

# کنترل آرایش ربات‌های هوایی در مسیر معین مبتنی بر پردازش تصویر در شرایط نارسایی ارتباطی میان عضوی

عباسی، یوسف<sup>۱</sup>، موسویان، سید علی اکبر<sup>۲\*</sup> و باصحبت نوین زاده، علیرضا<sup>۳</sup>  
۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
۳- استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
( تاریخ ارسال: ۱۳۹۲/۰۴/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۱/۱۶ )

## چکیده

در این مقاله به کنترل آرایش مبتنی بر پردازش تصویر یک آرایش راهبر-پیرو در شرایط نارسایی ارتباطی بین اعضا پرداخته شده است. عضو پیرو بدون نیاز به ارتباط مخابراتی، صرفاً با حسگر تصویری و پردازش تصویرهای آن، زاویه خط دید و فاصله خود نسبت به ربات هوایی راهبر را به دست آورده و با استفاده از آن‌ها سرعت و زاویه مسیر آن عضو را محاسبه می‌کند. با استفاده از روش کنترلی مدل پیش‌بین، حتی در شرایطی که ارتباط تصویری بین دو عضو دچار اختلال می‌شود آرایش پروازی کنترل شده و عضو پیرو در فاصله و زاویه مطلوب نسبت به عضو راهبر به پرواز خود ادامه داده است. ورودی‌های سیستم کنترل عضو پیرو به صورت شتاب‌های مماس و عمود بر بردار سرعت به دست آمده است. نتایج شبیه‌سازی ارائه شده، کنترل آرایش را هم در حالت بدون نارسایی ارتباطی و هم با وجود این نارسایی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: کنترل آرایش، راهبر-پیرو، پردازش تصویر، نارسایی ارتباطی

## مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از ربات‌های هوایی به علت انعطاف‌پذیری و تطبیق‌پذیری در انجام مأموریت‌های مختلف و نیز هزینه و ریسک به‌کارگیری بسیار کم آن‌ها کاربردهای نظامی، غیرنظامی و تجاری گسترده‌ای پیدا کرده و تحقیقات زیادی در زمینه طراحی، ساخت، هدایت و کنترل آن‌ها انجام شده و پیوسته به دامنه این تحقیقات افزوده می‌شود.

انجام مأموریت به صورت دقیق‌تر و گسترده‌تر ایجاب می‌کند که بجای یک ربات هوایی، چند ربات هوایی به صورت همزمان مورد استفاده قرار گیرند تا مأموریت مشترکی را انجام دهند. چیدمانی قرارگیری ربات‌ها در یک آرایش گروهی و کنترل آن‌ها باید به گونه‌ای صورت گیرد تا ربات‌ها ضمن حفظ پیکربندی آرایش و اجتناب از برخورد با ربات‌های مجاور و موانع بتوانند در مسیر مطلوب حرکت کرده و مأموریت محوله را انجام دهند. کنترل عضوهای گروه در آرایش و هدایت آن‌ها در مسیر مطلوب، یکی از زمینه‌های پژوهشی در حال توسعه بوده و فعالیت‌های زیادی در مورد آن انجام می‌شود. بنا به تعریف، حرکت گروهی و یا پرواز گروهی به صورت مجموعه‌ای با بیش از یک عضو از وسیله‌هایی مثل ربات‌های هوایی است که متغیرهای حالت دینامیک آن‌ها به وسیله یک قانون کنترلی مشترک با یکدیگر کوپل شده‌اند [۱]. در پرواز گروهی حداقل یک وسیله، یک حالت را نسبت به عضو دیگر دنبال می‌کند و قانون کنترلی بر اساس این حالت طراحی می‌شود.

در کنترل آرایش، اختلاف بین وضعیت موجود و وضعیت مطلوب، خطای وضعیتی هر عضو را مشخص می‌کند که می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف کنترلی، آن را کنترل کرد [۲]؛ بنابراین برای کنترل آرایش لازم است عضوهای پیرو در هر لحظه موقعیت عضو راهبر و عضوهای دیگر را داشته باشد که برای این منظور روش‌های مختلفی وجود دارد که به سه روش متداول آن‌ها اشاره می‌شود. روش اول این است که هر عضو به حسگرهای اندازه‌گیری، تجهیزات مخابراتی و ابزار محاسباتی مجهز بوده و پس از اندازه‌گیری یا محاسبه، اطلاعات مورد نیاز به وسیله ابزار مخابراتی به سایر اعضا ارسال شده و اعضا با استفاده از این اطلاعات و نیز مقادیر اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای خود و نیز با توجه به الگوی آرایش، مسیر حرکتشان را مشخص می‌کنند. روش دوم استفاده از سیستم هدایت مرکزی است به طوری که برای مثال یک ایستگاه

زمینی اطلاعات اعضا را دریافت کرده و با توجه به آرایش و موقعیت هر کدام از اعضا، فرمان هدایت لازم را به اعضا ارسال می‌کند؛ و بالأخره روش سوم، استفاده از پردازش تصویر برای استخراج فرمان‌های هدایت عضوهای آرایش پروازی هست. در این روش با پردازش تصاویری که توسط دوربین ربات پیرو از ربات راهبر و یا ربات‌های مجاور گرفته می‌شود، موقعیت آن‌ها به دست می‌آید. با توجه به ماهیت این روش، می‌توان بدون نیاز به ارتباط داده‌ای بین اعضا آرایش پروازی را کنترل کرد.

در [۳] از روش مبتنی بر پردازش تصویر برای کنترل آرایش پروازی دو پهپاد که بر روی عضو راهبر لامپ‌های پرنور LED قرار دارد استفاده شده است. برای کنترل پهپادها از کنترل‌کننده LQR که با تخمین‌گر EKF<sup>۱</sup> کوپل گردیده استفاده شده است. آزمایش‌های پروازی نشان‌دهنده کنترل فاصله دو پهپاد با دقت ده سانتیمتر است. در [۴] نیز از روش مبتنی بر پردازش تصویر برای کنترل آرایش پروازی راهبر-پیرو<sup>۲</sup> پهپادها استفاده شده است. با استفاده از اطلاعات بصری زاویه آزیموس<sup>۳</sup>، زاویه فراز<sup>۴</sup> و زاویه دید<sup>۵</sup> تخمین زده شده و موقعیت نسبی، سرعت نسبی و مؤلفه‌های شتاب پهپاد راهبر و یا موانع به دست می‌آید. مقایسه نتایج با داده‌های حاصل از تلفیق INS/GPS نشان‌دهنده عملکرد خوب تخمین‌های حاصل از روش مبتنی بر مشاهده است.

در [۵] یک روش تطبیقی برای کنترل مبتنی بر پردازش تصویر آرایش پهپادها مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش فرض شده است هر عضو آرایش با استفاده از حسگرهای بصری می‌تواند سرعت، زاویه رأس<sup>۶</sup> و اندازه خط دید (LOS)<sup>۷</sup> نسبت به سایر اعضا را اندازه بگیرد. در [۶] یک گروه دو عضوی با آرایش راهبر-پیرو با روش مبتنی بر مشاهده کنترل شده است. با استفاده از پردازش تصویر دوربین عضو پیرو و نیز تخمین‌گر EKF، فاصله نسبی، زاویه LOS و نرخ تغییرات زاویه LOS تخمین زده شده و سیستم هدایت عضو پیرو با استفاده از این داده‌ها، فرمان سرعت و شتاب را محاسبه کرده و به حلقه کنترلی داخلی ارسال می‌کند. معمولاً فرمان‌های خروجی از الگوریتم‌های هدایت به صورت مؤلفه‌های شتاب در راستای محورهای بدنه است [۷].

بین دو عضو و زاویه خط دید<sup>۱۰</sup> که از پردازش تصویر قابل محاسبه است، آرایش پروازی راهبر- پیرو در صورت بروز اختلال محدود در محاسبه متغیرهای مذکور نیز کنترل شود و برای این منظور از کنترل مدل پیشگو (MPC<sup>۱</sup>) با فرض امکان تخمین متغیرهای فاصله بین دو عضو و زاویه خط دید<sup>۱۰</sup> از روش پردازش تصویر برای کنترل آرایش راهبر- پیرو استفاده شده است.

روش MPC از روش های کنترل بهینه پیشرفته است که به کرات در صنعت بکار گرفته شده است. در سال های اخیر با ظهور میکروکنترلرهای قدرتمند و حسگرهای کوچک، این امکان به وجود آمده است که به کارگیری روش MPC به ربات های هوایی که دارای دینامیک نسبتاً سریعی هستند تعمیم پیدا کند. در [۱۳] کنترل کننده مدل پیشگو (MPC<sup>۱</sup>) برای کنترل آرایش استفاده گردیده و خاطر نشان شده است که کارایی این روش از روش های پسخوراند خطی ساز و کنترل تطبیقی بهتر بوده و اعمال قیده های مستقیم به این روش، ساده تر از روش های قبل انجام می شود. در [۱۴] و [۱۵] نیز از MPC برای کنترل آرایش گروه پروازی پهپادها استفاده شده است. معادلات حرکت دینامیک غیرخطی پهپادها با استفاده از پسخوراند خطی ساز، خطی شده و روش MPC به آن اعمال شده است. در [۱۶] به استفاده از MPC غیرمتمرکز برای کنترل پرواز گروهی پهپادهای عمود پرواز پرداخته شده است. پژوهش های زیاد دیگری در زمینه به کارگیری MPC در کنترل آرایش ربات های هوایی انجام شده که برای نمونه می توان به [۱۷]، [۱۸] و [۱۹] تا [۲۲] اشاره کرد.

