# طراحی و ساخت حسگر سرعت آبی بر مبنای قانون برنولی برای کاربرد در روندههای هوشمند زیرسطحی

محمدتقی ثابت (\* ، حسین بهروز ۲ ، حسین نور محمدی ۳

<sup>۱</sup> استادیار ، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده علوم و فناوری شمال، sabet\_mt@mut.ac.ir ۲ محقق، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده علوم و فناوری شمال ، hossein.behroz@gmail.com ۳ استادیار ، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده علوم و فناوری شمال، hnourmohammadi@mut.ac.ir

| اطلاعات مقاله                  | چکیدہ   |
|--------------------------------|---|
| <i>تاریخچه مقاله:</i>          | یکی از پارامترهای مهم در ناوبری یک رونده هوشمند زیرسطحی، تخمین سرعت است. حسگرهای سرعت   |
| تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۰۳ | آبی متنوعی وجود دارند که با استفاده از تکنولوژیهای متفاوت قابلیت اندازه گیری سرعت یک رونده در   |
| تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۲۹  | زیرسطح را دارند. از جمله این حسگرها می توان به حسگرهای سرعت آلتراسونیک، الکترومغناطیس، نوری،  |
|                                | ددامدار م دارای اشاره زمود در این مقاله هدف طراحی و ساخت دک جسگر سیعت آر ایزان قرمت در  |
| <i>کلمات کلیدی:</i>            | پهنوین و کاپتری اساره نمود. در این معاله هناک طراحی و ساخت یک حسار سرعت این ارزان طیمت بر   |
| رونده هوشمند زیرسطحی           | مبنای فشار تفاضلی بوده که با استفاده از قانون برنولی میزان سرعت یک رونده زیرسطحی را محاسبه  |
| حسگر سرعت آبی                  | میکند. برای بررسی عملکرد حسگر پیشنهادی، مجموعه تستی ساخته شده شده و در حوضچه کشش  |
| قانون برنولی                   | آزمایشگاه دریایی ملی ایران (NIMALA) تست شده است. به منظور بررسی دقت حسگر پیشنهادی،  |
| فشار تفاضلی                    | حسگر سرعت نصب شده روی ارابه کشش به عنوان حسگر مرجع در نظر گرفته شده است. در نهایت نتایج<br>نشان داده که در محدوده سبعت ۵/۰ تا ۶/۵ متر در ثانیه دقت اندازهگیری سبعت در محدوده ۰/۰۰ |
|                                | مت د ثانیه است.   |

## Designing and manufacturing Bernoulli's based water speed sensor for applied on Autonomous Underwater Vehicle

Mohammadtaghi Sabet <sup>1\*</sup>, Hossein Behroz <sup>2</sup>, Hossein Nourmohammadi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Assistance Professor, Malekashtar University of Technology, Northern Research Center for Science and Technology, <u>sabet\_mt@mut.ac.ir</u>
 <sup>2</sup> Researcher, Malekashtar University of Technology, Northern Research Center for Science and Technology, <u>hossein.behroz@gmail.com</u>
 <sup>3</sup> Assistance Professor, Malekashtar University of Technology, Northern Research Center for Science and Technology, <u>hnourmohammadi@mut.ac.ir</u>

### ARTICLE INFO

Article History: Received: 23 Apr. 2021 Accepted: 21 Oct. 2021

*Keywords:* AUV water speed sensor Bernoulli's low differential pressure

#### ABSTRACT

Speed estimation is one of the important parameters in navigation of an Autonomous Underwater Vehicle (AUV). Varied underwater speed sensors exist that they use of different technologies for measuring of an underwater speed. For example, ultrasonic, electromagnetic, optical and paddlewheel speed sensors and Doppler Velocity Log (DVL) are used for water speed measuring. The purpose of the article is designing and manufacturing of a differential pressure based speed sensor that measures an AUV speed by using of Bernoulli's low. For analyzing of the proposed sensor, it is tested in the towing tank of the National Iranian Marin Laboratory (NIMALA). For determining of the sensor measurement accuracy, the sensor data is compared with an accurate speedometer that is installed on the towing tank. With analyzing of the results, the sensor accuracy is 0.05 (m/sec) in speed range 0.5-4.5 (m/sec).

#### ۱ – مقدمه

امروزه سامانههای دریایی به سمت سامانههای هوشمندی سوق پیدا کرده تا نیاز حضور انسان را تا حد زیادی کاهش دهند. از جمله این سامانههای هوشهمند دریایی میتوان به روندههای هوشهمند زیرسطحی <sup>i</sup> اشاره نمود که برای مأموریتهای مختلف از جمله اكتشاف، شانخت عوارض زيرآبي، توليد نقشههاي جغرافيايي و ژرفاسنجی، عملیات نظامی و غیره استفاده می شوند [۱–۳]. تمامی این سامانه های زیرسطحی به منظور هوشهندسازی نیاز به تجهیزاتی شامل سامانههای هدایت، ناوبری و کنترل<sup>ii</sup> دارند. در بین این سامانهها، سامانه ناوبری به عنوان چشم سامانه زیرسطحی هوشـمند، وظيفه تعيين وضـعيت و سـمت<sup>iii</sup>، سـرعت و موقعيت وسیله در هر لحظه از زمان را بر عهده دارد. روشهای ناوبری روندههای هوشــمند زیرسـطحی به ســه گروه عمدهی ناوبری آکوستیکی<sup>v</sup> ، جغرافیایی<sup>v</sup> و اینرسی <sup>vi</sup> قابل تفکیک هستند [۴]. روشهای ناوبری اینرسیی به دلیل عدم استفاده از سامانههای موقعیت یابی مجزا دارای رشد خطای موقعیت بدون کران و محدوده هستند. برای جلوگیری از رشد خطا در این سامانه ناوبری، از حسـگرهای کمک ناوبری اسـتفاده میشـود. یکی از مهمترین این حسگرهای کمک ناوبری حسگر سرعت است. حسگر سرعت سهم زیادی در دقت سامانه ناوبری دارد. در میان حسگرهای سرعت مورد استفاده در محیط آب، حسگرهای مدل داپلری <sup>vii</sup>، آلتراسونیک <sup>viii</sup> و نوری<sup>i x</sup> بیشتر در روندههای هوشمند زیرسطحی استفاده شدند [۵–۹].

