J. of Marine Eng. Vol. 22, Iss. 50, 2026. (18-33)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Evaluation of scrubber systems on ships, focusing on marine environmental laws and regulations

Javad Kouhi[1], Siamak Mirmasoumi[2*]

[1] *Student of Engine Department, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran, j.kouhi81@gmail.com*
[2] *Assistant Professor of Engine Department, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran, s.mirmasoumi@cmu.ac.ir*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 18 Sep 2026
Last modification: 31 Oct 2026
Accepted: 1 Nov 2026
Available online: 4 Nov 2026

Article type:
Research paper

Keywords:
Exhaust gas cleaning system
MARPOL Convention
Marine pollution standards
Sulfur emissions
International Maritime Organization

ABSTRACT

Engine emissions present significant challenges to the environment, prompting decision-makers in the shipping industry to prioritize reductions in pollutants. The installation of exhaust gas cleaning systems (EGCS) or scrubbers in ship exhausts offers a practical solution for aligning with the regulations set by the International Maritime Organization (IMO). The current study investigates this technology through an examination of scrubber types and their associated environmental regulations. The primary focus of these laws and regulations revolves around the emission of pollutants like sulfur, carbon, and particulate matter. Addressing this concern, the IMO mandated the use of fuels containing less than 0.5% sulfur content starting from January 1, 2020. Scrubbers come in three main types – closed, open, and combined – where washing water is utilized to reduce sulfur emissions by cleansing exhaust gases. Proper disposal of the wash water waste is crucial, leading to stringent regulatory measures. The closed system, which involves collecting and treating wastewater at ports, is deemed the most environmentally-friendly option and is recommended. By employing scrubbers, ships can effectively decrease sulfur emissions and opt for cost-efficient fuels with higher sulfur content. Research findings indicate that within the initial five years of installation, 95% of scrubber-equipped vessels achieve an economic breakeven point. Nevertheless, the cost of marine environmental degradation resulting from the discharge of open-loop scrubber washwater in the Baltic Sea (2014–2022) amounted to 680 million euros (€2019). An alternative to scrubbers is the use of fuels with very low sulfur content, which, however, come at a significantly higher cost.

ISSN: 2645-8136

DOI:

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۲، شماره ۵۰، ۱۴۰۵، (۳۳-۱۸)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

ارزیابی سیستم های اسکرابر در کشتی ها با تمرکز بر قوانین و مقررات زیست محیطی دریایی

جواد کوهی[۱]، سیامک میرمعصومی[۲*]

[۱] دانشجوی مهندسی کشتی (موتور)، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار j.kouhi81@gmail.com

[۲] استادیار گروه مهندسی کشتی (موتور)، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، s.mirmasoumi@cmu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۲۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۵/۰۸/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۸/۱۰

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۵/۰۸/۱۳

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

سیستم تمیزکننده اگزوز کشتی

کنوانسیون مارپل

استانداردهای آلایندگی دریایی

انتشار گوگرد

سازمان جهانی دریانوردی

چکیده

انتشار آلاینده های موتوری، محیط زیست را دچار چالش های جدی کرده است؛ از اینرو، تصمیم گیرندگان صنعت دریانوردی همواره دغدغه کاهش آلاینده ها را دارند. تکنولوژی نصب اسکرابر (EGCS) در اگزوز کشتی ها، راهکاری مفید برای کاهش آلاینده ها در راستای مقررات سازمان جهانی دریانوردی (IMO) است. پژوهش حاضر با تمرکز بر انواع اسکرابرها و مقررات زیست محیطی مرتبط با آنها، به بررسی این فناوری می پردازد. تمرکز قوانین و مقررات، عمدتا بر انتشار آلاینده هایی مانند گوگرد، کربن و ذرات معلق است و در همین راستا، تمیز کردن گازهای سوخته خروجی و کاهش گوگرد منتشر شده از آنها راهکاری است که IMO تحت عنوان الزام به استفاده از سوختهایی با درصد گوگرد کمتر از ٪۰/۵، از اول ژانویه ۲۰۲۰ ابلاغ کرده است. طراحی اسکرابرها در سه نوع بسته، باز و ترکیبی است که در آنها، آب شستشو با تمیز کردن گازهای اگزوز، گوگرد منتشر شده را کاهش می دهد. در این میان، چگونگی دفع پسماند آب شستشو، از اهمیت زیادی برخوردار است و مقررات، محدودیتهای جدی برای آن وضع کرده است. از اینرو، سیستم بسته، که آب پسماند را جمع آوری و سپس در بنادر تصفیه می کند، سیستمی است که کمتر باعث تخریب محیط زیست بوده و لذا توصیه می شود. در نتیجه ی بهره گیری از اسکرابر، ضمن کاهش انتشار گوگرد، کشتی ها می توانند از سوختهای ارزان، با درصد گوگرد بالاتر استفاده کنند. نتایج تحقیقات نشان می دهند که در طول پنج سال اول نصب، ٪۹۵ از کشتی های مجهز به اسکرابر، به نقطه سربه سر اقتصادی می رسند. با این حال، هزینه تخریب محیط زیست دریایی، در نتیجه تخلیه آب شستشوی سیستم های باز در دریای بالتیک (۲۰۲۲-۲۰۱۴)، بالغ بر ۶۸۰ میلیون یورو (€2019) بوده است. جایگزین دیگر اسکرابرها، استفاده از سوخت هایی با میزان گوگرد بسیار پایین است که البته قیمت بسیار بالاتری دارند.

ISSN: 2645-8136

DOI:

حق نشر: © ۲۰۲۶ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) ارسال شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]

۱ - مقدمه

حدود ٪۹۰ تجارت جهانی از طریق دریا صورت می گیرد و لذا اتکای صنعت دریانوردی به سوخت های فسیلی نگرانی های مرتبط با تخریب محیط زیست، به ویژه انتشار گازهای گلخانه ای و آلاینده ها را تشدید می کند. مطالعات نشان می دهند که درحال حاضر، بخش حمل و نقل دریایی حدود ٪۳ از انتشار جهانی CO_2، ٪۱۵ از اکسید های نیتروژن (NO_x) و ٪۱۲ از اکسید های گوگرد (SO_x) را به خود اختصاص داده است. همچنین حدود ٪۹۰ SO_x منتشر شده در صنعت حمل و نقل متعلق به حوزه دریانوردی می باشد. به همین دلیل و با توجه به سهم چشمگیر این صنعت در انتشار آلایندگی، سازمان جهانی دریانوردی (IMO[1])، مصمم به تصویب قوانین جدی و سختگیرانه برای کاهش انتشار گوگرد در اکوسیستم آبی جهان گردید و در این راستا، مطابق مقررات ابلاغ شده ازسوی IMO، از اول ژانویه ۲۰۲۰، تمامی ناوگان دریایی جهان موظف شده اند سطح گوگرد سوخت مصرفی خود را از ٪۳/۵ به ٪۰/۵ وزنی کاهش دهند (IMO2020). از همین روی، با توجه به گستردگی دامنه شمول، عدم آمادگی تعداد قابل توجهی از کشورها برای اجرای این محدودیت جدید و پیامدهای مختلف ناشی از آن بر بازارهای جهانی نفت خام، فرآورده های نفتی و غیره، صاحب نظران آن را بزرگترین چالش صنعت دریانوردی از ابتدای قرن بیستم می دانند [۱]. در همین راستا و با افزایش حساسیتهای زیست محیطی و رشد تقاضاهای نظارتی، اپراتورها و مالکین کشتی ها، مجبور به جستجوی راههایی موثر برای بهبود شرایط و رعایت استانداردهای زیست محیطی هستند.

نصب سیستم اسکرابر در کشتی ها یکی از این راه حل ها است. معرفی مقررات انتشار گوگرد IMO2020، مالکان کشتی را بر آن داشت تا علیرغم وجود پیچیدگی های این سیستم و محدودیت های عملیاتی و زیست محیطی، به سیستم اسکرابر روی بیاورند تا بتوانند این مقررات را رعایت کنند. سیستم اسکرابر، نرخ انتشار آلاینده هایی مانند اکسیدهای نیتروژن، اکسیدهای گوگرد و ذرات معلق (PM[2]) را، که بخشی از گازهای سوخته خروجی از کشتی ها هستند، کاهش می دهد. بدین ترتیب این سیستم می تواند راه حل موثری برای رعایت این مقررات سختگیرانه باشد. در تحقیق حاضر، ابتدا وضعیت کنونی سوخت مصرفی ناوگان کشتیرانی در ایران و جهان مورد ارزیابی قرار می گیرد و سپس ضمن شناسایی محدودیتهای اجرای مقررات IMO2020، دیدگاه های مختلف در خصوص سیستم اسکرابر در کشتی ها بررسی می شوند. بدین منظور معایب و مزایای انواع مختلف سیستم های تمیزکننده گازهای خروجی، مطالعه شده و از منظر اقتصادی مورد سنجش قرار خواهند گرفت.

در تحقیق حاضر، تلاش شده است ارزیابی اقتصادی و اثرات زیست‌محیطی سیستم اسکرابر در قالب یک چارچوب تحلیلی واحد و مکمل ارائه شود، به‌گونه‌ای که نتایج زیست‌محیطی (نظیر هزینه خسارت اکولوژیک) مستقیماً در تحلیل هزینه-فایده و دوره بازگشت سرمایه لحاظ گردند.

۲- سوخت مصرفی ناوگان کشتیرانی در ایران و جهان

هنگامی که صحبت از عملیات دریایی می شود، از آنجاییکه انتخاب سوخت دریایی تاثیر قابل توجهی بر اثرات زیست محیطی، عملکرد کشتی و انطباق با مقررات دارد، انتخاب سوخت مناسب اهمیت بیشتری پیدا می کند زیرا صنعت کشتیرانی با افزایش نگرانی های زیست محیطی و انتشار گازهای گلخانه ای سر و کار دارد. کنترل محتوای گوگرد در سوخت ضروری است زیرا انتشار آن به خطری جدی برای سلامت انسان و محیط زیست تبدیل شده است. سوختهای دریایی هر کدام ویژگی های خاص خود را دارند[۲] و از اهم سوخت های دریایی می توان به موارد زیر اشاره کرد:

نفت کوره سنگین (HFO)[3]، گازوئیل دریایی (MGO)[4]، نفت دیزل دریایی (MDO)[5]، گاز طبیعی مایع (LNG)[6]، سوخت با گوگرد کم (LSFO)[7]، سوخت با گوگرد بسیار کم (VLSFO)[8]، سوخت با گوگرد فوق العاده کم (ULSFO)[9]

هنگامی که نفت خام تقطیر می شود، سوخت باقیمانده ای به نام نفت کوره سنگین تولید می کند که معمولا به طور گسترده در صنایع دریایی مورد استفاده قرار می گیرد. HFO به طور کلی، با محتوای گوگرد بالا (معمولا ٪۲ تا ٪۳/۵)، ویسکوزیته بالا و چگالی بالا شناخته می شود و به همین خاطر سوختی مقرون به صرفه است که سابقه طولانی در صنعت کشتیرانی دارد؛ با این حال میزان بالای گوگرد موجود در آن، محدودیتهایی نیز در حین استفاده بهمراه خواهد داشت.

