

علمی - پژوهشی

# بررسی عددی و تجربی دستیابی به کمترین حساسیت نسبت به زاویه غلت جریان برای تخمین سرعت در زیر سطح به وسیله حسگر فشارسنج تفاضلی

سعیدناهدی\*

مجتبی هاشمی

محمد سجادیوسفی

دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۷؛ تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰)

DOR: [https://fma.ihu.ac.ir/article\\_208868.html](https://fma.ihu.ac.ir/article_208868.html)

## چکیده

یکی از پارامترهای مهم در ناوبری یک رونده هوشمند زیرسطحی، تخمین سرعت بادقت مناسب است. یکی از روش‌های موجود در اندازه‌گیری سرعت در زیر سطح، استفاده از حسگرهای فشارسنج تفاضلی است. در این مطالعه، به منظور دستیابی به کمترین حساسیت نسبت به زاویه غلت جریان آب در زیرسطح، محل بهینه نصب حسگرها فشارسنج بر پیشانی یک هندسه استوانه‌ای موردتوجه قرار گرفته است. در این مطالعه به صورت تجربی و عددی، ۹ زاویه قرارگیری حسگرها نسبت به راس استوانه، به عنوان پارامتری اثرگذار در شش سرعت معین و پنج زاویه غلت جریان بررسی شده است. نتایج این بررسی‌ها نشان داده است که بهترین تخمین سرعت در زیرسطح با زاویه قرارگیری حسگرها در محدوده ۳۵ درجه و با کمترین حساسیت نسبت به زاویه غلت جریان (۵ درصد اختلاف با سرعت مرجع) قابل دستیابی است.

**واژه‌های کلیدی:** زاویه غلت جریان، حسگر فشارسنج تفاضلی، استوانه یکسر گیردار، تخمین سرعت زیرسطحی

## Numerical and Experimental Study on the Minimum Sensitivity to the Azimuth Angle of Underwater Vehicle Speedometry Using Differential Pressure Sensors

Yousefi, M. S\*

Hashemi, M.

Nahidi, S.\*

Imam Hossein University, Tehran, Iran

(Received: 2023/08/21, Revised: 2023/12/08, Accepted: 2023/12/28, Published: 2024/02/19)

### ABSTRACT

One of the important parameters in the navigation of an intelligent subsurface vehicle is to estimate the speed with appropriate accuracy. One of the available methods for measuring the speed under the surface is the use of differential pressure sensors. In this study, in order to achieve the lowest sensitivity to the azimuth angle of the water flow in the subsurface, the optimal place of installing pressure gauge sensors on the forehead of a cylindrical geometry has been considered. In this study, experimentally and numerically, nine positioning angles of the sensors with respect to the top of the cylinder have been investigated as an effective parameter in six specific speeds and five flow attack angles. The results of these investigations have shown that the best estimation of the speed in the subsurface can be achieved with the positioning angle of the sensors in the range of 35 degrees and with the lowest sensitivity to the azimuth angle (5% difference with the reference speed).

**Keywords:** Azimuth Angle, Differential Pressure Sensor, Free-end Cylinder, Underwater Vehicle Speedometry

۱. دانشجوی دکتری m.sajjad.y313@gmail.com

۲. استادیار mo\_hashemi@aut.ac.ir

۳. استادیار (نویسنده پاسخگو) saeednahidi@yahoo.com

## فهرست علائم و اختصارات

## ۱- مقدمه

حسگرها در اکثر سیستم‌های اندازه‌گیری و کنترلی به‌عنوان پرکاربردترین وسایل تشخیصی در بسیاری از آزمایشگاه‌های مهندسی و محیط‌های صنعتی به شمار می‌آیند. امروزه وسایل متحرک دریایی به سمت هوشمندسازی سوق پیدا کرده تا نیاز حضور انسان را تا حد زیادی کاهش دهند. از جمله این وسایل هوشمند دریایی می‌توان به رونده‌های زیرسطحی اشاره نمود که برای مأموریت‌های مختلف از جمله اکتشاف، شناخت عوارض زیرآبی، تولید نقشه‌های جغرافیایی و ژرفاسنجی، عملیات نظامی و غیره استفاده می‌شوند. تمامی این وسایل متحرک زیرسطحی به‌منظور هوشمندسازی نیاز به تجهیزاتی شامل سامانه‌های هدایت، ناوبری و کنترل دارند. عموماً در سامانه‌های ناوبری اعم از صنایع هوایی و صنایع دریایی از مجموعه حس‌گرهایی تحت عنوان واحد اندازه‌گیری اینرسی استفاده می‌شود. با استفاده از واحد اینرسی می‌توان شتاب خطی و نرخ تغییر زوایای جسم در سه راستا را اندازه گرفت. روش‌های ناوبری اینرسی به دلیل عدم استفاده از سامانه‌های موقعیت‌یابی مجزا دارای رشد خطای موقعیت بدون کران و نامحدود هستند [۱]. برای جلوگیری از رشد خطا در این سامانه ناوبری، از حسگرهای کمک ناوبری استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین حسگرهای کمک ناوبری در اندازه‌گیری سرعت جریان سیال حسگر فشارسنج تفاضلی است. کاربرد دیگر حسگر کمکی سرعت‌سنج، اندازه‌گیری سرعت در هنگام دورزدن موانع و کنترل مأموریت است. موارد ذکرشده اهمیت استفاده از یک حسگر سرعت‌سنج کمکی با تجهیزات ارزان‌قیمت به‌خصوص در وسایل متحرک ارزان را نشان می‌دهد.

روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری سرعت در زیر سطح وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از توربینی، مغناطیسی، داپلری و فشارسنج تفاضلی [۲]. هریک از این روش‌ها با در نظر گرفتن شرایط مأموریتی وسیله زیر سطحی کارایی منحصر به فرد خود را دارند. از میان روش‌های ذکر شده، سرعت‌سنجی با استفاده از حسگرهای فشار تفاضلی بدلیل هزینه کم، در وسایل متحرک ارزان قیمت مورد توجه می‌باشد [۳]. این روش برای اندازه‌گیری سرعت در مقایسه با روش‌های ذکرشده، یک حسگر بسیار

$R_e$	عدد رینولدز
$\rho$	چگالی سیال ( $\text{kg/m}^3$ )
$\mu$	ضریب لزجت سیال
$V$	سرعت سیال (m/s)
$V_{Analytical}$	سرعت تحلیلی (m/s)
$V_{Numerical}$	سرعت عددی (m/s)
$V_{\infty}$	سرعت جریان آزاد (m/s)
$u_r$	مؤلفه سرعت شعاعی
$u_{\theta}$	مؤلفه سرعت زاویه‌ای
$z$	جهت محور ارتفاعی
$y$	جهت محور عرضی
$x$	جهت محور طولی
$m$	طول
$p$	فشار سیال (pa)
$g_{\theta}$	شتاب گرانش
$t$	زمان (s)
$V_s$	سرعت حسگر
$A$	ماتریس سرعت حسگر
$B$	ضریب خطا ثابت
$S$	ضریب مقیاس
$X$	برداری ضرایب تصحیح
$\alpha_{(\theta)}$	ضریب عددی

