

## پیاده سازی سخت افزاری سیستم کنترل یک مکانیزم سه درجه آزادی چهارپره به روش تولید خودکار کد همراه با شبیه سازی سخت افزار در حلقه

عماد نورانیان<sup>۱</sup>، هادی نوبهاری<sup>۲</sup>، علیرضا شریفی<sup>۳</sup>

تهران، خیابان آزادی، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی هوافضا، هسته پژوهشی هدایت و کنترل

### چکیده

در این مقاله، حلقه های کنترل وضعیت یک مکانیزم چهارپره آزمایشگاهی طراحی و با استفاده از ابزار تولید خودکار کد به صورت زمان واقعی پیاده سازی شده است. به این منظور، ابتدا زوایای رول، پیچ و یاو چهارپره با استفاده از سیستم تعیین وضعیت و سمت از طریق طراحی بلوک دیاگرام های مناسب در محیط سیمولینک قرائت شده است. سپس، فرامین کنترلی به منظور اعمال به هر یک از موتورهای چهارپره بر مبنای منطق تناسبی-انتگرالی-مشتقی در محیط سیمولینک طراحی شده است. در گام بعد، تمامی بلوک دیاگرام های شبیه سازی شده در محیط سیمولینک با استفاده از ابزار تولید خودکار کد بر روی سخت افزار مناسب به صورت توکار پیاده سازی شده است.

همچنین عملکرد سخت افزار کنترل کننده با استفاده از شبیه سازی سخت افزار در حلقه بررسی شده است. در شبیه سازی سخت افزار در حلقه، مکانیزم چهارپره آزمایشگاهی به صورت نرم افزاری و کنترل کننده به صورت سخت افزاری در حلقه شبیه سازی قرار داده می شوند. سپس به منظور اعتبارسنجی عملکرد کنترل کننده، نتایج شبیه سازی سخت افزار در حلقه با نتایج شبیه سازی مقایسه شده است. در انتها با نصب سخت افزار کنترل کننده بر روی مکانیزم چهارپره آزمایشگاهی، عملکرد حلقه کنترل وضعیت بررسی شده است.

**واژه های کلیدی:** چهارپره، تولید خودکار کد، کنترل کننده وضعیت، سخت افزار در حلقه، پیاده سازی سخت افزاری، تست آزمایشگاهی

### مقدمه

پرنده های بدون سرنشین از نوع عمودپرواز، قابلیت انجام بسیاری از ماموریت ها از جمله دیده بانی، مداخله در مناطق دشمن، بررسی آلودگی ها، نقشه برداری و غیره را دارند. یکی از انواع پرنده های عمودپرواز، چهارپره است. این وسیله بدون سرنشین، دارای چهار ملخ است که معمولاً برای چرخاندن هر کدام، از یک موتور مجزا استفاده می کند. قابلیت مانورپذیری بالا، مدت زمان کوتاه یادگیری خلبان، سادگی ساخت، کاهش هزینه تعمیر و نگهداری و صدای کم از مزایای این پرنده نسبت به سایر پرنده های بدون سرنشین است.

یکی از عوامل پرواز موفق چهارپره، کنترل وضعیت مناسب است. به منظور دستیابی به یک سیستم کنترل وضعیت شامل کنترل همزمان زوایای رول، پیچ و یاو می توان از یک مکانیزم سه درجه آزادی آزمایشگاهی مطابق با شکل ۱ استفاده کرد. این مکانیزم با محدود کردن هر کدام از زوایا، علاوه بر قابلیت تست سه درجه آزادی، قابلیت تست های یک درجه آزادی زوایای رول، پیچ و یاو را نیز دارد.

بهتر است قبل از تست پروازی با روش های مختلف از عملکرد صحیح سخت افزارهای سیستم در کنار یکدیگر تا حد امکان مطمئن شد.

به این منظور، شبیه سازی سخت افزار در حلقه استفاده می شود. شبیه سازی سخت افزار در حلقه یکی از متداول ترین روش هایی است که به منظور توسعه و تست سیستم های پیچیده به صورت زمان واقعی قبل از تست مدل واقعی استفاده می شود. ایده اصلی شبیه سازی سخت افزار در حلقه به قرار دادن یک یا چند قسمت از زیرسیستم های یک سیستم به صورت سخت افزار واقعی در حلقه شبیه سازی است [۱]. در این صورت، می توان اشکالات موجود در سخت افزار واقعی را تا قبل از زمان تست پروازی یافت و آن را اصلاح کرد.

در گام بعد، به منظور پیاده سازی کنترل کننده بر مکانیزم سه درجه آزادی چهارپره باید کنترل کننده را به زبان C ترجمه کرد. این کار، زمان بر و همراه با اشتباه است؛ اما با استفاده از ابزار تولید خودکار کد، این ترجمه به سرعت و صحیح انجام می شود. از جمله ابزارهای تولید خودکار کد می توان به «نمونه سازی سریع کنترل کننده» اشاره کرد. با استفاده از این ابزار، کنترل کننده در محیط سیمولینک طراحی و شبیه سازی می شود. سپس مدل کنترل کننده موجود در سیمولینک به صورت خودکار به زبان C ترجمه شده و بر روی سخت افزار مشخص پیاده سازی می شود [۲]. در این روش می توان با انجام اصلاحاتی مکرر در پارامترهای کنترل کننده به بهترین عملکرد سیستم کنترل دست یافت.

