

مقاله علمی-پژوهشی

شبیه‌سازی و ارزیابی حرکت قایق ربات خودران

حمید عبدالملکی^۱، علی جعفری^{۲*}، حسین موسی‌زاده^۳، علی حاجی‌احمد^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۹

چکیده

با توجه به نیاز بیشتر جمعیت رو به افزایش جهان به مواد غذایی، محققان به دنبال افزایش تولید کمی و کیفی محصولات با گرایش به سمت پایش برخط، کنترل هوشمند تجهیزات و بررسی کیفیت محصولات کشاورزی به‌خصوص در زمینه پرورش آبزیان هستند. در این پژوهش شبیه‌سازی یک قایق خودران مدل انجام شده است تا کنترل این نوع از شناورها را در محیط‌های مختلفی مانند اسکله‌ها، سدها، بنادر، رودخانه‌ها، زیست‌بوم‌های آبی و مزارع پرورش آبزی انجام داده و امکان بررسی و پایش وضعیت زیست‌محیطی، عمق آب و شاخصه‌های مورد نیاز دیگر را فراهم آورد. موقعیت و زاویه حرکت قایق با استفاده از داده‌های GPS و IMU تعیین شده است. مدل سیالاتی و نیرویی قایق به کمک ضرایب هیدرودینامیکی و آئرویدینامیکی ارائه و در محیط متلب به کمک رانگ کوتای کلاسیک (RK4) شبیه‌سازی شده است. برای ارزیابی عملکرد قایق ربات خودران، یک مسیر مستطیل شکل با طول ۲۰ متر در عرض ۱۵ متر در یک استخر انتخاب شد و ۴ گوشه این مستطیل به‌عنوان نقطه مسیر به سامانه ناوبری معرفی گردید. بیشینه خطای موقعیت مکانی عرضی و طولی قایق ربات خودران به ترتیب ۱۳۵ cm و ۱۴۹ cm محاسبه شد. همچنین در آزمون کنترلر PID سرعت پیشروی با سرعت تنظیمی 40 cm s^{-1} میانگین و انحراف معیار به ترتیب 40 cm s^{-1} و 2 cm s^{-1} به‌دست آمد. مسیر حرکت قایق تقریباً بر روی مسیر شبیه‌سازی شده قرار داشت و نتایج به‌دست آمده از دقت خوب این مدل حکایت دارد.

واژه‌های کلیدی: سامانه موقعیت‌یاب جهانی، شبیه‌سازی سیالاتی، قایق ربات خودران، مزرعه پرورش آبزیان، واحد اندازه‌گیری ماند

مقدمه

افزایش کیفیت محصولات و تولید حسگرها و عملگرهای پیشرفته‌تر عنوان کرد.

امروزه با ساخت مزارع پرورش ماهی، به‌عنوان یک منبع غنی غذایی، به دنبال دستیابی به تولید محصول بیشتر، سود بالاتر، افزایش کیفیت و کمیت هستند. در این مزارع میزان املاح مؤثر بر کیفیت آب همچون آمونیوم و نیترات، سطح pH، مقدار اکسیژن محلول در آب، وضعیت دما، کدوری و سنجش سطح آب استخر، از مواردی است که باید مورد مطالعه قرار گرفته شود و با توجه به این مقادیر دستورهای مناسب را به عملگرها (پمپ‌ها، دریچه‌ها و غیره) ارسال کرد. با استفاده از شناورهای سطحی خودران، می‌توان بر شرایط محیطی مزارع پرورش آبزیان نظارت دائمی و دقیقی داشت و پارامترهای مختلف را برای کاهش تلفات و افزایش ظرفیت تولید به‌صورت برخط بررسی کرد. این شناورها به‌طور گسترده‌ای در رشته‌های مختلف علمی همچون هیدروگرافی (Mousazadeh *et al.*, 2017) و در بسیاری از تحقیقات نظامی و رباتیک مورد استفاده قرار می‌گیرند و ناوبری خودران آن‌ها، از نظر علمی و عملی، زوایای نهمفته و جذابی را دارد (Mousazadeh *et al.*, 2018).

پایش کیفیت مزارع پرورش ماهی با استفاده از قایق‌های پارویی مرسوم تک‌نفره انجام می‌شود. در مواردی که بستر رودخانه از عمق پروانه قایق بزرگ‌تر است و گیاهان آبزی در سطح آنجا وجود ندارد استفاده از پروانه در زیر آب روشی مرسوم است. در مواردی که عمق

با توجه به افزایش جمعیت جهان و به‌تبع آن نیاز به تولید بیشتر مواد غذایی، متخصصین و پژوهشگران به دنبال افزایش تولید کمی و کیفی محصولات کشاورزی هستند. یکی از نیازهای این فرآیند، توسعه روش‌های پایش و بررسی کیفیت و سلامت این محصولات است. به همین دلیل در سالیان گذشته در سایه توسعه مکانیزاسیون و اتوماسیون کشاورزی، اکثر خوراکی‌ها و موارد مورد مصرف انسان در محیط‌های کنترل‌شده یا بسته، تولید می‌شوند. دلایل رغبت کشاورزان در این زمینه را می‌توان کاهش هزینه تولید، نیاز به نیروی کار کمتر،

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۲- استاد، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۳- دانشیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۴- استادیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

* - نویسنده مسئول: (Email: Jafarya@ut.ac.ir)

DOI: 10.22067/jam.v11i2.78325

آب دریاچه‌ها، قایقی به نام وکتور (Vector) مربوط به کشور برزیل است (Melo et al., 2019). این قایق ۱۱۰ سانتی‌متری با بدنه V شکل، قابلیت اندازه‌گیری pH، اکسیژن حل شده در آب، دمای آب و محیط و غیره را دارد. یکی از تفاوت‌های این قایق نسبت به مدل‌های قبلی، بنابر اظهار خود پژوهشگران، قابلیت تعیین و خلق مسیر در نقشه با استفاده از موس است. این قایق از هیچ الگوریتم تلفیقی برای بهبود تخمین موقعیت استفاده نکرده و شعاع منطقه هدف را ۵ متر و با نرخ به‌روزرسانی ۱ هرتز در نظر گرفته بود. همچنین از روشی ساده برای تغییر جهت با استفاده از سکانی که درون آب قرار داده شده بود، استفاده می‌کرد.

