

## هدایت مسیر ربات زیرآبی کابلی با بهره‌گیری از سامانه ناوبری تلفیقی بر پایه فیلتر کالمن زمان پیوسته

سید مصطفی حسینی<sup>۱</sup>، حسن محمدی<sup>۲</sup>

seied64@yahoo.com

۱- مربی، دانشکده مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)  
 ۲- مربی، دانشکده مهندسی برق، گروه الکترونیک، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)

### چکیده

ربات زیرآبی کابلی برای موقعیت‌یابی، ردیابی مسیر، کنترل و هدایت، نیازمند یک سامانه ناوبری دقیق است. به علت محدودیت کاری سامانه موقعیت‌یاب جهانی در زیرآب، سامانه ناوبری اینرسی مهم‌ترین سامانه تعیین موقعیت در تجهیزات زیرآبی است. در این تحقیق، بر اساس دینامیک غیرخطی ربات زیرآبی و به‌منظور بهبود عملکرد ربات زیرآبی در ردیابی مسیر، یک سامانه ناوبری تلفیقی بر پایه حسگرهای اینرسی، قطب‌نما و سرعت‌سنج داپلری ارائه شده است. به‌منظور ترکیب داده‌های حسگرهای سیستم و تخمین موقعیت و وضعیت ربات، از فیلتر کالمن توسعه‌یافته زمان پیوسته استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی در مقایسه با سامانه های ناوبری بر پایه فیلتر کالمن خطی و فیلتر کالمن توسعه یافته زمان گسسته، نشان می‌دهد که سیستم ناوبری تلفیقی پیشنهادی بر پایه فیلتر کالمن توسعه‌یافته زمان پیوسته، موقعیت و وضعیت ربات را در حلقه کنترل با دقت بالایی تخمین زده است.

واژگان کلیدی: ربات زیرآبی کابلی، سامانه ناوبری تلفیقی، فیلتر کالمن توسعه یافته، ترکیب اطلاعات.

تاریخ دریافت مقاله :	۹۷/۰۲/۰۷
تاریخ پذیرش مقاله :	۹۸/۱۲/۲۸

## ۱- مقدمه

در حلقه کنترل و هدایت تجهیزات با شش درجه آزادی حرکت، سامانه ناوبری نقش کامل‌کننده مسیر پس‌خور را دارد. در واقع این سامانه متغیرهای موقعیت، سرعت و وضعیت وسیله متحرک را نسبت به یک دستگاه مرجع محاسبه می‌کند و سپس این اطلاعات را بنا به نیاز، در اختیار سامانه‌های کنترل و هدایت قرار می‌دهد.

سامانه‌های ناوبری به سه دسته کلی اینرسی، غیر اینرسی و تلفیقی تقسیم می‌شوند. سیستم ناوبری اینرسی<sup>۱</sup> مهم‌ترین و پرکاربردترین سامانه ناوبری، در کاربردهای نظامی است. اساس سامانه‌های ناوبری اینرسی بر پایه قوانین نیوتن است. ناوبری اینرسی دارای مزایایی است که آن را از سایر سامانه‌های ناوبری متمایز می‌کند که عبارت‌اند از:

- بی‌نیاز بودن از تجهیزات زمینی
- عدم تأثیرپذیری از عوامل خارجی همچون اختلالات رادیویی و راداری
- امکان استفاده در بردهای زیاد
- از جمله معایب سامانه ناوبری اینرسی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
- هزینه ساخت
- نیاز به تراز کردن اولیه
- افزایش خطای ناوبری باگذشت زمان
- در سامانه ناوبری اینرسی از حسگرهای اینرسی (شتاب سنچ‌ها و ژيروسکوپ‌ها)، برای اندازه‌گیری شتاب خطی و سرعت‌های زاویه‌ای وسیله استفاده می‌شود. امروزه توسعه فناوری MEMS<sup>۲</sup> باعث شده است که هزینه ساخت این حسگرها به میزان زیادی کاهش یابد، به مجموعه شتاب سنچ‌ها و ژيروسکوپ‌ها که با این فناوری تولید می‌شوند<sup>۳</sup> IMU گفته می‌شود [۲، ۱]. به علت ماهیت غیرخطی و خطای زیاد این حسگرها مدل‌سازی و تصحیح خطای آن‌ها مشکل است. در نتیجه، تعیین موقعیت و وضعیت وسیله متحرک هنگام استفاده از این حسگرها با خطای بزرگی همراه است. چون محاسبه سرعت و موقعیت توسط الگوریتم ناوبری بر اساس داده‌های قبلی صورت می‌گیرد، بدیهی است که خطای آن‌ها تجمعی است و به سرعت با زمان افزایش می‌یابد، به خصوص زمانی که در

مأموریت‌های طولانی‌مدت استفاده می‌شود. بنابراین، ضروری است در بازه‌های زمانی مشخص با یک سامانه ناوبری دیگر یا سایر اندازه‌گیری‌های خارجی مستقل، تطابق داده شود و خطای آن تصحیح شود [۳]. به این سامانه، سیستم ناوبری تلفیقی می‌گویند که بر اساس ترکیب اطلاعات حاصل از روش‌های اینرسی و غیر اینرسی عمل می‌کند تا بتواند از مزایای این دو دسته همزمان بهره‌گیرد. در اکثر تجهیزات متحرک که نیاز به سامانه‌های ناوبری دارند، دو نیاز اساسی اما متضاد باید توسط طراح در نظر گرفته شود، به دست آوردن دقت بالا و قیمت پایین است که برآورده سازی این نیازها با استفاده از سامانه‌های ناوبری تلفیقی میسر خواهد شد [۲].

تحقیقات زیادی در زمینه ترکیب داده‌های حسگرهای مختلف با استفاده از الگوریتم‌های محاسباتی گوناگون جهت دستیابی به اطلاعات ناوبری دقیق صورت گرفته است. در مرجع [۱] سامانه ناوبری تلفیقی، شامل سامانه ناوبری اینرسی بر پایه مجموعه حسگرهای ارزان قیمت IMU، سرعت‌سنج داپلری و قطب‌نما ارائه شده است که از فیلتر کالمن بر اساس دینامیک خطا و مدل اندازه‌گیرها برای تخمین خطای حسگرها استفاده شده است و در نهایت از این خطا برای تصحیح موقعیت ربات زیرآبی استفاده شده است. در مرجع [۴] به بررسی الگوریتم تخمین سیستم ناوبری تلفیقی بر پایه حسگرهای اینرسی پرداخته شده است که در آن از فیلتر کالمن توسعه یافته زمان گسسته بر پایه چهار پارامتر اولیبر<sup>۴</sup> برای تخمین پارامترهای ناوبری به صورت مستقیم بهره گرفته شده است. در مرجع [۵] یک سامانه ناوبری بر پایه INS، GPS و رایانه داده‌های هواشناسی<sup>۵</sup> ارائه شده است که با استفاده از فیلتر کالمن داده‌های حاصل از آن‌ها باهم ترکیب می‌شود. در این روش، موقعیت به دست آمده از INS با استفاده از اطلاعات به دست آمده از GPS که دارای دقت بالاتری است اصلاح می‌شود. هنگام در دسترس نبودن سیگنال GPS، داده‌های حاصل از INS با داده‌های ADC اصلاح می‌شود. مزیت سامانه ناوبری پیشنهادی این است که در زمان خرابی و در دسترس نبودن سیگنال GPS از قابلیت اطمینان بالا برخوردار است. در مرجع [۶] سامانه ناوبری تلفیقی

