

## مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1403.10.1.6.8

درصد همانندی: ۱٪

## کنترل حرکت یک شناور بدون سرنشین بادبانی در معرض اغتشاشات و جریانات سطحی بر اساس الگوریتم تلفیقی خطی سازی فیدبک بهینه

محمدرضا جلیلی<sup>۱</sup>، احمدرضا ولی<sup>۲</sup>، محمدعلی علیرضاپوری<sup>۳</sup>، حسین نورمحمدی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترای برق کنترل، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران. mohammadreza2833@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران. arvali@mut.ac.ir

<sup>۳</sup> نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران. maa\_pouri@mut.ac.ir

<sup>۴</sup> استادیار، پژوهشکده علوم و فناوری شمال، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران. hnoormohammadi@mut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵

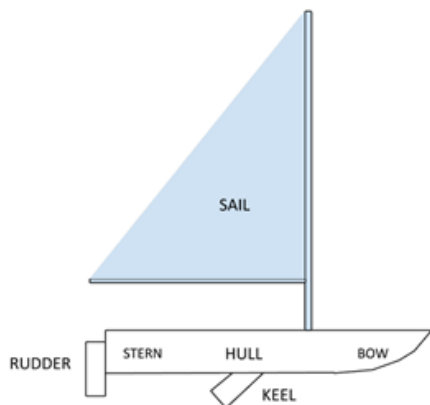
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

## چکیده

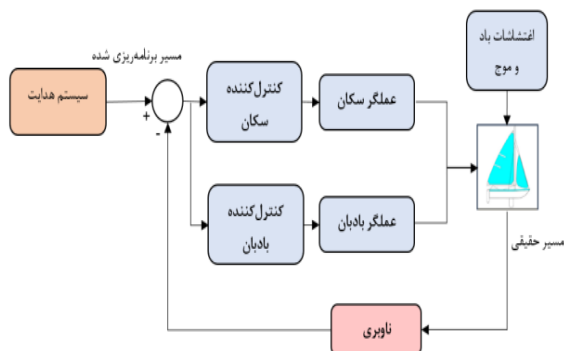
در این مقاله، طراحی کنترل کننده سمت و سرعت یک قایق بادبانی بدون سرنشین بررسی می شود که از نیروی باد طبیعی، به طور مؤثر جهت پیمایش مسیر در دریا استفاده می کند. در این پژوهش با توجه به معادلات غیرخطی حاکم بر دینامیک قایق بادبانی و اعمال اغتشاشات ناشی از جریان های آبی در معادلات دینامیک، از دو کنترل کننده مجزا برای کنترل سمت و سرعت قایق بادبانی در حضور اغتشاشات، استفاده شده است. در روش پیشنهادی، برای تعقیب زاویه سمت مطلوب از کنترل فیدبک خطی ساز ورودی خروجی و برای کنترل سرعت، از یک کنترل کننده ابتکاری بهینه با هدف کنترل زاویه بادبان، جهت بیشینه نمودن سرعت، استفاده شده است. در روش خطی سازی فیدبک، با حذف جمله های غیرخطی، سیستم خطی شده و سپس کنترل کننده سمت مناسب، به گونه ای طراحی می شود که خروجی، ورودی مطلوب را ردیابی کند. با طراحی کنترل کننده زاویه بادبان، سرعت بیشینه، متناسب با سمت و سرعت حقیقی باد، به دست خواهد آمد. نتایج شبیه سازی با روش کنترل PID مقایسه و مشاهده شد که روش کنترل فیدبک خطی ساز بهینه، سمت مرجع را در یک بازه زمانی کوتاه تری (حدود ۲۰ ثانیه) در برخی سمت های مرجع، دنبال نموده است و در کنترل سرعت شناور، به صورت میانگین، حدود ۲۰ درصد افزایش سرعت، نسبت به روش کنترل PID حاصل شده است.

واژه های کلیدی: قایق بادبانی بدون سرنشین، زاویه بادبان، زاویه سکان، خطی سازی فیدبک



شکل ۱. اجزای قایق بادبانی خودران

زیرسامانه هدایت، کنترل و ناوبری، همچنان که در شکل ۲ دیده می‌شود، مشتمل بر سه بخش هدایت، ناوبری و کنترل است و در این پژوهش بر بخش کنترل تمرکز می‌شود.



شکل ۲. زیرسامانه هدایت، ناوبری و کنترل در قایق بادبانی خودران

در بخش کنترل، بر اساس مسیر یا فرامین طراحی شده در بلوک هدایت و همچنین با استفاده از متغیرهای حالت تخمین زده شده در بلوک ناوبری، سیگنال کنترلی مناسبی برای عملگرهای شناور تعیین و ارسال می‌شود و از این طریق، نیروها و گشتاورهای مناسب برای حرکت مطلوب شناور تولید می‌شود. در قایق‌های بادبانی بدون سرنشین، سیستم کنترلی شامل دو ورودی کنترلی زاویه سکان<sup>۴</sup> و زاویه بادبان<sup>۵</sup> است. حرکت مناسب قایق با تنظیم هم‌زمان این دو زاویه، به‌طور کامل قابل اجرا است. شایان‌ذکر است، دینامیک‌های قایق بادبانی یک سیستم چندورودی-چندخروجی<sup>۶</sup> را تشکیل می‌دهند. همچنین، معمولاً زاویه سکان و زاویه بادبان به‌طور مستقل از یکدیگر کنترل می‌شوند. پژوهش‌های متعددی در زمینه کنترل این قایق‌ها انجام شده که در ادامه به مرور آن‌ها پرداخته خواهد شد.

## ۱. مقدمه

اقیانوس‌ها تقریباً ۷۰ درصد از سطح زمین را پوشانده‌اند؛ اما تاکنون تنها حدود ۵ درصد یا کمتر از آن کاوش شده است. این موضوع، به‌وضوح ضرورت و اهمیت پژوهش در حوزه توسعه ربات‌های دریایی را نشان می‌دهد. شناورهای بدون سرنشین سطحی که با نام خودران<sup>۱</sup> نیز شناخته می‌شوند، ربات‌هایی هستند که بدون مداخله انسان، روی سطح آب قادر به انجام مأموریت‌های از پیش تعریف شده، خواهند بود. از مهم‌ترین کاربردهای این شناورها می‌توان به کاوش اقیانوس، پایش منابع انرژی، حمل‌ونقل، عملیات نظامی و همچنین تحقیق و توسعه اشاره کرد [۱]. به‌طورکلی، شناورهای سطحی خودران را می‌توان بر اساس اندازه، بدنه، منبع پیشرانش و پیکره‌بندی کنترل دسته‌بندی کرد. بر اساس منبع پیشرانش، دودسته شناور به شرح زیر وجود دارند.

- شناورهای معمولی که در آن‌ها از موتورهای الکتریکی یا پیشرانه‌های احتراقی استفاده می‌شود.
- قایق‌های بادبانی<sup>۲</sup> که در آن‌ها از باد به‌عنوان منبع پیشرانش استفاده می‌شود. بدیهی است که مصرف انرژی در این قایق‌ها نسبت به شناورهای معمولی به‌مراتب کمتر است [۲].

در پژوهش حاضر، بر قایق‌های بادبانی خودران تمرکز می‌شود که نمونه‌ای از آن در شکل ۱ نشان داده شده است. این شناور بدون سرنشین، از نظر انرژی، خودکفا بوده و پیشرانش آن از طریق باد تأمین می‌شود. همچنین، کنترل آن به‌صورت خودکار و بدون کنترل از راه دور انجام می‌گیرد.

زیرسامانه هدایت، ناوبری و کنترل<sup>۳</sup> یکی از بخش‌های اصلی در انواع رونده‌های بدون سرنشین از جمله قایق‌های بادبانی خودران است که نقشی تعیین‌کننده در مدیریت حرکت و مأموریت آن‌ها بر عهده خواهد داشت. به‌عبارت‌دیگر، بدون زیرسامانه هدایت، ناوبری و کنترل، شناور قادر به دنبال کردن مسیرهای از پیش برنامه‌ریزی شده نخواهد بود و متعاقباً، انجام مأموریت موردنظر محقق نمی‌شود.

دینامیکی برای سیستم‌های غیرخطی در فرم بازخورد صریح<sup>۱۰</sup> پیشنهاد کرده‌اند [۱۱]. در این تحقیق مشخص شد که روش سنتی بازگشت به عقب به دلیل مشکل حل معادلات جبری غیرخطی با محدودیت‌هایی مواجه خواهد شد. در روش پیشنهادی با افزودن کنترل‌کننده‌های مجازی به عنوان حالت‌ها در هر مرحله از فرایند بازگشتی معادله جبری به‌طور مستقیم و به شیوه‌ای دینامیکی حل می‌شود. ژانگ و همکاران، دو موضوع هدایت هوشمند و کنترل‌کننده عصبی - تطبیقی در قایق بادبانی را بررسی کردند [۱۲]. در ادامه مجدد ژانگ و همکاران، مسئله کنترل قایق بادبانی بدون سرنشین با هدف دستیابی به کنترل دقیق سرعت و مقابله با محدودیت‌های ناشی از اغتشاشات محیطی ناشناخته و عدم قطعیت‌های مدل را بررسی کردند [۱۳]. ینگجی و همکاران، ابتدا یک مدل ریاضی مشخص با چهار درجه آزادی برای طراحی کنترل‌کننده پیشنهاد کردند [۱۴]. سپس یک طرح جدید بهینه‌سازی سرعت ترکیب‌شده با الگوریتم جستجوی اکستریم و سیستم منطق فازی خودتنظیم معرفی کردند. پس از آموزش برخط، با استفاده از یک موتور استنتاج فازی، سرعت شناور بیشینه می‌شود. ابرقوئی و همکاران، به طراحی یک کنترل‌کننده مد-لغزشی<sup>۱۱</sup> ترکیب‌شده با روش خطی‌سازی بازخورد برای یک قایق بادبانی بدون سرنشین پرداخته است [۱۵]. به دلیل غیرخطی بودن مدل دینامیکی، دو کنترل‌کننده برای زاویه سکان و زاویه باز شدن بادبان طراحی شده‌اند تا قایق به سمت موقعیت هدف خاص هدایت شود. کنترل‌کننده پیشنهادی می‌تواند اثر اغتشاشات خارجی را حذف کند، با این حال مشکل چترینگ<sup>۱۲</sup> در این کنترل‌کننده یکی از چالش‌های مهم است. در ادامه مجدد ابرقوئی و همکاران، توسعه یک سیستم کنترل مبتنی بر روش مد-لغزشی برای یک قایق بادبانی را بررسی کرده‌اند [۱۶]. این کنترل‌کننده با در نظر گرفتن یک مدل سه درجه آزادی برای دینامیک قایق، طراحی شد. البته، با وجود اثربخشی روش کنترل پیشنهادی، در این تحقیق از یک مدل ساده برای قایق استفاده شده است که جزئیات دقیق دینامیک قایق را به خوبی مدل نمی‌کند.