هدف این مقاله شبیه‌سازی سامانه هدایت و ناوبری یک قایق ربات خودران بر اساس رانگ کوتای درجه چهار برای تهیه نقشه تغییرات شاخص‌های کیفی آب در یک مزرعه پرورش ماهی و ارزیابی آن است. قایق موردنظر دارای موتور هوایی با قدرت کمتر و در نتیجه سرعت کمتری نسبت به نوع آبی آن است. نبود پروانه در زیر آب از درگیری با گیاهان سطح آب و برخورد با آبی‌زی جلوگیری می‌کند. همچنین از به هم خوردن و تلاطم آب در مناطق باتلاقی و کم‌عمق و ایجاد آب گل‌آلود جلوگیری خواهد نمود که امری ضروری برای بررسی مطالعات زیست‌شناسی است.

مواد و روش‌ها

قایق ربات خودران

برای رسیدن به هدف این پژوهش، یک قایق خودران برای نمونه‌برداری و اندازه‌گیری از آب یک استخر پرورش ماهی واقع در شهر کرج، طراحی و ساخته شد (شکل ۱). این قایق ربات خودران همه‌منظوره با ابعاد ۱۱۰ در ۳۷ در ۴۰ سانتی‌متر و با بدنه تریماران قابلیت نصب ابزار و حسگرهای مختلفی را دارد و می‌تواند انتقال و دسترسی برخط و سریع‌تر داده‌های ضروری را ممکن سازد. سامانه رانش و پروانه‌های این قایق از نوع هوایی به کمک موتور برانشلس (Emax 2213 995kv) است که بیشینه سرعت ۱۲۵ سانتی‌متر بر ثانیه را (در سرعت دورانی ۶۸۵۰ دور در ثانیه) فراهم می‌کند و قایق قابلیت رسیدن به شعاع دوران کمتر از ۶۱ سانتی‌متری را نیز دارد. انتقال اطلاعات ضروری و مورد نیاز کاربر به‌صورت برخط با استفاده از اینترنت اشیا، گوشی هوشمند، پیامک و رایانه در قایق میسر است. با توجه به طولانی بودن بحث فیلتر کالمن مورد استفاده برای بهبود دقت موقعیت مکانی به پژوهش صورت گرفته توسط (Goli et al., 2014) رجوع گردد.

آب کم است و در مناطق باتلاق مانند دارای گیاهان سطحی، از قایق‌های پارویی استفاده می‌شود. در مواردی که سرعت باد بیشتر از ۵ متر بر ثانیه باشد هدایت این‌گونه از قایق‌ها به سمت هدف، کاری سخت است (Kaizu et al., 2011).

امروزه انواع مختلف شناورهای سطحی خودران برای اهداف نظامی، جغرافیایی و کشاورزی ساخته شده است و طی سالیان گذشته به سمت خودران شدن پیش رفته است. در اوایل دهه ۱۹۲۰ با استفاده از قطب‌نما برای اندازه‌گیری جهت پیشروی و یک کنترلر PID شناور در مسیر صحیح قرار می‌گرفت. بعد از معرفی سامانه موقعیت‌یاب جهانی در دهه ۱۹۷۰ اطلاعات موقعیت باعث افزایش دقت در کنترلر در یک مسیر پیش‌فرض، گردید (Minorsky, 1922). در پژوهش صورت گرفته توسط (Goli et al., 2014) تلفیق داده‌های سامانه موقعیت‌یاب جهانی (Global Positioning System- GPS) و واحد اندازه‌گیری ماند (Inertial Measurement Unit-IMU) به کمک فیلتر کالمن دقت مناسبی را نسبت به روش‌های دیگر به همراه داشت.

در پژوهشی که توسط (Im and Nguyen, 2017) انجام شد، استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای بررسی و کنترل پهلو گرفتن یک کشتی ۱۰۳ متری در بنادر مختلف بدون بازآموزش، موفقیت‌آمیز گزارش شد. از یک USV دارای RTK-GPS با دقت عمودی بین ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر برای ایجاد نقشه سه‌بعدی یک منطقه ۲۸۰ کیلومترمربعی محل سکونت صدف خوراکی در سواحل آمریکا استفاده گردید (Twichell et al., 2007). یک هواقایق نیمه خودران را برای اندازه‌گیری عمق لایه لجن در یک مرداب با استفاده از DGPS و سونار کنار اسکن استفاده کردند (Singh et al., 2008). در تحقیق دیگری، (Singh et al., 2007) یک هواقایق ربات کوچک حدوداً ۹۰ سانتی‌متری را برای تعیین میزان کیفیت یک رودخانه کوچک در کالیفرنیا آمریکا ساختند. این قایق خودران بوده از GPS و قطب‌نما استفاده می‌کرد و وظیفه برداشت اطلاعات از ۱۰ بویه (Buoy) مختلف را بر عهده داشت. (Li and Weeks, 2009) از یک شناور سطحی خودران برای اندازه‌گیری جریان آب و تحلیل ادی (Eddy) استفاده کردند. (Lee et al., 2010) بعد از شبیه‌سازی یک قایق در متلب و سیمولینک، از داده‌های به‌دست‌آمده برای بررسی صحت عملکرد کنترلرهای PID بر روی قایق خودران ۴ متری استفاده نمودند و نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی را مثبت اعلام کردند. در این قایق با چرخاندن بدنه موتور، جهت‌گیری لازم صورت می‌گرفت. یکی دیگر از پژوهش‌های مربوط به ساخت هواقایق‌ها برای پایش برخط کیفیت

