



## ربات های زیر آبی تمیز کاری خزّه از شناورها: طراحی و ارزیابی سیستم؛ ص ۹۷-۱۱۲

فرهود آذر سینا<sup>۱</sup>

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۵

### چکیده

یکی از هزینه های اضافی که به خدمات دریایی تحمیل می شود، هزینه تمیز کاری بدنه زیرین شناورها از جانورانی است که به بدنه می چسبند. بعلاوه، در اثر رشد این خزّه و جلبک و جانوران روی بدنه، اصطکاک میان آب و بدنه قایق یا کشتی در حرکت افزایش یافته و در نتیجه هزینه سوخت اضافی به ناوگان دریایی تحمیل می گردد. رشد خزّه و جانوران اثر شدیدی بر افزایش نیروی پسای اصطکاکی بدنه دارد که میزان این افزایش وابسته به نوع ارگانیسم ها و مساحت پوشش آنها و نیز شکل بدنه شناور و سرعت عملیاتی آن است. در این تحقیق اطلاعات مربوط به انواع ربات های تمیز کاری بدنه قایق و کشتی جمع آوری شده است. در این مطالعه، تعداد زیادی از پروژه های مرتبط با ربات تمیز کاری بدنه و مشخصات اساسی آنها شامل قیمت، نحوه اتصال به بدنه و سیستم تمیز کاری ربات بررسی شده است. نیاز به ساخت ربات خزّه زدا در داخل کورتینر وجود دارد. نتایج این تحقیق نشان دهنده وضعیت موجود این فناوری، چالش ها و فرصت ها و در مجموع نقطه شروعی به کار برای ایجاد این ربات های زیرسطحی در داخل است.

**واژگان کلیدی:** ربات زیر آبی؛ تمیز کاری بدنه شناور، خزّه زدا؛ امکان سنجی ساخت ربات

## مقدمه و بیان مسأله

در کشتی های تجاری، قایق ها، شناورهای تفریحی و نظامی فولینگ<sup>۱</sup> عبارت از رشد ناخواسته زیستی بر روی سطوح باز زیرین این سازه ها است. پیامد بلاواسطه این رشد زیستی آن است که جریان آب روی سطوح مغشوش و درگ هیدرودینامیکی زیاد می شود: هر چه فولینگ شدیدتر باشد، افزایش درگ بیشتر است (آذر سینا، ۱۳۹۷: ۱۴).

این افزایش درگ منجر به کاهش مانورپذیری شناور و افت سرعت شده و یا برای رسیدن به سرعت قبلی باید توان موتور اضافه شود. در هر حالت افت سرعت و مصرف توان اضافه به معنای افزایش مصرف سوخت و بنابراین تحمیل هزینه عملیاتی و صدور گازهای آلاینده است.

پیامدهای منفی فولینگ و مزایای بدنه تمیز هزاران سال شناخته شده بوده است. پلوتارش<sup>۲</sup> در قرن نخست میلادی (آذر سینا، ۱۳۹۷: ۱۹) نوشته که "یک شناور به سبکی روی آب سر می خورد و تا زمانی که بدنه آن تمیز باشد به آسانی امواج را می شکافد؛ وانگهی، اگر زمانی بگذرد و خزه و لجن به کناره های بدنه بچسبد، حرکت شناور ضعیف و مختل میشود، و آب که به این بدنه کرخت می رسد راحت از آن جدا نمی شود، و به همین خاطر است که معمولاً کناره ها را می سابند و بدنه را تمیز نگه می دارند."

در حال حاضر معلوم گشته است که تاثیر رشد جانوران سخت روی سطح بدنه بدتر از خزه نرم است و مطالعات آزمایشگاهی، میدانی و بر روی کشتی با ابعاد واقعی به منظور درک فولینگ صورت پذیرفته اند، مثلاً منابع را ملاحظه فرمایید. (دور و دیگران: ۲۰۰۴؛ لت وات<sup>۳</sup> و دیگران: ۱۹۸۵؛ شولتز<sup>۴</sup>: ۲۰۰۴)

فولینگ اثر شدیدی بر افزایش درگ اصطکاکی بدنه دارد که میزان این افزایش وابسته به بیولوژی (نوع ارگانسیم ها و مساحت پوشش آنها) و نیز فرم بدنه شناور و سرعت عملیاتی آن است. به عنوان مثال یک شناور نظامی آمریکا که با سرعت ۳۰ نات حرکت میکند (۱۵٫۴ متر بر ثانیه) باید ۵۵٪ افزایش توان موتور بدهد تا بر درگ ناشی از فولینگ جانوران سخت غلبه نماید و یا در غیر اینصورت با ۱۰٫۷٪ افت سرعت مواجه خواهد شد (شولتز، ۲۰۰۴).

