



## طراحی هدایت غیر خطی پایدار یک وسیله زیرآبی در خط اثر شناور توسط مسیر تخمین زده شده با فیلتر پارتبیکل

علیرضا باصحت‌نوین‌زاده<sup>۱\*</sup>، مجتبی اسدی‌ماتک<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
۲- دانشجوی دکترای مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
\* تهران، صندوق پستی 1656983911 novinzadeh@kntu.ac.ir

### چکیده

هدایت یک وسیله زیرآبی در مسیر خط اثر شناور هدف به دلیل پیچیدگی هدایت در آب و همچنین محدودیت‌های حسگرها همچنان به عنوان اصلی ترین روش هدایت آسیانه‌یابی به حساب می‌آید. از معایب هدایت خط اثر شناور می‌توان به حرکت زیگزاگی جهت کشف مجدد آن اشاره کرد که با توجه به کاهش سرعت خطی نزدیک شدن به هدف گاها به آن نرسیده و اصابت و تخریب ناتمام می‌ماند. به همین علت ایده‌های مختلفی برای بهبود حرکت در مسیر خط اثر شناور مطرح شده است که هر کدام دارای مخاسن و معایبی هستند. مثل خط اثر شناور با توجه به پیچیدگی و همچنین ناپایداری آن جهت استخراج مشخصات، به پدیده‌ای بسیار غیر خطی تبدیل شده و هدایت در آن به عنوان گلوبال‌گاهی در وسیله‌های زیرآبی است. با توجه به اینکه ناحیه کشف خط اثر شناور توسط حسگر به اندازه کافی گسترش نیست، کشف آن فقط در نزدیکی خود ممکن می‌شود، بنابراین مسیر واقعی آن قابل کشف نبوده و در نتیجه روش هدایت پیش‌رفته در دسترس نیست. به همین علت پیشنهاد می‌شود جهت هدایت خط اثر شناور از روشی برای تعییب مسیر ناشناخته استفاده شود. این قانون هدایت شامل دو بخش تخمین مسیر خط اثر شناور و هدایت غیر خطی در آن است. روش تخمین مسیر با استفاده از فیلتر پارتبیکل انجام شده است که توانایی تخمین مسیرهای غیر خطی را دارد. اثبات پایداری روش هدایتی غیر خطی نیز از طریق لیاپانوف انجام می‌شود.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل	1395
دربافت: ۰۷ آسفند	۱۳۹۶
پذیرش: ۲۷ فروردین	۱۳۹۶
ارائه در سایت: ۱۶ اردیبهشت	۱۳۹۶
کلید واژگان:	
هدایت	
وسیله زیرآبی	
خط اثر شناور	
فیلتر پارتبیکل	
لیاپانوف	

## Design of stable nonlinear guidance of an underwater vehicle in the ship wake via estimated path by particle filter

Alireza Basohbat Novinzadeh<sup>\*</sup>, Mojtaba Asadi Matak

Department of Aerospace Engineering, Khaje Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran  
\* P.O.B. 1656983911 Tehran, Iran, novinzadeh@kntu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 25 February 2017  
Accepted 16 April 2017  
Available Online 06 May 2017

Keywords:  
Guidance  
Underwater vehicle  
Wake  
Particle filter  
Lyapunov

### ABSTRACT

Guidance of an underwater vehicle in the wake of target due to the complexity of guidance in water and also sensor limitations is still the most important homing guidance method. Disadvantages of wake guidance can be mentioned as zigzag motion for rediscovering the wake in its path which, according to the decreasing linear speed of approaching the target, sometimes does not reach the target and collision fails. Therefore, various ideas with both positive and negative aspects have been introduced to improve movement in the wake path. According to complexity of the wake model and also its instability in extracting its parameters, it is a very nonlinear phenomenon and guidance in it is problematic in underwater vehicles. Since the wake detection area by the sensor is not wide enough, wake is just discovered nearby. Hence the real wake path is not detectable and therefore advanced guidance method is not available. For this reason, it is suggested that a method of unknown path tracking be used for the wake guidance. This guidance law consists of two parts of path estimation and nonlinear guidance. The estimation method is performed using particle filter that has the ability to estimate nonlinear paths. The stability proof of nonlinear guidance method is done by Lyapunov.

وسیله‌های زیرآبی اطلاعات حرکتی هدف مورد نیاز است، اما در روش هدایت خط اثر شناور تنها اطلاعات مربوط به مسیر خط اثر مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به این که روش‌های هدایتی معمول قابل استفاده نیستند، روش هدایتی کارا برای تعییب خط اثر شناور، روشی بر پایه اطلاعات خط اثر و حرکت وسیله خواهد بود [2].  
وسیله‌های زیرآبی کنونی تنها یک حسگر صوتی (سونار) روی بدنه خود

در روش‌های پیشین هدایت خط اثر شناور از الگوریتم‌های ورود و خروج استفاده می‌شود که در آن هیچ‌گونه اعتبارسنجی محاسباتی برای کارایی و پایداری آن‌ها انجام نمی‌گیرد [1]. علاوه‌بر این مشخصات حلقه داخلی (دینامیک و کنترل کننده) در نظر گرفته نمی‌شود، در نتیجه روش هدایتی مستخرج به صورت عملی قابل استفاده نیست. در بیشتر روش‌های هدایتی

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Basohbat Novinzadeh, M. Asadi Matak, Design of stable nonlinear guidance of an underwater vehicle in the ship wake via estimated path by particle filter, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 260-266, 2017 (in Persian)