سیلوا و همکاران، سیستم کنترلی پیشنهاد دادند که به قایق بادبانی این امکان را می‌دهد که به هر نقطه هدف موردنظر در محیط کاری خود برسد [۳]. همچنین نشان داده شد که با یک کنترل‌کننده تناسبی - انتگرالی با قابلیت جدول بهره<sup>۷</sup> بهتر می‌توان بخش‌های غیرخطی ذاتی در دینامیک حرکت قایق بادبانی را کنترل نمود. لیو و همکارانش، یک استراتژی کنترل نگهداری موقعیت برای قایق بادبانی بدون سرنشین پیشنهاد کردند که در آن از ترکیب یک کنترل‌کننده PID، الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری و منطق فازی برای کنترل استفاده می‌شود [۴]. نتایج شبیه‌سازی دلالت بر عملکرد بهتر این روش نسبت به کنترل PID دارد. ژو و همکاران، یک کنترل‌کننده ترکیبی با ادغام الگوریتم جستجوی سوسک<sup>۸</sup> و کنترل PID برای قایق بادبانی پیشنهاد کرده‌اند [۵]. در این تحقیق ابتدا، مدل ریاضی حرکت بادبان و سکان استخراج شد. سپس، مسئله تنظیم پارامترهای PID به یک مسئله بهینه‌سازی سه‌بعدی تبدیل شد و از الگوریتم جستجوی سوسک برای بهینه‌سازی پارامترهای PID استفاده شد. ویرزو و همکاران، به طراحی یک کنترل‌کننده برای یک نمونه قایق بادبانی بدون سرنشین، متعلق به دانشگاه ETH زوریخ پرداختند [۶]. در این تحقیق، یک روش ساده برای شناسایی مدل فضای حالت خطی پیشنهاد شد که در طراحی کنترل‌کننده‌ها اهمیت زیادی دارد. سپس از یک کنترل‌کننده تناسبی برای کنترل قایق استفاده شد. در تحقیق ویلی و همکاران، جزئیات مربوط به قایق بادبانی بدون سرنشین و تمامی نیروهای وارد بر آن بررسی شد؛ سپس مدلی کامل با تعداد ۸ متغیر حالت برای توصیف دینامیک حرکت قایق بادبانی پیشنهاد شد [۷]. لی و همکارانش، یک روش مبتنی بر خطی‌سازی فیدبک همراه با رویکرد میدان برداری برای کنترل قایق بادبانی ارائه کرده‌اند [۸]. هررو و همکاران، ترکیب خطی‌سازی فیدبک با یک پیش‌جبران‌ساز پیشنهاد کردند که عملاً نیازهای مسئله را به خوبی برآورده می‌سازد [۹]. ابرقوئی و همکاران، طراحی الگوریتم خطی‌سازی فیدبک برای کنترل زاویه سکان و زاویه باز شدن بادبان یک قایق بادبانی بدون سرنشین را بررسی کردند [۱۰]. ژانگ و همکارانش، یک روش کنترل بازگشت به عقب<sup>۹</sup>

رونده) است؛ تا هم برای شناسایی عملکرد وسیله قبل از ورود به ساخت و هم در فرایند طراحی کنترل و هدایت استفاده شود. بنابراین، در این بخش سعی می‌شود تا مدلی از این وسیله با قابلیت تطبیق با طرح‌ها و معماری‌های مختلف این دسته از وسایل ارائه شود. معمولاً در تشریح حرکت شناورهای بادبانی خودگردان با توجه به استفاده از نیروی باد به‌عنوان سیستم پیشرانش، از یک مدل دینامیکی با تعداد چهار درجه آزادی [۱۸]، شامل حرکت انتقالی در راستای محور طولی  $x$ ، حرکت انتقالی در راستای محور  $y$ ، زاویه رول یا غلت (دوران حول محور طولی  $x$ ) و زاویه سمت (دوران حول محور عمودی  $z$ ) استفاده می‌شود. این در حالی است که در مدل‌سازی دینامیکی شناورهای معمول سطحی، ممکن است از درجه آزادی مربوط به زاویه غلت صرف‌نظر شود. در واقع ذات وسایل بدون سرنشین بادبانی باعث می‌شود تا میزان زاویه غلت ایجادشده در آن‌ها قابل صرف‌نظر نباشد. از این رو، در طراحی زیرسامانه هدایت، ناوبری و کنترل این شناورها، معمولاً وسایلی با چهار درجه آزادی در نظر گرفته می‌شوند. در ابتدا معادلات حرکت چهار درجه آزادی شناور موردنظر بدون حضور اغتشاشات، در فضای حالت توصیف شده و سپس به استخراج نیروهای خارجی شامل نیروی بادبان متأثر از سمت و سرعت باد حقیقی و نیروی سکان متأثر از آب دریا، پرداخته می‌شود. در ادامه معادلات دینامیکی قایق بادبانی هوشمند در حضور اغتشاشات ناشی از جریان‌ات سطحی دریا توسعه داده شده و در انتها، کنترلر مناسب برای کنترل حرکت شناور بادبانی موردنظر طراحی و با روش کنترل PID مقایسه خواهد شد.

### ۳. مدل‌سازی دینامیکی

در حالت کلی، مدل دینامیکی سیستم برای یک شناور بدون سرنشین بادبانی با تعداد هشت متغیر حالت قابل بیان است؛ اما قبل از پرداختن به آن لازم است که دستگاه‌های مختصات مورد استفاده در مدل‌سازی دینامیکی تشریح شوند که در شکل ۳، مشاهده می‌شود. دستگاه ناوبری با استاندارد NED<sup>13</sup> شامل محورهای در راستای شمال، شرق و عمود محلی به سمت پایین تعریف می‌شود. دستگاه بدنه که مبدأ

ویل و همکاران، مطالعه‌ای را با استفاده از روش فیدبک خطی‌سازی در حلقه داخلی و کنترل‌کننده PD در حلقه بیرونی با استفاده از خطای سمت و نرخ چرخش به انجام رساند [۱۷]. به دلیل برخی از تکنیک‌های فیدبک خطی‌سازی، هر دو و همکاران، فیدبک خطی‌سازی را با یک پیش‌جبران‌کننده ترکیب کردند که نقطه تنظیم سرعت و مسیر موردنیاز کاربر را به یک نقطه قابل قبول از زاویه بادبان و هدایت توسط کنترل‌کننده ترسیم می‌کرد [۹].

ساختار دینامیکی و ویژگی‌های خاص این نوع قایق بادبانی بدون سرنشین، منجر به جلب توجه بسیاری از محققان شده است؛ اما بررسی به این نوع سیستم‌ها و تحقیق در این حوزه با چالش‌های مختلفی نظیر وجود نایقینی‌های زیاد در مدل دینامیکی، اغتشاشات ناشناخته وارد بر وسیله و همچنین غیرخطی بودن دینامیک آن همراه است که پیچیدگی‌های بسیاری به دنبال خواهد داشت. مرور پیشینه پژوهش، دلالت بر این دارد که بخش عمده‌ای از فعالیت‌های گذشته در این حوزه، متمرکز بر سیستم‌های خطی و بدون در نظر گرفتن اغتشاشات بوده‌اند که در عمل فقط طیف محدودی از سیستم‌ها را پوشش می‌دهند. بر همین اساس و با توجه به خلأ تحقیقاتی فوق، در پژوهش حاضر، ابتدا ضمن بیان مدل دینامیکی ۴ درجه آزادی شناور بادبانی بدون سرنشین، به توسعه آن با در نظر گرفتن اغتشاشات ناشی از جریان‌ات آب پرداخته می‌شود. در ادامه، براساس دینامیک غیرخطی سیستم، به روش فیدبک خطی‌سازی، یک کنترل‌کننده مناسب برای کنترل سمت قایق بادبانی طراحی خواهد شد. همچنین با مشتق‌گیری از نیروی واردشده بر بادبان ناشی از باد نسبت به زاویه بادبان، یک کنترل‌کننده ابتکاری بهینه برای کنترل سرعت قایق بادبانی در حضور اغتشاشات منتج از جریان‌های آب دریا، ارائه می‌شود.

