

## مدل سازی سیستم پیشران‌ش هیبرید دیزلی برای شناورهای سطحی

ایرج جلیلی<sup>۱</sup>، عباس زارع نژاد اشکذری<sup>۲\*</sup><sup>۱</sup> دانشجوی دکتری/ دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)، سازمان تحقیقات و جهاد خودکفایی نداجا؛ iraj114jalili@gmail.com<sup>۲</sup> دکتری/ استادیار، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)؛ azarenezhad.a@gmail.com

| اطلاعات مقاله                                                                     | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| تاریخچه مقاله:<br>تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۱۹<br>تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۲۰ | مدیریت انرژی کشتی‌ها برای ارتقای کارایی کشتی‌ها و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، از مهمترین مسائلی می‌باشند که در سال‌های اخیر به‌عنوان نقطه عطفی در طراحی و ساخت شناورها مورد توجه قرار گرفته است. بررسی روند انرژی و توجه به تغییرات فناوری و اهمیت ضوابط سختگیرانه تر مسائل زیست محیطی در سال‌های اخیر منجر به یک چالش بزرگ در رابطه با آلودگی هوا، مدیریت انرژی و همچنین مواجهه با منابع رو به اتمام سوخت‌های فسیلی شده است. سیستم‌های پیشران هیبریدی امروزه یکی از راهکارهایی است که برای حل این معضل دنبال می‌شود. در این مقاله پس از معرفی سیستم شناور هیبریدی، مدل‌سازی و تعیین سیستم هیبریدی مناسب برای یک شناور سطحی، مورد بررسی قرار گرفته است. سپس محاسبات و روابط حاکم بر سیستم هیبرید موازی شناور سطحی ارائه گردیده و مدل‌سازی آن برای دو شناور عادی و هیبریدی با استفاده از نرم‌افزار ADVISOR در پلتفرم سیمولینک متلب انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که شناور سطحی هیبرید موازی سبب بهبود ۷٪ در بازدهی کلی و ۷۱٪ در مقدار مصرف سوخت شده است. همچنین مقادیر آلاینده‌های HC و CO به‌ترتیب به میزان ۴۴٪ و ۳۹٪ کاهش پیدا کرده است. |
| کلمات کلیدی:<br>موتور دیزل<br>شناور هیبریدی<br>شبیه‌سازی                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

## Modeling of the Diesel Hybrid Propulsion System for Vessels

Iraj Jalili<sup>1</sup>, Abbas Zarenezhad Ashkezari<sup>2\*</sup><sup>1</sup> Ph.D. Candidate, Imam Khomeini Maritime University; iraj114jalili@gmail.com<sup>2</sup> Assistant Professor, Imam Khomeini Maritime University; azarenezhad.a@gmail.com

## ARTICLE INFO

## Article History:

Received: 10 Nov. 2017

Accepted: 11 Nov. 2018

## Keywords:

Diesel Engine

Hybrid Vessel

Simulation

## ABSTRACT

The energy management of ships to improve the efficiency of ships and reduce greenhouse gas emissions is among the most important issues that have been considered as a milestone in designing and constructing of vessels in recent years. The study of energy trends and attention to technological changes and the importance of more stringent environmental standards in recent years have led to a major challenge in relation to air pollution, energy management, and exposure to end-of-life sources of fossil fuels. In recent years, focus on current fuels and technologies in vehicles has led to a major challenge regarding air pollution, greenhouse gas emissions, energy security, and also exposure to exhausting sources of fossil fuels. Now days, Hybrid propulsion systems are one of the solutions that are being followed in many countries to solve this problem. In this paper, after introducing the hybrid system; conceptual design and determination of a suitable hybrid system for vessels have been investigated. Then the calculations and relations dominating the hybrid parallel system of vessel are presented. The modeling is also done using the ADVISOR software run in the Simulink platform of the MATLAB for both conventional and hybrid systems. The results show that parallel hybrid vessel has improved by 7% in total efficiency and 7.1% for consumption. In addition, HC and CO emissions have been decreased by 0.44% and 0.39%, respectively.

## ۱ - مقدمه

در دهه‌های اخیر، تحقیق و توسعه در زمینه حمل و نقل بر توسعه حمل و نقل پربازده، پاک و ایمن تاکید دارد. در زمینه حمل و نقل دریایی، شرکت‌ها و ارگان‌های مختلفی در سراسر جهان (همانند نیروی دریایی ایالات متحده، بتا مارین<sup>۱</sup>، هیبرید مارین<sup>۲</sup> و استیر موتور<sup>۳</sup>) نمونه‌هایی از موتورهای شناورهای هیبریدی خود را ارائه نموده‌اند که این نشان از اهمیت این موضوع در سطح جهانی دارد [۷-۱]. معمولاً دسته‌بندی سیستم‌های پیشرانش هیبریدی به لحاظ نحوه چیدمان سامانه تامین توان، درجه هیبرید شدن و نوع سوخت مصرفی صورت می‌گیرد. سیستم‌های پیشرانش هیبرید کامل، ساختار خط انتقال قدرت متفاوتی با سیستم‌های پیشرانش معمول دارند و طراحی چنین سیستم‌هایی بسیار سخت و ساخت آن‌ها هزینه بر می‌باشد. در این میان سیستم‌های نیمه هیبرید موازی، آن‌هایی هستند که از همان ساختار انتقال قدرت معمول استفاده می‌کنند ولی با به کارگیری یک موتور الکتریکی قبل از موتور احتراقی، ساختار هیبرید در آن اجرا می‌شود [۸].

