می دهد.

در حالت حلقه باز، کنترل بهینه بر اساس اطلاعات و شرایط اولیه طراحی می شود و به تغییرات محیطی حساسیت بیشتری دارد. برای مقاوم کردن این نوع پاسخ های کنترل، از هوش مصنوعی فازی-عصبی استفاده می شود. در این روش، مدل فازی-عصبی به عنوان یک مکانیسم تصحیح کننده عمل می کند که در زمان واقعی، تنظیمات لازم را بر روی پارامترهای کنترل بهینه اعمال می کند تا تغییرات و ناپایداری های احتمالی را بهبود بخشد. این فرآیند باعث می شود که کنترلر حلقه باز بتواند با استفاده از هوش تطبیقی، به طور موثری در برابر

اغتشاشات محیطی و تغییرات ناگهانی مقاومت کند و عملکرد بهینه تری داشته باشد.

محکی که برای ارزیابی صحت فرآیند آموزش در شبکه فازی-عصبی در نظر گرفته می شود، میزان توانایی سیستم در دفع اغتشاشات وارد بر سیستم دینامیکی است. طبق تعریف، یک پاسخ کنترل بهینه حلقه بسته باید به گونه ای طراحی شود که توانایی مقابله با اغتشاشات خارجی و نویزهای احتمالی را داشته باشد. در اینجا، اغتشاشات به صورت نویزهایی بر متغیرهای حالت سیستم اعمال شده اند. به بیان دیگر، هر گونه تغییر یا انحراف در متغیرهای حالت ناشی از شرایط محیطی یا عوامل غیرمنتظره به عنوان یک اغتشاش در نظر گرفته می شود و شبکه فازی-عصبی باید قادر باشد این نویزها را تشخیص داده و سیستم را به حالت بهینه برگرداند.

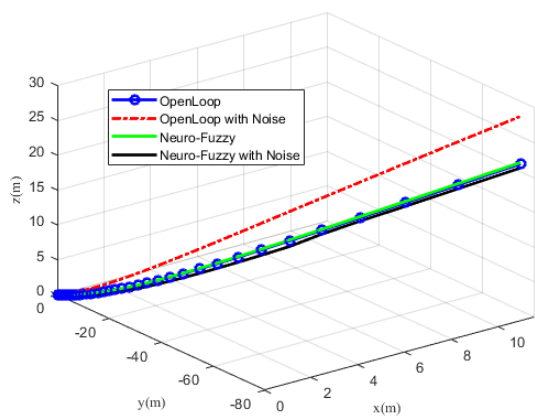
این فرآیند به کمک مدل فازی-عصبی انجام می شود، که با ترکیب شبکه های عصبی و منطق فازی به صورت تطبیقی رفتار سیستم را کنترل می کند. هدف اصلی این است که سیستم در مواجهه با اغتشاشات خارجی همچنان به مسیر بهینه خود ادامه دهد و پاسخ کنترل را به شکلی مقاوم تنظیم کند. اغتشاشات اعمال شده به متغیرهای حالت سیستم، مانند سرعت، موقعیت و زاویه های دینامیکی، به عنوان ورودی های شبکه فازی-عصبی تلقی می شوند و این شبکه باید بر اساس آموزش های خود، پارامترهای کنترلی را به گونه ای تنظیم کند که تاثیرات این اغتشاشات به حداقل برسد. شبکه آموزش داده شده فازی در شکل زیر آورده شده است.

$\delta u, \delta v, \delta w$  نویزهای اعمالی بر سیستم دینامیکی است که به فرم زیر برای بادهای جانبی مدنظر قرار گرفته است.

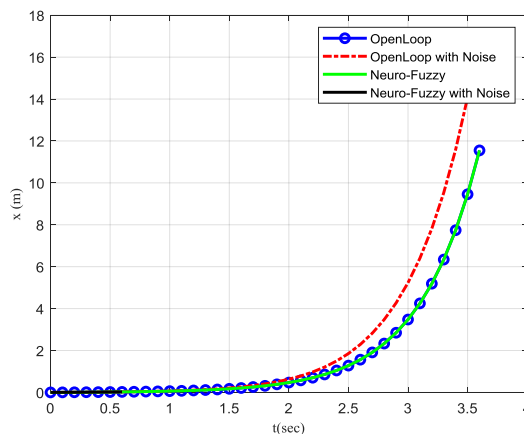
$$\delta u = \delta v = \delta w = 0.1(\text{rand}[-1,1])\text{Sin}(\varphi(t)) \quad (18)$$

بر اساس این محک شبکه آموزش دیده فازی-عصبی باید قادر باشد که اغتشاشات فوق را حذف نماید و یا به عبارتی در مقابل آن از خود مقاومت نشان دهد. در ادامه برای سه متغیر حرکت  $(x, y, z)$  پاسخ سیستم آورده شده است.

