



DOR:

20.1001.1.23223146.1401.9.2.6.4

نشریه علمی-فصلنامه علمی در مهندسی برق

دوره ۹ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۱

صفحات ۱۳۴ الی ۱۵۵

ISSN: 2322-3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

# تعیین سرعت بهینه حرکت کشتی دارای سیستم رانش الکتریکی با بهره‌گیری از یک مدل تصادفی خطی با هدف کمینه کردن هزینه انرژی

محمد علیزاده<sup>۱</sup> و علی گودرزی املشی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر، ایران،

[m.alizadeh@nit.ac.ir](mailto:m.alizadeh@nit.ac.ir)

<sup>۲</sup> مربی دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر، ایران، [a.g.bargh76@gmail.com](mailto:a.g.bargh76@gmail.com)

## چکیده

با هدف کاهش هزینه تولید انرژی الکتریکی و نیز کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشتی‌های دارای سیستم رانش الکتریکی، از منابع تولید انرژی تجدیدپذیر خورشیدی و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در کنار واحدهای حرارتی استفاده می‌شود. لذا در این مقاله، یک مدل خطی و تصادفی آمیخته با عدد صحیح به منظور مدیریت بهینه انرژی الکتریکی یک کشتی دارای سیستم رانش الکتریکی، ذخیره‌ساز انرژی، ژنراتورهای حرارتی و منابع تجدیدپذیر خورشیدی، با هدف حداقل کردن هزینه تولید انرژی الکتریکی و تعیین سرعت بهینه حرکت کشتی پیشنهاد شده است. در این مقاله از روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای مدل‌سازی عدم قطعیت در پیش‌بینی توان تولیدی منابع تجدیدپذیر خورشیدی و بار الکتریکی کشتی استفاده شده است. مدل پیشنهادی در نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS، پیاده‌سازی و تحلیل شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان از کارآمدی مدل پیشنهادی و کاهش هزینه تولید انرژی الکتریکی در صورت حرکت کشتی با سرعت بهینه و استفاده از منابع ذخیره‌ساز انرژی به مقدار ۷/۷ درصد دارد.

## واژه‌های کلیدی

رانش الکتریکی،

مدیریت انرژی،

برنامه مشارکت واحدهای حرارتی،

شبیه‌سازی مونت کارلو.



Sahand University  
of Technology

DOR:

[20.1001.1.23223146.1401.9.2.6.4](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1401.9.2.6.4)

Journal of Nonlinear  
Systems in Electrical  
Engineering

Vol.9, No.2

Autumn and Winter 2022

ISSN: 2322 – 3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

# Determining the Optimal Speed of the Ship with an Electric Propulsion System Using a Linear Stochastic Model with the Aim of Minimizing the Energy Cost

Mohammad Alizadeh<sup>1</sup>, Ali Godarzi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>**Corresponding Author**, Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Imam Khomeini University of Marine Sciences, Nowshahr, Iran, [m.alizadeh@nit.ac.ir](mailto:m.alizadeh@nit.ac.ir)

<sup>2</sup>Instructor, Department of Electrical Engineering, Imam Khomeini University of Marine Sciences, Nowshahr, Iran, [a.g.bargh76@gmail.com](mailto:a.g.bargh76@gmail.com)

## ABSTRACT

### Keywords

Electric Propulsion,  
Energy Management,  
Thermal Unit Participation  
Program,  
Monte Carlo simulation.

With the aim of reducing the cost of electric energy production and reducing greenhouse gas emissions in ships with electric propulsion systems, renewable solar energy sources, and energy storage systems are used in addition to thermal units. Therefore, in this article, a linear and stochastic mixed integer model has been proposed to optimally manage the electrical energy of a ship having an electric propulsion system, energy storage, thermal generators, and renewable solar resources, with the aim of minimizing the cost of producing electrical energy and determining the optimal speed of the ship. In this article, the Monte Carlo simulation method is used to model the uncertainty in predicting the production power of renewable solar resources and the electric load of the ship. The proposed model has been implemented and analyzed in GAMS optimization software. The simulation results show the effectiveness of the proposed model and the reduction of the cost of electric energy production if the ship moves at the optimal speed and uses energy storage resources by 7.7%.

## ۱- مقدمه

سیستم رانش کاملاً الکتریکی در کشتی‌ها منجر به افزایش پایداری، افزایش بهره‌وری انرژی، انعطاف‌پذیری عملکرد و همچنین محدودیت انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. در کشتی‌های دارای سیستم رانش الکتریکی، قسمت عمده‌ای از توان تولیدی ژنراتورها توسط موتورهای الکتریکی بزرگ مربوط به سیستم رانش مصرف می‌شود. عملکرد بهینه سیستم قدرت می‌تواند منجر به کاهش مصرف سوخت، کاهش هزینه‌های تولید انرژی و در نتیجه بهبود بهره‌وری انرژی شود [۱]. از این‌رو، استقرار یک سیستم مدیریت انرژی الکتریکی با طراحی مناسب برای کشتی‌های دارای سیستم رانش الکتریکی به یک ضرورت تبدیل شده است. اهداف عمده سیستم‌های مدیریت انرژی کشتی شامل حداقل کردن هزینه‌های بهره‌برداری و محدودیت انتشار گازهای گلخانه‌ای است. این اهداف همراه با رضایت‌مندی از محدودیت‌های عملیاتی کشتی، مدیریت بهینه انرژی در کشتی‌ها را به یک مشکل پیچیده تبدیل کرده است.

مدیریت سمت تقاضا نقشی اساسی در عملکرد بهینه سیستم الکتریکی کشتی دارد. در کشتی‌های دارای سیستم رانش الکتریکی، قسمت عمده‌ای از توان الکتریکی تولیدی به سیستم رانش اختصاص می‌یابد. از این‌رو، مدیریت سمت تقاضا بستگی زیادی به تنظیم توان سیستم رانش و در نتیجه سرعت کشتی دارد. لذا برنامه‌ریزی تولید بهینه توان همراه با مدیریت سمت تقاضا منجر به بروز چندین اثر مثبت در طراحی و بهره‌برداری از کشتی مانند کاهش تعداد محرکه‌های اولیه، کاهش هزینه سوخت و محدودیت در انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود.

منابع انرژی تجدیدپذیر همراه با سیستم‌های ذخیره انرژی می‌توانند به‌عنوان یک راه‌حل برای حمل‌ونقل سبز در سیستم الکتریکی کشتی‌ها مورد استفاده قرار گیرند. در [۲] به بررسی پیشرفت‌های مرتبط با به‌کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم قدرت کشتی مانند انرژی خورشیدی، انرژی باد و سلول‌های سوختی پرداخته شده است. در [۳، ۴]، روش‌های مدیریت انرژی برای سیستم انرژی یک کشتی تمام الکتریکی و بازدهی سیستم انرژی به روش‌های مختلف بررسی شده است. در [۵]، فناوری‌های تولید توان الکتریکی (موتورهای دیزلی، پیل سوختی، انرژی خورشیدی و باد به‌عنوان منابع انرژی تجدیدپذیر)، اجزای ذخیره‌سازی انرژی (باتری‌ها، ابرخازن‌ها و چرخ‌های طیار)، سیستم‌های مدیریت انرژی و توپولوژی‌های رانش هیبریدی (معماری سریال، موازی و سریال-موازی) با برجسته‌کردن سیستم‌های مدیریت انرژی و روش‌های بهینه‌سازی متداول بررسی شده‌اند. در [۶]، یک سیستم مدیریت توان کشتی با بهره‌گیری از روش کمینه‌سازی مصرف معادل<sup>۱</sup> همراه با حداقل کردن مصرف سوخت و تقسیم بهینه توان بین منابع انرژی هیبریدی در زمان واقعی پیشنهاد شده است. در [۷]، یک روش بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی برای کاهش مصرف انرژی پیشنهاد شده است. این روش شامل ترکیبی از بهینه‌سازی سرعت و مدیریت انرژی است که در سمت تقاضا، حداقل کردن توان مورد نیاز پروانه به‌عنوان تابع هدف برای مدل بهینه‌سازی سرعت و در سمت عرضه، حداقل کردن هزینه انرژی سیستم قدرت هیبریدی به‌عنوان تابع هدف مدل مدیریت انرژی در نظر گرفته است. در [۸] یک سیستم مدیریت انرژی هوشمند برای سیستم الکتریکی کشتی بر اساس سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی<sup>۲</sup> و منبع انرژی متشکل از پیل سوختی به‌عنوان منبع اصلی توان الکتریکی و بانک باتری به‌عنوان سیستم ذخیره انرژی با هدف حداقل کردن مصرف سوخت هیدروژن و اطمینان از تعادل سیستم پیشنهاد شده است. مرجع [۹]

<sup>1</sup> Equivalent Consumption Minimization Strategy

<sup>2</sup> Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

یک طرح مدیریت توان توزیع شده چند عاملی را برای دستیابی به تنظیم ولتاژ و تقسیم اقتصادی توان دیزل ژنراتورها برای بهره‌وری مصرف سوخت در کشتی‌های دارای سیستم قدرت  $DC$  ارائه کرده است. مرجع [۱۰] استراتژی‌های مختلف مدیریت انرژی را برای یک کشتی مسافربری ترکیبی که با ترکیبی از سلول‌های سوختی و باتری تأمین می‌شود مقایسه کرده است. در [۱۱] یک طرح مدیریت انرژی مبتنی بر کنترل پیش‌بین مدلی برای بهینه‌سازی هماهنگی بین ذخیره انرژی و ژنراتورها، پیشنهاد و اجرا شده است. در [۱۲] با توجه به میزان تولید گازهای گلخانه‌ای و زمان نوابری مداوم کشتی هیبریدی، یک استراتژی بهینه مصرف انرژی بر اساس مقدار بار پیش‌بینی شده برای دستیابی به اهداف حداقل کردن مصرف سوخت و آلاینده‌گی و حداکثر کردن استقامت عملکرد کشتی پیشنهاد شده است.

