

# تحلیل گرمایی و صوتی بر روی یک نمونه شناور زیرآبی

پرویز قدیمی<sup>\*</sup>، سامان کرمانی، هاشم نوروزی

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

## چکیده

شناورهای زیرآبی از مهم‌ترین تجهیزات صنایع دریایی، خصوصاً در راستای دفاعی می‌باشند. از این‌رو، استثمار این دسته از شناورها، یک عامل اساسی در بقای آنها به حساب می‌آید. نوفه‌های گرمایی و آصوتی دو دسته عمده‌ی نوافه 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 گرمایی و صوتی (ترمو‌هیدروآکوستیک) با حل معادلات ناویه-استوکس و انتقال حرارت صورت‌گرفته است. الگوهای فوکس و بیلام و هاکینز نیز برای بدست آوردن تراز فشار صوتی در دوردست بکار گرفته شده‌اند. برای محاسبه‌ی معادلات ناویه-استوکس و انتقال حرارت از حلگر انسپیس-سی‌اف‌ایکس و برای محاسبه‌ی تراز فشار صوتی استفاده شد، و یک برنامه رایانه‌ای موافقی در پایتون به نام «آکوپای» مهیا گردید. مشخصه‌های شدت پرتودهی گرمایی و تراز فشار صوتی (اس‌پی‌ال) به ترتیب برای سنجش نوفه‌ی گرمایی و نوفه‌ی آصوتی 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 سویی دیگر، تحلیل‌های گرمایی و صوتی توزیع غیر-یکنواخت سرعت و فشار را در عدد رینولدز  $Re = 45 \times 10^6$  نشان دادند.

**کلیدواژه‌ها:** نوفه‌ی گرمایی، نوفه‌ی آصوتی، شناور زیرآبی، پردازش موازی.

مستقیم (بصری) مورد شناسایی قرار می‌گیرد. در حالی که 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 آصوتی است [۱]. دو مورد آخر (تأثیرات گرمایی و آصوتی) 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 خواهد بود. در نتیجه، افزایش دمای بدنی زیردریایی در اثر افزایش حرارت تولید شده توسط منابع گرمایی، می‌تواند آن را در معرض دید دوربین‌های مادون قرمز قرار دهد. هم‌چنین، دمای بالای بدنی منجر به

## ۱. مقدمه

شناورهای زیرآبی عموماً از سرعت و قدرت مانور پایینی برخوردار می‌باشند. لذا، استثمار آن‌ها مهم‌ترین عامل کارآمدی‌شان در صنایع دفاعی<sup>۱</sup> است. از این‌رو، شناسایی و ارزیابی انواع نوفه‌های شناورهای زیرآبی حائز اهمیت می‌باشد. از سویی دیگر، نوفه‌های گرمایی و آصوتی شناورهای زیرآبی عاملی تاثیرگذار بر روی شرایط محیط‌زیست و موجودات دریایی قلمداد می‌شود. پس، از منظری دیگر، کاهش سطح نوفه‌های گرمایی و آصوتی شناورهای زیرآبی علاوه بر استثمار 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 حوزه عمل شناورهای زیر سطحی، دو دسته‌ی شناسایی مستقیم و غیرمستقیم وجود دارد. در روش شناسایی مستقیم، سازه شناور زیرآبی و موقعیت آن به صورت

\* نویسنده پاسخگو: pghadimi@aut.ac.ir

<sup>۱</sup> Defence

آن‌ها، سازوکار انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون یک حلقه‌ی محدود غیر-یکنواخت را بررسی نموده‌اند [۸]. هم‌چنین، سای و همکاران به صورت عددی، تاثیرات منابع چشم 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، یک داغ طولانی‌تر و میدان داغ گسترده‌تر می‌شود [۱۰].

در راستای تحقیقات صورت گرفته در زمینه‌ی تحلیل‌های آصوتی 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 مغروف در نظر گرفته‌اند [۱۲]. نوفه‌ی صوتی ناشی از سازه‌ی یک پروانه‌ی مغروف با روش‌های عددی متفاوت سی‌اف‌دی<sup>۲</sup>، عنصر (المان) مرزی<sup>۳</sup> و اجزاء متناهی<sup>۴</sup> نیز توسط ینگسان تحلیل شده است [۱۳].