حسگر DVL یک حسگر آکوستیکی بوده که سرعت را نسبت به کف<sup>x</sup> یا عمقی <sup>ix</sup> از آب دریا اندازه می گیرد [۱۰]. این حسگر سرعت را با استفاده از حداقل سه پالس بلند اندازه گیری شده توسط سه بیم آکوستیکی محاسبه میکند. این حسگرها معمولا دارای ۴ بیم آکوستیکی هستند. سرعت اندازه گیری شده توسط این حسگر در سه راستای بدنی حسکر ارائه می شود. زمانی که عمق حسکر تا بستر دریا در محدوده عملکردی آن باشد، خروجی حسگر دقت قابل قبولی دارد. به همین منظور یکی از محدودیتهای این حسـگر فاصله عمق از بستر دریا است. زمانی که این حسگر قادر به اندازه گیری سرعت نسبت به بستر دریا نباشد، نسبت به جریان عمق مشخصی از آب سرعت را اندازه می گیرد. در این صورت دقت حسگر سرعت كاهش مى يابد [11]. اين حسكر علاوه بر اين مورد، شامل دو محدودیت قیمت بالا و میزان مصرف انرژی زیاد بوده که کاربرد آن در روندههای هوشمند زیرسطحی ارزان قیمت برای کاربردهای خاص را محدود می کند. به عنوان مثال در روندههای هوشـمند زیرسطحی با کاربری در مناطق پر ریسک [۱۲]، روندههای همکار با تعداد بالا و حرکت جمعی [۱۳–۱۵]، روندههای یک بار مصرف و فنا شونده [۱۶] و روندههای با زمان کاربری بالا [۱۷] امکان استفاده

از حســگرهای DVL با توجه به قیمت بالا و مصـرف انرژی زیاد امکان پذیر نیست. از طرف دیگر این نوع از حسگرهای سرعت دارای دقت بسیار خوبی هستند. آقای کستانزی و همکارانش در کار تحقیقاتی خود که ناوبری یک رونده هوشمند زیرسطحی با استفاده از فیلتر کالمن بی دپا <sup>xi i</sup> بوده از حسگر DVL به منظور اندازه گیری سرعت رونده و جریانات زیرسطحی استفاده کردند [۸]. در مقاله [۹] آقای وانگ و همکارانش یک سامانه ناوبری اینرسی تلفیقی را برای یک رونده هوشـمند زیرسـطحی ارائه نمودند. در این سـامانه ناوبری از حسگر DVL به عنوان حسگر کمک ناوبری استفاده شده است. سامانه ناوبری ارائه شده در این کار تحقیقاتی، نسبت به نواقض DVL در محیطهای پیچیده که در آنها یک یا چند بیم <sup>xi i i</sup> حســگر DVL دچار نقص یا به علت تغییر ناگهانی عواض کف دریا دچار ایراد در اندازه گیری می شوند، مقاوم است. در مقاله [۱۸] نیز نویسندگان به موضوع نواقص حسگر DVL پرداخته و یک الگوریتم ناوبری تلفیقی مقاوم به منظور جلوگیری از خطاهای احتمالی ناشی از گیرنده DVL در سامانه ناوبری پیشنهاد نمودند. آنها با ارائه این الگوریتم دقت ناوبری موقعیت خود را تا ۳۲/۵ درصد افزایش دادند. آقای کلوس [۱۹] و همکارانش در کار تحقیقاتی خود دو سامانه ناوبری تلفیقی مقاوم با استفاده از فیلترهای کالمن توسعهیافته <sup>xi v</sup> و ذرهای<sup>xx</sup> ارلئه کردند. در این ساملنههای ناوبری، بایاس حسرگر DVL در زمانی که سـرعت نسـبت به عمق مشـخصـی از آب ارائه می شود، با کمک سامانه موقعیتیابی جهانی <sup>xvi</sup> به صورت برخط تخمین زده می شود.

حسگر سرعت التراسونیک از پالسهای التراسونیک برای دنبال کردن ذرات ریز آب استفاده می کند. به این منظور، این حسگر دارای دو مبدل <sup>i xvi</sup> فرستنده و گیرنده با فاصله مشخص به منظور محاسبه مدت زمان عبور ذرات ریز آب از مقابل حسگر استفاده می کند. با محاسبه زمان عبور ذرات از فاصله بین دو مبدل، سرعت رونده زیرسطحی یا سطحی محاسبه می شود [۲۰]. این مدل حسگرها به شدت به ذرات معلق در آب و ناخالصیهای آب وابسته بوده و در آبهای گل آلود و دارای ناخالصی بالا دچار خطا می شوند. همچنین الزامات نصب خاصی از جمله نصب در محلی بدون آشفتگی جریان سیال و بدون تشکیل حبابهای آب هستند. در مقالات [۵ و ۶]، از یک حسگر سرعت محوری مدل التراسونیک به منظور ناوبری اینرسی ارزان قیمت روندههای هوشمند زیرسطحی استفاده شده است.

عملکرد کلی حسگرهای سرعت نوری مشابه حسگرهای التراسونیک است. این حسگر با استفاده از دنبال کردن ذرات آب با استفاده از دو بیم نوری، سرعت محوری رونده را محاسبه میکند. با محاسبه زمان جلبهجایی ذرات ریز آب بین دو بیم نوری، سرعت محوری وسیله محاسبه می شود. این حسگر برای رونده های زیر سطحی و

سطحی قابل کاربرد است [۲۱]. مدرس و همکارانش در مقاله [۷]، یک مدل حسگر سرعت نوری را برای روندههای هوشمند زیرسطحی معرفی کردند.

در این مقاله، هدف طراحی و ساخت یک حسگر سرعت آبی بر مبنای فشار تفاضلی بوده که قادر به اندازه گیری سرعت محوری <sup>xviii</sup> روندههای زیرسطحی است. حسگر سرعت پیشنهادی در مقابل حسگرهای سرعت قابل کاربرد در محیط آبی موجود، یک حسـگر بسـيار ارزان قيمت، با مصرف انرژي پايين و ابعاد كوچك است. این حسگر از خاصیت اختلاف فشار دینامیکی در دو نقطه از روی بدنه یک رونده زیرسطحی استفاده کرده و با استفاده از رابطهی بین اختلاف فشار و سرعت حرکت رونده، میزان سرعت آن را تعیین می کند. این رابطه از قانون برنولی <sup>x ix</sup> اســتخراج میشـود. مطابق قانون برنولی یک تناسب مرتبه دوم بین سرعت جریان آزاد و اختلاف فشار برقرار است [۲۲ و ۲۳]. چون رابطه موجود بین اختلاف فشار و سرعت یک رابطه مرتبه دوم بوده به همین منظور دقت اندازه گیری اختلاف فشار مخصوصا در سرعتهای پایین که اختلاف فشار کم است از اهمیت برخوردار است. به همین منظور استفاده از حسـ گرهای نوع فشار مطلق و گیج ممکن است کار را پیچیده یا غیر ممکن کند. به منظور اندازه گیری این اختلاف فشار نیاز به حسگر دقیق همچون حسگرهای فشار تفاضلی است. در این مقاله به منظور افزایش دقت سرعت اندازه گیری شده به خصوص در مواقعی که رونده دارای زاویه حمله عرضی است، از دو حسگر فشار تفاضلی<sup>xx</sup> استفاده شده است. حسگر سرعت طراحی شده در این مقاله قابلیت اندازه گیری سرعت از ۵/۰ تا ۵ متر بر ثانیه را داراست. به منظور بررسی دقت و کالیبراسیون حسگر سرعت، مجموعه تستی ساخته شده و در حوضچه کشش آزمایشگاه دریایی ملی ایران <sup>xxi</sup> (NIMALA) تست شده است. مجموعه تست تعبیه شده توسط ارابه کشـش آزمایشـگاه NIMALA در سـرعتهای مختلف حمل شده و خروجی سرعت حسگر با خروجی سرعت مرجع گزارش شده توسط سیستم اندازه گیری روی ارابه کشش مقایسه می شود. با توجه به نتایج ارائه شـده از تسـتهای تجربی، حسـگر سـرعت ییشنهادی پس از کالیبراسیون دارای حداکثر میانگین خطای ۰/۰۵ متر بر ثانیه است.

