

طراحی سیستم های حفاظت کاتدی برای پیشگیری از خوردگی سازه های فولادی در محیط های دریایی

بابک یوسف زاده^۱، مهدی ثابت^۲، محمدرضا تابع افشار^۳

پرسنل طراحی شرکت لوله و پروفیل ارومیه ، عضو هیئت علمی دانشکده مکانیک دانشگاه ارومیه، مدیر طراحی شرکت لوله و پروفیل ارومیه

چکیده :

حفاظت کاتدی روشی مناسب برای کنترل خوردگی سازه های فولادی است که بطور گسترده ای در محیط های دریایی استفاده می شود. در این روش از طریق کاتد نمودن فلز در یک پیل الکتروشیمیایی سرعت خوردگی فلز مورد نظر بطور قابل ملاحظه ای کاهش میابد. اعمال جریان کاتدی ، موجب افزایش pH الکترولیت مجاور کاتد شده و چون حلالیت نمکهای معدنی در محیط های قلیایی نسبت به محیط های خنثی کمتر است، این افزایش pH منجر به تشکیل پوسته محافظی از رسوبات آهکی روی سطح سازه می شود. میزان آند لازم که بتواند دانسیته جریان کافی برای تشکیل این پوسته در مدت عمری که انتظار می رود را تأمین کند مستلزم محاسبات و انجام طراحی می باشد . در این مقاله سعی شده است برای درک و آگاهی بهتر ابتدا اصول الکتروشیمیایی خوردگی و تئوری حفاظت کاتدی و در ادامه مبانی طراحی سیستم های حفاظت کاتدی بر اساس استانداردهای موجود بررسی شود، مراحل طراحی به گونه ای تنظیم شده است که تا حد امکان شامل محیط های دریایی متنوع گردد .

واژه های کلیدی :

حفاظت کاتدی ، آب دریا ، پلاریزاسیون ، آند فداشونده، پتانسیل حفاظت

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ساخت و تولید دانشگاه ارومیه

۲- استادیار و عضو هیئت علمی دانشکده فنی دانشگاه ارومیه

۳- کارشناسی مهندسی مکانیک ماشین آلات از دانشگاه ارومیه

مقدمه:

خسارتها و زیانهای حاصل از خوردگی¹ بعنوان یک واقعیت اجتناب ناپذیر است که اغلب ناشی از عدم آگاهی کلی و یا بی اعتنائی به اهمیت اقتصادی آن می باشد. در صنعت نوین، خطوط لوله مخازن، پوسته چاهها، سازه های بتون مسلح کابل های ارتباطی و غیره، استفاده گسترده ای از فلزات در زیر زمین می شود. این امر مستلزم سرمایه گذاری بسیار زیاد در این موارد است. اگر این سازه های فلزی که در تماس مستقیم با خاک و یا آب هستند، حفاظت نشده و یا اینکه حفاظت کامل نشوند، دچار خوردگی خواهند شد. هزینه تعویض و تعمیر سازه های خسارت دیده در اثر خوردگی زیر زمینی، می تواند قابل ملاحظه باشند. به علاوه در مواردی که خوردگی باعث انهدام می شود، امکان حادثه و یا حتی فاجعه (نظیر نشت نفت) وجود دارد [1].

معمولاً حفاظت توسط پوشش ها برای این گونه تاسیسات کافی نیست. در این پوشش ها، حفره ها و سوراخ هایی در اثر تخریب موضعی، یا خسارات مکانیکی مربوط به حمل و نقل نامناسب و یا تنش های مربوط به خاک پدید می آید. حفاظت کاتدی ایده ساده ای است که توسط آن با کاتد کردن تمامی سازه فلزی واکنش های آندی را متوقف می کنند. این یک روش الکترو شیمیایی برای جلوگیری از خوردگی بوده که برای سازه های فلزی غوطه در یک محیط یا الکترولیت رسانا نظیر آب، خاک و یا بتن استفاده می شود. اگر حفاظت کاتدی خوب و صحیح اعمال شود می تواند فلزات بدون پوشش و یا نواحی حفره دار در سطح فلز پوشش داده شده را حفاظت کند [2].