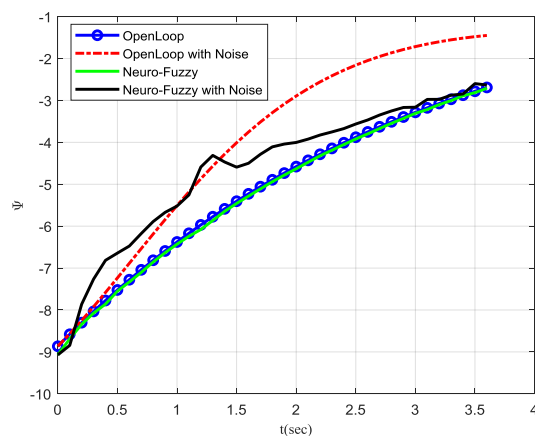
<sup>10</sup> Takagi-Sugeno-Kang



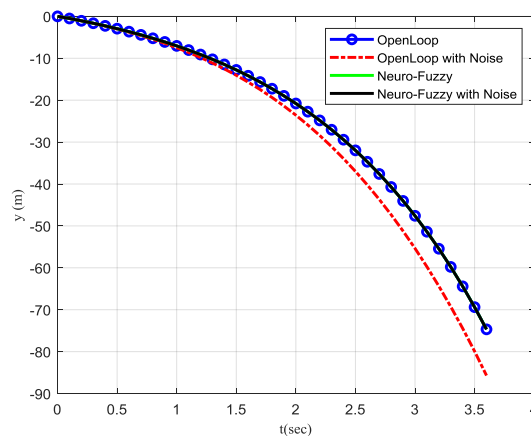
شکل ۱۲ - حرکت انتقالی سه بعدی



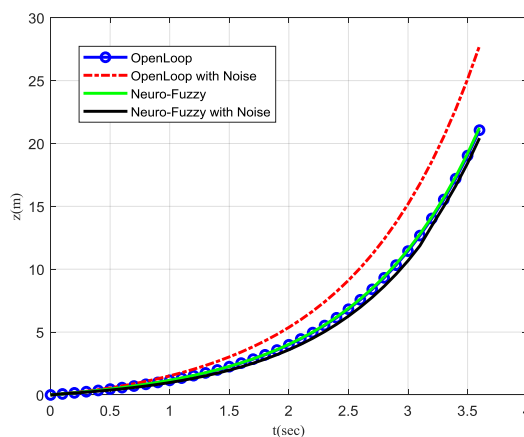
شکل ۹ - حرکت انتقالی در راستای X



شکل ۱۳ - رفتار متغیر کنترلی هدایتی



شکل ۱۰ - حرکت انتقالی در راستای y



شکل ۱۱ - حرکت انتقالی در راستای Z

در شکل های ۹ الی ۱۳ چهار نمودار کشیده شده است. نمودار آبی رنگ بیان کننده پاسخ هدایت حلقه باز بدون هیچ گونه اغتشاش باد جانبی است. در ادامه نمودار قرمز رنگ رفتار سیستم به واسطه اثر پذیری از اغتشاش باد جانبی برای حالت غیر مقاوم است که نشان می دهد ربات تک بال از مسیر خارج شده است. نمودار سبز رنگ هدایت حلقه بسته عصبی-فازی است بدون اغتشاش است که کاملاً بر پاسخ حلقه باز مطابقت دارد. مهم ترین نمودار نیز به رنگ مشکی است که رفتار هدایت حلقه بسته را در مقابل اغتشاش باد جانبی و توانایی آن برای غلبه بر اغتشاش فوق را نشان می دهد. چنانچه از اشکال بالا مشخص است شبکه فازی-عصبی آموزش دیده به خوبی توانسته است بر نویز اعمالی بر سیستم غلبه نماید و حل کنترل

بهینه حلقه باز با وجود اغتشاش از مسیر بهینه خود خارج شده است اما حل کنترل بهینه حلقه بسته به همراه اغتشاش توانسته است مسیر بهینه خود را طی نماید.

### کنترل وضعی

برای کنترل دقیق حرکت وضعی، طراحی یک کنترلر مناسب بسیار ارزشمند است. یکی از روش‌های رایج برای کنترل جهت‌گیری، استفاده از کنترلر پیش‌بین مدل<sup>۱۱</sup> است. این کنترلر با پیش‌بینی رفتار آینده ربات و با توجه به دینامیک پیچیده آن، دستورات کنترلی لازم را صادر می‌کند تا زاویه‌های وضعیت در مقدار بهینه باقی بمانند. این کنترلر توانایی تطبیق سریع و یادگیری از داده‌های گذشته، کنترل وضعیت ربات را بهینه‌تر می‌سازد. در نتیجه، در صورت ورود اغتشاشات یا تغییرات غیرمنتظره در محیط، سیستم کنترلی قادر است سریعاً واکنش نشان داده و حرکت وضعی ربات را به حالت مطلوب برگرداند.

ترکیب این دو نوع حرکت انتقالی و وضعی در کنار هم، پروازی پایدار، بهینه و مقاوم را برای ربات هوایی تک‌بال تضمین می‌کند. در ادامه برای پیاده‌سازی کنترلر ام پی سی<sup>۱۲</sup> به خطی سازی معادلات حاکم بر ربات تک بال پرداخته می‌شود.

