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

محمدتقی ثابت[۱*] ، حسین بهروز[۲] ، حسین نورمحمدی[۳]

[۱] 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

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۰۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۲۹

کلمات کلیدی:
رونده هوشمند زیرسطحی
حسگر سرعت آبی
قانون برنولی
فشار تفاضلی

چکیده

یکی از پارامترهای مهم در ناوبری یک رونده هوشمند زیرسطحی، تخمین سرعت است. حسگرهای سرعت آبی متنوعی وجود دارند که با استفاده از تکنولوژی‌های متفاوت قابلیت اندازه‌گیری سرعت یک رونده در زیرسطح را دارند. از جمله این حسگرها می‌توان به حسگرهای سرعت آلتراسونیک، الکترومغناطیس، نوری، پدلویل و داپلری اشاره نمود. در این مقاله هدف طراحی و ساخت یک حسگر سرعت آبی ارزان قیمت بر مبنای فشار تفاضلی بوده که با استفاده از قانون برنولی میزان سرعت یک رونده زیرسطحی را محاسبه می‌کند. برای بررسی عملکرد حسگر پیشنهادی، مجموعه تستی ساخته شده شده و در حوضچه کشش آزمایشگاه دریایی ملی ایران (NIMALA) تست شده است. به منظور بررسی دقت حسگر پیشنهادی، حسگر سرعت نصب شده روی ارابه کشش به عنوان حسگر مرجع در نظر گرفته شده است. در نهایت نتایج نشان داده که در محدوده سرعت ۰/۵ تا ۴/۵ متر بر ثانیه دقت اندازه‌گیری سرعت در محدوده ۰/۰۵ متربرثانیه است.

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

Mohammadtaghi Sabet [1*], Hossein Behroz [2], Hossein Nourmohammadi[3]

[1] Assistance Professor, Malekashtar University of Technology, Northern Research Center for Science and Technology, sabet_mt@mut.ac.ir
[2] Researcher, Malekashtar University of Technology, Northern Research Center for Science and Technology, hossein.behroz@gmail.com
[3] Assistance Professor, Malekashtar University of Technology, Northern Research Center for Science and Technology, hnourmohammadi@mut.ac.ir

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).

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.6.8]

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 هوشمند دریایی می‌توان به رونده‌های هوشمند زیرسطحی [i] اشاره نمود که برای مأموریت‌های مختلف از جمله اکتشاف، شناخت عوارض زیرآبی، تولید نقشه‌های جغرافیایی و ژرفاسنجی، عملیات نظامی و غیره استفاده می‌شوند [۱-۳]. تمامی این سامانه‌های زیرسطحی به منظور هوشمندسازی نیاز به تجهیزاتی شامل سامانه‌های هدایت، ناوبری و کنترل [ii] دارند. در بین این سامانه‌ها، سامانه ناوبری به عنوان چشم سامانه زیرسطحی هوشمند، وظیفه تعیین وضعیت و سمت [iii]، سرعت و موقعیت وسیله در هر لحظه از زمان را بر عهده دارد. روش‌های ناوبری رونده‌های هوشمند زیرسطحی به سه گروه عمده‌ی ناوبری آکوستیکی[iv]، جغرافیایی[v] و اینرسی [vi] قابل تفکیک هستند [۴]. روش‌های ناوبری اینرسی به دلیل عدم استفاده از سامانه‌های موقعیت‌یابی مجزا دارای رشد خطای موقعیت بدون کران و محدوده هستند. برای جلوگیری از رشد خطا در این سامانه ناوبری، از حسگرهای کمک ناوبری استفاده می‌شود. 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 [vii]، آلتراسونیک [viii] و نوری[ix] بیشتر در رونده‌های هوشمند زیرسطحی استفاده شدند [۵-۹].

