

مدلسازی تأثیر پارامترهای فیزیکی سطح و سیال بر خوردگی شناورها با استفاده از نرم افزار کامسول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۰

کد مقاله: ۹۱۹۱۷

بهروز شیرمحمدی^{۱*}، مهدی وهنانی^۲

چکیده

در این پژوهش تأثیر پارامترهای فیزیکی پوشش پروانه و بدنه، سرعت، رسانایی الکترولیت و طول شناور در توزیع پتانسیل و جریان سطح آن‌ها مطالعه شده است. برای مدلسازی از نرم افزار کامسول با توزیع جریان ثانویه استفاده شده است. ترسیم نمودارهای توزیع پتانسیل و جریان برای تحلیلی خوردگی سطوح به کار برده شده‌اند. از مدلسازی نتیجه شد الگوی تغییرات پتانسیل در حالات مختلف با دو آند برای حفاظت کاتدی شناور یکسان است و بیشترین پتانسیل مربوط به بخش شفت و کمترین پتانسیل مربوط به آند است در نتیجه بیشترین خوردگی شناور را بخش پيشران آن شامل پروانه و شفت تجربه می‌کنند. همچنین پوشش پروانه بیشترین تأثیر را در کاهش میزان جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی شناور دارد.

واژگان کلیدی: مدلسازی، خوردگی، الکتروشیمی، کامسول، شناور

۱- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (نویسنده مسئول) b_shirmohammadi@aur.ac.ir

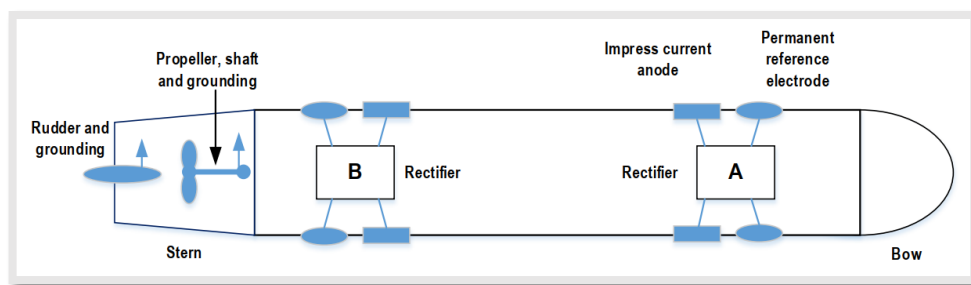
۲- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۱- مقدمه

خوردگی واکنش برگشت‌ناپذیر سطحی ماده (فلز، سرامیک، پلیمر) با محیط است که باعث مصرف ماده یا انحلال آن در ماده-ی یک جزء محیط می‌شود (تعریف آیوپاک) [۱]. این پدیده بسیار هزینه‌بر است و بین ۳ تا ۵ درصد از تولید ناخالص داخلی کشورها را به خود اختصاص می‌دهد [۲]. پوشش ۷۰ درصدی سطح زمین توسط دریا باعث شده است آب دریا بعد از اتمسفر گسترده‌ترین محیط خورنده باشد. عوامل فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی از جمله نمک‌ها و گازهای محلول، ذرات جامد، دما، موج آب، حیوانات، گیاهان و جلبک‌ها باعث شدت یافتن خوردگی در آب دریا می‌شود [۳].

روش‌های مختلفی برای حفاظت از سطح در برابر آب دریا وجود دارد. از جمله‌ی این روش‌های انتخاب جنس مناسب تجهیز و طراحی آن، استفاده از پوشش‌ها، عملیات سطحی مثل آندایزینگ، بازدارنده‌های خوردگی، حفاظت کاتدی و آندی هستند. اما مهم-ترین روش‌ها برای حفاظت کشتی‌ها در آب دریا استفاده از پوشش و حفاظت کاتدی هستند. عمده‌ی وظیفه‌ی پوشش در شناورها حفاظت در برابر میکروارگانیزم‌های دریایی هستند و حفاظت فلز در برابر خوردگی الکتروشیمیایی تحت تأثیر الکترولیت آب دریا توسط حفاظت کاتدی تأمین می‌شود [۴،۵].

