



## بهینه سازی انرژی و سرعت کشتی های داخلی با باتری با در نظر گرفتن قیمت دینامیک برق و محیط ناوبری پیچیده

محمد حسین انوشا<sup>۱</sup>، فردین یزدان پناه<sup>۲</sup>، سید مجید کشاورز<sup>۳</sup>\*

گروه مهندسی برق دانشگاه فنی حرفه ای، یاسوج، واحد پسران، ایران،

[mohammadjafarimehr72@gmail.com](mailto:mohammadjafarimehr72@gmail.com).<sup>۱</sup>[frdynyzdanpnah27@gmail.com](mailto:frdynyzdanpnah27@gmail.com).<sup>۲</sup>[Skeshavarz.tvu@ac.ir](mailto:Skeshavarz.tvu@ac.ir).<sup>۳</sup>

### چکیده

کربن زدایی یک روند در سراسر جهان، به ویژه در صنعت حمل و نقل بوده است. یک کشتی تمام الکتریکی با باتری خالص (AES) ممکن است انعطاف پذیرترین راه برای دستیابی به کربن زدایی کشتی در سال های اخیر باشد. در مقایسه با کشتی های معمولی، هزینه سرمایه گذاری اولیه بالا است و افزودنی انرژی برای کشتی های باتری دار کم است. بنابراین، یک استراتژی مدیریت انرژی که بتواند هزینه عملیات را به حداقل برساند و ایمنی مصرف انرژی را تضمین کند بسیار مهم است. در این مقاله، با توجه به قیمت دینامیک برق و عوامل محیطی، یک روش بهینه سازی مشترک سرعت کشتی و مصرف انرژی برای کشتی های با باتری داخلی پیشنهاد شده است. در مرحله اول، مدل مصرف انرژی با تجزیه و تحلیل تعامل بدنه، موتور محرکه و پروانه ساخته شده است. سپس مدل بهینه سازی سرعت و انرژی برای به حداقل رساندن هزینه عملیات کشتی پیشنهاد می شود. در نهایت، یک تکامل تفاضلی جستجوی همسایگی (NSDE) برای حل مسئله بهینه سازی غیرخطی پیچیده پیشنهادی برای به دست آوردن سرعت و زمان حرکت بهینه دریاوردی اتخاذ می شود. سپس مطالعه موردی با یک کشتی باری واقعی که با باتری کار می کند، اجرا می شود. نتایج نشان می دهد که این روش می تواند مرجعی برای مدیریت بهتر AES با باتری داخلی به اپراتورهای کشتی ارائه کند.

**کلمات کلیدی:** کشتی داخلی با باتری، بهینه سازی سرعت، قیمت برق دینامیک، محیط ناوبری، الگوریتم تکامل دیفرانسیل (DE)، سیستم یکپارچه قدرت (IPS).

## 1- مقدمه

استفاده از سوخت های جایگزین امیدوارکننده ترین اقدام برای کربن زدایی در صنعت کشتیرانی در نظر گرفته می شود. تمام کشتی های الکتریکی (AES) که با باتری خالص کار می کنند، که می توانند در طول سفر به انتشار صفر برسند [1] و تقاضای حمل و نقل داخلی در مسافت های طولانی و متوسط را برآورده کنند، توجه بیشتری را به خود جلب می کنند. اول، باتری های لیتیومی با چگالی انرژی بالا برای نصب روی برد مناسب هستند [2]. ثانیاً، کشتی های باتری دار کمترین انتشار چرخه عمر کامل را در مقایسه با کشتی هایی که از سوخت های جایگزین دیگر مانند گاز طبیعی مایع (LNG) و هیدروژن استفاده می کنند، دارد [3]. در AES، سیستم نیروی محرکه الکتریکی و سیستم قدرت در سیستم قدرت یکپارچه (IPS) یکپارچه شده است. IPS برای تولید برق، بارهای خدماتی و نیروی محرکه الکتریکی استفاده می شود [4]. IPS 4، [4] را می توان بیشتر به AC IPS و DC IPS طبقه بندی کرد. در مقایسه با AC IPS، مزایای DC IPS همگام سازی سریع، موتورهای اولیه کمتر، مصرف سوخت کمتر و فضا و وزن کمتر است [5]. در سال های اخیر، توسعه DC IPS در سیستم های حفاظتی، الکترونیک قدرت و استراتژی کنترل، پایه و اساس کاربرد تجاری آن را ایجاد کرده است [2]. بنابراین، یک AES با باتری با DC IPS به عنوان ذخیره انرژی ایده آل در نظر گرفته می شود.

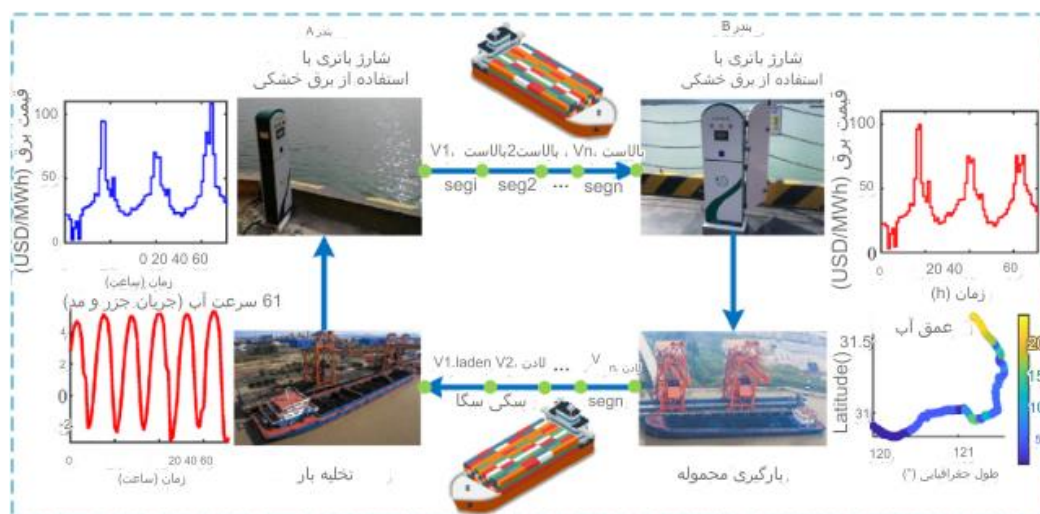
و طرح کاهش انتشار. با این حال، با قیمت بالای باتری و هزینه سرمایه گذاری اولیه محدود، ظرفیت باتری کشتی محدود است، و افزودنی انرژی آن از 20٪ فراتر نمی رود. در حال حاضر، تعداد ایستگاه های شارژ در طول مسیر کم است، بنابراین کشتی معمولاً نمی تواند باتری را تا نیمه شارژ کند. بنابراین، مانند وسایل نقلیه الکتریکی (EVs)، مشکل اضطراب برد در کشتی های باتری دار نیز وجود دارد. علاوه بر این، ظرفیت باتری کشتی باتری دار یک کشتی کلاس چند مگاواتی (MW) بسیار بزرگتر از کلاس الکتریکی است، بنابراین هزینه های عملیاتی بیشتری (عمدتاً هزینه برق) مورد نیاز است. بنابراین، بهینه سازی سفر برای کشتی با باتری برای کاهش هزینه های برق و اطمینان از ایمنی مصرف انرژی ضروری است. برای کاهش هزینه برق معرفی شده است. بهینه سازی سرعت کشتی های داخلی با کشتی های دریایی به دلیل محیط ناوربری پیچیده تر متفاوت است. در [7]، شاخص عملیاتی بهره وری انرژی (EEOI) یک کشتی رودخانه داخلی بر اساس داده های جمع آوری شده در آب آرام و شرایط عملی محاسبه و تجزیه و تحلیل شده است. نتیجه این است که محیط ناوربری به طور قابل توجهی بر بهره وری انرژی تأثیر می گذارد. به دلیل دشواری تعیین سرعت بهینه کشتی تحت شرایط محیطی مختلف در شرایط، الگوریتم خوشه بندی k-means برای دستیابی به تقسیم مسیر با تجزیه و تحلیل عوامل محیط ناوربری [8] اتخاذ شد. سپس یک بهینه سازی بازده انرژی با در نظر گرفتن تأثیر محیط ناوربری اجرا شد.

