رهیافتی برای کاهش عمق کاربری یک گلایدر زیرسطحی با موتور حرارتی

محمد علی رسولی[۱*] ، محمد رحیمی آهویی[۲]

[۱] استادیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر؛ rasoli.ma@gmail.com
[۲] پژوهشگر، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر؛ rahimi.m1367@gmail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۲۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۲۱

کلمات کلیدی:
گلایدر زیرسطحی
موتور حرارتی
انرژی گرمایی اقیانوسی
ماده تغییر فاز دهنده

چکیده

گلایدرهای زیرسطحی، گونه‌ای از وسایل خودمختار هستند که نقش ویژه‌ای در مطالعات اقیانوس شناسی ایفا می‌کنند. این مطالعات نیاز به پایش‌های مداوم و طولانی مدت دارند که گلایدرها به دلیل مصرف پایین انرژی و مداومت بالا، برای انجام این ماموریت‌ها محبوبیت یافته‌اند. در این میان، دسته‌ای از گلایدرها قابلیت بهره‌برداری از انرژی حرارتی نهفته در لایه‌های آب را دارند که موجب افزایش مداومت چشمگیر آن‌ها شده است. این شناورها نیاز به غوص در اعماق بالای ۶۸۰ متر دارند و در مناطق با عمق‌های کمتر قابلیت پیمایش خود را از دست می‌دهند. در این مقاله ضمن تحلیل سیستم پیشران یک نمونه شناور موجود، زمان انتقال حرارت و عمق کاربری آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و به منظور استفاده در آب‌های کم عمق‌تر، رهیافتی ارائه می‌گردد تا بتوان از این فناوری در مناطق وسیع‌تری از دریای عمان بهره‌برداری نمود.

An Approach for Operation Depth Reduction of an Underwater Glider Propelled by Ocean Thermal Energy

Mohammad Ali Rasoli[1*], Mohammad Rahimi Ahooee[2]

[1] Department of Mechanical Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Shahin Shahr, Iran; rasoli.ma@gmail.com
[2] Department of Mechanical Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Shahin Shahr, Iran; rahimi.m1367@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 20 Oct. 2018
Accepted: 11 Jun. 2019

Keywords:
Underwater Glider
Thermal Motor
Ocean Thermal Energy
Phase Changing Material

ABSTRACT

The underwater Gliders are a kind of autonomous vehicles that have a special role in ocean surveys which demand continuous monitoring and long endurance. Because of low energy consumption and long endurance, these vehicles are favorite for these missions. Among this, a type of gliders can harvest ocean thermal energy, causing significant endurance increase. These vehicles need at least 680 meters sea depth to operate their propulsion system. In this paper, by analyzing a propulsion system of a typical glider, heat transfer and its operation depth is assessed. For decreased operational depth, an approach is presented for possibility of using this technology in shallower seas, which provides the utilization of this type of gliders at wider range of the Gulf of Oman.

۱ – مقدمه

گلایدرهای زیرسطحی، دسته‌ای از وسایل خودمختار زیرسطحی هستند که نقش ویژه‌ای در مطالعات اقیانوس شناسی ایفا می‌کنند. با توجه به اینکه برخی از خصوصیات فیزیکی دریاها در شرایط مختلف تحت تاثیر قرار می‌گیرد، ارزیابی دقیق این خصوصیات نیاز به پایش‌های مداوم و طولانی مدت دارند که گلایدرها به دلیل مصرف پایین انرژی و مداومت بالا در پایش، برای انجام این ماموریت‌ها محبوبیت یافته‌اند. گلایدرها برخلاف سایر شناورها از سیستم رانش پروانه‌ای یا واترجت استفاده نمی‌کنند. آن‌ها با تغییر در میزان بویانسی و کمک گرفتن از بال‌های خود، حرکت عمودی خود را به حرکت افقی تغییر داده و با مصرف انرژی بسیار کم، پیش رانده می‌شوند. در نهایت با یک حرکت دندانه اره‌ای به جلو رانده می‌شوند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.7.5]

گلایدرهای گرمایی، نوعی از گلایدرهای زیرسطحی هستند که به موتور گرمایی مجهز شده‌اند. این موتورها انرژی لازم برای تغییر بویانسی (عامل پیشرانش) را از اختلاف دمای آب سطح و اعماق اقیانوس تامین می‌کنند. در این موتورها اختلاف دما موجب تغییر فاز در یک ماده تغییر فاز دهنده می‌شود که این خود عاملی برای تغییر حجم و تغییر بویانسی محسوب می‌شود. نمونه طراحی شده این نوع موتور نیاز به محیط‌هایی با عمق ۱۲۰۰ متر دارد تا فرایند تغییر فاز به طور کامل انجام شود که کاربردهای این تکنولوژی را بسیار محدود می‌کند. در این مقاله، راهکاری برای کاهش عمق کاربری گلایدر با موتور گرمایی ارائه و عملکرد موتور تحت این شرایط تحلیل می‌گردد. ایده اصلی موتور حرارتی، ابتدا توسط موسسه تحقیقاتی وب[1] ارائه شد [۱]. در سال ۱۹۹۱، موسسه وب اولین موتور حرارتی را که می‌توانست از انرژی اختلاف دما برای دریانوردی استفاده کند، توسعه داد. در سال ۱۹۹۵، این موتور حرارتی برای اولین بار برای انجام حرکت عمودی استفاده شد. در سال ۱۹۹۸، اولین گلایدر حرارتی به نام اسلوکم/حرارتی[2] تحت تست میدانی قرار گرفت. نتایج آزمون‌ها نشان داد که دامنه عملیاتی یک گلایدر با موتور حرارتی می‌تواند ۳ تا ۴ برابر بیشتر از گلایدر الکتریکی مشابه باشد[۲].

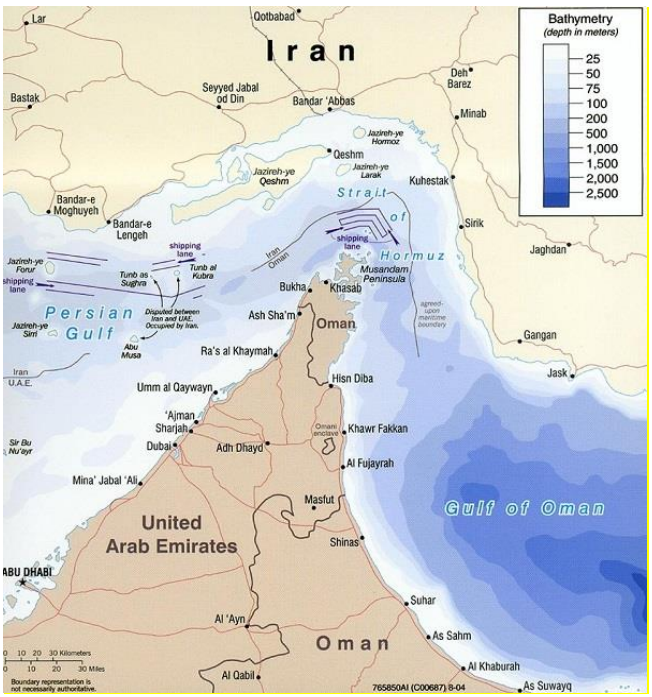
وانگ و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۶، حرکت گلایدر حرارتی را در صفحه عمودی تحلیل کرده و سیستم‌های مکانیکی و کنترلی را برای یک موتور حرارتی طراحی نمودند. در همین سال، کونگ و ما [۴]، فرآیند تغییر فاز در شرایط مرزی مختلف را مورد مطالعه قرار دادند و اثر ساختمان و اندازه محفظه ماده تغییر فاز دهنده[3] را از منظر نرخ انتقال حرارت بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که کوچک‌تر بودن اندازه محفظه و کمتر بودن فاصله ماده تغییر فاز دهنده تا سطح خارجی، باعث کاهش مقاومت گرمایی و بهتر شدن نرخ تغییر فاز می‌گردد. هم‌چنین دریافتند که سطح مقطع محفظه بر نرخ تغییر فاز تاثیرگذار است.

در سال ۲۰۰۹، ژانگ و همکاران [۵] یک موتور حرارتی بین لایه‌ای بهبود یافته برای گلایدرهای زیرسطحی توسعه دادند. در سال ۲۰۱۰، یانگ و ما [۶] با انجام آزمون‌هایی، اثرات عمق، ضخامت و شدت گرادیان عمودی دما[4] را بر عملکرد موتور گرمایی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که زمان ذوب و انجماد ماده تغییر فاز دهنده به ضخامت و گرادیان عمودی دما وابسته است و برای فعالیت موتور گرمایی، مقادیر آستانه‌ای برای عمق و ضخامت وجود دارد. در صورتی که مقادیر عمق و ضخامت از مقادیر آستانه کمتر باشد، فعالیت موتور گرمایی با اختلال مواجه می‌شود.

