تحلیل گرماآوصوتی بر روی یک نمونه شناور زیرآبی

پرویز قدیمی*، سامان کرمانی، هاشم نوروزی
دانشکدهٔ مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده
شناورهای زیرآبی از مهم‌ترین تجهیزاتِ صنایع دریایی، خصوصاً در راستای دفاعی می‌باشند. از این‌رو، استتار این دسته از شناورها، یک عامل اساسی در بقای آنها به حساب می‌آید. نوفه‌های گرمایی و آوصوتی دو دسته عمده‌ی نوفه در شناورهای زیرآبی می‌باشند. لذا، در مقاله حاضر، این نوفه‌های پیرامون یک نمونه شناور زیرآبی و در سه سرعت متفاوت، بررسی گردیدند. برای این هدف، تحلیل‌های گرماآوصوتی (ترمو هیدروآکوستیک) با حل معادلات ناویه-استوکس و انتقال حرارت صورت‌گرفته است. الگوهای فوکس ویلیام و هاکینز نیز برای بدست آوردن ترازفشار صوتی در دوردست بکار گرفته شده‌اند. برای محاسبه‌ی معادلات ناویر-استوکس و انتقال حرارت از حلگر انسیس-سی‌اِف‌اِیکس و برای محاسبه‌ی تراز فشار صوتی استفاده شد، و یک برنامه رایانه‌ای موازی در پایتون به نام «آکوپای» مهیا گردید. مشخصه‌های شدت پرتودهی گرمایی و تراز فشار صوتی (اِس‌پی‌اِل) به ترتیب برای سنجش نوفه‌ی گرمایی و نوفه‌ی آوصوتی ارزیابی شده‌اند. نتایج بدست آمده نشان داده‌اند که تأثیر تغییرات سرعت بر روی نوفه‌ی گرمایی بسیار ناچیز می‌باشد. هم‌چنین، با افزایش سرعت وسیله، افزایش ویک داغ پشت شناور زیرآبی و ارتقاء شدت پرتودهی حاصل شدند. از سویی‌دیگر، تحلیل‌های گرماآوصوتی توزیع غیر-یکنواخت سرعت و فشار را در عدد رینولدز ۴۵×۱۰^{۶} نشان دادند.

کلیدواژه‌ها: نوفه‌ی گرمایی، نوفه‌ی آوصوتی، شناور زیرآبی، پردازش موازی.

۱. مقدمه

شناورهای زیرآبی عموماً از سرعت و قدرت مانور پایینی برخوردار می‌باشند. لذا، استتار آن‌ها مهم‌ترین عامل کارآمدی‌شان در صنایع دفاعی[1] است. از این‌رو، شناسایی و ارزیابی انواع نوفه‌های شناورهای زیرآبی حائز اهمیّت می‌باشد. از سویی‌دیگر، نوفه‌های گرمایی و آوصوتی شناورهای زیرآبی عاملی تاثیرگذار بر روی شرایط محیط‌زیست و موجودات دریایی قلمداد می‌شود. پس، از منظری دیگر، کاهش سطح نوفه‌های گرمایی و آوصوتی شناورهای زیرآبی علاوه بر استتار آن‌ها از دید دشمن، در جهت حفظ تعادل اکولوژیک دریایی نیز مطلوب می‌باشد.
فن‌اوری‌های متفاوتی برای شناسایی شناورهای زیرآبی وجود دارند. اما عموماً برای شناسایی و مشخص کردن حوزهٔ عمل شناورهای زیر سطحی، دو دسته‌ی شناسایی مستقیم و غیرمستقیم وجود دارد. در روش شناسایی مستقیم، سازهٔ شناور زیرآبی و موقعیت آن به صورت مستقیم (بصری) مورد شناسایی قرار می‌گیرد. در حالی‌که در روش شناسایی غیر مستقیم، به واسطهٔ حضور یک شناور زیرآبی، آشفتگی، اغتشاش و تغییرات فیزیکی محیط دریایی نسبت به حالت عادی، عامل شناسایی است. روش‌های شناسایی غیرمستقیم خود به چهار زیربخش کلی تقسیم می‌گردند. این چهار زیربخش شامل، تأثیرات فیزیکی سطح، تأثیرات نوری، تأثیرات گرمایی و تأثیرات آوصوتی است [۱]. دو مورد آخر (تأثیرات گرمایی و آوصوتی) به دلیل دارا بودن پتانسیل بالا در شناسایی شناورهای زیرآبی، بسیار حائز اهمیت می‌باشند.
تمامی شناورهای زیرآبی به دلیل تولید حرارت و داشتن دمای بالای صفر مطلق، تشعشع پرتوهای مادون قرمز دارند. از سویی دیگر، هر چه دمای جسم (شناور زیرآبی) بیش‌تر باشد، شدت پرتوهای مادون قرمز منتشر شده در محیط بیش‌تر خواهند بود. در نتیجه، افزایش دمای بدنه‌ی زیردریایی در اثر افزایش حرارت تولید شده توسط منابع گرمایی، می‌تواند آن‌را در معرض دید دوربین‌های مادون قرمز قرار دهد. هم‌چنین، دمای بالای بدنه منجر به

* نویسندهٔ پاسخگو: pghadimi@aut.ac.ir

[1] Defence

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.5.4]

افزایش دمای آب در اطراف شناور زیرآبی گردیده و ویک[1] داغ شناور زیرآبی را شکل می‌دهد. این ویک داغ که تا چندین برابر طول بدنه در پشت آن گسترش می‌یابد، می‌تواند به راحتی توسط دوربین‌های مادون‌قرمز شناسایی شود. از سویی‌دیگر، تغییرات فشار هیدرودینامیکی پیرامون بدنه‌ی شناور زیرآبی، منجر به ایجاد نوفه‌ی هیدرودینامیکی آوصوتی می‌شود.

روش‌های متفاوتی برای تخمین نوفه‌های گرمایی و آوصوتی وجود دارند. عموماً، برای تخمین نوفه‌ی گرمایی مادون قرمز، معادلات ناویه-استوکس و انتقال حرارت به کار گرفته می‌شوند. هم‌چنین، برای محاسبه‌ی نوفه‌ی هیدرودینامیکی آوصوتی در میدان دوردست روش‌های انتگرالی از قبیل کرشهف [۲] یا فوکس ویلیام و هاکینز [۳] استفاده می‌شود.

از سویی دیگر، به دلیل ماهیّت دفاعی این موضوع، مطالعات بسیار کمی در مورد تأثیرات این نوفه‌ها در شناورهای زیرآبی وجود دارد. در این میان، می‌توان اشاره داشت به، تحقیقات تامپسون و همکارانش و بیرک و همکارانش که نوفه‌ی گرمایی مادون قرمز ناشی از شناورها را ناشی از دو منبع داخلی و خارجی می‌دانند. به صورتی‌که، موتور اصلی محرک شناور زیرآبی و ژنراتورهای تولید قدرت به عنوان منابع داخلی هستند. هم‌چنین، منبع خارجی شامل جذب و بازتاب مادون قرمز از سطح شناور در تعامل با محیط پیرامون خود تعریف می‌شود [۴-۵].