موقعیت‌یابی وسایل زیرسطحی در قسمت ناوبری جلوگیری شده است [۶]. در این مطالعه نمونه جدیدی از حسگر فشارسنج تفاضلی که به لحاظ وزنی، حجمی، دقت و هزینه از نمونه‌های قبلی مناسب‌تر است، بر روی یک رونده زیرسطحی هوشمند نصب و تست شده است. نتایج تست‌های میدانی بر روی وسیله متحرک زیرسطحی حاکی از آن بود که باوجود جریان جزرومدی، برخلاف حسگر داپلر صوتی از دقت سرعت‌سنج فشار تفاضلی در جهت جریان کم می‌شود. اما از طرفی دقت حسگر فشارسنج تفاضلی در سرعت‌های پایین جریان، بیشتر از سرعت‌سنج‌های داپلر صوتی است. به‌منظور بررسی اثر وجود جریان‌های زیرسطحی ناشی از جزرومد چهارده آزمایش که نیمی از آن‌ها در حالت جزر و نیمی دیگر در حالت مدی می‌باشد انجام شده است [۷].

به دلیل نصب برخی وسایل ارتباطی و دوربین فیلم‌برداری بر روی دماغه زیرسطحی، همیشه استفاده از حسگرهای فشار تفاضلی بر روی دماغه با هندسه کروی ممکن نیست. برای رفع مشکل، در این مقاله استفاده از حسگر فشارسنج تفاضلی بر روی یک جسم با هندسه استوانه‌ای که در زیر بدنه رونده‌های زیرسطحی بکار گرفته می‌شود پیشنهاد می‌گردد.

در این مطالعه عددی و تجربی، بعد از به‌دست‌آوردن معادلات حاکم به روش تحلیلی، با کمک دینامیک سیالات محاسباتی، محل نصب حسگرها بر روی سطح استوانه تعیین گردیده است. به دلیل اینکه محفظه استوانه‌ای در زیر بدنه زیرسطحی قرار دارد؛ بنابراین در حل عددی، جریان حول استوانه محدود که یک سر آن در لایه‌مرزی و طرف دیگر آن به‌صورت آزاد است شبیه‌سازی شده است. به عبارتی معادل با تحلیل فیزیکی جریان حول استوانه یک سر گیردار با طول محدود می‌باشد. باتوجه‌به شکل (۱) جریان حول استوانه به طول محدود به‌صورت سه‌بعدی است که بعد از نقطه جدایش به دلیل گرادیان معکوس فشار و آرام بودن رژیم جریان گردابه‌های متناوبی تشکیل می‌گردد. رژیم جریان حول استوانه با طول محدود بیشتر از عدد رینولدز بحرانی ۲۴۴ به حالت آشفتگی در می‌آید [۸].

ارزان قیمت، با مصرف انرژی پایین و ابعاد کوچک نتیجه می‌دهد. یکی از چالش‌های استفاده از این نوع سرعت‌سنجی حساسیت نسبت به زاویه غلت جریان است. به همین دلیل طراحی سرعت‌سنج فشار تفاضلی با هدف کمترین حساسیت نسبت به زاویه غلت جریان مورد توجه این مقاله است.

فونتز پرز و همکارانش [۴] با استفاده از چند حسگر فشارسنج تفاضلی به‌جای یک حسگر سعی در تخمین سرعت جریان در زوایای حمله مختلف را داشته‌اند. به‌منظور تعیین پارامترهای طراحی حسگر نظیر زاویه قرارگیری حسگرها (پراب حسگر) بر روی هندسه کروی، از حل عددی دوبعدی، سرعت انتخابی در محدوده  $m/s$  ۰-۰/۵ و زوایای حمله جریان بین  $\pm 45$  درجه استفاده شده است. با نتایج عددی متعدد و روابط تحلیلی حاصل از اختلاف فشار بین نقاط تعیین شده، موقعیت قرارگیری حسگرها به‌دست‌آمده است.

این گروه تحقیقاتی [۵] در مطالعات بعدی خود بر روی ارتقای حسگرهای فشار تفاضلی تلاش کردند. نمونه آزمایشگاهی ساخته شده تحت سرعت‌های صفر الی  $m/s$  ۲ در حوضچه کشش آزمایشگاهی تست شده است. در این مطالعه نیز مقایسه‌ای بین حسگرهای فشارسنج آنالوگ و دیجیتال انجام گرفت. باتوجه‌به عدم وجود خطای ناشی از دیجیتال سازی سیگنال در حسگرهای آنالوگ می‌توان انتظار داشت که اندازه‌گیری ارائه شده توسط حسگر آنالوگ دقیق‌تر از حسگر دیجیتال باشد. نتایج این مطالعه هم‌نشان می‌دهد دقت تخمین حسگر آنالوگ  $m/s$  ۰/۰۰۸۷ و برای حسگر دیجیتال  $m/s$  ۰/۰۱۰۷ بوده است.

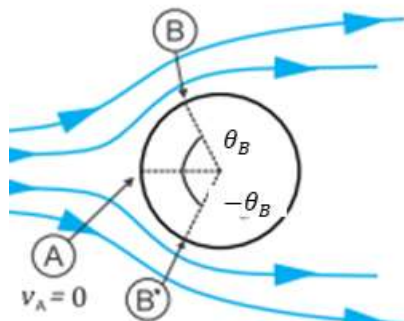
در مقاله‌ای دیگر که توسط این تیم پژوهشی منتشر گردید [۶] به اصلاح رابطه سرعت که بر مبنای قانون برنولی می‌باشد پرداخت شده است. اگر اختلاف ارتفاعی بین دونقطه از محل قرارگیری حسگرها ایجاد گردد اختلاف فشار محاسبه شده تنها ناشی از اختلاف فشار دینامیکی نخواهد بود؛ بلکه علاوه‌بر آن یک اختلاف فشار استاتیکی ناشی از اختلاف ارتفاع بین دونقطه هم اضافه خواهد شد. همچنین در این مطالعه از واحد اندازه‌گیری اینرسی برای اندازه‌گیری شتاب خطی و نرخ تغییر زوایا در سه راستا استفاده شد. با تلفیق واحد اندازه‌گیری اینرسی و حسگر فشارسنج تفاضلی از رشد خطای

در معادله (۱) با فرض پایا بودن جریان ترم مشتق زمانی حذف می‌شود و بدلیل در نظر گرفتن یک خط جریان در راستای  $\theta$  ترم‌های مشتق مکانی نسبت به  $r$  و  $z$  حذف می‌شود. همچنین با فرض عدم اصطکاک، لزجت دینامیکی سیال نیز لحاظ نمی‌گردد. بنابراین رابطه (۳) از ساده سازی قانون ناویراستوکس با فرضیات برنولی و صرف نظر از اثر ارتفاع استخراج می‌شود.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \rho \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} = 0 \quad (2)$$

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 = CTE \quad (3)$$

مبنای اصلی ارتباط بین اختلاف فشار دونقطه از پیشانی جسم و سرعت جریان آب بر اساس قانون برنولی می‌باشد. مطابق شکل (۲) استوانه‌ای با مقطع دایروی در معرض جریان سیال قرار گرفته است اگر جریان کاملاً عمود بر محور طولی به جسم برخورد کند، سرعت جریان سیال در نقطه مرکزی مقطع، صفر می‌شود. هرچه از این نقطه که نقطه سکون نامیده می‌شود به کناره‌ها فاصله گرفته شود سرعت جریان نیز بیشتر و فشار سیال کمتر خواهد شد.