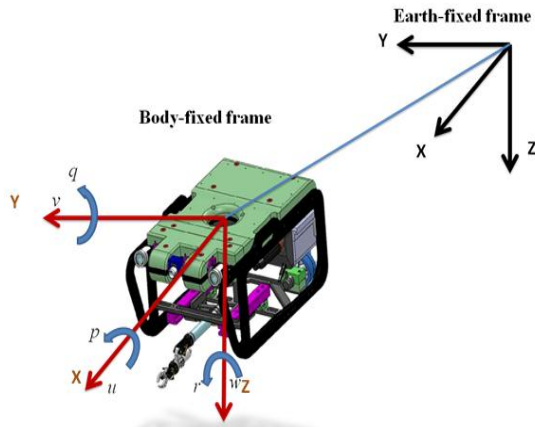
<sup>۱</sup> Inertial Navigation System (INS)

<sup>۲</sup> Micro Electromechanical System

<sup>۳</sup> Inertial Motion Unit

<sup>۴</sup> Quaternion

<sup>۵</sup> Air Data Computer (ADC)



شکل (۱) نمایش دستگاه مختصات بدنی و ثابت زمین یک ربات زیرآبی [۱۱].

سه مؤلفه سرعت خطی  $(u, v, w)$  مربوط به حرکت در سه راستای اصلی  $(x, y, z)$  و سه مؤلفه سرعت زاویه‌ای  $(p, q, r)$  مربوط به زوایای رول و پیچ و یاو می‌باشند که در شکل (۱) نشان داده شده است. بردار اغتشاشات خارجی وارد بر ربات است و بردار  $F$  شامل نیروهای اعمالی در راستای  $(x, y, z)$  و بردار گشتاورهای اعمالی به ربات است که توسط تراسترها تولید می‌شوند.  $M_R$  ماتریس اینرسی که در بردارنده مقادیر جرم افزوده ربات است، ماتریس  $C(x_b)$  در بردارنده شتاب جانب مرکز و کوریولیس افزوده ربات،  $D(x_b)$  ماتریس میرایی ربات و  $g(x_b)$  بردار نیرو و گشتاورهای گرانش شامل وزن و شناوری ربات است. از طرفی  $X_E = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]$  بردار موقعیت ربات در دستگاه مختصات ثابت زمین است که  $x, y, z$  بیانگر موقعیت مکانی و  $\phi, \theta, \psi$  نمایش‌دهنده زوایای رول، پیچ و یاو هستند. ارتباط بین سرعت در دستگاه مختصات بدنی با سرعت در دستگاه مختصات ثابت زمین با رابطه (۲) بیان می‌شود [۱۰].

$$\dot{X}_E^E = J(X_E) \dot{X}_b \quad (2)$$

که  $J(X_E)$  ماتریس انتقال از دستگاه مختصات بدنی به دستگاه مختصات ثابت زمین است.

نمایش فضای حالت معادلات دینامیکی ربات زیرآبی (۱) و (۲) به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\dot{x} = f(x, u, t) + d \quad (3)$$

که  $f(\cdot)$  تابعی غیرخطی از متغیرهای حالت،  $d$  نویز فرآیند،  $u$  بردار سیگنال کنترل و بردار متغیرهای حالت  $x = [p_n, p_e, p_d, \phi, \theta, \psi, u, v, w, p, q, r]^T$  سه مؤلفه

برای تجهیزات زیرآبی ارائه شده، در این روش از مؤلفه‌های سرعت استخراج شده از سرعت سنج داپلری<sup>۱</sup> برای اصلاح تخمین حاصل از سیستم INS استفاده شده است که برای ترکیب این داده‌ها از اعمال فیلتر کالمن به دینامیک خطا استفاده شده است. در مرجع [۷] سامانه ناوبری تلفیقی INS/DVL بر پایه فیلتر کالمن ارائه شده است که برای افزایش دقت تخمین، از فیلتر AIMM<sup>۲</sup> به طور جداگانه برای تنظیم کوواریانس نویز فرایند و نویز اندازه‌گیری استفاده شده است. هر یک از روش‌های پیشنهادی فوق دارای نقاط قوت و ضعف خاص خود هستند. که می‌توان به محدودیت‌های مکانی در استفاده از سیستم‌ها، بالا بودن حجم محاسبات، پایین بودن دقت تخمین، اشاره نمود. در این تحقیق، ابتدا در بخش ۲ معادلات دینامیکی ربات زیرآبی بررسی می‌شود. در بخش ۳ سامانه ناوبری تلفیقی بر پایه فیلتر کالمن توسعه یافته زمان پیوسته به عنوان یک ابزار ریاضی قوی و مطمئن در حل مسائل تخمین ارائه شده است. عملکرد الگوریتم پیشنهادی در بخش ۴ به صورت برخط در حلقه کنترل ربات، شبیه‌سازی شده است و نتیجه‌گیری و پیشنهاد در بخش ۵ بیان شده است.

## ۲- معادلات ربات زیرآبی

ربات زیرآبی دارای معادلات دینامیکی غیرخطی و بسیار وابسته<sup>۳</sup> است و از سوی دیگر بسیاری از پارامترهای این معادلات با زمان و مکان تغییر می‌کنند. ربات مورد بررسی در این تحقیق که در شکل (۱) نمایش داده شده است یک ربات زیرآبی کابلی<sup>۴</sup> است که دارای چهار تراستر جهت تأمین نیروی پیشران آن در جهات مختلف است.

نمایش ماتریسی دینامیک غیرخطی ربات با شش درجه آزادی در دستگاه مختصات بدنی<sup>۵</sup> که مرکز آن در مرکز ثقل ربات است به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۸،۹].

$$M_R \dot{X}_b^E + C(X_b) \dot{X}_b + D(X_b) X_b + g(X_E) = F + F_d \quad (1)$$

$$F^T = [F^x \ F^y \ F^z \ T^k \ T^m \ T^n]$$

$$X_b^T = [u \ v \ w \ p \ q \ r]$$

$X_b$  بردار متغیرهای حالت ربات در دستگاه مختصات بدنی است که در بردارنده سرعت خطی و زاویه‌ای ربات است.

<sup>1</sup> Doppler Velocity Log (DVL)

<sup>2</sup> Adaptive Interacting Multiple Model

<sup>3</sup> Coupled

<sup>4</sup> Remotely Operated Vehicle (ROV)

<sup>5</sup> Body Fixed Frame

$$+ \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}$$

که:

$y_a$  بردار خروجی شتاب سنج در راستای سه محور اصلی  
 $M_{ij}$  میزان خطای حساسیت محور  $i$  ام خروجی نسبت به  
 محور  $j$  ام ورودی

$S_i$  خطای ضریب مقیاس<sup>۳</sup> محور  $i$  ام  
 $b_i$  مقدار بایاس در راستای محور  $i$  ام  
 $v_i$  مقدار نویز سفید در راستای محور  $i$  ام  
 $a_i^b$  مقدار شتاب وسیله در دستگاه مختصات بدنه در  
 راستای محور  $i$  ام است.