از میان تحلیل‌های عددی و تجربی بر روی هیدرودینامیک شناورها و اجسام زیرآبی نیز می‌توان اشاره داشت به ژانگ و همکارانش که به صورت عددی، جریان بر روی بدنه شناور زیرآبی نامتقارن لاغر را مطالعه کرده‌اند. آن‌ها در این مطالعه، تمام نیروی هیدرودینامیکی و تکانه (اندازه حرکت، ممنتوم) بدنه شناور زیرآبی را محاسبه نموده‌اند [۶]. هم‌چنین، اوال و همکارانش ابزاری عددی برای تحلیل توانایی‌های مانورپذیری شناورهای زیرآبی را ارائه نمودند [۷].

اما در راستای تحقیقات در حوزه‌ی انتقال حرارت اجسام مغروق، می‌توان به مطالعه‌ی لی و کلینسترر اشاره نمود. آن‌ها، سازوکار انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون یک حلقه‌ی محدود غیر-یکنواخت را بررسی نموده‌اند [۸]. هم‌چنین، سای و همکاران به‌صورت عددی، تاثیرات منابع چشمه و چاه گرمایی غیر-یکنواخت را بر روی جریان سیال بررسی کرده‌اند [۹]. چن و همکارانش نیز در مطالعه تجربی- تئوری، مشخصه‌های گرمایی در منابع اگزوست اجسام زیرآبی را مطالعه نموده‌اند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش سرعت منبع گرمایی، ویک داغ طولانی‌تر و میدان داغ گسترده‌تر می‌شود [۱۰].

در راستای تحقیقات صورت‌گرفته در زمینه‌ی تحلیل‌های آوصوتی شناورهای زیرآبی نیز می‌توان به مطالعه‌ی مرز و همکارانش اشاره نمود. آن‌ها به صورت عددی، پاسخ‌های صوتی بسامد پایین سازه‌ای یک نمونه‌ی ساده از شناور زیرآبی را بررسی نموده‌اند. در این مطالعه، نوسان‌های پروانه نیز در نظر گرفته شده‌اند [۱۱]. کارستا و کسیسوگلو نیز در تحقیقی تحت عنوان «نوفه‌ی صوتی بدنه‌ی شناور زیرآبی تحت تحریکات هارمونیک» به صورت تحلیلی و عددی پاسخ‌های صوتی و سازه‌ای بر روی یک نمونه شناور زیرآبی را مطالعه نموده‌اند. آن‌ها یک نمونه سیلندر با بالک‌هد و مقاطع عرضی را به عنوان شناور زیرآبی کاملاً مغروق در نظر گرفته‌اند [۱۲]. نوفه‌ی صوتی ناشی از سازه‌ی یک پروانه‌ی مغروق با روش‌های عددی متفاوت سی‌اِف‌دی[2]، عنصر (المان) مرزی[3] و اجزاء متناهی[4] نیز توسط ینگ‌سان تحلیل شده است [۱۳].

براساس تحقیقات بالا، مشخص می‌باشد که تحلیل نوفه‌ی گرمایی و صوتی در شناورهای زیرآبی حائز اهمیّت است. از سویی دیگر، فقدان مطالعه‌ای مشتمل بر تحلیل‌های گرماآوصوتی برای بررسی هم‌زمان نوفه‌های گرمایی و آوصوتی نیز قابل مشاهده می‌باشد. در عین حال، تأثیر سرعت شناور زیرآبی بر روی نوفه‌های مورد نظر نیز تاکنون بررسی نشده است.

از این‌رو، در مقاله حاضر، تحلیل گرماآوصوتی یک نمونه شناور زیرآبی پیاده‌سازی شده است. برای این هدف، تحلیل عددی- تحلیلی انتقال حرارت (با حل معادلات ناویه- استوکس و انتقال حرارت) به صورت جفت‌شده

[1] Wake

[2] CFD
[3] BEM
[4] FEM

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.5.4]

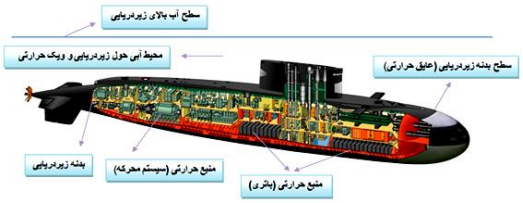
(کوپل) با تحلیل عددی آوصوتی اجرا شده است. هم‌چنین، برای تخمین نوفه‌های آوصوتی نیز روش فوکس ویلیام و هاکینز[1] به کار گرفته شده است. از سویی دیگر، تحلیل‌ها پارامتری در سرعت‌های متفاوت (یا اعداد رینولدز متفاوت) انجام شده‌اند.

۲. تشریح فیزیکی مسئله

در مطالعه‌ی حاضر، تشریح حل عددی به دو بخش کلی تقسیم گردیده است. در بخش نخست، حل معادلات ناویه-استوکس و انتقال حرارت تشریح می‌شوند. در بخش دوم نیز، معادلات فوکس ویلیام و هاکینز ارائه گردیده‌اند.

۲-۱. گرماصوتی

در این مقاله، یک الگوی ساده‌شده از یک شناور زیرآبی با مشخصه‌های فیزیکی و توزیع منابع گرمایی همانند شکل ۱ در نظر گرفته شده است. فیزیک و هندسه مسئله و موقعیت‌های منابع گرمایی به منظور تحلیل ترموهیدرودینامیکی شناور زیرآبی، به صورت طرحواره در شکل ۱ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱ طرحواره موقعیت منابع تولید حرارت برای یک الگوی ساده‌شده از شناوری زیرآبی.

در تعریف مسئله مذکور، منظور از منابع گرمایی، دیزل ژنراتور، باتری‌ها و موتور برقی شناور زیرآبی می‌باشند. در این نواحی، چشمه‌های گرمایی اصلی شناور زیرآبی قرار داشته که شار گرمایی اصلی q''' را تولید می‌کنند. دیوارهٔ شناور زیرآبی شامل تمامی استحکامات، شبکه‌بندی‌های سازه‌ای و عایق‌های صوتی و گرمایی می‌باشند. حرارت تولید شده در منابع گرمایی، توسط هدایت گرمایی طبق معادله ۱، به بدنهٔ شناور زیرآبی انتقال می‌یابد [۱۴].

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2}+\frac{q'}{k}=\frac{\rho c}{k}\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (۱)$$

در معادله فوق، T درجه حرارت (K)، $\frac{\partial T}{\partial t}$ تغییرات دما نسبت به زمان، q' چشمه گرمایی، k ضریب انتقال حرارت هدایتی (W/mK)، ρ جرم مخصوص و c گرمای ویژه می‌باشند.