براساس تحقیقات بالا، مشخص می‌باشد که تحلیل نوفه‌ی گرمایی و صوتی در شناورهای زیرآبی حائز اهمیت است. از سویی دیگر، فقدان مطالعه‌ای مشتمل بر تحلیل‌های گرمایی و صوتی برای بررسی همزمان نوفه‌های گرمایی و آصوتی 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 گرماً آصوتی 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

افزایش دمای آب در اطراف شناور زیرآبی گردیده و یک داغ شناور زیرآبی را شکل می‌دهد. این یک داغ چندین برابر طول بدنه در پشت آن گسترش می‌یابد، می‌تواند به راحتی توسط دوربین‌های مادون‌قرمز شناسایی شود. از سویی دیگر، تغییرات فشار هیدرودینامیکی پیرامون بدنه‌ی شناور زیرآبی، منجر به ایجاد نوفه‌ی هیدرودینامیکی آصوتی می‌شود.

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

از سویی دیگر، به دلیل ماهیت 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 مادون‌قرمز ناشی از شناورها را ناشی از دو منبع داخلی و خارجی می‌دانند. به صورتی که، موتور اصلی محرک شناور زیرآبی و ژنراتورهای تولید قدرت به عنوان منابع داخلی هستند. هم‌چنین، منبع خارجی شامل جذب و بازتاب مادون‌قرمز 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 نامتناظر 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 مغروف، می‌توان به مطالعه‌ی لی و کلینستر اشاره نمود.

<sup>1</sup> Wake

در معادله فوق،  $T$  درجه حرارت (K)،  $\frac{\partial T}{\partial t}$  تغییرات دما نسبت به زمان،  $q$ : چشمی گرمایی،  $k$  ضریب انتقال حرارت هدایتی ( $W/mK$ )،  $\rho$  جرم مخصوص و  $c$  گرمای ویژه می‌باشند.

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

$$q = hA(T_{wall} - T_{\infty}) \quad (2)$$

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

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

$$q_{rad} = \frac{q}{A} = \varepsilon E_b(T_s) - \alpha G = \varepsilon \sigma(T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (3)$$

که در آن  $E_b$ ، قدرت پرتووده‌ی جسم سیاه (نرخ انرژی خارج شده بر واحد سطح) ( $W/m^2$ ),  $G$ ، شدت تابش ورودی (نرخ تابش گرمایی ورودی بر واحد سطح گیرنده)،  $\varepsilon$  یک خاصیت تابشی سطح به نام ضریب تشعشع،  $\alpha$ ، ضریب جذب،  $6$  ثابت استفان بولتزمن ( $\frac{W}{m^2 K^4}$ ),  $T_s$  دمای مطلق سطح ( $K$ ) و  $T_{sur}$  دمای مطلق محیط ( $K$ ) می‌باشند. به دلیل وجود گرadiان دما در نزدیکی سطح بدن شناور زیرآبی، لایه مرزی گرمایی به وجود خواهد آمد. ضریب انتقال حرارت جابجایی برای لایه مرزی مذکور بایستی طبق معادله ۴ محاسبه شود.

$$h = \frac{-k_f \frac{\partial T}{\partial y}|_y = 0}{T_s - T_{\infty}} \quad (4)$$

در معادله ۴،  $k_f$  ضریب انتقال حرارت هدایتی در لایه نزدیک سطح،  $T_s - T_{\infty}$  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

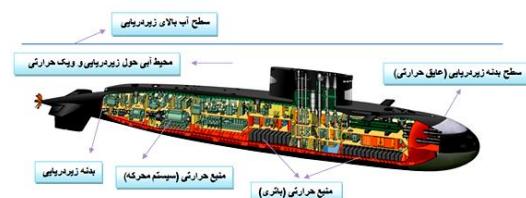
(کوپل) با تحلیل عددی آصواتی اجرا شده است. هم‌چنین، برای تخمین نوافه‌های آصواتی نیز روش فوکس ویلیام و هاکینز<sup>۱</sup> به کار گرفته شده است. از سویی دیگر، تحلیل‌ها پارامتری در سرعت‌های متفاوت (یا اعداد رینولدز متفاوت) انجام شده‌اند.