علاوه بر این، تحقیقات کمی در مورد بهینه سازی سرعت برای کشتی های داخلی با باتری وجود دارد. در [9]، یک مدل بهینه سازی مشارکتی برای کشتی با باتری داخلی با در نظر گرفتن عوامل محیطی و عملیاتی ایجاد می شود، سپس اندازه باتری بهینه و سرعت حرکت کشتی به دست می آید. مرجع. [10] یک روش بهینه سازی سفر برای یک کشتی تمام الکتریکی داخلی با استفاده از باتری های کانتینری قابل تعویض پیشنهاد کرد. این مقاله توسعه ای از کار قبلی نویسندگان است [9]. در [9]، عوامل محیطی سرعت آب و عمق آب عبارتند از در مورد سرعت آب، جریان جزر و مدی در برخی از بخش های خور در نظر گرفته می شود و ثابت می شود. با این حال، جریان جزر و مدی دقیقاً متحرک و متغیر با زمان است و به طور قابل توجهی بر ناوربری کشتی تأثیر می گذارد. در خور بنابراین، جریان جزر و مدی متغیر با زمان در این مقاله در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، فقط قیمت ثابت برق در نظر گرفته شده است، که ممکن است باعث شود کشتی به طور تصادفی باتری را شارژ کند، که برای شبکه اصلی مفید نیست. بنابراین، قیمت دینامیک برق در این مقاله در نظر گرفته شده است. زمان حرکت کشتی نیز به

عنوان یک متغیر تصمیم‌گیری معرفی می‌شود زیرا قیمت دینامیک الکتریسیته و جریان‌های جزر و مدی که کشتی در زمان‌های حرکت مختلف با آن مواجه می‌شود متفاوت است. در مورد روش حل، تکامل دیفرانسیل (DE) یک الگوریتم تکاملی و مبتنی بر جستجو است. تکامل طبیعی و انتخاب ژن، و مزایای آن از DE شامل عملیات ساده، سرعت همگرایی سریع، استحکام، و توانایی قوی بهینه‌سازی جهانی است [11]. در این مقاله، جستجوی همسایگی (NSDE) برای حل این مسئله پیچیده بهینه‌سازی غیرخطی پیشنهادی اتخاذ شده است. در این مقاله، کشتی تمام الکتریکی با باتری خالص داخلی به عنوان هدف تحقیق در نظر گرفته شده است. سرعت قایقرانی و زمان حرکت کشتی و همچنین حداقل هزینه برق به ترتیب به عنوان متغیر تصمیم‌گیری و هدف بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. سپس مدل بهینه‌سازی انرژی و سرعت با در نظر گرفتن الکتریسیته دینامیکی ایجاد می‌شود. قیمت و عوامل محیطی متعدد نتایج نشان می‌دهد که سرعت بهینه و زمان خروج را می‌توان با اتخاذ NSDE تعیین کرد، بنابراین به طور موثر هزینه برق سفر را کاهش داد. به طور کلی، این کار مرجعی برای عملیات عملی و مدیریت AES با باتری است.

## 2- شرح مشکل

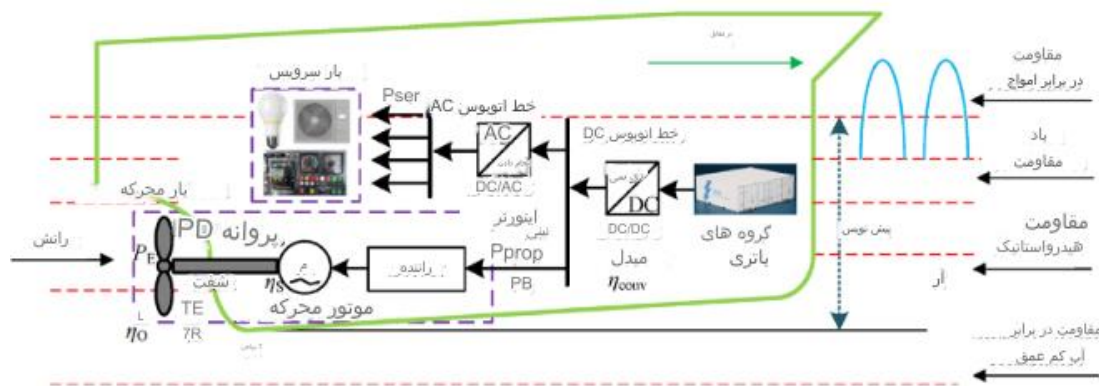
مقررات سختگیرانه زیست محیطی، افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی و توسعه باتری راه را برای AES با باتری باز کرده است. یک پیکربندی معمولی برای سفر AES با باتری داخلی در شکل 1 نشان داده شده است. در شکل 1، کشتی در شرایط بالاست به مقصد بندر B حرکت می‌کند و در شرایط بارگیری به بندر خروجی A باز می‌گردد. بر اساس ویژگی‌های منطقه‌ای عوامل محیطی سرعت آب و عمق آب، مسیر به بخش‌های N تقسیم می‌شود، به این معنی که کشتی می‌تواند سرعت قایقرانی متفاوتی داشته باشد تا متناسب با محیط‌های مختلف در بخش‌ها و شرایط مختلف باشد. کشتی با استفاده از اتو سرد و بارگیری یا تخلیه بار در بندر، شارژ باتری را انجام می‌دهد. سپس هزینه‌های برق را می‌توان از طریق ضرب انرژی مصرفی کشتی در قیمت برق دینامیکی بدست آورد و کاهش آن را با مصرف انرژی کم و قیمت پایین برق به دست آورد. اگرچه کاهش مصرف انرژی را می‌توان با کاهش سرعت طبق قانون مکعب به دست آورد، اما استفاده از کاهش سرعت به تنهایی باعث افزایش زمان دریانوردی و از دست دادن زمان با قیمت پایین برق و حتی زمان تعیین شده رسیدن می‌شود و منجر به هزینه بیشتر برق می‌شود. بنابراین، بهینه‌سازی سرعت، که می‌تواند ایمنی عملیات و کاهش هزینه برق را از طریق انتخاب سرعت بهینه در هر بخش و زمان حرکت به دست آورد، برای کشتی‌های دارای باتری داخلی اتخاذ می‌شود.



شکل (1) تصویری از سفر AES با باتری داخلی.

### 3- مدل مصرف انرژی کشتی

به منظور ساخت حالت مصرف انرژی، فرآیند انتقال انرژی AES با باتری، به دست آمده توسط IPS، تحلیل می‌شود. طراحی پیکربندی AES با باتری نشان داده شده است. گروه‌های باتری از طریق مبدل‌های شکل 2 به باس DC متصل می‌شوند. سپس، گروه‌های باتری نیرو را برای برآوردن نیاز نیروی محرکه و بارهای خدماتی تحویل می‌دهند. مبدل‌ها و اینورترها برای تبدیل ولتاژ و فرکانس اعمال می‌شوند [5]. بار محرکه برای به حرکت درآوردن کشتی است، به این معنی که قدرت در بار محرکه برای غلبه بر مقاومتی که کشتی با آن مواجه می‌شود استفاده می‌شود. بارهای سرویس شامل استفاده روزانه، دستگاه‌های ناوبری و غیره است [12]. بنابراین مصرف انرژی را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد. مصرف انرژی برای نیروی محرکه از طریق ضرب توان پیش‌رانه در زمان قایقرانی به دست می‌آید. قدرت رانش تحت سرعت‌های مختلف بر روی آب با تجزیه و تحلیل تعامل بدنه کشتی، ملخ و موتور محرکه به دست می‌آید. مصرف انرژی برای بار سرویس ثابت است.