از سویی دیگر، منظور از سطح بدنه، پوستهٔ بیرونی شناور زیرآبی است که معمولاً با عایق‌های گرمایی پوشیده می‌شود. سطح پوسته که دارای گرمایی متفاوت با محیط پیرامون خود می‌باشد، انتقال گرمایی از نوع جابجایی (همرفت) به آب دریا خواهد داشت. انتقال حرارت همرفتی با استفاده از معادله ۲ بدست می‌آید [۱۴].

$$q = hA(T_{wall}-T_\infty) \qquad (۲)$$

در معادله فوق، q شار گرمایی (W/m^2)، A مساحت سطح تبادل حرارت (m^2)، T_{wall} دمای دیواره، T_∞ دمای دوردست و h ضریب انتقال حرارت جابجایی (W/Km^2) می‌باشند.

هم‌چنین، با توجّه به اینکه سطح شناور زیرآبی دارای دمای بالای صفر مطلق می‌باشد، انتقال حرارت پرتودهی (جذب و تشعشع) نیز خواهد داشت که با استفاده از معادله ۳ بدست می‌آید.

$$q''_{rad}=\frac{q}{A}=\varepsilon E_b(T_s)-\alpha G=\varepsilon \text{б}(T_s^4-T_{sur}^4) \qquad (۳)$$

که در آن E_b، قدرت پرتودهی جسم سیاه (نرخ انرژی خارج شده بر واحد سطح) (W/m^2)، G، شدت تابش ورودی (نرخ تابش گرمایی ورودی بر واحد سطح گیرنده)، ε یک خاصیت تابشی سطح به نام ضریب تشعشع، α، ضریب جذب، б ثابت استفان بولتزمن $(\frac{W}{m^2K^4})$، T_s دمای مطلق سطح (k) و T_{sur} دمای مطلق محیط (k) می‌باشند.

به دلیل وجود گرادیان دما در نزدیکی سطح بدنه شناور زیرآبی، لایه مرزی گرمایی به وجود خواهد آمد. ضریب انتقال حرارت جابجایی برای لایه مرزی مذکور بایستی طبق معادله ۴ محاسبه شود.

$$h=\frac{-k_f\frac{\partial T}{\partial y}|y=0}{T_s-T_\infty} \qquad (۴)$$

در معادله ۴، k_f ضریب انتقال حرارت هدایتی در لایه نزدیک سطح، T_s-T_∞ اختلاف دمای بین سطح و محیط پیرامون، $\frac{\partial T}{\partial y}$ تغییرات دما در راستای عمود بر پوسته شناور زیرآبی است. در محیط آب پیرامون شناور زیرآبی و ناحیه ویک داغ ایجاد شده پشت آن، انتقال حرارت از نوع

[1] FWH

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.5.4]

پرتودهی و جابجایی تا سطح آب وجود خواهد داشت. بنابراین در این نواحی، معادلهٔ انتقال حرارت همرفتی، معادله ۲، و معادله انتقال حرارت پرتودهی، معادلهٔ ۳، حاکم است.

برای بررسی انتقال حرارت در سطح آب دریا، ابتدا بایستی حرارت پرتودهی از سطح شناور زیرآبی و ویک گرمایی پشت آن طبق ضریب دید، F_{ij}، از سطح شناور زیرآبی تا سطح آب منتقل شود. ضریب دید طبق معادله ۵ محاسبه می‌شود.

$$Q_{1-2} = J_1 A_1 F_{12} - J_2 A_2 F_{21} \qquad (۵)$$

در رابطه فوق، F_{ij} کسری از انرژی تابشی است که سطح i را ترک کرده و به سطح j می‌رسد، A سطح تشعشع و J، رادیوسیتی بوده که طبق معادله ۶ محاسبه می‌شود.

$$J = \rho G + \varepsilon E_b \qquad (۶)$$

انتقال حرارت منتقل‌شده از سطح شناور زیرآبی به سطح آب بالای شناور زیرآبی از نوع انتقال حرارت پرتودهی، معادلهٔ ۳ و انتقال حرارت همرفتی، معادله ۲، خواهد بود. لازم به ذکر است که به دلیل وجود لایه مرزی گرمایی در سطح آب، ضریب انتقال حرارت جابجایی برای لایه مرزی گرمایی نیز بایستی طبق معادله ۴ محاسبه گردد.

به علاوه از آن جایی که بخش نخستِ مسئله مذکور، بررسی ترمو هیدرودینامیکی یک شناور زیرآبی است، در تمام نواحی فوق‌الذکر، معادلات اساسی مکانیک سیالات شامل، معادلات ناویه-استوکس، معادلهٔ پیوستگی و معادلهٔ انرژی برقرار هستند. معادلات ناویه-استوکس، طبق رابطه (۷) محاسبه می‌گردند [۱۵].

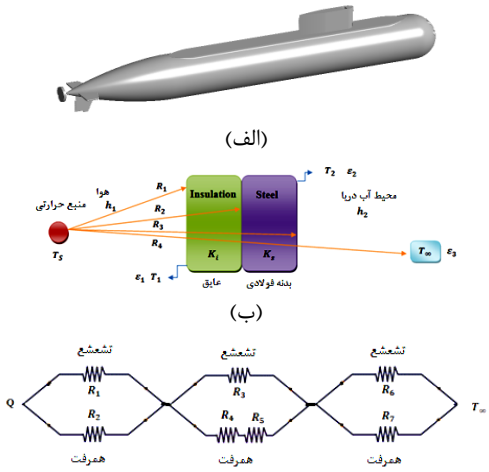
$$\begin{aligned}\frac{Du}{Dt} &= X - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} + \upsilon\nabla^2 u \\ \frac{Dv}{Dt} &= Y - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y} + \upsilon\nabla^2 v \\ \frac{Dw}{Dt} &= Z - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z} + \upsilon\nabla^2 w\end{aligned} \qquad (۷)$$

که در آن $V = ui + vj + wk$، میدان سرعت، p فشار و υ لزجت سینماتیکی می‌باشند. معادله پیوستگی که بیان‌کننده بقای جرم در سامانه است، طبق رابطه ۸ محاسبه می‌شود [۱۵].

هم‌چنین معادله انرژی، طبق رابطه ۹ محاسبه می‌شود [۱۵].

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\int_{cv} e\rho dV\right) + \int_{cs} e\rho(V.n)dA \ , \qquad (۹)$$

که در آن Q گرما، W کار، E انرژی، $V.n$ سرعت عمود ورودی بر سطح کنترل و e، انرژی بر واحد جرم می‌باشد. طرحواره انتقال حرارت در لایه‌های مختلف بدنه شناور زیرآبی و مقاومت گرمایی حاصل از آن در شکل ۲ دیده می‌شود.



