Archive of SID

# کاربرد فن‌آوری پیل سوختی در کشتی‌ها و زیردریایی‌ها

**ابراهیم علیزاده[1]، داود تحویلدارزاده[2]**

تهران، لویزان، جنب دانشگاه شهید رجایی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

## چکیده

پیل‌های سوختی به عنوان منبع تولید انرژی الکتریکی در شناورها از پتانسیل عظیمی برخوردار هستند. از پیل‌های سوختی در کشتی‌های تجاری و نظامی می‌توان در مواردی همچون (۱) تأمین برق اضطراری؛ (۲) تولید انرژی الکتریکی، خصوصاً در آبها و بنادری که قوانین زیست محیطی سختی در آنها حاکم است؛ (۳) تولید بخشی از توان لازم برای ایجاد نیروی رانش در شرایط کاری خاص همانند حرکت با سرعت زیاد؛ (۴) تولید توان الکتریکی برای شبکه برق کشتی و در صورت نیاز برای ایجاد رانش در کشتی‌هایی که مجهز به سیستم رانش الکتریکی هستند (همانند شناورهای نظامی دارای سیستم یکپارچه الکتریکی). علاوه بر این پیل سوختی برای اجرای طرح سیستم پیشرانش‌مستقل‌ازهوا بر روی زیردریایی‌ها از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله به بررسی فعالیتهایی پرداخته می‌شود که تاکنون در سطح دنیا در زمینه به کارگیری سیستمهای مختلف پیل سوختی در کشتی‌های تجاری، نظامی و زیردریایی‌ها صورت پذیرفته است.

**کلمات کلیدی:** پیل سوختی، کشتی، زیردریایی، پیشرانش‌مستقل‌ازهوا

---

[1] عضو هیئت علمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر
[2] کارشناس مرکز طراحی و پژوهشهای دریایی

www.SID.ir

Archvie of SID

## ۱ـ مقدمه

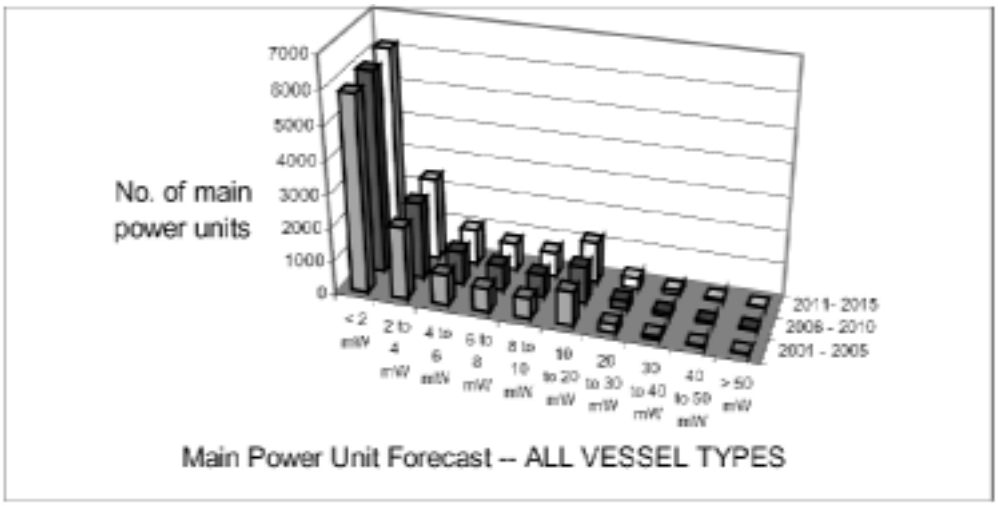
در بسیاری از کشتی‌ها دیزل‌ـژنراتورها، توان لازم برای نیروی محرکه و شبکه برق کشتی را تأمین می‌نمایند. در سال‌های اخیر دستیابی به منابع تولید انرژی‌های پاکیزه، افزایش آگاهی‌های عمومی در مورد آلاینده‌های زیست محیطی و هزینه‌های بالای سوخت‌های فسیلی باعث افزایش اهمیت استفاده از سیستم‌های جدید برای شبکه برق کشتی‌ها و یا سیستم‌های رانش آنها شده است. در این رابطه سیستم‌های پیل سوختی به دلیل برخورداری از پتانسیل زیاد برای توسعه و پیشرفت دارای نقشی اساسی هستند. همچنین مزایای استفاده از پیل‌های سوختی به عنوان سیستم‌های رانش‌مستقل‌ازهوا در زیردریایی‌های غیراتمی متداول در همان بررسی‌های اولیه مشخص شده است. در مورد کشتی‌ها خصوصاً کشتی‌های تجاری، استفاده وسیع از پیل‌های سوختی احتمالاً تا زمانی به تعویق خواهد افتاد که قیمت و قابلیت اطمینان فنی آنها با سیستم‌های رانش متداول برابری نماید.

بسیاری از کشورها در حال انجام مطالعات امکان‌سنجی استفاده از پیل‌های سوختی برای تولید توان الکتریکی بر روی شناورها هستند. این مطالعات در جهتی پیش رفته‌اند که امکان تبدیل سوخت دیزل دریایی و تولید توان الکتریکی با استفاده از تکنولوژی پیل سوختی میسر شود. پیل‌های سوختی بدلیل برخورداری از راندمان بالاتر قادر هستند با مصرف سوخت ٪۳۰ـ۲۵ کمتر از موتورهای دیزل دریایی یا توربین‌های گازی موجود، توان الکتریکی تولید نمایند. پیل سوختی با توجه به ویژگی‌های خاص خود به ویژه دانسیته توان بالا، راندمان بالا، صدا و لرزش و آلایندگی ناچیز، جایگاه مناسبی در صنایع دریایی یافته است و شناورهای متعددی نیز تاکنون به پیل سوختی مجهز گردیده‌اند.

