Design Of Cathodic Protection For Ship's Hulls Using Sacrificial Anodes

Dr. Ghaleb Ahmad*

(Received 11 / 6 / 2020. Accepted 19 / 7 / 2020)

□ ABSTRACT □

To minimize the risk of failures or major renewals of hull structures during the ship's expected life span, It is imperative that the precaution must be taken with regard to an adequate margin of safety against any one or combination of failure modes including excessive yielding, buckling, brittle fracture, fatigue and corrosion. The most efficient system for combating underwater corrosion is 'cathodic protection'.

This paper focuses on the sacrificial anode use as a method of cathodic protection of ship's hulls. The basic principle of this method is that the ship's hull structure is made cathodic, with respect to another metal acts as anode, the anodic reactions are suppressed on the protected structure. The sacrificial anodes are attached to the hull surface, the electrical current passes from anode to hull due to the difference of potential between the anodes and hull metals. Then, the ship's hull is protected by converting it to a cathode.

The sacrificial anodes are designed to protect the ship's hull against corrosion until the time of Periodical dry docking, which is between 2 to 3 years. In this design, the required protection is achieved by determining the total weight of sacrificial anodes and output of total electrical current requirements.

Keywords: Corrosion, Cathodic protection systems, sacrificial anodes, Design of Cathodic protection systems .

*Associate Professor - Marine Engineering Department- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering- Tishreen University- Lattakia. Syria.

تصميم الحماية المهبطية لابدان السفن باستخدام المصاعد المضحية

د. غالب أحمد*

(تاريخ الإيداع 11 / 6 / 2020. قُبِل للنشر في 19/ 7 / 2020)

□ ملخّص □

لتقليل خطر الانهيار أو التجديد الكبير لإنشاءات البدن على امتداد العمر المتوقع للسفينة، يلزم أخذ الاحتياطات بهامش أمان مناسب ضد أي واحد أو اتحاد لأشكال الانهيار التي تشمل الخضوع الزائد، الانبعاج، الانكسار القصف، أو التعب والصدأ. النظام الأكثر فعالية لمكافحة الصدأ تحت الماء هو طريقة الحماية المهبطية.

تمّ في هذا البحث استخدام الحماية المهبطية باستخدام المصعد الذّواب. المبدأ الأساسي لهذه الطريقة، يكون بجعل انشاء السفينة مهبطا بالنسبة لمعدن آخر يعمل كمصعد، ووقف التفاعلات المصعدية على الانشاء المراد حمايته. توصل المصاعد المضحية الى سطح البدن، ويمر التيار الكهربائي من المصعد الى البدن نتيجة فرق الجهد الكهربائي بين معدني المصاعد والبدن. يحمى البدن من الصدأ (التآكل) بتحوله الى مهبط.

تصمم المصاعد المضحية لتأمين حماية البدن من الصدأ حتى موعد تحويض السفينة لفترة تقدّر من 2 الى 3 سنوات. يتم في هذا التصميم تحقيق الحماية المطلوبة بتحديد متطلبات الوزن الكلي للمصاعد المضحية والخرج الكلي للتيار الكهربائي.

الكلمات المفتاحية: الصدأ (التآكل)، أنظمة الحماية المهبطية، المصعد المضحي، تصميم أنظمة الحماية المهبطية.

* **أستاذ مساعد – قسم الهندسة البحرية–كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة تشرين– اللاذقية– سورية.**

مقدمة:

تميل المعادن المستخرجة من فلزاتها الأصلية(أكاسيد، كربونات، كبريتات،...) للعودة ثانية بشكل طبيعي بفعل تأثير الاكسجين والماء ويعتبر الفولاذ أحد أهم المواد التي تستخدم بشكل واسع في بناء السفن ويشكّل الفولاذ الجسم الرئيس للسفينة. يتعرض الجسم الخارجي للسفينة (البدن) باستمرار للاتصال مع الماء والرطوبة، ما يجعله عرضة للصدأ.

الصدأ هو عملية كهروكيميائية، تتمثل في حدوث تفاعل كيميائي، يولّد تدفق تيار كهربائي بين معدنين متابينين. يقوم هذا التفاعل الكهروكيميائي بتدمير أحد المعدنين، يتم تدمير المادة بشكل تدريجي من خلال تفاعلها مع الوسط المحيط. ويعتبر الصدأ أحد أعظم أعداء السفينة، وأحد أكبر مشاكل اصلاح السفن، وبشكل خاص في الماء المالح، انه مكلف ماديا ، ويمكن أن تكون التكلفة كبيرة جدا اذا لم يتم اصلاح أو استبدال المعدات المعرضة للصدأ(وخاصة عند تعرّض الرفاص أو عمود الادارة للصدأ). لذلك يجب حماية انشاءات البدن في السفن من التآكل.

تعتبر الحماية المهبطية طريقة كهربائية، تستخدم لحماية العديد من المنشآت الفولاذية المدفونة في التربة (الخزانات المتوضعة تحت الأرض) أو الغاطسة في الماء (بوابات اغلاق السدود، معدات معالجة المياه، أبدان السفن الغاطسة) من الصدأ. يعتبر نظام الحماية المهبطية من أقدم الطرق المستخدمة في حماية أبدان السفن من الصدأ. تجرى الحماية المهبطية باستخدام تقنيات التيار المعاكس *Impressed Current* أو باستخدام المصعد الذّواب *Sacrificial Anode* أو بكليهما معا. تعمل الحماية المهبطية على تطبيق تيار مستمر للسطح الغاطس بتحويل المساحات الفعّالة للسطح المعدني الى سلبية (جعل السطح المراد حمايته مهبطا في الخلية الكهروكيميائية).

سنستعرض في هذا البحث آلية الصدأ ومباديء الحماية المهبطية التي تقوم بتحويل المعدن المراد حمايته الى مهبط من خلال امرار تيار كهربائي من المصعد الى المعدن المحمي. كما سيتم التعرف على انظمة الحماية المهبطية وأسباب استخدام كل منها لتقرير أي نظام حماية يضمن الحماية الأكثر فعالية. سيتم تصميم نظام الحماية باستخدام المصعد الذوّاب وتحديد الوزن الكلي للمصاعد وكثافة التيار الكلي المطلوبة وعدد المصاعد التي تحقق الحماية المطلوبة لانشاءات بدن السفينة باستخدام علاقات رياضية بسيطة.

أهمية البحث وأهدافه:

يعتبر الفولاذ أحد أهم المواد التي تستخدم بشكل واسع في بناء السفن، بدءا بالجسم الرئيس للسفينة (البدن) وانتهاء بأصغر معدات التشغيل. كما أنّ الفولاذ هو المادة الأكثر عرضة للصدأ عندما يكون على اتصال بالهواء والماء. تكون السفينة باستمرار على اتصال مع الماء والرطوبة، والذي يجعل السفينة معرضة بشكل كبير للصدأ لهذا السبب سيتم استخدام المصاعد المضحية لحماية البدن من الصدأ.

يهدف هذا البحث الى تصميم نظام حماية مهبطي باستخدام نوعين من المصاعد المضحية (مصاعد من الألمنيوم ومصاعد من التوتياء) وتقرير أي منهما يضمن الحماية المطلوبة، ويحقق متطلبات الوزن الكلي للمصاعد والخرج الكلي المطلوب للتيار الكهربائي، بالأخذ في الاعتبار العوامل الاقتصادية والهندسية.

طرائق البحث ومواده:

يعتمد هذا البحث على تحويل بدن السفينة الى مهبط بوصله بمعدن آخر يعمل كمصعد خارجي. مادة المصعد الخارجي (المصعد الذّواب) ذو جهد أكثر سلبية من مادة بدن السفينة (الفولاذ). يمر التيار الكهربائي من المصعد الذّواب الى المهبط (البدن) سيحدث تفاعل أكسدة على المصعد ويحرّر الكترونات ليصبح مشحونا ايجابيا (قطبا موجبا)، بينما سيحمى البدن بشحنه بالإلكترونات المقدمة من قبل المصعد ويصبح ذو شحنة سالبة (يتحول الى مهبط–قطبا سالبا).