در این مقاله با استفاده از فیلتر پارتبیکل مسیر خط اثر شناور توسط نقاط مرجع تولید شده و روش هدایتی روی آن نقاط پیشنهاد می‌شود که نقش بسیار مهمی در تعیین بهینگی روش هدایت در خط اثر شناور دارد. به این صورت که یک وسیله زیرآبی توسط تلفیق اطلاعات حسگرها خود که در بخش‌های بعد راجع به آن توضیح داده خواهد شد، مسیر واقعی خط اثر شناور تخمین زده شده و نقاط مرجعی در آن ساخته می‌شود، سپس با استفاده از قانون هدایت غیرخطی رابطه هندسی، بین وسیله و مسیر مورد انتظار تعریف شده و روش هدایتی مؤثر پیشنهاد می‌شود. در مرجع [7] یک الگوریتم کشف و تعقیب خط اثر شناور برای ریدیابی شناور استفاده شده است. آشناستگی قدرتمند تولید شده توسط پروانه شناور هدف برای تخمین جهت اولیه حرکت آن استفاده شده است، سپس با استفاده از ویژگی‌های خطی مرتبط با خط اثر شناور و حسگر صوتی فعال با فرکانس بالا جهت اندازه‌گیری اکوی بازگشته و فیلتر کالمن به تعقیب نقطه شروع خط اثر شناور و در نتیجه شناور هدف پرداخته شده است. در این مقاله دلیل استفاده از فیلترهای ذرهای به جای فیلترهای کالمن این است که اکوی اندازه‌گیری شده یک تابع غیرخطی از موقعیت هدف است و اختلال اندازه‌گیری نیز به صورت غیرگوسی است، علاوه‌بر این نسبت به روش با فیلتر کالمن نیاز به نقطه شروع خط اثر شناور ندارد. در ادامه مقاله مدل خط اثر شناور و نظریه‌ای برای تأیید کشف خط اثر شناور بررسی خواهد شد سپس با استفاده از روش فیلترهای پارتبیکل مسیر خط اثر شناور تخمین زده شده و با استفاده از روش هدایت غیرخطی به همراه تحلیل غیرخطی لیاپانوف در خط اثر شناور هدایت می‌شود. در ادامه با استفاده از شبیه‌سازی، روش هدایت غیرخطی برای تعقیب مسیر مورد اعتبارسنجی قرار گرفته و سپس با استفاده از مسیر تخمین زده شده توسط فیلتر پارتبیکل در هدایت وسیله در مسیر خط اثر شناور بررسی می‌شود. در انتهای به صورت خلاصه مقاله جمع‌بندی می‌شود.

## 2- شناسایی خط اثر شناور

### 2-1- مدل خط اثر شناور

مدل‌های زیادی برای خط اثر شناورهای سطحی پیشنهاد شده است. در این پیشنهادیه مدل خط اثر شناور به صورت شکل 2 مورد استفاده قرار می‌گیرد. طول خط اثر شناور عبارت از رابطه (1) است.

$$L_{\text{wake}} = C_A \cdot V_M \quad (1)$$

در آن  $C_A$  یک ثابت و در شرایط مختلف دریا معمولاً ۱۸۰ در نظر گرفته می‌شود و  $V_M$  سرعت شناور است [3].

عرض خط اثر شناور نیز از رابطه (2) قابل محاسبه است.

$$W_{\text{wake}} = \begin{cases} 0.5B + L_{\text{wake}} \tan \alpha & L_{\text{wake}} \leq B \cot \alpha \\ 2.5B & L_{\text{wake}} > B \cot \alpha \end{cases} \quad (2)$$

در آن  $B$  عرض شناور و  $\alpha$  زاویه انحراف خط اثر شناور است [3].

مقدار اکوی بازگشته مهم‌ترین ویژگی خط اثر شناور است که می‌تواند

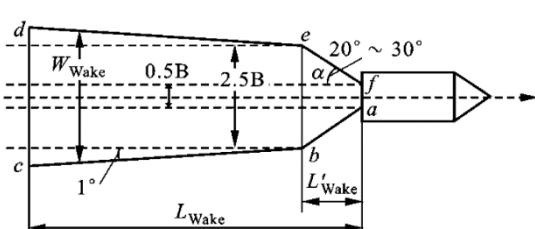


Fig. 2 Schematic of wake geometry

شکل 2 شماتیک هندسه خط اثر شناور [3]

و در راستای عمودی دارند. طریقه عملکرد حسگر صوتی چنان است که هرگاه سیگنال‌های صوتی ارسالی از آن به سطح آب برخورد کنند، موجی ضعیفتر اما با همان فرکانس ارسالی دریافت می‌شود که نشان‌دهنده این موضوع که وسیله هنوز زیر خط اثر شناور نگرفته است. اگر امواج صوتی ارسالی با خط اثر شناور برخورد کند به دلیل وجود حباب‌های خط اثر، فرکانس برگشتی چنان‌چه شرط آستانه برآورده شود، وسیله بودن در زیر خط اثر شناور را تأیید می‌کند. برای شبیه‌سازی مسیر حرکت وسیله زیرآبی به چهار ناحیه تقسیم شده است. این چهار ناحیه شامل دو قسمت داخل خط اثر شناور و دو قسمت در بیرون خط اثر شناور است.

الگوریتم فعلی یک وسیله زیرآبی بدین صورت است که در نخستین برخورد به لبیه خط اثر شناور در هنگام ورود، مسیر مستقیم الخط خود را طی می‌کند تا از خط اثر شناور برای بار اول خارج شود. سپس با سرعت زاویه‌ای  $w_1$  به مدت  $t_1$  در جهت ساعتگرد چرخیده و پس از آن به مدت  $t_2$  و با سرعت زاویه‌ای  $w_2$  باز هم در  $w_2 > w_1$  ساعتگرد چرخد. چنان‌چه وسیله هنوز به زیر خط اثر شناور وارد نشده باشد با سرعت زاویه‌ای  $w_3 > w_2$  می‌چرخد تا دوباره وارد خط اثر شناور شود.

شکل 1 مسیر حرکت یک وسیله زیرآبی را با زاویای ورود متفاوت ۲۰، ۵۰ و ۸۰ درجه در مطلب شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد.

با توجه به شکل 1 می‌توان عدم عملکرد مناسب روش هدایت خط اثر شناور را نشان داد. برای نمونه در زاویه خروج ۵۰ درجه در سیکل دوم، وسیله حدود ۴۰ متر از مرز بالای خط اثر شناور فاصله گرفته است که با توجه به سرعت هدف به هیچ وجه بهینه و مناسب نیست. هدف این مقاله استفاده از فیلتر پارتبیکل جهت تخمین مسیر خط اثر شناور و به کارگیری هدایت غیرخطی پایدار در مسیر تخمینی است که یک وسیله زیرآبی توسط آن بتواند مسیر بهینه‌تری در خط اثر شناور مخصوصاً در شرایط مانور هدف پیماید.

در مرجع [2] با استفاده از آرایش 2 حسگری، هدایت خط اثر شناور به صورت مقاومت‌تری نسبت به آرایش تک حسگری که در شکل 1 مورد بررسی قرار گرفت، انجام شده است، اما حرکت در خط اثر شناور همچنان به صورت زیگزاگی شدید است. در مرجع [3] روشی برای مدل کردن خط اثر شناور و استفاده از آن در شبیه‌سازی هدایت در خط اثر شناور ارائه شده است. در مرجع [6] آرایش سه حسگری برای بهبود حرکت زیگزاگی در خط اثر شناور معرفی شده است.