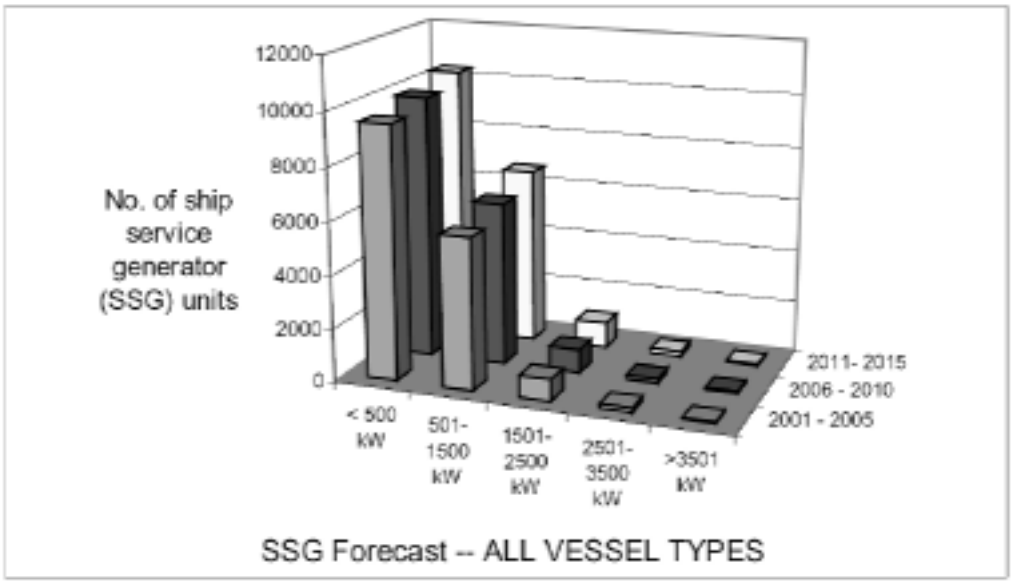
در اکثر شناورها نیروی لازم برای تأمین نیروی رانش کمتر از ۲ مگاوات (شکل ۱) و توان مورد نیاز برای مصارف داخلی کمتر از ۵۰۰ کیلووات (شکل ۲) است. چنانچه پیل سوختی با توان ۲۵۰ تا ۵۰۰ کیلووات بتواند به تولید تجاری برسد، می‌توان پیش‌بینی کرد که تا سال ۲۰۱۵، هزاران شناور سطحی به پیل سوختی مجهز گردند[۱].

www.SID.ir

Archvie of SID




**شکل ۱ـ پیش بینی تعداد واحدهای تولید توان جهت پیشرانش انواع شناورها تا سال ۲۰۱۵ [۱]**




**شکل ۲ـ پیش بینی تعداد ژنراتورهای تولید توان جهت مصارف داخلی انواع شناورها تا سال ۲۰۱۵ [۱]**

## ۲ـ کاربرد پیل سوختی در شناورهای سطحی

تلاش‌هایی که در راستای معرفی تجهیزات و یا سیستم‌هایی جدید به بازار صورت می‌پذیرند را می‌توان به فعالیت‌های زیر تقسیم‌بندی نمود: ۱ـ پروژه‌های آرمانی[۱] ۲ـ پروژه‌های پژوهشی و تکمیلی[۲] ۳ـ پروژه‌های راهبردی[۳] و

[1] Idealistic
[2] R&D
[3] Pilot

www.SID.ir

Archvie of SID

نهایی[1] ۴ـ تلاش در جهت بازاریابی. با توجه به دسته‌بندی فوق، استفاده از پیل‌های سوختی در کشتی‌های تجاری هنوز از مرحله پروژه‌های آرمانی خارج نشده است که دلیل عمده آن هزینه‌های بالای این سیستم می‌باشد. با این وجود هم اکنون در سراسر دنیا مطالعات جامعی در زمینه پیل‌های سوختی در حال انجام است. شناورهای سطحی نظامی، خصوصاً کشتی‌های دارای سیستم یکپارچه الکتریکی از لحاظ آمادگی برای نصب پیل سوختی بر روی آنها یک مرحله جلوتر قرار دارند.

## ۲ـ۱ـ نصب پیل‌های سوختی در کشتی‌های تجاری

مزایای استفاده از پیل سوختی در کشتی‌های تجاری عبارتند از: پتانسیل بالای این سیستم‌ها برای صرفه‌جویی در مصرف سوخت، کاهش آلایندگی گازهای خروجی، هزینه‌های عملیاتی کمتر، رانش آرام و بی‌صدا و بدون آلایندگی. اما تاکنون موضوع نصب پیل‌های سوختی بر روی کشتی‌های تجاری از مرحله مطالعات امکان‌سنجی و نمایشی فراتر نرفته است. دلایل اصلی این موضوع از یک طرف موقعیت بازار بوده که اجازه نمی‌دهد هزینه‌های بالایی صرف سیستم پیل سوختی شود و از طرف دیگر عدم دسترسی به مهارت‌های فنی سیستم پیل سوختی مانعی بر سر راه مالکان کشتی‌ها محسوب می‌شود. در ذیل به بررسی فعالیت‌هایی پرداخته شده است که در زمینه کاربری پیل سوختی در کشتی‌های تجاری در کشورهای مختلف انجام شده است:

کشور هلند در سال ۱۹۹۲ پیل‌های سوختی کربنات مذاب (MCFC) را به عنوان راه حلی برای سیستم رانش کشتی‌ها برای ۲۰ سال آینده در نظر گرفته است. سوخت پیشنهادی سیستم مورد نظر، سوخت دیزل حاوی مقادیر اندک گوگرد می‌باشد[۲].

کشور ایسلند که در حال حاضر ۲۵۰۰ شناور ماهیگیری فعال دارد، تصمیم گرفته است که تا سال ۲۰۳۰، تمامی شناورهای ماهیگیری خود را به پیل سوختی مجهز نماید. پیش‌بینی می‌شود که اولین نوع از این شناورها تا سال ۲۰۰۶، به پیل سوختی مجهز گردد[۳].

کشور آلمان در سال ۱۹۹۵ در یک طرح مطالعاتی مشترک با حضور شرکت‌های Ballard کانادا و HDW آلمان، امکان استفاده از پیل‌های سوختی در کشتی‌های تجاری همراه با سوخت‌های مناسب را بررسی نمود. نتایج حاصل از

[1] Demonstration

www.SID.ir

Archvie of SID

این بررسی‌ها نشان دادند که استفاده از پیل‌های سوختی در موارد مشخص زیر مناسب است: (۱) تأمین برق اضطراری کشتی‌های مسافربری و فری‌ها (۲) تولید انرژی الکتریکی برای مصارف روزمره سرنشینان، به ویژه در بنادری که قوانین زیست‌محیطی سختی در آنها حاکم است. (۳) تولید انرژی الکتریکی یا توان لازم برای ایجاد رانش در کشتی‌هایی که نیاز به کاهش صدا دارند، همانند کشتی‌های مسافربری و شناورهای تحقیقاتی (۴) تأمین نیروی رانش در کشتی‌های حامل هیدروژن یا متان، همانند تانکرهای حامل هیدروژن مایع و کشتی‌های LNG.