در سال ۲۰۱۶، ژئوسونگ و همکاران [۷] ضمن بیان قوانین بنیادی حاکم بر موتورهای گرمایی مورد استفاده در گلایدرهای زیرسطحی، یک مدل غیرخطی برای رابطه بین فشار سیستم و نرخ تغییر فاز ارائه دادند. هم‌چنین عوامل موثر بر فشار سیستم و انرژی ذخیره شده نظیر انحلال پذیری هوا در PCM و هوای باقیمانده در لوله انتقال حرارت را بررسی کردند. یانگ و همکاران [۸] نیز یک مدل موتور گرمایی بر پایه روش ترمودینامیکی توسعه دادند و عملکرد آن را بررسی کردند. هم‌چنین با استفاده از تکنولوژی پرس ایزواستاتیک، یک موتور گرمایی با ساختار دو لوله‌ای ساختند و برای کاهش وزن، آن را بهینه سازی کردند. سپس با کمک تحلیل مقاومت گرمایی، برای انتقال حرارت سریع‌تر، جنس و ضخامت مخزن ماده تغییر فاز دهنده را تعیین نمودند و این موتور حرارتی را به صورت آزمایشگاهی و میدانی تحت آزمون قرار دادند.

دریای عمان، مسیر عبور به خلیج فارس است و از سوی دیگر، ایران را به آب‌های بین‌المللی متصل می‌کند؛ لذا این منطقه از جنبه‌های اقتصادی و نظامی از اهمیت فراوانی برخوردار است. از این رو، نیاز است که این منطقه به صورت مداوم تحت پایش قرار گیرد. گلایدرهای حرارتی، وسایل مناسبی برای چنین ماموریت‌هایی هستند، چرا که هزینه طراحی و ساخت آن‌ها در مقایسه با سایر وسایل زیرسطحی بدون سرنشین بسیار پایین است. هم‌چنین، مصرف انرژی بسیار پایینی دارند و در نتیجه، مداومت کاری آن‌ها بالاست.

با توجه به گرادیان دمای عمودی مناسب دریای عمان، استفاده از گلایدرهای حرارتی برای پایش مداوم و انجام مطالعات اقیانوس‌شناسی در این منطقه ، مقرون به صرفه است. تنها مشکل پیش روی استفاده از گلایدرها در دریای عمان، عمق پایین این دریا در برخی نواحی می‌باشد؛ به نحوی که عمق برخی قسمت‌های این دریا از عمق عملکردی گلایدرها کمتر است (شکل ۱).



شکل ۱- تغییرات عمق در دریای عمان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.7.5]

در این مقاله پس از بررسی و تشریح سیستم موتور حرارتی، با حل معادلات انتقال حرارت، فرایند تغییر فاز و زمان آن تحلیل می‌گردد. سپس عوامل موثر در کاهش عمق ارزیابی می‌گردد و به منظور کاهش عمق کاربری روشی ارائه می‌گردد تا بتوان قابلیت کاربری گلایدرهای حرارتی را برای عمق‌های کم نیز توسعه داد.

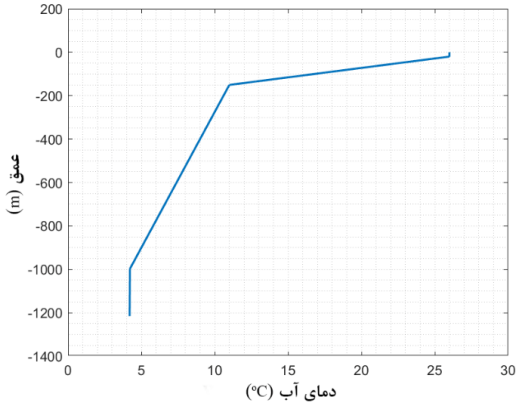
۲- انرژی حرارتی در لایه‌های مختلف آب دریا

انرژی در اقیانوس‌ها به صور مختلف نظیر انرژی جزر و مد، انرژی موج، انرژی جریانات آبی، انرژی گرمایی و ... یافت می‌شود. انرژی گرمایی، به صورت اختلاف دمای بین آب لایه‌های سطحی و عمق دریا نهفته است. در مناطق گرمسیری، استوایی و نیمه استوایی، دمای سطح می‌تواند تا ۲۶ درجه برسد؛ درحالی که در عمق بیش از ۱۰۰۰ متر، دما کمتر از ۴ درجه است [۷و۹]. این اختلاف دما در بیش از ۸۰ درصد از آب‌های اقیانوسی مشاهده می‌گردد [۱۰].

به منظور سهولت استفاده از منحنی تغییرات دما در تحلیل‌ها، این منحنی با رابطه (۱) خطی‌سازی شده است که نمودار حاصل، در شکل ۲ نشان داده شده است.

$$\begin{cases} T = 26℃ & z \le 20m \\ T = 26 - 0.115(z-20)℃ & 20m < z < 150m \\ T = 11 - 0.008(z-150)℃ & 150m < z < 1000m \\ T = 4.2℃ & z \ge 1000m \end{cases} \quad (۱)$$

گلایدرهای حرارتی نظیر اسلوکم/حرارتی که به موتور حرارتی مجهز هستند، می‌توانند از انرژی ناشی از این اختلاف دما برای پیش‌رانش بهره‌برداری کنند که به موجب آن پیمایش و مداومت کاری در آن‌ها، می‌تواند تا ۴ برابر گلایدرهای الکتریکی مشابه افزایش یابد. هم‌چنین، با حذف بسته باتری‌ها، هزینه ساخت کاهش یافته و از سوی دیگر فضای بیشتری برای حمل بار در دسترس قرار می‌گیرد.



شکل ۲- منحنی تغییرات دما در لایه‌های مختلف آب دریا

۳ - ساختار و عملکرد موتورهای حرارتی

به طور معمول، موتورهای حرارتی از تغییر فاز مایع-بخار استفاده می‌کنند، ولی در موتور حرارتی گلایدرها از تغییر فاز سیال-جامد استفاده می‌شود. هدف از این تغییر فاز، ایجاد تغییر حجم و بهره-گیری از تغییر در نیروی بویانسی ناشی از آن است. فرایند تغییر فاز سیال- جامد با بهره‌گیری از تغییرات دمایی لایه‌های مختلف آب انجام می‌شود. برای شناخت بهتر سیستم، حجم کنترلی مطابق شکل ۳ در نظر گرفته می‌شود. این حجم کنترل از یک حجم ثابت (قسمت مستطیلی شکل) و یک حجم متغیر (خارج از مستطیل) تشکیل شده است. فضای درون مستطیل به عنوان حجم ثابت شناور یا حجم درون پوسته سخت و عامل ایجاد بویانسی ثابت به شناور تلقی می‌شود و حجم متغیر خارج از پوسته سخت، عامل تغییر دهنده حجم و نیروی بویانسی است. بنابراین، با تغییر در حجم متغیر، تعادل جرمی-حجمی را می‌توان به بویانسی مثبت و یا بویانسی منفی تبدیل کرد و با کاهش حجم متغیر، بویانسی منفی و افزایش حجم متغیر، بویانسی مثبت ایجاد نمود. در صورتی که جرم شناور ثابت و تغییرات حجم بخش متغیر، ناشی از ورود یا خروج جرم درون بخش حجم ثابت باشد، تغییرات نیروی بویانسی موجب غوص و صعود شناور می-گردد. لذا برای ایجاد چرخه‌های غوص و صعود، حجم متغیر باید به صورت مداوم تغییر کند.