در زمان باستان از واکس، موم، قیر و لعاب سرب در اصل به منظور آب بند کردن بدنه

1 archPlut  
2 Durr et.all  
3 Lethwaite  
4 Schultz

استفاده می‌شد و متعاقباً رشد خزّه و جانوران نیازمند تمیزکاری مداوم بوده است (آذر سینا، ۹۷: ۱۳). این روزها اما بدنه کشتی های تجاری بوسیله رنگهای مخصوص برای جلوگیری از تجمع و رشد جانوران و خزّه پوشیده میشود. این رنگهای مدرن در دو دسته عملکردی تقسیم میشوند: رنگهای ضد خزّه بیوسیدی که بر اساس عوامل شیمیایی سمی مانع استقرار خزّه هستند؛ پوشش های غیر بیوسیدی رهاسازی خزّه FRC که از انرژی سطح استفاده مفید نموده تا چسبندگی جانوران را حداقل و جدا شدن آنها در جریان آب را تسهیل نمایند.

موضوعات مربوط به ربات های زیرسطحی در سطح نسبتاً گوناگونی در کشور مورد توجه بوده و حدود دو دهه است که پایان نامه ها و پژوهش های کاربردی در این حوزه تدوین شده اند. بسیاری از این تحقیقات از چند مرکز مهم در کشور منشأ گرفته و البته دانش آموختگان این مراکز اکنون در سایر پژوهشکده ها یا شرکت های دانش بنیان مشغول به کار هستند. (جدول شماره یک را ملاحظه کنید).

جدول ۱: برخی مراکز دانشگاهی داخل کشور مرتبط با ربات های زیرسطحی

ردیف	مرکز	اقدامات
۱	آزمایشگاه دریا دانشگاه صنعتی شریف	این مرکز از اواخر دهه ۷۰ شمسی در دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شریف فعال شده و تا کنون تحقیقات زیادی در ارتباط با ربات های زیرسطحی در این مرکز صورت گرفته از جمله مدل سازی دینامیک زیرسطحی و کنترل فازی حرکات زیرسطحی که توسط نگارنده به ترتیب در سالهای ۱۳۸۳ و ۱۳۸۴ تالیف شده و در کتابخانه مرکزی دانشگاه موجود است. از جمله تحقیقات کاربردی، ساخت ربات ROV با همکاری آزمایشگاه رباتیک بوده است که در دهه ۸۰ خاتمه یافت.
۲	دانشکده مهندسی دریا دانشگاه صنعتی امیرکبیر	این دانشکده یکی از مراکز اصلی برای تربیت نیروهای متخصص در حوزه صنایع دریایی بوده و با داشتن استادان مجرب برای توسعه فناوری زیرسطحی اقدام می نماید.
۳	مجتمع زیرسطحی دانشگاه مالک اشتر شاهین شهر	این مجموعه یکی از کامل ترین نیروهای تخصصی در حوزه زیرسطحی در کشور را داراست و البته طرح های کاربردی با اهداف نظامی سرفصل اصلی این مرکز می باشند.
۴	پژوهشکده زیردریا دانشگاه صنعتی اصفهان	این پژوهشکده با داشتن امکانات پیشرفته تا کنون توانسته دستگاه های اندازه گیری دریایی و حس گرهای زیردریایی را در کشور برای اولین بار تولید نماید و در مجموع تجارب با ارزشی در حوزه زیر دریا دارد.

علی رغم این اوصاف تا کنون اقدام مشخصی برای طراحی و ساخت ربات زیرسطحی خزه زدا در کشور گزارش نشده است. در جدول شماره دو، معیارهای طراحی ربات تمیزکاری شناورها معرفی شده اند.

جدول (۲): معیارهای طراحی ربات تمیزکاری

معیار	دلایل و توضیحات
وزن ربات	وزن ربات مشخص می کند که چه تجهیزات بار داخل آن هست. به علاوه به ابعاد کشتی که مورد تمیزکاری است هم ارتباط دارد گرچه ارتباط اینها مستقیم نیست.
ابعاد ربات	ابعاد ربات مشخص می کند که ربات به چه فضاهایی دسترسی خواهد داشت. همچنین مشخص می کند که ربات چه مقدار خزه زدایی را در توان دارد.
روش اتصال به بدنه	روش اتصال به بدنه های مختلف متفاوت است. همچنین اگر برجستگی یا گشودگی در بدنه باشد باید این موضوع لحاظ گردد.
نیروی اتصال	ربات باید به بدنه شناور بچسبد و متصل بماند تا زمانی که دستوری برای جدا شدن به آن صادر شود.
سرعت تمیزکاری	سرعت تمیزکاری پارامتر بسیار مهمی است از آن جهت که برخی از نمونه ها بسیار کند هستند. برای کشتی های تجاری بزرگ ربات های بزرگ با سرعت تمیزکاری زیاد لازم است.
ابزار تمیزکاری	نوع ابزار تمیزکاری مشخص می کند که ربات چه قدر کارایی دارد. استفاده از آب پرفشار در مقایسه با برس چالش هایی در بر دارد.
حسگرهای موجود روی ربات	برای آنکه نحوه عملکرد ربات مشخص شود باید درباره انواع حسگرهایی که روی آن کار می گذاریم تصمیم گرفته شود.
آیا ربات از فیلتر استفاده می کند؟	بر اساس قوانین کنونی درباره تمیزکاری بدنه داخل آب باید از ریختن رنگ های ضد خزه و نیز جانوران و خزه تمیز شده به داخل آب در حد غیر استاندارد پرهیز گردد.
زمان متوسط کارایی	باید عمر ربات تا قبل از جایگزینی یا تعمیرات اساسی مشخص باشد.
نوع عملکرد ربات (هوشمند، نیمه اتومات، کنترل دستی)	نوع عملکرد ربات وضعیت روزانه ربات در فعالیت های شناور را مشخص می کند. اگر هوشمند باشد کاربرد معمول آن میسر است. اگر دخالت کاربر لازم باشد باید مشخص شود که چه کسی و چگونه این عملیات را بطور معمول انجام خواهد داد.
آیا کابل لازم است؟	کابل برای آنکه ربات مفقود نشود مفید است.
هزینه	مانند هر فناوری پیشرفته ای هزینه بر توانایی ربات موثر است. رباتی که گران باشد باید نتایج عالی در تمیزکاری داشته باشد.