حفاظت کاتدی به دو روش آند گالوانی (آند فداشونده) و جریان تزئینی انجام می‌شود. در روش آند گالوانی یک فلز که در برابر خوردگی ضعیف‌تر است با سازه در تماس قرار می‌گیرد و الکترون‌های مورد نیاز برای حفاظت سطح از این طریق تأمین می‌شود. اما در روش جریان تزئینی از یک منبع جریان خارجی (منبع تغذیه) برای تبدیل آند به کاتد استفاده می‌شود. شکل ۱ سیستم حفاظت کاتدی جریان تزئینی را برای یک کشتی نمایش می‌دهد. در این سیستم پتانسیل ابتدا توسط سلول مرجع اندازه‌گیری می‌شود سپس این داده‌ها به منبع تغذیه می‌رود و جریان مورد نیاز برای حفاظت به آند فرستاده می‌شود. در نهایت جریان رسیده به آند صرف صفر کردن اختلاف پتانسیل می‌شود [۵،۶].



شکل ۱- سامانه‌ی حفاظت کاتدی جریان تزئینی جهت حفاظت از سطح کشتی‌ها [۶]

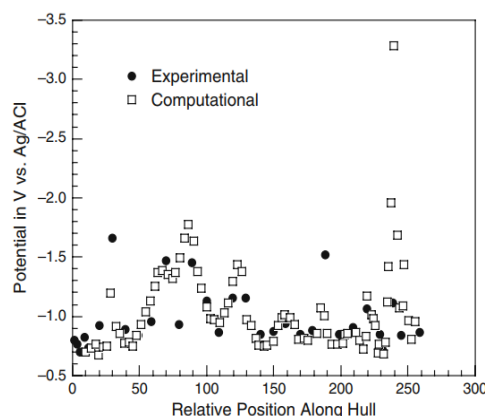
مدلسازی کامپیوتری خوردگی به یک روش قابل اتکا در بسیاری از مطالعات خوردگی به عنوان مکمل فعالیت‌های آزمایشگاهی تبدیل شده است. در سال‌های اخیر روش عددی عناصر مرزی برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های حفاظت کاتدی جریان تزئینی^۱ در شرایط متنوعی شامل آرایش‌های مختلف ICCP، عملکرد پوشش‌ها، جزئیات هندسی بدنه‌ها و خوردگی گالوانی کشتی‌های استفاده شده است. این رو به یک ابزار قدرتمند برای طراحی و آنالیز سیستم‌های حفاظت کاتدی جریان تزئینی تبدیل شده است [۵].

لوکاس و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۵ یک مدل کامپیوتری را برای پیش‌بینی توزیع پتانسیل و جریان در طول یک شناور ۳۱۷ متری تحت حفاظت کاتدی با ۱۷ آند را توسعه دادند. آن‌ها معادله‌ی لاپلاس را برای این سسامانه با استفاده از روش المان مرزی حل کردند. نتایج حاصل را با داده‌های حاصل مدلسازی و نتایج حاصل از فعالیت تجربی در شکل ۲ مقایسه شده‌اند. همچنین هابر و وانگ [۷] در سال ۲۰۱۲ یک مدل دیگر را برای شناور ۲۵ متری و در سرعت‌های مختلف مدلسازی کردند. مدل دارای ۲ آند در طرفین شناور و سرعت از صفر تا ۳۵ نات افزایش می‌یافت. نتیجه‌ی حاصل از مدلسازی نشان از پتانسیل بالای ناحیه‌ی شفت و پروانه را برای شناور داشت و تأثیر بالای پوشش دادن پروانه در حفاظت از خوردگی را نمایش می‌داد.