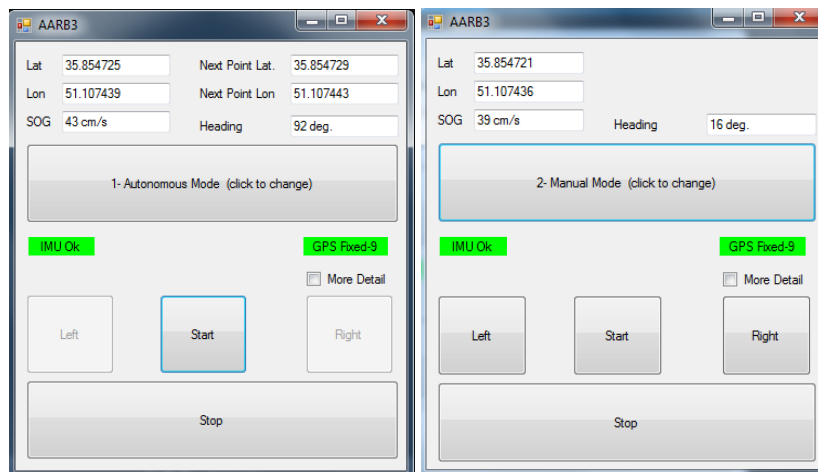


شکل ۱- قایق ربات خودران طراحی شده

Fig.1. The autonomous robotic airboat used in the experiments

ارسال/دریافت داده به/از قایق استفاده شده است. برای راه‌اندازی موتور براساس از یک باتری لیتیوم پلیمر سه سل با ظرفیت ۲۲۰۰ میلی‌آمپرساعت، کنترل سکان از یک موتور سروو مدل ۹۵۵، دریافت اطلاعات موقعیت و سرعت از یک GPS مدل UBlox-M8N با دقت بهتر از ۲/۵ متر (۰.۹۵٪) و فرکانس ۵ هرتز، راستای قایق با دقت ۰/۱ درجه از مازول GY-86 IMU و با کمک فیلتر کالمن استفاده شد و یک دوربین ۲ مگا پیکسلی برای مشاهده وضعیت استخر در جلوی قایق قرار داده شد.

از یک دوربین کوچک در جلوی قایق برای مشاهده محیط اطراف قایق استفاده شد. برد اصلی کنترل عملگرهای قایق، شامل سرعت موتور و زاویه سکان، APM 2.8 بود. برای کنترل از راه دور قایق از حالت دورفرمان با برد ۲ کیلومتر، با گوشی هوشمند با برد ۱۰ متر، با جوی استیک با برد ۱۰ متر و از دفتر کار با برد ۱۵۰۰ متر استفاده گردید. رابط گرافیکی مورد استفاده برای تعیین روش ناوبری، نقطه شروع، زمان شروع حرکت، موقعیت و سرعت قایق ربات خودران در شکل ۲ نشان داده شده و از مازول NRF24L01 برای



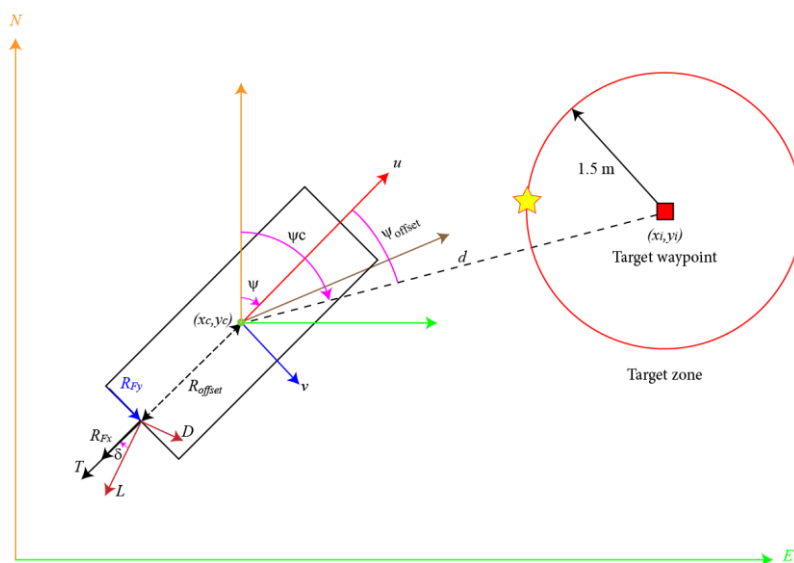
شکل ۲- نرم‌افزار ناوبری قایق ربات با استفاده از رایانه (نوشته شده در نرم‌افزار C#)

Fig.2. The navigation software using C# programming language

تنها سه مولفه، مختصات وسیله در مرکز جرم و جهت‌گیری آن، برای بررسی حرکت این شناور سطحی مورد نیاز است. در شکل ۳ مختصات قایق نشان داده شده است. با استفاده از کنترلرهای PID سرعت قایق و جهت پیشروی در حد مورد نظر نگه داشته می‌شد.

روش‌های کنترل

با توجه به این‌که قایق ربات خودران سرعت کمی دارد و در آب بدون تلاطم و آرام حرکت می‌کند، می‌توان با نادیده گرفتن اثرات موج، معادله حرکت قایق را در صفحه و دوبعدی در نظر گرفت؛ که



شکل ۳- مختصات دوبعدی قایق

Fig.3. 2D position of the autonomous robotic boat

$$\psi_c = \text{atan2}(y_i - y_c, x_i - x_c) \quad (2)$$
 برای تعیین میزان اختلاف بین راستای حرکت قایق و راستای مورد نظر از رابطه (۳) کمک گرفته می‌شود.

بردار حالت قایق شامل ۶ پارامتر است (رابطه ۱).

$$xState_k = [x, y, \psi, u, v, r] \quad (1)$$

با استفاده از رابطه (۲) زاویه بین خط واصل قایق و نقطه مسیر، نسبت به محور شمال، به دست می‌آید.

$$\psi_{offset} = \text{atan2}(\sin(\psi) \cdot \cos(\psi_c) - \cos(\psi) \cdot \sin(\psi_c), \cos(\psi) \cdot \cos(\psi_c) + \sin(\psi) \cdot \sin(\psi_c)) \quad (3)$$

رابطه مولفه‌های سرعت در مختصات بدنه را به مولفه‌های سرعت در مختصات اینرسی تبدیل می‌کند.

$$\dot{x} = u \cdot \cos(\psi) - v \cdot \sin(\psi) \quad (7)$$

$$\dot{y} = v \cdot \cos(\psi) + u \cdot \sin(\psi) \quad (8)$$

برای ساده‌سازی و بر اساس تئوری مونتتم (Escudier, 2018) مقدار تراست موتور بدون جاروبک (براشلس) یا نیروی پیش‌برنده، تابعی است از چگالی هوا، سطح مقطع پروانه و سرعت جریان هوای ایجادشده توسط پروانه (رابطه ۹). تابع این سرعت برحسب سرعت چرخش پروانه، با استفاده از بادسنج به دست می‌آید.

$$T = 2 \cdot \rho \cdot A_p \cdot u_i^2 \quad (9)$$

سرعت هوا بر روی سکان و در جهت طول قایق، از مجموع سرعت جریان هوای عبوری و سرعت قایق (رابطه ۱۰) و سرعت هوا بر روی سکان در جهت عرض قایق، از (رابطه ۱۱) به دست خواهد آمد.

