فصلنامه علمی - پژوهشی فرماندهی و کنترل، سال نهم، شماره دو، تابستان ۱۴۰۴

طراحی کنترل‌کننده‌ی مقاوم تحمل‌پذیر عیب برای کوادروتور بازودار در حضور نامعینی پارامتری و عیب عملگر

مهدی خالقی[۱]، امیرفرهاد احیائی[۲]، جواد احیائی[۳]*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۲ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۳**

چکیده

وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین مجهز به بازوی مکانیکی توان انجام عملیات‌های متنوع در محیط‌های دشوار را فراهم کرده‌اند و امروزه توجه زیادی را به خود جلب نموده‌اند. در این پژوهش، یک کنترل‌کننده مقاوم و تحمل‌پذیر عیب برای کوادروتور بازودار در حضور نامعینی‌های پارامتری، اغتشاشات خارجی و خرابی عملگر طراحی شد. در ابتدا مدل دینامیکی غیرخطی دقیق یک کوادروتور دارای بازوی رباتیک با دو درجه آزادی ارائه گردید و اثر دینامیک جفت‌شده بین وسیله پرنده و بازوی ربات در مدل‌سازی منظور شد. سپس، یک کنترل‌کننده مد لغزشی تناسبی–انتگرالی توسعه یافته و پایداری سیستم حلقه بسته با بهره‌گیری از تئوری توابع لیاپانوف اثبات شد. برای ارزیابی، شبیه‌سازی‌های عددی در محیط MATLAB/Simulink و در سه سناریوی عملیاتی یعنی حرکت مستقل کوادروتور در ارتفاع، عملکرد همزمان بازوی رباتیک با حرکت سینوسی دامنه ۴۵ درجه و خرابی با کاهش ۳۵ درصدی اثربخشی یک روتور انجام شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد کنترل‌کننده پیشنهادی در حضور ۲۰ درصد نامعینی پارامتری، اغتشاش و خرابی عملگر، پایداری و دقت کل سیستم را تضمین کرده و مسیر پرواز و موقعیت بازو را به‌طور دقیق و پایدار دنبال می‌کند. همچنین، مقایسه با کنترل‌کننده خطی‌سازی فیدبک (FLC) و مد لغزشی پایه (SMC)، برتری روش پیشنهادی را نشان داد.

واژگان کلیدی: کوادروتور بازودار، کنترل‌کننده مقاوم انتگرالی تناسبی، کنترل تحمل‌پذیر عیب، نامعینی پارامتری، عیب عملگر.

[۱] کارشناسی ارشد دانشگاه بین المللی امام خمینی mehdi۹۰۵۲@gmail.com

[۲] *(نویسنده مسئول)، دانشیار و عضو هیئت علمی دانشگاه بین المللی امام خمینی f.ehyaei@eng.ikiu.ac.ir

[۳] استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه بین المللی امام خمینی jehyaei@eng.ikiu.ac.ir

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]

۱. مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در حوزه رباتیک هوایی و سیستم‌های جابجایی هوایی منجر به دستاوردهای قابل توجهی شده است. لی و همکاران[۱] چارچوبی یکپارچه برای پهپادهای همکار بدون حسگر نیرو ارائه کردند که نتایج تجربی، عملکرد مؤثر آن را در محیط‌های واقعی تأیید کرد. جیائو و همکاران [۲] با ترکیب کنترل تطبیقی-لغزشی و تشخیص شیء، سیستم هگزاکوپتری توسعه دادند که در آزمایش‌های پروازی، موفق به شناسایی و جابجایی خودکار اشیاء شد. سیف و همکاران [۳] با کنترل بک‌استپینگ غیرمتمرکز، مقاومت سیستم کوادروتور با ملخ های مایل در برابر وزش باد را با استفاده از بهینه‌سازی به کمک روش تکامل تفاضلی بهبود بخشیدند. جیائو و همکاران [٤] با ترکیب ناظر اغتشاش، کنترلر بک‌استپینگ و مشتق‌گیر ردیاب، روشی برای کنترل دقیق وضعیت پهپادها در حضور اغتشاشات خارجی ارائه دادند و عملکرد موفق آن را نشان دادند. وانگ و همکاران [۵] کنترلر سلسله مراتبی غیرخطی طراحی کردند که ردیابی مسیر در حضور بار متغیر را ممکن ساخت و نتایج، پایداری کنترل کننده‌ها در شرایط اغتشاشی پیچیده را تایید کردند. جیائو و همکاران [٦] استراتژی کنترلی تطبیقی ارائه دادند که تغییرات مرکز جرم را جبران می‌کند. نتایج شبیه‌سازی، پایداری کنترل کننده پیشنهادی در مواجهه با تغییرات دینامیکی را نشان دادند. آلتان و همکاران [۷] با کنترل پیش‌بین مدل، سیستم حمل بار خودکار را توسعه دادند. نتایج به دست آمده عملکرد بهتری نسبت به روشهای کلاسیک نشان دادند. اسپورنی و همکاران [۸] سیستم جامعی برای جستجو توسط تیمی از پهپادها و تحویل خودکار اشیاء ایجاد کردند که در رقابت MBZIRC ۲۰۱۷ موفق به کسب رتبه نخست شد. شیرانی و همکاران [۹] با کنترلر توزیع‌شده LQR-PID، پایداری سیستم چندعاملی پهپادهای حمل کننده بار را تضمین کردند و نتایج نشان داد که روش پیشنهادی قادر به حمل ایمن بار با حداقل نوسان است. اندرسون و همکاران [۱۰] کنترلر تطبیقی مقاوم برای کوادکوپترهای حمل بارهای آویزان ناشناخته ارائه دادند. آنها نشان دادند که روش پیشنهادی قادر به حفظ پایداری تحت محدودیتهای شدید کنترلی و دینامیکی است.



شکل ۱- دو نمونه از مولتی‌روتورهای با بازوهای رباتیک.[۱۳]

امامی و بنازاده [۱۱] چارچوب کنترل پیش‌بین مدل چندمرحله‌ای برای عملیات همزمان گرفتن شیء و ردیابی مسیر توسعه دادند و کارایی روش را در حفظ پایداری در حضور اغتشاشات نشان دادند.

روگیرو و همکاران [۱۲] مرور جامعی بر پیشرفت‌های حوزه جابجایی هوایی به کمک پهپادهای چند روتوره به همراه بازوهای رباتیک، انجام دادند. نمونه‌ای از این پهپادها در شکل ۱ نمایش داده شده است.

وحدانی‌پور و خدابنده [١٤] کنترلر مد لغزشی کسری برای کوادروتورهای حمل‌کننده بار طراحی کردند. نتایج شبیه‌سازی مقاومت این کنترلر در برابر اغتشاشات ناشی از بار متغیر را نشان دادند. د آنجلیس [۱۵] روش فیلترینگ نوین مبتنی بر معادلات بازگشتی برای تخمین زاویه نوسان بار در سیستمهای حمل بار آویزان ارائه داد. نتایج، بهبود قابل توجه در پایداری سیستم را نشان داد. صمدی‌خوشخو و همکاران [١٦] چهار روش کنترلی برای سیستم‌های جابجایی هوایی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که این روشها با وجود عدم قطعیتها دقت کنترل و پایداری سیستم را تضمین می‌کنند. خمسه و همکاران [۱۷] دو گونه پیشرفته از فیلتر کالمن آنسنتد برای تخمین حالت پهپادها ارائه دادند. نتایج نشان داد که این روشها تطابق بهتری با شرایط نویزی و داده های ناقص حسی دارند. ریل و همکاران [۱۸] سیستم کنترل امپدانس برای ربات‌های هوایی با پروانه‌های مایل طراحی کردند. نتایج تجربی در چهار سناریوی تعاملی مختلف عملکرد موفقیت آمیز را نشان داد. یلماز و همکاران [۱۹] کنترلر انطباقی سلسله مراتبی برای کوادروتورهای مجهز به بازوی رباتیک ارائه دادند. نتایج، عملکرد موفقیت آمیز این روش در کنترل همزمان پرنده و بازو را تایید کرد. پیری و همکاران [۲۰] کنترلر دو لایه برای پهپادهای مجهز به بازو

فصلنامهٔ علمی - پژوهشی فرماندهی و کنترل، سال نهم، شمارهٔ دو، تابستان ۱۴۰۴

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]

توسعه دادند. نتایج شبیه‌سازی، پایداری و کارایی سیستم را حتی در حضور عدم قطعیتهای مدل سازی تایید کرد. سوارز و همکاران [۲۱] چارچوبی استاندارد که معیارهای کلیدی مانند دقت، زمان اجرا و تحمل ضربه را پوشش می دهند برای ارزیابی ربات‌های جابجایی هوایی ارائه دادند. میمو و همکاران [۲۲] معماری کنترلی نوین برای منیپولیتورهای هوایی توسعه دادند. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل‌ها کارایی این روش را تایید کردند. این پژوهش‌ها نشان‌دهنده پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه سیستم‌های جابجایی هوایی هستند. از سوی دیگر در سال‌های اخیر، طراحی کنترلگرهای تحمل‌پذیر عیب برای سیستم‌های پهپادی به دلیل ماهیت ذاتی غیرخطی و ناپایدار این وسایل نقلیه هوایی، مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این زمینه، سمیر زغلاچ و همکارانش [۲۳] یک کنترلگر عصبی تطبیقی مبتنی بر شبکه عصبی ارائه کرده‌اند که قادر به جبران همزمان عیوب عملگرها و نامعینی‌های پارامتری در پهپادهای مجهز به بازوی رباتیک می‌باشد. این روش در محیط شبیه‌سازی نتایج مطلوبی نشان داده است. همچنین، محمود مزارع و همکاران [۲٤] با تمرکز بر تخمین تطبیقی خطاها و عدم قطعیت‌ها، یک روش کنترل تحمل‌پذیر خطای تطبیقی برای وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین را توسعه داده‌اند که نیاز به دانش پیشینی از کران عدم قطعیت‌ها را مرتفع ساخته است. این رویکرد از نظر تئوری، پایداری در زمان محدود را تضمین می‌کند و نتایج تجربی، برتری این روش را در مقایسه با رویکردهای مرسوم نشان می‌دهد. به تازگی کریم احمدی و همکارانش [۲۵] با معرفی ساختار مبتنی بر رویکرد کنترل تطبیقی اصلاح شده مبتنی بر وارونگی دینامیکی افزایشی غیرخطی (INDI) و ادغام آن با کنترل تطبیقی گسسته‌زمان، گامی مؤثر در جهت حل مشکلات روش‌های مبتنی بر INDI برداشته‌اند. این روش با حذف نیاز به مشتقگیری مستقیم از سیگنال‌های سنسوری، توانسته است بر چالش‌های نویز و تأخیر فائق آید. کارایی کنترلگرهای پیشنهادی از طریق شبیه‌سازیهای غیرخطی و آزمایشهای عملی روی سکوی آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است.

جمع‌بندی مطالعات فوق نشان می‌دهد که تاکنون هیچ رویکردی سه عامل کلیدی: اغتشاش، نامعینی پارامتری و خرابی عملگر را به‌صورت هم‌زمان در طراحی کنترل‌کننده بازوهای رباتیک هوایی پوشش نداده است. همچنین اغلب روش‌ها یا بسیار پیچیده‌اند یا فاقد تحلیل پایداری کافی بوده‌اند. در این مقاله، یک کنترل‌کننده مقاوم جدید مبتنی بر مد لغزشی با ساختار تناسبی–انتگرالی تحت عنوان کنترل مقاوم تناسبی انتگرالی (PIR) برای یک کوادروتور بازودار دو درجه آزادی طراحی شده است که با در نظر گرفتن مدل دینامیکی کامل، تغییر مرکز جرم، اغتشاش و خرابی عملگر توسعه یافته و با تحلیل لیاپانوف، پایداری آن اثبات شده است. نتایج شبیه‌سازی در سناریوهای عملیاتی مختلف، اثربخشی روش پیشنهادی را نشان می‌دهند.

۲. اصول و تئوری‌ها

۲-۱. مدل‌سازی

کوادروتورها با وجود داشتن سیستم مکانیکی ساده، تحت تاثیر مجموعه‌ای از اثرات فیزیکی متعدد در حوزه‌های مکانیک و آیرودینامیک می‌باشند. به همین دلیل مدل ریاضی کوادروتورها باید تمامی این اثرات مهم را در بر داشته باشد. جدول ۱ لیستی از اثرات اصلی وارد شده به مولتی‌روتورها را بطور خلاصه نشان می‌دهد.

جدول ۱. لیست اثرات مختلف در مدل‌سازی کوادروتور.

اثر	منبع
اثرات آیرودینامیکی	چرخش و فلیپینگ ملخ‌ها
گشتاور اینرسی	تغییر در سرعت چرخش ملخ‌ها
اثر گرانش	موقعیت مرکز جرم
اصطکاک	حرکت کوادروتور
اثرات ژیروسکوپی	تغییر در جهت جسم صلب و تغییر در جهت صفحه ملخ

همچنین در راستای استخراج مدل دقیق کوادروتورها، علاوه بر اثرات مختلف فوق، مفروضات مهم زیر نیز در نظر گرفته می‌شوند[۲٦] :

۱- ساختار کوادروتورها و ملخ‌ها صلب می‌باشد.

۲- از اثرات زمین صرفنظر و زمین مسطح فرض می‌شود.

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]

۳- ساختار کوادروتورها متقارن فرض می‌شود.

٤- نیروی رانش و پسار با مربع سرعت زاویه‌ای متناسب می‌باشد.

٥- مرکز جرم و مبدا فریم متصل به کوادروتورها برهم منطبق هستند.

٦- محورهای فریم بدنی متصل به کوادروتورها بر محورهای اینرسی اصلی کوادروتورها منطبق هستند که در این صورت ماتریس ممان اینرسی، قطری شده و باعث ساده‌تر شدن معادلات می‌گردد.

در ادامه اثرات مکانیکی و آیرودینامیکی در دستگاه مختصات متصل به بدنه کوادروتورها که از این به بعد با نام دستگاه مختصات بدنی[1] شناخته می‌شود (و بر مرکز جرم و مرکز ساختار کوادروتور منطبق است) و جابجایی و جهت کوادروتورها نسبت به دستگاه مختصات زمین که به آن دستگاه مختصات اینرسی هم گفته می‌شود، بدست می‌آید؛ لذا، روابط دینامیکی کوادروتورها در دستگاه بدنی محاسبه می‌شوند و باید به دستگاه مختصات زمین انتقال پیدا کند و موقعیت و جهت آن‌ها در این دستگاه تحلیل گردند.

با توجه به اینکه نیرو و گشتاور لازم برای حرکت و جهت‌گیری کوادروتورها از نیرو وگشتاورهای آیرودینامیکی حاصل از چرخش ملخ‌ها به دست می‌آید، لذا در ابتدا معادلات موتور و نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی ملخ‌ها بررسی می‌شوند، سپس مدل کوادروتور استخراج می‌گردد.

۲-۱-۱- مدل‌سازی موتور الکتریکی

موتورهای مورد استفاده در مولتی روتورها، از نوع DC بدون جاروبک با اتصال مستقیم به ملخ‌ها هستند و با فرض کوچک بودن اندوکتانس، معادلات آن‌ها مانند موتور DC معمولی و مطابق شکل ۲ و به صورت زیر مدل‌سازی می‌شوند:

$$v_a = R_a i_a + e \qquad (۱)$$

در این رابطه e نیرو محرکه القایی است که از رابطه زیر بدست می‌آید.

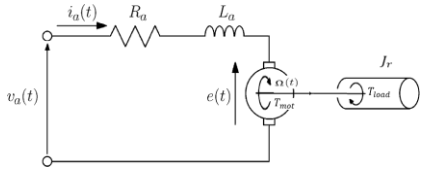
$$e = K_{mot}\Omega \qquad (۲)$$

در نتیجه جریان مدار مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$i_a = \frac{v_a - K_{mot}\Omega}{R_a} \qquad (۳)$$

با توجه به اینکه بار بدون چرخ‌دنده به روتور کوپل شده است، قوانین قسمت مکانیکی به صورت زیر بدست می‌آید.

$$J_r\dot{\Omega} = T_{mot} - T_{load} \qquad (۴)$$



شکل ۲. دیاگرام مداری موتور بدون جاروبک.

که در آن T_{mot} گشتاور تولید شده توسط موتور و برابر با $K_e i_a$ است که K_e ثابت الکتریکی موتور و برای موتورهای کوچک، این ضریب تقریبا برابر با K_{mot} می‌باشد. T_{load} گشتاور بار و برابر گشتاور تولید شده توسط ملخ‌ها می‌باشد.