(منبع: شولتز ۲۰۰۷)

## مواد و روش‌ها

پس از آنکه پاسخ به سوالات و موارد جدول شماره دو برای انتخاب ربات تمیزکاری مورد نظر مشخص شد طبیعتاً با در نظر گرفتن اصول هیدرواستاتیک، فرم سازه، هیدرودینامیک و مانور، و نیز نحوه اجرای عملیات تمیزکاری، طراحی ربات پیشرفت خواهد کرد و به تدریج با تعیین جانمایی عمومی و فهرست اقلام و اجزاء می توان به یک محصول نهایی اندیشید. نمونه هایی از ربات تمیزکاری در شکل شماره یک نشان داده شده اند. بعضی از آنها علاوه بر تمیزکاری، کارهای مربوط به بازرسی و پایش سلامت بدنه کشتی را نیز انجام می دهند.



ربات بازرسی و تمیزکاری بدنه کشتی سیبرنتیک



ربات پیشرفته تمیزکاری بدنه کشتی



تیر اصلی کف قایق



تمیزکننده ناوگان

شکل ۱: نمونه از ربات های خزّه زدا

در این بخش اطلاعات مربوط به انواع ربات های تمیزکاری بدنه قایق و کشتی جمع آوری شده است. در جدول شماره سه همچنین ظرفیت فیلتر کردن بیوفولینگ، نحوه اتصال به بدنه و سیستم تمیزکاری ربات گزارش شده است.

جدول (۳): نگاه اجمالی به ربات های تمیزکاری بدنه

نام محصول	شرکت/ توسعه دهنده	نوع عملکرد	فیلتر	نوع اتصال به بدنه	سیستم تمیزکاری
تمیزکننده بدنه کشتی	تمیزکننده بدنه کشتی	نیمه اتومات	بله	توربین	آب پرفشار
تمیزکننده ناوگان	تمیز کننده ناوگان	دستی	بله	آهن ربا	واترجت پرفشار
ربات تمیز کننده بدنه کشتی گریب سی	شرکت پیتون	هوشمند	بله	آهن ربای نئودیمیوم	برس با کارکرد فراصوتی
عملیات سطح بدنه کشتی	خدمات تجاری رانندگی	دستی	لازم ندارد	آهن ربا	شوک حرارتی
ربات بدنه کشتی	ربات بدنه کشتی	دستی	خیر	۳ پروانه	دیسک دوآر تمیزکاری
هال باگ	شرکت ربات های آبی	هوشمند و نیمه اتومات	بله	آهن ربا یا فشار منفی	برس و جت آب
هال تیمو	هال تیمو	دستی	بله	سیستم مکش	برس، غلتک پلی آمید (حوله ای)
پاک کننده بدنه کشتی	شرکت اینوپرون هال شعبه خلیج	دستی	بله	سیستم فشار منفی	دیسک تمیزکننده که آب شور را پمپ می کند
تیر اصلی کف قایق	ایف اس آر ۱	دستی	بله	توربین	خلا توربین، برس لاستیکی و نایلونی
ابزار پاک کننده M6 زیرآبی	ورتیدرایو	دستی	نامشخص	آهن ربا	نازل آب پرفشار
بدنه کشتی مغناطیسی ماهی چسبنده	تکنیپ سبیرنتیک دانشگاه ساوتامپ	دستی	خیر	آهن ربا	شوینده با فشار نامشخص
خفاش راهزن	گروه ای سی ای	نیمه اتومات	نامشخص	پروانه، تسمه موتوردار	جت آب یا برس
ربات زیرآبی تمیز کننده بدنه کشتی	صنعت سنگین سامسونگ	به سفارش	بله	به سفارش	به سفارش
ربات زیر آبی	شرکت دیوون سیستم	هوشمند	نامشخص	پروانه	نامشخص

## طراحی ربات تمیزکاری

طراحی ربات تمیزکاری<sup>۱</sup> HCR یک مساله چند وجهی است و باید چندین مشخصه داشته باشد. برای ناوبری پایدار و انجام تمیزکاری ربات باید چهار درجه آزادی حرکت سرچ، یاء، انتقالی در امتداد قائم و رول داشته باشد. برس های تمیزکاری به راحتی قابل تعویض هستند. پایداری ربات چندان تحت تاثیر بلندی برس ها نیست. تعمیر و نگهداری ربات و تجهیزات آن باید آسان باشد. بنابراین یک سازه باز برای ربات در نظر می گیریم.