استفاده از پیل‌های سوختی پلیمری همراه با هیدروژن خالص و هوا تنها برای کشتی‌هایی مناسب است که حامل محموله هیدروژن هستند. زیرا در غیر اینصورت بدلیل چگالی انرژی حجمی اندک هیدروژن، به مخازن بزرگ و حجیمی برای ذخیره‌سازی آن و در نتیجه پیش‌بینی‌های امنیتی بیشتری برای آن لازم و ضروری می‌باشد[۴]. در کشور آلمان، شرکت Mussel-Fishers در سال ۱۹۹۶ تصمیم گرفت که ناوگان کشتی‌های ماهیگیری خود را به سیستم‌های رانشی مجهز نماید که سازگاری بیشتری با محیط‌زیست دارند. یکی از راه حل‌های این مسأله استفاده از پیل‌های سوختی بجای دیزل‌ـژنراتورهای متداول است[۵]. همچنین در آلمان کشتی گشتی‌ـتفریحی MS Weltfrieden به عنوان پروژه‌ای برای شرکت در نمایشگاه Expo 2000 به سیستم رانش پیل سوختی پلیمری مجهز شده است. پیل سوختی مورد نظر، توان ۱۰ کیلووات را تولید کرده و هیدروژن مورد نیاز در دو مخزن هیدرید فلزی با ظرفیت کلی ۲۷ $N\,m^3$ نگهداری می‌شود. در سال ۲۰۰۰ نیز شناوری به نام Hydra به پیل سوختی قلیایی ۵ کیلووات شرکت ZeTek Power مجهز شده است که سوخت مورد نیاز آن از یک مخزن هیدرید فلزی به حجم ۰/۲۵ مترمکعب تأمین می‌شود. شرکت ZeTek همچنین بر روی پیل‌های سوختی جهت استفاده در قایق‌های کوچک و تندروی ماهیگیری در ایسلند کار می‌کند. شناور Hydra، یک شناور گشتی‌ـتفریحی می‌باشد که برای گشت در آب‌های کم عمق و عبور از زیر پل‌های کوتاه به وسیله شرکت Etaing طراحی و ساخته شده است و ظرفیت حمل ۲۲ مسافر را داراست. از این قایق جهت حمل هیأت‌های نمایندگی در خلال نمایشگاه Expo 2000 در شهر هانوور استفاده گردید[۶].

کشور ایتالیا در سال ۱۹۹۸ اقدام به نصب یک سیستم رانش هیبریدی بر روی یک کشتی مسافربری نمود. این سیستم متشکل بود از یک سیستم پیل سوختی پلیمری ۴۰ کیلووات ساخت شرکت Nuvera Fuel Cells Europa، مخزن هیدروژن مایع و یک سری باطری اسیدـسرب ۱۰۰ آمپرـساعت. سوخت مورد نیاز پیل سوختی از مخزن

www.SID.ir

Archvie of SID

هیدروژن مایع تأمین شده و سیستم رانش هیبریدی این شناور، ماکزیمم توان ۱۰۰ کیلووات را برای یک موتور آسنکرون ۱۲۰ کیلوواتی تأمین می‌کند. برد شناور حدود ۳۰۰ کیلومتر بوده و قابلیت حمل ۹۰ مسافر را داراست. تست‌های نهایی این شناور در تابستان سال ۱۹۹۸ در شهر Lago Maggiore انجام شد[۷].

در کشور ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۹۸ گزارش‌هایی در رابطه با انجام فعالیت‌هایی در نیروی دریایی، گارد ساحلی ایالات متحده (USCG) و اداره کل دریانوردی (MARAD) در زمینه پیل‌های سوختی انتشار یافته است[۸]. یک سری فعالیت‌های تحقیقاتی در رابطه با کاربرد پیل‌های سوختی برای شبکه برق یا سیستم رانش کشتی‌ها توسط یک گروه کاری مشترک تحت عنوان «توسعه فن‌آوری پیل سوختی جهت کاربردهای دریایی» بطور خلاصه گزارش شده است. این گروه کاری از نمایندگانی از ادارات غیرنظامی و نظامی همانند USCG، MARAD، اداره کل بین‌المللی اقیانوس و اتمسفر و فرماندهی سیستم‌های ناوگان دریایی تشکیل شده است. هدف این گروه توسعه سیستم‌های پیل سوختی برای کاربردهای دریایی با توجه به شرایط مختلف آن می‌باشد. به عنوان نمونه به فعالیت‌های تحقیقاتی زیر می‌توان اشاره نمود:

- انتخاب کشتی Vindicator از نوع کشتی‌های کلاس TAGOS-1 متعلق به گارد ساحلی آمریکا، برای نصب سیستم رانش پیل سوختی. این کشتی دارای یک سیستم قوای محرکه یکپارچه برقی متشکل از ۴ ژنراتور گازوئیلی ۶۰۰ کیلوواتی کاترپیلار و دو پروانه با گام ثابت است که هر کدام دارای موتوری با قدرت ۸۰۰ اسب بخار و با مصرف جریان برق *DC* می‌باشند. هدف از این پروژه، تعویض دیزل-ژنراتورهای شناور با یک پیل سوختی کربنات مذاب ۲/۵ مگاواتی با ابعاد تقریباً یکسان و دارای مبدل تبدیل سوخت دیزل بود. سیستم مورد نظر که شامل چهار مدول *kW* ۶۲۵ بود، توسط شرکت تحقیقات انرژی ساخته شد. هر مدول *kW* ۶۲۵ متشکل می‌شد از دو سری پیل سوختی که بصورت موازی ولتاژ ۴۵۰ تا ۶۰۰ ولت برق *DC* را تأمین می‌نمودند. سیستم مبدل سوخت از سوخت گوگردزدایی شده استاندارد *NATO F-76* استفاده نموده و آنرا به گاز متان غنی شده تبدیل می‌نماید.
- شرکت MARAD از سال ۱۹۹۸ تحقیقات در زمینه کاربرد سیستم رانش پیل سوختی در یک کشتی سوخت‌رسان در مسیر نیویورک-بوستون را آغاز نموده است. این شناور یک کشتی کانتینربر دیزل الکتریک با ظرفیت ۴۳۴ کانتینر بوده و کل توان مورد نیاز آن ۵۴۴۰ کیلووات می‌باشد. با توجه به کانتینربر بودن این کشتی نیازی به مخازن ذخیره سوخت ندارد و از ذخیره سوخت CNG موجود در کانتینرها که توسط این کشتی حمل می‌شود

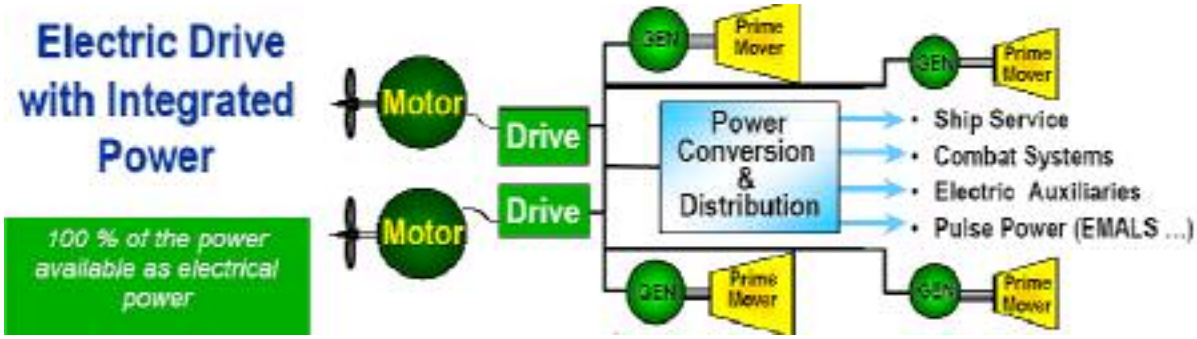
www.SID.ir

Archvie of SID

استفاده می‌کند. مزیت دیگری که می‌توان برای این شناور نام برد آنست که سوخت CNG حدود ۳۰ درصد ارزانتر از سوخت دیزل می‌باشد. تنها محدودیت این پروژه، عمر محدود مورد انتظار از پیل سوختی کربنات مذاب این کشتی است که برای کاربردهای دریایی، ۵ سال برآورد شده است.