MGO با ویژگی هایی نظیر احتراق بهتر، ویسکوزیته و چگالی پایین و محتوای گوگرد کم (کمتر از ٪۰/۱) شناخته می شود. MDO نیز همانند MGO است و در کاربرد های دریایی از جمله پیشرانه اصلی تا تولید نیروی کمکی مورد استفاده قرار می گیرد. شایان ذکر است که با توجه به پالایش سوختهای MGO و MDO برای کاربرد های دریایی، استفاده از آنها در این صنعت،

[1] International Maritime Organization (IMO)
[2] Particulate Matter (PM)

[3] Heavy Fuel Oil (HFO)
[4] Marine Gas Oil (MGO)
[5] Marine Diesel Oil (MDO)
[6] Liquefied Natural Gas (LNG)
[7] Low-Sulfur Fuel Oil (LSFO)
[8] Very Low-Sulfur Fuel Oil (VLSFO)
[9] Ultra Low-Sulfur Fuel Oil (ULSFO)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]

منجر به نقض استاندارد های کنترل آلایندگی دریایی نخواهد شد[۳].

ابلاغ و اجرای مقررات مربوط به انتشار گوگرد توسط سازمان جهانی دریانوردی، باعث شد که LSFO به یک انتخاب سازگار برای مالکین کشتی ها تبدیل شود تا از مقررات پیروی کنند. LSFO در مقایسه با HFO دارای میزان گوگرد کمتری است که معمولا بین ۰/۵ تا ۱٪ متغیر است. همچنین VLSFO و ULSFO هر دو با مقررات انتشار مطابقت دارند و به ترتیب شامل محتوای گوگرد کمتر از ۰/۵٪ و کمتر از ۰/۱٪ هستند [۴].

LNG یک گاز طبیعی بی بو، شفاف، غیر خورنده و غیرسمی است که عمدتا از متان تشکیل شده و البته تمیز هم می سوزد. LNG با محتوای متان آن تعریف می شود و به زیر ساخت های حمل و نقل و ذخیره سازی خاصی نیاز دارد. گاز طبیعی سوخت جایگزینی مهمی برای سوخت های سنتی دریایی است زیرا اثرات مخرب زیست محیطی کمتری دارد. LNG تقریبا عاری از گوگرد است و محتوای گوگرد آن معمولا کمتر از ۰/۰۰۴٪ است [۵]. با پیشرفت و توسعه بیشتر در امر تولید، ذخیره سازی و توزیع LNG، این احتمال وجود دارد که این سوخت بیش از پیش در دسترس اوپراتورهای کشتی ها قرار بگیرد. با این حال، بدلیل در دسترس نبودن تکنولوژی به میزان کافی، کماکان LNG را بیشتر به عنوان سوخت آینده برای صنعت کشتیرانی می شناسند، بنابراین می توان همچنان MGO را محبوب ترین سوخت پاک مورد استفاده در کشتی ها قلمداد کرد [۶]. با این حال، کشتی های با موتورهای بزرگ، برای کاهش هزینه های عملیاتی خود، از سوختی با درجه کیفیت پایین استفاده می کنند؛ زیرا سوختی مانند HFO، در مقایسه با سوخت های تقطیر شده ی با کیفیت تر، ارزان تر است و لذا اسکرابر، عمدتا در کشتی هایی نصب می شوند که از سوختی نظیر HFO بهره می برند [۵]. برای درک بهتر این واقعیت، نرخ بروز شده برخی از سوخت های دریایی، در اشکال ۱، ۲ و ۳ ارائه شده اند [۸]. همانطور که در این اشکال مشاهده می شود، در مناطق مختلف جهان، قیمت سوخت MGO با میزان گوگرد کمتر از ۰/۱٪، در مقایسه با سوخت VLSFO (با گوگرد حدود ۰/۵٪) حدود ۳۰ الی ۳۵٪ و در مقایسه با سوختهایی با میزان گوگرد بالا (IFO380) حدود ۳۸ الی ۵۰٪ گرانتر است.

همانطور که از این اشکال پیداست، سوختی با میزان گوگرد بالا، قیمت بسیار کمتری نسبت به سوختهای با کیفیت تر دارد و می توان نتیجه گرفت که تمایل مالکین کشتی ها به استفاده از این چنین سوخت هایی بیشتر از سوخت هایی با گوگرد پایین تر باشد و از اینرو ضرورت نصب و بهره برداری از تجهیزاتی مانند اسکرابر بیش از پیش احساس می شود.



شکل۱- قیمت سوخت با گوگرد بسیار پایین (VLSFO) بر حسب دلار بر تن متریک در تاریخ ۲۶ اکتبر ۲۰۲۵ [۸]



شکل۲- قیمت سوخت گازوئیل دریایی (MGO) بر حسب دلار بر تن متریک در تاریخ ۲۶ اکتبر ۲۰۲۵ [۸]



شکل۳- قیمت یک نوع سوخت گوگرد بالا (IFO380[1]) بر حسب دلار بر تن متریک در تاریخ ۲۶ اکتبر ۲۰۲۵ [۸]

براساس گزارش آژانس بین المللی انرژی [۹]، مصرف انرژی توسط ناوگان کشتیرانی جهانی در سال ۲۰۲۴ حدود ۹٪ از تقاضای انرژی جهان را تشکیل می دهد. در سال ۲۰۱۸ و تا قبل از ابلاغ IMO2020، در بین سوخت های مصرفی ناوگان دریایی جهان، سهم نفت کوره با گوگرد بالای ۳/۵٪ حجمی (HSFO[2]) حدود ۷۰٪ بوده و گازوئیل با سهم حدود ۱۹ درصدی، دومین سوخت مصرفی در بین ناوگان کشتیرانی جهان بوده است [۱]. از اینرو، نفت کوره سنگین، بیشترین سهم را در میان انواع سوختهای مصرفی صنعت دریانوردی به خود اختصاص می داد. این در حالی

[1] Intermediate fuel oil with a maximum viscosity of 380 centistokes (<3.5% sulfur)
[2] Heavy Sulfur Fuel Oil (HSFO)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]

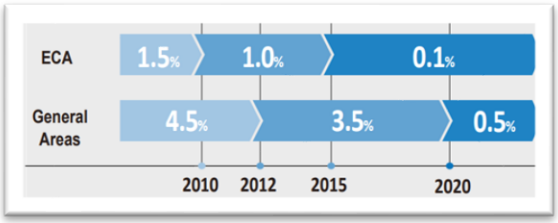
است که نفت کوره سنگین، مصارف جایگزین و بازار ثانویه کمی دارد و لذا جایگزین کردن آن با سوخت های دارای گوگرد کمتر، به منظور کاهش انتشار گوگرد، کار چندان راحتی نیست و به همین دلیل هم بود که تا سال ۲۰۱۹ فقط ٪۲/۵ از ناوگان کشتیرانی جهانی توانستند کشتی های خود را به اسکرابر مجهز کنند.

۳- کنوانسیون و مقررات بین المللی برای کاهش آلودگی کشتی ها

مقررات کنوانسیون MARPOL73/78، برای جلوگیری و کاهش انتشار اکسید نیتروژن [۱]، ذرات معلق، مونوکسیدکربن [۲] و هیدروکربن های نسوخته غیر متان [۳] هستند وشامل۶ پیوست فنی می باشند [۸].

SO_x یک محصول جانبی نامطلوب است که از گوگرد موجود در سوخت و در حین فرآیند های احتراق بوجود می آید. این آلاینده شامل مونوکسید گوگرد (SO)، دی اکسید گوگرد (SO_2) و تری اکسید گوگرد (SO_3) است. با این حال، از آنجاییکه SO بلافاصله به SO_2اکسید می شود بنابراین می توان ذکر کرد که SO_x به SO_2 و SO_3 اشاره دارد. اگرچه SO_2 عمدتا در فاز گازی است ولی SO_3 می تواند به صورت ذرات معلق نیز در اتمسفر انتشار یابد که باعث ایجاد بیماری های تنفسی مانند برونشیت و آسم می گردد. از سوی دیگر علاوه بر اکسیدهای نیتروژن، اکسیدهای گوگرد نیز یکی از عوامل ایجاد باران های اسیدی هستند که عامل غیرمستقیم بیماری در انسان ها می باشند. بنابراین انتشار SO_x باعث ایجاد مشکلات جدی می شود و لذا نیاز به یک راه حل جدی نیز دارد. از اینرو علاوه بر کنوانسیون فوق الذکر، همانطور که ذکر شد، در اول ژانویه ۲۰۲۰، محدودیت سختگیرانه ای در خصوص میزان گوگرد موجود در سوخت مصرفی کشتی ها به اجرا گذاشته شد که نقطه عطف قابل توجهی برای حفظ محیط زیست و حفاظت از سلامت بشر بود. این قانون که به عنوان "IMO2020" شناخته می شود، گوگرد موجود در سوخت مورد استفاده در کشتی هایی را که خارج از مناطق تعیین شده کنترل انتشار گازهای گلخانه ای کار میکنند، به ٪۰/۵ محدود می کند، که کاهش قابل توجهی نسبت به حد قبلی (٪۳/۵) دارد. البته در مناطق کنترل انتشار (ECA) [۴]، محدودیت ها از همان ابتدا سختگیرانه بودند (٪۰/۱).

مطابق مقررات ۱۴ پیوست VI مارپل، تغییرات میزان گوگرد مجاز در سوخت در مناطق ECA و نیز مناطق عمومی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- میزان مجاز محتوای گوگرد در سوخت در مناطق عمومی و ECA، طبق مقررات MARPOL

همانطور که از این شکل پیداست، بنا به دلایل گوناگون، از جمله افزایش اهمیت محیط زیست در دید عامه مردم و علی الخصوص تصمیم گیران، دایره ی مجاز تغییرات همواره در حال تنگ تر شدن بوده است.

اجرای محدودیت جدید، به دنبال اعمال ضمیمه ششم کنوانسیون اصلاح شده مارپل ۷۳/۷۸، الزامی شد و هدف از این محدودیتها، به زبان ساده، کاهش انتشار اکسیدهای گوگرد از کشتی ها و همچنین ذرات معلق بود. پیش بینی می شود که محدودیت جدید، منجر به کاهش ۷۷ درصدی انتشار کلی اکسیدهای گوگرد از کشتی ها شود که معادل سالانه ۸/۵ میلیون تن اکسید گوگرد است. اکسید های گوگرد با آسم، بیماری های ریوی، قلبی عروقی و تنفسی مرتبط هستند. بنابراین کاهش انتشار این آلاینده های زیان آور، باعث بهبود سلامت انسان ها، به ویژه آنهایی می شود که در نزدیکی سواحل و بنادر زندگی می کنند و آمار مرگ زودرس را نیز کاهش می دهد. مطالعه ای که در سال ۲۰۱۶، در مورد تاثیر انتشار اکسیدهای گوگرد از کشتی ها بر سلامت انسان، توسط فنلاند به کمیته حفاظت از محیط زیست دریایی [۵] ارائه شد، تخمین می زند که در صورت عدم کنترل انتشار SOx [۶] از کشتی ها، از سال ۲۰۲۰، آلودگی هوای ناشی از این آلاینده ها، بین سال های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ منجر به بیش از ۵۷۰۰۰۰ مرگ زودرس مازاد در سراسر جهان خواهد شد [۱۰].

