مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها/ سال ۱۴۰۳/ دوره ۱۴/ شماره ۲/ صفحه ۱۵-۲۹

نشریه مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها

DOI: 10.22044/JSFM.2024.13540.3787

طراحی شناور سطحی هیبریدی مبتنی بر پیل سوختی

محی‌الدین گنجیان[۱]، محمدعلی علیرضاپوری[۲] و حسین باقریان فرح‌آبادی[۲،*]

[۱] دکتری مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

[۲] استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده علوم و فناوری شمال، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۶

چکیده

با توجه به چالش‌های مرتبط با سطح آلایندگی و محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی، طراحی، ساخت و بهره‌برداری از شناورهای سطحی تمام‌برقی با تکیه بر انرژی‌های پاک در حال توسعه است. از طرف دیگر، با عنایت به ویژگی‌های برجسته سوخت هیدروژن و امکان نیل به سطح آلایندگی صفر در فرآیند تولید آن، در سال‌های اخیر، هیدروژن به عنوان سوخت اصلی آینده، مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. رشد استفاده از هیدروژن در صنعت حمل و نقل الکتریکی نیز قابل توجه بوده‌است و در صنعت شناورهای سطحی نیز، استفاده از سوخت هیدروژن و توسعه فناوری پیل سوختی توسعه قابل ملاحظه‌ای یافته است. در این مقاله روند طراحی مفهومی شناور سطحی تمام‌برقی هیبریدی مجهز به پیل سوختی، پیشنهاد شده‌است. در روند طراحی پیشنهادی، به منظور ایجاد یک رویکرد جامع‌نگرانه و سیستماتیک، با بررسی فازهای پروژه‌های معتبر بین‌المللی در حوزه طراحی، ساخت و بهره‌برداری شناورهای سطحی مبتنی بر پیل سوختی، یک فلوچارت طراحی مفهومی ارائه شده‌است. با استفاده از این فلوچارت و با در اختیار داشتن پارامترهای ورودی شناور سطحی مانند ظرفیت توان، انرژی مورد نیاز در هر سفر، نرخ تغییرات توان بارهای مصرفی، ابعاد شناور، ظرفیت مخازن سوخت، فضای در دسترس، و فناوری‌های در دسترس شامل ماژول‌های پیل سوختی و نحوه ذخیره‌سازی و تأمین هیدروژن، می‌توان طراحی پایه سیستم قدرت شناورهای سطحی تمام برقی هیبریدی مبتنی بر پیل سوختی را انجام داد.

کلمات کلیدی: پیل سوختی؛ شناور سطحی تمام برقی؛ هیدروژن؛ فلوچارت طراحی.

Fuel Cell-Based Hybrid Ship Design

Mohiedin Ganjian[1], Mohammad Ali Alirezapouri[2], Hossein Bagherian Farahabadi[2,*]

[1] Ph.D., Department of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

[2] Assis. Prof., Northern Research Center for Science & Technology, Malek Ashtar University of Technology, Iran

Abstract

Considering the challenges related to the level of pollution and the limitation of fossil fuel resources, the design, construction and operation of all-electric ships with on clean energy resources is being developed. On the other hand, due to the prominent features of hydrogen and the possibility of achieving a zero-pollution hydrogen production, , in recent years, hydrogen has received much attention as the main fuel of the future. The growth of the hydrogen usage in the electric transportation industry has also been significant, and in the ships' industry, the use of hydrogen fuel and the development of fuel cell technology have been significantly developed. In this paper, a conceptual design process of an all-electric fuel cell ship is proposed.To create a comprehensive and systematic approach in the proposed design process, by investigating the phases of internationally recognized projects in the field of design, construction and operation of fuel cell ships, a conceptual design flowchart has been presented. By using this flowchart and having the ship's input parameters such as power capacity, energy required for each trip, load change rates, ship's dimensions, fuel tank capacity, available space, and available technologies including fuel cell modules and hydrogen supplyment and storage methods, it is possible to design the basic power system of all-electric hybrid ship based on fuel cell.

Keywords: Fuel Cell; All-Electric Ship; Hydrogen; Design Flowchart.

* نویسنده مسئول؛ حسین باقریان فرح آبادی، تلفن: ۰۱۱۳۵۶۷۱۶۰۱، فکس: ۰۱۱۳۵۶۷۱۶۱۸

آدرس پست الکترونیک: bagherian@mut.ac.ir

۱- مقدمه

بشر برای دستیابی به رفاه بیشتر و قدرت بالاتر، همواره به دنبال یافتن ظرفیت‌هایی است که قدرت و تسلط خود را تضمین نماید. از این رو با بکارگیری ابزارآلات و تکنولوژی‌های جدید و به‌روز، سعی دارد تا این خواسته ذاتی خود را محقق نماید. شناورهای سطحی به عنوان یکی از پرکاربردترین و راهبردی‌ترین پتانسیل‌هامحسوب می‌شود که کشورهای مختلف با توسعه، بروز رسانی و پیاده‌سازی فناورهای نسل آینده، برای کسب برتری منطقه‌ای و جهانی، در این حوزه تلاش می‌کنند. از این رو، تحقیق، توسعه و پیاده‌سازی شناورهای نسل آینده که شناورهای تمام برقی هستند، باید در مرکز توجه تمامی افراد و دکترین دفاعی آتی کشور باشد.

شناورهای سطحی عموماً شناورهایی با سیستم قدرت پیچیده و متراکم، و با موتورهای توان‌بالا و با فناوری‌های پیشرفته هستند. این نوع شناورها به سنسورها، تجهیزات و سیستم مخابراتی پیچیده مجهز می‌شوند و نیازمند داشتن یک سیستم قدرت یکپارچه با قابلیت اطمینان بالا و با ویژگی افزونگی هستند.

از دید مالکان و بهره‌برداران شناورهای سطحی، هزینه سوخت یک نگرانی بزرگ است، چرا که اکثر شناورهای سطحی هنوز هم از سوخت دیزل و دیزل‌ژنراتور به‌عنوان منبع اصلی تولید توان بهره می‌گیرند. بازدهی انرژی دیزل‌ژنراتور نسبت به تغییرات بار، مشخصه غیرخطی دارد که در بار کامل به مقدار بیشینه خود می‌رسد. در سطح بار کم، بازدهی مجموعه دیزل-ژنراتور کاهش می‌یابد، که جهت رفع این مشکل می‌توان بعضی از دیزل‌ژنراتورها را خاموش نمود که در این صورت باید هزینه خاموشی و راه‌اندازی مجدد درنظر گرفته شود. این روش در زمانی که تغییرات بار منجر به برهم خوردن تعادل بین تولید و مصرف می‌شود، سبب تضعیف کیفیت توان و قابلیت اطمینان سیستم می‌گردد. یک راه‌حل مؤثر، جایگزینی سوخت آن‌ها با سوخت هیدروژن و توسعه فناوری پاک پیل سوختی است.

تمامی طراحان شناورهای تمام برقی نسل آینده، برای رعایت الزامات انتشار آلایندگی اعلان‌شده از سوی سازمان بین‌المللی کشتیرانی[1] بر بکارگیری منابع انرژی‌های پاک تأکید دارند. از مهم‌ترین این منابع می‌توان به پیل سوختی با سوخت پاک هیدروژن اشاره نمود. استفاده از انرژی هیدروژن در حوزه‌های متنوع حمل و نقل، خصوصا خودروهای الکتریکی مجهز به پیل سوختی، در سال‌های اخیر توسعه قابل ملاحظه‌ای داشته است و ادامه این روند افزایشی، تا حدود زیادی وابسته به روند کاهشی هزینه تولید هیدروژن از منابع انرژی تجدیدپذیر است [۱]. انواع روش‌های تولید هیدروژن از منابع انرژی تجدیدپذیر در ارائه شده است [۲]. شناورهای سطحی نیز در روند توسعه بکارگیری انرژی هیدروژن و پیل سوختی مستثنی نیستند. تمایل به طراحی و بکارگیری شناورهای تمام‌برقی مبتنی بر پیل سوختی در کشورهای توسعه‌یافته در حال افزایش است که این مهم در تعدد پروژهای تحقیقاتی تعریف شده، قابل مشاهده است.