در طراحی چیدمان عمومی، یک ربات زیرآبی<sup>۲</sup> ROV باید حد وسط و تعادلی میان راحتی کاربری و پیچیدگی طرح برقرار کرد. وسایل تمیزکاری را می توان روی وجوه بالا، پایین یا چپ و راست ربات تعبیه نمود. مزیت نصب روی وجه بالایی آن است که ربات تقریباً با همان زاویه ای که ناوبری می کند می تواند سطح زیرین کشتی را تمیز کند. فقط برای تمیز کردن سطوح کناری کشتی لازم است که ربات زاویه رول بزرگی به خود بگیرد.

برای آنکه شناوری و پایداری HCR تضمین شود لازم است که مرکز شناوری بالای مرکز جرم قرار گیرد و بدین منظور وزنه هایی در پایین اضافه می شوند. در شکل شماره دو نمای ابتدایی از HCR را ملاحظه می فرمایید. این طرح بر اساس ربات زیر آبی<sup>۳</sup> که در جدول شماره دو معرفی شد انتخاب شده است.

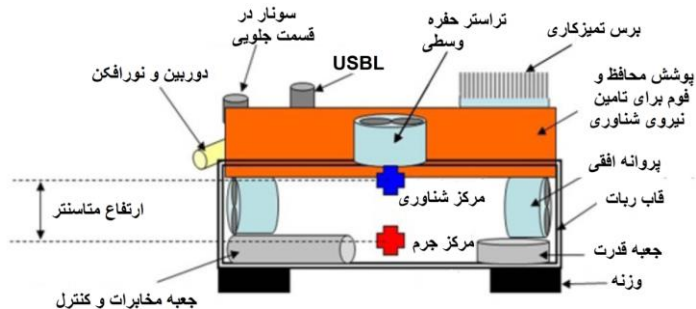
ابعاد ربات در مقایسه با طرح اصلی کشور کره جنوبی که به منظور استفاده در کشتی های تجاری بزرگ طراحی شده است، دو برابر کوچکتر فرض شده بنابراین طول ۸۵، عرض ۵۰ و ارتفاع ربات ۳۴ سانتی متر است.

نیروی محرک برای حرکت ربات با سرعت سه گره دریایی (نات) در نظر گرفته شده که با فرض ضریب درگ ۱،۱ برای این فرم مکعبی، نیروی تراست ۱۲،۵ کیلوگرم برای رسیدن به سرعت مورد نظر لازم است. وزن ربات ۵۰ کیلوگرم در نظر گرفته می شود.

1 (hull cleaning robot)