در ادامه مقاله در بخش دوم تئوری مربوط به حسـگر سـرعت پیشـنهادی و مباحث مربوط به آن از جمله رابطه سـرعت و اختلاف فشـار و اصلاحات قابل انجام روی رابطه ارائه خواهد شد. سپس در بخش سوم مجموعه تست و تجهیزات مربوط به تست ارائه خواهند شـد. در بخش چهارم نتایج مربوط به تسـتهای تجربی و خروجی دادههای تست ارائه میشوند. در بخش نهایی نتیجه گیری بدست آمده از مقاله حاضـر و دقت مورد انتظار از حسـگر طراحی شـده گزارش میشود.

۲ – تئوری حسگر سرعت آبی بر مبنای قانون برنولی در یک رونده هوشمند زیرسطحی، حسگر سرعت به عنوان یک حسگر با اهمیت، یک بخش جدایی ناپذیر از سیستم ناوبری دقیق است. در این بخش به معرفی تئوری حسگر سرعتی پرداخته که از خاصیت اختلاف فشار بین دو نقطه از بدنه یک رونده هوشمند زیرسطحی و برقراری ارتباط بین این اختلاف فشار و سرعت رونده، میزان سرعت حرکت را اندازه می گیرد. طراحی این حسگر بر مبنای قانون برنولی صورت گرفته است. طبق این قانون با فرض غیر ویسکوز <sup>i ixx</sup> و تراکمناپذیر <sup>i i ixx</sup> بودن سیال و صرف نظر از اثر ارتفاع یا عمق ارتباط بین فشار *q* و سرعت *V* طبق رابطه زیر برقرار ارتفاع یا عمق ارتباط بین فشار *q* و سرعت *V* طبق رابطه زیر برقرار است.

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = const \tag{1}$$

در این رابطه ho چگالی آب است.

قانون برنولی برای یک بدنه مغروق در آب قابل استفاده است. در این حسگر سعی بر این است که از تئوری موجود در حرکت سیال حول یک بدنه کروی استفاده شود [۲۴]. مطابق شکل (۱) با استفاده از اختلاف فشار دو نقطه روی یک بدنه کروی که در یک سیال با سرعت مشخص مغروق است، میتوان سرعت سیال را تخمین زد.



شکل (۱) خطوط جریان غیر چرخشی، غیر ویسکوز و تراکم ناپذیر حول یک بدنه کروی

در شکل (۱) نقطه St به عنوان نقطه ایستا<sup>v xx</sup> قابل تعریف است. در این نقطه با فرض غیر چرخشی، غیر ویسکوز و تراکم ناپذیر بودن جریان مقدار سرعت صفر بوده و مقدار فشار استاتیک در این نقطه بیشینه است. نقطه S نیز به نقطه استاتیک<sup>xxx</sup> معروف است. در این نقطه سرعت جریان سیال با سرعت جریان سیالی که بدنه در آن مغروق بوده برابر است. نقطه A نیز یک نقطه اختیاری <sup>xxv</sup> روی

سطح کره است. چنانچه بخواهیم سرعت هر نقطه اختیاری روی کره را با استفاده از سرعت جریان آزاد تعیین کنیم برای یک سیال با عدد رینولدز بالا این رابطه به صورت زیر قابل ارائه است [۲۲].

$$v_A = \frac{3}{2} v_\infty \sin(\gamma) \tag{7}$$

در این رابطه  $\gamma$  و  $_{\infty}v$  به ترتیب زاویه بین نقطه ایستا تا نقطه اختیاری A روی کره و سرعت جریان آزاد است. با توضیحات مطرح شده و مطابق قانون برنولی برای دو نقطه ایستا و نقطه اختیاری A خواهیم داشت:

$$P_{St} = P_A + \frac{1}{2}\rho v_A^2 = P_A + \frac{1}{2}\rho \left(\frac{3}{2}v_{\infty}\sin(\gamma)\right)^2 \qquad (7)$$

$$v_{\infty} = \frac{2}{3\sin(\gamma)} \sqrt{\frac{2(P_{St} - P_A)}{\rho}} = \frac{2}{3\sin(\gamma)} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \qquad ($$

با توجه به رابطه (۴) می توان دریافت که با استفاده از محاسبه اختلاف فشار نقطه ایستا و یک نقطه اختیاری دیگر روی سطح یک کره می توان سرعت جریان اطراف حول کره را تعیین نمود. بلید توجه داشت که رابطه (۴) یک رابطهای است که در حللت ایدهآل برقرار است. در واقعیت اغتشاشات ناشی از محیط اطراف

ممکن است اندکی اختلاف بین رابطه (۴) و آنچه در واقع رخ میدهد، اتفاق بیافتد. یکی از موضوعاتی که اینجا مطرح است، بحث نوساناتی است که در زاویه چرخش وسیله رخ میدهد. رابطه (۴) تا زمانی که اختلاف ارتفاعی بین نقطه A و St رخ ندهد، برقرار است. چنانچه اختلاف ارتفاعی بین این دو نقطه اتفاق بیافتد، اختلاف فشار محاسبه شده تنها ناشی از فشار دینامیکی ناشی از سرعت جریان عبوری اطراف وسیله نبوده و یک اختلاف فشار استاتیکی ناشی از اختلاف ارتفاع نیز وجود دارد. به همین منظور رابطه (۴) باید در این شرایط اصلاح شود. این اختلاف ارتفاع ناشی از چرخش

با چرخش کره موقعیت بین دو نقطه A و St در دستگاه اینرسی با چرخش کره موقعیت بین دو نقطه A با رابطه  $r^n = R(\varphi, \theta, \psi) r^b$  با رابطه  $r^n = \begin{bmatrix} x^n & y^n & z^n \end{bmatrix}^T$  با موقعیت بین دو نقطه در دستگاه بدنی اینجا موقعیت بین دو نقطه در دستگاه بدنی اینجا  $\left(r^b = \begin{bmatrix} x^b & y^b & z^b \end{bmatrix}^T\right)$  قابل محاسبه است. در این اینجا  $R(\varphi, \theta, \psi)$  ماتریس دوران بوده که به صورت زیر قلبل تعریف است.  $\varphi, \theta$  و  $\psi$  نیز زوایای چرخش غلت ixvii فراز xvii i مست.