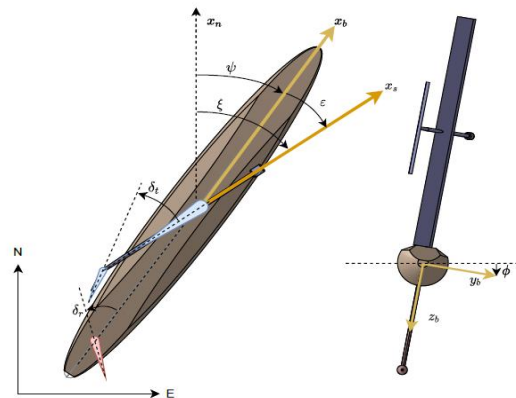
### ۲. بیان مسئله

یکی از ملزومات اساسی در طراحی زیرسامانه هدایت، ناوبری و کنترل برای یک وسیله متحرک، دسترسی به مدل دینامیکی سیستم (شامل روابط حاکم بر سینتیک و سینماتیک

جدول ۱. تعریف متغیرها و پارامترها در معادلات دینامیکی قایق بادبانی

| نماد                       | پارامتر  |
|----------------------------|--|
| $v_m$                      | سرعت باد   |
| $\gamma$                   | سمت باد  |
| $G$                        | مرکز گرانشی قایق بادبانی   |
| $CoE$                      | مرکز تلاش بادبان   |
| $(x_s, y_s, z_s)$          | موقعیت مرکز تلاش کنترلی روی بادبان                               |
| $(x_r, y_r, z_r)$          | موقعیت مرکز تلاش کنترلی روی سکان                                 |
| $(x, y)$                   | مختصات مرکز گرانشی قایق بادبانی                                  |
| $\phi$                     | زاویه غلت در دستگاه مختصات اینرسی                                |
| $\psi$                     | زاویه سمت در دستگاه مختصات اینرسی                                |
| $\delta_s$                 | زاویه باز شدن بادبان در دستگاه مختصات بدنی                       |
| $\delta_r$                 | زاویه سکان در دستگاه مختصات بدنی                                 |
| $u$                        | سرعت انتقالی قایق در راستای محور طولی                            |
| $v$                        | سرعت انتقالی قایق در راستای محور عرضی                            |
| $r, p$                     | نرخ زاویه‌ای غلت قایق بادبانی                                    |
| $r$                        | نرخ زاویه‌ای سمت قایق بادبانی                                    |
| $f_s$                      | نیروی آیرودینامیکی اعمالی از باد بر بادبان در دستگاه مختصات بدنی |
| $f_r$                      | نیروی هیدرودینامیکی اعمالی از آب روی سکان در دستگاه مختصات بدنی  |
| $p_1, p_2$                 | اصطکاک آب در دستگاه مختصات بدنی                                  |
| $p_3$                      | اصطکاک زاویه‌ای آب   |
| $p_4$                      | ضریب برا (بالابر) بادبان   |
| $p_5$                      | ضریب برا (بالابر) سکان   |
| $p_6$                      | فاصله بین دکل و مرکز تلاش کنترلی قایق                            |
| $p_7$                      | فاصله بین دکل و مرکز گرانشی قایق                                 |
| $p_8$                      | فاصله بین مرکز گرانش قایق و سکان                                 |
| $m$                        | وزن قایق   |
| $p_{10}$                   | ممان اینرسی حول محور Z   |
| $p_{11}$                   | ممان اینرسی حول محور X   |
| $p_{12}$                   | ضریب اصطکاک کانال غلت  |
| $p_{13}$                   | طول معادل نوسان در حرکت غلت                                      |
| $X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}$ | جرم افزوده انتقالی در دستگاه مختصات بدنی                         |
| $N_{\dot{r}}, K_{\dot{p}}$ | جرم افزوده زاویه‌ای در دستگاه مختصات بدنی                        |
| $\xi$                      | عرض ناحیه ممنوعه   |

آن بر مرکز جرم شناور منطبق است، شامل محورهای X (در راستای محور شناور)، Y (در راستای سمت راست شناور، دید از پشت) و Z (در راستای عمودی به سمت پایین) است. انتقال از دستگاه ناوبری به دستگاه بدنه با سه زاویه سمت (حول محور z)، زاویه فراز (دوران حول محور y) و زاویه غلت (دوران حول محور x) انجام می‌گیرد. بردار سرعت زاویه‌ای نسبت به دستگاه ناوبری با مؤلفه‌های  $p, q$  و  $r$  تعریف می‌شوند. بردار سرعت انتقالی در دستگاه بدنه نیز با مؤلفه‌های  $u, v$  و  $w$  تعریف می‌شوند [۱۸].



شکل ۳. نمایی از قایق بادبانی با نمایش دستگاه‌های مختصات

در این حالت، قایق بادبانی با سرعت زاویه‌ای  $r$  حول محور Z دستگاه مختصات اینرسی در حال چرخش است. در این صورت معادلات سینماتیک قایق بادبانی بدون سرنشین را می‌توان به صورت رابطه (۱) بیان نمود [۱۵-۱۶].

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos \psi - v \sin \psi \cos \phi \\ \dot{y} &= u \sin \psi + v \cos \psi \cos \phi \\ \dot{\psi} &= r \cos(\phi) \\ \dot{\phi} &= p \\ \dot{u} &= (f_s \sin \delta_s - f_r \sin \delta_r - p_1 u) / (m - X_{\dot{u}}) \\ \dot{v} &= (-f_s \cos \delta_s - f_r \sin \delta_r - p_2 v) / (m - Y_{\dot{v}}) \\ \dot{r} &= \frac{(p_6 - p_7 \cos \delta_s) f_s - p_8 f_r \cos \delta_r - p_3 r}{p_{10} - N_{\dot{r}}} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\dot{p} = (z_s f_s \cos \phi - p_{13} m g \sin \phi - p_{12} p) / (p_{11} - K_{\dot{p}})$$

$$\delta_s = u_1$$

$$\delta_r = u_2$$

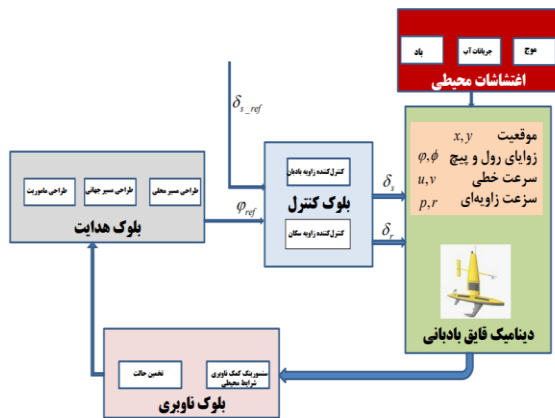
$$f_s = p_4 (v_m \sin(\psi - \gamma + \delta_s) - u \sin \delta_s)$$

$$f_r = p_5 u \sin \delta_r$$

متغیرهای به کار رفته در معادلات دینامیکی شناور، در جدول

۱ و متناسب با شکل ۴ تشریح خواهند شد.

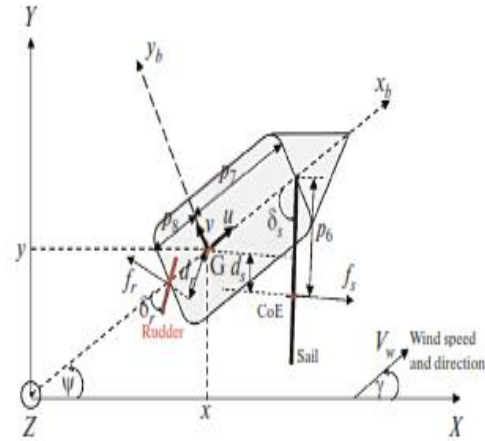
در ادامه دو نکتهٔ حائز اهمیت در طراحی کنترل‌کننده برای شناور بادبانی بیان می‌شود. اول اینکه همان‌طور که در معادلات حالت سیستم (رابطه (۱)) مشهود است، دو متغیر سمت و زاویهٔ بادبان که به‌عنوان ورودی کنترل هستند، در ظاهر از یکدیگر جدا نبوده و نیاز است بحث جداسازی آن‌ها تعیین و تکلیف گردد که عمدتاً با توجه به ساختار لخت و سرعت پایین شناور جدا در نظر گرفته می‌شوند [۱۵-۱۶]. از سوی دیگر همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است، اغتشاشات وارد بر قایق بادبانی ناشی از جریانات آب در نظر گرفته نشده است و در اکثر کارهای پژوهشی قبلی نیز، از آن صرف نظر شده است؛ اما ضروری است که این پارامترها برای بالا بردن دقت حرکت شناور، مدنظر قرار گیرند؛ در همین راستا، با توجه به شکل ۶ که در آن نمودار بلوکی کنترل قایق بادبانی کامل ترسیم شده است، جریانات سطحی آب دریا در راستای محور طولی و عرضی وسیله،  $C = (u_c, v_c)^T$ ، به‌عنوان اغتشاش به دینامیک وسیله وارد می‌شوند که در قالب رابطه (۴) قابل‌بیان هستند و سایر اغتشاشات وارد بر شناور نظیر امواج دریا و سمت و سرعت بادهای غیرمؤثر نادیده فرض شده است.



شکل ۶. نمودار بلوکی قایق بادبانی بدون سرنشین در حضور اغتشاشات ناشی از جریانات آب دریا

$$\begin{aligned} u_c &= v_{wc} \cos(\varphi_{wc}) \\ v_c &= v_{wc} \sin(\varphi_{wc}) \end{aligned} \quad (4)$$

در این حالت، تأثیر جریان‌های آبی عمدتاً باعث تغییر در سرعت خطی شناور در راستای محور طولی و عرضی متناسب با جهت جریان آب خواهد بود که می‌توان با



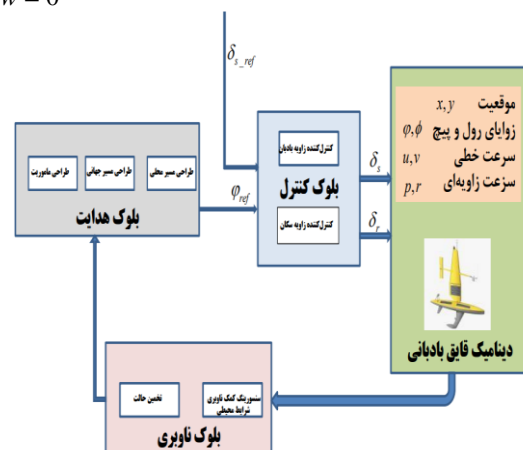
شکل ۴. نمایی از قایق بادبانی هوشمند (۱۵)

مدل دینامیکی شناور در رابطه (۱) را می‌توان به فرم کلی غیرخطی زیر بیان کرد.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{U}) \\ \mathbf{X} &= [x \ y \ \psi \ \phi \ u \ v \ r \ p]^T \\ \mathbf{U} &= \begin{pmatrix} \delta_s \\ \delta_r \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

شکل ۵، ساختار کنترلی شناور بادبانی بدون سرنشین را نشان می‌دهد که در آن  $\psi_d$  و  $\delta_{s\_ref}$  به ترتیب سمت و زاویه بادبان مطلوب قایق بادبانی بوده (پارامترهای ورودی به بلوک کنترل که از سمت بلوک هدایت تأمین می‌شوند) و زاویه بادبان  $\delta_s$  و تیغه سکان  $\delta_r$  به‌عنوان خروجی کنترل و ورودی مدل دینامیکی شناور هستند. لازم به ذکر است که از حرکت دورانی شناور در کانال فراز و حرکت انتقالی آن در راستای محور عمود بر وسیله صرف نظر می‌شود (۱۸).