در سالیان گذشته تحقیقاتی در زمینه پیاده سازی کنترل کننده وضعیت با رویکرد شبیه سازی سخت افزار در حلقه و انجام تست های پروازی با استفاده از ابزار تولید خودکار کد برای یک چهارپره انجام شده است. به منظور اعتبارسنجی سخت افزار کنترل کننده وضعیت یک چهارپره مراجع [۳] و [۴] از شبیه سازی سخت افزار در حلقه استفاده کرده اند. از این رو، ابتدا فرمان کنترلی از سخت افزار واقعی تولید و سپس به مدل نرم افزاری اعمال می شوند. در این مراجع، مدل سازی نرم افزاری چهارپره با فرض دارابودن سنسورهای شتاب سنج، ژيروسکوپ نرخ و مغناطیسی انجام شده است. همچنین در مرجع [۵] شبیه سازی سخت افزار در حلقه به منظور کنترل ارتفاع چهارپره برای پرواز ایستا با استفاده از ابزارهای XPC Target و Real time windows target انجام شده است. مرجع [۶] نیز شبیه سازی خلبان در حلقه را به منظور کنترل کانال های ارتفاع و وضعیت چهارپره انجام داده است. در شبیه سازی خلبان در حلقه، مقادیر مطلوب ارتفاع و زوایای رول، پیچ و یاو توسط خلبان از طریق جوی استیک به سخت افزار کنترل کننده وارد می شود.

همچنین مرجع [۷] با استفاده از داده های کنترل کننده تناسبی-مشتقی، کنترل کننده تطبیقی-عصبی-فازی را در محیط سیمولینک آموزش می دهد. سپس از ابزار تولید خودکار کد به منظور پیاده سازی کنترل کننده ارتفاع و وضعیت چهارپره، که در محیط سیمولینک موجود است، بر روی برد آردوینو استفاده می کند. همچنین مرجع [۸] به پیاده سازی مستقیم مدل کنترل کننده های ارتفاع و وضعیت از نوع گام به عقب (Backstepping) با استفاده از ابزار تولید خودکار کد بر روی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد

۲- استادیار، ۰۲۱۶۶۱۶۴۶۳۶، nobahari@sharif.edu (نویسنده مخاطب)

۳- دانشجوی دکتری، گرایش دینامیک پرواز و کنترل

$$M_z = d(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2) \quad (3)$$

در روابط فوق،  $b$  و  $d$  به ترتیب بیانگر فاکتور تراست و درگ هستند. همچنین  $d_{cg}$  و  $\Omega$  به ترتیب طول هر یک از چهار بازوی پرنده و سرعت زاویه‌ای روتور هستند. علاوه بر گشتاورهای کنترلی، گشتاور خارجی دیگری نیز به نام گشتاور ژيروسکوپی به چهارپره اعمال می‌شود. این گشتاور در جهتی ایجاد می‌شود که محور اسپین با محور دوران ورودی هم‌راستا شود. از این‌رو، در صورت دوران پرنده حول محور  $X_B$  یا  $Y_B$  (حرکت رول یا پیچ)، به دلیل چرخش موتورهای چهارپره حول محور  $Z_B$ ، جهت بردار مومنتوم زاویه‌ای موتورها تغییر کرده و باعث ایجاد گشتاور ژيروسکوپی می‌شود. با فرض ناچیز بودن شتاب زاویه‌ای موتورها، گشتاور ژيروسکوپی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$M_G = I_{rotor} \begin{bmatrix} q \Omega_r \\ -p \Omega_r \\ \dot{\Omega}_r \approx 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

در رابطه فوق،  $\Omega_r$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Omega_r = -\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4 = \sum_{i=1}^4 (-1)^i \Omega_i \quad (5)$$

با توجه به استخراج گشتاورهای کنترلی و ژيروسکوپی، معادلات دینامیکی حرکت سدرجه آزادی چهارپره شامل سه معادله گشتاور رول، پیچ و یاو به صورت زیر حاصل می‌شوند [۱۰]:

$$\dot{p} = \frac{(I_{yy} - I_{zz})qr}{I_{xx}} + \frac{1}{I_{xx}} \left( b d_{cg} (\Omega_2^2 - \Omega_4^2) - q I_{rotor} \sum_{i=1}^4 (-1)^i + 1 \Omega_i \right) \quad (6)$$

$$\dot{q} = \frac{(I_{zz} - I_{xx})rp}{I_{yy}} + \frac{1}{I_{yy}} \left( b d_{cg} (\Omega_1^2 - \Omega_3^2) + p I_{rotor} \sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} \Omega_i \right) \quad (7)$$

$$\dot{r} = \frac{(I_{xx} - I_{yy})pq}{I_{zz}} + \frac{d(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2)}{I_{zz}} \quad (8)$$

در معادلات فوق  $p$ ،  $q$  و  $r$  به ترتیب بیانگر سرعت‌های زاویه‌ای در دستگاه بدنی هستند. همچنین  $I_{xx}$ ،  $I_{yy}$  و  $I_{zz}$  به ترتیب ممان اینرسی پرنده حول محورهای  $X_B$ ،  $Y_B$  و  $Z_B$  در دستگاه مختصات بدنی و  $I_{rotor}$  ممان اینرسی هر روتور حول محورش است. همچنین به منظور دستیابی به زوایای اویلر می‌توان از معادله انتشار اویلر استفاده کرد. پارامترهای چهارپره در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: پارامترهای چهارپره