مدلسازی‌های مختلفی جهت تفسیر صحیح از پدیده‌ی خوردگی گالوانی نیز توسط گروه‌های مختلف ارائه شده است. دشپند [۸] در سال ۲۰۱۰ یک مدل برای خوردگی گالوانی منیزیم-استیل ارائه کرد و با نتایج حاصل از نرم افزار کامسول مورد مقایسه قرار داد. نتایج حاصل نشان از پیش‌بینی قابل قبول نرم افزار از توزیع پتانسیل و جریان در نواحی مختلف سامانه داشت. همچنین ترنر و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۳ با استفاده از نرم افزار کامسول به بررسی سیستم خوردگی گالوانی در هندسه‌های مختلف

1 Impressed current cathodic protection

پرداخته‌اند. در سال ۲۰۲۱ نیز ژائو و همکاران [۱۰] با توسعه‌ی یک مدل و مقایسه‌ی آن با نتایج تجربی و نتایج حاصل از نرم‌افزار کامسول توافقی نسبی این مدل‌ها را نتیجه گرفتند.



شکل ۲- پروفایل پتانسیل در طول شناور برای شناور ۳۱۷ متری نسبت به الکترود مرجع نقره/ نقره کلرید [۵]

در این پژوهش ما به بررسی پارامترهای تأثیر پوشش پروانه و بدنه‌ی شناور، طول شناور، سرعت شناور و تغییرات رسانایی الکترولیت در توزیع پتانسیل و جریان بدنه‌ی آن می‌پردازیم.

۲- تئوری و روش کار

معادله‌ی حاکم بر توزیع پتانسیل الکترولیت معادله‌ی لاپلاس است [۱۱]:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (1)$$

که در آن ∇ عملگر دیفرانسیل است. این معادله تنها زمانی اعمال می‌شود که محلول از لحاظ الکتریکی خنثی باشد، واکنشی شیمیایی که باعث تولید و یا مصرف گونه‌ها شود در توده سیال رخ ندهد و هیچ گرادیان غلظتی در توده محلول وجود نداشته باشد. برای به دست آوردن جریان در هر نقطه از رابطه‌ی (۲) استفاده می‌شود:

$$i = -\sigma \nabla \varphi \quad (2)$$

که در آن σ رسانایی الکترولیت است [۱۲]. ضرایب باتلر-ولمر (رابطه (۳)) که برای شرایط مرزی به کار برده شده‌اند از نتایج فعالیت‌های آزمایشگاهی استخراج شده‌اند.

$$i_{net} = i_0 \exp\left(\frac{a_{anodic} z F (\varphi - \varphi_0)}{RT}\right) - i_0 \exp\left(\frac{-a_{cathodic} z F (\varphi - \varphi_0)}{RT}\right) \quad (3)$$

همچنین در نقاطی که عایق در نظر گرفته می‌شوند شرط مرزی به صورت زیر است:

$$n \cdot i_l = 0 \quad (4)$$

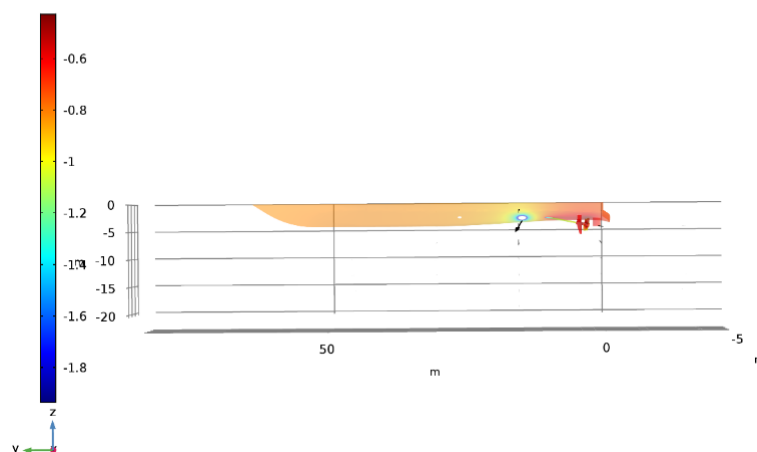
جنس شناور از آلومینیوم ۶۲۵ و پروانه از جنس نیکل-آلومینیوم-برنز است. مقدار مورد استفاده برای رسانایی الکترولیت ۴ و ۲٫۵ در دو حالت است. مش استفاده در پژوهش ریز و بسیار ریز با حداقل و حداکثر مقدار ۰٫۰۱ تا ۱٫۵ متر بوده است (شکل ۳).