$$\begin{aligned} \theta &= 0 \\ q &= 0 \\ z &= 0 \\ w &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$



شکل ۵. ساختار سیستم کنترلی شناور بادبانی بدون سرنشین

#### ۴-۱ طراحی کنترل کننده سرعت قایق بادبانی

بر اساس پژوهش‌های گذشته، به‌طور عمده از روش‌های مختلف کنترل خطی نظیر کنترلرهای از خانواده PID و یا غیرخطی مانند خطی‌سازی فیدبک، کنترل مد‌لغزشی و غیره برای کنترل سرعت قایق بادبانی با ورودی  $\delta_s$  استفاده می‌شود (۱۵، ۱۶). در پژوهش حاضر، یک روش ابتکاری برای کنترل زاویه بادبان  $\delta_s$  با هدف رسیدن به سرعت مطلوب ارائه می‌شود. همان‌طور که در رابطه (۶) نیروی وارد بر بادبان، بیان شده است در این حالت می‌توان، برای رسیدن به بیشینه نیروی ایجادشده از طریق باد اعمالی به بادبان، متناسب با زاویه بادبان، از رابطه زیر استفاده نمود.

$$\frac{\partial f_s}{\partial \delta_s} = 0 \quad (7)$$

که با حل رابطه (۷)، معادله (۸) حاصل می‌شود:

$$\delta_s = \arctan\left(\frac{v_m \cos(\psi - \gamma) - (u + v_{wc} \cos(\varphi_{wc}))}{v_m \sin(\psi - \gamma)}\right) \quad (8)$$

رابطه (۸) در واقع بیانگر این موضوع است که زاویه بادبان همیشه به‌گونه‌ای تنظیم خواهد شد که بیشینه سرعت برای قایق بادبانی هوشمند مدنظر باشد. این رابطه به‌عنوان ورودی کنترل زاویه بادبان ( $u_1$ ) به دینامیک وسیله اعمال می‌شود و عملاً در همه حال به‌گونه‌ای زاویه بادبان را تنظیم می‌کند که نیروی بیشتری از طریق باد، بر آن وارد شده و سرعت مناسب‌تری را برای وسیله ایجاد نماید.

#### ۴-۲ طراحی کنترل کننده سمت قایق بادبانی

در این بخش، با توجه به اغتشاش واردشده به قایق بادبانی بر اساس سمت و سرعت جریان‌های آب دریا، طراحی کنترل‌کننده سمت قایق بادبانی با استفاده از روش خطی‌سازی فیدبک و با در نظر گرفتن سمت و سرعت باد حقیقی صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه زاویه  $\psi$  به‌عنوان یکی از خروجی‌های وسیله است، طبق روش کنترل خطی‌سازی فیدبک تا زمانی که ورودی کنترلی  $\delta_r$  در آن ظاهر شود از آن مشتق، گرفته می‌شود.

همان‌طور که در رابطه (۹) مشاهده می‌شود، با سه مرحله مشتق‌گیری از متغیر سمت شناور، ورودی کنترلی  $\delta_r$  ظاهر

بازنویسی مجدد سرعت، در هر دو راستای طولی و عرضی قایق بادبانی، آن را به‌صورت رابطه (۵) بیان کرد.

$$\begin{aligned} u_t &= u + u_c = u + v_{wc} \cos(\varphi_{wc}) \\ v_t &= v + v_c = v + v_{wc} \sin(\varphi_{wc}) \end{aligned} \quad (5)$$

با جایگذاری رابطه (۵) در رابطه (۱) و بازنویسی مجدد معادلات دینامیکی قایق بادبانی در حضور اغتشاشات جریانات سطحی، معادلات دینامیکی قایق بادبانی هوشمند به‌صورت رابطه (۶) بازنویسی خواهد شد.

همان‌طور که در رابطه (۶) مشاهده می‌شود به‌واسطه حضور جریانات سطحی دریا، معادلات دینامیکی قایق بادبانی در حضور اغتشاشات بیان‌شده، توسعه داده شده است. بدین ترتیب تأثیر جریانات آب روی تمامی متغیرهای حالت قایق بادبانی هوشمند و همچنین نیروی واردشده بر بادبان ( $f_s$ ) و نیروی واردشده بر تیغه سکان ( $f_r$ )، لحاظ شده است.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u_t \cos \psi - v_t \sin \psi \cos \phi \\ \dot{y} &= u_t \sin \psi + v_t \cos \psi \cos \phi \\ \dot{\psi} &= r \cos(\phi) \\ \dot{\phi} &= p \\ \ddot{u} &= \frac{f_s \sin \delta_s - f_r \sin \delta_r - p_1(u + v_{wc} \cos(\varphi_{wc}))}{m - X_{\ddot{u}}} \\ \ddot{v} &= \frac{-f_s \cos \delta_s - f_r \sin \delta_r - p_2(v + v_{wc} \sin(\varphi_{wc}))}{m - Y_{\ddot{v}}} \\ \dot{r} &= \frac{(p_6 - p_7 \cos \delta_s) f_s - p_8 f_r \cos \delta_r - p_3 r}{p_{10} - N_r} \\ \dot{p} &= \frac{z_s f_s \cos \phi - p_{13} m g \sin \phi - p_{12} p}{p_{11} - K_p} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} f_s &= p_4 v_m \sin(\psi - \gamma + \delta_s) - \\ & p_4 (u + v_{wc} \cos(\varphi_{wc})) \sin \delta_s \\ f_r &= p_5 (u + v_{wc} \cos(\varphi_{wc})) \sin \delta_r \end{aligned}$$

در ادامه با توجه به توسعه مدل دینامیکی قایق بادبانی، مراحل طراحی کنترل‌کننده مناسب سمت و سرعت، برای شناور بادبانی بیان شده است.

#### ۴. طراحی کنترل کننده

در این بخش به طراحی دو کنترل‌کننده مستقل برای کنترل سمت و سرعت حرکت قایق بادبانی موردنظر می‌پردازیم..

کنترل کننده بهینه با هدف بیشینه کردن سرعت، از طریق کنترل زاویه بادبان، برای بیشینه کردن سرعت، طراحی شد. در این شبیه سازی پارامترهای اولیه برای قایق بادبانی هوشمند، مطابق با جدول ۲ مدنظر قرار گرفته است و در جدول شماره ۳ اختصارات به کاررفته در شبیه سازی نشان داده شده است و از همین اختصارات در ترسیم نمودارها استفاده شده است.

سمت باد ۲۷۰ درجه و سرعت آن ۱۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در این شبیه سازی زوایای بادبان، تیغه سکان، زوایای رول؛ یاو و در ادامه حرکت انتقالی شناور در راستای محور طولی و عرضی، سرعت زاویه ای قایق بادبانی در راستای محور طولی و عمود بر وسیله در مدت زمان ۱۰۰ ثانیه ترسیم شده است که هر کدام از شکل ها در ادامه ترسیم شده است.

جدول ۲. مقادیر پارامترهای معادلات دینامیک قایق بادبانی [۱۵]

| پارامتر           | مقدار                        |
|-------------------|------------------------------|
| $p_1$             | 10kg.s / m                   |
| $p_2$             | 400kg.s / m                  |
| $p_3$             | 125kg.m <sup>2</sup> / rad.s |
| $p_4$             | 30                           |
| $p_5$             | 50                           |
| $p_6$             | 0.5m                         |
| $p_7$             | 0.5m                         |
| $p_8$             | 1.5m                         |
| $m$               | 200kg                        |
| $p_{10}$          | 50kg.m <sup>2</sup>          |
| $p_{11}$          | 12.5kg.m <sup>2</sup>        |
| $p_{12}$          | 40kg.m <sup>2</sup> / rad.s  |
| $p_{13}$          | 0.2m                         |
| $X_{U^0}$         | -20kg                        |
| $Y_{V^0}$         | -200kg                       |
| $N_{r^0}$         | -50kg.m <sup>2</sup>         |
| $K_{p^0}$         | -12kg.m <sup>2</sup>         |
| $(x_s, y_s, z_s)$ | (0,0,1)m                     |
| $v_{wc}$          | 2m / s                       |
| $\phi_{wc}$       | $\pi / 3rad$                 |

می گردد؛ بنابراین سیستم موردنظر از مرتبه ۳ خواهد بود. در ادامه جهت محاسبه کنترل زاویه سکان ( $u_2$ ) به گونه ای اقدام شده است که به جای ورودی کنترلی زاویه سکان، عبارتی جایگزین شده است که معادلات غیرخطی دینامیک قایق بادبانی را حذف و معادلات دینامیکی را در حضور اغتشاشات ناشی از جریانات سطحی دریا، به صورت معادلات کاملاً خطی بیان می نماید.

$$\begin{aligned} \dot{\psi} &= r \cos(\phi) \\ \dot{\psi} &= \dot{r} \cos(\phi) - rp \sin(\phi) \\ \ddot{\psi} &= \ddot{r} \cos(\phi) - \sin(\phi)(2\dot{r}p + r\dot{p}) - rp^2 \cos(\phi) \\ \ddot{\psi} &= Au_2 + B \\ A &= \frac{p_8 f_r \sin \delta_r \cos \phi f_r}{p_{10} - N_{\dot{r}}} - \frac{p_5 p_8 u \cos^2 \delta_r \cos \phi}{p_{10} - N_{\dot{r}}} \\ B &= \frac{p_7 \sin \delta_s f_s \dot{\delta}_s}{p_{10} - N_{\dot{r}}} + \frac{(p_6 - p_7 \cos \delta_s) \dot{f}_s}{p_{10} - N_{\dot{r}}} \\ &\quad - \frac{p_5 p_8 \dot{u} \cos \delta_r \cos \phi \sin \delta_r}{p_{10} - N_{\dot{r}}} - \sin \phi (2\dot{r}p + r\dot{p}) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{f}_s &= p_4 (v_m (\dot{\psi} + \dot{\delta}_s) \cos(\psi - \gamma + \delta_s) \\ &\quad - (\dot{u} \sin \delta_s) - (u + v_{wc} \cos(\phi_{wc})) \dot{\delta}_s \cos \delta_s) \end{aligned}$$

$$u_2 = \frac{\ddot{\psi} - B}{A}$$

$$\ddot{\psi} = k_1 e - k_2 \dot{e} - k_3 \ddot{e}$$

$$e = \psi_{ref} - \psi$$

همان طور که در معادلات بالا مشاهده می شود ورودی کنترلی به گونه ای طراحی شده است که معادلات غیرخطی دینامیک قایق بادبانی (A و B) حذف خواهد شد.

