

## Investigating the Reduction of Fuel Cost of Ships Using Marine Kite Technology

**Kaveh**

**Poorshekarriz** 

M.A. Student, Maritime Engineering (Maritime Transportation) - Chabahar University of Maritime and Marine Sciences, Chabahar, Iran

**Seyed Jafar Sadjadi**

**Parsa**  \*

PhD, International Transportation - Chabahar University of Maritime and Marine Sciences, Chabahar, Iran

### Abstract

According to the strict rules of the International Maritime Organization regarding the reduction of greenhouse gases and atmospheric pollutants, reducing the energy consumption of ships is among the first priorities of shipping companies and their owners. This article deals with the relationship between the use of a new technology called Sea Kite and the reduction of fuel consumption of ships and its effect on the reduction of operating costs (ship fuel cost). The fuel cost of ships is one of the most effective parts of the operating costs of shipping companies and the concern of their owners. In addition, trying to reduce fuel consumption by using renewable technologies in order to prevent the increase of operating costs and preventing the emission of atmospheric pollutants, in accordance with the new regulations of the International Maritime Organization, is one of the major goals facing the shipping industry. This article describes the aerodynamic performance of the sea kite and its influencing factors and will answer how the kite produces power and energy to replace a part of the main propulsion power according to the aerodynamic equations. In this article, the effect of the auxiliary power of the kite on the fuel consumption of the ship and the increase in economic efficiency has been investigated. In addition, the effects of the kite on reducing environmental pollution, how to install the kite on the ship and the increase in efficiency and speed of the ship when using the kite have been examined too. In this research, by studying the types of ships, the conditions of using seakite technology are theoretically discussed, and the fuel costs of the desired ship class are evaluated after

\*Corresponding Author: [Sadjadi@cmu.ac.ir](mailto:Sadjadi@cmu.ac.ir)


**How to Cite:** Poorshekarriz, K., Sadjadi Parsa, S. J. (2024). Investigating the Reduction of Fuel Cost of Ships Using Marine Kite Technology. *Marine and Port Servicesch*, 1(2), 59-98.

using the technology. Finally, conclusions are drawn using the collected data. In favorable weather conditions, Sea kite technology can reduce fuel consumption by 5-33% and lead to a 20% reduction in greenhouse gases.


**Keywords:** Ship AFuel, Sea kite, Operating Costs, Ship Propulsion, Environment.

## بررسی کاهش هزینه سوخت کشتی‌ها با استفاده از فناوری کایت دریایی

دانشجوی کارشناسی ارشد دریانوردی (حمل و نقل دریایی)، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران

کاوه پورشکرریز 

دکتری حمل و نقل بین‌المللی - دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران

سیدجعفر سجادی پارسا \* 

### چکیده

با توجه به قوانین سخت‌گیرانه سازمان بین‌المللی دریانوردی در خصوص کاهش گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های جوی، کاهش مصرف انرژی در کشتی‌ها، جزو اولویت‌های اول شرکت‌های حمل و نقل دریایی و مالکانشان محسوب می‌شود. این مقاله به ارتباط بین استفاده از یک فناوری جدیدی بنام کایت دریایی و کاهش مصرف سوخت کشتی‌ها و تأثیرش بر روی کاهش هزینه‌های عملیاتی (هزینه سوخت کشتی) خواهد پرداخت. امروزه بیان این مطلب که هزینه سوخت کشتی‌ها یکی از بخش‌های مؤثر در هزینه‌های عملیاتی شرکت‌های کشتیرانی و دغدغه مالکانشان بوده و تلاش برای کاهش مصرف سوخت، با فناوری‌های تجدیدپذیر به منظور جلوگیری از افزایش هزینه‌های عملیاتی و ممانعت از انتشار آلاینده‌های جوی، وفق مقررات جدید سازمان بین‌المللی دریانوردی از جمله اهداف بزرگ پیش روی صنعت کشتیرانی است. این مقاله به تشریح عملکرد آیرودینامیکی کایت دریایی و عوامل تأثیرگذار بر آن پرداخته و به چگونگی تولید توان و تولید انرژی توسط کایت جهت جایگزینی قسمتی از توان پیشرانه اصلی با توجه به معادلات آیرودینامیکی پاسخ خواهد داد. در این مقاله اثر نیروی کمکی کایت بر مصرف سوخت کشتی و افزایش بهره‌وری اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته است تأثیرات کایت بر کاهش آلودگی محیط زیست، چگونگی نصب کایت در کشتی و میزان افزایش بازدهی و سرعت کشتی به هنگام استفاده از کایت بررسی شده است. در این پژوهش با مطالعه انواع کشتی‌ها، در صورت استفاده از فناوری کایت دریایی به صورت تئوری پرداخته شده و هزینه‌های سوخت کلاس کشتی مورد نظر را، بعد از استفاده از فناوری

کایت دریایی مورد ارزیابی قرار می‌دهد و در انتها با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده نتیجه‌گیری می‌شود که این تکنولوژی با توجه به شرایط جوی مساعد می‌تواند مصرف سوخت را در حدود ۵ تا ۳۳ درصد کاهش و منجر به کاهش ۲۰ درصدی گازهای گلخانه‌ای شود.

**کلیدواژه‌ها:** سوخت کشتی، کایت دریایی، هزینه‌های عملیاتی، رانش کشتی، محیط‌زیست.

## مقدمه

حمل‌ونقل کالا در تجارت جهانی در حال حاضر تحت سلطه صنعت حمل‌ونقل است. انتشار دی‌اکسید کربن از تجارت دریایی حدود ۲٫۹ درصد از انتشار دی‌اکسید کربن انسانی را تشکیل می‌دهد. سازمان بین‌المللی تخمین می‌زند که انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰، انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از حمل‌ونقل (IMO) دریانوردی دریایی ۹۰ تا ۱۳۰ درصد نسبت به سال ۲۰۰۸ افزایش یابد (یونلونگ وانگو همکاران، ۲۰۲۲). علاوه بر این، کشتیرانی اقیانوسی ۱۳ و ۱۵ درصد از انتشار جهانی سولفیدها و آمونیاک‌ها را تشکیل می‌دهد، زیرا ناوگان جهانی هنوز معمولاً از موتورهای دیزلی با نفت سوخت سنگین حاوی محتوای گوگرد بالا استفاده می‌کند (ارثی و همکاران، ۱۳۹۵)؛ بنابراین، تحت قوانین سخت‌گیرانه روزافزون انتشار گازهای گلخانه‌ای، نیاز فوری برای صنعت کشتیرانی وجود دارد که اقداماتی را برای کاهش تأثیر منفی آن بر محیط‌زیست و سلامت انسان انجام دهد.

## تاریخچه کایت دریایی

قدمت اولین کشتی‌های بادی به ۳۱۰۰ سال قبل از میلاد برمی‌گردد زمانی که مصریان از باد برای حرکت به سمت شمال و جنوب در رود نیل استفاده می‌کردند. در قرن‌های بعد حمل‌ونقل رودخانه‌ای و دریایی هر دو به باد متکی بودند و پس از انقلاب صنعتی در قرن نوزدهم زمانی که کشتی‌های بخاری انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان حمل‌ونقل بار و مسافر را به شدت افزایش دادند. استفاده از کشتی‌های بادبانی تا حد زیادی محدود شد. استفاده از انرژی بادی به دلیل نیاز به کارایی نزدیک به دو قرن است که در صنعت کشتیرانی متوقف شده است.

علاوه بر این، استفاده از نیروی باد به‌عنوان یک سیستم محرکه ادغام با کشتی‌های معمولی دیزلی برای کاهش مصرف سوخت کشتی‌های و کاهش انتشار کربن در نظر گرفته می‌شود. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، چارچوب سیاست فعلی پیش‌بینی می‌کند سوخت‌های کم کربن و صفر کربن تقریباً ۲ درصد از کل مصرف انرژی

در کشتیرانی در سال ۲۰۳۰ و ۵ درصد در سال ۲۰۵۰ را تشکیل می‌دهد<sup>۱</sup>. این روند با رشد ۱۵ درصد تا ۲۰۳۰ و ۸۳ درصد تا سال ۲۰۵۰ محقق خواهد شد (یونلونگ وانگو همکاران، ۲۰۲۲).

از این رو با توجه به افزایش اهمیت میزان انتشار آلاینده‌ها در صنعت حمل‌ونقل دریایی و مقررات سخت‌گیرانه (سازمان بین‌المللی دریانوردی) و هزینه بالای سوخت کشتی‌ها، مالکان کشتی را بر آن داشت تا به دنبال روش‌های کاهش سوخت مصرفی کشتی‌ها باشند؛ زیرا با کاهش مصرف سوخت علاوه بر کاهش هزینه‌های عملیاتی، در انتشار آلاینده‌های جوی نیز کاهش چشمگیری ایجاد می‌گردد (Carlton et al.m 2009). حال که صنعت کشتیرانی ملزم شده است که تا سال ۲۰۵۰ میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای خود را به صفر برساند (یونلونگ وانگو همکاران، ۲۰۲۲). بر اساس این الزام به دولت‌ها این سیگنال را می‌تواند اعلام کند که باید از حالا به فکر تغییر زیرساخت‌های خود در این صنعت باشند.

جهت بهینه‌سازی مصرف سوخت در کشتی‌ها در سال‌های اخیر تحقیقات و پروژه‌هایی در سرتاسر جهان انجام گرفته است که نمونه‌هایی از این تلاش‌ها و تحقیقات به شرح زیر است:

۱. سید کاظم ساداتی ساروی و همکاران سال ۱۳۹۷ مقاله‌ای تحت عنوان مروری بر روش‌های نوین کاهش مصرف سوخت کشتی‌ها را کار کرده‌اند که هدف از این مقاله مرور راهکارهای موجود برای کاهش مصرف سوخت در کشتی‌ها می‌باشد. تغییر در طراحی و تغییرات اساسی در شکل بدنه کشتی‌ها برای بهبود هیدرودینامیک کشتی در کاهش مصرف و مقاومت سوخت مؤثر است اما تنها راه‌حل، کاهش مقاومت شناور نیست در این راستا تلاش‌ها و تحقیقات زیادی صورت گرفته که استفاده از انرژی‌های جدید، استفاده از تجهیزات و ملحقات کاهش مصرف انرژی و استفاده از فناوری‌های نوین در عملکرد موتور و ماشین‌آلات از این جمله می‌باشد. در نهایت مدیریت صحیح انرژی در

کشتی، انتخاب مسیر دریانوردی با توجه به وضع آب‌وهوا و اتوماسیون می‌تواند در کاهش مصرف سوخت تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای داشته باشد.