در سال‌های اخیر استفاده از قایق‌های پیل سوختی در دریاچه‌های حفاظت شده اروپا مورد توجه قرار گرفته است. در سوئیس نیز تاکنون چندین قایق تولید شده‌اند که نیروی پیشرانه آنها بوسیله پیل‌های سوختی تأمین می‌شود تا قابلیت استفاده از این فن‌آوری در شناورهای دریایی را اثبات نمایند. در حال حاضر برنامه نصب پیل سوختی بر روی شناور Hydroxy 2000 در حال اجراست. این شناور که از نوع کاتاماران به ظرفیت ۶ نفر است، دارای ۷ متر طول و ۲/۵ متر عرض و سرعت $Km/h$ ۱۵ـ۱۰ می‌باشد و قرار است با یک سری پیل سوختی پلیمری $kW$ ۲ شرکت PSI تجهیز شود[۹].

در ژاپن از ۲ پیل سوختی پلیمری با توان ۵۰۰ کیلووات برای تأمین توان مورد نیاز یک شناور تجاری با وزن مرده ۱۵۰۰ تن استفاده شده است. سوخت مورد نیاز این پیل سوختی از طریق تبدیل متانول تأمین می‌شود. همچنین طراحی مفهومی سیستم مورد نظر برای شناور گارد ساحلی با وزن خالص ۴۹۹ تن انجام شده است.




**شکل ۳ـ عملکرد سیستم یکپارچه الکتریکی در شناورهای نظامی**

## ۲ـ۲ـ نصب پیل‌های سوختی در شناورهای نظامی

در زمینه شناورهای سطحی نظامی، فعالیت‌های مطالعاتی و اجرایی در اروپا، ایالات متحده آمریکا و کانادا بیشتر بر روی کشتی‌های دارای سیستم یکپارچه الکتریکی[1](AES) متمرکز شده است. شناورهای دارای سیستم یکپارچه الکتریکی به شناورهایی اطلاق می‌شود که دارای سیستم تولید انرژی الکتریکی یکپارچه بوده و انرژی الکتریکی

[1]- All-Electric Ship

www.SID.ir

Archvie of SID

تولیدی، توسط یک سیستم توزیع به بخشهای مختلف پیشرانش، تسلیحات و شبکه برق عمومی کشتی منتقل می‌شود (شکل ۳). به غیر از کشتی‌های تجاری که سیستم‌های پیشرانش کاملاً الکتریکی در آنها متداول نیست، این نوع پیشرانش بطور جدی بر روی فری‌گیت‌ها و دیگر کشتی‌های نظامی بزرگتر تا مراحل بعدی اجرا نخواهد شد. در حالی‌که در اروپا و کانادا پیل سوختی پلیمری و سیستم مبدل سوخت دیزل معمولی به عنوان مولد انرژی در نظر گرفته شده‌اند، در آمریکا فعالیت‌ها بر روی پیل‌های سوختی کربنات مذاب تولیدی شرکت تحقیقات انرژی متمرکز شده است.

در هلند یک سری فعالیت‌های مطالعاتی در مورد کشتی‌های دارای سیستم یکپارچه الکتریکی بین سال‌های ۱۹۹۲ و ۱۹۹۸ انجام شده و نتایج آن انتشار یافته است. با استفاده از سیستم‌های پیل سوختی، حدود ٪۳۰ـ۲۵ صرفه‌جویی در مصرف سوخت در مقایسه با دیزل‌ـژنراتورها و یا توربین‌های گازی پیش‌بینی می‌شود. .مزایای پیل سوختی عبارتند از: عملکرد قابل قبول تحت بارگذاری جزئی، نیاز به تعمیر و نگهداری ناچیز (بدلیل عدم وجود قطعات متحرک)، سر و صدا و ارتعاش ناچیز (انتشار علائم صوتی ناچیز در آب دریا)، حرارت گازهای خروجی پایین (انتشار علائم مادون قرمز ناچیز، IR)، آلایندگی ناچیز و طراحی مدولار (عدم تمرکز تجهیزات)[۱۰].

در بریتانیای کبیر، اداره بررسی و تحقیق وزارت دفاع در حال ارزیابی کاربرد پیل‌های سوختی پلیمری در کشتی‌های آینده نیروی دریایی سلطنتی می‌باشد. این طرح شامل تأمین انرژی الکتریکی با توان ۱ تا ۲ مگاوات برای شبکه برق کشتی از پیل‌های سوختی پلیمری در طی عملیات بندری و لنگراندازی بوده است. پیل‌های سوختی پلیمری بدلیل برخورداری از چگالی انرژی بالاتر، سادگی سیستم و تکنولوژی پیشرفته انتخاب شده‌اند. در راستای اجرای این طرح در سال ۱۹۹۸، وزارت دفاع انگلیس قرارداد ساخت یک شناور تحقیقاتی با نام Rv-Triton را امضاء کرد. این شناور یک تریماران بوده و کار ساخت آن در پاییز سال ۲۰۰۰ پایان یافت. این شناور قابلیت آنرا دارد که پیل‌های سوختی پلیمری بر روی آن نصب و مورد آزمایش قرارگیرند[۱۱].

کانادا فعالیت خود را بر روی توسعه تکنولوژی پیل سوختی پلیمری از اواسط سال ۱۹۸۰ آغاز نموده است. وزارت دفاع ملی کانادا، قرارداد طراحی و ساخت یک پیل سوختی پلیمری ۴۰ کیلوواتی جهت نصب روی یک شناور را با شرکت کانادایی Ballard به امضاء رسانده است. همچنین نصب یک مبدل سوخت جهت تبدیل گازوئیل به هیدروژن به منظور تأمین سوخت مورد نیاز پیل سوختی در فاز بعدی به اجرا در خواهد آمد[۷].

www.SID.ir

Archvie of SID

در آلمان یک سری مطالعات امکان‌سنجی در سطح ملی و بین‌المللی توسط گروه مشورتی صنعتی ناتو[1] (NIAG) و مشارکت بلند مدت دفاعی اروپا[2] (EUCLID) زیر نظر گروه تسلیحات اروپای غربی[3] صورت پذیرفته است[۱۲].