## 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.

### ۱-۱. 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 شناور زیرآبی.

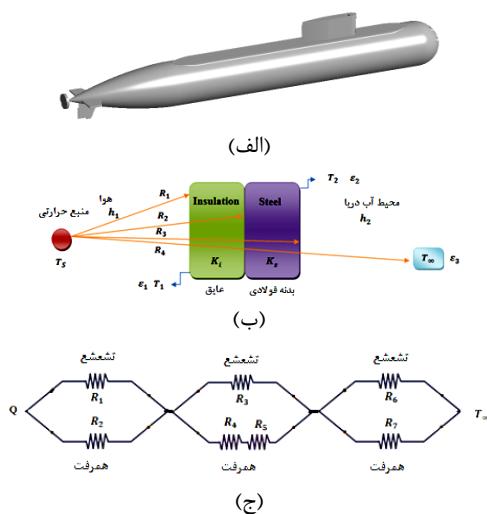
در تعریف مسئله مذکور، منظور از منابع گرمایی، دیزل ژنراتور، باتری‌ها و موتور برقی شناور زیرآبی می‌باشند. در این نواحی، چشمی گرمایی اصلی شناور زیرآبی قرار داشته که شار گرمایی اصلی  $q$  را تولید می‌کنند. دیواره شناور زیرآبی شامل تمامی استحکامات، شبکه‌بندی‌های سازه‌ای و عایق‌های صوتی و گرمایی می‌باشند.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

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{q}{k} = \frac{\rho c}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

<sup>۱</sup> FWH

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \int_{cv} e \rho dV \right) + \int_{cs} e \rho (V \cdot n) dA , \quad (9)$$

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



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

متناوب 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، حل گر حجم متناهی در نرم‌افزار انسیس-سی‌ایکس استفاده شده است.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = . \quad (8)$$

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

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

$$Q_{1-2} = J_1 A_1 F_{12} - J_2 A_2 F_{21} \quad (5)$$

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

$$J = \rho G + \epsilon E_b \quad (6)$$

انتقال حرارت منتقل شده از سطح شناور زیرآبی به سطح آب بالای شناور زیرآبی از نوع انتقال حرارت پرتودهی، معادله 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 نخست مسئله مذکور، بررسی ترمودینامیکی یک شناور زیرآبی است، در تمام نواحی فوق الذکر، معادلات اساسی مکانیک سیالات شامل، معادلات ناویه-استوکس، معادله پیوستگی و معادله انرژی برقرار هستند. معادلات ناویه-استوکس، طبق رابطه (۷) محاسبه می‌گردند [۱۵].

$$\begin{aligned} \frac{D u}{D t} &= X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + v \nabla^2 u \\ \frac{D v}{D t} &= Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + v \nabla^2 v \\ \frac{D w}{D t} &= Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + v \nabla^2 w \end{aligned} \quad (7)$$

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

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

$$p'(\vec{x}, t) = p'_T(\vec{x}, t) + p'_L(\vec{x}, t) + p'_Q(\vec{x}, t) \quad (18)$$

$$4\pi p'_T(\vec{x}, t) = \int_S \left[ \frac{\rho \cdot (\dot{U}_n + U_n)}{r^{(1-M_r)}} \right]_{ret} dS + \quad (19)$$

$$\int_S \left[ \frac{\rho \cdot u_n (r M_r + c(M_r - M^r))}{r^{(1-M_r)}} \right]_{ret} dS$$

$$4\pi p'_L(\vec{x}, t) = \frac{1}{c} \int_S \left[ \frac{L_r}{r^{(1-M_r)}} \right]_{ret} dS + \quad (20)$$

$$\int_S \left[ \frac{L_r - L_M}{r^{(1-M_r)}} \right]_{ret} dS + \\ \frac{1}{c} \int_S \left[ \frac{L_r (r M_r + c(M_r + M^r))}{r^{(1-M_r)}} \right]_{ret} dS$$

جایی که، علاوه دات (.)، نشان دهنده مشتق زمانی است. هم‌چنین،  $L_i M_i = L_M$  که در آن،  $M_i$  بردار عدد ماخ می‌باشد. در مقاله حاضر، منابع چهار قطبی 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.

$$SPL = 20 \log_{10} \left( \frac{p}{p_{ref}} \right) \quad (21)$$

در معادله‌ی فوق، فشار مرجع برای آب  $10^{-6}$  در نظر گرفته شده است. عموماً، در حل مسائل آو صوتی به دلیل حجم داده‌های بالا، استفاده از روش‌های پردازش موازی رایج می‌باشدند. لذا در مقاله حاضر، برنامه رایانه‌ای برای حل انگرال‌های فوکس ویلیام و هاکینز در پایتون پیاده‌سازی شده است. این برنامه رایانه‌ای آکوپای<sup>۳</sup> نام دارد که با استفاده از الگوریتم اس‌آی‌ام‌دی<sup>۴</sup>، برای پردازش موازی استفاده می‌شود.