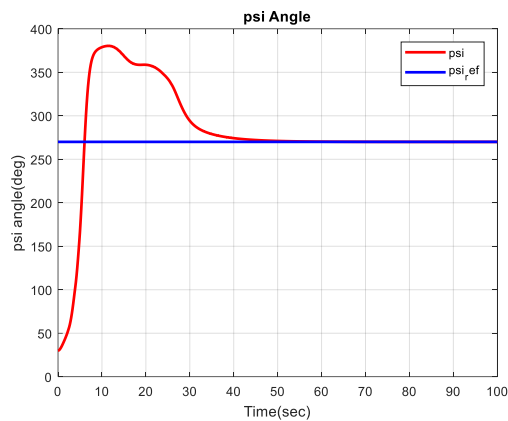
در ادامه، شبیه سازی ورودی های کنترلی زاویه بادبان و زاویه سکان، به ازای زوایای سمت مرجع گوناگون، بررسی می شود.

## ۵. شبیه سازی

در این بخش با توجه به طراحی کنترل کننده های سمت و سرعت قایق بادبانی هوشمند، متناسب با معادلات دینامیکی و استخراج مدل ۴ درجه آزادی قایق بادبانی هوشمند، به پیاده سازی کنترل کننده ها در محیط نرم افزار متلب پرداخته شده است.

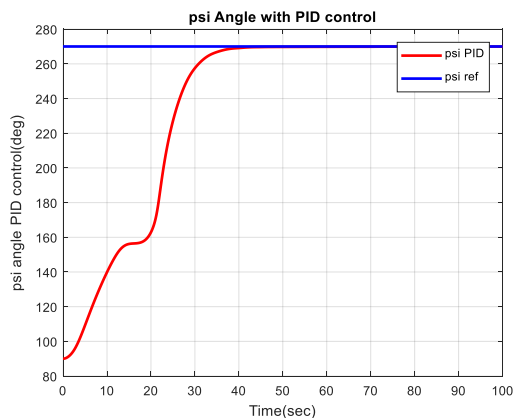
بلوک های کنترلی سمت و سرعت در شبیه سازی با استفاده از کنترل کننده فیدبک خطی ساز برای کنترل سمت و

راستای طولی قایق بادبانی می‌رسد که این امر باعث وزیدن باد به سطح مقطع بیشتری از بادبان صلب قایق خواهد شد و عملاً سرعت بیشتری را تجربه خواهد کرد که در ادامه در نمودار سرعت شناور بررسی شده است و زاویه تیغه سکان در محدوده ۶۰ درجه با توجه به محدودیت ایجادشده برای جابه‌جایی تیغه سکان، در حال تغییر، برای نگه‌داشتن قایق، در سمت مطلوب می‌باشد.



شکل ۹. کنترل زاویه سمت شناور به روش فیدبک خطی ساز بهینه

در شکل (۹) نمودار کنترل سمت قایق بادبانی هوشمند با توجه به سمت مطلوب ۲۷۰ درجه ترسیم شده است که بعد از حدود ۴۰ ثانیه، سمت مطلوب را دنبال کرده است.



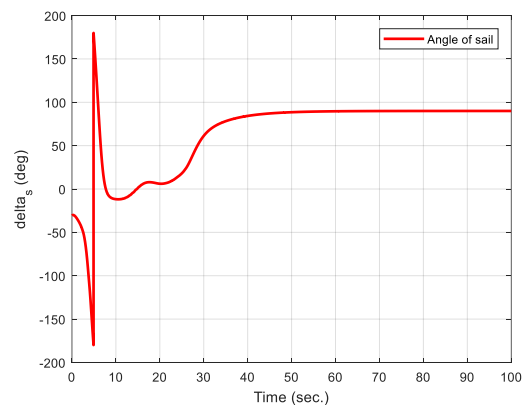
شکل ۱۰. کنترل زاویه سمت شناور به روش PID

در شکل (۱۰) زاویه سمت شناور، متناسب با زاویه سمت مطلوب ۲۷۰ درجه به ازای روش کنترلی PID ترسیم شده است. در این روش نیز بعد از مدت‌زمانی حدود ۴۰ ثانیه، سمت مطلوب را دنبال کرده است و به‌نوعی هر دو روش در کنترل سمت قایق بادبانی هوشمند، یکسان عمل نموده‌اند.

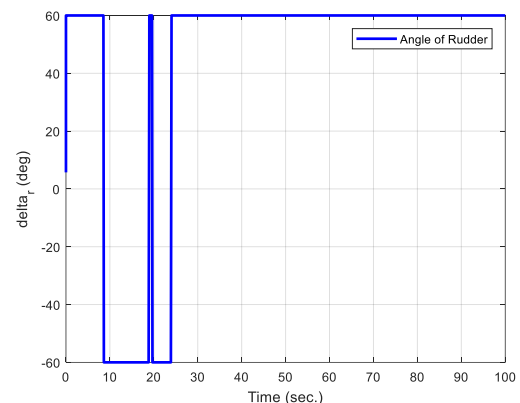
حال در ادامه به ازای زوایای  $\psi_{ref} = 270^0, 30^0, 350^0$  شبیه‌سازی به روش فیدبک خطی ساز بهینه و PID صورت گرفته است که نمودارهای مرتبط با هر یک از زوایای سمت مرجع به تفکیک و متناسب با هر یک از سمت‌های مطلوب ترسیم شده است. شایان‌ذکر است که در روش فیدبک خطی ساز بهینه برای کنترل سمت قایق بادبانی هوشمند، به روش جایابی قطبی ضرایب  $k_1, k_2, k_3$  به ازای شرایط اولیه زیر به صورت  $k_1 = 5, k_2 = 20, k_3 = 25$  محاسبه شد.

$$(x, y, \psi, \phi, u, v, r, p) = (0, 0, 30^0, 0, 0.1, 0, 0, 0)$$

### ۵-۱. شبیه‌سازی قایق بادبانی به ازای $\psi_{ref} = 270^0$

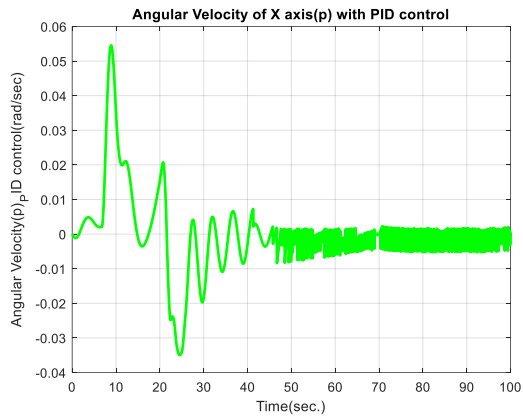


شکل ۷. کنترل زاویه بادبان به روش فیدبک خطی ساز بهینه



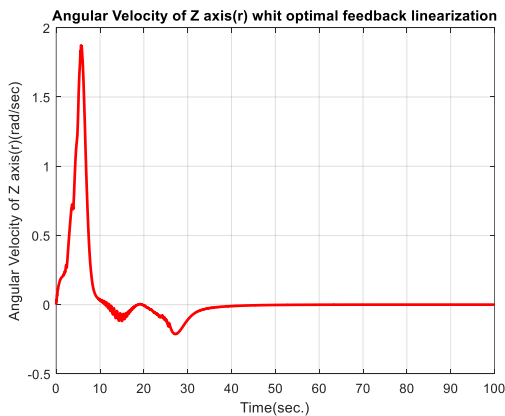
شکل ۸. کنترل زاویه سکان به روش کنترل فیدبک خطی ساز بهینه

همان‌طور که در شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌شود با توجه به جهت باد و سمت مطلوب ۲۷۰ درجه برای قایق بادبانی هوشمند، زاویه بادبان متناسب جهت بیشینه کردن سرعت قایق بادبانی بعد از حدود ۲۰ ثانیه به ۹۰ درجه، نسبت به

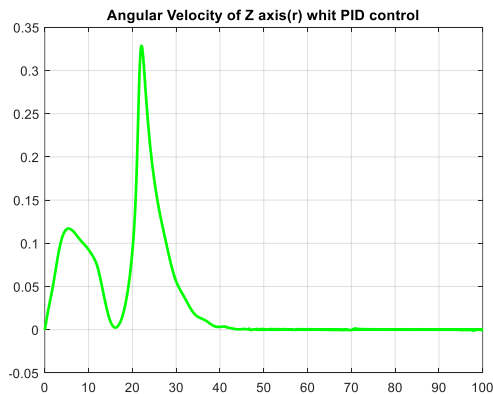


شکل ۱۴. نرخ تغییرات رول شناور به روش کنترل PID

در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نرخ تغییرات رول شناور به هر دو روش ترسیم شده است که نمودارها بیانگر این است که روش کنترل فیدبک خطی‌ساز بهینه در یک مدت‌زمان کوتاهی نرخ تغییرات رول را به سمت صفر سوق می‌دهد درحالی‌که در روش PID بعد از گذشت مدت‌زمانی حدود ۴۰ ثانیه، حول نقطه صفر در حال نوسان است.