نیروی دریایی ایالات متحده در سال ۱۹۹۵ مطالعاتی را در رابطه با ارزیابی تأثیر کاربرد تکنولوژی‌های مختلف پیل سوختی (پیل سوختی پلیمری، پیل سوختی کربنات مذاب، پیل سوختی اسید فسفریک، پیل سوختی اکسید جامد) در شبکه برق و سیستم رانش کشتی، بر طراحی و عملکرد شناورهای نظامی آینده همانند رزمناوها و کروت‌ها انجام داد[۱۳]. نتایج این بررسی‌ها در اواخر سال ۱۹۹۷ منجر به اجرای یک طرح سه مرحله‌ای توسط اداره تحقیقات دریایی با مشارکت فرماندهی سیستم‌های ناوگان دریایی شد. هدف از اجرای این طرح بررسی امکان توسعه تجاری تکنولوژی پیل‌های سوختی جهت کاربردهای دریایی و امکان کاربرد سوخت‌های دریایی در آنها می‌باشد. فاز ۱ شامل طراحی مفهومی یک پیل سوختی ۲/۵ مگاواتی به عنوان سیستم رانش، فاز ۲ طراحی و ساخت یک مدل با مقیاس ۵ /۰ مگاوات برای انجام آزمایش در خشکی و فاز ۳ شامل آزمایش سیستم با استفاده از سوخت دیزل *NATO F-76* (حاوی حداکثر ۱ درصد گوگرد) تحت شرایط کاری دریا می‌باشد[۱۴].

## ۳ـ کاربرد پیل سوختی در شناورهای زیرسطحی

زیردریایی‌های معمول مجهز به سیستم رانش دیزل‌ـالکتریک هستند که در هنگام عملیات در زیر آب انرژی لازم برای رانش و مصارف داخلی زیردریایی را از انرژی ذخیره شده در باتری‌های اسیدـسرب تأمین می‌نمایند. اما ظرفیت محدود باطری‌ها باعث کاهش شعاع عملیاتی زیردریایی می‌شود. این باطری‌ها در طی مدتی که زیردریایی در حالت اسنورکل قرار دارد، توسط دیزلـژنراتورها شارژ می‌شوند. در این حالت زیردریایی به میزان زیادی در معرض خطر ردیابی و انهدام توسط دشمن قرار دارد. بنابراین توسعه یک سیستم رانش مستقل از هوا (AIP) که زمان باقی ماندن در زیر آب را افزایش دهد، ضروری است. یک سیستم رانش مستقل از هوا جهت نصب بر روی زیردریایی باید دارای شرایط زیر باشد: (۱) برد عملیاتی زیاد در زیر آب بدون نیاز به آمدن به سطح آب (۲) سر و صدای کم (۳) اثرات مغناطیسی ناچیز (۴) انتقال حرارت اندک با آب دریا

بدین منظور سیستم‌های مختلفی مورد بررسی قرارگرفته‌اند مانند سیکل دیزل مداربسته که در آلمان به مدت ۲۵

[1]- NATO Industrial Advisory Group
[2]- European Cooperation Long-Term in Defense
[3]- Western European Armaments Group

www.SID.ir

Archvie of SID

سال به کار گرفته شد، سیکل استرلینگ و سیکل توربین گاز و بخار مداربسته. در این میان، فن‌آوری پیل سوختی در سه دهه گذشته در کشورهای صنعتی در کانون توجهات قرار گرفته است. برخی از مهم‌ترین مزایای استفاده از پیل سوختی در زیردریایی به قرار زیر است:

۱ـ به دلیل راندمان بالای پیل سوختی، مصرف سوخت کاهش یافته، برد زیر آب افزایش می‌یابد.

۲ـ کاهش امکان ردیابی، به دلیل آنکه (الف) پیل سوختی دارای قطعات متحرک نیست و عدم تولید صدا و ارتعاش موجب عدم امکان ردیابی به وسیله سونار می‌گردد. (ب) چون پیل سوختی مورد استفاده در زیردریایی، معمولاً از نوع دماپایین است، بنابراین توسط ردیاب‌های حرارتی، قابل ردگیری نیست. (ج) پیل سوختی در صورت مصرف اکسیژن و هیدروژن، هیچ نوع آلایندگی تولید نمی‌کند و توسط ردیاب‌های شیمیایی نیز قابل ردگیری نیست.

۳ـ کارکرد مستقل از عمق

۴ـ قابلیت اطمینان بالا و هزینه تعمیر و نگهداری کم.

**آمریکا**

تعداد زیادی از زیردریایی‌های نظامی آمریکا، با انرژی اتمی کار می‌کنند. برخی گزارشات از محافل علمی مرتبط با وزارت دفاع آمریکا حاکی از استراتژی بکارگیری سیستم پیل سوختی در زیردریایی‌های تحقیقاتی و نجات این کشور می‌باشد. اما تاکنون اطلاعات زیادی در مورد اقدامات آمریکا در زمینه بکارگیری پیل سوختی در زیردریایی‌های اتمی ارائه نشده است. کشور ایالات متحده با وجود ناوگان زیردریایی‌های هسته‌ای قدرتمند خود، از تجهیز کشورهای مختلف به زیردریایی‌های دارای سیستم پیشرانش مستقل از هوا به شدت هراس دارد و آن را تهدیدی برای حفظ اقتدار خود در آب‌های ساحلی کشورهای مختلف می‌داند. هم‌اکنون این سوال در ذهن آمریکایی‌ها شکل گرفته است که آیا زیردریایی‌های اتمی خود را در آینده به سیستم‌های رانش مستقل از هوای غیرهسته‌ای تجهیز نمایند و یا اینکه همچنان با صرف هزینه‌های هنگفتی بالغ بر ۱/۶ بیلیون دلار در زیردریایی کلاس جدید ویرجینیا، از سیستم پیشرانش هسته‌ای استفاده نمایند.

نیروی دریایی آمریکا در سال ۱۹۷۸، زیردریایی تحقیقاتی Deep Quest را به پیل سوختی قلیایی ۳۰ کیلووات مجهز و آزمایشات لازم بر روی آن انجام گرفته است. پیل سوختی مورد نظر توسط سازمان فضایی آمریکا (NASA) طراحی و ساخته شده است. این زیردریایی با استفاده از سیستم رانش پیل سوختی خود حدود ۵۰ عملیات را با

www.SID.ir

Archvie of SID

موفقیت به انجام رساند. بعد از آن پیل سوختی قلیایی ۳۰ کیلوواتی سازمان فضایی آمریکا (NASA) برای انجام آزمایشات بیشتر بر روی زیردریایی نجات آبهای عمیق (DSRV) که برای حمل بر روی یک زیردریایی هسته‌ای طراحی شده بود، نصب گردید. باتری‌های این زیردریایی توسط زیردریایی مادر شارژ می‌شدند. بنابراین توان اولیه آن با نصب پیل سوختی بیشتر از میزانی بود که برای عملیات نجات مورد نیاز است با این حال هنوز سؤالاتی در مورد قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم در عملیات واقعی نجات مطرح بود. از جمله آنکه مخازن پرفشار هیدروژن و اکسیژن مورد استفاده به عنوان سوخت پیل سوختی قلیایی باید در زیردریایی مادر ذخیره و سپس برای سوخت‌گیری به DSRV منتقل می‌شدند که با افزایش مقادیر این مخازن باید سیستمهای جنگ‌افزاری زیردریایی مادر حذف می‌شدند. به عبارت دیگر پیل سوختی قلیایی بدلیل افزایش مدت مأموریت زیردریایی DARV از نظر فنی بسیار مناسب بود اما احتیاجات مأموریتی آنرا تأمین نمی‌نمود[۱۵]. آمریکا تعداد زیادی از شناورهای زیرسطحی مانند UUVها، AUVها و زیردریایی‌های تحقیقاتی و نجات خود را به پیل سوختی مجهز کرده است. شرکت Treadwell، اقدام به طراحی و ساخت یک سیستم پیل سوختی یک کیلوواتی جهت نصب روی UUV کرده است. آمریکا، در سال ۲۰۰۱ یک AUV طراحی و ساخته است که این AUV از پیل سوختی پلیمری ۴ کیلووات استفاده می‌کند. قرار است یک سیستم هیبرید شده متشکل از پیل سوختی اکسید جامد و یک میکروتوربین نیز بر روی این AUV آزمایش گردد[۱۶].