۲. آقای محمدتقی توکلی ۱۳۸۴ مقاله‌ای تحت عنوان روش‌های کاهش مصرف سوخت در شناورهای دریایی با بهینه‌سازی بدنه در راستای کم کردن مقاومت شناور را نوشته‌اند که با توجه به اینکه مقاومت شناور مهم‌ترین پارامتر در مصرف سوخت شناور است، ابتدا اجزای مختلف مقاومت و روش‌های کاهش آن بررسی شده، همچنین روش‌هایی از قبیل بهبود فرم بدنه، استفاده از حباب هوا و پوشش‌های جدید، کاهش وزن و بهبود راندمان سیستم رانش برای کاهش مصرف سوخت مورد بررسی قرار گرفته. استفاده از سیستم‌های پیش‌برنده جدید و دقت در نگهداری و بهره‌برداری شناور عوامل مهم دیگری است که به آن اشاره شده است و می‌تواند در کاهش مصرف سوخت شناور تأثیر داشته باشد.

۳. مهندس سیاوش یگانه ۱۴۰۲ مقاله‌ای تحت عنوان کاهش مصرف سوخت کشتی‌ها به روش Slow steaming که در این مقاله به بررسی نقاط قوت و ضعف و چالش‌های پیش‌روی روش Slow steaming در بهینه‌سازی و کاهش مصرف سوخت کشتی‌ها پرداخته شده است. Slow steaming یک روش بهینه‌سازی مصرف سوخت در کشتی‌هاست که با کاهش سرعت حرکت کشتی می‌تواند انرژی و سوخت بیشتری صرفه‌جویی کند. در این روش سرعت حرکت کشتی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای پایین‌تر از حداکثر سرعت ممکن کاهش می‌یابد. به‌منظور کاهش مصرف سوخت و افزایش بهره‌وری، استفاده از Slow steaming به دلیل مزایای زیادی که دارد به‌شدت در صنعت حمل‌ونقل دریایی مورد توجه گرفته است. یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از این روش کاهش مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای است. همچنین این روش می‌تواند باعث کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری کشتی و افزایش عمر مفید آن شود و با توجه به مزایای زیادی که این روش داراست، اما مشکلات و چالش‌های را نیز پیش‌رو دارد که باید مدیریت شود. در برخی از این موارد در اجرای روش Slow steaming ممکن است عدم رضایت مشتریان به دلیل افزایش زمان حمل‌ونقل را همراه داشته باشد. همچنین این

روش ممکن است باعث بروز مشکلات عملیاتی در کشتی شود. به عنوان مثال کاهش قدرت تراکم و افزایش زمان سفر

شکل ۱. نمایی از کشتی‌های در حال حرکت در اقیانوس<sup>۱</sup>



۴-سایت Marine Lynk - ۲۰۲۳ مقاله‌ای تحت عنوان نصب بادبان‌های جدید برای صرفه‌جویی سوخت در کشتی‌های فله بر نوشته است. این سایت گزارش شده است که شرکت برگ بالک با پایه‌گذاری در سنگاپور، بادبان‌های نوآرانه‌ای از جنس فولاد و کامپوزیت ساخته است که این بادبان‌ها می‌تواند در مسیرهایی که شرایط بادی مناسب دارد به کاهش مصرف سوخت و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، ۱۹,۵ تن کربن در روز کمک کند. جیمز مارشال رئیس شرکت بیگ بالک، افزود کشتی فله بره برگ المپیوس که با چهار بادبان به نام ویندز مجهز شده، اکنون از چین به سمت برزیل در حرکت است. او وی بیان داشت شرکت باهدف دستیابی به کربن صفر تا سال ۲۰۲۵ رویکرد متنوعی دارد و به تسریع در فرایند کاهش کربن متعهد است. با کاهش مصرف سوخت کشتی‌ها، تمامی کشتی به سمت نصب بادبان‌های صرفه‌جویی سوخت می‌رود

1 <https://turkdeniz.com/images/news/dunyanin-en-buyuk-yelkenli-gemisi-tanitildi.jpg>

شکل ۲. کشتی Bergebulk



با توجه به اهمیت بیان‌شده جهت کاهش هزینه‌های سوخت کشتی، روش‌های نوین بر پایه انرژی‌های تجدید پذیر مثل باد می‌باشد این پژوهش بر کارکرد فناوری کایت دریایی بر هزینه‌های مرتبط با سوخت کشتی‌ها (مطالعه موردی کشتی‌های شرکت کشتیرانی جمهوری اسلامی ایران) خواهد بود.

حال با توجه به استفاده از روش‌های نوین در جهت کاهش مصرف سوخت کشتی‌ها، از روش نوآورانه استفاده از کایت‌ها برای حل مسئله کاهش سوخت کشتی‌ها به‌عنوان یک منبع جایگزین تولید انرژی الکتریکی و مکانیکی می‌توان بهره برد.

در حال حاضر تمامی وسایل و تجهیزات تولید انرژی الکتریکی و توان پیش‌ران در کشتی، همگی تجهیزاتی هستند که از مصرف کردن سوخت‌های فسیلی جهت تأمین انرژی بهره می‌برند که با استفاده از کایت‌های هوشمند می‌توان گام بلندی در جهت جایگزین نمودن دستگاه‌ها و تجهیزات مصرف‌کننده سوخت فسیلی که آلودگی‌کننده محیط‌زیست می‌باشند را با دستگاه‌ها و تجهیزات تولیدکننده توان و انرژی پاک جایگزین نمود.

در حال حاضر با توجه به تکنولوژی‌های ارائه‌شده، در مبحث کاهش مصرف سوخت کشتی و آلاینده‌گی جوی، همگی موارد پژوهش تاکنون در راستای کاهش مصرف

سوخت هستند که به صورت غیرمستقیم بر روی کاهش سوخت مصرفی پیشرانه اصلی کشتی تأثیرگذار هستند و این فناوری‌ها نمی‌توانند به تنهایی جایگزین توان موتور کشتی شده و گازهای گلخانه‌ای را به صفر برسانند، این در حالی است که در حدود ۱۰۰ سال پیش، قبل از پیدایش نفت از انرژی پاک باد با کمک بادبان‌ها به جای موتورهای دیزل امروزی بهره‌گیری می‌شد حال با پیشرفت‌های علمی در عصر حاضر می‌توان از قدرت انرژی باد در راستای جایگزینی موتور اصلی کشتی با کمک فناوری کایت دریایی بهره برد. در حال حاضر با توجه به نوظهور بودن این پژوهش و اقدام در جهت جایگزین کردن پیشرانه کایت دریایی به جای موتور اصلی، می‌توان بکارگیری این کایت دریایی را مقدمه‌ای بر شروع روند جایگزینی کایت‌های هوشمندی که به کمک انرژی باد در دریاها در اهتزاز هستند را با موتور اصلی کشتی دانست؛ که از طریق این فناوری بتوان گام بلندی برای به صفر رساندن مصرف سوخت‌های فسیلی و همچنین متوقف نمودن انتشار آلاینده‌های جوی بیان نمود (Breuer & Cuchsinger, 2010).

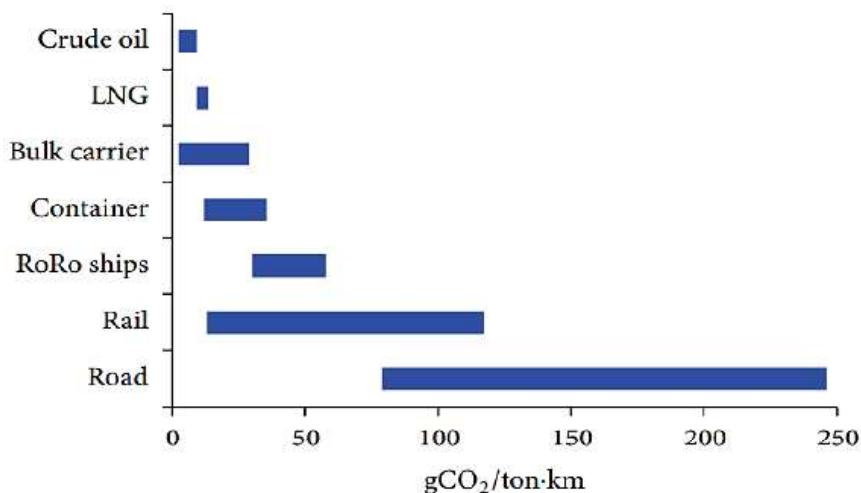
کایت دریایی به صورت آیرودینامیک طراحی شده است و جلوتر از کشتی به شکل هشت در هوا تحت کنترل خلبان خودکار پرواز می‌کند در نتیجه سرعت باد قدرت کایت تا چندین برابر سرعت واقعی باد افزایش می‌یابد. علاوه بر این کایت در ارتفاعات ۱۰۰ تا ۵۰۰ متری پرواز می‌کند. جایی که بادهای قوی‌تر و پایدارتر است. در نتیجه کایت دریایی به راحتی می‌تواند ۵ تا ۲۵ برابر بیشتر نیروی محرکه در هر متر مربع مساحت بادبان در مقایسه با سیستم‌های رانش بادبان معمولی تولید کنند. اطلاعات فنی ارائه شده توسط کایت نشان می‌دهد که در شرایط باد خوب کایت دریایی می‌تواند ۲۰۰۰ کیلووات نیروی محرکه ارائه دهند با پتانسیل عظیم باد در دریاهای آزاد واحد پیشران SkySails می‌تواند مصرف سوخت کشتی را در شرایط ایدئال به نصف کاهش دهد با پیشرانه و کایت دریایی هوشمند می‌توان به طور متوسط ۱۰ تا ۱۵ درصد در سال صرفه‌جویی در سوخت حاصل کرد در همین زمان IMO تخمین می‌زند که تنها با فناوری کایت دریایی سالانه تا ۱۰۰ میلیون تن از انتشار کربن در جهان کاهش می‌یابد.<sup>۱</sup>

<sup>1</sup> Ship Energy Efficiency Measures, Status and Guidance Advisory, ABS Organization

## ۲. بیان مسئله

امروز شرکت‌های حمل‌ونقل دریایی باید از سوخت تمیز با حداکثر ۱ درصد محتوای گوگرد، برای تأمین سوخت موردنیاز کشتی‌های خود با توجه به مقرراتی که از قبل توسط سازمان بین‌المللی دریانوردی تصویب شده است، استفاده نمایند و در پاسخ به فشار سیاسی جهانی، سازمان بین‌المللی دریانوردی در حال حاضر در حال تهیه مقررات سخت‌گیرانه در مورد کاهش انتشار CO<sub>2</sub> از سوی کارشناسان است. کارشناسان اقتصادی براین باورند که با تصویب ممنوعیت نفت کوره، قیمت سوخت مصرفی کشتی‌ها افزایش خواهد یافت چراکه ظرفیت‌های پالایشگاه‌ها برای پوشش این تقاضاها بسیار محدود خواهد بود و هنگامی که صحبت از تقاضا برای سوخت مطرح می‌شود مهم است که به‌خاطر داشته باشیم که در آینده کشتی‌ها با اتومبیل‌ها، کامیون‌ها و سایر مصرف‌کنندگان مشتقات نفتی در خشکی مقایسه خواهند شد.