از نقطه نظر چیدمان سامانه تامین توان، سیستم‌های پیشرانش هیبریدی به سه دسته موازی، سری و ترکیبی سری - موازی تقسیم می‌گردند. در سیستم پیشرانش هیبریدی موازی، هر دو سامانه تولید توان به طور مستقیم به سیستم انتقال قدرت متصل شده‌اند، بنابراین امکان استفاده همزمان از هر دوی آن‌ها وجود دارد. در سیستم‌های پیشرانش هیبریدی سری، در صورتی که از باتری برای ذخیره انرژی الکتریکی استفاده شود، به عنوان منبع انرژی سیستم‌های پیشرانش عمل کرده و موتور احتراق داخلی، پیل سوختی یا موتور دیزل وظیفه شارژ نمودن را به عهده دارند. سیستم هیبرید سری - موازی، ترکیبی از هیبرید سری و موازی می‌باشد. به لحاظ درجه هیبرید شدن، سیستم‌های پیشرانش هیبریدی به سه نوع هیبرید کامل، هیبرید میکرو و هیبرید معتدل تقسیم می‌شوند که هر یک نشان‌دهنده میزانی از درگیری سامانه تامین توان اصلی و فرعی است.

تعدادی از پروژه‌هایی که در زمینه ساخت وسایل نقلیه هیبریدی صورت گرفته، عبارتند از موتور سیکلت هیبریدی، مینی‌بوس هیبریدی پیل سوختی، سمند سورن هیبریدی پیل سوختی و قایق تفریحی با سیستم رانش هیبرید خورشیدی. این در حالی است که تقریباً ۵۰ شرکت سازنده شناور در جهان دارای یک شناور الکتریکی یا هیبریدی می‌باشند. برخی از این سازندگان چندین مدل متفاوت موجود در بازار دارند، در حالی که بقیه سازندگان، نمونه‌های آزمایشی با استانداردهای متفاوت را توسعه داده‌اند [۹-۱۱].

بارلو و همکاران یک شناور تفریحی هیبریدی با ساختار سری به طول ۲۷ متر را در نرم‌افزار DVISOR شبیه‌سازی کرده و نشان

داده اند که شناور هیبرید سری، میزان مصرف سوخت را کاهش می‌دهد [۱۲].

فارال و همکاران، سامانه انتقال قدرت نوینی را طراحی کردند که در آن، راهبرد پایشی را برای یک سیستم رانش هیبرید موازی توسعه داده است به گونه ای که در آن، حد ذخیره باتری و دور موتور مولد وارد یک پایشگر فازی می‌شود و این پایشگر چگونگی تقسیم توان بین موتور احتراقی و موتور برقی را تعیین می‌کند و در این روش موتور احتراقی بهینه می‌شود [۱۳].

انواع شناورهای توسعه داده شده به لحاظ کاربرد می‌تواند شناورهای تجاری، مسافری و نظامی باشند. شناورهای تجاری و مسافری نیز خود در سه دسته قایق‌های بادبانی، قایق‌های تفریحی موتوری و قایق‌های موتوری تجاری قرار می‌گیرند.

در زمینه قایق‌های بادبانی، تعداد زیادی از آن‌ها، هیبرید سری هستند به طوری که از چیدمان‌های دیگر در این حوزه معمول‌تر می‌باشند. در کل، ترکیبی از انرژی‌های تجدیدپذیر خورشید یا باد برای چیدمان تمام این گونه سیستم‌ها به کار می‌رود. یکی از شناورهای مطرح ساخته شده از این نوع، "نادا" است که هدف از طراحی آن کاهش مصرف سوخت به منظور افزایش بازده تا ۳۰٪ بود. عمده شرکت‌های سازنده قایق‌های بادبانی هیبرید سری، سوئد، فرانسه و اسپانیا هستند [۱۴].

در دسته قایق‌های تفریحی موتوری تعداد ۳۶ سازنده مختلف وجود دارد که ۱۵ تای آن‌ها به تولید شناور باتری/الکتریکی، ۵ تای آن‌ها هیبرید سری و ۱۶ تای آن‌ها سازندگان نوع هیبرید موازی این قایق‌ها هستند. این قایق‌ها موتورهای DC ساده‌ای دارند که اغلب ۳۶ ولت هستند. فناوری ساخت این گونه قایق‌ها از روی ماشین‌های گلف، کپی‌برداری شده است. این شناورها به باتری‌هایی با اندازه و وزن مناسب مجهز شده‌اند. متداول‌ترین نوع باتری استفاده شده در این شناورها، باتری‌های لیتیوم-یون می‌باشد. موتورهای الکتریک آنها از ۲۵ تا ۷۰ کیلووات توان دارند و به طور سری یا منفرد می‌توانند عمل کنند. ولتاژ سیستم از ۹۶ تا ۶۴۰ ولت قابل تغییر می‌باشد. سازندگان مطرح در این دسته دو شرکت اتریشی فراشر<sup>۴</sup> و آستریان ماریان بُت<sup>۵</sup> هستند که هر کدام از آن‌ها حداقل ۵ مدل کروز الکتریکی با محدوده طولی بین ۵ تا ۷ متر دارند [۱۴].

برای شناورهای موتوری تفریحی نیز سه نوع کلی شناور هیبرید سری وجود دارد؛ شناورهای با طول بیش از ۵۰ متر، شناورهای با طول ۵ تا ۷ متر و شناورهای مفهومی آینده. قایق‌های موتوری تفریحی هیبرید موازی اکثراً کروزهای با طول ۷ تا ۱۰ متر و اساساً دارای دو نوع چیدمان هیبرید موازی هستند:

• یک موتور الکتریکی بین موتور احتراق داخلی و سیستم انتقال قدرت روی محور بیرون رونده نصب شده است (موتور الکتریکی چرخ طیار).