استفاده از آندهای روی، یک روش الکتروشیمیایی بوده که در سال 1824 میلادی توسط هامفری دیوی² برای حفاظت روکشهای مسی کشتیها ارائه و به کار گرفته شد. این روش به حدی موفقیت آمیز بود که هیچ گونه انحلال (خوردگی) مس و یا تشکیل نمکهای مس ملاحظه نشد. بعد از او ادموند دیوی³ دستگاهها و وسایل آهنی شناور در دریا را با نصب قطعاتی از فلز روی (Zn) محافظت کاتدی نمود و ربرت مالت⁴ در 1840 آلیاژی از فلز روی ساخت که به عنوان آندهای از بین رونده مورد استفاده قرار گرفت [3]. کاربرد آندهای از بین رونده ادامه داشت تا اینکه بتدریج رنگهای ضد زنگ ساخته شد و استفاده از آنها به منظور صرفه جوئی در هزینه تعمیرات رواج بیشتری یافت. این وضع تا یکصد سال بعد، یعنی دهه 1930 میلادی ادامه یافت [1]. از این تاریخ به بعد، استفاده صنعتی از حفاظت کاتدی در مقیاس وسیع شروع شد. امروزه برای پیشگیری از خطرات ناشی از خوردگی اکثر قطعات و تاسیسات فولادی که در محیطهای خورنده قرار دارند از قبیله: دریچه های کانال ها، خنک کننده های آبی، زیردریایی ها، مخازن آب، پمپ ها، اسکله ها و تاسیسات دریایی دیگر از این روش استفاده می شود.

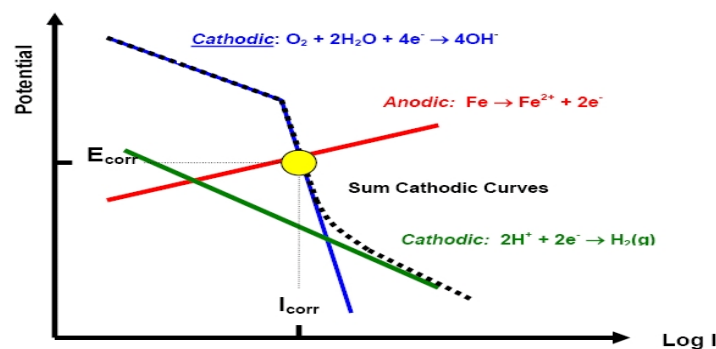
اصول الکتروشیمیایی خوردگی

فولاد های کربنی و فولادهای ضد زنگ در تماس با آب دریا در معرض خوردگی قرار می گیرند. واکنش هایی که در سطح فلز رخ می دهند شامل واکنش های زیر می باشند: [2]



1-Corrosion
2-Humphrey Davy
3-Edmund Davy
4-Robert Mallet

این واکنش ها به صورت شماتیک در نمودار E-log i (شکل 1) نشان داده شده اند .

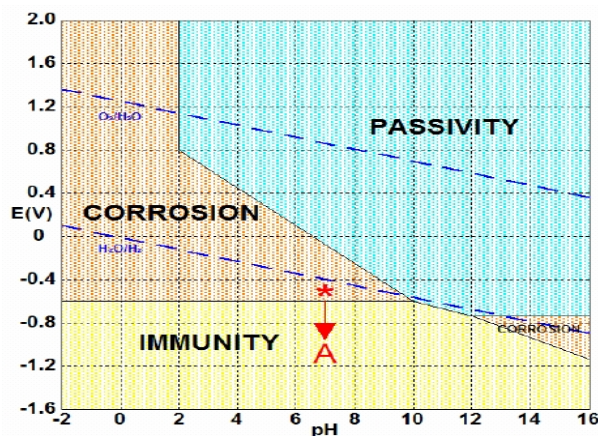


شکل 1- نمودار E-log i برای فولاد کربنی در آب در یا [4]

خوردگی در محل تلاقی منحنی های آندی و کاتدی واقع می باشد. که این نقطه متناظر با پتانسیل خوردگی (E_{corr}) و دانسیته جریان خوردگی (i_{corr}) می باشد. که نرخ خوردگی آهن متناسب با این دانسیته جریان می باشد.