هرچند بکارگیری پیل سوختی به عنوان یک مبدل الکتروشیمیایی انرژی جهت تأمین انرژی الکتریکی، قدمت زیادی دارد، اما سابقه کاربرد پیل سوختی در شناورهای سطحی کمتر از ۵۰ سال است. یکی از اولین انگیزه‌ها در توسعه و طراحی پیل سوختی در شناورهای سطحی، الزام سازمان بین المللی کشتیرانی به رعایت میزان انتشار آلایندگی است [۳]. از این رو، پیل سوختی به عنوان یکی از محبوب‌ترین گزینه‌ها در حل این قید زیست‌محیطی مورد توجه قرار گرفته است. قید محدودیت انتشار آلایندگی، سبب ایجاد انگیزه جهت طراحی شناورهای برقی مبتنی بر پیل سوختی شده است.

در این مقاله یک روند طراحی مفهومی شناور سطحی تمام‌الکتریکی هیبریدی مبتنی بر پیل سوختی پلیمری پیشنهاد شده است. کلیه فاکتورهای طراحی سامانه انرژی هیبریدی مبتنی بر پیل سوختی پلیمری، با کاربری در شناورهای سطحی، با رعایت توالی و در قالب یک فلوچارت کاربردی در این مقاله ارائه شده است. همچنین، مطالعه یک نمونه موردی طراحی مفهومی شناور سطحی پیل سوختی، با هدف نمایش جنبه‌های کاربردی روند طراحی پیشنهادی، در این مقاله انجام و نتایج آن تحلیل شده است. موضوع این مقاله، به عنوان یک حوزه موضوعی جدید در زمینه کاربرد فناوری پیل سوختی در شناورهای سطحی در داخل کشور، لحاظ می‌شود.

[1] International Maritime Organization (IMO)

۲- مرور سابقه کاربرد پیل سوختی در کاربری‌های دریایی

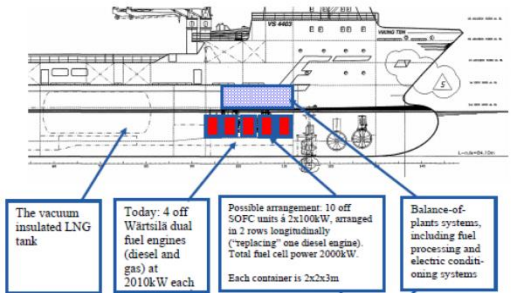
اولین استفاده از پیل سوختی در سیستم پیشران مستقل از هوا در زیردریایی U1 کلاس ۲۰۵ کشور آلمان در سال ۱۹۸۰ بود که در آن از پیل سوختی آلکالاین استفاده شد [۴،۵]. سیستم مورد نظر شامل ۱۶ ماژول به ظرفیت ۶/۲ کیلووات است که به‌صورت سری به هم متصل می‌شوند. بعدها، پیل سوختی پلیمری[1] با ظرفیت ۳۴ کیلووات در زیردریایی کلاس ۲۱۲ مورد استفاده قرار گرفت [۶]. زیردریایی کلاس U31 در سال ۲۰۰۵ با یک پیل سوختی پلیمری با ظرفیت ۱۲۰ کیلووات به آب انداخته شد [۷].

در سال ۲۰۰۹، یک سیستم ترکیبی از پیل سوختی ۳۳۰ کیلوواتی و باتری ۴۵۰ کیلووات ساعتی بر روی کشتی Viking lady به‌منظور تأمین برق سیستم پیشران نصب شد. این شناور سطحی، در حقیقت اولین شناور سطحی مبتنی بر پیل سوختی در جهان است. با بکارگیری این سیستم، تا ۳۰ درصد در مصرف سوخت صرفه‌جویی شد [۸]. در مورد پروژه مربوط به این شناور سطحی در ادامه توضیحات کامل‌تری ارائه خواهد شد. البته در این میان، شناورهای سطحی تمام‌برقی مبتنی بر باتری نیز توسعه داده شدند. در سال ۲۰۱۵، یک کشتی مسافربری تمام‌برقی در نروژ به آب انداخته شد. این کشتی با یک بانک باتری یک مگاواتی تجهیز گردید که قادر به حمل ۱۲۰ خودرو و ۳۶۰ مسافر در یک سفر نیم‌ساعته است [۹].

پیل سوختی PEM در زیردریایی HDW کشور آلمان به‌عنوان منبع تولید توان الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته است. این فناوری از شرکت زیمنس شامل ۹ واحد PEM با ظرفیت ۳۰ و ۴۰ کیلووات برای تأمین برق سیستم پیشران بود. اولین کاربرد پیل سوختی در شناورهای مسافربری، به‌عنوان تأمین برق سیستم پیشران در شناور Alsterwasser استفاده شد. مهم‌ترین چالش در توسعه پیل‌های سوختی در شناورهای سطحی، ذخیره‌سازی هیدروژن و توزیع آن است. یکی از راه‌حل‌ها، استفاده از منابع با ترکیبات هیدروژن است که در گاز طبیعی مایع (LNG) و یا سوخت دیزل یافت می‌شود [۱۰]. نکته قابل‌توجه این است که استفاده از این سوخت‌ها تنها در پیل‌های سوختی اکسید جامد[2] و کربن مذاب[3] امکان‌پذیر است [۱۱].

پروژه تحقیق و توسعه دیگری تحت عنوان پیل سوختی برای شناورهای با آلایندگی کم (FellowSHIP) با همکاری شرکت‌های صنعتی مانند Det Norske Veritas، Wartsila و Eidesvik Offshore انجام شده است. شورای تحقیق نروژ تأمین مالی این پروژه را انجام داده است. در این پروژه یک پیل سوختی ۳۳۰ کیلووات بر روی کشتی Viking Lady نصب گردید. این کشتی در سال ۲۰۰۹ در بندر کپنهاگ به‌منظور تعویض سیستم قدیمی با پیل سوختی پهلو گرفت. شناور سطحی با دو نوع منبع توان پیل سوختی با سوخت گاز طبیعی مایع و دیزل‌ژنراتور تجهیز گردید. چهار موتور دیزلی از شرکت Wartsila به همراه چهار ژنراتور جهت تأمین برق سیستم پیشران و مصارف داخلی، در این کشتی نصب شد. هم‌چنین پیل سوختی کربن مذاب با توان ۳۲۰ کیلووات با دمای کاری ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد در این شناور نصب گردید. ترکیب استفاده از موتور دیزلی و پیل سوختی نه‌تنها سبب کاهش آلاینده‌ها شد، بلکه سبب افزایش بازده کل سیستم به ۵۲/۱ درصد گردید. ساختار شبکه الکتریکی در این پروژه در شکل ۱ آورده شده است [۱۲].

در [۱۳] به مدل‌سازی هم‌زمان حرارتی و الکتریکی سیستم ترکیبی پیل سوختی-توربین گاز در شناورهای تمام برقی آینده پرداخته‌شده است. این پروژه بر روی بستر مجازی در دانشگاه کارولینای جنوبی پیاده‌سازی شد. شماتیک سیستم ترکیبی مورد مطالعه در شکل ۲ آورده شده است.

