مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISSN: 1605-9719
سال ۲۶، شماره ۱۱۷، صفحات ۲۲-۳۱

مروری بر روش‌های نوین کاهش مصرف سوخت در کشتی‌ها

سید کاظم ساداتی ساروئی[۱ و *]، آنالی داهیم[۲]، حمید زراعتگر[۳]

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران)
[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی انرژی معماری، دانشگاه غیر انتفاعی پارس
[۳] دانشیار مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیر کبیر
*مسئول مکاتبات: s.kazemsadati@aut.ac.ir

◄ چکیده

با توجه به اهمیت کاهش جهانی مصرف انرژی در سال‌های اخیر، این مسأله در مورد کشتی‌ها نیز مطرح شده است. امروزه تلاش برای کاهش مصرف سوخت، جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های جوی و همچنین هماهنگ شدن با قوانین جدید از جمله اهداف بزرگ پیش روی صنعت کشتیرانی جهان است. هدف از ارائه 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 مقاومت و مصرف سوخت مؤثر است اما تنها راه حل، کاهش مقاومت شناور نیست. در این راستا تلاشها و تحقیقات زیادی صورت گرفته است که استفاده از انرژیهای جدید، استفاده از تجهیزات و ملحقات کاهش مصرف انرژی و استفاده از فناوری‌های نوین در عملکرد موتور و ماشین آلات از این جمله می‌باشند. در نهایت مدیریت صحیح انرژی در کشتی، انتخاب مسیر دریانوردی با توجه به وضع آب و هوا و اتوماسیون می‌تواند در کاهش مصرف سوخت تأثیر قابل ملاحظه‌ای داشته باشد.

◄ واژگان کلیدی

کاهش مصرف سوخت کشتی
انرژی‌های جدید
تجهیزات کاهش مصرف انرژی
استفاده از فناوری‌های نوین
مدیریت صحیح انرژی در کشتی

◄ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۷/۱۸
تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۴/۱۱

۱ مقدمه

کشتی‌ها برای حمل کالاها در همه ابعاد در سرتاسر جهان بهترین وسیله می‌باشند. کشتیرانی بین المللی با وجود آنکه بخش قابل توجهی از تجارت جهانی را جابجا می‌کند اما از نظر مصرف انرژی و میزان آلودگی محیط زیست نسبت به سایر روش‌های حمل و نقل بهترین انتخاب است. اما با توجه به رویکرد جهانی در زمینه کاهش انتشار آلاینده‌ها و بهبود بازدهی انرژی، لحاظ موارد یاد شده در حمل و نقل دریایی در کنار ادامه رشد این صنعت در بازارهای جهانی باید مدنظر قرار گیرد.

سازمان بین المللی دریایی (IMO) به عنوان آژانس تخصصی سازمان ملل متحد و تهیه کننده مقررات بین المللی کشتیرانی در کلیه زمینه‌ها دارای نقش کلیدی در اطمینان بخشی به جامعه جهانی در خصوص عدم آلودگی محیط زیست توسط کشتی‌ها می‌باشد. در اواخر دهه هشتاد میلادی IMO فعالیت در زمینه کاهش آلودگی هوا توسط کشتی‌ها را آغاز نمود و حاصل آن تصویب ضمیمه شش مارپل و اجباری شدن آن از سال ۲۰۰۵ میلادی می‌باشد [۱].

از آن زمان با توجه به افزایش اهمیت میزان انتشار آلاینده‌ها در صنعت حمل و نقل دریایی و مقررات سختگیرانه‌تر IMO و هزینه بالای سوخت کشتی‌ها، مالکان کشتی به دنبال روش‌های کاهش مصرف سوخت می‌باشند؛ زیرا با کاهش مصرف سوخت علاوه بر کاهش انتشار آلاینده‌ها در هوا، در هزینه‌ها نیز صرفه جویی می‌گردد [۲، ۳].

به منظور ارزیابی وضعیت مصرف انرژی در کشتی‌ها و تدوین روش‌های کاهش مصرف انرژی در کشتی باید عملکرد شناور از لحاظ مصرف سوخت و برق و همچنین میزان اتلاف انرژی در ماشین آلات، سیستم‌های تهویه، گرمایش و سرمایش مورد مطالعه قرار گیرد. بدین منظور پس از مطالعه مدارک و مستندات کشتی باید از شناور بازدید و آزمایشاتی بر روی آن انجام شود. با به دست آوردن اطلاعات وضعیت موجود شناور می‌توان در مورد بهینه‌سازی مصرف انرژی در کشتی اقدام کرد [۴].

جهت بهینه سازی مصرف سوخت در کشتی‌ها در سال‌های اخیر تحقیقات و پروژه‌هایی در سراسر جهان انجام گرفته است. در سال ۲۰۰۹ جان کارلتون[1] و همکارانش با در نظر گرفتن هندسه‌های مختلف برای سکان و بررسی جریان و اندکنش بین سکان، پروانه و بدنه کشتی به هندسه بهینه سکان جهت کاهش مصرف سوخت دست یافته‌اند [۵]. در سال ۲۰۰۹ تحقیقات کیم[2] و همکارش پارک[3] با طراحی چتری جهت استفاده از انرژی باد به تولید نیرو منجر شد [۶]. کالیا[4] و همکارانش در سال ۲۰۱۵ با ارائه مدل[5] SIM و بهبود عملکرد سیستم رانش و موتور باعث کاهش تولید دی‌اکسید کربن در موتورهای کشتی شده‌اند.

با توجه به اهمیت بیان شده جهت کاهش مصرف انرژی در کشتی‌ها در این مقاله راهکارهای کاهش مصرف انرژی در کشتی‌ها به طور مفصل تشریح شده‌اند. لازم به ذکر است این مقاله مروری کامل بر کارهای دیگر محققان در این زمینه می‌باشد که چند مورد از آنها در پاراگراف قبلی بیان شد. راه کارهای ارائه شده جهت کاهش مصرف انرژی را می‌توان به ۵ دسته کلی تقسیم کرد:

۱. بهینه‌سازی فرم بدنه

[1] John Carlton [2] J. Kim [3] C. Park [4] J. Calleya [5] Ship Impact Model

۲. ابزارهای صرفه‌جویی در انرژی
۳. بهینه‌سازی سازه و ساخت سازه‌های سبک
۴. بکارگیری فناوری‌های نوین در ماشین آلات
۵. بهره‌وری سوخت کشتی‌های در حال کار.