کلیه این پارامترها با افزایش درجه حرارت تغییر می کنند.  
 نمایش ماتریسی مدل خطای شتاب سنج به صورت زیر بیان  
 می شود.

$$y_a = M_a S_a a + b_a + v_a \quad (5)$$

### ۳-۲- مدل خطای ژيروسکوپ

منابع عمده خطای اندازه گیری سرعت زاویه ای توسط  
 ژيروسکوپ عبارت اند از:

- ناهمراستایی محور ورودی ژيروسکوپ
- دریافت ژيروسکوپ (شامل جملات مستقل از  $g$ ،  
 جملات حساس به  $g$  و  $g^2$ )
- خطای ضریب مقیاس ژيروسکوپ

با فرض بر اینکه پیکربندی نامی ژيروسکوپها متعامد بوده  
 و دریافت های حساس به  $g$  و حساس به  $g^2$ ، عدم تقارن،  
 ضریب مقیاس (در صورت وجود) قابل صرف نظر کردن باشد  
 مدل ژيروسکوپ به صورت زیر تعریف می شود [۱۲].

$$y_g = M_g S_g w + b_g + v_g \quad (6)$$

که:

$w = [p, q, r]$  بردار سرعت زاویه ای وسیله است

$b_g$  بردار بایاس روی سه محور

$v_g$  بردار نویز سفید روی سه محور

$M_g$  ماتریس حساسیت ژيروسکوپها

$S_g$  ماتریس ضریب مقیاس

اول بردار، موقعیت خطی ربات در دستگاه ثابت زمین، سه  
 مؤلفه دوم وضعیت زاویه ای ربات (رول، پیچ و یاو) و شش  
 مؤلفه آخر سرعت خطی و زاویه ای ربات زیرآبی هستند.

### ۳- سامانه ناوبری

فرایند کنترل شناورهای دریایی معمولاً شامل سه قسمت  
 مستقل کنترل، هدایت<sup>۱</sup> و ناوبری<sup>۲</sup> است. این قسمت ها از  
 طریق اطلاعات و سیگنال های ارسالی مطابق شکل (۲)  
 متقابلاً روی هم اثر می گذارند.

محاسبه متغیرهای حالت  $x$  در رابطه (۳) جهت کنترل  
 ربات ضروری است که این اطلاعات مطابق شکل (۲) توسط  
 سامانه ناوبری تأمین می شوند.

خروجی حاصل از شتاب سنجها و ژيروسکوپهای  
 مجموعه IMU دارای خطاهای مختلف چون نویز و بایاس  
 است که باعث افزایش خطا در سامانه ناوبری اینرسی  
 می شود. در این تحقیق برای کاهش خطا به ارائه یک  
 سیستم ناوبری تلفیقی شامل حسگرهای اینرسی،  
 قطب نما مغناطیسی و یک سرعت سنج داپلری به عنوان  
 حسگر خارجی می پردازیم که با ترکیب اطلاعات حاصل از  
 این حسگرها به تخمین متغیرهای حالت ربات می پردازیم.  
 برای این منظور ابتدا به بررسی خطای حسگرها  
 پرداخته شده است.

### ۳-۱- مدل خطای شتاب سنج

منابع عمده خطای اندازه گیری توسط شتاب سنجها:

- ناهمراستایی محور ورودی شتاب سنج
- بایاس شتاب سنج
- خطای ضریب مقیاس شتاب سنج شامل اثرات  
 غیرخطی و همچنین خطاهای مرتبه بالاتر

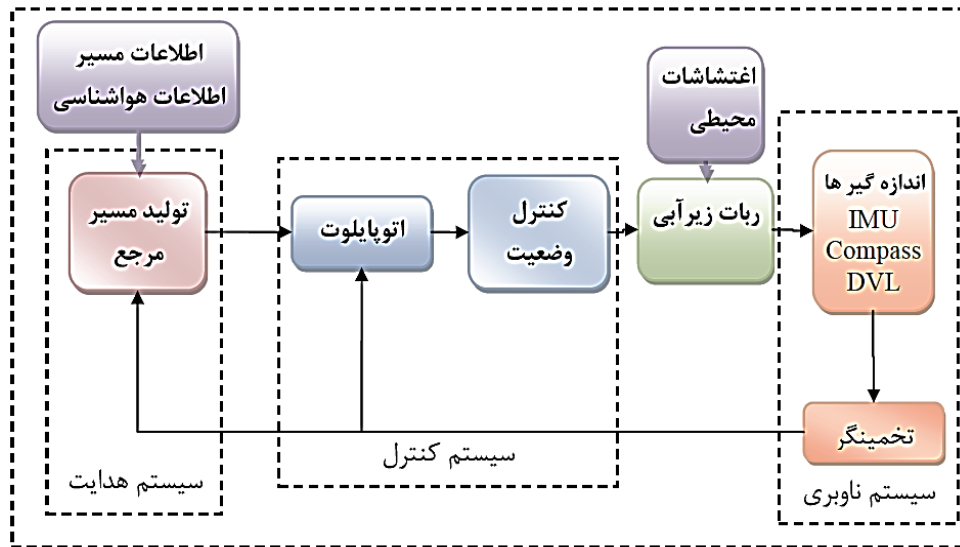
حال با فرض اینکه پیکربندی نامی شتاب سنجها متعامد  
 بوده و اثرات غیرخطی درجه دوم و بالاتر و نیز عدم تقارن  
 ضریب مقیاس (در صورت وجود) قابل صرف نظر باشند مدل  
 خطای شتاب سنج را می توان چنین نوشت [۱۲].

$$y_a = \begin{bmatrix} 1 & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & 1 & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{S_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{S_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{S_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

<sup>1</sup> Guidance

<sup>2</sup> Navigation

<sup>3</sup> Scale Factor



شکل (۲) بلوک دیاگرام کنترل ربات زیرآبی.

منبع خطای اندازه گیر در حسگر سرعت سنج داپلری مربوط به ضریب مقیاس است که این خطا ناشی از عدم قطعیت موجود در سرعت صوت در آب دریا است که به میزان شوری آب وابسته است.

#### ۳-۴ - قطب نما

قطب نما حسگری است که شدت و جهت میدان مغناطیسی را اندازه گیری می کند. اگر بردار میدان مغناطیسی زمین مشخص باشد خروجی حسگر قادر به تخمین سمت ربات زیرآبی خواهد بود. مدل ریاضی قطب نما در صورتی که از انحرافات مغناطیسی صرف نظر کنیم به صورت زیر بیان می شود [۹]:

$$y_m = M_m S_m m_b + b_m + v_m \quad (۸)$$

که:

$m_b$  بردار میدان مغناطیسی زمین در دستگاه مختصات بدنی<sup>۴</sup> است.