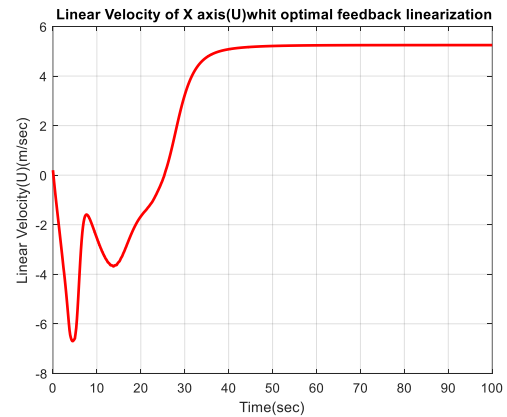


شکل ۱۵. نرخ تغییرات سمت شناور به روش فیدبک خطی‌ساز بهینه

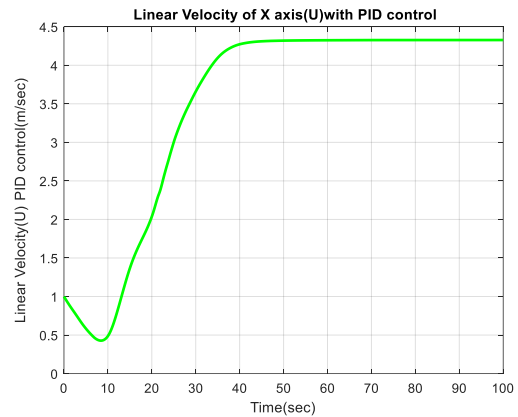


شکل ۱۶. نرخ تغییرات سمت شناور به روش کنترل PID

در نمودارهای (۱۵) و (۱۶) نرخ تغییرات سمت شناور به هر دو روش ترسیم شده است. این شکل‌ها بیانگر این است که

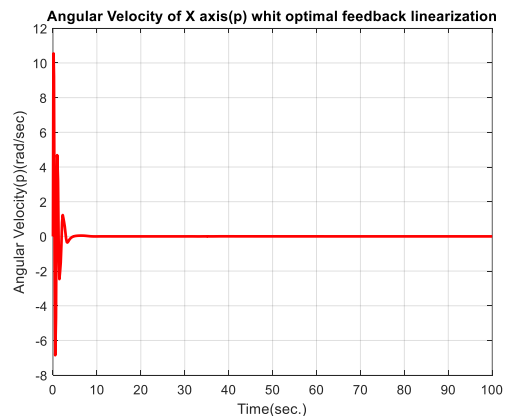


شکل ۱۱. کنترل سرعت شناور به روش کنترل فیدبک خطی‌ساز بهینه



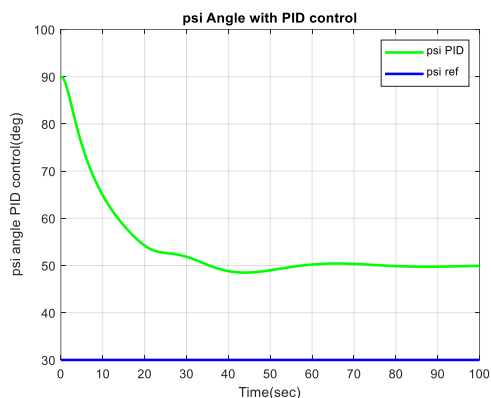
شکل ۱۲. کنترل سرعت شناور به روش کنترل PID

همان‌طور که در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌شود سرعت شناور به ازای سمت مرجع ۲۷۰ درجه، به روش فیدبک خطی‌ساز بهینه نسبت به روش PID، بیشتر بوده و عملاً ابتکار و تکنیک به‌کاررفته در این پژوهش به‌وضوح در پیشینه کردن سرعت شناور نمایان شده است.

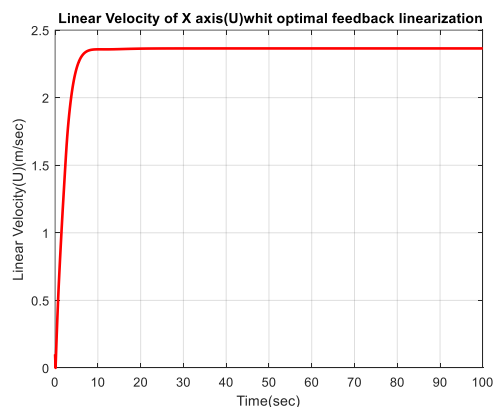


شکل ۱۳. نرخ تغییرات رول به ازای روش کنترل فیدبک خطی‌ساز بهینه

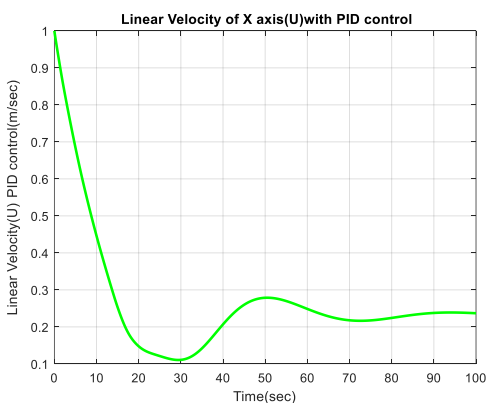
در شکل (۱۹) نمودار زاویه سمت قایق بادبانی به نمایش گذاشته شده است که به روش کنترل فیدبک خطی ساز بهینه صورت گرفته است در این روش سمت شناور بعد از حدود ۱۸ ثانیه سمت مطلوب ۳۰ درجه را دنبال نموده است و به خوبی در یک بازه زمانی مناسب شناور را در مسیر مطلوب قرار داده است؛ اما در ادامه در شکل (۲۰) که به روش کنترل PID، سمت شناور کنترل شده است عملاً این روش کنترلی نتوانسته است قایق بادبانی هوشمند را به سمت مطلوب سوق دهد و با یک اختلاف ۲۰ درجه نسبت به سمت مرجع در حال حرکت است.



شکل ۲۰. کنترل زاویه سمت شناور به روش کنترل PID



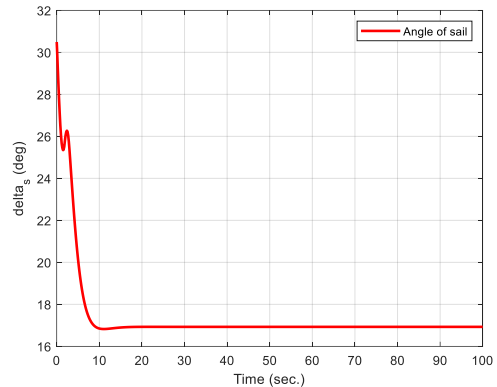
شکل ۲۱. کنترل سرعت شناور به روش کنترل فیدبک خطی ساز بهینه



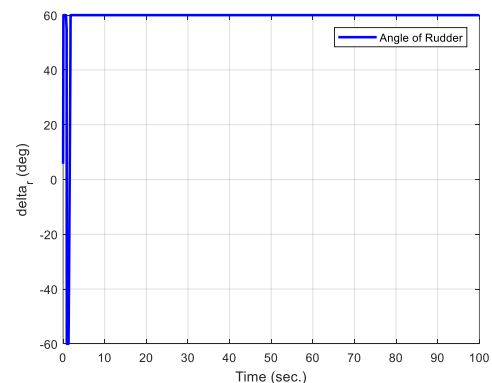
شکل ۲۲. کنترل سرعت شناور به روش کنترل PID

در روش فیدبک خطی ساز بهینه، قایق بادبانی هوشمند، چندثانیه‌ای زودتر، سمت مطلوب را دنبال کرده و به مسیر خود ادامه می‌دهد.

### ۲-۵. شبیه‌سازی قایق بادبانی به ازای $\Psi_{ref} = 30^\circ$

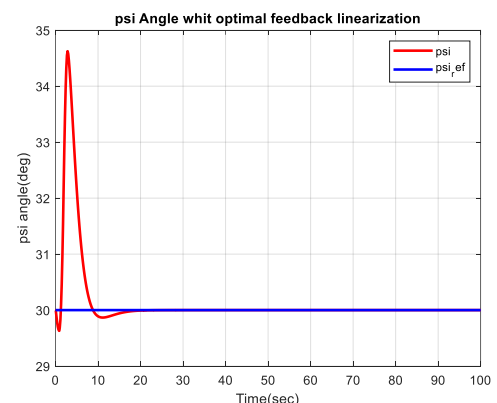


شکل ۱۷. کنترل زاویه بادبان شناور به روش فیدبک خطی ساز بهینه

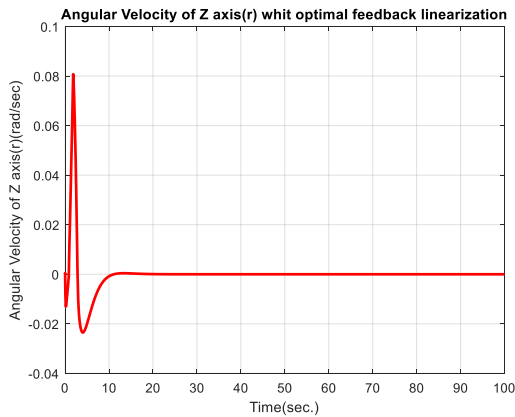


شکل ۱۸. کنترل زاویه سکان به روش کنترل فیدبک خطی ساز بهینه

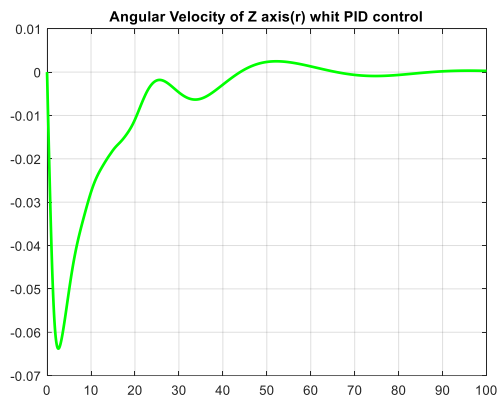
در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) به ازای سمت مطلوب ۳۰ درجه، به ترتیب زاویه بادبان و زاویه تیغه سکان ترسیم شده است به گونه‌ای که زاویه بادبان حدود ۱۷ درجه نسبت به راستای طولی شناور، تغییر زاویه داده است و تیغه سکان نیز در محدود ۶۰+ تا ۶۰- در حال تغییر، جهت دنبال کردن سمت مطلوب می‌باشد.