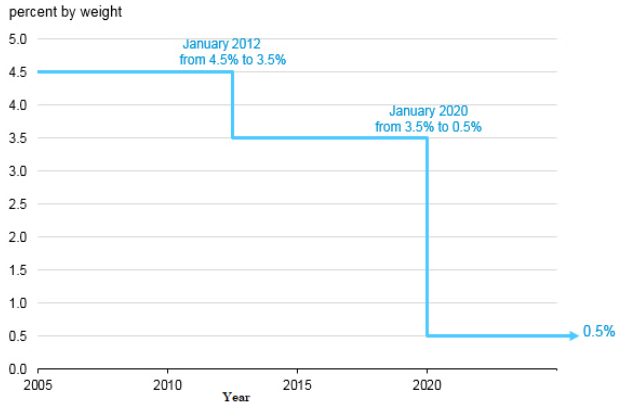
همانطور که پیشتر اشاره شد، آیین نامه IMO2020 علاوه بر اکسیدهای گوگرد، بر میزان انتشار ذرات معلق نیز محدودیت قائل است و همین امر، بیانگر این واقعیت است که ذرات معلق نیز به اندازه SO_x در ایجاد آلودگی موثر می باشند. به طور کلی، این ذرات معلق دارای قطر $10\ \mu m$ یا کمتر هستند و می توانند ریشه طبیعی یا انسانی داشته باشند. منابع طبیعی شامل خاکستر آتشفشانی، گرده، شن و ماسه زرد، نمک دریا و غیره هستند و منابع انسانی شامل دوده، دود، خاکستر بادی، مه شیمیایی و غیره می باشند. به طور خاص، PM ناشی از منابع انسانی را می توان به

[1] Nitrogen Oxides (NO_x)
[2] Carbon Monoxide (CO)
[3] Non-methane Hydrocarbons (NMHCs)
[4] Emission control area (ECA)
[5] Marine Environment Protection Committee (MEPC)
[6] Sulfur Oxides (SOx)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]

عنوان یک مشکل برای محیط زیست در نظر گرفت. در این میان، ذرات معلق کوچکتر (با قطر $2.5\ \mu m$ یا کمتر) که عمدتا حاصل احتراق در موتورهای احتراق تراکمی یا دیزلی هستند، خطرات بسیار بیشتری برای سلامتی انسانها ایجاد می کنند و لذا تمرکز بر کنترل انتشار این آلاینده نیز مانند آنچه که برای اکسیدهای گوگرد عنوان گردید، شدید و سختگیرانه می باشد.

شکل ۵ میزان محدودیت های اعمال شده بر میزان سولفور در سوختهای دریایی در سنوات گذشته را نشان می دهد [۱۱]. همانطور که مشاهده می شود، در ۲۰ سال گذشته میزان گوگرد مجاز در سوختهای دریایی، به تدریج از ٪۴/۵ به ٪۰/۵ وزنی تقلیل پیدا کرده است. از همین روی مالکین کشتی ها به منظور رعایت حد مجاز استاندارد، یا باید سوخت را تصفیه کنند یا با استفاده از تجهیزات بعد از احتراق، از انتشار آن به اتمسفر جلوگیری نمایند و همانطور که پیشتر اشاره شده، یکی از پرکاربردترین تجهیزات مورد استفاده برای کاهش گوگرد گازهای سوخته، اسکرابر می باشد.



شکل ۵- محدودیت میزان سولفور در سوختهای دریایی در سنوات گذشته [۱۱]

۴- چالش های نصب سیستم های تمیزه کننـــده اگـــزوز در کشتی ها

در خصوص میزان رعایت کنوانسیون ها و مقررات بین المللی برای حفاظت از محیط زیست دریایی سوالی که مطرح می شود این است که وضعیت فعلی استفاده از سیستمهای تمیزه کننده اگزوز یا اسکرابر در کشتی ها به چه صورت است؟ آیا تمام فیلترهای نصب شده بر روی اگزوز کشتی ها مطابق با MARPOL 73/78 و IMO2020 در خصوص محدود کردن انتشار گازهای سولفوری و ذرات معلق هستند یا خیر؟

همانطور که پیشتر اشاره شد، کشتی ها از ابتدای سال ۲۰۲۰ باید خود را با الزامات سازمان جهانی دریانوردی هماهنگ می کردند. در همین راستا تعداد زیادی کشتی برای نصب فیلتر های مورد اشاره در نوبت قرار گرفتند که البته همگی نتوانستند به موقع نسبت به نصب تجهیزات اسکرابر اقدام کنند. همچنین فیلترهای قدیمی نیز که گاها بر روی برخی از کشتی ها نصب بودند، انطباق مناسبی با آیین نامه های جدید نداشتند و باید تغییراتی در آنها اعمال می شد. با این حال، بنا به دلایلی این موضوع با تأخیر مواجه شد که کمبود امکانات و ظرفیت محدود کشتی سازی ها در سطح جهانی از بزرگ ترین مشکلات در این زمینه بود. همچنین طراحان و کشتی سازها برای نصب، راه اندازی و مقاوم سازی در روند نصب اسکرابرها، با فشار بالای کاری روبرو شدند و کمبود نیروی انسانی، باعث شد تا مدت زمان نصب این تجهیزات، از ۴۰ به ۸۰ روز افزایش یابد. در عین حال، سازمان های رده بندی کشتی ها[1] مجبور بودند تعداد بسیار بیشتری از کشتی هایی که مشغول نصب این تجهیزات بودند را مورد بازرسی قرار دهند. علاوه بر این، شیوع ویروس کرونا شرایط را نسبت به قبل دشوارتر کرد و کارگران در برخی از کشتی سازی ها و یاردها به علت نگرانی از ابتلا به کووید دست از کار کشیدند.

همانطور که پیشتر بیان شد، اگر فیلترهای اسکرابر در موعد مقرر نصب نشده باشند، مالکان کشتی ها باید تا زمان نصب این فیلترها و تأیید آن، از سوختی با گوگرد کمتر از ٪۰/۵ استفاده کنند. مقررات در این باره چنان محکم است که تنها تا اول ماه مارس سال ۲۰۲۰، تحت شرایطی خاص، اجازه استفاده از سوخت VLSFOرا داده بود. از آن تاریخ به بعد، حتی حمل سوخت با گوگرد بالا بر روی کشتی های بدون فیلتر اسکرابر ممنوع شد. این بدان معنی است که اپراتورهای کشتی هایی که به سیستم تمیز کننده اگزوز مجهز نیستند باید تمام سوخت گوگرد بالا را از کشتی تخلیه و مخازن آن را تمیز کنند. آنها فقط زمانی مجاز به حمل مجدد سوخت با گوگرد بالا هستند که از نصب فیلترهای اسکرابر و عملیاتی شدن آن اطمینان حاصل کرده باشند.

از دیگر چالش های پیش رو در خصوص نصب اسکرابرها، می توان به خوردگی لوله فیلترها در خروجی اگزوز، در اثر گاز SO_x اشاره کرد که منجر به نشت آلاینده ها بدون رعایت محدوده ی تعیین شده در مقررات می شود. برای حل این مشکل، قوانین و استانداردهای به روز شده، اندازه گیری ضخامت لوله های مختلف را در تجهیزات اسکرابر بطور سالانه پیشنهاد می کنند. خرابی سنسورهای اسکرابر نیز یکی دیگر از نگرانی ها و چالشهای پیش روست و لذا برنامه ریزی برای رعایت فواصل صحیح بازرسی و تعمیر و نگهداری از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۲].

در سیستم‌های اسکرابر حلقه‌باز، آب دریا به عنوان ماده شست‌وشو به کار می‌رود و دبی حجمی آن متناسب با قدرت خروجی و اندازه موتور تنظیم می‌شود. با این حال، در مناطقی با شوری پایین، مانند دریای بالتیک یا نواحی نزدیک ساحل، این سیستم کارایی مطلوبی ندارد، زیرا برای شست‌وشوی مؤثر، به حجم بسیار زیادی از آب دریا نیاز دارد و در نتیجه انرژی قابل‌توجهی مصرف می‌کند. علاوه بر این، مصرف مداوم انرژی برای پمپاژ و تصفیه جریان

[1] Ship Classification Societies

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]

شست‌وشو، به‌ویژه در سیستم‌های حلقه‌بسته، یک عیب فنی و عملیاتی محسوب می‌شود.

بطور کلی، اهم چالش های مرتبط با نصب و بهره برداری از اسکرابرها را می توان به پنج مورد زیر خلاصه کرد، که در این مقاله به طرق مختلف، مورد بحث و واکاوی قرار می گیرند:

الف) وابستگی به قلیائیت آب دریا (سیستم‌های حلقه‌باز)

ب) مصرف بالای آب دریا و در نتیجه تقاضای انرژی بالا

ج) کیفیت آب تخلیه‌شده و محدودیت‌های قانونی

د) خوردگی بدنه اسکرابر و لوله‌های خروجی

ه) محدودیت فضا برای نصب سازه

۵- انواع سیستم اسکرابر اگزوز

طراحی های مختلفی برای سیستمهای تمیزکننده گازهای خروجی از موتور کشتی یا همان اسکرابر وجود دارد که وظیفه ی همگی، زدودن اکسیدهای گوگرد و ذرات معلق از گازهای سوخته خروجی از موتور و یا دیگهای بخار است. اجزای اصلی تشکیل دهنده یک اسکرابر کشتی در شکل ۶ قابل مشاهده است [۱۳] و بخش اصلی آن بشرح زیر است:

- مخزن یا برجی که جریان گازهای خروجی موتور یا دیگ بخار را قادر می‌سازد تا کاملاً با آب مخلوط شده و اصطلاحا شسته شوند. این آب، آب دریا یا آب شیرین یا ترکیب هر دو می تواند باشد.

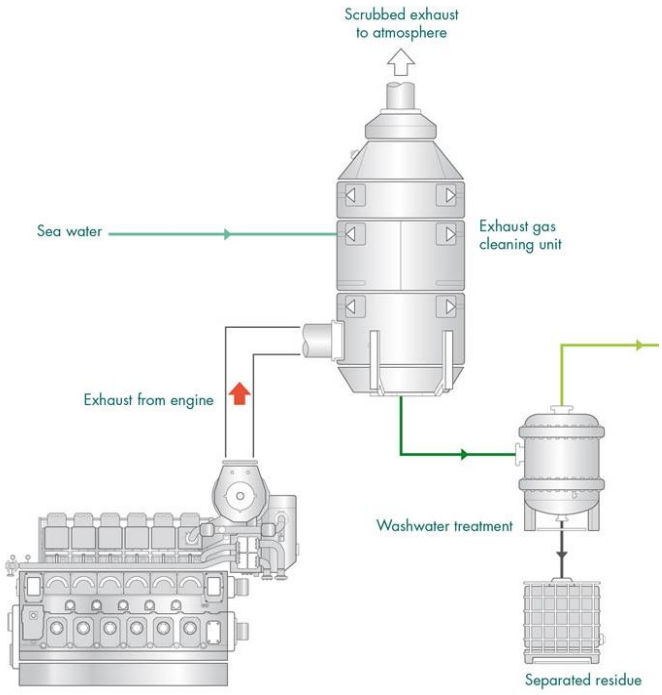
- تصفیه خانه ای برای حذف آلاینده ها از آب "شستشو" پس از فرآیند شستشو؛

- تاسیسات مدیریت پسماند: پسماند خروجی از تصفیه خانه آب شستشو، باید تا زمان دفع در ساحل، درون کشتی نگهداری شود و نمی توان آن را در کشتی سوزاند.