شکل ۲ طرحواره مسئله انتقال حرارت به بدنه شناور زیرآبی و نمودار مقاومت گرمایی حاصل از آن؛ الف) بدنه شناور زیرآبی، ب) طرحواره‌ای از لایه‌های بدنه شناور زیرآبی، ج) مقاومت گرمایی معادل.

متناسب با نمودار مقاومت گرمایی شکل ۲-ج، معادلات غیرخطی ۱۰، ۱۱، ۱۲ به شرح ذیل استخراج می‌شوند.

با استفاده از این دستگاه غیرخطی سه معادله و سه مجهول با استفاده از تنظیمات مسئله مورد نظر می‌توان به دمای سطوح خارجی دست پیدا کرد. روش‌های عددی متفاوتی برای حل معادلات بالا پیشنهاد شده‌اند. یکی از بهترین شیوه‌های حل عددی معادلات ناویه-استوکس، روش حجم متناهی است. لذا در مطالعه‌ی حاضر، حل‌گر حجم متناهی در نرم‌افزار انسیس-سی‌اِف‌ایکس استفاده شده است.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \qquad (۸)$$

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.5.4]

۲-۲. تحلیل‌های آوصوتی

برای تحلیل‌های آوصوتی در میدان دوردست بایستی توزیع فشار و سرعت بر روی بدنه‌ی شناور زیرآبی با استفاده از حل معادلات ناویه-استوکس استخراج شود. سپس تراز فشار صوتی را می‌توان با استفاده از معادلات فوکس ویلیام و هاکینز محاسبه نمود.

معادلات فوکس ویلیام و هاکینز از معادلات تکانه (اندازه حرکت) و بقای جرم استخراج شده‌اند. شکل کلی این معادله به صورت ذیل می‌باشد.

$$\boxdot^{۲} c^{۲}\rho'(x,t) = \frac{\partial^{۲}}{\partial x_i \partial x_j}\left[T_{ij}H(f)\right] - \frac{\partial}{\partial x_i}\left[L_i\delta(f)\right] + \frac{\partial}{\partial t}\left[\left(\rho_{.}U_n\right)\delta(f)\right] \quad (۱۳)$$

که در آن، $\boxdot^{۲} \equiv \left(\frac{۱}{c^{۲}}\right)\frac{\partial^{۲}}{\partial t^{۲}} - \nabla^{۲}$ عمل‌گر موج، ρ' چگالی آشفتگی، $\rho_{.}$ چگالی سیال، c سرعت صوتی، f دامنه پیرامون جسم، که مقدار این مشخصه نشان‌دهنده‌ی سطح انتگرالی است، می‌باشند. هم‌چنین t زمان مشاهده‌گر، δ تابع دلتای دیراک، H تابع هویساید[1] است. از سویی دیگر، U_i و L_i در معادلات ۱۴ و ۱۵ تعریف شده‌اند.

$$U_i = \left(۱ - \frac{\rho}{\rho_{.}}\right)v_i + \frac{\rho u_i}{\rho_{.}} \quad (۱۴)$$

$$L_i = P_{ij}\,\hat{n}_j + \rho u_i\,(u_n - v_n) \quad (۱۵)$$

در این معادلات، تکانه (اندازه حرکت) سیال، سرعت سطح انتگرالی و معمولی بر سطح انتگرالی به ترتیب ρu_i، v_i و $\hat{n}_j$ می‌باشند. هم‌چنین $P_{ij} = p'\delta_{ij}$ است که، δ_{ij} تابع دلتای کرونکر[2] می‌باشد. برای سیال آب معادلات ۱۴ و ۱۵ به معادلات زیر تبدیل می‌شوند.

$$U_i = u_i \quad (۱۶)$$

$$L_i = P_{ij}\,\hat{n}_j \quad (۱۷)$$

برای حل معادله‌ی فوکس ویلیام و هاکینز، فراست حلی انتگرالی بر پایه‌ی منابع تک-قطبی و دوقطبی ارائه داده است [۲]. در این معادلات، فشار صوتی در مشاهده‌گر همانند زیر حساب می‌گردد:

$$p'(\vec{x},t) = p'_T(\vec{x},t) + p'_L(\vec{x},t) + p'_Q(\vec{x},t) \quad (۱۸)$$

$$۴\pi\, p'_T(\vec{x},t) = \int_S \left[\frac{\rho_{.}(\dot{U}_n + U_{\dot{n}})}{r\left(۱-M_r\right)^{۲}}\right]_{ret} dS + \int_S \left[\frac{\rho_{.}u_n\left(r\dot{M}_r + c\left(M_r - M^{۲}\right)\right)}{r^{۲}\left(۱-M_r\right)^{۳}}\right]_{ret} dS \quad (۱۹)$$

$$۴\pi\, p'_L(\vec{x},t) = \frac{۱}{c}\int_S \left[\frac{\dot{L}_r}{r\left(۱-M_r\right)^{۲}}\right]_{ret} dS + \int_S \left[\frac{L_r - L_M}{r^{۲}\left(۱-M_r\right)^{۲}}\right]_{ret} dS + \frac{۱}{c}\int_S \left[\frac{L_r\left(r\dot{M}_r + c\left(M_r + M^{۲}\right)\right)}{r^{۲}\left(۱-M_r\right)^{۳}}\right]_{ret} dS \quad (۲۰)$$

جایی‌که، علاوت دات (̇)، نشان‌دهنده‌ی مشتق زمانی است. هم‌چنین، $L_M = L_i M_i$ که در آن، M_i بردار عدد ماخ می‌باشد. در مقاله حاضر، منابع چهارقطبی به دلیل اعداد ماخ بسیار کوچک، نادیده گرفته شده‌اند. تراز فشار صوتی را می‌توان با استفاده از معادله‌ی ۲۱ بعد از محاسبه‌ی فشار صوتی به کار برد.

$$SPL = ۲۰\log_{۱۰}\left(\frac{p}{p_{ref}}\right) \quad (۲۱)$$

در معادله‌ی فوق، فشار مرجع برای آب $۱۰^{-۶}$ در نظر گرفته شده است. عموماً، در حل مسائل آوصوتی به دلیل حجم داده‌های بالا، استفاده از روش‌های پردازش موازی رایج می‌باشند. لذا در مقاله حاضر، برنامه رایانه‌ای برای حل انتگرال‌های فوکس ویلیام و هاکینز در پایتون پیاده‌سازی شده است. این برنامه رایانه‌ای آکوپای[3] نام دارد که با استفاده از الگوریتم اِس‌آی‌اِم‌دی[4]، برای پردازش موازی استفاده می‌شود.

۳. پیاده‌سازی مسئله

در شناور زیرآبی مورد نظر، طول آن ۱۵ متر و عرض آن ۲٫۰۶۷ متر قرار داده شده است. در حالی‌که الگوی اصلی این شناور زیرآبی دارای طول ۷۲٫۶ متر است. لذا مقیاس الگوکردن شناور زیرآبی ۴٫۸۴ بوده است. از سویی‌دیگر، مقدار کلی افت گرمایی تولید شده در مقیاس اصلی شناور زیرآبی ۳۴۳۱٫۰۹۹ کیلووات می‌باشد. نوع منابع گرمایی برای شناور زیرآبی هدف در جدول ۱ ارائه شده است.