شکل ۱۹. کنترل زاویه سمت شناور به روش فیدبک خطی ساز بهینه



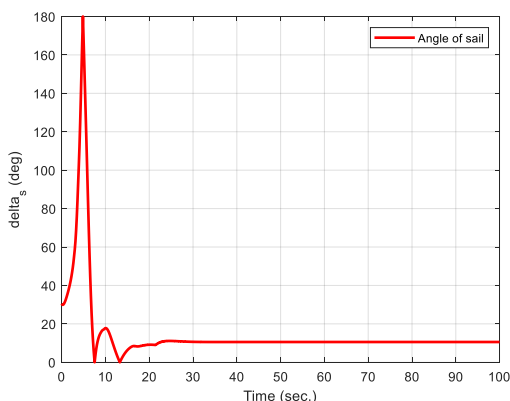
شکل ۲۵. نرخ تغییرات سمت به روش کنترل فیدبک خطی ساز بهینه



شکل ۲۶. نرخ تغییرات سمت به روش کنترل PID

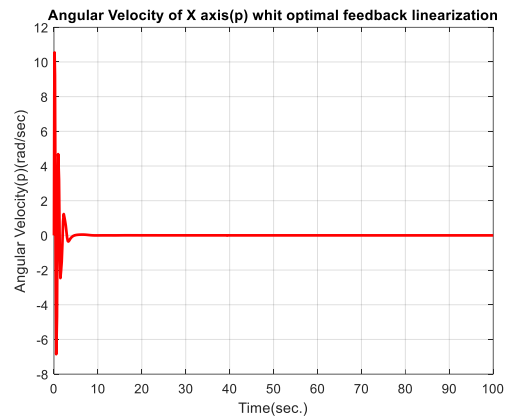
در شکل‌های (۲۵) و (۲۶) به ازای سمت مرجع  $30^\circ$  درجه، نرخ تغییرات سمت شناور به دو روش کنترلی نشان داده است که در روش کنترل فیدبک خطی ساز بهینه، قایق بادبانی هوشمند بعد از حدود ۲۰ ثانیه، نرخ تغییرات سمت را به سمت صفر سوق می‌دهد در صورتی که در روش کنترل PID بعد از حدود ۸۰ ثانیه به این مهم دست پیدا می‌کند.

### ۳-۵. شبیه‌سازی قایق بادبانی به ازای $\Psi_{ref} = 350^\circ$

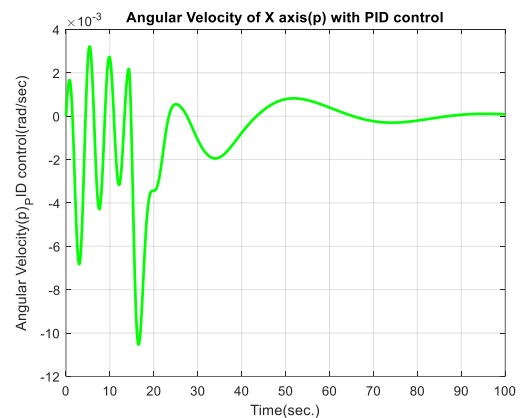


شکل ۲۷. کنترل زاویه بادبان شناور به روش فیدبک خطی ساز بهینه

در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) نمودار سرعت شناور به دو روش فیدبک خطی ساز بهینه و PID ترسیم شده است که به وضوح مشخص است روش فیدبک خطی ساز بهینه به خوبی سرعت شناور را با توجه به جهت وزش باد که تقریباً مخالف جهت حرکت شناور می‌باشد بیشینه نموده است. در صورتی که در روش کنترل PID سرعت تقریباً  $0.2$  متر بر ثانیه است.



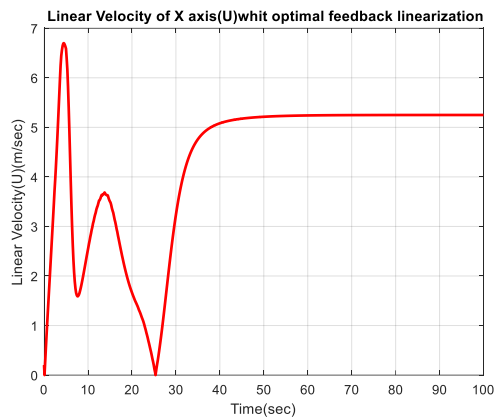
شکل ۲۳. نرخ تغییرات رول به روش کنترل فیدبک خطی ساز بهینه



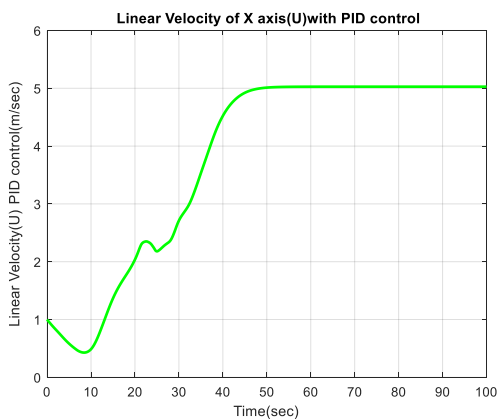
شکل ۲۴. نرخ تغییرات رول به روش کنترل PID

نرخ تغییرات رول قایق بادبانی هوشمند که در شکل (۲۳) ترسیم شده است بیانگر این موضوع است که روش کنترل فیدبک خطی ساز بهینه در کمتر از ۵ ثانیه، سرعت زاویه‌ای حول طولی را به صفر می‌رساند و شناور در وضعیت پایداری قرار خواهد گرفت. در صورتی که در شکل (۲۴) نرخ تغییرات رول بعد از حدود ۹۰ ثانیه به سمت صفر میل می‌کند.

همان‌طور که در شکل‌های (۲۹) و (۳۰) مشخص است روش کنترل فیدبک خطی‌ساز بهینه، نسبت به روش کنترل PID، مدت‌زمان کمتری، سمت مطلوب قایق بادبانی هوشمند را دنبال می‌کند و زمان نشست آن کمتر می‌باشد.

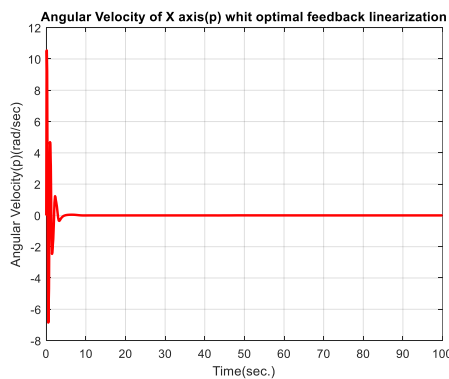


شکل ۳۰. کنترل سرعت شناور به روش کنترل فیدبک خطی‌ساز بهینه



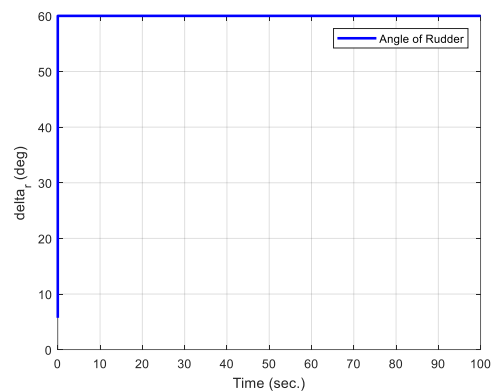
شکل ۳۱. کنترل سرعت شناور به روش کنترل PID

در شکل‌های (۳۰) و (۳۱) سرعت قایق بادبانی هوشمند به ازای سمت مرجع ۳۵۰ درجه ترسیم شده است که مشاهده می‌شود کنترل سرعت به روش فیدبک خطی‌ساز بهینه نسبت به PID بهتر عمل کرده و سرعت تقریباً ۰,۵ متر بر ثانیه بیشتر شده است.



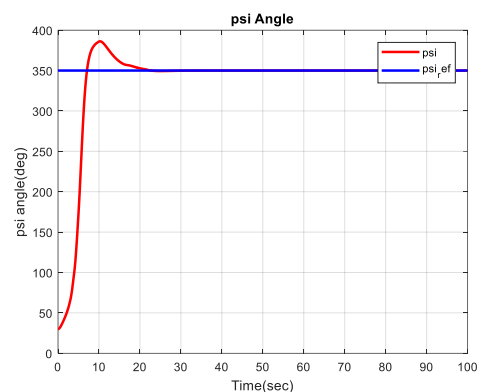
شکل ۳۲. نرخ تغییرات رول به روش کنترل فیدبک خطی‌ساز بهینه

همان‌طور که در شکل (۲۷) مشاهده می‌شود با توجه به جهت باد و سمت مطلوب ۳۵۰ درجه برای قایق بادبانی هوشمند، بادبان جهت پیشینه کردن سرعت قایق بادبانی، زاویه‌ای تقریباً ۱۰ درجه، نسبت به راستای طولی قایق بادبانی هوشمند می‌گیرد تا بتواند سطح مقطع بیشتری از بادبان صلب قایق را در معرض وزش باد قرار دهد و سرعت بیشتری را برای شناور فراهم کند.

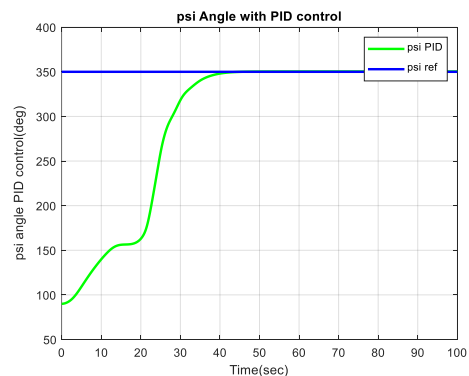


شکل ۲۸. کنترل زاویه سکان شناور به روش فیدبک خطی‌ساز بهینه

در شکل (۲۸) زاویه تیغه سکان در محدوده ۶۰ درجه با توجه به محدودیتی که در شبیه‌سازی، به واسطه ساختار فیزیکی تیغه سکان برای آن لحاظ شد، در حال تغییر، جهت ثابت نگه‌داشتن سمت قایق بادبانی در جهت سمت مطلوب است.



شکل ۲۹. کنترل زاویه سمت شناور به روش فیدبک خطی‌ساز بهینه



شکل ۳۰. کنترل زاویه سمت شناور به روش PID

یک بازه زمانی کوتاه تری نرخ تغییرات سمت را صفر می کند که عملاً در نمودار کنترل سمت (شکل ۲۹) به وضوح این موضوع را تأیید می کند.