برای هر کدام از راه‌کارهای پیشنهادی برای کاهش مصرف سوخت زیربخش‌هایی در بدنه اصلی مقاله آورده شده است. جهت مطالعه و بررسی زیربخش‌های مربوط به هر راه‌کار برای درک و مقایسه بهتر، توضیحات مربوط به هر کدام در جداولی بیان شده‌اند. هر راهکار از لحاظ

۱. میزان صرفه‌جویی
۲. قابلیت استفاده در کدام نوع از کشتی‌ها
۳. قابلیت استفاده در کشتی‌های جدید و یا موجود و
۴. هزینه مورد مطالعه قرار خواهند گرفت.

۲ بهینه‌سازی فرم بدنه [۷، ۸]

بهینه‌سازی فرم بدنه بعنوان ابزاری جهت افزایش بهره‌وری سوخت کشتی‌ها، هر روز بیشتر در جامعه دریایی به رسمیت شناخته می‌شود. هنگام ارزیابی بهینه‌سازی فرم بدنه، مالک کشتی می‌تواند سه گزینه زیر را مدنظر قرار دهد:

۱. استاندارد موجود برای فرم بدنه و سیستم رانش که توسط کارخانه کشتی‌سازی پیشنهاد شده را بپذیرد.
۲. در فرم‌های بدنه موجود به نحوی مناسب، با توجه به نیازهای عملیاتی خود تغییر ایجاد کند.
۳. طرح جدیدی ایجاد کند.

گزینه یک که انتخاب طرح استاندارد پیشنهاد شده توسط کارخانه‌ی کشتی‌سازی است، اغلب موجب صرفه‌جویی در هزینه ساخت شناور می‌شود. لازم به ذکر است که در بسیاری طرح‌های پیشنهاد شده توسط کارخانه کشتی سازی، فرم بدنه و سیستم رانش بهینه‌سازی شده‌اند.

عملکرد هیدرودینامیکی و سرعت کشتی با تغییر آبخور کشتی به میزان قابل توجهی تغییر خواهد کرد، با این وجود امکان دارد این شرایط عملیاتی در استانداردهای مربوط به فرم بدنه اصلا مورد توجه قرار نگیرد. در این شرایط با انتخاب گزینه دوم، بهینه‌سازی طرح برای شرایط خدماتی خاص (برای مثال، تعدادی از ترکیبات مختلف و محتمل عملیاتی برای آبخور، تریم و سرعت و طول مدت سرویس‌های آنها) امکانپذیر خواهد بود. فرآیند بهینه‌سازی معمولاً شامل اصلاح و تغییر طرح قسمت جلوی بدنه کشتی می‌شود و می‌تواند شامل شکل پاشنه نیز باشد، بخصوص هنگامی‌که میزان غوطه‌وری در آب به دلیل بار سنگین، بیش از حد باشد.

گزینه سوم امکان بهینه‌سازی ویژگی‌های بدنه کشتی، پروانه و سیستم مولد نیرو را بطور همزمان میسر می‌سازد، اما موجب افزایش هزینه ساخت شناور نیز خواهد شد. در هر صورت، گزینه سوم فقط هنگامی قابل توجیه است که

۱. پای سفارش مجموعه‌های بسیار بزرگ در میان باشد
۲. کارخانه کشتی‌سازی مورد نظر طرح استاندارد قابل قبولی پیشنهاد نداده باشد
۳. جبران هزینه از طریق کاهش هزینه‌های عملیاتی منطقی باشد
۴. کشتی برای ارایه سرویس‌های ویژه نیازمند ویژگی‌های منحصر بفرد باشد.

در این بخش معیارهایی برای ارزیابی بهره‌وری ارائه شده و روش‌های موجود برای معماری کشتی‌سازی امروز و بهینه‌سازی شکل بدنه و پروانه شرح داده شده است.

در ضمن نکاتی هم که مالکان باید به منظور افزایش بهره‌وری سوخت در هنگام ارزیابی فرم بدنه مدنظر قرار دهند به طور اجمالی ذکر شده است. محتوای این بخش که شامل بهینه‌سازی ویژگی‌های کشتی می‌باشد از قرار ذیل است:

- بهینه سازی اندازه و ظرفیت کشتی
- بهینه سازی سرعت سرویس
- بهینه سازی سرعت سرویس
- بهینه‌سازی مقاومت بدنه و افزایش بهره‌وری سیستم پیشرانه

۱.۲ بهینه سازی اندازه و ظرفیت کشتی

جدول ۱: بهینه سازی اندازه و ظرفیت کشتی

میزان صرفه‌جویی	در کشتی‌های کانتینربر افزایش اندازه از ۴۵۰۰ به ۸۰۰۰ TEU تقریبا موجب ۲۵ درصد کاهش در مصرف سوخت می‌گردد (که برحسب مصرف سوخت به ازای هر تن_ مایل دریایی که بار حمل می‌شود محاسبه می‌گردد). افزایش اندازه از ۸۰۰۰ به ۱۲۵۰۰ TEU تقریبا موجب ۱۰ درصد کاهش در مصرف سوخت خواهد شد.
نوع کشتی	در همه نوع کشتی‌ها این روش در کاهش مصرف انرژی تاثیر گذار است. بیشترین صرفه جویی‌ها برای کشتی‌های سریعالسیر و قابل توجه‌ترین صرفه جویی‌ها برای شناورهای کوچکتر اتفاق می‌افتد.
کشتی‌های جدید/ موجود	همه کشتی‌ها
هزینه	افزایش اندازه کشتی از ۴۵۰۰ به ۸۰۰۰ TEU تقریبا موجب ۱۵ درصد کاهش در هزینه ساخت خواهد شد(این هزینه برحسب دلار آمریکا برای هر TEU محاسبه می‌شود).

در جدول ۱ و بقیه جدول‌ها که در ادامه آورده شده است، منظور از کشتی‌های جدید، کشتی‌هایی هستند که قرار است ساخته شوند و یا در حال ساخت می‌باشند و منظور از کشتی‌های موجود، کشتی‌هایی هستند که هم اکنون در حال عملیات و ارائه خدمات می‌باشند.

۲.۲ بهینه سازی سرعت سرویس

جدول ۲: بهینه سازی سرعت سرویس

میزان صرفه‌جویی	در کشتی‌های کانتینربر ۴۵۰۰ TEU و بزرگتر، یک گروه دریایی کاهش سرعت موجب کاهش ۱۲ تا ۱۵ درصدی مصرف سوخت شناور خواهد شد. در نفتکش‌ها با کاهش یک گره دریایی از سرعت، مصرف سوخت حدود ۱۷ تا ۲۲ درصد کاهش می‌یابد.

نوع کشتی	همه انواع
کشتی‌های جدید/ موجود	همه کشتی‌ها
هزینه	اگر موتورهای کوچکتر برای رسیدن به سرعت مد نظر انتخاب شوند، تا حدودی در هزینه ساخت صرفه‌جویی خواهد شد.