$M$  میزان خطای حساسیت ناشی از ناهمترایی<sup>۵</sup> محورها

$S$  خطای ضریب مقیاس

$b_m$  بردار بایاس حسگر روی سه محور

$v_m$  بردار نویز سفید ناشی از اندازه گیری روی سه محور

چون می خواهیم از حسگر برای تعیین سمت ربات زیرآبی استفاده کنیم، نیاز است که میدان مغناطیسی زمین در

#### ۳-۳ - سرعت سنج داپلری

سرعت خطی وسیله را نسبت (DVL) سرعت سنج داپلری به کف دریا محاسبه می کند این حسگر یک وسیله آکوستیکی<sup>۱</sup> است که امواج صوتی را از طریق آب دریا ارسال می کند و مقدار بازتابش این امواج از کف دریا را با یک اکوساندر چند پرتوی<sup>۲</sup> اندازه گیری می کند در این امواج بازتابیده یک شیفت داپلری<sup>۳</sup> وجود خواهد داشت که با سرعت ربات زیرآبی رابطه دارد. خروجی این حسگر سرعت را نشان DVL ربات در دستگاه مختصات ثابت حسگر می دهد که برای محاسبه این سرعت در دستگاه مختصات بدنی بایستی از دستگاه مختصات حسگر به دستگاه مختصات بدنه انتقال یابد. مدل اندازه گیر سرعت سنج داپلری بصورت زیر تعریف می شود [۱۳]:

$$y_v = R^{DVLb} (v_t^b + w_t r^{DVLb}) + v_{DVL} \quad (۷)$$

که در این رابطه:

$R^{DVLb}$  ماتریس انتقال از دستگاه مختصات بدنی به دستگاه مختصات حسگر DVL است.

$v_t^b$  بردار سرعت ربات زیرآبی در دستگاه مختصات بدنی

$w_t$  بردار سرعت زاویه ای در دستگاه مختصات بدنی

$r^{DVLb}$  بردار بین مرکز سرعت سنج داپلری و مرکز جرم

ربات زیرآبی است.

$v_{DVL}$  نویز اندازه گیر

<sup>4</sup> Body Frame

<sup>5</sup> Misalignment

<sup>1</sup> Acoustic

<sup>2</sup> Multi-Beam Echo-Sounder

<sup>3</sup> Doppler Shift

خط<sup>۱</sup> استفاده شود. چون معادلات دینامیکی ربات زیرآبی (۱) غیرخطی هستند در نتیجه، استفاده از فیلتر کالمن به صورت مستقیم در این مسئله ممکن نیست و فرض خطی بودن معادلات ربات زیرآبی، محدودکننده بوده و در برابر خطاهای تقریبی غیرخطی سیستم، مقاوم نیست [۱۴].

به همین دلیل برای تخمین متغیرها از فیلتر کالمن توسعه یافته<sup>۲</sup> (EKF) بهره گرفته شده است؛ که الگوریتم آن مطابق جدول (۱) است. در فیلتر کالمن توسعه یافته، با استفاده از بسط تیلور مرتبه اول حول بهترین تخمین موجود، مدل‌های غیرخطی را با مدل‌های خطی تقریب می‌زنیم. در این حالت می‌توان فیلتر کالمن را به سیستم خطی به دست آمده اعمال کرد.

در حالت کلی یک سیستم دینامیکی و معادلات اندازه‌گیری همراه با نویز جمع شونده با روابط بازگشتی زیر تعریف می‌شوند [۱۴]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) + w, & w &\approx N(0, Q) \\ z &= h(x) + v, & v &\approx N(0, R) \end{aligned} \quad (11)$$

که بردار حالت سیستم با  $n$  بعد، بردار ورودی سیستم، بردار خروجی با  $m$  بعد،  $f(\cdot), h(\cdot)$  به ترتیب توابع غیرخطی سیستم و اندازه‌گیر است.  $w, v$  به ترتیب بردار نویز سیستم و اندازه‌گیر می‌باشند. که فرض می‌شود از نوع نویز گوسی بوده و مستقل از هم و مستقل از شرایط اولیه بردار حالت هستند. ماتریس‌های  $Q, R$  به ترتیب ماتریس کوواریانس نویزهای اندازه‌گیر و فرآیند می‌باشند. تخمین بردار حالت  $x$  از روی بردار اندازه‌گیر  $z$  با فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF) به طور کلی در دو مرحله پیش‌بینی و به‌روزرسانی صورت می‌گیرد. در مرحله پیش‌بینی، بردار حالت در هر لحظه بر اساس اطلاعات و بردار حالت در لحظه قبلی محاسبه می‌شود؛ که در این مورد خاص، بردار حالت شامل بردارهای سرعت و موقعیت در دستگاه مختصات ثابت زمین است. در حقیقت منظور از بخش پیش‌بینی، تعیین موقعیت و سرعت در هر لحظه توسط مشاهدات دریافتی از اندازه‌گیرها در لحظه پیش از آن است. بخش دوم به‌روزرسانی است که تنها زمانی صورت می‌گیرد که مشاهده جدیدی از حسگرها دریافت شود.

مختصات بدنی ربات  $m_b$  بیان شود. لذا بایستی در معکوس ماتریس انتقال  $R(\varphi, \theta, \psi)$  که تابعی از زوایای اوپلر است ضرب شود. اگر بردار میدان مغناطیسی اندازه گرفته شده در دستگاه مختصات زمین ثابت باشد داریم:

$$m_b = R^T(\varphi, \theta, \psi)m_f \quad (9)$$

حال مدل قطب‌نما به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$y_m = R^T(\varphi, \theta, \psi)m_f + b_m + v_m \quad (10)$$

که:

$m_f$  میدان مغناطیسی اندازه گرفته شده در دستگاه مختصات زمین ثابت

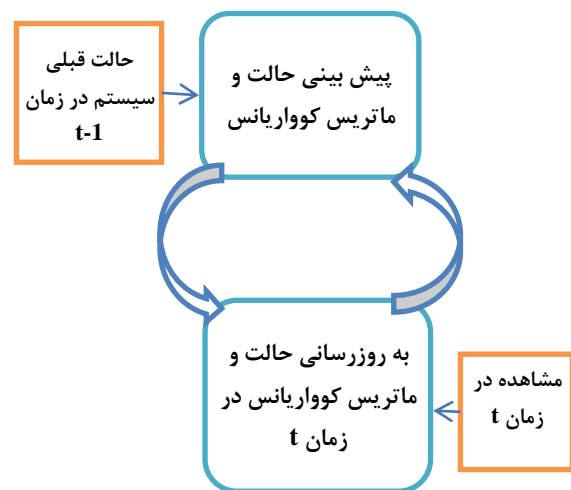
$R^T(\varphi, \theta, \psi)$  معکوس ماتریس انتقال

$b_m$  بردار بایاس حسگر روی سه محور

$v_m$  بردار نویز سفید ناشی از اندازه‌گیری روی سه محور

### ۵-۳- الگوریتم تخمین موقعیت ربات

با بررسی خطای حسگرها در بخش‌های قبل ارائه یک روش بر پایه تخمین متغیرهای حالت ضروری به نظر می‌رسد. یکی از مهم‌ترین روش‌های تخمین، بهره‌گیری از فیلتر کالمن است؛ که در این روش تخمین به صورت بازگشتی مطابق شکل (۳) با استفاده از مدل فضای حالت انجام می‌شود.