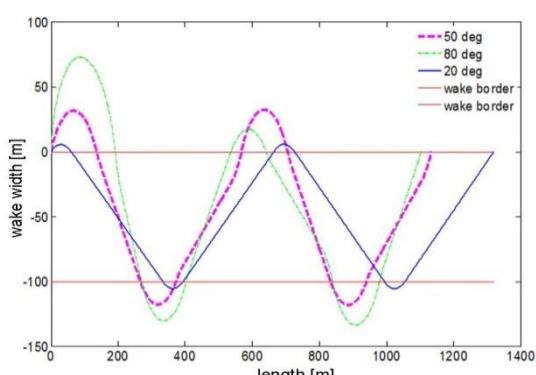


Fig. 1 Path simulation of an underwater vehicle with different entry angles

شکل 1 شبیه‌سازی مسیر حرکت یک وسیله زیرآبی با زاویای ورود مختلف

وجود دارد که در ادامه به شرح مختصه‌ی از آن پرداخته شده است. در مرجع [7] یک الگوریتم تعقیب برای کشف و ردیابی شناور براساس تصاویر پی‌درپی حسگر صوتی فعال از خط اثر شناور تشريح شده است. اختلال قوی حاصل از چرخش پروانه شناور هدف برای تخمین سمت و جهت نقطه شروع خط اثر مورد استفاده قرار می‌گیرد، سپس یک ویژگی خطی مرتبط با خط اثر شناور توسط مکان اندازه‌گیری تخمین سمت هدف تعیین می‌شود و توسط نقشه و ترمالیزه کردن مکان، تعداد اندازه‌گیری‌های اشتباه کاهش می‌یابد و فیلتر کالمون برای تعقیب نقطه شروع خط اثر شناور و در نتیجه هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله با توجه به این که اکوی دریافتی از خط اثر شناور یکتابع غیرخطی از مکان هدف و همچنین اختلال اندازه‌گیری غیرگوسی است، از فیلتر پارتبیکل به جای فیلتر کالمون استفاده می‌شود [8]. در نتیجه در مقایسه با روش مرجع [7] نیاز به وجود نقطه شروع خط اثر داخل محدوده جستجو نیست.

الگوریتم تعقیب خط اثر شناور با استفاده از فیلتر پارتبیکل به صورت زیر عمل می‌کند:

الف- تعیین وجود خط اثر شناور در داخل محدوده جستجو: هر پرتوی منبع به صورت عمود بر محور عرض خط اثر شناور به بخش‌های با حجم 10 متراً مکعب تابیده می‌شود. برای هر منبع سطح اکوی دریافتی از بخش‌های 10 متراً مکعبی جمع می‌شود. اگر این حاصل جمع از منابع با موقعیت‌های متولی بیشتر از حد آستانه از پیش تعیین شده باشد، وجود خط اثر شناور در آن فاصله تأیید می‌شود.

ب- یافتن جهت خط اثر شناور: با استفاده از مدل خط اثر شناور و از طرفی برای هر پرتو از منبع که به خط اثر شناور تابیده می‌شود، مراکزیم اکوی دریافتی و مکان آن تعیین می‌شود. مکان اکوهای مراکزیم از بخش‌های متولی خط اثر شناور می‌تواند محور طولی خط اثر شناور و در نتیجه جهت خط اثر شناور را به دست دهد.

پ- استفاده از روش فیلتر پارتبیکل برای ردگیری: پس از تعیین مکان و جهت خط اثر شناور، موقعیت هدف با استفاده از اندازه‌گیری اکوی خط اثر شناور قابل محاسبه می‌شود. ارتباط بین اکوی دریافتی و موقعیت هدف می‌تواند با استفاده از مدل خط اثر شناور فرموله شود. ردگیری موقعیت هدف با استفاده از روش فیلتر پارتبیکل و با شرح مختصه‌ی زیر انجام می‌گیرد.

پ-1- تنظیم اولیه اجزاء و وزن‌های آن‌ها برای محورهای  $X$  و  $Y$ : بردار حالت تخمین  $x$  و  $y$  در نظر گرفته شده‌اند. توابع چگالی احتمال برای محورهای هدف با 100 نمونه در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به استقلال بین متغیر طول و عرض هدف وزن‌های  $W$  برابر  $0.01$  مقداردهی می‌شوند، به طوری که  $n$  شماره نمونه است.

پ-2- اندازه‌گیری سطح اکوی بازگشته به صورت رابطه (3) است.

$$M = f(x, y) + N \quad (3)$$

در آن  $M$  مقدار اندازه‌گیری را بیان می‌کند.  $(x, y)$  نقطه اندازه‌گیری و  $N$  اختلال اندازه‌گیری است.  $p(M|r)$  احتمال وجود مقدار اندازه‌گیری  $M$  در فاصله طولی  $r$  از هدف است که با استفاده از 100 بار شبیه‌سازی استخراج می‌شوند.  $p(M|x_d)$  و  $p(M|y_d)$  نیز همین مقدار را به صورت روابط (5,4) خواهند داشت.

$$x_d = x - x_m = r \cos \theta \quad (4)$$

$$y_d = y - y_m = r \sin \theta \quad (5)$$

در آن  $x$  و  $y$  مختصات نقطه هدف،  $x_m$  و  $y_m$  مختصات نقطه

برای کشف و تعقیب استفاده شود.

زمانی که حباب‌های آشفته داخل خط اثر شناور به اندازه کافی موجود باشند قدرت شناسایی خط اثر شناور هدف افزایش می‌یابد، از طرفی تلفات انتقال صوت بیشتر شده و سطح اکوی دریافتی از خط اثر شناور کمتر خواهد شد. استفاده از منابع صوتی با فرکانس‌های مختلف نیز می‌تواند در کشف بهتر خط اثر شناور کمک کند [4]. تعقیب پس از کشف مطمئن خط اثر شناور توسط تغییرات نمونه صوتی دریافتی انجام می‌شود، بدین صورت که اکوی صوتی بازگشته به دلیل برخورد به آشفته حاصل از ترکیدگی حباب و همچنین مسیر رفت و برگشت در بازگشت خود دارای دامنه کمتر و از طرفی فرکانس متفاوت با فرکانس ارسال خواهد بود [5]. در ادامه حسگر خط اثر شناور به اختصار بررسی شده است.

## 2-2- حسگر خط اثر شناور

ناحیه کشف خط اثر شناور توسط مکان قرار گیری حسگر و زاویه اندازه‌گیری آن تعیین می‌شود. در این مقاله از آرایش سه حسگری با زاویه محوری نسبت به هم استفاده شده است. دلیل استفاده از این نوع آرایش در موارد زیر خلاصه می‌شود:

الف- امکان استفاده از حسگرهای موجود و عدم نیاز به بازطراحی حسگری

ب- تعیین جهت خط اثر شناور با توجه به تأخیر زمانی در تشخیص حسگرهای جانبی

پ- تشخیص به صورت پیش‌بین به دلیل وجود زاویه حسگرهای جانبی نسبت به محور سمت وسیله زیرآبی

ت- تأیید خط اثر شناور توسط حسگر میانی- بعد از تشخیص لبه خط اثر شناور توسط یکی از حسگرهای جانبی، تشخیص توسط حسگر میانی می‌تواند لبه خط اثر شناور را تأیید کرده و نقطه برخورد را تعیین کند.