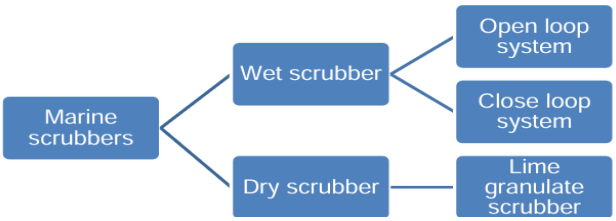
همچنین همانطور که در شکل ۷ مشاهده می کنید، دو نوع اسکرابر صنعتی خشک و مرطوب وجود دارد. دانستن تفاوت بین اسکرابر مرطوب و خشک بسیار مهم است. اگرچه اسکرابرهای خشک به طور کلی نمی توانند آلاینده ها را به اندازه اسکرابرهای مرطوب حذف کنند، اما برای استفاده در تاسیساتی که فاقد زیرساخت های مدیریت پساب هستند، انتخاب بسیار مناسبی می باشند.

۵-۱- سیستم اسکرابر خشک

سیستم اسکرابر خشک یک دستگاه کنترل آلودگی هوا است که برای حذف آلاینده ها از گازهای خروجی استفاده می شود که به آن سیستم جاذب خشک نیز می گویند. در این نوع از اسکرابرها، به عنوان جایگزین مایع، بی کربنات سدیم یا آهک، نمونه هایی از جاذب های خشک هستند که به جریان گازهای سوخته تزریق میشوند و حذف آلاینده ها از گازهای خروجی توسط مایع انجام نمی شود [۱۴].



شکل ۶- اجزای اصلی یک سیستم اسکرابر در کشتی [۱۳]



شکل ۷- دسته بندی اسکرابرهای اگزوز کشتی ها

۵-۲- سیستم اسکرابر مرطوب

سیستم اسکرابر مرطوب نوع دیگری از دستگاه کنترل آلودگی هوا در کشتی هاست که برای حذف آلاینده ها از گازهای خروجی طراحی شده است. این سیستم با ورود آب دریا یا آب شیرین بعلاوه افزودنی های شیمیایی به جریان گاز خروجی، برای جذب و زدودن آلاینده ها عمل می کند. اسکرابر مرطوب معمولا برای کنترل ذرات معلق، دی اکسید گوگرد و سایر مواد مضر استفاده می شود که به حفاظت از محیط زیست و رعایت مقررات کمک می کند [۱۵].

گاز خروجی به برج اسکرابر مرطوب وارد می شود و با محلول شستشو که حاوی مواد شیمیایی بوده و برای جذب و خنثی سازی آلاینده ها است، تماس پیدا میکند. این تماس از طریق نازل های اسپری رخ می دهد و آلاینده ها ضمن چسبیدن به قطرات آب، در مایع حل می شوند و در نتیجه این واکنش، ترکیبات سمی کمتری تولید می شوند [۱۶].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]

هنگامی که دی اکسید گوگرد با یک محلول قلیایی واکنش می دهد، سولفات ایجاد شده و پس از شستشو، مایع و گاز از هم جدا می شوند و در نهایت، گاز خالص شده به اتمسفر رها می گردد. آب شستشویی که حاوی آلاینده ها است یا به دریا ریخته می شود یا برای استفاده مجدد در اسکرابر تصفیه خواهد شد. برای اطمینان از کارایی سیستم، مانیتورینگ مداوم عملکرد اسکرابر مورد نیاز است که به این منظور، پارامترهایی مانند نرخ جریان مایع، دما و فشار به طور منظم بررسی و کنترل می شوند [۱۷].

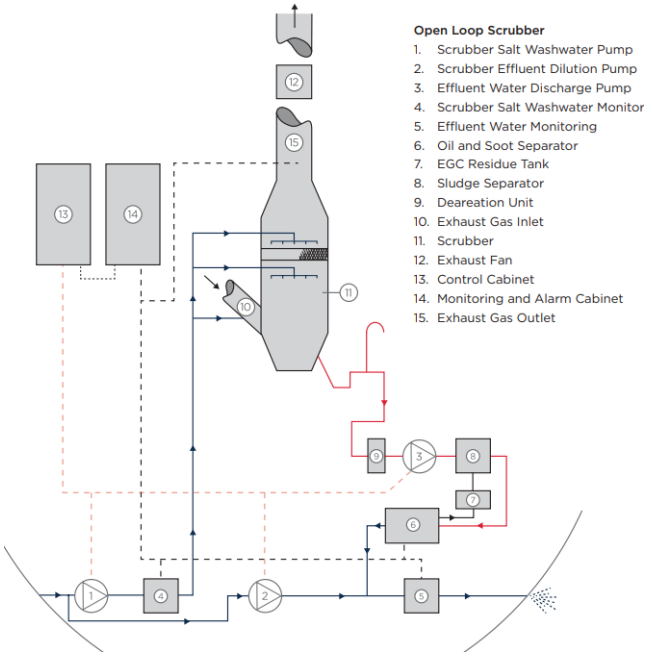
شدت جریان ورودی به یک اسکرابر مرطوب، اغلب به طور مستقیم با مقدار ذرات معلقی که اسکرابر می تواند جمع آوری کند، متناسب است. اسکرابرهای مرطوب معمولا تنها سیستم کاهش آلودگی هوا هستند که هم گازها و هم ذرات معلق را از جریان گاز حذف می کنند. اسکرابرهای مرطوب قابل تنظیم هستند و دارای طراحی های مختلفی می باشند که به طور گسترده در صنایع دریایی برای رعایت مقررات زیست محیطی و کاهش تاثیر انتشار گازهای سمی استفاده می شوند. در ادامه به بررسی گونه های دیگری از اسکرابرهای مرطوب خواهیم پرداخت [۱۸].

۵-۲-۱- سیستم اسکرابر مرطوب حلقه باز[1]

سیستم اسکرابر حلقه باز، نوعی سیستم پاکسازی گازهای خروجی است که در کشتی برای کاهش آلودگی هوا با حذف آلاینده ها از گازهای خروجی موتور کشتی مورد استفاده قرار می گیرد (شکل ۸).

این نوع از طراحی اسکرابر، نیازی به افزودن مواد شیمیایی برای خنثی کردن گوگرد از گازهای خروجی ندارد و آب دریا به عنوان وسیله شستشو عمل می کند. در این طرح، قلیائیت آب دریا برای تصفیه گازهای خروجی از موتور و دیگ بخار استفاده شده و دبی حجمی آب دریا با قدرت خروجی و اندازه موتور تنظیم می شود. این سیستم، آب را از دریا می گیرد و به داخل اسکرابر هدایت می کند. آب دریا از طریق نازل های پاشش در بالای اسکرابر وارد شده و منجر به یک الگوی اسپری به طور مساوی درسراسر اسکرابر می گردد یا از طریق جریان گاز خروجی در برج اسکرابر به گردش در می آید [۱۹].

گازهای خروجی اگزوز از سمت پایین برج اسکرابر وارد شده و بعد از برخورد با اسپری آب دریا، واکنش شیمیایی رخ می دهد. ذرات گوگرد در گازهای خروجی در دمای مناسب و شرایط فرآیندی در قطرات آب حل می شوند و در ابتدا دی اکسید گوگرد موجود در اگزوز را خنثی می کنند و سپس اسید سولفوریک (H_2SO_4) به عنوان یک محصول واکنش شیمیایی بین آب دریا و دی اکسیدگوگرد شکل می گیرد. اسید سولفوریک در مقایسه با دی اکسیدگوگرد کمتر سمی است و در آب قابل حل می باشد؛ بنابراین در طی این فرآیند انحلال، آب اسیدی خواهد شد [۲۰].



شکل ۸- سیستم اسکرابر مرطوب، طراحی حلقه باز [۱۰]

با این حال، اسید به طور طبیعی توسط خواص قلیایی آب دریا خنثی می شود و تاثیرات کلی آن بر محیط زیست دریایی را کاهش می دهد. محصولات جانبی، شامل سولفات ها، همراه با آب تصفیه شده به دریا تخلیه می شوند و در نهایت گازهای خروجی تمیز شده با تایید مقررات انتشار به اتمسفر رها می گردند. این سیستم مجهز به دستگاه های نظارتی برای اطمینان از رعایت مقررات زیست محیطی نیز می باشد (شکل ۹).



شکل ۹- سنسور آنالیز گازهای خروجی از اسکرابر به اتمسفر

عواملی مانند راندمان اسکرابر، pH آب دریا و کیفیت آب تخلیه، پارامترهایی هستند که به طور مستمر پایش می شوند. در مورد طراحی حلقه باز، تعداد کم قطعات متحرک و سهولت نصب بر روی کشتی ها از مزایای این طراحی هستند. این سیستم نیازی به حمل و نگهداری مواد شیمیایی ندارد و مقرون به صرفه است و به حداقل تعمیر و نگهداری نیز نیاز دارد. همچنین به غیر از رسوب زدایی و بررسی های عملیاتی، مواد زائد این سیستم نیازی به جمع آوری ندارند [۲۱]. با این حال، عدم توانایی در استفاده از سیستم های اسکرابر مرطوب حلقه باز در همه شرایط، باعث ایجاد

[1] Open Loop System (OLS)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]

چالش هایی در فرآیند کاهش آلایندگی گازهای خروجی شده است؛ زیرا عملکرد موثر سیستم به قلیایی بودن آب دریا در دسترس بستگی دارد و در صورتیکه میزان قلیائیت آب شور یا شیرین کم باشد، اسکرابرهای حلقه باز به خوبی با آنها کار نمی کنند. اسکرابرهای حلقه باز با قلیائیت طبیعی آب دریا کار می کنند، به همین دلیل، مناطقی با سطوح شوری پایین تر، مانند دریای بالتیک و مناطق نزدیک به خشکی، مکان مناسبی برای بهره گیری از اسکرابرهای حلقه باز نیستند. تمیز کردن موثر، به حجم بسیار زیادی از آب دریا نیاز دارد و در نتیجه، این سیستم انرژی زیادی مصرف می کند [۲۲]. از همین روی، به علت اثرات زیست محیطی، تخلیه فاضلاب حاوی سولفات به دریا، برخی از مناطق، محدویت هایی را برای استفاده از سیستم حلقه باز اعمال کرده اند و پیشنهاد می کنند راه حل جایگزینی برای انتشار کمتر گوگرد در بنادر و مناطق کنترل انتشار ارائه شود.

یکی دیگر از چالش‌های سیستم حلقه باز، خوردگی ناشی از تشکیل اسیدسولفوریک در بدنه اسکرابر و لوله‌های خروجی است؛ این پدیده به‌ویژه در صورت ناکافی‌بودن قلیائیت آب دریا یا کاهش pH آب شست‌وشو تشدید می‌شود [۲۷].