لتحقيق الأهداف المذكورة أعلاه، تمّ في هذا البحث الاعتماد على بيانات عن قيم الجهود لمواد المصاعد ولمادة بناء السفن، ومعلومات عن كثافات التيار الكهربائي للسفن المراد حمايتها، معدل استهلاك المصاعد، وكثافة التيار لمادة المصاعد المضحية، واستخدام العلاقات الرياضية في: – تحديد مساحات السطوح المراد حمايتها، – تحديد التيار الكلي المطلوب،– الوزن الكلي لمادة المصعد الذّواب المطلوبة، – وعدد المصاعد التي تؤمّن حماية السطح من التآكل.

1- آلية الصدأ.

يعتبر المعدن المستخرج من فلزه الأساسي ذو ميل للعودة الى وضعه الطبيعي بفعل تأثير الأكسجين والماء. ويدعى هذا الفعل بالأكسدة (الصدأ) والمثال الأكثر انتشارا هو صدأ الفولاذ. يعمل الصدأ على تدمير المادة من خلال تفاعلها مع الوسط المحيط، وهذا يؤدي الى خسائر مادية اضافية لإصلاح الضرر الذي يسببه الصدأ. مع العلم بأنّه ينفق من 3% الى 5% من الناتج الوطني في البلدان الصناعية على ضرر الصدأ. فعلى سبيل المثال نذكر بأنّ صدأ المعادن يسبب خسارة في الاقتصاد الأمريكي تقدّر بحوالي 300 مليار دولار سنويا [1].

الصدأ هو عملية كهروكيميائية بتأين الفولاذ وفقده للإلكترونات كما يلي:

$$Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^{-}$$

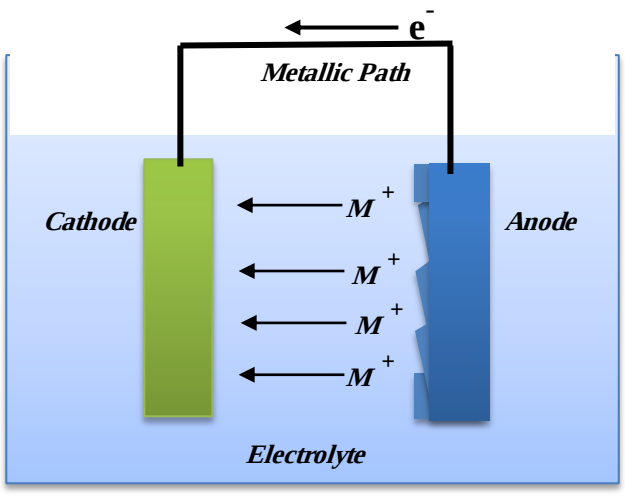
تمر هذه الالكترونات من المعدن (المصعد) الى سطح معدن آخر (المهبط) وتستهلك من خلال التفاعل المهبطي. يحدث التفاعل المهبطي في المحاليل الحامضية كما يلي:

$$2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2$$

يتضمن التفاعل المهبطي في المحاليل الحيادية استهلاك الأكسجين المنحل في المحلول كما يلي:

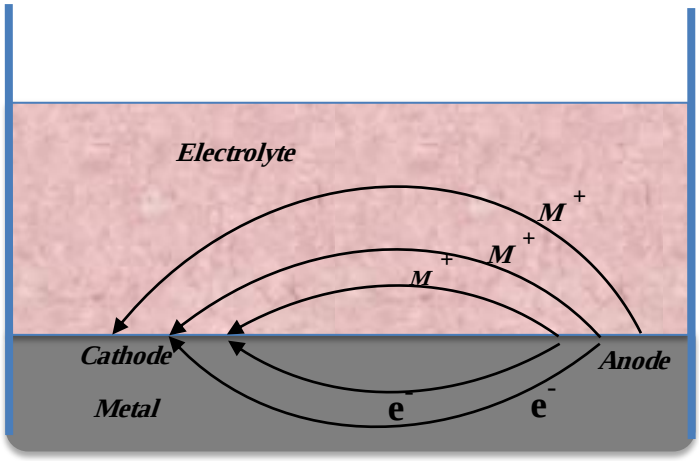
$$O_2 + 2\mathrm{H2O} + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$$

يبين الشكل (1) مخططا بسيطا لخلية الصدأ الكهروكيميائية [2].



الشكل (1) خلية الصدأ الكهروكيميائية

يحدث الصدأ أيضا بين مساحتين على سطح نفس المعدن كما هو مبين بالشكل (2) [2]. يتدفق التيار بسبب وجود فرق في الجهد بين المصعد والمهبط. يصدأ المصعد بترك الشوارد (الأيونات) له واستقبالها من قبل المهبط الذي يحمى من الصدأ.



الشكل (2) خلية كهروكيميائية بسطح معدني واحد

تنتج عملية الصدأ عن:

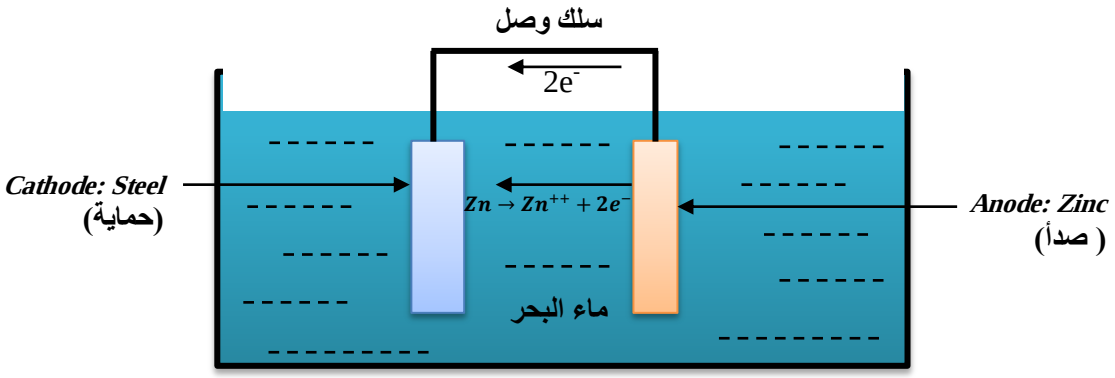
- الفرق في الجهد الطبيعي بين المعادن المتباينة.
- التغيرات الميتالورجية للمعدن عند نقاط مختلفة.
- الفروقات الموضعية في الوسط المحيط، كالتغيرات في تزويد السطح بالأكسجين (المناطق الغنية بالأكسجين تصبح مهبطا والمناطق المفرغة من الأكسجين تصبح مصعدا).

2- مبادئ الحماية المهبطية.

تعتمد هذه التقنية على تحويل المساحات الفعّالة على سطح المعدن الى سلبية، أي جعلها مهبطا للخلية الكهروكيميائية. فالمبدأ الأساسي للحماية المهبطية هي جعل كامل مساحة السطح المعدني مهبطا، يوصل المعدن المراد حمايته بمعدن آخر يعمل كمصعد من خلال امراره لتيار كهربائي مستمر الى السطح المراد حمايته وبذلك يحميه من التآكل (الصدأ).

يمكن أن يكون المصعد الخارجي غلفاني (مصعد ذوّاب)، حيث يكون التيار نتيجة لفرق الجهد بين المعدنين، أو يمكن أن يكون مصعد تيار عكسي، حيث يعكس التيار من مصدر طاقة خارجي للتيار المستمر. وفقا للمصطلحات الكهروكيميائية، الجهد الكهربائي بين المعدن والمحلول الكهربائي الذي هو على اتصال معه يجعله أكثر سلبية، بتزويد المعدن بإلكترونات ذات شحنة سالبة لقيمة معينة تجعل تفاعلات الصدأ(التفاعلات المصعدية) تتخامد وتحدث فقط التفاعلات المهبطية. تستهلك الالكترونات المتحررة من التفاعل المصعدي في التفاعل المهبطي. تقدّم الالكترونات الاضافية بواسطة تيار كهربائي مستمر. عند تقديم الكترونات اضافية للإنشاء المعدني، سيكون هناك الكترونات متاحة أكثر للتفاعل المهبطي، ستسبب تزايد معدّل التفاعل المهبطي وتقليل التفاعل المصعدي، والذي سيقود الى تقليل الصدأ أو ازالته. وبكلام آخر، عند تقديم تيار مستمر كاف، يقل فرق الجهد بين المصعد والمهبط فيتوقف الصدأ.