۳- نتایج

شکل‌های (۳) توزیع پتانسیل شناور ۶۵ متری در حرکت با سرعت ۵ نات را در حالت بدون پوشش پروانه و شفت نمایش می‌دهد. چنانکه مشاهده می‌شود پتانسیل در بخش پیشران شناور و در همسایگی پروانه و شفت بیشترین میزان را دارد و در آند و همسایگی‌های آند کمترین میزان پتانسیل مشاهده می‌شود. همچنین از آند هرچقدر دورتر می‌شویم میزان پتانسیل در نوک شناور بیشتر و در نتیجه خوردگی آن افزایش می‌یابد. شکل (۴) اما توزیع پتانسیل شناور در حالتی را نمایش می‌دهد که پروانه‌ی شناور پوش داده شده است. در این مشاهده‌ی توزیع پتانسیل نشان می‌دهد که حداکثر پتانسیل به سمت شفت حرکت کرده است و

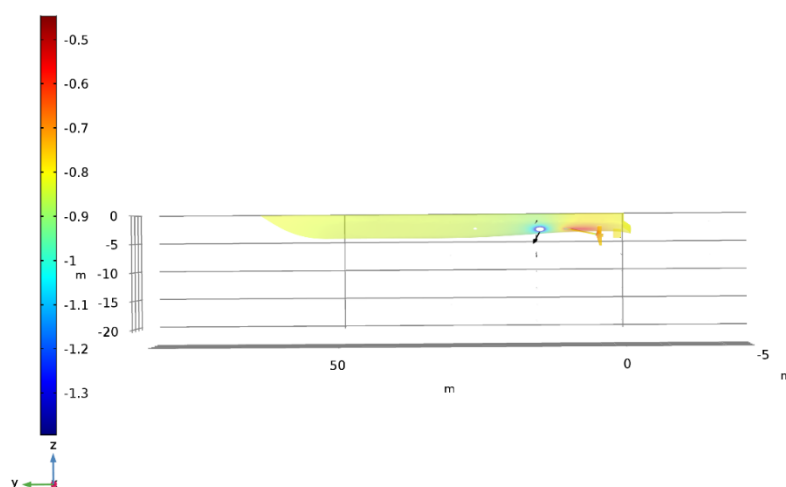
پتانسیل اطراف پروانه تا حدودی کاهش یافته است. با استفاده از شکل (۵) که تغییرات پتانسیل در طول شناور را نمایش می‌دهد می‌توان مقایسه‌ی بهتری از دو شناور داشت. این شکل نشان می‌دهد الگوی تغییرات پتانسیل در دو شناور مشابه می‌باشد اما دامنه‌ی تغییرات پتانسیل در شناور بدون پوشش پروانه برابر ۰.۵۳ و برای شناور با پوشش برابر ۰.۲۳ ولت است. همچنین دیده می‌شود که حداکثر پتانسیل در طول شناور برای حالت با پوشش پروانه در ناحیه‌ی شفت و همسایگی آن است در حالیکه بدون پوشش این میزان حداکثر به سمت پروانه حرکت می‌کند.

Arrow Volume: Electrolyte current density vector Surface: Electrode potential vs adjacent reference (V)
Surface: Electrode potential vs adjacent reference (V) Surface: Electrode potential vs adjacent reference (V)
Surface: Hull potential vs Ag/AgCl (V)



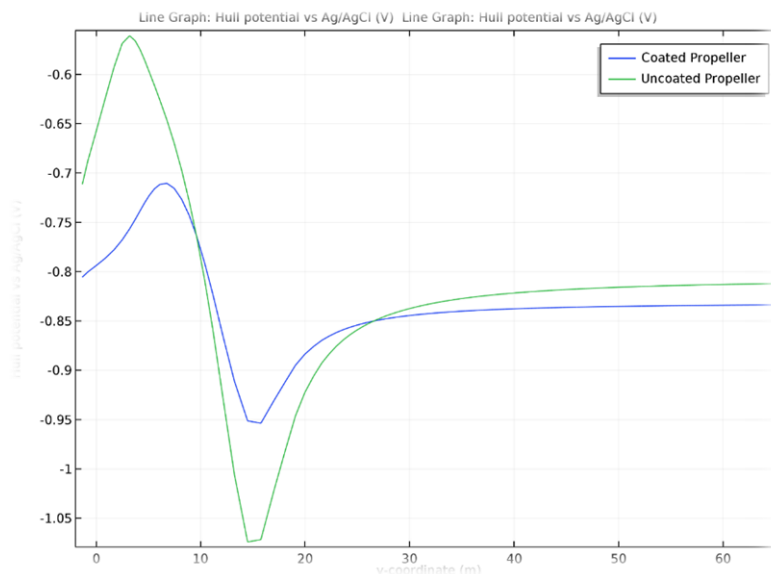
شکل ۳- توزیع پتانسیل بدنه‌ی شناور ۶۵ متری در حرکت با سرعت ۵ نات و بدون پوشش پروانه