۳.۲ بهینه سازی ابعاد اصلی

جدول ۳: بهینه سازی ابعاد اصلی

میزان صرفه‌جویی	افزایش نسبت طول/ عرض کشتی و یا افزایش طول و کاهش ضریب بلوک‌بندی می‌تواند موجب کاهش ۳ تا ۵ درصدی مصرف سوخت شناور گردد.
نوع کشتی	همه انواع
کشتی‌های جدید/ موجود	کشتی‌های جدید
هزینه	در مقایسه با عرض یا عمق کشتی، طول کشتی بعد گران قیمت‌تری محسوب می‌شود. برای مثال، هنگامی که در یک نفتکش افراماکس طول/ عرض از ۵/۵ به ۵/۷ افزایش می‌یابد و سرعت و حجم بار ثابت نگاه داشته می‌شود، هزینه ساخت حدود ۱ درصد افزایش می‌یابد.

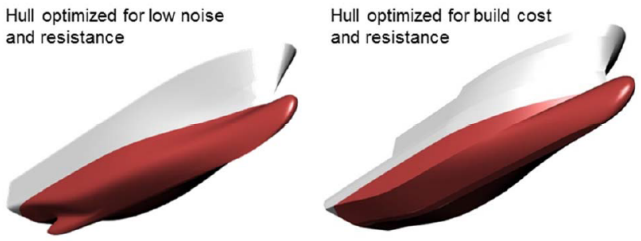
۴.۲ بهینه‌سازی مقاومت بدنه و افزایش بهره‌وری سیستم رانش

جدول ۴: بهینه‌سازی مقاومت بدنه و افزایش بهره‌وری سیستم رانش

میزان صرفه‌جویی	پیش‌بینی می‌شود با بهینه‌سازی بیشتر فرم بدنه و پروانه‌ها، مصرف سوخت سیستم رانش بین ۵ تا ۸ در صد کاهش خواهد یافت.
نوع کشتی	همه انواع
کشتی‌های جدید/ موجود	کشتی‌های جدید
هزینه	تست مدل مولتی پاس برای بررسی عملکرد شناور جهت بهینه سازی مقاومت و سیستم رانش شناور برای هر نوع شناور بین ۲۰۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰۰ دلار هزینه خواهد داشت

در اشکال ۱ و ۲ نمونه کارهای انجام شده در راستای بهینه سازی فرم بدنه ارائه شده است. در شکل ۱ سمت راست فرمی از بدنه نشان داد شده است که باعث کاهش مقاومت و هزینه ساخت و در شکل ۱ سمت چپ فرمی از بدنه نشان داده شده است که باعث کاهش مقاومت و نویز نسبت به فرم اولیه بدنه می‌شود.

در شکل ۲ باز طراحی دماغه شناور نشان داده شده است که این باز طراحی باعث کاهش مقاومت موج سازی می‌شود. در شکل ۲ تصویر سمت راست، نشان دهنده تغییر فرم در دماغه کشتی می‌باشد.



شکل ۱: هندسه‌های متفاوت بدنه سمت چپ(برای کاهش مقاومت و نویز)و سمت راست(برای کاهش مقاومت و هزینه ساخت) [۷]

شکل ۲: باز طراحی در دماغه شناور جهت کاهش مقاومت موج‌سازی(تصویر راست بعد از باز طراحی می‌باشد) [۸]

۳ ابزارهای صرفه‌جویی در انرژی [۷، ۸]

تاکنون با استفاده از پدیده‌های فیزیکی که معمولاً در فرآیند طراحی نرمال یا عوامل ثانویه شناخته می‌شوند یا هنوز کاملا شناخته نشده‌اند، ابزارهای بسیار مختلفی جهت اصلاح عملکرد انرژی کشتی‌ها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این بخش انواع ابزارها که بیشترشان تا امروز، روی بهبود عملکرد پروانه متمرکز هستند، مورد مطالعه قرار گرفته است.

با این وجود، لازم بذکر است که توسعه‌ها و پیشرفت‌های اخیر به ساخت مجموعه ابزارهایی منجر شده است که موجب کاهش مقاومت اصطکاکی بدنه یا بهره‌برداری از منابع طبیعی موجود از قبیل انرژی خورشید و باد خواهند شد. محتوای این بخش از قرار ذیل می‌باشد:

- دستگاه‌های بهبود نیروی محرکه (PID)
- ابزارهای ویژه متحده‌الشکل ساختن خط دنباله کشتی و کاهنده جدایی جریان
- ابزارهای پیش از چرخش (Pre-Swirl-Devices)
- ابزارهای پس از چرخش (Past-Swirl-Devices)
- پروانه‌های پر بازده
- کاهش اصطحکاک پوسته
- روانکاری هوایی
- تهیه بافت ویژه برای سطح بدنه
- انرژی‌های تجدید پذیر بادی، خورشیدی و موج

همه این ابزارها برای کاهش مصرف سوخت سیستم رانش در نظر گرفته شده‌اند. فناوری‌های PID و کاهش اصطکاک پوسته با کاهش مقاومت بدنه و یا افزایش راندمان سیستم رانش موجب کاهش مصرف سوخت می‌شود.

منابع انرژی تجدیدپذیر جایگزین بخشی از سوخت خریداری شده می‌شود.

بسیاری از این ابزارها از سازگاری متقابل برخوردار نیستند یا برای همه انواع کشتی‌ها کاربرد ندارند. بعضی از ابزارهای مورد بحث در این بخش در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر قرار می‌گیرند و با توجه به وضعیت فعلی علم و فناوری هنوز قابل اجرا و استفاده نیستند. این ابزارها برای ایفای نقش مهم و عمده در صنایع به شدت در حال نبرد هستند، چرا که هزینه کاربرد آنها بسیار بالاست و یکپارچه‌سازی و ادغام این ابزارهای صرفه‌جویی در مصرف انرژی با طرح و عملیات کشتی‌ها کار دشواری است. در اغلب موارد این مسائل موجب عدم بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر در کشتی‌ها می‌شود، بخصوص هنگامی که ریسک اقتصادی استفاده از آنها از لحاظ کمی قابل تعیین نباشد (این مشکلی است که برای بیشتر فناوری‌های جدید وجود دارد).

۱.۳ ابزارهای ویژه متحده‌الشکل ساختن خط دنباله کشتی و کاهش مقاومت جریان‌ها

جدول ۵: ابزارهای ویژه متحده‌الشکل ساختن خط دنباله کشتی و کاهش مقاومت جریان‌ها

میزان صرفه‌جویی	باعث ۰ تا ۵ درصد کاهش در مصرف سوخت سیستم رانش می‌شود.
قابلیت اجراء	بسیار مناسب برای مشکلات هیدرودینامیکی موجود شناخته شده
نوع کشتی	همه کشتی‌های متوسط و کم سرعت
کشتی‌های جدید/ موجود	کشتی‌های جدید و بروز رسانی شده
هزینه	بسته به نوع ابزار، هزینه اندک تا متوسط می‌باشد.