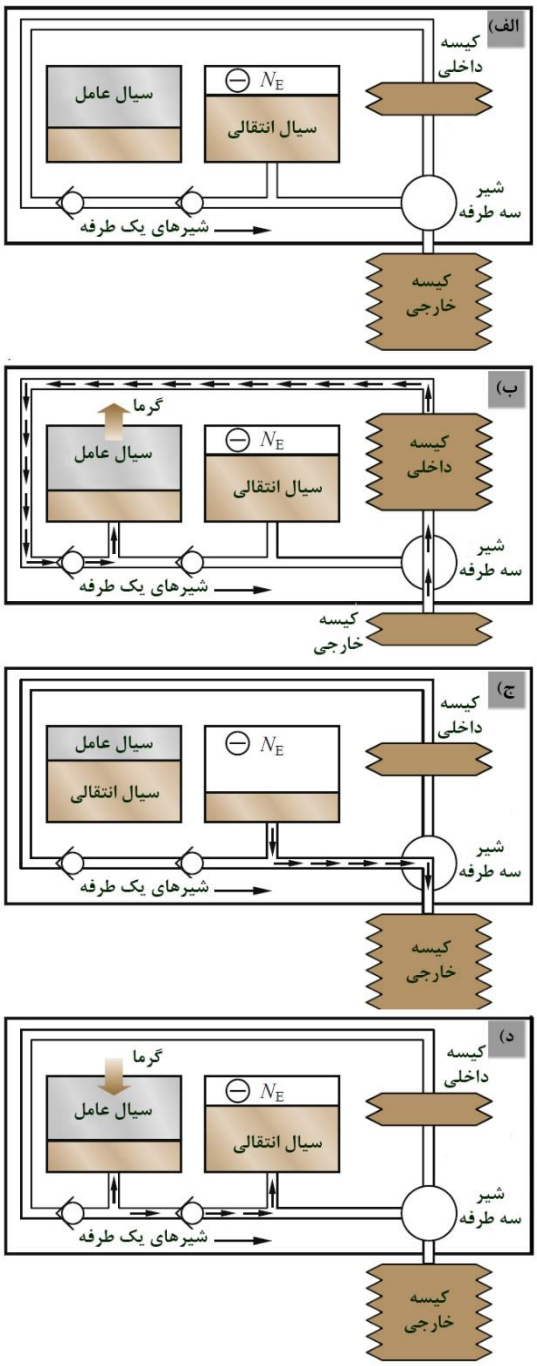
تغییر حجم در کیسه خارجی به کمک یک چرخه ترمودینامیکی ایجاد می‌شود. در بخش محصور در قسمت حجم ثابت، سه محفظه قرار دارد که عبارتند از: محفظه سیال تغییر فاز دهنده (سیال عامل)، محفظه روغن (سیال انتقالی) تحت فشار گاز نیتروژن و کیسه داخلی حاوی روغن. در ابتدا همانند شکل ۳-الف، در صورتی که کیسه خارجی پر باشد، شناور در حالت بویانسی مثبت قرار دارد و روی سطح آب قرار می‌گیرد. این کیسه توسط سیال انتقالی، پر و خالی می‌شود. هدف، تغییر حجم کیسه خارجی با استفاده از تغییرات حجم ماده تغییر فاز دهنده (ناشی از تغییرات دمای لایه‌های آب) است. همانطور که اشاره شد، بر روی سطح، دمای آب حدود ۲۶ درجه سانتی‌گراد است و در زیر سطح به حدود ۴ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. اگر سیال عامل به گونه‌ای انتخاب شود که در این محدوده دمایی تغییر فاز دهد، می‌توان از تغییرات حجم آن برای تغییر حجم کیسه خارجی استفاده کرد.

بر روی سطح، سیال عامل به صورت کامل مذاب است. در شکل ۳-الف، حالت تعادل گرمایی روی سطح آب نشان داده شده است. در این حالت سیال عامل بیشترین فضای محفظه را اشغال نموده است و حجم سیال انتقالی در این محفظه در کمترین مقدار قرار دارد. محفظه سیال عامل باید به گونه‌ای طراحی شود که بیشترین سطح تماس با آب دریا را داشته باشد تا حداکثر تبادل انرژی انجام شود. در صورتی که سیال انتقالی از کیسه خارجی به کیسه داخلی منتقل شود، به دلیل کاهش حجم کل، نیروی بویانسی کاهش می‌یابد و موجب غوص شناور می‌شود. این وضعیت در شکل ۳-ب نمایش داده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.7.5]

حین غوص به دلیل کاهش دما و سرد شدن محفظه حاوی ماده تغییر فاز دهنده، سیال عامل منجمد شده و موجب مکش سیال انتقالی موجود در کیسه داخلی به درون محفظه می‌شود. با رسیدن به عمق و ایجاد ارتباط بین محفظه تحت فشار نیتروژن و کیسه خارجی، سیال تحت فشار نیتروژن به درون کیسه خارجی رانده شده و شناور مجددا آماده صعود می‌گردد (شکل ۳-ج). حین صعود و با گرم شدن محیط اطراف شناور، سیال عامل ذوب می‌شود و افزایش حجم آن موجب می‌گردد که سیال انتقالی از محفظه حاوی سیال عامل به محفظه تحت فشار نیتروژن تخلیه شود. بدین ترتیب، با کامل شدن یک چرخه، شناور آماده غوص مجدد می‌شود (شکل ۳-د).



شکل ۳- حجم کنترلی ثابت و متغییر شناور

به منظور تبادل سیال انتقالی بین محفظه‌ها و کنترل صحیح چرخه، نیاز است که در هر بخش از چرخه غوص و صعود از تجهیزات جانبی مناسب استفاده شود. این تجهیزات شامل سنسور فشار جهت برآورد عمق قرارگیری شناور، شیرهای یک طرفه تاسیساتی، شیر سه راهه با قابلیت فرمان الکتریکی، سیستم تامین انرژی برای فرمان به شیر سه راهه و سیستم پردازش کامپیوتری برای کنترل فرامین است.

نقش شیرهای یک طرفه، جلوگیری از حرکت روغن در مسیرهای ناخواسته است. شیر سه راهه وظیفه ایجاد و قطع ارتباط بین کیسه‌های داخلی، خارجی و محفظه تحت فشار نیتروژن را بر عهده دارد. زمانی که شناور در حالت سطحی قرار دارد، ارتباط بین ۳ محفظه قطع است. برای شروع غوص، شیر به گونه‌ای قرار می‌گیرد که ارتباط بین کیسه‌های داخلی و خارجی برقرار گردد. در زمان تخلیه سیال انتقالی از محفظه تحت فشار نیتروژن به کیسه خارجی، ارتباط این ۲ محفظه برقرار و ارتباط با کیسه داخلی قطع می‌شود. و سرانجام، حین انتقال سیال انتقالی از محفظه تبادل به محفظه تحت فشار نیتروژن، کلیه‌ی ارتباط‌ها توسط شیر سه راهه به طور کامل قطع می‌گردد.

۴- انتخاب شناور مدل و انجام محاسبات اولیه

در این مقاله، از گلایدر اسلوکم/حرارتی به عنوان شناور مدل برای طراحی استفاده شده است. تغییرات حجم این شناور در فرآیند غوص و صعود تقریبا ۵۰۰ cc است. این بدان معناست که تغییرات حجم ماده تغییر فاز دهنده در محدوده دمایی ۴ تا ۲۶ درجه باید به اندازه‌ای باشد که این مقدار از تغییرات بویانسی را تامین نماید.

برای به حداکثر رسیدن کار مکانیکی در گلایدرها، ماده تغییر فاز دهنده باید به گونه‌ای انتخاب شود که بالاترین تغییرات حجمی را دارا باشد. پر کاربردترین PCMها که معمولا در گلایدرهای زیرسطحی مورد استفاده قرار می‌گیرند، ترکیبات هیدروکربنی هستند که با عنوان پارافین شناخته می‌شوند. مهم‌ترین ویژگی ترکیبات هیدروکربنی، تغییرات حجمی بالای آن‌ها است. این مواد غیر سمی، کم هزینه، به لحاظ فیزیکی و شیمیایی پایدار و اغلب در برابر خوردگی مقاوم هستند. به دلیل داشتن ناخالصی، تغییر فاز جامد به مایع و بالعکس در این مواد، در یک بازه دمایی انجام می‌پذیرد. PCM مورد استفاده در این طراحی، هگزادکان است که می‌تواند تغییر حجمی معادل ۱۰ درصد داشته باشد. این ماده در بازه دمایی ۱۶ تا ۱۸ درجه تغییر فاز می‌دهد که برای محدوده دمایی ۴ تا ۲۶ درجه مناسب است [۱۱و۱۲].