2 Remotely Operated Vehicle

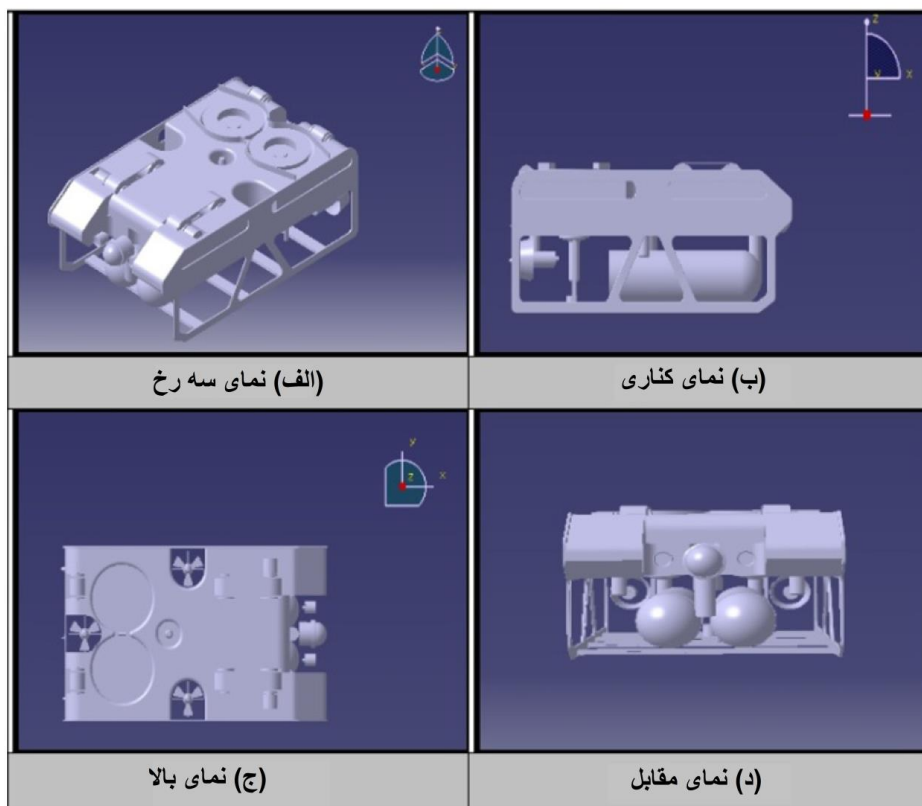
3 Underwater Robot



شکل (۱): طرح مقدماتی ربات تمیزکاری بدنه

برای حرکت انتقالی در امتداد قائم لازم است که ربات نیروی پیشرانه عمودی داشته باشد. این نیرو یک بخش مهم از طراحی است زیرا همین نیرو برای اتصال ربات به بدنه نیز مورد استفاده است. همچنین از این نیرو برای تغییر زاویه رول HCR استفاده می شود. حداقل نیروی لازم باید سرعت انتقالی در امتداد قائم ۱٫۷ نات و نیز گشتاور لازم برای دوران ۹۰ درجه را تامین نماید. ربات سه پیشرانه عمودی دارد که در رئوس یک مثلث تعبیه می شوند و برس های تمیزکاری در وسط این مثلث مستقر هستند (شکل شماره سه را ملاحظه فرمایید). حداکثر نیروی مجموع سه پیشرانه در امتداد حرکت انتقالی در امتداد قائم ۱۸٫۷ کیلوگرم نیرو و حداکثر گشتاوری که این پیشرانه ها ایجاد می کنند ۲٫۳ کیلوگرم نیرو در متر kgf.m است. گشتاور واژگونی ربات که در زاویه حرکت دورانی حول محور طولی ۹۰ درجه بر اثر فاصله مرکزیت ناو بوجود می آید کمتر از ۲ kgf.m است و در نتیجه پیشرانه ها گشتاور کافی برای چرخاندن ربات را فراهم می کنند.





شکل (۳): نقشہ مقدماتی از اجزا ربات

همانطور کہ در جدول شماره یک اشاره شد سرعت تمیزکاری از عوامل اصلی در طراحی ربات تمیزکاری است. طراحی مورد نظر دارای دو برس مجموعاً بہ پهنای تقریبی عرض وسیله یعنی نیم متر هستند یعنی قطر ہر برس ۲۰ cm فرض می شود. بہ طور تقریبی HCR توانایی تمیزکاری  $50 \text{ m}^2/\text{h}$  را داراست.

### مشخصات ربات تمیزکاری زیرآبی

در ادامہ، ربات ساخت کشور کرہ جنوبی را با جزئیات بیشتر مورد بررسی قرار می دہیم. در ابتدا برای نوابری و استقرار ربات در موقعیت درست فرمان های کنترلی بہ پیشرانہ های افقی صادر می شود تا با ایجاد نیروی رانش لازم آنرا در مسیر زیرآبی بہ سمت بدنہ شناور ہدایت کنیم. ہدف از این پروژہ توسعہ رباتی بودہ کہ بتواند مسیر و موقعیت زیرآبی خود را پیدا کند. پروژہ با بودجہ دولتی بودہ و همچنان در حال توسعہ است. جدول شماره چہار مشخصات مورد نظر ربات را نشان می دہد.

جدول (۴): مشخصات ربات تمیزکاری شناور کره جنوبی

وضعیت طرح	در حال توسعه
قیمت	دلار ۴۰۰/۰۰۰
سرعت تمیزکاری	۲۰۰ m <sup>2</sup> /h هنگام تمیزکاری بارناکل و ۶۳۰ m <sup>2</sup> /h هنگام تمیزکاری خزّه
سیستم تمیزکاری	برس
قابل استفاده در هنگام حرکت	خیر
ابعاد	cm ۱۷۰×۱۰۰×۶۸
وزن	kg ۳۱۵
مدت زمان متوسط کارایی	۱۰۰۰ ساعت
سیستم اتصال به بدنه	پروانه
نیروی اتصال	نامشخص
حسگرها	دوربین، UT، عمق سنج، DVL، USBL، DGPS، IMU
فیلتر بیوفولینگ	نامشخص
کابل	نامشخص
نوع عملکرد	هوشمند

ابعاد ربات در مقایسه با طرح اصلی کشور کره جنوبی که به منظور استفاده در کشتی های تجاری بزرگ طراحی شده ۲ برابر کوچکتر فرض شده بنابراین طول ۸۵، عرض ۵۰ و ارتفاع ربات ۳۴ سانتی متر است.

نیروی پیشرانه برای حرکت ربات با سرعت ۳ گره دریایی (نات) در نظر گرفته شده که با فرض ضریب درگ ۱,۱ برای این فرم مکعبی، نیروی پیشرانه ۱۲,۵ کیلوگرم برای رسیدن به سرعت مورد نظر لازم است. وزن ربات ۵۰ کیلوگرم در نظر گرفته می شود (جدول شماره ۵).