با ادغام سیستم‌های الکتریکی و تجهیزات تأمین توان الکتریکی در حمل‌ونقل دریایی، سیستم رانش الکتریکی، مزایای متعددی مانند بهبود توانایی در انطباق با قوانین بین‌المللی، افزایش انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان، کاهش هزینه‌های عملیاتی و دسترسی به قابلیت‌های اتوماسیون پیشرفته را برای مالکان کشتی‌ها به ارمغان آورده است. با این حال، سیستم‌های رانش الکتریکی و هیبریدی، فشار قابل توجهی را بر طراحان کشتی در هنگام بهینه‌سازی سیستم قدرت و رانش کشتی و استراتژی‌های کنترل آن‌ها وارد کرده است. مرجع [۱۳] مرور جامعی بر سیستم‌های رانش الکتریکی معمولی و پیشرفته در کشتی‌های تجاری فعلی و کشتی‌های هوشمند آینده ارائه کرده است. در [۱۴]، یک سیستم مدیریت انرژی برای تقسیم بهینه توان در سیستم رانش هیبریدی کشتی پیشنهاد شده است که گشتاور موتور دیزل و موتور الکتریکی بر اساس یک استراتژی پیش‌بینی با روش ضریب وزنی و با هدف حداقل کردن مصرف سوخت و کاهش انتشار آلاینده‌گی تعیین شده است. در [۱۵] یک ترکیبی از باتری و ابرخازن به‌عنوان بافر برای جبران نوسانات بار، مانند نوسانات بار پیش‌رانه و بارهای قدرت پالس استفاده می‌شود.

مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای حرارتی<sup>۱</sup> به‌عنوان یک برنامه بهینه‌سازی سیستم قدرت تلاش دارد تا با تعیین زمان ورود و خروج واحدها و نیز تعیین تولید بهینه هر واحد، هزینه کل تولید را کمینه سازد [۱۶]. در [۱۷] مروری جامع بر مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای حرارتی مبتنی بر سود انجام شده است. برای حل این مسئله روش‌هایی مانند مهاجرت ماهی‌ها [۱۸]، یادگیری تقویتی عمیق [۱۹]، الگوریتم کلونی مورچگان [۲۰]، الگوریتم ژنتیک [۲۱]، بهینه‌سازی ازدحام ذرات [۲۲]، عکس‌العمل شیمیایی [۲۳] و الگوریتم جهش قورباغه [۲۴] پیشنهاد شده‌اند. مرجع [۲۵] به مسئله هم‌زمان پاسخگویی بار اضطراری و مشارکت واحدها به‌صورت بلندمدت پرداخته و نتایج آن را با قراردادهای بارهای قابل قطع مقایسه کرده است. مرجع [۲۶] به تأثیر اجرای هم‌زمان برنامه پاسخگویی بار زمان استفاده در کاهش هزینه مشارکت واحدها پرداخته است. در [۲۷] مدلی برای پاسخگویی سمت بار با در نظر گرفتن بارهای قابل قطع ارائه شده است. در [۲۸] برنامه پاسخگویی بار برای تأمین رزرو با در نظر گرفتن قیدهای قابلیت اطمینان استفاده شده است. مرجع [۲۹] از الگوریتم فرانک-ولف<sup>۵</sup> برای حل مسئله مشارکت واحدها با در نظر گرفتن حجم بالایی از بارهای پاسخگویی تقاضا استفاده کرده است.

<sup>1</sup> Unit Commitment

<sup>2</sup> Ant Colony

<sup>3</sup> Chemical Reaction

<sup>4</sup> Shuffled Frog Leaping Algorithm

<sup>5</sup> Frank-Wolfe algorithm

کشتی *Ghost G180H* اولین قایق بادبانی هیبریدی است که از ترکیبی از پنل‌های خورشیدی و باتری‌های لیتیم-یون جهت تولید نیروی رانش استفاده می‌کند. پنل‌های مسطح خورشیدی روی عرشه کشتی، قدرتمندترین سیستم خورشیدی در جهان است که ۱۶۰ کیلووات توان الکتریکی تولید می‌کند [۳۰]. کشتی *Turanor Planet Solar* که به‌عنوان بزرگ‌ترین کشتی خورشیدی جهان شناخته می‌شود که انرژی حرکتی خود را جهت سفر به دور دنیا در سال ۲۰۱۲ و طی سفری ۱۸ ماهه از طریق پنل‌های فتولتائیک به مساحت ۵۳۷ مترمربعی تأمین کرده است [۳۰].

م تفاوت از سیستم قدرت زمینی، یک سیستم قدرت کشتی تمام الکتریکی، دارای نسبت زیادی از بارهای مربوط به بخش سیستم رانش الکتریکی است که دارای ویژگی‌های دینامیک بالا، تناوب، عدم قطعیت و وابستگی زیاد به محیط دریایی است [۳۱]. با بررسی مقالات، مشخص می‌شود که هیچ‌یک از مقالاتی که در زمینه مدیریت انرژی در سیستم الکتریکی یک شناور دریایی منتشر شده‌اند تأثیر مسئله در مدار قرار گرفتن ژنراتورها را در هزینه تولید انرژی در نظر نگرفته‌اند. لذا در این مقاله، مدلی خطی و احتمالاتی به‌منظور مدیریت توان الکتریکی، تعیین زمان روشن و خاموش بودن هر یک از ژنراتورها و محدود کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای در یک کشتی تمام الکتریکی که از سیستم رانش الکتریکی، ذخیره‌ساز انرژی و توان تأسیسات ساحلی استفاده می‌کند پیشنهاد شده است. به‌طور کلی، ویژگی‌های اصلی این مقاله می‌تواند به شرح زیر باشد:

- ارائه یک مدل احتمالاتی و خطی آمیخته با عدد صحیح به‌منظور تعیین برنامه بهینه مشارکت واحدهای حرارتی
- تعیین سرعت بهینه حرکت کشتی به‌منظور حداقل کردن هزینه تولید انرژی
- در نظر گرفتن عدم قطعیت در پیش‌بینی توان تولیدی منابع تجدیدپذیر خورشیدی و توان الکتریکی مصرفی
- بهره‌برداری بهینه از ذخیره‌ساز انرژی و امکان تأمین توان الکتریکی از ساحل در هنگام توقف کشتی در بندرها

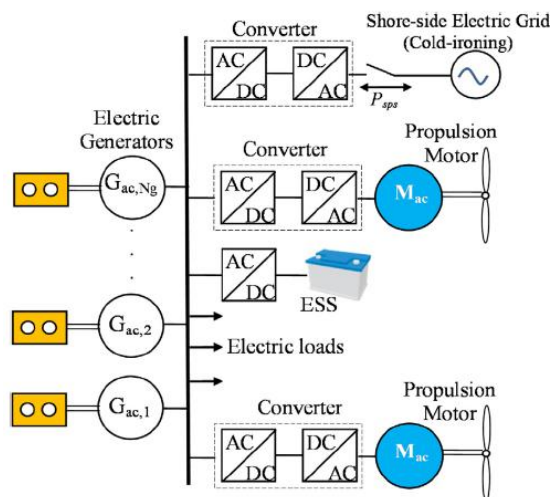
برای کاهش زمان محاسبات، تعداد سناریوهای توان تولیدی خورشیدی و بار شبکه با به‌کارگیری روش فاصله احتمالی<sup>۱</sup> کاهش یافته است. ادامه این مقاله، شامل مطالب زیر است:

در بخش دوم، مسئله مشارکت واحدهای حرارتی یک کشتی دارای سیستم رانش الکتریکی و ذخیره‌ساز انرژی به‌صورت خطی و با تعریف تابع هدف و قیود موردنیاز مدل شده است. در بخش سوم، شبیه‌سازی مدل پیشنهادی در سیستم قدرت یک کشتی دارای رانش الکتریکی، انجام و نتایج تحلیل شده و نتیجه‌گیری نیز در بخش چهارم آورده شده است.