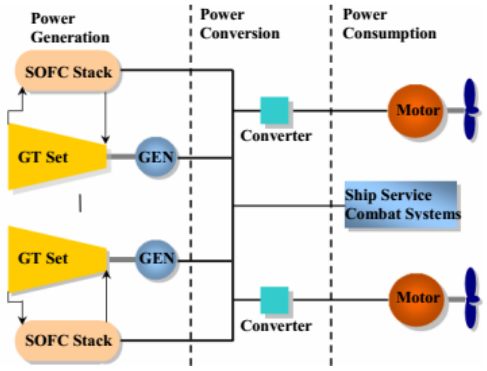


شکل ۱- سیستم قدرت یکپارچه شناور سطحی Viking Lady [۱۲]

[1] Polymer Electrolyte Membrane (PEM)
[2] Solid-Oxide Fuel Cell (SOFC)
[3] Molten-Carbonate Fuel Cell (MCFC)

از بین انواع مختلف پیل سوختی، پیل سوختی PEM به دلایل چگالی توان بالا، سادگی سیستم و بلوغ فناوری از محبوبیت بیشتری برخوردار است. هرچند پیل سوختی کربن مذاب دارای بازدهی بالاتر، عدم نیاز به کاتالیزور، دمای کاری بهینه متناسب با عملکرد ریفرمر داخلی و امکان استفاده از سوخت هیدروکربن دار بجای هیدروژن خالص است.

لیستی از پروژه‌های انجام شده در حوزه طراحی، ساخت و بهره‌برداری از شناورهای سطحی تمام‌الکتریکی مبتنی بر پیل سوختی، در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۲- شماتیک مفهومی سیستم قدرت یکپارچه [۱۳]

جدول ۱ - مشخصات مهم‌ترین پروژه‌های شناورهای سطحی مبتنی بر پیل سوختی

ردیف	نام شناور	کشور	سرعت نات	نوع شناور	ابعاد (m)	نوع پیل سوختی	توان پیل (kW)	درصد توان پیل به کل	محل مصرف	محرک اصلی	سال	زمان ماندگاری در آب	نوع سوخت	فشار منبع (بار)	مرجع
۱	Alsterwasser	آلمان	۸	مسافری ۱۰۰ نفره	۲۵*۵	PEMFC	۲*۴۸	۱۰۰	سیستم پیشران	پیل سوختی	۲۰۰۹	۲-۳ روز	هیدروژن	۳۵۰	[۱۴]
۲	Nemo H2	هلند	۹	مسافری	۲۲	PEMFC	۲*۳۰	۶۰	سیستم پیشران	پیل سوختی	۲۰۰۸	۹ ساعت	هیدروژن	۳۵۰	[۱۵]
۳	SF-BREEZE	آمریکا	۳۵	مسافری ۱۵۰ نفری	۳۴	PEMFC	۴۱*۴*۳۰=۴۹۲۰	۱۰۰	سیستم پیشران+جانبی	پیل سوختی	۲۰۱۵	۱۸۵ کیلومتر	هیدروژن مایع	کرایوژنیک	[۱۶]
۴	Tourist Boat	کره	۸	مسافری	۲۰ متر	PEMFC	۲*۲۸	۶۰	هیبرید	هیبرید	۲۰۱۴	۸-۱۰ ساعت	هیدروژن	۳۵۰	[۱۷]
۵	Pa-X-ell	آلمان	۸	کروز مسافری	۲۲	PEMFC	۲*۵*۶	۸۰	مصرف جانبی	پیل سوختی	۲۰۱۶	۱۲ ساعت	متانول	گزارش‌نشده	[۱۸]
۶	River cell ELEKTRA	آلمان	۸	باری	۲۰*۸	PEMFC	۳۰۰	۶۰	هیبرید	هیبرید	۲۰۱۲	۱۶ ساعت	هیدروژن	۵۰۰	[۱۹]
۷	Viking Lady	نروژ	۱۶	باری	۹۲*۲۱	MCFC	۳۲۰	۴	مصارف جانبی	هیبرید	۲۰۰۹	۱۳۰ کیلومتر	LNG/متانول	گزارش‌نشده	[۸]
۸	US SSFC	آمریکا	۱۰	نظامی	۱۰۰*۴۲	MCFC	۶۲۵	۸۰	سیستم پیشران	هیبرید	۱۹۹۸	۴۰ ساعت	دیزل	کرایوژنیک	[۲۰]
۹	METAPHU	اتحادیه اروپا	۱۶	باری کارگو	۱۴۷*۲۱	SOFC	۲۵۰	۵	مصرف جانبی	هیبرید	۲۰۱۰	گزارش‌نشده	متانول	گزارش‌نشده	[۲۱]

۳- مطالعات امکان‌سنجی بکارگیری پیل سوختی در شناور تمام برقی

یکی از مطالعات اصلی برای ارزیابی طرح‌های صنعتی، انجام مطالعات فنی و اقتصادی برای طرح می‌باشد. هرچند برای طرح‌های مهم، ممکن است هزینه در اولویت نباشد و فقط امکان‌پذیری اجرای طرح از لحاظ فنی بالاترین اولویت را داشته باشد. در صورتیکه اجرای طرح به روش‌ها و فرآیندهای مختلف قابل انجام باشد، بهتر است فهرستی از آن‌ها تهیه شود و برای هر روش، مطالعات امکان‌سنجی فنی-اقتصادی به طور جداگانه اجرا شود [۲۲].

۳-۱- الزامات سیستم قدرت شناورهای سطحی

در طراحی شناورها، باید الزامات ذیل در سطح بالاتری رعایت شود [۲۳]:

- عملکرد با بازده انرژی مناسب
- نویز کم
- اثر مادون‌قرمز کم
- تأمین بی‌وقفه بارها
- آلایندگی کم

۳-۲- نمونه‌های تجاری پیل سوختی

مزایای بکارگیری پیل سوختی و جلب توجهات جهانی در بکارگیری آن در کاربردهای متنوع باعث شده است تا شرکت‌های مختلفی در طراحی و توسعه ساخت آن فعالیت داشته باشند. از مهم‌ترین این شرکت‌ها می‌توان به Hyundai، Doosan، Nedstack Fuel Cell، Ballard، Horizon، Nuvera، Hydrogenic، Power cell و ... اشاره نمود.

به عنوان نمونه بزرگ‌ترین پیل سوختی ساخته‌شده در ابعاد تجاری توسط شرکت Doosan (مدل PureCell®Model 400) با ظرفیت ۴۶۰ کیلووات و ابعاد ۳*۲/۵*۸/۳ متر مکعب، ساخته شده است. سوخت مصرفی این سیستم گاز طبیعی و با نرخ ۳۶۷۴ نرمال مترمکعب بر ساعت در بار کامل است.

نمونه تجاری ساخته شده توسط شرکت Ballard مدل FCwave با ظرفیت ۲۰۰ کیلووات است که برای نصب در شناورهای سطحی، ناوچه‌ها و شناورهای مسافری ساخته شده است. این پیل سوختی یک ماژول با حداکثر ولتاژ ۷۰۰ ولت و جریان ۳۰۰ آمپر و با بازدهی کل ۵۶ درصد است. ابعاد این ماژول در حدود ۱/۱۲*۷/۳۸*۲/۲متر مکعب و جرم آن ۸۷۵ کیلوگرم است.

نمونه تجاری پیل سوختی ساخته شده توسط شرکت POWERCELL، یک ماژول با ظرفیت ۱۲۵ کیلووات و با ابعاد ۴۲۰*۵۶۸*۱۵۶ میلی‌متر مکعب و جرم ۴۳ کیلوگرم است[۲۴]. سوخت مصرفی آن هیدروژن خالص است. اطلاعات فنی چند نمونه تجاری پیل سوختی در جدول ۲ درج شده است. مشخصات ابعادی و جرمی چند نمونه تجاری پیل سوختی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲- اطلاعات فنی نمونه‌های تجاری پیل سوختی

کالا	شرکت	نوع پیل	ظرفیت (kW)	بازده	ولتاژ (V)	ابعاد (m)	وزن (kg)	نوع سوخت	نرخ مصرف (Nm3/hr)
PureCell®Model 400	Doosan	PAFC	۴۶۰	۴۳	۴۸۰	۹*۵*۲	۲۷۰۰	گاز طبیعی	۳۶۷۴
ES-5700 Energy Server	Bloom Energy	SOFC	۲۰۰	گزارش‌نشده	۴۸۰	۸*۲/۵*۲	۱۹۰۰	گاز طبیعی	۲۹۴۶
DFC1500	FuelCell Energy	MCFC	۱۴۰۰	۴۷	۴۸۰	۴/۵*۷*۲۰	۱۰۹۰۰۰	گاز طبیعی	۲۹۱
HyPM HD 180	Hydrogenics	PEM	۱۹۸	۵۵	۳۶۰–۷۲۰	۲*۲*۰/۸	۶۵۴	هیدروژن	۱۳۰ m3/hr
HyPM™-R1000	Hydrogenics	PEM	۱۰*۱۰۰	۴۹	۳۸۰–۴۸۰	۲/۵*۳*۱۶	۳۲۰۰۰	هیدروژن	۶۴۸ m3/hr
FCwave	Ballard	PEM	۲۰۰	۵۶	۳۵۰–۷۲۰	۱/۲*۰۷/*۲/۲	۸۷۵	هیدروژن	۱۳۵ m3/hr