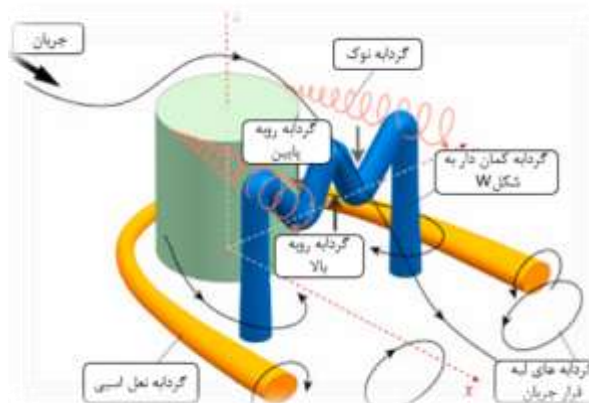


شکل (۲): شماتیکی از جریان سیال عمود بر محور استوانه

در شکل (۲) نقطه‌ی دلخواه B در زاویه  $\theta$  نسبت به نقطه‌ی سکون قرار گرفته‌است. باتوجه‌به رابطه (۴) در صورتی که اختلاف فشار بین نقطه‌ی سکون و نقطه‌ی دلخواه B وجود داشته باشد، می‌توان سرعت جریان در نقطه مورد نظر را محاسبه کرد.

$$P_B + \frac{1}{2} \rho V_B^2 = P_A \quad (3)$$

$$V_B = \sqrt{\frac{2(P_A - P_B)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (4)$$



شکل (۱): فیزیک جریان حول استوانه محدود [۱۰]

سپس به منظور راستی‌آزمایی و بررسی عملکرد حسگر پیشنهادی، تست‌های آزمایشگاهی انجام شده است. محدوده انتخابی سرعت، زاویه غلت جریان جزو قیود طراحی و همچنین زاویه قرارگیری حسگرها نسبت به مرکز استوانه نیز به‌عنوان پارامترهای طراحی حسگر می‌باشد. محدوده انتخابی سرعت از ۰/۵ تا ۳ m/s زاویه غلت جریان بین ۳۰- تا ۳۰ درجه و موقعیت قرارگیری حسگرها در بازه ۵ تا ۴۵ درجه به‌عنوان فرضیات و قیود بهینه‌سازی حسگر مدنظر قرار گرفته است.

## ۲ - معادلات اساسی حاکم

در این بخش روابط تحلیلی بین سرعت جریان و اختلاف فشار بین دو نقطه از یک هندسه استوانه‌ای ارائه شده است. دینامیک حاکم بر جریان بر اساس رابطه ناویر استوکس در مختصات استوانه‌ای و جهت زاویه‌ای به فرم رابطه (۱) است. در معادله زیر به ترتیب  $(u_r, u_\theta)$  سرعت سیال در راستای  $(r, \theta)$  فشار سیال،  $g_\theta$  شتاب،  $\rho$  چگالی سیال و  $t$  زمان هستند.

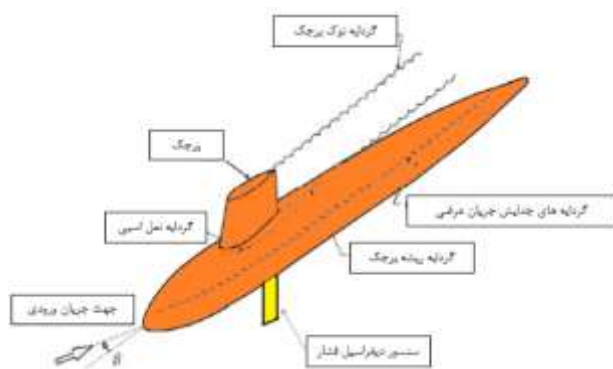
$$\rho \left( \frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r u_\theta}{r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) = \rho g_\theta - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right] \quad (1)$$

با فرضیاتی همچون عدم اصطکاک، تراکم ناپذیری سیال، جریان پایا و در نظر گرفتن یک خط جریان معادله ناویراستوکس (۱) تبدیل به رابطه برنولی می‌شود. بطوریکه

طرف محور طولی جسم با هم برابر باشند ( $\Delta p_1 = \Delta p_2$ ) در این صورت  $\alpha_{(\theta)} = 1$  می باشد. بطور کلی در محدوده زاویه نصب حسگرها به ازای  $-35 \leq \theta \leq 35$  ضریب عددی  $\alpha_{(\theta)} \geq 1$  خواهد شد [۵]. در صورتی که زاویه جریان نسبت به محور طولی کمتر از ۴۵ درجه باشد رابطه (۹) برای محاسبه‌ی سرعت جریان صادق است [۷].

### ۳- شبیه‌سازی و تحلیل عددی

همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است شماتیکی از قرارگیری حسگرهای تفاضل فشار درون یک محفظه استوانه‌ای در زیر بدنه رونده زیرسطحی را نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی عددی صورت گرفته محدوده سرعت جریان ورودی بین ۰/۵ تا ۳ m/s و زوایای حمله جریان  $\pm 30^\circ$  و زوایای نصب حسگرها نسبت به محور افقی در بازه ۵ تا ۴۵ درجه و شرط جریان ورودی velocity inlet انتخاب گردید. در کتاب مهندس صنیعی نژاد [۸] نزدیکی دیواره، بررسی جریان توربولانسی به صورت سه‌بعدی، دائم با چگالی ثابت به روش K -  $\omega$  SST در نظر گرفته شده است [۹]. با توجه به رینولدز بالا یعنی ۲e۴ برای یک استوانه با نسبت ابعادی  $\frac{L}{D} = 2$  در این محدوده از سرعت جریان ورودی، رژیم جریان آشفته است. در تنظیمات حلگر شرط جریان خروجی pressure outlet و فشار خروجی نیز صفر پاسکال انتخاب گردید.



شکل (۳): شماتیکی از محل نصب محفظه استوانه‌ای حسگر فشارسنج تفاضلی بر زیر بدنه زیرسطحی

#### ۳-۱- تعریف دامنه محاسباتی

ابعاد دامنه محاسباتی باید به گونه‌ای انتخاب شود که بتوان از تأثیرات دیواره بر روی حل صرف نظر شود.

بر مبنای فرضیات برنولی با در نظر گرفتن یک خط از مسیر جریان مولفه‌های دیگر سرعت در بهینه‌سازی محل نصب حسگرها کاربردی نداشته و سرعت جریان در نقطه دلخواه B با فرض دو بعدی بودن جریان حول استوانه با طول محدود به دست آمده است.