در ادامه در جدول شماره ۴ به مقایسه هر دو روش کنترل فیدبک خطی ساز بهینه و PID به ازای سمت های مرجع مختلف پرداخته شده است. همان طور که در جدول مشاهده می شود روش کنترلی فیدبک خطی ساز بهینه به مراتب شرایط بهتری نسبت به روش کنترل PID در کنترل سمت و سرعت قایق بادبانی هوشمند دارد.

جدول ۴. مقایسه روش کنترل فیدبک خطی ساز بهینه (OFLC) و PID

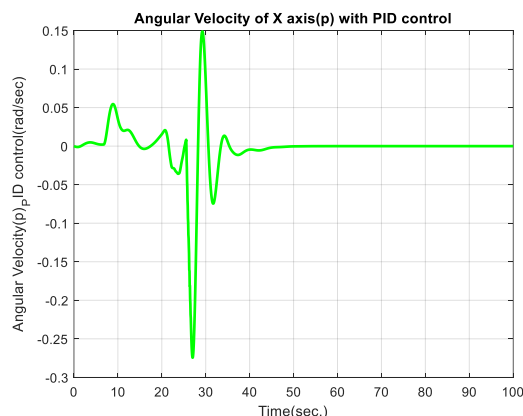
| روش کنترلی | سمت مرجع (درجه) | زمان لازم جهت ردیابی سمت مطلوب (ثانیه) | سرعت (متر بر ثانیه) |
|------------|-----------------|--|---------------------|
| OFCLC      | ۲۷۰             | ۴۲                                     | ۵/۲                 |
|            | ۳۵۰             | ۲۱                                     | ۵/۲                 |
|            | ۳۰              | ۲۰                                     | ۲/۳                 |
| PID        | ۲۷۰             | ۴۱                                     | ۴/۳                 |
|            | ۳۵۰             | ۴۰                                     | ۵                   |
|            | ۳۰              | دنبال نمی کند                          | ۰/۲۵                |

## ۶. جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله، ابتدا یک مدل دینامیکی از قایق بادبانی هوشمند تحت تأثیر اغتشاشات جریان آب دریا، توسعه داده شد.

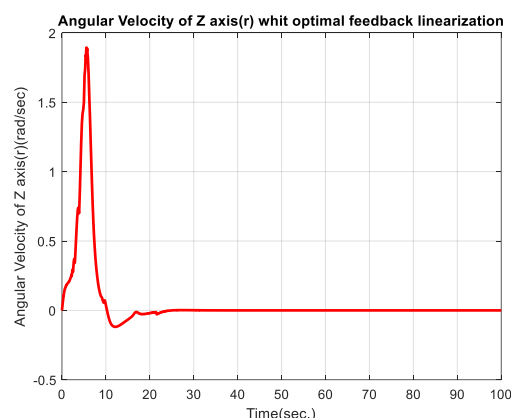
در ادامه با استفاده از کنترل فیدبک خطی ساز و در حضور اغتشاشات جریان آب، یک کنترل کننده مناسب برای کنترل زاویه سکان، جهت کنترل سمت شناور طراحی شد که عمده‌تاً در تحقیقات قبلی به موضوع اغتشاشات ناشی از جریان آب پرداخته نشده بود.

این روش کنترلی با روش کنترل PID مقایسه شد که در تمامی نمودارها مشاهده گردید که به ازای سمت های مرجع مختلف، سمت شناور، بعد از گذشت حدود ۲۰ ثانیه به ازای سمت های مرجع ۳۰ و ۳۵۰ درجه، سمت مطلوب را دنبال می کند.

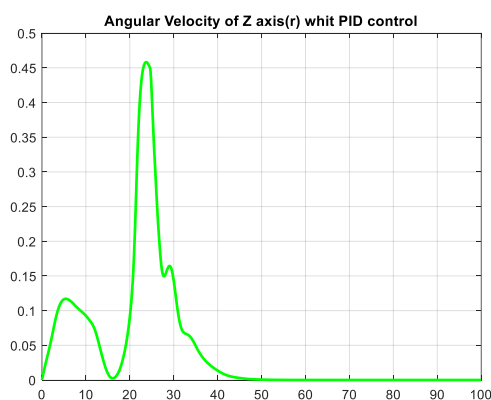


شکل ۳۳. نرخ تغییرات رول شناور به روش PID

نرخ تغییرات رول به نمایش درآمده در شکل های (۳۲) و (۳۳) به وضوح نشان می دهد که روش کنترلی فیدبک خطی ساز بهینه در مدت زمان کوتاه تری نسبت به روش کنترل PID، نرخ تغییرات را به سمت صفر سوق می دهد.



شکل ۳۴. نرخ تغییرات سمت به روش کنترل فیدبک خطی ساز بهینه



شکل ۳۵. نرخ تغییرات سمت شناور به روش کنترل PID

در شکل های (۳۴) و (۳۵) مجدد به ازای سمت مرجع ۳۵۰ درجه، نرخ تغییرات سمت شناور به هر دو روش ترسیم شده است. مشاهده می شود که روش کنترل فیدبک خطی ساز در

- International Conference on System Science and Engineering (ICSSE); 2020 31 Aug.-3 Sept. 2020.
- [6] Wirz J, Tranzatto M, Liniger A, Colombino M, Hesse H, Grammatico S. AEOLUS, the ETH Autonomous Model Sailboat 2015.
- [7] Wille KL, Hassani V, Sprenger F. Modeling and Course Control of Sailboats. IFAC-PapersOnLine. 2016;49(23):532-9.
- [8] Le Gallic M, Tillet J, Jaulin L, Le Bars F. Tight slalom control for sailboat robots. International Robotic Sailing Conference (IRSC); 2018-08-31; Southampton, United Kingdom 2018.
- [9] Herrero P, Jaulin L, Vehí J. Guaranteed Set-point Computation with Application to the Control of a Sailboat. International Journal of Control, Automation and Systems. 2010;8:1-7.
- [10] Abrougui H, Nejm S, Dallagi H. Modeling and Autopilot Design for an Autonomous Catamaran Sailboat Based on Feedback Linearization 2019. 130-5 p.
- [11] Zhang S, Du X, Hu F-F, Huang J-T, editors. An Associatively Recursive Dynamic Backstepping Control Design for Pure-Feedback Nonlinear Systems. 2021 40th Chinese Control Conference (CCC); 2021: IEEE.
- [12] Zhang G, Li J, Li B, Zhang X. Improved Integral LOS Guidance and Path-Following Control for an Unmanned Robot Sailboat via the Robust Neural Damping Technique. Journal of Navigation. 2019;72:1-21.
- [13] Zhang G, Li J, Liu C, Zhang W. A robust fuzzy speed regulator for unmanned sailboat robot via the composite ILOS guidance. Nonlinear Dynamics. 2022;110:1-16.
- [14] Yingjie D, Xianku Z, Guoqing Z. Fuzzy logic based speed optimization and path following control for sail-assisted ships. Ocean Engineering. 2019;171:300-10.
- [15] Abrougui H, Dallagi H, Nejm S. Autopilot Design for an Autonomous Sailboat Based on Sliding Mode Control. Automatic Control and Computer Sciences. 2019;53:393-407.
- [16] Abrougui H, Nejm S. Sliding Mode Control of An Autonomous Sailboat 2018.
- [17] Wille K, Hassani V, Sprenger F. Modeling and Course Control of Sailboats 2016.
- [18] Xiao L, Jouffroy J. Modeling and Nonlinear Heading Control of Sailing Yachts. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2014.

نرخ تغییرات رول و سمت نیز در یک زمان محدود حداقل ۵۰ درصدی، سریع تر به سمت صفر میل می کند.

از طرفی با یک روش ابتکاری به طراحی یک کنترل کننده سرعت، به منظور کنترل زاویه بادبان با هدف پیشینه کردن سرعت پرداخته شد که سرعت شناور بین  $\frac{2}{3}$  تا  $\frac{5}{2}$  متر بر ثانیه به ازای سمت های مرجع مختلف، در حال تغییر است.

## ۷. پیشنهادها

روش های ارائه شده در این مقاله، به خوبی قایق بادبانی هوشمند را در سمت و سرعت مدنظر کنترل نمود اما به هر حال توسعه مدل دینامیکی وسیله در حضور اغتشاشات ناشی از امواج دریا، مسئله ای بود که در این مقاله به آن پرداخته نشد. کار آینده در این مقاله، می تواند اعتبارسنجی این روش کنترلی بر روی قایق بادبانی مدل در دریا و در ادامه توسعه کنترل کننده سکان و بادبان به روش های دیگر، نظیر کنترل کننده مدلغزشی و یا الگوریتم های هوش مصنوعی در حضور اغتشاشات ناشی از امواج دریا باشد.

## سپاسگزاری

بدین وسیله از مجموعه سازمان تحقیقات و جهاد خودکفایی نداجا، که زمینه فعالیت در این حوزه را فراهم نمودند کمال تشکر و قدردانی بعمل می آید.

## مراجع

- [1] Manley J. Unmanned surface vehicles, 15 years of development 2008. 1-4 p.
- [2] Santos D, Gonçalves L. A gain-scheduling control strategy and short-term path optimization with genetic algorithm for autonomous navigation of a sailboat robot. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2019;16:172988141882183.
- [3] Silva MF, Friebe A, Malheiro B, Guedes P, Ferreira P, Waller M. Rigid wing sailboats: A state of the art survey. Ocean Engineering. 2019;187:106150.
- [4] Liu K, Sun Z, Qu Y, Yu J, Huang Y, Zhao W. Research on Key Methods of Autonomous sailboat's Position Keeping Control 2022. 1-6 p.
- [5] Zhou L, Chen K, Chen Z, Dong H, Song D, editors. Course Control of Unmanned Sailboat Based on BAS-PID Algorithm. 2020

## پی‌نوشت‌ها

1. Autonomous
2. Sail boats
3. Guidance, Navigation and Control (GNC)
4. Rudder angle
5. Sail angle
6. Multi Input Multi Output (MIMO)
7. Gain scheduling
8. Cuckoo search algorithm
9. Back-stepping
10. Strict Feedback
11. Sliding mode
12. Chattering
13. North-East-Down