جدول ۳- شاخص‌های ابعادی و جرمی نمونه‌های تجاری پیل سوختی

مدل پیل سوختی	ظرفیت (kW)	حجم (m3)	چگالی حجمی (kW/m3)	جرم (kg)	چگالی جرمی (kw/kg)
PureCell®Model 400	۴۶۰	۶۲	۷/۴	۲۷۰۰	۰/۱۷
ES-5700 Energy Server	۲۰۰	۴۰	۵	۱۹۰۰	۰/۱
HyPM HD 180	۱۹۸	۳/۲	۶۲	۶۵۴	۰/۳۱
HyPM™-R1000	۱۰۰۰	۱۲۰	۸/۳	۳۲۰۰۰	۰/۰۳
FCwave	۲۰۰	۲۰	۱۰	۸۷۵	۰/۲۳

۳-۳- نوع سوخت مصرفی

تهیه و خرید و در دسترس بودن سوخت مصرفی برای تمامی منابع و مبدل‌های انرژی، یک مقوله بسیار مهم و نیازمند مدیریت راهبردی است. در شناورهای حال حاضر برقی یا غیر برقی، سوخت دیزل یا گاز به عنوان سوخت رایج مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت مقایسه انرژی آزادشده در شناورهای سطحی مبتنی بر دیزل، گاز و پیل سوختی، اطلاعات آن‌ها در جدول ۴ مقایسه شده است.

جدول ۴- مشخصات سوخت مصرفی شناورها

سوخت	توان مبنا	جرم سوخت مورد نیاز	حجم سوخت مورد نیاز	قیمت واحد (تومان بر واحد)	قیمت کل
دیزل	یک کیلووات ساعت	۸۴/۵ گرم	۰/۱ لیتر	۱۶۰۰۰	۱۶۰۰
هیدروژن		۳۰ گرم	۰/۳۳ Nm3	۳۰۵۰۰۰	۹۱۵۰
گاز		۷۶ گرم	۰/۰۹۸ Nm3	۳۰۰۰	۳۲۵

۳-۴- نحوه ذخیره‌سازی سوخت

در حوزه تأمین سوخت پیل سوختی، هرچه خلوص هیدروژن مورد استفاده بالاتر باشد، بازدهی سوخت بالاتر و احتمال مسمومیت پیل سوختی نیز کمتر خواهد شد.

هیدروژن را می‌توان به دو صورت هیدروژن گازی فشرده‌شده و هیدروژن مایع در مخازن کرایوژنیک ذخیره‌سازی نمود. هیدروژن دارای چگالی ۰/۰۹ کیلوگرم بر نرمال مترمکعب در فشار یک بار و دمای صفر درجه سانتی‌گراد است. به‌عنوان مثال برای ذخیره‌سازی یک کیلوگرم هیدروژن در دمای صفر درجه سانتی‌گراد و با فشار یک بار، به حجمی برابر با ۱/۱۱ مترمکعب معادل ۱۱۱۱ لیتر نیاز است که عددی بزرگ است و برای ذخیره‌سازی آن در سیلندرهای ۴۰ لیتری، به ۲۷۷ سیلندر نیاز است.

با افزایش فشار می‌توان حجم را کم نمود. در نتیجه، ذخیره‌سازی هیدروژن در مخازن در فشار کاری بالاتر از فشار جو انجام می‌شود. فشار شارژ هیدروژن در دنیا به‌طورمعمول در فشار ۳۵۰ تا ۷۰۰ بار انجام می‌شود. در شارژ با فشار ۳۵۰ بار، تنها به یک سیلندر ۴۰ لیتری نیاز است.

ذخیره‌سازی کرایوژنیک یکی از روش‌های پیشرفته و بهینه برای ذخیره‌سازی هیدروژن به‌صورت مایع در دمای منفی بسیار پایین است که قابلیت ذخیره‌سازی مقدار هیدروژن بیشتری نسبت به حالت گازی دارد.

یکی از روش‌های ذخیره‌سازی هیدروژن به‌کارگیری مواد و پودرهای فلزی است که قابلیت ذخیره‌سازی و آزادسازی هیدروژن را دارند. برخی از این موارد فلزی LiBH4، NaAlH4، LiAH4 و ... می‌باشند. مخازن هیدروژن با این فناوری ذخیره‌سازی را، مخازن هیدرید فلزی می‌نامند.

۴- طراحی شناور سطحی تمام‌الکتریکی مبتنی بر پیل سوختی

برای تعیین سیستم قدرت مناسب یک شناور تمام برقی مبتنی بر پیل سوختی، می‌توان از فلوچارت شکل ۳ استفاده نمود. در ابتدا باید اطلاعات فنی و بهره‌برداری شناور مانند ظرفیت توان، انرژی مورد نیاز در هر دور سفر، نرخ تغییرات توان بارهای مصرفی و ابعاد شناور، ظرفیت تانکر سوخت، ابعاد خالی در دسترس و ... مشخص شود.

در گام بعدی، با توجه به کلاس کاری و ظرفیت توانی شناور، سطح ولتاژ سیستم قدرت شناور مشخص می‌شود. برای انتخاب سطح ولتاژ می‌توان از استاندارد IEC استفاده کرد. در صورتی که نرخ تغییرات توان بارها بالا باشد، توصیه می‌شود که از منابع هیبریدی استفاده شود. در صورتی‌که سیستم قدرت شناور سطحی، از نوع هیبریدی باشد، به ناچار باید ترکیب نوع مختلف منابع تولیدی مشخص شود. ترکیب پیل سوختی با باتری، ترکیب پیل سوختی/باتری/منابع تجدیدپذیر، ترکیب پیل سوختی/باتری/دیزل ژنراتور و ... گزینه‌های مختلفی را در اختیار قرار می‌دهد.

ذخیره‌ساز رایجی که در سیستم‌های انرژی هیبریدی مبتنی بر پیل سوختی، مورد کاربرد قرار می‌گیرد، باتری است. انواع مختلف باتری در سیستم‌های هیبریدی پیل سوختی بکار می‌روند که البته با عنایت به پیشرفت فناوری و ویژگی‌های ممتاز خانواده باتری‌های لیتیومی، در سال‌های اخیر سیستم‌های انرژی هیبریدی پیل‌سوختی/باتری لیتیومی توسعه چشمگیری در کاربردهای مختلف پیدا کرده‌اند. در سیستم‌های هیبریدی پیل سوختی/باتری، ممکن است پیل سوختی به عنوان منبع توان اصلی[1] و باتری به عنوان منبع کمکی[2] و یا عکس این حالت باشد. در کاربری‌های حوزه حمل و نقل الکتریکی، معمولا منبع کمکی به عنوان اضافه‌کننده برد[3] لحاظ می‌شود. نسبت مشارکت پیل سوختی و باتری در تأمین بار نیز توسط درجه هیبریداسیون[4] سیستم محاسبه می‌شود [۲۵].