$$R(\varphi,\theta,\psi) = \begin{bmatrix} C(\theta)C(\psi) & -S(\psi)C(\varphi) + C(\psi)S(\theta)S(\varphi) & S(\psi)S(\varphi) + C(\psi)S(\theta)C(\varphi) \\ C(\theta)S(\psi) & C(\psi)C(\varphi) + S(\psi)S(\theta)S(\varphi) & -C(\psi)S(\varphi) + S(\psi)S(\theta)C(\varphi) \\ -S(\theta) & C(\theta)S(\varphi) & C(\theta)C(\varphi) \end{bmatrix}$$
( $\Delta$ )

در رابطه (۵)، داریم  $S = \sin, C = \cos$ . با توضیحات مطرح شده اختلاف ارتفاع بین نقاط A و St مطابق رابطه زیر قلبل محاسبه است.

$$z^{n} = z_{A}^{n} - z_{St}^{n} = -S(\theta)x^{b} + C(\theta)S(\phi)y^{b} + C(\theta)C(\phi)z^{b}$$
(7)

پس از محاسبه اختلاف ارتفاع بین نقطه ایستا و نقطه اختیاری A به منظور محاسبه دقیقتر اختلاف فشار دینامیکی، از اختلاف فشار Δp در رابطه (۴)، اختلاف فشار سکون ناشی از اختلاف ارتفاع را مطابق رابطه زیر حذف خواهیم کرد.

$$\Delta P^{correct} = \Delta P - \rho g \left( z_A^n - z_{St}^n \right) \tag{Y}$$

بنابراین رابطه (۴) به صورت زیر اصلاح می شود.

$$v_{\infty} = \frac{2}{3\sin(\gamma)} \sqrt{\frac{2\Delta P^{correct}}{\rho}} \tag{A}$$

با استفاده از رابطه (۸) با اختلاف فشار اصلاح شده  $\Delta P^{correct}$  که در واقع خروجی حسگر فشار تفاضلی منهای اختلاف فشار ناشی از اختلاف عمق بين دو نقطه ايستا و نقطه اختياري A بوده، مي توان سرعت جریان آزاد را اندازه گیری نمود. اما باید توجه داشت که این رابطه با فرض اینکه نقطه St دقیقا روبروی جریان عبوری از کره بوده، استخراج شده است. با توجه به دینامیک حرکت روندههای زیرسطحی در بسیاری مواقع رونده دارای یک زاویه حمله عرضی بوده که در این شرایط نقطه ایستا دقیقا روبروی جریان عبوری رونده نبوده و شرط صفر بودن سرعت در نقطه ایستا برقرار نیست. به همین منظور نقطه اندازه گیری دوم \*A دقیقا در موقعیت متقارن نقطه A نسبت به نقطه ایستا با زاویه  $\gamma$  اختیار شده و با استفاده از اختلاف فشار نقطه \*A و نقطه ایستا سرعت دومی نیز از جریان حول کره بدست میآید. با استفاده از دو سرعت بدست آمده از اختلاف فشارهای بین نقطه ایستا و نقاط A و \*A و میانگین گیری از این دو سرعت، خروجی سرعت دقیق تری در شرایط وجود زاویه حمله عرضی ناشی از دینامیک رونده و جریانات عرضی بدست میآید. به همین منظور نیاز به استفاده از دو حسگر

فشار تفاضلی برای اندازه گیری اختلاف فشارهای بین دو نقطه اختیاری و نقطه ایساتا است. عملیات میانگین گیری طبق رابطه کلی زیر که میانگین گیری مرتبه n بوده، قابل انجام است.

$$v_{\infty} = \sqrt[n]{\frac{\left(v_{\infty}^{1}\right)^{n} + \left(v_{\infty}^{2}\right)^{n}}{2}} = \frac{9}{3\sin\left(\gamma\right)} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt[n]{\frac{\left(\sqrt{\Delta P_{1}^{correct}}\right)^{n} + \left(\sqrt{\Delta P_{2}^{correct}}\right)^{n}}{2}}$$

در این رابطه  $\Delta P_2^{correct}$  و  $\Delta P_2^{correct}$  به ترتیب خروجی فشار اصلاح شده حسگر فشار تفاضلی اول و دوم است. مرتبه میانگین گیری n نیز از خروجی نتایج تجربی استخراج می شود.

در این مقاله هدف طراحی و ساخت یک حسگر سرعت بر مبنای قانون برنولی است. به منظور تست و تحلیل نتایج، یک مجموعه تستی همانند طرحواره زیر ساخته شده که در آن حسگر فشار تفاضلی و کامپیوتر دادهبردار و تحلیل گر و حسگر IMU و بقیه تجهیزات جانمایی شده است.



#### شکل (۲) طرحواره مجموعه تست حسگر سرعت آبی بر مبنای فشار تفاضلی

این مجموعه تست در واقع قسمتی از بدنه یک رونده هوشمند زیرسطحی با قطر ۲۳۰ میلیمتر است. در روی دماغه یا همان بخش نیم کرهای جلوی مجموعه سه سوراخ کوچک به منظور خطوط فشار تعبیه شده است. در این مجموعه، دماغه دقیقاً به صورت نیم کره به قطر ۲۳۰ میلیمتر طراحی شده است. سوراخ مرکزی (نقطه ایستا) دقیقاً در نقطه مرکزی رو به جلوی نیم کره و دو سوراخ کناری (نقاط اختیاری) با زاویه ۳۵ درجه نسبت به

راستای محوری بدنه و سوراخ مرکزی تعبیه شدند. با توجه به روابط ارلئه شـده در بخش قبلی هر چه زاویه بین خطوط فشـار مرکزی و کناری بیشتر باشد، اختلاف فشار اندازه گیری شده بیشتر خواهد بود. از طرفی با افزایش اختلاف فشار نیاز به یک حسگر با محدوده اندازه گیری بیشتر بوده که این منجر به افزایش قیمت به منظور استفاده از حسگر با دقت بالاتر یا کاهش دقت در صورت استفاده از حسگر با رنج خطای مشخص می شود. به این منظور با توجه به قید قیمت و برای حفظ دقت نمی توان زاویه خطوط فشار اختیاری را خیلی بزرگ در نظر گرفت و از طرفی هم باید یک حداقل اختلاف فشار، مخصوصا در سرعتهای پایین حس شود تا سرعت به درستی اندازه گیری شود. به همین منظور زاویه ۳۵ درجه برای نقاط اختیاری انتخاب شده است. با اندازه گیری اختلاف فشار بین هر کدام از این نقاط با نقطه ایستا که توسط دو حسگر فشار تفاضلی انجام میشوند، میتوان سرعت جریان اطراف بدنه را محاسبه نمود. در این مجموعه تسبت یک لوله عمودی به منظور اتصال به ارابهی تانک کشش تعبیه شده است. مشخصات ابعادی و جرمی مجموعه تست در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱) مجموعه تست حسگر سرعت آبی بر مبنای فشار تفاضلی

| اندازه      | عنوان  | رديف |
|-------------|--|------|
| ۲۳۰ میلیمتر | قطر دماغه  | ١    |
| ۴۵۰ میلیمتر | طول قسمت استوانهای   | ۲    |
| ۱ متر       | طول لوله حامل  | ٣    |
| ۱۶ کیلوگرم  | جرم مجموعه   | ۴    |
| ۲۰ لیتر     | حجم مجموعه   | ۵    |
| ۳۵ درجه     | زاویه بین سوراخهای کناری (اختیاری) و<br>مرکزی (نقطه ایستا) | ۶    |