ممکن است در یک مانور حرکتی جریان سیال دقیقاً عمود بر مقطع جسم نباشد در این صورت رابطه فوق دقیق نیست. برای این که تأثیر جابجایی نقطه سکون کاهش یابد، به صورت متقارن دو حسگر برای محاسبه اختلاف فشار در دو طرف محور طولی جسم ( $\theta_1$  و  $\theta_2$ ) در نظر گرفته شده است. رابطه (۵) یک روش متوسط گیری بین دو حسگر فشار تفاضلی می‌باشد [۶]:

$$\sqrt{\frac{\Delta p_1^2 + \Delta p_2^2}{2}} = \sqrt{\frac{(\frac{1}{2}\rho(V_{B_1})^2) + (\frac{1}{2}\rho(V_{B_2})^2)}{2}} \quad (5)$$

باتوجه به این که سوراخ‌ها متقارن فرض شده است  $\theta_1 = \theta_2 = \theta$  و جریان سیال بدون زاویه غلت آنگاه:

$$\sqrt{(\frac{\rho}{2}(V_B)^2)^2} = \sqrt{\frac{\Delta p_1^2 + \Delta p_2^2}{2}} \quad (6)$$

در نهایت ارتباط بین سرعت جریان سیال حول استوانه و اختلاف فشار نقطه سکون با نقاط جانبی به صورت رابطه (۹) خواهد شد:

$$V_B = \sqrt[4]{\frac{2(\Delta p_1^2 + \Delta p_2^2)}{\rho^2}} \quad (7)$$

$$V_B = 2V_\infty \sin \theta \quad (8)$$

$$\alpha_\theta = \left(\frac{1}{4 \sin^2 \theta}\right)^2 \quad (9)$$

$$V_\infty = \sqrt[4]{\frac{2\alpha_\theta(\Delta p_1^2 + \Delta p_2^2)}{\rho^2}}$$

در رابطه (۹)  $\alpha_{(\theta)}$  یک ضریب عددی است [۴]. چنانچه اختلاف فشار استاتیکی محاسبه شده توسط حسگرها در دو

برحسب اندازه سلول (تعداد سلول‌ها)، نخستین جایی که نمودارها به حالت معیار و مطلوب نزدیک می‌شود، همان نقطه بهینه است.

مقادیر ضریب فشار باتوجه‌به المان‌های مختلف در جدول (۱) گردآوری شده است.

**جدول (۱):** محاسبه ضریب فشار حول استوانه

شماره ردیف	تعداد سلول	ضریب فشار کمینه
۱	۱۳۶۰۶۷۴	۰/۱۶۱۴
۲	۲۳۱۵۰۰۸	۰/۱۵۲۴
۳	۲۸۳۵۴۵۸	۰/۱۵۱۷
۴	۲۸۵۶۳۶۴	۰/۱۵۱۴

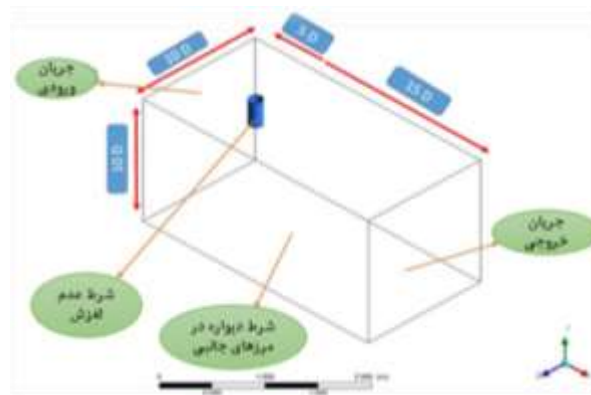
نتایج به دست آمده بر اساس جدول (۱)، حالت معیار مقدار ضریب فشار کمینه در تعداد المان (سلول) ۲۸۵۶۳۶۴ می‌باشد.

به منظور صحت سنجی شبیه‌سازی مقاله حاضر، نتایج روش پیشنهادی با مقاله معتبر دیگر مقایسه می‌شود [۱۰]. در مرجع مذکور استوانه‌ای با طول محدود با دامنه‌ای مشخص در نظر گرفته شده است با این تفاوت که سیال عامل، هوا با دانسیته  $1/225 \text{ kg/m}^3$  و سرعت جریان ورودی  $20 \text{ m/s}$  بوده است. بر این اساس به منظور صحت سنجی تنظیمات حلگر، شرایط مسئله با تنظیمات دامنه حل مقاله مورد نظر منطبق گردید.

همان‌طور که در شکل (۶) مشخص شده است، خط‌ها با علامت دایره و مربع بترتیب حل عددی و تجربی مقاله مرجع و خط دیگری که به علامت مثلث نشان داده، نیز مربوط به حل عددی مقاله حاضر می‌باشد. مطابق نمودار شکل (۶) ضریب فشار جریان حول استوانه اختلاف ناچیزی با حل عددی و تجربی در مقاله مشابه را نشان می‌دهد. در نتیجه تنظیمات حلگر در شبیه‌سازی عددی مقاله پیشرو به درستی انتخاب گردید.

در شکل (۴) دامنه محاسباتی و شرایط مرزی برای حل مساله نشان داده شده است. مشخصات هندسی در نظر گرفته شده برای بدنه استوانه‌ای مورد نظر عبارت است از:

قطر استوانه ( $D$ ) برابر با  $0.15 \text{ m}$  و طول استوانه ( $L$ ) برابر  $0.3 \text{ m}$  می‌باشد. در این پژوهش برای ورودی و خروجی جریان دو شرط مرزی ورودی و فشار خروجی اعمال گردید. طول دامنه محاسباتی هندسه سه‌بعدی  $20D$  در نظر گرفته شده به طوری که فاصله ورودی دامنه تا مرکز استوانه  $5D$  و فاصله تا انتهای دامنه  $15D$  می‌باشد. عرض دامنه  $10D$  و همچنین فاصله از کف تا استوانه  $10D$  می‌باشد.