## ۲- مدل‌سازی ریاضی مسئله

نمودار الکتریکی تک‌خطی سیستم تولید انرژی یک کشتی دارای سیستم رانش کاملاً الکتریکی در شکل (۱) نشان داده شده است [۳۲]. در این شبکه، یک سویچ برد اصلی وجود دارد که همه ژنراتورها به آن متصل هستند. هم‌چنین فیدرهای مختلفی وجود دارد که از سویچ برد اصلی تأمین می‌شوند و از طریق ترانسفورماتورها و مبدل‌ها، نیروی الکتریکی موردنیاز را برای موتورهای سیستم رانش الکتریکی و سایر بارهای الکتریکی خدماتی تأمین می‌کنند. هر ژنراتور، تابع هزینه سوخت مصرفی و محدودیت‌های فنی خود را دارد. در سیستم مورد بررسی، یک سیستم ذخیره انرژی نیز به فیدر اصلی متصل است که جهت کمک به مدیریت انرژی

<sup>۱</sup> Probability Distance



شکل ۱. نمودار الکتریکی تک خطی سیستم قدرت کشتی دارای سیستم رانش کاملاً الکتریکی

کشتی، هرگونه کمبود و یا اضافه توان تولیدی در کشتی را تنظیم می‌کند. در این شبکه، فرض بر این است که امکان اتصال سیستم تأمین توان الکتریکی کشتی از ساحل در مدت زمان پهلوگیری کشتی در بندرها وجود دارد.

سیستم قدرت کشتی دارای ویژگی‌های عملیاتی و فنی ویژه‌ای است که آن‌ها را از سیستم‌های قدرت مربوط به ساحل متمایز می‌کند. توان الکتریکی مصرفی کشتی‌های دارای سیستم رانش الکتریکی عمدتاً به مصرف موتورهای پیش‌رانه الکتریکی بستگی دارد که آن نیز به برنامه دریاوردی کشتی بستگی دارد. از این روی، در کشتی‌های دارای سیستم رانش الکتریکی، می‌توان بخش عمده‌ای از تقاضای بار را با تنظیم سرعت کشتی تنظیم کرد. تنظیم بهینه توان سیستم رانش باید به صورت مشترک با بهینه‌سازی توان تولیدی الکتریکی انجام شود. این مسئله شامل در مدار قرار گرفتن واحدها و پخش بار بهینه است. در ادامه به مدل‌سازی مسئله تأمین انرژی الکتریکی موردنیاز یک کشتی دارای سیستم رانش الکتریکی پرداخته شده است.

## ۱-۲- هزینه تأمین انرژی الکتریکی

هزینه تأمین انرژی الکتریکی ( $C_{tot}$ ) به صورت مجموع هزینه سوخت مصرفی ( $FC_{it\omega}$ ) و راه‌اندازی ژنراتورها ( $SC_{it}$ ) و همچنین هزینه تأمین انرژی مورد نیاز از توان الکتریکی تولیدشده در ساحل در هنگام توقف در بندرها ( $SPC_{it\omega}$ ) محاسبه شده است. با توجه به امکان تحقق سناریوهای مختلف برای توان تولیدی خورشیدی و مقدار بار شبکه، تابع هدف مسئله به صورت (۱) تعریف می‌شود:

$$C_{tot} = \sum_{i=1}^{N_G} \sum_{t=1}^T \sum_{\omega=1}^{\Omega} \rho_{\omega} (FC_{it\omega} + SC_{it} + SPC_{it\omega}) \quad (1)$$

که  $i$  اندیس ژنراتور،  $t$  اندیس دوره زمانی،  $\omega$  اندیس سناریو،  $N_G$  تعداد ژنراتورها،  $T$  زمان مورد مطالعه،  $\Omega$  مجموعه سناریوها و  $\rho_{\omega}$  احتمال وقوع سناریوی  $\omega$  است.

## • هزینه سوخت مصرفی هر ژنراتور

هزینه بهره‌برداری واحدهای حرارتی شامل هزینه راه‌اندازی و هزینه سوخت است. هزینه سوخت ژنراتور  $\omega$  به صورت یک تابع درجه دوم از توان تولیدی آن ژنراتور بیان می‌شود [۳۳]:

$$FC_{it\omega} = a_i P_{it\omega}^2 + b_i P_{it\omega} + c_i \quad (2)$$

که  $a_i$ ،  $b_i$  و  $c_i$  ضرایب تابع هزینه سوخت ژنراتور  $\omega$  هستند. برای خطی‌سازی مدل پیشنهادی طبق شکل (۲)، تابع هزینه به چند بخش خطی تقریب زده می‌شود. برای خطی‌سازی منحنی درجه دوم هزینه سوخت از روابط زیر استفاده شده است [۳۴]:

$$FC_{it\omega} = C_i^{\min} U_{it} + \sum_{k=1}^{N_k} m_{ik} g_{ikt\omega} \quad \forall i, t, \omega \quad (3)$$

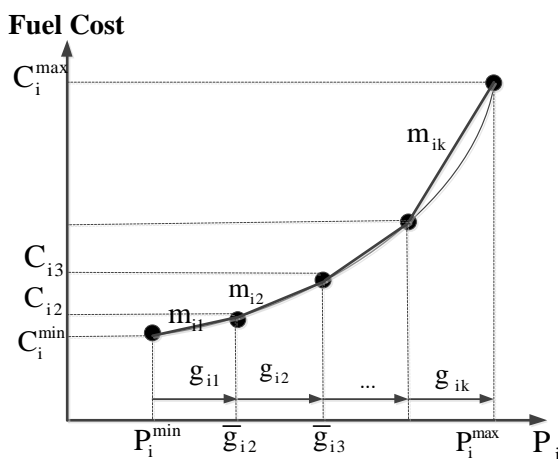
$$0 \leq g_{ikt\omega} \leq \frac{P_i^{\max} - P_i^{\min}}{N_k} \quad \forall i, k \quad (4)$$

$$m_{ik} = \frac{N_k (C_{ik+1} - C_{ik})}{(P_i^{\max} - P_i^{\min})} \quad \forall i, k \quad (5)$$

$$C_{ik} = a_i \bar{g}_{ik}^2 + b_i \bar{g}_{ik} + c_i \quad \forall i, k \quad (6)$$

$$\bar{g}_{ik} = P_i^{\min} + (k-1) \frac{P_i^{\max} - P_i^{\min}}{N_k} \quad \forall i, k \quad (7)$$

که  $P_i^{\max}$  و  $P_i^{\min}$  حداقل و حداکثر توان مجاز تولیدی ژنراتور،  $m_{ik}$  شیب بخش  $k$ ام از مشخصه خطی شده هزینه تولید واحد  $\omega$  و  $g_{ikt\omega}$  توان تولیدی بخش  $k$ ام واحد  $\omega$  در زمان  $t$  و سناریوی  $\omega$  است. متغیر باینری  $U_{it}$  که نشان‌دهنده روشن بودن ژنراتور  $i$  در زمان  $t$  است مستقل از سناریو در نظر گرفته شده است. در این مقاله، فواصل توان تولیدی جهت خطی‌سازی منحنی درجه دوم به صورت برابر در نظر گرفته شده است [۲۷]. لذا توان تولیدی ژنراتور  $\omega$  از (۸) به دست می‌آید:



شکل ۲. خطی‌سازی منحنی درجه دوم

$$P_{it\omega} = P_i^{\min} U_{it} + \sum_{k=1}^{N_k} g_{ikt\omega} \quad \forall i, t, \omega \quad (8)$$

• **هزینه راه‌اندازی هر ژنراتور**

با توجه به (۳۰)، مدت‌زمانی که یک واحد حرارتی قبل از روشن شدن، در حالت خاموش قرار داشته است یکی از دو حالت راه‌اندازی گرم و سرد برای محاسبه هزینه راه‌اندازی در نظر گرفته می‌شود:

$$SC_{it} = \begin{cases} cost^{hot} & t < t_i^{cold} \\ cost^{cold} & t \geq t_i^{cold} \end{cases} \quad (9)$$

با توجه به این که مدل پیشنهادی این مقاله، یک مدل احتمالی و خطی است بنابراین رابطه (۹) با استفاده از روابط (۱۰) الی (۱۲) خطی‌سازی شده است:

$$V_{it} = S_{it}^{cold} + S_{it}^{hot} \quad (10)$$

$$U_{it} - \sum_{h=t-t_i^{cold}}^{t-1} U_{ih} \leq S_{it}^{cold} \quad (11)$$

$$SC_{it} = S_{it}^{cold} cost_i^{cold} + S_{it}^{hot} cost_i^{hot} \quad (12)$$

رابطه (۱۰) بیان می‌کند که راه‌اندازی یک واحد حرارتی به دو صورت راه‌اندازی گرم و یا سرد انجام می‌شود. با توجه به (۱۱)، در صورت راه‌اندازی یک واحد حرارتی در ساعت  $t$ ام، اگر این واحد برای مدت‌زمان  $t^{cold}$  قبل از لحظه راه‌اندازی، خاموش باشد این واحد به صورت سرد ( $S^{cold}$ )، راه‌اندازی شده است. با توجه به راه‌اندازی گرم ( $S^{hot}$ ) و یا سرد برای واحد  $t$ ام و هزینه‌های راه‌اندازی گرم ( $cost^{hot}$ ) و سرد ( $cost^{cold}$ )، هزینه راه‌اندازی آن واحد در ساعت  $t$ ام در (۱۲) محاسبه می‌شود.