$$u_r = u + u_i \quad (10)$$

$$v_r = v - r \cdot R_{offset} \quad (11)$$

در صورتی که قایق وارد منطقه هدف (دایره‌ای به شعاع ۱/۵ متر به مرکزیت نقطه مسیر) شود الگوریتم حرکت، سراغ نقطه مسیر بعدی خواهد رفت. این فاصله از رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$d = \sqrt{(y_i - y_c)^2 + (x_i - x_c)^2} \quad (4)$$

از کنترلر PID برای کنترل بهینه زاویه سکان استفاده می‌شود و کنترلر باید برای رساندن قایق به نقطه موردنظر (رابطه ۵)، راستای حرکت قایق را تنظیم نماید. محدوده تغییر زاویه سکان بین ۴۵+ درجه و ۴۵- درجه است.

$$dr = P_\psi \cdot \psi_{offset} + D_\psi \cdot (rc - r) \quad (5)$$

سرعت حرکت قایق نیز باید با استفاده از یک کنترلر PID دیگر ثابت نگه داشته شود. بردار ورودی (رابطه ۶)، شامل دو پارامتر میزان تغییر در زاویه سکان و درصد چرخش موتورهای بدون جاروبک است.

$$u_k = [dr, dt] \quad (6)$$

مدل سیالاتی

در ادامه، روابط مورد نیاز برای محاسبه مشتق تمام متغیرهای بردار حالت آورده می‌شود. با مشتق گرفتن از موقعیت، سرعت در جهت x و y به ترتیب از رابطه (۷) و رابطه (۸) به دست می‌آید. این دو

معمولاً به راحتی در برنامه‌های رایانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش از نظر عددی پایدار است.

$$k = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{\psi}, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}] \quad (25)$$

$$k_1 = DD(t_k, x_k, u_k) \quad (26)$$

$$k_2 = DD(t_k + t_{step}/2, x_k + k_1 \cdot t_{step}/2, u_k) \quad (27)$$

$$k_3 = DD(t_k + t_{step}, x_k + k_2 \cdot t_{step}, u_k) \quad (28)$$

$$k_4 = DD(t_k + t_{step}, x_k + k_3 \cdot t_{step}, u_k) \quad (29)$$

$$\phi = (1/6) \cdot (k_1 + 2 \cdot k_2 + 2 \cdot k_3 + k_4) \quad (30)$$

$$xState_{k+1} = xState_k + \phi \cdot t_{step} \quad (31)$$

$$uState_{k+1} = uState_k \quad (32)$$

شبیه‌سازی

با استفاده از نرم‌افزار متلب و محیط دستورنویسی آن، شبیه‌سازی قایق با استفاده از روابط ذکر شده در قسمت قبل صورت پذیرفت و از روش دستی ضرایب کنترلرهای PID تخمین زده شد. با توجه به استخر پرورش مورد نظر واقع در کرج و ابعاد مفید ۲۰ متر در ۱۵ متر، به ترتیب چهار نقطه از شماره ۱ تا ۴ با مختصات (۰، ۰)، (۰، ۰)، (۲۰، ۰)، (۲۰، ۱۵) و (۰، ۱۵) در استخر مشخص شد. هدف قایق ربات خودران رفتن از نقطه شروع به نقطه‌های بعدی است. زمانی که قایق به فاصله ۱/۵ متری نقطه هدف می‌رسد، نقطه بعدی به عنوان هدف معرفی خواهد شد. نقطه تنظیمی سرعت قایق، ۰/۴ متر بر ثانیه و بردار شروع حرکت (بردار صفر) [۰، ۰، ۹۰، ۰، ۰، ۰] در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

مولفه‌های دقت افقی، عمودی و موقعیت (PACC، PACC H، PDOP و V) در طول آزمون نشان‌دهنده دقت بسیار خوب GPS است (شکل ۴). مقدار PDOP همواره زیر عدد ۲ و دقت افقی حدود ۱ متر است. در شکل ۵، مسیر شبیه‌سازی شده و واقعی (داده GPS) حرکت قایق به مدت حدود ۱۸۰ ثانیه، مناطق هدف (دایره توخالی قرمز رنگ)، ۴ نقطه مسیر و محل رسیدن به نقاط هدف در یک استخر به مساحت ۳۰۰ مترمربع نمایش داده شده و ضرایب کنترلرهای PID نیز در جدول ۱ آورده شده است.

زاویه کلی حمله سکان از رابطه (۱۲) و رابطه (۱۳) و مربع سرعت در سکان از رابطه (۱۴) به دست می‌آید.

$$\delta = a \tan(v_r, u_r) \quad (12)$$

$$\delta_R = a \tan(v_r, u_r) + dr \quad (13)$$

$$V_R^2 = u_r^2 + v_r^2 \quad (14)$$

به کمک رابطه (۱۵) و رابطه (۱۶) به ترتیب نیروهای برآ و پسا محاسبه خواهند شد (Escudier, 2018).

$$L = 0.5 \cdot \rho \cdot V_R^2 \cdot A_R \cdot C_{la} \cdot \delta_R \quad (15)$$

$$D = 0.5 \cdot \rho \cdot V_R^2 \cdot A_R \cdot (C_{d0} + C_{da} \cdot \delta_R^2) \quad (16)$$

برای نگاشت نیروها به مختصات بدنه داریم:

$$R_{Fx} = -\cos(\delta) \cdot D + \sin(\delta) \cdot L \quad (17)$$

$$R_{Fy} = -\sin(\delta) \cdot D - \cos(\delta) \cdot L \quad (18)$$

با در نظر گرفتن اصطکاک حاصل از حرکت قایق در آب، مجموع نیروها در راستای محور x از رابطه (۱۹) و در راستای محور y از رابطه (۲۰) به دست می‌آید.