حسگر DVL یک حسگر آکوستیکی بوده که سرعت را نسبت به کف[x] یا عمقی [xi] از آب دریا اندازه می‌گیرد [۱۰]. این حسگر سرعت را با استفاده از حداقل سه پالس بلند اندازه‌گیری شده توسط سه بیم آکوستیکی محاسبه می‌کند. این حسگرها معمولا دارای ۴ بیم آکوستیکی هستند. سرعت اندازه‌گیری شده توسط این حسگر در سه راستای بدنی حسگر ارائه می‌شود. زمانی که عمق حسگر تا بستر دریا در محدوده عملکردی آن باشد، خروجی حسگر دقت قابل قبولی دارد. به همین منظور یکی از محدودیت‌های این حسگر فاصله عمق از بستر دریا است. زمانی که این حسگر قادر به اندازه‌گیری سرعت نسبت به بستر دریا نباشد، نسبت به جریان عمق مشخصی از آب سرعت را اندازه می‌گیرد. در این صورت دقت حسگر سرعت کاهش می‌یابد [۱۱]. این حسگر علاوه بر این 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 می‌کند. به عنوان مثال در رونده‌های هوشمند 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 حسگرهای DVL با توجه به قیمت بالا و مصرف انرژی زیاد امکان‌پذیر 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 بی‌ردپا [xii] بوده از حسگر DVL به منظور اندازه‌گیری سرعت رونده و جریانات زیرسطحی استفاده کردند [۸]. در مقاله [۹] آقای وانگ و همکارانش یک سامانه ناوبری اینرسی تلفیقی را برای یک رونده هوشمند زیرسطحی ارائه نمودند. در این سامانه ناوبری از حسگر DVL به عنوان حسگر کمک ناوبری استفاده شده است. سامانه ناوبری ارائه شده در این کار تحقیقاتی، نسبت به نواقص DVL در محیط‌های پیچیده که در آنها یک یا چند بیم [xiii] حسگر DVL دچار نقص یا به علت تغییر ناگهانی عواض کف دریا دچار ایراد در اندازه‌گیری می‌شوند، 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[xiv] و ذره‌ای[xv] ارائه کردند. در این سامانه‌های ناوبری، بایاس حسگر DVL در زمانی که سرعت نسبت به عمق مشخصی از آب ارائه می‌شود، با کمک سامانه موقعیت‌یابی جهانی [xvi] به صورت برخط تخمین زده می‌شود.

حسگر سرعت التراسونیک از پالس‌های التراسونیک برای دنبال کردن ذرات ریز آب استفاده می‌کند. به این منظور، این حسگر دارای دو مبدل [xvii] فرستنده و گیرنده با فاصله مشخص به منظور محاسبه مدت زمان عبور ذرات ریز آب از مقابل حسگر استفاده می‌کند. با محاسبه زمان عبور ذرات از فاصله بین دو مبدل، سرعت رونده زیرسطحی یا سطحی محاسبه می‌شود [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 می‌شوند. 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 جابه‌جایی ذرات ریز آب بین دو بیم نوری، سرعت محوری وسیله محاسبه می‌شود. این حسگر برای رونده‌های زیرسطحی و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.6.8]

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 اندازه‌گیری سرعت محوری [xviii] رونده‌های زیرسطحی است. حسگر سرعت پیشنهادی در مقابل حسگرهای سرعت قابل کاربرد در محیط آبی موجود، یک حسگر بسیار ارزان قیمت، با مصرف انرژی پایین و ابعاد کوچک 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 می‌کند. این رابطه از قانون برنولی [xix] استخراج می‌شود. 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 اندازه‌گیری اختلاف فشار مخصوصا در سرعت‌های پایین که اختلاف فشار کم است از اهمیت برخوردار است. به همین منظور استفاده از حسگرهای نوع فشار مطلق و گیج ممکن است کار را پیچیده یا غیر ممکن کند. به منظور اندازه‌گیری این اختلاف فشار نیاز به حسگر دقیق همچون حسگرهای فشار تفاضلی است. در این مقاله به منظور افزایش دقت سرعت اندازه‌گیری شده به خصوص در مواقعی که رونده دارای زاویه حمله عرضی است، از دو حسگر فشار تفاضلی [xx] استفاده شده است. حسگر سرعت طراحی شده در این مقاله قابلیت اندازه‌گیری سرعت از ۰/۵ 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 [xxi] (NIMALA) تست شده است. مجموعه تست تعبیه شده توسط ارابه کشش آزمایشگاه NIMALA در سرعت‌های مختلف حمل شده و خروجی سرعت حسگر با خروجی سرعت مرجع گزارش شده توسط سیستم اندازه‌گیری روی ارابه کشش مقایسه می‌شود. با توجه به نتایج ارائه شده از تست‌های تجربی، حسگر سرعت پیشنهادی پس از کالیبراسیون دارای حداکثر میانگین خطای ۰/۰۵ متر بر ثانیه است.

در ادامه مقاله در بخش دوم تئوری مربوط به حسگر سرعت پیشنهادی و مباحث مربوط به آن از جمله رابطه سرعت و اختلاف فشار و اصلاحات قابل انجام روی رابطه ارائه خواهد شد. سپس در بخش سوم مجموعه تست و تجهیزات مربوط به تست ارائه خواهند شد. در بخش چهارم نتایج مربوط به تست‌های تجربی و خروجی داده‌های تست ارائه می‌شوند. در بخش نهایی نتیجه‌گیری بدست آمده از مقاله حاضر و دقت مورد انتظار از حسگر طراحی شده گزارش می‌شود.