• **هزینه تأمین انرژی موردنیاز از برق ساحلی**

در ساعاتی که کشتی به یکی از بندرهای موجود در مسیر، پهلو می‌گیرد می‌تواند انرژی الکتریکی موردنیاز خود را از تأسیسات موجود در بندر تأمین کند. هزینه تأمین انرژی الکتریکی از ساحل با رابطه (۱۳) بیان می‌شود.

$$SPC_{t\omega} = portcall_t \cdot P_{t\omega}^{sp} \cdot \rho_t^{sp} \quad (13)$$

که  $P^{sp}$  توان دریافتی از ساحل،  $\rho^{sp}$  قیمت برق ساحل و  $PortCall$  یک متغیر باینری است که نشان‌دهنده توقف کشتی در یکی از بنادر در زمان  $t$  است.



## ۲-۲- قیود فنی و عملیاتی

در این بخش، قیود فنی و عملیاتی که در هنگام تأمین انرژی الکتریکی موردنیاز کشتی دارای سیستم رانش الکتریکی باید رعایت شوند بیان شده است:

### • انتشار آلاینده‌ها

میزان انتشار آلاینده‌ها معمولاً به صورت تابعی از میزان توان تولیدی واحدهای حرارتی بیان می‌شود. در این مقاله از یک تابع درجه دوم برای نمایش تابع انتشار آلاینده‌ها استفاده شده است [۳۵]:

$$emission_{it\omega} = \alpha_i P_{i\omega}^2 + \beta_i P_{i\omega} + \gamma_i \quad (14)$$

که  $\alpha_i$ ،  $\beta_i$  و  $\gamma_i$  ضرایب انتشار واحد تولیدی نام هستند. برای خطی‌سازی منحنی درجه دوم انتشار آلاینده‌گی نیز از روابط مشابه روابط خطی‌سازی منحنی درجه دوم هزینه سوخت استفاده شده است.

### • مدل‌سازی سیستم ذخیره‌ساز انرژی

سیستم قدرت کشتی مورد مطالعه، مجهز به سیستم ذخیره انرژی است. روابط مورد استفاده برای مدل‌سازی سیستم ذخیره انرژی در زیر بیان شده است [۳۴].

$$P_{ts}^{ESS, ch} \leq P^{ch, max} u_t^{ESS} \quad \forall t, s \quad (15)$$

$$P_{ts}^{ESS, dch} \leq P^{dch, max} (1 - u_t^{ESS}) \quad \forall t, s \quad (16)$$

$$SOC_{t\omega}^{ESS} = SOC_{t-1, \omega}^{ESS} + \eta^{ch} \cdot P_{t\omega}^{ESS, ch} - \frac{P_{t\omega}^{ESS, dis}}{\eta^{dch}} \quad (17)$$

$$SOC_{1s}^{ESS} = SOC^{ESS, ini} \quad \forall s \quad (18)$$

$$SOC^{ESS, min} \leq SOC_{ts}^{ESS} \leq SOC^{ESS, max} \quad (19)$$

که  $SOC^{ESS}$  سطح شارژ باتری،  $(P^{ESS, ch}, P^{ESS, dch})$  توان شارژ (دشارژ)،  $(P^{ch, max}, P^{dch, max})$  حداکثر توان مجاز شارژ (دشارژ)،  $u^{ESS}$  متغیر باینری نشان‌دهنده عملکرد سیستم در زمان  $t$  ( $=1$  شارژ و  $=0$  دشارژ) و  $\eta^{ch}$  ( $\eta^{dch}$ ) بازده سیستم شارژ (دشارژ) هستند. روابط (۱۵) و (۱۶) توان شارژ و دشارژ باتری را محدود می‌کنند. در هر لحظه از زمان، باتری می‌تواند یکی از حالت‌های شارژ و دشارژ را داشته باشد که این شرط توسط متغیر باینری  $u^{ESS}$  مشخص شده است. لازم به ذکر است که متغیر  $u^{ESS}$  به صورت مستقل از سناریو در نظر گرفته شده است. با توجه به رابطه (۱۷) سطح انرژی باتری در هر دوره زمانی برابر با مقدار انرژی ذخیره‌شده در بازه قبلی به علاوه میزان انرژی واردشده به آن از طریق شارژ و یا انرژی خارج‌شده از طریق دشارژ خواهد بود. رابطه (۱۸) سطح انرژی اولیه ذخیره‌ساز در ابتدای بازه برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. بر اساس رابطه (۱۹) سطح انرژی ذخیره‌ساز باید محدود به مقادیر حداقل و حداکثر ظرفیت ذخیره‌ساز باشد.

• توان الکتریکی سیستم رانش

بار سیستم رانش الکتریکی را می‌توان طوری تنظیم کرد که به نقاط بهینه عملکرد واحدهای تولید توان الکتریکی نزدیک شد. منحنی سرعت - توان سیستم رانش به شرایط ویژه مقاومت بدنه، بارگیری کشتی و شرایط جوی بستگی دارد و می‌توان آن را با توجه به رابطه (۲۰) تقریب زد [۳۲]:

$$P_{pro} = \xi_1 \cdot V^{\xi_2} \quad (20)$$

که  $V$  سرعت حرکت کشتی،  $P_{pro}$  توان الکتریکی مورد نیاز سیستم رانش برای حرکت کشتی با سرعت  $V$ ،  $\xi_1$  ضریبی است که برای تطبیق توان سیستم رانش و سرعت مورد استفاده قرار می‌گیرد و  $\xi_2$  یک عدد ثابت نمایانگر تأثیر شکل و فرم بدنه کشتی است. ضریب  $\xi_1$  برای فرم‌های رایج بدنه برابر ۳ در نظر گرفته می‌شود [۳۶]. لازم به ذکر است که رابطه (۲۰) یک رابطه غیرخطی است لذا برای خطی‌سازی این رابطه نیز از روابط مشابه روابط بیان شده برای خطی‌سازی هزینه سوخت مصرفی هر ژنراتور و انتشار آلاینده‌ها استفاده شده است.

• تعادل توان

برابری توان الکتریکی تولیدی و مصرفی در رابطه (۲۱) بیان شده است [۳۷].

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{it\omega} + P_{t\omega}^{solar\_used} + P_{t\omega}^{ESS,dis} + P_{t\omega}^{sp} = P_{t\omega}^D + P_{t\omega}^{pro} + P_{t\omega}^{ESS,ch} \quad (21)$$

که  $P^D$  بار الکتریکی کشتی در زمان  $t$  و  $P^{solar-used}$  بخشی از انرژی خورشیدی تولیدی است که از حداکثر ظرفیت انرژی تولیدی خورشیدی کشتی، کمتر بوده و جهت تأمین انرژی بارهای الکتریکی کشتی در معادلات تعادل توان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$P_{t\omega}^{solar\_used} \leq P_{t\omega}^{solar} \quad (22)$$

• محدودیت حداقل و حداکثر بارگیری ژنراتور

با توجه به ظرفیت نامی ژنراتورها، قید محدودیت توان تولیدی هر ژنراتور در (۲۳) بیان شده است [۳۴]:

$$U_{it} \cdot P_i^{\min} \leq P_{it\omega} \leq U_{it} \cdot P_i^{\max} \quad \forall i, t, \omega \quad (23)$$

• محدودیت نرخ افزایش و کاهش توان<sup>۱</sup> ژنراتورها

<sup>۱</sup> Ramp Rate

$$|p_{it\omega} - p_{it\omega-1}| \leq R^{\max} \quad \forall i, t, \omega \quad (24)$$

که  $R^{\max}$  حداکثر نرخ مجاز افزایش و کاهش توان تولیدی ژنراتورها است. با توجه به خطی بودن مدل پیشنهادی این مقاله، رابطه قدرمطلق غیرخطی (۲۴) توسط روابط زیر خطی شده است:

$$p_{it\omega} - p_{it\omega-1} = p_{it\omega}^{pos} - p_{it\omega}^{neg} \quad \forall i, t, \omega \quad (25)$$

$$R_{it\omega} = p_{it\omega}^{pos} - p_{it\omega}^{neg} \quad \forall i, t, \omega \quad (26)$$

$$p_{it\omega}^{pos} \geq 0 \quad \forall i, t, \omega \quad (27)$$

$$p_{it\omega}^{neg} \geq 0 \quad \forall i, t, \omega \quad (28)$$

$$R_{it\omega} \leq R_i^{\max} \quad \forall i, t, \omega \quad (29)$$

که  $R_{it\omega}$  نرخ افزایش و کاهش توان خروجی ژنراتور  $i$  و  $P^{pos}$  و  $P^{neg}$  متغیرهای کمکی برای تبدیل رابطه غیرخطی قدرمطلق به روابط خطی است.