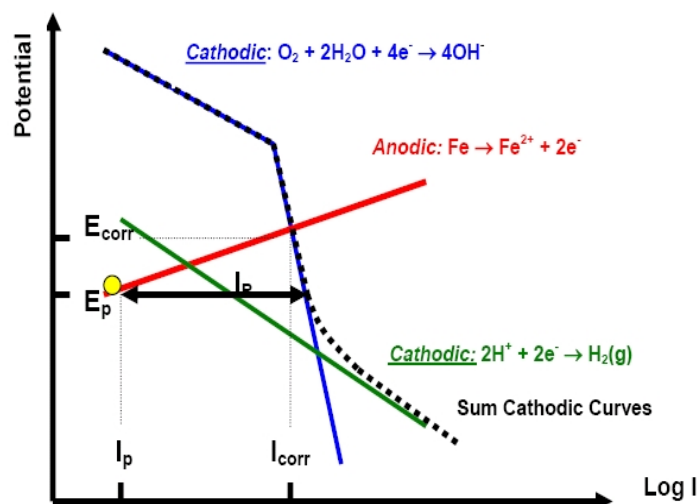
تئوری حفاظت کاتدی

دیاگرام های Pourbaix وضعیت یک فلز را برای پتانسیل ها و pH های مختلف نشان می دهد. در این دیاگرام مشخص است که فلز می تواند در سه وضعیت مختلف غیر فعال و خوردگی و مصونیت نسبت به E و pH های متفاوت قرار بگیرد. پتانسیل خوردگی فولاد کربنی در حدود 600- میلی ولت نسبت به الکترود مرجع Ag/AgCl می باشد [2]. دیاگرام Pourbaix مشخص می کند که فولاد در این پتانسیل و در pH حدود 7 در وضعیت خوردگی قرار گرفته است. (شکل 2)



شکل 2- دیاگرام Pourbaix برای فولاد های کربنی [3]

یکی از راههای پیشگیری از خوردگی پایین آوردن پتانسیل تا منطقه مصونیت (حفاظت کاتدی) می باشد. مطابق شکل 3 پایین آمدن پتانسیل فلز باعث کاهش دانسیته جریان واکنش های آندی می شود ، که این عمل را حفاظت کاتدی می نامند که با اعمال یک خارجی به سازه ای که باید حفاظت شود ، بدست می آید.



شکل 3- نمودار E-log i برای فولاد کربنی در آب دریا همراه با جریان حفاظتی I_p [4]

پتانسیل خوردگی نرمال E_{corr} فولاد های کربنی در آب دریا در محدوده -550 تا -660 میلی ولت نسبت به الکتروود مرجع Ag/AgCl قرار دارد . برای حفاظت این فولادها یک پتانسیلی (E_p) کمتر از -800 میلی ولت نسبت به الکتروود مرجع Ag/AgCl لازم می باشد[2].

سیستم های حفاظت کاتدی :

جریان حفاظتی مذکور را معمولا می توان از دو طریق اعمال کرد :

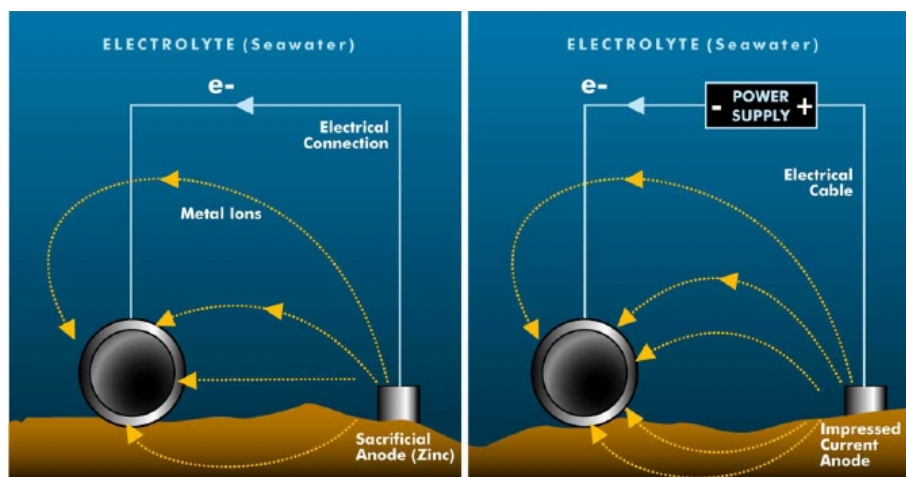
1- استفاده از آندهای فدا شونده¹

2- جریان اعمالی از یک منبع خارجی (یکسو)²

یک سیستم کامل حفاظت از خوردگی برای یک سازه یا تاسیسات فولادی عموما بصورت ترکیبی از دو سیستم حفاظت کاتدی و پوشش دهی می باشد.

شکل 4 شماتیکی از اصول حفاظت کاتدی توسط دو سیستم را نشان می دهد .