### ۳. پیاده‌سازی مسئله

در شناور زیرآبی مورد نظر، طول آن ۱۵ متر و عرض آن ۲۰۶۷ متر قرار داده شده است. در حالی که الگوی اصلی این شناور زیرآبی دارای طول ۷۲۶ متر است. لذا مقیاس الگوکردن شناور زیرآبی ۴/۸۴ بوده است. از سویی دیگر، 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.

### ۲-۲. تحلیل‌های آو صوتی

برای تحلیل‌های آو صوتی در میدان دور دست 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.

$$\square^r c^r \rho'(x, t) = \frac{\partial^r}{\partial x_i \partial x_j} [T_{ij} H(f)] - \frac{\partial}{\partial x_i} [L_i \delta(f)] + \frac{\partial}{\partial t} [(\rho \cdot U_n) \delta(f)] \quad (13)$$

که در آن،  $\square^r \equiv \left( \frac{1}{c^r} \right) \frac{\partial^r}{\partial t^r}$  عمل گر موج،  $\rho$  چگالی آشفتگی،  $c$  چگالی سیال،  $H$  سرعت صوتی،  $f$  دامنه پیرامون جسم، که مقدار این مشخصه نشان دهنده سطح انترگرالی است، می‌باشدند. هم‌چنین  $t$  زمان مشاهده‌گر،  $\delta$  تابع دلتای دیراک،  $H$  تابع هویساید<sup>۱</sup> است. از سویی دیگر،  $U_i$  در معادلات ۱۴ و ۱۵ تعریف شده‌اند.

$$U_i = \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right) v_i + \frac{\rho u_i}{\rho_0} \quad (14)$$

$$L_i = P_{ij} \hat{n}_j + \rho u_i (u_n - v_n) \quad (15)$$

در این معادلات، تکانه (اندازه حرکت) سیال، سرعت سطح انترگرالی و معمولی بر سطح انترگرالی به ترتیب  $v_i$ ،  $\rho u_i$  و  $v_i$  می‌باشدند. هم‌چنین  $P_{ij} = p \delta_{ij}$  است که،  $\delta_{ij}$  تابع دلتای کرونکر<sup>۲</sup> می‌باشد. برای سیال آب معادلات ۱۴ و ۱۵ به معادلات زیر تبدیل می‌شوند.

$$U_i = u_i \quad (16)$$

$$L_i = P_{ij} \hat{n}_j \quad (17)$$

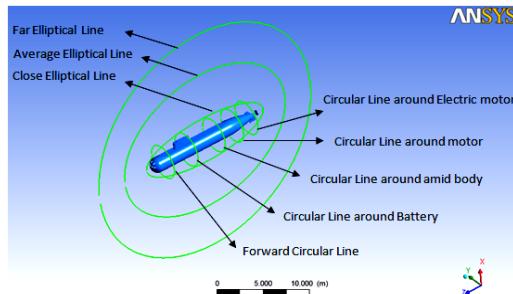
برای حل معادله‌ی فوکس ویلیام و هاکینز، فراست حلی انترگرالی بر پایه‌ی منابع تک-قطبی و دوقطبی ارائه داده است [۲]. در این معادلات، فشار صوتی در مشاهده‌گر همانند زیر حساب می‌گردد:

<sup>3</sup> AcoPy

<sup>1</sup> SIMD; Single Instruction Multiple Data

<sup>1</sup> Heaviside

<sup>2</sup> Kronecker



شکل ۳ خطوط دایروی و بیضی گون محاسباتی پیرامون شناور زیرآبی الگو شده.