**شکل (۴):** ابعاد دامنه محاسباتی سه‌بعدی

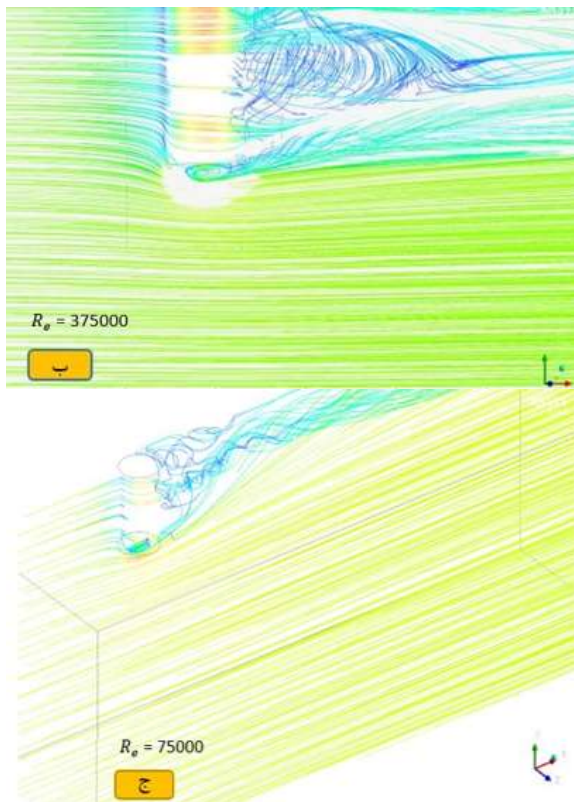
### ۳-۲- استقلال از شبکه و اعتبار سنجی

در این مقاله، از شبکه‌بندی منظم و سازمان‌یافته استفاده شده است. شبکه اطراف سطح جسم و ناحیه‌هایی که پارامترهای جریان (به خصوص سرعت و فشار) تغییرات زیادی دارند باید ریزتر شوند تا حدی که تغییرات به خوبی دیده شود. شکل (۵) شبکه‌بندی دامنه را در نمای مختلف نشان می‌دهد.



**شکل (۵):** (الف) نمای فوقانی شبکه‌بندی در هندسه سه‌بعدی (ب) نمای جانبی شبکه‌بندی در هندسه سه‌بعدی

به منظور استقلال نتایج از شبکه‌بندی، شبکه محاسباتی تا جایی ریز می‌گردد که نتایج تحلیل (منظور در اینجا ضریب فشار حول استوانه) از ابعاد یا تعداد سلول‌ها مستقل گردد، یعنی با رسم نمودار نتایج تحلیل



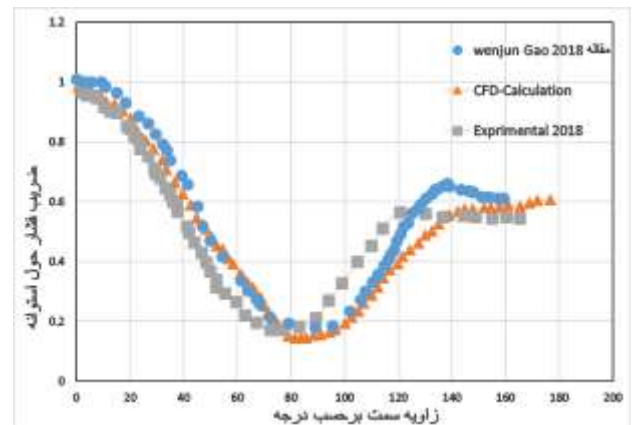
شکل (۷): خطوط جریان حول استوانه در رینولدزهای مختلف

### ۳-۴- تعیین پارامترهای طراحی حسگر

در این بخش یکی از پارامترهای مهم طراحی یعنی روند تعیین زاویه بهینه موقعیت قرارگیری حسگرها نسبت به هم و محور افقی با استفاده از نتایج حل عددی ارائه می‌شود. سرعت جریان آزاد حول رونده زیرسطحی با استفاده از رابطه (۹) تعیین می‌گردد این رابطه به زاویه قرارگیری و اختلاف فشار حسگرها وابسته است [۷]. رابطه (۹) در حالت ایده‌آل و مستقل از زاویه غلت جریان می‌باشد؛ بنابراین می‌توان برای تعیین زاویه قرارگیری حسگرها به این صورت تعریف کرد:

بهترین زاویه برای قرارگیری حسگرها درحالی‌که کمترین حساسیت نسبت به زاویه غلت جریان وجود دارد، زاویه‌ای است که تابع سرعت جریان نسبت به اختلاف فشار استاتیکی در دونقطه حسگر از رابطه (۹) پیروی کند.

برای تعیین زاویه قرارگیری حسگرها از حداقل کردن میانگین مربعات خطا در فرایند برازش منحنی به‌دست‌آمده از رابطه تحلیلی (۹) و منحنی حاصل از حل عددی، استفاده خواهد شد. بطوریکه در هر زاویه قرارگیری حسگرهای

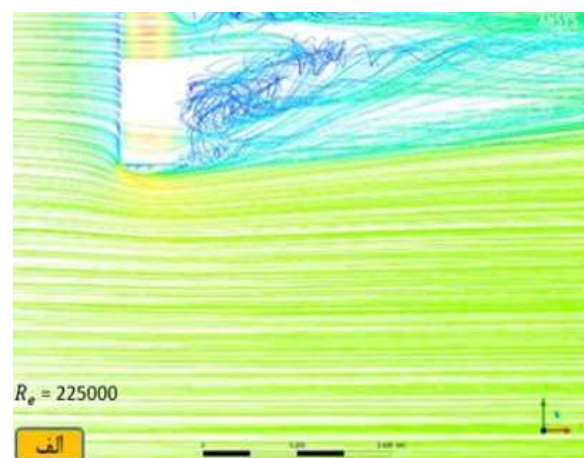


شکل (۶): صحت سنجی تنظیمات حلگر با یک مقاله مشابه

### ۳-۳- نتایج حل عددی

کانتورهای فشار در سرعت  $2 \text{ m/s}$  و خطوط جریان حول استوانه در رینولدزهای  $75000$  تا  $375000$  در زاویه غلت صفر درجه در شکل (۷) ارائه شده است. کانتورهای جریان در سرعت  $2 \text{ m/s}$  بر روی بدنه‌ی استوانه به خوبی وضعیت تغییرات فشار بر روی جسم را نمایش می‌دهد. با رجوع به چنین کانتورهایی کاملاً مشخص است که در چه مقطعی از مسیر حرکت جسم مغروق، جریان آب بیشتر دستخوش اغتشاش شده است.

باتوجه به شکل (۷) در پشت سیلندر حداقل فشار مشاهده می‌شود و در هر کجا که گردابه‌ای تشکیل شده است در آن نقاط، خطوط جریان آرایش خود را از دست داده و فشار به حداقل مقدار خود رسیده است. در رینولدزهای پایین که سرعت جریان آزاد مقدار کمتری دارند، گردابه‌ها شکل پراکنده تری خواهند داشت.



در جدول زیر مقدار خطای ناشی از برازش منحنی برای هریک از زاویه قرارگیری حسگرهای حسگر مقایسه شده است.

**جدول (۲):** انتخاب محل قرارگیری حسگرهای حسگر باتوجه به کمترین درصد خطا فیت کردن

زاویه $\theta$	درصد اختلاف برازش منحنی
۵	۱/۲۱
۱۰	۲/۷۹
۱۵	۸/۹۳
۲۰	۹/۶۷
۲۵	۱۱/۹۳
۳۰	۱۰/۸۲
۳۵	۴/۰۲
۴۰	۱۵/۳۷
۴۵	۱۴/۱۱

باتوجه به جدول (۲) نتیجه گرفته می شود که از بین زوایای انتخابی موقعیت قرارگیری حسگرهای حسگر، زاویه ۳۵ درجه به دلیل کمترین خطای برازش نتایج عددی و تحلیلی به عنوان بهترین زاویه قرارگیری برای نصب حسگرهای می باشد. اما باتوجه به حداقل مقدار خطا در زوایای ۵ و ۱۰ درجه به دلیل خارج بودن از محدوده عملکردی حسگرهای انتخابی زوایای مناسبی برای نصب حسگرها بر روی بدنه استوانه ای مساله مورد نظر نمی باشند [۱۱].