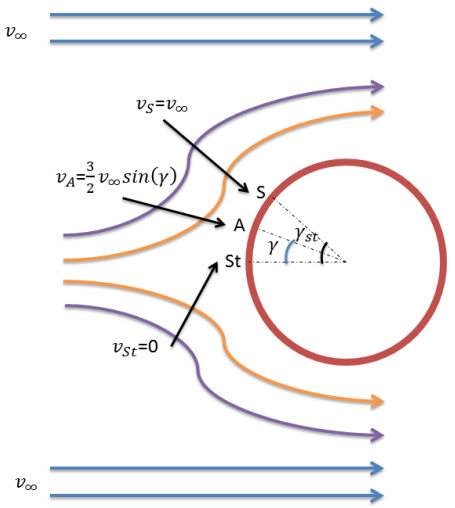
۲- تئوری حسگر سرعت آبی بر مبنای قانون برنولی

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 می‌گیرد. طراحی این حسگر بر مبنای قانون برنولی صورت گرفته است. طبق این قانون با فرض غیر ویسکوز [xxii] و تراکم‌ناپذیر [xxiii] بودن سیال و صرف نظر از اثر ارتفاع یا عمق ارتباط بین فشار p و سرعت v طبق رابطه زیر برقرار است.

$$p+\frac{1}{2}\rho v^2 = const \qquad (۱)$$

در این رابطه ρ 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 [xxiv] 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 [xxv] 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 [xxvi] روی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.6.8]

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].

$$v_A = \frac{3}{2} v_\infty \sin(\gamma) \qquad (۲)$$

در این رابطه γ و 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:

$$P_{St} = P_A + \frac{1}{2}\rho v_A^2 = P_A + \frac{1}{2}\rho\left(\frac{3}{2} v_\infty \sin(\gamma)\right)^2 \qquad (۳)$$

$$v_\infty = \frac{2}{3\sin(\gamma)}\sqrt{\frac{2(P_{St}-P_A)}{\rho}} = \frac{2}{3\sin(\gamma)}\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \qquad (۴)$$

با توجه به رابطه (۴) می‌توان دریافت که با استفاده از محاسبه اختلاف فشار نقطه ایستا و یک نقطه اختیاری دیگر روی سطح یک کره می‌توان سرعت جریان اطراف حول کره را تعیین نمود.

باید توجه داشت که رابطه (۴) یک رابطه‌ای است که در حالت 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 وسیله حول محورهای مختلف رخ می‌دهد.

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

$$R(\varphi,\theta,\psi) = \begin{bmatrix} C(\theta)C(\psi) & -S(\psi)C(\varphi)+C(\psi)S(\theta)S(\varphi) & S(\psi)S(\varphi)+C(\psi)S(\theta)C(\varphi) \\ C(\theta)S(\psi) & C(\psi)C(\varphi)+S(\psi)S(\theta)S(\varphi) & -C(\psi)S(\varphi)+S(\psi)S(\theta)C(\varphi) \\ -S(\theta) & C(\theta)S(\varphi) & C(\theta)C(\varphi) \end{bmatrix} \qquad (۵)$$

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

$$\begin{aligned} z^n &= z_A^n - z_{St}^n = \\ &-S(\theta)x^b + C(\theta)S(\phi)y^b + C(\theta)C(\phi)z^b \end{aligned} \qquad (۶)$$

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.

$$\Delta P^{correct} = \Delta P - \rho g\left(z_A^n - z_{St}^n\right) \qquad (۷)$$

بنابراین رابطه (۴) به صورت زیر اصلاح می‌شود.

$$v_\infty = \frac{2}{3\sin(\gamma)}\sqrt{\frac{2\Delta P^{correct}}{\rho}} \qquad (۸)$$

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 بین دو نقطه ایستا و نقطه اختیاری A بوده، می‌توان سرعت جریان آزاد را اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری 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 میانگین‌گیری از این دو سرعت، خروجی سرعت دقیق‌تری در شرایط وجود زاویه حمله عرضی ناشی از دینامیک رونده و جریانات عرضی بدست می‌آید. به همین منظور نیاز به استفاده از دو حسگر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.6.8]