شکل 3 نمایی از این نوع آرایش را نشان می‌دهد.

اگر خط اثر شناور توسط حداقل دو عدد حسگر کشف شود، وسیله داخل خط اثر شناور در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این که حسگرهای موجود فقط وجود و یا عدم وجود خط اثر شناور را تشخیص می‌دهند، در نتیجه اطلاعاتی راجع به شدت و جهت آن در اختیار قرار نمی‌دهند. علاوه‌بر این شکل و ناحیه دقیق خط اثر شناور ناشناخته است، در نتیجه شناخت مکان مرز واقعی خط اثر شناور هم بسیار مشکل است؛ بنابراین نقطه بین نقاط قطع توسط دو حسگر به عنوان مرز در نظر گرفته می‌شود. این نقطه در منطقه هدایتی استفاده می‌شود.

## 3- تخمین مسیر خط اثر شناور با استفاده از فیلتر پارتبیکل

الگوریتم‌های جدیدتری برای تعقیب هدف توسط روش‌های فیلترینگ بیضوی

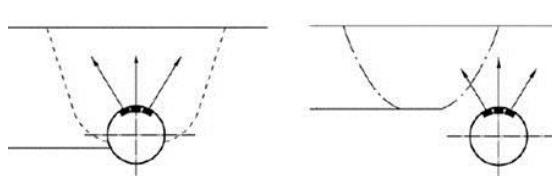


Fig. 3 Schematic of wake sensor

شکل 3 شماتیک حسگر خط اثر شناور [6]

[9]. اغلب روش حلقه‌های داخلی و خارجی مجزا به دلیل سادگی و روش‌های شناخته شده طراحی حلقة داخلی کنترل مورد استفاده قرار می‌گیرد. کنترلهای خطی معمولاً برای هدایت حلقة خارجی و به طور معمول، کنترلهای PD برای خطای تعییف استفاده می‌شوند. اگر مسیر مورد انتظار شبیه یک خط راست باشد، این روش ساده برای عملکرد حلقة خارجی به خوبی عمل می‌کند. در صورتی که هدایت در مسیر پیچیده خمیده شکلی مورد نظر باشد، بازخورد خطی از خطای تعییف نمی‌تواند نیازهای هدایتی را برآورده سازد. در ادامه منطق هدایتی برای غلبه بر محدودیتهای بازخورد کنترلی در دنبال کردن مسیرهای منحنی شکل مورد برسی قرار گرفته است. روش‌های مختلف هدایتی برای مoshک‌های برد کوتاه با در نظر گرفتن نقاط روی مسیر مورد انتظار نظیر هدایت ناوپری تناسی که تلاش کنترلی پایینی داشته و به صورت گسترشده استفاده می‌شوند [12-13].

یک جزء مهم در ناوپری تناسی استفاده از تعییر خط دید بین هدف و موشک است که شبیه به خصوصیتی در منطق هدایت در مسیر است با این تفاوت که برخلاف ناوپری تناسی، سرعت هدف در هدایت تعییر مسیر وارد نمی‌شود. در ادامه بیشتر به ارتباط بین ناوپری تناسی و منطق پیشنهادی هدایت در مسیر پرداخته می‌شود.

در ادامه به معرفی روش هدایتی و خصوصیات آن پرداخته می‌شود. به دلیل این که روش هدایتی مورد نظر در استفاده ساده است مزایای متعددی می‌توان برای آن برشمرد که از آن میان به برخی اشاره می‌شود.

- الف- شامل کنترل کننده‌های مشتقی و تنسی بینی برای کنترل خطاست.
- ب- شامل پارامتری برای پیش‌بینی مسیر است که به تعییر دقیق تر مسیرهای منحنی وار گمک می‌کند.
- پ- از سرعت لحظه‌ای وسیله در الگوریتم استفاده می‌کند که این فاکتور سینماتیکی یک خصوصیت تطبیقی برای مقابله با تغییرات سرعت وسیله در حضور اغتشاشات به هدایت می‌افزاید.

#### 4- تبیین روش هدایت

منطق هدایتی مورد نظر یک نقطه مرجع در مسیر مورد انتظار انتخاب کرده و با استفاده از آن فرمان شتاب جانبی را تولید می‌کند. انتخاب نقطه مرجع- با توجه به شکل زیر نقطه مرجع در فاصله  $L_1$  روبروی وسیله تا مسیر تعریف می‌شود.

فرمان شتاب جانبی- فرمان شتاب جانبی به صورت رابطه (9) تعیین می‌شود. شکل 5 هندسه هدایت وسیله زیرآبی و نقاط مرجع را نشان می‌دهد.

$$a_{s_{cmd}} = 2 \frac{V^2}{L_1} \sin \eta \quad (9)$$

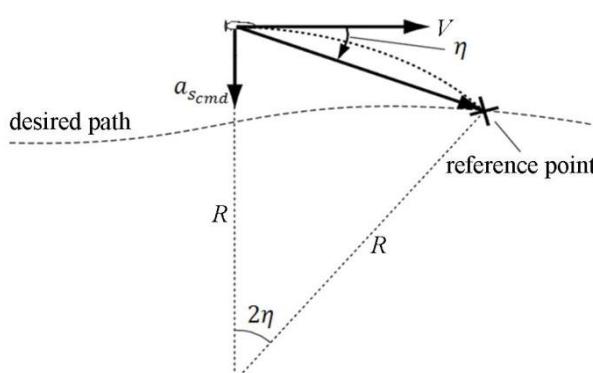


Fig. 5 Guidance geometry

شکل 5 هندسه هدایت

اندازه‌گیری اکو و  $\theta$  جهت چرخش خط اثر شناور است.

ب-3-آپدیت وزن‌های اجزاء براساس اطلاعات اندازه‌گیری شده به صورت روابط (7,6) است.

$$w_{x,t}^i = w_{x,t-1}^i p(M|x_d) \quad (6)$$

$$w_{y,t}^i = w_{y,t-1}^i p(M|y_d) \quad (7)$$

پ-4- نمونه‌برداری مجدد اجزاء: اجزا با وزن‌های کوچک حذف می‌شوند.

پ-5- گام‌های پیش‌بینی، آپدیت و نمونه برداری مجدد در هر اکو در حلقة روند فیلتر پارتيکل انجام می‌شود. حسگر خط اثر شناور هر 12 ثانیه نواحی مورد تابش را جستجو می‌کند. در هر تابش مکان و جهت چرخش خط اثر شناور تعیین می‌شوند.