آب دریا هنگام ورود به داخل کشتی از دریچه آب دریا[1] عبور می‌کند؛ در این مرحله سیستم MGPS[2] وارد عمل شده و از طریق افزایش گردش آب دریا و کاهش تجمع رسوبات زیستی[3]، به کاهش نرخ خوردگی در خطوط لوله کمک می‌کند. یون‌های افزوده‌شده توسط این سیستم می‌توانند با ایجاد یک لایه محافظ نسبی در سطح داخلی لوله‌ها، از شدت خوردگی بکاهند، هرچند این سیستم جایگزین انتخاب مناسب مواد و انجام تعمیر و نگهداری دوره‌ای نمی‌شود [۳۴و ۳۵]. با توجه به فشار ورودی بالای آب دریا به اسکرابر و افزایش جریان ناشی از عملکرد MGPS، فرصت کمتری برای تجمع محلی رسوبات خورنده ناشی از اسیدسولفوریک باقی می‌ماند؛ ضمن آنکه تخلیه مداوم آب از داخل اسکرابر نیز به کاهش زمان تماس و در نتیجه کاهش اثرات خوردگی کمک می‌کند. به‌عنوان نمونه مشابه در صنعت دریایی، سامانه آب‌بندی عرشه[4] در کشتی‌های تانکر، که همچون سیستم اسکرابر حلقه باز به‌صورت پیوسته و حتی در حالت لنگر فعال است، در عمل نشان داده که با برنامه نگهداری منظم می‌توان هزینه تعمیر و نگهداری را در بازه‌های اورهال اساسی مدیریت‌پذیر نگه داشت. این تجربه عملیاتی نشان می‌دهد که سیستم‌های مشابه در محیط دریایی، با رویکرد طراحی صحیح، می‌توانند قابلیت اطمینان بلندمدت داشته باشند؛ با این حال، اثربخشی MGPS در کاهش خوردگی اسکرابر به نوع فناوری، روش تزریق یون و شرایط عملیاتی بستگی دارد و جایگزین انتخاب مواد مقاوم و پایش منظم pH نیست.

۵-۲-۲- سیستم اسکرابر مرطوب حلقه بسته [5]

اصول عملکرد سیستم حلقه بسته شبیه به سیستم حلقه باز است، به غیر از اینکه مایع شستشو در این نوع از اسکرابر، آب شیرین است که به جای آب دریا با یک ماده شیمیایی قلیایی، عمدتا هیدروکسید سدیم (NaOH)، فرآوری شده است. مایع شستشو از طریق نازل های اسپری در برج اسکرابر پاشیده می شود، با تماس گازهای خروجی با مایع، آلاینده هایی مانند دی اکسیدگوگرد جذب شده و در طول فرآیند خنثی می شوند، سپس اکسیدهای گوگرد موجود در جریان گاز خروجی به سولفات سدیم تبدیل می شوند که بی ضرر هستند[۲۳].

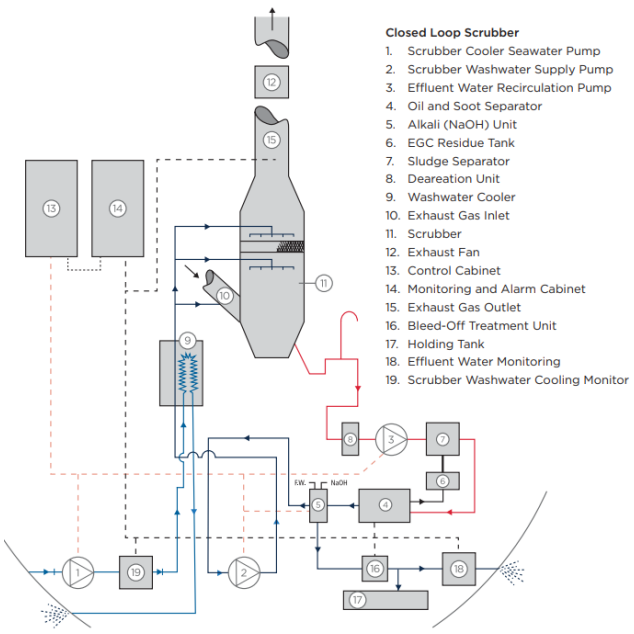
هنگامی که مایع شستشو و گازهای خروجی با هم تماس می یابند، آلاینده ها جذب و بعد از جمع آوری، به یک سیستم حلقه بسته هدایت می گردند. در مرحله بعدی، پسماند برای جداسازی ذرات سنگین تر و کاهش تیرگی، در مخزن ته نشین می شود. حذف ذرات معلق و سایر مواد جامد یا آلاینده ها، از طریق چندین فرآیند فیلتراسیون انجام می گردد. همچنین در این سیستم، مایع شستشو بازیافت می شود و برای تمیز کردن پسماند آب شستشو قبل از استفاده مجدد، از یک مخزن فرآیندی بهره می برند، سپس مایع شستشوی جمع آوری شده و برای خنثی سازی و حذف آلاینده های به دام افتاده، تصفیه می گردد که شامل تکنیک های شیمیایی برای تبدیل آلاینده ها به مواد کم خطر است[۱۷]. پس از پمپاژ آب به مخزن فرآیند، مواد قلیایی مانند هیدروکسید سدیم (NaOH) یا هیدروکسید منیزیم (MgOH) اضافه می شود تا pH و دوز آب، قبل از اسکرابر افزایش یابد. ماده شیمیایی قلیایی موجود در آب، اجزای اسیدی را از گازهای خروجی جذب می کند و انتشار گوگرد را کاهش می دهد. طی این فرآیند، محلول آلوده به آلاینده ها (دوغاب اسکرابر) در پایین محفظه اسکرابر جمع آوری شده و برای تصفیه بیشتر به مخزن فرآیند می رود. سپس دوغاب با تنظیم سطوح pH و همچنین حذف ناخالصی ها تصفیه می شود. پس از تصفیه، دوغاب تمیز شده به سیستم اسکرابر برگشت داده شده و چرخه حلقه بسته را به پایان می رساند (شکل ۱۰).

اسکرابر با طراحی حلقه بسته نیاز به پر کردن مداوم مایع شستشو را کاهش می دهد. با این حال، مقادیر کمی از آب شستشو به طور مرتب حذف شده و به مخازن نگهداری که در آن آب تازه اضافه

[1] Sea Chest
[2] Marine Growth Prevention System (MGPS)
[3] Biofouling
[4] Deck Seal
[5] Close Loop System (CLS)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]

می شود، منتقل می گردد، این کار از تجمع سولفات سدیم در سیستم جلوگیری می کند. همچنین برای اطمینان از انطباق سیستم با مقررات انتشار، نظارت مستمر مورد نیاز است [۲۳]. علاوه بر این، در مقایسه با طراحی باز، اسکرابر حلقه بسته از نظر انرژی، کارآمدتر است، زیرا آب شستشوی مصرف شده در آن، نسبت به سیستم حلقه باز، تقریبا نصف می شود که دلیل آن چرخش مجدد دوغاب است. از طرفی، این سیستم ها نیاز به نگهداری کمتری دارند و عملکرد آنها به شرایط عملیاتی کشتی بستگی ندارد. این طراحی منعطف است و واحد می تواند به اندازه کافی با سوخت های مختلف، بدون نقض قوانین کار کند و لذا هنگام کار در مناطق ECA، هیچ تغییری در سوخت انجام نمی شود.



شکل ۱۰- سیستم اسکرابر مرطوب، طراحی حلقه بسته

یکی دیگر از مزایای استفاده از سیستم تمیزکننده با حلقه بسته، عدم تخلیه آب شستشو به دریا و یا وارد کردن آلاینده هایی مانند فلزات سنگین به دریا است [۲۴]. با این حال، چالش هایی شامل نیاز به فضا، نیاز به ذخیره سازی و تصفیه آلاینده های جمع آوری شده در سیستم حلقه بسته وجود دارد. فضاهای ذخیره سازی بزرگ برای فیلترها، پمپ ها و مخزن فرآیند و همچنین تمام تجهیزاتی که با تصفیه و گردش مجدد دوغاب مرتبط هستند مورد نیاز است. یک مخزن ذخیره برای تنظیم دمای هیدروکسید سدیم بین ۲۰ تا ۵۰°C استفاده می شود. بدین ترتیب، انرژی مصرفی برای پمپاژ و تصفیه مداوم دوغاب، می تواند به عنوان یک عیب فنی و عملیاتی برای این نوع سیستم لحاظ شود. با این حال، عدم استفاده از اسکرابر، در مقایسه با هزینه های مرتبط با پمپ و فرآیند پمپاژ، برای صاحبان کشتی، گرانتر تمام میشود [۳۱].

با توجه به مواد شیمیایی قلیایی موجود در سیستم اسکرابر حلقه بسته، لوله ها و مخازن دارای پتانسیل بالایی برای پوسته پوسته شدن یا خوردگی هستند. بنابراین این سیستم اغلب نیاز به تعویض فیلترها و همچنین نظارت مداوم بر دوز مواد شیمیایی، عملکرد سیستم و کیفیت مایع تمیز کننده دارد [۲۵].

از دیگر نکاتی که به منظور بهره برداری صحیح از سیستم اسکرابر بسته بایستی مورد توجه قرار گیرد این است که پسماند این نوع اسکرابر، حاوی دوده و آلاینده هایی است که از گازهای خروجی اگزوز استخراج می شود. سپس این پسماند برای دفع در خشکی، باید جمع آوری و نگهداری گردد. در نتیجه، یک کشتی باید امکانات کافی برای جابجایی و ذخیره پسماند تا زمان دفع آن را داشته باشد.

اسکرابر حلقه بسته به عنوان یک طراحی ترجیحی در نظر گرفته می شود، به خصوص در مناطق کنترل انتشار که تخلیه فاضلاب ممنوع است. این سیستم در مقایسه با سیستم های حلقه باز، قابلیت کنترل و مدیریت بیشتری دارد [۲۶].

۵-۲-۳- سیستم اسکرابر مرطوب هیبریدی

سیستم اسکرابر مرطوب هیبریدی، ترکیبی از هر دو اسکرابر حلقه باز و حلقه بسته است (شکل ۱۱) که آن را قادر می سازد قابل تنظیم باشد و به راحتی با مقررات زیست محیطی متغییر و الزامات عملیاتی سازگار شود. از این رو، تحت شرایط عملیاتی مختلف، اپراتور کشتی ها ملزم به تغییر بین این دو حالت هستند.

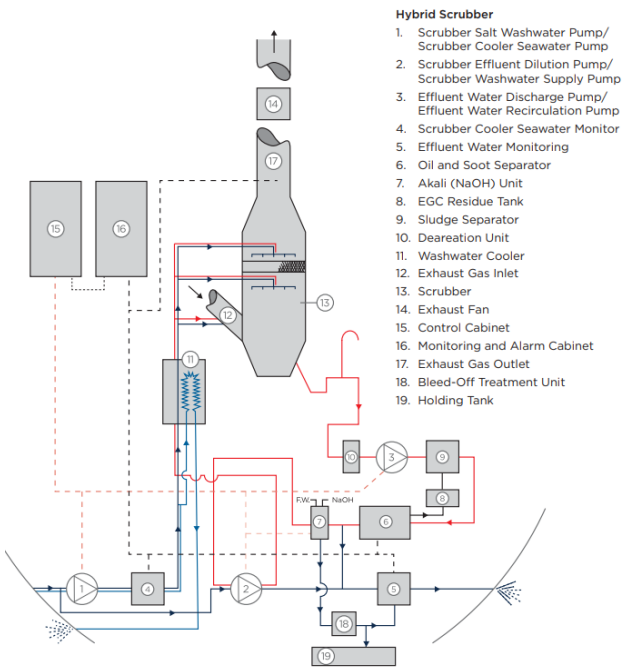
ویژگی انعطاف پذیری و قابلیت انتقال از حالت حلقه باز به حالت حلقه بسته باعث می شود تا در مناطقی که استفاده از اسکرابر حلقه باز ممنوع است، با تغییر حالت به سیستم حلقه بسته، بتوان الزامات آیین نامه ها را تامین کرد و برای این کار دیگر نیازی به صرف هزینه برای سوخت با محتوای گوگرد کم نیست. چراکه با توجه به امکان عملیاتی کردن هر دو حالت، سوخت با محتوای گوگرد بالا به طور کلی می تواند بدون هیچ مشکلی مورد استفاده قرار گیرد [۲۴].