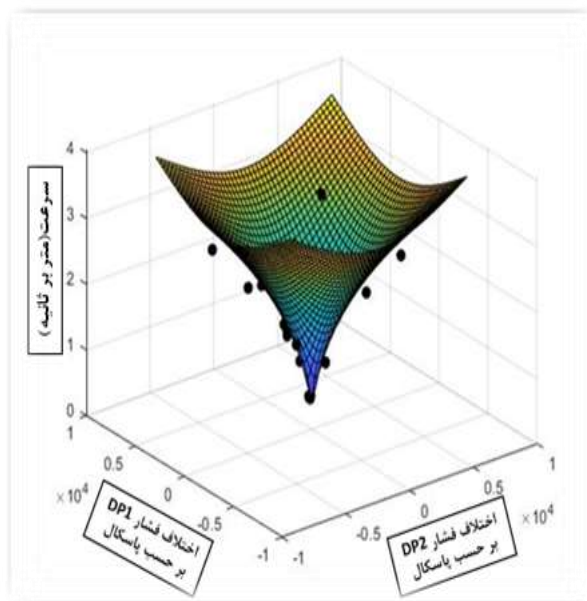
#### ۴- تست های آزمایشگاهی در حوضچه کشش

در حوضچه کشش آزمایشگاه ملی شهدای خلیج فارس باهدف بررسی عملکردی حسگر فشارسنج پیشنهادی نسبت به زاویه غلت جریان با موقعیت قرارگیری ۳۵ درجه نسبت به سوراخ مرکزی، سه تست دینامیکی تعریف شده است. به منظور صحت سنجی و تکرار پذیری نتایج، هریک از تست ها دو مرتبه انجام گرفته شد. در این تست ها مجموعه تست توسط اربابه کشش از ابتدا تا انتهای حوضچه که مسافت تقریبی ۴۰۰ m بوده با سرعت های مختلف از ۰/۵ تا ۲/۵ m/s حمل شده است. دو تست اولیه در شرایطی که مجموعه تست در راستای حرکت و بدون زاویه غلت بوده، اجراء

حسگر مقدار میانگین مربعات خطای نمودار برازش شده از نقاط حاصل از حل عددی محاسبه می گردد. بهترین زاویه موقعیت قرارگیری حسگرهای حسگر زاویه ای است که کمترین خطای برازش را در موارد متعدد مورد مطالعه داشته باشد. این موضوع معادل با حل مساله بهینه سازی به فرم رابطه (۱۰) است. در رابطه زیر  $V_{Analytical}$  سرعت تحلیلی و  $V_{Numerical}$  سرعت به دست آمده از حل عددی می باشد.

$$\cos t = \min(\min(RMSE(V_{analytical} - V_{numerical})) \quad (10)$$

برای این منظور نتایج عددی برای شرایط مختلف در سرعت جریان ورودی بین ۰/۵ m/s تا ۳ و زوایای حمله جریان  $30 \pm$  درجه و زوایای نصب حسگرهای حسگر نسبت به محور افقی در بازه ۵ تا ۴۵ درجه انتخاب گردید. داده های منتج شده از حل عددی بعد از برازش از یک سطح که به فرم رابطه (۹) و مستقل از زاویه غلت جریان است، به صورت یک نمودار سه بعدی که محورهای آن سرعت جریان آزاد و اختلاف فشار حسگرهای حسگر نسبت به نقطه سکون به دست می آید. زاویه ای بهینه است که کمترین اختلاف را بین داده های منتج شده از حل عددی و سطح عبوری از این نقاط به دست آمده را داشته باشد. نقاط سیاه رنگ در شکل (۸) نتایج به دست آمده از حل عددی برای یک نمونه مشخص می باشد.



**شکل (۸):** نمودار سه بعدی نرم افزار متلب در زاویه ۳۵ درجه



به منظور انجام تست‌های آزمایشگاهی در حوضچه کشش، حسگر مورد مطالعه مطابق شکل (۱۰) از دستگاه مانور مقید که قابلیت چرخش برای تعیین زاویه غلت جریان را دارد استفاده شده است.



شکل (۱۰): ۱- آزمایشگاه ملی خلیج فارس ۲- دستگاه مانور مقید ۳- حسگر فشارسنج تفاضلی ۴- نحوه نصب حسگر به ارابه کشش

#### ۴-۲- نتایج تست‌های تجربی

به دلیل اینکه رابطه برنولی برای سیال ایده‌آل تراکم‌ناپذیر و غیرلزج استخراج شده است. اما در سیال واقعی خطاهای احتمالی دیگر نیز وجود دارد، به همین منظور یک ضریب تصحیح ( $S$ ) در سرعت محاسبه شده باهدف کاهش خطای اندازه‌گیری ضرب شده است.  $S$  ضریب مقیاس و ( $B$ ) ضریب خطا ثابت، به‌عنوان مجهولات واسنجی (کالیبراسیون) فرض شده است. در شکل (۱۲)- الف) برای زاویه غلت صفر درجه تعداد ۳۶۰ داده از سرعت ارابه جمع‌آوری شده است. داده‌های جمع‌آوری شده به‌منظور استفاده در فرایند واسنجی در ماتریسی به نام  $A$  به‌صورت زیر قرار داده شده است.

$$[A] = [V_s \{1\}_{360 \times 1}] \quad (9)$$

پارامترهای واسنجی در بردار  $x$  قرار گرفته است:

$$\{x\} = \begin{Bmatrix} S \\ B \end{Bmatrix} \quad (10)$$

شدند. تست‌های سوم و چهارم در زاویه غلت ۱۵ درجه نسبت به راستای حرکت و دو تست آخر در زاویه غلت ۳۰ درجه انجام شده است.

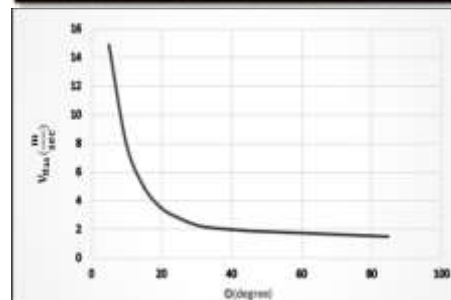
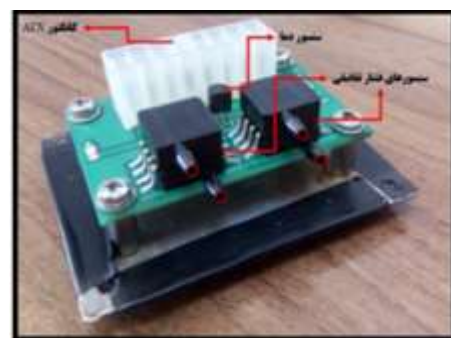
فرضیات حاکم بر آزمایش به ترتیب زیر می‌باشند:

- ❖ آب کاملاً آرام و بدون موج و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد
- ❖ قرارگیری مجموعه تست در عمق ۰/۵ m

#### ۴-۱- معرفی نمونه آزمایشگاهی

برای اندازه‌گیری اختلاف فشار بین دو سوراخ در بدنه استوانه‌ای از حسگر فشارسنج تفاضلی با مدل MPXV7002 انتخاب شده است.