[1] Heaviside
[2] Kronecker
[3] AcoPy
[4] SIMD; Single Instruction Multiple Data

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.5.4]

جدول ۱ منابع گرمایی اعمال‌شده در شناور زیرآبی هدف.

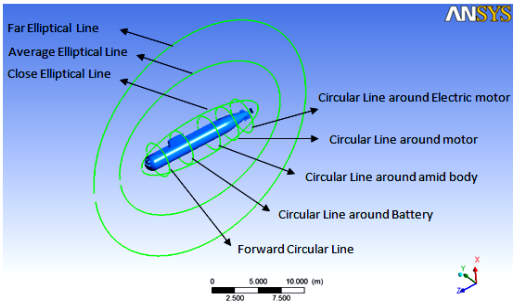
شماره حالت	نوع موتور مولد انرژی	نوع باتری	نوع موتور انتقال انرژی	عدد رینولدز
۱	دیزل	اسید-سرب	موتور برقی	۴۵×۱۰^۶
۲	دیزل	اسید-سرب	موتور برقی	۶۷/۵×۱۰^۶
۳	دیزل	اسید-سرب	موتور برقی	۹۰×۱۰^۶

از طرفی دیگر میزان کل حرارت تولیدی هدررفت در شناور زیرآبی با مقیاس اصلی و شناور زیرآبی در حالات مختلف در جدول ۲ ارائه شده‌اند. با توجه به مقیاس الگوسازی و مقاومت گرمایی شناور زیرآبی موردنظر، توزیع دمای روی سطح بدنه شناور زیرآبی در حالت‌های مختلف در جدول ۲ ارائه گردیده است.

جدول ۲ توزیع دمایی در حالت‌های مختلف شبیه‌سازی گرمایی؛ مقدار و موقعیت منبع گرمایی.

موقعیت اجزا مولد حرارت			
دمای کلی زیر موتور مولد انرژی	دمای کلی زیر باتری	دمای کلی زیر موتور برقی	دمای کلی نیمه بالایی
۲/۵ متر	۵ متر	۱/۵ متر	-----
۱۲/۵-۱۰ متر	۲/۵ تا ۷/۵ متر	۱۲/۵ تا ۱۴ متر	-----
۲۵/۴۵۵۸۷	۲۵/۴۴۲۲۴	۲۵/۴۴۰۶۲	۲۵/۴۳۷۸۲

برای دست‌یابی به ارزیابی صحیح از شدت پرتودهی گرمایی به عنوان عامل ارزیابی میزان حرارت هدر رفت شناور زیرآبی، خطوطی دایروی پیرامون هر یک از منابع تولید حرارت شناور زیرآبی و خطوطی بیضی‌گون در فاصله‌های متفاوت برای پوشش طولی در برگیرنده تمامی منابع گرمایی شناور زیرآبی، ترسیم شده‌اند. این خطوط محاسباتی در شکل ۳ قابل مشاهده هستند.



شکل ۳ خطوط دایروی و بیضی‌گون محاسباتی پیرامون شناور زیرآبی الگوشده.

خطوط دایروی پیرامون شناور زیرآبی در شکل ۳، به شعاع ۲ متر ترسیم شده‌اند. شعاع طولی و عرضی خطوط بیضوی نیز به ترتیب برای بیضی‌گون نزدیک[1]، ۸ متر و ۳ متر، بیضی‌گون متوسط[2]، ۱۱ متر و ۹ متر و بیضی‌گون دور[3]، ۱۴/۵ متر و ۱۴/۵ متر در نظر گرفته شده‌اند.

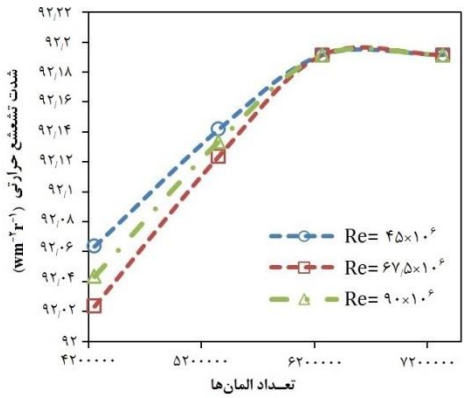
اما از منظر پیاده‌سازی مسئله برای تحلیل‌های آوصوتی، در گام نخست، توزیع فشار و سرعت بر روی سطوح بیضی‌گون سطح با مقطع دایروی[4] پیرامون شناور زیرآبی با شعاع ۳/۷ و طول بیضی‌گون ۱۹ متر، انتقال داده شده‌اند. در گام دوم، تراز فشار صوتی بر روی دو دایره‌ی با شعاع ۵۰ متر و با ۳۶۰ درجه مشاهده‌گر با استفاده از برنامه آکوپای محاسبه می‌شود. یکی از دایره‌ها در سطح متقارن (x-z) بدنه زیردریایی و دیگری در وسط سطح بدنه شناور زیرآبی (x-y) قرار دارند. در نهایت نمودارهای قطبی برای هر دایره ترسیم شده‌اند. در بخش بعدی، نمودارهای تحلیل گرماآوصوتی ارائه شده‌اند.

به دلیل فقدان داده‌های تجربی و عددی برای صحه‌گذاری نتایج عددی تحلیل‌های گرماآوصوتی اجسام زیرآبی، در ادامه تحلیل حساسیت شبکه‌بندی بر روی مشخصه‌ی شدت پرتودهی گرمایی برای خط بیضی‌گون نزدیک بدنه‌ی شناور زیرآبی و در اعداد رینولدز متفاوت، صورت گرفته است.

تحلیل حساسیت شبکه‌بندی برای شدت پرتودهی گرمایی برای خط بیضی‌گون نزدیک بدنه شناور در سه عدد رینولدز متفاوت در شکل ۴ نمایش داده شده است.

[1] Close elliptical line
[2] Average elliptical line
[3] Far elliptical line
[4] Circular line

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.5.4]



شکل ۴ تحلیل حساسیت شبکه‌بندی بر روی مشخصه‌ی شدت پرتودهی گرمایی برای خط بیضی‌گون نزدیک بدنه شناور زیرآبی در سه عدد رینولدز متفاوت.