در ادامه ی مقاله، معادلات حرکت استخراج گردیده و روش MPC توصیف شده است. سپس، به طراحی کنترل کننده از روش MPC و در نهایت به شبیه سازی و بررسی عملکرد کنترل کننده طراحی شده و به بحث و بررسی نتایج پرداخته شده است.

### معادلات حرکت

در این پژوهش فرض شده است دو ربات هوایی (بالگرد بدون سرنشین) با آرایش راهبر- پیرو در ارتفاع ثابت، با فاصله نسبتاً اندک در حال پرواز بوده و عضو پیرو که به دوربین تصویربرداری مجهز است می تواند با پردازش تصویر عضو راهبر،

در [۸] با استفاده از تصاویر دوربین نصب شده بر روی هواپیمای پیرو، از شبکه عصبی برای تخمین موقعیت و زاویه غلت هواپیمای راهبر بهره گرفته شده است. در این مقاله، هدف طراحی الگوریتم مقاوم برای سوخت گیری خودکار بوده است. در [۹] به هنگام قطعی ارتباط، برای پیش بینی مسیر عضوهای مجاور، از برون یابی مسیری که عضوها قبل از قطعی ارتباط طی می کردند استفاده شده است.

در [۱۰] کنترل آرایش بر اساس حسگر تصویری که زاویه خط دید را اندازه می گیرد انجام شده است. با توجه به اینکه مسیر حرکت دایره ای فرض شده است لذا عضو پیرو فقط لازم است زاویه خط دید ۴۵ درجه ای را حفظ کند تا فاصله  $\sqrt{2}R$  دو عضو حفظ گردد و نیازی به کنترل فاصله نیست.

در [۱۱] از روش DRHC<sup>۱</sup> برای کنترل آرایش ربات های هوایی همکار در شرایط نارسایی ارتباط مخابراتی بین عضوها استفاده شده است. در [۱۲] از رادار و حسگر تصویری برای تخمین فاصله و سرعت نسبی بین عضوهای آرایش استفاده شده و از فیلتر  $H_{\infty}$  برای حذف نویزها استفاده شده است.

هدف این پژوهش کنترل آرایش پروازی راهبر- پیرو حتی در موقع بروز نارسایی در ارتباط تصویری عضو پیرو با عضو راهبر با فرض در اختیار داشتن متغیرهای فاصله بین دو عضو و زاویه خط دید<sup>۱۰</sup> است. فرض شده است که متغیرهای مذکور با استفاده از روش هایی مثل پردازش تصویر قابل اندازه گیری باشد اما به منظور تمرکز بر روی موضوع اصلی، از پرداختن به پردازش تصویر و نحوه محاسبه فاصله و خط دید از این روش خودداری شده است.

در پژوهش های انجام شده که به صورت خلاصه به برخی از آن ها اشاره شد هنگام استفاده از روش پردازش تصویر برای کنترل آرایش گروه، لازم است عضو پیرو همواره عضو راهبر را در زاویه دید دوربین خود داشته باشد و در صورتی که عضو راهبر به دلایلی مانند مانور از این زاویه خارج شود، یا برای مدتی موانعی مثل مه گرفتگی، وجود ابر و موانع دیگر موجب اختلال در تصویربرداری شود و یا عضو راهبر در فاصله ای قرار بگیرد که عضو پیرو نتواند به دلیل وضوح نامناسب تصاویر موقعیت آن را تشخیص دهد کنترل آرایش دچار مشکل خواهد شد. در این مقاله سعی شده است با استفاده متغیرهای فاصله

$$\lambda = \tan^{-1} \frac{\rho_y}{\rho_x} \quad (2)$$

که در این روابط

$$\rho_x = \rho \cos(\lambda) \quad (3)$$

$$\rho_y = \rho \sin(\lambda) \quad (4)$$

می‌باشند.

با مشتق‌گیری از رابطه‌های (۱) و (۲) می‌توان نوشت:

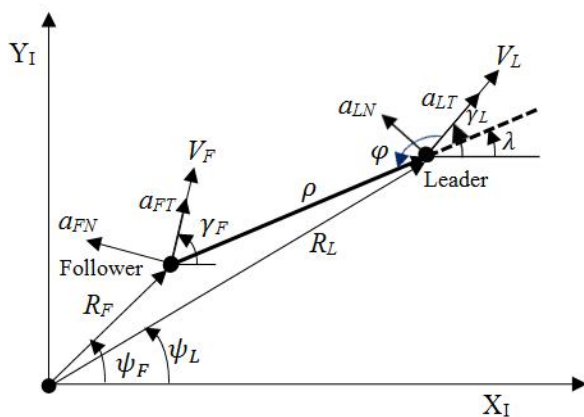
$$\dot{\rho} = \frac{\rho_x \dot{\rho}_x + \rho_y \dot{\rho}_y}{\rho} \quad (5)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{\dot{\rho}_y \rho_x - \dot{\rho}_x \rho_y}{\rho^2} \quad (6)$$

از سوی دیگر با توجه به شکل ۲ می‌توان نتیجه گرفت:

$$\dot{\rho}_x = V_L \cos(\gamma_L) - V_F \cos(\gamma_F) \quad (7)$$

$$\dot{\rho}_y = V_L \sin(\gamma_L) - V_F \sin(\gamma_F) \quad (8)$$



شکل ۲. توصیف پارامترهای هندسی آرایش راهبر- پیرو

با جایگذاری رابطه‌های (۳)، (۴)، (۷) و (۸) در رابطه‌های (۵) و (۶) رابطه‌های زیر به دست خواهد آمد:

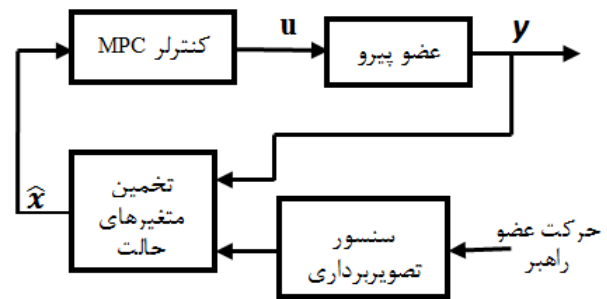
$$\dot{\rho} = V_L \cos(\gamma_L - \lambda) - V_F \cos(\gamma_F - \lambda) \quad (9)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{V_L \sin(\gamma_L - \lambda) - V_F \sin(\gamma_F - \lambda)}{\rho} \quad (10)$$

با ترکیب رابطه‌های (۹) و (۱۰) و حذف  $V_L$  می‌توان به صورت زیر رابطه‌ای را برای محاسبه  $\gamma_L$  به دست آورد:

$$\gamma_L = \tan^{-1} \left( \frac{\rho \dot{\lambda} + V_F \sin(\gamma_F - \lambda)}{\dot{\rho} + V_F \cos(\gamma_F - \lambda)} \right) + \lambda \quad (11)$$

زاویه LOS و نیز فاصله خود نسبت به عضو راهبر را اندازه‌گیری کند. عضوها به صورت جرم نقطه‌ای در نظر گرفته شده اما فرض شده است که سرعت و ورودی‌های کنترلی در محدوده مشخصی قرار گرفته باشند. هدف این است که با فرضیات یاد شده بتوان آرایش راهبر-پیرو را در شرایط نارسایی ارتباط تصویری کنترل کرده و عضو پیرو بتواند در فاصله و زاویه مناسب عضو راهبر را دنبال کند. در این مقاله فرض شده است اختلال ارتباطی بین دو عضو در زمان محدودی باشد اما این اختلال می‌تواند به صورت تصادفی در زمان‌های مختلفی اتفاق بیفتد. از تأخیر زمانی که در عمل برای پردازش تصویر و محاسبه فرمان‌های کنترلی اتفاق می‌افتد صرف‌نظر شده است. همچنین فرض شده است که فاصله نسبی بین عضوها در بُرد تصویربرداری و زاویه دید دوربین نصب شده بر روی عضو پیرو قرار گیرد گرچه سیستم کنترل آرایش باید بتواند در زمان‌های محدودی که فاصله بین عضوها بیش از بُرد بوده و یا عضو راهبر از زاویه دید دوربین خارج می‌شود پیکره‌بندی آرایش را کنترل کند. در شکل ۱ بلوک دیاگرام کنترل آرایش مبتنی بر پردازش تصویر نشان داده شده است.