### طراحی کنترلر مدل پیش‌بین

کنترلر پیش‌بین مدل<sup>۱۳</sup> یکی از روش‌های پیشرفته کنترل در سیستم‌های دینامیکی پیچیده است که از اطلاعات مدل سیستم برای پیش‌بینی رفتار آینده آن استفاده می‌کند. این روش بر اساس حل یک مسئله بهینه‌سازی در طول یک افق زمانی مشخص عمل می‌کند. کنترلر ام پی سی با داشتن مدل ریاضی سیستم، به صورت بلادرنگ پیش‌بینی می‌کند که سیستم در آینده چگونه رفتار خواهد کرد و دستورات کنترلی مناسب را بر اساس این پیش‌بینی تولید می‌کند. هدف اصلی ام

پی سی این است که خطای بین خروجی واقعی و مطلوب سیستم را به حداقل برساند و در عین حال محدودیت‌های فیزیکی و کنترلی (مانند محدودیت‌های ورودی و خروجی) را رعایت کند.

یکی از ویژگی‌های اصلی ام پی سی این است که افق پیش‌بینی خود را به صورت متحرک به‌روزرسانی می‌کند. در هر گام زمانی، ام پی سی از وضعیت کنونی سیستم به عنوان نقطه شروع استفاده کرده و رفتار آینده سیستم را برای چند گام زمانی جلوتر محاسبه می‌کند. سپس، یک مجموعه ورودی‌های کنترلی بهینه را برای سیستم در این افق زمانی می‌یابد. در نهایت، تنها اولین ورودی کنترلی از این مجموعه اعمال می‌شود، و این فرآیند در گام زمانی بعدی مجدداً تکرار می‌شود. این ویژگی باعث می‌شود که ام پی سی توانایی واکنش به تغییرات غیرمنتظره یا اغتشاشات خارجی را داشته باشد و در طول زمان تنظیمات کنترلی خود را بهینه‌سازی کند.

کنترلر ام پی سی به دلیل قابلیت مدیریت محدودیت‌های چندگانه و بهینه‌سازی در سیستم‌های غیرخطی و پیچیده، در کاربردهای گسترده‌ای مانند رباتیک، سیستم‌های هوایی، کنترل فرآیندهای صنعتی و خودروهای خودران استفاده می‌شود. یکی از مزایای بزرگ ام پی سی نسبت به کنترل‌کننده‌های سنتی، توانایی آن در مواجهه با تغییرات دینامیکی سیستم و اغتشاشات محیطی است. از آنجایی که این کنترلر همواره به آینده سیستم نگاه می‌کند و محدودیت‌های ورودی و خروجی را به طور دقیق در نظر می‌گیرد، می‌تواند پایداری و عملکرد بهینه سیستم را تضمین کند. این ویژگی‌ها ام پی سی را به یکی از مؤثرترین روش‌های کنترل در سیستم‌های پیچیده تبدیل کرده است.

در طراحی کنترلر ام پی سی، چندین فاکتور کلیدی باید در نظر گرفته شوند تا سیستم عملکرد مطلوب و پایداری داشته باشد. اولین فاکتور، مدل دینامیکی سیستم است که باید دقیق و جامع باشد تا کنترلر بتواند رفتار آینده سیستم را به درستی پیش‌بینی کند. این مدل ممکن است خطی یا غیرخطی باشد و

<sup>11</sup> Model Predictive Controller (MPC)

<sup>12</sup> MPC

<sup>13</sup> Model Predictive Control - MPC

زوایای  $\beta_{1c}$ ،  $\beta_{1s}$ ،  $\beta_{1(c,s)0}$  به زوایای خاصی اشاره دارند که مرتبط با دینامیک فلپینگ بال ربات تکبال در هنگام پرواز هستند. این زوایا رفتار فلپینگ چرخه‌ای بال را توصیف می‌کنند که بر جهت‌گیری و پایداری وسیله در حین پرواز تأثیر می‌گذارد.

$\beta_{1s}$  زاویه فلپ سینوسی: این زاویه، فلپ بال را که به صورت سینوسی با زاویه سمت  $\psi$  تغییر می‌کند، نشان می‌دهد. این زاویه عمدتاً بر سرعت رو به جلو  $V_{cg}$  وسیله تأثیر می‌گذارد و به زاویه رول (چرخش حول محور طولی) جسم مرتبط است.

$\beta_{1c}$  زاویه فلپ کسینوسی: این زاویه، فلپ بال را که به صورت کسینوسی با زاویه سمت  $\psi$  تغییر می‌کند، نشان می‌دهد. این زاویه بر سرعت عمودی یا حرکت رو به پایین تأثیر می‌گذارد و با زاویه پیچ (چرخش حول محور عرضی) جسم وسیله مرتبط است.

$\beta_1$  این زاویه، زاویه کلی مخروطی را نشان می‌دهد که ترکیبی از  $\beta_{1c}$  و  $\beta_{1s}$  است و فلپ خارج از صفحه بال را توصیف می‌کند. این زاویه جهت‌گیری کلی بال نسبت به بدنه وسیله را در هنگام چرخش تعیین می‌کند. همچنین اندیس صفر بیان‌کننده شرایط اولیه زوایای فوق است.