۲-۱-۲- روابط نیرو و گشتاور آیرودینامیکی ملخ

بر اساس اثر دوران، با چرخش ملخ، یک نیرو به نام نیروی آیرودینامیکی و همچنین یک گشتاور به نام گشتاور آیرودینامیکی تولید می‌شود. روابط این نیرو و گشتاور بصورت زیر بیان می‌شوند [۳۷] و [۳۸]:

$$F = \frac{1}{2}\rho A C_T r_b^2 \Omega^2 \qquad (۵)$$

$$M = \frac{1}{2}\rho A C_D r_b^2 \Omega^2 \qquad (۶)$$

که در این رابطه ρ چگالی هوا، A مساحت پره‌ها، C_T ضریب آیرودینامیکی نیروی رانش، C_D ضریب آیرودینامیکی پسار، r_b شعاع پره و Ω سرعت زاویه‌ای ملخ که با سرعت چرخش روتور برابر است، می‌باشند.

همانطور که در روابط مشاهده می‌شود، می‌توان دریافت که نیرو و گشتاور آیرودینامیکی کاملا وابسته به هندسه ملخ و چگالی هوا می‌باشد. باتوجه به اینکه در سیستم کوادروتور، بیشینه ارتفاع معمولاً محدود می‌باشد، در نتیجه چگالی هوا می تواند ثابت در نظر گرفته شود. در نتیجه روابط (۸) و (۹) بصورت زیر ساده‌سازی می‌شود:

[1] Body Coordinate System

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]

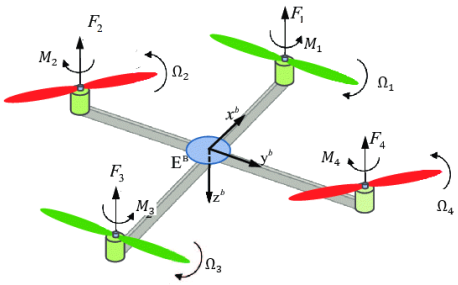
$$F = K_f \Omega^2 \quad (۷)$$

$$M = K_M \Omega^2 \quad (۸)$$

که در دو رابطه بالا، K_f و K_M، به ترتیب ثابت‌های آیرودینامیکی نیرو و گشتاور آیرودینامیکی هستند که مقادیر آنها می‌توانند بصورت آزمایشگاهی برای هر ملخ استخراج گردد. حال باتوجه به گشتاورها و نیروهای آیرودینامیکی ناشی از هر روتور، می‌توان به مطالعه نیروها و گشتاورهای اعمال شده بر کوادروتور پرداخت و معادلات کوادروتور را استخراج کرد. در همین راستا، در شکل ۳ ممان‌ها و نیروهای وارد شده بر کوادروتور نشان داده شده است و همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، هر روتور دارای یک نیروی رانش رو به بالا (F_i) و یک گشتاور (M_i) است که در جهت مخالف با جهت دوران روتور i وارد می‌شود.

۲-۱-۳- مدل‌سازی کوادروتورها

ساختار مکانیکی کوادروتورها در حالت کلی به دو صورت کراس و پلاس می‌باشند. در حالت کراس بازوهای کوادروتور بصورت ضربدری و با زاویه ٤٥ درجه نسبت به محورهای طولی و عرضی بدنه کوادروتور هستند و در حالت پلاس بازوهای کوادروتور دقیقا بر محورهای طولی و عرضی بدنی کوادروتور منطبق می‌باشند (شکل ٤). مدل‌سازی در هر دو ساختار بصورت مشابه می‌باشد و تنها در انتها بردار نیروها و گشتاورها متناسب با زاویه بازوها نسبت به محورهای مختصات بدنی تعیین می‌گردند.

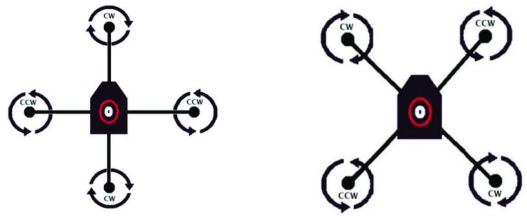


شکل ۳. نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی روتورها. [۲۷]

با توجه به اینکه نیروها و گشتاورها در دستگاه مختصات متحرک بدنی محاسبه می‌شوند و موقعیت و جهت کوادروتورها در دستگاه مختصات ثابت زمین بدست می‌آیند، لذا باید هم سینماتیک و هم دینامیک مربوط به این وسائل هوایی برای مدل‌سازی تعیین گردند.

۲-۱-۳-۱- مدل سینماتیک

برای بدست آوردن مدل سینماتیک، فرض کنید دستگاه ثابت زمین با O_E و محورهای $\{X_E, Y_E, Z_E\}$ و دستگاه متحرک بدنی با O_B و محورهای $\{X_B, Y_B, Z_B\}$ نشان داده شوند. سمت مثبت و منفی محور X_B به ترتیب بعنوان جلو و عقب کوادروتور و سمت مثبت و منفی محور Y_B به ترتیب به عنوان سمت راست و سمت چپ کوادروتور در نظر گرفته می‌شوند. موتور جلو بعنوان موتور شماره ۱، موتور سمت چپ بعنوان موتور شماره ۲، موتور عقب بعنوان موتور شماره ۳ و موتور سمت راست به عنوان موتور شماره ٤ در نظر گرفته می‌شوند و به ترتیب نیروها و گشتاورهای ۱ تا ٤ را به بدنه کوادروتور اعمال می‌کنند (شکل ۵).



ب) الف)

شکل ٤. ساختار مکانیکی کوادروتورها. الف) ساختار ضربدر، ب) ساختار بعلاوه. [۲۸]

دستگاه مختصات بدنی نسبت به کوادروتور ثابت و نسبت به دستگاه مختصات زمین متحرک می‌باشد. لذا از چرخش کوادروتور حول محور X_E حرکت رول با زاویه φ و به همین ترتیب از چرخش کوادروتور حول محور Y_E حرکت پیچ با زاویه θ و همچنین از چرخش کوادروتور حول محور Z_E حرکت یاو با زاویه ψ ایجاد می‌شود. بنابراین ماتریس‌های دوران حول محورهای $\{X_E, Y_E, Z_E\}$ بصورت زیر بدست می‌آیند:

$$R^X_{e/b} = \begin{pmatrix} ۱ & ۰ & ۰ \\ ۰ & c\phi & -s\phi \\ ۰ & s\phi & c\phi \end{pmatrix} \quad (۹)$$

$$R^Y_{e/b} = \begin{pmatrix} c\theta & ۰ & s\theta \\ ۰ & ۱ & ۰ \\ -s\theta & ۰ & c\theta \end{pmatrix} \quad (۱۰)$$

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]

طراحی کنترل‌کننده‌ی مقاوم تحمل‌پذیر عیب برای کوادروتور بازودار در حضور نامعینی پارامتری و عیب عملگر

$$R_{e/b}^{Z}=\begin{pmatrix} c\psi & -s\psi & ۰ \\ s\psi & c\psi & ۰ \\ ۰ & ۰ & ۱ \end{pmatrix} \qquad (۱۱)$$

در این روابط $R_{e/b}^{X}$، $R_{e/b}^{Y}$ و $R_{e/b}^{Z}$ به ترتیب بیانگر ماتریس دوران حول محور $\boldsymbol{X}$، $\boldsymbol{Y}$ و $\boldsymbol{Z}$ برای دوران مختصات از دستگاه بدنی به دستگاه زمین و منظور از $\boldsymbol{c}$ و $\boldsymbol{s}$ به ترتیب کسینوس و سینوس می‌باشد. ماتریس دوران از دستگاه بدنی به دستگاه اینرسی در حالت کلی از حاصلضرب سه ماتریس بالا بدست می‌آید که به صورت زیر می‌باشد: [۲۹]

$$R_{e/b}=\begin{pmatrix} c\theta c\psi & -s\psi c\phi+s\phi s\theta c\psi & c\phi s\theta c\psi+s\phi s\psi \\ c\theta s\psi & s\phi s\theta s\psi+c\phi c\psi & c\phi s\theta s\psi-s\phi c\psi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{pmatrix} \qquad (۱۲)$$

ماتریس دوران در محاسبات مدل کوادروتور تاثیر گذار است و به کمک آن می‌توان نیروهای رانش تولید شده توسط ملخ‌های کوادروتور را در دستگاه زمین نمایش داد و یا تاثیر نیروی گرانشی را در دستگاه بدنی کوادروتور مورد محاسبه قرار داد. ماتریس $R_{e/b}$ **یا** $R_{b/e}=R_{e/b}^{T}$ در مدل‌سازی دینامیکی کوادروتور با این هدف مورد استفاده و اهمیت قرار گرفته است که در مدل دینامیکی این پرنده برخی از متغیرها در دستگاه مرجع بدنی و برخی دیگر در مرجع اینرسی اندازه‌گیری و فرمول‌بندی می‌شوند و بمنظور بیان معادلات حالت سیستم در یک مرجع واحد، بایستی از ماتریس دوران استفاده نمود.

همچنین به منظور ایجاد یک تبدیل بین سرعت‌های اویلری یعنی $\dot{\eta}=(\dot{\phi},\dot{\theta},\dot{\psi})^{T}$ **که** در دستگاه مرجع ساکن اندازه‌گیری می‌شوند و نیز سرعت‌های زاویه‌ای کوادروتور یعنی $\omega=(p,q,r)^{T}$ یک تبدیل بصورت رابطه زیر مورد نیاز است.

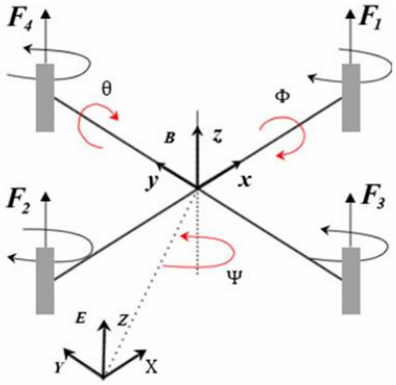
$$S_{\omega/\dot{\eta}}=\begin{pmatrix} ۱ & ۰ & s\theta \\ ۰ & c\phi & s\phi c\theta \\ ۰ & -s\phi & c\phi c\theta \end{pmatrix} \qquad (۱۳)$$

برای ساده سازی در حالتی که کوادروتور شناور است و یا با فرض اینکه زوایای اویلر بسیار کوچک هستند، می‌توان از تقریب $\cos(\theta)=\cos(\phi)\cong ۱$ و $\sin(\theta)=\sin(\phi)\cong ۰$ استفاده کرد و آنگاه ماتریس $\boldsymbol{S_{\omega/\dot{\eta}}}$ به یک ماتریس همانی تبدیل می‌شود.

با محاسبه ماتریس‌های بدست آمده می‌توان معادلات دینامیکی را در دستگاه بدنی محاسبه کرد و به دستگاه اینرسی انتقال داد.

۲-۱-۳-۲- مدل دینامیکی

حرکت کوادروتور قابل تقسیم به دو نوع دورانی و انتقالی می‌باشد[۳۰]. لذا باتوجه به توضیحات و مفروضات ارائه شده در بالا و همچنین تعریف دستگاه‌های مرجع مورد نیاز به استخراج مدل دینامیکی کوادروتور پرداخته می‌شود.



شکل ۵. نیروها و گشتاورهای کوادروتور پلاس در مختصات بدنی و موقعیت و جهت آن در مختصات اینرسی. [۳۱]

معادلات حرکت دورانی:

معادلات حرکت دورانی کوادروتور در دستگاه مرجع بدنی متصل به مرکز ساختار و مرکز جرم کوادروتور و بر اساس روش نیوتن- اویلر و با معادله کلی زیر بیان می‌شود.

$$J_b\dot{\omega}_b+\omega_b\times J_b\omega_b+M_G=M_b \qquad (۱۴)$$

که در این رابطه J_b ماتریس قطری اینرسی کوادروتور، $\boldsymbol{\omega_b}=\boldsymbol{(p,q,r)^T}$ بردار سرعت زاویه‌ای سیستم، M_G ممان‌های ژیروسکوپی ناشی از اینرسی روتورها، $M_b=(M_{X_b},M_{Y_b},M_{Z_b})^{T}$ بردار گشتاورهای اعمالی بر روی کوادروتور در دستگاه مرجع بدنی می‌باشند.

دو عبارت اول مربوط به نرخ تغییرات ممان زاویه‌ای در دستگاه مرجع بدنی می‌باشد. M_G ممان ژیروسکوپی و ناشی از اینرسی روتورها می‌باشد که بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$M_G=\omega_b\times\begin{pmatrix} ۰ \\ ۰ \\ J_r\Omega_r \end{pmatrix} \qquad (۱۵)$$

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]

در رابطه فوق J_r اینرسی روتورها و Ω_r سرعت نسبی روتورها است که از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\Omega_r = -\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4 \quad (16)$$

که Ω_i برای $i = 1, \dots, 4$ سرعت زاویه‌ای هر یک از روتورهای کوادروتور می‌باشد.

معادلات حرکت دورانی در دستگاه مرجع بدنی محاسبه شده‌اند، در این حالت با توجه به اینکه ساختار مکانیکی کوادروتور نیز متقارن است، ماتریس اینرسی J_b بصورت زیر بدست می‌آید.

$$J_b = \begin{pmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{pmatrix} \quad (17)$$

در رابطه فوق I_{xx}، I_{yy} و I_{zz} ممان‌ها در راستای محورها در دستگاه مرجع متحرک می‌باشند. ماتریس ممان اینرسی کوادروتور یک ماتریس قطری می‌باشد که المان‌های غیرقطری آن بدلیل تقارن کوادروتور صفر هستند.

برای محاسبه مقدار بردار گشتاورهای کوادروتور در مختصات بدنی باید تأثیر نیروها و گشتاورهای روتورها بر روی هر یک از دوران‌های رول، پیچ و یاو محاسبه شوند. بردار $M_b = \left(M_{X_b}, M_{Y_b}, M_{Z_b}\right)^T$ شامل سه گشتاور حول محور X_B، Y_B و Z_B می‌باشد که با توجه به شکل ۵ محاسبه می‌شوند.

مطابق با شکل ۵، گشتاور ایجاد شده حول محور X_B متناسب با اختلاف نیروی رانش بین روتور شماره ۲ و ٤ می‌باشد که علامت (جهت) آن با توجه به قانون دست راست محاسبه می‌شود. اگر طول بازوی کوادروتور، l_u (فاصله بین محور دوران هر یک از روتورها تا مرکز دستگاه مرجع بدنی) در نظر گرفته شود، گشتاور ایجاد شده حول محور X_B به صورت زیر بدست می‌آید.

$$M_{X_b} = F_2 l_u - F_4 l_u \quad (18)$$

به همین ترتیب نیروی رانش روتورهای ۱ و ۳ باعث ایجاد گشتاور حول محور Y_B می‌شوند که با استفاده از قانون دست راست، این مقدار بصورت زیر بدست می‌آید.

$$M_{Y_b} = F_1 l_u - F_3 l_u \quad (19)$$

بر خلاف گشتاورهای ایجاد شده حول محورهای X_B و Y_B، گشتاور ایجاد شده حول محور Z_B از نیروی رانش روتورها بدست نمی‌آید، بلکه بر اساس گشتاور ایجاد شده توسط هر روتور به دست می‌آید و با استفاده از قانون دست راست و جهت چرخش روتورها بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$M_{Z_b} = M_1 + M_3 - M_2 - M_4 \quad (20)$$

که M_1 تا M_4 گشتاورهای ایجاد شده توسط هر روتور می‌باشند و از گشتاورهای آیرودینامیکی نشأت می‌گیرند.