پارامتر	مقدار	واحد (SI)	علامت
$d_{cg}$	0.27	m	بازوی پرنده
$b$	$3.13 \times 10^{-5}$	kg.m/rad <sup>2</sup>	فاکتور تراست
$d$	$3.2 \times 10^{-6}$	kg.m <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup>	فاکتور درگ
$I_{xx}$	0.02839	kg.m <sup>2</sup>	ممان اینرسی حول محور $X_B$
$I_{yy}$	0.03066	kg.m <sup>2</sup>	ممان اینرسی حول محور $Y_B$
$I_{zz}$	0.0439	kg.m <sup>2</sup>	ممان اینرسی حول محور $Z_B$
$I_{Rotor}$	$8.3 \times 10^{-5}$	kg.m <sup>2</sup>	ممان اینرسی روتور

سخت‌افزار MPC555 پرداخته است. در انتها، مرجع [۹] خلبان خودکاری با استفاده از ابزار تولید خودکار کد به منظور کنترل شش‌درجه آزادی چهارپره ایجاد کرده است.

مسئله مورد بررسی در این مقاله پیاده‌سازی سخت‌افزاری سیستم کنترل یک مکانیزم سدرجه آزادی چهارپره به روش تولید خودکار کد همراه با شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه است. به این منظور، ابتدا زوایای رول، پیچ و یاو چهارپره با استفاده از سیستم تعیین وضعیت و سمت (AHRS) از طریق طراحی بلوک دیاگرام‌های لازم در محیط سیمولینک قرائت می‌شود. سپس فرامین کنترلی به منظور اعمال به هر یک از موتورهای چهارپره بر مبنای منطق تناسبی - مشتقی - انتگرالی در محیط سیمولینک طراحی می‌شود. در گام بعد، رایانه بلوک دیاگرام‌های سیمولینک را به کد C ترجمه می‌کند. سپس کد ترجمه‌شده در سخت‌افزار مناسبی، که قابلیت پشتیبانی توسط نرم‌افزار سیمولینک را دارد، پیاده‌سازی می‌شود. در انتها با نصب این سخت‌افزار به مکانیزم آزمایشگاهی، می‌توان عملکرد حلقه‌های کنترل وضعیت چهارپره را بررسی کرد.

در ادامه ابتدا معادلات دینامیک وضعیت چهارپره مدل‌سازی شده است. سپس حلقه‌های کنترل وضعیت چهارپره طراحی شده است. در گام بعد، نحوه پیاده‌سازی کنترل‌کننده به روش تولید خودکار کد بر روی سخت‌افزار تشریح شده است. پس از پیاده‌سازی کنترل‌کننده، شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه به منظور اعتبارسنجی عملکرد کنترل‌کننده انجام شده است. در نهایت عملکرد کنترل‌کننده با استفاده از تست آزمایشگاهی بررسی شده است.

### مدل‌سازی دینامیک وضعیت چهارپره

به منظور مدل‌سازی دینامیک سدرجه آزادی وضعیت چهارپره، ابتدا باید سیستم‌های مختصات بیان شود. به این منظور از سیستم‌های مختصات اینرسی و بدنی استفاده می‌شود. در سیستم مختصات اینرسی، محور  $X$  به سمت شمال جغرافیایی، محور  $Y$  به سمت شرق و محور  $Z$  به سمت مرکز زمین هستند. همچنین در سیستم مختصات بدنی مطابق شکل ۲، محور  $X$  در جهت روتور شماره ۱، محور  $Y$  در جهت روتور شماره ۴ هستند. همچنین محور  $Z$  با استفاده از قانون دست راست تعیین می‌شود.

پس از معرفی سیستم مختصات، به منظور استخراج معادلات حرکت سدرجه آزادی چهارپره مکانیزم حرکتی چهارپره مطابق با شکل ۱ توصیف می‌شود. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، به دلیل جلوگیری از گشتاور یاو ناشی از چرخش موتورها، موتورهای شماره ۱ و ۳ پادساعت‌گرد و موتورهای شماره ۲ و ۴ ساعت‌گرد می‌چرخند. با چرخش موتورها، نیروی تراست توسط هر روتور در خلاف جهت محور  $Z$  ایجاد می‌شود. از این‌رو، گشتاور رول مثبت با کاهش نیروی تراست موتور شماره ۴ و افزایش نیروی تراست موتور شماره ۲ مطابق با رابطه (۱) ایجاد می‌شود.

به صورت مشابه، گشتاور پیچ مطابق با رابطه (۲) با کاهش نیروی تراست موتور شماره ۳ و افزایش نیروی تراست موتور شماره ۱ ایجاد می‌شود. همچنین گشتاور یاو ناشی از نیروی پسای روتورها با افزایش دور موتورهای شماره ۱ و ۳ و کاهش دور موتورهای شماره ۲ و ۴ مطابق با رابطه (۳) ایجاد می‌شود. بنابراین گشتاورهای کنترلی رول، پیچ و یاو به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$M_x = b d_{cg} (\Omega_2^2 - \Omega_4^2) \quad (1)$$

$$M_y = b d_{cg} (\Omega_1^2 - \Omega_3^2) \quad (2)$$

### طراحی حلقه‌های کنترل وضعیت

به منظور ساده‌سازی طراحی کنترل‌کننده، می‌توان ورودی پرنده را با استفاده از مکانیزم حرکت چهارپره (گشتاورهای رول، پیچ و یاو) تغییر داد. از این رو، متغیرهای ورودی حرکت سه‌درجه‌آزادی چهارپره به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$u_1 = bd_{cg}(\Omega_2^2 - \Omega_4^2) \quad (9)$$