Arrow Volume: Electrolyte current density vector Surface: Electrode potential vs adjacent reference (V)
Surface: Hull potential vs Ag/AgCl (V)

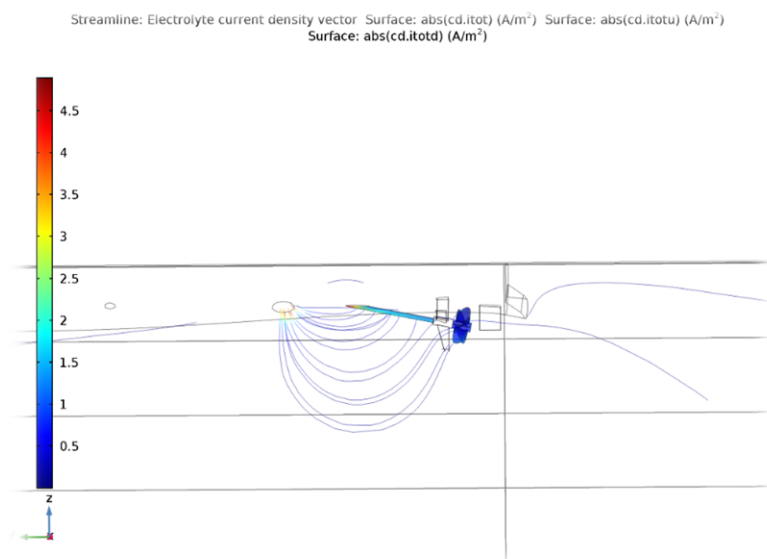


شکل ۴- توزیع پتانسیل بدنه‌ی شناور ۶۵ متری در حرکت با سرعت ۵ نات با پوشش کامل پروانه و بدنه

شکل (۶) توزیع و خطوط جریان در الکترولیت در حالت شناور بدون پوشش پروانه را نمایش می‌دهد. چنانکه مشاهده می‌شود میزان جریان بیشتری در شفت برای حفاظت از آن هزینه می‌شود که این مقدار در دهانه‌ی ابتدایی شفت بسیار بیشتر از سایر نواحی آن است. از انتگرال‌گیری بر روی آند برای اندازه‌گیری میزان جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی سطح میزان ۱۸.۲۶ آمپر به دست می‌آید. این مقدار برای حالت پروانه‌ی دارای پوشش برابر ۹.۳۵ آمپر است که حاصل کم کردن سطح لخت در معرض الکترولیت است.