حال با استفاده از روابط (۱۸) تا (۲۰) بردار $M_b = \left(M_{X_b}, M_{Y_b}, M_{Z_b}\right)^T$ شامل سه گشتاور حول محور X_B، Y_B و Z_B بصورت زیر بدست می‌آید.

$$M_b = \begin{pmatrix} F_2 l_u - F_4 l_u \\ F_1 l_u - F_3 l_u \\ M_1 + M_3 - M_2 - M_4 \end{pmatrix} \quad (21)$$

که در رابطه فوق، l_u فاصله بین محور دوران هر یک از روتورها تا مرکز دستگاه مرجع متحرک می‌باشد و بایستی منطبق بر مرکز جرم کوادروتور باشد. از سوی دیگر، با جایگذاری مقادیر نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی روتورها، بردار M_b به صورت زیر به دست می‌آید.

$$M_b = \begin{pmatrix} l_u K_f(\Omega_2^2 - \Omega_4^2) \\ l_u K_f(\Omega_1^2 - \Omega_3^2) \\ K_M(\Omega_1^2 + \Omega_3^2 - \Omega_2^2 - \Omega_4^2) \end{pmatrix} \quad (22)$$

معادلات حرکت انتقالی:

حال پس از استخراج معادلات حرکت دورانی کوادروتور در دستگاه مرجع بدنی، معادله حرکت انتقالی کوادروتور در دستگاه مرجع بدنی بصورت زیر بدست می‌آید [۳۰].

$$\dot{V}_b = \frac{1}{m} F_b + R_{b/e} F_G - \omega_b \times V_b \quad (23)$$

که در این رابطه $V_b = [u, v, w]^T$ بردار سرعت کوادروتور در دستگاه مختصات بدنی، $F_b = \left[F_{X_b}, F_{Y_b}, F_{Z_b}\right]^T$ بردار نیروهای غیر گرانشی اعمالی بر کوادروتور در دستگاه مختصات بدنی، $R_{b/e}$ ماتریس دوران از دستگاه اینرسی به دستگاه بدنی و $F_G = [0, 0, mg]^T$ بردار نیروی گرانش زمین در دستگاه مختصات اینرسی می‌باشند. بردار نیروی گرانش زمین فقط در راستای مرکز زمین یا همان محور Z_E دارای مقدار است که همان نیروی وزن می‌باشد که باید به دستگاه بدنی انتقال پیدا کند. در اینجا m وزن کوادروتور و g شتاب گرانش زمین می‌باشد.

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]

طراحی کنترل‌کننده‌ی مقاوم تحمل‌پذیر عیب برای کوادروتور بازودار در حضور نامعینی پارامتری و عیب عملگر

مقدار نیروی $\boldsymbol{F_b}$ در دستگاه مختصات بدنی شامل نیروهایی است که در جهت محورهای مختصات بدنی به کوادروتور اعمال می‌شوند. با توجه به این که هر روتور تنها در راستای محور $\boldsymbol{Z_B}$ نیروی رانش تولید می‌کند، لذا مجموع نیروی رانش هر ٤ روتور تنها در راستای محور عمودی دستگاه بدنی وجود دارد و در راستای محورهای طولی و عرضی دستگاه بدنی هیچ نیرویی وارد نمی‌شود. بنابراین بردار نیروی $\boldsymbol{F_b}$ به صورت زیر بدست می‌آید.

$$F_b = \begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ -(F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \end{pmatrix} \quad (٢٤)$$

که با جایگذاری مقادیر نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی روتورها، بردار $\boldsymbol{F_b}$ به صورت زیر به دست می‌آید.

$$F_b = \begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ -K_f(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \end{pmatrix} \quad (٢٥)$$

معادلات حرکت انتقالی را در دستگاه اینرسی نیز می‌توان محاسبه کرد. در این حالت نیروهای اعمال شده در دستگاه بدنی به دستگاه اینرسی انتقال داده می‌شوند و معادلات بصورت زیر بدست می‌آیند.

$$m\ddot{P}_e = R_{e/b}F_b + F_G \quad (٢٦)$$

که در این رابطه $\boldsymbol{P_e} = [\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}, \boldsymbol{z}]^{\boldsymbol{T}}$ بردار موقعیت و بیانگر فاصله کوادروتور از مبدأ دستگاه مختصات اینرسی و $\boldsymbol{R_{e/b}}$ ماتریس دوران از دستگاه بدنی به دستگاه اینرسی می‌باشند.

با توجه به زاویه‌ای که بازوهای کوادروتور با محورهای مختصات بدنی ایجاد می‌کنند، مؤلفه‌های نیرو و گشتاور هر روتور بر روی محورهای مختصات بدنی تجزیه می‌شوند. در این حالت بردار نیرو و گشتاور اعمالی به بدنه کوادروتور نوع کراس از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$F_b = \begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ -(F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \end{pmatrix} \quad (٢٧)$$

$$M_b = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2}(F_2 + F_4 - F_1 - F_3)l_u \\ F_1 l_u - F_3 l_u \\ M_1 + M_3 - M_2 - M_4 \end{pmatrix} \quad (٢٨)$$

در این بخش مدل کوادروتور استخراج شد و در ادامه به معادلات بازوی ربات پرداخته می‌شود.

٢-١-٤- مدل‌سازی بازوی ربات

معادله‌ی دینامیکی سیستم ربات باتوجه به شکل ٦ و پارامترهای آن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$H(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (٢٩)$$

که در این رابطه $\boldsymbol{H(q)}$ ماتریس اینرسی، $\boldsymbol{C(q,\dot{q})}$ ماتریس کوریولیس و نیروهای گریز از مرکز و $\boldsymbol{G(q)}$ گشتاورهای گرانشی هستند که بصورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$H(q) = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix}$$

$$h_{11} = l_2^2 m_2 + 2l_1 l_2 m_2 cosq_2 + l_1^2(m_1 + m_2)$$

$$h_{12} = l_2^2 m_2 + l_1 l_2 m_2 cosq_2$$

$$h_{21} = h_{12}$$

$$h_{22} = l_2^2 m_2$$

$$C(q,\dot{q}) = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & \cdot \end{pmatrix}$$

$$c_{11} = -l_1 l_2 m_2 sin(q_2)\dot{q}_2$$

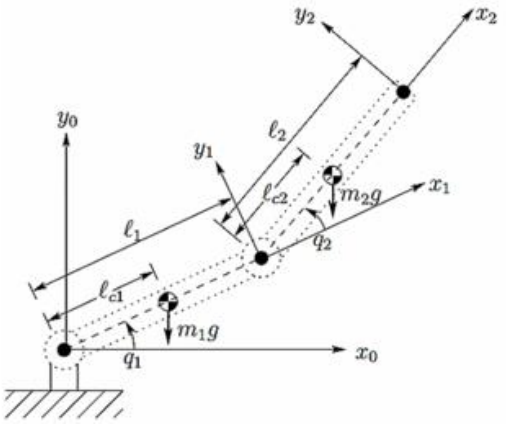
$$c_{12} = -l_1 l_2 m_2 sin(q_2)(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)$$

$$c_{21} = l_1 l_2 m_2 sin(q_2)\dot{q}_1$$

$$G(q) = \begin{pmatrix} g(m_2 l_2 cos(q_1 + q_2) + (m_1 + m_2)l_1 cosq_1) \\ g m_2 l_2 cos(q_1 + q_2) \end{pmatrix}$$

$$\tau = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix}$$

و $\boldsymbol{l_i}$، $\boldsymbol{m_i}$، $\boldsymbol{q_i}$، $\boldsymbol{\dot{q}_i}$، $\boldsymbol{\ddot{q}_i}$ و $\boldsymbol{\tau_i}$ به ترتیب طول، جرم، زاویه، سرعت زاویه‌ای، شتاب زاویه‌ای و گشتاور اعمالی به لینک $\boldsymbol{i}$ام بازوی ربات می‌باشند.



شکل ٦. دیاگرام ربات دو لینکی. [٣٩]

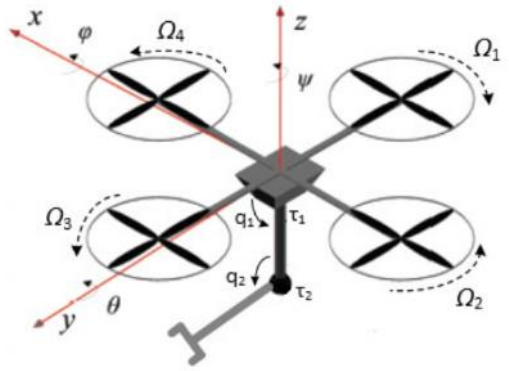
٢-١-٥- مدل‌سازی کوادروتور بازودار

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]

در این بخش مدل دینامیکی کامل یک کوادروتور مجهز به بازوی رباتیک دو درجه آزادی (شکل ۷) به منظور بهره‌برداری در طراح کنترل‌کننده، استخراج می‌شود که شدیداً تحت‌تاثیر دینامیک جفت شده غیرمعمول وسیله هوایی و بازوی رباتیک قرار دارد [۳۱]. باید توجه داشت توزیع جرم یک کوادروتور بازودار با حرکت بازو تغییر می‌کند و تغییرات دینامیکی در مرکز جرم و ماتریس اینرسی و همچنین نیروهای واکنش (گشتاور) بین وسیله نقلیه و بازوی ربات وجود دارد؛ لذا، در این مقاله یک مدل مبتنی بر عدم قطعیت شامل مدل‌های اسمی کوادروتور و بازوی رباتیک پیشنهاد می‌شود. کوادروتور متشکل از چهار روتور است که به طور متقارن بر روی یک قاب متقاطع قرار گرفته‌اند که در آن دو روتور در جهت عقربه‌های ساعت و دو روتور دیگر در خلاف جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخند. سرعت چهار روتور یک نیروی رانش کلی برای شتاب انتقالی و سه جزء گشتاور به منظور حرکات چرخشی ایجاد می‌کند. در شکل ۷، بردار $\boldsymbol{p} = [\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}, \boldsymbol{z}]^{\boldsymbol{T}}$ مختصات دکارتی وسیله، $\boldsymbol{\Theta} = [\boldsymbol{\phi}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\psi}]^{\boldsymbol{T}}$ زوایای اویلر (پیچ، رول، یاو)، $\boldsymbol{I_{xx}}$، $\boldsymbol{I_{yy}}$ و $\boldsymbol{I_{zz}}$، عناصر قطری ماتریس اینرسی و $\boldsymbol{m}$، جرم کوادروتور است. همچنین، برای بازوی ربات دو لینکی فرض کنید که $\boldsymbol{q} = [\boldsymbol{q_1}, \boldsymbol{q_2}]^{\boldsymbol{T}}$ مختصات لینک‌های ربات را در سیستم مرجع اینرسی نشان می‌دهد. با توجه به توصیف رایج کوادروتورها که در مراجع به کار گرفته شده است [۳۲]، با در نظر گرفتن معادله بازوی رباتیک، سیستم کوادروتور بازودار شکل ۷ به صورت زیر مدل می‌شود.

$$\begin{cases} \ddot{x} = u_x \dfrac{u_۱}{M} - \dfrac{k_۱ \dot{x}}{M} \\ \ddot{y} = u_y \dfrac{u_۱}{M} - \dfrac{k_۲ \dot{y}}{M} \\ \ddot{z} = (cos\theta cos\phi) \dfrac{u_۱}{M} - \dfrac{k_۳ \dot{z}}{M} - g \\ \ddot{\phi} = a_۱ \dot{\theta}\dot{\psi} - \dfrac{u_۱}{\bar{I}_x(q)} + \dfrac{\tau_a(q, \dot{q}, \tau)}{\bar{I}_x(q)} \\ \ddot{\theta} = a_۲ \dot{\phi}\dot{\psi} - \dfrac{u_۲}{\bar{I}_y(q)} \\ \ddot{\psi} = a_۳ \dot{\phi}\dot{\psi} - \dfrac{u_۳}{\bar{I}_z(q)} \end{cases} \quad (۳۰)$$

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau - \tau_r(\eta, \dot{\eta}, u) \quad (۳۱)$$



شکل ۷. کوادروتور مجهز به بازوی ربات دو درجه آزادی. [۳۳]

که در روابط فوق $\boldsymbol{\tau_a(q, \dot{q}, \tau)}$ گشتاور اعمالی از بازوی ربات به کوادروتور، $\boldsymbol{\tau_r(\eta, \dot{\eta}, u)}$ گشتاور اعمالی از کوادروتور به بازوی ربات می باشد. علاوه بر این $\boldsymbol{u_x}$ ، $\boldsymbol{u_y}$ و ضرائب $\boldsymbol{a_1}$ تا $\boldsymbol{a_3}$ در روابط (۳۰) و (۳۱) با استفاده از روابط زیر محاسبه می شوند:

$$u_x = (sin\psi sin\varphi + cos\varphi sin\theta cos\psi) \quad (۳۲)$$

$$u_y = (-sin\phi cos\psi + sin\psi sin\theta cos\varphi) \quad (۳۳)$$

و:

$$a_۱ = \frac{\left(\bar{I}_y(q) - \bar{I}_z(q)\right)}{\bar{I}_x(q)}$$

$$a_۲ = \frac{\left(\bar{I}_z(q) - \bar{I}_x(q)\right)}{\bar{I}_y(q)}$$

$$a_۳ = \frac{\left(\bar{I}_x(q) - \bar{I}_y(q)\right)}{\bar{I}_z(q)}$$

$\boldsymbol{\bar{I}_{x,y,z}(q)}$ ممان اینرسی سیستم کلی کوادروتور بازودار در سه جهت $\boldsymbol{x}$، $\boldsymbol{y}$ و $\boldsymbol{z}$ می‌باشد که مقدار آنها تابعی از زوایای بازوی ربات بوده و به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\bar{I}_x(q) = I_{xx} + \frac{m_۱ l_۱^۲ sin^۳(q_۱)}{۳} + \frac{m_۲ l_۲^۲ sin^۳(q_۲)}{۳} + m_۲ l_۱^۲ sin^۲(q_۱)$$

$$\bar{I}_y(q) = I_{yy} + \frac{m_۱ l_۱^۲}{۳} + \frac{m_۲ l_۲^۲}{۳} + m_۲ l_۱^۲$$

$$\bar{I}_z(q) = I_{zz} + \frac{m_۱ l_۱^۲ cos^۳(q_۱)}{۳} + \frac{m_۲ l_۲^۲ cos^۳(q_۲)}{۳} + m_۲ l_۱^۲ cos^۲(q_۱)$$

گشتاور اعمالی از بازوی ربات به کوادروتور با استفاده از رابطه زیر به دست می آید:

$$\tau_a(q, \dot{q}, \tau) = \tau_۱ + m_۱ g l_۱ \cos(q_۱) + m_۲ g l_۲ \cos(q_۱ - q_۲) + \tau_۲$$

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]

و $\boldsymbol{u} = [\boldsymbol{u_1}, \boldsymbol{u_2}, \boldsymbol{u_3}, \boldsymbol{u_4}]^{\boldsymbol{T}}$ بردار ورودی کنترلی می‌باشد که با بهره‌گیری از (۸) و (۹) بصورت زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{aligned} u_1 &= K_f(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ u_2 &= K_f(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ u_3 &= K_M(\Omega_4^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ u_4 &= K_f(\Omega_4^2 + \Omega_3^2 + \Omega_2^2 + \Omega_1^2) \end{aligned} \quad (۳۴)$$

در این حالت رابطه بین بردار ورودی کنترلی و سرعت‌های زاویه‌ای را می‌توان به فرم ماتریسی زیر بازنویسی کرد.

$$u = \Gamma \Omega^2 \quad (۳۵)$$

که در آن:

$$\Gamma = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -K_f & K_f \\ -K_f & K_f & 0 & 0 \\ -K_M & -K_M & K_M & K_M \\ K_f & K_f & K_f & K_f \end{pmatrix}$$

در رابطه (۳۵)، $\boldsymbol{\Omega}$ برداری شامل سرعت‌های زاویه‌ای چهار روتور کوادروتور است.

در ادامه به بیان عیب عملگر به صورت از دست رفتن اثربخشی روتورها پرداخته می‌شود.

۲-۲. عیب کاهش اثربخشی روتورها

مدل غیرخطی فضای حالت کوادروتور مورد بحث درحالت کلی به صورت زیر تعریف می‌شود: [۳۱]

$$\dot{x} = F(x) + G(x,u) + d \quad (۳۶)$$

که در این رابطه $\boldsymbol{d}$ معرف اغتشاشات خارجی و :

$$x = \left[x, \dot{x}, y, \dot{y}, z, \dot{z}, \phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \psi, \dot{\psi}\right]^T$$

$$F(x) = \begin{pmatrix} x_2 \\ -\frac{k_1}{M}x_2 \\ x_4 \\ -\frac{k_1}{M}x_4 \\ x_6 \\ -\frac{k_1}{M}x_6 - g \\ x_8 \\ a_1 x_{10} x_{12} \\ x_{10} \\ a_2 x_8 x_{12} \\ x_{12} \\ a_3 x_8 x_{10} \end{pmatrix}$$

$$G(x,u) = \begin{pmatrix} 0 \\ u_x \frac{u_4}{M} \\ 0 \\ u_y \frac{u_4}{M} \\ 0 \\ (cos\theta cos\phi)\frac{u_4}{M} \\ 0 \\ -\frac{u_1}{\bar{I}_x(q)} \\ 0 \\ -\frac{u_2}{\bar{I}_y(q)} \\ 0 \\ -\frac{u_3}{\bar{I}_z(q)} \end{pmatrix}$$

ثابت می‌شود که خطای عملگر را می‌توان به عنوان یک عبارت افزودنی در نظر گرفت.