جدول (۵): ابعاد و سایر پارامترهای اصلی ربات

طول بدنه	۸۵ cm
عرض بدنه	۵۰ cm
ارتفاع بدنه	۳۴ cm
وزن	۵۰ kg
سرعت	۳ knot
ضریب درگ بدنه	۱,۱ nd
نیروی تراست	۱۲,۵ kg

### ارزیابی اقتصادی طرح

شناورهای مرزبانی ناجا بخش اعظمی از سرمایه و توان عملیاتی این سازمان را تشکیل می دهد و سالانه جهت نگهداری آنها هزینه های فراوانی مصرف می شود. یکی از عواملی که باعث افزایش این هزینه ها در دریا می شود، رشد و چسبیدن خزّه و بارتکل (گچسار) به بدنه شناورها است. این امر سبب می گردد:

ضمن کاهش ۳۰ درصدی سرعت شناور، باعث افزایش مصرف سوخت و اعمال فشار بیشتر به سیستم موتور و رانش شناور و بروز تعمیرات زودرس می گردد. لذا به عنوان نمونه، با بررسی شناورهای موجود در مرزبانی ناجا، میزان اضافه هزینه ای که سازمان به دلیل رشد خزّه و گچسار بر روی بدنه ناوگان دریایی متحمل می گردد به شرح ذیل محاسبه گردیده است:

- میزان مصرف سوخت سه کلاس شناور در سال: ۱۶۰،۳۲۵،۰۰۰،۰۰۰ ریال
- ۲۰ درصد اضافه مصرف سوخت که ناشی از رشد گچسار بر روی بدنه است: ۳۲،۰۶۵،۰۰۰،۰۰۰ ریال
- هزینه سالانه انجام تعمیرات زیرآبی شناورهای نیمه سنگین: ۹،۹۰۰،۰۰۰،۰۰۰ ریال

در نتیجه، فقط با در نظر گرفتن اضافه هزینه مصرف سوخت و تعمیرات زیرآبی برای سه نمونه از شناورهای سازمان و بدون احتساب هزینه های سربار دیگر از جمله تعمیرات زودرس موتور و سیستم رانش به دلیل فشار بیشتر به موتور و افت کارآمدی شناورها به دلیل افت سرعت، مجموعاً ۴۱,۹۶۵,۰۰۰,۰۰۰ ریال هزینه اضافی در سال به این سازمان تحمیل می گردد.

به همین منظور، تامین سامانه ای که بتواند بصورت مداوم و محلی و بدون نیاز به جابجایی شناور به مراکز تعمیراتی و اسکله های خاص، اقدام به خزه زدایی شناور نماید، ضروری است.

هزینه تمیزکاری شناورهای ۵۰-۶۰ فوتی

هر مرتبه ۳۰ میلیون تومان × چهار نوبت در سال × ۴۰ فروند = ۴۸۰۰ میلیون تومان

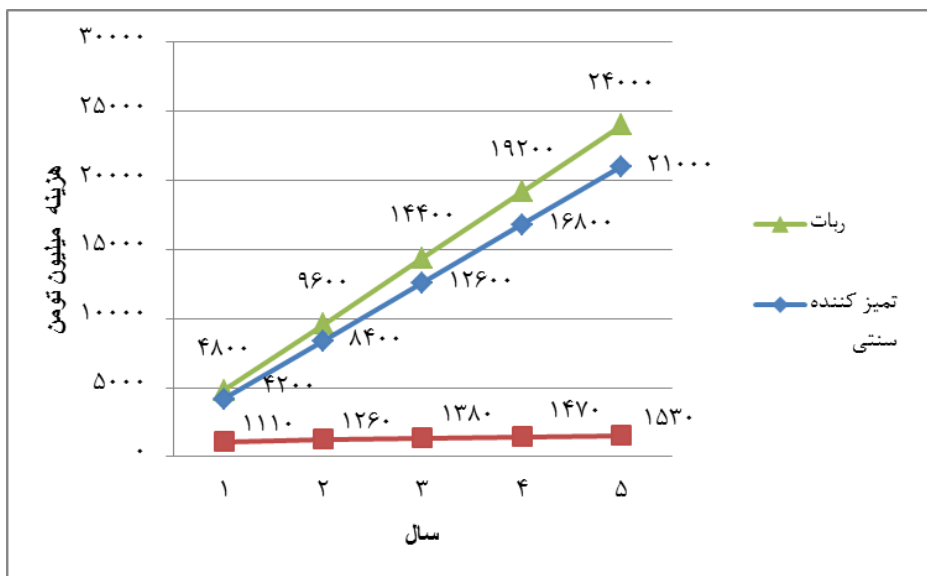
در جدول شماره شش هزینه تقریبی ساخت ربات را نشان می دهد.

جدول (۶): هزینه تقریبی ساخت ربات (میلیون تومان)