شکل (2) نمودار شماتیک AES با باتری.

### 1-3- برهمکنش موتور محرکه کشتی و ملخ

همانطور که در شکل (2) نشان داده شده است، کشتی در سفر با مقاومت  $R_{ship}$  مواجه می‌شود که شامل مقاومت هیدرواستاتیکی، مقاومت در برابر افزایش موج، مقاومت در برابر باد و مقاومت در برابر آب کم عمق است [13]. قدرت الکتریکی موتور محرکه  $P_{prop}$  برای غلبه بر این مقاومت در حالی که نیروی رانش  $T_{prop}$  تولید می‌شود به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود. نیروی رانش موثر TE دریافت شده توسط کشتی برابر است با مقاومت کل کشتی  $R_{ship}$ :

$$R_{ship} = T_E = k(1-t)T_{prop} \quad (1)$$

$$P_E = T_E V_S = R_{ship} V_S \quad (2)$$

جایی که  $R_{ship}$  مقاومت کل کشتی را نشان می‌دهد. TE نشان دهنده رانش موثر پروانه است.  $T_{prop}$  رانش پروانه را نشان می‌دهد.  $k$  تعداد پروانه‌ها را نشان می‌دهد.  $t$  نشان دهنده ضریب کسر رانش است.  $P_E$  قدرت موثر دریافت شده توسط کشتی را نشان می‌دهد.  $V_S$  سرعت کشتی را در آب نشان می‌دهد. قدرت دریافتی پروانه PD به دلیل تلفات اصطکاکی کمتر از  $P_{prop}$  است. PD پس از برهمکنش آب با پروانه و بدنه به  $P_E$  تبدیل می‌شود.  $P_{prop}$  را می‌توان با معادله محاسبه کرد. (3):

$$P_{prop} = \frac{P_D}{\eta_S} = \frac{P_E}{\eta_S \eta_O \eta_H \eta_R} \quad (3)$$

جایی که  $P_{prop}$  قدرت رانش است.  $P_D$  توان تحویلی است.  $\eta_S$  راندمان شفت است.  $\eta_O$  راندمان آب باز پروانه است که می توان آن را با (4) محاسبه کرد.  $\eta_R$  راندمان چرخشی نسبی است.  $\eta_H$  راندمان بدنه است که می توان آن را با معادله محاسبه کرد. (5).

$$\eta_O = (K_T J) / (K_Q 2\pi) \quad (4)$$

$$\eta_H = (1 - t) / (1 - w) \quad (5)$$

که در آن  $K_T$  ضریب رانش را نشان می دهد.  $J$  نشان دهنده ضریب پیشروی پروانه است که با معادله به دست می آید. (6)؛  $K_Q$  ضریب گشتاور را نشان می دهد. و  $w$  نشان دهنده ضریب بیداری است.

$$J = \frac{V_A}{nD} = \frac{(1-w)V_S}{nD} \quad (6)$$

جایی که  $V_A$  نشان دهنده سرعت جریان به پروانه است.  $n$  نشان دهنده سرعت محور پروانه است.  $D$  قطر پروانه را نشان می دهد.  $T_{prop}$  را می توان با استفاده از معادله محاسبه کرد. (7)؛

$$T_{prop} = K_T \rho n^2 D^4 \quad (7)$$

جایی که  $\rho$  چگالی آب را نشان می دهد. در نهایت، با توجه به معادلات (1)-(7)،  $P_{prop}$  را می توان با استفاده از معادله محاسبه کرد. (8)؛

$$P_{prop} = \frac{P_E}{\eta_S \eta_O \eta_H \eta_R} = \frac{R_{ship} V_S}{k \eta_S \eta_O \eta_H \eta_R} = \frac{R_{ship} V_S K_Q 2\pi (1-w)}{k \eta_S \eta_R K_T J (1-t)} = \frac{2\pi \rho D^2 (1-w)^3 K_Q}{J^3 \eta_S \eta_R} V_S^3 = C_1 V_S^3 \quad (8)$$

در معادله (8)، رابطه سرعت-قدرت به دست می آید. در این مقاله، یک مدل چند جمله‌ای مبتنی بر داده‌های عملی برای توصیف این رابطه ایجاد شده است که می‌تواند با (9) محاسبه شود:

$$P_{prop} = a_1 V_S^3 + b_1 V_S^2 + c_1 V_S + d_1 \quad (9)$$

که در آن  $a_1$ ،  $b_1$ ،  $c_1$  و  $d_1$  ضرایب برازش هستند.

## 2-3- مدل مصرف انرژی کشتی

کل مصرف انرژی الکتریکی  $E_{using,i}$  را می توان با معادله زیر بیان کرد. (10):

$$E_{using} = \sum_{i=1}^M (E_{nav,i} + E_{load,i}) \quad (10)$$

که در آن  $M$  تعداد شرایط عملیاتی را نشان می دهد.  $i$  شرط  $i$  را نشان می دهد.  $E_{nav,i}$  و  $E_{load,i}$  مصرف انرژی برای ناوبری و بارگیری یا تخلیه محموله را در شرایط عملیاتی  $i$  نشان می دهد. سپس مصرف انرژی برق برای ناوبری و بارگیری یا تخلیه بار را می توان با معادله بیان کرد. (11) و (12):

$$E_{nav,i} = \sum_{j=1}^N \sum_{h=1}^T P_{nav,ijh} Y_{nav,ijh} \quad (11)$$

$$E_{load,i} = P_{load,i} Y_{load,i} \quad (12)$$

که در آن،  $N$  تعداد بخش ها را نشان می دهد.  $T$  زمان اسمی سفر را نشان می دهد.  $Z$  قسمت  $Z$  را نشان می دهد.  $h$  بازه زمانی  $h$  را نشان می دهد.  $P_{nav,i}$  و  $P_{load,i}$  تقاضای برق در طول ناوبری و بارگیری محموله را در بخش  $Z$  ام از شرایط عملیاتی در بازه زمانی  $h$  نشان می دهد که می تواند با معادله ها نمایش داده شود. (13) و (14)؛  $Y_{nav,i}$  و  $Y_{load,i}$  زمان دریانوردی کشتی و بارگیری یا تخلیه محموله را در بخش  $Z$  ام شرایط عملیاتی در بازه زمانی  $h$  نشان می دهد.

$$P_{nav,ijh} = \frac{k \cdot P_{prop,ijh}}{\eta_{conv}} + \frac{P_{ser}}{\eta_{conv}\eta_{inv}} \quad (13)$$

$$P_{load,i} = \frac{P_{ser}}{\eta_{conv}\eta_{inv}} \quad (14)$$

که در آن،  $N$  تعداد بخش ها را نشان می دهد.  $T$  زمان اسمی سفر را نشان می دهد.  $Z$  قسمت  $Z$  را نشان می دهد.  $h$  بازه زمانی  $h$  را نشان می دهد.  $P_{nav,i}$  و  $P_{load,i}$  تقاضای برق در طول ناوبری و بارگیری محموله را در بخش  $Z$  ام شرایط عملیاتی در بازه زمانی  $h$  نشان می دهد که می تواند با معادلات (13) و (14) نمایش داده شود.  $Y_{nav,i}$  و  $Y_{load,i}$  زمان دریانوردی کشتی و بارگیری یا تخلیه محموله را در بخش  $Z$  ام شرایط عملیاتی در بازه زمانی  $h$  نشان می دهد.

$$Y_{total} = Y_{nav} + Y_{load} + Y_{wait} \quad (15)$$

جایی که  $Y_{total}$  کل زمان سفر را نشان می دهد.  $Y_{wait}$  زمان استراحت در پورت را برای شارژ باتری و استراحت نشان می دهد.  $Y_{load}$  و  $Y_{wait}$  هر دو به عنوان ثابت در این مقاله تنظیم شده اند. زمان دریانوردی  $Y_{nav,i}$  را می توان با معادله بیان کرد. (16):

$$Y_{nav} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{S_{nav,ij}}{V_{g,ij}} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{h=1}^T \frac{S_{nav,ijk}}{V_{s,ijh} \pm V_{w,ijh} - \Delta V_{sh,ijh}} \quad (16)$$