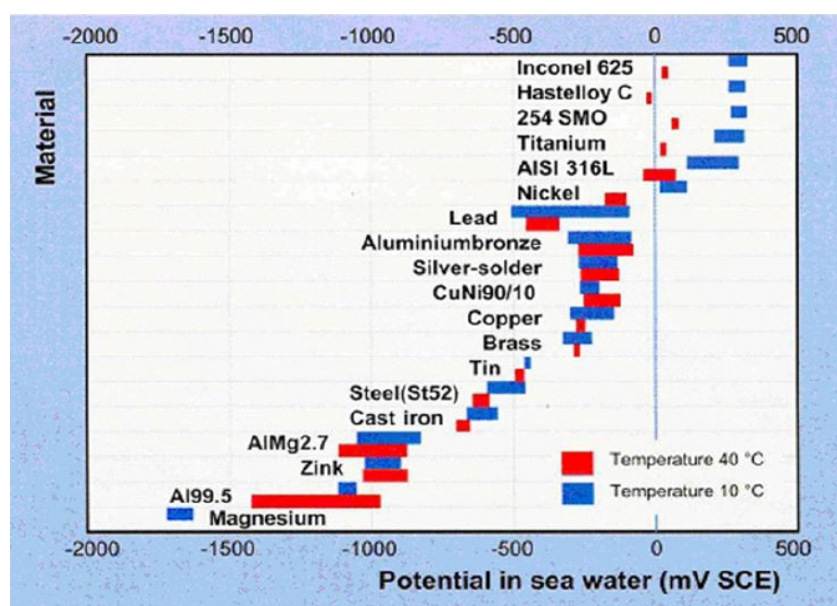
1-Sacrificial Anodes System
 2- Impressed Current System



شکل 4 - سمت چپ سیستم آند های فداشونده ، سمت راست سیستم اعمال جریان خارجی [4]

سیستم آند های فدا شونده :

حفاظت کاتدی با آند های فداشونده بر پایه اصول خوردگی گالوانیکی استوار می باشد. و مفهوم آن استفاده از یک فلز کمتر نجیب ، در تماس الکتریکی با فلز سازه حفاظتی می باشد. برای انتخاب ماده آند فداشونده مناسب ، استفاده از سری گالوانیکی مواد در آب دریا بسیار مهم می باشد . شکل 5 سری گالوانیکی مواد منتخب را در آب دریا نشان می دهد.



شکل 5 - سری گالوانیکی بعضی فلزات در آب دریا [3]

از شکل 5 مشخص می شود که پتانسیل خوردگی فولاد کربنی در آب دریا در محدوده 550- تا 600- میلی ولت نسبت به SCE قرار دارد. برای کاهش پتانسیل فولاد با استفاده از آند ها ، یک آندی با پتانسیل منفی تر از 600- میلی ولت نسبت به SCE باید انتخاب شود . شکل نشان میدهد که آلیاژهای روی و آلومینیوم و منیزیم از این لحاظ بسیار مناسب هستند. ولی دی پلاریزاسیون شدید منیزیم در آب دریا به علت وجود یون های کلراید و سولفاتها باعث خوردگی شدید آن می شود و به همین دلیل از آندهای منیزیم به تنهایی در آب دریا استفاده نمی شود.

الکترودهای مرجع :

اندازه گیری پتانسیل مطلق یک الکتروود تنها ، میسر نمی باشد، مع هذا ، بطور قراردادی انتخاب پتانسیل صفر برای الکتروود استاندارد هیدروژن (SHE)، امکان بدست آوردن مقادیر پتانسیل الکتروود را فراهم می کند . در عمل می توان بجای الکتروود استاندارد هیدروژن از الکتروودهای مرجع متفاوتی برای تعیین پتانسیل الکتروشیمیایی سطح فلزی که در معرض الکتروولیت های مختلف قرار دارد ، استفاده کرد، جدول 1 الکتروود های مرجع متداول و اختلاف پتانسیل های بین الکتروود های مختلف را نشان می دهد.

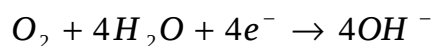
Name	Nernst Equation (V vs. SHE)	Potential (V vs. SHE)	T coefficient (mV °C ⁻¹)
Hydrogen (SHE)	$E^0 - 0.059 \text{ pH}$	0.00	..
Silver chloride	$E^0 - 0.059 \log a_{\text{chloride}}$	0.2224	-0.6
	0.1 M KCl	0.2881	..
	1.0 M KCl	0.235	..
	saturated (KCl)	0.199	..
	seawater	~0.250	..
Calomel	$E^0 - 0.059 \log a_{\text{chloride}}$	0.268	..
	0.1 M KCl	0.3337	-0.06
	1.0 M KCl	0.280	-0.24
	(SCE) saturated (KCl)	0.241	-0.65
Mercurous sulfate	$E^0 - 0.0295 \log a_{\text{sulfate}}$	0.6151	..
Mercuric	$E^0 - 0.059 \text{ pH}$	0.926	..
Copper sulfate	$E^0 + 0.0295 \log a_{\text{copper}}$	0.340	..
	saturated	0.318	..