$$F_x = R_{Fx} + T - C_f \cdot u \quad (19)$$

$$F_y = R_{Fy} - C_s \cdot v \quad (20)$$

با استفاده از قانون دوم نیوتون داریم:

$$\dot{u} = r \cdot v + F_x / m \quad (21)$$

$$\dot{v} = -r \cdot u + F_y / m \quad (22)$$

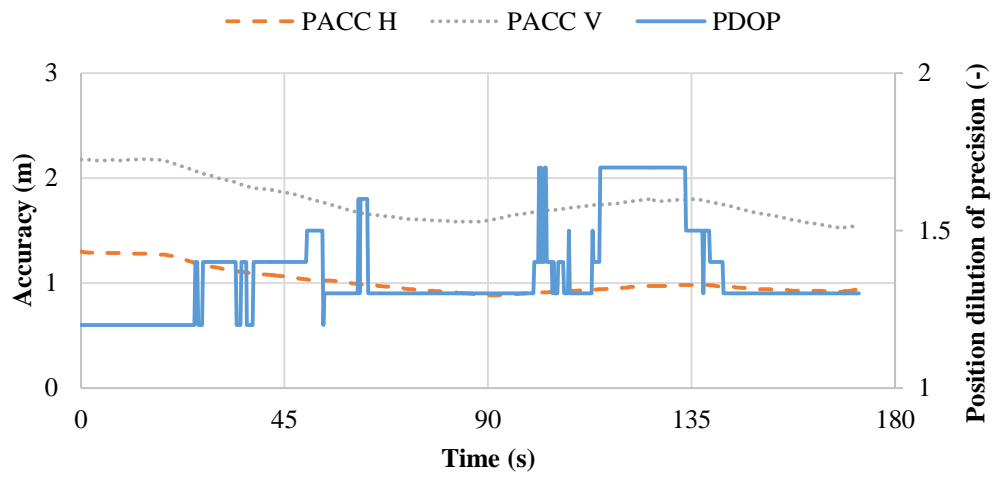
برای محاسبه مشتق دوم سرعت زاویه‌ای (رابطه ۲۴) مومنت وارد شده (رابطه ۲۳) به قایق نیاز است.

$$N = C_r \cdot r - R_{offset} \cdot R_{Fy} \quad (23)$$

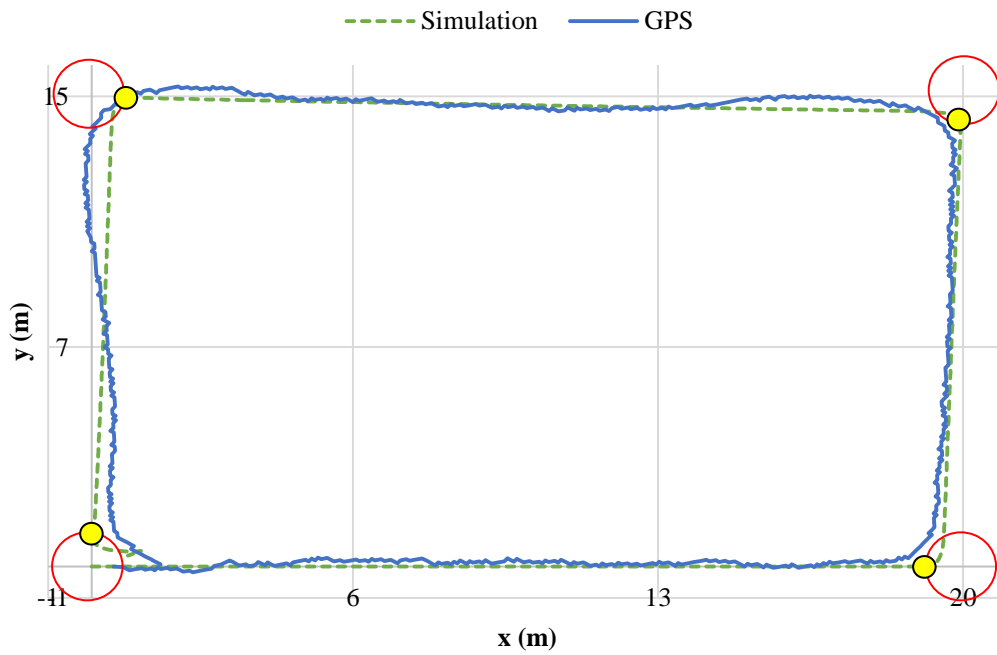
$$\dot{r} = N / I_{zz} \quad (24)$$

رانگ کوتای کلاسیک

یکی از روش‌های مهم و دقیق‌تر نسبت به روش‌های اوپلری یا حتی اوپلری پیشرفته (مانند روش هن) روش رانگ کوتای کلاسیک درجه ۴ است (Kreyszig et al., 2011). در هر گام اجرای این روش ۴ کمیت کمکی (k_1, k_2, k_3, k_4) محاسبه شده سپس مقدار متغیر مورد نظر به دست خواهد آمد (رابطه ۲۵ تا رابطه ۳۲). با توجه به اینکه این روش به هیچ رویه آغاز ویژه‌ای نیاز ندارد، حجم محاسباتی کمی لازم دارد و مکرراً از یک روش مشخص و ساده استفاده می‌کند؛



شکل ۴ - مولفه‌های دقت GPS
Fig.4. GPS accuracy parameters



شکل ۵ - موقعیت قایق ربات خودران
Fig.5. Local location of the boat

جدول ۱ - ضرایب PID

Table 1- PID gains

کنترلر Control parameter	ضریب P K_p	ضریب I K_i	ضریب D K_d
سرعت پیشروی Forward speed	140.54	11.91	0.0003
جهت حرکت Heading	8.1	4.65	0.04

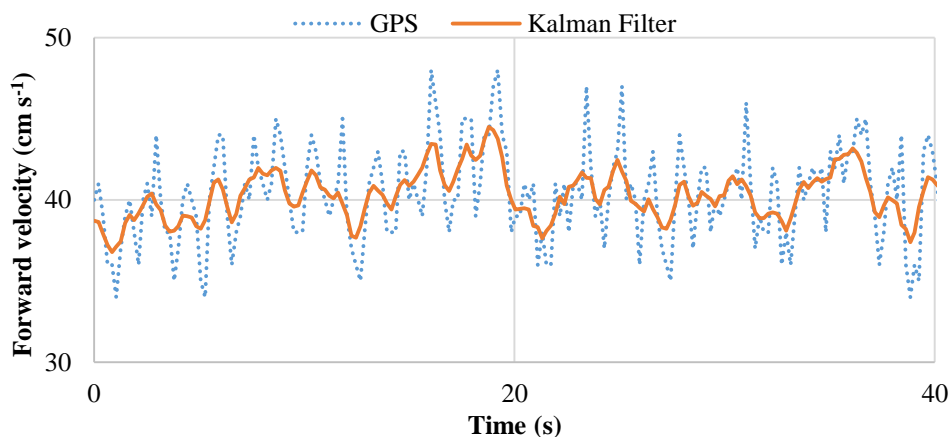
جدول ۲- مقادیر قدرمطلق خطا بین متغیرهای آماری مدل شبیه‌سازی شده و داده‌های واقعی

Table 2- Absolute error of simulation and real data

متغیر Parameter	واحد Unit	بیشترین Maximum
موقعیت طولی Local position (x)	m	1.49
موقعیت عرضی Local position (y)	m	1.35
راستای قایق Heading	°	39
سرعت زاویه‌ای Angular velocity	rad s ⁻¹	2
سرعت پیشروی Forward speed	cm s ⁻¹	3.1

شکل ۶ نمودار سرعت پیشروی برای بررسی عملکرد کنترلر PID سرعت نشان داده شده است. میانگین و انحراف معیار سرعت با استفاده از این کنترلر ۰/۴۰ و ۰/۰۲ متر بر ثانیه محاسبه شد.