با توجه به اینکه جرم حجمی در حالت جامد (ρ_s) برای هگزادکان برابر $۸۶۴ kg.m^{-3}$ و جرم حجمی حالت مایع (ρ_l) برابر $۷۷۳ kg.m^{-3}$ است و میزان تغییر حجم کیسه خارجی، ۵۰۰ cc در نظر گرفته می‌شود، با استفاده از رابطه (۲) می‌توان میزان تغییرات حجم در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.7.5]

واحد جرم ناشی از تغییر فاز و هم‌چنین مقدار ماده هگزادکان مورد نیاز را به دست آورد.

$$\Delta V = \frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_s} = 0.000136261 \quad {}^{m^3}/_{kg} \qquad (۲)$$

با توجه به مقادیر به دست آمده، برای ایجاد تغییر حجم ۵۰۰ cc، ۳/۶۶۹ کیلوگرم یا ۴/۲ لیتر هگزادکان مورد نیاز است.

۵- تعیین هندسه و ابعاد محفظه ماده تغییر فاز دهنده

در شناور مشابه، ماده تغییر فاز دهنده در دو محفظه استوانه‌ای شکل قرار می‌گیرد. ابعاد مخازن به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که بیشترین سطح تماس را با آب دریا داشته باشند تا حداکثر بازدهی در انتقال حرارت و حداقل زمان در تغییر فاز ایجاد شود. در شناور مشابه طول این مخازن ۱/۵ متر در نظر گرفته شده است که بیشترین طول ممکن در این شناور است. درصورتی که ماده تغییر فاز دهنده هگزادکان باشد، قطر داخلی مخزن با استفاده از رابطه (۳) محاسبه و تعیین می‌گردد:

$$\begin{aligned} &\vartheta_{Hexa} = 4.2\ lit = 4.2\ e^{-3}\ m^3 = 2.\pi.\frac{D^2}{4}.l \\ &l = 1.5\ m \\ &\rightarrow D = \sqrt{\frac{4 * 4.2 * e^{-3}}{2 * 3.14 * 1.5}} = 0.042\ m = 42\ mm \end{aligned} \qquad (۳)$$

که در این روابط ϑ حجم مورد نیاز، D قطر مخزن و l طول مخزن است.

۶- تعیین جنس و ضخامت پوسته محفظه تبادل

جنس پوسته محفظه تبادل، نقش مهمی در بازدهی موتور ایفا می‌کند. این پوسته تحت فشار خارجی ناشی از آب دریا در عمق‌های بالا قرار دارد و به علاوه، به دلیل ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده در سطح و نیاز به غلبه بر فشار مخزن نیتروژن برای امکان افزایش حجم ماده تغییر فاز دهنده، تحت فشار داخلی ناشی از افزایش حجم نیز هست. بنابراین، باید از مواد با استحکام بالا ساخته شود. از سوی دیگر، گلایدر زیرآبی به وزن قطعات حساس است. به دلیل نیاز به کاهش وزن، استفاده از مواد با نسبت استحکام به وزن بالا توصیه می‌گردد. با توجه به این موارد، آلیاژ تیتانیوم TA2M برای ساخت این محفظه در نظر گرفته می‌شود. مقاومت به خوردگی این آلیاژ بالاست و ویژگی‌های مکانیکی و متالوژیکی متناسب با کاربرد مورد نظر را دارد. مشخصات آلیاژ TA2M در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مشخصات آلیاژ تیتانیوم TA2M

ضریب رسانش حرارتی [$w/m^{-1}.k^{-1}$]	۱۶۶/۹
مدول الاستیک [MPa]	۶۹۰۰۰
استحکام کششی [MPa]	۲۴۰
تنش مجاز [MPa]	۱۲۰
ضریب پواسون	۰/۳۳

ضخامت دیواره پوسته فلزی و فشار طراحی داخلی، دو پارامتر اساسی موتور گرمایی هستند که در این بخش به منظور کاهش وزن کل موتور گرمایی بهینه می‌شوند. پوسته باید در مقابل فشار خارجی آب دریا و فشار داخلی روغن مقاومت کند. آسیب پوسته در شرایط فشاری مختلف، همواره یکسان نیست. فشار خارجی می‌تواند موجب ناپایداری و کمانش پوسته شود؛ در حالی که شکست، از فشار داخلی بیش از حد ناشی می‌شود. بیشترین عمق غوص موتور گرمایی، ۱۰۰۰ متر بوده که برابر با بیشترین عمق غوص گلایدر زیرسطحی است. در فرایند طراحی، فشار خارجی بحرانی P_{cr}، ۱۵ MPa در نظر گرفته می‌شود که ۱/۵ برابر بیشتر از حداکثر فشار ناشی از غوص است. طبق استاندارد طراحی مخازن تحت فشار، ضخامت پوسته، برابر با بیشترین مقدار بدست آمده از روابط (۴) است [۱۳].

$$\delta = max\left\{\frac{D_i}{\sqrt[3]{\frac{2\,E}{P_{cr}(1-\mu^2)}} - 2}; \frac{P_c D_i}{2|\sigma| - P_c}\right\} \qquad (۴)$$

در این روابط، D_i قطر داخلی، E مدول الاستیک، μ ضریب پواسون، P_{cr} فشار خارجی طراحی، σ تنش مجاز و δ ضخامت جداره هستند. حالت بهینه آن است که ضخامت بدست آمده از این دو رابطه یکسان باشد. یعنی:

$$\frac{1}{\sqrt[3]{\frac{2\,E}{P_{cr}(1-\mu^2)}} - 2} = \frac{P_c}{2|\sigma| - P_c} \qquad (۵)$$

با در نظر گرفتن فرض فوق و $P_{cr} = 15\ MPa$، مقدار فشار داخلی $P_c = 17.7\ MPa$، به دست خواهد آمد. هم‌چنین، ضخامت محفظه معادل ۱/۸ میلی‌متر خواهد بود.

۷- معادلات حاکم

وسیله ذخیره انرژی در گلایدر گرمایی، مخازن استوانه‌ای طویل هستند که به منظور افزایش سرعت انتقال حرارت، خارج از بدنه شناور قرار می‌گیرند و انتقال حرارت در آن‌ها به دلیل قطر کم و طول بلند یک بعدی و در جهت شعاع استوانه لحاظ می‌گردد. مسئله تغییر فاز جامد به مایع با نام مسئله استفان شناخته می‌شود. مسئله یک بعدی نامحدود با خواص گرمایی ثابت، شرایط مرزی و شرایط اولیه ساده را می‌توان با استفاده از حل نیومن حل کرد. برای مسائل

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.7.5]

پیچیده و چند بعدی، حل عددی تقریبا تنها روش ممکن است. معادلات عمومی حاکم برای تغییر فاز و انتقال حرارت شامل معادله پیوستگی (رابطه ۶)، معادله مومنتوم (رابطه ۷) و معادله دما-انرژی (رابطه ۸) است.

$$\nabla.\vec{v} = 0 \qquad (۶)$$

$$\rho\frac{\partial\vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v}.\nabla)\vec{v} = -\nabla p + (\mu\nabla^2\vec{v}) + f \qquad (۷)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \vec{v}.\nabla T = \nabla\left(\frac{k}{\rho}\nabla T\right) + \dot{Q} \qquad (۸)$$

در این روابط H آنتالپی مخصوص، $\vec{v}$ بردار سرعت ماده تغییر فاز دهنده در حالت مایع و ρ چگالی است. تبدیل معادلات بر مبنای فرضیات زیر انجام می‌پذیرد:

۱) PCM همگن و ایزوتروپیک است. ظرفیت ویژه، ضریب رسانش گرمایی و چگالی ثابت و مستقل از دما هستند. این مقادیر برای حالات جامد و مایع از PCM متفاوتند.

۲) PCM به صورت ایده‌آل رفتار می‌کند، لذا پدیده‌ای مانند افت خواص برای آن در نظر گرفته نمی‌شود.

۳) انتقال حرارت در جهت محوری به علت طول زیاد نادیده گرفته می‌شود.

۴) دمای تغییر فاز PCM عدد ثابتی نیست و در یک محدوده تغییر می‌کند.

۵) اثرات همرفتی طبیعی طی فرآیندهای ذوب با اعمال ضریب رسانش موثر در نظر گرفته می‌شود. فرایند انتقال حرارت اساسا با رسانش کنترل می‌شود.