نمودار ۱- میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید توسط وسایل نقلیه مختلف (دهش و همکاران، ۱۳۹۰)



در حال حاضر پالایشگاه‌های مدرن به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که نفت کوره کمتری تولید کنند و در عوض فرآورده‌های پالایش‌شده با کیفیت بالا و قیمت بالا تولید نمایند. در نتیجه انجمن‌های صنفی معتقدند که پالایشگاه‌ها قادر به پوشش تقاضای اضافی نیستند و

برای صنعت کشتیرانی وضعیت در کوتاه‌مدت در حال تبدیل شدن به یک بحران قیمتی که تأثیر مستقیم بر روی وضعیت کرایه‌ها خواهد داشت (Carlton et al.m 2009).

### روش‌شناسی پژوهش

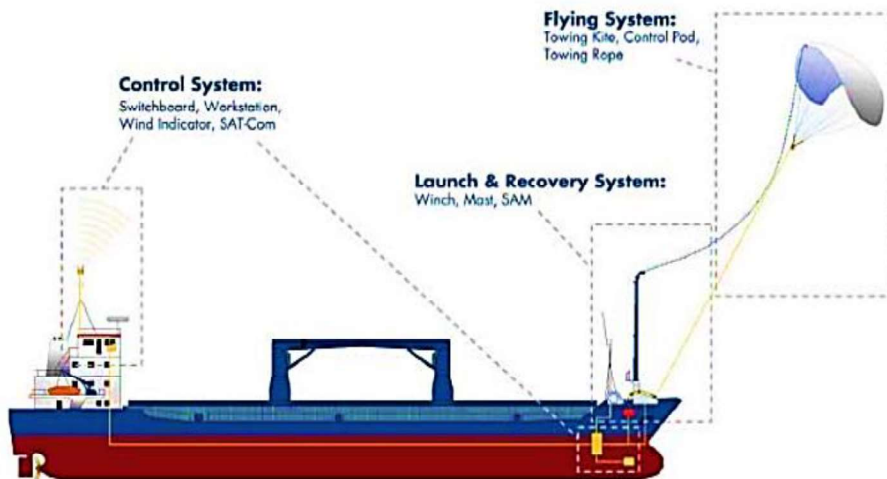
پژوهش حاضر از نوع پژوهش توصیفی و کاربردی می‌باشد که به جمع‌آوری مطالب پیرامون کایت‌های دریایی در عرصه دریانوردی پرداخته است. روش حال حاضر کتابخانه‌ای است و با استفاده از منابع اینترنتی و بررسی اسناد و مدارک در دسترس مطالب مقاله حاضر جمع‌آوری گردیده است.

### تعاریف و معادلات حاکم

#### ۲-۲ جزئیات تکنولوژی کایت

سیستم کایت شامل ۳ بخش اصلی می‌باشد: یک کایت و طناب متصل به آن، سیستم باز و بسته کردن کایت و سیستم کنترل برای عملیات اتوماتیک (دهش و همکاران، ۱۳۹۰). در شکل زیر اجزای سیستم کایت نشان داده شده است:

شکل ۳. اجزای سیستم کایت (دهش و همکاران، ۱۳۹۰)



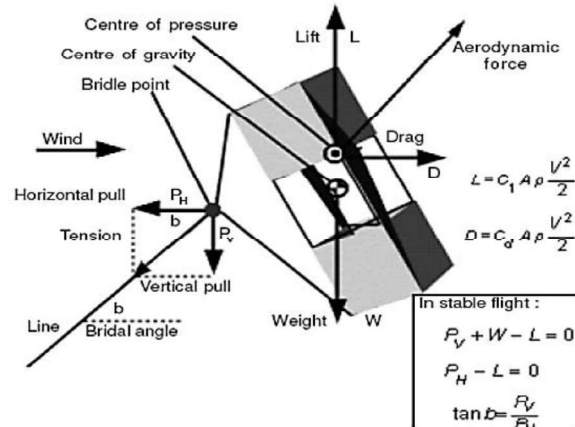
## ۲-۳ کایت

در این روش به جای سیستم رانش دریایی استفاده شده در کشتی‌های معمولی، کایت‌های بزرگ برای رانش کشتی استفاده می‌شود. کایت‌ها از بافت‌های ضد رطوبت، ضد نور و با مقاومت بالا ساخته می‌شوند. پروفیل کایت به روشی طراحی شده است که به بالاترین بازده آیرودینامیک می‌تواند قابل دستیابی باشد. در مسیرهای با بادهای خیلی قوی می‌توان قدرت کایت را با تغییر زاویه حمله تغییر داد بدون اینکه مجبور شویم سطح آن را کاهش یا افزایش دهیم. مساحت کایت‌ها می‌تواند از ۱۵۰ تا ۶۰۰ مترمربع باشد (Breuer & Cuchsinger, 2010)

## ۲-۴ آنالیز نیروهای وارد بر کایت

در شکل زیر، نیروهای آزاد وارد بر کایت رسم شده است (Sidhartha, 2012).

شکل ۴. نیروهای آزاد وارد بر یک کایت



در راستای عمودی و افقی، مجموع نیروها برابر با صفر است:

$$P_V + W - L = 0 \quad (۱)$$

$$P_H - D = 0 \quad (۲)$$

در راستای عمودی و افقی، مجموع نیروها برابر با صفر است:

$$L = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 \cdot A C_L \quad (۳)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 \cdot A C_D \quad (۴)$$

که)، چگالی هوا،  $CL$  ضریب لیف،  $CD$  ضریب درگ،  $A$  سطح تصویر شده کایت و  $V$  سرعت باد است.

هر چه ارتفاع بیشتر باشد، چگالی هوا کمتر است. مقدار استاندارد چگالی هوا در شرایط دریایی برابر با  $\rho = 1.299 \text{ kg/m}^3$  است<sup>۱</sup>.

## ۲-۵ انتقال نیرو

سیستم انتقال نیرو، نیرو را از کایت به کشتی انتقال می‌دهد. سیستم انتقال نیرو شامل طناب‌های کششی، وینچ و مرکز انتقال نیرو است.

طناب‌های کششی برای انتقال نیروی کششی و وینچ برای باز و بسته کردن کایت و ذخیره طناب استفاده می‌شوند. نقطه انتقال نیرو نقطه‌ای است که طناب‌های کششی کایت، به کشتی متصل می‌شود و در ناحیه جلو عرشه کشتی قرار دارد (Breuer & Cuchsinger, 2010).

## ۲-۶ سیستم چرخشی

سیستم چرخشی، رانش کایت را به صورت اتوماتیک بر عهده دارد. سیستم چرخشی شامل کنترل پد و سیستم کنترلی است. کنترل پد طناب‌های کنترلی را به راست و چپ می‌کشد و مسیر حرکت کایت را تعیین می‌کند. اجزای مکانیکی، الکترونیکی و نرم‌افزار اتوپایلر برای کنترل کایت در کنترل پد تعبیه شده است. وظیفه سیستم کنترلی این است که کایت را به‌طور اتوماتیک بچرخاند<sup>۲</sup>. سیستم کنترلی شامل اجزای زیر می‌باشد:

1. Kite on-board computer
2. Control pod computer
3. Autopilot program/kite maneuver control

1 <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/kitedrag.html>

2 <http://www.kitewindgenerator.com>

## ۲-۷ فرآیند باز و بسته شدن کایت

کایت در انبار کایت در قسمت جلوی کشتی ذخیره می‌شود. در حالت باز شدن، دکل تلسکوپیی، کایت را در قسمت انباری کایت بلند می‌کند. در نتیجه دکل تلسکوپیی تا بیشترین ارتفاع باز می‌شود و کایت تا حداکثر سائزش گسترش می‌یابد. سپس وینچ طناب کششی را تا ارتفاع عملیاتی تعیین شده، رها می‌کند. روند جمع شدن در پروسه معکوس باز شدن، شکل می‌گیرد. تمام مراحل باز و بسته شدن، به صورت اتوماتیک انجام می‌شود و هر کدام تقریباً ۱۰ تا ۲۰ دقیقه طول می‌کشد. کایت، برای عملیات در بادهای بین ۵,۴ تا ۲۰,۷ متر بر ثانیه در دریا طراحی شده است. کایت در این شرایط می‌تواند باز و بسته شود ولی در بادهای کمتر از ۵,۴ متر بر ثانیه نمی‌تواند باز شود (دهش و همکاران، ۱۳۹۰).

حسگرهایی برای اندازه‌گیری مسیر و سرعت باد، بر روی کشتی و کنترل پد، نصب می‌شوند. این حسگرهای کشتی که on-board هستند باید با استاندارد (National Marine electronic Association NMEA) مطابقت داده شوند. حسگرها، داده‌ها را به سیستم کنترلی و کامپیوترهای کایت انتقال می‌دهند (دهش و همکاران، ۱۳۹۰).

## ۲-۸ مزایای کایت

**- نیروی رانش بالا:** با توجه به فرمول زیر:

$$F = \frac{C_p \rho V^2 A}{2} \quad (5)$$

که F، نیروی لیفت کایت، C ضریب لیفت، ρ چگالی هوا، V سرعت جریان هوا در کایت، A مساحت سطح کایت است. اگر سرعت جریان هوا دو برابر شود نیروی رانشی کایت ۴ برابر می‌شود. در مواقعی که بادهای پایدار، قوی‌تر و بیشتر در حال وزش هستند، کایت می‌تواند در ارتفاع بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ متر عمل کند که در این ارتفاع، سرعت باد چندین برابر سرعت بادهای سطحی دریاست (دهش و همکاران، ۱۳۹۰).

**- هیل کمتر:** با استفاده از سیستم کایت مقدار هیل کشتی به حداقل می‌رسد (همان).

**- کنترل نیروی دینامیک:** در حالت وزش بادهای خیلی قوی و تند، اتوپایل می‌تواند

کایت را حداکثر در مدت ۳۰ ثانیه در موقعیت بهینه (که هیچ نیرویی را به کشتی اعمال نکند) قرار دهد.