بنابراین می‌توان یک سیستم معیوب (همراه با عیب عملگر) را به صورت زیر نشان داد: [۳۱]

$$\dot{x} = F(x) + G(x,u) + d + f_a \quad (۳۷)$$

فرض می‌شود که خطای محرک در یکی از روتورها در واقع از بین رفتن مقداری از اثربخشی روتور است. از سوی دیگر، اثر خطا با متغیر s مدل می‌شود که مقداری بین صفر و یک دارد ($0 \le s \le 1$) و در مجذور سرعت روتورهای ۱ تا ۴ ضرب می‌شود. اگر این متغیر برای روتور شماره i مقداری کمتر از ۱ داشته باشد بدین معنی است که اثربخشی روتور i کاهش یافته است. بنابراین اگر فرض شود که خطا در روتور ۱ رخ می‌دهد، در یک سیستم معیوب رابطه زیر برای سرعت روتورها در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{pmatrix} \Omega_{1f}^2 \\ \Omega_{2f}^2 \\ \Omega_{3f}^2 \\ \Omega_{4f}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s\Omega_1^2 \\ \Omega_2^2 \\ \Omega_3^2 \\ \Omega_4^2 \end{pmatrix}, \quad 0 \le s \le 1 \quad (۳۸)$$

اگر s به سمت صفر تمایل داشته باشد، روتور مورد بحث به طور کامل از کار می‌افتد و اگر به یک میل نماید، روتور به درستی کار می‌کند. ورودی‌های کنترلی با در نظر گرفتن بروز عیب در روتور ۱ را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]

$$\begin{pmatrix} u_{1f} \\ u_{2f} \\ u_{3f} \\ u_{4f} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -K_f & K_f \\ -K_f & K_f & 0 & 0 \\ -K_M & -K_M & K_M & K_M \\ K_f & K_f & K_f & K_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s\Omega_1^2 \\ \Omega_2^2 \\ \Omega_3^2 \\ \Omega_4^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 + (1-s)K_f\Omega_1^2 \\ u_3 - (1-s)K_M\Omega_1^2 \\ u_4 - (1-s)K_f\Omega_1^2 \end{pmatrix} \quad (۳۹)$$

رابطه بالا را می‌توان بصورت زیر خلاصه کرد:

$$u_f = u - u_{add} \quad (۴۰)$$

که $\boldsymbol{u_f}$ بردار ورودی در حالت معیوب، $\boldsymbol{u}$ بردار ورودی در حالت نرمال و $\boldsymbol{u_{add}}$ تفاوت بین $\boldsymbol{u_f}$ و $\boldsymbol{u}$ می‌باشد و بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{pmatrix} u_{1add} \\ u_{2add} \\ u_{3add} \\ u_{4add} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -(1-s)K_f\Omega_1^2 \\ (1-s)K_M\Omega_1^2 \\ (1-s)K_f\Omega_1^2 \end{pmatrix} \quad (۴۱)$$

همانطور که مشاهده می‌شود عیب در یکی از موتورها که در اینجا موتور شماره ۱ می‌باشد بر روی سه ورودی کنترلی تأثیر می‌گذارد.

۲-۳. طراحی کنترل‌کننده PIR

در این قسمت سیستم کوادروتور بصورت دو زیر سیستم جداگانه ربات دو لینکی و یک کوادروتور در نظر گرفته می‌شود؛ ولی اثرات کوپلینگ آن‌ها بعنوان اغتشاش خارجی لحاظ می‌گردد. بنابراین ابتدا برای ربات دو لینکی طراحی انجام می‌شود و سپس بر روی کنترل موقعیت و وضعیت کوادروتور اعمال می‌شود.

۲-۳-۱- کنترل ربات

مدل ربات دو لینکی در رابطه (۳۱) را در نظر بگیرید. تعیین مقادیر دقیق پارامترهای $\boldsymbol{H(q)}$، $\boldsymbol{C(q,\dot{q})}$ و $\boldsymbol{G(q)}$ در مدل دینامیکی به دلیل یک سری عوامل تأثیرگذار مانند پیچیدگی مکانیسم ربات، تغییرات محیطی و خطاهای اندازه‌گیری در عملکرد واقعی ربات دشوار است. بنابراین مقادیر واقعی این ماتریس‌ها به دو بخش نامی و بخش خطای مدل بصورت زیر در نظر گرفته می‌شوند. [۳٤]

$$H(q) = H_0(q) + \Delta E_M(q) \quad (۴۲)$$

$$C(q,\dot{q}) = C_0(q,\dot{q}) + \Delta E_C(q,\dot{q}) \quad (۴۳)$$

$$G(q) = G_0(q) + \Delta E_G(q) \quad (۴۴)$$

بنابراین مدل دینامیکی (۳۱) به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$H_0(q)\ddot{q} + C_0(q,\dot{q})\dot{q} + G_0(q) + E(q,\dot{q}) = \tau \quad (۴۵)$$

$$E(q,\dot{q}) = \Delta E_M(q) + \Delta E_C(q,\dot{q}) + \Delta E_G(q) + \tau_r(\eta,\dot{\eta},u) \quad (۴۶)$$

همانطور که مشاهده می‌شود در (٤٥) اثرات اغتشاش و نامعینی مدل (ناشی از نامعینی پارامترها) بطور کامل در نظر گرفته شده است. در این مقاله فرض می‌شود ΔE دارای کران بالا بوده و نامعینی‌های سیستم را در چارچوب نامعینی کراندار مدل می‌کند. تعیین مقدار دقیق این کران می‌تواند با استفاده از مشاهده‌گرهای اغتشاش یا روش‌های تطبیقی، در تحقیقات آتی دنبال شود.

اکنون با توجه به مدل بدست آمده کنترل‌کننده PIR برای بازوی ربات طراحی می‌گردد.

در سیستم بازوی ربات، خطای موقعیت $\boldsymbol{e_q(t)}$ تفاوت بین زاویه واقعی بازوها $\boldsymbol{q(t)}$ و زاویه لینک مورد انتظار $\boldsymbol{q_d(t)}$ می‌باشد. خطای موقعیت و سطح لغزش بصورت زیر تعریف می‌شوند.

$$e_q(t) = q_d(t) - q(t) \quad (۴۷)$$

$$s_q = \dot{e}_q + \Lambda_q e_q \quad (۴۸)$$

که در این رابطه:

$$\Lambda_q = \Lambda_q^T = \begin{pmatrix} K_{r1}^q & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & K_{rn}^q \end{pmatrix}$$

با تعریف رابطه (٤٩) و مطابق با رابطه (٤٥) مشتق سطح لغزش بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{q}_s = s_q + \dot{q} = \dot{q}_d + \Lambda_q e_q \quad (۴۹)$$

$$\dot{s}_q = \ddot{q}_s - H(q)^{-1}\left(\tau - C(q,\dot{q})\dot{q} - G(q)\right) \quad (۵۰)$$

از طرفی مطابق با کنترل PIR ارائه شده در [۳٤] گشتاور کنترلی برای سیستم نامی بازوی ربات بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$\tau = \tau_m + \tau_{pi} + \tau_{robust} \quad (۵۱)$$

که در این رابطه:

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]

طراحی کنترل‌کننده‌ی مقاوم تحمل‌پذیر عیب برای کوادروتور بازودار در حضور نامعینی پارامتری و عیب عملگر

$$\tau_m = H.(q)\ddot{q}_s + C.(q,\dot{q})\dot{q} + G.(q) \quad (۵۲)$$

$$\tau_{pi} = H.(q)\left(K_p s_q + K_i \int s_q dt\right) \quad (۵۳)$$

$$\tau_{robust} = H.(q)\left(K_s sign(s_q)\right) \quad (۵۴)$$

که $\boldsymbol{\tau}$ گشتاور اعمال شده به هر مفصل بازوی رباتیک، $\boldsymbol{\tau_m}$ عبارت کنترل گشتاور مدل، $\boldsymbol{K_p}$ و $\boldsymbol{K_i}$ به ترتیب بهره عبارت تناسبی و انتگرالی هستند و $\boldsymbol{\tau_{robust}}$ ، عبارت مربوط به مقاوم سازی برای جبران خطای مدل دینامیکی و اغتشاشات خارجی می‌باشد. از رابطه (۵۰) و (۵۱) می‌توان نتیجه گرفت که:

$$\dot{s} = \Delta E - K_p s_q - K_i \int s_q dt - K_s sign(s_q) \quad (۵۵)$$

که $\boldsymbol{\Delta E}$ در اینجا شامل تمام نامعینی‌های مدل و اغتشاشات خارجی می‌باشد. با تعریف تابع لیاپانوف زیر شرایط پایداری سطح لغزش بررسی می‌گردد.

$$V = \frac{1}{2} s_q^T s_q + \frac{1}{2}\left(\int s_q\, dt\right)^T K_i \left(\int s_q\, dt\right) \quad (۵۶)$$

اگر مقدار $\boldsymbol{K_i}$ مثبت باشد، آنگاه تابع لیاپانوف نیز مثبت معین است، اکنون مشتق تابع لیاپانوف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

$$\dot{V} = s_q^T \left(\dot{s}_q + K_i \left(\int s_q\, dt\right)\right) \quad (۵۷)$$

با جایگذاری رابطه (۵۵) در (۵۷) مشتق تابع لیپانوف بصورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\dot{V} = s_q^T \left(\Delta E - K_p s_q - K_s sign(s_q)\right) = -s_q^T K_p s_q - \sum_{i=1}^{n} K_s^{ii} |s_q|_i + s_q^T \Delta E \quad (۵۸)$$

که اگر $\boldsymbol{K_s^{ii} \geq |\Delta E_i|}$ باشد آنگاه $\boldsymbol{\dot{V} \leq -s_q^T K_p s_q \leq 0}$ می‌باشد، بنابراین سیستم بصورت مجانبی پایدار می‌باشد.

۲-۳-۲- کنترل کوادروتور

کوادروتور یک سیستم شش درجه آزادی زیر تحریک با چهار ورودی کنترل است و طراحی یک کنترل‌کننده برای آن تا حدی دشوار است. کنترل کوادروتور شامل سه بخش، کنترل ارتفاع، کنترل موقعیت و کنترل وضعیت می‌باشد که در ادامه قانون کنترلی برای هر بخش محاسبه می‌شود.

۲-۳-۲-۱- کنترل ارتفاع

با استفاده از رابطه (۳۰) معادلات دینامیکی مربوط به ارتفاع کوادروتور در حالت کلی که عیب عملگر، اغتشاشات خارجی و نامعینی مدل نیز در نظر گرفته شده باشد، به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$H_z(\Theta)\ddot{z} + C_z(\Theta)\dot{z} + G_z(\Theta) + d_z(t) = u_{\iota f} \quad (۵۹)$$

که در این رابطه $\boldsymbol{d_z(t)}$ اغتشاشات خارجی در راستای عمودی و:

$$H_z(\Theta) = H._z(\Theta) + \Delta H_z(\Theta) = \frac{M}{\cos\theta\cos\phi} + \Delta H_z(\Theta) \quad (۶۰)$$

$$C_z(\Theta) = C._z(\Theta) + \Delta C_z(\Theta) = \frac{k_۳}{\cos\theta\cos\phi} + \Delta C_z(\Theta) \quad (۶۱)$$

$$G_z(\Theta) = G._z(\Theta) + \Delta G_z(\Theta) = \frac{Mg}{\cos\theta\cos\phi} + \Delta G_z(\Theta) \quad (۶۲)$$

که در نهایت می‌توان دینامیک مربوط به حرکت عمودی کوادروتور را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$H._z(\Theta)\ddot{z} + C._z(\Theta)\dot{z} + G._z(\Theta) + \Delta E_Z = u_\iota \quad (۶۳)$$

که در این رابطه:

$$\Delta E_Z = u_{\iota add} + d_z(t) + \Delta H_z(\Theta)\ddot{z} + \Delta C_z(\Theta)\dot{z} + \Delta G_z(\Theta) \quad (۶۴)$$

شامل تمام عبارت های نامعینی، اغتشاشات و اثر عیب عملگر در ورودی کنترلی چهارم می‌باشد. قانون کنترلی در این حالت مشابه بخش کنترل بازوی ربات به صورت زیر بدست می‌آید:

$$u_\iota = u_{\iota,m} + u_{\iota,pi} + u_{\iota,robust} \quad (۶۵)$$

که در این رابطه:

$$u_{\iota,m} = H._z(\Theta)\ddot{z}_s + C._z(\Theta)\dot{z} + G._z(\Theta) \quad (۶۶)$$

$$u_{\iota,pi} = H._z(\Theta)\left(K_p^z s_z + K_i^z \int s_z dt\right) \quad (۶۷)$$

$$u_{\iota,robust} = H._z(\Theta)\left(K_s^z sign(s_z)\right) \quad (۶۸)$$

در روابط فوق $\boldsymbol{\Theta}$ به‌عنوان بردار وضعیت زاویه‌ای کوادروتور شامل سه زاویه اویلر، یعنی رول (ϕ) ، پیچ (θ) و یاو (ψ) ، $\Theta=[\phi\ \theta\ \psi]$، تعریف می‌شود. همچنین متغیر $\boldsymbol{s_z}$ به عنوان

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]

سطح لغزش مربوط به مسیر موقعیت در جهت $\mathbf{z}$ در نظر گرفته می‌شود.

۲-۳-۲-۲- کنترل موقعیت

برای تعیین موقعیت کوادروتور باید اطلاعات مربوط به مسیرهای مطلوب طراحی $\boldsymbol{x_d}$ و $\boldsymbol{y_d}$ را دنبال کند ولی با توجه به معادلات دینامیک کوادروتور هیچ ورودی کنترلی به طور مستقیم برای این بخش وجود ندارد و باید به کمک زوایای اویلر مطلوب و قانون کنترلی $\boldsymbol{u_4}$ به این مهم دست یافت. برای این منظور ابتدا باید ورودی‌های کنترلی مجازی $\boldsymbol{u_x}$ و $\boldsymbol{u_y}$ محاسبه شوند و سپس از طریق آن‌ها زوایای مطلوب رول و پیچ محاسبه گردند.

دینامیک این بخش با در نظر گرفتن نامعینی‌های مدل‌سازی، اغتشاشات خارجی و اثر عیب عملگر به صورت زیر است:

$$H_{.x}(\Theta)\ddot{x} + C_{.x}(\Theta)\dot{x} + \Delta E_x = u_x \quad (۶۹)$$

$$H_{.y}(\Theta)\ddot{y} + C_{.y}(\Theta)\dot{y} + \Delta E_y = u_y \quad (۷۰)$$

که در این رابطه:

$$H_{.x}(\Theta) = H_{.y}(\Theta) = \frac{M}{u_{۱f}} \quad (۷۱)$$

$$C_{.x}(\Theta) = \frac{k_۱}{u_{۱f}} \quad (۷۲)$$

$$C_{.y}(\Theta) = \frac{k_۲}{u_{۱f}} \quad (۷۳)$$

$$\Delta E_x = d_x(t) + \Delta H_x(\Theta)\ddot{x} + \Delta C_x(\Theta)\dot{x} \quad (۷۴)$$

$$\Delta E_y = d_y(t) + \Delta H_y(\Theta)\ddot{y} + \Delta C_y(\Theta)\dot{y} \quad (۷۵)$$

بنابراین قانون کنترل مجازی برای ردیابی موقعیت به صورت زیر بدست می‌آید:

$$u_x = u_{x,m} + u_{x,pi} + u_{x,robust} \quad (۷۶)$$

که در این رابطه:

$$u_{x,m} = H_{.x}(\Theta)\ddot{x}_s + C_{.x}(\Theta)\dot{x} \quad (۷۷)$$

$$u_{x,pi} = H_{.x}(\Theta)\left(K_p^x s_x + K_i^x \int s_x dt\right) \quad (۷۸)$$

$$u_{x,robust} = H_{.x}(\Theta)\left(K_s^x sign(s_x)\right) \quad (۷۹)$$

و:

$$u_y = u_{y,m} + u_{y,pi} + u_{y,robust} \quad (۸۰)$$

که در آن:

$$u_{y,m} = H_{.y}(\Theta)\ddot{y}_s + C_{.y}(\Theta)\dot{y} \quad (۸۱)$$

$$u_{y,pi} = H_{.y}(\Theta)\left(K_p^y s_y + K_i^y \int s_y dt\right) \quad (۸۲)$$

$$u_{y,robust} = H_{.y}(\Theta)\left(K_s^y sign(s_y)\right) \quad (۸۳)$$

متغیرهای $\boldsymbol{s_y}$ ،$\boldsymbol{s_x}$ در روابط فوق به عنوان سطوح لغزش مربوط به مسیرهای موقعیت در جهات $\boldsymbol{x}$ و $\boldsymbol{y}$ می باشند.