در شکل ۳ یکی از ابزارهایی که برای متحده‌الشکل ساختن خط دنباله کشتی و کاهش مقاومت جریان‌ها در کشتی استفاده می‌شود، ارائه شده است. شکل ۳ فین‌های تراست را که روی سکان در امتداد جریان خروجی از پروانه نصب می‌شوند، نشان می‌دهد. این ابزار باعث افزایش راندمان سیستم رانش و در نتیجه کاهش مصرف سوخت خواهد شد.

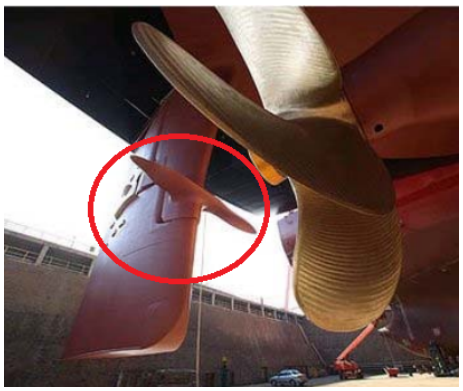
۲.۳ ابزارهای پیش از چرخش

جدول ۶: ابزارهای پیش از چرخش

میزان صرفه‌جویی	باعث ۲ تا ۶ درصد کاهش در مصرف سوخت سیستم رانش می‌شود.
قابلیت اجراء	باید هماهنگ با پروانه و همه ابزارهای پس از چرخش مربوطه طراحی شود.
نوع کشتی	همه انواع
کشتی‌های جدید/ موجود	کشتی‌های جدید و بروز رسانی شده
هزینه	بسته به نوع ابزار، هزینه کم تا متوسط می‌باشد.

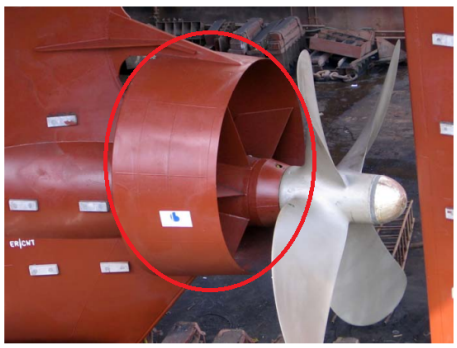
در شکل ۴ یکی از ابزارهایی که جهت افزایش راندمان سیستم رانش و کاهش مصرف سوخت پیش از پروانه استفاده می‌شود، نشان داده شده است. در این تصویر استاتور ثابت به نمایش در آمده است که باعث چرخش جریان سیال در خلاف جهت گام‌های پروانه قبل از ورود به پروانه می‌شود. در نتیجه ترکیب این ابزار با پروانه، پروانه نیروی تراست بیشتری در دور و گشتاور برابر نسبت به عدم وجود استاتور تولید خواهد کرد.

در شکل ۵ ترکیب داکت و استاتور به نمایش درآمده است که قبل از پروانه نصب می‌شود و باعث افزایش کاکرد سیستم رانش می‌شود.



شکل ۳: فین‌های تراست نصب شده روی سکان [۷]

شکل ۴: نصب استاتور ثابت با گام‌های مخالف گام پروانه بین پروانه و شناور [۸]



شکل ۵: نصب ترکیب استاتور و داکت بین پروانه و بدنه [۸]

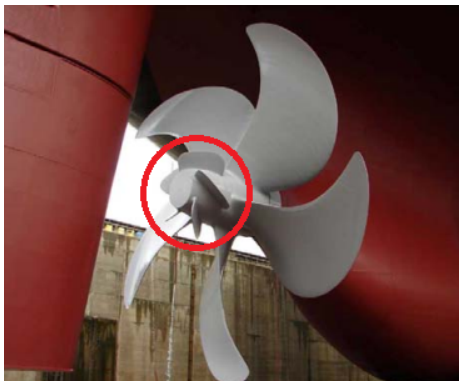
۳.۳ ابزارهای پس از چرخش

جدول ۷: ابزارهای پس از چرخش

میزان صرفه‌جویی	باعث ۲ تا ۶ درصد کاهش در مصرف سوخت سیستم رانش می‌شود.
قابلیت اجراء	باید هماهنگ با پروانه و ابزارهای پیش از چرخش مربوطه طراحی شود.
نوع کشتی	همه انواع

کشتی‌های جدید/ موجود	کشتی‌های جدید و بروز رسانی شده
هزینه	بسته به نوع ابزار، هزینه اندک تا متوسط می‌باشد.

در شکل ۶ نمونه‌ای از ابزارهای پس از پروانه نشان داده شده است. این ابزار Propeller Boss Cap Fin نام دارد که محصول شرکت کشتی سازی هیوندای می‌باشد این ابزار باعث افزایش چرخش جریان در قسمت هاب پروانه می‌شود، در نتیجه پروانه نیروی تراست بیشتری تولید خواهد کرد.



شکل ۶: نصب Propeller Boss Cap Fin پشت پروانه [۷]

۴.۳ پروانه‌های پربازده

جدول ۸: پروانه‌های پربازده

میزان صرفه‌جویی	باعث ۳ تا ۱۰ درصد کاهش در مصرف سوخت شناور می‌شود.
قابلیت اجراء	باید مطابق با ویژگی‌های هیدرودینامیک پاشنه و پروفایل عملیاتی کشتی طراحی شود.
نوع کشتی	همه انواع
کشتی‌های جدید/ موجود	کشتی‌های جدید و بروز رسانی شده
هزینه	بسته به نوع پروانه، هزینه اندک تا متوسط می‌باشد.

در شکل ۷ پروانه Contra-Rotating نشان داده شده است که از جمله فناوری‌های پرکاربرد در افزایش راندمان پروانه و سیستم رانش در شناورهای جدید می‌باشد.