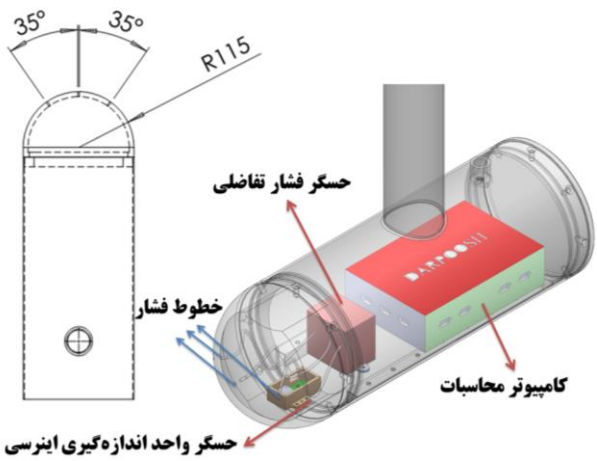
فشار تفاضلی برای اندازه‌گیری اختلاف فشارهای بین دو نقطه اختیاری و نقطه ایستا است. عملیات میانگین‌گیری طبق رابطه کلی زیر که میانگین‌گیری مرتبه n بوده، قابل انجام است.

$$v_\infty = \sqrt[n]{\frac{\left(v_\infty^1\right)^n + \left(v_\infty^2\right)^n}{2}} = \frac{2}{3\sin(\gamma)}\sqrt{\frac{2}{\rho}}\sqrt[n]{\frac{\left(\sqrt{\Delta P_1^{correct}}\right)^n + \left(\sqrt{\Delta P_2^{correct}}\right)^n}{2}} \quad (۹)$$

در این رابطه $\Delta P_1^{correct}$ و $\Delta P_2^{correct}$ به ترتیب خروجی فشار اصلاح شده حسگر فشار تفاضلی اول و دوم است. مرتبه میانگین‌گیری n نیز از خروجی نتایج تجربی استخراج می‌شود.

۳ –مجموعه تست حسگر سرعت آبی بر مبنای قانون برنولی

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 تحلیل‌گر 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 ارائه شده در بخش قبلی هر چه زاویه بین خطوط فشار مرکزی و کناری بیشتر باشد، اختلاف فشار اندازه‌گیری شده بیشتر خواهد بود. از طرفی با افزایش اختلاف فشار نیاز به یک حسگر با محدوده اندازه‌گیری 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 می‌شود. به این منظور با توجه به قید قیمت و برای حفظ دقت نمی‌توان 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 اندازه‌گیری شود. به همین منظور زاویه ۳۵ درجه برای نقاط اختیاری انتخاب شده است. با اندازه‌گیری 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 تست 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

ردیف	عنوان	اندازه
۱	قطر دماغه	۲۳۰ میلیمتر
۲	طول قسمت استوانه‌ای	۴۵۰ میلیمتر
۳	طول لوله حامل	۱ متر
۴	جرم مجموعه	۱۶ کیلوگرم
۵	حجم مجموعه	۲۰ لیتر
۶	زاویه بین سوراخ‌های کناری (اختیاری) و مرکزی (نقطه ایستا)	۳۵ درجه

در مجموعه تست حاضر از دو حسگر فشار تفاضلی آنالوگ، ساخت شرکت هانیول[xxx] 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 ۱۶ بیتی مدل ADS1115 ساخت شرکت Texas Instrument (TI) به سیگنال دیجیتال تبدیل شده است. به منظور اصلاح اثر عمق در خروجی حسگر فشار تفاضلی (طبق رابطه (۷))، اندازه‌گیری زوایای چرخش توسط یک حسگر واحد اندازه‌گیری اینرسی[xxxi] مدل IMU80 ساخت شرکت Skymems انجام می‌شود. عملیات داده‌برداری و محاسبات در یک پردازنده ARM مدل STM32H743 که یک پردازنده ۳۲ بیتی بوده، انجام می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.6.8]

جدول (۲) حسگر فشار تفاضلی Honeywell مدل ASDX001PDAA5

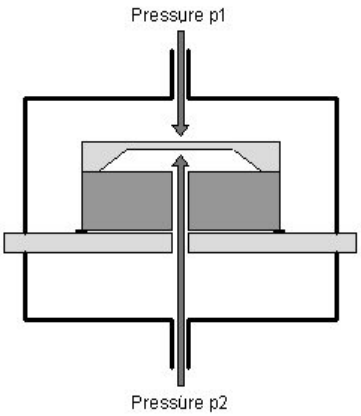
ردیف	عنوان مشخصه	اندازه
۱	ولتاژ تغذیه	۵ ولت DC
۲	جریان	۲/۵ میلی آمپر
۳	دمای کارکرد	۰~۸۵ درجه سانتیگراد
۴	محدوده خطای	%2 FSS
۵	رزولوشن	۱۲ بیت
۶	محدوده عملکرد	±1 psi