$$u_2 = bd_{cg}(\Omega_1^2 - \Omega_3^2) \quad (10)$$

$$u_3 = d(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2) \quad (11)$$

در روابط فوق،  $u_1$  ورودی تولیدکننده گشتاور رول،  $u_2$  ورودی تولیدکننده گشتاور پیچ و  $u_3$  ورودی تولیدکننده گشتاور یاو هستند. در این صورت، ارتباط بین مجذور سرعت‌زاویه‌ای موتورها  $(\Omega_i^2, i = 1, 2, 3, 4)$  با استفاده از بردار ورودی  $(u_1, u_2, u_3)$  به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\Omega_1^2 = \Omega_{mean}^2 + \frac{1}{2bd_{CG}}u_2 + \frac{1}{4d}u_3 \quad (12)$$

$$\Omega_2^2 = \Omega_{mean}^2 + \frac{1}{2bd_{CG}}u_1 - \frac{1}{4d}u_3 \quad (13)$$

$$\Omega_3^2 = \Omega_{mean}^2 - \frac{1}{2bd_{CG}}u_2 + \frac{1}{4d}u_3 \quad (14)$$

$$\Omega_4^2 = \Omega_{mean}^2 - \frac{1}{2bd_{CG}}u_1 - \frac{1}{4d}u_3 \quad (15)$$

در روابط فوق، پارامتر  $\Omega_{mean}$  بیانگر دور متوسط هر موتور است. بردار ورودی با استفاده از منطق کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) حاصل می‌شود. فرامین کنترل‌کننده، با دریافت زوایای اوپلر از سنسور تعیین وضعیت و سمت چهارپره و محاسبه اختلاف آن با زوایای اوپلر مطلوب مطابق با روابط (۱۷) تا (۱۹) صادر می‌شود. سپس فرامین سرعت‌های زاویه‌ای هر موتور با توجه به روابط (۱۲) تا (۱۵) تعیین می‌شوند.

$$u_1 = I_{xx} \left[ K_{p_\phi} (\phi_d - \phi) + K_{I_\phi} \int (\phi_d - \phi) + K_{I_\phi} (\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) \right] \quad (16)$$

$$u_2 = I_{yy} \left[ K_{p_\theta} (\theta_d - \theta) + K_{I_\theta} \int (\theta_d - \theta) + K_{I_\theta} (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \right] \quad (17)$$

$$u_3 = I_{zz} \left[ K_{p_\psi} (\psi_d - \psi) + K_{I_\psi} \int (\psi_d - \psi) + K_{I_\psi} (\dot{\psi}_d - \dot{\psi}) \right] \quad (18)$$

به منظور انجام شبیه‌سازی حلقه‌های کنترل وضعیت، فرامین سرعت‌های زاویه‌ای هر موتور به دینامیک وضعیت چهارپره ارسال می‌شود. سپس شتاب‌های دورانی در سیستم مختصات بدنی با استفاده از روابط (۶) تا (۸) محاسبه می‌شوند. در انتها، زوایای اوپلر چهارپره با استفاده از معادلات انتشار اوپلر محاسبه می‌شوند. پارامترهای تنظیم‌شده کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی-انتگرالی در مرحله شبیه‌سازی در جدول ۲ نشان داده شده است.

### پیاده‌سازی کنترل‌کننده به روش تولید خودکار کد

تولید خودکار کد به معنای ترجمه یک زبان برنامه‌نویسی به زبان دیگر است. به عنوان نمونه، پروگرام کردن یک میکروکنترلر نوعی تولید خودکار کد است که در آن زبان برنامه‌نویسی سطح بالا به زبان ماشین ترجمه شده و بر روی آن پیاده‌سازی می‌شود. یکی از مهم‌ترین ابزارهای تولید خودکار کد، محیط سیمولینک در نرم‌افزار متلب است. در این محیط، به جای کدنویسی از نمودار بلوکی استفاده می‌شود. درک آسان نحوه ارتباط بین ورودی و خروجی‌ها در هر بلوک مهمترین مزیت نمودار بلوکی است.

همچنین محیط سیمولینک قابلیت تبدیل هر نمودار بلوکی و حتی تمام شبیه‌سازی را به زبان‌هایی مانند C و C++ را دارد. پیاده‌سازی مستقیم مدل سیمولینک بر سخت‌افزار کنترل‌کننده قابلیت جدید محیط سیمولینک به عنوان ابزاری به منظور تولید خودکار کد است.

به منظور انتخاب سخت‌افزارهایی موجود با قابلیت پشتیبانی توسط محیط سیمولینک و نیز پیاده‌سازی حلقه‌های کنترلی چهارپره از سخت‌افزار آردوینو به دلیل طراحی ساده استفاده می‌شود. همچنین سخت‌افزار آردوینو از نوع UNO، با توجه به تعداد مناسب خروجی‌های PWM آن جهت فرمان به موتورهای براشلس و قیمت کمتر به منظور انجام طراحی حلقه‌های کنترل وضعیت چهارپره انتخاب می‌شود. در شکل ۳ تصویر مربوط به سخت‌افزار UNO نشان داده شده است. محیط سیمولینک برای بردهای آردوینو کتابخانه‌ای مجزا دارد که باید جداگانه نصب شود. در این کتابخانه بلوک‌هایی مانند بلوک ارسال و دریافت از طریق پورت سریال، تولید پالس PWM، ورودی سیگنال آنالوگ، ورودی و خروجی سیگنال دیجیتال و ... وجود دارد.