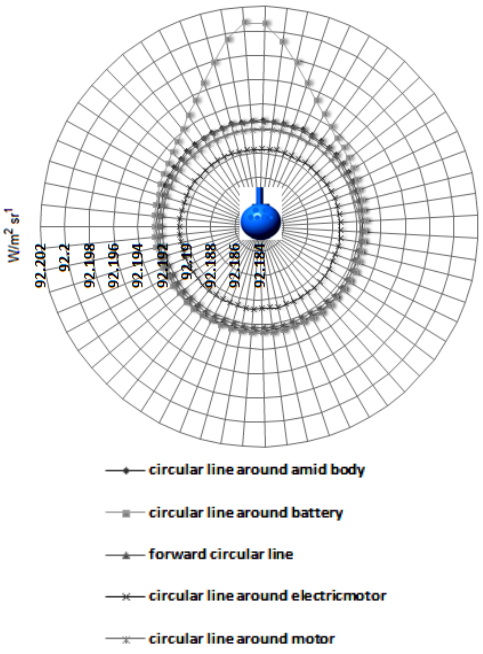
همان‌گونه که از شکل ۴ مشخص می‌باشد، شبکه‌ی با تعداد عنصرهای بیش‌تر از ۶۲۰۰۰۰۰ جواب‌های همگرایی در هر سه عدد رینولدز دارد. از این‌رو، شبکه‌بندی غیرساختاریافته‌ای با ۶۲۷۳۵۳۸ عناصر برای دامنه‌ی محاسباتی مطالعه حاضر استفاده شده است.

۴. نتایج و بحث

در این بخش، در ابتدا نمودارهای شدت پرتودهی گرمایی برای سنجش نوفه‌ی گرمایی ارائه شده است. سپس، نمودارهای تراز فشار صوتی برای سنجش نوفه آوصوتی ارائه گردیده‌اند. برای سنجش نوفه‌ی گرمایی و نوفه‌ی آوصوتی به ترتیب، شدت پرتودهی گرمایی و تراز فشار صوتی به کار گرفته شده‌اند. مقایسه‌ی شدت پرتودهی گرمایی برای خطوط دایروی پیرامون بدنه‌ی شناور زیرآبی در شکل ۵ قابل مشاهده می‌باشد.

در ابتدا بایستی اشاره شود که، به دلیل تاثیرات بسیار ناچیز عدد رینولدز بر روی معادله‌ی انرژی برای محاسبه‌ی توزیع دما و عدم وابستگی شدت تشعشع بر عدد رینولدز، تفاوتی مشهود در شدت تشعشع بر روی خطوط دایروی پیرامون شناور زیرآبی مشاهده نگردیده است.

از سویی دیگر، براساس شکل ۵، می‌توان نتیجه گرفت که، بیشینه‌ی پرتودهی گرمایی با مقدار $\frac{w}{m^2 sr^1}$ ۹۲٫۲۰۰۸ برای خطوط دایروی پیرامون باتری و بدنه‌ی بالایی اسنورکل [1]



شکل ۵ مقایسه‌ی شدت پرتودهی گرمایی بر روی خطوط دایروی پیرامون بدنه‌ی شناور زیرآبی (مقدار بیشینه برابر با $\frac{w}{m^2 sr^1}$ ۹۲٫۲۰۰۸ برای خط دایروی پیرامون باتری).

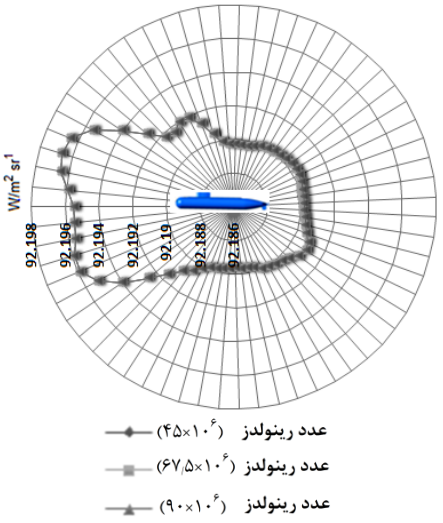
شناور زیرآبی اتفاق افتاده است. دلیل این پدیده، دمای بالای باتری و سطح کم اسنورکل شناور زیرآبی است. هم‌چنین متوسط پرتودهی گرمایی پیرامون باتری برابر است با $\frac{w}{m^2 sr^1}$ ۹۲٫۱۹۳۷ که نشان‌دهنده‌ی ناحیه‌ی حیاتی از منظر شناسایی نوفه گرمایی می‌باشد. متوسط پرتودهی گرمایی بر روی خط دایروی پیرامون وسط بدنه شناور زیرآبی، خط دایروی جلوی شناور زیرآبی و خط دایروی پیرامون موتور به ترتیب $\frac{w}{m^2 sr^1}$ ۹۲٫۱۹۲۵، $\frac{w}{m^2 sr^1}$ ۹۲٫۱۹۲۳ و $\frac{w}{m^2 sr^1}$ ۹۲٫۱۹۲۲ می‌باشند. با مقایسه‌ی این اعداد می‌توان مشاهده نمود که مقدار پرتودهی گرمایی تقریباً مشابهی در این نواحی حاکم است. اما کمینه‌ی شدت پرتودهی گرمایی برای خط دایروی پیرامون موتور برقی برابر با مقدار $\frac{w}{m^2 sr^1}$ ۹۲٫۱۹۰۵ می‌باشد.

مقایسه‌ی شدت پرتودهی گرمایی بر روی خط بیضی‌گون نزدیک، در اعداد رینولدز متفاوت در شکل ۶ قابل مشاهده می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی شدت پرتودهی گرمایی در ناحیه‌ی محلیِ نوک (بینی) شناور زیرآبی و ناحیه‌ی فوقانی اسنورکل شناور زیرآبی اتفاق افتاده است. از سویی‌دیگر، متوسط شدت

[1] Snorkel

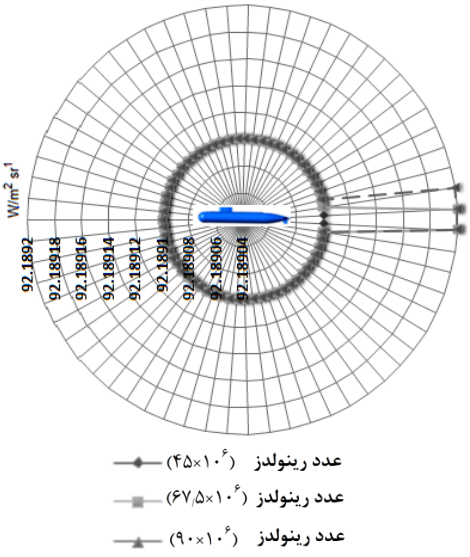
[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.5.4]

پرتودهی در اعداد رینولدز ۴۵×۱۰^{۶}، $۶۷/۵\times۱۰^{۶}$ و ۹۰×۱۰^{۶} به ترتیب $\frac{w}{m^{۲}sr^{۱}}$ ۹۲/۱۹۱۴۷، $\frac{w}{m^{۲}sr^{۱}}$ ۹۲/۱۹۱۴۸ و $\frac{w}{m^{۲}sr^{۱}}$ ۹۲/۱۹۱۴۹ می‌باشد. از این‌رو، تفاوت مابین متوسط این مقادیر، برابر با $\frac{w}{m^{۲}sr^{۱}}$ ۰/۰۰۰۰۱ است که مقدار ناچیزی می‌باشد.