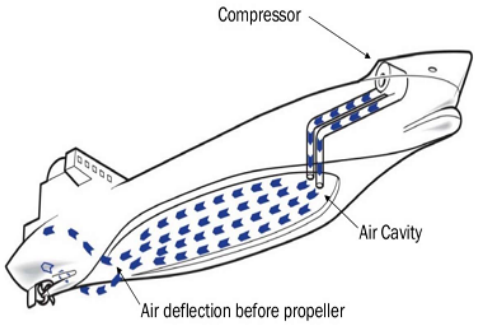
۵.۳ روانکاری هوایی

جدول ۹: روانکاری هوایی

میزان صرفه‌جویی	بیش از ۱۰ درصد کاهش در مصرف سوخت سیستم رانش
قابلیت اجراء	این فناوری هنوز به تایید نرسیده و برای استفاده تجاری تحت مطالعه و پژوهش قرار دارد.
نوع کشتی	در اصل، برای همه انواع کشتی‌ها، اما در عمل هنوز اطلاعات بسیار ناچیزی درباره قابلیت اجرای آن وجود دارد.
کشتی‌های جدید/ موجود	عموما فقط برای کشتی‌های جدید کاربرد دارد. برای کشتی‌های بروز رسانی شده نیز امکانپذیر است، اما می‌تواند بسیار پرهزینه باشد.
هزینه	متوسط تا زیاد، هزینه نت نامشخص است.

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با تزریق هوا روی سطح شناور می‌توان باعث کاهش مقاومت اصطکاکی شد، در نتیجه انرژی کمتر و سوخت کمتری برای رانش کشتی در سرعت سرویس برابر استفاده خواهد شد.

شکل ۷: پروانه Contra-rotating [۷]



شکل ۸: تزریق هوا در کف شناور برای کاهش مقاومت اصطکاکی Contra-rotating [۷]

۶.۳ بافت سطح بدنه

جدول ۱۰: بافت سطح بدنه

میزان صرفه‌جویی	نامشخص. احتمالاً باعث بیش از ۵ تا ۱۰ درصد صرفه‌جویی در مصرف سوخت شناور نخواهد شد.
قابلیت اجراء	این فناوری هنوز ناشناخته است (تحت مطالعه قرار دارد)
نوع کشتی	در اصل، برای همه کشتی‌ها اما عملا هنوز مشخص نیست.
کشتی‌های جدید/ موجود	کشتی‌های جدید و بروز رسانی شده
هزینه	پیش‌بینی می‌شود هزینه این فناوری اندک تا متوسط باشد.

۷.۳ انرژی باد [۹]

جدول ۱۱: انرژی باد

میزان صرفه‌جویی	موجب می‌شود مصرف سوخت سیستم رانش بیش از ۳۰ درصد کاهش یابد، اما عملکرد کلی به شدت تحت تاثیر پروفایل عملیاتی کشتی قرار دارد.
قابلیت اجراء	این فناوری به سر حدکمال رسیده است. قابلیت اجرای آن به روساخت‌ها و پروفایل‌های عملیاتی کشتی محدود می‌شود.

نوع کشتی	برای همه انواع کشتی‌های کم سرعت. آرایش و کاربری عرشه می‌تواند کاربرد واقعی بعضی از ابزارها را به شدت محدود سازد.
کشتی‌های جدید/ موجود	کشتی‌های جدید و بروز رسانی شده
هزینه	متوسط

در شکل ۹ شناوری نشان داده شده است که از انرژی باد علاوه بر سوخت فسیلی جهت تامین انرژی استفاده شده است. در داخل استوانه‌هایی که عمود بر شناور در شکل ۹ نشان داد شده‌اند، روتورهایی قرار گرفته‌اند که در اثر برخورد باد با آنها به چرخش در می‌آیند و باعث تولید انرژی می‌شوند. همانطور که در مشخصات انرژی باد در جدول ۱۱ بیان شده است، می‌توان در مناطق دریایی بادخیز تا ۳۰ درصر مصرف انرژی ناشی از سوخت فسیلی را کاهش داد.

۸.۳ انرژی خورشیدی [۹]

جدول ۱۲: انرژی خورشیدی

میزان صرفه‌جویی	کاهش مصرف سوخت نهایی
قابلیت اجراء	این فناوری به حد کمال رسیده، اما قابلیت اجرای آن بسیار محدود است.
نوع کشتی	همه انواع
کشتی‌های جدید/ موجود	متوسط
هزینه	متوسط

شکل ۱۰ شناوری را نشان می‌دهد که با بکارگیری صفحات خورشیدی روی عرشه با جذب انرژی ناشی از خورشید باعث کاهش مصرف انرژی می‌شود.

۹.۳ انرژی موج [۹]

جدول ۱۳: انرژی موج

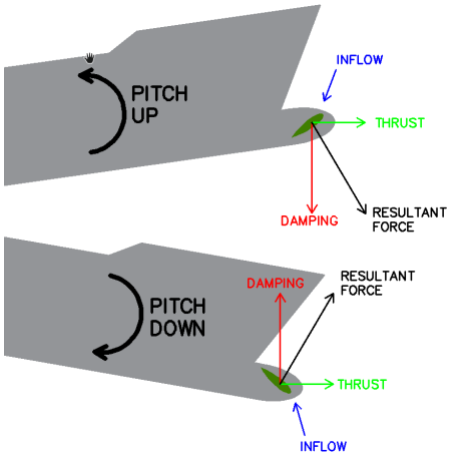
میزان صرفه‌جویی	کاهش مصرف سوخت نهایی
قابلیت اجراء	این فناوری هنوز در مرحله تحقیق و توسعه می‌باشد.
نوع کشتی	همه انواع
کشتی‌های جدید/ موجود	کشتی‌های جدید و بروز رسانی شده
هزینه	نامعلوم می باشد.

از جمله راهکارهایی که مرز دانش نیز تلقی می‌شود، استفاده از انرژی موج جهت کاهش مصرف سوخت در کشتی می‌باشد. همانطور که که در شکل ۱۱ نشان داده شده است در این ایده از هیدروفویل‌های سه بعدی زیر سینه شناور استفاده می‌شود. در اثر حرکت پیچ شناور حین عبور از امواج در هیدروفویل نیروی لیفت شکل می‌گیرد. مولفه این نیرو در جهت نیروی تراست باعث کاهش مصرف سوخت در سرعت سرویس مشخص می‌شود. این موضوع در شکل ۱۲ به خوبی نشان داده شده است.

شکل ۹: استفاده از Flettner Rotors برای بهرگیری از انرژی باد [۸]

شکل ۱۰: استفاده از انرژی خورشیدی برای تولید انرژی [۸]

شکل ۱۱: استفاده از هیدروفویل‌در زیر سینه شناور جهت بهره‌گیری از انرژی موج [۸]



شکل ۱۲: نمایش چگونگی استفاده از انرژی موج [۸]

۴ بهینه‌سازی سازه و ساخت سازه‌های سبک [۷، ۸]

کاهش وزن سازه تاثیر بسزایی روی نیروی مورد نیاز برای شناورهای کوچک‌تر و سریع‌تر دارند. بهینه‌سازی وزن سازه برای شناورهای باری بزرگ از طریق جانشین‌سازی بدنه‌ها و سازه‌های سبک موجب افزایش تناژ بارگیری کشتی می‌شود و در نتیجه موجب افزایش راندمان حمل و نقل می‌گردد. در قایق‌های سریع‌السیر، کاهش وزن شناور از طریق استفاده از مواد غیرآهنی برای دستیابی به اهداف مورد نظر ضروری است و می‌تواند تاثیر بسزایی روی مصرف سوخت داشته باشد.