که در آن  $S_{nav,i}$  فاصله قایقرانی در بخش  $Z$  ام شرایط عملیاتی  $i$  است.  $V_g$  سرعت کشتی بر روی زمین است (سرعت بادبانی کشتی).  $V_w$  سرعت آب است.  $\Delta V_{sh}$  کاهش سرعت ناشی از آب کم عمق است. در رودخانه داخلی،

$$V_g = V_s \pm V_w - \Delta V_{sh}.$$

علاوه بر این، یک مدل چند جمله ای بر اساس داده های عملی برای محاسبه  $\Delta V_{sh}$  استفاده می شود، همانطور که در معادله نشان داده شده است. (17).

$$\Delta V_{sh} = a_{sh} V_s^3 + b_{sh} V_s^2 + c_{sh} V_s + d_{sh} \quad (17)$$

که در آن خاکستر، bsh، csh و dsh ضرایب برازش را نشان می دهد. با فرض اینکه باتری کشتی همیشه هنگام خروج از بندر کاملاً شارژ است. سپس انرژی الکتریکی شارژ شده توسط اتو سرد Echag، i برابر با مصرف انرژی در آخرین شرایط عملیاتی است، همانطور که نشان داده شده است. توسط (18).

$$E_{chag,i} = E_{using,i} \quad (18)$$

#### 4- مدل بهینه سازی انرژی و سرعت کشتی

در این مقاله، هزینه کل برق (EC) و همچنین سرعت قایقرانی  $V_{g,i}$  و زمان حرکت Tdep به ترتیب به عنوان تابع هدف و متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شده است. (1) تابع هدف.

$$\min EC = \sum_{i=1}^M \sum_{h=1}^T E_{chag,ih} \lambda_{ih} = \sum_{i=1}^M \sum_{h=1}^T P_{chag,i} Y_{chag,ih} \lambda_{ih} \quad (19)$$

جایی که EC هزینه های برق را نشان می دهد.  $\lambda_{ih}$  نشان دهنده قیمت برق شرایط عملیاتی من در بازه زمانی h، USD/kWh است.  $Y_{chag,ih}$  نشان دهنده زمان شارژ شدن شرایط عملیاتی یکم در فاصله زمانی h،  $0 \leq Y_{chag,ih} \leq 1$  است.  $P_{chag,i}$  قدرت نامی نرمال اتوی سرد را در شرایط عملیاتی یکم نشان می دهد.

(2) محدودیت ها

$$Y_{total} \leq Y_{total}^{max} \quad (20)$$

$$V_{g,ij}^{min} \leq V_{g,ij} \leq V_{g,ij}^{max} \quad (21)$$

$$E_{using,i} \leq DoD_{max} \cdot E_{bat} \quad (22)$$

$$0 \leq T_{dep} < 24 \quad (23)$$

معادله (20) تضمین می کند که کشتی می تواند به موقع به بندر برسد، که در آن  $Y_{max}$  مجموع محدودیت زمانی دریانوردی برای یک سفر رفت و برگشت بین بندر A و B است. (21) محدود به مقررات اداره دریانوردی محلی است که در آن  $V_{max}$  و  $V_{min}$  حداکثر و حداقل سرعت روی زمین هستند. معادله (22) حد مصرف انرژی باتری است که در آن  $g, i$  و  $z, i$

DoDmax حداکثر عمق مجاز تخلیه باتری (DoD) است. Ebat ظرفیت باتری است. معادله (23) تضمین می کند که کشتی می تواند از ساعت 0:00 تا 24:00 روز اول بندر را ترک کند.

## 5- روش حل بر اساس NSDE

DE دارای عملیات جهش، تقاطع و انتخاب است. روند پیاده سازی به شرح زیر است:

(1) اولیه سازی.

در این عملیات جمعیتی ایجاد می شود. اندازه جمعیت  $(N, P, D)$  است که در آن  $N$  تعداد افراد را نشان می دهد و  $D = 1N + 2$  نشان دهنده تعداد متغیرهای تصمیم گیری زمان حرکت و سرعت قایقرانی در بخش های مختلف و شرایط عملیاتی است. بردار یکم جمعیت در تکرار فعلی  $x = (x_1, x_2, \dots, x_D)$  است.  $i = 1, 2, \dots, N$ ،  $G = 1, 2, \dots, N$  که در آن هر پارامتر  $x_{ji,G}$  در محدوده  $[x_{Lj}, x_{Uj}]$  تولید می شود.

(2) جهش.

بردار دهنده  $1v_{i,G}+$  در این عملیات به دست می آید. با توجه به اینکه عملگر کوشی عملکرد عالی در جستجوی جهانی دارد و عملگر گاوسی در جستجوی محلی به خوبی عمل می کند، یک استراتژی جهش هیبریداسیون پیشنهاد شده در [14] در این مقاله اتخاذ شده است، همانطور که توسط معادله نشان داده شده است. (24):

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F_i \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}) = x_{r1,G} + \begin{cases} N_i(0.5, 0.5) \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}) & \text{if } U_i(0, 1) \leq 0.5 \\ C_i(0, 1) \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (24)$$

که در آن  $r1, r2, r3$  اعداد صحیح متقابلاً منحصر به فرد هستند که به طور تصادفی از محدوده  $[1, N]$  انتخاب شده اند، که با  $r1/i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) متفاوت هستند  $F_i$  عامل کنترلی است که بزرگی بردار را کنترل می کند  $(x_{r2,G} - x_{r3,G})$ .  $N_i(0.5, 0.5)$  (عدد توزیع گاوسی با میانگین 0.5 و انحراف معیار 0.5 است)  $C_i(0, 1)$  (عدد توزیع کوشی با پارامتر مقیاس  $t = 1$  است).  $U_i(0, 1)$  (عدد تصادفی یکنواخت است).

(3) تقاطع.

با مبادله مولفه های  $1v_{i,G}+$  و  $x_{i,G}$  بردار آزمایشی  $1u_{i,G}+$  تولید می شود، همانطور که در معادله نشان داده شده است. (25).

$$u_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1} & \text{if } (rand_{ji} \leq CR) \text{ or } (j = j_{rand}) \\ x_{ji,G} & \text{others} \end{cases}, j = 1, 2, \dots, D. \quad (25)$$

جایی که  $rand_{ji} \in [0, 1]$  [مبنی عدد تصادفی یکنواخت است  $rand_{ji} \in 1, 2, \dots, D$  یک شاخص تصادفی انتخاب شده است که تضمین می کند که رابط کاربری،  $1G+$  می تواند حداقل یک پارامتر از  $1G+$  دریافت کند]  $CR \in [0, 1]$  [احتمال تقاطع است].