بفرض أنّ المعدن المراد حمايته هو الفولاذ، حيث أنّه المادة الأكثر استخدما في بناء السفن، يتم وصله مع التوتياء لأنها أكثر نشاطا من الفولاذ، فهي ستصدأ (تتآكل) وتحمي الفولاذ بتقديم الكترونات بوصلها بسلك الى الفولاذ ومنع فقد الفولاذ للإلكترونات. يبين الشكل (3) تدفق التيار بين معدنين متباينين متصلين معا في ماء البحر.



الشكل (3) تدفق التيار بين معدنين متباينين متصلين معا في ماء البحر.

3- أنظمة الحماية المهبطية.

تستخدم تقنية الحماية المهبطية للتحكم بتآكل المعدن المتصل معه كهربائيا. تطبّق الحماية المهبطية على السفن لحماية الجزء الغاطس من السفينة من الصدأ. يشمل الجزء الغاطس سطح البدن الخارجي والسطوح الداخلية للخزانات التي تحوي ماء البحر (خزانات الصابورة). تعمل الحماية المهبطية على تطبيق تيار مستمر على السطح الغاطس يغير جهد الفولاذ بالنسبة الى المحلول الكهربائي الى قيم يكون عندها معدّل الصدأ غير مهم.

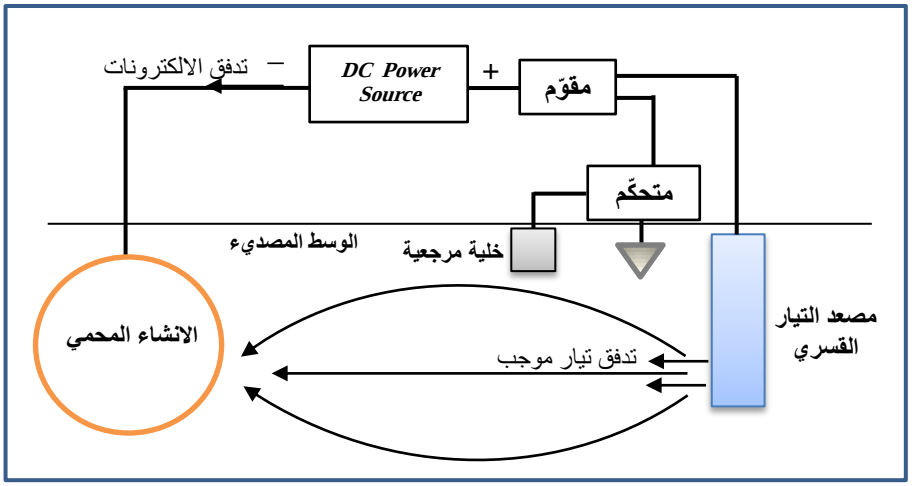
تنجز الحماية المهبطية بطريقتين أساسيتين هما:

1- نظام الحماية المهبطية بالتيار المعاكس (القسري)*Impressed current Cathodic Protection (ICCP)*.

2- نظام الحماية المهبطية بالمصعد الذّواب *Sacrificial Anode Cathodic Protection (SACP)*.

3-1- نظام الحماية المهبطية بالتيار المعاكس (القسري) *(ICCP)*.

يولّد نظام التيار المعاكس الكترونات من مصدر طاقة تيار مستمر خارجي كما هو مبين بالشكل (4). يتألف نظام الحماية المهبطية بالتيار المعاكس من مقوّم التيار، مصاعد، الكترودات مرجعية، ووحدة التحكّم. يقدّم المقوّم التيار المطلوب ويسلّم بواسطة المصاعد الى الانشاء المراد حمايته. أثناء هذه العملية، تحدد الالكترودات المرجعية مستوى الحماية وتنظّم وحدة التحكّم المقدار المناسب للتيار الناتج. أخيرا، يصبح الانشاء المعدني ذو شحنة سالبة، والذي يقود لخفض الجهد لأقل من قيمة العتبة المحددة. قيم هذه العتبة توافق القيمة التي تؤمّن الحماية للفولاذ والتي هي *0.8 V-* أو أكثر سلبية. نظام الحماية المهبطية سيكون قادرا على جعل الجهد لكل الفولاذ الغاطس بين *0.8 V-* و *1.1 V-* بالنسبة لالكترود مرجعي في ماء البحر هو *Ag/AgCl* [3]، والمحافظة على قيمة الجهد ضمن هذا المجال طيلة العمر التصميمي لنظام الحماية.



الشكل (4) مخطط بسيط لنظام الحماية المهبطية بالتيار المعاكس.

يستخدم نظام الحماية المهبطية بالتيار المعاكس بشكل واسع لأنّه يقدّم حماية معتبرة ضد الصدأ لكل أنواع السفن، المنصات البحرية، خطوط الأنابيب، المواني، والأعمدة الفولاذية،...الخ. بالرغم من كل المزايا لنظام الحماية المهبطية بالتيار المعاكس، لكّن تطبيقه يتعرّض الى العوائق التالية [1]:

- يتطلب عمّال مهرة.
- يجب دعم وتعزيز مزود الطاقة باستمرار.
- يجب وصل التيار دائما بالاتجاه الصحيح.
- يتطلب تحجيب التيار عند استخدام مصاعد دائمة.

3-2 نظام الحماية المهبطية بالمصعد الذّواب *(SACP)*.

الطريقة الأبسط لتطبيق الحماية المهبطية هي وصل المعدن المراد حمايته بمعدن آخر يصدأ بسهولة ليعمل كمصعد. يصبح المعدن الأكثر نشاطا مصعدا بالنسبة لمعدن آخر ويضحّى به لحماية المهبط من خلال صدأه. تدعى المصاعد المضحية بالمصاعد المضحّية، لأنّها تضحّي بذاتها من أجل المعادن المراد حمايتها.

المبدأ الأساسي لنظام الحماية المهبطية بالمصعد الذّواب، هو وجود فرق في الجهد الكهربائي بين الفولاذ المراد حمايته ومعدن آخر في نفس الوسط يدير قيادة الجهد. بسبب فرق الجهد بين منطقة المصعد ومنطقة المهبط، ستترك شوارد المعدن المشحونة ايجابيا سطح المصعد وتنتقل الالكترونات الى سطح المهبط. سيحدث تفاعل أكسدة بين المعدنين بسبب انتقال الالكترونات من المصعد الى المهبط نتيجة الفرق المفروض في الجهود الكهروكيميائية. سيتعرّض المهبط للإرجاع ويصبح ذات شحنة سالبة بسبب اكتسابه الالكترونات من المصعد، بينما سيتعرّض المصعد للأكسدة ويصبح ذات شحنة موجبة بسبب فقده للإلكترونات. يحدث على سطح مصاعد خليط الألمنيوم تفاعل الأكسدة التالي:

$$4Al \rightarrow 4Al^{+++} + 12e^{-}$$

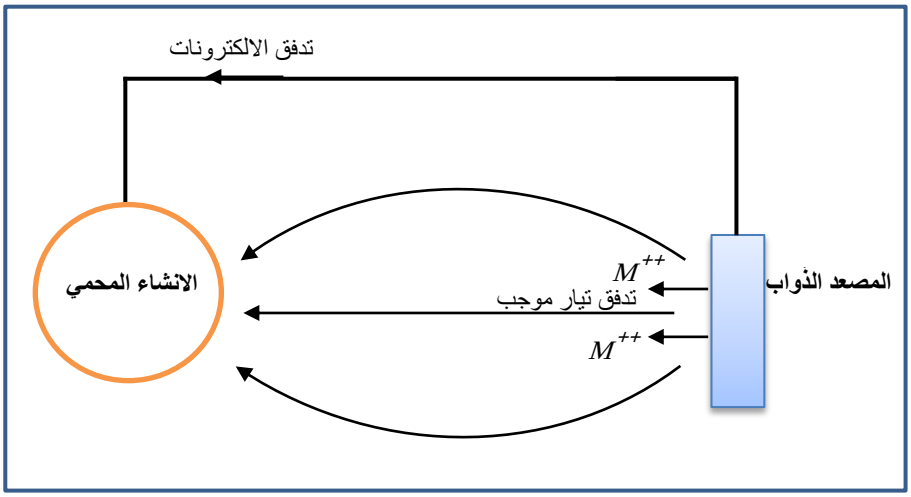
عند تركيب المصاعد، سواء أكانت ملحومة أو موثوقة الى سطح فولاذ البدن، يتم ضمان اتصال دائم بين المعدنين. المعدنان سيكونا بجهود كهروكيميائية مختلفة، هذا يعني بأنّه ستتولد خلية غلفانية بين المعدنين بسبب الاختلاف في