شایان ذکر است که تغییر حالت بین طراحی حلقه باز و بسته به صورت دستی یا خودکار توسط خدمه مسئول کشتی انجام می شود. این تغییر حالت قبل از ورود به مکان هایی با قوانین سختگیرانه زیست محیطی، به ویژه ممنوعیت تخلیه پسماند انجام می شود، بطوری که در طول حضور در بندر یا مناطق کنترل انتشار، حالت حلقه بسته و در شرایط دریانوردی در دریا، حالت حلقه باز مورد استفاده قرار می گیرد.

با توجه به تفاوت های اساسی میان سیستم های اسکرابر حلقه باز، حلقه بسته، هیبریدی و خشک از نظر ساختار عملیاتی که در بخش های پیشین تشریح شد، ارزیابی مقایسه ای این فناوری ها از منظر اقتصادی، فنی و زیست محیطی برای انتخاب سیستم مناسب، متناسب با نوع کشتی و مسیر دریانوردی ضروری است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]

جدول ۱ این چهار نوع سیستم را بر اساس شاخص های کلیدی شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه عملیاتی سالانه، فضای مورد نیاز برای نصب، میزان تولید پسماند، اثرات زیست‌محیطی مستقیم و دوره بازگشت سرمایه با یکدیگر مقایسه می‌کند.



شکل۱۱- سیستم اسکرابر مرطوب با طراحی هیبریدی

جدول ۱- مقایسه فنی سیستم‌های مختلف اسکرابر

معیار	حلقه‌باز [۱۹]، [۲۰] و [۲۲]	حلقه‌بسته [۲۳] و [۲۵]	هیبریدی [۲۴] و [۳۱]	خشک [۱۴] و [۲۳]
هزینه سرمایه‌گذاری اولیه	کم	زیاد	متوسط تا زیاد	متوسط
هزینه عملیاتی	متوسط (انرژی پمپاژ)	زیاد (مواد شیمیایی، تصفیه، پسماند)	متغیر بر اساس حالت عملیاتی	متوسط؛ هزینه تهیه جاذب جامد (بی‌کربنات سدیم یا آهک)
نیاز به فضا	کم	زیاد	زیاد	متوسط؛ فضای انبارش جاذب و پسماند جامد
تولید پسماند	تخلیه مستقیم به دریا	جمع‌آوری و تخلیه در بندر	بسته به حالت عملیاتی	جاذب جامد مصرف‌شده (بدون پساب مایع)
محدودیت عملیاتی اصلی	وابسته به قلیائیت آب دریا؛ ممنوع در برخی بنادر	نیاز به امکانات پذیرش پسماند در بندر	پیچیدگی سیستم بیشتر	کارایی حذف آلاینده کمتر نسبت به انواع مرطوب
دوره بازگشت سرمایه	کوتاه‌ترین	طولانی‌ترین	متوسط	گزارش نشده
سهم در ناوگان جهانی (۲۰۲۴)	۸۶٪	۱٪	۱۳٪	ناچیز

نکته قابل توجه در خصوص سیستم های هیبریدی این است که اگرچه نصب سیستم هیبریدی هزینه بر است، اما این سیستم می تواند با بهره گیری از سوخت های ارزان یا سوخت هایی با عیار پایین، برای مدت طولانی تری بدون نقض مقررات زیست محیطی کار کند. با این حال، به دلیل تغییرات ساختاری، این سیستم به فضای ذخیره سازی بیشتری برای مواد شیمیایی و افزودنی ها و همچنین مخازن و پمپ ها نیاز دارد. این سیستم دارای خطر بالای رسوب گیری و خورندگی لوله ها نیز می باشد [۲۷].

۶- اثرات زیست محیطی نصب سیستم اسکرابر اگزوز

۶-۱- کاهش آلودگی هوا

تحقیقات نشان داده که اثر بخشی اسکرابر در کاهش آلاینده های SOx مستقیما با عواملی مانند نوع سوخت مصرفی و شرایط عملیاتی کشتی ارتباط دارد. کشتی هایی که از سوخت HFO با محتوای گوگرد ۲/۶٪ همراه با اسکرابر استفاده می کنند در مقایسه با کشتی هایی که از MGO با محتوای گوگرد ۰/۰۷٪ بهره می برند، حدود ۳۱٪ کمتر دی اکسیدگوگرد (SO_2) تولید می کنند. با این همه، هنگام استفاده از HFO با اسکرابر، به جای MGO، انتشار ذرات معلق تقریبا ۷۰٪ بیشتر است، بعلاوه انتشار کربن سیاه نیز ۸۱٪ افزایش می یابد که دلیل آن احتراق ناقص هیدروکربن های موجود در HFO می باشد، زیرا محتوای آروماتیک و ویسکوزیته ی بالاتر HFO منجر به احتراق ناقص و تشکیل ذرات کربنی بیشتر، در مقایسه با MGO می‌شود [۲۸ و ۳۳]. بنابراین وقتی صحبت از کاهش انتشار کلی آلودگی هوا، در نتیجه ی ورود ذرات معلق می شود، اسکرابرها به اندازه استفاده از MGO یا ULSF موثر نیستند. با این حال، در کاهش انتشار دی اکسیدکربن، گوگرد و نیتروژن موفق و موثر بوده اند. مقایسه ی انتشار دی اکسیدکربن بین HFO و MGO، هر دو همراه با اسکرابر، نشان می دهد که انتشار دی اکسیدکربن در حالت استفاده از سوخت HFO، ۴٪ بیشتر است [۲۹].

۶-۲- آلودگی آب و تاثیر آن بر اکوسیستم دریایی

تخلیه آب شستشوی اسکرابر سیستم حلقه باز، بر اکوسیستم دریایی تاثیر منفی می گذارد. معمولا ارگانیسم های دریایی با تغییرات سطح pH آب آسیب می بینند، به عنوان مثال صدف ها، زمانی که آب خیلی اسیدی یا خیلی قلیایی باشد آسیب می بینند. این امر، تعادل اکوسیستم های دریایی را مختل می کند. فلزاتی مانند نیکل، سرب و مس به عنوان بخشی از آب تخلیه در دریا رسوب می کنند. آب دریا در حال شستشو از گازهای داغ خروجی، گرما دریافت می کند و در نتیجه، دما را نیز افزایش می دهد، سپس این آب گرم در دریا تخلیه شده و باعث ایجاد شوک حرارتی در ارگانیسم ها و همچنین تاثیر بر تعادل حرارتی دریا می گردد. تخلیه طولانی مدت آب اسکرابر به دریا در مدت زمانی معین، ممکن است باعث جهش DAN در موجودات دریایی و همچنین رفتار آنها شود. قرار گرفتن طولانی مدت در معرض این تغییرات، گونه های مختلف حساس را تحت استرس یا آسیب قرار می دهد. بنابراین نظارت بر دما و pH آب شستشو هنگام تخلیه،

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]

برای کاهش تاثیر منفی آن بر اکوسیستم دریایی ضروری است. از اینرو، دستورالعمل سازمان جهانی دریانوری، حد pH را ۶/۵ برای آب شستشو تعیین می کند و نباید دمای آب تخلیه از ۶۰°C تجاوز کند [۲۸].

مطابق تعریف، تیرگی، به میزان شفاف نبودن آب اطلاق می شود. تیرگی در آب شستشوی اسکرابر به دلیل شستشوی خاکستر گازهای خروجی و رسوبات یا ذرات معلق، بسیار زیاد است. تیرگی بالا در دریا، با کاهش یا مسدود کردن مقدار نوری که به آب دریا می رسد، ضمن کاستن از توانایی گیاهان دریایی برای فتوسنتز، بینایی برخی از گونه ها را نیز تحت تاثیر قرار می دهد. همچنین وجود رسوبات گازهای خروجی در آب، این قابلیت را دارد که آبشش ماهی ها را مسدود کرده و بر تنفس آنها نیز تاثیر منفی بگذارد. لذا سطح تیرگی باید کنترل شود تا از اثرات منفی آن بر موجودات دریایی جلوگیری گردد. بدین منظور، با استفاده از روش های مناسب فیلتراسیون یا ته نشینی، میتوان در اسکرابرها، تعداد ذرات معلقی که در آب شستشو آزاد می شوند را کاهش داد. بر اساس قوانین IMO، افزایش تیرگی آب شستشو، بعد از فرآیند تمیزکردن گازهای خروجی، نباید بیش از 25 FNU باشد [۲۰].

علاوه بر موارد فوق الذکر، هیدروکربن های آروماتیک چند حلقه ای (PAH) در آب شستشوی خروجی از اسکرابر، برای حیات موجودات دریایی مضر هستند. PAHها پس از تخلیه در اقیانوس در رسوبات دریایی جمع می شوند که پیامدهای منفی زیادی دارند. با قرار گرفتن در معرض غلظت های بالای PAH، موجودات دریایی عواقب منفی زیادی را متحمل می شوند، از جمله آسیب در DNA، مشکلات تولید مثل و ناهنجاری های رشدی؛

علاوه بر این، PAH ها از طریق تجمع زیستی در زنجیره غذایی ماهی ها، پستانداران دریایی و همچنین سایر منابع غذایی دریایی را به خطر می اندازند [۲۹]. برای کاهش انتشار PAHها و تاثیرات آنها بر اکوسیستم های دریایی، رعایت دقیق مقررات زیست محیطی، نظارت کارآمد و تصفیه مناسب آب شستشوی اسکرابر، ضروری است و کشتی هایی که محدودیتهای تخلیه آب شستشوی اسکرابر را نقض می کنند مشمول جریمه های سنگینی خواهند شد و یا اینکه از دسترسی به بنادر محروم می گردند.

۷- ارزیابی اقتصادی بکارگیری اسکرابر در کشتی ها

نتایج این تحقیق، تا بدین جا، مشخص کرد که اسکرابرها می توانند به طور کارآمدی محتوای گوگرد در اگزوز را به سطوح انطباق مورد نیاز کاهش دهند؛ همچنین آنها جایگزین مناسبی برای راه حل تغییر سوخت می باشند. با این حال، تمرکز بر اثرات زیست محیطی این تجهیزات نشان داد که علیرغم مزایای فنی قابل توجه، نگرانی هایی در مورد تأثیر تخلیه ی آب شستشوی اسکرابر بر محیطزیست دریایی مطرح شده است که در بخش های پیشین به تفصیل مورد بحث قرار گرفت.