به منظور پیاده‌سازی حلقه‌های کنترل وضعیت با استفاده از ابزار تولید خودکار کد، ابتدا زوایای اوپلر (رول، پیچ و یاو) توسط سنسور تعیین وضعیت و سمت با استفاده از سیمولینک دریافت می‌شود. این سنسور از نوع MHPR-11 (مطابق با شکل ۴) به منظور تعیین اندازه‌گیری زوایای اوپلر چهارپره استفاده می‌شود. سپس با پورت سریال به بلوک کنترل‌کننده ارسال می‌شود. در گام بعد، کنترل‌کننده با محاسبه اختلاف بین زوایای اوپلر دریافتی و مقادیر مطلوب، فرمان کنترلی را به موتورهای چهارپره اعمال می‌کند.

موتورهای چهارپره از نوع براشلس هستند. این موتورها با کاهش چرخه کار تا کمتر از ۱۰٪ خاموش شده و با افزایش آن تا ۶۰٪ به حداکثر دور خود می‌رسد. در محیط سیمولینک و در کتابخانه آردوینو، بلوکی به منظور ایجاد سیگنال PWM موتورها بر روی پین‌های سخت‌افزار با استفاده از ابزار تولید خودکار کد مطابق با شکل ۵ وجود دارد. این بلوک با دریافت یک عدد بین بازه [۰:۲۵۵] سیگنال مورد نظر را تولید می‌کند. عدد صفر متناظر با چرخه کار ۰٪ و عدد ۲۵۵ متناظر با چرخه کار ۱۰۰٪ است. همچنین عدد بین این دو به صورت خطی متناظر با درصدی از چرخه کار است. بنابراین، فرمان چرخه کار باید به موتور اعمال شود. به این منظور، ابتدا متناظر با هر چرخه کار، دور موتور توسط تاکومتر اندازه‌گیری می‌شود. سپس فرمان سرعت‌زاویه‌ای تولید شده توسط کنترل‌کننده به چرخه کار متناظر خود تبدیل می‌شود. در انتها فرمان چرخه کار به موتورها اعمال می‌شود.

### شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه

در شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه (HIL)، پلنت به صورت نرم‌افزاری و کنترل‌کننده به صورت سخت‌افزار در حلقه شبیه‌سازی قرار می‌گیرد. در این صورت می‌توان عملکرد سخت‌افزار کنترل‌کننده چهارپره را با نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزاری مقایسه کرد. به این منظور، مدل سیمولینک کنترل‌کننده با استفاده از ابزار تولید خودکار کد بر سخت‌افزار کنترل‌کننده (برد آردوینو) پیاده‌سازی می‌شود. سپس فرمان کنترلی از برد آردوینو به مدل نرم‌افزاری سیستم سه‌درجه‌آزادی چهارپره به صورت زمان واقعی با استفاده از ابزار زمان واقعی مانند XPC Target در محیط سیمولینک اعمال می‌شود. در این صورت، شرایط برای تست آزمایشگاهی عملکرد سیستم کنترل فراهم می‌شود. شکل ۶ شماتیک شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه چهارپره را نشان می‌دهد.

ناشی از متفاوت بودن پاسخ گذرای سیستم هستند. نتایج حاکی از عملکرد مناسب بخش‌های شبیه‌سازی، سخت‌افزار در حلقه و تست آزمایشگاهی حلقه کنترل زاویه یاو چهارپره هستند.

جدول ۲: پارامترهای تنظیم‌شده کنترل‌کننده تناسبی- مشتقی- انتگرالی

پارامتر	مقدار در مرحله شبیه‌سازی	مقدار در مرحله سخت‌افزار در حلقه	مقدار در مرحله پیاده‌سازی
KP	۰/۱	۰/۵	۱
KI	۰	۰	۰/۶
KD	۰/۰۵	۰/۱	۰/۴

### نتیجه‌گیری

در این مقاله، حلقه‌های کنترل وضعیت یک مکانیزم چهارپره آزمایشگاهی طراحی و به‌صورت زمان واقعی با استفاده از ابزار تولید خودکار کد پیاده‌سازی شد. به این منظور، ابتدا زوایای رول، پیچ و یاو چهارپره با استفاده از سنسور AHRS از طریق طراحی بلوک دیاگرام‌های مناسب در محیط سیمولینک قرائت شد. سپس فرامین کنترلی به‌منظور اعمال به هر یک از موتورهای چهارپره بر مبنای منطق کنترلی تناسبی- مشتقی- انتگرالی- مشتقی در محیط سیمولینک طراحی شد. در گام بعد، تمام مراحل شبیه‌سازی شده در محیط سیمولینک با استفاده از ابزار تولید خودکار کد بر روی سخت‌افزار مناسب به‌صورت توکار پیاده‌سازی شد.

سپس عملکرد سخت‌افزار کنترل‌کننده به روش شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه بررسی شد. در این روش، مکانیزم چهارپره آزمایشگاهی به‌صورت نرم‌افزاری و کنترل‌کننده به‌صورت سخت‌افزاری در حلقه شبیه‌سازی قرار داده شد. نتایج این شبیه‌سازی با نتایج شبیه‌سازی مدل در حلقه مقایسه شد و عملکرد کنترل‌کننده تایید شد. در انتها با نصب سخت‌افزار کنترل‌کننده بر روی مکانیزم چهارپره آزمایشگاهی، عملکرد حلقه‌های کنترل وضعیت با ابزار تولید خودکار کد بررسی شد. نتایج تست آزمایشگاهی، حاکی از کارایی مناسب ابزار تولید خودکار کد به‌منظور کنترل وضعیت چهارپره است.