• یک سیستم پیشرانش باتری / الکتریکی منفرد که به طور جداگانه از سیستم تولید توان مکانیکی دیزل متداول نصب شده است. به عنوان نمونه‌ای از این دست شناورها، قایق هیبریدی گرین لاین<sup>۶</sup> ۳۳ فوتی ساخت شرکت سیگوی<sup>۷</sup> در نمایشگاه قایق دوسلدورف به عنوان قایق توانمند سال ۲۰۱۰ انتخاب شد. به علاوه سیستم پیشرانش هیبریدی، این قایق دارای طراحی خاص بدنه و یک صفحه بزرگ خورشیدی بر روی سقف آن می‌باشد. غالب بازار قایق موتوری تجاری، شامل حمل و نقل مسافری می‌شود. سایر موارد مربوط به کاربردهای نظامی و غریق نجات است. سازندگان این نوع از قایق‌ها تقریباً به طور یکسان از سه نوع ممکن هیبرید، تولید می‌کنند [۱۵].

در زمینه نظامی تاکنون نیروی دریایی ایالات متحده موفق شده از اولین شناور هیبریدی خود بهره برداری کند. شناور مکین ایسلند<sup>۸</sup> به عنوان اولین شناور هیبریدی این نیرو به حساب می‌آید که بخشی از توان آن توسط سیستم هیبرید توربین گاز-الکتریک و بخشی توسط دیزل-الکتریک تامین می‌شود. تقریباً در بیشتر مواقع، این کشتی از پیشرانش دیزل-الکتریک استفاده کرده و سوخت کمتری مصرف می‌کند، چون موتورهای دیزل برای سرعت کروز بهینه عمل کرده و سوخت کمتری نسبت به توربین گاز مصرف می‌کنند. [۱۶].

## ۲ - طراحی مفهومی شناور هیبریدی

همانطور که اشاره شد، چیدمان‌های مختلفی برای یک سیستم هیبرید دیزلی می‌تواند وجود داشته باشد؛ هیبرید موازی، سری یا ترکیبی. بر اساس این واقعیت که وسایل نقلیه دیزلی می‌توانند به مصرف سوخت کمتری دست پیدا کنند، بازدهی سوخت در وسایل نقلیه هیبرید دیزلی بهتر از نوع بنزینی آن خواهد بود [۱۷-۱۸]. انواع سیستم‌های پکی که قابلیت هیبرید شدن با موتور دیزل شناور را دارند مزایای مختلفی را برای بکارگیری در شناور هیبریدی دارا هستند که کارکرد پاک و مناسب شناور را تضمین خواهند کرد. برخی از مهمترین سیستم‌های هیبریدی عبارتند از:

- توربین گاز
- موتور بیودیزل
- موتور احتراق داخلی بیوگاز
- موتور استرلینگ
- پیل سوختی
- موتور احتراق داخلی هیدروژنی
- سلول‌های فوتوولتائیک

- توربین باد
- باتری و موتور الکتریکی

برای افزایش قدرت و سرعت شناورهای مجهز به موتور دیزل، می‌توان این سیستم‌ها را با توربین‌های گازی هیبرید نمود. به دلیل اینکه توربین گازی مقیاس‌پذیر نیست و در هر اندازه‌ای نمی‌تواند ساخته شود، معمولاً چنین هیبریدی برای پیشرانش شناورها یا کشتی‌های بزرگ استفاده می‌شود. در رابطه با موتور بیودیزل به علت مشکلاتی که برای استفاده از بیودیزل در موتورهای دیزل معمولی وجود دارد، استفاده مستقیم از بیودیزل در موتور دیزل شناور گزینه مناسبی برای استفاده از بیودیزل نخواهد بود. باید در نظر داشت که مشکلات تولید این سوخت، ظرفیت لازم برای استفاده از آن و هزینه‌های تولید و همچنین هزینه‌های جانبی استفاده از آن مساله مهمی است که سد راه تجاری شدن و استفاده وسیع از آن قرار گرفته است.

با بررسی موتور بیوگاز می‌توان دید که اگرچه بیوگاز از سوخت ارزان و پاک برای پیشرانش استفاده می‌کند اما محتوای بالای CO<sub>2</sub> در بیوگاز، توان خروجی موتور را کاهش خواهد داد. همچنین به علت وجود H<sub>2</sub>S اسیدی و رطوبت بالای ته نشین، کارکرد موتور دچار مشکلاتی خواهد شد. در رابطه با موتور استرلینگ می‌توان گفت توسعه این موتور با اندازه بزرگ و فشار بالا دشوار است. بنابراین احتمال کمی وجود دارد که موتور استرلینگ به عنوان تنها پیشران یک کشتی بزرگ به کار گرفته شود. از طرفی، بازدهی حرارتی یک موتور دیزل دریایی با اندازه بزرگ زیاد است و افزایش این بازدهی در آینده‌ای نزدیک بسیار دشوار خواهد بود.

تجارب عملیاتی نشان داده است که فناوری پیل سوختی در محیط دریایی کارکرد خوبی دارد، قبل از اینکه پیل سوختی بتواند به عنوان یک سیستم پربازده و پاک تولید توان با فناوری‌های امروزی برای شناورها رقابت کند، لازم است که تحقیق و توسعه بیشتری در این زمینه انجام پذیرد. چون هزینه‌های تحمیلی این سیستم هنوز به لحاظ اقتصادی توجه پذیر نمی‌باشد. در رابطه با موتور احتراق داخلی هیدروژنی هزینه تولید و ذخیره هیدروژن، سیستم‌های جانبی و مسائل ایمنی، مشکلات بر سر راه شناور هیبریدی مورد نظر می‌باشند.

در حالی که بزرگترین مشکل استفاده از سلول‌های خورشیدی برای استفاده به عنوان سیستم تامین توان جانبی، عدم پایدار بودن آن (قابلیت اطمینان کم برای سیستم) می‌باشد، محدودیت سرعت عملکردی نیز مشکل اساسی توربین‌های بادی است. سیستم باتری/موتور الکتریکی علاوه بر پایداری، ظرفیت بالا، مقیاس‌پذیری، آلاینده‌گی صوتی و زیست محیطی بسیار کم، بازدهی بالایی دارد و بنابراین می‌توان بهترین گزینه برای توسعه شناورهای هیبریدی باشد.