در مجموعه تست حاضر از دو حسگر فشار تفاضلی آنالوگ، ساخت شرکت هانیول<sup>xxx</sup> مدل ASDX001PDAA5 که مشخصات آن در جدول (۲) ارائه شده، استفاده شده است. این حسگر فشار تفاضلی یک حسگر با دقت ۲ درصد کل بازه دادهخوانی است. خروجی آنالوگ این حسگر با استفاده از مبدل آنالوگ به دیجیتال ۹۲ بیتی مدل ADS1115 ساخت شرکت Texas Instrument ایز بیتی مدل ADS1115 ساخت شرکت Texas Instrument معق در خروجی حسگر فشار تفاضلی (طبق رابطه (۷))، اندازه گیری زوایای چرخش توسط یک حسگر واحد اندازه گیری اینرسی <sup>xxx</sup> مدل MU80 ساخت شرکت ARM انجام اینرسدی <sup>xxx</sup> مدل MU80 ساخت شرکت ARM انجام می شود. عملیات دادهبرداری و محاسبات در یک پردازنده ARM می شود. ملیات دادهبرداری و محاسبات در یک پردازنده م می شود.

جدول (۲) حسگر فشار تفاضلی Honeywell مدل ASDX001PDAA5

| اندازه              | عنوان مشخصه   | رديف |
|---------------------|---------------|------|
| ۵ ولت DC            | ولتاژ تغذيه   | ١    |
| ۲/۵ میلی آمپر       | جريان         | ۲    |
| ۸۵~۰ درجه سانتیگراد | دمای کارکرد   | ٣    |
| %2 FSS              | محدوده خطاى   | ۴    |
| ۱۲ بیت              | رزولوشن       | ۵    |
| ±1 psi              | محدوده عملكرد | ۶    |

## ۴- نتایج تسـت تجربی حسـگر سـرعت آبی بر مبنای قانون برنولی

به منظور بررسی عملکرد حسگر سرعت پیشنهادی مجموعه تستهایی در آزمایشگاه تخصصی دریایی NIMALA تعبیه شده است. این تستها شامل دو مجموعه تستهای استاتیکی و تستهای دینامیکی است. تستهای استاتیکی با هدف کالیبراسیون حسگرهای فشار تفاضلی برگزار می شوند. پس از انجام عملیات کالیبراسیون تستهای دینامیکی که در آن مجموعه تست توسط ارابه کشش در سرعتهای مختلف در طول حوضچه کشش حمل می شود، انجام خواهد گرفت. در ادامه نتایج مربوط به این تستهای ارائه خواهند شد.

۱-۴- نتایج تستهای استاتیکی در حوضچه کشش

قبل از ارائه نتایج توضیح مختصری از نحوه عملکرد یک حسگر فشار تفاضلی ارائه می شود. حسگر فشار تفاضلی اختلاف فشار بین دو پورت فشار P1 و P2 را اندازه می گیرد. در شکل (۳) طرحوارهای از این حسگر نشان داده شده است.



شکل (۳) منطق اندازه گیری توسط حسگر فشار تفاضلی

حسـگرهای فشـار تفاضـلی به دو دسـتهی دو طرفه <sup>i i xxx</sup> و یک طرفه <sup>i i xxx</sup> تقسیم میشـوند. در نوع دو طرفه امکان اندازه گیری فشـار در هر دو حللت (P2>P2) و (P2>P1) وجود دارد. اما نوع یک طرفه تنها در محدودهی فشـار مثبت یعنی (P2<P2) کار میکند. در این نوع از حسـگرها هر چه میزان فشـار محیط یا در واقع فشار وارده به هر خط فشار حسگر بیشتر شود، متناسب با آن میزان خطا یا بایاس حسگر بیشتر خواهد شد. به همین دلیل بوده که حسگر در عمق بالاتر میزان بایاس بیشتر از خود نشان میدهد. علت این خطاء اختلاف فشـار ایجاد شـده بین هر کدام از خطوط فشار و محفظه اطراف حسگر است. در جدول زیر نتایج مربوط به تستهای استاتیکی در عمقهای مختلف ارائه شده است.

جدول (۳) نتایج تستهای استاتیک

| بایاس<br>حسگر<br>فشار<br>(Pa) | خروجی<br>فشار<br>حسگر<br>(Pa) | فشار ناشی<br>از اختلاف<br>عمق (Pa) | اختلاف عمق<br>دو خط فشار<br>(میلی متر) | عمق<br>(متر) | شماره<br>تست |
|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|--|--------------|--------------|
| 47                            | 40                            | ۳-                                 | _ • /Ψ                                 | ۰ /٣         |              |
| ۵۳                            | <i>99</i>                     | -13                                | -1/r                                   | • /8         | ١            |
| ٨٧                            | ٨۶/۵                          | • /۵                               | • / ١                                  | ١/١          |              |
| ۴۵                            | ۶.                            | -10                                | $-1/\Delta$                            | ۰ /٣         |              |
| ۵۴                            | ۵۶                            | -۲                                 | - • / Y                                | • /8         | ۲            |
| ٩٣                            | ٨۶                            | ۷                                  | • /Y                                   | ١/١          |              |

با توجه به اینکه خروجی بایاس مربوط به دو حسـگر در هر دو تست نزدیک به هم است، در جدول بالا نتایج مربوط به یک حسگر ارائه شده است. نتایج تستهای (۱) و (۲) نشان میدهد، با افزایش میزان فشار مربوط به هر دو خط فشار حسگر تفاضلی (افزایش عمق قرار گیری حسـگر) میزان بایاس حسـگر افزایش یافته اسـت. همچنین میزان بایاس حسکر در عمقهای مختلف در دو تست تقريبا با هم برابرند. بنابراين مي توان به اين نتيجه رسيد كه با تست حسگر در عمقهای مختلف و تعیین میزان بایاس حسگر در هر عمق می توان به صورت برخط میزان بایاس حسگر را متناسب با عمق قرارگیری حذف کرد. بایاسهای بدست آمده در تستهای استاتیکی، در تست دینامیکی استفاده شده و از خروجی حسگر این بایاس حذف شده است. چون رابطه برنولی برای سیال ایدهآل تراکمنایذیر و غیرویسکوز استخراج شده به همین منظور یک ضریب تصحیحی در سرعت محاسبه شده به منظور کاهش خطای اندازه گیری ضرب می شود. با تعیین بایاس مطابق عمق قرار گیری، رابطه (۹) به صورت زیر اصلاح می شود.