در شرایطی که فناوری ریفرمینگ سوخت در دسترس باشد بسته به ظرفیت و دبی هیدروژن تولیدی سیستم ریفرمر و مشخصات مخازن ذخیره سوخت شناور، می‌توان به راحتی حداکثر ظرفیت پیل سوختی را محاسبه نمود. در واقع توان پیل سوختی بر اساس ظرفیت تولید هیدروژن ریفرمر (بر حسب نرمال‌متر مکعب بر ساعت) قابل تعیین است و یا بالعکس. در صورتی که توان پیل سوختی را مقید نماییم، ظرفیت ریفرمر می‌تواند به عنوان متغیر طراحی محسوب شود. فشار هیدروژن تولیدی ریفرمر نیز عموما در محدوده

[1] Main
[2] Auxiliary
[3] Range Extender
[4] Degree of Hybridization (DOH)

فشار کاری پیل‌سوختی و یا بالاتر از آن قرار دارد. ریفرمر سوخت رایجی که در حوزه شناورهای سطحی پیل سوختی کاربرد دارد، ریفرمر بخار[۱] است. یکی از چالش‌های مهم در ارتباط با هیدروژن تولیدی ریفرمر، موضوع خلوص گاز هیدروژن تولیدی است. استاندارد معتبر مربوط به خلوص گاز هیدروژن، استاندارد ISO14687 است.

در صورتی که، فناوری ریفرمینگ سوخت موجود نباشد، سوخت هیدروژن ذخیره شده در مخازن، به عنوان ورودی پیل سوختی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بسته به نوع هیدروژن که می‌تواند به صورت گازی یا مایع باشد و فشار و دمای کاری، جرم مشخصی از هیدروژن را می‌توان در یک ابعاد معلوم، ذخیره نمود. منبع ذخیره سوخت هیدروژن، هرچقدر قابلیت عملکرد در فشار بالاتر و دمای کمتری را داشته باشد، جرم بیشتری از هیدروژن، قابل ذخیره‌سازی است. از این رو، با توجه به ابعاد قابل دسترس در شناور برای نصب و جانمایی منابع ذخیره سوخت هیدروژن و همچنین سطوح دما و فشار قابل دسترسی برای شارژ سوخت هیدروژن منابع ذخیره، می‌توان انرژی قابل حصول از هیدروژن را تعیین نمود.

پس از تعیین حداکثر ظرفیت توان پیل سوختی، لازم است تا سهم منابع تولید دیگر نیز تعیین شوند. بسته به درصد ظرفیت پیل سوختی به ظرفیت توان کل شناور، مابقی توان باید توسط منابع دیگر تأمین شود. میزان نرخ تغییرات توان مصرفی بارها و ابعاد و فضای در دسترس، دو مورد مهم در تعیین ظرفیت منابع هیبریدی است. پس از استخراج ترکیب مناسب منابع تولیدی هیبریدی، باید جانمایی و توپولوژی مناسب عناصر سیستم قدرت شناور با توجه به مکان قرارگیری آن‌ها، تعیین شود. این ساختارها می‌تواند به صورت شعاعی، مش، حلقوی و ... باشند.

در گام نهایی، مطالعات فنی از بابت اطمینان از عملکرد سیستم قدرت شناور سطحی در سناریوهای مختلف مانوری شناور سطحی انجام شود.

۵- مطالعه موردی بکارگیری پیل سوختی ۲۰۰ کیلوواتی در شناور سطحی

۵-۱- اطلاعات طراحی و بهره‌برداری پیل سوختی

واکنش‌های الکتروشیمیایی در پیل سوختی پلیمری، جهت تولید انرژی الکتریکی مطابق روابط زیر توصیف می‌شود:

$$Anode:\ H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \quad (۱)$$

$$Cathode:\ 2H^+ + 2e^- + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O \quad (۲)$$

$$Overall:\ H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O + energy \quad (۳)$$

توان تولیدی پیل سوختی پلیمری مطابق رابطه (۴) بدست می‌آید:

$$\dot{W}_{PEMFC} = V_{PEMFC}.i_{PEMFC} \quad (۴)$$

که در آن V_{PEMFC} و i_{PEMFC} به ترتیب ولتاژ تک‌سلول پیل سوختی و چگالی جریان جریان پیل سوختی است. ولتاژ تولیدی پیل سوختی مطابق رابطه زیر با استفاده از ولتاژ تک‌سلول پیل سوختی تعیین می‌شود:

$$V_{PEMFC} = N_c E_{Cell} = N_c(E_{Nernst} - E_{Loss}) \quad (۵)$$

در رابطه فوق، N_c و E_{Cell} به ترتیب تعداد سلول و ولتاژ تک‌سلول پیل سوختی است. E_{Nernst} ولتاژ مدارباز و یا همان حداکثر ولتاژ تولیدی پیل سوختی است و E_{loss} افت ولتاژ پیل سوختی است. تشریح روابط ولتاژ مدارباز و افت ولتاژ به همراه معادلات تحلیلی طراحی پیل سوختی پلیمری در [۲۶] ارائه شده است.

با توجه به سطح توان پیل سوختی، با رویکرد طراحی سامانه توان هیبریدی پیل سوختی با استفاده نمونه‌های تجاری در دسترس، برای نمونه ماژول پیل سوختی ۲۰۰ کیلوواتی شرکت PowerCell با مدل Marine PowerCellution System 200 مخصوص کاربرد در شناورهای سطحی مجهز به پیل سوختی را به عنوان ماژول پیل سوختی شناور

[5] Steam Reformer

سطحی مورد نظر انتخاب می‌کنیم. اطلاعات بهره‌برداری این پیل سوختی در جدول ۵ ارائه شده است:

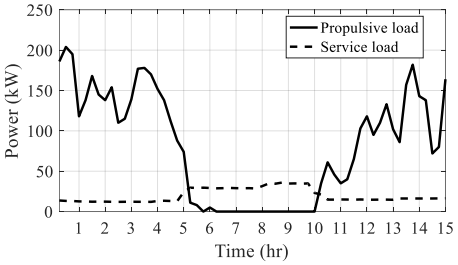
۵-۲- تخمین انرژی و توان مصرفی

علاوه بر فاکتور توان و چگالی توان، فاکتور انرژی نیز در محاسبات پیل سوختی باید مدنظر باشد. انرژی مصرفی یک شناور به مأموریت شناور بستگی دارد. پروفایل مصرف انرژی یک شناور نمونه در شکل ۴ به نمایش در آمده است. این پروفایل با استفاده از اطلاعات واقعی مصرف یک شناور ماهیگیری حین یک مأموریت ۱۵ ساعته ماهیگیری، شامل حرکت از بندر به نقطه صید ماهی، توقف جهت صید و برگشت به بندر، ترسیم شده است.

شکل ۳- فلوچارت طراحی کلی سیستم قدرت شناور تمام برقی مبتنی بر پیل سوختی

جدول ۵- مشخصات بهره‌برداری ماژول پیل سوختی شناور سطحی مورد نظر جهت طراحی[۲۷]

حداکثر توان خالص (kW)	۲۰۰
محدوده ولتاژ (V)	۵۰۰-۱۰۰۰
ولتاژ نامی (V)	۶۰۰
محدوده جریان (A)	۶۰-۴۵۰
جریان نامی (A)	۳۸۰
حداکثر بازده (٪)	۶۰
ابعاد (m^3)	۰/۷*۰/۹*۲
جرم (kg)	۷۰۰



شکل ۴- یک نمونه پروفایل مصرف توان برای یک شناور نمونه

ضریب توان برای شناورها بسته به ابعاد و مأموریت بین ۰/۴۵ تا ۰/۶ متغیر است. به‌عنوان‌مثال برای شناور با توان ۲۰۰ کیلووات و با ضریب بار ۰/۶ و در یک دور سفر ۱۵ ساعت کار، میزان انرژی برابر با ۱۸۰۰ کیلووات‌ساعت خواهد بود.

۵-۳- هزینه تأمین پیل سوختی

یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش رو در توسعه فناوری شناور سطحی پیل سوختی، بالا بودن هزینه تأمین پیل سوختی است. با توجه به حجم تولید و بهبود فناوری، هزینه تمام‌شده پیل سوختی در حال کاهش است. علاوه بر هزینه تولید خود پیل سوختی، هزینه مربوط به خرید تجهیزات جانبی و نصب و راه اندازی آن نیز باید در محاسبات درنظر گرفته شود. همان‌طور که در شکل ۵ نمایش داده شده است، درصد قابل‌توجهی از هزینه‌ها متعلق به واحد جانبی (پلنت تعادل[1]) است [۲۸].