خطوط دایروی پیرامون شناور زیرآبی در شکل ۳، به شعاع ۲ متر ترسیم شده‌اند. شعاع طولی و عرضی خطوط بیضوی نیز به ترتیب برای بیضی گون نزدیک<sup>۱</sup>، ۸ متر و ۳ متر، بیضی گون متوسط<sup>۲</sup>، ۱۱ متر و ۹ متر و بیضی گون دور<sup>۳</sup>، ۱۴/۵ متر و ۱۴/۵ متر در نظر گرفته شده‌اند.

اما از منظر پیاده‌سازی مسئله برای تحلیل‌های آصوتی، در گام نخست، توزیع فشار و سرعت بر روی سطح بیضی گون سطح با مقطع دایروی<sup>۴</sup> پیرامون شناور زیرآبی با شعاع ۳/۷ و طول بیضی گون ۱۹ متر، انتقال داده شده‌اند. در گام دوم، تراز فشار صوتی بر روی دو دایره‌ی با شعاع ۵۰ متر و با ۳۶۰ درجه مشاهده گر 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 گرمایی اصوتی ارائه شده‌اند.

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

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

جدول ۱ منابع گرمایی اعمال شده در شناور زیرآبی هدف.

ردیف	عدد رینولدز	نوع موتور انتقال انرژی	نوع باتری	نوع موتور مولد انرژی	شماره حالت
۱	$45 \times 10^6$	موتور برقی سرب	-	اسید- دیزل	
۲	$67.5 \times 10^6$	موتور برقی سرب	-	اسید- دیزل	
۳	$90 \times 10^6$	موتور برقی سرب	-	اسید- دیزل	

از طرفی دیگر میزان کل حرارت تولیدی هدر رفت 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				
دماهی کلی نیمه بالایی	دماهی کلی زیر موتور برقی	دماهی کلی زیر باتری	دماهی کلی زیر موتور مولد انرژی	دماهی کلی زیر موتور مولد انرژی
-----	۱/۵ متر	۵ متر	۲/۵ متر	
-----	۱۲/۵ تا ۷/۵ تا ۲/۵	۱۴ متر	۱۲/۵-۱۰ متر	
۲۵/۴۳۷۸۲	۲۵/۴۴۰۶۲	۲۵/۴۴۲۲۴	۲۵/۴۵۵۸۷	

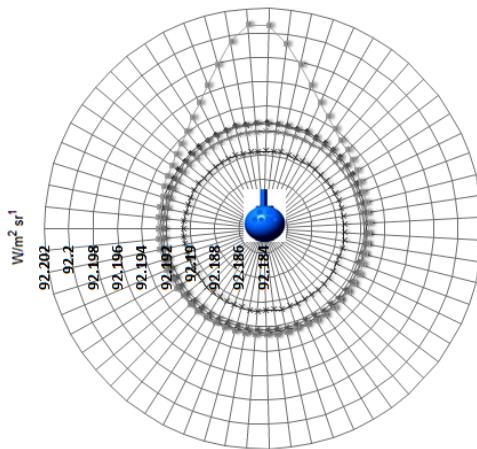
برای دست‌یابی به ارزیابی صحیح از شدت پرتودهی گرمایی به عنوان عامل ارزیابی میزان حرارت هدر رفت شناور زیرآبی، خطوطی دایروی پیرامون هر یک از منابع تولید حرارت شناور زیرآبی و خطوطی بیضی گون در فاصله‌های متفاوت برای پوشش طولی در برگیرنده تمامی منابع گرمایی شناور زیرآبی، ترسیم شده‌اند. این خطوط محاسباتی در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