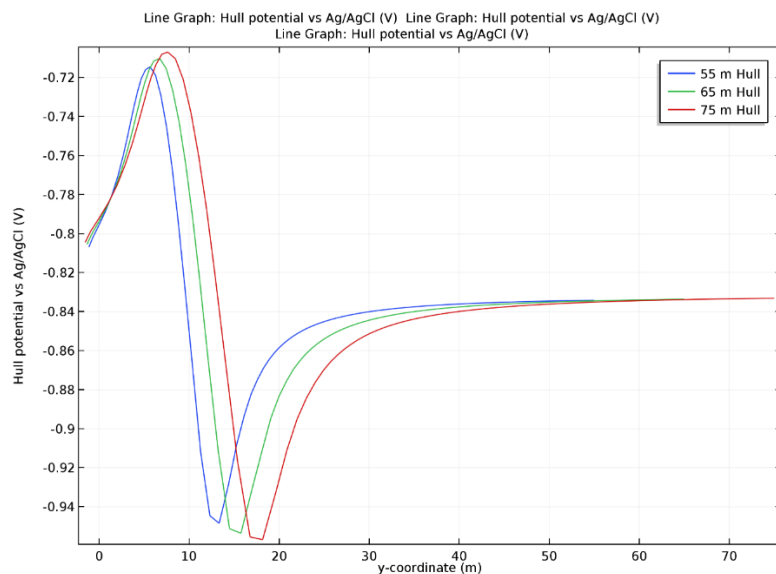


شکل ۵- مقایسه‌ی پروفایل پتانسیل دو حالت با پوشش و بدون پوشش پروانه برای شناور ۶۵ متری متحرک با سرعت ۵ نات



شکل ۶- توزیع جریان بدنه‌ی شناور ۶۵ متری در حرکت با سرعت ۵ نات و بدون پوشش پروانه

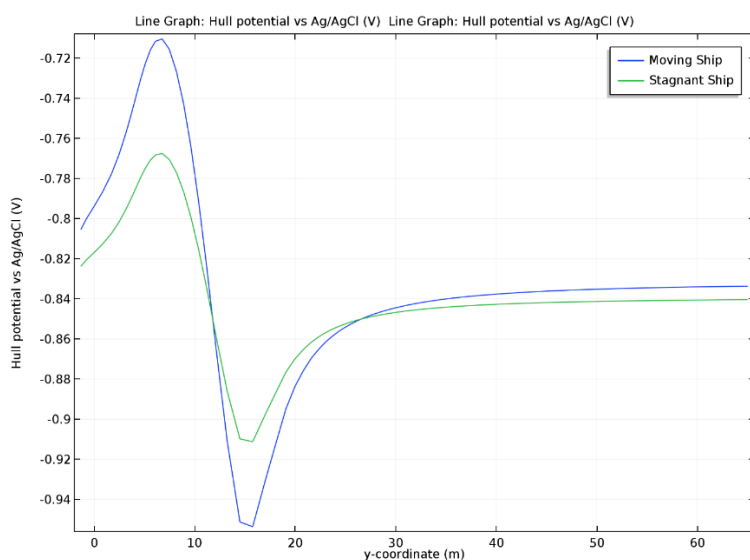
شکل (۷) تأثیر طول شناور در توزیع پتانسیل سطح آن را نمایش می‌دهد. چنانکه از شکل‌ها پیداست الگوی تغییرات پتانسیل شبیه به هم است و در ناحیه‌ی پیشران میزان پتانسیل بیشتر و در نتیجه خوردگی بیشتری را مشاهده می‌کنیم و در ناحیه‌ی آند کمترین میزان مشاهده می‌شود. نکته‌ی دیگر که از شکل‌ها قابل استنباط است برابر بودن دامنه‌ی تغییرات پتانسیل در حالت است. به دلیل تغییر نکردن جنس تجهیزات و الکترولیت که خاصیت الکتروشیمیایی مشابهی را نشان می‌دهند این میزان تغییر زیادی را نشان نمی‌دهد. اما میزان جریان مورد نیاز برای حفاظت از سطح به دلیل افزایش کل سطح شناور با افزایش طول شناور بیشتر می‌شود. این میزان برای شناورهای ۵۵، ۶۵ و ۷۵ متری به ترتیب برابر ۷،۶۲، ۹،۳۵ و ۱۱،۱۰ آمپر است.



شکل ۷- مقایسه‌ی توزیع پتانسیل بدنه‌ی شناورهای ۵۵، ۶۵ و ۷۵ متری در حرکت با سرعت ۵ نات با پوشش کامل بدنه و پروانه

شکل (۸) به مقایسه‌ی توزیع پتانسیل در دو حالت شناور ساکن و متحرک می‌پردازد. در حالت متحرک ناور با سرعت ۵ نات حرکت می‌کند. چنانکه می‌بینیم دامنه‌ی تغییرات پتانسیل در حالت متحرک بزرگ‌تر است و به همین سبب میزان جریان مورد نیاز جهت حفاظت نیز بیشتر است. این میزان برای حالت ساکن برابر ۵,۵۲ آمپر است در حالیکه برای حالت متحرک برابر ۹,۳۵ می‌شود.