در مدل دینامیک ربات تکبال،  $\beta_0$  نقش زاویه مخروطی ثابت یا زاویه فلپ اولیه را دارد. این زاویه نشان‌دهنده انحراف ثابت بال از صفحه افقی است و توصیف‌کننده شکل کلی مخروطی است که توسط حرکت بال ایجاد می‌شود. در واقع،  $\beta_0$  همان زاویه‌ای است که بدون در نظر گرفتن تغییرات سینوسی و کسینوسی (یعنی بدون در نظر گرفتن  $\beta_{1c}$  و  $\beta_{1s}$ ) در پرواز ثابت یا پرواز معلق وجود دارد.

نقش  $\beta_0$  در تعیین کلی حرکت عمودی<sup>۱۸</sup> و پایداری اولیه ربات در پرواز است. این زاویه زمانی که ربات در حال هاور یا پرواز در یک مسیر مستقیم است، ثابت می‌ماند و به تنظیم نیروی لیفت کلی و کنترل پایداری وسیله کمک می‌کند [۲۵-۲۸].

بسته به پیچیدگی سیستم انتخاب می‌شود. دومین فاکتور، افق پیش‌بینی<sup>۱۴</sup> است که تعیین می‌کند کنترلر تا چه اندازه به آینده نگاه کند؛ افق بلندتر به دقت بیشتر در پیش‌بینی‌ها منجر می‌شود اما به هزینه محاسباتی بالاتری نیاز دارد. افق کنترل<sup>۱۵</sup> نیز تعداد گام‌های کنترلی را مشخص می‌کند که کنترلر در آن‌ها بهینه‌سازی می‌کند. وزن‌دهی به اهداف از دیگر عوامل مهم است، به این معنا که باید بین اهداف مختلف مانند به حداقل رساندن خطا، مصرف انرژی یا رعایت محدودیت‌ها تعادل برقرار شود. محدودیت‌های فیزیکی و کنترلی سیستم، از جمله محدودیت‌های ورودی‌ها، خروجی‌ها و متغیرهای حالت، نیز باید در طراحی گنجانده شوند تا کنترلر بتواند تصمیمات قابل اجرا و عملی بگیرد. همچنین، روش‌های بهینه‌سازی مورد استفاده برای حل مسئله ام پی سی تأثیر مستقیم بر عملکرد و سرعت اجرای کنترلر دارند.

### خطی‌سازی معادلات حرکتی سامانه تک‌بال

ربات تک بال بر اساس مدل طراحی شده در پژوهشگاه هوافضا است. این سامانه در شکل‌های ۲ الی ۶ و جدول ۱ آورده شده است. عامل کنترل زاویه‌ای آن فلپ طراحی شده روی تک‌بال سامانه فوق است.

### دستگاه چرخش ماریچ

مسیر پروازی سامانه شبیه به یک چرخش بنک<sup>۱۶</sup> پایدار است. علاوه بر این، زاویه مسیر پروازی  $\gamma$  کوچک در نظر گرفته شده است. کوچکتر از صفر برای پرواز صعودی<sup>۱۷</sup> به طوری که  $\sin(\gamma) = \gamma$  و  $\cos(\gamma) = 1$ . لذا نرخ زوایای رول، پیچ و یاو به ترتیب عبارتند از:

$$p = -\dot{\psi}_{cg} \sin \beta_{1c} \quad (19)$$

$$q = \dot{\psi}_{cg} \cos \beta_{1c} \sin \beta_{1s} \quad (20)$$

$$r = \dot{\psi}_{cg} \cos \beta_{1c} \sin \beta_{1s} \quad (21)$$

<sup>14</sup> Prediction Horizon

<sup>15</sup> Control Horizon

<sup>16</sup> Bank

<sup>17</sup> Climbing flight

<sup>18</sup> heave

$$\frac{\Delta X_c}{m} = X_\theta \Delta \theta \quad (29)$$

سیستم خطی زمان-ثابت در حال حاضر در فضای حالت به فرم زیر بیان می‌شود.  $\dot{\vec{x}} = \mathbf{A}\vec{x} + \mathbf{B}\vec{u}$  که  $\vec{x} = [\Delta u, \Delta \omega, \Delta \beta_0, \Delta \beta_{1c}]$  و  $\vec{u} = [\Delta \theta_0]$ ، با حذف  $\Delta$ ، مدل فضای حالت هم به فرم ماتریسی به صورت زیر نوشته می‌شود، که در آن در  $\mathbf{A}$  و  $\mathbf{B}$  از مشخصات سیستم است و به صورت زیر انتخاب شده‌اند.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} +0.004165 & +0.037378 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +0.002538 & -57.323 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01335 & +10.015 & 0 \\ 0 & 0 & 0.000081 & 0 & 0 \\ -0.005881 & 0 & -0.001145 & 2.4323 & 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\mathbf{B} = [-7.9875 \quad -14.7180 \quad 0 \quad -1.8922 \quad 0]^T \quad (31)$$