هر سوراخ از حسگر با یک لوله پلاستیکی نازک به قطر ۳ mm به سوراخ‌های مرکزی و جانبی وصل شده است. مطابق شکل (۹) حسگر انتخابی در این مطالعه برای زوایای کمتر از ۲۰ درجه خارج از محدوده اندازه‌گیری سرعت می‌باشد. حداکثر سرعت قابل اندازه‌گیری برای حسگر باتوجه به محدوده ولتاژ خروجی حسگرها (۰/۵ - ۴/۵ ولت) است برابر با ۲/۳۲ متر بر ثانیه است. به همین دلیل زوایای کمتر از ۲۰ درجه، زوایای مناسبی برای محل نصب حسگرها بر روی بدنه استوانه‌ای نمی‌باشد [۱۱].



شکل (۹): محدوده اندازه‌گیری سرعت بر حسب زاویه قرارگیری حسگرها نسبت به هم

نمودار شکل (۱۱) خط (۱) از واسنجی (کالیبراسیون) سرعت حسگر به دست آمده است و خط (۲) مربوط به سرعت مرجع و واقعی می باشد.

در تستی مشابه در شکل (۱۱) بترتیب در بخش های (ب) و (ج) جسم با زوایای ۱۵ و ۳۰ درجه نسبت به جهت حرکت ارابه (جهت جریان) بسته شده است. در این تستها نیز ابتدا خط ثابت حسگرها حذف شده است. برای واسنجی حسگرها در هریک از تستها، از ضرایب واسنجی تست با زاویه غلت صفر استفاده شده است.

جدول (۳) خطای جذرمیانگین مربعات بین سرعت حسگر و سرعت ارابه نشان داده شده است.

**جدول (۳):** محاسبه اختلاف خطا سرعت حسگر و ارابه آزمایشگاه

زاویه غلت جریان	۰ درجه	۱۵ درجه	۳۰ درجه
RMSE سرعت	۰/۰۵۳۶	۰/۱۱۴۸	۰/۱۸۷۶

زمانی که محفظه استوانه ای تحت زاویه غلت جریان قرار می گیرد خروجی فشار اندازه گیری شده توسط هر یک از حسگرهای نصب شده بر روی محفظه استوانه ای مقادیر کاملاً متفاوتی را نشان می دهند. این نتایج خود نیاز به استفاده از دو حسگر مجزا را اثبات می کند. چنانچه توسط هر یک از این حسگرها سرعت معادل فشار محاسبه شود، خطای سرعت به شدت زیاد خواهد شد؛ بنابراین نیاز به میانگین گیری از خروجی داده های هر یک از حسگرها است.

سرعت حاصل از نتایج تست های آزمایشگاهی و سرعت به دست آمده به روش عددی با یکدیگر مقایسه گردید و در جدول (۴) جمع آوری شده است. در روش تجربی اختلاف فشارهای اندازه گیری شده توسط حسگر فشارسنج تفاضلی در رابطه (۹) جای گذاری شده است و به این ترتیب سرعت جریان حول استوانه به صورت تجربی محاسبه گردید.

باتوجه به خطای کمتر از ده درصد، حل عدد بادقت نسبتاً خوبی به درستی انجام شده است.

مقادیر مجهولات فرض شده یعنی  $S$  و  $B$  از روش حداقل مربعات محاسبه شده است که پس از قراردادن در الگوریتم، مقادیر پارامترها عبارت است از:

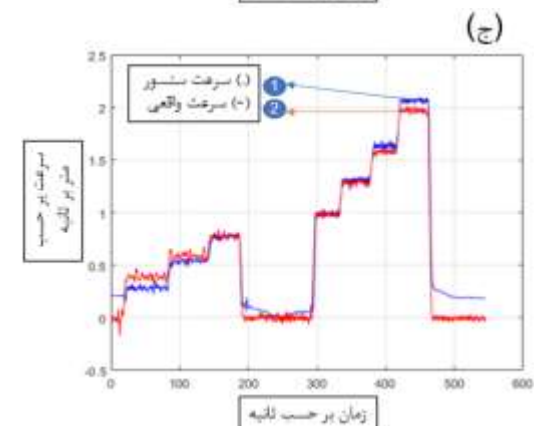
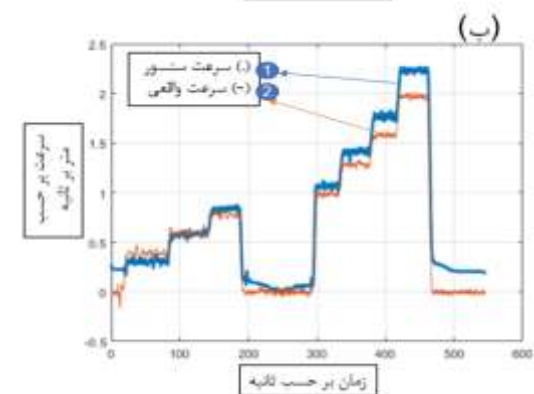
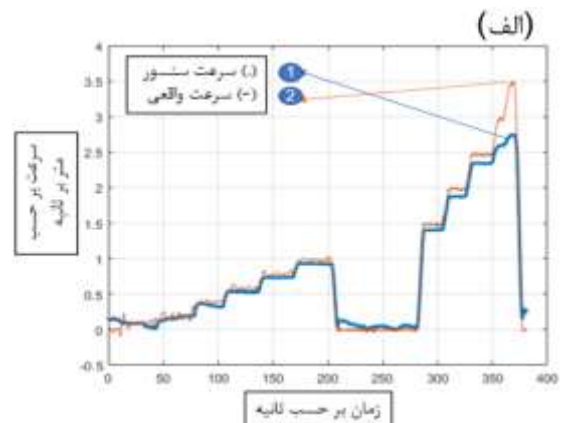
$$(۱۱)$$

$$S = 0.9261$$

$$(۱۲)$$

$$B = -0.0470$$

پس از اعمال ضرایب مجهولات ( $S$  و  $B$ )، سرعت محاسبه شده توسط حسگر تصحیح شده و به سرعت ارابه نزدیک تر شده است.