## ۲-۱- چیدمان منتخب سیستم هیبریدی

در یک هیبرید موازی، اجزای الکتریکی سبک‌تر، کوچک‌تر و در نتیجه به طور قابل ملاحظه‌ای ارزان‌تر از اجزای الکتریکی یک هیبرید سری خواهد بود. این موضوع باعث می‌شود در هزینه و ترکیب، سیستم هیبرید موازی از سری پیش بیفتد و به همین دلیل است که امروزه کارخانه‌های ساخت شناور، تمرکز بیشتری برای ساخت شناورهای هیبرید موازی داشته‌اند. بنابراین سیستم هیبرید موازی دیزل/الکتریکی یک سیستم مناسب برای هیبریداسیون شناور خواهد بود.

## ۳- مدل سازی شناور هیبریدی

### ۳-۱- محاسبات پیشرانش

محاسبات پیشرانش شناور هیبریدی شامل دو معادله دیفرانسیل معمولی است. این معادلات بر پایه قانون دوم نیوتون است. معادله مربوط به صورت زیر می‌باشد [۱۹]:

$$M_v \cdot a = F_{prop} - F_{boat} \quad (۱)$$

که در رابطه فوق،  $M_v$  جرم شناور،  $a$  شتاب،  $F_{prop}$  نیروی مقاومت پروانه و  $F_{boat}$  نیروی مقاومت شناور می‌باشد.

ارتباط بین سرعت زاویه‌ای موتور دیزل و موتور الکتریکی  $\omega_{ICE} = \omega_{EM}$  است و سرعت زاویه‌ای پروانه،  $\omega_{prop}$  به وسیله رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$\omega_{ICE} = \omega_{prop} i_{gear} \quad (۲)$$

که در آن،  $\omega_{ICE}$  سرعت زاویه‌ای موتور دیزل،  $\omega_{EM}$  سرعت زاویه‌ای موتور الکتریکی و  $i_{gear}$  نسبت دنده می‌باشد.

معادله دیفرانسیل معمولی دوم، شتاب قطعات چرخنده است که رابطه اساسی  $\omega I = M_2 - M_1$  بر آن حاکم است. معادله مربوطه به صورت زیر است [۱۹]:

$$\omega_{ICE} I_{tot} = (M_{ICE} - M_{EM}) - \frac{M_{prop}}{\eta_{prop} i_{gear}} \quad (۳)$$

که در رابطه بالا  $M_{ICE}$  گشتاور موتور دیزل،  $M_{EM}$  گشتاور موتور الکتریکی،  $I_{tot}$  اینرسی کل،  $M_{prop}$  گشتاور پروانه و  $\eta_{prop}$  راندمان پروانه می‌باشد. گشتاور پروانه به وسیله مقاومت آب ایجاد شده و با استفاده از این دو معادله جفت شده محاسبه می‌گردد:

$$M_{prop} = K_Q \rho_w \left( \frac{\omega_{prop}}{2\pi} \right) (D_{prop})^5 \quad (۴)$$

$$K_Q = A_2 + B_2 J + C_2 J^2 + D_2 J^3 \quad (۵)$$

که در روابط بالا  $K_Q$  ضریب گشتاور یا ممان،  $\rho_w$  چگالی آب دریا،  $\omega_{prop}$  سرعت زاویه‌ای پروانه،  $D_{prop}$  قطر پروانه و  $A_2$ ،  $B_2$ ،  $C_2$  و  $D_2$  ضرایب ثابتی می‌باشند که از روابط تجربی به دست آمده است [۱۷].

همچنین مقدار اینرسی نهایی با استفاده از رابطه (۶) قابل محاسبه است [۱۷]:

$$I_{tot} = (I_{ICE} - I_{EM}) - \frac{I_{prop}}{\eta_{prop} (i_{gear})^2} \quad (۶)$$

که در آن،  $I_{ICE}$  اینرسی موتور دیزل،  $I_{EM}$  اینرسی موتور الکتریکی و  $I_{prop}$  اینرسی پروانه است.

### ۳-۲- موتور دیزل

در موتورهای احتراق داخلی بازده حرارتی برابر است با [۲۰]:

$$\eta = \frac{W}{e_c \dot{m}_f} \quad (۷)$$

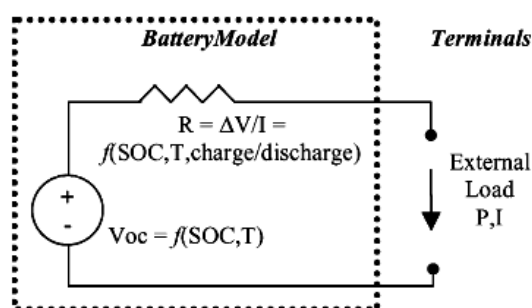
که در آن  $W$  کار انجام شده توسط موتور،  $e_c$  انرژی شیمیایی سوخت و  $\dot{m}_f$  دبی جرمی سوخت است. با توجه به این مطلب، مصرف مخصوص سوخت (مقدار جرم سوخت مصرف شده بر واحد زمان و واحد توان) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$sfc = \frac{\dot{m}_f}{P} \quad (۸)$$

که در آن  $P$  مقدار توان تولیدی می‌باشد.

### ۳-۳- باتری لیتیوم - یون

باتری مناسب برای استفاده در شناور هیبریدی باید از چگالی توان بالایی برخوردار باشد. لذا به دلیل طول عمر بالا، قیمت مناسب و چگالی توان بالای باتری‌های لیتیوم-یون، این باتری برای ذخیره‌سازی و دریافت انرژی مازاد در مدل شناور انتخاب شده است. مدلی که در این کار برای مدل‌سازی باتری استفاده شده است، مدلی است که توسط فادال به کار گرفته شده است [۲۱-۲۲]. مدار معادل باتری در این مدل‌سازی به صورت زیر است.