الجهد بينهما. يعمل فولاذ البدن في هذه الخلية كمهبط. الفرق الملائم في الجهد الكهروكيميائي بين المصعد الذّواب وبدن السفينة، يجنّب سطح البدن الصدأ ويتعرّض فقط المصعد الموصول معه للتآكل.

تستخدم خلائط التوتياء، الألمنيوم، والمغنيزيوم بشكل واسع كمصاعد ذوّابة بالنسبة للفولاذ. يبين الشكل (5) توضيح تخطيطي لنظام الحماية بالمصعد الذّواب. ينظّم التيار الذي يقدمه المصعد على مدى فترة معيّنة آليا اعتمادا على:

- المادة التي تصنع منها المصاعد، توتياء، ألمنيوم، مغنيزيوم.
- حجومها (أبعادها وأوزانها).
- نقاوتها (تجنب اي تلوث بجسيمات الفولاذ).

يعتبر تحديد نوع المصعد الذّواب ذو أهمية كبيرة، حيث يعتمد اختياره على العوامل الاقتصادية والحسابات الهندسية. سيتم توضيح اختيار نوع المصعد الأفضل واجراء الحسابات لنظام الحماية بالمصعد الذّواب في جزء لاحق من البحث.



الشكل (5) مخطط بسيط لنظام الحماية المهبطية بالمصعد الذّواب.

4- مقارنة بين أنظمة الحماية المهبطية.

من المهم جدا تقرير أي نظام حماية مهبطي يضمن الحل الأكثر فعالية للمركب. يعتمد القرار على عدة عوامل، العوامل الأكثر أهمية هي نوع الانشاء والأمان بالأخذ في الاعتبار الوسط المحيط والبضاعة المحمولة.

تستخدم أنظمة التيار المعاكس *ICCP* بشكل عام للمساحات الخارجية لانشاءات هندسية بسيطة، بسبب تعقيدها وكونها أكثر غلاء من نظام الحماية بالمصعد الذّواب حتى ولو على امتداد فترة زمنية طويلة. لكنّه ليس بمشكلة من أجل بدن السفينة ذو السطح المستوي الضخم. يستخدم نظام الحماية بالتيار المعاكس لحماية أبدان السفن للأسباب التالية:

- نعومة للسطح، لا يوجد على السطح عوائق زائدة.
- المرونة والوزن الخفيف للمراكب ذات الازاحات الضخمة.
- ذو عمر طويل.
- لا يتطلب لحام.
- مؤتمت بشكل كامل.

يستخدم نظام الحماية بالمصعد الذّواب *SACP* لحماية أبدان السفن للأسباب التالية [1]:

- بساطة في التركيب.
- اجراء الصيانة بحرية بين فترات التحويض الجاف.
- متاح عالميا بشكل واسع.
- كلفته منخفضة من أجل فترة التشغيل القصيرة.

نظام الحماية بالمصعد الذّواب مناسب جدا بشكل خاص للاستخدام الداخلي وللإنشاءات المعقدة، حيث يقدّم الحماية لكامل الانشاء بتوزيع للمصاعد الصغيرة. لهذا السبب، تحمى غالبا المراكب باستخدام المصاعد المضحية.

عندما يستنتج بأنّ نظام الحماية بالمصعد الذّواب هو الخيار الأفضل، عندئذ يجب اتخاذ القرار للأخذ في الاعتبار أي خليط معدني يمكن استخدامه. يمكن أن تفضّل معادن عديدة، لكن مصاعد التوتياء أو الألمنيوم تستخدم بشكل واسع في قطاع انشاءات السفن. لا يستخدم المغنيزيوم في ماء البحر لأنّه يحرر حجم ضخم من غاز الهيدروجين بسبب عملية الصدأ الذاتي. الألمنيوم أكثر غلاء من التوتياء بمصطلح سعر الكغ، بينما معدّل استهلاكه الوزني هو 1/3 من الاستهلاك لمصعد توتياء مكافيء. يكلّف التوزيع الانفرادي لمصاعد الألمنيوم على كامل بدن السفينة نصف تكلّفة مصاعد التوتياء تقريبا [1]. لمصاعد الألمنيوم الأفضلية على مصاعد التوتياء اعتمادا على التكاليف الكلية. لكن يجب أن يكون في الذهن بأنّ هناك قيود على استخدام مصاعد الألمنيوم ضمن وبجانب الخزانات التي تحمل بضائع ذات درجة وميض منخفضة. فهناك وجود خطر من تولّد شرارات عند سقوط المصاعد وعدم احكام تثبيتها.

5- معايير أنظمة الحماية المهبطية.

قياسات الجهد هي المعيار الأكثر استخداما بشكل واسع لضمان مستوى الحماية المهبطية المقدّم للمعادن والخلائط المعدنية. تتغير قيم جهد الحماية المهبطية طبقا للمعدن وللوسط المحيط. من المحتمل حدوث الصدأ عند جهود تكون أكثر ايجابية من قيمة جهد الانشاء المحمي، كما يمكن حدوث الضرر أيضا اذا كان المعدن عالي الحماية (الجهد ذو سلبية عالية).

قياس الجهد بالنسبة لالكترود مرجعي معياري هو الطريقة الأكثر انتشارا لتقييم درجة الحماية المهبطية المقدمة للانشاء. المعيار الموصى به لحماية الفولاذ الكربوني أو خلائط الفولاذ في ماء البحر المعرّض للهواء هو جهد حماية *0.8 V-*أو أكثر سلبية مقاس بالنسبة لالكترود مرجعي في ماء البحر هو *Ag/AgCl*. عند مثل هذا الجهد للفولاذ سيتوقف معدّل الصدأ عند مستوى منخفض مقبول. جهود الحماية المهبطية للمعادن المستخدمة بشكل واسع بالنسبة لـ *Ag/AgCl* كالكترود مرجعي في ماء البحر مبينة بالجدول (1).

الجدول (1)، جهد الحماية التقريبي للمعادن بالنسبة لـ *Ag/AgCl* كالكترود مرجعي في ماء البحر [3] .

Metal or Alloy	Protected Potential (volt) ref. Ag/AgCl
316,304 Stainless (Passive)	-0.75
Copper Alloys	-0.70
316,304 Stainless (active)	-0.75
Steel	-0.80
Aluminum Alloys	-1.00

6- تصميم أنظمة الحماية المهبطية.

6-1- مبادئ تصميم أنظمة الحماية المهبطية.