<sup>۱</sup> Close elliptical line

<sup>۲</sup> Average elliptical line

<sup>۳</sup> Far elliptical line

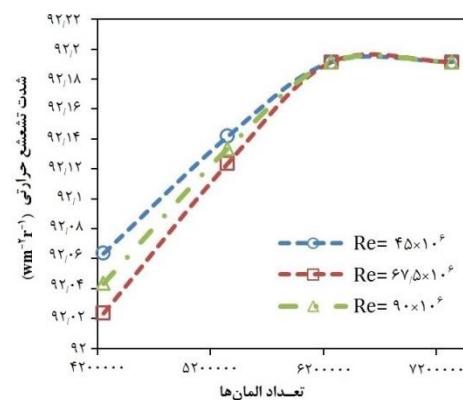
<sup>۴</sup> Circular line



شکل ۵ مقایسه‌ی شدت پرتودهی گرمایی بر روی خطوط دایروی پیرامون بدنی شناور زیرآبی (مقدار بیشینه برابر با  $\frac{w}{m^2 sr^1}$  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 نشان‌دهنده ناحیه‌ی حیاتی از منظر شناسایی نوفه گرمایی می‌باشد. متوسط پرتودهی گرمایی بر روی خط دایروی پیرامون وسط بدن شناور زیرآبی، خط دایروی جلوی شناور زیرآبی و خط دایروی پیرامون موتور به ترتیب  $\frac{w}{m^2 sr^1}$  ۹۲,۱۹۲۵ و  $\frac{w}{m^2 sr^1}$  ۹۲,۱۹۲۳ 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 محلی نوک (بینی) شناور زیرآبی و ناحیه‌ی فوکانی اسنورکل شناور زیرآبی اتفاق افتاده است. از سویی دیگر، متوسط شدت



شکل ۶ تحلیل حساسیت شبکه‌بندی بر روی مشخصه‌ی شدت پرتودهی گرمایی برای خط بیضی‌گون نزدیک بدنی شناور زیرآبی در سه عدد رینولدز متفاوت.

همان‌گونه که از شکل ۴ مشخص می‌باشد، شبکه‌ی با تعداد عنصرهای بیشتر از ۶۲۰۰۰۰ 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 نوفه‌ی آصواتی ارائه گردیده‌اند. برای سنجش نوفه‌ی گرمایی و نوفه‌ی آصواتی به ترتیب، شدت پرتودهی گرمایی و تراز فشار صوتی به کار گرفته شده‌اند. مقایسه‌ی شدت پرتودهی گرمایی برای خطوط دایروی پیرامون بدنی شناور زیرآبی در شکل ۵ قابل مشاهده می‌باشد.

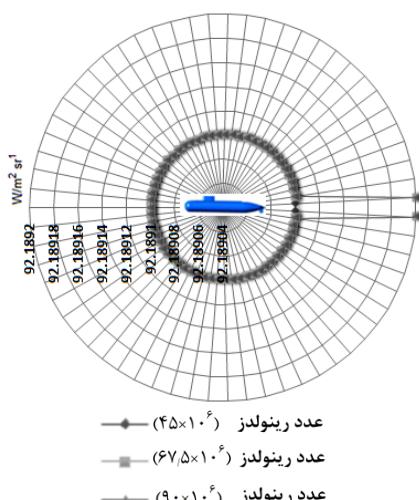
در ابتدا بایستی اشاره شود که، به دلیل تاثیرات بسیار ناچیز عدد رینولدز بر روی معادله‌ی انرژی برای محاسبه‌ی توزیع دما و عدم واپستگی شدت تشعشع بر عدد رینولدز، تفاوتی مشهود در شدت تشعشع بر روی خطوط دایروی پیرامون شناور زیرآبی مشاهده نگردیده است.

از سویی دیگر، براساس شکل ۵، می‌توان نتیجه‌گرفت که، بیشینه‌ی پرتودهی گرمایی با مقدار  $\frac{w}{m^2 sr^1}$  ۹۲,۲۰۰۸ برای خطوط دایروی پیرامون باتری و بدنی بالایی اسنورکل

<sup>1</sup> Snorkel

داغ پشت شناور زیرآبی افزایش یافته است. در عدد رینولدز  $90 \times 10^6$ ، بیشینه‌ی شدت پرتودهی در حدود دو برابر بیشتر از حالت ۲ با عدد رینولدز  $67.5 \times 10^6$  می‌باشد. همچنین برای حالت ۱، با عدد رینولدز  $45 \times 10^6$ ، 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.

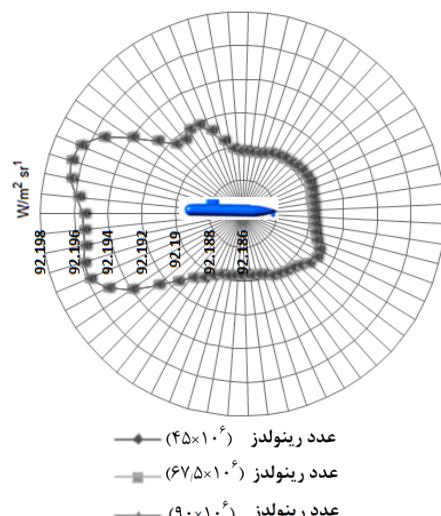


شکل ۸ مقایسه‌ی شدت پرتودهی گرمایی بر روی خط بیضی‌گون دور در اعداد رینولدز متفاوت.