با افزایش نفوذ اسکرابرها و با سرمایه گذاری های مورد نیاز در صنعت پالایش برای تولید نفت کوره کم گوگرد (LSFO)، انتظار می رود که به تدریج از رشد شدید تقاضای گازوئیل کاسته شود. براساس گزارش انجمن بین المللی صنعت بانکرینگ، شرکت BP در پی نصب اسکرابر بر روی چند فروند نفتکش اعلام کرده است که ارزانترین راه جهت رعایت الزامات IMO2020، نصب اسکرابر روی کشتی هاست. طبق پیش بینی های انجام شده، در میان مدت، رشد قابل توجهی در تعداد ناوگان مجهز به اسکرابر مشاهده خواهد شد. به طوری که تعداد کشتی های دارای اسکرابر از ۶۵۰ فروند در سال ۲۰۱۸ به حدود ۱۳۲۰ در سال ۲۰۲۲ رسیده است [۱]. با این همه، سوالی که مطرح می گردد و لازم است که بطور واضح پاسخ داده شود، این است که آیا نصب اسکرابر از منظر اقتصادی مقرون به صرفه است یا نه؟

در سطح جهانی، تا اواسط سال ۲۰۲۴، نزدیک به ۶۰۰۰ کشتی تجاری نسبت به نصب اسکرابر اقدام کرده اند [۳۰]. با این حال، ممکن است با توجه به مقررات جدید تعیین شده توسط IMO، برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از حمل و نقل بین‌المللی به نزدیک صفر، تا سال ۲۰۵۰، در میان مدت شاهد تغییراتی در روند رو به رشد استفاده از این تجهیزات باشیم. بنابراین اهمیت توجه به موضوعات زیست محیطی در خصوص بهره گیری از اسکرابرها، بایستی در مطالعات اقتصادی نیز گنجانده شود و هزینه های تخریب محیط زیست در نتیجه ی تخلیه آب پسماند سیستم تمیزکننده گازهای خروجی در محاسبه ی سود و زیان و مدت زمان بازگشت سرمایه، در نظر گرفته شود.

هرمنسون و همکاران [۳۱] در سال ۲۰۲۴ در مطالعه ای که نتایج آن در مجله معتبر Nature Sustainability به چاپ رسید، وضعیت نصب انواع اسکرابرها در کشتی ها را از منظر اقتصادی مورد ارزیابی قرار دادند. تحقیق مذکور، ۳۸۱۸ کشتی را که در آنها انواع اسکرابر نصب شده بودند، شامل می شد که از این تعداد، ۳۲۸۳ کشتی (۸۶٪) دارای اسکرابر حلقه باز، ۵۰۲ کشتی (۱۳٪) مجهز به سیستم هیبریدی و تنها در ۲۸ مورد از کشتی ها (۱٪)، اسکرابر حلقه بسته نصب شده بود.

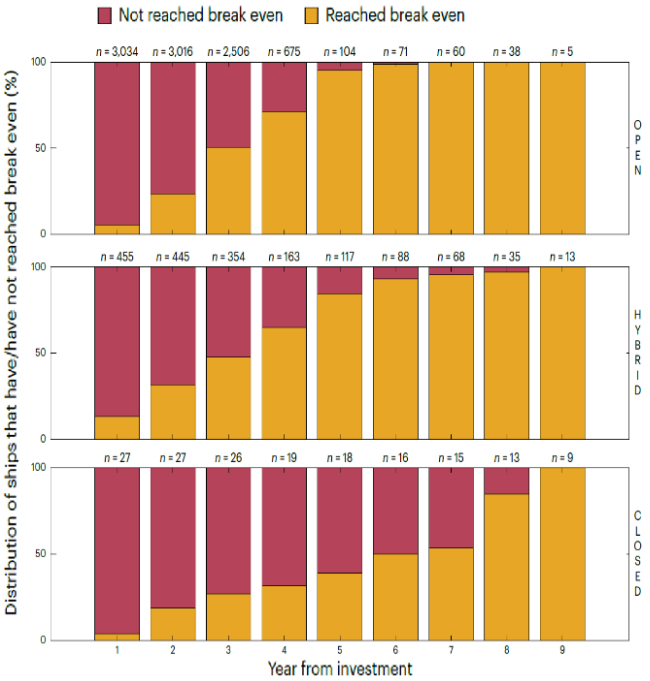
تا پایان سال ۲۰۲۲، ناوگان کشتی هایی که مابین سالهای ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ بر روی آنها اسکرابر نصب گردیده بود، به لطف وجود اسکرابر و امکان بهره گیری از سوخت HFO به جای سوخت های گرانتر مانند MGO و یا VLSFO بالغ بر ۴/۷ میلیون یورو (۲۰۱۹€) تراز مالی مثبت داشته اند. همچنین، در طول ۵ سال اول پس از نصب تجهیزات تمیزکننده گازهای خروجی، بیش از ۹۵٪ از کشتی های مجهز به سیستم اسکرابر حلقه باز، به نقطه سر به سر اقتصادی رسیده اند (شکل ۱۲). در این بین، حتی در ۱۳٪

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]

از این کشتی ها، مدت زمان بازگشت سرمایه، کمتر از ۱ سال بوده است و این بدین معنی است که در همان سال اول نصب اسکرابر، هزینه سرمایه گذاری، به مالک کشتی بازگشته است.

مدت زمان بازگشت سرمایه به پارامترهای زیادی بستگی دارد که در این خصوص می توان به نوع اسکرابر، قیمت سوخت مصرفی و نرخ سوخت مصرفی اشاره کرد. با این توضیح که میزان سرمایه اولیه، به نوع اسکرابر وابسته است و هزینه خرید تجهیزات، مستقیما به نوع طراحی اسکرابر انتخابی و شرکت سازنده آن بستگی دارد و ناگفته پیداست که هزینه اولیه بالاتر، در مدت زمان طولانی تری نیز باز خواهد گشت. از طرفی، بالا بودن قیمت سوخت مصرفی، قبل از نصب اسکرابر، می تواند میزان پول ذخیره شده، در نتیجه ی نصب اسکرابر، را افزایش دهد که این مبلغ، در ارزیابی های اقتصادی، به مثابه درآمد تلقی شده و لذا بالا رفتن میزان آن، مدت زمان بازگشت سرمایه را کاهش خواهد داد. بدین معنی که جایگزینی سوخت ارزان قیمت با سوخت گران قیمت قبلی، سود بیشتری را عائد مالکین کشتی خواهد کرد.

ناگفته نماند که هرمنسون و همکاران بازگشت سرمایه را عمدتاً بر مبنای اختلاف قیمت سوخت بین HFO و VLSFO/MGO محاسبه نموده اند و میزان لحاظ شدن اجزای کامل هزینه‌های عملیاتی (OPEX) - از جمله انرژی پمپاژ، دوز مواد شیمیایی و دفع پسماند - در محاسبات بازگشت سرمایه آن‌ها نامشخص است.



شکل ۱۲- مدت زمان بازگشت سرمایه ی نصب اسکرابر، بر حسب نوع طراحی (تعداد کشتی های مورد مطالعه=n) [۳۱]

همانند تحلیلی که در ارتباط با قیمت سوخت مصرفی صورت پذیرفت، در مورد نرخ سوخت مصرفی نیز می توان چنین عنوان کرد که بالا بودن نرخ مصرف سوخت در زمان استفاده از اسکرابر، منجر به افزایش سود حاصل از جایگزینی سوخت خواهد شد. از اینرو، نرخ بالای مصرف سوخت، که عمدتا به معنی بزرگتر بودن موتور کشتی می باشد، زمان بازگشت سرمایه را کوتاه تر می کند. بنابراین در کشتی های بزرگ، که سوخت مصرفی آنها قبل از نصب اسکرابر، سوخت با کیفیتی بوده است، در صورت نصب اسکرابرهای حلقه باز، که هزینه خرید نسبتا پایین تری دارند، زمان بازگشت سرمایه بسیار کوتاه خواهد بود. اما در کشتی هایی که از سیستم حلقه بسته و یا هیبریدی بهره می برند، بدلیل بالاتر بودن هزینه سرمایه گذاری اولیه و هزینه های مربوط به تصفیه پسماند، مدت زمان بازگشت سرمایه، بالاتر تخمین زده می شود.

شایان ذکر است که ارزیابی سودآوری بلندمدت اسکرابر نمی‌تواند صرفاً بر اختلاف قیمت سوخت (HFO در برابر VLSFO/MGO) متکی باشد و برای رسیدن به نتایجی دقیقتر و واقع بینانه تر، باید هزینه‌های عملیاتی و نگهداری (OPEX)، مانند هزینه‌های انرژی، هزینه مواد شیمیایی، تعویض فیلتر و تعمیرات و هزینه دفع پسماند، به‌صورت مستقل محاسبه و از صرفه‌جویی سوخت کسر شوند.

نکته دیگری که بایستی به آن اشاره کرد بحث عدم قطعیت در قیمت‌های آینده سوخت (اختلاف قیمت HFO و VLSFO) است که می‌تواند محاسبات بازگشت سرمایه را تحت تأثیر قرار دهد. از اینرو و برای روشن‌تر شدن میزان حساسیت دوره بازگشت سرمایه نسبت به اختلاف قیمت سوخت، تحلیل حساسیتی برای یک شناور نمونه با مصرف سوخت تقریبی ۵۸ تن در روز و توان پمپ اسکرابر حدود ۳۵ کیلووات انجام شد. نتایج این تحلیل در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ ـ حساسیت دوره بازگشت سرمایه اسکرابر نسبت به اختلاف قیمت HFO–VLSFO

سناریو	اختلاف قیمت HFO–VLSFO (تن/$)	دوره بازگشت سرمایه تقریبی (سال)
بدبینانه	۱۰۰	۷–۵
پایه (مبنا)	۱۸۰–۱۵۰	۵–۳
خوش‌بینانه	+۲۵۰	۳–۱

این تحلیل بر اساس چارچوب اقتصادی گزارش‌شده توسط هرمانسون و همکاران [۳۱] انجام شده است که ۳۸۱۸ شناور را بررسی کرده اند. همچنین این ارقام با داده‌های بازار گزارش‌شده توسط Ship & Bunker (مرجع [۷]) سازگار است و محدوده اختلاف قیمت‌های مشاهده‌شده بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ را پوشش می‌دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]

۷-۱- هزینه عدم ایجاد محـدودیت بـر روی اسـکرابرها در دریای بالتیک

تعداد کشتی های مجهز به اسکرابر در دریای بالتیک، مابین سالهای ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲، همواره در حال افزایش بوده است و در سال ۲۰۲۰ و همزمان با ابلاغ مقررات IMO2020 با تعداد ۹۵۷ کشتی، به اوج خود می رسد. با افزایش تعداد ناوگان مجهز به سیستم اسکرابر، در دریای بالتیک، میزان مصرف سوخت HFO نیز در این مناطق تحت کنترل سولفور (SECA)، بیشتر می شود و در نتیجه، آب شستشوی تخلیه شده به دریا نیز افزایش چشمگیری پیدا می کند. به گونه ای که از سال ۲۰۱۵، ۳/۲ میلیون مترمکعب آب از سیستم های باز و ۰/۴ میلیون مترمکعب از سیستم های بسته در دریای بالتیک تخلیه می شود. لازم بذکر است که ٪۸۰ از حجم آب شستشوی تخلیه شده، از سال ۲۰۱۹ به بعد وارد آب های دریای بالتیک شده است.