پس از محاسبه قوانین کنترل موقعیت مجازی، مقادیر مطلوب زوایای رول و پیچ با استفاده از رابطه بین کنترل مجازی موقعیت و زوایای اویلر که در (۳۲) و (۳۳) بیان شده است، به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$\phi_d = arcsin\left(u_x \sin\psi - u_y \cos\psi\right) \quad (۸۴)$$

$$\theta_d = arcsin\left(\frac{\left(u_x \cos\psi + u_y \sin\psi\right)}{\cos\phi}\right) \quad (۸۵)$$

اگر کوادروتور زوایای رول و پیچ مطلوب در روابط (۸٤) و (۸۵) را دنبال کند، می‌تواند موقعیت مطلوب $\boldsymbol{x_d}$ و $\boldsymbol{y_d}$ را دنبال کند.

۲-۳-۲-۳- کنترل وضعیت

در این بخش نیز روش کنترل پیشنهادی PIR ، [۳٤] بر روی زیر سیستم چرخشی کوادروتور بازودار اعمال می‌شود.

مطابق شکل ۸ کنترل وضعیت بعنوان کنترل‌کننده حلقه داخلی طراحی می‌شود و پس از کنترل موقعیت، حلقه داخلی وظیفه ردیابی مسیرهای مطلوب مربوط به وضعیت سیستم را بر عهده دارد. مراحل محاسبه قوانین کنترل مربوط به رول، پیچ و یاو مشابه هم می‌باشند، لذا محاسبات فقط برای کانال رول محاسبه می‌شود و نتیجه نهایی برای کل زیر سیستم نمایش داده می‌شود. مدل دینامیکی کانال رول بصورت زیر می‌باشد:

$$H_\phi \ddot{\phi} + G_\phi + d_\phi(t) = u_{۱f} \quad (۸۶)$$

که در این رابطه $\boldsymbol{d_\phi(t)}$ مجموع اغتشاشات خارجی و گشتاور اعمالی $\left(\boldsymbol{\tau_a(q,\dot{q},\tau)}\right)$ از طرف بازوی ربات به بدنه کوادروتور در جهت رول می‌باشد و:

$$H_\phi = H_{.\phi} + \Delta H_\phi$$
$$H_{.\phi} = I_{xx} \quad (۸۷)$$

$$G_\phi = G_{.\phi} + \Delta G_\phi$$
$$G_{.\phi} = \left(I_{zz} - I_{yy}\right)\dot{\theta}\dot{\psi} \quad (۸۸)$$

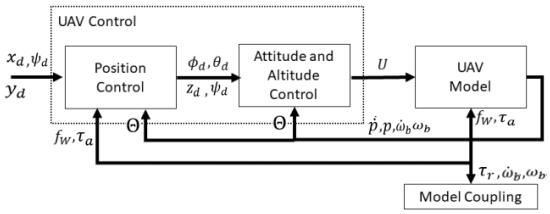
در نهایت می‌توان دینامیک مربوط به حرکت رول کوادروتور را به صورت زیر نمایش داد:

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]

$$H_{.\phi}\ddot{\phi} + G_{.\phi} + \Delta E_{\phi} = u_{1} \quad (۸۹)$$

که در این رابطه:

$$\Delta E_{\phi} = u_{1add} + d_{\phi}(t) + \Delta H_{\phi}\ddot{\phi} + \Delta G_{\phi} \quad (۹۰)$$



شکل ۸. کنترل دو حلقه‌ای کوادروتور. [۳۵]

این روابط به طور مشابه برای دینامیک پیچ و یاو نیز قابل محاسبه هست.

$$H_{.\theta}\ddot{\theta} + G_{.\theta} + \Delta E_{\theta} = u_{2} \quad (۹۱)$$

$$H_{.\psi}\ddot{\psi} + G_{.\psi} + \Delta E_{\psi} = u_{3} \quad (۹۲)$$

برای محاسبه قانون کنترلی کانال رول، خطای ردیابی و سطح لغزش بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$e_{\phi}(t) = \phi_{d}(t) - \phi(t) \quad (۹۳)$$

$$s_{\phi} = \dot{e}_{\phi} + \Lambda_{\phi} e_{\phi} \quad (۹۴)$$

که در این رابطه:

$$\Lambda_{\phi} = \Lambda_{\phi}^{T} = \begin{pmatrix} K_{r1}^{\phi} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & K_{rn}^{\phi} \end{pmatrix}$$

با تعریف فوق و مطابق با رابطه (٤٥) مشتق سطح لغزش بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{\phi}_{s} = s_{\phi} + \dot{\phi} = \phi_{d} + \Lambda_{\phi} e_{\phi} \quad (۹۵)$$

$$\dot{s}_{\phi} = \ddot{\phi}_{s} - H_{\phi}^{-1}\left(u_{1} - G_{\phi}\right) \quad (۹۶)$$

و گشتاور کنترلی برای کانال رول بصورت زیر بدست می‌آید:

$$u_{\phi} = u_{\phi,m} + u_{\phi,pi} + u_{\phi,robust} \quad (۹۷)$$

که در این رابطه:

$$u_{\phi,m} = H_{.\phi}(\Theta)\ddot{\phi}_{s} + G_{.\phi} \quad (۹۸)$$

$$u_{\phi,pi} = H_{.\phi}(\Theta)\left(K_{p}^{\phi} s_{\phi} + K_{i}^{\phi}\int s_{\phi} dt\right) \quad (۹۹)$$

$$u_{\phi,robust} = H_{.\phi}(\Theta)\left(K_{s}^{\phi} sign\left(s_{\phi}\right)\right) \quad (۱۰۰)$$

به همین ترتیب قوانین کنترلی برای کنترل وضعیت‌های پیچ و یاو نیز بدست می‌آید.

۳. شبیه‌سازی‌ها و اعتبارسنجی نتایج

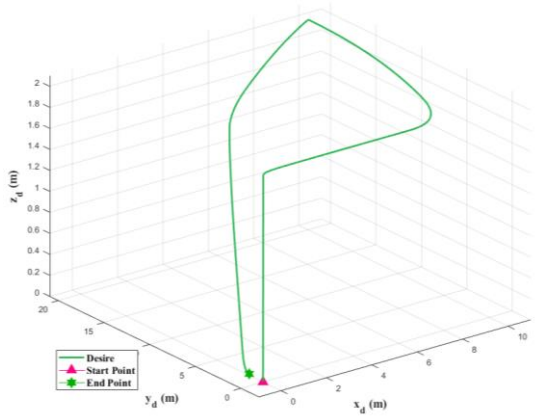
در این بخش نتایج شبیه‌سازی روشهای کنترلی پیشنهادی PIR و دو روش کنترلی مرجع FLC [۳٦] و SMC [۳۱] ارائه می‌شوند. برای اعتبارسنجی روش پیشنهادی، شبیه‌سازی‌هایی با در نظر گرفتن پارامترهای جدول ۲ و جدول ۳ برای کوادروتور بازودار اجرا شده است . برای این منظور سه سناریوی مختلف برای ارزیابی این روش‌ها ارائه شده است. در سناریو اول بازوی ربات بدون حرکت است و کوادروتور یک مسیر تعیین شده را طی می‌کند. در این حالت کنترل‌کننده تحت نامعینی‌های پارامتری، جابجایی مرکز ثقل و تغییرات ممان‌های اینرسی ارزیابی می‌شود. در سناریو دوم علاوه بر موارد قبلی، اغتشاشات خارجی و حرکت سریع بازوی ربات در حین پرواز نیز در نظر گرفته می‌شود. در این سناریو در حین حرکت کوادروتور عملکرد ردیابی بازوی ربات در حضور نامعینی‌های مدل و اغتشاشات ارزیابی می‌شود و نیز پایداری و ردیابی کوادروتور در شرایطی که بازوی ربات مدام در حرکت است ارزیابی می‌شود. در نهایت در آخرین سناریو موتور شماره ۳ در حین حرکت معیوب می‌شود و ۳۵ درصد از اثر بخشی خود را از دست می‌دهد و توانایی کنترل‌کننده در جبران‌سازی عیب عملگر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

پارامترهای کنترل‌کننده PIR برای کوادروتور و بازوی ربات به ترتیب در جدول ٤ و جدول ٥ و پارامترهای کنترل‌کننده مد لغزشی برای کوادروتور و بازوی ربات به ترتیب در جداول ٦ و ۷ ارائه شده اند. علاوه بر این پارامترهای کنترل‌کننده خطی‌سازی فیدبک برای کوادروتور و بازوی ربات به ترتیب در جدول ۸ و جدول ۹ آورده شده‌اند. این مقادیر متناسب با بدترین وضعیت سیستم، یعنی وجود نامعینی مدل، اثر کوپلینگ بین ربات و کوادروتور، تغییرات مرکز جرم و ممان‌های اینرسی و اغتشاشات و با سعی و خطا تعیین شده‌اند.

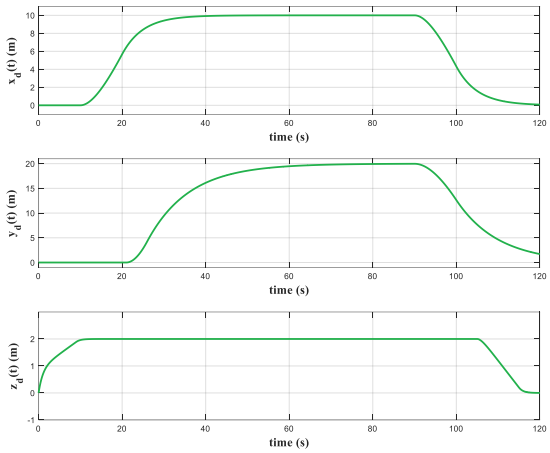
در تمامی سناریوها، مسیر پرواز کوادروتور یکسان و مشابه در نظر گرفته شده است. مسیر سه بعدی حرکت کوادروتور

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]

بازودار در شکل ۹ نشان داده شده است. کوادورتور از نقطه مثلث قرمز رنگ به صورت عمودی تا ارتفاع ۲ متری بالا می‌رود، سپس در راستای محور x حرکت می‌کند. در میانه مسیر جابجایی کوادروتور همزمان هم در راستای محور x و هم در راستای محور y می‌باشد و به سمت نقطه اولیه باز می‌گردد و زمان‌های انتهایی پرواز در هر سه جهت همزمان تغییر موقعیت می‌دهد تا عملکرد کنترل‌کننده زمانی که سیستم همزمان چرخش‌های پیچ، رول و یاو انجام می‌دهد، سنجیده شود. نمودار جابجایی‌ها در راستای محورهای مختصات نسبت به زمان نیز در شکل ۱۰ نمایش داده شده است، تا تغییرات موقعیت نسبت به زمان دقیق‌تر مشخص گردند. همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، مدت زمان شبیه سازی ۱۲۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. در لحظه اول کوادروتور یک پرواز عمودی را شروع می‌کند و پس از آنکه ارتفاع آن به ۲ متر رسید شروع به حرکت در راستای محور x کرده و در زمان ۲۱ ثانیه در جهت y نیز حرکت می‌کند. پس از مدت زمان ٤٠ ثانیه کوادروتور در راستای محور x و در موقعیت $x = 10$ متر ثابت می‌ماند ولی به حرکت خود در راستای محور y ادامه می‌دهد تا در لحظه ۸۰ ثانیه به $y = 20$ متر برسد. سپس ۱۰ ثانیه توقف کرده و در لحظه ۹۰ ثانیه به سمت مبدا مختصات صفحه $x - y$ باز می‌گردد. در بین راه و در زمان ۱۰۵ ثانیه نیز همزمان ارتفاع خود را کاهش می‌دهد تا به زمین برسد. حرکت وسیله در راستای هر یک از محورهای مختصات بصورت شتابدار می‌باشد، بنابراین سرعت انتقالی وسیله خطی نمی‌باشد. پس از تعیین مسیر حرکت کوادروتور و پارامترهای سیستم و کنترل‌کننده‌ها، در ادامه عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی و دو کنترل کننده مرجع FLC و SMC در سناریوهای مختلف ارزیابی می‌شوند.



شکل ۹. مسیر مرجع برای حرکت سه بعدی کوادروتور بازودار.



شکل ۱۰. مسیر مرجع حرکت کوادروتور در جهات مختلف برحسب زمان.

جدول ۲. پارامترهای بازوی ربات دو لینکی.

توضیحات	پارامتر (یکا)	مقدار
جرم بازوی اول	$m_1\ (kg)$	۰/٤
جرم بازوی دوم	$m_2\ (kg)$	۰/۲
طول بازوی اول	$l_1\ (m)$	۰/۳
طول بازوی دوم	$l_2\ (m)$	۰/۲

جدول ۳. پارامترهای کوادروتور.

توضیحات	پارامتر (یکا)	مقدار
جرم کوادروتور	$m.\ (kg)$	۲
فاصله روتورها از مرکز	$l.\ (m)$	۰/۷
ممان اینرسی در راستای x	$I_{xx}\ (kg.m^2)$	۰/۰۰۸۱
ممان اینرسی در راستای y	$I_{yy}\ (kg.m^2)$	۰/۰۰۸۱
ممان اینرسی در راستای z	$I_{zz}\ (kg.m^2)$	۰/۰۰۸۱
ثابت نیروی ملخ	K_f	۰/۰۰۰٥٤۲
ثابت گشتاور ملخ	K_M	۰/۰۰۰۰۰۱

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]

اینرسی روتورها	$J_r\ (kg.m^2)$	۰/۰۰۰۱
شتاب گرانشی	$g\ (m/s^2)$	۹/۸۱

جدول ٤. پارامترهای کنترل‌کننده PIR کوادروتور.

توضیحات	K_i	K_p	K_s	Λ
موقعیت x	۰/۱	۱	۱	۲
موقعیت y	۰/۱	۱	۱	۲
موقعیت z	۱۰	۱۰	۱۰	۲۰۰
رول	۱	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰
پیچ	۱	۱۰	۱۰	۲۰
یاو	۱۰	۱۰	۱۰	۲۰

جدول ۵. پارامترهای کنترل‌کننده PIR بازوی ربات.

توضیحات	K_i	K_p	K_s	Λ
بازوی اول	۱	۱۰	۱۰	۲۰۰
بازوی دوم	۱	۱۰	۱۰	۲۰۰۰

جدول ٦. پارامترهای کنترل‌کننده مد لغزشی برای کوادروتور.

توضیحات	K_s	Λ
موقعیت x	۱	۲
موقعیت y	۱	۲
موقعیت z	۱۰	۲۰۰
رول	۱۰۰۰	٤۰
پیچ	۱۰	۲۰۰
یاو	۱۰	۲۰

جدول ۷. پارامترهای کنترل‌کننده مد لغزشی برای بازوی ربات.

توضیحات	K_q	Λ_q
بازوی اول	۱۰	۲۰۰
بازوی دوم	۱۰	۲۰۰۰

جدول ۸. پارامترهای کنترل‌کننده خطی‌سازی فیدبک برای کوادروتور.

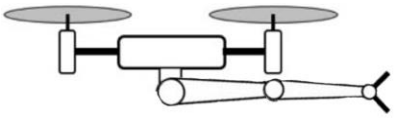
توضیحات	λ_1	λ_2
موقعیت x	٦	۹
موقعیت y	٦	۹
موقعیت z	۲۰	۱۰۰
رول	٤۰۰	٤۰۰۰
پیچ	٤۰۰	٤۰۰۰
یاو	٤۰۰	٤۰۰۰

جدول ۹. پارامترهای کنترل‌کننده خطی‌سازی فیدبک برای بازوی ربات.