شکل ۱- نمایی از مکانیزم سه‌درجه آزادی چهارپره.

همانطور که در این شکل قابل مشاهده است، زوایای اویلر از طریق مدل نرم‌افزاری سه‌درجه آزادی چهارپره، که در رایانه میزبان موجود است، به صورت زمان واقعی تولید می‌شود. در گام بعد، پس از ترجمه به زبان C از طریق رایانه هدف به‌وسیله پورت RS232 به سخت‌افزار کنترل‌کننده ارسال می‌شود. در مرحله بعد، سخت‌افزار کنترل‌کننده، که توسط ابزار تولید خودکار کد ایجاد شده است، به‌وسیله پین‌های Rx و Tx به ترتیب زوایای اویلر را دریافت و فرامین کنترلی را ارسال می‌کند.

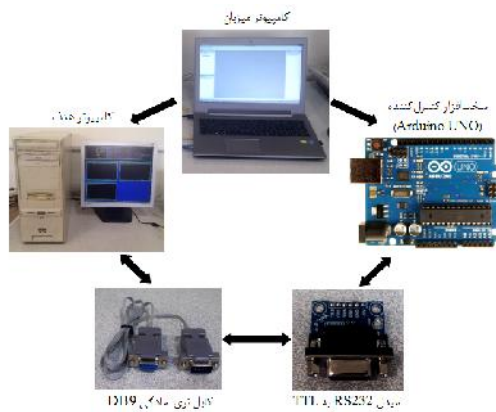
لازم به ذکر است به‌منظور تبدیل پروتکل RS232 به پروتکل آردینو (پروتکل TTL) از ماژول مبدل RS232 به TTL استفاده می‌شود. در پروتکل RS232 ولتاژ +۱۲ ولت، معادل بیت با ارزش صفر و ولتاژ -۱۲ ولت، معادل بیت با ارزش یک است و در پروتکل آردینو (پروتکل TTL) ولتاژهای ۰ و ۵ ولت به ترتیب برابر با بیت‌های صفر و یک هستند. همچنین از کابل DB9 به‌منظور دسترسی آسان‌تر به پورت RS232 استفاده شده است.

نحوه شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه با استفاده از روش تولید خودکار کد در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین پارامترهای تنظیم‌شده کنترل تناسبی- مشتقی- انتگرالی در مرحله سخت‌افزار در حلقه در جدول ۲ نشان داده شده است. شکل ۸، شکل ۹ و شکل ۱۰ به ترتیب زوایای رول، پیچ و یاو مطلوب را با زوایای رول، پیچ و یاو ناشی از سخت‌افزار در حلقه و شبیه‌سازی نرم‌افزاری به‌ازای زاویه مطلوب به‌صورت موج مربعی با فرکانس ۰/۱ هرتز و دامنه ۴۰ درجه و نیز شرط اولیه صفر مقایسه می‌کنند. نتایج شبیه‌سازی حاکی از کارایی مناسب کنترل‌کننده سه‌درجه آزادی چهارپره در شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه و همچنین شبیه‌سازی نرم‌افزاری به‌منظور رسیدن به وضعیت مطلوب است.

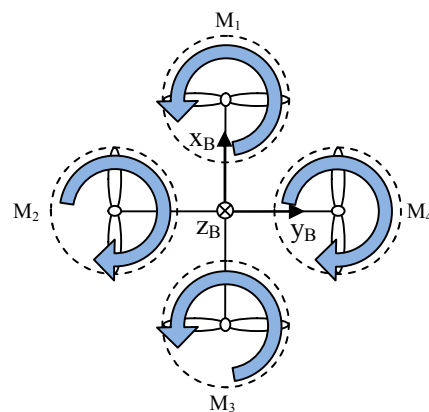
### تست آزمایشگاهی حلقه‌های کنترل وضعیت و اعمال آن بر چهارپره

پس از شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه و اطمینان از صحت پیاده‌سازی کنترل‌کننده بر روی سخت‌افزار، می‌توان کنترل‌کننده را بر چهارپره واقعی اعمال کرد. نمایی از مکانیزم سه‌درجه آزادی چهارپره به‌منظور تست زاویه یاو در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همچنین نحوه تست آزمایشگاهی حلقه کنترل زاویه یاو و اعمال آن بر چهارپره در شکل ۱۲ بیان شده است. به منظور ذخیره‌سازی خروجی‌های سنسور و تحلیل نحوه عملکرد کنترل‌کننده، خروجی سنسور ابتدا به محیط XPC Target ارسال می‌شود. سپس XPC Target داده‌های سنسور را به برد آردینو ارسال می‌کند. برد آردینو نیز فرامین کنترلی را تولید کرده و به موتورهای چهارپره اعمال می‌کند. پارامترهای تنظیم‌شده کنترل تناسبی- مشتقی- انتگرالی در مرحله پیاده‌سازی در جدول ۲ نشان داده شده است.