شکل ۶ مقایسه‌ی شدت پرتودهی گرمایی بر روی خط بیضی‌گون نزدیک در اعداد رینولدز متفاوت.

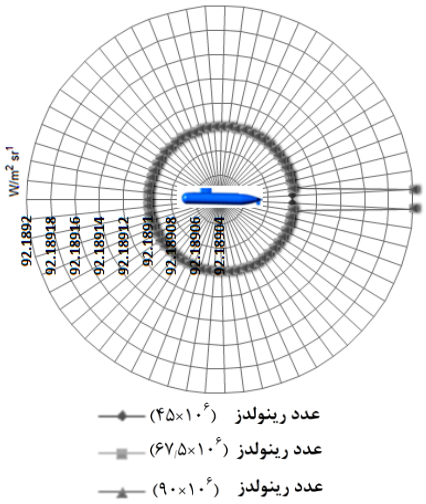
مقایسه‌ی شدت پرتودهی گرمایی بر روی خط بیضی‌گون متوسط در اعداد رینولدز متفاوت در شکل ۷ قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به شکل ۷، با افزایش عدد رینولدز، بزرگی مقدار شدت پرتودهی و ناحیه‌ی توزیع‌شده‌ی ویک



شکل ۷ مقایسه‌ی شدت پرتودهی گرمایی بر روی خط بیضی‌گون متوسط در اعداد رینولدز متفاوت.

داغ پشت شناور زیرآبی افزایش یافته است. در عدد رینولدز ۹۰×۱۰^{۶}، بیشنیه‌ی شدت پرتودهی در حدود دو برابر بیش‌تر از حالت ۲ با عدد رینولدز $۶۷/۵\times۱۰^{۶}$ می‌باشد. هم‌چنین برای حالت ۱، با عدد رینولدز ۴۵×۱۰^{۶}، نمی‌توان ناحیه‌ای محلی با بیشینه‌ی شدت پرتودهی در پشت شناور زیرآبی یافت.

مقایسه‌ی شدت پرتودهی گرمایی بر روی خط بیضی‌گون دور در اعداد رینولدز متفاوت در شکل ۸ قابل مشاهده می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، حالات ۲ و ۳ دارای مقدار و توزیع شدت پرتودهی تقریباً یکسانی می‌باشند. با مقایسه‌ی شکل‌های ۷ و ۸ مقدار بیشینه‌ی شدت پرتودهی یکسانی در ویک داغ پشت شناور زیرآبی مشاهده می‌شود. این پدیده به واسطه‌ی تعادل گرمایی مابین ویک داغ انتقال داده شده و محیط آب دریا می‌باشد.

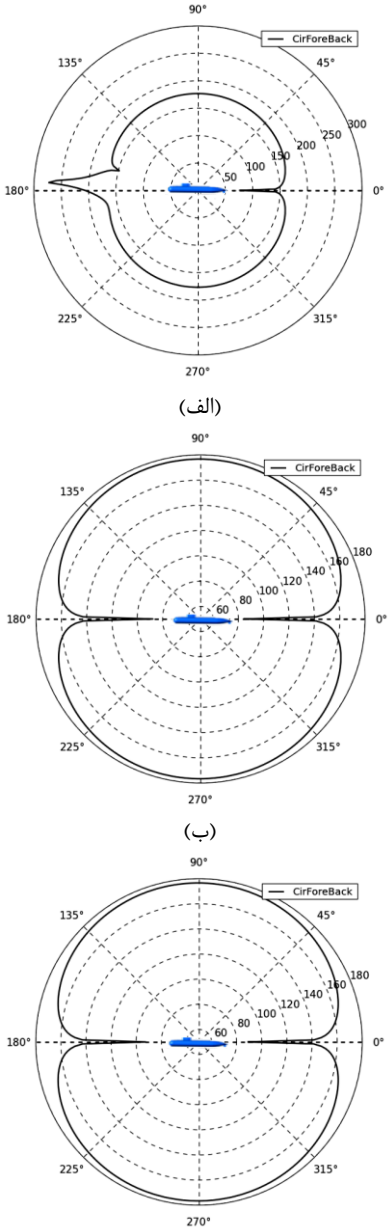


شکل ۸ مقایسه‌ی شدت پرتودهی گرمایی بر روی خط بیضی‌گون دور در اعداد رینولدز متفاوت.

در ادامه، تراز فشار صوتی به عنوان معیاری در سنجش آوصوتی شناور زیرآبی برای حالات متفاوت ارائه شده است. تراز فشار صوتی برای سه حالت متفاوت بر روی دایره‌ای در صفحه متقارن با شعاع ۵۰ متر در شکل ۹ نشان داده شده است.

در حالت ۱، نوفه در پشت شناور زیرآبی برابر با ۷۰ دسی‌بل می‌باشد. با این حال، در جلوی آن مقدار

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.5.4]



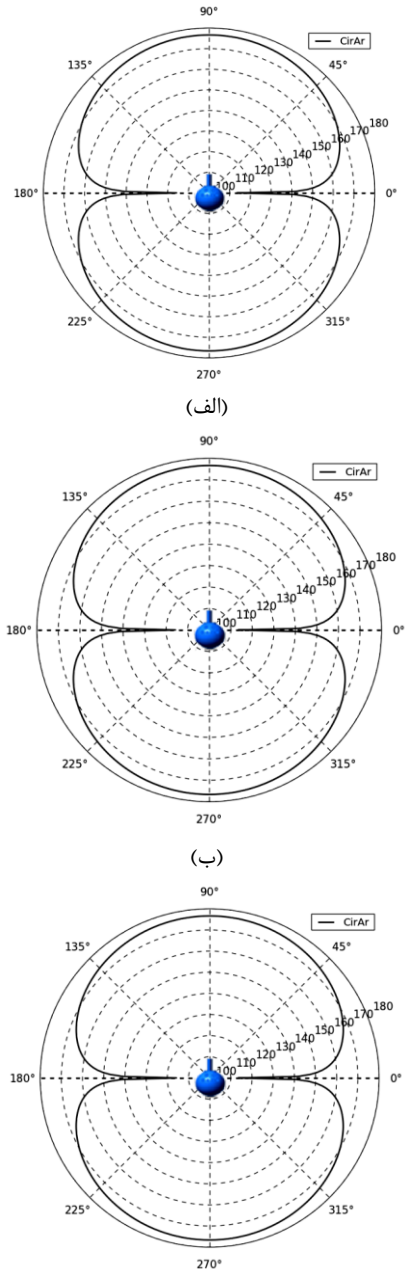
(الف)

(ب)

(ج)

شکل ۹ تراز فشار صوتی (اِس‌پی‌اِل) در سطح متقارن؛ الف) حالت ۱، ب) حالت ۲، ج) حالت ۳.