#### • حداقل زمان خاموش و روشن بودن واحدهای حرارتی

برای رعایت قیود حداقل زمان خاموش و روشن بودن واحدها روابط (۳۰) الی (۳۳) تعریف شده‌اند [۳۴]:

$$U_{it} - U_{it-1} \leq V_{it} \quad \forall i, t \quad (30)$$

$$U_{it} - U_{it-1} = V_{it} - W_{it} \quad \forall i, t \quad (31)$$

$$\sum_{h=t-mut_i+1}^t V_{ih} \leq U_{it} \quad \forall i, t \geq mut_i \quad (32)$$

$$\sum_{h=t-mdt_i+1}^t W_{ih} \leq 1 - U_{it} \quad \forall i, t \geq mdt_i \quad (33)$$

که  $mut$  و  $mdt$  به ترتیب، پارامترهای بیان‌کننده حداقل زمان مجاز روشن و خاموش بودن هر یک از ژنراتورها و متغیرهای  $V$  و  $W$  نشان‌دهنده وضعیت روشن و خاموش شدن هر یک از ژنراتورها در زمان  $t$  هستند.

#### • محدودیت‌های عملکرد منبع تغذیه ساحلی

محدودیت‌های توان الکتریکی دریافتی از تأسیسات ساحلی به ظرفیت تأسیسات ساحلی و همچنین جریان قابل تحمل کابل‌های مربوط به تأمین انرژی برق کشتی بستگی دارد که توسط (۳۴) بیان شده است.

$$P_{t\omega}^{sp} \leq P^{sp,max} \quad (34)$$

که  $P^{sp,max}$  حداکثر توان دریافتی مجاز از منبع تغذیه ساحلی است.

#### • قید کفایت رزرو چرخان در شبکه

جهت حفظ قابلیت اطمینان شبکه در مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای حرارتی، این واحدها به گونه‌ای در مدار قرار می‌گیرند که علاوه بر تأمین تقاضای بار شبکه، مقداری رزرو چرخان هم در شبکه وجود داشته باشد که این رزرو چرخان در ساعت  $t$  به میزان درصدی از تقاضای بار در آن ساعت در نظر گرفته می‌شود [۳۴].

$$\sum_{i=1}^{N_g} U_{it} \cdot P_i^{max} + P_{t\omega}^{solar} + P_{t\omega}^{dch,max} + portcall_t \cdot P^{sp,max} \geq R(1 + P_{t\omega}^D) \quad \forall t, \omega \quad (35)$$

که  $R$  درصد رزرو چرخان در شبکه است.

#### • محدودیت انتشار گازهای گلخانه‌ای

سازمان بین‌المللی دریانوردی (*IMO*) مقرراتی را برای اعمال محدودیت در حد بالای انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از احتراق سوخت شناورهای دریایی تصویب کرده است که این محدودیت در (۳۶) بیان شده است:

$$\sum_i^{N_G} emission_{it\omega} \leq emission^{max} \quad \forall t, \omega \quad (36)$$

که  $emission^{max}$  بیشترین مقدار آلاینده‌گی مجاز برای کشتی است که توسط سازمان *IMO* برای کشتی‌ها در نظر گرفته می‌شود.

#### • حداقل-حداکثر سرعت مجاز کشتی

با توجه به ظرفیت موتورهای الکتریکی سیستم رانش و شکل بدنه کشتی، یک حد بالا و پایین برای سرعت کشتی وجود دارد که در (۳۷) بیان شده است [۳۲].

$$V^{min} \leq V_{t\omega} \leq V^{max} \quad \forall t, \omega \quad (37)$$

که  $V^{max}$  و  $V^{min}$  به ترتیب حداقل و حداکثر سرعت مجازی دریانوردی برای کشتی است.

#### • مسافت پیموده شده

$$distance_{t\omega} = \sum_{t \leq \tau} V_{t\omega} \cdot \Delta t \quad (38)$$

که  $distance_{t_0}$  مسافت پیموده شده پس از  $\tau$  ساعت و  $\Delta t$  مدت زمان هر دوره شبیه‌سازی است که در این مقاله برابر یک ساعت در نظر گرفته شده است. با توجه به قرارداد بین مالک کشتی و مسافری، کشتی باید در ساعت مشخصی، به بندر میانی و در ساعت مشخصی به بندر مقصد برسد لذا با توجه به مسافت بین مبدأ حرکت تا بندر میانی و مقصد، باید مسافت مشخصی در ساعات مشخص شده طی شود که این قید در (۳۹) و (۴۰) بیان شده است.

$$distance_{t_0} = D_1 \quad t = t_1 \quad (39)$$

$$distance_{t_0} = D_2 \quad t = t_2 \quad (40)$$

که  $D_1$  و  $t_1$  به ترتیب مسافت و مدت زمان لازم برای پیمودن مسیر بین مبدأ حرکت و بندر میانی و به همین ترتیب  $D_2$  و  $t_2$  به ترتیب مسافت و مدت زمان لازم برای پیمودن مسیر بین مبدأ حرکت و بندر مقصد است.

### ۲-۳- مدل سازی عدم قطعیت در پیش‌بینی بار و انرژی تجدیدپذیر خورشیدی

در این مقاله عدم قطعیت مربوط به پیش‌بینی توان تولیدی منابع انرژی خورشیدی و نیز تقاضای بار سیستم در نظر گرفته شده است. برای تولید سناریوهای پیش‌بینی توان خورشیدی از تابع چگالی احتمال بتا<sup>۱</sup> استفاده شده که به صورت (۴۱) الی (۴۳) تعریف می‌شود:

$$PDF(p) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} p^{\alpha-1} (1-p)^{\beta-1} & 0 \leq p \leq 1 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (41)$$

$$\beta = (1 - \mu) \left( \frac{\mu(1 + \mu)}{\sigma^2} - 1 \right) \quad (42)$$

$$\alpha = \frac{\mu\beta}{1 - \mu} \quad (43)$$

که در آن  $p$  توان تولیدی خورشیدی و ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب مثبت تابع بتا هستند. برای تولید سناریوهای مربوط به میزان تقاضای بار، از تابع چگالی احتمال نرمال<sup>۲</sup> استفاده شده که به صورت (۴۴) تعریف می‌شود.

$$PDF(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (44)$$

که  $\mu$  و  $\sigma$  به ترتیب مقدار میانگین و انحراف معیار پیش‌بینی تقاضای بار شبکه هستند.

<sup>۱</sup> Beta

<sup>۲</sup> Normal

زیاد بودن تعداد سناریوها موجب پیچیدگی مسئله و افزایش زمان محاسبات خواهد شد. لذا در این مقاله، به منظور کاهش زمان محاسبات، تعداد سناریوها با استفاده از نظریه فاصله احتمالی کاهش یافته است که ضمن کاهش تعداد سناریوها، اطلاعات تصادفی سناریوها نیز تا حد امکان حفظ شود.

### ۳- شبیه‌سازی

مدل پیشنهادی بر روی سیستم قدرت یک کشتی دارای سیستم رانش الکتریکی پیاده‌سازی شده است. کشتی مورد بررسی شامل ۲ موتور رانش الکتریکی بزرگ است که توسط ۵ دیزل ژنراتور، تأمین انرژی می‌شود. نمودار تک‌خطی سیستم قدرت در شکل (۱) نشان داده شده است [۳۲]. پارامترهای فنی کشتی و سیستم قدرت در جدول (۱) ارائه شده است. پارامترهای مربوط به سیستم ذخیره‌ساز انرژی نیز در جدول (۲) آورده شده است.

قیمت خرید انرژی از ساحل برابر  $100 \$/MWh$  و حداکثر توان قابل دریافت از تأسیسات بندری برابر ۲۰ مگاوات در نظر گرفته شده است. حداقل و حداکثر سرعت مجاز کشتی به ترتیب برابر ۲ و ۱۲ مایل بر ساعت فرض شده است. در این مقاله فرض شده است که کشتی مورد مطالعه در مسیر حرکت خود از مبدأ تا مقصد نهایی در میانه راه به مدت ۲ ساعت در یک بندر، پهلو گرفته و مجدد به مسیر خود ادامه می‌دهد. کشتی باید پس از ۹ ساعت به بندر میانی و پس از ۱۹ ساعت به بندر مقصد برسد. فاصله مبدأ تا بندر میانی و بندر میانی تا مقصد به ترتیب برابر ۸۰ و ۹۰ مایل در نظر گرفته شده است. محدودیت آلایندگی در این مقاله برابر  $1500$  تن در نظر گرفته شده است. ضرایب  $\alpha$

جدول ۲. پارامترهای سیستم ذخیره‌ساز انرژی

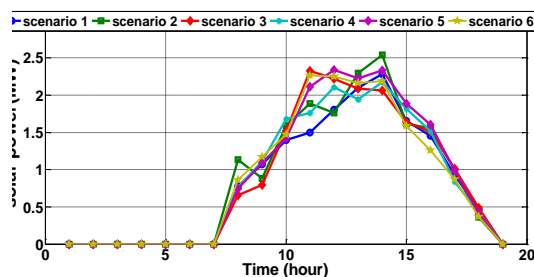
بازده شارژ و دشارژ	۰.۹۵
نرخ شارژ و دشارژ	۱ (MWh)
سطح شارژ اولیه	۵ (MWh)
سطح شارژ کمینه	۰.۷۵ (MWh)
سطح شارژ بیشینه	۵ (MWh)