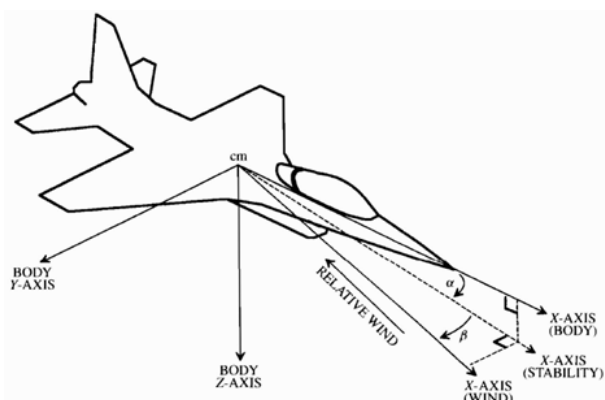
شکل ۱. بلوک دیاگرام روش MPC

در شکل ۲ آرایش راهبر-پیرو دو ربات هوایی در صفحه افقی موازی با سطح زمین نشان داده شده است. اندیس‌های  $L$  و  $F$  به ترتیب متناظر با ربات‌های راهبر و پیرو است.  $\rho$ ، فاصله نسبی بین دو عضو،  $\lambda$  زاویه خط دید،  $\gamma$  زاویه مسیر هر کدام از عضوها نسبت به محور  $X$  دستگاه مختصات مرجع و  $V$  نشان دهنده سرعت عضوهاست. ابتدا معادلات حرکت بین عضو راهبر و پیرو استخراج شده و سپس معادلات سینماتیک هر دو عضو در دستگاه مختصات اینرسی (مرجع) به دست خواهد آمد. با توجه به شکل ۲ می‌توان نوشت [۱۷]:

$$\rho = \sqrt{\rho_x^2 + \rho_y^2} \quad (1)$$

هوایی نیز به طور معمول نیروهای وارده در راستای محورهای بدنه تجزیه شده و در معادلات حرکت وارد می شوند. با توجه به اینکه معادلات به دست آمده برای آرایش، معادلات سینماتیکی حرکت هستند، شتابها مماس و عمود بر بردار سرعت عضوها هستند. در صورتی که بجای فرض جرم نقطه‌ای، دینامیک شش درجه عضوهای آرایش مد نظر قرار گیرد با استفاده از ماتریس دوران رابطه (۱۵) می توان شتابهای مماس و عمود بر بردار سرعت را به دستگاه مختصات بدنه منتقل کرد. با توجه شکل ۳، ماتریس دوران در حالت سه بعدی از ترکیب دوران به اندازه زاویه حمله ( $\alpha$ ) و زاویه لغزش جانبی ( $\beta$ ) تشکیل شده است ([۲۳]):

$$C_{w/b} = \begin{bmatrix} \cos\alpha \cos\beta & \sin\beta & \sin\alpha \cos\beta \\ -\cos\alpha \sin\beta & \cos\beta & -\sin\alpha \sin\beta \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (15)$$



شکل ۳. دستگاه‌های مختصات بدنه، پایداری و باد

لازم به ذکر است در روش‌های هدایت مثل هدایت تناسبی که از زاویه خط دید ( $\lambda$ ) و خط دید ( $\rho$ ) برای هدایت استفاده می‌شود اغلب، خروجی‌های حلقه هدایت که در واقع ورودی‌های مطلوب سیستم کنترل هستند به صورت شتابهای مماس و عمود بر خط دید می‌باشند ( $[V]$ ) و با توجه به شکل ۲ می‌توان شتابهای مماس و عمود بر مسیر ( $a_T$  و  $a_N$ ) را بر روی خط دید و عمود بر آن تصویر کرده و با به دست آوردن مؤلفه‌های شتاب در این راستاها فرمان‌های هدایت را محاسبه کرد.

در رابطه (۱۱)، فاصله  $\rho$  و زاویه خط دید  $\lambda$  از طریق روش‌های پردازش تصویر به دست می‌آید و مقادیر  $V_F$  و  $\gamma_F$  مربوط به عضو پیرو نیز در دسترس است. با توجه به اینکه مقادیر متغیرهای  $\lambda$  و  $\rho$  در پله‌های زمانی قبلی وجود دارد می‌توان با مشتق‌گیری عددی، مقادیر مشتق این متغیرها را به دست آورده و با محاسبه  $\gamma_L$  از رابطه (۱۱)، از طریق یکی از رابطه‌های (۹) یا (۱۰) سرعت عضو پیرو ( $V_L$ ) را محاسبه کرد. همچنین این روند را می‌توان با محاسبه  $\dot{\lambda}$  و  $\dot{\rho}$  از طریق پردازش تصویر نیز انجام داد.

بنابراین عضو پیرو می‌تواند بدون نیاز به سیستم ارتباطی بین عضوهای راهبر و پیرو برای دریافت متغیرهای حالت عضو راهبر، با متغیرهای اندازه‌گیری شده حاصل از روش مبتنی بر پردازش تصویر و با استفاده از رابطه (۵) مقدار  $\gamma_L$  را تخمین زد.

با مشتق‌گیری از روابط (۹) و (۱۰)، مشتق مرتبه دوم متغیرهای  $\rho$  و  $\lambda$  به دست می‌آید:

$$\ddot{\rho} = \rho \dot{\lambda}^2 + a_{LT} \cos(\gamma_L - \lambda) - a_{LN} \sin(\gamma_L - \lambda) - a_{FT} \cos(\gamma_F - \lambda) + a_{FN} \sin(\gamma_F - \lambda) \quad (12)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{-2\rho\dot{\lambda} + a_{LT} \sin(\gamma_L - \lambda) + a_{LN} \cos(\gamma_L - \lambda)}{\rho} - \frac{-a_{FT} \sin(\gamma_F - \lambda) - a_{FN} \cos(\gamma_F - \lambda)}{\rho} \quad (13)$$

در این روابط  $a_{FN}$  و  $a_{FT}$  به ترتیب شتابهای مماس و عمود بر بردار سرعت ربات پیرو و  $a_{LN}$  و  $a_{LT}$  شتابهای مماسی و عمود بر بردار سرعت ربات راهبر می‌باشند که از روابط زیر به دست می‌آیند: ([۷])

$$a_{FT} = \dot{V}_F$$

$$a_{FN} = \dot{\gamma}_F V_F \quad (14)$$

$$a_{LT} = \dot{V}_L$$

$$a_{LN} = \dot{\gamma}_L V_L$$

شتابهای متناظر عضو پیرو، ورودی‌های کنترلی و در واقع فرمان‌های هدایتی آن عضو بوده اما شتابهای متناظر عضو راهبر باید با استفاده از داده‌های پله‌های زمانی قبلی و مشتق‌گیری عددی به دست آورده شوند. در عمل برای اینکه جسمی در یک راستا، شتاب مورد نظر را پیدا کند لازم است نیروی متناسب با آن به جسم وارد شود. در مورد ربات‌های

## معادلات حرکت سینماتیکی عضوها

برای انجام شبیه‌سازی حرکت عضوها و ارزیابی اینکه آن‌ها در مسیر از پیش تعیین شده حرکت می‌کنند لازم است معادلات حرکت دینامیکی آن‌ها در یک دستگاه اینرسی مرجع استخراج شود. با توجه به شکل ۲ و استفاده از مختصات قطبی فاصله هر کدام از عضوها نسبت به مرکز دستگاه مختصات مرجع با  $R$  و زاویه خط فاصله با افق با  $\psi$  نشان داده شده است. با فرض دو بعدی بودن آرایش می‌توان نوشت:

$$\dot{R}_{Fx} = V_F \cos \psi_F \quad (۱۶)$$

$$\dot{R}_{Fy} = V_F \sin \psi_F \quad (۱۷)$$

$$\dot{R}_{Lx} = V_L \cos \psi_L \quad (۱۸)$$

$$\dot{R}_{Ly} = V_L \sin \psi_L \quad (۱۹)$$

معادلات (۹)، (۱۰)، (۱۲)، (۱۳) و نیز معادلات (۱۶) تا (۱۹) هشت معادله حرکت آرایش بوده و به سادگی برای بیش از دو عضو نیز قابل تعمیم هستند.

موضوع قابل توجه دیگر در آرایش نشان داده شده در شکل ۲ زاویه قرارگیری عضو پیرو نسبت به عضو راهبر است. با توجه به شکل ۲ در صورتی که  $\theta = \gamma_L - \lambda$  تعریف شود می‌توان نوشت:

$$\varphi + (\gamma_L - \lambda) = \pi \quad (۲۰)$$

بنابراین

$$\theta = \pi - \varphi \quad (۲۱)$$

برای مثال اگر  $\gamma_L = \lambda$  باشد مقدار  $\theta$  صفر و  $\varphi = \pi$  به دست خواهد آمد. لذا عضو پیرو در امتداد عضو راهبر و درست پشت سر آن و در فاصله مطلوب ( $\rho_d$ ) حرکت خواهد کرد. بنابراین با توجه به پیکره‌بندی آرایش و نحوه قرارگیری عضوها، فاصله ( $\rho_d$ ) و زاویه قرارگیری مطلوب آن‌ها نسبت به عضو راهبر ( $\theta_d$  یا  $\varphi_d$ ) مشخص شده و سیستم کنترل آرایش با محاسبه و اعمال ورودی‌های کنترلی مناسب ( $a_{FN}$  و  $a_{FT}$ ) عضو پیرو را به موقعیت مطلوب هدایت می‌کند.