دینامیک هدف به صورت رابطه (8) در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} X_t^i &= AX_{t-1}^i + Bu + R \\ X_t^i &= [x_t^i, y_t^i] \\ A &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} T\cos\theta_{t-1} \\ T\sin\theta_{t-1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

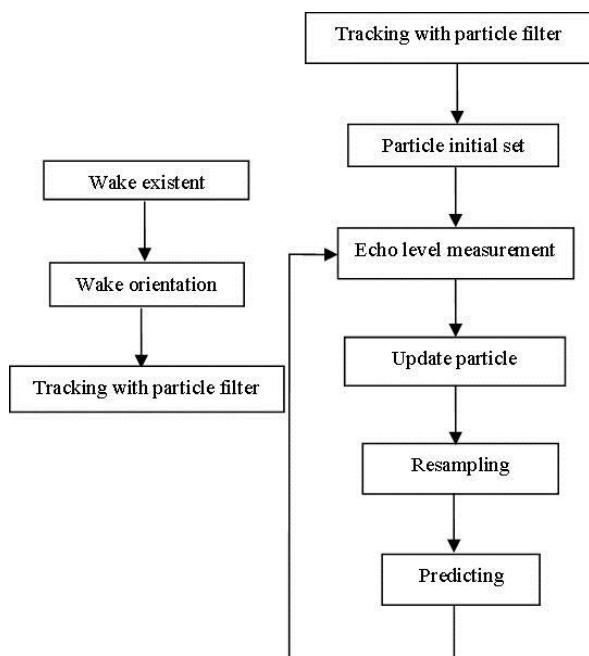
در آن  $u$  سرعت هدف،  $R$  اختلال فرآیند و  $T$  دوره زمانی تابش حسگر است. موقعیت هدف در هر سیکل با میانگین  $\hat{x}$  و  $\hat{y}$  ها برابر است.

شکل 4 الگوریتم ردگیری با فیلتر پارتيکل را نشان می‌دهد.

#### 4- هدایت

##### 4-1- بیان مسئله

دو نظر برای حل مسئله تعییب مسیر وجود دارد. در یک روش هدایت و کنترل به صورت حلقة خارجی هدایت و حلقة داخلی کنترل جدا می‌شوند که حلقة داخلی وسیله را برای دنبال کردن فرمان‌های شتاب که توسط حلقة خارجی تولید می‌شود، کنترل می‌کند و روش‌های ساده براساس مشخصات هندسی و سینماتیکی معمولاً در حلقة خارجی هدایت استفاده می‌شوند. روش جاگزین روشنی جامع است که در آن حلقة‌های داخلی و خارجی همزمان طراحی شده و در آن می‌توان از روش‌های کنترلی نوین استفاده کرد



شکل 4 الگوریتم ردگیری

فرمان شتاب جانبی در منطقه هدایت تعقیب مسیر می‌تواند به صورت رابطه

$$(11) \text{ بیان شود.}$$

$$a_{\perp LOS} = N' V_c \dot{\lambda} \quad (11)$$

که برای فرمان شتاب عمود بر خط دید در ناوبری تنسی با ثابت ناوبری  $N' = 2$ , با فرض نقطه مرجع ثابت در محاسبه نرخ خط دید و سرعت رسیدن است.

رابطه (11) توسط شکل 8 قابل نمایش است، که ابتدا اختلاف زاویه ای بین شتاب جانبی وسیله ( $a_s$ ) و شتاب عمود بر خط دید ( $a_{\perp LOS}$ ) به صورت رابطه (12) نشان داده است.

$$a_{\perp LOS} = a_s \cos \eta \quad (12)$$

با استفاده از رابطه فرمان شتاب به صورت رابطه (13) داریم.

$$a_s = 2 \frac{V^2}{L_1} \sin \eta \quad (13)$$

بنابراین رابطه (14) به صورت زیر است.

$$a_{\perp LOS} = 2 \frac{V^2}{L_1} \sin \eta \cdot \cos \eta = 2(V \cos \eta) \left( \frac{V}{L_1} \sin \eta \right) \quad (14)$$

به طوری که با فرض نقطه هدف ثابت، پرانتر اول (14)، سرعت نزدیک شدن (بخش سرعت وابسته به جهت خط دید) و پرانتر دوم نرخ خط دید است، بنابراین می‌توان رابطه (15) را نوشت.

$$a_{\perp LOS} = 2 \cdot V_c \cdot \dot{\lambda} \quad (15)$$

به شکل رابطه ناوبری تنسی با ثابت ناوبری برابر 2 است. به هر حال منطقه هدایت (انتخاب نقطه مرجع و فرمان شتاب) قابل توضیح با ناوبری تنسی نیست چرا که نقطه مرجع در حال حرکت بوده و سرعت نزدیک شدن نقطه مرجع و وسیله (با  $L_1$  ثابت) همواره صفر است.

**3-2-4- تحلیل خطی روش هدایت پیشنهادی در مسیر مستقیم**  
شکل 9 برای خطی سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.  $L_1$  فاصله بین وسیله و نقطه مرجع  $d$ , خطی تعقیب  $V$  سرعت نامی وسیله است. با فرض کوچک رابطه (16) را داریم.

$$\sin \eta \approx \eta = \eta_1 + \eta_2$$

$$\eta_1 \approx \frac{d}{L_1}, \quad \eta_2 \approx \frac{d}{V} \quad (16)$$

با ترکیب روابط بالا با رابطه هدایت، رابطه (17) را داریم.

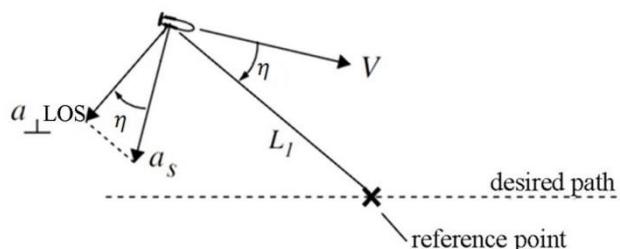


Fig. 8 Relation with Proportional Navigation

شکل 8 ارتباط با ناوبری تنسی

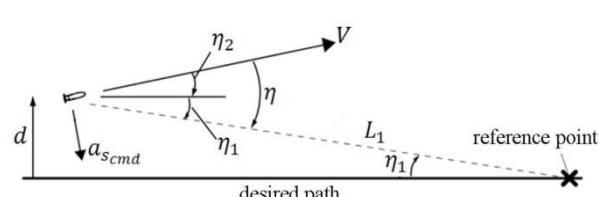


Fig. 9 Linear model for tracking straight line

شکل 9 مدل خطی تعقیب مسیر مستقیم

دو پارامتر برای معادله هدایت ضروری است.