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

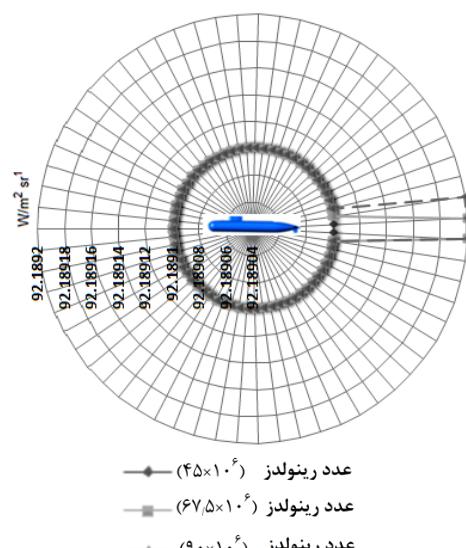
در حالت ۱، نوفه در پشت شناور زیرآبی برابر با ۷۰ دسی‌بل می‌باشد. با این حال، در جلوی آن مقدار

پرتودهی در اعداد رینولدز  $45 \times 10^6$ ،  $67.5 \times 10^6$  و  $90 \times 10^6$  به ترتیب  $\frac{w}{m^2 sr^{-1}}$ ،  $92/19148$  و  $92/19147$  می‌باشد. از این‌رو، تفاوت مابین متوسط این مقادیر، برابر با  $1/10000$  است که مقدار ناچیزی می‌باشد.



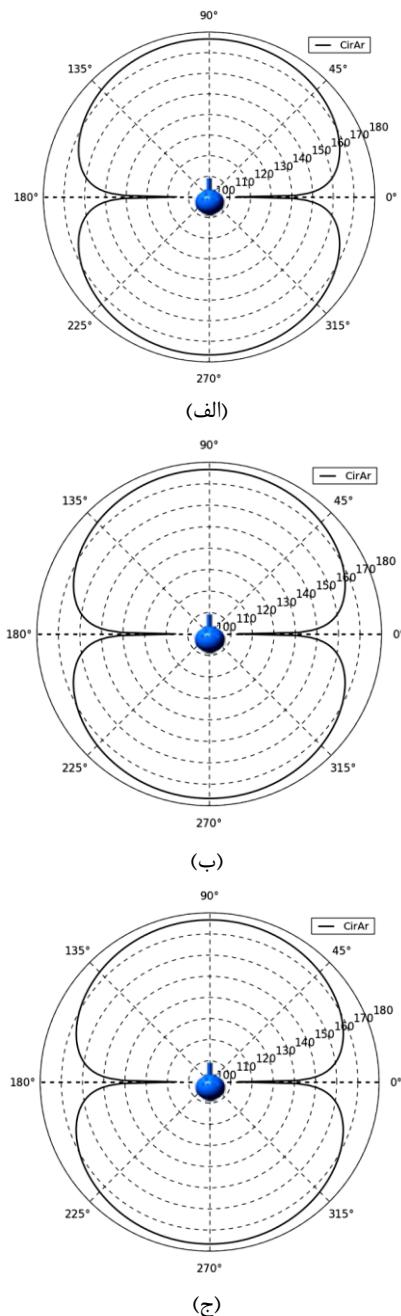
شکل ۶ مقایسه‌ی شدت پرتودهی گرمایی بر روی خط بیضی‌گون نزدیک در اعداد رینولدز متفاوت.