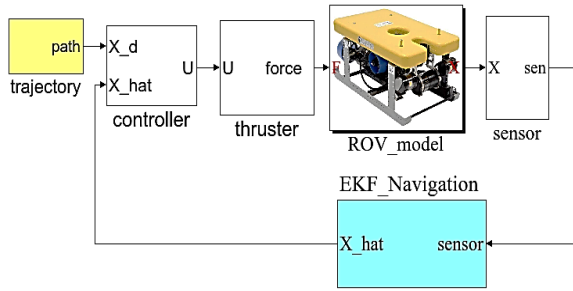


شکل (۳) بلوک دیاگرام فیلتر کالمن.

این ویژگی بازگشتی باعث شده است که از فیلتر کالمن به صورت گسترده برای حل مسائل مهندسی به صورت بر

<sup>1</sup> Online

<sup>2</sup> Extended Kalman Filter



شکل (۴) پیاده سازی در محیط سیمولینک.

کنترل کننده طراحی شده برای ربات، یک کنترل کننده مود لغزشی است که متغیرهای حالت مورد نیاز آن به صورت برخط مطابق شکل (۴) از سامانه ناوبری پیشنهادی تأمین می شود. مدل مورد استفاده در شبیه سازی یک ربات زیرآبی کابلی با شش درجه آزادی که دینامیک آن در بخش ۲ توضیح داده شد، است. پارامترهای مورد نیاز شبیه سازی ربات مطابق جدول (۲) هستند [۱۱].

اطلاعات مربوط به حسگرهای به کاررفته در سامانه ناوبری پیشنهادی برای ربات مطابق جداول (۳ و ۴) است. مطابق شکل (۴) داده های مورد نیاز فیلتر کالمن توسعه یافته به صورت برخط از طریق بلوک حسگر در حلقه کنترل تأمین و خروجی آن در اختیار بلوک کنترل قرار می گیرد.

جدول (۲) پارامترهای ربات زیرآبی [۱۱].

$X_u = -72 \text{kg s}^{-1}, X_{\dot{u}} = -29 \text{kg}, X_{u u} = 0 \text{kg m}^{-1}$ $Y_v = -77 \text{kg s}^{-1}, Y_{\dot{v}} = -30 \text{kg}, Y_{v v} = 0 \text{kg m}^{-1}$ $Z_w = -95 \text{kg s}^{-1}, Z_{\dot{w}} = -90 \text{kg}, Z_{w w} = 0 \text{kg m}^{-1}$ $K_p = -40 \text{kg m s}^{-1}, K_{\dot{p}} = -5.2 \text{kg m}, K_{p p} = 0 \text{kg m}$ $M_q = -30 \text{kg m s}^{-1}, M_{\dot{q}} = -7.2 \text{kg m}, M_{q q} = 0 \text{kg m}$ $N_r = -30 \text{kg m s}^{-1}, N_{\dot{r}} = -3.3 \text{kg m}, N_{r r} = 0 \text{kg m}$	ضرایب هیدرو دینامیک
$I_{xx} = 1.32 \text{Kg m}^2, I_{xy} = I_{yx} = 0 \text{Kg m}^2$ $I_{yy} = 2.08 \text{Kg m}^2, I_{yz} = I_{zy} = 0 \text{Kg m}^2$ $I_{zz} = 2.32 \text{Kg m}^2, I_{zx} = I_{xz} = 0 \text{Kg m}^2$	ممان اینرسی
$x_G = 0 \text{m}, y_G = 0 \text{m}, z_G = 0 \text{m}$ $x_B = 0 \text{m}, y_B = 0 \text{m}, z_B = -1 \text{m}$	مركز جرم و مركز ناوبری
$\rho = 1024 \text{kg m}^3 \quad m = 98.5 \text{kg} \quad g = 9.81 \text{m s}^{-2}$	پارامترها

در این مرحله موقعیت و سرعت پیش بینی شده با استفاده از ماتریس بهره کالمن (K) تصحیح شده و ماتریس کوواریانس خطای تخمین (P) نیز به روز می گردد.

$$E \{e(t)e^T(t)\} = E \{(x - \hat{x})(x - \hat{x})^T\} = P(t) \quad (12)$$

#### ۴- نتایج شبیه سازی

عملکرد سامانه ناوبری ارائه شده، در قالب یک حلقه کنترل برای هدایت مسیر یک ربات زیرآبی جستجوگر در محیط سیمولینک مطابق شکل (۴) شبیه سازی می شود.

حداقل سازی تأثیر نویزهای فرایند و اندازه گیری در روند تخمین متغیرهای حالت سیستم است، دست پیدا می کند. در واقع، فیلتر کالمن توسعه یافته با کمینه سازی ماتریس کوواریانس خطای تخمین ماتریس های F, H به ترتیب از بسط تیلور مدل غیرخطی حسگرها و مدل دینامیکی ربات به دست می آیند [۱۵].

شبیه سازی با این فرض که ربات زیرآبی یک ربات جستجوگر بوده و مأموریت آن جستجو در یک محدوده مشخص است، انجام می گیرد.

جدول (۱) فلوچارت فیلتر کالمن توسعه یافته زمان پیوسته [۱۴]

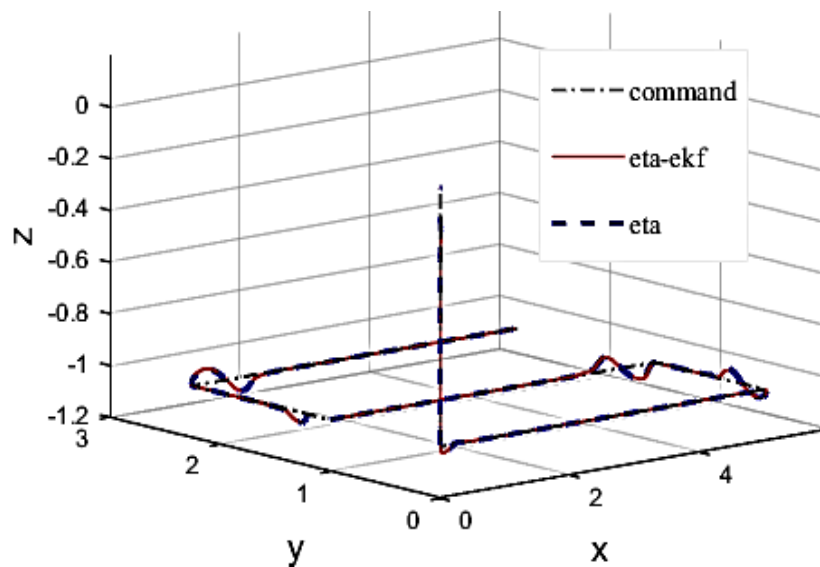
مدل دینامیکی غیرخطی: $\dot{x}(t) = f(x(t), t) + w(t), w(t) \approx N(0, Q(t))$
مدل غیرخطی اندازه گیر: $z(t) = h(x(t), t) + v(t), L v(t) \approx N(0, R(t))$
<b>معادلات کاربردی:</b>
معادله دیفرانسیل تخمین حالت: $\dot{\hat{x}}(t) = f(\hat{x}(t), t) + \bar{K}(t)[z(t) - \hat{z}(t)]$
پیش بینی اندازه گیر: $\hat{z}(t) = h(\hat{x}(t), t)$
معادلات تقریب خطی: $F^{(1)}(t) \approx \frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \Big _{x=\hat{x}(t)}$ $H^{(1)}(t) \approx \frac{\partial h(x, t)}{\partial x} \Big _{x=\hat{x}(t)}$
معادلات بهره کالمن: $\dot{P}^{(1)}(t) = F^{(1)}(t)P(t) + P(t)F^{(1)T}(t) + G(t)Q(t)G^T(t) - \bar{K}(t)R(t)\bar{K}^T(t)$ $\bar{K}(t) = P(t)H^{(1)T}(t)R^{-1}(t)$