مسئله اصلی، نرخ تغییر فاز و نحوه تغییر حجم حین فرآیند تغییر فاز است. میزان مایع موجود در مخزن در فاز مایع در فرایند تغییر فاز موثر است؛ زیرا موجب انتقال حرارت همرفتی نیز می‌گردد. لذا به جای لحاظ کردن انتقال حرارت همرفتی برای بخشی از ماده که در فاز مایع است، از ضریب رسانش موثر استفاده می‌شود [۱۴و۱۵]. در نتیجه، معادلات حاکم را می‌توان به یک معادله انرژی، ساده سازی کرد:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla.\left(\frac{k_{eff}}{\rho}\nabla T\right) \qquad (۹)$$

که:

$$k_{eff}(t) = 0.288Ra_L(t)^{1/4}[1 - d(t)/D]^{1/4} \qquad (۱۰)$$

در این رابطه، K_{eff} ضریب رسانش موثر، Ra_L عدد رایلی، dt قطر موثر ماده تغییر فاز دهنده ذوب نشده، D قطر داخلی مخزن استوانه‌ای و t زمان است. در حالت کلی، تغییر فاز هگزادکان در یک محدوده دمایی غیر هم‌دما اتفاق می‌افتد. فرآیندهای انجماد و ذوب را می‌توان به دو روش آنتالپی و روش ظرفیت گرمایی موثر مورد بررسی قرار داد. در روش ظرفیت گرمایی موثر، می‌توان با استفاده از ظرفیت گرمایی موثر، اثر گرمای نهان ذوب را در یک بازه دمایی کوچک (محدوده تغییر فاز) تقریب زد [۱۶]. مفهوم این روش ساده است و به راحتی می‌توان آن را پیاده سازی نمود. تغییرات انرژی فقط ناشی از تغییرات دما است، بنابراین، با جایگذاری $\frac{\partial H}{\partial t}$ با $c_{p,eq}\frac{\partial T}{\partial t}$، رابطه (۹) در مختصات استوانه‌ای به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_{p_eq}}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right) \qquad (۱۱)$$

که در آن، $c_{p\text{-}eq}$ گرمای مخصوص معادل است و مقدار آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$c_{p_eq} = \begin{cases} c_{p_s} & T < T_s \\ \dfrac{L}{T_l - T_s} + \dfrac{c_{p_s} - c_{p_l}}{2} & T_s < T < T_l \\ c_{p_l} & T > T_l \end{cases} \qquad (۱۲)$$

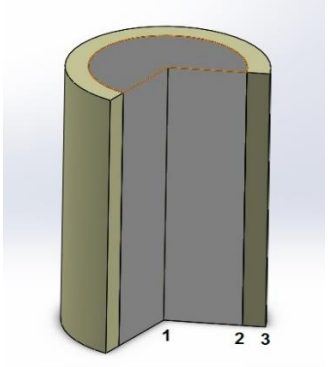
در رابطه (۱۲)، T_s معرف دمای آغاز ذوب یا انجماد است و T_l بیانگر دمایی است که در آن، ماده کاملا ذوب یا منجمد شده است. هم‌چنین، L گرمای نهان ذوب PCM، $c_{p\text{-}s}$ ظرفیت گرمایی حالت جامد و $c_{p\text{-}l}$ ظرفیت گرمایی حالت مایع است. ضریب رسانش معادل نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$k = \begin{cases} k_s & T < T_s \\ k_s + \dfrac{k_l - k_s}{T_l - T_s} & T_s < T < T_l \\ k_{eff} & T > T_l \end{cases} \qquad (۱۳)$$

برای دیواره مخزن، معادله انرژی بدین صورت است:

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{k_w}{\rho_w c_{p_w}}\left(\frac{\partial^2 T_w}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T_w}{\partial r}\right) \qquad (۱۴)$$

گلایدر با سرعت ثابت در آب اقیانوس غوص و صعود می‌کند و انتقال حرارت از آب دریا به محفظه PCM از روش همرفتی انجام می‌شود. سه شرط مرزی بر مسئله حاکم است که در شکل ۴ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۴- شرایط مرزی حاکم بر مسئله

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.7.5]

شرایط مرزی برای جداره را به صورت زیر می‌توان بیان کرد:

$$-k\frac{\partial T(R_t)}{\partial r} = h_c\left[T(R_t) - T_f(t)\right] \qquad (۱۵)$$

در این رابطه T_f دمای سیال، T دما و h_c ضریب همرفتی است. در ابتدا گلایدر در آب گرم سطح اقیانوس در حالت تعادل گرمایی پایدار قرار دارد و دمای اولیه PCM برابر با دمای آب T_0 است. پس شرط اولیه بدین صورت است:

$$T(r,0) = T_0 \qquad (۱۶)$$

شرط مرزی دوم، فصل مشترک ماده تغییر فاز دهنده و مبدل حرارتی است. برای مرز تماس جداره با ماده تغییر فاز دهنده نیز شرایط مشابهی وجود دارد، با این تفاوت که نرخ انتقال حرارت در ماده تغییر فاز دهنده و جداره هر دو از نوع رسانشی در نظر گرفته می‌شود و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$q_1 = q_2 \Rightarrow k_{PCM}\frac{\partial T}{\partial r} = k_w\frac{\partial T}{\partial r} \qquad (۱۷)$$

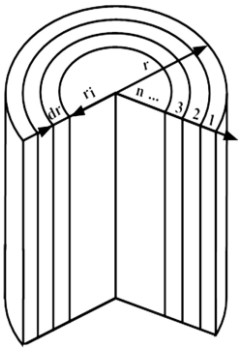
در مرز جداره با PCM شرط دیگری نیز حاکم است. این شرط بیان می‌دارد که دمای جداره با PCM برابر است؛ یعنی:

$$T_{r=R_{in}} = T_{w=R_{in}} \qquad (۱۸)$$

شرط مرزی سوم در مرکز ماده تغییر فاز دهنده قرار دارد:

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial r} = 0 \qquad (۱۹)$$

برای حل مساله از روش گسسته‌سازی صریح تفاضل محدود استفاده شده است. برای حل ابتدا استوانه به n قسمت تقسیم می‌گردد. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، استوانه به n گره در جهت شعاعی تقسیم شده است. در مرز شماره ۱ از روش پسرو برای حل نقطه *i-1* استفاده شده، در مرز شماره ۲ از حل پسرو و پیشرو برای بدست آوردن گره‌ها استفاده شده و در جداره خارجی مخزن، مرزشماره ۳، از روش تفاضل محدود پیشرو برای بدست آوردن دمای گره بعدی استفاده شده است.



شکل ۵- نمایی از تقسیمات گره‌ها در مخزن استوانه‌ای

برای تعیین شکل تفاضل محدود رابطه (۱۱)، برای مشتق اول مکانی $\frac{\partial T}{\partial r}$، می‌توان از تقریب تفاضل پیشرو در ابتدای بازه و از تقریب تفاضل پسرو در انتهای بازه استفاده کرد. برای گره‌های میانی، مشتق اول $\frac{\partial T}{\partial r}$ و دوم $\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}$ از تقریب تفاضل مرکزی بدست می‌آیند. علاوه بر گسسته‌سازی مکانی، مسئله باید بر حسب زمان نیز گسسته شود. برای این منظور، عدد صحیح n را وارد در نظر گرفته می‌شود به صورتی که:

$$t = n.\Delta t \qquad (۲۰)$$

بنابراین تقریب تفاضل محدود برای مشتق زمانی را می‌توان به صورت زیر در معادله جایگزین نمود:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_i = \frac{T^{n+1} - T^n}{\Delta t} \qquad (۲۱)$$

با جایگذاری معادله تفاضل محدود برای مشتق مکانی در معادله گرما، ماهیت حل تفاضل محدود به زمان خاصی که دما به تقریب‌های تفاضل محدود مشتق‌های مکانی در آن محاسبه می‌شوند بستگی پیدا می‌کند. با جایگذاری تقریب تفاضل مکانی در سمت راست معادله، شکل صریح معادله تفاضل محدود برای گره‌ها مشخص می‌شود.

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \frac{k}{\rho c_{p_eq}}\left(\frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta r^2} + \frac{1}{r}\frac{T_{i+1}^n - T_{i-1}^n}{2\Delta r}\right) \qquad (۲۲)$$

که:

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \frac{\alpha\Delta t}{\Delta r^2}(T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) + \Delta t\left(\frac{1}{r}\frac{T_{i+1}^n - T_{i-1}^n}{2\Delta r}\right) \qquad (۲۳)$$

رابطه (۲۳) شکل صریح معادله است، زیرا دماهای مجهول گره‌ها در زمان جدید فقط توسط دماهای معلوم گره‌ها در زمان قبل تعیین می‌شوند.