شکل ۱- مدار الکتریکی معادل برای باتری لیتیوم-یون [۲۱]

می باشد. این نرم افزار به عنوان یک ماژول، بر روی پلت فرم نرم افزار متلب پیاده سازی شده است و برای راه اندازی حتما به متلب نیاز دارد. از جمله امکانات این نرم افزار، محاسبه مصرف سوخت، میزان آلاینده‌گی های موتورهای احتراقی و همچنین محاسبه پارامترهای عملکردی موتور می باشد. بدین منظور ملاحظات در نظر گرفته شده و پارامترهای مختص آن، می بایست طوری انتخاب شود که به بهترین نحو قادر به توصیف شرایط شناور مورد نظر باشد. کلیه مشخصات و مقادیر متغیرهای به کار رفته در مدل سازی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱ - مقادیر مشخصه شناور هیبریدی [۱۹]

| مقدار | واحد  | مشخصه                          |
|-------|-------|--------------------------------|
| ۸۴۶   | kW    | توان موتور دیزل                |
| ۳۰۲   | kW    | توان موتور الکتریکی            |
| ۱۶۵   | kg    | وزن موتور الکتریکی             |
| ۲۲۳۶  | kg    | وزن موتور دیزل                 |
| ۰/۴۱  | %     | بازدهی موتور دیزل              |
| ۰/۹۱  | %     | بازدهی موتور الکتریکی          |
| ۲۶۷   | V     | ولتاژ باتری لیتیوم-یون         |
| ۲۵    | -     | تعداد ماژول باتری لیتیوم-یون   |
| ۲۸    | kg    | وزن باتری لیتیوم-یون           |
| ۱۱۴   | kg    | وزن سیستم انتقال قدرت          |
| ۲۰    | °C    | دمای محیط                      |
| ۱۰۰۹  | kJ/kg | ظرفیت گرمایی ویژه هوا          |
|       |       | دمای اولیه منی فولد گاز خروجی، |
| ۲۰    | °C    | موتور الکتریکی و کنترلر، موتور |
|       |       | دیزل و باتری لیتیوم-یون        |
| ۰/۷   | -     | حالت شارژ اولیه باتری          |

پس از وارد نمودن مشخصات شناور هیبریدی مطابق با جدول فوق، نمونه توسعه یافته هر جزء شناور مطابق جدول زیر در نرم افزار انتخاب شد.

جدول ۲ - ردیف نمونه توسعه یافته هر جزء شناور

| Vehicle                 | Unit Type           | VEH_large SUV                               |
|-------------------------|---------------------|---------------------------------------------|
| Fuel Converter          | ic/ci               | FC_CI60_emis                                |
| Exhaust After treatment | -----               | EX_CI                                       |
| Energy Storage          | Rint/li             | tESS_LI7_temp                               |
| Motor                   | -----               | MC_AC150_Focus_draft                        |
| Transmission            | -----               | TX_5SPD_CI                                  |
| Torque Coupling         | -----               | TC_DUMMY                                    |
| Wheel/Axle              | -----               | WH_SUV                                      |
| Accessory               | -----               | ACC_SUV                                     |
| Powertrain Control      | Par/man<br>Conv/man | PTC_PAR for parallel<br>PTC_Heavy for conv. |

ولتاژ کل قرار گرفته در پایانه های باتری از تفاضل ولتاژ مدار باز و افت ولتاژ در اثر مقاومت داخلی بدست می آید.

$$V_{batt} = n_s (V_0(SOC) - i_{batt} R(SOC)) \quad (۹)$$

که در آن،  $R(SOC)$  مقاومت داخلی باتری،  $V_0(SOC)$  ولتاژ مدار باز،  $i_{batt}$  جریان باتری،  $SOC$  شرایط شارژ باتری و  $Q$  ظرفیت باتری است.

با حل مدار معادل شکل ۱، رابطه (۱۰)، برای به دست آوردن جریان باتری به دست خواهد آمد [۲۳]:

$$i_{batt} = \frac{V_0 - \sqrt{V_0^2 - 4RP_{batt}}}{2R} \quad (۱۰)$$

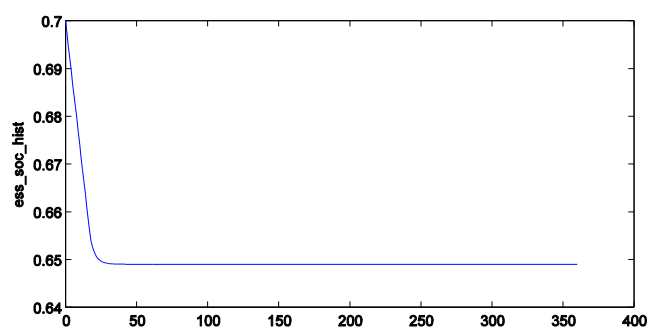
که در آن  $P_{batt}$  توان باتری است.

#### ۴ - شبیه سازی شناور هیبریدی

به منظور شبیه سازی، یک شناور هیبریدی با در نظر گرفتن اجزاء اساسی و استانداردهای مربوطه آن با استفاده از نرم افزار ADVISOR در پلتفرم MATLAB مدل سازی گردید [۲۴]. نرم افزار تخصصی ADVISOR یکی از بهترین و ساده ترین نرم افزارهای تخصصی در زمینه ی طراحی سیستمهای رانش هیبریدی است. این نرم افزار شبیه ساز پیشرفته، شامل مجموعه ای از مدل، داده ها و فایل های متنی اسکریپت برای استفاده در متلب و سیمولینک هست. این نرم افزار برای تحلیل های سریع عملکرد و صرفه سوخت موتورهای احتراقی، الکتریکی و هیبریدی طراحی شده است. این نرم افزار همچنین ابزار کاملی برای شبیه سازی های دقیق و جزئی و تحلیل اجزای پیشرانده تعریف شده توسط کاربر را ارائه می دهد. مدل های استفاده شده در این نرم افزار عمدتاً تجربی و آزمایشگاهی و مبتنی بر روابط ورودی/خروجی و نیز شبه استاتیک با استفاده از داده های جمع آوری شده در حالت ماندگار