جدول (۴) پارامترهای بلوک IMU [۱۰].

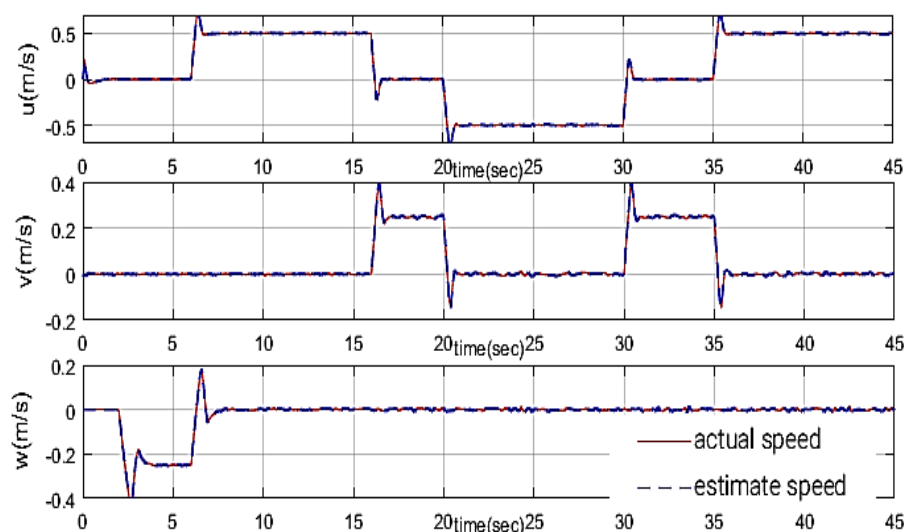
Sensor name	Noise variance	Bias $k_i$	Sensitivity
Rate gyroscope	$147 \times 10^{-4}$	2.48mV	24.804mV//s
x-axis	$147 \times 10^{-4}$	.25mV	24.922mV//s
y-axis	$147 \times 10^{-4}$	1.75mV	24.943mV//s
z-axis			
accelerometer	$6 \times 10^{-3}$	9.46mV	3.753V/g
x-axis	$6 \times 10^{-3}$	14.09mV	3.747V/g
y-axis	$6 \times 10^{-3}$	-7.26mV	3.760V/g
z-axis			

جدول (۳) پارامترهای حسگر DVL و مغناطیس سنج [۱۰].

Measurement	Bias	Noise Variance	accuracy (m/s) <sup>2</sup>	
DVL	Surge	$1.5 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-5}$	$1.44 \times 10^{-4}$
	Sway	$.7 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$	$1.44 \times 10^{-4}$
	Heave	$.5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1.44 \times 10^{-4}$
magnetometer	Heading	-	$8.4 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$
	Pitch & Roll	-	$6.1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$



شکل (۵) آزمون ردیابی ربات با استفاده از سامانه ناوبری ارائه شده (رنگ مشکی مسیر مرجع برای ربات، رنگ آبی ردیابی مسیر با فرض اینکه متغیرها را داریم، رنگ قرمز ردیابی مسیر با استفاده از تخمین زده شده توسط سامانه ناوبری پیشنهادی).



شکل (۱) عملکرد سیستم ناوبری در تخمین مؤلفه‌های سرعت خطی (رنگ قرمز مقدار واقعی سرعت و خط چین آبی مقدار تخمین سرعت را نشان می‌دهد).

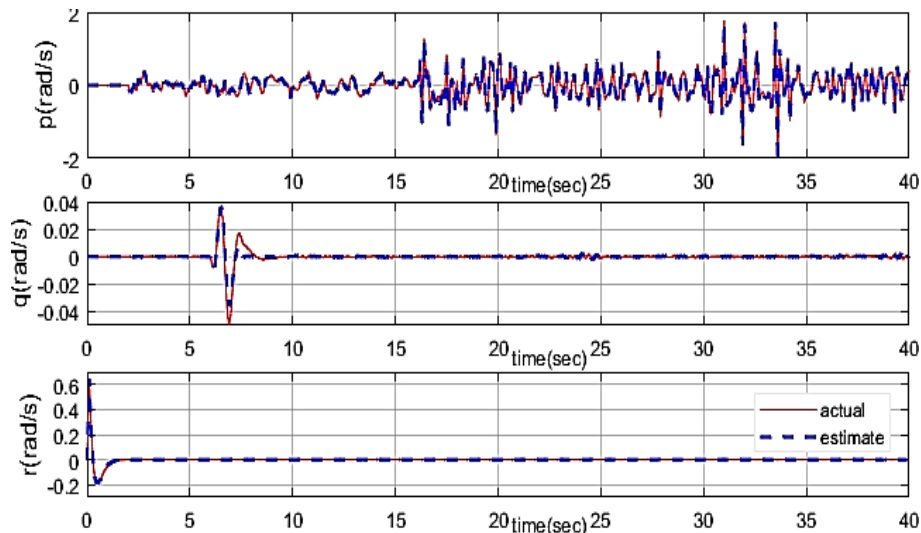


مقدار خطای تخمین مؤلفه‌های سرعت خطی و سرعت زاویه‌ای در هر سه جهت  $(x,y,z)$  در شکل‌های (۹ و ۱۰) بیانگر دقت الگوریتم در تخمین پارامترهای ناوبری است. عملکرد الگوریتم تخمین پیشنهادی با الگوریتم‌های تخمین ارائه‌شده در مراجع [۱،۴] که بر پایه فیلتر کالمن خطی و فیلتر کالمن توسعه‌یافته زمان گسسته مبتنی بر کواترنیون می‌باشند، مقایسه می‌شود.