با کاهش مقادیر Δr و Δt می‌توان دقت حل تفاضل محدود را افزایش داد. البته با کاهش Δt تعداد گره‌هایی که باید بررسی شوند افزایش و با کاهش Δt تعداد بازه‌های زمانی برای نیل به زمان نهایی افزایش می‌یابد. انتخاب Δr برمبنای تعدیلی بین دقت زمان و مدت زمان محاسبه صورت می‌گیرد و با انتخاب آن مقدار Δt را نمی‌توان به طور مستقل انتخاب کرد، بلکه باید با شرایط پایداری تعیین کرد. حل این معادله در صورتی پایدار است که $\frac{\alpha\Delta t}{\Delta r^2} \leq \frac{1}{2}$ باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

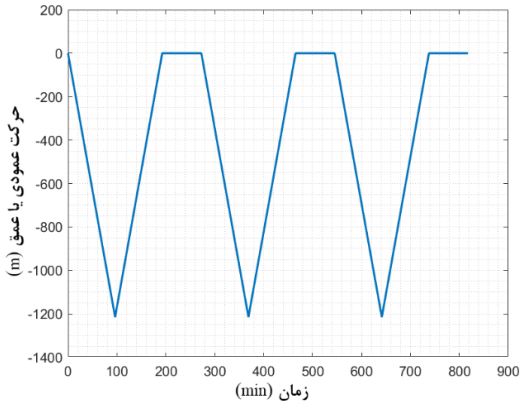
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.7.5]

۸- تحلیل فرآیند گلاید و اعتبارسنجی

گلایدر با سرعت عمودی متوسط ۰/۲۱ m/s غوص و صعود می‌کند. ضریب همرفتی میانگین بین آب دریا و گلایدر برابر ۲۶۰ $W/(m^2.K)$ می‌باشد. در ابتدا بویانسی گلایدر مثبت است و در سطح قرار دارد. در این حالت که تمام ماده تغییر فاز دهنده مایع است، دمای اولیه ماده آن برابر با دمای سطح آب می‌باشد. بعد از غوص کردن گلایدر و رسیدن به عمق بیشینه تمام ماده تغییر فاز داده و منجمد می‌شود. پس از آن گلایدر به سمت سطح حرکت می‌کند و تغییر فاز مجدد اتفاق می‌افتد. در عمق ۹۶ متری، دمای آب برابر با دمای ذوب هگزادکان است، لذا این عمق، مرز فرآیند انجماد و ذوب در نظر گرفته می‌شود.

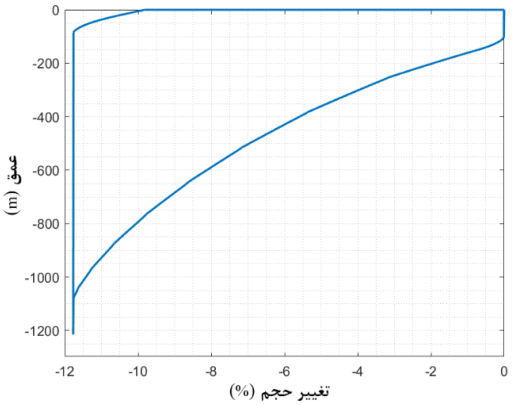
با توجه به روابط حاکم، گسسته سازی ارائه شده، در نظر گرفتن شرایط فوق و با کمک کدنویسی متلب، فرآیند تغییر فاز طی یک چرخه غوص و صعود بررسی می‌گردد. نتایج حاصل در شکل‌های ۶ تا ۹ ارائه شده است.

تغییرات عمق غوطه‌وری با زمان عملکرد در شکل ۶ نشان داده شده است. حداکثر عمق یک سیکل ۱۲۱۵ متر و زمان یک چرخه ۲۸۰ دقیقه در نظر گرفته شده است.

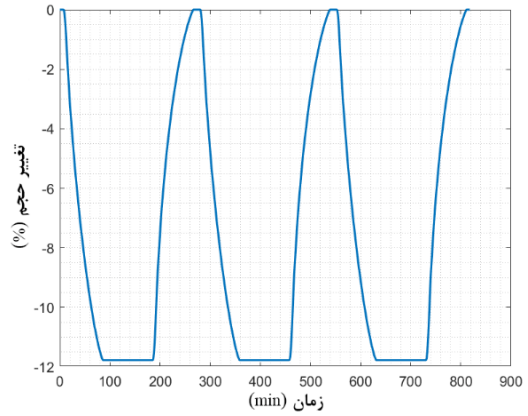


شکل ۶- تغییرات عمق شناور با زمان برای عمق ۱۲۱۵ متری

شکل ۷ و شکل ۸ درصد تغییرات حجم کل طی فرآیند غوص و صعود نسبت به زمان و عمق را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۷ در فرآیند غوص تا عمق ۹۶ متری، تغییر فازی در ماده هگزادکان رخ نمی‌دهد و پس از عبور از عمق ۹۶ متری تغییرات حجمی شروع شده و درصد تغییر حجم از صفر به مقدار حداکثر خود یعنی ۱۱/۸ در عمق ۱۰۷۵ متری می‌رسد. علامت منفی در نمودار معرف کاهش حجم در ماده در اثر انجماد PCM است. سپس این تغییرات تا عمق حداکثر تعریف شده برای تحلیل‌ها معادل ۱۲۱۵ مترثابت می‌ماند. حین صعود، مجددا تا عمق ۹۶ متری هیچ تغییر حجمی ایجاد نمی‌شود. پس از عبور از این عمق، تغییر فاز شروع می‌شود و تغییرات حجمی در جهت افزایش حجم به دلیل ذوب PCM شروع می‌گردد و تا زمانی که کل ماده ذوب شود ادامه می‌یابد. همانطور که در نمودار شکل ۸ ملاحظه می‌شود، میزان تغییرات حجمی و چگالی در ابتدای عبور از مرز ۹۶ متری بسیار سریع است و رفته رفته به صفر نزدیک می‌شود که به دلیل کاهش نرخ انتقال حرارت به مرکز مخزن ماده تغییر فاز دهنده است. در واقع، به دلیل کم بودن رسانش ماده تغییر فاز دهنده، از سرعت انتقال حرارت به لایه های داخلی کاسته می‌شود.



شکل ۷- منحنی درصد تغییر حجم در هگزادکان با عمق در یک چرخه غوص و صعود تا عمق ۱۲۱۵ متری



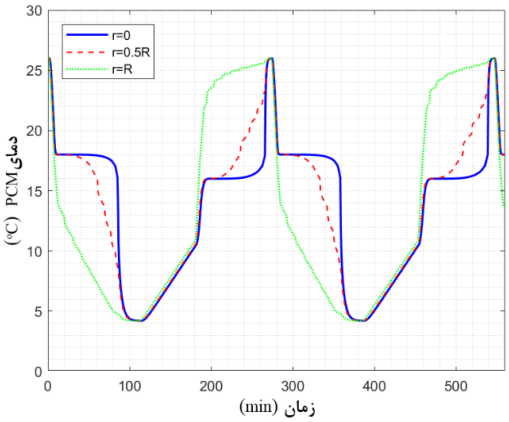
شکل ۸- منحنی درصد تغییر حجم کل ماده هگزادکان با زمان در فرآیند غوص و صعود

شکل ۹ نشان دهنده تغییرات دمای مرکز $r=0$، شعاع $r=0.5R$ و شعاع $r=R$ طی فرایند غوص و صعود است. حین غوص، دمای کل قسمت‌ها با دمای آب کاهش می‌یابد. وقتی که هگزادکان شروع به انجماد می‌کند، مقادیر زیادی حرارت آزاد کرده که موجب تغییرات زیاد دما در شعاع $r=R$ می‌گردد و دمای دو قسمت دیگر به مرور زمان کمتر می‌شود. پس از آن که هگزادکان کاملا منجمد شد، دمای مرکزی به سرعت کاهش می‌یابد. در عمق بیشینه، دمای تمامی قسمت‌های هگزادکان به ۴ درجه رسیده است. حین صعود، تمام هگزادکان جامد باقی می‌ماند. با افزایش دمای آب، دمای مرکزی به تدریج افزایش یافته تا وقتی که شناور به عمق ۹۶ متری می‌رسد که دمای تغییر فاز و شروع ذوب هگزادکان است. هگزادکان مقادیر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.7.5]

زیادی گرمای نهان جذب کرده و دمای مرکزی تقریبا بدون تغییر باقی می‌ماند. پس از آن که هگزادکان کاملا ذوب شد، دمای مرکزی هنوز کمی کمتر از دمای آب سطحی است و پس از زمان استراحت، دمای مرکز نیز به دمای سطحی نزدیک می‌گردد.