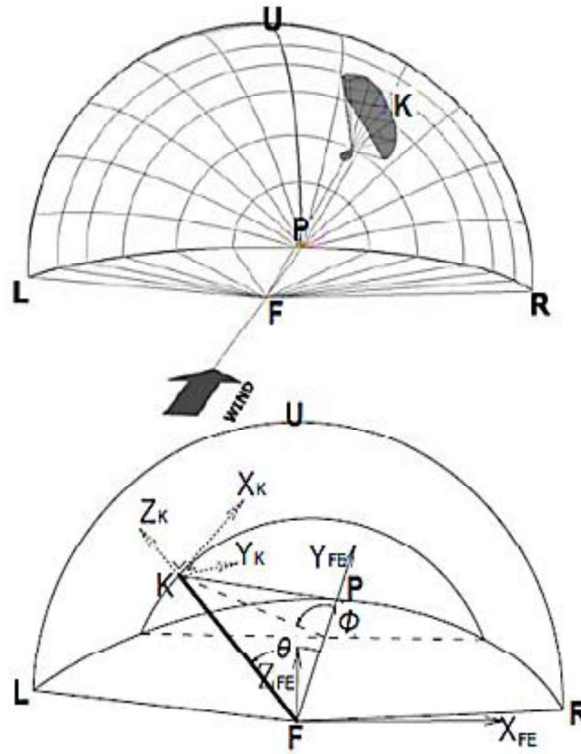
**- رفتار اصلاح شده در دریا:** با توجه به نیروی بالابرنده کایت در قسمت جلوی کشتی، سیستم کایت موج‌ها را مهار (دمپ) می‌کند.

**- عملیات اتوماتیک:** در طول عملیات یک اتوپایلِت کلیه فرایندها را کنترل و مدیریت می‌کند (همان).

## ۲-۹ روش Flight envelope (FE)

برای بیان موقعیت و حرکت کایت در فضا از روش FE استفاده می‌شود. موقعیت‌های احتمالی کایت متصل شده به طناب کششی به طول  $r$ ، با ربع کره یا دایره به شعاع  $r$  که FE نامیده می‌شود، تعریف می‌گردد. سرعت باد واقعی،  $W$ ، نقطه  $F$  محل اتصال طناب کششی،  $LUR$  نیم‌دایره لبه FE و  $P$  مرکز منطقه‌ای نیرو است. همه نیم‌دایره‌ها موازی با  $LUR$  هستند و خطوط واحد نیرو نامیده می‌شوند که بر روی این خطوط، سرعت و کشش کایت یکسان و با هم برابر هستند. همه بخش‌های نیم‌دایره از  $P$  تا لبه خطوط، خطوط واحد شیب (خطوط دارای شیب برابر) نامیده می‌شوند. تغییر مقدار (شیب) قدرت و سرعت، ثابت و دارای بیشترین مقدار بر روی این خطوط است. موقعیت کایت در FE به وسیله نقطه  $K$  تعریف می‌شود که دارای دو زاویه است. (شکل شماره ۳) (دهش و همکاران، ۱۳۹۰).

شکل ۵. روش FE (دهش و همکاران، ۱۳۹۰).



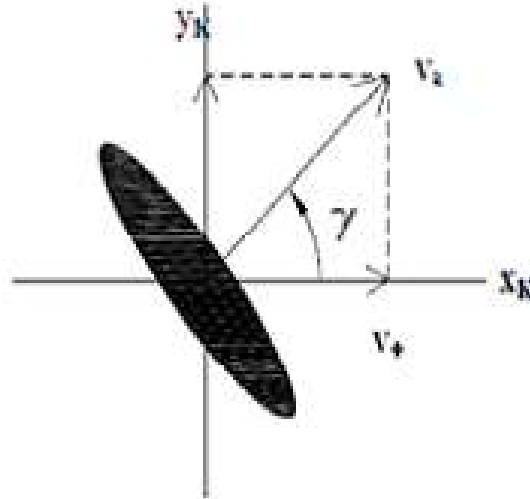
$\theta$ : انحراف خطوط FK با توجه به خط FP (زاویه بین FK و FP)

$\Phi$ : خمیدگی یا کج شدن سطح FKP نسبت به سطح افق.

برای توضیح جهت پرواز کایت، سه محور  $X_K$  و  $Y_K$  و  $Z_K$  که مبدأ آن‌ها در K است تعریف می‌شوند.  $\gamma$ ، زاویه بین جهت پرواز کایت و محور  $X_K$  می‌باشد. شکل زیر، تصویر

از بالای کایت را نشان می‌دهد: (Sidhartha, 2012)

شکل ۶. تصویر از بالای کایت



همان‌طور که موقعیت و جهت پرواز کایت را تعریف کردیم، این تعریف نیز برای تنظیم کردن ایجاد باد به وسیله کایت استفاده می‌شود. سرعت در FE در سه جهت X و Y و Z تعریف می‌شود. سرعت کل، ترکیبی از این سه مؤلفه سرعت خواهد بود. به وسیله سرعت باد و سرعت خود کایت ایجاد می‌شود. قسمتی از سرعت که به وسیله سرعت کایت ایجاد می‌شود به دو قسمت تقسیم می‌گردد:

الف: قسمتی که به خطوط واحد نیرو که در جهت  $X_K$  است، متصل است و سرعت را در آن جهت با  $V_{X-K}$  نمایش می‌دهیم.

ب: قسمتی که به خطوط واحد شیب که در جهت  $Y_K$  است، متصل است و سرعت را در آن جهت با  $V_{Y-K}$  نمایش می‌دهیم.

سرعت باد در جهت  $Y_K$  با  $V_{Y-W}$  نشان داده می‌شود. پس داریم: (Sidhartha, 2012)

$$V_{t-y} = -r\dot{\theta} + W \sin(\theta) = V_{y-k} + V_{y-w} \quad (6)$$

$$V_{t-x} = -r \sin(\theta) \dot{\phi} = V_{x-k} \quad (7)$$

از ترکیب دو سرعت معادله ۶ و ۷، سرعت کل به دست می‌آید:

بررسی کاهش هزینه سوخت کشتی‌ها با استفاده از فناوری کایت‌دریایی؛ پورشکرریز و سجادی پارسا | ۷۷

$$V_t = \sqrt{(V_{t-x})^2 + (V_{t-y})^2} \quad (۸)$$

فرمول‌های  $V_k$  (سرعت پرواز) و  $X_k$  و  $V_k$  (زاویه بین  $X_k$  و  $V_k$  در زیر آمده است:

$$V_k = \sqrt{(V_{y-k})^2 + (V_{x-k})^2} \quad (۹)$$

$$\gamma = \text{Arc tan}\left(\frac{V_{y-k}}{V_{x-k}}\right) \quad (۱۰)$$

سرعت شعاعی فقط به وسیله باد حقیقی ایجاد می‌شود:

$$V_{r-z} = W \cos(\theta) \quad (۱۱)$$

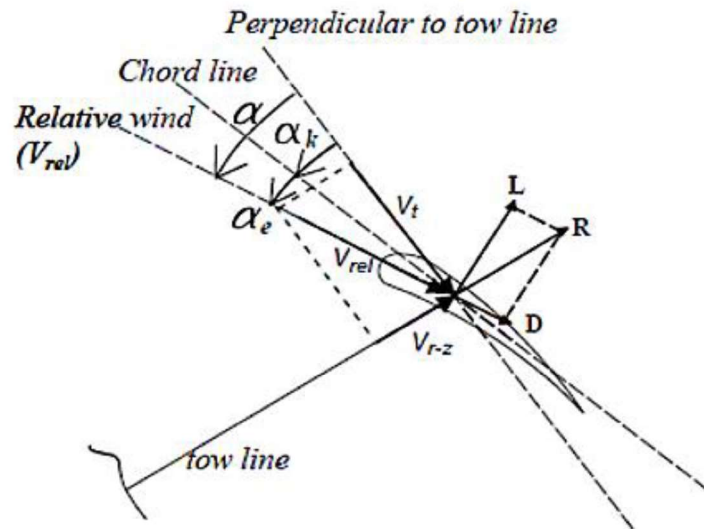
$$V_{rel} = \sqrt{(V_t)^2 + (V_{r-z})^2} \quad (۱۲)$$

$$\alpha = \text{Arc tan}\left(\frac{V_{r-z}}{V_t}\right) \quad (۱۳)$$

برای پیدا کردن زاویه حمله مناسب ( $\alpha_e$ )، زاویه اتصال کایت به طناب کششی ( $\alpha_k$ ) را باید از کم کرد (شکل زیر)

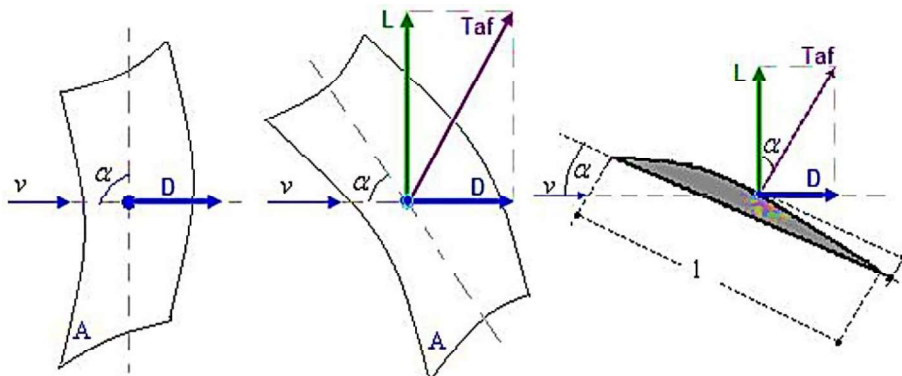
$$\alpha_e = \alpha - \alpha_k \quad (۱۴)$$

شکل ۷- زاویه کایت (Sidhartha, 2012)

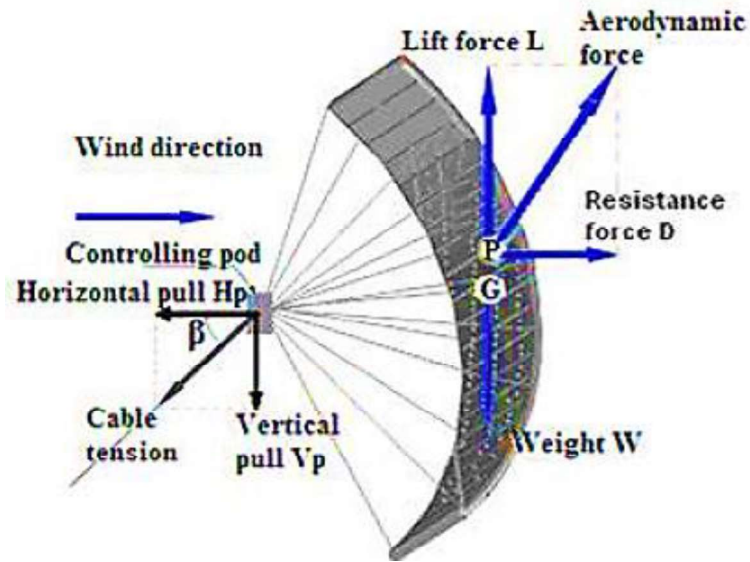


همان‌طور که در شکل مشاهده می‌نمایید نیروهایی که به کایت وارد می‌شود عبارت‌اند از: ۱-نیروی بالابرنده یا lift (L)، ۲-نیروی اصطکاک یا کشش (D)، ۳-نیروی وزن (W). (Sidhartha, 2012)