میزان هزینه تمام‌شده پیل سوختی وابسته به مواردی شامل نوع و مکانیزم عملکرد پیل سوختی، سطح توان، کاربرد پیل سوختی (با توجه به قابلیت کار در شرایط محیطی مختلف)، سطح قابلیت اطمینان، میزان خلوص هیدروژن مورد نیاز و تیراژ تولید، متغیر است. به‌طورکلی هزینه تمام‌شده تأمین پیل سوختی بین حدود ۱۲۰ تا ۸۰۰ دلار بر کیلووات است [۲۹] که البته اعداد گزارش‌شده در مراجع مختلف تا حدی متفاوت است. با توجه به اینکه پیل سوختی مورد کاربرد در شناور سطحی، باید توانایی عملکرد در شرایط محیطی سخت[2] (از جمله رطوبت بالا و زوایای رول و پیچ زیاد) و همچنین در برخی موارد قابلیت کار با خلوص هیدروژن کم (به عنوان مثال هیدروژن تولیدی با ریفرمینگ سوخت مایع) را داشته باشد، قیمت در نظر گرفته‌شده پیل سوختی را معادل با میزان حداکثر هزینه (۸۰۰ دلار بر کیلووات) در نظر می‌گیریم. ضمن اینکه پیل‌های سوختی مورد کاربرد در شناورهای سطحی، معمولا توان بالاتر و شرایط عملیاتی خاصی دارند و به صورت سفارشی، طراحی و تولید می‌شوند. لذا تیراژ کم تولید، هزینه پیل سوختی را افزایش می‌دهد؛ بنابراین، برای پیل سوختی ۲۰۰ کیلووات، هزینه‌ای در حدود حداکثر ۱۶۰۰۰۰ دلار در نظر می‌گیریم.

۵-۴- هزینه تأمین سوخت

برای شناور مدنظر با توان ۲۰۰ کیلووات و با پروفایل بار مطابق با شکل ۴ جهت انجام یک مأموریت ۱۵ ساعته، در

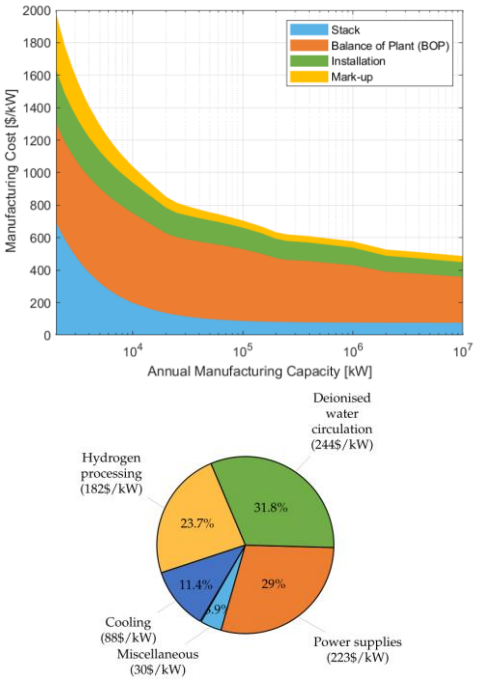
[1] Balance of Palnt (BoP)

[2] Harsh

صورتی که از پیل سوختی شرکت FCWave با ظرفیت ۲۰۰ کیلووات و بازدهی ۵۶ درصد[۳۰] و یا پیل سوختی شرکتHyPM HD 180 شرکت Hydrogenics با بازده ۵۵ درصد [۳۱] استفاده شود، برای هیدروژن ذخیره‌شده با فشار ۳۰۰ بار، در حدود ۶/۴ متر مکعب گاز هیدروژن نیاز است [۲۵].

برای مقایسه در جدول ۶ برای یک سفر ۱۲ ساعته شناور سطحی، یک موتور دیزل ۲۰۰ کیلوواتی از شرکت mtu با مدل MTU 6R0120 DS200 در نظر گرفته‌شده است که در حدود ۵۵/۳ لیتر بر ساعت سوخت دیزل مصرف می‌کند [۳۲].

جهت بررسی و مقایسه بکارگیری دو فناوری پیل سوختی و دیزل ژنراتور در شناورهای سطحی، شاخص مدت زمان ماندگاری در آب به عنوان یک شاخص بسیار مهم در شناورهای سطحی، درنظر گرفته شده است. با فرض اینکه شناور موردنظر دارای یک تانک ذخیره با حجم یکسان در دو فناوری مذکور باشد، مطابق با جدول ۷، شناور سطحی پیل سوختی به دلیل بازدهی بالاتر، سوخت موجود را در زمان بیشتری مصرف نموده و در نتیجه مدت زمان بیشتری در دریا ماندگار خواهد بود.



شکل ۵ - آنالیز قیمتی ماژول پیل سوختی[۲۷]

جدول ۶- مقایسه سوخت مصرفی یک دور سفر ۱۲ ساعته با پیل سوختی و موتور دیزل

تجهیز	انرژی مصرفی روزانه (kwh)	بازده (%)	میزان انرژی مصرفی (Mj)	سوخت مصرفی	قیمت سوخت	قیمت کل (میلیون تومان)
HyPM HD 180	۲۴۰۰	۵۵	۱۵۷۰۹	۱۳۰ کیلوگرم هیدروژن	۲/۱۲ دلار بر کیلوگرم در ایستگاه سوخت کشور چین	۳۹/۵
					۱۶ دلار بر کیلوگرم در ایستگاه سوخت کشور امریکا	۵۲
					۳۲ دلار بر کیلوگرم برای سیلندرهای ۴۰ لیتری	۱۰۴
FCwave		۵۶	۱۵۴۲۸	۱۲۸/۵ کیلوگرم هیدروژن	۲/۱۲ دلار بر کیلوگرم در ایستگاه سوخت کشور چین	۳۹/۲
					۱۶ دلار بر کیلوگرم در ایستگاه سوخت کشور آمریکا	۵۱/۴
					۳۲ دلار بر کیلوگرم برای سیلندرهای ۴۰ لیتری	۱۰۲/۸
دیزل ژنراتور		۴۰	۲۱۶۰۰	۵۱۷ کیلوگرم دیزل	۰/۹۲۵ دلار بر کیلوگرم	۱۴/۳

جدول ۷- مقایسه شاخص ماندگاری در آب

تجهیز	بازده (%)	ضریب بار	سوخت ذخیره شده بر حسب مگاژول	زمان ماندگاری در آب (ساعت)
HyPM HD 180	۵۵	۰/۵	۱۰۰۰۰	۲/۱۵
FCwave	۵۶			۵/۱۵
دیزل ژنراتور	۴۰			۱/۱۱

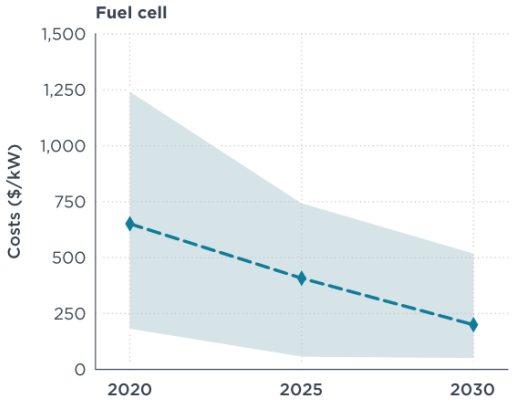
شاخص دیگر برای مقایسه دو فناوری پیل سوختی و دیزل ژنراتور، میزان نویز صوتی تولید شده توسط تجهیزات است که در ارتباط با آرامش و راحتی پرسنل شناور مطرح می‌شود. در جدول ۸، میزان نویز صوتی تولید شده و حد مجاز آن بیان شده است. ملاحظه می‌شود که نویز تولیدی پیل سوختی بسیار کمتر از دیزل‌ژنراتور و در محدوده مجاز نویز صوتی است، در حالی که برای دیزل‌ژنراتور این عدد بیشتر از حد مجاز است.