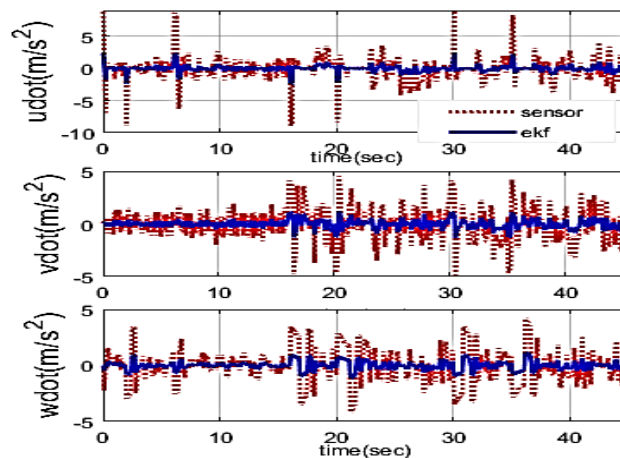
برای این منظور با پیاده‌سازی هر دو سامانه ناوبری مراجع فوق، در قالب حلقه کنترل ربات زیرآبی مسیریاب، شبیه‌سازی مطابق شکل (۴) انجام شد. مقدار مینیمم مربع خطای تخمین موقعیت  $(x,y,z)$  برای هر سه روش از رابطه (۱۳) به دست می‌آید.

طراحی مسیر ربات در زمان شبیه‌سازی به این صورت است که ربات پس از قرار گرفتن در یک عمق تعیین‌شده، محدوده مشخصی را به صورت ماشین چمن‌زن جستجو می‌کند. شکل (۵) مقایسه عملکرد ربات در ردیابی مسیر در سه جهت  $(x,y,z)$  با سامانه ناوبری پیشنهادی با شرایطی که فرض شود تمام متغیرهای واقعی در حالت ایده‌آل در دسترس است مقایسه شده است.

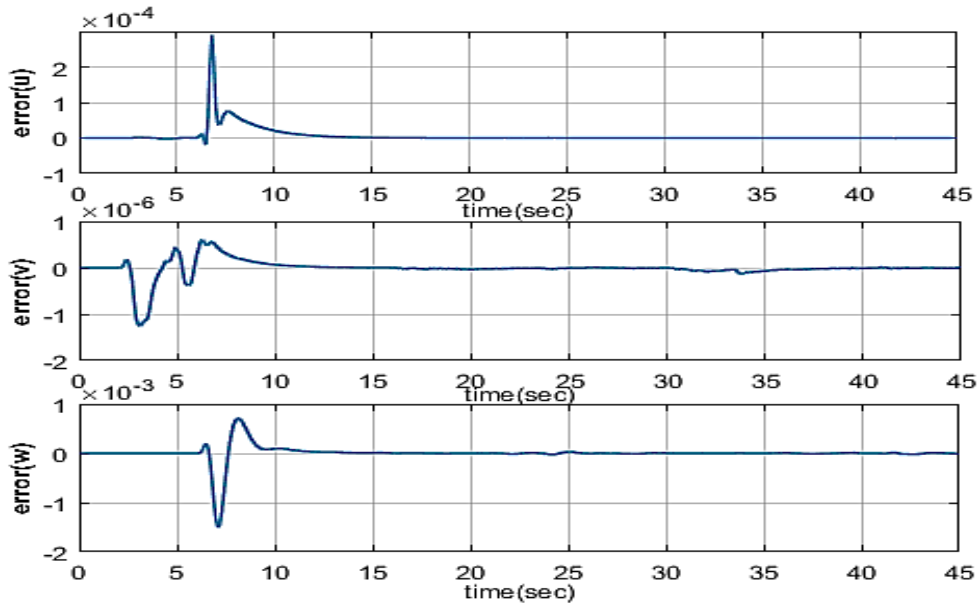
مقایسه عملکرد سامانه ناوبری در تخمین سه مؤلفه سرعت خطی  $(u,v,w)$  و سه مؤلفه سرعت زاویه‌ای  $(p,q,r)$  ربات در مدت زمان ردیابی مسیر توسط ربات با مقدار واقعی این سرعت‌ها در شکل‌های (۶ و ۷) نمایش داده شده است. شکل (۸) عملکرد فیلتر را در حذف نویز و بایاس خروجی شتاب سنجه‌ها قبل و بعد از فیلتر شدن را نمایش می‌دهد.



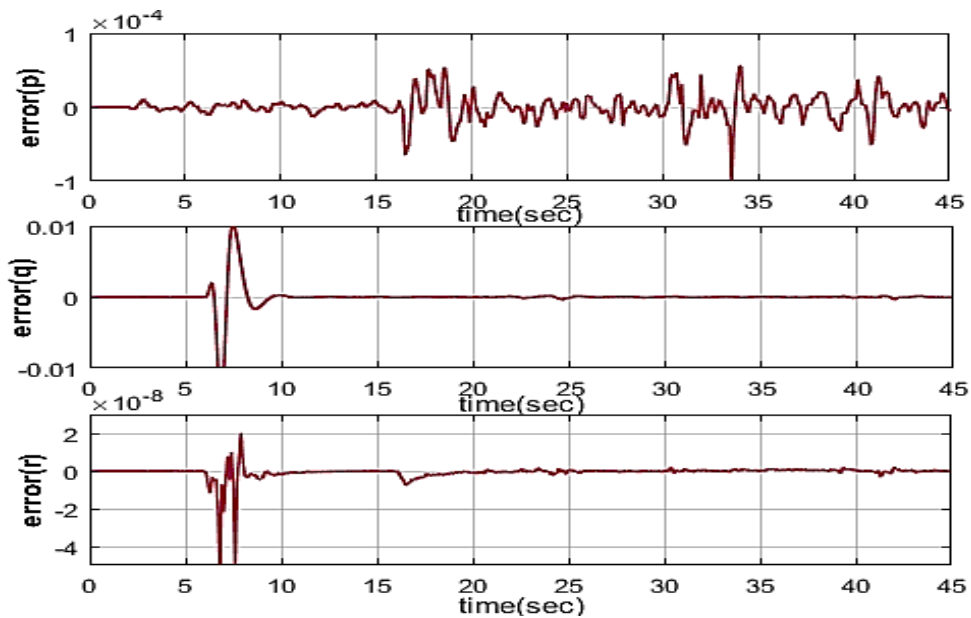
شکل (۲) عملکرد سیستم ناوبری در تخمین مؤلفه‌های سرعت زاویه‌ای (رنگ قرمز مقدار واقعی سرعت و خط چین آبی مقدار تخمین سرعت را نشان می‌دهد).



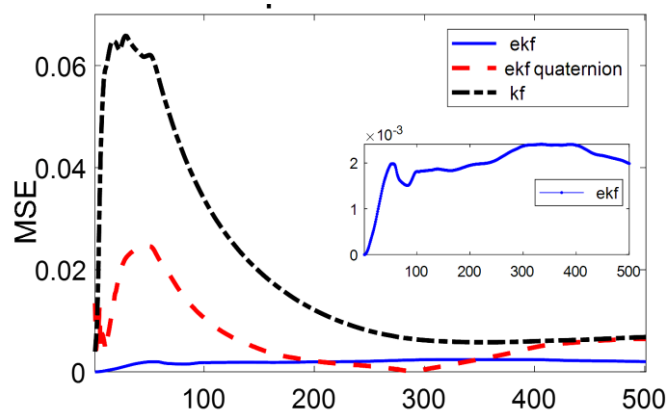
شکل (۳) مقایسه خروجی‌های حسگر شتاب سنجه با خروجی فیلتر پیشنهادی (خط چین قرمز خروجی واقعی حسگرها قبل از فیلتر و رنگ آبی خروجی فیلتر شده را نشان می‌دهد).