در این بخش فعالیت‌های جاری در زمینه استفاده از مواد مستحکم‌تر در کشتی‌های باری و آن اندازه از کاهش وزن شناور که موجب بهینه‌سازی مصرف سوخت می‌شود، مورد بحث قرار گرفته است. استفاده از فولاد مستحکم‌تر (HTS) در نفتکش‌ها شناورهای فله‌بر و کشتی‌های کانتینربر، صرفه جویی‌های وزنی ناشی از استفاده از فولاد مستحکم‌تر (HTS)، تاثیر احتمالی استفاده از HTS روی ظرفیت باربری، تاثیر احتمالی استفاده از HTS روی مصرف سوخت و تاثیر استفاده از کامپوزیت و سایر مواد غیرآهنی از جمله مباحث قابل بررسی در این راستا می‌باشد. استفاده صحیح از فولاد مستحکم‌تر (HTS) ابزاری مناسب و موثر برای کاهش وزن و هزینه است. اگر ضریب بلوک‌بندی و استفاده از فولاد مستحکم‌تر درست تنظیم شود، کاهش میزان مصرف سوخت مشهود خواهد بود. در شناورهایی که از تناژ بارگیری محدودی برخوردارند(مانند تانکرها و شناورهای فله‌بر) اگر ضریب بلوک‌بندی ثابت نگه داشته شود، تناژ بارگیری افزایش خواهد یافت.

۱.۴ استفاده از فولاد مستحکم‌تر (HTS)

جدول ۱۴: استفاده از فولاد مستحکم‌تر (HTS)

میزان صرفه‌جویی	ده درصد HTS بیشتر می‌تواند وزن فولادی را ۱/۵ تا ۲ درصد کاهش دهد. برای کشتی‌هایی که از لحاظ تناژ بارگیری با محدودیت مواجه هستند، ۰/۲ تا ۰/۳ درصد افزایش در تناژ بارگیری و بار مفید کشتی قابل تحقق است. به همین ترتیب، مصرف سوخت به ازای هر تن بار نیز ۰/۲ تا ۰/۵ درصد کاهش خواهد یافت.
نوع کشتی	همه انواع
کشتی‌های جدید/ موجود	جدید
هزینه	با افزایش HTS هزینه ساخت کاهش خواهد یافت، چرا که صرفه‌جویی ناشی از کاهش وزن فولاد آنقدر هست که همه افزایش هزینه برای استفاده از HTS به جای فولاد نرم را جبران کند.

۵ فناوری ماشین آلات

فناوری‌های موجود برای افزایش بهره‌وری انرژی موتورهای اصلی و کمکی باید از نقطه نظر منبع اصلی انرژی(سوخت) مورد بررسی دقیق قرار بگیرند.

شناورهای تجاری بزرگ از قدیم، از نفت کوره سنگین (HFO) که سوخت ته مانده نفت نیز نامیده می‌شود استفاده می‌کنند HFO. یکی ازمحصولات جانبی حاصل از عملیات پالایش سنتی است و معمولا حاوی مواد بسیار چسبناکی است که از فرآورده‌های نفتی تصفیه شده‌تر، حذف می‌شوند. در مقررات جدید سازمان بین‌المللی دریایی (IMO) ترکیبات نیتروژن و گوگرد (SO_x و NO_x) و همچنین $CO_۲$ به عنوان گازهای گلخانه‌ای شناخته شده‌اند. با کاهش استفاده از نفت کوره یا افزایش بهره وری سوخت می‌توان میزان $CO_۲$ را کاهش داد. کاهش NO_x به بهبود فرآیند احتراق منوط می‌باشد. IMO یک طرح قانونی جهت کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای NO_x در صنعت کشتیرانی را به اجرا گذاشته است. اولین مرحله در کاهش NO_x تحت عنوان TIRERI IMO شناخته می‌شود که در سال ۲۰۰۰ اجرایی شد. مرحله دوم در سال ۲۰۱۱ لازم الاجرا شد و در پی بیست درصد کاهش بیشتر نسبت به سطح توصیه شده بود. مرحله سوم به دنبال کاهش هرچه بیشتر انتشار NO_x است و انتظار می رود با اجرای آن در مناطق مشمول کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای (ACAS) میزان انتشار تا ۸۰ درصد کاهش یابد. به نظر می‌رسد برای پیروی از مقررات TIRERI موتورها باید پذیرای نوآوری‌های جدید باشند و نوعی سیستم پاکسازی را در خود جای دهند. لازم به ذکر است که چنین سیستم‌هایی روی بهره‌وری کلی اثر مثبت دارند. میزان سولفور موجود درگازهای گلخانه‌ای شناور با میزان سولفور موجود در نفت کوره ارتباط مستقیمی دارد. از مقررات IMO در رابطه با کاهش SO_x کاهش محتوای سولفور در سوخت دریایی است. میزان مرزبندی کاهش NO_x و SO_x در شرکت‌هایی که موثرترین استراتژی را مورد بررسی قرار دهند یا از مقررات مربوطه گازهای گلخانه‌ای IMO پیروی کنند از دیدگاه و چشم اندازی جامع برخوردار خواهند شد. با استفاده از سوخت‌های جایگزین نظیر LNC یا سایر فرآورده‌های متان می‌توان میزان NO_x و SO_x را کاهش داد اما هزینه‌های سرمایه‌ای افزایش خواهد یافت. در نهایت، استفاده از سیستم‌های تصفیه گاز خروجی امکان استفاده از سوخت‌های محتوی سولفور بیشتری را در اختیار اپراتورها قرار می‌دهد. اما در این حالت نیز هزینه اجرا و هزینه ناشی از بهره‌وری کلی سیستم وجود خواهد داشت. ادامه این بخش در سه قسمت اصلی تقسیم شده است: موتورهای اصلی و کمکی، بازیافت حرارت اتلاف شده، ماشین آلات کمکی. در هریک از این زیر بخش‌ها، کاربردی‌ترین و در دسترس ترین اقدامات و ابزارهای بهره‌وری انرژی قابل اعمال در ماشین آلات مورد بحث و مورد بررسی قرار گرفته است. محتوای این بخش که محرک‌های اولیه موتورهایی اصلی و کمکی می‌باشد از قرار ذیل است:

- افزایش بهره‌وری انرژی موتوردیزل
- ابزار اندازه‌گیری بهره‌وری انرژی موتور اصلی
- کنترل و اندازه‌گیری عملکرد موتور اصلی و بازیافت حرارت اتلاف شده
- بازیافت گرمای گاز خروجی_ بخار
- بازیافت گرمای گاز خروجی $CO_۲$
- تجهیزات جانبی
- ژنراتور شفت (شفت ژنراتور)

- تعداد و اندازه ژنراتورهای در حال سرویس کشتی‌ها
- سایر تجهیزات جانبی
- گرمایش و تهویه مطبوع
- موتورها، پمپ‌ها و فن‌های دارای سرعت متغیر

در ادامه عوامل مهم کاهش مصرف انرژی در این راه‌کار مورد بررسی قرار گرفته است.