جدول ۸- میزان نویز صوتی تولید شده

تجهیز	ظرفیت (kw)	مقدار نویز تولیدی (db)	مقدار مجاز نویز صوتی (db)
پیل سوختی	۳۰۰	۴۰-۴۵	۶۵-۷۵
دیزل ژنراتور MTU 8V0183 GS260	۳۰۰	۹۰	

۶- آنالیز اقتصادی توسعه سیستم توان پیل سوختی

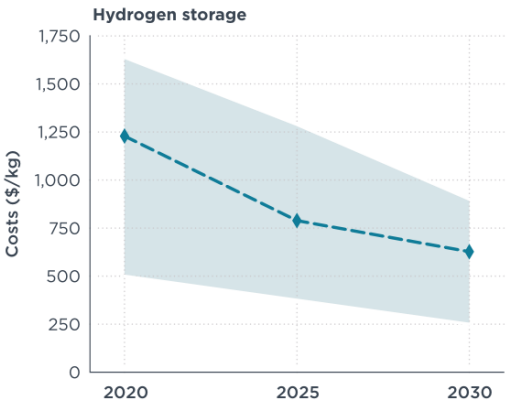
جهت آنالیز کامل اقتصادی سیستم هیبریدی پیل سوختی، با رویکرد تأمین کلیه تجهیزات، باید آنالیز هزینه تمامی اجزای سیستم انجام شود. در همین راستا، باید داده‌های آماری مناسبی از قیمت کلیه زیرسیستم‌ها در دسترس باشد. موضوع مهم در این زمینه، کاهش تدریجی هزینه تأمین تجهیزات با رشد و توسعه فناوری و کاربرد سیستم‌های توان هیبریدی پیل سوختی در کاربری‌های مختلف است. در این بخش از مقاله، با هدف ایجاد دیدگاه کلی در مورد هزینه‌های تأمین تجهیزات زیرسیستم‌های سیستم توان هیبریدی پیل سوختی در کاربری حمل و نقل الکتریکی، نمودارهایی از مرجع [۲۹] ارائه می‌شود. البته این نمودارها مربوط به کامیون‌های مجهز به پیل سوختی است و گزارش مشابه در کاربری شناور سطحی در دسترس نبود. با این وجود نمودارهای ارائه‌شده، روندهای کلی هزینه‌ها از سال ۲۰۲۰ میلادی تا حال حاضر و پیش‌بینی تا سال ۲۰۳۰ میلادی در بر دارد و می‌تواند در برآورد هزینه‌ها در کاربری شناور سطحی پیل سوختی مؤثر باشد. لازم به ذکر است که اطلاعات ارائه شده مربوط به سال ۲۰۲۲ میلادی است و تغییر مقادیر هزینه‌ها در گزارش‌های جدیدتر، محتمل است. نمودار هزینه تأمین پیل سوختی بر حسب دلار بر کیلووات ساعت در شکل ۶ ارائه شده است:



شکل ۶- نمودار هزینه تأمین پیل سوختی[۲۹]

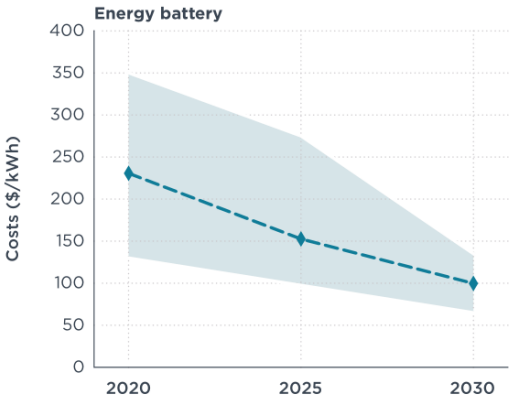
ملاحظه می‌شود با گذر زمان و توسعه فناوری پیل سوختی هزینه‌ها کاهش می‌یابد.

نمودار هزینه ذخیره هیدروژن بر حسب دلار بر کیلوگرم در شکل ۷ ارائه شده است.



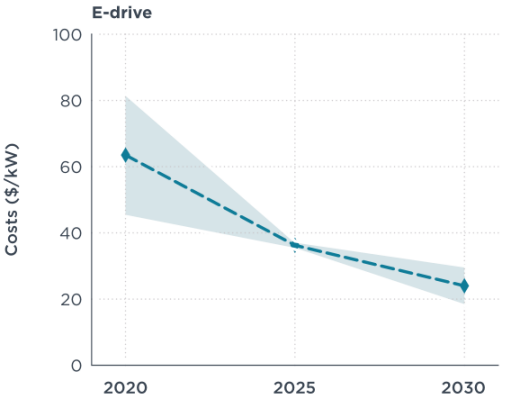
شکل ۷- نمودار هزینه ذخیره هیدروژن[۲۹]

نمودار هزینه انرژی باتری بر حسب دلار بر کیلووات‌ساعت در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۸- نمودار هزینه انرژی باتری[۲۹]

نمودار هزینه زیرسیستم پیشران الکتریکی بر حسب دلار بر کیلووات در شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۹- نمودار هزینه زیرسیستم پیشران الکتریکی[۲۹]

همانطور در نمودارهای فوق ملاحظه می‌شود، با استفاده از نمودارهای فوق و در نظر گرفتن اطلاعات ورودی طراحی، از جمله سطح توان سیستم توان پیل سوختی شناور سطحی، برد شناور و به تبع آن میزان ذخیره انرژی مورد نیاز مخازن هیدروژن و بانک باتری، مشخصات و ظرفیت موتورهای رانش، می‌توان برآورد هزینه کل سیستم را انجام داد.

۷- نتیجه‌گیری

در حال حاضر، از مهم‌ترین چالش‌های فنی و اقتصادی توسعه و بکارگیری پیل سوختی می‌توان به گران بودن پیل سوختی و ادوات جانبی آن، بالا بودن قیمت سوخت هیدروژن و عدم وجود زیرساخت کافی در تأمین سوخت هیدروژن اشاره نمود. قیمت پیل سوختی بسته به نوع پیل سوختی، ظرفیت ماژول پیل سوختی و نوع سوخت ورودی متغیر است و واحدهای جانبی و هزینه آن‌ها متناسب با نوع سوخت متفاوت هستند. با توجه به روند رو به رشد استفاده از پیل سوختی در کاربردهای مختلف، انتظار می‌رود که میزان تولید توسط شرکت‌های تولیدکننده ماژول‌های پیل سوختی افزایش یابد و پیش‌بینی می‌شود که قیمت تأمین پیل سوختی کاهش یابد.

در حوزه تأمین سوخت پیل سوختی، به دلیل پایین بودن تعداد شرکت‌های فرآورش و تولید سوخت هیدروژن و عدم وجود زیرساخت‌های فراگیر در دنیا، در حال حاضر هیدروژن یک سوخت گران قیمت لحاظ شود. محدودیت فنی دیگر در تأمین سوخت هیدروژن، نحوه توزیع و ذخیره‌سازی آن است. توزیع سوخت هیدروژن به طور معمول توسط لوله‌های مخصوص در صورت نزدیکی محل تولید و مصرف سوخت هیدروژن و یا با استفاده از کامیون های تانکردار و یا شناورهای باری تانکردار در فواصل دور انجام می‌شود. پراکندگی واحدهای تولیدی گاز هیدروژن ، موجب افزایش قیمت سوخت هیدروژن و یا نارسایی در تأمین سوخت هیدروژن شده است. در صورت افزایش تعداد ایستگاه‌های سوخت‌رسان و شارژ آن‌ها در شبکه توزیع، انتظار می‌رود که روند تجهیز شناورهای سطحی به پیل سوختی رشد بیشتری پیدا کند.