## طراحی کنترل کننده از روش MPC

در روش MPC که گاهی RHC<sup>۱۲</sup> معرفی می‌شود هدف، به دست آوردن ورودی کنترلی  $u(t)$  در محدوده مجاز و تا یک افق زمانی است تا متغیرهای حالت سیستم را به مقادیر مطلوب نزدیک کند. یافتن ورودی کنترلی  $u(t)$  از طریق تشکیل یک تابع هزینه و کمینه کردن آن توسط این ورودی به دست می‌آید. به صورت خلاصه در روش MPC هدف پیدا کردن رشته ورودی کنترلی  $u$  در بازه زمانی  $[t_k \ t_{k+N}]$  است به طوری که تابع هزینه زیر کمینه شود:

$$J(\mathbf{x}, k, \mathbf{u}) = \phi(\bar{\mathbf{y}}(k+N)) + \sum_{i=k}^{k+N-1} L(\mathbf{u}(i)), \quad (۲۲)$$

که در آن

$$\phi(\bar{\mathbf{y}}(k+N)) = \phi(\mathbf{x}(k+N)) = \frac{1}{2} \bar{\mathbf{y}}^T(k+N) P_0 \bar{\mathbf{y}}(k+N) \quad (۲۳)$$

$$L(\mathbf{u}(i)) = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T(i) R \mathbf{u}(i) \quad (۲۴)$$

$$\mathbf{u} = \{u(k), u(k+1), \dots, u(k+N-1)\} \quad (۲۵)$$

$$\bar{\mathbf{y}} = \mathbf{y}_d - \mathbf{y} \quad (۲۶)$$

در این روابط  $\mathbf{u}$  بردار ورودی‌های کنترلی،  $\mathbf{x}$  بردار متغیرهای حالت،  $\mathbf{y}$  بردار متغیرهای خروجی و  $\mathbf{y}_d$  بردار خروجی‌های مطلوب و  $N$  تعداد پله‌های افق زمانی است. برای جزئیات بیشتر می‌توان به منابعی مثل ( [۲۴] ) مراجعه کرد.

با توجه به توضیحات ارائه شده،  $\mathbf{y}_d = [\rho_d, \theta_d]$  است. در هر پله زمانی که بهینه‌سازی انجام می‌شود رشته‌ای از ورودی‌های کنترلی  $\mathbf{u}$  (رابطه ۲۴) به دست می‌آید اما فقط عضو اول این رشته ( $u(k)$ ) به دینامیک سیستم اعمال شده و متغیرهای زمانی تا انتهای پله زمانی محاسبه می‌شود.

در این پژوهش برای کمینه‌سازی تابع هزینه از تابع کتابخانه‌ای FMINCON نرم‌افزار MATLAB استفاده شده که اساس آن بر الگوریتم بهینه‌سازی عددی نلدرد-مید<sup>۱۳</sup> استوار است ( [۲۵] و [۲۶] ).

متغیرهای زمانی به دست آمده شرایط اولیه برای بهینه‌سازی پله زمانی بعدی در نظر گرفته شده و با انجام بهینه‌سازی، رشته ورودی‌های کنترلی جدید به دست آمده و متغیرهای حالت سیستم با اعمال اولین عضو رشته محاسبه می‌شوند. این فرآیند تا هر زمان دلخواه ادامه پیدا می‌کند تا ربات هوایی پیرو در فاصله و زاویه مطلوب نسبت به عضو راهبر

۴- محاسبه  $\dot{V}_L$  از رابطه:

$$\dot{V}_L = \frac{V_L(k) - V_L(k-1)}{t(k) - t(k-1)} \quad (27)$$

۵- محاسبه  $\dot{\gamma}_L$  از رابطه

$$\dot{\gamma}_L = \frac{\gamma_L(k) - \gamma_L(k-1)}{t(k) - t(k-1)} \quad (28)$$

۶- محاسبه  $\dot{\rho}$  و  $\dot{\lambda}$  از رابطه‌های (۱۲) و (۱۳)

۷- محاسبه معادلات دیفرانسیل رابطه‌های (۱۶) تا (۱۹)

۸- انتگرال‌گیری از معادلات دیفرانسیل

۹-  $k = k + 1$

۱۰- بازگشت به گام ۱

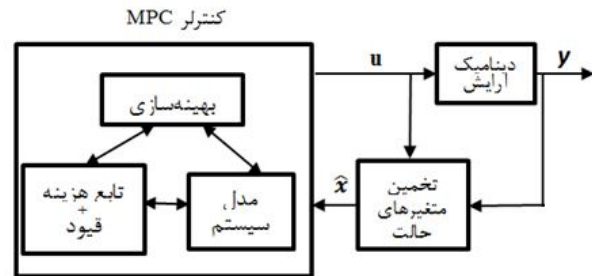
لازم به توضیح است تا زمانی که اختلال در ارتباط وجود دارد در پله ۴ این الگوریتم از  $V_L(k)$  که در پله زمانی قبل از اختلال تا پله زمانی  $t_{k+N}$  به دست آمده، استفاده می‌شود.

با این فرآیند تا پله زمانی  $t_{k+N}$  می‌توان با استفاده از داده‌های پیش‌بینی شده توسط روش MPC آرایش را کنترل کرد. بنابراین هرچه  $N$  بزرگ‌تر باشد افق زمانی بیشتری از متغیرهای حالت در دسترس بوده و سیستم کنترل آرایش می‌تواند بروز اختلال با بازه زمانی بیشتری را تحمل کرده و آرایش را کنترل کند. در صورتی که بعد از پله زمانی  $t_{k+N}$  اختلال همچنان وجود داشته باشد می‌توان با ثابت فرض کردن  $V_L(k)$  در گام ۴ و یا برونیابی  $V_L(k)$  با استفاده از داده‌های موجود باز هم آرایش را تا زمان محدودی کنترل کرد.

نظر به اینکه در زمان وجود اختلال، تخمین متغیرهای حالت عضو راهبر با عدم قطعیت همراه است لذا برای جلوگیری از برخورد احتمالی بین اعضا لازم است فاصله مطلوب و در صورت نیاز زاویه قرارگیری عضو پیرو نسبت به راهبر به صورت تابعی از زمان اختلال تغییر یابد. همچنین می‌توان در زمان استفاده از داده‌های پیش‌بینی شده توسط MPC و زمانی که برای  $V_L(k)$  از داده‌های برونیابی و یا از مقدار ثابت برای آن استفاده می‌شود از تابع متفاوتی استفاده کرد. برای مثال در زمان اختلال می‌توان از روابط زیر برای فاصله نسبی و زاویه قرارگیری مطلوب استفاده کرده و با توجه به شرایط، مقادیر ثابت مناسبی ( $C_\rho$  و  $C_\varphi$ ) را بکار گرفت.

$$\rho_a \rightarrow \rho_a + C_\rho \times \text{loss time} \quad (29)$$

پرواز کند. لازم به ذکر است در انجام بهینه‌سازی، محدوده‌های مجاز متغیرهای حالت و نیز ورودی‌های کنترل در نظر گرفته می‌شوند. در شکل ۴ بلوک دیاگرام کنترل آرایش با روش MPC آورده شده است.



شکل ۴. بلوک دیاگرام کنترل آرایش با روش MPC

همان‌طور که اشاره شد در روش MPC در هر پله زمانی، بعد از بهینه‌سازی و کمینه کردن تابع هزینه، ورودی کنترلی و متغیرهای حالت تا  $N$  پله زمانی بعد ( $[t_k, t_{k+N}]$ ) به دست می‌آید. در حالت عادی ورودی کنترل  $u(k)$  به سیستم اعمال شده و متغیرهای حالت پله زمانی بعدی به دست می‌آید. اما در صورت بروز نارسایی ارتباط تصویری بین اعضا، متغیرهای زاویه خط دید ( $\lambda$ ) و خط دید ( $\rho$ ) از طریق پردازش تصویر قابل محاسبه نخواهد بود. چون در این پژوهش فرض شده است که عضو پیرو، تنها عضو راهبر را دنبال کند بنابراین اگر عضو راهبر بتواند در زمان وجود اختلال مسیر حرکت عضو راهبر را تخمین بزند چیدمانی آرایش حفظ خواهد شد.

با توجه به اینکه در روش MPC در هر لحظه متغیرهای حالت تخمینی عضو راهبر در بازه زمانی  $[t_k, t_{k+N}]$  در اختیار عضو پیرو قرار دارد بنابراین عضو پیرو می‌تواند در زمان بروز نارسایی ارتباطی با استفاده از این اطلاعات در لحظه  $t_k$  با تخمین مسیر حرکت عضو راهبر، پیکره‌بندی آن را دنبال کرده و آرایش را حفظ کند. با توجه به رابطه (۱۱) برای محاسبه  $\gamma_L$  لازم است مقادیر متغیرهای  $\lambda$ ،  $\rho$  و مشتق اول آن‌ها مشخص باشد. برای تخمین متغیرهای حالت عضو راهبر می‌توان از الگوریتم زیر استفاده کرد:

- ۱- محاسبه  $\dot{\rho}$  و  $\dot{\lambda}$  از رابطه‌های (۹) و (۱۰) با استفاده از مقادیر موجود در پله  $k-1$
- ۲- محاسبه  $\gamma_L$  از رابطه (۱۱)
- ۳- محاسبه  $\dot{\gamma}_F$  و  $\dot{\gamma}_F$  با استفاده از معادله اول و دوم رابطه (۱۴)

شبیه‌سازی در دو بخش بدون اختلال و با وجود اختلال در زمان محدود انجام شده است. فرض شده که از ثانیه ۵ تا ۱۳ در پردازش تصویر اختلال به وجود آمده و ربات پیرو نمی‌تواند اطلاعات مربوط به ربات راهبر را از طریق پردازش تصویر به دست آورد. اختلال در هر دو ثانیه، فقط در یک پله زمانی برطرف شده و مجدداً بروز می‌کند. از ثانیه سیزدهم به بعد اختلال به صورت کامل بر طرف شده و کنترل آرایش به حالت عادی برمی‌گردد. در انجام شبیه‌سازی فرض شده است به ازای هر ثانیه اختلال، یک متر به  $\rho_d$  اضافه شود.

نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۵ تا ۱۱ ارائه شده است. در شکل ۵ فاصله نسبی بین اعضا بر حسب زمان برای هر دو حالت بدون اختلال و با در نظر گرفتن اختلال نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود فاصله اولیه بین اعضا در ابتدا ۶۰ متر بوده است که در حالت بدون اختلال پس از حدود ۵ ثانیه، فاصله نسبی بین اعضا به مقدار مطلوب ( $\rho_d = 30m$ ) رسیده است. در حالتی که اختلالی در تخمین متغیرهای فاصله و زاویه دید بین اعضا به وجود می‌آید به منظور کاهش احتمال برخورد بین اعضا، لازم است فاصله مطلوب بین اعضا به صورت تابعی از مدت زمان اختلال افزایش یابد. البته این افزایش فاصله علاوه بر زمان اختلال می‌تواند تابعی از مشخصات عملکردی پرنده و نیز محدوده‌ی ورودی‌های کنترل نیز باشد. در این پژوهش، با توجه به پژوهش‌های دیگر ([۱۸]) فرض شده است که به ازای هر ثانیه اختلال یک متر به فاصله مطلوب بین دو عضو اضافه گردد. البته در صورتی که بجای روش MPC (که چند پله زمانی بعدی را پیش‌بینی می‌کند) از روش‌های متداول کنترلی استفاده شود لازم است فاصله مطلوب در هنگام اختلال افزایش بیشتری داشته باشد. برای انجام شبیه‌سازی فرض شده است که بروز نارسایی از ثانیه ۵ شروع شده و تا ثانیه ۱۳ ادامه داشته باشد. نظر به اینکه اختلال ۸ ثانیه به طول انجامیده، فاصله مطلوب از ۳۰ به ۳۸ متر افزایش می‌یابد که این امر در شکل ۵ قابل مشاهده است.

علاوه بر کنترل فاصله، یکی دیگر از اهداف کنترل آرایش، کنترل زاویه قرارگیری ( $\varphi$ ) عضو پیرو نسبت به عضو راهبر بوده و در انجام شبیه‌سازی مقدار مطلوب این زاویه ۱۵۰ درجه ( $\varphi_d = 150 \text{ deg}$ ) در نظر گرفته شد. در شکل ۵ شکل ۶ تغییرات زاویه  $\varphi$  برای دو حالت بدون اختلال و با وجود اختلال

$$\varphi_d \rightarrow \varphi_d + C_\varphi \times \text{loss time} \quad (30)$$

در این روابط منظور از *loss time* مدت زمان اختلال یا بروز نارسایی ارتباطی می‌باشد.

### شبیه‌سازی حرکت

در این بخش به شبیه‌سازی پرواز یک آرایش راهبر-پیرو دو ربات هوایی (بالگرد بدون سرنشین) همسان که در ارتفاع یکسان در حال پرواز هستند پرداخته شده است و هدف، کنترل دو عضو به صورتی است که فاصله نسبی دو عضو ۳۰ متر ( $\rho_d = 30m$ ) و  $\varphi_d = 150 \text{ deg}$  باشد. به منظور رعایت اختصار از پرداختن به جزئیات مسیر صرف‌نظر شده اما سرعت و زاویه مسیری ربات راهبر که شبیه‌سازی براساس آن‌ها انجام شده، در شکل‌های ۹ تا ۱۱ آورده شده است.

برای انجام شبیه‌سازی و ارزیابی توانمندی روش ارائه شده فرض می‌شود با در نظر گرفتن محدودیت عملکردی یک ربات هوایی و نیز موانع ثابت موجود، مسیر حرکت ربات راهبر به صورت تابعی از زمان مشخص باشد. در این صورت می‌توان  $\gamma$  مسیر و در نتیجه  $\dot{\gamma}$  عضو راهبر و نیز سرعت آن را به دست آورد.

شرایط اولیه به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\begin{aligned} V_{F0} &= 4 \frac{m}{s}, & V_{L0} &= 0.7 \frac{m}{s}, & \rho_0 &= 60 m \\ \gamma_{F0} &= 10 \text{ deg}, & \lambda_0 &= 15 \text{ deg} \\ \dot{\rho}_0 &= 0 \frac{m}{s}, & \dot{\lambda}_0 &= 0 \frac{rad}{s} \end{aligned} \quad (31)$$

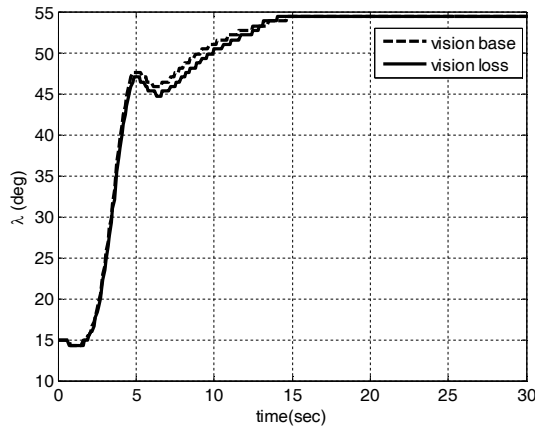
همچنین فرض می‌شود محدوده ورودی‌های کنترل (شتاب‌های وارد به عضو پیرو) به صورت زیر باشد (بر حسب  $\frac{m}{s^2}$ ):

$$u_{1\text{limits}} = [-5 \ 5]; \quad u_{2\text{limits}} = [-10 \ 10]; \quad (32)$$

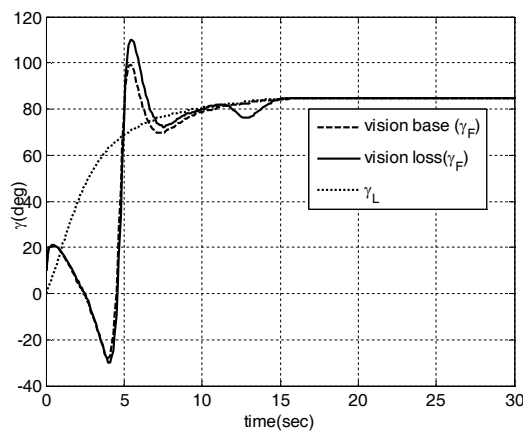
محدوده‌ی سرعت هر دو عضو بین ۱ تا ۳۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در بهینه‌سازی و کمینه کردن تابع هزینه،  $N=20$  و زمان نمونه‌برداری ۱۰ هرتز در نظر گرفته شده است. با توجه به روش MPC هرچه  $N$  بزرگ‌تر باشد افق زمانی بیشتری قابل پیشگویی بوده و عملکرد این روش کنترلی در هنگام بروز اختلال بهتر خواهد شد.



ثانیه ۵ تا ۱۳ موجب ایجاد خطای کمتر از سه درجه بین دو عضو شده و با برطرف شدن اختلال، این اختلاف برطرف شده است. بعد از ثانیه ۱۵ از شروع پرواز با توجه به اینکه زاویه مسیر عضو راهبر به مقدار ثابت ۸۲ درجه می‌رسد عضو پیرو نیز زاویه مسیر ۸۲ درجه را با محور X می‌سازد.