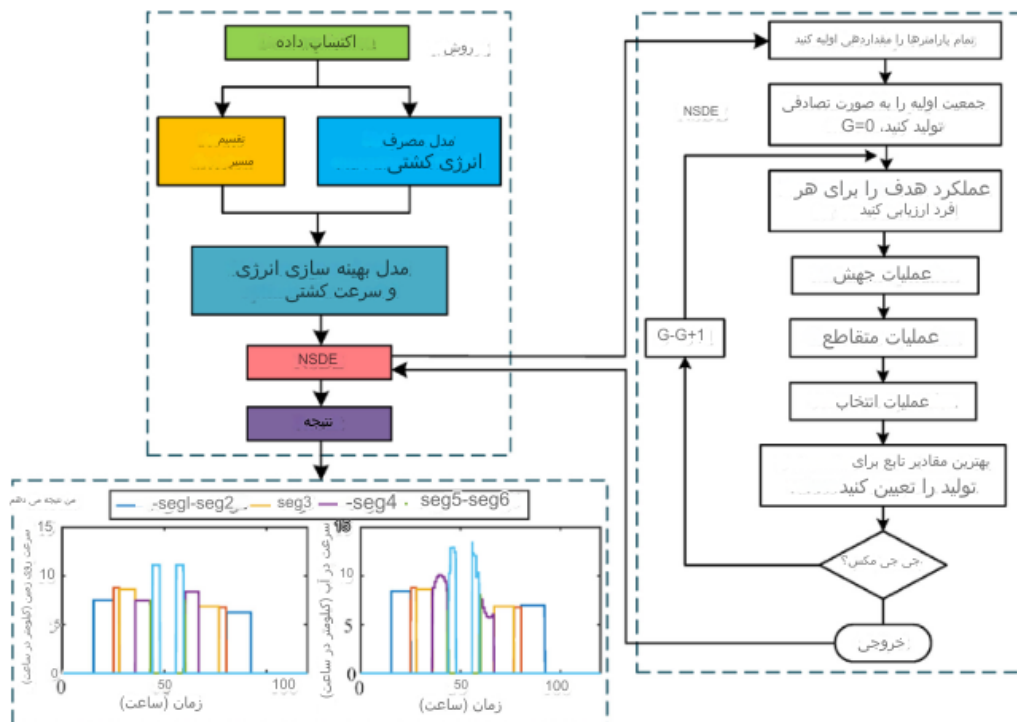
(4) انتخاب.

$1x_{i,G}+$  با مقایسه مقدار تناسب  $u_{i,G}+1f(x)$  و  $x_{i,G}$  تولید می شود.

$$x_{i,G+1} = \begin{cases} u_{i,G+1} & f(u_{i,G+1}) \leq f(x_{i,G}) \\ x_{i,G} & f(u_{i,G+1}) > f(x_{i,G}) \end{cases} \quad (26)$$

$1G = G +$  سپس به مرحله جهش بروید و تکرار کنید تا معیار توقف برآورده شود.

روش پیشنهادی بهینه سازی انرژی و سرعت کشتی در شکل 3 نشان داده شده است. سمت چپ شکل روش پیشنهادی و نتیجه بهینه سازی زمان حرکت و همچنین سرعت روی زمین و سرعت از طریق آب در هر بخش و بازه زمانی است. ابتدا داده های مورد نیاز روش به دست می آید. مسیر به چند بخش تقسیم می شود و مدل مصرف انرژی کشتی ایجاد می شود. سپس مدل بهینه سازی انرژی و سرعت کشتی ایجاد می شود. NSDE برای حل این مدل پیچیده و غیرخطی اتخاذ شده است. در نهایت، سرعت قایقرانی بهینه می شود و هزینه برق به حداقل می رسد. در شکل نتیجه، کشتی در بندر A یا B پهلو می گیرد که سرعت بادبانی صفر است. در غیر این صورت، کشتی در مسیر حرکت می کند. تفاوت بین دو منحنی سرعت روی زمین و سرعت در آب، سرعت آب و کاهش سرعت به دلیل اثر آب کم عمق است. سمت راست شکل نمودار جریان NSDE است که در بالا معرفی شده است.



شکل (3) روش بهینه سازی انرژی و سرعت کشتی پیشنهادی.

## 6- مطالعه موردی و تجزیه و تحلیل نتایج

## 1-6- موضوع تحقیق

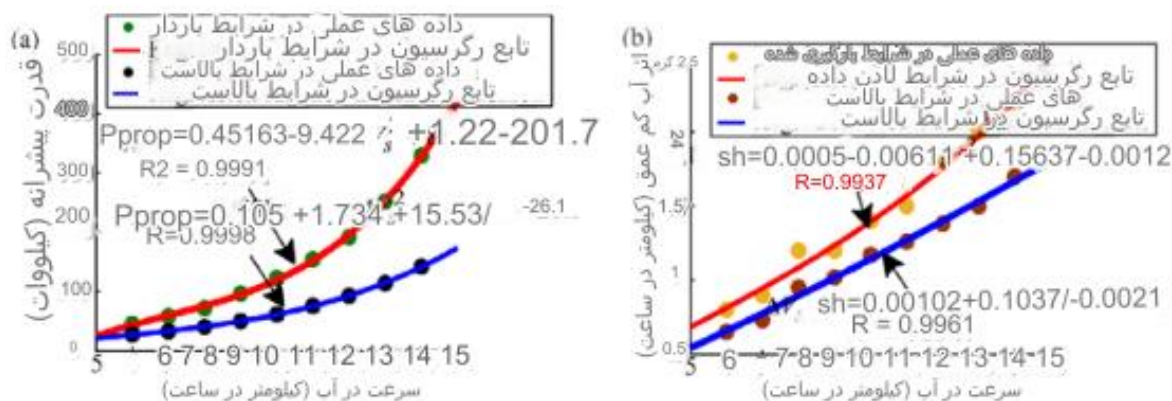
یک AES با باتری داخلی DWT 1600 به عنوان هدف تحقیق انتخاب شده است. کشتی مورد نظر برای حمل و نقل زغال سنگ بین بندر Huzhou و بندر Taicang حرکت می کند. در جدول 1، پارامترهای فنی و عملیاتی کشتی به تفصیل آمده است.

جدول (1) پارامترهای فنی و عملیاتی کشتی.

مولفه های	ارزش	مولفه های	ارزش	مولفه های	ارزش
طول	62.4 متر	سرعت طراحی	10 کیلومتر در ساعت	حداکثر وزارت دفاع	0.8
عمق	4 متر	طول مسیر	270 کیلومتر	زمان بارگیری یا تخلیه	3 ساعت
عرض	12.4 متر	محدودیت زمانی کل	85 ساعت	زمان استراحت و شارژ باتری	5 ساعت
پیش نویس طراحی	3.25 متر	ظرفیت باتری	3400 کیلووات ساعت	تقاضای برق برای بارهای سرویس	5 کیلو وات

## 1-1-6- اکتساب داده ها

اطلاعات عملیات کشتی به دست خواهد آمد. علاوه بر اطلاعات به دست آمده از دستگاه های نصب شده در هواپیما، داده های مربوط به عوامل محیطی، شرایط عملیاتی و قیمت برق دینامیکی نیز جمع آوری می شود. داده های عمق آب و داده های پیش بینی جریان جزر و مدی ارائه شده توسط دپارتمان دریایی محلی در این مقاله استفاده می شود، که در شکل 1 نشان داده شده است. داده های قیمت برق دینامیکی از AEP و DEOK در بازار انرژی PJM در این مقاله معرفی شده است. [15]، همانطور که در شکل 6 (a) نشان داده شده است. داده های تجربی ارائه شده توسط موسسه طراحی برای تناسب با رابطه بین  $V_s$  و  $P_{prop}$  و همچنین  $V_{sh\Delta}$  و  $V_s$ ، همانطور که در شکل 4 نشان داده شده است. در شکل 4 به دست آمده است. (الف)، مقادیر R2 برای خط قرمز 0.9998 و برای خط آبی 0.9991 است. در شکل 4b، مقادیر R2 برای خط قرمز 0.9937 و برای خط آبی 0.9961 است. این نتایج نشان می دهد که این توابع رگرسیون برازش خوبی دارند.



شکل (4) تابع رگرسیون  $P_{prop}$  و  $V_s$  و همچنین  $V_{sh\Delta}$  و  $V_s$ .