۴- نتایج تست تجربی حسگر سرعت 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 می‌شوند. پس از انجام عملیات کالیبراسیون تست‌های دینامیکی که در آن مجموعه تست توسط ارابه کشش در سرعت‌های مختلف در طول حوضچه کشش حمل می‌شود، انجام خواهد گرفت. در ادامه نتایج مربوط به این تست‌های ارائه خواهند شد.

۴-۱- نتایج تست‌های استاتیکی در حوضچه کشش

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



شکل (۳) منطق اندازه‌گیری توسط حسگر فشار تفاضلی

حسگرهای فشار تفاضلی به دو دسته‌ی دو طرفه [xxxi] و یک طرفه [xxxii] تقسیم می‌شوند. در نوع دو طرفه امکان اندازه‌گیری فشار در هر دو حالت (P1>P2) و (P2>P1) وجود دارد. اما نوع یک طرفه تنها در محدوده‌ی فشار مثبت یعنی (P1>P2) کار می‌کند. در این نوع از حسگرها هر چه میزان فشار 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 خطا، اختلاف فشار ایجاد شده 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

شماره تست	عمق (متر)	اختلاف عمق دو خط فشار (میلی متر)	فشار ناشی از اختلاف عمق (Pa)	خروجی فشار حسگر (Pa)	بایاس حسگر فشار (Pa)
۱	۰/۳	-۰/۳	-۳	۴۵	۴۲
	۰/۶	-۱/۳	-۱۳	۶۶	۵۳
	۱/۱	۰/۱	۰/۵	۸۶/۵	۸۷
۲	۰/۳	-۱/۵	-۱۵	۶۰	۴۵
	۰/۶	-۰/۲	-۲	۵۶	۵۴
	۱/۱	۰/۷	۷	۸۶	۹۳

با توجه به اینکه خروجی بایاس مربوط به دو حسگر 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 قرارگیری حسگر) میزان بایاس حسگر افزایش یافته است. همچنین میزان بایاس حسگر در عمق‌های مختلف در دو تست تقریبا با هم برابرند. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که با تست حسگر در عمق‌های مختلف و تعیین میزان بایاس حسگر در هر عمق می‌توان 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 تراکم‌ناپذیر و غیرویسکوز استخراج شده به همین منظور یک ضریب تصحیحی در سرعت محاسبه شده به منظور کاهش خطای اندازه‌گیری ضرب می‌شود. با تعیین بایاس مطابق عمق قرارگیری، رابطه (۹) به صورت زیر اصلاح می‌شود.

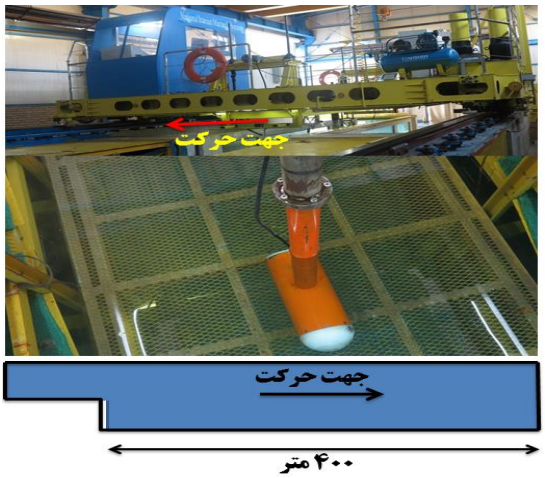
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.6.8]

$$v_{\infty} = \Theta \times \frac{2}{3\sin(\gamma)}\sqrt{\frac{2}{\rho}} \times \sqrt[n]{\frac{\left(\sqrt{\Delta P_1^{correct} - \Phi_1(z)}\right)^n + \left(\sqrt{\Delta P_2^{correct} - \Phi_2(z)}\right)^n}{2}} \quad (۱۰)$$

در این رابطه Φ_1 و Φ_2 بایاس‌های دو حسگر تفاضلی هستند. ضریب Θ ضریب تصحیح به منظور اصلاح رابطه برنولی برای سیال واقعی است. با توجه به توضیحات مطرح شده، ضرایب بایاس Φ_1 و Φ_2 با استفاده از تست‌های استاتیکی (مطابق جدول (۳)) و ضریب مقیاس Θ با استفاده از تست‌های دینامیکی استخراج می‌شوند.