از سوی دیگر، طراحی حرکت انتقالی باید به نحوی انجام شود که تغییرات شتاب و سرعت ربات همواره در محدوده‌های قابل قبول باقی بمانند. در این راستا، روش‌های کنترلی مانند کنترل‌کننده پیش‌بین مدل ام پی سی می‌توانند به صورت بلادرنگ برای کنترل دقیق حرکت انتقالی استفاده شوند. ام پی سی این قابلیت را دارد که با پیش‌بینی رفتار ربات در آینده، دستورات کنترلی بهینه‌ای را تولید کند که نه تنها مسیر تعیین‌شده را دنبال کند، بلکه محدودیت‌های دینامیکی و فیزیکی ربات را نیز رعایت کند. این روش به طور خاص برای سیستم‌های پیچیده و غیرخطی مانند ربات هوایی تک بال که دارای دینامیک پیچیده هستند، بسیار موثر است. لذا در ادامه نتایج حاصل از طراحی کنترلر ام پی سی آورده شده است.

در این بخش، به بررسی عملکرد کنترلر پیش‌بین مدل طراحی‌شده برای ربات تک‌بال هوایی پرداخته می‌شود. عملکرد این کنترلر در سه حالت مختلف شامل ورودی پله‌ای، شیب، و سینوسی در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ نشان داده شده است. این تحلیل به بررسی پاسخ سیستم به این ورودی‌ها و دقت و پایداری کنترلر در کنترل ربات می‌پردازد.

این زوایا در مدل‌سازی دینامیک بال فلپینگ و پیش‌بینی رفتار ربات تک‌بال در شرایط مختلف پروازی اهمیت دارند. با جایگزین کردن مشتقات سرعت و سینماتیک‌های اصلاح شده در معادلات تعادل، معادلات حرکتی زیر بر اساس  $p, q, r$  دست آمده است.

$$F_X = mg \sin \beta_{1c} + m(\dot{u} + wq - vr) \quad (22)$$

$$F_Y = -mg \cos \beta_{1c} \sin \beta_{1s} + m(\dot{v} + ur - wp) \quad (23)$$

$$F_Z = -mg \cos \beta_{1c} \cos \beta_{1s} + m(\dot{w} + vp - uq) \quad (24)$$

که  $[F_X, F_Y, F_Z]^T$  نشان دهنده نیرو در قاب مختصاتی چسبیده به بدنه، و شتاب  $g$  ناشی از جاذبه است.

می‌توان یک پرواز مستقیم را به صورت یک چرخش مختصاتی با شرایط روبرو در نظر گرفت به طوری که  $\dot{\psi} = p_0 = q_0 = r_0 = \beta_{1s} = 0$  پرواز رو به جلو می‌تواند بصورت ترکیبی از یک شرایط نامی و یک انحراف کوچک  $\Delta$  به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$X_0 + \Delta X - mg[\sin(\beta_{1c0}) + \Delta \beta_{1c} \cos(\beta_{1c0})] = \Delta \dot{u} \quad (25)$$

با تنظیم تمامی کمیت‌های اغتشاشی به صفر، عملکرد متعادل نیروها در طول پرواز رو به جلو تریم به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\frac{X_0}{m} = g \sin \beta_{1c0} \quad (26)$$

با کم کردن معادلات پروازی تریم شده از معادلات تعادل حرکت اغتشاشی کوچک حول شرایط تعادل تغییرات سرعت برای نمونه به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\Delta \dot{u} = \Delta X - mg \Delta \beta_{1c} \cos \beta_{1c} \quad (27)$$

لذا متغیرهای  $[u, w, \beta_0, \beta_{1c}]$  توسعه مدل کنترل خطی متعارف را تسهیل می‌کند و به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\frac{\Delta X}{m} = X_u \Delta u + X_w \Delta w + \quad (28)$$

$$X_{\beta_0} \Delta \beta_0 + X_{\beta_{1c}} \Delta \beta_{1c} + \frac{X_c}{m}$$

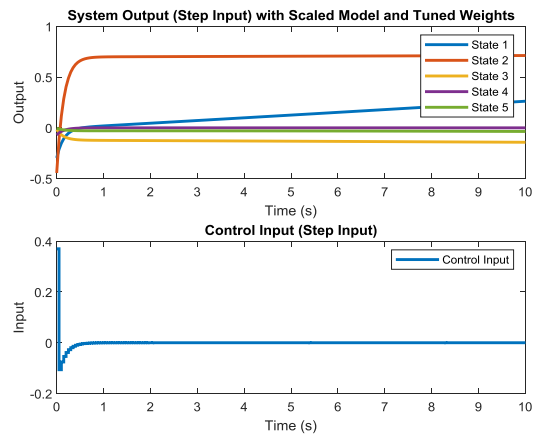
که در حالت کلی  $X_{[*]} = (1/m) \partial X / \partial [*]$  و

خروجی پایدار و سریعی دارد. هر پنج حالت سیستم به سرعت خود را با ورودی تطبیق می دهند و نوسانات قابل توجهی در آن دیده نمی شود. کنترلر ام پی سی با استفاده از پیش بینی رفتار آینده سیستم و تنظیم بهینه ورودی ها، توانسته است بدون ایجاد بیش نویسی یا تأخیر قابل توجه، به طور دقیق به ورودی پله ای پاسخ دهد. این نتیجه نشان دهنده توانایی کنترلر در مدیریت تغییرات ناگهانی در سیستم است.