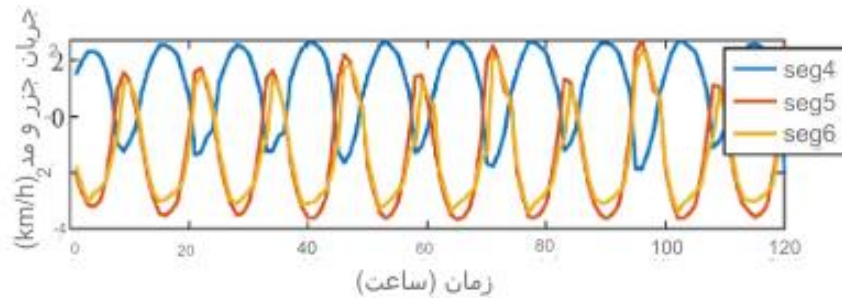
(برای تفسیر ارجاعات به رنگ در این افسانه شکل، خواننده به نسخه وب این مقاله مراجعه می کند.)

### تقسیم مسیر

اطلاعات مسیر قایقرانی در جدول 2 نشان داده شده است [9]. این مسیر بر اساس ویژگی های منطقه ای محیط به شش بخش تقسیم می شود. در بخش 1، اثر آب کم عمق در نظر گرفته خواهد شد. بخش های 4 تا 6 در مصب رودخانه یانگ تسه قرار دارند. در میان آنها، بخش 5، که در محل تلاقی مصب رودخانه یانگ تسه و رودخانه هوانگپو قرار دارد، در مقایسه با دو بخش دیگر، جریان جزر و مدی سریع تری دارد. سپس مقدار میانگین جریان های جزر و مدی در بخش های 4 تا 6 برای 120 ساعت آینده می تواند با استفاده از داده های پیش بینی، همانطور که در شکل 5 نشان داده شده است، محاسبه شود. فرض می شود که جهت این جریان های جزر و مدی با جهتی که کشتی به سمت بندر A حرکت می کند، حفظ می شود.

جدول (2) اطلاعات مسیر قایقرانی [9]

محدودیت سرعت	سرعت آب	مسافت پیموده شده	بخش	مسیر قایقرانی
< 3 گره	اثر آب کم عمق	76 کیلومتر	1	
< 3 گره	0	24 کیلومتر	2	
< 3 گره	0	68 کیلومتر	3	
< 4 گره	جریان جزر و مدی	56 کیلومتر	4	
< 3 گره	جریان جزر و مدی	6 کیلومتر	5	
< 6 گره	جریان جزر و مدی	40 کیلومتر	6	

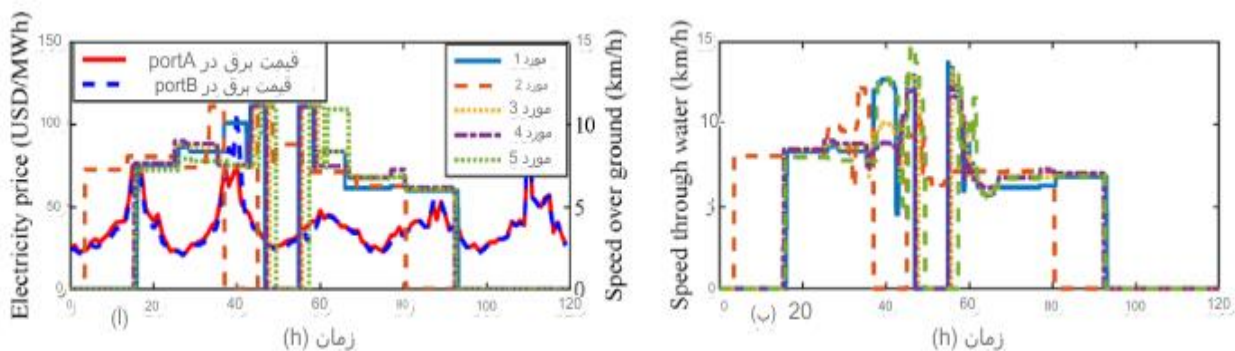


شکل (5) مقدار میانگین جریان جزر و مدی در بخش های 4 تا 6.

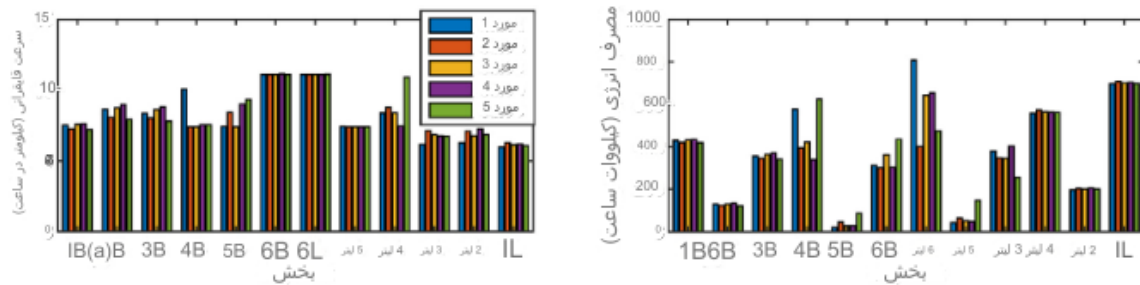
## 2-6- تجزیه و تحلیل نتایج

### 1-2-6- تجزیه و تحلیل مقایسه ای با قیمت برق مختلف و جریان جزر و مدی

به منظور ارائه مرجعی برای اپراتورهای کشتی برای انتخاب سرعت و زمان حرکت بهینه دریانوردی، تأثیر قیمت برق و جریان جزر و مدی بر ناپوری در پنج مورد مطالعه و مقایسه شده است. مورد 1: تجزیه و تحلیل نتایج با در نظر گرفتن قیمت برق دینامیکی و ثابت جریان جزر و مدی (TC مورد 2: تجزیه و تحلیل نتیجه با در نظر گرفتن قیمت ثابت برق و TC متغیر با زمان عادی (1×). مورد 3: تجزیه و تحلیل نتیجه بهینه با در نظر گرفتن قیمت برق دینامیکی و TC متغیر با زمان عادی (1×). مورد 4: تجزیه و تحلیل نتایج بهینه با در نظر گرفتن قیمت برق دینامیکی و افزایش TC متغیر با زمان (0.5×). مورد 5: تجزیه و تحلیل نتیجه بهینه با در نظر گرفتن قیمت برق دینامیکی و کاهش زمان متغیر (2TC×). سرعت بهینه روی زمین و سرعت عبور از آب در هر زمان بازه و همچنین سرعت و مصرف انرژی در بخش ها و شرایط مختلف به دست می آید، همانطور که در شکل های نشان داده شده است. 6 و 7 به ترتیب B و L به ترتیب بیانگر شرایط بالاست و لادن هستند. در این مقاله h 0 به معنای ساعت 0:00 روز اول سفر است. سپس نتایج بهینه از زمان حرکت کشتی، زمان شروع شارژ، هزینه کل برق، مصرف انرژی در دو شرایط عملیاتی و کل مصرف انرژی نیز به دست می آید که در جدول 3 نشان داده شده است.



شکل (6) نتایج بهینه سازی موارد مختلف در هر بازه زمانی: (الف) سرعت روی زمین. (ب) سرعت در آب.



شکل (7) نتایج بهینه سازی موارد مختلف در هر بخش قایقرانی: (الف) سرعت قایقرانی. (ب) مصرف انرژی.

جدول (3) نتایج بهینه سازی موارد مختلف.