شکل ۹- تغیرات دمای هگزادکان با زمان در سه شعاع مختلف از محفظه حین فرآیند غوص و صعود

مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از تحلیل انجام شده توسط کونگ و همکاران [۱۷]، بیانگر تطبیق مناسب نتایج است. لذا می‌توان اعتبار کد نوشته شده را تایید کرد.

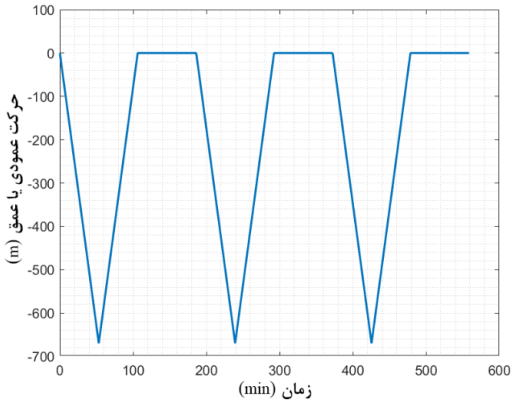
۹- کاهش عمق عملکردی

گلایدر طراحی شده، دارای عمق عملکردی ۱۰۷۵ متر است که این عمق، کاربری این گلایدر را برای بخش‌هایی از دریای عمان محدود می‌کند. هدف این مقاله، کاهش عمق کاربری و مناسب سازی این گلایدر برای بخش‌های وسیع‌تری از دریای عمان است. برای تحقق این امر، بهینه‌سازی فرآیند گلاید و استفاده از سه محفظه PCM بررسی می‌گردد.

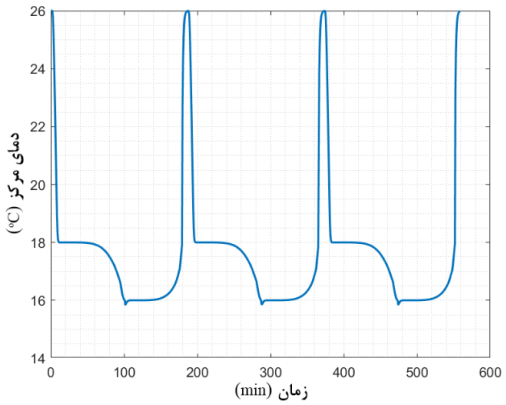
۹-۱- بهینه‌سازی فرآیند گلاید

در تحلیل‌های ارائه شده، عمق بیشینه برای گلایدر ۱۲۱۵ متر در نظر گرفته شد. تحلیل‌ها نشان داد که در عمق ۱۰۷۵ متری، انجماد کامل اتفاق می‌افتد. هدف از این بخش، بهینه سازی فرآیند غوص و صعود و کاهش عمق بیشینه است.

بر اساس نمودار ارائه شده در شکل ۲، دما در عمق ۹۶ متر، دمای تغییر فاز ماده هگزادکان است که عمق گذار نامیده می‌شود و با افزایش عمق دما کاهش می‌یابد. در فرآیند غوص، پس از عبور از عمق گذار، فرایند انجماد هگزادکان شروع می‌شود. این فرایند حین صعود تا قبل از رسیدن به عمق گذار نیز قابل حصول است زیرا دما هنوز کمتر از دمای تغییر فاز است. لذا بخشی از فرایند انجماد برای تامین تغییر حجم مورد نیاز می‌تواند حین صعود انجام شود. با کاستن عمق بیشینه، بخشی از هگزادکان هنوز مذاب است ولی با شروع صعود، تا قبل از عمق گذار، انجماد هگزادکان ادامه خواهد داشت. در نتیجه، عمق یک چرخه کامل کاهش می‌یابد. با استفاده از سعی و خطا و اعمال عمق‌های مختلف در تحلیل‌های انجام شده، حداقل عمق برای انجماد کامل تا قبل از عمق گذار حدودا ۶۸۰ متر به دست می‌آید. شکل ۱۰ تغییر عمق نسبت به زمان را برای عمق بیشینه ۶۸۰ متر نشان می‌دهد. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که طی این فرآیند غوص و صعود، دما در مرکز به مقدار مورد نیاز برای تغییر فاز یعنی ۱۶ درجه سانتی‌گراد رسیده است. هم‌چنین، در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که در عمق بیشینه، میزان تغییرات حجم نزدیک به ۹ درصد است؛ اما با وجود تغییر روند فرآیند گلاید و صعود وسیله، افزایش تغییرات حجمی تا قبل از عمق گذار ادامه می‌یابد و در این عمق به میزان مورد نیاز می‌رسد. در این عمق، دمای محیط به محدوده دمای تغییر فاز رسیده و PCM با دریافت حرارت محیط شروع به ذوب شدن و انبساط می‌کند.



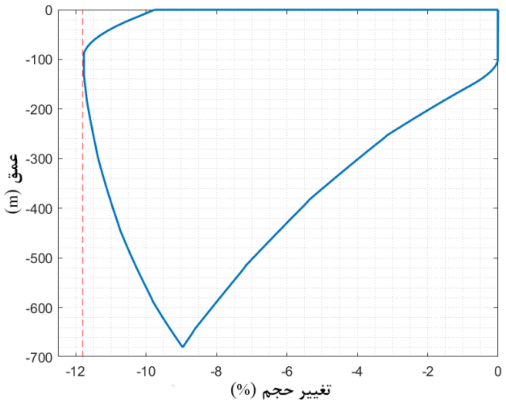
شکل ۱۰- تغییرات عمق شناور با زمان برای عمق ۶۸۰ متری



شکل ۱۱-تغیرات دمای هگزادکان با زمان در مرکز محفظه حین فرآیند غوص و صعود تا عمق ۶۸۰ متری

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.7.5]



شکل ۱۲- منحنی درصد تغییر حجم در هگزادکان با عمق در یک چرخه غوص و صعود تا عمق ۶۸۰ متری

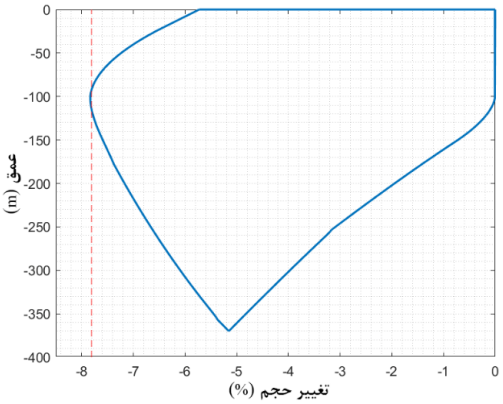
۹-۲- استفاده از سه محفظه همراه با فرایند گلاید بهینه

در شناور مورد بررسی از دو مخزن به عنوان مخزن ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده است. نرخ انتقال حرارت در قسمت‌های داخلی محفظه‌ها کاهش می‌یابد؛ چراکه ماده تغییر فاز دهنده تا حدی به عنوان عایق عمل می‌کند. در نتیجه، نرخ تغییرات حجم در شعاع‌های داخلی کاهش می‌یابد. با افزودن یک محفظه حاوی PCM دیگر، نیاز نیست تا تغییر فاز تا لایه مرکزی مخازن ادامه یابد و کافی است تا بخشی از حجم که در لایه‌های خارجی قرار دارد و سرعت انتقال حرارت نیز در آن‌ها بیشتر است تغییر فاز دهد. لذا می‌توان درصد تغییرات حجمی مورد نیاز (۱۱/۸) را سریع‌تر و در عمق‌های کمتر تامین کرد. حجم ماده تغییر فاز دهنده در لایه‌های خارجی در حالت سه مخزن، مساوی با حجم کل ماده مشابه در حالت دو مخزن است، لذا شعاع داخلی ماده درون مخازن در حالت ۳ مخزن به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} v_1 &= 2\pi {r_o}^2 l \\ v_2 &= 3(\pi {r_o}^2 l - \pi {r_i}^2 l) \\ v_1 = v_2 &\rightarrow r_i = \frac{\sqrt{3}}{3} r_o \end{aligned} \qquad (۲۴)$$

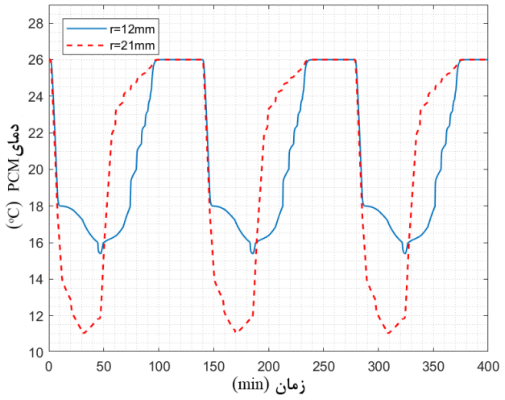
که v_1 مقدار حجم با دو محفظه، v_2 مقدار حجم با سه محفظه، r_0 شعاع خارجی ماده تغییر فاز دهنده (معادل شعاع داخلی مخزن) و r_i بیانگر شعاعی است که اگر تا آن شعاع تغییر فاز انجام گیرد، تغییرات حجمی مورد نیاز حاصل می‌شود.