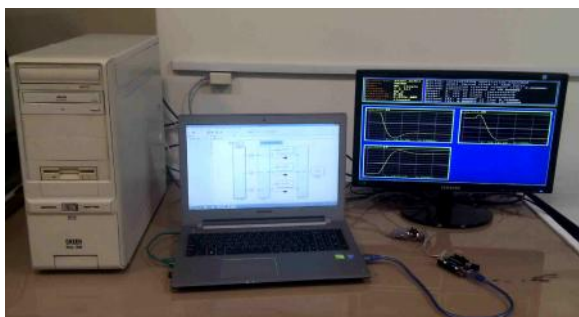
نتایج حاصل از تست آزمایشگاهی حلقه کنترل زاویه یاو به‌ازای زاویه مطلوب به‌صورت موج مربعی با فرکانس ۰/۱ هرتز و دامنه ۴۰ درجه و شرط اولیه صفر در شکل ۱۳ نشان داده شده است. نتایج تست آزمایشگاهی حاکی از عملکرد مناسب کنترل‌کننده زاویه یاو با اعمال به چهارپره است. همچنین شکل ۱۴ به‌صورت موج مربعی با فرکانس ۰/۱ هرتز و دامنه ۴۰ درجه و شرط اولیه صفر، به مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی، سخت‌افزار در حلقه و تست آزمایشگاهی حلقه کنترل زاویه یاو می‌پردازد. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر بحرانی و تاخیر زمانی در بخش پاسخ گذرای سیستم با یکدیگر متفاوت هستند. تاخیر زمانی ارسال فرمان کنترل‌کننده به چهارپره، تاخیر زمانی دریافت زوایای اویلر از سنسور AHRS و دقیق‌نبودن پارامترهای چهارپره در مدل‌سازی از جمله عوامل



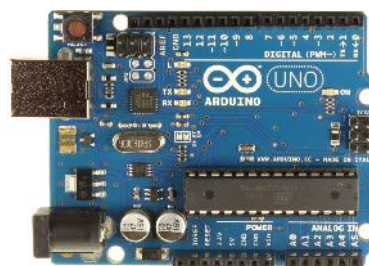
شکل ۶- اجزای شبیه سازی سخت افزار در حلقه.



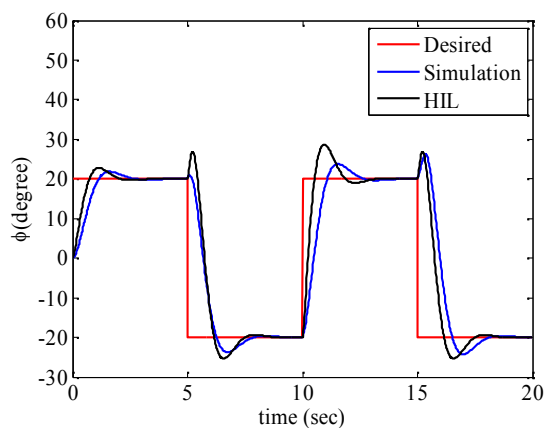
شکل ۲- سیستم مختصات بدنی و جهت چرخش موتورها.



شکل ۷- نحوه شبیه سازی سخت افزار در حلقه.



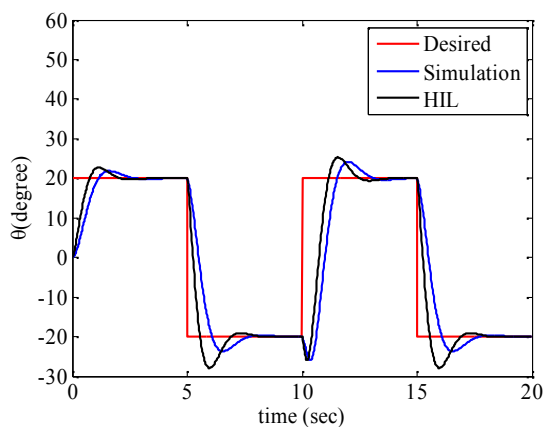
شکل ۳- سخت افزار Arduino UNO



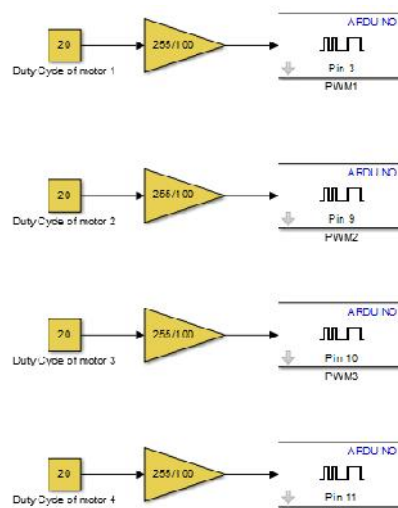
شکل ۸- عملکرد حلقه کنترل زاویه رول در شبیه سازی سخت افزار در حلقه و شبیه سازی نرم افزاری.



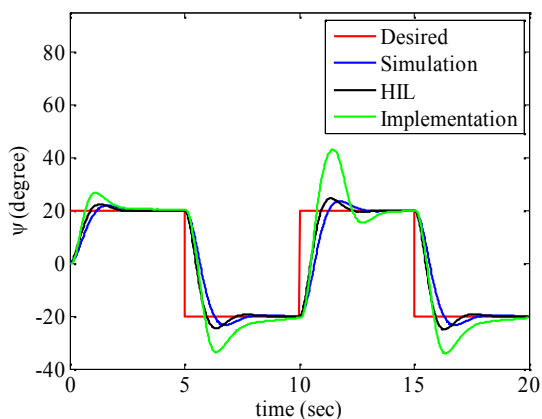
شکل ۴- سنسور تعیین وضعیت و سمت.