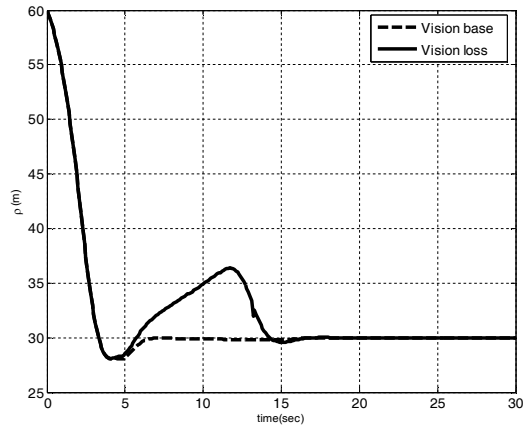
شکل ۷. تغییرات زاویه خط دید (LOS)



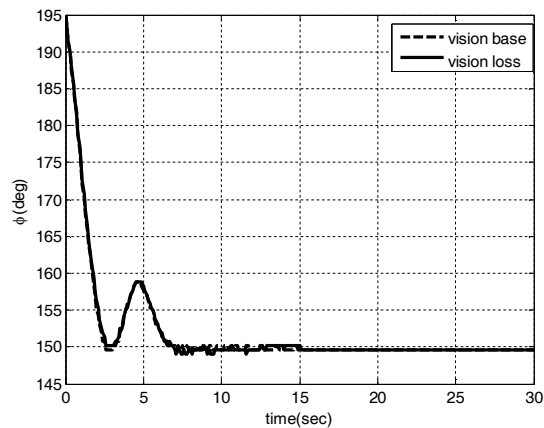
شکل ۸. تغییرات زاویه مسیر (γ) عضوهای راهبر و پیرو

همان طور که ذکر شد اگر عضو پیرو بتواند از طریق پردازش تصویر و یا تخمین، سرعت و زاویه مسیر ربات هوایی راهبر را به دست آورد در این صورت می‌تواند آن را در فاصله و زاویه مطلوب دنبال کند. بدیهی است پس از آنکه ربات پیرو در فاصله و زاویه مناسب نسبت به ربات راهبر قرار گیرد سرعت و زاویه مسیر آن مانند مقادیر متناظر ربات راهبر خواهد بود. در شکل ۸ نشان داده شد که حتی در حالت اختلال نیز زاویه مسیر عضو پیرو پس از ۵ ثانیه با زاویه مسیر عضو راهبر برابر شده است. به همان صورت شکل ۹ نیز نشان می‌دهد در حالت

نشان داده شده است. چون برای هر دو حالات یکسان در نظر گرفته شده است نمودار تغییرات آن‌ها با اختلاف خیلی کم نسبت به یکدیگر به مقدار مطلوب همگرا شده‌اند و این امر توانمندی روش MPC را به خوبی نشان می‌دهد.



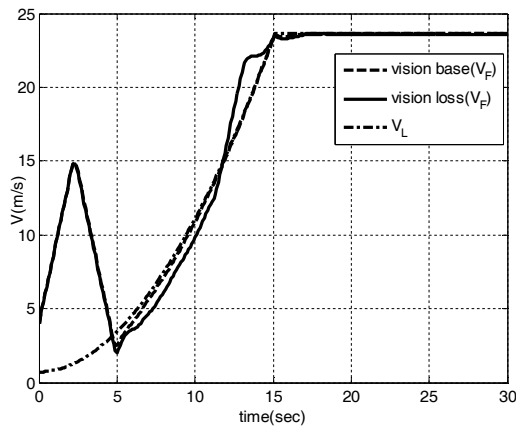
شکل ۵. تغییرات فاصله نسبی عضوهای راهبر و پیرو



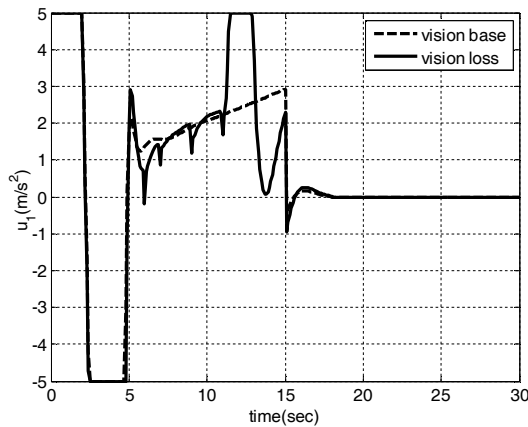
شکل ۶. تغییرات زاویه فرارگیری عضو پیرو نسبت به راهبر

نظر به اینکه  $\phi$  به سمت مقدار مطلوب ۱۵۰ درجه پیش می‌رود و از ثانیه ۱۵ به بعد زاویه مسیر  $\gamma_L$  در شکل ۸، حدود ۸۵ درجه است بنابراین با توجه به رابطه ۲۰ انتظار می‌رود مقدار زاویه خط دید به ۵۵ درجه برسد. تغییرات زمانی این زاویه که در شکل ۷ تحقق این امر را نشان می‌دهد.

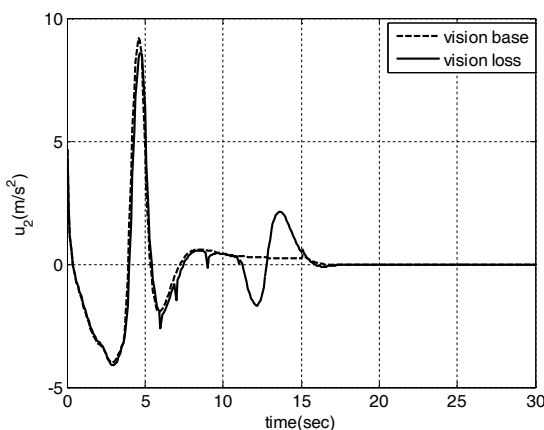
شکل ۸ تغییرات زاویه مسیر عضو پیرو در حالت بدون اختلال و با وجود اختلال و زاویه مسیر عضو راهبر را بر حسب زمان نشان می‌دهد. در هر دو حالت عضو پیرو توانسته است پس از حدود ۵ ثانیه با اختلاف خیلی کمی، زاویه مسیر عضو راهبر را دنبال کرده و در پشت سر آن پرواز کند. بروز اختلال از



شکل ۹. تغییرات سرعت ربات‌های راهبر و پیرو



شکل ۱۰. تغییرات ورودی کنترلی اول (شتاب مماسی)



شکل ۱۱. تغییرات ورودی کنترلی دوم (شتاب نرمال)

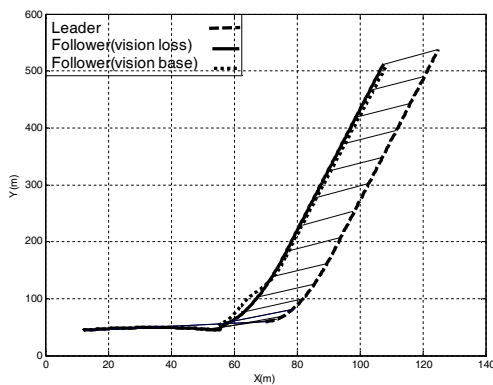
در شکل ۱۲ مسیر حرکت ربات هوایی راهبر و پیرو نشان داده شده است. همان طور مشاهده می‌شود با توجه به تعریف زاویه  $\varphi$  (شکل ۲) ربات هوایی پیرو در زاویه مطلوب  $150^\circ$  درجه نسبت به ربات راهبر و در فاصله ۱۰ متری آن قرار گرفته

بدون اختلال، پس از حدود ۵ ثانیه از شروع حرکت، سرعت عضوهای پیرو و راهبر بر یکدیگر منطبق شده و هر دو سرعت حدود ۲۳ متر بر ثانیه را پیدا می‌کنند. در حالت بروز اختلال نیز با کمی اختلاف، با توجه به قابلیت‌های روش MPC، سرعت عضو پیرو به سرعت پیرو نزدیک شده و پس از رفع اختلال بر آن منطبق شده است. بدیهی است که اگر در فاصله زمانی‌های دیگری باز هم ارتباط تصویری دچار نارسایی شود منحنی تغییرات سرعت عضو راهبر و پیرو از یکدیگر فاصله بیشتری خواهند گرفت و این امر به مسیر حرکت عضو پیرو و در نتیجه چیدمانی آرایش تأثیر خواهد گذاشت. در عمل لازم است تمهیداتی بکار گرفته شود تا در صورت بروز نارسایی طولانی اعضا بتوانند در مورد ادامه پرواز تصمیم‌گیری کنند.

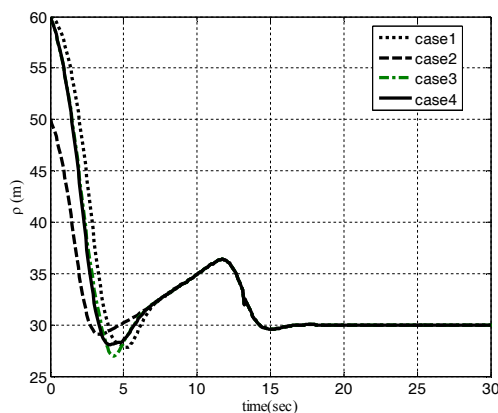
در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ ورودی‌های کنترلی (شتاب‌های مماسی و نرمال) عضو پیرو نشان داده شده است. تلاش کنترلی در حالت وجود اختلال بیشتر از حالت بدون اختلال بوده است. ورودی کنترلی اول ( $u_1$ ) در محدوده‌ی زمانی صفر تا ۵ ثانیه در حالت بدون اختلال، هم در ناحیه مثبت و هم در ناحیه منفی اشباع شده اما در حالت اختلال نیز برای مدت کوتاهی دچار اشباع در ناحیه مثبت شده است. اما ورودی کنترلی دوم ( $u_2$ ) در هر دو حالت در داخل محدوده‌ی در نظر گرفته‌شده قرار داشته و به اشباع نرسیده است. با مقایسه شکل ۱۰ و شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که تغییرات زمانی ورودی کنترلی  $u_2$  نسبت به ورودی کنترلی  $u_1$  در حالت نارسایی ارتباطی انطباق بیشتری به حالت بدون نارسایی دارد. علت آن این است که در حالت بروز نارسایی فرض شد که مقدار  $\varphi_d$  ثابت مانده اما  $\rho_d$  به صورت تابعی از مدت زمان نارسایی با استفاده از ۲۹ افزایش یابد. با توجه به اینکه در کنترل  $\rho_d$ ، ورودی کنترلی اول (شتاب مماسی) نقش بیشتری دارد بنابراین تلاش کنترلی این ورودی بیشتر از ورودی کنترلی دوم (شتاب نرمال) خواهد بود.