توضیحات	Λ_1^q	Λ_2^q
بازوی اول	٤۰۰	۱۰۰۰
بازوی دوم	۲۰۰۰	۲۵۰۰۰

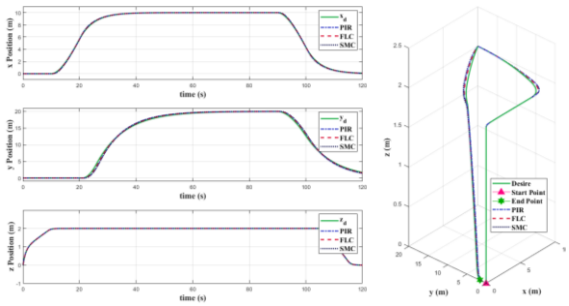
۳-۱- نتایج سناریو اول : پرواز مستقل کوادروتور

در این سناریو بازوی ربات ثابت در نظر گرفته می‌شود. زاویه لینک‌های ربات صفر درجه در نظر گرفته می‌شود تا بیشترین جابجایی مرکز ثقل در راستای محور y_B کوادروتور اتفاق بیفتد و شرایط کنترل سیستم را چالشی‌تر کند (شکل ۱۱). در این حالت ربات کاملا مستقیم و در راستای محور y_B قرار می‌گیرد. برای اینکه ربات بتواند وضعیت خود را حفظ کند، گشتاورهایی به لینک اول و دوم ربات اعمال می‌شود که این گشتاورها بر روی کوادروتور نیز تأثیر می‌گذارد.



شکل ۱۱. نحوه قرارگرفتن بازوی ربات در سناریو اول.

در این شرایط کوادروتور بازودار با هر ۳ کنترل‌کننده به خوبی مسیرهای مرجع تعیین شده را دنبال کرده‌اند (شکل ۱۲).

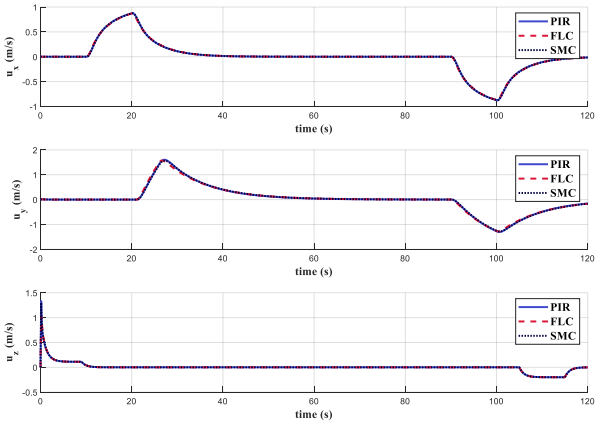


شکل ۱۲. مسیر حرکت کوادروتور بازودار برای سناریو اول.

در بعضی از نقاط که حرکت شتابدار است کنترل‌کننده خطی‌ساز فیدبک ردیابی بهتری داشته است. با توجه به شکل ۱۳ سیستم کوادروتور بازودار در لحظه شروع حرکت به صورت شتابدار ارتفاع می‌گیرد، سپس بعد از ۵ ثانیه تقریبا با سرعت ثابت به مسیر خود ادامه می‌دهد تا به ارتفاع ۲ متری برسد. در این حالت سرعت در راستای عمودی صفر می‌شود و به صورت شتابدار در راستای محور **x** حرکت می‌کند و سپس در لحظه ۲۱ ثانیه به طور همزمان در راستای محور **y** نیز به صورت شتابدار شروع به می‌کند. همانطور که مشخص است در برخی از لحظات

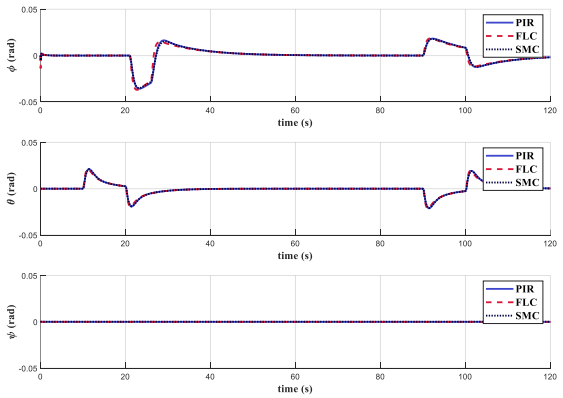
[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]

سرعت صفر بوده و کوادروتور بازودار در آن جهت ثابت می‌ماند.



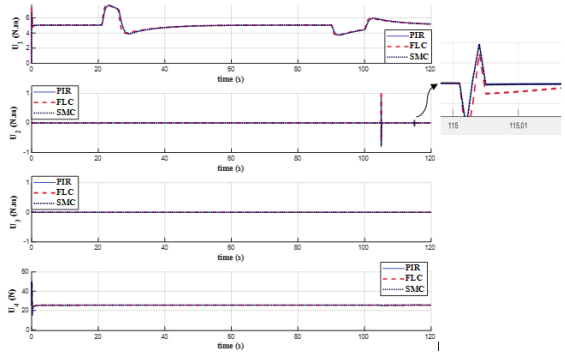
شکل ۱۳. نمودار سرعت‌های خطی کوادروتور بازودار برای سناریو اول.

با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که سرعت کوادروتور به صورت شتابدار است و سرعت آن در لحظات مختلف، متفاوت می‌باشد. این امر بخاطر نوع مسیر مرجع تعیین شده است که جابجایی‌ها نسبت به زمان متغیر در نظر گرفته شده است و از انتخاب مسیرهای مرجع با تغییرات ناگهانی مثل تابع پله اجتناب شده است.



شکل ۱٤. نمودار زوایای اویلر کوادروتور بازودار برای سناریو اول.

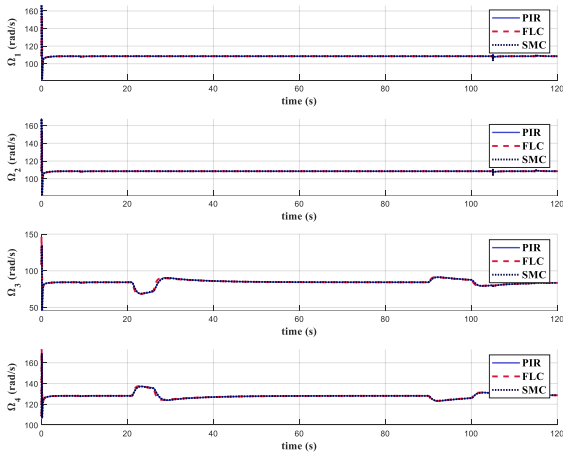
برای آنکه کوادروتور در جهت محور x حرکت کند لازم است که یک گشتاور ایجاد شود تا کوادروتور دوران پیچ انجام دهد. به همین ترتیب برای حرکت در راستای محور y، کوادروتور باید گشتاوری در جهت دوران رول انجام دهد. این امر کاملاً در شکل ۱٤ مشخص است. زمانی که کوادروتور در راستای محور x حرکت می‌کند، سیستم دوران پیچ انجام می‌دهد و زاویه θ به خود می‌گیرد و در راستای محور y نیز به همین صورت در لحظه حرکت زاویه ϕ پیدا می‌کند. در تمامی این شرایط لازم است که سیستم دوران حول محور z نداشته باشد، که نتایج شکل ۱٤ به خوبی نشان می‌دهد که کنترل‌کننده به خوبی توانسته است زاویه ψ را در صفر ثابت نگه دارد.



شکل ۱۵. نیرو و گشتاورهای تولید شده توسط روتورها برای سناریو اول.

نیروها و گشتاور تولید شده توسط مجموع روتورها برای ردیابی مسیر مورد نظر در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

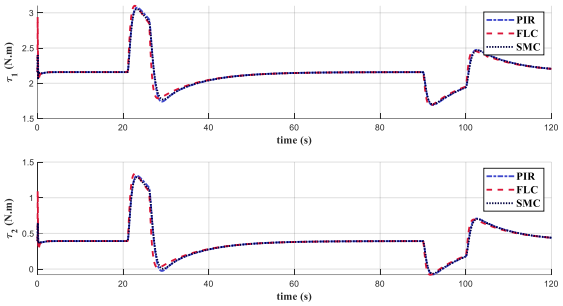
برای تولید این نیروها و گشتاورها، روتورها سرعتی مطابق با شکل ۱٦ دارند.



شکل ۱٦. سرعت چرخش روتورها برای سناریو اول.

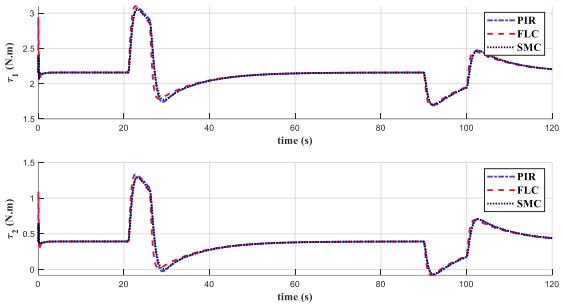
موتور شماره ۱ و شماره ۲ سرعت چرخش یکسانی دارند و بجز لحظه شروع تنها در لحظات ۱۰، ۲۰، ۹۰، ۱۰۵ و در راستای محور x در لحظات ۱۰، ۲۰ و ۹۰ و در لحظات ۱۰۵ و ۱۱۵ بخاطر فرود و تغییر جهت در راستای عمودی این تغییرات در سرعت موتور شماره ۱ و ۲ نمایان شده است.

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]



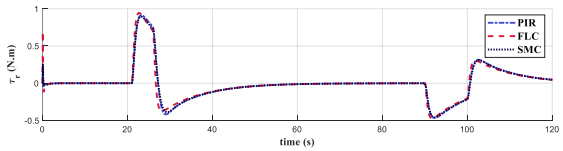
شکل ۱۷. گشتاورهای بازوی اول و دوم ربات برای سناریو اول.

دو روتور شماره ۱ و ۲ با توجه به شکل ۱۷ باعث ایجاد گشتاور حول محور $\boldsymbol{y}$ یا همان حرکت پیچ می‌شود که با توجه به رابطه بین ورودی کنترلی و سرعت روتورها، $\boldsymbol{u_2}$ نتیجه حاصل از حرکت این دو روتور می‌باشد. در بین ورودی‌های کنترلی، ورودی $\boldsymbol{u_4}$ بیشترین مقدار را دارد که ناشی از نیروی تولیدی هر چهار روتور برای غلبه بر نیروی وزن سیستم کوادروتور بازودار می‌باشد. به همین خاطر در شرایطی که سیستم در راستای عمودی حرکت ندارد، این نیرو برابر با وزن می‌باشد. همانطور که از شکل ۱۵ مشخص است، هیچ گشتاوری حول محور $\boldsymbol{z}$ وجود ندارد که نشان دهنده این است که مجموع مربعات سرعت روتورهای ۱ و ۲ با مجموع مربعات سرعت روتورهای ۳ و ٤ با یکدیگر برابر هستند. لذا چرخشی حول محور یاو وجود ندارد. اما در $\boldsymbol{u_1}$ تغییرات محسوس‌تر هستند، زیرا این ورودی کنترلی وظیفه کنترل حرکت رول و حرکت خطی در راستای محور $\boldsymbol{y}$ را بر عهده دارد. در زمان ۲۱ ثانیه وسیله در راستای محور $\boldsymbol{y}$ شتاب می‌گیرد که دلیل آن گشتاور تولید شده توسط $\boldsymbol{u_1}$ است که باعث می‌شود سیستم رول بگیرد و رو به جلو حرکت کند. اما مقدار غیر صفر این ورودی کنترلی در همه زمان‌ها به دلیل موقعیت و وضعیت بازوی ربات است. بازوی ربات در صفحه $\boldsymbol{y}-\boldsymbol{z}$ کوادروتور نصب شده است، بنابراین فقط بر روی حرکت رول تأثیرگذار است و کوادروتور در تلاش است تا سیستم را در شرایطی که حرکتی در راستای محور $\boldsymbol{y}$ ندارد، در وضعیت پایدار نگه دارد. برای ایجاد این گشتاور کنترلی موتورهای سوم و چهارم با یکدیگر اختلاف سرعت دارند که نتیجه آن ایجاد یک گشتاور ثابت برای پایدار نگه داشتم وضعیت رول سیستم کوادروتور بازودار می‌شود. سرعت روتورهای ۳ و ٤ نیز در لحظات ۲۱ و ۹۰ دچار تغییرات می‌شوند که بخاطر ایجاد حرکت در راستای محور $\boldsymbol{y}$ می‌باشد. در این سناریو به بررسی کامل حالت‌ها و ورودی‌های سیستم کوادروتور پرداخته شد. هر سه کنترل‌کننده به جز تفاوت‌های خیلی جزیی توانسته‌اند به خوبی مسیر مورد نظر را ردیابی کنند و سیستم را پایدار نگه دارند. در ادامه شرایط بازوی ربات و تاثیرپذیری آن از کوادروتور و عملکرد کنترل‌کننده‌های ارائه شده بر روی کنترل ربات مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۱۸. گشتاورهای بازوی اول و دوم ربات برای سناریو اول.

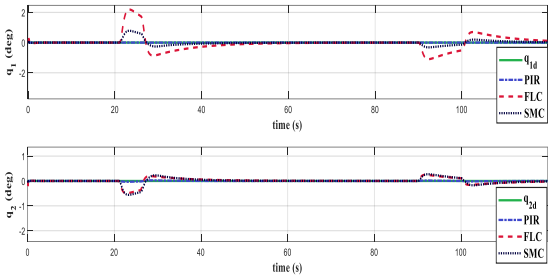
بازوهای ربات در زاویه صفر درجه ثابت مانده‌اند و هیچ تغییراتی ندارند. بنابراین گشتاور کنترلی که به لینک‌های ربات اعمال می‌شود تا بازوهای ربات در موقعیت خود بمانند در شکل ۱۸ نشان داده شده است. مقدار گشتاور اعمالی به بازوی اول و دوم در لحظات ۲۱ و ۹۰ ثانیه دارای تغییراتی هستند که ناشی از حرکت شتابدار کوادروتور در راستای محور $\boldsymbol{y}$ می‌باشد. این حرکت شتابدار باعث ایجاد تکانه در راستای محور $\boldsymbol{y}$ شده و بر روی بازوهای ربات تاثیر می‌گذارد. از این رو گشتاورهای کنترلی برای حفظ موقعیت ربات، یک گشتاور مخالف تکانه ایجاد شده به بازوی ربات اعمال می‌کنند تا ربات در موقعیت مورد نظر پایدار بماند.



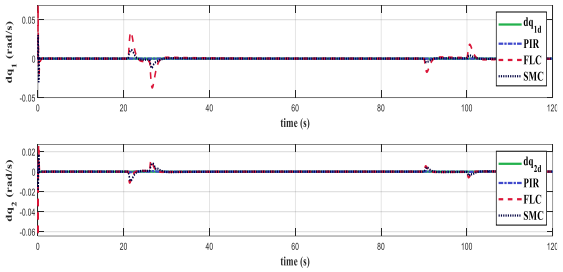
شکل ۱۹. گشتاور اعمال شده به ربات به دلیل تکانه برای سناریو اول.

تکانه ایجاد شده توسط حرکت کوادروتور در شکل ۱۹ نشان داده شده است، که دقیقا در لحظاتی که سیستم حرکت شتابدار پیدا می‌کند، این تکانه به بازوی ربات اعمال می‌شود.

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]



شکل ۲۰. زوایای بازوی اول و دوم ربات برای سناریو اول.



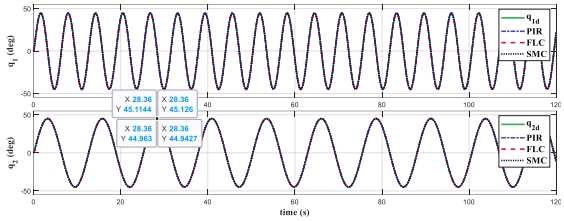
شکل ۲۱. سرعت زاویه‌ای بازوی اول و دوم ربات برای سناریو اول.

نمودار زوایا و سرعت‌های زاویه‌ای بازوی ربات به ترتیب در شکل ۲۰ و شکل ۲۱ نشان داده شده است. در لحظه‌ای که تکانه به بازوی ربات اعمال می‌شود، بازوی ربات در حالتی تحت کنترل خطی‌سازی فیدبک می‌باشد، در لحظه ۲۱ ثانیه بیش از ۲ درجه و در لحظه ۹۰ ثانیه بیش از ۱ درجه جابجایی داشته و سپس به موقعیت اولیه خود باز می‌گردد. در حالی که روش PIR بدون تغییرات قابل مشاهده‌ای، توانسته است عملکرد بهتری نسبت به دو روش دیگر داشته باشد و سیستم را در وضعیت مورد نظر ثابت نگه دارد. در مورد سرعت‌های زاویه‌ای بازوهای ربات نیز کنترل‌کننده PIR بهترین عملکرد و کنترل خطی سازی فیدبک بدترین عملکرد را داشته‌اند.