موارد	مورد 1	مورد 2	مورد 3	مورد 4	مورد 5
زمان حرکت (ساعت)	16.1	330	15.4	15.3	15.7
شروع زمان شارژ در پورت B)h(	49.8	40.0	50.8	50.1	52.4
شروع زمان شارژ در پورت A)h(	96.1	83.5	95.4	95.3	95.7
کل مصرف انرژی (کیلووات ساعت)	4589.13	4014.38	4333.60	4273.22	4454.56
مصرف انرژی در شرایط بالاست (کیلووات ساعت)	1868.70	1672.72	1783.13	1651.22	2073.60
مصرف انرژی در حالت بارگیری (کیلووات ساعت)	2710.43	2341.66	2550.47	2622.00	2380.96
هزینه کل برق (دلار)	124.53	235.39	118.91	115.17	129.16

در جدول 3، در مقایسه با مورد 1، کل هزینه های برق مورد 3 را می توان از USD 124.53 به USD 118.91 کاهش داد که کاهش 4.02٪ است. سپس حدود 260 کیلووات ساعت انرژی الکتریکی را می توان کاهش داد. در بخش های B4 و L6، مصرف انرژی برای مورد 1 بسیار کمتر از مورد 3 است. زمان شروع شارژ برای این دو مورد نزدیک است، بنابراین تفاوت در هزینه برق عمدتاً به دلیل مصرف انرژی متفاوت است. از یک طرف، جهت جریان جزر و مدی از بالادست به پایین دست در بخش L6 تغییر می کند، به این معنی که کشتی که دیرتر وارد قطعه L6 می شود می تواند سرعت کمتری از طریق آب و مصرف انرژی کمتری داشته باشد. از سوی دیگر، کشتی مورد 1 برای اطمینان از رسیدن به موقع، سرعت خود را در بخش 4 لیتری بالادست بالادست TC کاهش می دهد تا در مصرف انرژی صرفه جویی کند و در سایر بخش ها بدون جریان جزر و مد سرعت بگیرد.

علاوه بر این، DoD در شرایط بارگیری برای مورد 1 0.797 است که نزدیک به 0.8 DoDmax و ناامن برای عملیات کشتی است و برای مورد 3 0.75 است که ایمن تر است. در مقایسه نتیجه مورد 1 و Case 2، اگرچه کل مصرف انرژی مورد 2 بسیار کمتر از مورد 3 است، هزینه کل برق مورد 2 تقریباً دو برابر مورد 3 است. دلیل آن این است که موارد در نظر گرفتن قیمت های دینامیکی برق می توانند به بندر با قیمت های نسبتاً پایین، پس از آن هزینه کل برق می تواند به سرعت کاهش یابد. بنابراین، این روش می تواند از ویژگی های عوامل محیطی و قیمت دینامیک برق برای دستیابی به هزینه برق بهینه و ایمن بهره برداری بهره برد.

در مقایسه نتیجه موارد 3 و 4، هزینه کل برق و مصرف انرژی برای مورد 4 کمترین است. در مقایسه با مورد 3، کشتی مورد 3 انرژی بیشتری در بخش هایی با TC پایین دست و انرژی کمتری در بخش هایی با TC بالادست مصرف می کند. به این ترتیب انرژی افزایش یافته انرژی کاهش یافته را جبران می کند. علاوه بر این، جریان های جزر و مدی بالادست در B4 و B6 به اوج خود رسیده اند، بنابراین تغییر در مصرف انرژی در شرایط بالادست آشکارتر از شرایط بارگیری خواهد بود. بنابراین، مصرف انرژی برای مورد 4 در حالت بالادست افزایش و در شرایط باردار کاهش می یابد. در مقایسه نتیجه مورد 3 و 5، کل هزینه برق و مصرف انرژی برای مورد 5 بیشترین مقدار را دارد. در مقایسه با مورد 3، کشتی مورد 5 انرژی بیشتری در بخش هایی با TC بالادست و انرژی کمتری در بخش هایی با TC پایین دست مصرف می کند.

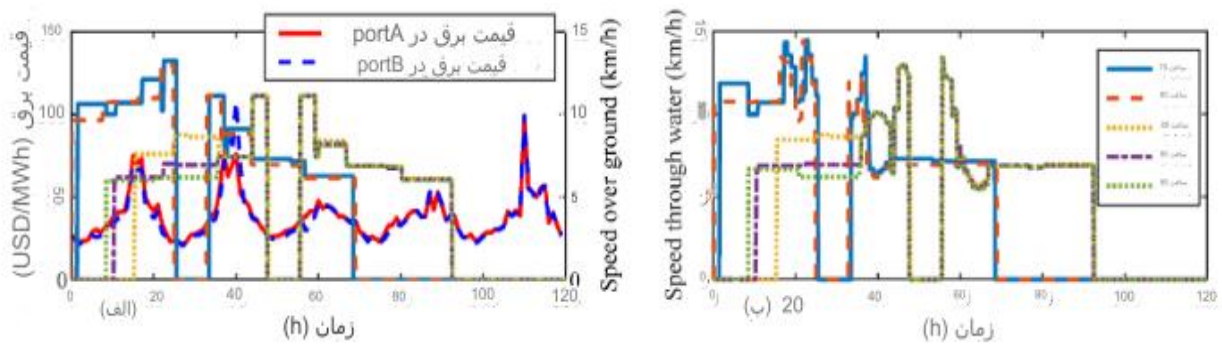
بنابراین، مصرف انرژی برای مورد 5 در شرایط بالادست کاهش و در شرایط باردار افزایش می یابد. علاوه بر این، زمان شروع شارژ در پورت B برای کیس 3، کیس 4 و کیس 5 به ترتیب 50.8 ساعت، 50.1 ساعت و 52.4 ساعت است. می توان دریافت که زمان شروع شارژ برای Case 5 2 ساعت دیرتر از سایر موارد است، به این معنی که کشتی باتری را با قیمت برق بالاتر شارژ می کند. از این سه مورد، می توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی می تواند سرعت و زمان حرکت را به طور موثری متناسب با محیط در حال تغییر تنظیم کند. بنابراین، الکتریسیته بهینه تحت انواع مختلف جریان جزر و مدی را می توان با روش پیشنهادی به دست آورد.

## 2-2-6- تجزیه و تحلیل مقایسه ای با محدودیت های زمانی مختلف قایقرانی

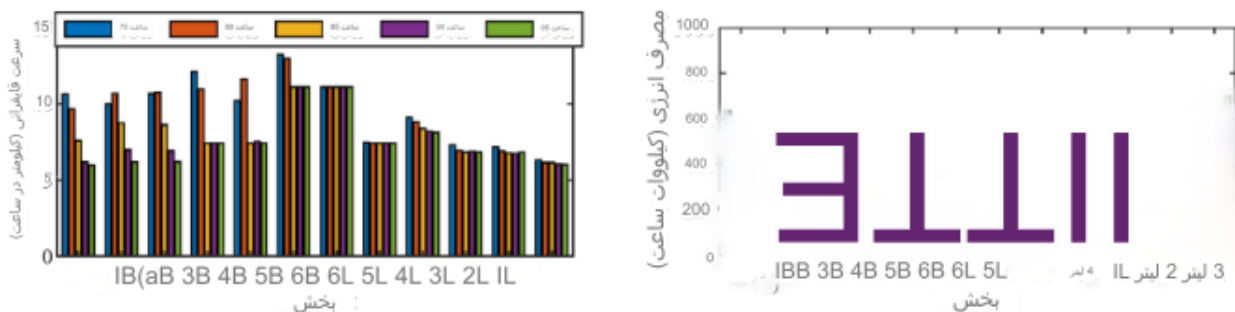
با توجه به الزامات مختلف برای صاحبان کشتی در زمان قایقرانی، مصرف انرژی و هزینه برق تحت محدودیت های زمانی مختلف تحلیل می شوند. نتایج بهینه سازی با محدودیت زمانی قایقرانی از 75 تا 95 ساعت از طریق روش پیشنهادی به دست می آید، همانطور که در شکل های نشان داده شده است. به ترتیب 8 و 9. کل مصرف انرژی و هزینه برق تحت محدودیت های زمانی مختلف در جدول 4 نشان داده شده است. با افزایش محدودیت زمانی قایقرانی، سرعت های بهینه در هر بخش در شکل 9 کاهش می یابد و یک روند نزولی در کل مصرف انرژی و هزینه های برق وجود دارد. در جدول 4 می توان نتیجه گرفت که با افزایش محدودیت های زمانی قایقرانی، پتانسیل بیشتری برای کاهش سرعت وجود دارد و در نتیجه انرژی بیشتری صرفه جویی خواهد شد. علاوه بر این، هزینه های بهینه برق 90 ساعت و 95 ساعت نزدیک است، بنابراین مزایای افزایش محدودیت های زمانی قایقرانی ممکن است زمانی که سرعت کشتی به محدوده های پایین تر مربوطه می رسد آشکار نباشد. علاوه بر این، نتایج بهینه زمان حرکت با محدودیت های زمانی مختلف دریانوردی تغییر می کند تا کشتی همیشه بتواند به بندری با قیمت برق پایین برسد و از جریان جزر و مدی پایین دست برای کاهش مصرف انرژی استفاده کند. بنابراین، روش پیشنهادی هنوز با محدودیت های زمانی مختلف قایقرانی مؤثر است.