جدول ۱. اطلاعات مورد نیاز شبکه مورد مطالعه

	واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴	واحد ۵
حداکثر توان تولیدی (MW)	۱۵	۱۵	۱۵	۹	۹
حداقل توان تولیدی (MW)	۳	۳	۳	۲	۲
$a(\$/MWh^2)$	۵/۴	۵/۴	۵/۶	۱۳/۱	۱۳/۵
$b(\$/MWh)$	۶۱/۵	۶۳	۶۵	۱۲	۱۰
$c(\$)$	۳۹۰	۴۰۰	۴۲۰	۴۳۰	۴۵۰
$\alpha(\text{ton}/MWh^2)$	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۳
$\beta(\text{ton}/MWh)$	۲/۴	۲/۴	۴	۴	۳/۸
$\gamma(\text{ton})$	۱۰۳	۱۰۳	۳۰۰	۳۰۰	۳۲۰
حداقل زمان روشن بودن (hr)	۱	۱	۱	۱	۱
حداقل زمان خاموش بودن (hr)	۱	۱	۱	۱	۱
هزینه راه اندازی گرم (\$)	۵۰۰	۵۵۰	۵۰۰	۶۰۰	۶۵۰
هزینه راه اندازی سرد (\$)	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۱۰۰	۱۰۰۰
ساعت راه اندازی سرد (hr)	۴	۴	۴	۳	۳

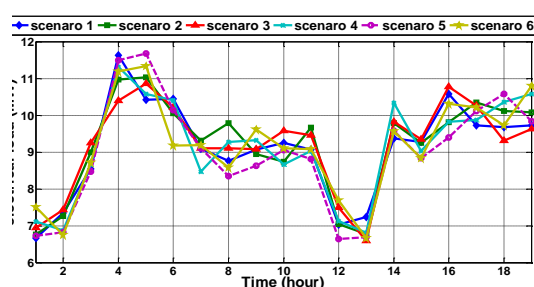
و  $\beta$  برای تبدیل سرعت کشتی به توان رانش به ترتیب برابر  $1/7$  و  $0/8$  در نظر گرفته شده است. به منظور پیش‌بینی

توان خورشیدی تعداد ۱۰۰ سناریو ساخته شد که برای افزایش سرعت و کاهش زمان محاسبات با استفاده از نظریه



شکل ۳. سناریوهای پیش‌بینی توان خورشیدی

فاصله احتمالاتی به تعداد ۶ سناریو کاهش یافت. سناریوهای مربوط به پیش‌بینی توان خورشیدی و بار الکتریکی و



شکل ۴. سناریوهای پیش‌بینی بار شبکه

احتمال وقوع هر سناریو به ترتیب در شکل (۳) و (۴) و جدول (۳) نشان داده شده است. جهت تأیید کارایی مدل پیشنهادی، سه حالت متفاوت در این مقاله بررسی شده است:

**مورد اول:** حرکت کشتی با سرعت ثابت و بدون منابع ذخیره‌ساز

**مورد دوم:** حرکت کشتی با سرعت بهینه و بدون منابع ذخیره‌ساز

**مورد سوم:** حرکت کشتی با سرعت بهینه و با منابع ذخیره‌ساز

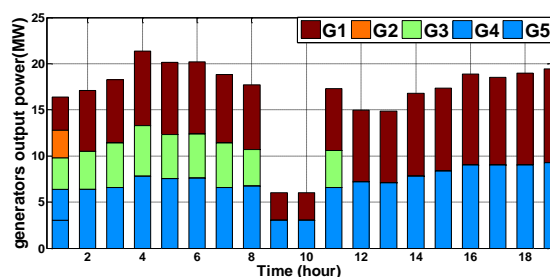
لازم به ذکر است که در هر سه مورد، عدم قطعیت در پیش‌بینی توان تولیدی خورشیدی و بار مصرفی در نظر گرفته شده است. مدل خطی پیشنهادی در نرم‌افزار GAMS و حل‌کننده Cplex پیاده‌سازی و تحلیل شده است.

جدول ۳. احتمال وقوع هر یک از سناریوها

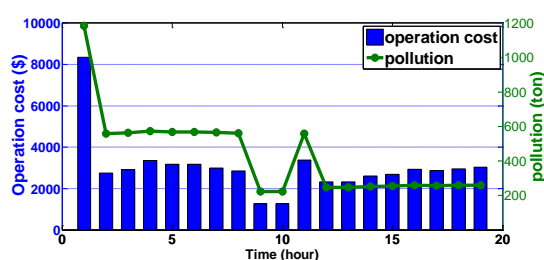
سناریو	احتمال	سناریو	احتمال
اول	۰/۱	چهارم	۰/۱۴
دوم	۰/۲۲	پنجم	۰/۱۳
سوم	۰/۲۵	ششم	۰/۱۶

**مورد مطالعاتی اول:** حرکت کشتی با سرعت ثابت غیربهینه و بدون استفاده از منابع ذخیره‌ساز

در این حالت، کشتی با سرعت غیربهینه ثابت ۱۰ مایل بر ساعت مسیر خود را طی می‌کند تا با توجه به مسافت مسیر بتواند در ساعت مشخص به بنادر مقصد برسد. در این حالت برنامه‌ریزی در مدار قرار گرفتن ژنراتورها و تعیین توان تولیدی هر یک از ژنراتورها در سناریوی اول احتمالاتی در شکل (۵) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برنامه‌ریزی در مدار قرار گرفتن هر یک از ژنراتورها مستقل از تحقق سناریوهای احتمالاتی است و در همه سناریوها این برنامه‌ریزی، ثابت است به‌عنوان نمونه در ساعت اول حرکت کشتی، مستقل از تحقق هر یک از سناریوها، همه ژنراتورها در مدار قرار خواهند گرفت ولی توان تولیدی ژنراتورها، با توجه به تحقق هر یک از سناریوها تغییر خواهد کرد. در مدت زمان توقف کشتی در بندر میانی، با توجه به وجود هزینه راه‌اندازی ژنراتورها



شکل ۵. برنامه ریزی توان تولیدی ژنراتورها در مورد مطالعاتی اول



شکل ۶. هزینه بهره برداری و میزان آلاینده‌گی در مورد مطالعاتی اول



شکل ۷. توان تولیدی و مصرفی در مورد مطالعاتی اول

و علی‌رغم هزینه پایین خرید انرژی از تأسیسات ساحلی، هم‌چنان ژنراتورهای ۱ و ۲ با توان حداقل ۳ مگاوات روشن باقی خواهند ماند.

در این حالت، هزینه بهره‌برداری و مقدار آلاینده‌گی ساعتی ژنراتورها در نخستین سناریوی احتمالاتی در شکل (۶) نشان داده شده است. با در نظر گرفتن همه سناریوهای احتمالاتی، مقدار مورد انتظار هزینه تأمین انرژی الکتریکی در مدت ۱۹ ساعت برابر



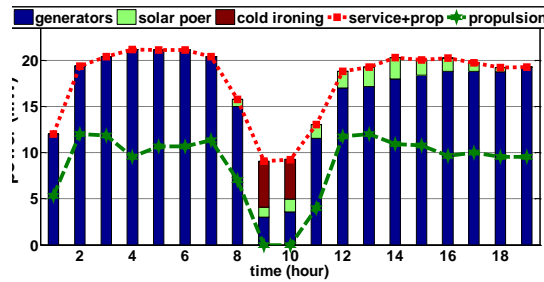
۵۷,۳۶۳ دلار و مقدار آلاینده‌گی برابر ۸۱۸۴ تن به دست آمده است. دلیل بالا بودن هزینه بهره‌برداری در ساعت اول، راه‌اندازی هم‌زمان همه ژنراتورها جهت تولید توان کافی برای حرکت کشتی با سرعت ثابت ۱۰ مایل بر ساعت با توجه به محدودیت نرخ افزایش توان تولیدی ژنراتورها است. البته از ساعت دوم به بعد ژنراتورهای سوم و پنجم که دارای هزینه بهره‌برداری بالاتری هستند از مدار خارج شده و بار بیشتری روی ژنراتورهای اول و دوم قرار می‌گیرد.

برابری توان الکتریکی تولیدی (ژنراتورها و ساحلی و خورشیدی) و توان مصرفی (هتل‌داری و رانش الکتریکی) در نخستین سناریوی احتمالاتی در شکل (۷) نشان داده شده است.

### مورد مطالعاتی دوم: حرکت کشتی با سرعت بهینه و بدون استفاده از منابع ذخیره‌ساز

در این حالت، سرعت حرکت کشتی با حل مدل پیشنهادی و با هدف حداقل کردن هزینه‌های کشتی و با رعایت قیود فنی و عملیاتی شبکه قدرت، به صورت بهینه تعیین شده است. سرعت بهینه کشتی در شکل (۸) نشان داده شده است.