در سناریو اول هر سه روش کنترلی عملکرد قابل قبولی داشته‌اند و تفاوت قابل لمس آن‌ها در کنترل بازوی ربات می‌باشد که کنترل PIR عملکرد بهتری داشته است. در ادامه عملکرد این سه روش کنترلی برای سناریو دوم مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

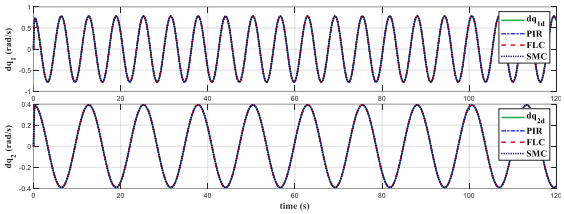
۳-۲-نتایج سناریو دوم: حرکت همزمان بازوی رباتیک

مسیر مرجع برای حرکت بازوی اول ربات یک حرکت سینوسی با دامنه ٤٥ درجه با دوره تناوب 2π و برای بازوی دوم نیز حرکت سینوسی با دامنه ٤٥ درجه اما با دوره تناوب 4π در نظر گرفته شده است. زاویه بازوهای ربات برای هر سه کنترل‌کننده در شکل ۲۲ نشان داده شده است.



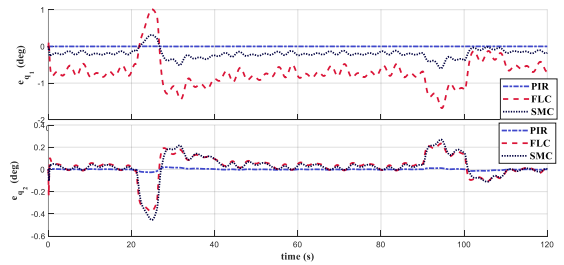
شکل ۲۲. زوایای بازوی اول و دوم ربات برای سناریو دوم.

به دلیل اینکه دامنه زوایا بزرگ است عملکرد کنترل‌کننده‌ها به خوبی مشخص نمی‌باشد. برای این منظور برای بازوی دوم یک نقطه در لحظه ۲۸/۳٦ ثانیه انتخاب شده است که مقدار سیگنال مرجع در این نقطه ٤٤/۹٤۲۷ درجه می‌باشد. کمترین اختلاف از این مقدار مرجع مربوط به کنترل PIR و برابر با ۰/۰۲ درجه و بیشترین اختلاف مربوط به خطی سازی فیدبک و برابر با ۰/۱۸۳ درجه می‌باشد.



شکل ۲۳. سرعت‌های زاویه‌ای بازوی اول و دوم ربات برای سناریو دوم.

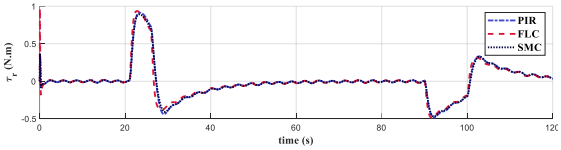
در این سناریو نیز کنترل PIR برای بازوی ربات، ردیابی دقیق‌تری نسبت به دو روش دیگر دارد. سرعت‌های زاویه‌ای بازوهای ربات نیز در شکل ۲۳ نشان داده شده است. در کل عملکرد هر سه کنترل‌کننده برای ردیابی بازوی ربات در حضور نامعینی و اغتشاشات خارجی (ناشی از تکانه) مناسب می‌باشد و توانسته‌اند مسیرهای مرجع را به خوبی دنبال کنند. در این بین عملکرد کنترل‌کننده PIR دقیق‌تر بوده و خطای ردیابی کمتری دارد (شکل ٢٤).



[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]

شکل ۲۴. خطای ردیابی زوایای بازوی اول و دوم ربات برای سناریو دوم.

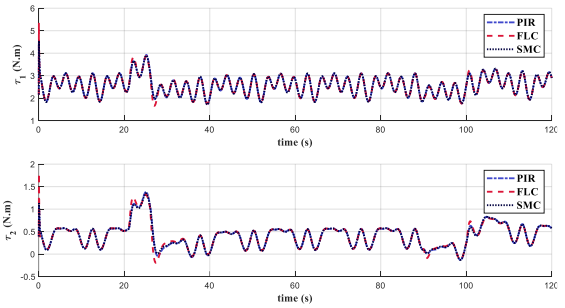
همانطور که در شکل ۲۴ مشاهده می‌شود در برخی از لحظه‌ها مقدار خطای ردیابی تحت کنترل‌کننده‌های مد لغزشی و خطی سازی فیدبک افزایش می‌یابد. این امر بخاطر تکانه اعمال شده از جانب کوادروتور به بازوی ربات می‌باشد، که دقیقا در لحظات ۲۱ و ۹۰ ثانیه اتفاق می‌افتند (شکل ۲۵).



شکل ۲۵. گشتاور اعمال شده به ربات به دلیل تکانه برای سناریو دوم.

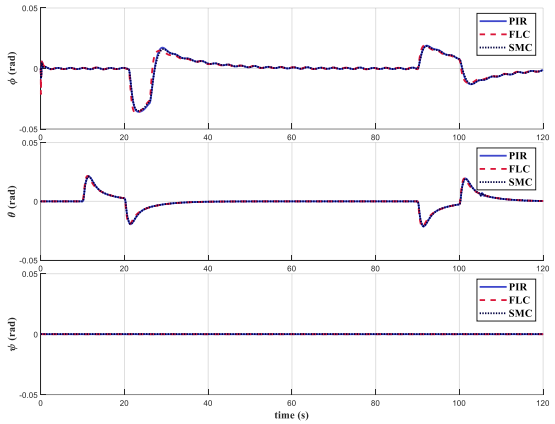
با توجه به شکل ۷ مفاصل ربات در صفحه $\boldsymbol{y}-\boldsymbol{z}$ در فریم بدنی حرکت می‌کنند و جابجایی در راستای محور $\boldsymbol{x}$ ندارند. از این رو تنها نیروی‌های اعمالی از طرف کوادروتور به بازوی ربات در اثر حرکت شتابدار در راستای محور $\boldsymbol{z}$ یا $\boldsymbol{y}$ اتفاق می‌افتد، که در اینجا باز هم از تکانه ناشی از حرکت عمودی صرف نظر شده است و تنها نیروی تکانه در راستای محور $\boldsymbol{y}$ به بازوی ربات اعمال شده است.

رفتار نوسانی گشتاورهای کنترلی بازوی ربات بخاطر مسیر مرجع سینوسی می‌باشد. با این وجود اثر تکانه در لحظات ۲۱ و ۹۰ ثانیه در این گشتاورها نیز مشهود می‌باشد (شکل ۲۶). دقیقاً در لحظاتی که به بازوی ربات تکانه وارد می‌شود، گشتاورهای کنترلی برای مقابله با آن تغییرات بزرگتری دارند و اثر این اغتشاش خارجی را از بین می‌برند.



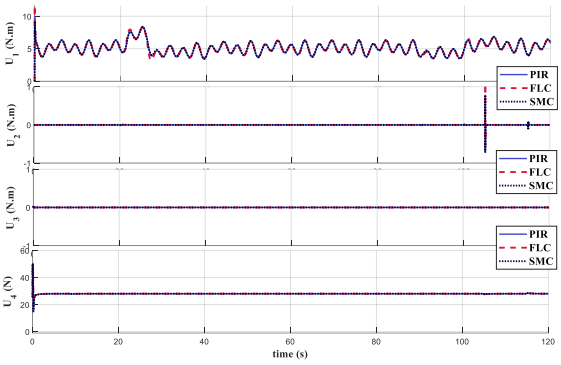
شکل ۲۶. گشتاورهای بازوی اول و دوم ربات برای سناریو دوم.

رفتار سینوسی بازوی ربات بر روی عملکرد کوادروتور نیز تأثیرگذار است. با توجه به موقعیت نصب بازو به کوادروتور در شکل ۷ حرکت نوسانی ربات باعث تغییر مرکز ثقل کل سیستم در صفحه $\boldsymbol{y}-\boldsymbol{z}$ می‌شود. تغییر مرکز ثقل باعث تغییرات ممان‌های اینرسی می‌شود. در نهایت برای ردیابی مسیر مطلوب ربات، گشتاورهای کنترلی مطابق شکل ۲۶ تولید می‌شوند که طبق اصل عمل و عکس العمل بر روی کوادروتور تأثیر می‌گذارند و به صورت یک گشتاور اغتشاشی حول محور $\boldsymbol{x}$ به کوادروتور اعمال می‌شود. تأثیر رفتار سینوسی ربات بر روی زاویه $\boldsymbol{\phi}$ در شکل ۲۷ قابل مشاهده است. رفتار کلی مشابه سناریو اول می‌باشد و تنها نوسانات کوچکی که ناشی از حرکت نوسانی بازوی ربات است نیز بر روی آن قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می‌کنید حرکت ربات هیچ تأثیری بر روی زوایای پیچ و یاو ندارد. نمودار ورودی کنترلی و سرعت روتورها در این سناریو به ترتیب در شکل ۲۸ و شکل ۲۹ نشان داده شده‌اند. تأثیرات حرکت سینوسی بازوی ربات بر روی کنترل گشتاور رول و سرعت‌های موتور سوم و چهارم به خوبی قابل مشاهده می‌باشد. در این سناریو نیز ردیابی موقعیت و ارتفاع سیستم و سرعت حرکت آن مانند سناریو دوم می‌باشد. تنها تفاوت جزیی در سرعت حرکت در راستای محور $\boldsymbol{y}$ می‌باشد که بخاطر حرکت بازوی ربات نوسانات خیلی کوچکی در سرعت ایجاد می‌کند که دامنه‌ای کمتر از ۰/۰۰۵ متر بر ثانیه دارد. برای اینکه این تغییرات قابل مشاهده باشد، مقدار سرعت $\boldsymbol{u_y}$ در بازه ۲ تا ۱۴ ثانیه با دقت بیشتری در شکل ۳۰ نشان داده شده است.

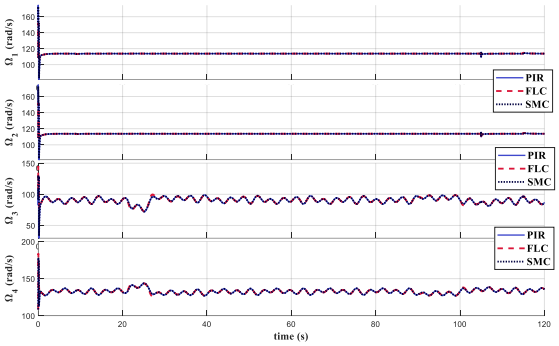


شکل ۲۷. نمودار زوایای اویلر کوادروتور بازودار برای سناریو دوم.

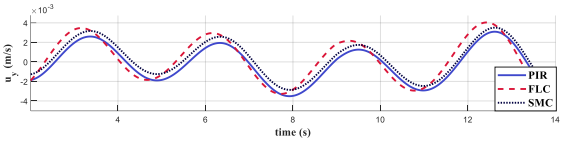
[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]



شکل ۲۸. نیرو و گشتاورهای تولید شده توسط روتورها برای سناریو دوم.



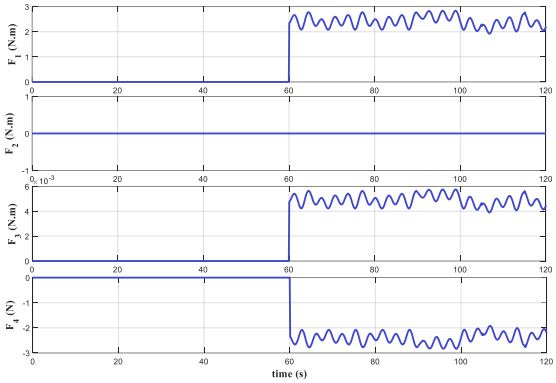
شکل ۲۹. سرعت چرخش روتورها برای سناریو دوم.



شکل ۳۰. سرعت حرکت سیستم در راستای محور y برای سناریو دوم.

۳-۳- نتایج سناریو سوم: بروز خرابی عملگر

در سناریو آخر علاوه بر موارد در نظر گرفته شده در سناریو دوم فرض می‌شود موتور شماره ۳ در حین حرکت و در زمان ۶۰ ثانیه معیوب می‌شود و به طور ناگهانی ۳۵ درصد از اثر بخشی (نهایت مقداری که می‌توان اعمال کرد) خود را از دست می‌دهد. با توجه به روابط بین ورودی‌های کنترلی و سرعت روتورها در رابطه ۳۵، خرابی روتور شماره ۳ بر روی ورودی‌های کنترلی ۲، ۳ و ٤ تأثیر می‌گذارد. با توجه به بخش ۲-۱-۳ ، سیگنال‌های عیب در ورودی سیستم به صورت شکل ۳۱ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود خرابی موتور شماره ۳ تأثیری در ورودی کنترلی دوم که مربوط به کنترل پیچ است، ندارد ولی سه ورودی دیگر را تحت تأثیر قرار می‌دهد که بیشترین سهم برای ورودی کنترل اول و چهارم می‌باشد.



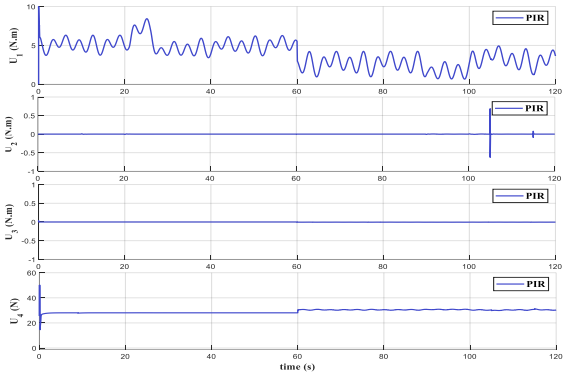
شکل ۳۱. سیگنال‌های عیب در ورودی سیستم.

در بین سه روش کنترلی، خطی سازی فیدبک نهایتا ۲ درصد، کنترل مد لغزشی ۱۷ درصد و روش PIR ۳۵ درصد عیب را می‌توانند تحمل کنند. لذا با توجه به این که دو کنترل‌کننده خطی سازی فیدبک و مد لغزشی نمی‌توانند ۳۵ درصد عیب را تحمل کنند و سیستم ناپایدار می‌شود، تنها نتایج کنترل‌کننده PIR قابل نمایش است.

قبل از بررسی نمودار نیروها و گشتاورها لازم است دو مفهوم مورد بررسی قرار گیرند. یکی نیرو و گشتاورهای واقعی که توسط چرخش روتورها ایجاد می‌شوند و دیگری سیگنال کنترلی که بر طبق آن سرعت مطلوب چرخش روتورها تعیین می‌گردد. برای درک بهتر این موضوع فرض کنید یک کوادروتور با وزن ۲ کیلوگرم در هوا معلق است، در این حالت نیرویی که مجموع چهار موتور تولید می‌کنند برابر با نیروی وزن است (در این مثال فرض شتاب گرانش برابر با ۱۰، نیروی تولیدی هر روتور باید ۵ نیوتن باشد). حال اگر یکی از روتورها به دلیل کثیفی، خرابی یا عیب در ملخ نیرویی کمتر تولید کند (کمتر از ۵ نیوتن)، لازم است که ولتاژ ورودی آن موتور افزایش یابد تا سرعت روتور به حدی برسد که نیروی تولیدی توسط آن به ۵ نیوتن برسد. پس نیروی تولیدی واقعی تغییری نمی‌کند ولی چیزی که تغییر می‌کند ولتاژ ورودی هر یک از روتورها می‌باشد.

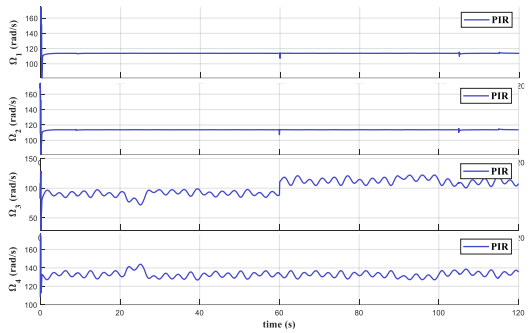
پس ولتاژ روتورها بر اساس سیگنال کنترلی که توسط کنترل تحمل‌پذیر عیب تعیین می‌گردد، تولید می‌شود. سپس بر اساس این ولتاژ سرعت روتورها تعیین می‌شود و نیروها و گشتاورهای واقعی به سیستم کوادروتور بازودار اعمال می‌شوند که دقیقا باید مشابه مقداری باشد که در حالت سالم به سیستم اعمال می‌شدند.