شکل ۸. تصاویر نیروهای وارده به کایت<sup>۱</sup>



1 <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/kitedrag.html>



حال با محاسبه نیروی Drag و lift از طریق فرمول‌های زیر می‌توانیم مقدار کل نیروی ایجادشده توسط کایت را تعیین نماییم<sup>۱</sup>:

$$D = C_D \times P \times V_\infty^2 / 2 \times A_K \quad (15)$$

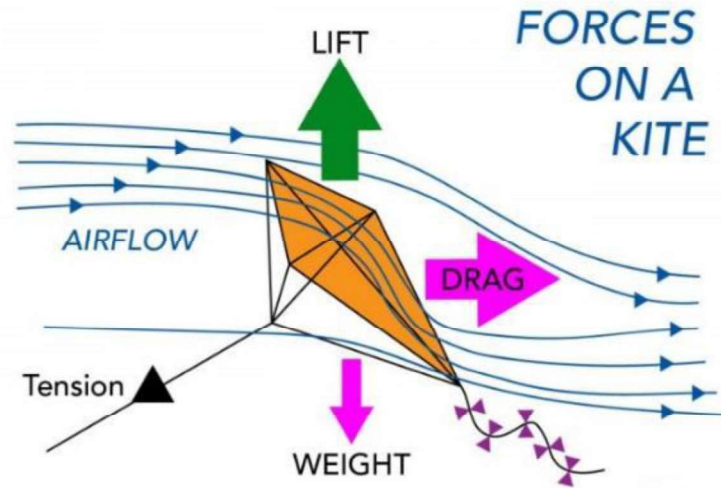
$$L = C_L \times P \times V_\infty^2 / 2 \times A_K \quad (16)$$

در فرمول بالا ضرایب برا و درگ بر اساس نتایج آزمایشگاهی و تونل باد تولیدشده و با محاسبه زیر به دست می‌آید:

$$C_d = C_{d0} + \frac{C_l^2}{.7 \times \pi \times AR} \quad (17)$$

1 <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/kitedrag.html>

شکل ۹. تصویر نیروهای وارده به sea kite



$$C_l = \frac{C_{l0}}{1 + \frac{C_{l0}}{\pi \times AR}} \quad (18)$$

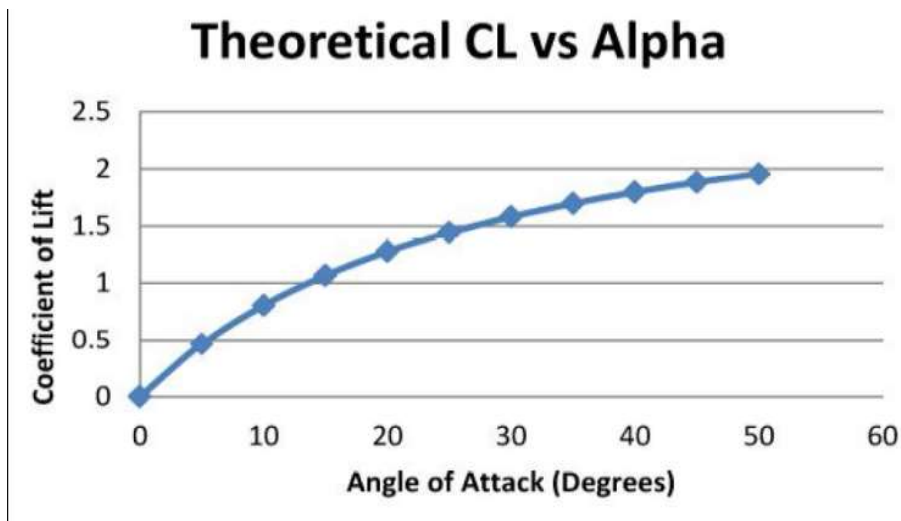
حال با در دست داشتن فرمول‌های بالا، می‌توان جدول زیر را برای یک کایت دریایی به طول ۵۷/۲۸ متر و عرض ۷ متر و ضخامت ۰,۷ متر به دست آورد:

جدول ۱. جدول تأثیر زاویه کایت بر نیروی برآوردینامیکی

A (°)	5°	8°	12°	14°	15°
P(kg/m <sup>3</sup> )	1.2047	1.2047	1.2047	1.2047	1.2047
W(m/s)	10	10	10	10	10
CD	0.0565	0.0804	0.1400	0.2172	0.2421
CL	0.6605	0.08780	1.054	0.9750	0.9250
L (N)	7957,043	10577,265	12697,602	11745,824	11143,474
D (N)	680,768	968,578	1686,580	2616,608	2916,578
Taf (N)	7986,101	10581,72	12809,043	12033,768	11518,830

از نتایج جدول فوق به این نتیجه می‌رسیم که: هر چه زاویه حمله کایت بیشتر باشد نیروی برآوردینامیکی نیز بیشتر خواهد بود اگرچه کشش زیاد نخواهد بود ولی کایت با سرعت بیشتری به سمت بالا ارتفاع می‌گیرد.

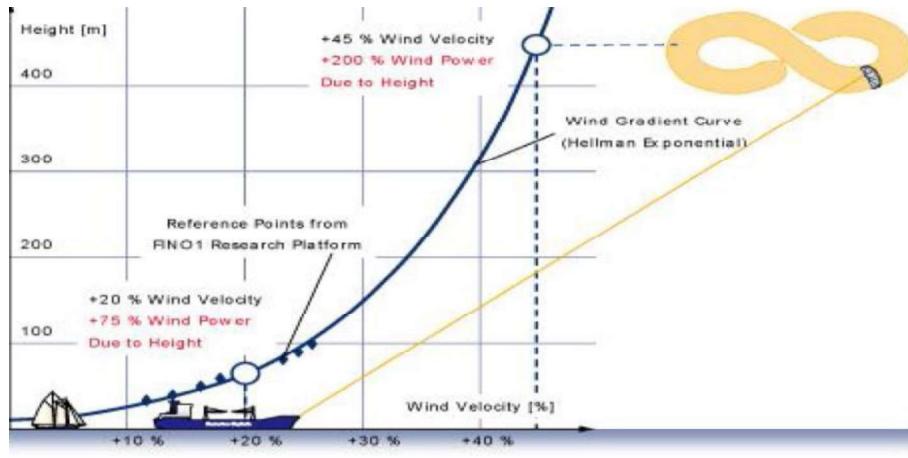
نمودار ۲. تئوریکال و آلفا (Sidhartha, 2012)



کایت متصل به کشتی در ارتفاعات بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ متری که بادها قوی‌تر و پایدارتر حاکم هستند به راحتی بین ۵ تا ۲۵ برابر قدرت بیشتری به نسبت زمانی که کایت در ارتفاع ۱۰ متری زمین است توان به دست می‌آورد.

در ارتفاع ۶۱۰ متری معادل ۲۰۰۰ فوتی سرعت باد ۲-۳ برابر در مقایسه با سطح زمین است و محاسبه قدرت کایت با مکعب آن سرعت باد بالا می‌رود بنابراین تنها باید با به دست آوردن ۲۰۰۰ فوت ارتفاع توسط کایت به دست خواهد آمد. بهترین مزیت این تکنولوژی استفاده آن در ارتفاع ۱۵۰ متری به بالا نمایان می‌شود چرا که اصطکاک باد با زمین کم شده و سرعت باد تقریباً ۲۵ درصد بیشتر از ارتفاع ۱۰ متری خواهد بود و از آنجایی که انرژی جنبشی یک توده هوا با سرعت باد به توان ۳ افزایش می‌یابد بسته به شرایط آب و هوایی می‌توان بیش از دو برابر انرژی در ارتفاع عملیاتی کایت نسبت به ارتفاع ۱۰ متری تولید کند و با این کار می‌توان انرژی قابل توجهی به دست آورد (Sidhartha, 2012).

شکل ۱۰. تصویر مقایسه نیروی باد مورد استفاده در کایت و کشتی‌های بادبانی ( Zhi Yong (Tai, 2023



حال با در دانستن نحوه عملکرد توان و اجزا تشکیل دهنده فناوری کایت دریایی نیاز به دانستن علم دیگری است که در بهره‌گیری از کایت نقش مؤثری دارد که در این پژوهش آن را با سیستم مسیریابی و بهینه‌سازی در مسیر خواهیم شناخت که این سیستم یک سیستم اختیاری مسیریابی آب و هوایی می‌باشد که به شرکت‌های حمل‌ونقل دریایی مسیریابی را با توجه به وضعیت جوی جهت مقرون‌به‌صرفه بودن پیشنهاد می‌دهد.

این مسیرها توسط هواشناسان بر اساس ۴ مدل زیر ارائه می‌شود ( The Energy Efficiency Design index (EEDI) for new Ships, 2011):

۱- **پیش‌بینی آب‌وهوا:** ابتدا مشخص می‌کنند که در شرایط آب و هوایی پیش‌بینی شده چه نوع عملکردی را می‌توان با پیش‌رانه کایت دریایی ایجاد کرد سپس مسیرها و سرعت احتمالی محاسبه می‌شود.

۲- **مدل تصمیم‌گیری:** در این مدل الزامات تعیین شده توسط شرکت حمل‌ونقل، مانند زمان موردنظر رسیدن، گنجانده می‌شود.

بررسی کاهش هزینه سوخت کشتی‌ها با استفاده از فناوری کایت‌دریایی؛ پورشکرریز و سجادی پارسا | ۸۳

**۳-محاسبه عملکرد:** داده‌های پیش‌بینی هواشناسی به همراه مدل تصمیم‌گیری به محاسبات داده می‌شود. سپس مسیر بهینه بر اساس عملکرد محاسبه می‌شود.

**۴-مسیر پیشنهادی:** در نهایت مسیر پیشنهادی بر اساس نقاط بین‌راهی پیش‌بینی شده، برای فرمانده کشتی ارسال می‌شود.

جدول ۲- عوامل مؤثر بر کارایی عملیات فناوری ناوبری به کمک باد

عوامل تأثیرگذار	عوامل محیطی	عوامل کشتی	عوامل تجاری
۱	سرعت باد	بهینه‌سازی مسیر	مسیر تجارت
۲	موج	فرمان کاپیتان منبع	زمان سفر
۳	تغییرات آب و هوایی فصلی	آموزش خدمه	تقاضای بندر

**۲-۱۰ دیگر مزایای فناوری استفاده از کایت دریایی و نکات قابل تأمل در استفاده از آن:**

۱- مقدار فضایی که این سیستم در کشتی اشغال می‌کند از نظر اقتصادی ناچیز است این به این دلیل است که اجزای سیستم کایت دریایی در منطقه جلوی کشتی و دکل سینه نصب شده است که به‌هرحال برای بار استفاده نمی‌شود.