يسبب الصدأ خسارة للمعدن، خشونة للسطح، وبذلك زيادة في مقاومة الاحتكاك، والتي بدورها تؤثّر على استهلاك الوقود. يعتبر تصميم أنظمة الحماية المهبطية نوعا ما معقّد، لكنّها مبنية على مباديء كهربائية بسيطة. فلا يمكن فهم أو تصميم نظام الحماية المهبطي المناسب بدون المعرفة الأساسية لنظرية التيار الكهربائي المستمر[4]. يعتبر قانون أوم: $I = E / R$ نقطة البداية، حيث أنّ التيار الكهربائي $I(amps)$ يتناسب طردا مع الجهد الكهربائي $E(volts)$ وعكسا مع المقاومة الكهربائية $R(ohms)$. لذلك يجب تصميم نظام الحماية المهبطي ليحقق الحماية الأعظمية للمركب المعرّض للصدأ. يتطلب مجموعتين أساسيتين من البيانات لتصميم نظام حماية مهبطي مناسب [1]:

1- معرفة شاملة ببيانات الانشاء المراد حمايته، والتي تتضمّن ما يلي:

- المخطط العام للإنشاء.
- بيان عن حالة التيار (تحطم طبقة الدهان، ضرر بسبب الصدأ...).
- المادة المراد حمايتها.
- معلومات عن الوسط الخارجي المحيط.
- مستوى البضاعة أو ماء الصابورة في الخزان.
- الضرر المتوقع.

2- أعداد ومواقع المصاعد المضحية، والتي تتضمن اجراء حسابات للبارامترات التالية:

- المساحة المراد حمايتها (m^2).
- النسبة المئوية لتحطم التغطية.
- الكثافة المتوسطة للتيار (mA/m^2).
- العمر الزمني للحماية بالسنين ($year$).
- خرج التيار الانفرادي لمادة المصعد (A / Kg).
- معدّل استهلاك المصعد ($Kg /A .year$).

لتحديد المساحة المراد حمايتها، يجب حساب المساحة الفعلية للسطح الغاطس بناء على المعلومات المبينة في الجدول (2).

الجدول (2)،المساحة الفعلية للسطح الغاطس (*Actual Wetted Surface Area- WSA*) [5] .

خزانات السفن	أبدان السفن
رسومات المالك: (مقطع وسط السفينة، الرسومات الانشائية للخزانات العلوية)	الأبعاد: الطول بين القائمين، العرض، الغاطس الأعظمي
نوع وامتداد التغطية مع تقدير النسبة المئوية لتحطمها	معامل الامتلاء C_b
العمر المطلوب لنظام الحماية والفترة الزمنية المئوية لوجوده في ماء الصابورة	نوع التغطية
البضاعة المراد حملها، نوع الخزان(فقط للصابورة أو بضاعة/صابورة	العمر المطلوب لنظام الحماية
أية وشائع تسخين، موادها فيما اذا كانت معزولة عن الانشاء	طبيعة الخدمة
متطلبات موافقة هيئة التصنيف	هل الرفاص مرتبط بحلقة انزلاق؟
	عدد الرفاصات، الدفات
أية عوامل خاصة ؟	

يتطلب كل مركب أو انشاء كثافة تيار مختلفة. تتغير كثافة التيار اعتمادا على نوع المركب وحالة البدن. يقدّم الجدول (3) فكرة عامة حول متطلبات كثافة التيار لمراكب مختلفة لحالتين مختلفتين (سفن في الخدمة، سفن مبنية حديثا):

الجدول (3)، متطلبات كثافة التيار لمجال واسع من المراكب [1,5] .

Vessel Type	New Building mA/m^2	In Service mA/m^2
Ocean-going ships (coated)	10	15
Other Ocean-going ships	12	15
Coasters	14	20
Ro-Ro ferries	14	20
Trawlers	22	24
Kort nozzele tugs	22	24
Dredgers	24	27
Ice breakers	25	30
Tugs	18	22

تتأثّر كثافة التيار بشكل واسع بنوعية نظام التغطية. يمكن أن تزداد متطلبات كثافة التيار لسطح المادة غير المغطاة لتصل حتى $180\ mA/m^2$ [1]. لذلك يوصى بقوة باستخدام طريقة حماية مهبطية بنظام تغطية، حيث أنّ التغطية تقلل متطلبات كثافة التيار للإنشاء المراد حمايته.

6-2- مواد المصعد وخواصه الكهروكيميائية.

معظم المصاعد الغلفانية الشائعة الاستخدام هي، خلائط الألمنيوم، والتوتياء، والمغنيزيوم. التكوين الصافي لهذه المعادن غير مناسب غالبا كمصاعد لأنها تتعرض لصدأ ذاتي كبير جدا ولن تبقى فعّالة. لذلك يتم تشكّل مصاعد خلائط الألمنيوم، التوتياء، والمغنيزيوم لتقليل هذا التأثير.

تصنّع المصاعد الغلفانية لتستخدم على أبدان السفن من خلائط التوتياء أو خلائط الألمنيوم. مصاعد خلائط المغنيزيوم مناسبة للتطبيقات في الماء العذب، ولا تستخدم في ماء البحر بسبب جهدها وناقليتها المرتفعتان لماء البحر، كما لا تستخدم في خزانات ماء الصابورة لناقلات النفط بسبب مخاطر الشرارة الكهربائية [6]. تتطلب مصاعد خلائط التوتياء استخدام توتياء بنوعية عالية بمقدار ضئيل أعظمي مسموح به من مادة الحديد. اضافة الكادميوم والألمنيوم سيمح بزيادة التسامح للحديد. التركيب الكيميائي لمصاعد الألمنيوم، والتوتياء، والمغنيزيوم مبينة بالجدول (4).

الجدول (4)،التركيب الكيميائي لمصاعد الألمنيوم، والتوتياء، والمغنيزيوم، النسب الوزنية [3].

Anode Type	*Elements*									
Zinc	*Al*	*Cd*		*Fe*	*Cu*	*Pb*	*Mg*	*Sn*	*Others*	*Zn*
	0.1-0.5	0.025-0.07		0.005 *Max*	0.005 *Max*	0.006*Max*	----	----	0.1 *Max*	Remainder
Aluminum	*Zn*	*In*		*Ga*	*Fe*	*Cu*	*Si*	*Cd*	*Others*	*Al*
	2-6	0.01-0.03		----	0.12 *Max*	0.006 *Max*	0.12 *Max*	0.002 *Max*	0.1 *Max*	Remainder
Magnesium	*Mn*	*Al*	*Zn*	*Fe*	*Cu*	*Si*	*Pb*	*NI*	*Others*	*Mg*
	0.15-0.7	5-7	2-4	0.005 *Max*	0.08 *Max*	0.3 *Max*	0.03 *Max*	0.003 *Max*	0.3 *Max*	Remainder

يعتمد أداء مادة المصعد الغلفاني على تركيبه الكيميائي الفعلي وتجانسه، كثافة التيار، وظروف البيئة المحيطة التي يتعرّض لها. كما يمكن أن يؤثّر تشكيل سطح المصعد على فعاليته. تشمل الخواص الكهروكيميائية لمادة المصعد الجهد *Potential*، سعة التيار *Current Capacity*، ومعدّل استهلاك المصعد *Anode Consumption Rate*. يمكن الحصول على خواص الخليط المصعدي من بيانات الأداء لظروف الوسط المحيط. تشمل المعلومات التي يجب أن توثّق ما يلي:

- الجهد الكهربائي القائد (الفرق بين جهد المصعد في الدارة المغلقة والحد الموجب لجهد الحماية المعياري).
- سعة التيار الكهربائي *[A-h/Kg]* أو معدّل الاستهلاك *[Kg/A-year]*.
- قابليته للسلبية، قابليته للتآكل بين حبيباته.

يرتبط أداء مادة المصعد الغلفاني بالتركيب الكيميائي، لذلك من الضروري اجراء الضبط الدقيق للتركيب الكيميائي الخليطي لكلا العناصر الخليطة والشوائب. يجب أن يكون المصعد الخليطي المختار ذو جهد في الدارة المغلقة أكثر سلبية من جهد الحماية المطلوب للحماية المهبطية. بشكل عام، يجب أن يكون جهد التشغيل أكثر سلبية من *-1.00 V* مقاسا بجهد *Ag/AgCl* كالكترود مرجعي في ماء البحر، حيث من الضروري أنّ يكون الجهد الكهربائي القائد واستهلاك المصعد منخفضان (بجهد تشغيل *-0.85 V* بالنسبة لـ *Ag/AgCl* كالكترود مرجعي في ماء البحر)، أو باستخدام مصاعد بمتحكّم للجهد الكهربائي بين المصعد والانشاء. يجب أن يكون جهد التشغيل للمصعد الخليطي المختار مستقرا مع الزمن لتقديم أداء لفترة طويلة من أجل الوسط المحيط الخاص. كما يجب أن يتغير الجهد مع الوسط البيئي المحيط، حالة السطح، ومع التغيرات في التيار المطلوب.