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]



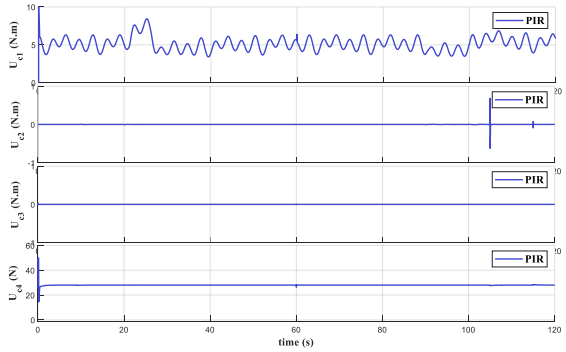
شکل ۳۲. نمودار سیگنال کنترلی برای سناریو سوم.

نمودار سیگنال کنترلی که توسط کنترل تحمل‌پذیر عیب تولید می‌شود تا سرعت‌های چرخش مطلوب هر روتور را تعیین کند در شکل ۳۲ نشان داده شده است. بر اساس این سیگنال کنترلی سرعت‌های مطلوب برای چرخش هر روتور مطابق با شکل ۳۳ به دست می‌آید. در واقع سیگنال‌های کنترلی که در شکل ۳۲ به دست می‌آیند، معادل نیروها و گشتاورهای مجازی هستند که معادل با آن‌ها سرعت روتورها تعیین گردد.



شکل ۳۳. سرعت چرخش روتورها برای سناریو سوم.

زمانی که روتورها با توجه به سرعت‌های مطلوب بچرخند نیروها و گشتاورها مطابق با شکل ۳٤ به دست می‌آیند که دقیقا مطابق با مقداری است که در سناریوهای قبلی به دست آمده‌اند.



شکل ۳٤. نیرو و گشتاورهای تولید شده توسط روتورها برای سناریو سوم.

این نیروها و گشتاورها در حالتی به دست آمده‌اند که طبق شکل ۳۳ مقدار سرعت روتور سوم برای جبران عیب به وجود آمده دقیقا در لحظه ٦۰ ثانیه افزایش پیدا کرده است. در حالت عادی افزایش سرعت روتور سوم باعث افزایش نیروی بالابر و گشتاور رول می‌شود، اما در اینجا این افزایش سرعت بخاطر جبران عیب به وجود آمده در روتور سوم می‌باشد. در این سناریو نمودار موقعیت و سرعت سیستم کوادروتور بازودار مشابه سناریو سوم می‌باشد، زیرا کنترل‌کننده توانسته است به خوبی عیب به وجود آمده در روتور سوم را جبران کند. به همین دلیل سیستم کلی با وجود عیب عملگر سوم، مسیر تعیین شده را به درستی طی می‌کند. لازم به ذکر است این عیب در هر یک از روتورها قابل بررسی است و روتور سوم تنها به عنوان یک روتور نمونه خراب فرض شده است. البته ناگفته نماند که روتور سوم و چهارم بخاطر اینکه حرکت رول را کنترل می‌کنند و بازوی ربات نیز بر روی حرکت رول سیستم تأثیرگذار است، از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. در این بخش نتایج سه کنترل‌کننده خطی‌ساز فیدبک، مد لغزشی و PIR مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی کنترل‌کننده PIR در هر سه سناریو موفق تر عمل کرده و یک روش عالی برای جبران عیب در سیستم کوادروتور بازودار می‌باشد.

٤. بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک کنترل‌کننده مقاوم و تحمل‌پذیر عیب مبتنی بر مد لغزشی تناسبی–انتگرالی (PIR) برای کوادروتور بازودار طراحی و در محیط شبیه‌سازی MATLAB/Simulink اعتبارسنجی شد. نتایج کمی نشان داد که در سناریوی نخست، کنترل‌کننده PIR توانست مسیر سه‌بعدی مرجع را در حضور ۲۰ درصد نامعینی پارامتری و جابجایی مرکز جرم، با خطای حداقلی و بدون انحراف از زوایای اویلر تعیین‌شده دنبال کند، به‌طوری‌که زاویه یاو در تمامی طول مسیر ثابت باقی ماند. در سناریوی دوم که بازوی رباتیک با دامنه ٤٥ درجه به‌صورت سینوسی حرکت می‌کرد، کنترل‌کننده پیشنهادی توانست تکانه‌های دینامیکی ناشی از حرکت سریع بازو را مهار کند و مقدار خطای ردیابی زاویه بازوی دوم را در نقطه اوج به حدود ۰/۰۲ درجه محدود کند؛

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]

در حالی‌که همین خطا برای کنترل‌کننده خطی‌سازی فیدبک به ۰/۱۸۳ درجه رسید. همچنین در این سناریو، سرعت زاویه‌ای بازوی ربات با کنترل PIR نوسان حداقلی داشت و بازوی ربات در برابر اغتشاشات خارجی پایدار باقی ماند. در سناریوی سوم که خرابی عملگر با کاهش ناگهانی ۳۵ درصدی اثربخشی روتور شماره ۳ شبیه‌سازی شد، کنترل‌کننده PIR توانست به‌طور کامل عیب ایجادشده را جبران کند و مسیر پروازی را بدون تغییر نسبت به حالت سالم ادامه دهد؛ در حالی‌که کنترل‌کننده‌های مرجع حداکثر تا ۲ درصد (FLC) و ۱۷ درصد (SMC) تحمل عیب داشته و سیستم را ناپایدار کردند. تحلیل لیاپانوف به‌عنوان مبنای تئوریک طراحی، تضمین‌کننده همگرایی خطای ردیابی به سمت صفر بود و انطباق کامل نتایج عددی با پیش‌بینی‌های تئوری، کارایی ساختار پیشنهادی را تأیید کرد. با وجود این، پیاده‌سازی تنها در محیط شبیه‌سازی انجام شده و وابستگی به تنظیم دستی پارامترها همچنان باقی است؛ ازاین‌رو اجرای آزمایش‌های عملی روی سکوی واقعی، توسعه استراتژی‌های تطبیقی و استفاده از یادگیری ماشین برای بهینه‌سازی ضرایب کنترل و تحمل چندگانه خرابی، مسیرهای ارزشمند برای ادامه این تحقیق خواهند بود. همچنین استفاده از ساختارهای تخصیص کنترل به منظور جلوگیری از اعمال بار اضافی به موتورها در شرایط خرابی توصیه می شود.

۵. مراجع

[۱] H. Lee, H. Kim, W. Kim, and H. J. Kim (۲۰۱۸.), "An integrated framework for cooperative aerial manipulators in unknown environments.," *IEEE Robotics and Automation Letters 3,* vol. ۳, pp. ۲۳۰۷-۲۳۱٤.

[۲] J. Ran, M. Dong, W. Chou, H. Yu, and H. Yu (۲۰۱۸), "Autonomous aerial manipulation using a hexacopter equipped with a robotic arm," presented at the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO).

[۳] A.-W. A. Saif, A. Aliyu, M. A. Dhaifalla, and M. Elshafei (۲۰۱۸)., "Decentralized backstepping control of a quadrotor with tilted-rotor under wind gusts," *International Journal of Control, Automation and Systems,* vol. ۱٦, pp. ۲٤٥۸–۲٤۷۲.

[٤] J. Ran, W. Chou, and Y. Rong (۲۰۲۰), "Disturbance observer-based backstepping control for quadrotor UAV manipulator attitude system.," presented at the Chinese Automation Congress (CAC).

[٥] W. Chen, B. Song, P. Huang, and C. Tang (۲۰۱٦), "Trajectory tracking control for quadrotor robot subject to payload variation and wind gust disturbance.," *Journal of Intelligent & Robotic Systems* vol. ۸۳, pp. ۳۱٥-۳۳۳.

[٦] J. Ran, W. Chou, R. Ding, and M. Dong (۲۰۱۸), "Adaptive robust control of quadrotor with a ۲-degree-of-freedom robotic arm.," *Advances in Mechanical Engineering* vol. ۱۰.

[۷] A. Aytaç, Ö. Aslan, and R. Hacıoğlu (۲۰۱۷)., "Model predictive control of load transporting system on unmanned aerial vehicle (UAV)." presented at the Fifth international conference on advances in mechanical and robotics engineering, Institute of Research Engineers and Doctors Rome.

[۸] S. Vojtěch *et al.* (۲۰۱۹), "Cooperative autonomous search, grasping, and delivering in a treasure hunt scenario by a team of unmanned aerial vehicles," *Journal of Field Robotics,* vol. ۳٦, pp. ۱۲٥-۱٤۸.

[۹] S. Behzad, M. Najafi, and I. Izadi (۲۰۱۹), "Cooperative load transportation using multiple UAVs.," *Aerospace Science and Technology,* vol. ۸٤, pp. ۱٥۸-۱٦۹.

[۱۰] R. B. Anderson, J. A. Marshall, and A. L'Afflitto. (۲۰۲۰), "Constrained robust model reference adaptive control of a tilt-rotor quadcopter pulling an unmodeled cart.," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* vol. ٥۷, pp. ۳۹-٥٤.

[۱۱] E. S. Ali and A. Banazadeh (۲۰۲۱), "Simultaneous trajectory tracking and aerial manipulation using a multi-stage model predictive control.," *Aerospace Science and Technology* vol. ۱۱۲.

[۱۲] R. Fabio, V. Lippiello, and A. Ollero (۲۰۱۸), "Aerial manipulation: A literature review.," *IEEE Robotics and Automation Letters 3,* vol. ۳, pp. ۱۹٥۷-۱۹٦٤.

[۱۳] S. A. Emami and A. Banazadeh (۲۰۲۱), "Simultaneous trajectory tracking and aerial manipulation using

a multi-stage model predictive control," *Aerospace Science and Technology,* vol. ۱۱۲.

[۱٤] M. Vahdanipour and M. Khodabandeh (۲۰۱۹), "Adaptive fractional order sliding mode control for a quadrotor with a varying load.," *Aerospace Science and Technology* vol. ۸٦, pp. ۷۳۷-۷٤۷.

[۱٥] D. Angelis and E. L. (۲۰۱۹), "Swing angle estimation for multicopter slung load applications.," *Aerospace Science and Technology,* vol. ۸۹, pp. ۲٦٤-۲۷٤.

[۱٦] Z. Samadikhoshkho, S. Ghorbani, F. Janabi-Sharifi, and K. Zareinia (۲۰۲۰), "Nonlinear control of aerial manipulation systems.," *Aerospace Science and Technology* vol. ۱۰٤.

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]

[۱۷] H. B. Khamseh, S. Ghorbani, and F. Janabi-Sharifi (۲۰۱۹), "Unscented Kalman filter state estimation for manipulating unmanned aerial vehicles.," *Aerospace Science and Technology* vol. ۹۲, pp. ٤٤٦-٤٦٣.

[۱۸] M. Ryll *et al.*(۲۰۱۹), "٦D interaction control with aerial robots: The flying end-effector paradigm.," *The International Journal of Robotics Research,* vol. ۳۸, pp. ۱۰٤٥-۱۰٦۲.

[۱۹] E. Yilmaz, H. Zaki, and M. Unel (۲۰۱۹), "Nonlinear adaptive control of an aerial manipulation system.," presented at the ۱۸th European control conference (ECC).

[۲۰] P. Francesco, G. Muscio, and F. Caccavale(۲۰۱۸), "An adaptive hierarchical control for aerial manipulators," *Robotica,* vol. ۳٦, pp. ۱٥۲۷-۱٥٥۰.

[۲۱] S. Alejandro, V. M. Vega, M. Fernandez, G. Herediad, and A. Ollero (۲۰۲۰), "Benchmarks for aerial manipulation.," *Robotics and Automation Letters,* vol. ٥, pp. ۲٦٥۰-۲٦٥۷.

[۲۲] N. Mimmo, A .Macchelli, R. Naldi, and L. Marconi (۲۰۲۰), "Robust motion control of aerial manipulators.," *Annual Reviews in Control* vol. ٤۹, pp. ۲۳۰-۲۳۸.

[۲۳] S. Zeghlache, H. Rahali, A. Djerioui, L. Benyettou, and M. F. Benkhoris (۲۰۲٤), "Robust adaptive backstepping neural networks fault tolerant control for mobile manipulator UAV with multiple uncertainties," *Mathematics and Computers in Simulation,* vol. ۲۱۸, pp. ٥٥٦-٥٨٥.

[۲٤] M. Mazare, M. Taghizadeh, P. Ghaf-Ghanbari, and E. Davoodi (۲۰۲٤), "Robust fault detection and adaptive fixed-time fault-tolerant control for quadrotor UAVs," *Robotics and Autonomous Systems,* vol. ۱۷۹.

[۲٥] K. Ahmadi, D. Asadi, S.-Y. Nabavi-Chashmi, and O. Tutsoy (۲۰۲۳), "Modified adaptive discrete-time incremental nonlinear dynamic inversion control for quad-rotors in the presence of motor faults," *Mechanical Systems and Signal Processing,* vol. ۸۸.

[۲٦] Y. Naidoo, R. Stopforth, and G. Bright (۲۰۱۱), "Rotor aerodynamic analysis of a quadrotor for thrust critical applications.," presented at the ٤th Robotics and Mechatronics Conference of South Africa.

[۲۷] X. Yu, Z. Lv, Y. Wu, and X.-M. Sun (۲۰۱۸), "Neural Network Modeling and Backstepping Control for Quadrotor," presented at the ۲۰۱۸ Chinese Automation Congress (CAC), ۳۰ November ۲۰۱۸ - ۰۲ December ۲۰۱۸.

[۲۸] M. F. F. Rahman, S. Fan, Y. Zhang, and L. Chen (۲۰۲۱), "A Comparative Study on Application of Unmanned Aerial Vehicle Systems in Agriculture," Agriculture, vol. ۱۱.

[۲۹] F. Sharifi, M. Mirzaei, B. W. Gordon, and Y. Zhang (۲۰۱۰), "Fault Tolerant Control of a Quadrotor UAV using Sliding Mode Control," presented at the Conference on Control and Fault Tolerant Systems, France, October ٦-۸.

[۳۰] Z. Zhenhua, D. Cao, J. Yang, and H. Wang (۲۰۲۰), "High-order sliding mode observer-based trajectory tracking control for a quadrotor UAV with uncertain dynamics.," *Nonlinear Dynamics,* vol. ۱۰۲, pp. ۲٥۸۳-۲٥۹٦.

[۳۱] A. Mohammadi and A. Ramezani (۲۰۲۰), An active actuator fault-tolerant control of a quadrotor based on analytical redundancy relations.," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering* vol. ٤٤, pp. ۱۰٦۹-۱۰۷۹.

[۳۲] D. Lee, H. J. Kim, and S. Sastry (۲۰۱۹), "Feedback linearization vs. adaptive sliding mode control for a quadrotor helicopter.," *International Journal of control, Automation and systems,* vol. ۷, pp. ٤۱۹-٤۲۸.

[۳۳] H. Beikzadeh and G. Liu (۲۰۱۸), "Trajectory tracking of quadrotor flying manipulators using L۱ adaptive control.," Journal of the Franklin Institute, vol. ۱٤, pp. ٦۲۳۹-٦۲٦۱.

[۳٤] P. Lu, W. Huang, J. Xiao, F. Zhou, and W. Hu (۲۰۲۱), "Adaptive Proportional Integral Robust Control of an Uncertain Robotic Manipulator Based on Deep Deterministic Policy Gradient.," Mathematics, vol. ۹.

[۳٥] H. A. Anuar, F. Plestan, A. Chriette, and O. Kermorgant (۲۰۲۱), "Sliding Mode Control with Adaptive Gain of Quadrotor with Rigid Manipulator," presented at the ۲۰th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), Ljubljana, Slovenia.

[۳٦] S. Al-Hiddabi (۲۰۰۹), "Quadrotor control using feedback linearization with dynamic extension," presented at the ٦th International Symposium on Mechatronics and its Applications, Sharjah, UAE, March ۲٤-۲٦.

[۳۷] D. Mellinger and V. Kumar (۲۰۱۱), "Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors", IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA, pp:۲٥۲۰-۲٥۲٥.

[۳۸] R. Beard and T. McLain (۲۰۱۲), "Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice", Princeton University Press.

[۳۹] Q. Zhu, W. Yang, X. Zhang, B. Gao (۲۰۲۳),"Distributed region reaching consensus control for uncertain networked multi-robot systems", Journal of Applied Mathematics and Mechanics, vol.۱۰٤.

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-26]