**شکل (۱۱):** نمودار سرعت ارابه ی تست و سرعت ثبت شده توسط حسگر DPS

**جدول (۴): درصد اختلاف بین سرعت‌های اندازه‌گیری شده**

زاویه غلت (درجه)	سرعت ارابه	سرعت تجربی (m/s)	سرعت عددی (m/s)	درصد اختلاف سرعت عددی و تجربی	درصد اختلاف سرعت ارابه و تجربی
۰	۰/۵۲	۰/۶۲	۰/۵۶	۷/۴۷	۱۹/۲۳
۰	۰/۹۸	۰/۸۵	۰/۷۷	۹/۱۳	۱۳/۲۶
۰	۱/۵۱	۱/۳۹	۱/۲۹	۷/۰۲	۷/۹۴
۰	۱/۹۹	۲/۰۶	۱/۸۴	۶/۶۴	۳/۵۱
۰	۲/۵۴	۲/۶۲	۲/۴۵	۶/۵۴	۳/۱۴
۱۵	۰/۶۱	۰/۶۱	۰/۵۶	۷/۶۹	۰
۱۵	۱/۰۱	۱/۰۶	۰/۸۸	۹/۱۲	۴/۹۵
۱۵	۱/۵۳	۱/۵۷	۱/۴۲	۸/۵۵	۲/۶۱
۱۵	۲/۰۲	۱/۸۵	۱/۷۱	۸/۱۸	۸/۴۱
۱۵	۲/۵۵	۲/۶۱	۲/۳۷	۸/۹۹	۲/۳۵
۳۰	۰/۶۰۲	۰/۶۰	۰/۵۵	۸/۱۶	۰/۳۳۲
۳۰	۱/۰۲	۱/۰۸	۰/۸۹	۸/۸۷	۵/۸۸
۳۰	۱/۵۷	۱/۶۴	۱/۵۶	۸/۷۲	۴/۴۵۸
۳۰	۲/۱۹	۲/۲۰	۱/۷۸	۸/۸۳	۰/۴۵۶
۳۰	۲/۳۰	۲/۴۰	۲/۳۵	۹/۷۶	۴/۳۴۷

شده توسط ارابه کشش در تست‌های متعدد و در شرایط حضور زوایای حمله جریان مختلف مقایسه گردید. در نتیجه دقت این سرعت سنجی نسبت به سرعت مرجع یعنی ارابه کشش در زاویه غلت صفر درجه ۵درصد در زاویه ۱۵ درجه ۱۱ درصد و زاویه غلت ۳۰ درجه ۱۸ درصد می‌باشد که تأثیر زاویه غلت جریان بر دقت اندازه‌گیری حسگر را نشان می‌دهند؛ بنابراین با در نظر گرفتن نتایج عددی و تست‌های آزمایشگاهی مناسب‌ترین محل قرارگیری حسگرها نسبت به هم بر روی محفظه استوانه‌ای، زاویه ۳۵ درجه می‌باشد. در این زاویه بهینه، حسگرهای فشارسنج کمترین حساسیت را در دقت اندازه‌گیری فشار نسبت به زاویه غلت جریان مختلف را دارند؛ بنابراین در موقعیت نصب پیشنهادی حسگرها یعنی زاویه ۳۵ درجه حسگرها دقت نسبتاً خوبی در تخمین سرعت دارند.

#### ۶- تشکر و قدردانی

در این بخش از پژوهشکده دریایی دانشگاه جامع امام حسین (ع) به‌عنوان حامی مالی و معنوی تحقیق انجام شده و همچنین از همه دوستان و بزرگوارانی که در انجام این تحقیقات مشارکت داشتند، تشکر و قدردانی می‌شود.

#### ۷- مراجع

- [1] A. and Sabet, M. T., Daniali, H. M., Fathi and E. Alizadeh, "A Low-Cost Dead Reckoning Navigation System for an AUV Using a Robust AHRS: Design and Experimental Analysis," IEEE J. Ocean. Eng., 2018. (In Persian)
- [2] N. R. Y. A. g. A. M. b. And. G. Shahqoli, "Comprehensive review of fluid flow intensity measurement methods," the first national conference on sustainable development strategies in agriculture, natural resources and environment sectors. (In Persian)
- [3] A. J. Hickey, "Fluid Flow," Pharm. Process Eng., pp. 1–35, 2020, doi: 10.1201/9781420002324-1.
- [4] Juan F. Fuentes-Pérez<sup>1</sup>, Kaia Kalev<sup>1</sup>, Jeffrey A. Tuhtan<sup>1</sup> and Maarja Kruusmaal<sup>1</sup> Centre for Biorobotics, Tallinn University of Technology, Tallinn, "Underwater vehicle speedometry using differential pressure sensors: Preliminary results." IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, 2016.

#### ۵- بحث و نتیجه‌گیری

مقاله حاضر به بهینه‌سازی تخمین سرعت به‌وسیله حسگرهای فشارسنج تفاضلی در داخل یک محفظه استوانه‌ای پرداخته است. مهم‌ترین نکته در این بهینه‌سازی، زاویه قرارگیری حسگرهای حسگر نسبت به هم بر روی هندسه استوانه‌ای با کمترین حساسیت نسبت به زاویه غلت جریان بوده است.

حسگر موجود یک حسگر سرعت محوری بوده که برای محدوده اندازه‌گیری سرعت ۰/۵ m/s تا ۲/۵ طراحی شده است. زاویه بهینه قرارگیری حسگرها نسبت به هم در یک فرایند بهینه‌سازی و با استفاده از شبیه‌سازی عددی استخراج شد. در این مقاله باهدف صحت سنجی حل‌های عددی پس از ساخت نمونه طراحی شده، تست‌های تجربی در آزمایشگاه حوضچه کشش انجام پذیرفت. خروجی سرعت اندازه‌گیری شده توسط حسگر با سرعت مرجع اندازه‌گیری

- [8] M. Saniinejad, "An introduction to the concepts of turbulent flows and their modeling," 2013. (In Persian)
- [9] Mohammad Amin Salehi, Said Mazaheri, Mohammad Hossein Kazeminezhad, "Study of Flow Characteristics around a Near-Wall Circular Cylinder Subjected to a Steady Cross-Flow," 2018.
- [10] Y. L. Wenjun Gao, Daniel Nelias a, Zhenxia Liu, "Numerical investigation of flow around one finite circular cylinder with two free ends." Ocean Engineering, 2018.
- [11] F. Semiconductor and T. Data, "Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned , Temperature Compensated and Calibrated," pp. 1-10, 2005.
- [5] M. K. Juan Francisco Fuentes-Pérez, Christian Meurer, Jeffrey Andrew Tuhtan, "Differential Pressure Sensors for Underwater Speedometry in Variable Velocity and Acceleration Conditions." IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, 2018.
- [6] M. K. Christian Meurer , Juan Francisco Fuentes-Pérez , Narcís Palomeras , Marc Carreras, "Differential Pressure Sensor Speedometer for Autonomous Underwater Vehicle Velocity Estimation." IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, 2019.
- [7] M. K. Christian Meurer , Juan Francisco Fuentes-Pérez , Kordula Schwarzwälder, Martin Ludvigsen , Asgeir Johan Sørensen, "2D Estimation of Velocity Relative to Water and Tidal Currents Based on Differential Pressure for Autonomous Underwater Vehicles." IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS, 2020.