۱.۵ ابزارهای اندازه‌گیری راندمان(بازده موتور اصلی)

جدول ۱۵: ابزارهای اندازه‌گیری راندمان(بازده موتور اصلی)

میزان صرفه‌جویی	هیچ صرفه‌جویی مستقیمی وجود ندارد، اما توانایی نظارت بر مصرف سوخت را افزایش می‌دهد.
قابلیت اجراء	برای موتورهای دیزلی کم سرعت یا سرعت متوسط قابلیت اجرا دارد.
نوع کشتی	برای موتورهای جدید و موجود
کشتی‌های جدید/ موجود	فقط برای موتورهای جدید
هزینه	۲۰۰۰۰ تا ۷۵۰۰۰ دلار برای کنتورها، کنترل و نمایشگرها هزینه دارد.

۲.۵ سنجش و کنترل عملکرد موتور اصلی

جدول ۱۶: سنجش و کنترل عملکرد موتور اصلی

میزان صرفه‌جویی	باعث ۱ تا ۲ درصد کاهش در مصرف با میزان‌سازی موتور (تنظیم موتور) می‌شود.
قابلیت اجراء	در موتورهای دیزلی کم سرعت یا سرعت متوسط
نوع کشتی	همه انواع
کشتی‌های جدید/ موجود	موتورهای جدید و موجود
هزینه	متغیر، بسته به قابل حمل بودن تجهیزات (این تجهیزات کم هزینه‌تر هستند) یا ثابت بودن آنها (پرهزینه‌تر هستند)، بین ۵۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ دلار هزینه دارد.

۶ بهره‌وری سوخت کشتی‌های در حال کار [۷، ۸]

مهمترین و کارآمدترین ابزارهایی که یک اپراتور برای بهبود عملکرد یک شناور در اختیار دارد، تصمیمات عملیاتی روزانه در خصوص چگونگی انجام سفر، انجام بازرسی منظم و نظارت بر بهره‌وری مصرف سوخت است. هر سفر دریایی به منزله فرصتی برای بهینه‌سازی سرعت، یافتن امن‌ترین راه در آب‌های آرام و اطمینان از برخورداری از بهترین آبخور و تدوین و تنظیمات جهت حفظ بهره‌وری در طول مسیر است. چرخه‌های منتخب نگهداری و تعمیر بر مقاومت ایجاد شده توسط بدنه و پروانه تاثیر می‌گذارد. نظارت دقیق و منظم بر مصرف انرژی در کل ناوگان می‌تواند ناکارآمدی را مشخص نماید و مکانیزم لازم جهت بهبود و ترقی مداوم را فراهم کند. به اشتراک گذاری اطلاعات مربوط به مصرف انرژی در کل ناوگان حتی می‌تواند موجب رقابت بیشتر میان خدمه جهت ارتقای عملکرد انرژی شود. این تلاش‌ها با اهداف دستور العمل لازم الاجرای IMO در خصوص طرح‌های مدیریت بهره وری انرژی کشتی مستقیما در یک راستا قرار دارد. این دستورالعمل که به تازگی لازم الاجرا شده یک چارچوب بالا–پایین است که به موجب آن شرکت‌ها نسبت به حفاظت از انرژی متعهد می‌شوند. در این بخش، عوامل عملیاتی کلیدی که توجه به آن برای حفاظت از انرژی در کشتی‌ها و مدیریت همه جانبه بهره‌وری انرژی ضروریست، مورد بررسی قرار گرفته است.

۱.۶ بهینه‌سازی سرعت سفر دریایی

جدول ۱۷: بهینه‌سازی سرعت سفر دریایی

میزان صرفه‌جویی	۱۰ درصد کاهش در سرعت موجب تقریبا ۲۰ درصد کاهش مصرف انرژی خواهد شد.
نوع کشتی	همه انواع کشتی‌ها، اما بهبود بیشتر برای کشتی‌های سریع‌السیرتر اتفاق خواهد افتاد.
کشتی‌های جدید/ موجود	کشتی‌های جدید و موجود
هزینه	هزینه‌ها پیچیده هستند و به تغییر در شرایط موتور، ارزش زمانی بار، کاهش تقاضای فرستندگان کالا برای کشتی کم سرعت‌تر و توافق‌های انجام شده در قرارداد اجاره کشتی در خصوص سرعت و سوخت بستگی دارد.

۲.۶ مسیریابی آب و هوایی اقلیم‌ها– انتخاب مسیر امن و دارای بهره‌وری انرژی

جدول ۱۸: مسیریابی آب و هوایی اقلیم‌ها– انتخاب مسیر امن و دارای بهره‌وری انرژی

میزان صرفه‌جویی	صرفه‌جویی تا حد زیادی به شرایط اقلیمی و طول مدت سفر بستگی دارد، اما در شرایط جوی نامساعد می‌تواند قابل توجه باشد.
نوع کشتی	همه انواع کشتی‌ها، اما بهبود بیشتر در مسیرهای طولانی یا شرایط اقلیمی نامساعد رخ می‌دهد.
کشتی‌های جدید/ موجود	همه انواع کشتی‌ها
هزینه	هزینه براساس هزینه سفر بعلاوه هزینه خرید نرم‌افزار بستگی دارد. انواع متنوعی از سیستم‌ها وجود دارد، از نرم‌افزار پیش‌بینی و ضعیت آب و هوای بسیار ابتدایی گرفته تا سیستم‌های اطلاعاتی پیچیده‌ای که بطور منظم بروز رسانی می‌شوند. هزینه در هر سفر بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ دلار می‌باشد.

۳.۶ بهبود اتو پایلوت‌ها

جدول ۱۹: بهبود اتو پایلوت‌ها

میزان صرفه‌جویی	باعث بیش از یک درصد کاهش در مصرف سوخت شناور می‌شود.
نوع کشتی	همه انواع کشتی‌ها، اما بیشترین بهبود برای کشتی‌های عازم مسیرهای طولانی در شرایط جوی نامساعد اتفاق می‌افتد.