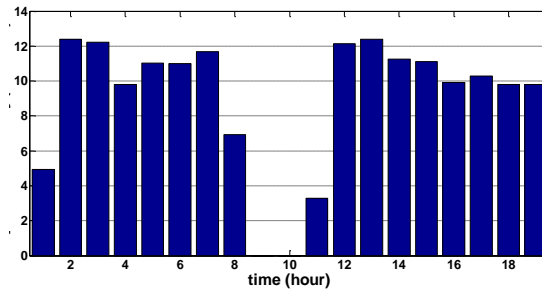
در این حالت، برنامه‌ریزی در مدار قرار گرفتن و توان خروجی هر یک از ژنراتورها در سناریوی اول احتمالاتی در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۹) مشخص است در ساعت اول حرکت کشتی و با توجه به هزینه راه‌اندازی ژنراتورها، فقط ژنراتورهای اول، دوم و چهارم در مدار قرار گرفته‌اند و دو ژنراتور دیگر در مدار قرار نگرفته‌اند. همچنین در ساعات پهلوگیری کشتی در بندر، فقط ژنراتور دوم به فعالیت خود ادامه می‌دهد و دو ژنراتور دیگر خاموش می‌شوند. در این ساعات، سایر توان الکتریکی مصرفی کشتی از تأسیسات ساحلی تأمین خواهد شد. بنابراین در این حالت توان الکتریکی بیشتری از تأسیسات بندری نسبت به حالت اول تأمین خواهد شد.



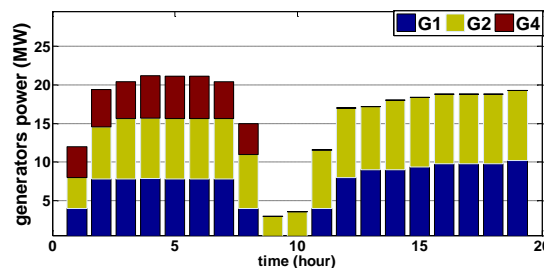
شکل ۱۰. توان تولیدی و مصرفی در مورد مطالعاتی دوم

برابری توان‌های تولیدی و مصرفی کشتی در نخستین سناریوی احتمالاتی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۰) نشان داده شده است قید برابری توان تولیدی و مصرفی در همه ساعت‌ها رعایت شده است. همچنین به دلیل رایگان بودن توان خورشیدی، همه توان تولیدی خورشیدی جهت تأمین بارهای شبکه مورد استفاده قرار گرفته است. در نخستین سناریوی احتمالاتی و در مدت‌زمان توقف در بندر به ترتیب ۵ و ۴/۳ مگاوات از برق تأسیسات بندری جهت تأمین توان مورد نیاز کشتی دریافت شده است که هزینه‌ای برابر با ۲۴۹/۵ و ۲۱۴/۵ دلار برای مالک کشتی در پی داشته است. همچنین مقدار مورد انتظار هزینه توان خریداری شده از تأسیسات بندری در همه سناریوهای احتمالاتی به مقدار ۴۶۹/۴ دلار برآورد شده است.

در این حالت مقدار مورد انتظار هزینه تأمین انرژی الکتریکی در مدت ۱۹ ساعت برابر ۵۴/۰۷۹ دلار تعیین شده است که کاهش ۵/۷٪ را نسبت به هزینه تأمین انرژی در مورد مطالعاتی اول - با فرض سرعت غیر بهینه ثابت دریانوردی - به دنبال داشته است. همچنین



شکل ۸. سرعت بهینه کشتی در مورد مطالعاتی دوم

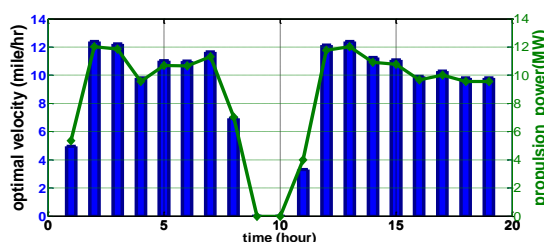


شکل ۹. برنامه‌ریزی توان تولیدی ژنراتورها در مورد مطالعاتی دوم

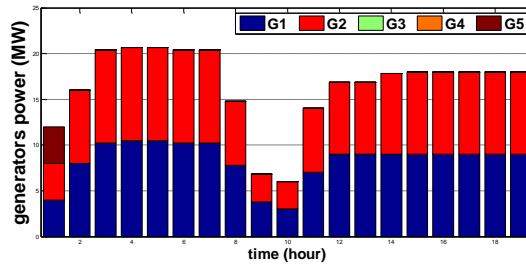
مقدار مورد انتظار آلاینده‌گی مقدار ۷/۰۳۷ تن تعیین شده است که این پارامتر نیز نسبت به آلاینده‌گی در مورد اول، مقدار ۱۴٪ کاهش یافته است.

### مورد مطالعاتی سوم: حرکت کشتی با سرعت بهینه و با بهره‌برداری از منابع ذخیره‌ساز

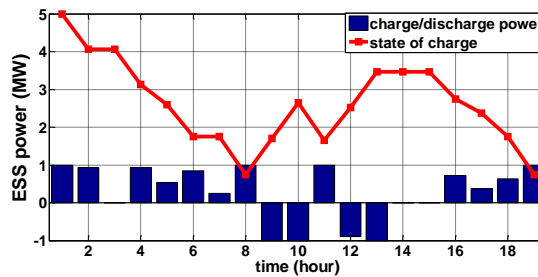
این حالت، از یک منبع ذخیره‌ساز انرژی به ظرفیت ۵ مگاوات ساعت برای کمک به شبکه تأمین انرژی استفاده شده است. در این حالت و با تحلیل مدل خطی پیشنهادی، سرعت بهینه کشتی و توان متناظر سیستم رانش الکتریکی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. برنامه در مدار قرار گرفتن ژنراتورها و توان تولیدی آن‌ها در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در این حالت نیز مانند مورد مطالعاتی دوم در ساعت اول حرکت، با توجه به محدودیت نرخ افزایش توان خروجی ژنراتورها، سه ژنراتور اول، دوم و پنجم در مدار قرار گرفته‌اند ولی در ساعت‌های بعدی حرکت، ژنراتور پنجم از مدار، خارج شده و شبکه تأمین انرژی فقط با استفاده از دو ژنراتور اول و دوم، بارهای مصرفی کشتی و توان سیستم رانش الکتریکی را تأمین کرده است. در این حالت و با بهره‌گیری از سیستم ذخیره‌ساز انرژی، مقدار مورد انتظار هزینه تأمین انرژی الکتریکی به مقدار ۵۲،۹۳۹ دلار تعیین شده است که به ترتیب ۷/۷ و ۲/۱ درصد نسبت به مورد مطالعاتی اول و دوم کاهش یافته است. همچنین در این حالت مقدار آلاینده‌گی ژنراتورها برابر ۵،۱۰۷ تن برآورد شده است که ۳/۷ و ۲/۷ درصد نسبت به موارد مطالعاتی اول و دوم کاهش داشته است. با توجه به مصرف بالای سوخت در کشتی‌های قاره‌پیما و غول‌پیکر ناشی از حجم و وزن زیاد آن‌ها و نیز دریانوردی مداوم این کشتی‌ها، کاهش ۷/۷ درصدی در هزینه سوخت مصرفی و نیز کاهش ۳/۷ درصدی در انتشار آلاینده‌ها در صورت حرکت کشتی با سرعت بهینه و استفاده از منابع ذخیره‌ساز انرژی، مبلغ قابل توجه و چشمگیری خواهد بود.



شکل ۱۱. سرعت بهینه کشتی و توان مصرفی سیستم رانش در مورد مطالعاتی سوم



شکل ۱۲. برنامه‌ریزی توان تولیدی ژنراتورها در مورد مطالعاتی سوم



شکل ۱۳. برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ سیستم ذخیره ساز انرژی در مورد مطالعاتی سوم

برنامه‌ریزی توان شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز در نخستین سناریوی احتمالاتی در شکل (۱۳) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مقادیر مثبت به معنی دشارژ و مقادیر منفی به معنی شارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی است. همان‌گونه که از شکل (۱۳) مشخص است سیستم ذخیره‌ساز در نخستین سناریوی احتمالاتی، در ساعت‌های مشخصی شارژ و دشارژ می‌شود تا جایی که پس از رسیدن به بندر نهایی، همه انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز جهت تأمین بخشی از بارهای شبکه و تا حداقل سطح شارژ مجاز، دشارژ شده است. همان‌گونه که در روابط مربوط به سیستم ذخیره‌ساز انرژی بیان شد برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز در هر ساعت، مستقل از سناریو و مطابق شکل (۱۳) خواهد بود ولی توان شارژ و دشارژ به‌صورت وابسته به تحقق هر یک از سناریوهای احتمالاتی متغیر خواهد بود.