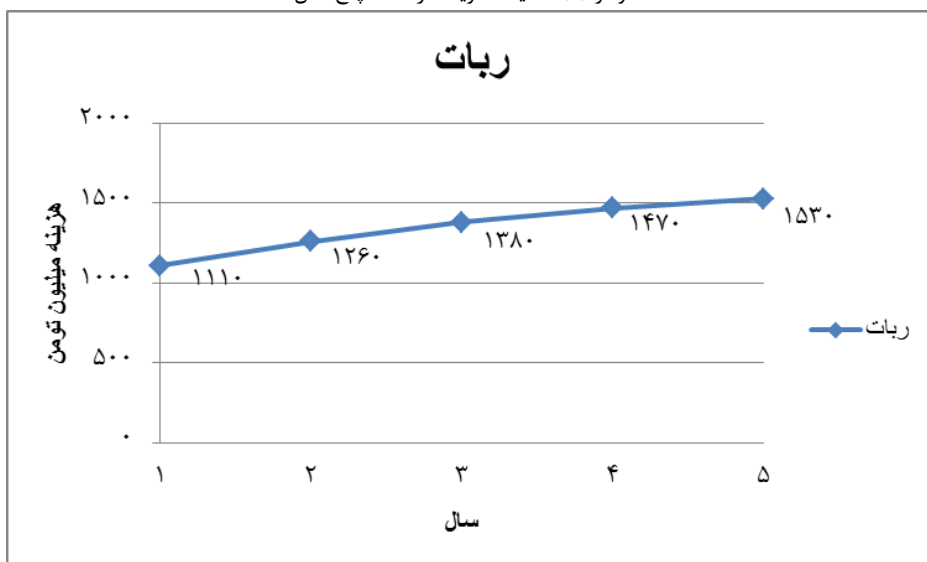
۱۰۰	مهندسی موتورهای الکتریکی	C1
۱۰۰	مهندسی کنترل و ناوبری زیرسطحی	C2
۵۰	مهندسی تمیزکاری	C3
۴۰	مهندسی بدنه و سازه	C4
۳۰	مهندسی تجهیزات	C5
۳۲۰	مجموع	C6

حداقل سه دستگاه از این ربات برای کار تمیزکاری مداوم بدنه شناورها مورد نیاز است. هزینه نگهداری در بخش های C1 و C2 در صورت خرابی عمده است، در بخش های C3 و C4 اندک است و در بخش C5 با شرایط خرید قطعات نسبت به زمان متغیر است. بر اساس تحقیقات هزینه نگهداری ابزار صنعتی بین ۱۵ تا ۶۰ درصد هزینه محصول تولید شده را در بر می گیرد یعنی بین حدود ۵۰ تا ۱۹۰ میلیون تومان. فرض کنیم که این ارقام به صورت نمایی از سال اول تا سال پنجم پس از تولید محصول افزایش یابد.

نمودار شماره ۴، مجموع هزینه تولید و نگهداری وسیله را در مقایسه با هزینه تمیزکاری به روش سنتی و نیز هزینه سوخت اضافی در صورت عدم تمیزکاری مناسب در مدت زمان پنج سال نشان می دهد. نمودار شماره پنج کل هزینه سه دستگاه ربات را در مدت پنج سال نشان می دهد.

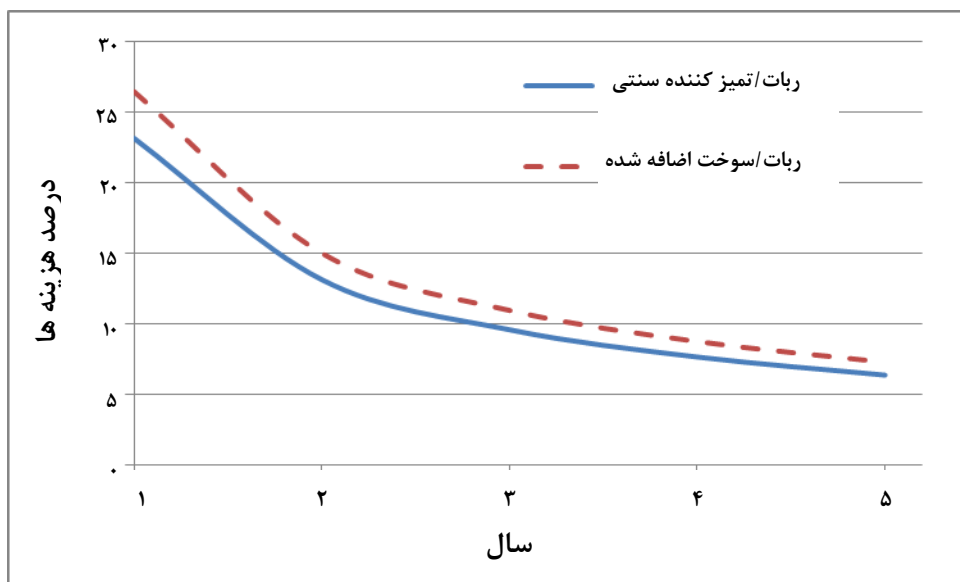


نمودار (۴): مقایسه هزینه در مدت پنج سال



نمودار (۵): مجموع هزینه سه دستگاه ربات در مدت پنج سال

همانطور که در نمودار پنج مشخص است هزینه ربات پس از پنج سال تنها حدود پنج درصد هزینه تمیزکاری سنتی و هفت درصد هزینه مصرف سوخت تحمیل شده ناشی از خزه و گچسار است. البته هزینه اولیه این فناوری حدود ۲۰ درصد هزینه سال اول تمیزکاری سنتی می باشد و در نتیجه شاید تصمیم گیری مدیران برای توسعه این فناوری در صورت بلااثر بودن فناوری و چالش های آن توام با ریسک باشد.