$$w_{\infty} = \Theta \times \frac{2}{3\sin(\gamma)} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \times \sqrt{\frac{\left(\sqrt{\Delta P_{1}^{correct}} - \Phi_{1}(z)\right)^{n} + \left(\sqrt{\Delta P_{2}^{correct}} - \Phi_{2}(z)\right)^{n}}}{2} \qquad (1 \cdot )$$

در این رابطیه  $\Phi_1$  و  $\Phi_2$  بایاس های دو حسگر تفاضلی هستند. ضریب  $\Theta$  ضریب تصحیح به منظور اصلاح رابطه برنولی برای سیال واقعی است. با توجه به توضیحات مطرح شده، ضرایب بایاس  $\Phi_1$  و  $\Phi_2$  با استفاده از تستهای استاتیکی (مطابق جدول (۳)) و ضریب مقیاس  $\Theta$  با استفاده از تستهای دینامیکی استخراج می شوند.

۲-۴- نتایج تستهای دینامیکی در حوضچه کشش در حوضچه کشش آزمایشگاه NIMALA به منظ ور بررسی عملکردی حسگر سرعت پیشنهادی، سه تست دینامیکی تعریف شده است. در این تستها مجموعه تست توسط ارابه کشش از ابتدا تا انتهای حوضچه که مسافت تقریبی ۴۰۰ متر بوده با سرعتهای مختلف از ۲۰ تا ۲۵ متر بر ثانیه متر بوده با سرعتهای مختلف از ۲۰ تا ۲۵ متر بر ثانیه محمل شده است. دو تست اولیه در شرایطی که مجموعه تست در راستای حرکت و بدون زاویه حمله بوده، اجراء شدند. تست سوم نیز در شرایطی که مجموعه تست یک زاویه حمله ۵ درجه نسبت به راستای حرکت داشته، انجام شده است. در شکل (۴) ارابه کشش آزمایشگاه NIMALA و مجموعه تست نصب شده روی این ارابه نشان داده شده است.



شکل (۴) تصویری از ارابه کشش آزمایشگاه NIMALA و مجموعه تست حسگر سرعت بر مبنای قانون برنولی

در این تستها میزان زوایای رول و پیچ وسیله کم بوده که این منجر به اختلاف ارتفاع کمی بین دو خط فشار میشود. میزان فشار هیدروستاتیکی ناشی از این اختلاف ارتفاع بسیار ناچیز و حدود ۱۰ پاسکال است.

تســتهای اول و دوم به منظور بررســی تکرارپذیری و عملکردی حسـگر سـرعت پیشـنهادی با شـرایط یکسـان با زاویه حمله صفر انجام شدند. در شکل (۵) خروجی فشار مربوط به این تستها ارائه شده است.



شکل (۵) خروجی فشار حسگر فشار تفاضلی در تستهای ۱ و ۲ در سرعتهای ۰/۵ تا ۴/۵ متربرثانیه در آزمایشگاه NIMALA

در این تستها چون خروجی دو حسگر فشار در هر تست تقریبا یکسان است، خروجی مربوط به یک حسگر نشان داده شده است. مطابق شکل (۵) میزان خروجی فشار در سرعتهای مختلف در دو تست ۱ و ۲ تقریبا برابرند. در شکل (۶) خروجی سرعت معادل هر

دو تست ۱ و ۲ که از رابطه (۱۰) بدست آمده نشان شده است. در شکل (۶) سرعت اندازه گیری شده از حسگر سرعت پیشنهادی و خروجی سرعت مرجع که توسط حسگر سرعت نصب شده روی ارابه کشش آزمایشگاه NIMALA نشان داده شده است. در هر دو تست مشاهده می شود که سرعتهای اندازه گیری شده دقت قابل قبولی نسبت به سرعت مرجع دارند. چون خروجی حسگر سرعت مرجع نویزی است، به منظور بررسی دقت سرعت پیشنهادی در هر محدوده سرعتی باید میانگین سرعت مرجع را با میانگین سرعت اندازه گیری شده توسط حسگر سرعت پیشنهادی مقایسه نمود. به همین منظور، برای بررسی دقیق تر میانگین خروجی فشار و سرعت دو تست ۱ و ۲ در جدول (۴) ارائه شده است.

در جدول (۴) خروجی سرعت اندازه گیری شده توسط رابطه (۱۰) بدون اعمال ضریب تصحیح Θ است. به منظور تعیین این ضریب تصحیح مطابق شکل (۷) در سرعتهای مختلف، سرعت مرجع که توسط حسگر سرعت دقیق نصب شده روی ارابه کشش اندازه گیری

شده بر سرعت اندازه گیری شده تقسیم شده و منحنیای بر دو منحنی مربوط به تستهای ۱ و ۲ منطبق می شود. به منظور تطبیق منحنی از ابزار Curve Fitting در نرم افزار متلب استفاده شده است.



شکل (۶) خروجی سرعت مرجع و سرعت اندازهگیری شده توسط حسگر سرعت پیشنهادی در تستهای ۱ و ۲.

جدول (۴) میانگین فشار تفاضلی و سرعت اندازهگیری شده در تستهای ۱ و ۲ در سرعتهای مختلف.

| سرعت مرجع<br>(متربرثانیه) | سرعت اندازهگیری<br>شده (متربرثانیه) | خروجی فشار<br>تفاضلی<br>(پاسکال) | شماره<br>تست |
|---------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------|
| •/۴٧                      | •/۵۲                                | 1.7                              |              |
| ٠/٩٨                      | ۱/•۴                                | 4                                |              |
| ١/٩۵                      | ۲/۰ ۱                               | ۱۵۰۸                             |              |
| ۲/۹۴                      | ٣                                   | ۳۳۵۷                             | ١            |
| ٣/۴٢                      | $\nabla / \Delta$                   | 4004                             |              |
| ٣/٩١                      | ٣/٩۶                                | ۵۸۵۲                             |              |
| 4/41                      | ۴/۴۵                                | ٨٣٧٩                             |              |
| ۰/۴۸                      | •/۵۵                                | 118                              |              |
| •/٩Y                      | ۱/• ۱                               | ۳۸۰                              |              |
| ۱/۹۵                      | ٢                                   | 1474                             | ~            |
| ۲/۹۴                      | ٢/٩٩                                | ۳۳۴۵                             | ١            |
| 34/44                     | <b>۳/۴</b> λ                        | 40.1                             |              |
| <b>m</b> /9 <b>m</b>      | ٣/٩۵                                | ۵۸۱۷                             |              |



شکل (۷) نمودار نسبت سرعت مرجع به سرعت اندازهگیری شده در تستهای ۱ و ۲ و منحنی منطبق شده بر آنها.