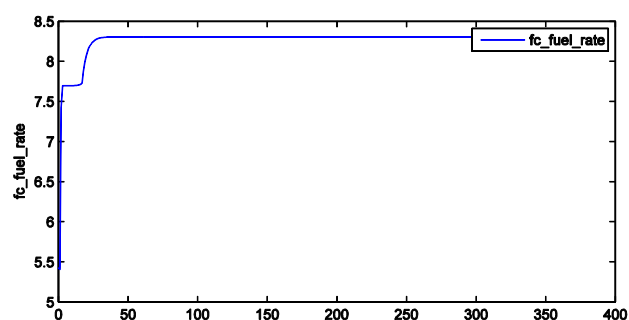
## ۵- نتایج

در شکل ۲ نتایج مدل سازی شناور هیبریدی موازی مورد نظر برای یک سیکل حرکتی آمده است.

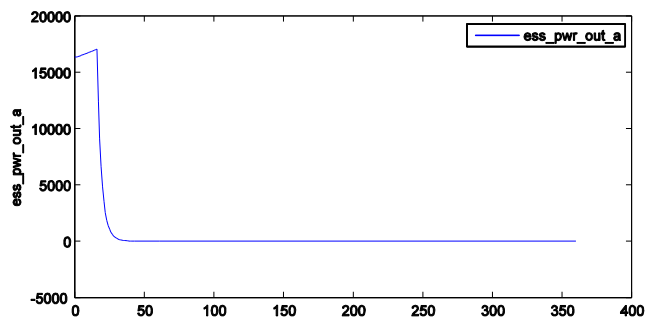


شکل ۴- حالت شارژ باتری برای سیکل حرکتی

در شکل های ۵ و ۶، نرخ مصرف سوخت موتور دیزل و مقدار توان مصرفی سیستم ذخیره سازی انرژی در سیکل حرکتی نشان داده شده است. مشاهده می شود که تا قبل از رسیدن به ثانیه ۲۲، مصرف سوخت شناور به طور فزاینده ای رو به افزایش است. این دقیقاً زمانی است که شناور با قدرت بالا شروع به حرکت کرده است. پس از عبور از ثانیه ۲۲، موتور دیزل با روند ثابتی در حال مصرف سوخت و تولید توان می باشد، در حالی که باتری هیچ انرژی ای مصرف نمی کند و تا انتهای سیکل حالت شارژ آن بدون تغییر باقی می ماند.

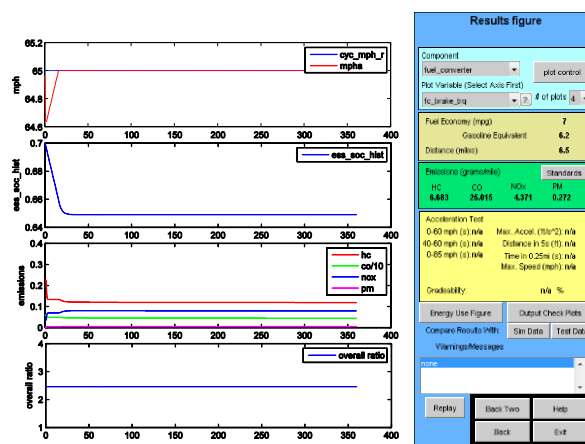


شکل ۵- نرخ مصرف سوخت موتور دیزل در سیکل حرکتی مورد نظر



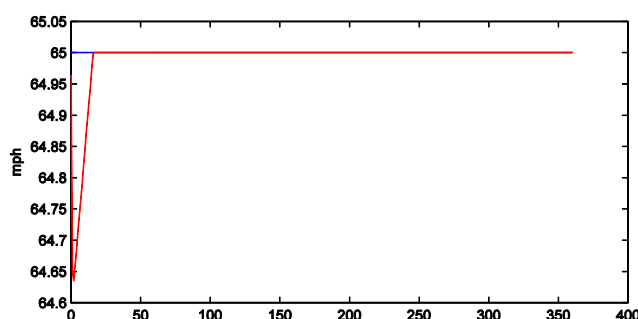
شکل ۶- مقدار توان مصرفی باتری در سیکل حرکتی مورد نظر

به منظور ارزیابی مناسبی از میزان مصرف انرژی و توان کلی سیستم با استفاده از فناوری هیبریدی، در شکل ۷ نمودار مصرف و اتلاف انرژی آورده شده است. همانطور که دیده می شود، بیشترین اتلاف



شکل ۲- نتایج مدل سازی شناور هیبریدی موازی مورد نظر

شکل های ۳ و ۴ نمودارهای سرعت بر حسب زمان و حالت شارژ باتری برای سیکل حرکتی مورد نظر را نشان می دهد. منحنی قرمز رنگ سرعتی است که شناور تجربه می کند و منحنی آبی رنگ سرعت مورد انتظار است. دیده می شود که تا رسیدن سرعت شناور به سرعت دلخواه در طول مدت ۲۲ ثانیه، موتور با قدرت بالا عمل کرده و یک پیک سرعتی رو به پایین را می گذراند. بنابراین مصرف توان بالا و با توجه به هدف توسعه شناور هیبرید بر مبنای کاهش مصرف سوخت و انرژی، باتری در این لحظه از زمان به کمک موتور دیزل شتافته تا از کارکرد آن در حوزه بازدهی پایین جلوگیری شود. این دلیلی است بر کاهش حالت شارژ باتری در ۲۲ ثانیه اول شروع به حرکت شناور در سیکل حرکتی که به خوبی در شکل ۴ قابل مشاهده است.