۲- کایت دریایی به همراه طناب‌های مهار آن به‌راحتی تا شده و در انبار کشتی نگهداری می‌شود و فضای بسیار کمی در انبار کشتی اشغال می‌کند به‌عنوان مثال یک کایت دریایی ۱۶۰ متر مربعی تا شده تنها به‌اندازه یک باجه تلفن فضا برای نگهداری می‌خواهد.

۳- کایت دریایی با توجه به افزایش و بالا رفتن خودکار هیچ‌گونه مانعی جهت دریافت و به‌کارگیری انرژی باد نخواهد داشت. این کایت دارای ایمنی مناسب بوده و عکس‌العمل ناچیزی روی حرکت کشتی دارد.

۴- خدمه عادی کشتی برای راه‌اندازی و به‌کارگیری این سیستم کافی هستند و هیچ هزینه اضافی برای مالک کشتی و پرسنل ایجاد نمی‌کند.

۵- بسته به باد غالب، میانگین مصرف سوخت سالانه کشتی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را می‌توان از ۵ تا ۳۳ درصد کاهش داد. در آخرین فناوری کایت دریایی می‌تواند ۲ مگاوات

(معادل تقریباً ۲۷۰۰ اسب بخار موتور کشتی) تولید کند که این معادل صرفه‌جویی ۱۰ تن سوخت کشتی در روز می‌باشد (دهش، ۱۳۹۰).

۶- فناوری استفاده از کایت دریایی با توجه به استفاده از نیروی در دسترس باد بر روی تمامی کشتی‌ها قابل نصب بوده و استفاده از این فناوری راه‌حلی مناسب و سریع برای کاهش انتشار کربن کشتی‌های قدیمی موجود در ناوگان تجاری جهان می‌باشد.

۷- سازمان ملل متحد، سازمان بین‌المللی دریانوردی، اهمیت ویژه و زیادی به فناوری کایت دریایی به جهت حفاظت از آب‌وهوا می‌دهد. در آخرین مطالعه انتشار گازهای گلخانه‌ای، سازمان بین‌المللی دریانوردی اعلام می‌نماید که این فناوری کایت دریایی، پتانسیل صرفه‌جویی در حدود ۱۰۰ میلیون تن CO<sub>2</sub> در سال در صورت استفاده گسترده در کشتی‌های ناوگان تجاری جهان دارد (Second IMO (International Maritime Organization) GHG Study, 2009).

۸- با توجه به اینکه انرژی و قدرت باد هرچه از سطح زمین بالاتر باشد به‌علت کاهش اصطکاک بیشتر خواهد بود، پس برای مهار و تولید انرژی، توان بیشتر نیاز است که طناب مهارکننده توسط یک بکسل برقی کنترل شود تا بتواند از انرژی باد در تمام سطوح استفاده کند.

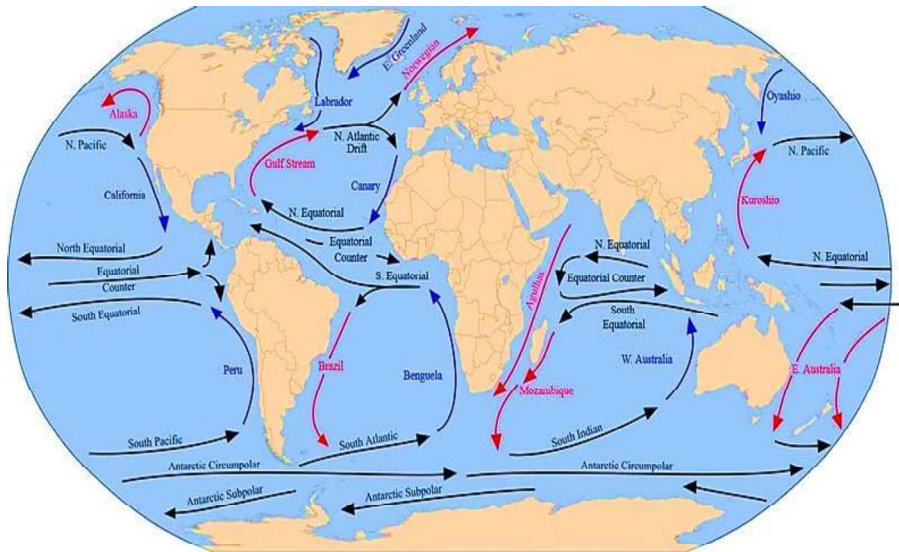
۹- توجه به اینکه انرژی و قدرت باد هرچه از سطح زمین فاصله بگیریم بیشتر خواهد بود بایستی با توجه به سیستم‌های هواشناسی پیش‌بینی‌کننده، قدرت حداکثری باد را در لایه‌های مختلف جوی اندازه‌گیری نموده که بتوانیم از حداکثر کارایی کایت دریایی استفاده کنیم برای مثال در محاسبات مشخص شده است اگر سرعت جریان هوا عبوری از کایت دریایی دو برابر شود، نیروی کشش کایت دریایی در عمل ۴ برابر خواهد شد؛ و در عمل با توجه به وزن طناب و اتلاف انرژی کشتی، این میزان ۴ برابری به ۳ برابر تقلیل خواهد یافت (Sidhartha, 2012).

در شکل ۱۱ جهت حرکت بادهای غالب در مناطق مختلف جهان را مشاهده می‌نمایید که شرکت‌های حمل‌ونقل دریایی می‌توانند با استفاده از علم پیش‌بینی هواشناسی و نقشه‌های

بررسی کاهش هزینه سوخت کشتی‌ها با استفاده از فناوری کایت‌دریایی؛ پورشکرریز و سجادی پارسا | ۸۵

موجود در انتخاب مسیرهای دریانوردی جهت استفاده از فناوری کایت دریایی استفاده نمایند (Enter sting engineering.com):

شکل ۱۱. تصویر جهت حرکت بادهای غالب در مناطق مختلف جهان



استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر هدف نهایی حمل‌ونقل دریایی پایدار است در گذشته از انرژی باد (بادبان‌ها) برای حمل‌ونقل مردم و کالاها بر روی اقیانوس‌ها استفاده می‌شد فناوری در حال توسعه کایت دریایی ثابت می‌کند که تکنیک‌های قدیمی می‌تواند اثبات‌کننده آینده باشند و نوآوری در صنعت کشتیرانی را تسریع نمایند ( Regulation (EU), 2015).

با فناوری جدید کایت دریایی می‌توان ۳۳٪ در مصرف سوخت کشتی‌ها صرفه‌جویی کرد و طبق آخرین دست‌آورد فناوری، کایت دریایی می‌تواند قدرت پیشرانه‌ای بیش از ۲ مگاوات (تقریباً معادل ۱۲۷۰۰ اسب بخار، موتور کشتی) تولید کند و این توان تولیدی از انرژی باد توسط فناوری کایت دریایی معادل صرفه‌جویی ۱۰ تن سوخت در یک روز می‌باشد (دهش، ۱۳۹۰).

استفاده از فناوری کایت دریایی در کنار سایر تکنیک‌ها و فناوری‌ها، برای کاهش

مصرف سوخت و بازگشت سرمایه گذاری‌ها است که با کمک فناوری کایت دریایی بتوانیم سهم مهمی در کاهش هزینه‌های مرتبط با سوخت و کاهش انتشار و دفع گازهای گلخانه‌ای داشته باشیم (Second IMO (International Maritime Organization) (GHG Study, 2009).

یکی از روش‌های ترکیبی که می‌تواند با استفاده از فناوری کایت دریایی اثربخشی دو برابری داشته دریانوردی در مسیر دایره عظیمه<sup>۱</sup> است اگر مسافت بین دو بندر بیشتر از ۶۰۰ مایل دریایی باشد، می‌بایستی از روش دریانوردی در مسیر دایره عظیمه حرکت و استفاده نماییم. این روش به علت کوتاه‌ترین فاصله بین دو نقطه جزو اقتصادی‌ترین مسیرها برای دریانوردی محسوب می‌شود، در دریانوردی‌های اقیانوسی بالاتر از ۶۰۰ مایل، مسیر حرکت بایستی بر روی دایره عظیمه مورد استفاده قرار گیرد به همین دلیل سازمان آموزش بین‌المللی دریانوردان، روش مصوبی را برای حل این مسئله توسط دریانوردان ارائه نموده است.

روش محاسبه دایره عظیمه با نقطه ورتکس<sup>۲</sup> (نزدیک‌ترین نقطه مسیر به قطب) که توسط جداول لگاریتمی است مورد حل قرار می‌گیرد. زمانی که در حال دریانوردی در فواصل بالای ۶۰۰ مایلی هستید و زمان و فرصت کافی برای رسیدن به مقصد وجود دارد استفاده از تکنولوژی کایت دریایی جهت صرفه‌جویی در مصرف سوخت کشتی می‌تواند مفید باشد. در عصر جدید استفاده از کایت‌ها در ورزش‌های هوایی مرسوم بوده و به‌عنوان یک سرگرمی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Carlton et al., 2009).

حال با توجه به تکنولوژی پیشنهاد شده در جهت کاهش مصرف سوخت کشتی این کایت‌ها می‌توانند یک کشتی باری ۱۶۵,۰۰۰ تنی را با توجه به قدرت باد ناشی از گیرافتادن در این کایت‌ها در دریا به حرکت در آورد؛ که در ادامه به اتصال کایت به کشتی و اثرات آن می‌پردازیم:

---

1 Great circle

2 vortex

شکل ۱۲. یک نمونه کایت نصب‌شده بر روی یک کشتی<sup>۱</sup>



کشتی‌های باری برای ارسال کالاها به سراسر جهان باید روزانه ۱۰۰۰ مایل دریایی را سفر کنند و تقریباً ۴۰۰ تن در روز سوخت مصرف نمایند که این سوخت معادل سوخت ۱۰۰۰ خودرو می‌باشد.

کشتی‌ها از یک سوخت ارزان به نام سوخت کوره که شبیه قیر است استفاده می‌کنند که این سوخت با توجه به قیمت ارزان خود بسیار سمی و کثیف است. به‌طوری‌که یک کشتی می‌تواند آلودگی معادل ۵۰ میلیون خودرو در یک روز تولید کند؛ که این تولید آلودگی، مغایر با سازمان بین‌المللی دریانوردی و قانون مارپل می‌باشد.