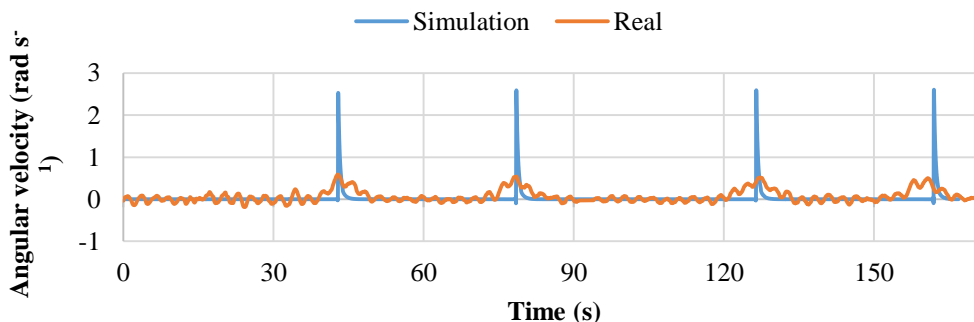
با استفاده از داده‌های به دست آمده از فیلتر کالمن در مورد موقعیت مکانی می‌توان به دقت زیر ۳۵ سانتی‌متر نیز رسید (Goli *et al.*, 2014) که در مقالات بعدی با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته امکان بهبود کیفیت در قایق ربات خودران، بررسی خواهد شد. در



شکل ۶- سرعت پیشروی ۴۰ سانتی‌متر بر ثانیه در آزمون قایق ربات خودران
Fig.6. Performance of forward speed PID controller (40 cm s⁻¹)

باید با تغییر شعاع منطقه هدف و تصحیح ضرایب کنترلر، بیشینه و کمینه سرعت دورانی را لحاظ نمود. در این گونه موارد سرعت میانگین همواره با اختلاف بسیار کمتری برابر با سرعت تنظیمی خواهد بود. با توجه به این که حرکت قایق ربات خودران از نقطه ۱ شروع شده و در مسیر مستقیم حرکت می‌کند، بعد از رسیدن به منطقه هدف دوم، راستای قایق زاویه بیشتری نسبت به مسیر مورد نظر تا نقطه بعدی دارد که باعث افت بیشتر سرعت نسبت به نقاط دیگر می‌شود. حتی با وجود این نقاط، اختلاف حدود ۴ درصدی با نقطه سرعت تنظیمی از عملکرد خوب کنترلر سرعت حکایت دارد. برای غلبه بر این افت سرعت می‌توان از موتورهای بزرگتر استفاده نمود.

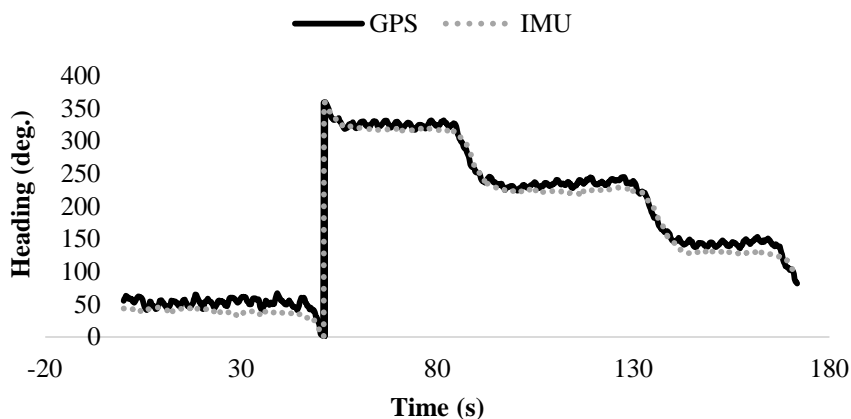
موقعی که قایق به منطقه هدف می‌رسد، سکان قایق بلافاصله عکس‌العمل نشان داده و قایق سرعت زاویه‌ای و جانبی را تجربه می‌کند (شکل ۷). با دوران قایق راستای قایق تغییر کرده، مقداری از سرعت پیشروی قایق کم شده به قدر مطلق سرعت جانبی اضافه شود. کنترلر سرعت برای جبران کاهش سرعت پیشروی دور موتور برافشس را زیاد می‌کند. اگر مقدار تغییر زاویه سکان زیاد باشد، حتی با بیشینه شدن سرعت موتور برافشس، کاهش سرعت پیشروی جبران نخواهد شد. در شکل ۷ می‌توان زمان رسیدن قایق ربات خودران را به ۴ نقطه هدف، با توجه به نقاط "۸" مانند مشاهده نمود. باید توجه داشت تغییرات شدید در سرعت دورانی و جانبی در مواردی که انسان در شناورها وجود ندارد مشکلی را ایجاد نمی‌کند. در غیر این صورت



شکل ۷- سرعت زاویه‌ای آزمون دور کامل
Fig.7. Angular velocity of the boat during the loop test (4 points)

۳۹ درجه است. باید توجه داشت که میانگین اختلاف این خطاها، در آزمون مسیر مستطیلی حدود صفر است. مولفه‌های مختلف سرعت پیشروی نیز در شکل ۹ به نمایش درآمده است. در صورت عدم نیاز به دقت بسیار بالا، داده‌های جهت‌گیری GPS دقت مطلوبی را فراهم خواهند کرد.

بیشترین اختلاف بین زاویه به‌دست‌آمده از فیلتر کالمن و زاویه دریافتی از GPS، ۱۱ درجه است (شکل ۸) که این مقدار با توجه به دقت ۰/۳ درجه ای زاویه به‌دست آمده از GPS، نشانگر وجود زاویه لغزش جانبی در حرکت قایق و مقداری خطا در داده‌های GPS در لحظه موردنظر است. همچنین بیشترین مقدار اختلاف بین زاویه به‌دست‌آمده از فیلتر کالمن و زاویه محاسبه شده از روش شبیه‌سازی



شکل ۸- زاویه حرکت در آزمون مسیر مستطیلی
Fig.8. Heading of the boat during the loop test

ساخته شده می‌توان به‌طور مطمئن در مزارع پرورش ماهی برای کنترل و پایش شرایط زیست‌محیطی و کیفیت آب استفاده نمود.