شکل (۴) میزان خطای تخمین مؤلفه‌های سرعت خطی.



شکل (۵) میزان خطای تخمین مؤلفه‌های سرعت زاویه‌ای.



شکل (۶) مینیمم مربع خطای تخمین موقعیت (X, Y, Z).

تخمین می‌زند. عملکرد روش پیشنهادی در حلقه کنترل ربات مسیریاب و در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها، مبین دقت روش پیشنهادی در تخمین موقعیت و وضعیت ربات است.

#### ۶- مراجع

- [1] M. Dinc And C. Hajiye, "Integration of Navigation Systems for Autonomous Underwater Vehicles," J. Mar. Eng. Technol., Vol. 14, No. 1, Pp. 32-43, 2015.
- [2] K. R. Britting, Inertial Navigation Systems Analysis. 1971.
- [3] V. Sokolović, G. Dikic, G. Markovic, R. Stancic, And N. Lukic, "INS/GPS Navigation System Based On Mems Technologies," Strojniški Vestnik-Journal Mech. Eng., Vol. 61, No. 7-8, Pp. 448-458, 2015.
- [4] M. Zhang, K. Li, B. Hu, and C. Meng, "Comparison of Kalman Filters for Inertial Integrated Navigation," Sensors, vol. 19, no. 6, p. 1426, 2019.
- [5] S. Topczewski, M. Żugaj, J. Narkiewicz, And A. Pawełek, "Integrated Attitude and Navigation System for Small Airplane," J. Kones, Vol. 24, No. 1, Pp. 339-348, 2017.
- [6] A. Tal, I. Klein, And R. Katz, "Inertial Navigation System/Doppler Velocity Log (INS/DVL) Fusion With Partial Dvl Measurements," Sensors, Vol. 17, No. 2, P. 415, 2017.
- [7] C. Zhang, C. Guo, And D. Zhang, "Data Fusion Based on Adaptive Interacting Multiple Model for GPS/INS Integrated Navigation System," Appl. Sci., Vol. 8, No. 9, P. 1682, 2018.
- [8] T. I. Fossen, Marine Control System-Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs And Underwater Vehicles. 2002.
- [9] M. Hosseini and S. Seyedtabaii, "Improvement In ROV Horizontal Plane Cruising Using Adaptive Method," in 2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2016, pp. 1892-1896.
- [10] M. Hosseini and S. Seyedtabaii, "Robust ROV Path Following Considering Disturbance and Measurement Error Using Data Fusion," Appl. Ocean Res., vol. 54, pp. 67-72, 2016.
- [11] L. G. García-Valdovinos, T. Salgado-Jiménez, M. Bandala-Sánchez, L. Nava-Balazar, R. Hernández-Alvarado, and J. A. Cruz-Ledesma, "Modelling, Design And Robust Control Of A Remotely Operated Underwater Vehicle," Int. J. Adv. Robot. Syst., vol. 11, no. 1, p. 1, 2014.
- [12] W. S. Widnall and P. A. Grundy, Inertial Navigation System Error Models. Intermetrics Incorporated, 1973.
- [13] M. A. Skoglund, F. Gustafsson, and K. Jönsson, "Modeling And Sensor Fusion Of A Remotely

$$MSE = \sqrt{(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2 + (z - \hat{z})^2} \quad (13)$$

شکل (۱۱) مینیمم مربع خطای تخمین موقعیت (x, y, z) برای هر سه روش را نمایش می‌دهد. واضح است که مینیمم مربع خطای تخمین موقعیت در روش پیشنهادی که از فیلتر کالمن توسعه یافته زمان پیوسته استفاده شده مطابق شکل (۱۱) در مقایسه با دو الگوریتم دیگر بهبود یافته است. مقدار مینیمم مربع خطای تخمین موقعیت در ردیابی مسیر برای هر سه روش در طول زمان شبیه‌سازی در جدول (۵) نشان داده شده است

خط چین قرمز فیلتر EKF گسسته و رنگ آبی فیلتر کالمن EKF زمان پیوسته و رنگ مشکی فیلتر کالمن خطی

ماکزیمم خطای تخمین موقعیت در سه راستای (X, Y, Z) از رابطه (۱۴) به دست می‌آید.

$$MAXE = MAX \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |(x_i(k) - \hat{x}_{hat}_i(k))| \quad (14)$$

میزان ماکزیمم خطای تخمین موقعیت مربوط به هر سه روش شبیه‌سازی شده در جدول (۶) نشان داده شده است.

جدول (۵) مقدار خطای MSE

	KF	DEKF	EKF زمان پیوسته
MSE	۹/۳۴۸	۳/۱۷۷۹	۰/۹۸۸۴

جدول (۶) مقدار خطای MAXE

MAXE	KF	DEKF	EKF زمان پیوسته
x	۳/۱۵۰	۱/۶۶	۰/۱۱۹
y	۰/۶۶	۲/۵۴	۰/۷۷
z	۰/۰۱۸	۰/۰۱۲	۰/۶

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به ارائه یک سامانه ناوبری تلفیقی بر پایه حسگرهای اینرسی ارزان قیمت، سرعت سنج داپلری و قطب‌نما پرداختیم. با توجه به مشکل دینامیک غیرخطی ربات زیرآبی و خطاهای موجود در حسگرهای مختلف بکار رفته در سامانه ناوبری، از ترکیب اطلاعات حاصل از حسگرها برای تصحیح خروجی سامانه ناوبری استفاده شد. الگوریتم پیشنهادی برای ترکیب داده‌ها، از فیلتر کالمن توسعه یافته زمان پیوسته بهره گرفته است که متغیرهای حالت ربات زیرآبی را -که مورد نیاز حلقه کنترل هستند-

- Operated Underwater Vehicle,” in 2012 15th International Conference on Information Fusion, 2012, pp. 947–954.
- [14] G. Mohinder and A. Andrews, “Kalman filtering, Theory and Practice using Matlab”, JohnWiley & Sons.” Inc, 2008.
- [15] L. Ascorti, “An Application Of The Extended Kalman Filter To The Attitude Control Of A Quadrotor,” 2013.
- [16] N. Q. Hoang and E. Kreuzer, “A Robust Adaptive Sliding Mode Controller For Remotely Operated Vehicles,” Tech. Mech. Sci. J. Fundam. Appl. Eng. Mech., vol. 28, no. 3–4, pp. 185–193, 2008.
- [17] J. Javadi-Moghaddam and A. Bagheri, “An Adaptive Neuro-Fuzzy Sliding Mode Based Genetic Algorithm Control System For Under Water Remotely Operated Vehicle,” Expert Syst. Appl., vol. 37, no. 1, pp. 647–660, 2010.
- [18] L. Zhao, J. Li, J. Cheng, and Y. Hao, “Damping Strapdown Inertial Navigation System Based On A Kalman Filter,” Meas. Sci. Technol., vol. 27, no. 11, p. 115102, 2016.