Silver chloride = Ag/AgCl
 Saturated Calomel = SCE
 Copper Sulfate = Cu/CuSO₄

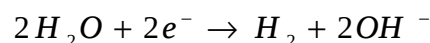
جدول 1 : الکتروودهای مرجع متداول مورد استفاده در الکتروولیت های مختلف [3]

چگونگی شکل گیری رسوبات کالکریسی¹

برای حفاظت کاتدی سازه های فولاد در آب دریا یا معمولاً از پتانسیل های حدود (SCE) -0.8V الی -1.2V- استفاده میشود . در این رنج از پتانسیلها اکسیژن حل شده در آب دریا در اثر واکنشهای زیر بر روی سطح فولاد احیا می شود و باعث افزایش pH در مجاورت سطح فولادی می شود [4].

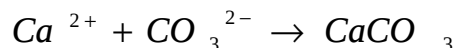
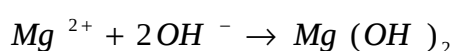
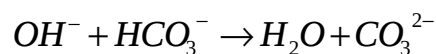


در پتانسیلهای خیلی منفی احیاء هیدروژن خواهیم داشت:



1-CALCAREOUS

در هر دو حالت تولید یونهای هیدروکسیل منجر به افزایش pH الکترولیت مجاور سطح فلز می شود در اثر افزایش pH یونهای هیدروکسیل با یونهای منیزیم و کلسیم موجود در آب دریا مطابق واکنشهای زیر واکنش داده و ترکیبات $Mg(OH)_2$ و $CaCO_3$ بر روی سطح رسوب می کنند که به رسوبات کلکریوسی مرسوم هستند.



شکل گیری رسوبات کالکریوسی در سطح فلز مانع از نفوذ اکسیژن به سطح فلز شده و در نتیجه باعث کاهش میزان دانسیته جریان مورد نیاز برای حفاظت می شوند [4].

مراحل طراحی :

• آماده سازی اصول طراحی

قبل از شروع کار های طراحی ، باید اصول طراحی از طرف مشتری یا مدیر پروژه تعیین شود ، که می توانند شامل موارد زیر باشند:

- طراحی بر اساس کدام استاندارد یا روش پیشنهاد شده می باشد.
- نوع سیستم حفاظتی : آند فدا شونده یا جریان اعمالی
- آیا حفاظت همراه با سیستم پوشش دهی می باشد.
- دانسیته جریان لازم (حتی اگر مطابق استاندارد نباشد باید گزارش شود)
- پتانسیل حفاظتی
- اگر از سیستم پوشش دهی استفاده شود، باید نوع پوشش و ضریب تفکیک آن مشخص شود.
- میزان انحراف از استاندارد واقعی
- ارائه اسناد و مستند سازی بر پایه اطلاعات طراحی

• تعیین سطح منطقه تحت حفاظت

بر پایه اطلاعات جمع آوری شده از وضعیت سازه در آب دریا ، و با در نظر گرفتن قسمت های مختلف سازه از لحاظ دما و عمق های متفاوت ، کل سطح این مناطق باید مشخص شده و با هم جمع شوند . باید در نظر داشت که هر یک از این سطوح دارای دانسیته جریان مشخصی می باشند. سطح کل حفاظتی ، حاصل جمع مساحت تمامی سطوحی است که باید حفاظت شوند [5].

$$\text{Total area } A_T = \sum A_1 + A_2 + \dots A_n$$

• محاسبه جریان کل حفاظتی

جریان کل حفاظتی I_T از رابطه زیر محاسبه می شود :

$$I_T = \sum (i_1 A_1 + i_2 A_2 + \dots i_n A_n)$$

که در این رابطه $i_1, i_2, \dots, i_n$ به ترتیب دانسیته جریان های معادل سطوح $A_1, A_2, \dots, A_n$ می باشند. مطابق استاندارد DNV سه مقدار جریان مختلف تعریف شده است که عبارتند از :

جریان اولیه I_i : جریان کاتدی لازم برای ایجاد پلاریزاسیون مؤثر در سطح اولیه بدون پوشش می باشد.

$$I_i = \sum (i_{i1}.A_1 + i_{i2}.A_2 + \dots + i_{in}.A_n)$$

جریان میانگین I_A : جریان کاتدی لازم برای حالتی که سیستم حفاظت کاتدی به یک وضعیت پایداری از پتانسیل حفاظتی رسیده باشد.