---

1 <https://airseas.com>

شکل ۱۳. نمونه‌ای از میزان آلاینده‌گی یک کشتی<sup>۱</sup>



برای اولین بار یک استارت آپ فرانسوی تصمیم گرفت تا یک بادبان هوشمند را دوباره در کشتی‌ها به کارگیری کند و یک طرح علمی بنام کایت دریایی را بنیان بگذارد. کایت دریایی استفاده شده در ابعاد ۵۴۰۰ فوت مربع بر روی یک کشتی باری ۳۰ میلیون دلاری نصب شده تا بتواند ثابت کند که این بادبان هوشمند بکار گرفته شده تحت عنوان Sea kite می‌تواند در کاهش مصرف سوخت در صنعت کشتیرانی یک ایده نوظهور می‌باشد و می‌تواند آلودگی را تا در حدود ۲۰٪ کاهش دهد (Breuer & Cuchsinger, 2010).

1 [https://content.maltatoday.com.mt/ui/images/photos/ship\\_climate\\_change.png](https://content.maltatoday.com.mt/ui/images/photos/ship_climate_change.png)

شکل ۱۴. کایت نصب‌شده بر روی یک کشتی باری<sup>۱</sup>



حال به بیان عملکرد مستقیم کایت دریایی بر روی کشتی و نقش آن برای تولید انرژی می‌پردازیم: زمانی که کشتی وارد آب‌های بین‌المللی می‌شود با فرض داشتن باد غالب از پاشنه کشتی، پارافویل<sup>۲</sup> کایت که در دکل اصلی در جلوی سینه نصب و طراحی شده است، تنها با لمس یک دکمه باز می‌شود و خود کایت که یک شکل آیرودینامیکی<sup>۳</sup> دارد با جریان باد باز شده و از جایگاهش خارج می‌شود و با کمک باد محیط، کایت دریایی اوج می‌گیرد و به ارتفاع ۵۰۰ فوتی یا ۳۰۰ متری از سطح دریا می‌رسد که این ارتفاع برای گرفتن بیشترین قدرت از باد جهت کشیدن کشتی توسط کایت مناسب است (Breuer & Cuchsinger, 2010).

1 <https://tineye.com/search/12c92d622186b0fc8e6d59f2256654ddc97b06e1?sort=score&order=desc&page=1>

2 Parafoil

3 Aerodynamic

شکل ۱۵. تصویر فرایند بالا بردن / پایین آوردن کایت در سینه کشتی (Zhi Yong Tai, 2023)

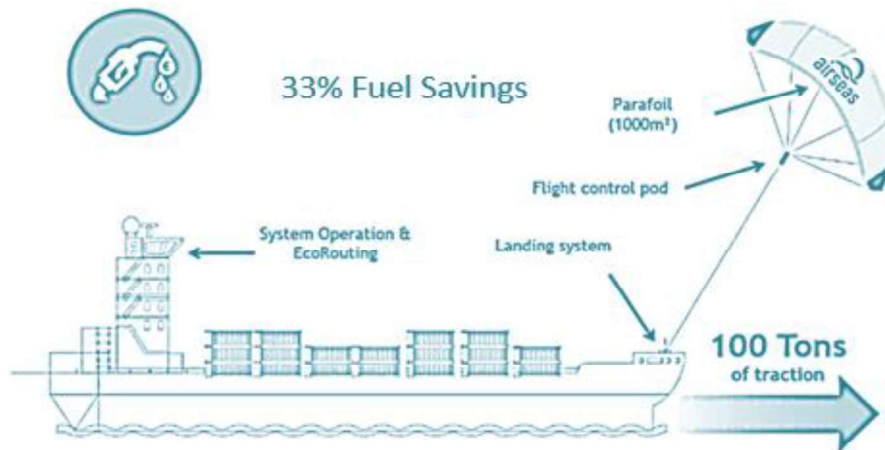


کل فرایند بالا بردن کایت از دکل اصلی در قسمت سینه کشتی و یا جمع کردن کایت و انبار کردن آن، بین ۱۰ تا ۲۰ دقیقه طول خواهد کشید که دیدن منظره باز و جمع نمودن کایت بسیار مهیج و فوق العاده است. کایت دریایی به علت شکل آیرودینامیکی به صورت گسترده توسط ناسا و شرکت Space X برای فرود ایمن فضاپیماها نیز استفاده می شوند<sup>۱</sup>. در ادامه زمانی که کایت به صورت کامل در جلوی سینه کشتی باز شد حرکت آن به صورت هشت انگلیسی خواهد بود، کایت قدرت باد را در ارتفاع مورد نظر جمع آوری کرده و از طریق طناب متصل به کشتی، آن را یدک می کشد.

1 Massimo Ippolito and Partners. Kite wind generator. <http://www.kitewindgenerator.com>

شکل ۱۶. چگونگی تأثیر کایت دریایی بر کاهش ۳۳ درصدی سوخت کشتی

(<https://airseas.com>)



کایت مورد استفاده در این تکنولوژی دارای ایمنی مناسبی است چراکه در آن از پارچه با الیاف مصنوعی استفاده شده که در برابر باد شدید و باران و رطوبت و تابش شدید نور خورشید مقاوم است. همچنین طناب متصل بین کایت کشتی نیز از مواد مصنوعی ساخته شده و ایمنی چندان برابری در مقابل پاره شدگی ناشی از کشش دارد و این طناب نیز مثل پارچه کایت در مقابل رطوبت و گرما و تابش محیطی مقاوم است.

لازم به ذکر است در هنگامی که کایت کشتی را یدک می‌کند، حرکت کشتی را کندتر می‌نماید، این کند شدن با توضیح آن به علم آیرودینامیک به شرح زیر توضیح داده می‌شود که:

برای تولید یک کیلومتر بر ساعت باد، بایستی کشتی و یا هر جسمی با سرعت یک کیلومتر بر ساعت در محیط حرکت نماید که بتواند بادی با سرعت یک کیلومتر تولید کند، حال با توجه به اینکه کشتی‌ها بسته به نوع کالایی که حمل می‌کنند سرعت‌های مختلفی دارند برای اینکه در مصرف سوخت کشتی‌ها کاهش داشته باشند باید از باد پیرامونی با استفاده از فناوری کایت دریایی استفاده نماییم، در ابتدا لازم است اهرم‌های

کنترلی موتور کشتی که میزان سوخت صرفی رو کنترل می کنند را به عقب کشیده و کاهش دهیم و سرعت کشتی (۱۲ نات) که توسط موتور تولیدشده را تقریباً به صفر برسانیم.

حال که سرعت کشتی با توجه به کاهش اهرمها تقریباً صفر شده زمان مناسبی برای به کارگیری و افراشت Sea kite می باشد که بتواند با شرایط جوی مناسبی که در پیرامون کشتی حاکم است از انرژی باد برای سرعت بخشیدن به کشتی با استفاده از فناوری کایت دریایی استفاده نماییم.

این اقدام فرمانده کشتی به جهت عقب کشیدن اهرمهای موتور باعث کاهش سرعت تولیدشده توسط پروانه های کشتی شده و کاهش مصرف سوخت موتور و پیشرانه را در پی خواهد داشت، استفاده از این فناوری در کشتی، سرعت کمتری به نسبت زمانی که از موتور استفاده نموده ایم به کشتی می دهد ولی مزیت آن عدم استفاده از سوخت برای حرکت در دریاست.

این یدک شدن توسط کایت دریایی حرکت کشتی را کند می نماید به نسبت زمانی که از موتور کشتی برای حرکت استفاده شود اما همچنان این استفاده از این فناوری کایت دریایی، ۳۳٪ سوخت مصرف کشتی را کاهش می دهد و می تواند یک روش ساده و کم هزینه در جهت کاهش مصرف سوخت در شرایط جوی مناسب باشد (دهش، ۱۳۹۰). استفاده از کایت های دریایی هیچ گاه نمی تواند جایگزین موتور کشتی باشد چرا که در حین پهلوگیری و یا مانورهای کشتی نیازمند استفاده از توان و موتور کشتی خواهیم بود.

حال با توجه به معادلات به دست آمده و حاکم بر نیروهای وارد بر کایت و دانستن نحوه محاسبه قدرت و کشش آن، در این قسمت ۲ فروند از کشتی های شرکت کشتیرانی جمهوری اسلامی ایران جهت بررسی میزان مصرف سوخت و تأثیرگذاری این کاهش مصرف بر روی هزینه های سوخت مصرفی به صورت تئوری تشریح می گردد:

بررسی کاهش هزینه سوخت کشتی‌ها با استفاده از فناوری کابیت‌دریایی؛ پورشکرریز و سجادی پارسا | ۹۳

جدول ۳. مشخصات دو فروند از کشتی‌های شرکت کشتیرانی ج.ا. ایران

IMO:	922zzz!	IMO:	940zzz!
Name:	Alfa (Panamax)	Name:	Bravo (Handy Max)
Vessel Type- Generic:	Cargo	Vessel Type- Generic:	Cargo
Vessel Type- Detailed:	Bulker	Vessel Type- Detailed:	Bulker
Navigational Status:	Active	Navigational Status:	Active
MMSI:	422zzzz!	MMSI:	422zzzz!
Call Sign:	EPzz!	Call Sign:	EPzz!
Flag:	[IR]	Flag:	[IR]
Gross Tonnage:	+39 k	Gross Tonnage:	+32 k
Summer DWT:	+72 Kt	Summer DWT:	+53 Kt
Length Overall x Breadth Extreme:	225 x 32m	Length Overall x Breadth Extreme:	190 x 32 m
Year Built:	2001	Year Built:	2009
Main Engine	HYUNDAI MAN B&W _ 5S60MC	Main Engine	MAN B&W 6S50 MC-C Mark VII
BHP (KW)	8,945 KW	BHP (KW)	9480 KW
Fuel Oil Daily Consumption:	21.5 mT	Fuel Oil Daily Consumption:	24 mT

با توجه به جدول ۳، میزان آورده نقدی و سوددهی استفاده از این فناوری را به صورت تقریبی محاسبه می‌نماییم:

حداقل و حداکثر میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت دو نمونه شناور مندرج در

جدول فوق بر اساس فرمول زیر بررسی می‌شوند:

میزان مصرف سوخت روزانه کشتی  $x$  حداقل / حداکثر تأثیر بر کاهش هزینه سوخت

(درصد) = میزان صرفه‌جویی روزانه سوخت

شناور کلاس Panamax:

Min (5%):  $21.5 \times 5\% = 1.075 \text{ mT} \times 800 = 860\$ \text{ per Day} \times 30 = \underline{25,800\$ \text{ per Month}}$  (19)

Max (33%):  $21.5 \times 33\% = 7.095 \text{ mT} \times 800 = 5,670\$ \text{ per Day} \times 30 = \underline{170,280\$ \text{ per Month}}$  (20)

\* نتایج فوق نشان می‌دهد که در کمترین میزان (۵ درصد)، در شناور کلاس Panamax، ماهانه 25,800 دلار و در بیشترین حالت (۳۳ درصد) می‌توان تا ماهانه 170,280 دلار صرفه‌جویی در تأمین هزینه سوخت داشت.