اِس‌پی‌اِل[1] برابر با ۲۷۰ دسی‌بل است. دلیل این امر، عدم‌تقارن توزیع فشار و سرعت پیرامون شناور زیرآبی می‌باشد. در حالت ۲ و ۳، این پارامترها دارای رفتاری یکنواخت می‌باشند. به نحوی که مقدار اِس‌پی‌اِل در جلو و پشت شناور زیرآبی در حالت ۲ و حالت ۳ به ترتیب تقریباً برابر با ۸۰ و ۹۰ دسی‌بل می‌باشند. بیشینه‌ی سطح فشار صوتی در حالت ۲ و ۳ برابر با ۱۸۰ دسی‌بل می‌باشد. این مقدار برای زوایای ۹۰ و ۲۷۰ درجه مشهود می‌باشند. تراز فشار صوتی برای سطح وسط بدنه در شعاع ۵۰ متر برای سه حالت متفاوت در شکل ۱۰ به نمایش در آمده است.



(الف)

(ب)

(ج)

شکل ۱۰ تراز فشار صوتی (اِس‌پی‌اِل) برای سطح وسط بدنه؛ الف) حالت ۱، ب) حالت ۲، ج) حالت ۳.

[1] SPL

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.5.4]

تراز فشار صوتی در هر سه حالت مشابه می‌باشند. نتایج نشان‌دهنده‌ی آن است که تغییرات سرعت در سه حالت تاثیری بر روی نوفه در سطح وسط بدنه در میدان دوردست ندارد. نرخ تراز فشار صوتی در حدود ۱۰۰ تا ۱۷۵ دسی‌بل و کیمنه‌ی تراز فشار صوتی در زاویای ۰ و ۱۸۰ درجه رخ می‌دهد.

۵. نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین اهداف در طراحی شناورهای زیرآبی، استتار آن‌ها از دید شناساگرها می‌باشد. شناورهای زیرآبی عموماً به واسطه‌ی دو نوفه‌ی حرارتی (مادون قرمز) و هیدرودینامیکی (آوصوتی) شناسایی می‌شوند. از این‌رو در مطالعه‌ی حاضر، تحلیل‌های گرماآوصوتی (ترموهیدرو آکوستیکی) برای ارزیابی نوفه‌های گرمایی و آوصوتی یک نمونه شناور زیرآبی انجام شده است. برای این هدف، از یک‌سو معادلات ناویه- استوکس به صورت جفت‌شده با معادلات گرمایی برای تحلیل ترموهیدرودینامیکی و از سویی دیگر، معادلات فوکس- ویلیلام هاکینز برای تحلیل آوصوتی شناور زیرآبی مذکور در سه عدد رینولدز متفاوت حل شده‌اند. نرم‌افزار انسیس- سی‌اِفایکس و برنامه رایانه‌ای موازی آکوپای برای حل معادلات ذکر شده استفاده شده‌اند. برای سنجش نوفه‌ی گرمایی و نوفه‌ی آوصوتی به ترتیب، شدت پرتودهی گرمایی و تراز فشار صوتی به کار گرفته شده‌اند. نتایج تحلیل‌های گرماآوصوتی نشان‌دهنده‌ی تاثیر ناچیز سرعت شناور زیرآبی بر روی نوفه‌ی گرمایی در تمامی جهات شناور و نوفه‌ی آوصوتی در سطح وسط بدنه شناور زیرآبی می‌باشد. این در حالی است که افزایش سرعت شناور زیرآبی متناظر با افزایش عدد رینولدز، منجر به افزایش ویک داغ پشت شناور می‌شود. از سویی دیگر، تحلیل‌های آوصوتی در میدان دوردست، نشان‌دهنده‌ی غیر-یکنواخت بودن سرعت و فشار در اعداد رینولدز ۴۵×۱۰^{۶} می‌باشد. علاوه بر این، در دو عدد رینولدز دیگر، توزیع فشار یکنواخت بوده و تراز فشار صوتی با افزایش عدد رینولدز افزایش یافته است.

۶. فهرست منابع

[1] D. May, G.G. Wren, "Detection of submerged vessels using remote sensing techniques," Australian Defence Force Journal, no. 127, 1997.

[2] F. Farassat, M.K. Myers, "Extension of Kirchhoff's formula to radiation from moving surfaces," Journal of Sound and Vibration, vol. 123, no. 3, pp. 451-460, 1988.

[3] J.E. Ffowcs Williams, D.L. Hawkings, "Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion," Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 264, no. 1151, pp. 321-342, 1969.

[4] J. Thompson, D. Vaitekunas, A.M. Birk, "IR signature suppression of modern naval ships," In ASNE 21st Century Combatant Technology Symposium, pp. 27-30, 1998.

[5] A.M. Birk, W.R. Davis, "Suppressing the infrared signatures of marine gas turbines," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 111, no. 1, pp. 123-129, 1989.

[6] J.T. Zhang, J.A. Maxwell, A.G. Gerber, A.G.L. Holloway, G.D. Watt, "Simulation of the flow over axisymmetric submarine hulls in steady turning," Ocean Engineering, vol. 57, pp. 180-196, 2013.

[7] D.M. Ovalle, J. García, F. Periago, "Analysis and numerical simulation of a nonlinear mathematical model for testing the maneuverability capabilities of a submarine," Nonlinear Analysis: Real World Applications, vol. 12, no. 3, pp. 1654–1669, 2011.

[8] M. Lei, C. Kleinstreuer, "Natural-convection heat transfer in a nonuniform finite annulus with concentric heat source," International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 15, no. 6, pp. 456-461, 1994

[9] R. Tsai, K.H. Huang, J.S. Huang, "Flow and heat transfer over an unsteady stretching surface with non-uniform heat source," International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 35, no. 10,pp. 1340-1343, 2008.

[10] S. Chen, H. Liu, Y. Qi, "The thermal character of the underwater heat exhausting source," Journal of Thermal Science, vol. 19, no. 5, pp. 445-450, 2010.

[11] S. Merz, R. Kinns, N. Kessissoglou, "Structural and acoustic responses of a submarine hull due to propeller forces," Journal of Sound and Vibration, vol. 325, no. 1, pp. 266-286, 2009.

[12] M. Caresta, N.J. Kessissoglou, "Acoustic signature of a submarine hull under

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.5.4]

harmonic excitation," Applied Acoustics, vol. 71, no. 1, pp. 17-31, 2010.

[13] W. Ying-san, Y.Wang, S. Chang, F. Jian, "Numerical prediction of propeller excited acoustic response of submarine structure based on CFD, FEM and BEM," Journal of Hydrodynamics, Ser. B, vol. 24, no. 2, pp. 207-216, 2012.

[14] F.P. Incropera, D.P. Dewitt "Introduction to Heat Transfer," John Wiley & sons, 2002.

[15] I.H. Shames, "Mechanics of Fluids," Mc Graw Hill, 2003.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.5.4]