سپاسگزاری

از همکاری جناب آقای دکتر علیمردانی عضو محترم هیئت‌علمی دانشگاه تهران کمال تشکر و سپاس را داریم. همچنین از داوران محترمی که با ارائه نظرات خود در بهبود کیفیت مقاله و رفع مشکلات آن ما را یاری دادند، متشکریم.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش شبیه‌سازی حرکت یک قایق ربات خودران خورشیدی انجام شد و با استفاده از یک قایق مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. از بین متغیرهای موقعیت طولی، موقعیت عرضی، زمان رسیدن به منطقه هدف، سرعت زاویه‌ای، راستای قایق و سرعت پیشروی؛ کمترین و بیشترین درصد خطای بیشینه به‌ترتیب مربوط به متغیرهای سرعت پیشروی و سرعت زاویه‌ای است. این اعداد از عملکرد خوب و مناسب مدل شبیه‌سازی شده و کنترلرهای PID حکایت دارد. از قایق

Symbol	متغیر	Parameter	Value	Unit/Remarks
ρ	چگالی هوا	Air density	1.225	kg m ⁻³
ψ	زاویه حرکت	Heading	-	deg.
δ	زاویه حمله سکان	Rudder angle of attack	-	deg.
ϕ	ضریب	Constant	-	-
ψ_c	زاویه بین خط واصل قایق و نقطه مسیر	Angle between target waypoint and boat	-	deg.
ψ_{offset}	اختلاف راستای قایق و خط واصل	Angle between target waypoint and boat	-	deg.
δ_R	زاویه حمله کلی سکان	Total Rudder angle of attack	-	deg.
A_p	مساحت پروانه	Propeller area	0.05	m ²
A_R	مساحت سکان	Rudder are	0.03	m ²
b	طول قایق	Boat length	1.1	m
C_{d0}	ضریب درگ	Drag coefficient	0.3	-
C_{da}	ضریب لیفت	Lift coefficient	5.7	-
C_f	ضریب جلو	Forward coefficient	0.2	-
C_{la}	ضریب صفر درگ	Zero drag coefficient	0.005	-
C_r	ضریب دوران	Rotational coefficient	0.0075	-
C_s	ضریب کناری	Side coefficient	0.26	-
D	نیروی پسا	Drag	-	N
d	شعاع دایره منطقه هدف	Radius of target zone (circle)	1	m
D_ψ	ضریب D کنترلر سکان	D term value of Rudder PID controller	-	-
d_{prop}	قطر پروانه	Propeller Diameter	10	in
dr	زاویه سکان	Rudder angle	-	deg.
dt	درصد سرعت موتور برآشلس	Percentage of throttle	-	%
F_x	نیروی طولی اعمالی به قایق	Longitudinal force of boat	-	N
F_y	نیروی عرضی اعمالی به قایق	Lateral force of boat	-	N
I_{zz}	ممان اینرسی قطبی	Moment of Inertia	-	m ⁴
k_{1-4}	ضرایب رانگ کوتاه	RK coefficient	-	-
L	نیروی برآ	Lift	-	N
m	جرم قایق	Boat mas	5	kg
N	گشتاور وارده به قایق	Exerted moment to boat	-	Nm
P_ψ	ضریب P کنترلر سکان	P term value of Rudder PID controller	-	-
P_{prop}	پیچ پروانه	Propeller Pitch	4.5	in
r	سرعت زاویه‌ای	Angular velocity	-	deg s ⁻¹
rc	سرعت زاویه‌ای موردنظر	Desired angular velocity	-	deg s ⁻¹
R_{Fx}	نیروی طولی اعمالی به سکان	Longitudinal force in ruuder	-	N
R_{Fy}	نیروی عرضی اعمالی به سکان	Lateral force in ruuder	-	N
R_{offset}	فاصله سکان تا مرکز جرم	Offset between rudder and CG	0.185	m
T	تراست	Thrust	-	N
t_k	زمان	Time	-	s
t_{step}	گام زمانی	Step time	-	s
u	سرعت طولی	Longitudinal speed	-	m s ⁻¹
u_i	سرعت هوای ایجادشده	Air velocity	-	m s ⁻¹
u_k	بردار ورودی	Input vector	-	-
u_r	سرعت طولی در روی سکان	Longitudinal component of Air velocity	-	m s ⁻¹
v	سرعت عرضی	Lateral velocity	-	m s ⁻¹
v_r	سرعت عرضی هوا در روی سکان	Lateral component of Air velocity	-	m s ⁻¹
V_R	سرعت کلی هوا در روی سکان	Air velocity on rudder	-	m s ⁻¹
VE	مولفه سرعت در جهت شرق	East component of velocity	-	m s ⁻¹
VN	مولفه سرعت در جهت شمال	North component of velocity	-	m s ⁻¹
VX	مولفه x سرعت	x component of velocity	-	m s ⁻¹
VY	مولفه y سرعت	y component of velocity	-	m s ⁻¹
w	عرض قایق	Boat width	0.37	m
x	موقعیت طولی	Local position (x)	-	m
x_c	موقعیت طولی فعلی	Current local position (x)	-	m
x_i	موقعیت طولی نقطه مسیر	Local position (x)of way point	-	m
$xState_k$	بردار حالت در زمان k	State vector at time k	-	-
y	موقعیت عرضی	Local position (y)	-	m
y_c	موقعیت عرضی فعلی	Current local position (y)	-	m
y_i	موقعیت عرضی نقطه مسیر	Local position (y) of way point	-	m