نتایج مقایسه توابع هدف در سه مورد مطالعاتی در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴. مقایسه نتایج مدل پیشنهادی در سه مورد مطالعاتی

مقدار مورد انتظار (تن)	مقدار مورد انتظار مجموع هزینه تامین انرژی الکتریکی (\$) )	ESS	سرعت		مورد مطالعاتی
			بهینه	غیر بهینه	
۸/۱۸۴	۵۷/۳۶۳	×	✓	×	اول
۷/۰۳۷	۵۴/۰۷۹	×	×	✓	دوم
۵/۱۰۷	۵۲/۹۳۹	✓	×	✓	سوم

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل خطی و تصادفی آمیخته با عدد صحیح به منظور مدیریت بهینه انرژی الکتریکی یک کشتی دارای سیستم رانش الکتریکی، ذخیره‌ساز انرژی، ژنراتورهای حرارتی و منابع انرژی خورشیدی و باهدف حداقل کردن هزینه تولید انرژی الکتریکی، تعیین سرعت بهینه حرکت کشتی و تعیین زمان روشن و خاموش شدن ژنراتورهای مورد استفاده در بخش تولید انرژی الکتریکی پیشنهاد شده است. جهت پیش‌بینی توان الکتریکی خورشیدی و نیز بار شبکه الکتریکی عدم قطعیت در نظر گرفته شده است. جهت ارزیابی مدل پیشنهادی و بررسی تأثیر استفاده از باتری ذخیره انرژی، مدل پیشنهادی در سه مورد مطالعاتی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدون استفاده از باتری ذخیره انرژی، در صورت حرکت کشتی با سرعت بهینه، مقدار مورد انتظار هزینه تأمین انرژی به مقدار ۵/۷ درصد نسبت به حالتی که کشتی با سرعت غیر بهینه حرکت می‌کند کاهش یافته است. هم‌چنین حرکت کشتی با سرعت بهینه و استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی، مقدار مورد انتظار هزینه تأمین انرژی را ۲/۱ درصد نسبت به حالتی که از ذخیره‌ساز انرژی استفاده نشد کاهش یافته است که با توجه به هزینه سرسام‌آور تأمین سوخت در کشتی‌ها، معادل پولی این مقدار کاهش در هزینه‌ها می‌تواند بسیار چشمگیر باشد.

## مراجع

- [1] Guerrero, J.M., et al. *Shipboard Microgrids: Maritime Islanded Power Systems Technologies*. in *PCIM Asia 2016; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*. 2016.
- [2] Pan, P., et al., *Research progress on ship power systems integrated with new energy sources: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021. 144: p. 111048.
- [3] Nuchturee, C., T. Li, and H. Xia, *Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships – A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020. 134: p. 110145.
- [4] Xie, P., et al., *Optimization-Based Power and Energy Management System in Shipboard Microgrid: A Review*. *IEEE Systems Journal*, 2022. 16(1): p. 578-590
- [5] Inal, O.B., J.-F. Charpentier, and C. Deniz, *Hybrid power and propulsion systems for ships: Current status and future challenges*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022. 156: p. 111965.
- [6] Xie, P., et al., *MPC-informed ECMS based real-time power management strategy for hybrid electric ship*. *Energy Reports*, 2021. 7: p. 126-133
- [7] He, Y., et al., *Two-phase energy efficiency optimisation for ships using parallel hybrid electric propulsion system*. *Ocean Engineering*, 2021. 238: p. 109733.
- [8] Gaber, M., et al., *Intelligent Energy Management System for an all-electric ship based on adaptive neuro-fuzzy inference system*. *Energy Reports*, 2021. 7: p. 7989-7998
- [9] Wang, Y., et al., *Multiagent Distributed Power Management of DC Shipboard Power Systems for Optimal Fuel Efficiency*. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021. 7(4): p. 3050-3061
- [10] Bassam, A.M., et al., *Development of a multi-scheme energy management strategy for a hybrid fuel cell driven passenger ship*. *International Journal of Hydrogen Energy*,: (1)42.2017p.623-635
- [11] Vu, T.V., et al., *Predictive Control for Energy Management in Ship Power Systems Under High-Power Ramp Rate Loads*. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017. 32(2): p. 788-797
- [12] Gao, D., et al., *An Energy Optimization Strategy for Hybrid Power Ships under Load Uncertainty*

- Based on Load Power Prediction and Improved NSGA-II Algorithm*. Energies, 2018..(7)11
- [13] Nguyen, H.P., et al., *The electric propulsion system as a green solution for management strategy of CO<sub>2</sub> emission in ocean shipping: A comprehensive review*. International Transactions on electrical energy systems, 2021. 31(11): p. e12580.
- [14] Planakis, N., G. Papalambrou, and N. Kyrtatos, *Predictive power-split system of hybrid ship propulsion for energy management and emissions reduction*. Control Engineering Practice, 2021. 111: p. 104795.
- [15] Hou, J., et al., *Implementation and evaluation of real-time model predictive control for load fluctuations mitigation in all-electric ship propulsion systems*. Applied Energy, :230.2018p. 62-77
- [16] Khodayar, M.E., L. Wu, and M. Shahidehpour, *Hourly Coordination of Electric Vehicle Operation and Volatile Wind Power Generation in SCUC*. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012. 3(3): p. . 1271-1279
- [17] Abdi, H., *Profit-based unit commitment problem: A review of models, methods, challenges, and future directions*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021. 138: p. 110504.
- [18] Pan, J.-S., P. Hu, and S.-C. Chu, *Binary fish migration optimization for solving unit commitment*. Energy: 226 .2021, p. .120329
- [19] Ajagekar, A. and F. You, *Deep Reinforcement Learning Based Unit Commitment Scheduling under Load and Wind Power Uncertainty*. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022.
- [20] Ghanbarzadeh, T., S. Goleijani, and M.P. Moghaddam. *Reliability constrained unit commitment with electric vehicle to grid using Hybrid Particle Swarm Optimization and Ant Colony Optimization*. in *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. 2011.
- [21] Shobana, S. and R. Janani. *Optimization of Unit Commitment Problem and Constrained Emission using Genetic Algorithm*. 2013.
- [22] Rezaee Jordehi, A., *An improved particle swarm optimisation for unit commitment in microgrids with battery energy storage systems considering battery degradation and uncertainties*. International Journal of Energy Research, 2021. 45(1): p..727-744
- [23] Yu, J.J.Q., V.O.K. Li, and A.Y.S. Lam. *Optimal V<sup>2</sup>G scheduling of electric vehicles and Unit Commitment using Chemical Reaction Optimization*. in *2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. 2013.
- [24] Samuel, G.G. and C.C.A. Rajan. *A Modified Shuffled Frog Leaping Algorithm for Long-Term Generation Maintenance Scheduling*. in *Proceedings of the Third International Conference on Soft Computing for Problem Solving*. 2014. New Delhi: Springer India.
- [25] Sahebi, M., et al., *Simultaneous EDRP and Unit Commitment Programming In Comparison With Interruptible Load Contracts*. IET Generation, Transmission and Distribution, 2012. 6: p. 605-611.
- [26] Rahmani-andebili, M. *Intelligent implementation of TOU (Time-of-Use) program by a GenCo*. in *2012 Proceedings of 11th Conference on Electrical Power Distribution*. 2012.
- [27] Aalami, H.A., M.P. Moghaddam, and G.R. Yousefi, *Demand response modeling considering Interruptible/Curtailable loads and capacity market programs*. Applied Energy, 2010. 87(1): p..243-250
- [28] Parvania, M. and M. Fotuhi-Firuzabad, *Demand Response Scheduling by Stochastic SCUC*. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010. 1(1): p. 89-98.
- [29] Sigler, D., et al. *Solving Unit Commitment Problems with Demand Responsive Loads*. in *2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*. 2022.
- [30] Nguyen, H.P., et al., *The electric propulsion system as a green solution for management strategy of CO<sub>2</sub> emission in ocean shipping: A comprehensive review*. International Transactions on Electrical Energy Systems. n/a(n/a): p. e12580.

- [31] Xie, P., et al., *A Real-Time Power Management Strategy for Hybrid Electrical Ships Under Highly Fluctuated Propulsion Loads*. IEEE Systems Journal, 2022: p. 1-12.
- [32] Kanellos, F.D., A. Anvari-Moghaddam, and J.M. Guerrero, *A cost-effective and emission-aware power management system for ships with integrated full electric propulsion*. Electric Power Systems Research, 2017. 150: p. 63-75.
- [33] Venkatesh, P., R. Gnanadass, and N.P. Padhy, *Comparison and application of evolutionary programming techniques to combined economic emission dispatch with line flow constraints*. IEEE Transactions on Power Systems, 2003. 18(2): p. 688-697.
- [34] alizadeh, m., m. jafari, and g. karami, *Mixed integer Linear Programming for Thermal Units unit commitment considering Load Uncertainty, Renewable resources and Electric Vehicles*. Journal of Nonlinear Systems in Electrical Engineering, 2020. 7(1): p..108-130
- [35] Gabriel, J., et al., *Stochastic operational scheduling of distributed energy resources in a large scale virtual power plant*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016. 82: p. 608-620.
- [36] Kanellos, F.D., G.J. Tsekouras, and N.D. Hatziargyriou, *Optimal Demand-Side Management and Power Generation Scheduling in an All-Electric Ship*. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014. 5(4): p..1166-1175
- [۳۷] علیزاده، م.، جعفری نوکندی، م.، سلطان مرادی، ی.، مدلسازی و بهینه سازی مصرف انرژی در خانه هوشمند با حضور ذخیره‌ساز انرژی، سلول خورشیدی، خودروی برقی و پاسخ‌گویی بار، مدل سازی در مهندسی، ۲۰۱۹. ۱۷(۵۷): صفحات ۲۱۵-۲۲۶.