#### شناور کلاس Handy Max:

Min (5%):  $24 \times 5\% = 1.2 \text{ mT} \times 800 = 960\$ \text{ per Day} \times 30 = 28,800\$ \text{ per Month}$  (21)

Max (33%):  $24 \times 33\% = 7.92 \text{ mT} \times 800 = 6,336\$ \text{ per Day} \times 30 = 190,080\$ \text{ per Month}$  (22)

\* همچنین برای شناور کلاس Handy Max، در کمترین میزان (۵ درصد)، ماهانه 28,800 دلار و در بیشترین حالت (۳۳ درصد) می‌توان تا ماهانه 190,080 دلار صرفه‌جویی در تأمین هزینه سوخت داشت.

حال با بررسی میدانی در شرکت کشتیرانی ج.ا.ا در خواهیم یافت که میزان سودآوری و صرفه‌جویی ناشی از استفاده از این فناوری علاوه بر کاهش ۲۰ درصدی آلودگی، در میزان سودآوری و کاهش هزینه‌های عملیاتی بسیار مؤثر خواهد بود. در حال حاضر با توجه به رعایت قوانین مارپل و استفاده از سوخت مصرفی با حداقل سولفور، قیمت هر تن این سوخت به صورت میانگین ۷۰۰-۸۰۰ دلار در هر تن می‌باشد.

جدول ۴. درصد صرفه‌جویی کاهش مصرف سوخت کشتی‌های واقعی با استفاده از فناوری کایت

#### دریایی

نام کشتی	ابعاد کایت	نوع کشتی	مسیرها	میزان کاهش مصرف سوخت (درصد)
افروس	۱۶ متر ۲۰ متر	DWT ۶۴۰۰۰ فله بر	نانتونگ به ونکوور	۱۲٫۵٪
Axios	۲۵۴ متر - ۳٫۵ متر	DWT ۸۲۰۰۰ Kamsarmax فله بر	کوزه کامارا به یاراناکوا	۱۲٪
استرادن	۱۸ متر - ۳ متر	کشتی باری DWT ۹۰۰۰	هلند به بریتانیا	۶٫۱٪
تیمبرولف	۳۰ متر ۵ متر	تانکر W ۱۱۰۰۰۰ D	تاجونگ پلباس به عین	۸٫۲٪

نام کشتی	ابعاد کایت	نوع کشتی	مسیرها	میزان کاهش مصرف سوخت (درصد)
			سوختا	
SC رابط	۳۵ متر - ۵ متر	DWT۸۸۴۳ Ro-Ro کشتی	ریسا و یکایه آرهوس	۲۵٪
مایکل	۱۳۳ متر - ۲,۴۴ متر	DWT۳۵۶۰ کشتی بازی	نامشخص	۱۰-۱۵٪

### بحث و نتیجه‌گیری

حمل‌ونقل دریایی در تمامی کشورهای جهان به‌ویژه ایران به جهت تجارت جهانی و داشتن مسیرهای دریایی در شمال و جنوب کشور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. قابل تأکید است که با به‌کارگیری از این تکنولوژی و تکنولوژی مشابه که در کاهش مصرف سوخت کشتی‌ها و آلودگی ناشی از آنها نقش به‌سزایی دارند می‌توان گام‌های مفید و مؤثری در توسعه صنایع دریایی برداشت.

با توجه به کاهش انتشار کربن به‌طور فزاینده‌ای که در خط مقدم افکار بین‌المللی قرار دارد تغییرات در صنعت کشتیرانی قریب‌الوقوع است و سرنوشت آن ایجاد تحول در کل زنجیره صنعت از طراحی کشتی تا عملیات دریایی است. فناوری کایت یک گزینه عالی برای مالکان کشتی برای انطباق با انتقال است. مطالعات متعدد در دانشگاه و صنعت پتانسیل فنی برای صرفه‌جویی در سوخت ناشی از انرژی باد را تعیین کرده‌اند و تأثیر سرعت و جهت باد الگوهای تجاری مناطق جغرافیایی اثرات فصلی و بهینه‌سازی مسیر را بررسی کرده‌اند. نتایج به‌طور مداوم نشان می‌دهد که فناوری کایت دریایی پتانسیل زیادی برای بهبود بهره‌وری انرژی کشتی‌ها صرفه‌جویی در انرژی و کاهش انتشار دارد. این مقاله با تجزیه‌وتحلیل و جمع‌بندی نتایج زیر را به دست می‌آورد. انرژی باد یک منبع انرژی تجدید پذیر و پاک است و باد انرژی است که همیشه وجود دارد، فناوری‌ها و بازارهای استفاده از این انرژی در زمین به‌عنوان یک فناوری کمکی برای بهبود بهره‌وری انرژی کشتی قابل توسعه است.

استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر هدف نهایی حمل‌ونقل دریایی پایدار است در گذشته از انرژی باد (بادبان‌ها) برای حمل‌ونقل مردم و کالاها بر روی اقیانوس‌ها استفاده می‌شد.

فناوری درحال توسعه کایت دریایی ثابت می‌کند که تکنیک‌های قدیمی می‌تواند اثبات‌کننده آینده باشند و نوآوری در صنعت کشتیرانی را تسریع نمایند.

با فناوری جدید کایت دریایی می‌توان ۳۳٪ در مصرف سوخت کشتی‌ها صرفه‌جویی کرد و طبق آخرین دست‌آورد فناوری، کایت دریایی می‌تواند قدرت پیشرانده‌ای بیش از ۲ مگاوات (تقریباً معادل ۱۲۷۰۰ اسب بخار، موتور کشتی) تولید کند و این توان تولیدی از انرژی باد توسط فناوری کایت دریایی معادل صرفه‌جویی ۱۰ تن سوخت در یک روز می‌باشد؛ که با استفاده از فناوری کایت دریایی، علاوه بر کاهش مصرف سوخت و بازگشت سرمایه‌گذاری و کاهش هزینه‌های عملیاتی، هدف مهم دیگری همچون کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را نیز کاهش خواهیم داد.

شاید روزگاری نه‌چندان دور با مقرون‌به‌صرفه بودن و سودآوری تضمین‌شده شاهد بازگشت کشتی‌های تجاری با بادبان‌های افراشته شده ولی هوشمند، به جهت استفاده از انرژی پاک و کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی باشیم. شاید روزگاری کشتی‌های بادبانی هوشمند در حمل‌ونقل دریایی نقش مهم ایفا نمایند.

## منابع

۱. ساداتی ساروئی، سید کاظم- داهیم، آنالی- زراعتگر، حمید (۱۳۹۷) مروری بر روش‌های نوین کاهش مصرف سوخت در کشتی‌ها. دانشگاه صنعتی امیرکبیر ۲۲-۳۱.
۲. کیان ارثی، سیروس- نیکویی فر، مجید (۱۳۹۵). بررسی روش‌های کاهش مصرف سوخت و انرژی در کشتی‌ها و اولویت‌بندی روش‌های کاهش مصرف انرژی جهت ناوگان شرکت ملی نفت کش ایران. سمینار پتروشیمی و انرژی (۸۳)، ۱۸۹-۱۹۵.
۳. دهش، سعید- سایبانی، مصباح- غیائی، محمود (۱۳۹۰)، استفاده از کایت و تأثیر آن بر کاهش مصرف سوخت و آلودگی زیست‌محیطی در کشتی‌ها و تحلیل دینامیکی حرکت کایت.
۴. یونلونگ وانگو همکاران (۲۰۲۲). تحلیل توسعه فناوری نیروی محرکه کشتی با کمک باد و کمک به کاهش انتشار.

## References

1. Zhi Yong Tai 1, Dimitrios Konovisis (2023), *Sustainable energy propulsion systems for maritime transport to achieve the United Nations Sustainable Development Goals: a review*
2. Energy Efficiency White Paper, The Ship Operation Cooperative Program, INC Woodville, (2016). Washington, June 2016.
3. John Carlton, Dejan Radosavljevic, (2009). Stewart Whitworth; Rudder-Propeller- Hull Interaction: The Results of Some Recent Research, In-Service Problems and Their Solutions; First International Symposium on Marine Propulsors smp'09, Trondheim, Norway, June 2009.
4. J. Kim, C. Park; (2009). Wind power generation with a par awing on ships, a proposal; Energy journal of Elsevier.
5. Second IMO GHG Study (2009), *International Maritime Organization*.
6. Regulation (EU) (2015/757), *European Parliament and the Council of the European Union*, 29 April 2015.
7. Renewable Energy Options for Shipping, Technology Brief, (2015). *IRENA* (international renewable energy agency), January 2015.
8. The Energy Efficiency Design index (EEDI) for new Ships, (2011). Policy Update No. 15 of the International Council on Clean Transportation, 3 October 2011.
9. Second IMO (International Maritime Organization) GHG Study (2009); *International Maritime Organization*, London, UK
10. Guidance On Treatment Of Innovative Energy Efficiency Technologies For Calculation And Verification Of The Attained Eedi And Eexi,

2021

11. <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/kitedrag.html>
12. J.C.M Breuer & R.H. Cuchsinger, (2010). "in flat-able kites", Aerospace Science Tech, 24 April 2010.
13. Massimo Ippolito and Partners. Kite wind generator. <http://www.kitewindgenerator.com>.
14. Sidhartha, J. (2012). kite Technology (Pull Shipping to Greener Future)
15. <https://turkdeniz.com/images/news/dunyanin-en-buyuk-yelkenli-gemisi-tanitildi.jpg>
16. <https://airseas.com/>
17. [https://content.maltatoday.com.mt/ui/images/photos/ship\\_climate\\_change.png](https://content.maltatoday.com.mt/ui/images/photos/ship_climate_change.png)
18. <https://tineye.com/search/12c92d622186b0fc8e6d59f2256654ddc97b06e1?sort=score&order=desc&page=1>

**استناد به این مقاله:** پورشکرریز، کاوه، سجادی پارسا، سیدجعفر. (۱۴۰۲). بررسی کاهش هزینه سوخت کشتی‌ها با استفاده از فناوری کایت‌دریایی، فصلنامه خدمات دریایی و بندری، ۱ (۲)، ۵۹-۹۸.



Marine and Port Servicesch Journalis licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International License.