نمودار ۶: درصد هزینه ربات نسبت به هزینه تمیزکاری و مصرف سوخت اضافی در ۵ سال

### نتیجه گیری و پیشنهادات

نتایج تحقیق به شرح زیر ارائه می گردد:

- امکان ساخت ربات خزه زدا در داخل وجود دارد. دلیل این ادعا آن است که عملیات مورد نظر در آب کم عمق بندر اجرا می شود و سایر موارد مربوط به پایداری و مانور وسیله نیز قبلاً در طرح های آزمایشگاهی با موفقیت انجام شده است. مسلماً بازدهی تمیزکاری بدنه موضوعی است که با ساخت یک نمونه صنعتی و اصلاح طرح قابل بهینه سازی خواهد بود.
- سرجمع هزینه ساخت، تعمیر، نگهداری و عملیات ربات در مقایسه با هزینه تمیزکاری شناورها در خشکی در بلند مدت ناچیز است.

- شبیه سازی ربات در محیط زیرآب نشان دهنده پایداری و سرعت مناسب ربات در اجرای عملیات تمیزکاری است.
- اگر از پوشش رنگ مناسب با فناوری های پیشرفته نانو و مشابه آن در شناورها استفاده شود، سرعت رشد و قدرت چسبندگی خزّه به طور چشمگیری کاهش می یابد و در نتیجه تمیزکاری زیر آبی به سهولت قابل اجراست.

ربات مورد نظر دارای چندین سیستم رانش کوچک است که می تواند آنرا در جهات حرکت انتقالی در راستای طولی، اسوی، حرکت دورانی حول محور قائم و حرکت دورانی حول محور طولی در اطراف شناور مانور دهند. ساختار باز قاب سازه ای باعث می شود که تجهیزات داخل وسیله به راحتی دسترس پذیر و اصلاح طرح اولیه میسر باشد.

گلوگاه های فناوری از جمله بالبوس بو، تراستر، توپی پاشنه، دهانه ورودی آب شور، و تیغه ها و سطوح تعادل بدنه به خاطر شکل هندسی خاصی که دارند در عملیات تمیزکاری ربات را با چالش همراه خواهند کرد. در شناورهای تندرو پروازی پله ها نیز مناطقی هستند که ربات را با چالش مواجه می کنند. نکته مهم در طراحی جزئیات ربات، طراحی مدارات کنترلی آن است به گونه ای بتواند گلوگاه فناوری را مرتفع نماید. موضوع مانور و کنترل ربات برای تمیزکاری نواحی چالش برانگیز بدنه قایق باید با حمایت صنعت و همت محققان دانشگاهی مورد مطالعات آینده باشد.

پیشنهاد مشخص تحقیق آن است که سازمان های صنایع دریایی (دولتی یا خصوصی) در موضوع طراحی و ساخت یک ربات تمیزکاری بدنه سرمایه گذاری کنند زیرا هم اکنون تعداد زیادی کشتی و قایق در آبهای جنوب کشور با مشکل رشد خزّه و جانوران مواجه می شوند و تمیزکاری بدنه یک چرخه تکراری و پرهزینه است که در صورت کمک گرفتن از تجهیزات خودکار می تواند صرفه جویی قابل ملاحظه ای ایجاد کند.

آذر سینا، ف.، امکان سنجی ایجاد ربات خزه زدا ساخت داخل برای تمیزکاری بدنه شناورهای مرزبانی ناجا، مرکز تحقیقات کاربردی معاونت آماذ و پشتیبانی ناجا، تهران، ۱۳۹۷.

S. Durr and J. C. Thomason, Biofouling, John Wiley & Sons, 2009.

E. R. Holm, M. P. Schultz and e. al., "Evaluation of hydrodynamic drag on experimental fouling release surfaces using rotating discs," *Biofouling*, vol. 20, pp. 219-226, 2004.

J. C. Lethwaite and e. al., "An investigation into the variation of ship skin frictional resistance with fouling," *Transactions of the Royal Institute of Naval Architects*, vol. 127, pp. 269-284, 1985.

M. P. Schultz, "Frictional resistance of antifouling coating systems," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 126, pp. 1039-1047, 2004.

M. P. Schultz, "Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering," *Biofouling*, vol. 23, pp. 331-341, 2007.

Office of Naval Research, "Hullbug," Robotic hull bio-mimetic underwater grooming., 2019. [Online]. Available: <http://www.onr.navy.mil/Media-Center/Fact-Sheets/Robotic-Hull-Bio-mimetic-Underwater-Grooming.aspx>.

Gulf Agency Company EnvironHull, "HullWiper," GAC - GAC EnvironHull- unique brushless hull cleaning solution, 2019. [Online]. Available: <http://gac.com/shipping/hull-cleaning-solution/>.

Technique Cybernetix, "Magnetic Hull Crawler (MHC)," Magnetic hull crawler hull inspection and cleaning robot, 2019. [Online]. Available: <http://www.cybernetix.fr/wp-content/uploads/2016/05/MHC-Product-Fact-Sheet-EN-Dec-2015.pdf>.

ClimateKIC, "Fleet Cleaner," Fleet cleaner | climate-KIC, 2019. [Online]. Available: <http://www.climate-kic.org/start-ups/fleet-cleaner/>.

Sailmagazine, "Hulltimo," Hulltimo pro hull-cleaning robot - sail magazine, 2019. [Online]. Available: <http://www.sailmagazine.com/gear/electronics-and-navigation/hulltimo-pro-hull-cleaning-robot/>.