۲-۴- نتایج تست‌های دینامیکی در حوضچه کشش

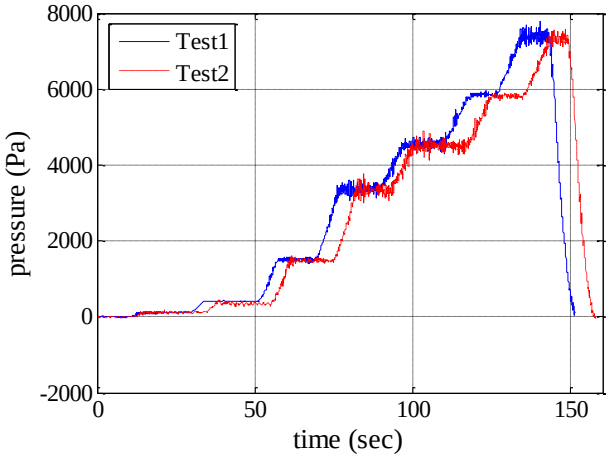
در حوضچه کشش آزمایشگاه NIMALA به منظور بررسی عملکردی حسگر سرعت پیشنهادی، سه تست دینامیکی تعریف شده است. در این تست‌ها مجموعه تست توسط ارابه کشش از ابتدا تا انتهای حوضچه که مسافت تقریبی ۴۰۰ متر بوده با سرعت‌های مختلف از ۰/۵ تا ۴/۵ متر بر ثانیه حمل شده است. دو تست اولیه در شرایطی که مجموعه تست در راستای 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.

تست‌های اول و دوم به منظور بررسی تکرارپذیری و عملکردی حسگر سرعت پیشنهادی با شرایط یکسان 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

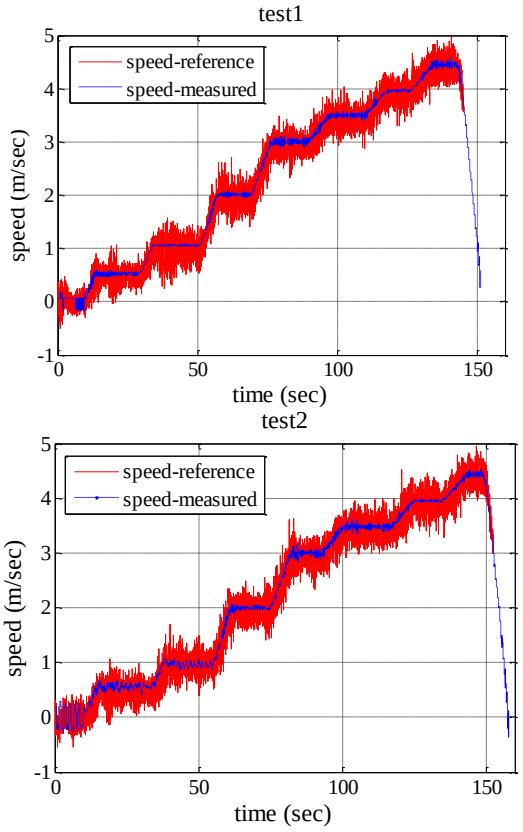
در این تست‌ها چون خروجی دو حسگر فشار در هر تست تقریبا یکسان است، خروجی مربوط به یک حسگر نشان داده شده است. مطابق شکل (۵) میزان خروجی فشار در سرعت‌های مختلف در دو تست ۱ و ۲ تقریبا برابرند. در شکل (۶) خروجی سرعت معادل هر دو تست ۱ و ۲ که از رابطه (۱۰) بدست آمده نشان شده است.

در شکل (۶) سرعت اندازه‌گیری 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 می‌شود که سرعت‌های اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری شده توسط حسگر سرعت پیشنهادی مقایسه نمود. به همین منظور، برای بررسی دقیق‌تر میانگین خروجی فشار و سرعت دو تست ۱ و ۲ در جدول (۴) ارائه شده است.