1- جهت شتاب که بستگی به علامت زاویه بین  $L_1$  و بردار سرعت وسیله دارد.

2- در هر نقطه از زمان یک مسیر دایروی توسط مکان نقطه مرجع، مکان وسیله و بردار سرعت مماسی وسیله قابل تعریف می‌شود که در شکل 3 به صورت خط نقطه‌چین نشان داده است. فرمان شتاب تولیدی توسط رابطه (9) برای شتاب جانب مرکز در تعقیب بخش دایروی به صورت رابطه (10) قابل بیان است.

$$L_1 = 2R \sin \eta \quad (10)$$

$$\frac{V^2}{R} = 2 \frac{V^2}{L_1} \sin \eta = a_{s_{cmd}}$$

#### 1-2-4- مشخصات منطقه هدایت

در این قسمت یک شبیه‌سازی زمان گسسته برای درک بیشتر قانون غیرخطی هدایت انجام می‌شود. ابتدا با توجه به شکل 6 فرآیند منطقه هدایت در یک بازه کوچکی از زمان در نظر گرفته می‌شود. در این شماتیک نقطه مرجع در سمت راست جهت سرعت وسیله قرار دارد. بنابراین در بازه زمانی بعدی جهت سرعت به صورت ساعتگرد به فرمان شتاب اعمال می‌شود.

با استفاده از شماتیک یک بازه زمانی در شکل 6، شکل 7 مسیر وسیله برای چند بازه زمانی را نشان می‌دهد، جایی که وسیله شروع به حرکت از نقطه‌ای دور از مسیر مورد انتظار کرده است و سرانجام به مسیر مورد انتظار همگرا می‌شود.

#### 4-2-2- ارتباط با قوانین هدایت ناوبری تنسی

با فرض نقطه مرجع به عنوان هدف و وسیله به عنوان موشک، شباهت جالبی در ارتباط با هدایت ناوبری تنسی موشک یافت می‌شود. رابطه (9) برای

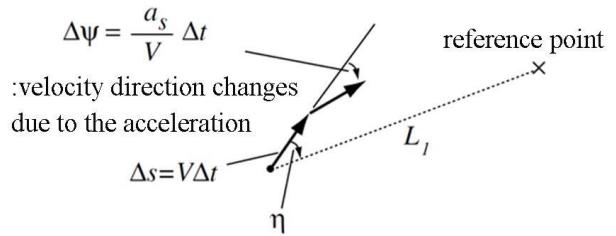


Fig. 6 Discrete show: One Time Step

شکل 6 نمایش گسسته: یک بازه زمانی

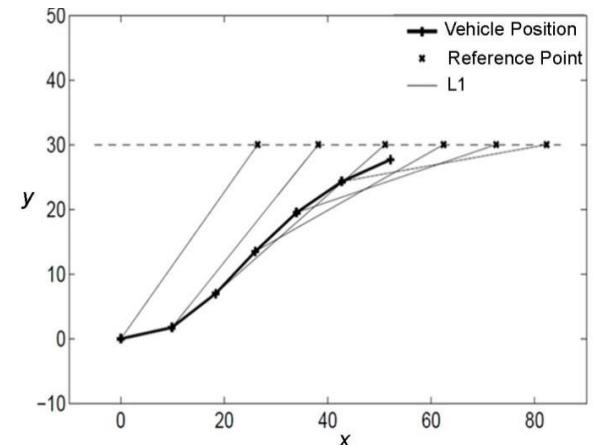


Fig. 7 Discrete simulation ( $\Delta t = 1$  s,  $V = 10 \frac{m}{s}$ ,  $L_1 = 40$  m)

شکل 7 شبیه‌سازی زمان گسسته ( $\Delta t = 1$  s,  $V = 10 \frac{m}{s}$ ,  $L_1 = 40$  m)

#### 4-2-4- مقایسه منطق هدایت پیشنهادی با روش خطی

در بخش پیشین منطق هدایت غیرخطی در تعییب خط راست با تقریبی به صورت یک کنترل خطی مشتقی- تناسبی روی خطی تعییب نمایش داده شد. این بخش با استفاده از شبیه‌سازی، منطق هدایت غیرخطی را با کنترل خطی مرتبط مقایسه می‌کند.

در تحلیل شبیه‌سازی که در شکل 10 آمده است، سرعت نامی وسیله 25 متر بر ثانیه، فاصله  $L_1$  150 متر و در ابتداء از خط راست 10 متر فاصله دارد. کنترل خطی رابطه (17) استفاده شده است.

#### 5- شبیه‌سازی

برای اعتبارسنجی روش‌های ارائه شده در مقاله از شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب استفاده می‌شود. همان‌طور که در بخش‌های پیشین مقاله بیان شد، نقاط مسیر خط اثر شناور توسط فیلتر پارتيکل به صورت گستته در زمان‌های ارسال حسگر صوتی تخمین زده شده و به گونه‌ایی نقاط مرجع جهت استفاده در الگوریتم هدایت غیرخطی استخراج می‌شود. در این سناریو هدف با سرعت ثابت از نقطه  $x=2150$  و  $y=500$  با زاویه 45 درجه در جهت کاهش  $x$  و افزایش  $y$ ، پس از آن به صورت مستقیم در جهت کاهش  $x$  و سپس در جهت کاهش  $x$  و  $y$  حرکت می‌نماید. وسیله زیرآبی نیز که پس از پرتاب از یک پلت فرم اولیه با یک تخمین اولیه توسط آن به سمت خط اثر شناور هدف حرکت کرده است از نقطه با مختصات  $x=2450$  و  $y=500$  وارد فاز هدایت خط اثر شناور خود می‌شود. شکل 11 تعییب هدف را توسط وسیله نشان داده است.

شکل 11 تعییب مسیر مورد انتظار بالا را در نقاط تخمین‌زده شده توسط فیلتر پارتيکل توسط هدایت غیرخطی پیشنهادی را نشان می‌دهد. فرآیند پیشنهادی با استفاده از الگوریتم فیلتر پارتيکل مسیر و جهت خط اثر شناور هدف را مشخص کرده و در هر تابش حسگر، نقطه‌ای را روی خط اثر شناور هدف در نظر می‌گیرد. این نقطه در هر پریود تابشی به عنوان نقطه مرجع برای استفاده در هدایت غیرخطی تعیین می‌شود. توضیح این که با توجه به محیط آب، اختلال اندازه‌گیری گوسی به مقدار 20 دسی‌بل و با انحراف معیار 6 دسی‌بل در رابطه (3) است و همچنین به سطح اکوی دریافتی هر بخش حسگر مقداری به صورت تصادفی و در بازه  $[-15, 15]$  اضافه شده است.

خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، میزان خطای بین دو مجموعه داده را اندازه‌گیری می‌کند. در این مقاله از این پارامتر برای مقایسه مقادیر  $x$  و  $y$  تخمین‌زده شده هدف توسط فیلتر پارتيکل با مقادیر واقعی مختصات هدف استفاده شده و تعریف این خط در حالت زمان گستته به صورت رابطه (28) است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (28)$$

که در آن  $x_i$  مقدار واقعی و  $\hat{x}_i$  مقدار تخمین‌زده شده است. مقدار RMSE مختصات  $x$  و  $y$  نقاط تخمین‌زده شده و موقعیت شناور هدف در شکل‌های 12، 13 به دست آمده است.

با توجه به شکل 11 روش هدایت پیشنهادی توانسته به خوبی نقاط مرجع تخمینی توسط فیلتر پارتيکل را که بیانگر مختصات هدف هستند، تعییب کند. با توجه به مقادیر RMSE شکل‌های 12 و 13 می‌توان روش تخمین نقاط مرجع به دست آمده را اعتبارسنجی کرد.

#### 6- نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از توضیح مختصری راجع به خط اثر شناور مدلی برای خط

$$a_{s_{cmd}} = 2 \frac{V^2}{L_1} \sin \eta \approx 2 \frac{V}{L_1} \left( \dot{d} + \frac{V}{L_1} d \right) \quad (17)$$

خطی‌سازی منطق غیرخطی به کنترل کننده PD برای خطای تعییب منجر می‌شود، همچنین نسبت سرعت وسیله به فاصله  $L_1$  یک فاکتور مهم برای تعیین بهره‌های تناسبی و مشتقی کنترل کننده است. برای نمونه یک مقدار کوچک برای  $L_1$  به بهره بالای کنترل منجر می‌شود و نسبت  $\frac{L_1}{V}$  ثابت زمانی کنترل کننده PD را تعیین می‌کند.

فاصله  $L_1$  را می‌توان با استفاده از تحلیل پایداری به همراه مدل خطی پلنت و کنترل خطی استخراج کرد. مدل پلنت باید شامل دینامیک وسیله با کنترل زاویه حلقه داخلی و دینامیک همه حسگرها درتابع تبدیل باشد.

علاوه بر این با فرض نبود دینامیک حلقه داخلی و زاویه کوچک  $\eta$  در نتیجه  $\ddot{d} = a_{s_{cmd}}$  و رابطه (11) به صورت رابطه (18) می‌شود.

$$\ddot{d} + 2\xi\omega_n\dot{d} + \omega_n^2 d = 0, \xi = 1/\sqrt{2}, \omega_n = \sqrt{2V/L_1} \quad (18)$$

رابطه (12) یک معادله خطی تقریبی برای موضوع تعییب مسیر مستقیم نشان می‌دهد که یک سیستم درجه دوم ساده و همیشه دارای ضریب میرایی 0.707 است و فرکانس طبیعی توسط نسبت سرعت و فاصله تا نقطه مرجع تعیین می‌شود.

با استفاده از تحلیل پایداری لیپانوف غیرخطی براساس شکل 9 به صورت (19) داریم.

$$\ddot{d} = V \sin \eta_2 \quad \eta_2 = -\frac{a_s}{V} \quad (19)$$

با توجه به رابطه (13) و برای وجود نقطه مرجع منحصر به فرد با فرض رابطه (20) است.

$$d < L_1, \quad -\frac{\pi}{2} < \eta < \frac{\pi}{2} \quad (20)$$

با تعریفتابع لیپانوف به صورت رابطه (21) است.

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(V \sin \eta_2)^2 + \int_0^d \frac{2V^2}{L_1} \sin(\eta - \eta_2) dy \quad (21)$$

با استفاده از شکل 9 رابطه (22) را داریم.

$$\sin(\eta - \eta_2) = \frac{d}{L_1} \quad (22)$$

بنابراین رابطه (23) به صورت زیر است.

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} V^2 \sin^2 \eta_2 + \frac{V^2}{L_1^2} d^2 \quad (23)$$

که یک تابع مثبت معین است. با مشتق‌گیری زمان از رابطه (21) رابطه (24) را داریم.

$$\dot{\mathcal{L}} = V^2 \sin \eta_2 \cos \eta_2 \dot{\eta}_2 + \frac{V^2}{L_1^2} d \dot{d} \quad (24)$$

از روابط (24,22,19) رابطه (25) را داریم.

$$\dot{\mathcal{L}} = -\frac{2V^3}{L_1} \sin \eta_2 \{ \cos \eta_2 \sin \eta - \sin(\eta - \eta_2) \} \quad (25)$$

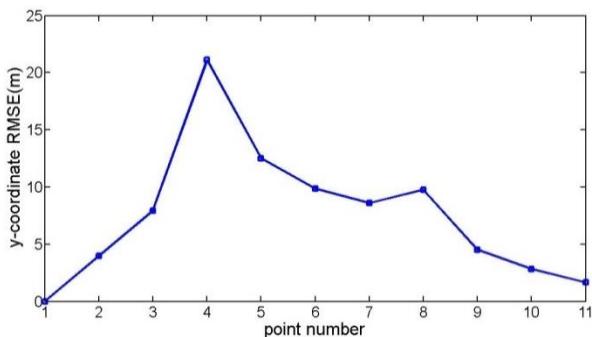
در آخر با استفاده از رابطه (26)

$$\sin(\eta - \eta_2) = \cos \eta_2 \sin \eta - \cos \eta \sin \eta_2 \quad (26)$$

تابع لیپانوف به صورت رابطه (27) می‌شود.

$$\dot{\mathcal{L}} = -\frac{2V^3}{L_1} \sin^2 \eta_2 \cos \eta \quad (27)$$

که به ازای  $|\eta| > \pi/2$  یک تابع منفی نیمه معین است. با توجه به قضیه مجموعه ثابت،  $\dot{\mathcal{L}} = 0$ ،  $d = 0$ ،  $\eta_2 = 0$  را نتیجه می‌دهد، بنابراین برای  $(\eta_2 = 0, d = 0)$  پایدار مجانبی است.