هم همگرا شده‌اند و بعد از آن اختلاف محسوسی بین آن‌ها وجود مشاهده نمی‌شود.

همان طور که در ابتدای قسمت شبیه‌سازی ذکر شد در انجام شبیه‌سازی‌ها فرض شده است روش MPC در هر پله زمانی بیست پله زمانی دیگر را پیش‌بینی کرده ( $N=20$ ) و ورودی‌های کنترل را از طریق کمینه‌سازی تابع هزینه به دست آورد. با توجه به اینکه در این پژوهش هر پله زمانی برابر  $0.1$  ثانیه در نظر گرفته شده است بنابراین در هر پله زمانی، ورودی‌های کنترلی تا دو ثانیه دیگر قابل پیش‌بینی است و در صورتی که اختلال تا ۲ ثانیه هم طول بکشد از نظر کنترل آرایش مشکل چندانی به وجود نخواهد آمد. از نظر ریاضی می‌توان  $N$  را بی‌نهایت افزایش داد اما از نظر کاربردی، افزایش  $N$  تا حدی قابل قبول است که پردازشگر سیستم کنترل بتواند با تأخیر معقول محاسبات بهینه‌سازی را انجام داده و ورودی‌های کنترلی را استخراج کند.



شکل ۱۲. مسیر حرکت ربات‌های هوایی راهبر و پیرو



شکل ۱۳. تغییرات فاصله نسبی عضوهای راهبر و پیرو در شرایط اولیه مختلف

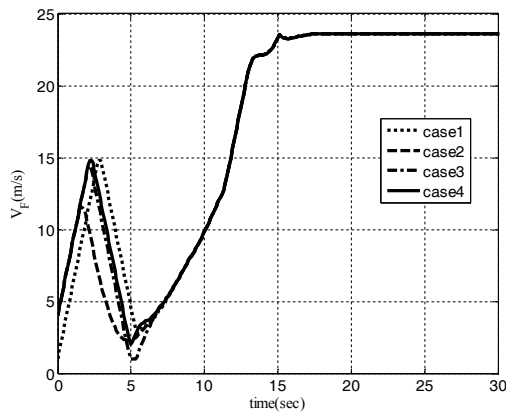
است. هر دو ربات با شرایط اولیه‌ای که در رابطه ۳۱ ذکر شد شروع به حرکت کرده و در کمتر از ۵ ثانیه، نسبت به یکدیگر در فاصله و زاویه مطلوب قرار گرفته‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده و شکل‌های ۲ و ۱۲ می‌توان ربات‌های پیرو دیگری در زوایا و فواصل مطلوب دیگری ( $\rho_d$  و  $\varphi_d$ ) قرار داده و آرایش چند عضوی را شکل داده و آن‌ها را با استفاده از روش کنترلی MPC کنترل کرد تا در مواقع نارسایی ارتباطی نیز بتوان آرایش را حفظ کرد. در کنترل آرایش بیش از دو عضو، علاوه بر اینکه فاصله بین دو عضو راهبر و پیرو کنترل می‌شود باید فاصله عضو پیرو با عضوهای پیرو دیگر نیز کنترل گردد تا از برخورد بین آن‌ها اجتناب شود. برای این امر لازم است تا در تابع هزینه‌ای که در روش MPC تشکیل می‌شود خطای فاصله بین اعضا و در صورت نیاز زاویه قرارگیری آن‌ها هم وارد شوند و فرمان‌های هدایت خروجی علاوه بر کنترل فاصله بین عضوهای پیرو و راهبر، تأمین‌کننده فاصله و زاویه مطلوب بین همه عضوهای پیرو نیز باشد. نکته دیگر این است که در کنترل آرایش بیش از دو عضو به صورت آرایش راهبر- پیرو می‌توان بیش از یک عضو را به عنوان راهبر در نظر گرفت. به عبارت دیگر هر عضو، نزدیک‌ترین عضوی را که جلوتر از آن حرکت می‌کند به عنوان راهبر در نظر گرفته و کنترل آرایش به صورت غیرمتمرکز انجام شود.

به منظور ارزیابی توانمندی و نیز حساسیت سنجی الگوریتم ارائه شده، شبیه‌سازی برای شرایط اولیه مختلف (جدول ۱) و در حالت بروز نارسایی انجام و نتایج در شکل‌های ۱۳ تا ۱۹ آورده شده است.

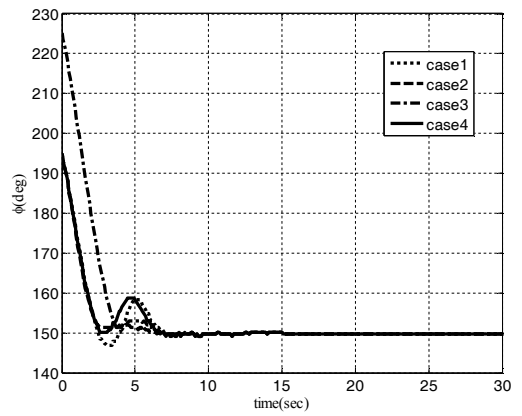
جدول ۱. شرایط اولیه شبیه‌سازی

	$V_{F0}(\frac{m}{s})$	$\rho_0(m)$	$\lambda_0(deg)$
Case ۱	۱	۶۰	۱۵
Case ۲	۴	۵۰	۱۵
Case ۳	۴	۶۰	۴۵
Case ۴	۴	۶۰	۱۵

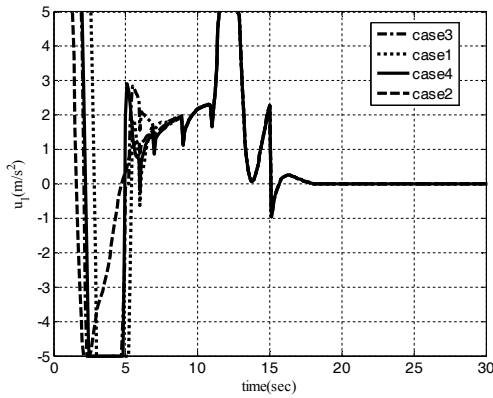
همان طور که نتایج نشان می‌دهد سیستم کنترل طراحی شده نسبت به شرایط اولیه مختلف مقاوم بوده و می‌تواند با شرایط اولیه مختلف، فاصله و آرایش پروازی را به مقادیر مطلوب برساند. همه متغیرها بعد از حدود هفت ثانیه نسبت به



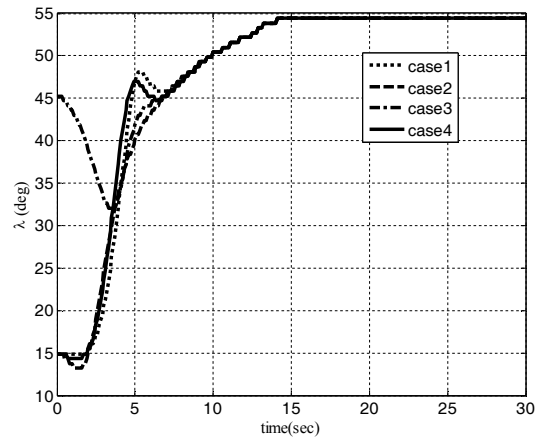
شکل ۱۷. تغییرات سرعت ربات‌های راهبر و پیرو در شرایط اولیه مختلف



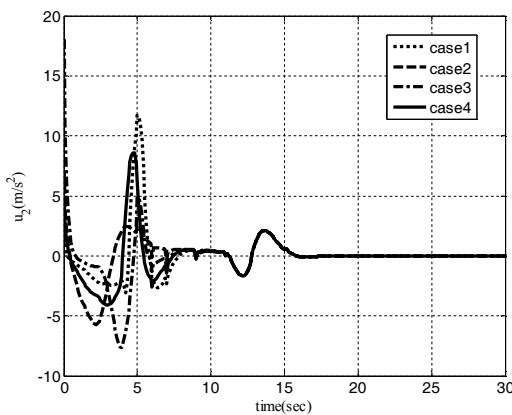
شکل ۱۴. تغییرات زاویه قرارگیری عضو پیرو نسبت به راهبر در شرایط اولیه مختلف



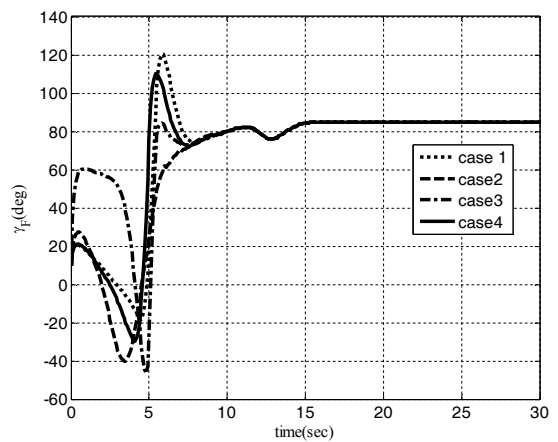
شکل ۱۸. تغییرات ورودی کنترلی اول (شتاب مماسی) در شرایط اولیه مختلف