سعة التيار للخليط المصعدي الغلفاني هي الكمية الكلية من الكهرباء *[A-h]* المنتجة بواحد كغ من مادة المصعد عند ظروف التشغيل المطلوبة. تعتمد سعة التيار العملية على درجة الحرارة (تنخفض بارتفاع درجة الحرارة في ماء البحر وفي الرواسب البحرية)، وعلى كثافة التيار (تزداد بازدياد كثافة التيار). عند كثافات تيار منخفضة جدا، يحصل تآكل ذاتي واضح للمصعد يؤدي الى انخفاض مهم في سعة التيار العملية.

معدّل استهلاك المصعد هو الكمية الكلية لمادة المصعد المستهلكة من أجل خرج تيار مقداره واحد أمبير خلال عام واحد *[Kg/A-y]*. يرتبط استهلاك المصعد وكثافة التيار بالعلاقة [3]:

$$E \times Q = 8760 \ [h/y]$$

حيث، *E [Kg/Ampers-year]*: معدّل استهلاك المصعد.

Q [Amps-hors/Kg]: سعة التيار.

8760: عدد الساعات خلال عام واحد.

الخواص الكهروكيميائية لمصاعد التوتياء، الألمنيوم، والمغنيزيوم مبينة بالجدول (5).

الجدول (5)،الخواص الكهروكيميائية لمصاعد التوتياء، الألمنيوم، والمغنيزيوم في ماء البحر[3].

Electrode Type	Operation Temperature, [^{0}C]	Closed Current Potential to Ag/AgCl/ seawater reference Electrode, [volt]	Practical Current Density, [A-h/Kg]	Practical Anode Consumption Rate, [Kg/(A-y)]
Zinc	41-77	-1.00 , -1.03	760-780	11.2-11.5
Aluminum	25	-0.83 , -1.09	2500	3.5-3.8
Magnesium	5-25	-1.5 , -1.7	1200	7.3

6-3- الحسابات التصميمية لأنظمة الحماية المهبطية.

لتحديد نوع وعدد المصاعد المطلوبة لحماية البدن الخارجي للسفينة، يجب تقدير المساحة الغاطسة للبدن، والتي تتعلق بحجم ونوع السفينة. تحسب مساحة سطح البدن الغاطس المراد حمايته من الرسومات أو باستخدام العلاقة المناسبة التالية [5]:

$$Wetted\ Surface\ Area = L_{BP}(1.8\times D + C_b \times B) \qquad (1)$$

حيث، L_{BP}: الطول بين القائمين، D: الغاطس، C_b: عامل الأمتلاء، B: العرض.

يعطى معامل الامتلاء لمراكب مختلفة بالجدول (6).

الجدول (6)،عامل الامتلاء(C_b) لسفن مختلفة [5] .

Vessel Type	Block Coefficient (C_b)
Passenger Vessel	0.6
Cargo Vessel	0.75
Coasters	0.75
Trawlers	0.55
Yachts	0.4-0.5
Tankers	0.8-0.9
Dredgers	0.8
Naval Vessels	0.55
Tugs	0.6
Launches	0.4

يجب الأخذ بالاعتبار العديد من العوامل، مثل: نوع السفينة، ظروف الخدمة وحالة البدن (فيما اذا كان جديد أو في الخدمة). تتغير متطلبات كثافة التيار من مركب لآخر. يجرى تصميم الحماية المهبطية بالاعتماد على حسابات بسيطة جدا. فالعلاقات المستخدمة في هذه الحسابات هي [7]:

- يحسب التيار الكلي المطلوب لحماية المركب بالعلاقة التالية:

$$Current\ (amperes) = \frac{Protected\ Area(m^2)\times Current\ Density\ (\mathrm{mA}/m^2)}{1000} \qquad (2)$$

- يحسب الوزن الكلي المطلوب لمادة المصعد (مصعد ذوّاب) بالعلاقة التالية:

$$Weight\ (Kg) = \frac{Current\ (amperes)\times Design\ Life\ (years)\times 8760\ )}{Capacity\ of\ Material\ (amp.hrs/kg)} \qquad (3)$$

حيث، 8760: عدد الساعات بالسنة.

- يتم حساب عدد المصاعد المطلوبة، بعد اختيار نوع مادة المصعد والوزن الصافي للمصعد المختار، باستخدام العلاقتين التاليتين:

$$Number\ of\ Anodes = \frac{Total\ Weight\ Required}{Individual\ Net\ Weight} \qquad (4)$$

$$Number\ of\ Anodes = \frac{Total\ Current\ Required}{Individual\ Current\ Output} \qquad (5)$$

لحساب عدد المصاعد، يجب اختيار شكل ووزن المصاعد. يتم اختيار شكل المصعد بالنسبة للألمنيوم من الجدول (7) [8]، ومن الجدول (8) بالنسبة للتوتياء[9].

الجدول (7) مصاعد الألمنيوم المضحية [8].

Anode Shape	Product Code	L mm	W mm	H mm	Dist. Bet. Hole Cents. (mm)	Net Weight (Kg)	Gross Weight (Kg)	Insert Dimensions (mm)
	AW9C1	300	150	30	-	2.80	3.70	440×40×6 MS
	AW9C2	300	150	50	-	4.00	4.90	440×40×6 MS
	AW9C3	350	150	35	-	3.60	4.60	500×40×6 MS
	AW11A1	150	150	25	-	-	1.40	No Insert
	AW16C2	285	80	40	-	1.65	2.20	435×25×6 MS
	AW17C1	500	125	40	-	6.70	8.10	700×40×6 MS
	AW17C2	500	125	50	-	7.40	8.90	700×40×6 MS
	AW18C1	580	135	40	-	7.50	9080	780×40×6 MS
	AW18C3	590	140	50	-	9.60	11.10	790×40×6 MS
	AW18C5	610	140	65	-	13.10	14.60	790×40×6 MS
	AW18C15	585	135	36	-	7.70	9.20	785×40×6 MS
	AW25B	300	100	50	160	2.50	3.0	440×40×6 MS Al avail. With Rubber gasket

الجدول (8) مصاعد التوتياء المضحية [9].

Anode Shape	Product Code	L mm	W mm	H mm	Dist. Bet. Hole Cents. (mm)	Net Weight (Kg)	Gross Weight (Kg)	Insert Dimens. (mm)
	NW11B1	150	150	25	-	3.40	20.30	20 dia hole
	NW11B2	150	75	25	-	1.40	1.50	20 dia hole
	NW11C1	150	150	28	-	3.80	4.10	260×25×3 MS
	NW11C3	150	75	25	-	1.80	2.10	250×25×6 MS
	NW11B1	75	75	25	-	0.90	1.00	275×25×3 MS
	NW16C1	285	80	30	-	2.10	3.20	435×25×6 MS
	NW16C1	285	80	40	-	4.50	5.00	435×25×6 MS
	NW17C1	500	125	45	-	16.80	18.20	690×40×6 MS
	NW17C2	500	125	55	-	20.30	21.60	690×40×6 MS
	NW18C1	580	135	30	-	20.30	21.60	780×40×6 MS
	NW18C2	600	138	50	-	22.50	24.00	800×40×6 MS
	NW18C3	600	135	53	-	25.50	27.00	800×40×6 MS
	NW18C4	600	140	57	-	27.50	29.00	800×40×6 MS
	NW18C6	600	145	67	-	34.50	36.00	800×40×6 MS
	NW18C15	585	135	36	-	16.50	18.00	800×40×6 MS

النتائج والمناقشة:

تمّ تصميم نظام حماية مهبطي باستخدام الألمنيوم، والتوتياء كمصاعد ذوّابة لمدة ثلاث سنوات لسفن بضائع عامة بحمولات مختلفة. استخدمت العلاقات المذكورة أعلاه في اجراء الحسابات التصميمية. تمّ اجراء الحسابات لكلا المصعدين لتقرير أيهما الأنسب ليستخدم في الحماية المهبطية لسفن البضائع العامة.