شکل ۳- پروفایل سرعت برای سیکل حرکتی

مختلفی تقسیم بندی می‌شوند. مشاهده گردید که گزینه‌های زیادی برای نوع سیستم هیبریدی وجود دارد که با دانستن شرایط سیستم موجود (نوع شناور، هدف شناور، نوع موتور به کار رفته در آن که در اینجا از نوع دیزل می‌باشد) می‌توان گزینه درست را انتخاب نمود. از بین سیستم‌های مختلف تولید توان به عنوان سیستم جانبی (توربین گاز، پیل سوختی، موتور استرلینگ، موتور احتراق داخلی هیدروژنی، سلول‌های فوتوولتائیک و غیره) سیستم باتری و موتور الکتریکی انتخاب گردید. همچنین از بین گزینه‌های مختلف برای چیدمان سیستم هیبریدی شناور، با توجه به نیاز شناور مورد نظر، هیبرید موازی انتخاب شد. سپس به بیان محاسبات و روابط حاکم بر سیستم هیبرید موازی شناور سطحی و مدل‌سازی آن با استفاده از نرم‌افزار ADVSIOR اجرا شده در پلتفرم سیمولینک<sup>۹</sup> برنامه متلب<sup>۱۰</sup> پرداخته شد. پس از آن به منظور درک بهتر نحوه عملکرد شناور پس از هیبریداسیون، یک شناور معمولی با مشخصات مشابه نیز مدل گردید. نتایج حاصله بیانگر بهبود بازده کل سیستم، بازده موتور دیزل و اقتصاد سوخت شناور به ترتیب به میزان ۷٪، ۸٪ و ۷/۱٪ برای شناور هیبریدی است. البته هرچند این درصد افزایش، قابل ملاحظه به نظر نمی‌رسد، ولی در مسافت‌های طولانی پراهمیت خواهد بود.

## ۸- کلید واژگان

- 1- Beta Marine
- 2- Hybrid Marine
- 3- Steyr Motors
- 4- Frauscher
- 5- Austrian Marian Boats
- 6- Green line Hybrid
- 7- Segway
- 8- Makin Island
- 9- Simulink
- 10- MATLAB

## ۷- فهرست اختصارات

|                  |                  |
|------------------|------------------|
| Hydro Carbon     | HC               |
| Carbon Monoxide  | CO               |
| Direct Current   | DC               |
| Carbon dioxide   | CO <sub>2</sub>  |
| Hydrogen sulfide | H <sub>2</sub> S |

## ۸- مراجع

- 1- Ehsani, M., Gao, Y. and Emadi, A., (2009), *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design, Second Edition*, CRC Press, Boca Raton London New York Washington, D.C.
- 2- Blair Guenther, M., (2005), *Modelling and Design Optimization of Low Speed Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles*, Master Thesis of Applied Science, University of Victoria.

انرژی مربوط به مبدل سوختی یعنی موتور دیزل با اتلاف انرژی ۱۰۲ مگاژول می‌باشد که با این مقدار اتلاف انرژی بازدهی برابر با ۲۰٪ خواهد داشت. پس از آن، اتلاف انرژی مربوط به غلبه بر نیروهای کشش آئرویدینامیکی و غلطش به ترتیب مقادیر ۶/۶ و ۱۶ مگا ژول را داراست. همچنین دیده می‌شود بازده کلی سیستم (ضرب کل بازدهی‌های اجزاء سیستم) برابر با ۱۷/۶٪ است.

| Energy Usage Table (kJ) |            |        |        |      |                                                                                      |            |     |      |      |
|-------------------------|------------|--------|--------|------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----|------|------|
| Fuel                    | POWER MODE |        |        |      |                                                                                      | REGEN MODE |     |      |      |
|                         | In         | Out    | Loss   | Eff. |                                                                                      | In         | Out | Loss | Eff. |
| Fuel Conversion         | 0          | 127634 |        |      |                                                                                      |            |     |      |      |
| Fuel Conversion         | 127634     | 24885  | 102749 | 0.2  |                                                                                      |            |     |      |      |
| Clutch                  | 25245      | 25245  | 0      | 1    |                                                                                      |            |     |      |      |
| Hyd. Excess Conversion  |            |        |        |      |                                                                                      |            |     |      |      |
| Generator               |            |        |        |      |                                                                                      |            |     |      |      |
| Torque Coupling         | 24825      | 24825  | 0      | 1    |                                                                                      |            |     |      |      |
| Energy Storage          | 1          | 322    | 43     | 0.87 |                                                                                      |            |     |      |      |
| Motor/Controller        | 383        |        |        |      |                                                                                      |            |     |      |      |
| Motor/Controller        | 322        | 267    | 55     | 0.83 |                                                                                      |            |     |      |      |
| Gearbox                 | 24825      | 24184  | 751    | 0.97 |                                                                                      | 577        | 1   | 576  | 0    |
| Final Drive             | 24184      | 24184  | 0      | 1    |                                                                                      |            |     |      |      |
| Wheel/Axle              | 9836       | 22684  | 12648  | 2.28 |                                                                                      |            |     |      |      |
| Braking                 |            |        |        |      |                                                                                      |            |     |      |      |
| Aux Loads               | 388        | 0      | 388    | 0    |                                                                                      |            |     |      |      |
| Auxro                   |            |        |        |      |                                                                                      |            |     |      |      |
| Rolling                 |            |        |        |      |                                                                                      |            |     |      |      |
|                         |            |        | 15824  |      |                                                                                      |            |     |      |      |
|                         |            |        |        |      | Overall System Efficiency                                                            |            |     |      |      |
|                         |            |        |        |      | 0.476                                                                                |            |     |      |      |
|                         |            |        |        |      | *Overall energy efficiency is calculated as: (work + rolling/fuel in - loss storage) |            |     |      |      |
| Loss Plot (Power Mode)  |            |        |        |      | Loss Plot (Regen Mode)                                                               |            |     |      |      |
|                         |            |        |        |      | DONE                                                                                 |            |     |      |      |

شکل ۷- مصرف انرژی و بازدهی کل سیستم شناور هیبریدی

با وارد کردن مقادیر جدول ۱ و ۲ (غیر از پارامترهای مختص سیستم هیبریدی) مدل‌سازی شناور عادی نیز به همین صورت انجام می‌پذیرد. جدول ۳ مهمترین پارامترها و کمیت‌های سیستم شناور سطحی دیزلی هیبرید موازی و معمولی را با یکدیگر مقایسه کرده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که در مقدار پارامترهای فنی سیستم عادی حداقل ۷٪ بهبود حاصل شده است.