**کانادا**

وزارت دفاع ملی کانادا از اواسط سال ۱۹۸۰ توسعه تکنولوژی پیل‌های سوختی پلیمری را در برنامه خود قرار داده است. برنامه طراحی مفهومی و ساخت سیستم رانش مستقل از هوای پیل سوختی پلیمری برای استفاده در زیردریایی‌ها با امضا قرارداد طراحی، ساخت و آزمایش یک پیل سوختی پلیمری ۴۰ کیلووات با شرکت کانادایی بلارد به اجرا در آمد. وزارت دفاع ملی کانادا هم‌اکنون، درصدد تجهیز زیردریایی‌های نظامی خود به پیل سوختی است. زیردریایی‌های مورد نظر از کلاس ویکتوریا بوده و سیستم رانش معمول آنها دیزل-الکتریک است. بر این اساس، وزارت دفاع ملی کانادا برنامه طراحی و ساخت یک پیل سوختی پلیمری ۳۰۰ کیلوواتی را با ارزش ۷۵ میلیون دلار به شرکت بلارد پیشنهاد داده است که در صورت تصویب و اجرای طرح، این زیردریایی می‌تواند به مدت ۳۰ روز با سرعت ۴ گره دریایی در زیر آب حرکت کند. وزارت دفاع ملی کانادا امیدوار است که سیستم رانش جدید بلارد توان

www.SID.ir

Archvie of SID

لازم را برای جایگزینی کامل با دیزل ژنراتورهای زیردریایی کلاس ویکتوریا فراهم نماید. سیستم پیل سوختی شرکت بلارد شبیه به پیل‌های سوختی آلمانی و روسی کار می‌کند با این تفاوت که هیدروژن مورد نیاز آن بجای مخازن هیدرید فلزی از یک مخزن حاوی متانول تأمین می‌شود[۱۷].

**سوئد**

تلاش سوئدی‌ها در زمینه پیل سوختی در دهه ۱۹۶۰ با Asen (ABB فعلی) شرکتی که پیل‌های سوختی قلیایی را برای کاربری در زیردریایی‌ها تولید می‌کرد، آغاز شد. هم‌اکنون، شرکت Kockumis که تولیدکننده زیردریایی است و در حال حاضر بخشی از شرکت کشتی‌سازی آلمانی HDW محسوب می‌شود در حال اجرای پروژه‌ای برای نیروی دریایی سوئد، دانمارک و نروژ جهت تولید نسل جدیدی از زیردریایی‌ها است. در میان زیردریایی‌های در حال توسعه مختلف، احتمالاً نمونه‌ای قرار خواهد داشت که تولید الکتریسیته و آب آشامیدنی آن هر دو با استفاده از پیل سوختی انجام خواهد شد[۷].

**روسیه**

با توجه به تجربیاتی که از ساخت و نصب پیل سوختی قلیایی بر روی شاتل‌ها در روسیه وجود داشته است، توجه این کشور معطوف به استفاده از پیل سوختی قلیایی در زیردریایی‌ها بوده است. برخی از اقداماتی که در روسیه در زمینه استفاده از پیل سوختی در شناورهای زیرسطحی انجام گرفته است، عبارتند از:

نسل اول سیستم AIP روسیه با نام Kristall-20 در سال ۱۹۹۱ بر روی زیردریایی S-273 نصب گردید که این سیستم از یک پیل سوختی قلیایی با توان ۱۳۰ کیلووات تشکیل می‌شد و سوخت آن نیز از مخازن هیدروژن و اکسیژن مایع تأمین می‌شد. اما زیردریایی مذکور از نظر اندازه بزرگ بوده و دارای برخی مشکلاتی از جمله خطر انفجار بود. نسل دوم سیستم AIP روسیه با استفاده از تجربیات سیستم نسل اول به تازگی توسط شرکت SKBK با نام Kristall-27E طراحی و ساخته است. قرار است این سیستم بر روی زیردریایی کلاس Amur-1650 روسیه که هم اکنون در کارخانه کشتی‌سازی Admirateiskiye Verfi در حال ساخت است، نصب شود. بر اساس تخمین‌های انجام شده Kristall-27E زمان ماندن زیر آب زیردریایی کلاس Amur را از ۱۵ روز به ۴۵ روز در سرعت اقتصادی افزایش می‌دهد. طراحی سیستم Kristall-27E به گونه‌ای است که قابلیت نصب روی زیردریایی کلاس کیلو این کشور را نیز داراست. نسل سوم این سیستم‌ها نیز هم اکنون در شرکت SKBK در حال توسعه است که برد زیر آب

www.SID.ir

Archvie of SID

زیردریایی‌ها را تا ۶ برابر مقدار فعلی (۹۰ـ۶۰ روز) افزایش می‌دهد. پیش‌بینی می‌شود که تجهیز زیردریایی‌های معمول به این نوع پیل سوختی، بعد از سال ۲۰۱۰ صورت گیرد. شرکت J. P. Kenny روسیه، ۱۰ فروند زیردریایی توریستی مجهز به پیل سوختی اسید فسفریک ساخت شرکت روسی Energia Space Corporation ساخته است. شرکت Lazurit Central Design، اقداماتی را در زمینه تجهیز یک زیردریایی دیزل‌ـالکتریک به پیل سوختی انجام داده است و نتایج آزمایش سیستم مربوطه، حاکی از این است که در صورت نصب این سیستم بر روی زیردریایی، برد زیر آب زیردریایی به میزان ۵ تا ۱۰ برابر افزایش خواهد یافت.

اخیراً کشور چین سفارش ساخت ۸ فروند زیردریایی نوع 636 Kilo Class را به روسیه داده است. این زیردریایی‌ها احتمالاً مجهز به سیستم رانش مستقل از هوا (AIP) هستند. همچنین چینی‌ها برای انتقال تکنولوژی ساخت این نوع زیردریایی‌ها با روسیه مذاکره کرده‌اند[۱۸].