در جدول (۴) خروجی سرعت اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.6.8]

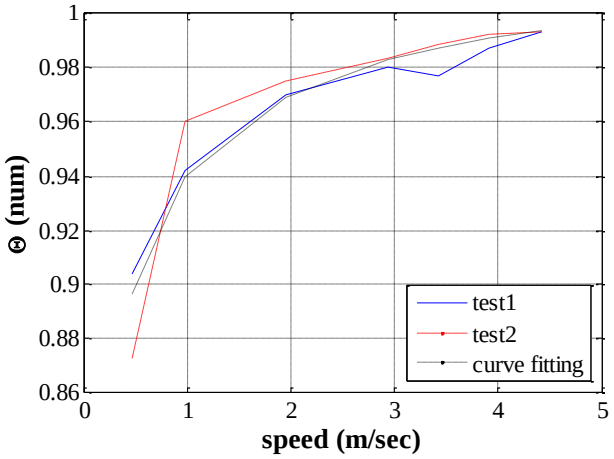
شده بر سرعت اندازه‌گیری شده تقسیم شده و منحنی‌ای بر دو منحنی مربوط به تست‌های ۱ و ۲ منطبق می‌شود. به منظور تطبیق منحنی از ابزار Curve Fitting در نرم افزار متلب استفاده شده است.



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.

شماره تست	خروجی فشار تفاضلی (پاسکال)	سرعت اندازه‌گیری شده (متربرثانیه)	سرعت مرجع (متربرثانیه)
۱	۱۰۲	۰/۵۲	۰/۴۷
	۴۰۰	۱/۰۴	۰/۹۸
	۱۵۰۸	۲/۰۱	۱/۹۵
	۳۳۵۷	۳	۲/۹۴
	۴۵۵۸	۳/۵	۳/۴۲
	۵۸۵۲	۳/۹۶	۳/۹۱
	۷۳۸۹	۴/۴۵	۴/۴۲
۲	۱۱۶	۰/۵۵	۰/۴۸
	۳۸۰	۱/۰۱	۰/۹۷
	۱۴۸۹	۲	۱/۹۵
	۳۳۴۵	۲/۹۹	۲/۹۴
	۴۵۰۱	۳/۴۸	۳/۴۴
	۵۸۱۷	۳/۹۵	۳/۹۲
	۷۳۳۷	۴/۴۴	۴/۴۱

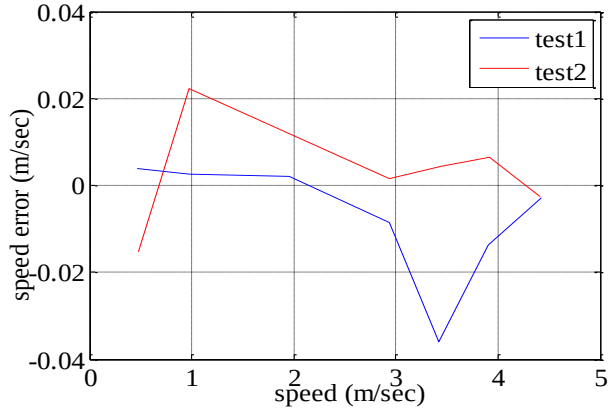


شکل (۷) نمودار نسبت سرعت مرجع به سرعت اندازه‌گیری شده در تست‌های ۱ و ۲ و منحنی منطبق شده بر آنها.

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

$$\Theta = -0.1068 \times \left(\bar{v}\right)^{-0.5} + 1.0445 \qquad (۱۱)$$

در رابطه (۱۱) $\bar{v}$ سرعت اندازه‌گیری شده بدون استفاده از ضریب تصحیح Θ است. با استفاده از ضریب تصحیح میزان خطای اندازه‌گیری سرعت در دو تست ۱ و ۲ مطابق شکل (۸) قابل ارائه است.



شکل (۸) خطای اندازه‌گیری سرعت در شرایط استفاده از ضریب تصحیح

با توجه به جدول (۴) مشاهده می‌شود که میزان فشار خروجی حسگر در تست‌های ۱ و ۲ تکرارپذیری دقت حسگر را تایید می‌کنند. این نتیجه با خروجی سرعت اندازه‌گیری شده نیز مشهود

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.6.8]