کشتی‌های جدید/ موجود	همه انواع کشتی‌ها
هزینه	اپراتور می‌تواند تنظیمات ساده‌ای برروی اتوپایلوت‌های لاینر موجود انجام دهد (هزینه تقریبا صفر است.) هزینه اتوپایلوت کاملا سازگاری یافته که برای شرایط جوی بسیار نامساعد یا کشتی‌های دارای جهت ناپایدار قابل استفاده است حدود ۲۰۰۰ دلار می‌باشد.

۴.۶ رنگ‌های ضد رسوب بدنه

جدول ۲۰: رنگ‌های ضد رسوب بدنه

میزان صرفه‌جویی	هنگامیکه از این رنگ‌ها همزمان با پاکسازی زبری مناسب و سبزه بدنه استفاده شود، یک رنگ و پوشش بسیار با کیفیت می‌تواند تقریبا موجب ۳ تا ۴ درصد کاهش در مصرف سوخت سیستم رانش شود. رنگ کردن مجدد یک بدنه زبر می‌تواند موجب ۱۰ تا ۱۲ درصد کاهش در هزینه سوخت شود.
نوع کشتی	همه انواع
کشتی‌های جدید/ موجود	همه انواع
هزینه	پاکسازی کامل زبری بدنه و استفاده از پرایمر، ضد رنگ و ضد رسوب با کیفیت می‌تواند ۱۰ دلار در مترمربع (در خاورمیانه بین ۶ تا ۱۷ دلار) یا در حدود ۳۰۰ دلار برای یک VLCC معمولی هزینه داشته باشد.

۵.۶ بهینه‌سازی تریم/ آبخور

جدول ۲۱: بهینه‌سازی تریم/ آبخور

میزان صرفه‌جویی	باعث ۱ تا ۲ درصد کاهش در مصرف سوخت می‌شود.
نوع کشتی	همه انواع کشتی‌ها، اما بیشترین بهبودها برای کشتی‌های عازم مسیرهای طولانی اتفاق می‌افتد.
کشتی‌های جدید/ موجود	کشتی‌های جدید و موجود
هزینه	هزینه تهیه داده با استفاده از تست‌های مدل بین ۵۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ دلار است (برای همه کشتی‌هایی که طرح مشابه دارند هزینه یکسان می‌باشد). هزینه استفاده موثر از داده‌ها حدود ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ دلار برای هر کشتی می‌باشد. هزینه خدمات به هزینه انرژی مورد نیاز برای پمپ بالاست و زمان برنامه ریزی بار جهت بهینه‌سازی توزیع بار محدود می‌شود.

۶.۶ پاکسازی بدنه

جدول ۲۲: پاکسازی بدنه

میزان صرفه‌جویی	تمیز کردن گل و لجن سبک می‌تواند موجب ۷ تا ۹ درصد کاهش در مصرف سوخت سیستم رانش شود. پاکسازی گل و لای سنگین موجب بیش از ۱۵ تا ۱۸ درصد صرفه‌جویی خواهد شد و پاکسازی یک رسوب ماکروی سنگین به بیش از ۲۰ تا ۳۰ درصد صرفه‌جویی در مصرف سوخت منجر خواهد شد.
نوع کشتی	همه انواع
کشتی‌های جدید/ موجود	کشتی‌های در حال سرویس‌دهی
هزینه	پاکسازی بدنه توسط غواص‌ها یا ربات در خاورمیانه حدود ۱/۵ تا ۲/۵ دلار برای هر مترمربع هزینه دارد.

۷ نتیجه‌گیری

بهینه‌سازی در مصرف انرژی از مهمترین عوامل توسعه صنایع مختلف بویژه صنعت دریایی می‌باشد. با مصرف بیش از حد انرژی‌های فسیلی، جهان با کاهش و در نهایت اتمام منابع و ذخایر فسیلی پیش رو خواهد بود. همچنین مصرف سوخت‌های فسیلی عامل اصلی آلودگی هوا در سراسر جهان معرفی شده‌اند. از این رو بهینه‌سازی در مصرف انرژی بویژه انرژی‌های فسیلی:

۱. باعث حفظ طولانی‌تر منابع فسیلی برای نسل‌های بعد خواهد شد
۲. به عنوان عامل مهم در فرآیند توسعه اقتصادی در هر سیستم در نظر گرفته خواهد شد و در نتیجه باعث کاهش هزینه‌های مصرفی می‌شود
۳. باعث کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه کاهش آلودگی هوا خواهد شد.

در صنایع دریایی به عنوان یکی از مصرف کنندگان بزرگ انرژی‌های فسیلی، طراحان و سازندگان در تلاشند با بکارگیری روش‌ها و تجهیزات کاهش مصرف انرژی در شناورها و وضع قوانین بین‌المللی حداکثر بازدهی را از سیستم رانش با کمترین سوخت مصرفی دریافت کنند. در این نگارش سعی شده است تمامی راه‌کارها و تجهیزات موجود کاهش مصرف انرژی در کشتی‌ها معرفی شوند و مورد بررسی قرار گیرند. به طور کلی راه‌کارهای تشریح شده در متن اصلی مقاله عبارتند از:

۱. بهینه‌سازی فرم بدنه
۲. ابزارهای صرفه‌جویی در انرژی
۳. بهینه‌سازی سازه و ساخت سازه‌های سبک
۴. فناوری ماشین آلات
۵. بهره‌وری سوخت کشتی‌های در حال کار.

حمل و نقل دریایی در تمامی کشورهای جهان بویژه ایران جهت تجارت جهانی با وجود مسیرهای دریایی در شمال و جنوب کشور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توانمندی مهندسان ایرانی و بومی‌سازی و توسعه راه‌کارهای کاهش مصرف انرژی، می‌توان قدم‌های مفید و موثری در توسعه صنعت دریایی برداشت.

مراجع

[1] Second IMO GHG Study 2009, International Maritime Organization, 2009.

[2] Regulation (EU) No 2015/757, European Parliament and the Council of the European Union, 29 April 2015.

[3] Resolution MEPC.203(62) Annex 19, MARPOL Annex VI, SOLAS, International Maritime Organization, 15 July 2011.

[4] The Energy Efficiency Design index (EEDI) for new Ships, Policy Update No. 15 of the International Council on Clean Transportation, 3 October 2011.

[5] John Carlton, Dejan Radosavljevic, 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.

[6] J. Kim, C. Park; Wind power generation with a parawing on ships, a proposal; Energy journal of Elsevier; 2009.

[7] Ship Energy Effiency Measures, Status and Guidance Advisory, ABS Organization.

[8] Energy Efficiency White Paper, The Ship Operation Cooperative Program, INC Woodiville, Washington, June 2016.

[9] Renewable Energy Options for Shipping, Technology Brief, IRENA(international renewable energy agency), January 2015.