با توجه به شعاع داخلی ۲۱ میلی‌متری مخازن، در حالت استفاده از ۳ مخزن کافی است از شعاع خارجی تا شعاع ۱۲/۱۲ میلی‌متری، دما از ۱۶ درجه سانتی‌گراد کمتر شود. این محدوده ۷/۸۱ درصد از حجم کل در حالت دو مخزن را تشکیل می‌دهد که این مقدار با توجه به نمودار شکل ۷ در عمق ۵۵۰ متری قابل حصول است. با توجه به اینکه ۷/۸۱ برای دو مخزن معادل دو سوم همین حجم برای سه مخزن است، لذا در حالت سه مخزن بدون بهینه سازی فرایند گلاید تغییر حجم ۱۱/۸ درصدی در عمق ۵۵۰ متری قابل دستیابی است. همانند قبل با سعی و خطا در تغییر عمق، حداقل عمق ممکن که در آن، حین صعود و قبل از رسیدن به عمق گذار، بتوان فرایند انجماد را ادامه داد و مواد در حجم مورد نظر در لایه‌های خارجی مخازن به حالت جامد درآیند، ۳۷۰ متر بدست می‌آید. نمودار درصد تغییرات حجم با عمق در شکل ۱۳ برای این عمق نشان داده شده است.



شکل ۱۳- منحنی نرخ تغییر حجم در هگزادکان با عمق در یک چرخه غوص و صعود تا عمق ۳۷۰ متری

شکل ۱۴، نمودار تغییرات دما در شعاع داخلی مخزن و حداقل شعاع مورد نظر برای تغییر فاز، شعاع ۱۲ میلی‌متری از مرکز مخزن را نشان می‌دهد. در این شکل ملاحظه می‌شود که دما در شعاع ۱۲ میلی‌متر از ۱۶ درجه کمتر شده است. لذا می‌توان در عمق ۳۷۰ متری به تغییر فاز کامل دست یافت.



شکل ۱۴- تغیرات دمای هگزادکان با زمان در شعاع‌های مختلف حین فرآیند غوص و صعود تا عمق ۳۷۰ متری

۱۰- بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش، ضمن معرفی گلایدرهای دریایی و سیستم پیشران آن‌ها، نقش کلیدی این وسایل در تحقیقات اقیانوسی و سایر ماموریت‌های دریایی بیان شد. اهمیت این وسایل در قابلیت ماندگاری و پیمایش آن‌ها در اقیانوس است و با بهره‌گیری از انرژی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.7.5]

حرارتی اقیانوس که نوعی انرژی تجدیدپذیر است، می‌توان مقدار آن را به طور چشم‌گیری افزایش داد. پس از معرفی اهمیت موتور حرارتی در بهبود زمان ماموریت گلایدرها، ساختار موتور حرارتی و نحوه عملکرد موتور حرارتی یک گلایدر موجود و زیر سیستم‌های آن بیان شد. هم‌چنین وظیفه بخش‌های مختلف حین فرآیندهای گلاید ارزیابی شد. سپس، با انتخاب یک شناور مشابه، اجزای مورد نیاز در پیاده‌سازی سیستم آن مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحلیل‌ها شناور اسلوکم به عنوان شناور مشابه انتخاب شد. با استفاده از اطلاعات موجود از این شناور و با استفاده از اطلاعات فیزیکی حاکم بر مسئله، تحلیل‌های انتقال حرارت با فرضیات ساده شونده بر محفظه حاوی ماده تغییر فاز دهنده انجام شد و زمان غوص و صعود نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. هم‌چنین، روشی برای کاهش عمق غوص شناور به منظور افزایش قابلیت کاربرد آن در مناطق با عمق کمتر پیشنهاد گردید. در ادامه، نتایج تحلیل‌های ارائه شده بیان می‌گردد:

- با استفاده از دو مخزن، بدون بهینه‌سازی در فرآیند گلاید، شناور باید تا عمق ۱۰۷۵ متر غوص کند تا فرایند تغییر فاز انجام گیرد و با بهینه‌سازی، به کمک نتایج بدست آمده از تحلیل‌های انتقال حرارت، می‌توان عمق غوص را به ۶۸۰ متر کاهش داد.
- با استفاده از سه مخزن برای ماده تغییر فاز دهنده و در نظر گرفتن دمای تغییر فاز ۱۶ درجه (تبدیل مایع به جامد) بدون استفاده از فرایند گلاید بهینه حداکثر عمق را می‌توان به حدود ۵۵۰ متر کاهش داد.
- با استفاده از سه مخزن برای ماده تغییر فاز دهنده و در نظر گرفتن دمای تغییر فاز ۱۶ درجه (تبدیل مایع به جامد) و امکان جمود ماده تغییر فاز دهنده در مسیر صعود قبل از رسیدن به عمق گذار، عمق غوص را می‌توان به حدود ۳۷۰ متر کاهش داد.

کلیدواژگان

1- Webb Research Corporation
2- SLOCUM/Thermal
3- Phase Change Material (PCM)
4- Thermocline

مراجع

1- D C Webb, P J Simonetti and C P Jones, (2001), *SLOCUM: an underwater glider propelled by environmental energy*, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.26, p.447–452.

2- C C Eriksen, Osse T J and Light R D, (2001), *Seaglider: A long range autonomous underwater vehicle for oceanographic research*, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.26, p.424-436.

3- Wang SX, Wang YH, Zhang DT, He ML, Zhu GW, Ren W, (2006), *Design and trial on an underwater glider propelled by thermal engine*", Ocean Technology; Vol.25(1), p.1–5 [in Chinese].

4- Kong Q, Ma J, Xia D, (2007), *Phase change analysis of an underwater glider propelled by the ocean's thermal energy*, J Mar Sci Appl; Vol6:p.37-43.

5- Zhang H, Wang Y, Zheng-Guang L, (2009), *Application and improvement of the interlayer thermal engine powered by ocean thermal energy in an underwater glider*, Power and energy engineering conference (APPEEC), Asia-Pacific, p.1-4.

6- Yang H, Ma J, (2010), *Experimental study of effects of thermocline on the performance of underwater glider's thermal engine*, Power and energy engineering conference (APPEEC), p.1–4.

7- Ma Z, Wang Y, Wang S, Yang Y, (2016), *Ocean thermal energy harvesting with phase change material for underwater glider*, Appl Energy; Vol.178, p.557–66.

8- Yang Y, Wang Y, Ma, Z, Wang S, (2016), *A thermal engine for underwater glider driven by ocean thermal energy*, Appl. Therm. Eng; Vol.99, p.455–464.

9- Bedard R, Jacobson PT, Previsic M, Musial W, Varley R, (2010), *An overview of ocean renewable energy technologies*, Oceanography; Vol.23, p.22-31.

10- SA Jenkins, G D'Spain, (2016), *Autonomous underwater Gliders*, Springer Handbook of Ocean Engineering, Springer, p.301-321.

11- I Dinçer, M Rosen, (2010), *Thermal energy storage systems and applications*, Wiley Publications, 2ed eddition.

12- P Zoller, D Walsh, (1995), *Standard pressure-volume-temperature data for polymers*, Lancaster Pennsylvania USA.

13- China National Standardization Committee on Pressure Vessels, GB/T150-2010, *Stationary Pressure Vessels*, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Beijing.

14- Ismail KA, Abugderah MM, (2000), *Performance of a thermal storage system of the vertical tube type*, Energy Conversion & Management; Vol.41, p.1165–90.

15- Hirata T, Nishida K, (1989), *An analysis of heat transfer using equivalent thermal conductivity of liquid phase during melting inside and isothermally heated horizontal cylinder*, International Journal of Heat and Mass Transfer; Vol.32(9), p.1663–70.

16- Piia L, Reijo L, Anna-Maria H, (2004), *Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage*, International Journal of Thermal Sciences; Vol.43, p.277–87.

17- Kong Q, Ma J, Xia D, (2010), *Numerical and experimental study of the phase change process for underwater glider propelled by ocean thermal energy*, Renew Energy, p.35:771.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.7.5]