**آلمان**

در سال ۱۹۷۰ بر اساس ارزیابی صنایع زیردریایی آلمان و وزارت دفاع آلمان مشخص شد که پیل سوختی، بهینه‌ترین راه‌حل برای استفاده در زیردریایی می‌باشد. پیل سوختی پلیمری توسط وزارت دفاع آلمان به عنوان سیستم رانش زیردریایی کلاس ۲۰۸ آلمان انتخاب گردید. اما پیل سوختی در دهه هفتاد به اندازه کافی پیشرفت نکرده بود و پروژه در سال ۱۹۷۹ متوقف شد. در طراحی مفهومی زیردریایی کلاس ۲۰۸، مشخصات فنی پیل سوختی پلیمری تدوین شد و پیشرفت لازم در این تکنولوژی با انتقال تکنولوژی شرکت جنرال الکتریک آمریکا به شرکت زیمنس توسط وزارت دفاع آلمان آغاز گردید. در سال ۱۹۸۰ تولید اولین تجهیزات پیل سوختی برای زیردریایی، توسط کنسرسیومی متشکل از شرکت کشتی‌سازی HDW، بخش طراحی شرکت IKL و شرکت بازرگانی Ferrostaal آغاز شده بود. تحقیقات پیشین نشان داده بودند که پیل سوختی پلیمری هنوز به توسعه لازم دست نیافته است لذا در آن زمان که پیل سوختی پلیمری در حال توسعه بود از پیل سوختی قلیایی جهت انجام آزمایشات اولیه استفاده گردید. بدلیل آنکه پیل سوختی قلیایی و پلیمری کارایی مشابهی در زیردریایی داشتند. سیستم مورد آزمایش تشکیل شده بود از ۱۶ مدول ۶/۲ کیلووات که توسط شرکت زیمنس ساخته شد. آزمایش مدول‌های مختلف پیل سوختی قلیایی با توان‌های ۳/۵، ۶/۲ و ۷ کیلووات و متناسب با ولتاژ زیردریایی‌های مختلف دارای باتری‌های اسیدـ سرب، نشانگر انعطاف‌پذیری بالای مدول‌های پیل سوختی بود.

www.SID.ir

Archvie of SID

یک پیل سوختی قلیایی ۱۰۰ کیلووات در یک نیروگاه آزمایشی واقع در ساحل در کارخانه کشتی‌سازی HDW از سال ۱۹۸۳ تا ۱۹۸۵ و بعداً به مدت ۹ ماه در طی سال‌های ۱۹۸۹ـ۱۹۸۸ در سفرهای دریایی بر روی زیردریایی کلاس ۲۰۵ بنام U1 مورد آزمایش قرار گرفت و بدین ترتیب امکان کارکرد پیل سوختی و مخازن هیدروژن و اکسیژن در شرایط زیردریایی به اثبات رسید. در این پروژه بر روی اصول ایمنی و رعایت آنها تأکید زیادی شده بود. نتایج این آزمایشات بسیار موفقیت‌آمیز و رضایت‌بخش بود، بگونه‌ای که نیروی دریایی آلمان تصمیم گرفت طراحی مفهومی زیردریایی جدید کلاس ۲۱۲A نیز آغاز شود. با وجود عملکرد بسیار خوب سیستم پیل سوختی که به دلیل قابلیت اطمینان بالای سیستم، امکان کاهش زمان آزمایش‌ها حتی تا کمتر از ۳ ماه را نیز میسر کرده بود اما این پروژه می‌بایست کنار گذاشته شود چون زیردریایی به ناتو اختصاص داشت و به برخی از استانداردهای لازم زیردریایی (همانند مقاومت در برابر شوک‌های وارده، مشکل تأمین گازهای واکنش‌گر (سوخت و اکسیدکننده) و قطعات یدکی، مستندسازی و غیره) دست نیافته بود. پس از آن شرکت TNSW فرصت یافت تا سیکل دیزل مداربسته خود را بر روی همان زیردریایی آزمایش کند چون برای جاسازی سیستم پیل سوختی بدنه سخت آن بلندتر شده بود و امکان جاسازی کل سیستم دیزل مداربسته در آن وجود داشت.

از سال ۱۹۸۰ وزارت دفاع آلمان تصمیم گرفت که مدول‌های ویژه پیل سوختی پلیمری برای کاربری در زیردریایی توسط شرکت زیمنس توسعه بخشد. به موازات پیشرفت پیل سوختی شرکت زیمنس که با استفاده از اکسیژن و هیدروژن کار می‌کرد، آزمایش‌هایی نیز بر روی یک مدول پیل سوختی هوا‌ـتنفسی شرکت بلارد در سال ۹۷ـ۱۹۹۶ توسط شرکت HDW در شهر Kiel انجام شد. سیستم مورد نظر به دلیل اشغال فضا و وزن زیاد کنار گذاشته شد. بازده کمتر و طراحی پیچیده از دیگر معایب سیستم فوق بودند.

www.SID.ir

Archvie of SID

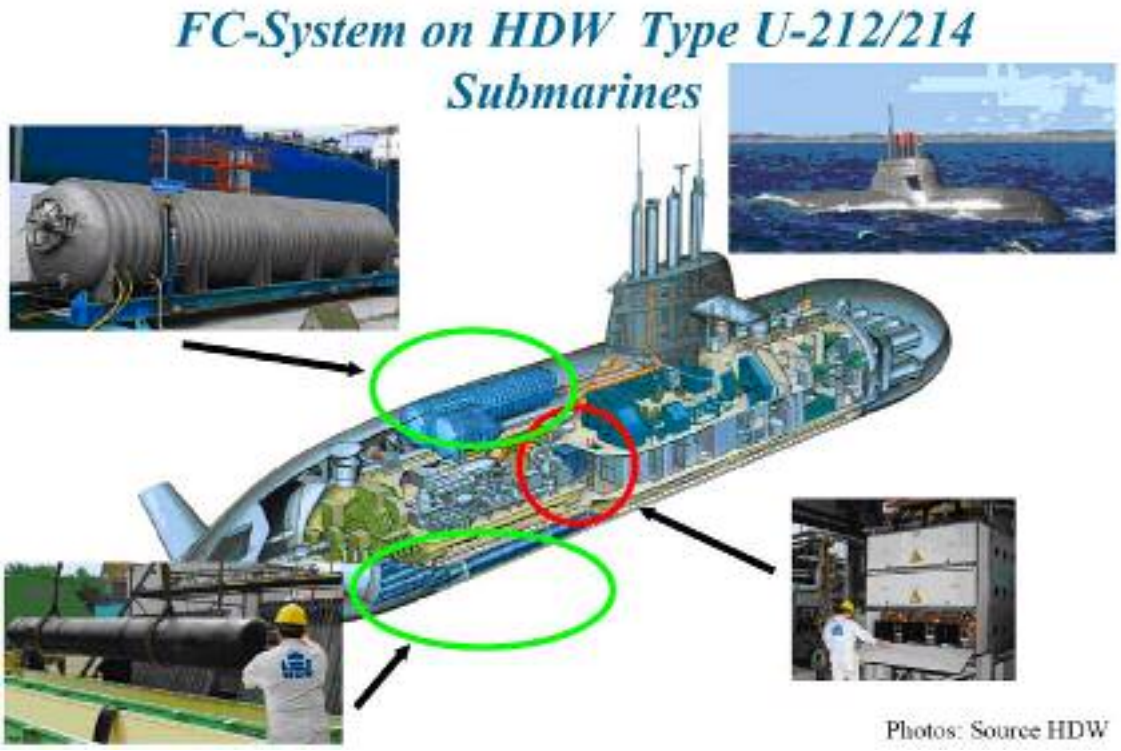
**شکل ۴ـ مراسم تحویل اولین زیردریایی آلمانی ۲۱۲A مجهز به پیل سوختی پلیمری با نام جدید U31**