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 توزیع شده‌ی ویک

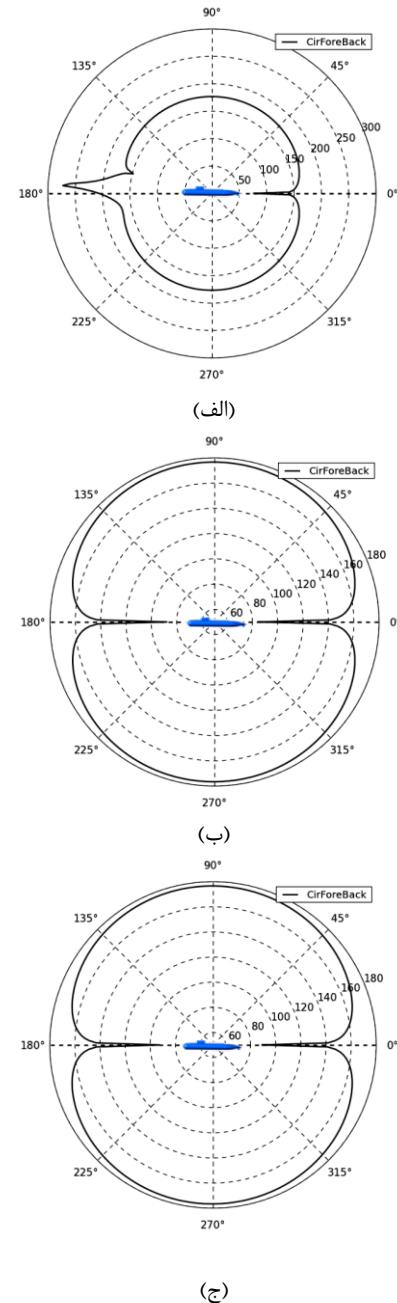


شکل ۷ مقایسه‌ی شدت پرتودهی گرمایی بر روی خط بیضی‌گون متوسط در اعداد رینولدز متفاوت.

فشار صوتی در حالت ۲ و ۳ برابر با ۱۸۰ دسیبل می‌باشد. این مقدار برای زوایای ۹۰ و ۲۷۰ درجه مشهود می‌باشد. تراز فشار صوتی برای سطح وسط بدن در ساعت ۵۰ متر برای سه حالت متفاوت در شکل ۱۰ به نمایش در آمده است.



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



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

اسپیال<sup>۱</sup> برابر با ۲۷۰ دسیبل است. دلیل این امر، عدم تقارن توزیع فشار و سرعت پیرامون شناور زیرآبی می‌باشد. در حالت ۲ و ۳، این پارامترها دارای رفتاری یکنواخت می‌باشند. به نحوی که مقدار اسپیال در جلو و پشت شناور زیرآبی در حالت ۲ و حالت ۳ به ترتیب تقریباً برابر با ۸۰ و ۹۰ دسیبل می‌باشند. بیشینه‌ی سطح

<sup>1</sup> SPL

- 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

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

## ۵. نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین اهداف در طراحی شناورهای زیرآبی، استثمار آن‌ها از دید شناساگرها می‌باشد. شناورهای زیرآبی عموماً به واسطه‌ی دو نوافه‌ی حرارتی (مادون قرمز) و هیدرودینامیکی (آصوتی) شناسایی می‌شوند. از این‌رو در مطالعه‌ی حاضر، تحلیل‌های گرماآصوتی (ترموهیدرودینامیکی و آکوستیکی) برای ارزیابی نوافه‌های گرمایی و آصوتی یک نمونه شناور زیرآبی انجام شده است. برای این هدف، از یک سو معادلات ناویه-استوکس به صورت جفت‌شده با معادلات گرمایی برای تحلیل ترموهیدرودینامیکی و از سویی دیگر، معادلات فوکس-ولیلام هاکینز برای تحلیل آصوتی شناور زیرآبی مذکور در سه عدد رینولدز متفاوت حل شده‌اند. نرم‌افزار انسیس-سی‌اف‌ایکس و برنامه رایانه‌ای موازی آکوپای برای حل معادلات ذکر شده استفاده شده‌اند. برای سنجش نوافه‌ی گرمایی و نوافه‌ی آصوتی به ترتیب، شدت پرتودهی گرمایی و تراز فشار صوتی به کار گرفته شده‌اند. نتایج تحلیل‌های گرماآصوتی نشان‌دهنده‌ی تاثیر ناچیز سرعت شناور زیرآبی بر روی نوافه‌ی گرمایی در تمامی جهات شناور و نوافه‌ی آصوتی 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 آصوتی در میدان دوردست، نشان‌دهنده‌ی غیر-یکنواخت بودن سرعت و فشار در اعداد رینولدز  $45 \times 10^4$  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

- 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.