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

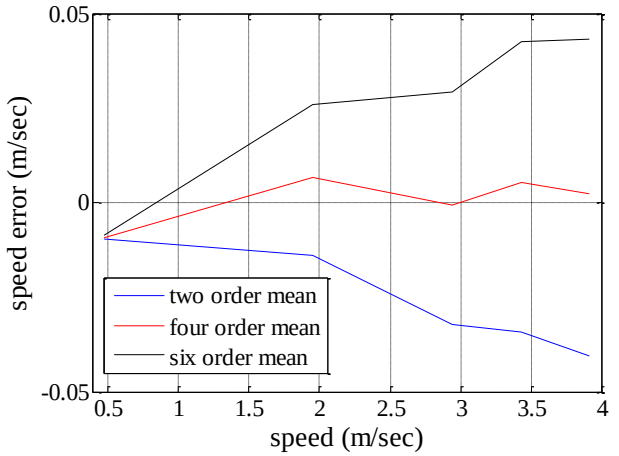
به منظور بررسی دقت حسگر در مواقعی که رونده زیرسطحی دارای زاویه حمله عرضی بوده، تست ۳ با زاویه حمله ۵ درجه تعبیه شده است. در رونده‌های هوشمند زیرسطحی میزان زاویه حمله کمتر از ۵ درجه با توجه به میزان جریانات عرضی محدوده منطقی است. در جدول (۵) نتایج مربوط به خروجی فشار دو حسگر فشار تفاضلی و سرعت اندازه‌گیری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

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

شماره تست	خروجی فشار حسگر ۱ (پاسکال)	خروجی فشار حسگر ۲ (پاسکال)	سرعت اندازه‌گیری شده (متربرثانیه)	سرعت مرجع (متربرثانیه)
	۹۰	۷۵	۰/۴۳	۰/۴۸
	۱۷۹۵	۹۸۶	۱/۹۲	۱/۹۵
۳	۴۰۹۲	۲۲۱۱	۲/۹۲	۲/۹۴
	۵۶۰۲	۲۹۸۷	۳/۴۳	۳/۴۳
	۷۲۲۸	۳۹۱۴	۳/۹۲	۳/۹۱

مطابق جدول (۵)، زمانی که مجموعه تست تحت زاویه حمله قرار می‌گیرد خروجی فشار اندازه‌گیری شده توسط هر یک از حسگرهای نصب شده در مجموعه تست نتایج کاملا متفاوتی را نشان می‌دهند. این نتیجه خود نیاز به استفاده از دو حسگر مجزا را اثبات می‌کند. چنانچه بخواهیم توسط هر یک از این حسگرها سرعت معادل فشار را محاسبه کنیم، خطای سرعت به شدت زیاد می‌شود. بنابراین همان‌طور که قبلا بیان کردیم نیاز به استفاده از میانگین‌گیری از خروجی سرعت هر یک از حسگرها مطابق رابطه (۱۰) است. اما اینکه مرتبه میانگین‌گیری یا پارامتر n موجود در رابطه (۱۰) چند باشد از نتایج تجربی بدست می‌آید. به این منظور میزان خطای محاسبه سرعت که از تفاضل سرعت اندازه‌گیری شده با رابطه (۱۰) (با عدد n مختلف) و سرعت مرجع بدست می‌آید، در شکل (۹) نشان داده شده است.

با توجه به نتایج شکل (۹) میانگین‌گیری مرتبه ۴ کمترین خطا را نسبت به مراتب دیگر ارائه کرده است. بنابراین عدد n موجود در رابطه (۱۰) برابر ۴ تعیین می‌شود. نتایج سرعت ارائه شده در جدول (۶) نیز با میانگین‌گیری 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 مقاله یک حسگر 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 اندازه‌گیری 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 آزمایشگاه حوضچه کشش NIMALA کالیبره شده است. در تست‌های استاتیکی ضرایب بایاس مربوط به دو حسگر فشار تفاضلی (Φ_1 و Φ_2) متناسب با عمق قرارگیری حسگر استخراج شده است. این ضرایب با توجه به ماهیت حسگر فشار تفاضلی متناسب با عمق قرارگیری یا در واقع محدوده فشار عملکردی تغییر می‌کنند. بطوری که با افزایش عمق میزان این بایاس افزایش می‌یابد. ضریب تصحیح Θ 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 حسگر یک حسگر سرعت محوری بوده که برای محدوده اندازه‌گیری ۰/۵ تا ۴/۵ متر بر ثانیه طراحی شده است. با مقایسه خروجی سرعت اندازه‌گیری شده توسط حسگر با سرعت مرجع اندازه‌گیری 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.6.8]

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 under-ice 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/explorer-doppler-vel.

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/mixcroV-description.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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.6.8]

Autonomous Underwater vehicle (AUV) [i]
Guidance, Navigation and Control (GNC) [ii]
Attitude and Heading [iii]
Acoustic Navigation [iv]
Geophysical Navigation [v]
Inertial Navigation [vi]
Doppler Velocity Log (DVL) [vii]
Ultrasonic Speed Sensor [viii]
Optical Speed Sensor [ix]
Bottom Tracking [x]
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]
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]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.6.8]