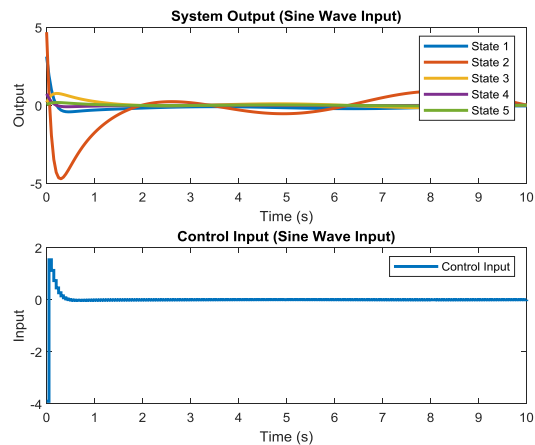
شکل ۱۵ نشان دهنده عملکرد کنترلر در مواجهه با یک ورودی شیب است. در این حالت، ورودی به صورت پیوسته افزایش می یابد و کنترلر باید به طور پیوسته خروجی را تنظیم کند. همان طور که از نمودار خروجی مشاهده می شود، سیستم به خوبی قادر به دنبال کردن تغییرات شیب ورودی بوده و خروجی ها به شکلی روان و بدون نوسانات غیرطبیعی تغییر می کنند. این نشان دهنده توانایی کنترلر ام پی سی در کنترل دقیق سیستم در مواجهه با ورودی هایی است که به صورت خطی و به تدریج تغییر می کنند.

شکل ۱۶ عملکرد سیستم را در مواجهه با ورودی سینوسی بررسی می کند. این ورودی نوسانی به کنترلر فشار بیشتری وارد می کند زیرا سیستم باید به طور مداوم بین حالات مختلف تغییر کند. همان طور که در نمودار خروجی دیده می شود، کنترلر ام پی سی قادر است با دقت زیاد و بدون ایجاد نوسانات اضافی، خروجی را با ورودی سینوسی تطبیق دهد. پاسخ سیستم تقریباً هم فاز با ورودی سینوسی بوده و نشان دهنده دقت بالای کنترلر در مدیریت ورودی های نوسانی است.

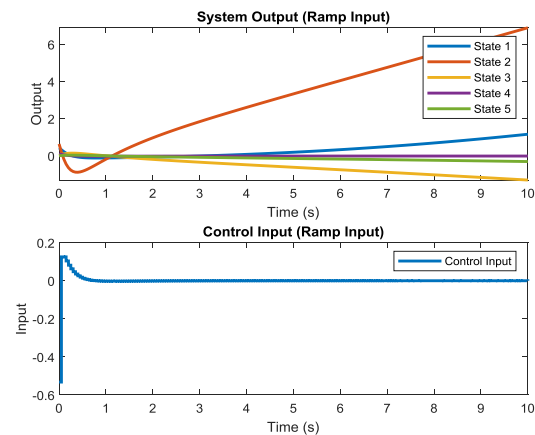
در تمامی نمودارها، ورودی های کنترلی که توسط کنترلر تولید می شوند نیز به خوبی دیده می شوند. کنترلر ام پی سی به طور پیوسته و دقیق ورودی های لازم برای کنترل ربات را به سیستم اعمال کرده است. این ورودی ها برای ورودی پله ای سریع و ناگهانی، برای ورودی شیب ملایم و پیوسته، و برای ورودی سینوسی هماهنگ با تغییرات نوسانی تنظیم شده اند. مشاهده می شود که کنترلر با بهره گیری از قابلیت پیش بینی خود، از ایجاد نوسانات غیرضروری در ورودی ها جلوگیری کرده است.



شکل ۱۴ - پاسخ کنترلر MPC برای ورودی پله



شکل ۱۵ - پاسخ کنترلر MPC برای ورودی شیب



شکل ۱۶ - پاسخ کنترلر MPC برای ورودی سینوسی

در شکل ۱۴، پاسخ سیستم به یک ورودی پله ای بررسی شده است. مشاهده می شود که سیستم در برابر این ورودی ناگهانی،

به‌طور کلی، کنترلر ام پی سی طراحی شده برای ربات تک‌بال توانسته است در تمامی سناریوهای ورودی شامل پله‌ای، شیب و سینوسی عملکرد بسیار دقیقی از خود نشان دهد. این کنترلر با پیش‌بینی رفتار آینده سیستم و بهینه‌سازی ورودی‌ها، توانسته است خروجی‌هایی پایدار، دقیق و هم‌خوان با ورودی‌های موردنظر تولید کند. عدم وجود نوسانات غیرطبیعی در خروجی‌ها و ورودی‌های سیستم، نشان‌دهنده دقت بالای این کنترلر در مدیریت دینامیک پیچیده ربات هوایی است.

### نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف طراحی و توسعه یک ربات هوایی تک‌بال الهام‌گرفته از دانه درخت افرا، راهکاری نوین برای بهبود هدایت و کنترل سیستم‌های هوایی ارائه می‌دهد. ربات تک‌بال طراحی شده با استفاده از ویژگی‌های طبیعی دانه افرا، عملکردی پایدار و بهینه در مأموریت‌های پیچیده از جمله عملیات جستجو و نجات دارد. در این راستا، معادلات دینامیکی حرکت ربات استخراج شده و به کمک روش شبه‌طیفی، استراتژی کنترل بهینه تدوین گردید تا مصرف انرژی به حداقل رسیده و مسیر حرکت بهینه حفظ شود.

یکی از جنبه‌های کلیدی این تحقیق، طراحی قانون هدایت بهینه مقاوم بود که با استفاده از سیستم عصبی-فازی برای مقابله با اغتشاشات محیطی به ویژه بادهای جانبی، توانایی ربات را در حفظ پایداری و عملکرد در شرایط نامساعد افزایش داد. این سیستم با توانایی پیش‌بینی بلادرنگ تغییرات محیطی، کنترل مناسبی بر ربات اعمال می‌کند. تحلیل و نتایج نشان داد که این روش، عملکرد پایداری در شرایط ناپایدار محیطی به ربات می‌دهد و باعث حفظ دقت در مسیر حرکت می‌شود.

کنترلر مدل پیش‌بین<sup>۱۹</sup> نیز به عنوان بخش دیگری از طراحی، با خطی‌سازی معادلات دینامیکی و پیش‌بینی رفتار آینده ربات، کنترل دقیق‌تری بر حرکت وضعی و انتقالی ربات ارائه داد. این کنترلر توانایی واکنش سریع به تغییرات ناگهانی و تنظیم

پیوسته ورودی‌ها را داراست و نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده عملکرد بهینه آن در شرایط مختلف ورودی است.

از دیگر دستاوردهای این تحقیق، ارزیابی تأثیر اغتشاشات بر متغیرهای حالت سیستم بود. نتایج نشان داد که مدل فازی-عصبی می‌تواند اغتشاشات وارد شده به سیستم را تشخیص داده و با تغییر مناسب پارامترهای کنترلی، تأثیرات این اغتشاشات را به حداقل برساند. این قابلیت باعث شد تا سیستم بتواند حتی در شرایط ناپایدار و همراه با اغتشاشات شدید، مسیر بهینه خود را حفظ کند. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، کنترلر مدل پیش‌بین در مواجهه با ورودی‌های پله‌ای، شیب و سینوسی عملکرد بسیار مناسبی از خود نشان داد. این کنترلر با توانایی پیش‌بینی و بهینه‌سازی ورودی‌ها، توانست به‌طور دقیق و پایدار به تغییرات ناگهانی و پیوسته پاسخ دهد و از ایجاد نوسانات غیرضروری جلوگیری کند. ورودی‌های کنترلی در تمامی حالت‌ها به‌خوبی با سیستم هماهنگ شدند و خروجی‌های سیستم با دقت بسیار بالا با ورودی‌ها مطابقت داشتند. یکی از ویژگی‌های برجسته این پژوهش، توانایی ترکیب هدایت بهینه مقاوم و کنترلر مدل پیش‌بین بود که با هم پروازی پایدار و بهینه را برای ربات فراهم کردند. کنترلر فوق با مدیریت دقیق و بهینه‌سازی ورودی‌ها در زمان واقعی، و سیستم عصبی-فازی با مقاومت در برابر اغتشاشات محیطی، باعث شد تا ربات هوایی تک‌بال حتی در شرایط دشوار محیطی به‌طور پایدار و دقیق به مأموریت خود ادامه دهد. از محدودیت‌های روش هدایت بهینه برخط فوق می‌توان به فرآیند آموزش در حین پرواز اشاره کرد که می‌تواند در آینده مورد پژوهش قرار گیرد.

در نهایت، این پژوهش نشان داد که ترکیب روش‌های هوشمند عصبی-فازی و کنترلر پیش‌بین مدل می‌تواند راه‌حل مناسبی برای کنترل سیستم‌های پیچیده هوایی فراهم کند. توانایی این روش‌ها در بهینه‌سازی و مدیریت تغییرات محیطی، باعث افزایش دقت و پایداری سیستم در انجام مأموریت‌های حساس شد. به‌طور کلی، ربات هوایی تک‌بال طراحی شده با بهره‌گیری

<sup>19</sup> MPC

Youngren, "SAMARAI Nano Air Vehicle—A Revolution in Flight," DARPA CR W31P4Q-06-C-0324, 2007.

[9] Youngren, Harold, and Ming Chang. Test, Analysis and Design of Propeller Propulsion Systems for Mavs. 2011. doi:10.2514/6.2011-876.

[10] Abadollahi, S., Madani Esfahani, M., and Golestani, M., "Design of a Guidance Law Based on Robust Model Predictive Control Using Linear Matrix Inequalities to Find the Optimal Line-of-Sight Angle of an Aircraft," Journal of Electrical Engineering of Tabriz University, Vol. 48, No. 4, March 2019

[11] Doe, J., and Smith, A., "Reinforced Learning-Based Robust Control Design for Unmanned Aerial Vehicle," International Journal of UAV Studies, Vol. 35, No. 2, Springer, Berlin, Germany, 2023, pp. 125–140. DOI: 10.1007/s13369-022-06746-0.