References

1. Escudier, M. 2018. Introduction to engineering fluid mechanics, Oxford University Press, Oxford.
2. Goli, H., S. Minaee, A. Jafari, A. Keyhani, A. Hajiahmad, H. Abdolmaleki, and A. Mohammad Borghaee. 2014. Comparison of four different methods for agricultural positioning using GPS and IMU. *Journal of Agricultural Machinery* 4 (2): 285-95. (In Farsi).
3. Im, N. K., and V. S. Nguyen. 2017. Artificial neural network controller for automatic ship berthing using head-up coordinate system. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*.
4. Kaizu, Y., M. Iio, H. Yamada, and N. Noguchi. 2011. Development of unmanned airboat for water-quality mapping. *Biosystems Engineering* 109 (4): 338-47.
5. Kreyszig, E., H. Kreyszig, and E. J. Norminton. 2011. *Advanced engineering mathematics*, Wiley, [Hoboken, NJ].
6. Lee, S. D., C. H. Yu, K. Y. Hsiu, Y. F. Hsieh, C. Y. Tzeng, and Y. Z. Kehr. 2010. Design and experiment of a small boat track-keeping autopilot. *Ocean Engineering* 37 (2): 208-17.
7. Li, C. Y., and E. Weeks. 2009. Measurements of a small scale eddy at a tidal inlet using an unmanned automated boat. *Journal of Marine Systems* 75 1-2: 150-62.
8. Melo, M., F. Mota, V. Albuquerque, and A. Alexandria. 2019. Development of a Robotic Airboat for Online Water Quality Monitoring in Lakes. *Robotics* 8 1: 19.
9. Minorsky, N. 1922. Directional Stability of Automatically Steered Bodies. *Journal of the American Society for Naval Engineers* 34 (2): 280-309.
10. Mousazadeh, H., H. Jafarbiglu, H. Abdolmaleki, E. Omrani, F. Monhaseri, M. R. Abdollahzadeh, A. Mohammadi-Aghdam, A. Kiapei, Y. Salmani-Zakaria, and A. Makhsoos. 2018. Developing a navigation, guidance and obstacle avoidance algorithm for an Unmanned Surface Vehicle (USV) by algorithms fusion. *Ocean Engineering* 159: 56-65.
11. Mousazadeh, H., H. Jafarbiglu, E. Omrani, F. Monhaseri, A. Kiapei, Y. Salmani-Zakaria, and A. Makhsoos. 2017. Experimental evaluation of a hydrography surface vehicle in four navigation modes. *Journal of Ocean Engineering and Science* 2 (2): 127-36.
12. Singh, A., M. J. Stealey, V. Chen, W. J. Kaiser, M. Batalin, Y. Lam, B. Zhang, A. Dhariwal, C. Oberg, A. Pereira, G. S. Sukhatme, B. Stauffer, Moorthi Stefanie, D. Caron, and M. Hansen. 2007. Human assisted robotic team campaigns for aquatic monitoring. *Journal of Field Robotics* 24 11-12: 969-89.
13. Singh, K., J. Worley, and M. Risse. 2008. Sludge Measurement Using Global Positioning System (GPS) Enabled Sonar Equipped Airboat in a Lagoon. *Applied Engineering in Agriculture* 24 (5): 603-09.
14. Twichell, D. C., B. D. Andrews, H. L. Edmiston, and W. R. Stevenson. 2007. Geophysical mapping of oyster habitats in a shallow estuary; Apalachicola Bay, Florida, Apalachicola Bay, Florida. U.S. Geological Survey Open-File Report.

Simulation, Development and Evaluation of an Autonomous Robotic Boat Used in Aquacultures

H. Abdolmaleki¹, A. Jafari^{2*}, H. Mousazadeh³, A. Hajiahmad⁴

Received: 14-02-2019

Accepted: 19-06-2019

Introduction

As the world population grows up, the quantity and quality of human food must be improved. The production yield of marine aquaculture and farming of aquatic organisms, as a valuable source of food, will be increased. Regular and online monitoring of the physical, chemical, and biological qualities of water and environmental parameters in such these controlled environments can be achieved by using advanced world technologies, such as autonomous boats. In this study, simulation of an autonomous boat has been done to help better understanding and control of this type of vessel in various environments such as dams, ports, rivers, aquatic ecosystems, and aquaculture. Hence, the main goal of this paper is to simulate and evaluate the guidance and navigation system of an autonomous boat based on the Fourth order of Runge-Kutta for determining the changes of water quality indices in a fish farming ponds.

Materials and Methods

In order to achieve the main goal of this study, an autonomous boat was designed and built. This boat as a general-purpose robotic trimaran boat has dimensions of 110 cm x 37 cm x 40 cm and is made of Plexiglas 2 mm thick. Maximum forward speed of the boat is 125 cm s⁻¹ (at 6850 rpm of brushless motors) and the turning radius is less than 61 cm. The environmental data can be transferred using Internet of Things (IOT), smartphones, SMS, and mini PC. The position and heading of the boat are determined using GPS and IMU data. The hydrodynamic and aerodynamic forces, moments, and coefficients of the boat model are determined and then applied in the mathematical simulation as the input of classic Runge-Kutta (RK4). The performance of the robotic boat navigational and control systems evaluated in a rectangular track with a length of 20 m and a width of 15 m in a fish farming pond in Karaj and 4 waypoints. The local coordinates of four corner of the mentioned rectangular in the pond was (0, 0), (0, 20), (15, 20), and (15, 0). The purpose of control system was to conduct the actuators in such way that boat be able to go to the next point. When the boat reaches the target distance of one m of the desired point, the next point will be introduced as a new target. The set point of boat speed was 0.4 m s⁻¹ and zero state vector was [0, 0, 0, 0, 0, 0].

Results and Discussion

The maximum error of position and heading of the autonomous boat is 135 cm and 11 degrees, respectively. Also, in the speed PID controller test (40 cm s⁻¹), the average and standard deviation of the speed calculated as 40 cm s⁻¹ and 2 cm s⁻¹, respectively. Maximum difference between the heading obtained from the Kalman filter and received from the GPS is 11 degrees. In some situations that high precision of heading angle is not required, the GPS data can provide such accuracy of the heading. Among the variables of longitudinal, latitude, time to reach the target area, yaw rate, heading, and forward speed the minimum and maximum of percentage error are related to forward speed and yaw rate, respectively. These values show good performance of the simulated model and PID controllers.

Conclusions

In this study, motion simulation and evaluation of a robotic boat was carried out using a model boat and MATLAB software. The mathematical model simulated the real boat behavior correctly and the boat can be used safely in fish farming ponds to monitor environmental conditions and water quality.

Keywords: Aquaculture farm, Autonomous robotic boat, Fluid simulation, GPS, IMU

1- PhD. Student of Mechanical Engineering of Biosystems, University of Tehran

2- Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, University of Tehran

3- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, University of Tehran

4- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, University of Tehran

(*- Corresponding Author Email: Jafarya@ut.ac.ir)