هرمنسون و همکاران [۳۱] بر اساس نتایج تحقیقات هویجبرگتس و همکاران [۳۲] و با نرخ گذاری بر آسیب های زیست محیطی، نشان دادند که هزینه تخریب محیط زیست، در نتیجه ی تخلیه هر مترمکعب از آب شستشوی اسکرابر حلقه باز در دریای بالتیک برابر 0.21±0.07 €2019/m3 می باشد. این ضریب بر اساس حجم تخلیه گزارش‌شده طی بازه ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ (حدود ۲/۳ میلیون مترمکعب از سیستم‌های حلقه‌باز و ۰/۴ میلیون مترمکعب از سیستم‌های حلقه‌بسته) به هزینه کل تقریبی ۶۸۰ میلیون یورو (€2019) منجر می‌شود. این برآورد بر مبنای مدل قیمت‌گذاری آسیب دریایی[1] محاسبه شده که غلظت فلزات سنگین و اسیدیته پساب را به هزینه اکولوژیک تبدیل می‌کند. همچنین، تخمین صورت گرفته، صرفاً اثرات مستقیم تخلیه آب شستشو را در بر می‌گیرد و هزینه‌های ناشی از حمل و تصفیه پسماند در سیستم‌های حلقه‌بسته، مصرف انرژی اضافی و مواد شیمیایی را شامل نمی‌شود؛ از اینرو، رقم گزارش‌شده یک کران پایین از هزینه واقعی زیست‌محیطی محسوب می‌شود. بنابراین می توان تخمین زد که در اثر عدم ایجاد محدودیت بر سیستم های اسکرابر باز، هزینه های زیادی بر محیط زیست دریای بالتیک تحمیل شده است.

۸- نتیجه گیری

در نتیجه ی استفاده از تجهیزات کاهش انتشار آلاینده ها، مانند اسکرابرها و رعایت آخرین قوانین و آیین نامه های بین المللی، توسط صنعت کشتیرانی، شاهد کاهش چشمگیر میزان آلاینده های منتشر شده در جو و محیط زیست دریایی هستیم. با این حال، اثرات تخلیه ی آب شستشوی اسکرابر بر اکوسیستم دریایی، تنوع زیستی و فرآیندهای بیوژئوشیمیایی به طور کامل شناخته نشده است. به طور خاص، اطلاعات کافی در مورد حجم و ترکیب تخلیه آب شستشو و اثرات مربوطه بر زیست دریایی وجود ندارد. لذا به جهت انجام تحقیقات تکمیلی، لازم است که مطالعات آتی در حوزه‌های اثرات اکولوژیک بلندمدت، تجمع رسوبات PAH در بسترهای دریایی و اثرات زیست‌محیطی در زیستگاه های ساحلی، صورت پذیرد. در این مقاله، چهار نوع مختلف از اسکرابرها، مرور و ارزیابی شدند که مالکان کشتی ها می توانند یک یا ترکیبی از آن سیستم ها را برای نصب روی خروجی موتورها، به منظور کاهش انتشار گوگرد، دی اکسیدنیتروژن و دی اکسیدکربن انتخاب کنند. در نگاه کلی، می توان گفت اسکرابر مرطوب حلقه بسته تنها مورد از این چهار نوع است که واقعا دوستدار محیط زیست است زیرا تا زمانی که پسماند پس از جمع آوری در بنادر تصفیه شوند، هیچ انتشاری در هوا یا آب ایجاد نمی کند. از طرفی لازمه رعایت کردن مقررات کنوانسیون MARPOL 73/78 و IMO2020 جایگزینی سوخت هایی با درصد گوگرد بالا با سوخت های با کیفیت تر و درصد گوگرد پایین تر است که این راه حل نیاز به صرف هزینه بیشتری دارد. همچنین مطالعات اقتصادی صورت گرفته در خصوص اسکرابر نشان می دهند که در ٪۹۵ از موارد، پنج سال بعد از نصب تجهیزات تمیزکننده گازهای خروجی، سرمایه گذاری اولیه برگشته و به نقطه سربه سر اقتصادی می رسند. با این حال، هزینه تخریب محیط زیست دریایی، در نتیجه تخلیه آب شستشوی سیستم های باز در دریای بالتیک (۲۰۲۲-۲۰۱۴)، بالغ بر ۶۸۰ میلیون یورو (€2019) بوده است. جایگزین دیگر اسکرابرها، استفاده از سوخت هایی با میزان گوگرد بسیار پایین است که البته قیمت بسیار بالاتری دارند.

نتایج نشان می‌دهد که جذابیت اقتصادی اسکرابرها (صرفه جویی های صورت گرفته در برابر هزینه پمپاژ روزانه)، عمدتاً از منظر مالکان کشتی و بدون در نظر گرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی خارجی محاسبه شده است. با افزودن هزینه زیست‌محیطی برآورد شده (نظیر ۶۸۰ میلیون یورو آسیب به دریای بالتیک طی سالهای ۲۰۲۲-۲۰۱۴)، مزیت اقتصادی سیستم‌های حلقه‌باز به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. بنابراین، توجیه‌پذیری اقتصادی و پذیرش زیست‌محیطی دو معیار مستقل‌اند و سیستم‌های حلقه‌باز، حلقه‌بسته و هیبریدی نباید معادل یکدیگر در نظر گرفته شوند.

۹- مراجع

1- Research Center of the Islamic Consultative Assembly, Deputy for Infrastructure Research and Production Affairs, (2019) "*Investigation of the effects of implementing the new regulations of the International Maritime Organization, known as IMO2020, on the global markets of crude oil and*

[1] Marine Damage Cost Pricing

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]

petroleum products and the oil refining industry in the world and Iran," Serial No. 16722, (In Persian)

2- Vedachalam, S., Baquerizo, N., Dalai, A. K. (2022) "*Fuel: Review on impacts of low sulfur regulations on marine fuels and compliance options*" J. of Fuel, 310: 122243. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122243

3- Bilgili, L. (2021) "*Life cycle comparison of marine fuels for IMO 2020 Sulphur Cap*" Science of the Total Environment, 774. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145719

4- The environment committee of the European Parliament (25th Jan 2012) "*Sulphur in marine fuels*" Retrieved on 1st Dec 2024 from https://www.transportenvironment.org/discover/sulphur-marine-fuels

5- Wankhede, A. (2020) "*A Guide to Marine Gas Oil and LSFO Used on Ships*" Retrieved from https://www.marineinsight.com/guidelines/a-guide-to-marine-gas-oil-and-lsfo-used-on-ships

6- Vermeire, M., B. (Aug 2021) "*Marine products: Everything you need to know about marine fuels*" Retrieved from https://www.chevronmarineproducts.com/content/dam/chevro

7- Word Bunker Prices, https://shipandbunker.com/prices

8- MARPOL/Annex 6/ Regulations 3, 8, 9, 14.

9- International Energy Agency (IEA), (2024) "*World Energy Outlook"*

10- IMO/IMO2020/ https://www.imo.org/en/mediacentre/Pages/Default.aspx

11- U.S. Energy Information Administration (EIA), 2019.

12- Hoomun Pooyan International Shipping Co. ltd. (26th Sep. 2024), "*Challenges of ship scrubber installation*", Retrieved from https://shipping.zingapp.org/articles/?lang=fa&id=10867.

13- Exhaust Gas Cleaning Systems Association (EGCSA), (26th Sep. 2024*) "what is an exhaust gas cleaning system*", Retrieved from https://www.egcsa.com/technical-reference/what-is-an-exhaust-gas-cleaning-system/

14- "*What is a dry scrubber, and how does it work*" (2019, Dec 7th), Retrieved from https://teral-aerotech.com/what-is-a-dry-scrubber-and-how-does-it-work/

15- Hesketh, D.H., Schifftner, C.K. (2017) "*Wet scrubbers (2nd ed.)*" *CRC Press*.

16- Babicz, J. (2015) "*Ship systems and machinery" Baobab Naval Consultancy*".

17- Hee, D., Fisher, K. (2023) "*What is a wet scrubber*" CECO environmental.

18- O'Donnell, D. (2021) "*Wet scrubber and industrial application*" Senorex, Retrieved from https://sensorex.com/wet-scrubbers/

19- DNV, Maritime impacts (18th Oct 2018) "*Scrubbers at glance*", Retrieved from https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Scrubbers-at-a-glance.html

20- Comer, B. (18th Jun 2020) "*Scrubber on ships: Time to close the open loop (hole)*" Retrieved from https://theicct.org/scrubbers-on-ships-time-to-close-the-open-loophole/

21- Evans, P. (2015) "*Density of metals: Density of common metals*", The Engineering Mindset.

22- Moe, G. (24th Mar. 2020) "*Onboard with marine scrubbers: Resilient solutions for lower emissions*", Retrieved from https://nickelinstitute.org/en/blog/2020/march/onboard-with-marine-scrubbers

23- Dey, A. K. (2021) "*What are industrial scrubbers: Their working, types, and advantages*", Retieved from https://whatispiping.com/industrial-scrubbers-types-dry-wet-scrubbers/

24- Jee, J. (2022) "*Hybrid multi-criteria decision-making for marine SOx scrubber systems*" J. Marine Science Engineering, 10 (11). https://doi.org/10.3390/jmse10111599

25- Sargun, S. (2021) "*A guide to scrubber system on ship*" Retrieved from https://www.marineinsight.com/tech/scrubber-system-on-ship/

26- Gerwick, B.C. (2007) "*Construction of marine and offshore structures (Third edition)*" Taylor & Francis.

27- Hutchinson, K., Ravel, B. (2020) "*Meeting the material and coatings challenges posed by scrubbers*" Retrieved from https://www.safinah-group.com

28- Moldanová, J., Fridell, E., Winnes, H. (2020) "*Effects of marine exhaust gas scrubbers on gas and particle emissions*" J. Marine Science Engineering , 8(4), 299. https://doi.org/10.3390/jmse8040299

29- Osipova, L., Georgeff. E, Comer. B. (2020) "*Air emissions and water pollution discharges from ships with scrubbers*", Retrieved from https://theicct.org/publication/air-emissions-and-water-pollution-discharges-from-ships-with-scrubbers

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]

30- "*Shipping, Trade Data Analysis, and Research*", 1st Jan. 2025, Retrieved from https://www.clarksons.com/research/shipping-trade

31- Lunde Hermansson A., Hassellöv I.M, Grönholm, T., Jalkanen J.P, Fridell, E., Parsmo, R., Hassellöv J., Ytreberg, E. (2024) "*Strong economic incentives of ship scrubbers promoting pollution*" J. of Nature Sustainability, Volume 7, 812–822, https://doi.org/10.1038/s41893-024-01347-1

32- Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F. et al., (2017) "*ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level*" Int. J. Life Cycle Assess., V22, 138–147. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y

33- Lack, D. A., Corbett, J. J. (2012) "*Black carbon from ships: a review of the effects of ship speed, fuel quality and exhaust gas scrubbing*" Atmospheric Chemistry and Physics, 12(9), 3985–4000. https://doi.org/10.5194/acp-12-3985-2012

34- Melchers, R.E. (2003) "*Probabilistic model for marine corrosion of steel for structural reliability assessment*" Journal of Structural Engineering, 129(11), 1484-1493. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:11(1484)

35- Revie, R.W., Uhlig, H.H. (2008) "*Corrosion and Corrosion Control*" John Wiley & Sons.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]