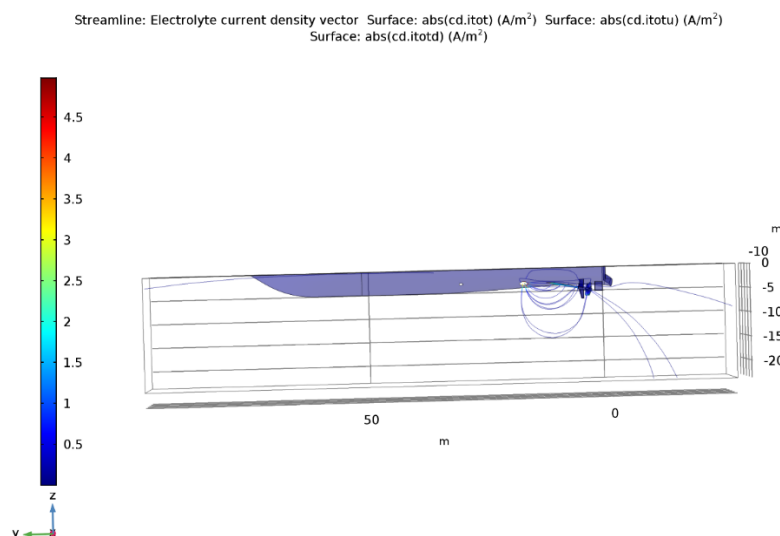
برای حالتی که میزان نمک در آب و در نتیجه رسانایی آن تغییر کند ضرایب باتلر-والمر نیز تغییر می‌کنند. اما آنچه تغییر بی‌تر در جریان مورد بری حفاظت را تعیین می‌کند میزان رسانایی الکترولیت است که مستقیماً در گردادیان پتانسیل ضرب می‌شود. در حالت رسانایی الکترولیت ۴ زیمنس بر ثانیه میزان جریان برای حفاظت شناور ۶۵ متری متحرک با سرعت ۵ نات برابر ۹,۳۵ آمپر است. این میزان برای همین شناور در آبی با رسانایی ۲,۵ زیمنس بر ثانیه برابر ۵,۹۵ آمپر است.



شکل ۸- مقایسه‌ی توزیع پتانسیل بدنه‌ی شناور ۶۵ متری در حرکت با سرعت ۵ نات و جریان ساکن

شکل (۹) توزیع جریان در شناور ۶۵ متری بدون پوشش پروانه و با تخریب ۱۵ درصدی پوشش سطح بدنه را نشان می‌دهد. شکل توزیع جریان در تمام سطح بدنه را به دلیل تخریب پوشش نمایش می‌دهد. چگالی جریان در بخش پیش‌ران شناور بیشتر از

سایر نقاط است. مقدار جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی سطح با انگرال گیری بر روی سطح آند در این حالت ۲۲,۴۱ آمپر به دست می آید.



شکل ۹- توزیع جریان بدنه‌ی شناور ۶۵ متری در حرکت با سرعت ۵ نات و بدون پوشش پروانه و ۱۵ درصد کاهش کارایی پوشش بدنه