تمّ حساب مساحة الجزء الغاطس من بدن السفينة باستخدام العلاقة:

$$Area = L_{PB}(1.8\times D + C_b\times B)\ (m^2)$$

يبين الجدول (9) مساحة الجزء الغاطس لسفن بحمولات مختلفة ذو أبعاد مختلفة:

الجدول (9) مساحة الجزء الغاطس لسفن بضائع عامة بحمولات مختلفة وأبعاد مختلفة [10].

Dead weight (ton)	length between perpendicular (m)	Breadth B(m)	Draught D(m)	Area= $L_{PB}(1.8\times D+ C_b\times B)$ (m^2), C_b=0.75
2000	75	13.1	4.8	1385
5000	99	17.0	6.4	2403
10000	123	20.7	8.1	3703
12000	130	21.8	8.6	4138
18000	147	24.4	9.8	5283
30000	171	28.7	10.5	6913

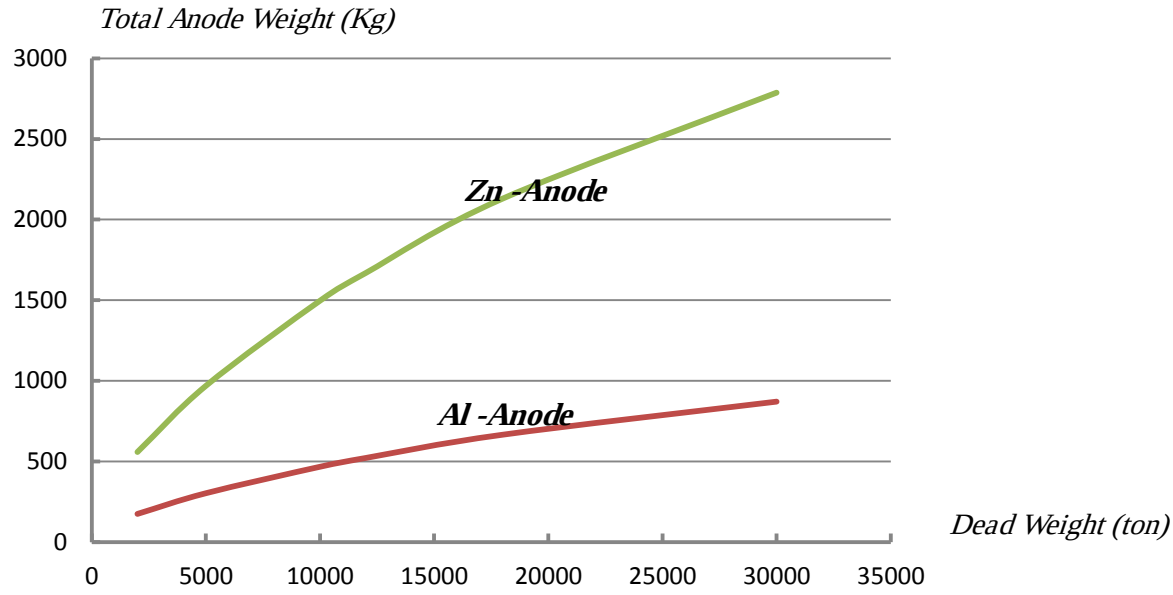
كما تمّ حساب التيار الكلي المطلوب والوزن الكلي للمصاعد لتأمين الحماية المهبطية لمدة ثلاث سنوات. اعتبرت السفن مبنية حديثا، كثافة التيار لسفينة غير مغطاة، من الجدول 3، هي: $12\ mA/m^2$، يبين الجدول (10) نتائج الحسابات.

الجدول (10) التيار الكلي والوزن الكلي للمصاعد.

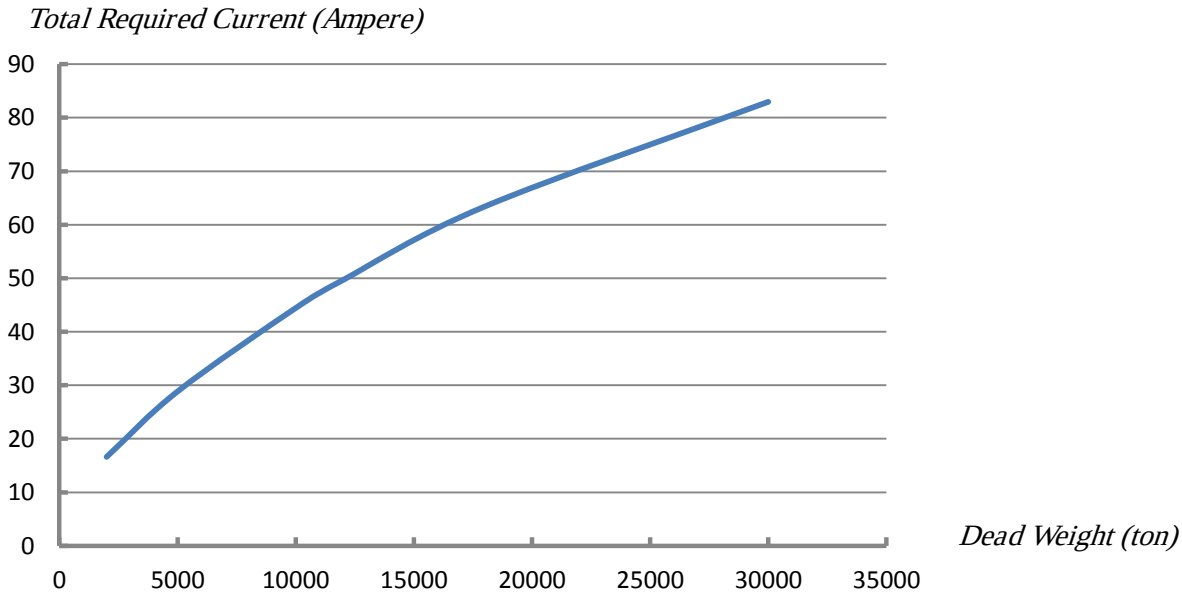
Dead weight (ton)	Area= $L_{PB}(1.8\times D+ C_b\times B)$ (m^2), C_b=0.75	Total Required Current (Ampere)	Total Required Weight (Kg)	
			Al	Zn
2000	1385	16.62	174.5	558.43
5000	2403	28.84	302.82	969.0
10000	3703	44.43	467.0	1497.15
12000	4138	49.66	521.43	1668.6
18000	5283	63.4	665.7	2130.42
30000	6913	82.96	871.0	2787.46

تمّ رسم الشكل (1)، الذي يبين العلاقة بين الوزن الكلي المطلوب لكلّ من مصعد الألمنيوم والتوتياء لسفن بضائع عامة ذات حمولات مختلفة، كتابع للوزن المحمول لسفن البضائع العامة، كما تمّ أيضا رسم الشكل (2)، الذي يبين العلاقة بين التيار الكلي المطلوب للمصعد كتابع للوزن المحمول لسفن البضائع العامة.

نلاحظ بأنّ الوزن المطلوب من مصاعد التوتياء أكبر بحوالي 3.2 مرّة منه للوزن المطلوب من مصاعد الألمنيوم، لأنّه يتعلّق بمعدّل استهلاك التوتياء الذي هو *11.2 Kg/A.year*، بينما للألمنيوم هو *11.2 Kg/A.year*. بينما نلاحظ أنّ شدة التيار المطلوب للحماية هو ذاته لكلا المصعدين، لأنّه يتعلّق فقط بمساحة السطح المراد حمايته وهو ثابت.



الشكل (1) العلاقة بين الوزن الكلي المطلوب للمصاعد والوزن المحمول



الشكل (2) العلاقة بين التيار الكلي المطلوب للمصاعد والوزن المحمول

لحساب عدد المصاعد، نختار المصاعد من الجدولين 7و 8. يتم حساب عدد المصاعد اعتمادا على الوزن المطلوب من المصاعد والتيار الكهربائي الذي تقدمه المصاعد المركّبة باستخدام المعادلتين 4 و5، حيث يحدد وزن المصعد المختار من الجدولين 7 و 8، بينما يجب حساب التيار الكهربائي للمصعد *Individual Current Output* باستخدام علاقة أوم: $I = E / R$.