[12] Vasquez, R., and Garcia, M., "An Iterative Model Predictive Control Algorithm for UAV Guidance," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 58, No. 4, IEEE, Piscataway, NJ, 2022, pp. 2450–2462. DOI: 10.1109/TAES.2022.7272877.

[13] S. Minami and A. Azuma, —Various Flying Modes of Wind-Dispersal Seeds, Journal of Theoretical Biology, Vol. 225, 2003, pp. 1-14

[۱۵] کرامت ملک زاده، سید علی سادات، سید مهدی شجاعی، "مقدمه‌ای بر پرنده‌های بدون سرنشین و اصول طراحی آنها"، نشر اخوان، چاپ اول ۱۳۹۰.

[۱۶] اسماعیلی لالی، پایان نامه ارشد شبیه‌سازی شش درجه آزادی یک پرتابه، حامل یک پرنده بدون سرنشین، پایان‌نامه ارشد دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، دانشکده هوافضا، ۱۳۸۵.

از فناوری‌های پیشرفته و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، توانست عملکرد دقیقی در شرایط محیطی مختلف از خود نشان دهد و این پژوهش گامی موثر در توسعه سیستم‌های هوایی پایدار و کارآمد برای مأموریت‌های پیچیده بود.

## مراجع

[1] A. Kellas, The Guided samara: Design and development of a controllable single –bladed autorotating vehicle, 1th edition, Drexel university, sept 2007.

[2] S. Jameson, B. Satterfield, C. Bolden, H. Youngren and N. Allen, SAMARAI Nano Air Vehicle A Revolution in Flight, Unmanned Vehicle Systems International Unmanned Systems North America 2007, Washington, DC, August 6-9, 2007.

[3] D. Lentink and M.H. Dickinson, —Biofluidynamic scaling of flapping, spinning and translating fins and wings, Jour-nal of Experimental Biology, vol 16, July 31, 2009.

[4] E. Ulrich, D. Pines, and S. Gerardi —Autonomous Flight of a Samara MAV, American Helicopter Society AHS 65th Annual Forum and Technology Display, Grapevine, TX, May 27-29, 2009.

[5] A. Rosen, and D. Seter, "Vertical Autorotation of a Single-Winged Samara", Proceedings of the ASME Joint Applied Mechanics/Bioengineering Conference, Ohio State University, Columbus, OH, June 16-19, 1991.

[6] Z. Sarris, —Survey of UAV Applications in Civil Markets, the 9th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, June 2001.

[7] L. R. Newcome, Unmanned Aviation: A Brief History of Unmanned Aerial Vehicles, AIAA, Reston, VA, 2004.

[8] S. Jameson, N. Allen, and H.

- [27] J. G. Leishman, *Principals of Helicopter Aerodynamics*, Cambridge Univ. Press, New York, pp. 160–190, 2006.
- [28] V. Klein, and E. Morelli, *Aircraft System Identification: Theory and Practice*, AIAA Education Series, AIAA, Reston, VA, Chap. 4, 2006.
- [17] مهرداد عاصی قاسم آبادی، "تحلیل تجربی آیرودینامیک یک پرنده بدون سرنشین"، پایان نامه ارشد دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، دانشکده هوافضا، گروه آیرودینامیک، ۱۳۸۴.
- [18] M. Bakula, C. Hockley, R. Khatri, C. Kirby, C. Sammet, and C. Reinholtz, —A Natural Evolution in Flight: The Design and Development of the SamarEye System, A Method for Searching Closed Quarter Environments, 2009 AUVSI International Aerial Robotics Competition.
- [19] F. Graham, —Monocopters, East Liverpool, OH, Perigree Press, 1999.
- [20] "Defense Sciences Office Nano Air Vehicle," DARPA, TR W31P4Q-06-C-0324, Sept 2009.
- [21] D. Pines, and F. Bohorquez, "Challenges Facing Future Micro-Air-Vehicle Development," *Journal of Aircraft*, Vol. 43, No. 2, pp.290-305. 2006.
- [22] Graham, F., *Monocopters*, Perigee, East Liverpool, OH, p. 24, 1999.
- [23] S. Jameson, N. Allen, and H. Youngren, "SAMARAI Nano Air Vehicle—A Revolution in Flight," DARPA CR W31P4Q-06-C-0324, 2007.
- [24] E. R. Ulrich, and D. Pines, "Planform Geometric Variation, and its Effect on the Autorotation Efficiency of Mechanical Samara," *American Helicopter Society 64th Annual Forum*, Vol. 2, AHS International, Alexandria, VA, p. 1138, 2008.
- [25] E. R. Ulrich, and D. Pines, "Effects of Planform Geometry on Mechanical Samara Autorotation Efficiency and Rotational Dynamics," *Journal of the American Helicopter Society*, 2010.
- [26] E. R. Ulrich, D. Pines, and J. S. Humbert, "Pitch and Heave Control of Robotic Samara Micro-Air-Vehicles," *Journal of aircraft*, Vol. 47, No. 4, pp. 1290–1299, 2010.