جدول (4) نتایج بهینه سازی تحت محدودیت های زمانی مختلف دریانوردی.

موارد	75 ساعت	80 ساعت	85 ساعت	90 ساعت	95 ساعت
زمان حرکت (ساعت)	1.5	0.0	15.4	10.4	8.5
کل مصرف انرژی (کیلووات ساعت)	4737.20	4601.15	4333.60	4256.96	4245.21
هزینه کل برق (دلار)	129.68	124.01	118.91	115.97	115.70



شکل (8) نتایج بهینه‌سازی تحت محدودیت‌های زمانی مختلف در هر بازه زمانی: (الف) سرعت روی زمین. (ب) سرعت در آب.



شکل (9) نتایج بهینه‌سازی تحت محدودیت‌های زمانی مختلف در هر بخش قایقرانی: (الف) سرعت قایقرانی. (ب) مصرف انرژی.

## 7- نتیجه گیری

در این مقاله، مدل مصرف انرژی برای AES با باتری داخلی از طریق بررسی فرآیند انتقال انرژی DC IPS ایجاد می‌شود. مصرف انرژی تحت سرعت‌ها و شرایط مختلف قایقرانی را می‌توان به طور موثر توسط این مدل توصیف کرد. علاوه بر این، یک مدل بهینه‌سازی انرژی و سرعت کشتی غیرخطی برای AES با باتری کار می‌کند تا هزینه‌های برق را به حداقل برساند. سپس با اتخاذ الگوریتم NSDE می‌توان سرعت‌های بهینه در بخش‌ها و شرایط مختلف و زمان حرکت را بدست آورد. مطالعه موردی نشان می‌دهد که هزینه برق در مقایسه با روشی که محیط نایبری ثابت را در نظر می‌گیرد، حدود 4 درصد کاهش می‌یابد. سپس تحلیل‌های مقایسه‌ای قیمت‌های مختلف برق، جریان‌های جزر و مدی و محدودیت‌های زمانی انجام می‌شود که کارایی و انعطاف‌پذیری روش پیشنهادی را بیشتر به اثبات رسانده است. با این حال، داده‌های محیط نایبری مورد استفاده در این مقاله عمدتاً از داده‌های پیش‌بینی آب و هوا به دست می‌آیند که دقت کمتری نسبت به محیط نایبری واقعی با ویژگی‌های پویا و نامطمئن دارند. علاوه بر آن، عوامل مؤثرتر پویاتر مانند کارایی عملیات بندر و تقاضای محموله نیز در این مقاله بررسی نشده است. بنابراین، تحقیقات آینده بر روی سرعت دینامیکی و بهینه‌سازی انرژی برای AES با باتری داخلی با در نظر گرفتن عوامل تأثیرگذار دینامیکی تمرکز خواهد کرد. روش پیشنهادی می‌تواند به اپراتورهای کشتی مرجعی برای عملیات و مدیریت بهتر ارائه دهد.

## منابع

- [1] Perčić M, Vladimir N, Fan A. Life-cycle cost assessment of alternative marine fuels to reduce the carbon footprint in short-sea shipping: A case study of Croatia. *Appl Energy* 2020;279:115848.
- [2] Xu L, Guerrero J, Lashab A, Wei B, Bazmohammadi N, Vasquez J, et al. A review of DC shipboard microgrids part I: Power architectures, energy storage and power converters. *IEEE Trans Power Electron* 2021;37:5155–72.
- [3] Fan A, Wang J, He Y, Perčić M, Vladimir N, Yang L. Decarbonising inland ship power system: Alternative solution and assessment method. *Energy* 2021;226:120266.
- [4] WeiMing Ma. A survey of the second-generation vessel integrated power system. In: 2011 international conference on advanced power system automation and protection. 2011, p. 1293–302.
- [5] Weiming Ma. Development of vessel integrated power system. In: 2011 international conference on electrical machines and systems. 2011, p. 1–12.
- [6] Psaraftis HN. Speed optimization versus speed reduction: Are speed limits better than a bunker levy? *Marit Econ Logist* 2019;21:524–42.
- [7] Sun X, Yan X, Wu B, Song X. Analysis of the operational energy efficiency for inland river ships. *Transp Res D* 2013;22:34–9.
- [8] Yan X, Wang K, Yuan Y, Jiang X, Negenborn RR. Energy-efficient shipping: An application of big data analysis for optimizing engine speed of inland ships considering multiple environmental factors. *Ocean Eng* 2018;169:457–68.
- [9] Zhang Y, Sun L, Ma F, Wu Y, Jiang W, Fu L. Collaborative optimization of the battery capacity and sailing speed considering multiple operation factors for a battery-powered ship. *World Electr Veh J* 2022;13.
- [10] Gu M, Wen S, Zhu M, Chen C, Huang Y. Voyage optimization for all-electric vessels integrated with swappable containerized battery. In: 11th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES). 2021, p. 586–91.
- [11] Storn R. On the usage of differential evolution for function optimization. In: *Proceedings of North American Fuzzy Information Processing*. 1996, p. 519–23.
- [12] Fang S, Wang Y, Gou B, Xu Y. Toward future green maritime transportation: An overview of seaport microgrids and all-electric ships. *IEEE Trans Veh Technol* 2019.69:207.19.
- [13] Fan A, Yan X, Bucknall R, Yin Q, Ji S, Liu Y, et al. A novel ship energy efficiency model considering random environmental parameters. *J Mar Eng Technol* 2018;19:215–28.
- [14] Yang Z, Yao X, He J. Making a difference to differential evolution. In: Siarry P, Michalewicz Z, editors. *Advances in Metaheuristics for Hard Optimization*. 2008, p. 397–414.

[15] O’Conor M. The effects of coal capacity retirement on wholesale electricity prices: a demand side analysis (Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports), 2019.

## Optimizing the energy and speed of domestic ships with batteries, taking into account the price, dynamics of electricity and complex navigation environment

Mohammad Hossein Anusha\* - Yasouj Men's Vocational Technical University

mohammadjafarimehr72@gmail.com

Fardin Yazdanpna - Yasouj Men's Vocational Technical University

frdynyzdanpna27@gmail.com

Majid Keshavarz - Yasouj Men's Vocational Technical University

Skeshavarz.tvu@ac.ir

**Abstract** Decarbonization has been a worldwide trend, especially in the transportation industry. A pure battery electric ship (AES) may be the most flexible way to achieve ship decarbonisation in recent years. Compared to conventional ships, the initial investment cost is high and the energy surplus is low for battery-powered ships. Therefore, an energy management strategy that can minimize the cost of operation and ensure the safety of energy consumption is very important. In this paper, considering the dynamic price of electricity and environmental factors, a joint optimization method of ship speed and energy consumption for ships with internal batteries is proposed. In the first step, the energy consumption model is built by analyzing the interaction of the hull, engine and propeller. Then the speed and energy optimization model is proposed to minimize the ship operation cost. Finally, a neighborhood search differential evolution (NSDE) is adopted to solve the proposed complex nonlinear optimization problem to obtain the optimal sailing speed and movement time. A case study is then carried out with a real battery powered cargo ship. The results show that this method can provide a reference for ship operators to better manage AES with internal battery.

**Keywords:** inland ship with battery, speed optimization, dynamic electricity price, navigation environment, differential evolution algorithm (DE), integrated power system (IPS).