۴- نتیجه گیری

- در این پژوهش به مدلسازی حفاظت کاتدی شناورها با استفاده از نرم افزار کامسول پرداخته شد. شناور ۶۵ متری برای حالات بدون پوشش پروانه و با پوشش پروانه، تغییرات الکترولیت، در سرعت ۵ نات و آب ساکن و سه شناور به طول‌های ۵۵، ۶۵ و ۷۵ متری در حالت پوشش پروانه پوشش مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش به صورت خلاصه نتایج زیر به دست آمد:
- در شناورها در حالت بدون پوشش توزیع پتانسیل بدنه‌ی شناور و داخل الکترولیت به نسبت حالت دارای پوشش پروانه یکنواختی کمتری وجود دارد و دامنه‌ی تغییرات پتانسیل بسیار بیشتر از حالت دارای پوشش است. که این موضوع به افزایش میزان فلز لخت در معرض الکترولیت وابسته است.
- در شناور بدون پوشش میزان جریان برای حفاظت از بدنه‌ی شناور بسیار بیشتر از حالت پوشش دار است. میزان جریان مورد نیاز در حالت بدون پوشش برای شناور ۶۵ متری ۹,۳۵ آمپر و در حالت پوشش دار این میزان جریان برابر ۱۸,۲۶ آمپر است.
- با افزایش طول بدنه‌ی شناور توزیع پتانسیل در الکترولیت و بدنه از یکنواختی کمتری برخوردار است. میزان دامنه‌ی تغییرات پتانسیل در شناورهای ۵۵، ۶۵ و ۷۵ متری در حالت بدون پوشش پروانه به ترتیب ۲۳۵، ۲۴۰ و ۲۵۰ میلی ولت است.
- میزان جریان مورد نیاز برای حفاظت از سطح در هر دو حالت بدون پوشش و دارای پوشش با افزایش طول شناور افزایش می‌یابد. در حالت بدون پوشش این مقدار برای شناورهای ۵۵، ۶۵ و ۷۵ متری به ترتیب برابر ۷,۶۲، ۹,۳۵ و ۱۱,۱۰ آمپر است.
- برای نمایش تأثیر سرعت بر توزیع پتانسیل و جریان و میزان افزایش جریان مورد نیاز حفاظت خوردگی شناور متحرک در جریان ۵ نات نیز مدلسازی گردید و نتایج با حالت ساکن مقایسه شد. در حالت با پوشش پروانه میزان جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی برای شناور ۶۵ متری در سرعت ۵ نات برابر ۹,۳۵ آمپر است که این مقدار برای حالت ساکن برابر ۵,۵۲ آمپر به دست می‌آید که نشان از تأثیر سرعت جریان در میزان افزایش خوردگی سطح دارد.
- میزان جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی بدنه در آب با رسانایی الکترولیت ۴ برای شناور ۶۵ متری در سرعت ۵ نات برابر ۹,۳۵ آمپر است در حالیکه همین مقدار برای آب‌های با رسانایی ۲,۵ برابر ۵,۹۸ آمپر محاسبه می‌شود.
- بعد از ۱۵ درصد تخریب پوشش بدنه میزان جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی بدنه به ۲۲,۲۶ آمپر می‌رسد. این مقدار که در طول زمان با تخریب پوشش به دست می‌آید به دلیل افزایش سطح در معرض الکترولیت است.

- [1] Pietro Pedferri, (2018) Corrosion Science and engineering, Springer, (2018)
- [2] B. Hou et al, The cost of corrosion in china, Materials degradation nature, (2017)
- [3] M. Shutze, M. Roche, and R.Bender, Corrosion resistance of steels, Nickel alloys and zinc in aqueous media, Wiley, (2016)
- [4] Sh. Verma et al, A review on protective polymeric coatings for marine applications, Journal of coating technology and research, (2019)
- [5] V.G.DeGiorgi, S. A. Wimmer, Geometric details and modeling accuracy requirements for shipboard impressed current cathodic protection system modeling, Engineering Analysis with Boundary Elements (2005)
- [6] Cathodic protection of ships, American bureau of shiping, (2017)
- [7] Huber and Y. Wang, Effect of propeller coating on cathodic protection current demand: Sea trial and modeling studies, Corrosion, (2012)
- [8] Kiran B.Deshpande, Validated numerical modelling of galvanic corrosion for couples:Magnesium alloy (AE44)-mild steel and AE44-aluminium alloy (AA6063) in brine solution, Corrosion Science, (2010)
- [9] M. Turner et al, Modeling galvanic corrosion, Comsol conference, Boston, (2013)
- [10] Jiangming Zhao et al, A Peridynamic Model for Galvanic Corrosion and Fracture, Electrochemica Acta, (2021)
- [11] E.McCafferty, Introduction to corrosion science, Springer, (2010)
- [12] E. J. F. Dickinson et al, COMSOL Multiphysics: Finite element software for electrochemical analysis. A mini-review, Electrochemistry Communications, (2014)