مطابق شکل (۷) میزان ضریب تصحیح  $\Theta$  در سرعتهای مختلف متفاوت است. با افزایش سرعت میزان این ضریب به ۱ همگرا می شود. معادله مربوط به ضریب تصحیح  $\Theta$  بر حسب سرعت مطابق رابطه (۱۱) قابل ارائه است. این رابطه توسط ابزار Curve Fitting در نرم افزار متلب استخراج شده است.

$$\Theta = -0.1068 \times (\overline{\nu})^{-0.5} + 1.0445$$
 (11)

در رابطه (۱۱)  $\overline{V}$  سرعت اندازه گیری شده بدون استفاده از ضریب تصحیح  $\Theta$  است. با استفاده از ضریب تصحیح میزان خطای اندازه گیری سرعت در دو تست ۱ و ۲ مطابق شکل (۸) قابل ارائه است.



شکل (۸) خطای اندازه گیری سرعت در شرایط استفاده از ضریب



٨٠

است. با نتایج بدست آمده از این دو تست میزان دقت حسگر در محدوده ســرعت ۰/۵ تا ۴/۵ متر بر ثانیه در حدود ۰/۰۵ متر بر ثانیه است.

به منظور بررسی دقت حسگر در مواقعی که رونده زیرسطحی دارای زاویه حمله عرضی بوده، تست ۳ با زاویه حمله ۵ درجه تعبیه شده است. در روندههای هوشمند زیرسطحی میزان زاویه حمله کمتر از ۵ درجه با توجه به میزان جریانات عرضی محدوده منطقی است. در جدول (۵) نتایج مربوط به خروجی فشار دو حسگر فشار تفاضلی و سرعت اندازه گیری شده و مرجع در تست ۳ ارائه شده است.

جدول (۵) میانگین فشار تفاضلی و سرعت اندازهگیری شده در تست ۳ در س عتهای مختلف.

| در شرعفهای محصف |                    |               |               |       |
|-----------------|--------------------|---------------|---------------|-------|
| سرعت مرجع       | سرعت<br>اندازهگیری | خروجی<br>فشار | خروجی<br>فشار | شماره |
| (متربر ثانيه)   | شده                | حسگر ۲        | حسگر ۱        | تست   |
|                 | (متربر ثانیه)      | (پاسکال)      | (پاسکال)      |       |
| ٠/۴٨            | •/4٣               | ۷۵            | ٩٠            |       |
| ۱/۹۵            | 1/98               | ٩٨۶           | ۱۷۹۵          |       |
| ۲/۹۴            | ۲/9۲               | 7711          | 4.97          | ٣     |
| ۳/۴۳            | ٣/۴٣               | 79.XV         | 68.2          |       |
| ٣/٩١            | ٣/٩٢               | 3914          | ٨٢٢٨          |       |

مطابق جدول (۵)، زمانی که مجموعه تست تحت زاویه حمله قرار می گیرد خروجی فشار اندازه گیری شده توسط هر یک از حسگرهای نصب شده در مجموعه تست نتایج کاملا متفاوتی را نشان می دهند. این نتیجه خود نیاز به استفاده از دو حسگر مجزا را اثبات می کند. چنانچه بخواهیم توسط هر یک از این حسگرها سرعت معادل فشار را محاسبه کنیم، خطای سرعت به شدت زیاد می شود. بنابراین همان طور که قبلا بیان کردیم نیاز به استفاده از میانگین گیری از خروجی سرعت هر یک از حسگرها مطابق رابطه میانگین گیری از خروجی سرعت هر یک از حسگرها مطابق رابطه رابطه (۱۰) است. اما اینکه مرتبه میانگین گیری یا پارامتر n موجود در میزان خطای محاسبه سرعت که از تفاضل سرعت اندازه گیری شده با رابطه (۱۰) (با عدد n مختلف) و سرعت مرجع بدست می آید. در شکل (۹) نشان داده شده است.

با توجه به نتایج شکل (۹) میانگین گیری مرتبه ۴ کمترین خطا را نسبت به مراتب دیگر ارائه کرده است. بنابراین عدد n موجود در رابطه (۱۰) برابر ۴ تعیین می شود. نتایج سرعت ارائه شده در جدول (۶) نیز با میانگین گیری مرتبه ۴ و با اعمال ضریب تصحیح مطابق رابطه (۱۱) بدست آمدند. بنابراین با نتایج بدست آمده دقت حسگر در حالتی که رونده هوشمند زیرسطحی زاویه حمله دارد نیز در محدود ۰/۰۵ متر بر ثانیه است.



شکل (۹) خطای سرعت اندازهگیری شده در تست ۳ با استفاده از میانگینگیری مراتب ۱ تا ۴ خروجی حسگرهای فشار ۱ و ۲.

۵- نتیجهگیری

در این مقلله یک حسیگر سرعت آبی بر مبنای قانون برنولی به منظور کاربری در روندههای هوشمند زیرسطحی طراحی و ساخته شده است. به منظور تحلیل و بررسی دقت این حسگر، مجموعه تستی که قسمتی از بدنه یک رونده هوشمند زیرسطحی بوده ساخته شده و حسگر روی آن نصب شده است. در این مجموعه تست، از یک حسگر واحد اندازه گیری اینرسی نیز به منظور تخمین زوایای غلت و فراز برای حذف خطای ناشی از اختلاف ارتفاع بین دو خط فشار هر کدام از حسگرهای فشار تفاضلی، استفاده شده است. این حسگر در دو مجموعه تست استاتیکی و دینامیکی در آزمایشـگاه حوضـچه کشـش NIMALA کالیبره شـده اسـت. در تستهای استاتیکی ضرایب بایاس مربوط به دو حسگر فشار تفاضلی ( $\Phi_2 \, {}_{2} \, {}_{0} \, {}_{1}$ ) متناسب با عمق قرارگیری حسگر استخراج شده است. این ضرایب با توجه به ماهیت حسگر فشار تفاضلی متناسب با عمق قرار گیری یا در واقع محدوده فشار عملکردی تغییر می کنند. بطوری که با افزایش عمق میزان این بایاس افزایش می یابد. ضریب تصحیح  $\Theta$  نیز با استفاده از تستهای دینامیکی استخراج شده است. این ضریب تصحیح به سرعت حرکتی وسیله وابسته بوده که رابطه مربوط به این ضریب با سرعت حرکتی وسیله با استفاده از تستهای تجربی دینامیکی استخراج شده است. این حســگر یک حسـگر سـرعت محوری بوده که برای محدوده اندازه گیری ۵/۰ تا ۴/۵ متر بر ثانیه طراحی شده است. با مقایسه خروجی سرعت اندازه گیری شده توسط حسگر با سرعت مرجع اندازه گیری شده توسط ارابه کشش در تستهای دینامیکی مختلف که در شرایط حضور زاویه حمله و بدون زاویه حمله عرضی انجام شدند، دقت این حسگر سرعت آبی در محدوده ۰/۰۵ متر بر ثانیه است. این حسگر سرعت آبی در مقایسه با حسگرهای سرعت آبی

12- Allotta, B., Costanzi, R., Ridolfi, A., Colombo, C., Bellavia, F., and Fanfani, M., (2015), The ARROWS project: Adapting and developing robotics technologies for underwater archaeology, IFAC-PapersOnLine, vol. 48, no. 2, pp. 194–199.