$$I_A = \sum (i_{A1}.A_1 + i_{A2}.A_2 + \dots + i_{An}.A_n)$$

جریان نهایی I_F : جریان کاتدی لازم بعد از شکل گیری رسوبات کاکریسی در انتهای دوره حفاظتی می باشد.

$$I_F = \sum (i_{F1}.A_1 + i_{F2}.A_2 + \dots + i_{Fn}.A_n)$$

دانشیه جریانهای اولیه، میانگین و نهایی در استاندارد DNV (بخش 3-6) برای آبهای مناطق مختلف پیشنهاد شده است .
 در صورتیکه سیستم حفاظتی بصورت مرکب همراه با یک سیستم پوششی انجام پذیرد ، جریان لازم برای حفاظت باید به فاکتور تفکیک پوشش fb ضرب می شود.
 جریانهای کل اولیه ، نهایی و میانگین بایستی با تاثیر فاکتورهای پوشش اولیه ، میانگین و نهایی محاسبه شوند :

Total initial current: $I_{Ti} = \sum (i_{i1}.A_1.fb_{i1} + i_{i2}.A_2.fb_{i2} + \dots + i_{in}.A_n .fb_{in})$

Total average current: $I_{TA} = \sum (i_{A1}.A_1.fb_{A1} + i_{A2}.A_2.fb_{A2} + \dots + i_{An}.A_n.fb_{An})$

Total final current: $I_{TF} = \sum (i_{F1}.A_1.fb_{F1} + i_{F2}.A_2.fb_{F2} + \dots + i_{Fn}.A_n.fb_{Fn})$

• **جریان حفاظتی لازم برای یک عمر واقعی :**

الف- وضعیت بدون پوشش [5] :

$$I_P = \text{Max} (I_i, I_A, I_F)$$

ب- وضعیت همراه با پوشش [5]:

$$I_P = \text{Max} (I_{Ti}, I_{TA}, I_{TF})$$

• **محاسبه جرم کل آند لازم برای حفاظت :**

جرم کل آند لازم برای حفاظت (m_{TA}) برپایه کل جریان میانگین مطابق معادله زیر محاسبه می شود [5]:

$$m_{TA} = (I_{TA} . t . 8670) / (U . C)$$

که در آن :

I_{TA} : جریان کل میانگین

t : عمر طراحی بر حسب سال

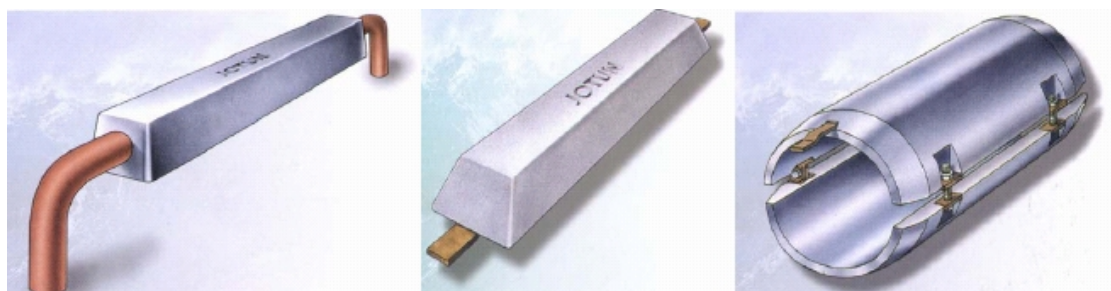
8760: تعداد ساعت در سال

U : فاکتور بهره وری آند

C : ظرفیت الکتروشیمیایی آند

• **انتخاب نوع و اندازه آند**

متداول ترین انواع آند های مورد استفاده برای حفاظت کاتدی در شکل 6 آمده اند.
 آندها باید در سائز های استاندارد انتخاب شوند که مطابق اطلاعات سازنده آندها انجام می گیرد .



شکل 6: انواع آندهای کاربردی [4]

علاوه بر شکل و اندازه، پارامترهای دیگر آندها باید مشخص باشند که عبارتند از:

- در صد بهره وری آندها¹
 - ظرفیت الکتروشیمیایی آندها² (آمپر ساعت بر سال)
 - مقاومت الکتریکی آندها
- که این پارامترها یا از طرف کارخانه سازنده و یا از طریق محاسبات مشخص می شوند.