اولین زیردریایی ۲۱۲A مجهز به پیل سوختی پلیمری با نام جدید U31 در ژوئیه ۲۰۰۳ در دریای بالتیک به آب انداخته شد و در حال حاضر در حال آزمایش در دریا می‌باشد. شرکت زیمنس تکنولوژی سیستم پیل سوختی پلیمری را تحت قراردادی با وزارت دفاع آلمان و با همکاری شرکت HDW با ساخت یک پیل سوختی ۳۰۰ کیلووات، توسعه داده است. توان ۳۰۰ کیلووات این سیستم پیل سوختی از ۹ پیل سوختی پلیمری که توان هر کدام بین ۳۰ تا ۵۰ کیلووات می‌باشد، تأمین می‌شود. به منظور افزایش ایمنی سیستم، مدول‌ها در محفظه‌های مقاوم در برابر فشار قرار داده شده‌اند. حجم آزاد محفظه نیز با گاز خنثی پر شده و یک حسگر نشت گاز نیز در آن جاسازی شده است. بر اساس تجربه مدول‌های ۵۰ـ۳۰ کیلووات کلاس ۲۱۲A، شرکت زیمنس یک مدول پیل سوختی پلیمری ۱۲۰ کیلووات پیشرفته را ساخته است. به سفارش نیروی دریایی یونان و کره جنوبی دو عدد از این مدول‌ها در یک سیستم پیل سوختی ۲۴۰ کیلووات، بر روی زیردریایی‌های کلاس ۲۰۹ و کلاس ۲۱۴ نصب خواهند گردید. این پیل سوختی همچنین برای زیردریایی کلاس ۲۱۲B آلمان نیز در نظر گرفته شده است. کارایی مدول ۱۲۰ کیلووات جدید تقریباً چهار برابر مدول‌های پیشین با همان وزن و ابعاد می‌باشد.

www.SID.ir

Archvie of SID

تاکنون در تمامی سیستم‌های پیل سوختی زیردریایی، هیدروژن بصورت جذب شده در هیدرید فلز و اکسیژن بصورت مایع در مخازنی از جنس بدنه سخت زیردریایی نگهداری می‌شوند. سیستم‌های ذخیره‌سازی هیدروژن و اکسیژن نیز همانند مدول‌های پیل سوختی و سیستم‌های مربوطه در اوایل سال ۱۹۹۰ به مرحله تولید انبوه رسیده‌اند و در حال حاضر تمامی اجزای پیل سوختی برای استفاده در زیردریایی در دسترس می‌باشند[۱۹].




**شکل ۵ـ اجزاء مختلف سیستم پیل سوختی در زیردریایی‌های کلاس ۲۱۲ و ۲۱۴ آلمان**

## ۴ـ نتیجه‌گیری

استفاده از پیل‌های سوختی در شناورهای سطحی نظامی و غیرنظامی هنوز در مرحله مطالعات و تحقیقات قرار دارد. پیل‌های سوختی پلیمری با تغذیه هیدروژن و اکسیژن برای استفاده در زیردریایی‌ها به مرحله تولید انبوه رسیده‌اند. جهت افزایش برد عملیاتی زیردریایی‌ها، هم اکنون توسعه تکنولوژی مبدل‌های تبدیل سوخت‌های هیدروکربنی مایع به هیدروژن بر روی زیردریایی در دستور کار قرار دارد.

www.SID.ir

## مراجع

[1] Zvi Karin, N. Leavitt (JJMA) and T. Costa, R. Grijalva (CALSTART), "*Marine Fuel Cell Market Potential*", U.S. Coast Guard Research and Development Center, Report No. CG-D-01-00, September 1999.

[2] H.H., Boswinkel, "*Ship propulsion with fuel cells*", ECN-C-91-022, 1992, pp. 39.

[3] NN, "*Replacing Icland's Fossil Fuels*", Fuel Cell Technology News, Vol. 1, No. 6, 1999, p. 3.

[4] G. Sattler, "*Hydrogen propulsion systems for surface vessels"*, Sea 2000 Proceedings Hamburg, 1996, pp. 161-169.

[5] C. Eusterbarkey, et al., "*Solar hydrogen technology of the future*", Signet-Verlag, Flensburg, 1998.

[6] G. Sattler, "*Fuel Cells Going On-Board*", J. Power Sources 86, pp. 61-67, 2000.

[7] G. Weaver, S. Barrett, "*Marine Application of Fuel Cell Technology*", Fuel Cell Bulletin, P. 11, Jan. 2003.

[8] S. Allen et al., "*Marine Application of Fuel Cells*", A multi-agency research program, Nav. Eng. J. 1, pp. 93-108, 1998.

[9] J., Affolter, "*Swiss Fuel Cell Passenger and Pleasure Boats*", Published for the International conference Fuel Cell 2000, Lucerne, July 2000.

[10] D. Schmal, et al., "*Development of a polymer fuel cell system for naval surface application*", Abstracts 1996 Fuel Cell Seminar, Orlando, FL, 1996, pp.587-590.

[11] N.D.J. Lever et al., "*Fuel cell systems for surface ships*", Inst. Mar. Eng. 110 (2) (1998) 29-35.

[12] H.W. Rahn, "*The all-electric ship-an answer to future challenges*", Naval Forces 2 (1999) 38-46.

[13] P. Goubault et al., "*Fuel cell power plants for surface fleet applications*", Nav. Eng. J. 5 (1994) 59-76.

[14] NN, "*Navy floats toward FC-powered ships*", Fuel Cell Technology News, Vol. 1, No. 6, 1999, p. 3.

[15] U.S. Congress, Office of Technology Assessment, "*Marine Application of Fuel Cell Technology–A Technical Memorandum*", OTA-TM-O-37, Washington DC: US Government Printing Office, February 1986.

[16] www.sfu.ca/casr/index.htm

[17] C. Bourne, T. Nietsch, D. Griffiths and, J. Moreley, "*Application of Fuel Cells in Surface Ships*", ETSU F/03/00207/REP, DTI/Pub URN 01/902, 2001.

[18] www.milpadre.com/1998/29/022.html

[19] A. Psoma, G. Sattler, "*Fuel Cell Systems for Submarines: From the First Idea to Serial Production*" J. Power Sources 106, pp. 381-383, 2002.

www.SID.ir