ذخیره‌سازی سوخت هیدروژن به طور معمول در مخزن‌های فشار بالا و دما پایین و یا کرایوژنیک انجام می‌پذیرد. با توجه به محدودیت موجود در حجم و ابعاد و جرم در هر نوع از شناورهای سطحی، محدودیت‌هایی در ذخیره‌سازی گاز هیدروژن وجود دارد. این محدودیت‌ها به فناوری مخزن و پروفیل فشار-دمای قابل تحمل آن بستگی دارد. از این رو، استفاده از پیل سوختی با سوخت هیدروژن خالص برای شناورها تا سطوح توانی مشخص، منطقی و قابل قبول است و برای سطوح توان بالاتر، فناوری تولید هیدروژن از ریفرمینگ سوخت‌های دیگر مطرح می‌شود

بنابراین سطح توان شناور برای کاربرد پیل سوختی به ترکیب و حضور منابع تولید توان الکتریکی دیگر، فناوری پیل سوختی و فناوری مخزن ذخیره هیدروژن و نحوه شارژ مخازن بستگی دارد. در کشورهایی که صاحب فناوری ذخیره‌سازی و بکارگیری مخازن هیدروژن کرایوژنیک هستند، امکان توسعه شناورهای سطحی مجهز به پیل سوختی با ظرفیت توانی بالاتر فراهم شده‌است.

در کشور ایران، با توجه به گران بودن سوخت هیدروژن در کشور، عدم وجود زیرساخت توزیع سوخت هیدروژن و محدودیت در ظرفیت مخازن ذخیره‌سازی و فرآیند شارژ سوخت هیدروژن در فشار کم، سوخت هیدروژن از بعد اقتصادی از جایگاه پایین‌تری نسبت به دیزل ژنراتور و سوخت دیزل برخوردار است. با توجه به فناوری پیشرفته پیل سوختی و فرآیندها و دستگاه‌های وابسته به آن از یکسو و وجود پتانسیل‌های تحقیقاتی در کشور و فراوانی سوخت‌های هیدروکربنی به عنوان منبع اصلی سوخت هیدروژن از سویی دیگر، لازم است تا در ابتدا تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام شود تا چالش‌ها، محدودیت ها و رویکردهای مناسب طراحی شناورهای تمامی برقی مبتنی بر پیل سوختی در سطوح مختلف سخت افزاری، نرم افزاری و حتی سیاست-گذاری انرژی استخراج شود.

مراجع

[۱] ناصر بهارلو هوره و سید عرفان سخنگوی(۱۴۰۲) مروری بر روند توسعه خودروهای پیل سوختی در دنیا. نشریه مهندسی مکانیک, ۳۲(۲), ۶۶-۸۰.

[2] Farzaneh F and Golmohammad M(2021) Iranian hydrogen production insight: research trends and outlook. Hydrogen, Fuel Cell & Energy Storage, 8(1), 23-33.

[3] Shakeri N, Zadeh M, and Nielsen B (2020) Hydrogen fuel cells for ship electric propulsion: Moving toward greener ships. IEEE Electrification Magazine 8(2): 27-43.

[4] Han J, Charpentier J, and Tang T (2012) State of the art of fuel cells for ship applications. IEEE international symposium on industrial electronics: 1456-1461.

[5] Raucci C, Smith T, Rehmatulla N, Palmer K, Balani S and Pogson G (2017) Zero-Emission Vessels 2030: How do we get there?. Online article published by Lloyd's Register and UMAS. https://www.lrs.or.jp/news/pdf/LR_Zero_Emission_Vessels_2030.pdf

[6] Psoma A and Sattler G (2002) Fuel cell systems for submarines: from the first idea to serial production. Journal of Power Sources 106(1): 381-383.

[7] https://www.naval-technology.com/projects/type_212/?cf-view.

[8] Kolodziejski M and Michalska-Pozoga I(2023) Battery Energy Storage Systems in Ships' Hybrid/Electric Propulsion Systems. Energies, 16(3), 1122.

[9] Hansen J and Wendt F(2015) History and state of the art in commercial electric ship propulsion, integrated power systems, and future trends. Proceedings of the IEEE 103(12):2229-2242.

[10] Symington W, Belle A, Nguyen H and Binns J(2016) Emerging technologies in marine electric propulsion. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment 230(1):187-198.

[11] Carlton J, Aldwinkle J and Anderson J(2013)Future ship powering options: exploring alternative methods of ship propulsion. London: Royal Academy of Engineering.

[12] Tronstad T and Byrknes J(2003) Fuel cells in ships: safety and reliability.

[13] Fang R, Jiang W, Khan J and Dougal R(2009)System-level thermal modeling and co-simulation with hybrid power system for future all electric ship. IEEE Electric Ship Technologies Symposium:547-553.

[14]https://www.blue-growth.org/Blue_Growth_Technology_Innovation/Hydrogen_Ferries_Cruise_Ships_Cargo_Vessels_Fuel_Cells/FCS_Alsterwasser_Alster_Touristik_Hydrogen_FuelCell_Ships_Hamburg_Riverboat.htm

[15] Fact sheet Nº 4: Fuel Cell Propulsion, Published by Development Centre for Ship Technology and Transport Systems, Germany, April 2020.

[16] Pratt, J. W(2017) Feasibility of the SF-BREEZE: a Zero-Emission Hydrogen Fuel Cell High-Speed Passenger Ferry (No. SAND2017-0692PE). Sandia National Lab.(SNL-CA), Livermore, CA (United States).

[17] Kim K, Park K, Roh G, Choung C, Kwag K and Kim W (2023). Proposal of Zero-Emission Tug in South Korea Using Fuel Cell/Energy Storage System: Economic and Environmental Long-Term Impacts. J. Marine Sci. Eng., 11(3), 540.

[18] German e4ships project reports on fuel cell maritime demos. Fuel Cells Bulletin (2016), Elsevier, Vol 2016, issue 10, page 5.

[19]https://www.argo-anleg.de/en/project/kanalschubboot-elektra/

[20] SFC Fuel Cells for US Army, Major Order from German Military. Fuel Cells Bull. 2012, 6, 4

[21] METHAPU Prototypes Methanol SOFC for Ships. Fuel Cells Bull. 2008, 5, 4–5. 2859(08)70190-1

[22] Lévai E, Matluka Á, Bereczky Á and Kft P(2018) Perspectives for the Use of Hydrogen as Fuel in Inland Shipping A Feasibility Study. Online article published by INDanube. https://indanube.eu/2018/11/06/handover-of-the-feasibility-study-perspectives-for-the-use-of-hydrogen-as-fuel-in-inland-shipping/

[23] Kumar D and Zare F(2019)A comprehensive review of maritime microgrids: System architectures, energy efficiency, power quality, and regulations. IEEE Access 7(1):67249-67277.

[24] PowerCell S3:30-125 kW PEM Technology. Product datasheet, Published by Bumhan Indutries Company.

[25] Bagherian Farahabadi, H., Rezaei Firozjaee, M., Mohammadpour Mir, A., Youneszadeh, R. (2023). Fuel Cell Power System Conceptual Design for Unmanned Underwater Vehicle. Hydrogen, Fuel Cell & Energy Storage. 10(1):33-50.

[26] Rahimi-Esbo, M., Firouzjaee, M. R., Farahabadi, H. B., & Alizadeh, E. (2024). Performance investigation of a standalone renewable energy system using response surface methodology (RSM): 4E analysis and multi-objective optimization. Energy Conversion and Management, 299, 117752.

[27] Power Cellution Marine System 200, product brochure, published by PowerCell Co, Sweden.

[28] Bristowe G and Smallbone A (2021). The key techno-economic and manufacturing drivers for reducing the cost of power-to-gas and a hydrogen-enabled energy system. Hydrogen, 2(3), 273-300.

[29] Sharpe B and Basma H(2022). A meta-study of purchase costs for zero-emission trucks. International council on clean energy transportation, (s 18).

[30] FCWave product brochure, Ballard Power Systems Co. 2021.

[31] HyPM HD 180 product brochure, Hydrogenics Co. 2012.

[32] MTU 6R0120 DS200 technical datasheet, Rolls-Royce Group, 2021.