• محاسبه مقاومت الکتریکی آندها

مقاومت الکتریکی آندها را R_a می توان مطابق فرمول های جدول زیر محاسبه کرد:

ANODE TYPE	RESISTANCE FORMULA
Long slender stand-off anode; $L \geq 4r$	$R_a = (\rho / (2\pi L)) (\ln(4L/r) - 1)$
Short slender stand-off anode; $L < 4r$	$R_a = (\rho / (2\pi L)) (\ln[2L/r(1 + \sqrt{1 + (r/2L)^2})] + r/2L - \sqrt{1 + (r/2L)^2})$
Long flush mounted $L \geq 4x$ with and thickness	$R_a = \rho / (2S)$
Short flush mounted, bracelet and other flush mounted shapes	$R_a = 0.315\rho / \sqrt{A}$

جدول ۲: فرمول های محاسبه مقاومت آندها [۶]

که در این فرمول ها:

$\rho(\Omega m)$ مقاومت الکتریکی آب دریا

$L(m)$ طول آندها

$S(m)$ میانگین طول و عرض آندها

$A(m^2)$ سطح منطقه بدون پوشش آندها

$r(m)$ شعاع آندها

1-Utilization factor

2- Anode capacity

• محاسبه تعداد آند مورد نیاز

با مشخص بودن کل جرم آند لازم m_{TA} و جرم هر یک از آندهای استاندارد مورد استفاده m_a می توان تعداد آندهای لازم را محاسبه کرد [5]:

$$N_T = m_{TA} / m_a$$

• محاسبه جریان خروجی از هر آند

برای هر نوع آند مورد استفاده ، تعداد آندهای لازم برای تامین جریان کل حفاظتی بایستی برای جریان کل اولیه و نهایی محاسبه شود [6]:

$$I_{aI} = |E_P - E_a| / R_{aI}$$

جریان خروجی از هر آند در وضعیت اولیه :

$$I_{aF} = |E_P - E_a| / R_{aF}$$

جریان خروجی از هر آند در وضعیت نهایی:

که در این رابطه :

E_P : پتانسیل حفاظت

E_a : پتانسیل آند

R_{aI} : مقاومت الکتریکی آند در حالت اولیه

R_{aF} : مقاومت الکتریکی آند در حالت نهایی

• محاسبه تعداد آند لازم طراحی

$$N_I = I_{TI} / I_{aI}$$

تعداد آندهای لازم برای وضعیت اولیه :

$$N_F = I_{TF} / I_{aF}$$

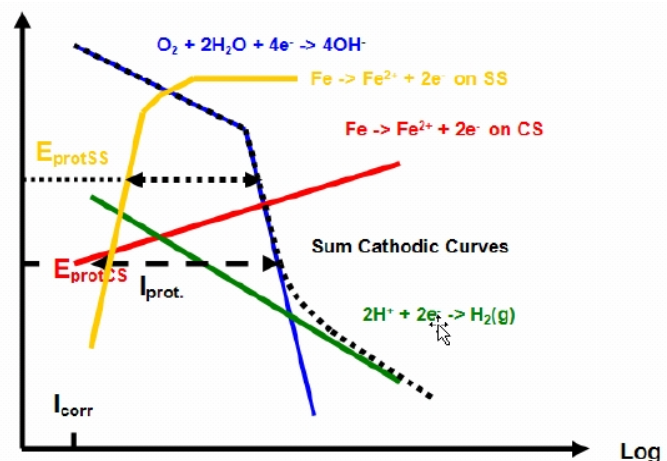
تعداد آندهای لازم برای وضعیت نهایی:

تعیین تعداد نهایی آندهای مورد نیاز :

$$N = \text{Max} (N_I, N_F, N_T)$$

• تعیین پتانسیل حفاظت برای فولاد های ضد زنگ

قبلا پتانسیل $800 \text{ mv vs Ag/AgCl}$ به عنوان پتانسیل حفاظت برای فولادهای کربنی و فولادهای ضدزنگ استفاده می شد [8]. آزمایشات نشان دادن که پتانسیل های از مثبت تر هم می توان استفاده کرد ، در شکل 7 منحنی های آندی مربوط به حل شدن یون های فولاد کربنی و ضد زنگ مشخص می باشد، چنانکه مشاهده می شود پتانسیل حفاظت E_{prot} در فولاد ضد زنگ نجیب تر از فولاد کربنی می باشد.