شکل ۱۵. تغییرات زاویه خط دید (LOS) در شرایط اولیه مختلف



شکل ۱۹. تغییرات ورودی کنترلی دوم (شتاب نرمال) در شرایط اولیه مختلف



شکل ۱۶. تغییرات زاویه مسیر (gamma) عضو پیرو در شرایط اولیه مختلف

را کنترل کرد. همچنین با توجه به توانمندی روش کنترلی MPC و پیش‌بینی متغیرها برای N پله زمانی، با وجود اختلال در ارتباط تصویری بین دو ربات هوایی، باز آرایش راهبر-پیرو کنترل گردیده و نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده عملکرد خوب الگوریتم پیشنهادی است. به منظور ارزیابی توانمندی الگوریتم کنترلی، شبیه‌سازی برای شرایط اولیه مختلف انجام شد و نتایج به دست آمده نشان داد با وجود اینکه عضو پیرو از شرایط اولیه مختلفی شروع به حرکت می‌کند اما الگوریتم کنترلی آن را به فاصله و زاویه مطلوب هدایت می‌کند. هرچه افق زمانی قابل پیش‌بینی (N) دورتر باشد در مدت زمان بیشتری می‌توان با وجود اختلال، آرایش پروازی ربات‌های هوایی را کنترل کرد. تعمیم شیوه ارائه‌شده به بیش از دو ربات و نیز حل مسئله به صورت سه بعدی می‌تواند گام‌های بعدی ادامه این پژوهش باشد.

ربات راهبر با هر شرایط اولیه‌ای که شروع به حرکت می‌کند در حالت پایا وقتی در فاصله و زاویه مطلوب نسبت به عضو راهبر قرار می‌گیرد با توجه به سینماتیک آرایش، باید سرعت و زاویه مسیر آن نسبت به افق (Y) به مقادیر متناظر عضو راهبر همگرا شود. در شکل ۹ نشان داده شد که عضو راهبر به سرعت حدود ۲۳ متر بر ثانیه رسیده است. در شکل ۱۷ نیز مشاهده می‌شود بدون توجه به شرایط اولیه مختلف، سرعت ربات راهبر به ۲۳ متر بر ثانیه همگرا شده است. همچنین شکل ۸ نشان می‌دهد زاویه مسیر عضو راهبر در حالت پایا به ۸۵ درجه رسیده است و همانند سرعت، انتظار می‌رود زاویه مسیر عضو پیرو نیز به این زاویه همگرا شود. شکل ۱۶ نشان می‌دهد فارغ از شرایط اولیه‌ای که عضو پیرو شروع به حرکت کرده است زاویه مسیر آن به ۸۵ درجه همگرا شده است. با این موارد می‌توان صحت کارکرد سیستم کنترل آرایش را مورد تأیید قرار داد.

#### منابع و مراجع

- [1]. Scharf, D.P., Hadaegh, F.Y., and Ploen, S.R., "A survey of spacecraft formation flying guidance and control", American Control Conference, pp.1733-1739, 2003.
- [2]. Linorman, N., and Liu, H., "Formation UAV flight control using virtual structure and motion synchronization", Proceedings of the American Control Conference (ACC), IEEE, pp. 1782-1787, 2008.
- [3]. Zouhair, M., Kolter, Z., Wang, T., and Bower, G., "Camera based localization for autonomous UAV formation flight", AIAA Infotech@Aerospace, pp. 2631- 2643, 2011.
- [4]. Seung-Min Oh and Eric, N.J., "Relative Motion Estimation for Vision-based Formation Flight using Unscented Kalman Filter", Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Volume 5 pp. 5365-5381, 2007.
- [5]. Sattigeri, R., Calise, A.J., and Evers, J.H., "An adaptive vision-based approach to decentralized formation control", AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Providence, RI. pp. 2575-2798, 2004.
- [6]. Vela, P., Betser, A., Malcolm, J., Tannenbaum, A., "Vision-Based Range Regulation of a Leader-Follower Formation", IEEE Transactions on Control Systems

#### پی‌نوشت‌ها

- ۱ Extended Kalman Filter
- ۲ Leader-Follower
- ۳ Azimuth
- ۴ Elevation
- ۵ Subtended
- ۶ Heading angle
- ۷ Line of Sight
- ۸ Decentralized receding horizon controller
- ۹ Model predictive control
- ۱۰ Line of Sight
- ۱۱ Model predictive control
- ۱۲ Receding Horizon Control
- ۱۳ Lender-Mead

#### بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله نشان داده شد اگر تنها فاصله نسبی و زاویه دید بین ربات هوایی راهبر و پیرو با استفاده از پردازش تصویر اندازه‌گیری شود بدون نیاز به ارتباط مخابراتی بین اعضا می‌توان با تخمین سرعت و زاویه مسیر عضو راهبر، فاصله نسبی و زاویه قرارگیری ربات پیرو نسبت به ربات راهبر

- autonomous vehicle formations*", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Volume 16, No. 1, pp. 19-33, 2008.
- [17]. Shin, H.S., and Thak, M.J., "Nonlinear Model Predictive Control for Multiple UAVs Formation Using Passive Sensing", International Journal of Aeronautical & Space Sci., Volume 12, No.1, pp.16-23, 2011.
- [18]. Izadi, H., Brandon, W.G., and Zhang, Y., "Decentralized Model Predictive Control for Cooperative Multiple Vehicles Subject to Communication Loss", International Journal of Aerospace Engineering Volume, 2011.
- [19]. Chung, H., "Autonomous formation flight of helicopters: model predictive control approach", Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, Calif., USA, 2006.
- [20]. Richards, A., and How, J.P., "Implementation of robust decentralized model predictive control", Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, pp.4929-4941, August 2005.
- [21]. Schouwenaars, T., "Decentralized cooperative trajectory planning of multiple aircraft with hard safety guarantees", in Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2004.
- [22]. Kuwata, Y., and How, J.P., "Cooperative distributed robust trajectory optimization using receding horizon MILP", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Volume 19, No. 2, pp.1-9, 2010.
- [23]. STEVENS, B.L., LEWIS, F.L., "AIRCRAFT CONTROL AND SIMULATION", 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc., pp. 72-73, 2003.
- [24]. Gu, D. and Yang, E., "A suboptimal model predictive formation control", in Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE Press, pp. 1295-1300, 2005.
- [25]. Michael Baudin, "Nelder-Mead User's Manual," Consortium Scilab - Digiteo - Michael Baudin, April 2010.
- [26]. John H. Mathews and Kurtis K. Fink, "Numerical Methods Using Matlab, 4th Edition," Prentice-Hall Inc., pp.430-436, 2004.
- Technology, Volume 17, No. 2 , pp. 442 – 448, 2009.
- [7]. Zarchan, P., "Tactical and Strategic Missile Guidance, (Progress in Astronautics and Aeronautics)", 4nd Edition, AIAA, pp. 11-14, 2002.
- [8]. Saghafi, F., KhansariZadeh, S. M., "Vision-Based Trajectory Tracking Controller for Autonomous Close Proximity Operations", IEEE Aerospace Conference, pp. 1-11, 2008.
- [9]. Zhang, X., Xu, R., Kwan, C., Haynes, L., Yang, Y., and Polycarpou, M.M., "Fault tolerant formation flight control of UAVs", Int. J. of Vehicle Autonomous Systems, Volume 2, No. 3-4, pp. 217-235, 2004.
- [10]. Sadraey, M., "Optimal Integrated Guidance and Control Design for Line-of-Sight Based Formation Flight", AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 08 - 11 August, 2011.
- [11]. Izadi, H., Brandon W.G., and Zhang Y., "Hierarchical Decentralized Receding Horizon Control of Multiple Vehicles with Communication Failures", IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS, Volume 49, No.2 APRIL, pp. 744-759, 2013.
- [12]. Wang, Y., Yang, S., Hu, H., Chen, K., Ji, Q., "Relative Navigation Algorithm Based on Robust Filter for UAV Formation Flight", Control Engineering and Communication Technology (ICCECT), International Conference on, pp.249-252, 2012.
- [13]. Weihua, Z. and Hiong T., "Robust Decentralized Formation Flight Control", International Journal of Aerospace Engineering, Volume 2011.
- [14]. Cheng, Z., Necsulescu, D.S., Kim, B. and Sasiadek, J.Z., "Nonlinear control for UAV formation flying", Proceedings of the 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, July 6-11, 2008.
- [15]. Chao, Z., Zhou, S.L., Ming, L., and Zhang, W.G., "UAV Formation Flight Based on Nonlinear Model Predictive Control", Journal of Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering, Volume 2012.
- [16]. Keviczky, T., Borrelli, F., Fregene, K., Godbole, D., and Balas, G. J., "Decentralized receding horizon control and coordination of