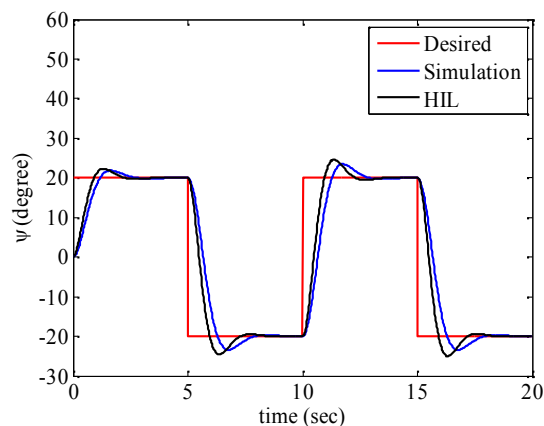
شکل ۹- عملکرد حلقه کنترل زاویه پیچ در شبیه سازی سخت افزار در حلقه و شبیه سازی نرم افزاری.



شکل ۵- مدل سیمولینک به منظور فرمان به موتورها.



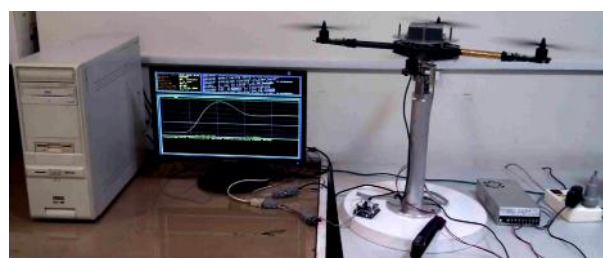
شکل ۱۴- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی، سخت‌افزار در حلقه و تست آزمایشگاهی حلقه کنترل زاویه یاو.



شکل ۱۰- عملکرد حلقه کنترل زاویه یاو در شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه و شبیه‌سازی نرم‌افزاری.

### مراجع

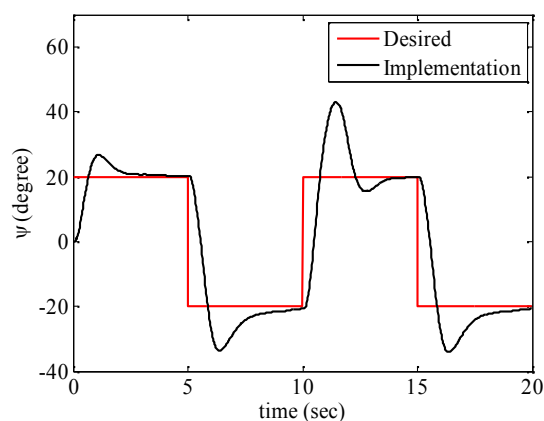
1. Grega, Wojciech. "Hardware-in-the-loop simulation and its application in control education", *Frontiers in Education Conference*, IEEE, FIE'99. 29th Annual. Vol. 2, 1999.
2. Freudenberg, J. S., "Simulink Models for Autocode Generation", *EECS 461*, 2011.
3. Berbra, C., Simon, D., Gentil, S., & Lesecq, S. "Hardware in the loop networked control and diagnosis of a quadrotor drone", *In Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Safeprocess 2009*.
4. Simon, Daniel. "Hardware-in-the-loop test-bed of an Unmanned Aerial Vehicle using Orccad", *6th National Conference on Control Architectures of Robots*, 2011.
5. Bo, Zhao, et al. "Hardware-in-loop simulation testbed for quadrotor aerial vehicles", *Control Conference (CCC)*, 2012 31st Chinese. IEEE, 2012.
6. Dharma Setiawan, Joga, Mochammad Ariyanto, and Agus Mukhtar. "Pilot in the Loop Simulation for Quadrotor Flight Experiment", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 8.4, 2014.
7. Bhatkhande, Pranav S., "Real Time Fuzzy Controller for Quadrotor Stability Control", Master's Thesis, Michigan Technological University, 2014.
8. Kis, Laszlo, Gergely Regula, and Bela Lantos. "Design and hardware-in-the-loop test of the embedded control system of an indoor quadrotor helicopter", *Intelligent Solutions in Embedded Systems*, 2008 International Workshop on. IEEE, 2008.
9. Pollini, Lorenzo, Valeria Parnenzini, and Mario Innocenti. "Distributed Real-Time Hardware- and Man-in-the-loop Simulation for the ICARO II Unmanned Systems Autopilot", *WSEAS International Conference, Proceedings, Recent Advances in Computer Engineering Series*. No. 7. WSEAS, 2012.
۱۰. شریفی، علیرضا؛ طراحی و پیاده‌سازی زمان حقیقی الگوریتم فرود خودکار یک چهارپره با در نظر گرفتن اثر زمین، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی هوافضا، دی‌ماه ۱۳۹۱.



شکل ۱۱- نحوه تست آزمایشگاهی حلقه کنترل زاویه یاو و اعمال آن بر چهارپره.



شکل ۱۲- نمایی از مکانیزم سه‌درجه آزادی چهارپره به‌منظور تست زاویه یاو.



شکل ۱۳- پیاده‌سازی حلقه کنترل زاویه یاو به ازای زاویه مطلوب به‌صورت موج مربعی با استفاده از ابزار تولید خودکار کد.