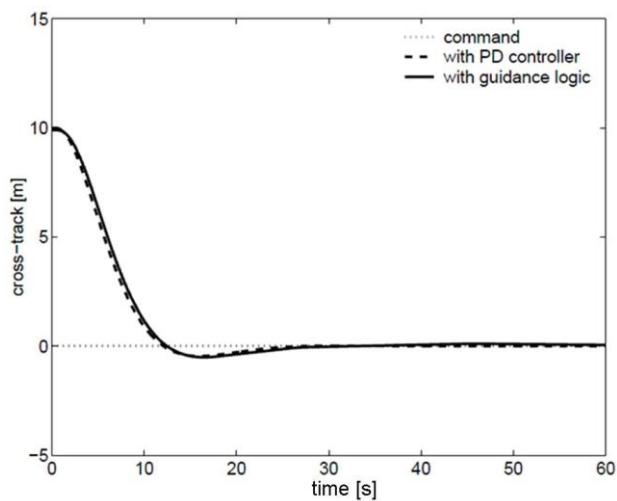


شکل 13 مقدار RMSE مختصات  $y$  تخمین‌زده شده نقاط هدف

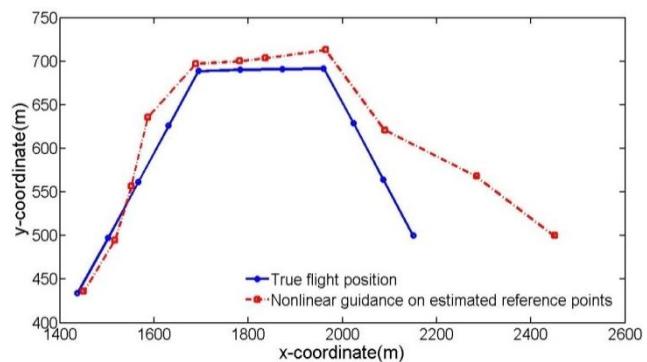
پرداخته شد. در ادامه روشی با استفاده از فیلتر پارتیکل، خط اثر شناور و جهت آن را برای تولید نقاطی از مختصات هدف در فاصله‌های تابش حسگر پیشنهاد شد. سپس یک روش هدایت غیرخطی معرفی شده و با استفاده از تحلیل لیپانوف پایداری آن ثابت شد. در ادامه نقاط مستخرج از الگوریتم تخمین با فیلتر پارتیکل به عنوان نقاط مرتع در هدایت غیرخطی پیشنهادی در شبیه‌سازی متلب مورد استفاده قرار گرفته و می‌توان عملکرد الگوریتم تخمین را با استفاده از تحلیل مقادیر RMSE در شکل‌های 12 و 13 مطلوب دانست. با توجه به شکل 11 تعقیب نقاط مرتع توسط هدایت غیرخطی اعتبارسنجی شده است. با توجه به استفاده از روش تخمین نقاط مرتع و همچنین هدایت غیرخطی پیشنهادی و مقایسه نتایج مقاله با کارهای مشابه که به صورت جداگانه در حوزه تخمین توسط فیلترها و همچنین در حوزه آرایش حسگرها در متن مقاله به همراه مراجع آن‌ها مورد بررسی قرار گرفتند، می‌توان حرکت روانتر و بدون زیگزاگ وسیله زیرآبی به سمت هدف را از نتایج مهم مقاله برشمرد.

## 7- مراجع

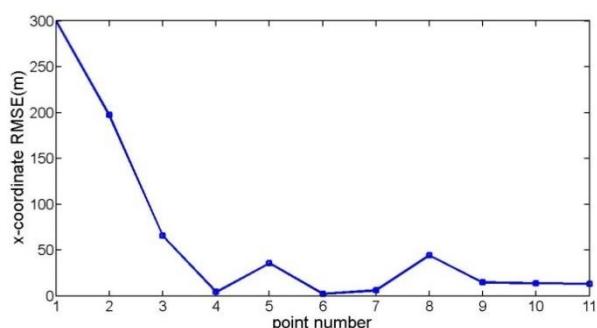
- [1] A. E. Gamal, Performance and stability of an autonomous underwater vehicle guidance and control, *Proceedings of International Conference on Modelling, Identification & Control (ICMIC)*, pp. 67-73, 2013.
- [2] Y. H. Lee, B. H. Ku, S. M. Chung, W. Y. Hong, H. S. Ko, Robust search method for shipwake using two wake sensors, *Acoustical Society of Korea*, Vol. 29, No. 3, pp.155-164, 2010.
- [3] Z. Xiang-tao, S. Xu-wen, Z. Ming, Simulation of trajectory logic for wake homing torpedo, *Torpedo Technology*, China, 2009.
- [4] I. Karoui, I. Quidu, M. Legris, Automatic sea-surface obstacle detection and tracking in forward-looking sonar image sequences, *Geoscience and Remote Sensing IEEE Transactions*, Vol. 53, No. 8, pp. 4661-4669, 2015.
- [5] H .Fu, P. Wan, Numerical simulation on ship bubbly wake, *Harbin Engineering University and Springer-Verlag Berlin*, Heidelberg, 2011.
- [6] P. Xun, Z. Jing-yuan, Z. Jiang, Simulation and optimization of homing strategy for acoustic wake guide torpedo, *Journal of Naval University of Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 98-102, China, 2012.
- [7] K. W. Lo, B. G. Ferguson, Automatic detection and tracking of a small surface watercraft in shallow water using a high frequency active sonar, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 40, No. 4, pp. 1377-1388, October, 2004.
- [8] H. Ohlsson, M. Verhaegen, S. Shankar Sastry, Nonlinear compressive particle filtering, *Decision and Control (CDC) 2013 IEEE 52nd Annual Conference*, pp. 7054-7059, USA, December, 2013.
- [9] T. Keviczky, J. Balas, Software enabled flight control using receding horizon techniques, *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, (AIAA2003-5671), Texas, August, 2003.
- [10] D. J. Yost, J. E. Kain, Command to line-of-sight guidance: A stochastic optimal control problem, *Spacecraft*, Vol. 14, No. 7, pp. 438-444, 1977.
- [11] P. Zarchan, *Tactical and Strategic Missile Guidance*, third edition, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997.
- [12] J. H. Blakelock, *Automatic Control of Aircraft and Missiles*, second edition, Wiley- Interscience, 1991.



شکل 10 تعقیب مسیر مستقیم



شکل 11 تعقیب مسیر مورد انتظار توسط هدایت غیرخطی پیشنهادی در نقاط مرتع تخمین‌زده شده



شکل 12 مقدار RMSE مختصات  $x$  تخمین‌زده شده نقاط هدف

اثر شناور معرفی شده و پس از آن آرایش سه حسگری جهت کشف و شناسایی خط اثر شناور با توجه به محاسب آن که شامل امکان استفاده از حسگرهای موجود و عدم نیاز به بازنگری سیستم حسگری، تعیین جهت خط اثر شناور با توجه به تأخیر زمانی در تشخیص حسگرهای جانی، تشخیص به صورت پیش‌بین به دلیل وجود زاویه حسگرهای جانی نسبت به محور سمت وسیله زیرآبی و تأیید خط اثر شناور توسط حسگر میانی است.