## جدول ۳ - مقایسه پارامترهای اصلی دو سیستم شناور هیبریدی و عادی

| کمیت                      | مقدار در شناور دیزلی هیبرید موازی | مقدار در شناور عادی | درصد بهبود |
|---------------------------|-----------------------------------|---------------------|------------|
| کل توان اتلاfi (kW)       | ۱۱۳۱۱۷                            | ۱۲۲۲۸۲              | ~۷٪        |
| بازدهی موتور دیزل         | ۰/۲                               | ۰/۱۸۳۶              | ~۸٪        |
| بازدهی کلی سیستم          | ۰/۱۷۶                             | ۰/۱۶۳               | ~۷٪        |
| آلاینده HC (g/mile)       | ۶/۶۸۳                             | ۶/۶۵۳               | ~۰/۴۴٪     |
| آلاینده CO (g/mile)       | ۲۵/۰۱۵                            | ۲۵/۱۵۱              | ~۰/۳۹٪     |
| مصرف سوخت ویژه (kg/kW-hr) | ۷                                 | ۶/۵                 | ~۷/۱٪      |

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله به امکان سنجی هیبریداسیون شناورهای دیزلی موجود پرداخته شد و گزینه‌های مختلف برای این کار مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. شناورهای هیبریدی بر حسب نوع سیستم‌های تولید توان، نوع چیدمان آن‌ها و میزان هیبریداسیون به دسته‌های

TO090000055.

16- Boughner, A., Dalton, T. and Mako, C.D., (2010), *Engineering a Class of Innovative Affordable Amphibious Assault Hybrid Warships via LHD 8: USS Makin Island*, Electric Machines Technology Symposium. Philadelphia, Pennsylvania: American Society of Naval Engineers.

17- Wang, X., He, H., Sun, F., Sun, X. and Tang, H., (2013), *Comparative study on different energy management strategies for plug-in hybrid electric vehicles*, *Energies*, Vol.6, p.5656-5675.

18- Tremblay, O., Dessaint, L.A. and Dekkiche, A.I., (2007), *A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles*, In Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Arlington, VA, USA.

19- Magnus, M. and Jakob, T., (2010). *Marine Hybrid Electric Powertrain*, Thesis for master of program, Chalmers University Of Technology, Sweden.

20- Pulkrabek, W.W., (2003), *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*, Second Edition, Pearson Education (US), Upper Saddle River, NJ, United States.

21- Goodenough, J.B., Abruna, H.D. and Buchanan, M.V., (2007), *Basic Research Needs for Electrical Energy Storage*, Report of the Basic Energy Sciences Workshop on Electrical Energy Storage, United States.

22- Fadel, A. and Zhou, B., (2011), *An experimental and analytical comparison study of power management methodologies of fuel cell–battery hybrid vehicles*, *Journal of Power Sources*, Vol.196, p.3271-3279.

23- Wipke, K., Cuddy, M., Barton, D., Burch, S., Johnson, V., Markel, A. and Sprick, S., (1999), *ADVISOR 2.0: A Second-Generation Advanced Vehicle Simulator for Systems Analysis*, North American EV & Infrastructure Conference and Exposition (NAEVI 99).

24- Abdin, Z., Webb, C.J. and Gray, E.M., (2016), *PEM fuel cell model and simulation in Matlab–Simulink based on physical parameters*, *Energy*, Vol.116, p.1131-1144.

3- Laramie, J. and Dicks, A., (2002), *Fuel Cell Systems Explained*, John Wiley & Sons, New York.

4- <http://www.hybrid-marine.co.uk>.

5- Hamelin, J., Agbossou, K., Laperrière, A., Laurencelle, F. and Bose, T.K., (2001), *Dynamic behavior of a PEM fuel cell stack for stationary applications*, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.26, p.625-629.

6- <http://www.steyr-motors.com>.

7- Nordholm, L., (2006). *Development of validation methods for HEV (Hybrid Electrical Vehicle)*, Master Thesis of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University.

8- Kheir, NA., Salman, MA. and Schouten, NJ., (2016), *Hybrid engine performance determination using simulation with GT-drive software and comparison with diesel engine*, *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol.191, No.3, p.463-473. 9- Energy Information Administration - Official energy statistics from the US government, (2006), *Country analysis briefs* (2006-05-02).

10- U.S. Environmental Protection Agency, 40 CFR Part 86.128-00, (2006), *Describing gear and driving strategies* (2006-05-03).

11- Tronstad, T., Astrand, H.H., Haugom, G.P. and Langfeldt, L., (2006), *Maritime Study on the Use of Fuel Cells in Shipping*, DNV GL – Maritime Brooktorkai 18, 20457 Hamburg, Germany.

12- Barlow, T.J., Latham, S., McCrae, IS. and Boulter, PG., (2017), *The study of improving fuel consumption in a hybrid vessel by using ADVISOR*, *Advanced Intelligent Mechatronics, Energy conversion and management*, Vol.143, p. 20-31.

13- Farrall, SD. and Jones, RP., (2017), *Energy management in an electric heat engine hybrid powertrain using fuzzy logic*, *IEEE Trans Contr Syst Technol*, Vol.10, No.3, p.76-94.

14- Han, J., Charpentier, J.F. and Tang, T., (2014), *An Energy Management System of a Fuel Cell/Battery Hybrid Boat*, *Energies*, Vol.7, p.2799-2820.

15- Nayyar, P., (2010). *The Use of Biodiesel Fuels in the U.S. Marine Industry*, US Maritime Administration, Contract No. DTMA1D05007,