شکل ۷ - منحنی های پلاریزاسیون برای فولاد های کربنی و ضد زنگ [۴]

در جدول زیر مطابق استاندارد ISO، محدوده پتانسیلهای حفاظتی برای فولادهای کربنی و ضد زنگ مشخص است [8]:

Material	Minimum negative potential V	Maximum negative potential ^a V
Carbon steel		
Aerobic environment	- 0,80	- 1,10 ^b
Anaerobic environment	- 0,90	- 1,10 ^b
Austenitic stainless steel		
$N_{PRE} \geq 40$ ^c	- 0,30 ^d	- 1,10
$N_{PRE} < 40$ ^c	- 0,50 ^d	- 1,10
Duplex stainless steel	- 0,50 ^d	e
Martensitic stainless (13 % Cr) steel	- 0,50 ^d	e
The potentials given in Table 1 apply to saline mud and normal seawater compositions (salinity 3,2 % to 3,8 %).		
The potentials are referenced to an SCE reference electrode, which are equivalent to a silver/silver chloride reference electrode (Ag/AgCl/seawater) in 30 Ω·cm seawater.		
^a These negative limits also ensure negligible impact of CP on pipeline coatings.		
^b Where pipeline systems are fabricated from high strength steel ($\sigma_{SMY} > 550$ MPa), the most negative potential that can be tolerated without causing hydrogen embrittlement shall be ascertained.		
^c $N_{PRE} = \%Cr + 3,3 \% (Mo + 0,5W) + 16 \%N$.		
^d For stainless steels, the minimum negative potentials apply for aerobic and anaerobic conditions.		
^e Depending on strength, specific metallurgical condition and stress level encountered in service, these alloys can be susceptible to hydrogen embrittlement and cracking. If a risk of hydrogen embrittlement exists, then potentials more negative than -0,8 V should be avoided.		

سیستم اعمال جریان¹

این سیستم ها شامل تجهیزات زیر می باشند:

- رکتیفایر (برای تامین جریان یکسو)
- آند کمکی
- الکتروود رفرنس

1- Impressed current system

در این روش یک منبع جریان یکسو (رکتیفایر) را به ترتیبی در سیستم قرار می دهند که قطب مثبت آن متصل به یک آند کمکی و قطب منفی آن به فلز یا دستگاه موردنظر وصل شود بطوری که جریان در داخل الکترولیت از آند به سمت فلز مورد نظر برقرار می گردد. ولتاژ اعمال شده باید به مقداری تنظیم شود که بتواند شدت جریان کافی برای تمام قطعه ای که تحت حفاظت کاتدی قرار گرفته است تامین نماید در مورد آبهای با مقاومت زیاد ولتاژ اعمال شده باید بیشتر از محیطهایی با مقاومت کمتر باشد همچنین وقتی که طول زیادی از یک خط لوله فقط به وسیله یک آند محافظت شود به ولتاژ اعمال شده بیشتری نیاز دارد. در شکل 8 یک سیستم اعمال جریان برای حفاظت کاتدی بدنه یک کشتی نشان داده شده است.



شکل 8: شماتیکی از سیستم اعمال جریان [4]

توزیع آندها در سیستم حفاظت کاتدی

آندها بایستی به نحوی توزیع شوند که جریان و پتانسیل لازم حفاظتی را در حد امکان تامین کنند. نکات مهمی که در این مورد باید مد نظر گرفته شوند به قرار زیر می باشد:

- توزیع آندها در یک ساختار متقارن (لوله)
- استفاده از آندهای بیشتر در مناطق با تمرکز سطحی زیاد
- نصب آنها همیشه در زیر سطح آب

برای پیدا کردن روش مناسب توزیع آندها یا می توان عملاً با انجام آزمایش های مختلف و یا با استفاده از مدلسازی کامپیوتری و شبیه سازی سازه تحت حفاظت و آنالیز جریان و پتانسیل کل سازه بهینه ترین روش توزیع را انتخاب کرد . در شکل 9 چگونگی توزیع آندها مشاهده می شود .



شکل ۹ : نحوه توزیع آندها

References:

- [1] زمانیان ، خوردگی و روشهای کنترل آن ، چاپ دوم ، انتشارات دانشگاه تهران ، تهران، 1374
- [2] دل. پیرون، "الکتروشیمی خوردگی"، ترجمه دکتر گلزار ، چاپ اول ، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان 1378
- [3] Corrosion Doctors web site, <http://www.corrosion-doctors.org>
- [4] Cathodic Protection, Prepared By Professor Roy Johnson, of Engineering Design and Materials
- [5] DnV RP B401 "Cathodic Protection Design", revision 1993
- [6] NORSOK M-503 "Cathodic Protection"
- [7] NACE RP0176-83: "Corrosion control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production"
- [8] ISO 15589-1/2:2004 Petroleum and natural gas industries – Cathodic protection of pipeline transportable systems - Part 2: Offshore pipelines