13- Mourikis, A. and Roumeliotis, S., (2006), Performance analysis of multi-robot cooperative localization, IEEE Trans. Robot., vol. 22, no. 4, pp. 666–681.

14- Fallon, M. F., Kaess, M., Johannsson, H. and Leonard, J. J., (2011), Efficient AUV navigation fusing acoustic ranging and side-scan sonar, inProc. IEEE Int. Conf. Robot, pp. 2398–2405.

15- Osterloh, C., Pionteck, T. and Maehle, E., (2012), MONSUN II: A small and inexpensive AUV for underwater swarms, in Proc. 7th German Conf. Robot, pp. 1–6.

16- OpenROV, (2017), "OpenROV/products/trident," OpenROV, Berkeley, CA, USA, [Online]. Available: https://www.openrov.com/products/trident/, Accessed on.

17- Rudnick, D. L., Davis, R. E., Eriksen, C. C., Fratantoni, D. M. and Perry, M. J., (2004), Underwater gliders for ocean research, Mar. Technol. Soc. J., vol. 38, no. 2, pp. 73–84.

18- Liu, P., Wang, B., Deng Z. and Fu, M., (2018), "INS/DVL/PS Tightly Coupled Underwater Navigation Method with Limited DVL Measurements1", IEEE Sensors Journal, vol. 18, Issue. 7, pp. 2994–3002.

19- Claus, B., Kepper, J. H., Suman, S., Kinsey, J. C., (2017), Closed-loop one-way-travel time navigation using low-grade odometry for autonomous underwater vehicles, Journal of Field Robotics, vol. 35, Issue. 4, pp. 421–434.

20- AIRMARE Technology Corporation, (2018), "Datasheet UST850 SmartTM Sensor Thru-hull", Milford, Hampshire, USA, [Online]. Available: http://www.airmar.com/uploads/brochures/UST800-850-UDST800-SmartSensors.pdf.

21- Measurement Science Enterprise (MSE), Inc., (2007), Datasheet MicroVTM System, Pasadena, CA, USA, [Online]. Available: http://www.msesensors.com/Papers/mixcroVdescription.pdf.

22- Anderson, Jr., J., (1985), Fundamentals of Aerodynamics, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill.

23- Fuentes-Pérez J. F., A Tuhtan, J., Carbonell-Baeza, R., Musall, M., Toming, G., Muhammad, M., Kruusmaa, M., (2015), Current velocity estimation using a lateral line probe, Ecol. Eng., vol. 85, pp. 296– 300.

24- Ower, E. and Pankhurst, R. C., (2014), The Measurement of Air Flow. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.

موجود دارای محدوده قیمتی و مصرف انرژی بسیار پایینی است. قیمت این حسگر در محدوده ۱۰۰ دلار و مصرف انرژی آن حدود ۲۰۰ میلی وات است.

۶ – مراجع

1- Yoerger, D. R., Jakuba, M., Bradley, A. M. and Bingham, B., (2007), Techniques for deep sea near bottom survey using an autonomous underwater vehicle, Int. J. Robot. Res., vol. 26, no. 1, pp. 41–54. 2- Khan, R., Taher, T. and Hover, F., (Sep. 2010), Accurate geo-referencing method for AUVs for oceanographic sampling, in Proc. OCEANS Conf., DOI: 10.1109/OCEANS.2010.5664570.

3- Kunz, C., Murphy, C., Singh, H., Pontbriand, C., Sohn, R. A., Singh, S., Sato, T., Roman, C., Nakamura, K.-I., Jakuba, M., Eustice, R., Camilli, R. and J. Bailey, (2009), Toward extra planetary underice exploration: Robotic steps in the arctic, J. Field Robot., vol. 26, no. 4, pp. 411–429.

4- Paull, L., Saeedi, S., Seto, M. and Li, H., (2014), AUV navigation and localization: A review, IEEE J. Ocean. Eng., vol. 39, no. 1, pp. 131–149.

5- Sabet, M. T., Daniali, H. M., Fathi, A. and Alizadeh, E., (2018), A Low-Cost Dead Reckoning Navigation System for an AUV Using a Robust AHRS: Design and Experimental Analysis", IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, vol. 43, Issue. 4, pp. 927–939.

6- Alizadeh, E., Nourmohammadi, H., Sabet, M. T., Zarrini Larimi, M., (2017), Design and implementation of AHRS/GPS/DR Navigation algorithm applied to long-range AUVs with high underwater durability, Journal of Marin Engineering, Vol.26, p.47-57. (In Persian)

7- Modarress, D., Svitek, P., Modarress, K. and Wilson D. W., (2007), Micro-Optical Sensors for Underwater Velocity Measurement, IEEE conference, Tokyo, Japan, 17-20.

8- Costanzi, R., Fanelli, F., Meli, E., Ridolfi, A., Caiti, A. and Allotta, B., (2019), UKF-Based Navigation System for AUVs: Online Experimental Validation, IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, vol. 44, Issue. 3, pp. 633–641.

9- Wang, D., Xu, X., Yao, Y., Zhang, T. and Zhu, Y., (2020), A Novel SINS/DVL Tightly Integrated Navigation Method for Complex Environment", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 69, Issue. 7, pp. 5183–5196.

10- Dhanak, M. R. and Xiros, N. I., (2016), Springer Handbook of Ocean Engineering, New York, NY, USA, Springer.

11- Teledyne RD Instrument, Inc, (2017), Datasheet Teledyne explorer DVL, Poway, CA, USA, [Online]. Available: http://www.teledynemarine.com/explorerdoppler-vel.

Downloaded from marine-eng.ir on 2025-09-05

Surge Velocity xviii Bernoulli's Law xix Differential Pressure Sensor xx National Iranian Marine Laboratory (NIMALA) xxi Inviscid xxii Incompressible xxiii Stagnation Point xxiv Static Point xxv Arbitrary Point xxvi Roll xxvii Pitch xxviii Yaw xxix Honeywell xxx Inertial Measurement Unit (IMU) xxxi Bidirectional xxxii Unidirectional xxxiii

Autonomous Underwater vehicle (AUV)<sup>i</sup> Guidance, Navigation and Control (GNC) <sup>ii</sup> Attitude and Heading <sup>iii</sup> Acoustic Navigation iv Geophysical Navigation v Inertial Navigation vi Doppler Velocity Log (DVL) vii Ultrasonic Speed Sensor viii Optical Speed Sensor ix Bottom Tracking <sup>x</sup> Water Tracking xi Unscented Kalman Filter (UKF) xii Beam xiii Extended Kalman Filter (EKF) xiv Particle Filter (PF) xv Global Positioning System (GPS) xvi

Transducer xvii