حيث: $E= -0.8-(1.05)=0.25(volte)$: فرق الجهد بين المصعد والمعدن المراد حمايته. وتحسب مقاومة المصعد للمصاعد اللوحية باستخدام علاقة *Lloyds'*: $R= \rho/2S\ (ohm)$

$\rho=25\ ohm.cm$: مقاومة المحلول الكهربائي (ماء البحر).

$S = a+b/2\ (cm)$: متوسط ابعاد جوانب المصعد.

يبين الجدول 11 قيم المقاومة الكهربائية والتيار الكهربائي لكل من مصعدي الألمنيوم والتوتياء المختارين.

الجدول 11 قيم المقاومة الكهربائية والتيار الكهربائي.

Anode Type	Product Code	Anode Length mm	Anode Width mm	Anode Height mm	Nominal net weight Kg	Nominal Gross weight Kg	R Ohm	I Ampere
المنيوم	AW18C1	580	135	40	7.5	9.0	0.349	0.715
توتياء	NW17C2	500	125	55	20.30	21.60	0.4	0.625

نتائج الحساب للعدد المطلوب من المصاعد لحماية البدن الخارجي لسفن البضائع العامة (الجدول 9) مبينة في الجدول 12.

الجدول (12) عدد المصاعد المطلوبة لحماية البدن.

Dead weight (ton)	*Total Required Current (A)*	*Total Required Weight (Kg)*		عدد مصاعد الألمنيوم		عدد مصاعد التوتياء	
		Al	*Zn*	اعتماد على الوزن	اعتماد على التيار المطلوب	اعتماد على الوزن	اعتماد على التيار المطلوب
2000	16.62	174.5	558.43	24	24	28	27
5000	28.84	302.82	969.0	42	42	48	47
10000	44.43	467.0	1497.15	63	63	74	72
12000	49.66	521.43	1668.6	70	70	83	80
18000	63.4	665.7	2130.42	89	89	105	102
30000	82.96	871.0	2787.46	117	117	138	133

نلاحظ أن العدد المطلوب من مصاعد الألمنيوم هو نفسه اعتمادا على كلّ من الوزن أو التيار، بينما العدد المطلوب من مصاعد مادة التوتياء اعتمادا على الوزن هو أكبر من ذلك الذي يعتمد على التيار، لذلك يتم اختيار عدد مصاعد التوتياء اعتماد على الوزن المطلوب.

يتم توزيع المصاعد على المساحة التي تقوم المصاعد بتأمين التيار الكهربائي الذي يحافظ على فرق الجهد المطلوب بين المصاعد والسطح المراد حمايته. تحسب المساحة التي يقوم المصعد بحمايتها من التآكل باستخدام العلاقة التالية:

$$Maximum\ Area\ Protected = Anode\ Current(A)/Max.\ Current\ Demand(A/m^2)$$

كل مصعد ألمنيوم يقوم بحماية مساحة مقدارها $59.6\ m^2$، بينما يقوم مصعد التوتياء بحماية مساحة مقدارها $52\ m^2$.

يبين الجدول التالي المساحة التي يمكن أن تقوم المصاعد بحمايتها.

الجدول (13) المساحة المحمية باستخدام المصاعد المحسوبة.

Dead weight (ton)	المساحة المراد حمايتها (m^2)	المساحة المحمية باستخدام مصاعد الألمنيوم(m^2)	المساحة المحمية باستخدام مصاعد التوتياء(m^2)
		Max. Area Per one Anode= 59.6 m^2	Max. Area Per one Anode=52 m^2
2000	1385	1430.4	1456
5000	2403	2443.6	2496
10000	3703	3754.8	3848
12000	4138	4172	4316
18000	5283	5304.4	5460
30000	6913	6973.2	7176

نلاحظ من الجداول 12 و13 أنّ المصاعد المصممة تؤمّن الحماية المطلوبة لأبدان السفن، حيث أنّها تقدّم التيار المطلوب للحماية، كما أنّها تؤمّن الحماية لكامل السطح الغاطس.

الاستنتاجات والتوصيات:

الصدأ هو تفاعل كهروكيميائي وأحد أعظم أعداء السفينة، وأحد أكبر مشاكل اصلاح السفن. يقوم هذا التفاعل بتدمير أحد المعدنين بشكل تدريجي من خلال تفاعله مع الوسط المحيط. انه مكلف ماديا ، ويمكن أن تكون التكلفة كبيرة جدا اذا لم يتم اصلاح أو استبدال المعدات المعرضة للصدأ، لذلك يجب حماية انشاءات البدن في السفن من التآكل.

تمّ في هذا البحث تقديم مراجعة عامة للطريقتين الرئيستين في الحماية المهبطية: *ICCP* و *SACP*. لقد تبيّن أنّ نظام الحماية بالمصعد الذّواب مناسب جدا بشكل خاص للاستخدام الداخلي وللإنشاءات المعقدة، حيث يقدّم الحماية لكامل انشاء السفينة بتوزيع مناسب للمصاعد الصغيرة. كما يتميز بالبساطة في التركيب، اجراء الصيانة بحرّية بين فترات التحويض للسفينة، كلفته المنخفضة من أجل فترة التشغيل القصيرة. لهذه الأسباب تحمى غالبا المراكب باستخدام المصاعد المضحية.

تمّ توضيح الحسابات التصميمية لنوعين من المصاعد المضحية (مصاعد الألمنيوم ومصاعد التوتياء) لسفن البضاعة العامّة ذات الحمولات المختلفة. تبيّن أنّ حسابات الحماية المهبطية باستخدام المصاعد المضحية تعتمد بشكل كبير على مساحة السطح المراد حمايته وعلى كثافة التيار المطلوب للإنشاء.

تمّ تحقيق الحماية المطلوبة وذلك بحساب عدد المصاعد اعتمادا على الوزن الكلي لهذه المصاعد والتيار المطلوب الذي تقدّمه للسطح المراد حمايته. يعتقد بأنّ هذه الحسابات التصميمية ستقود الى حماية فعّالة لمنع الصدأ سفن البضائع، حيث ستقلل الصيانة والاصلاح الذي يسببها الصدأ.

يمكن أن تمتد هذه الدراسة لحماية كل أنواع المنشآت البحرية من الصدأ، كما يمكن برمجة هذه الحسابات لإجراء حسابات سريعة للحماية المهبطية.

References:

1- Tahsin Tezdogan& Yigit Kemal Demirel, An Overview of Marine Corrosion Protection with a Focus on Cathodic Protection and Coating, Brodogradnja/ Shipbuilding, Volume 65, No. 2, 2014.

2- Zaki Ahmad, Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control, Chthodic Protection- an overview, SienceDirect, 2006.

3- American Bureau of Shipping, Guidance Notes on Cathodic Protection of Ships, December 2017.
4- Cathodic Protection for Boats in Salt Water, Oregon State University Extension Mrine Advisory Program, A Land Grant/ Sea Grant Cooperative SG 46 November 1979.
5- Craig Botha, Paradigam Projects, Cathodic Protection for Ships, Mechnical Technology May 2000.
6- D.J. Eyres M.S.C, Corrosion Control and Antifouling Systems, Ship Construction, Seventh Edition, MSNAME,2012.
7- A. Mathiazhagan, Design and Programming of Cathodic Protection for Ships, International Journal of Chemical Engineerin and Applications, Vol. 1, No. 3 October 2010.
8- Lloyd Register, https:/www. Amacgroup.com. au/ Sacrificial Anodes- Aluminum, Certified ISO 9001.
9- Lloyd Register, https:/www. Amacgroup.com. au/ Sacrificial Anodes- Zinc, Certified ISO 9001.
10- Hironao TAKAHASHI, Study on Standards for Main Dimensions of the Design Ship, Technical Note of NILIM No. 309.