

# روش‌های جلوگیری از خوردگی

### 4-1- انتخاب مواد مناسب (مقاوم در برابر خوردگی)

الف) آلیاژها (ب) فلزات خالص (ج) غیر فلزات  
الف) آلیاژها: با اضافه کردن عناصر آلیاژی مناسب می‌توان مقاومت به خوردگی را زیاد کرد.  
مثال:

$Fe + C$  مقاومت خوردگی کمی در محیط‌های اکسید کننده دارد.  
 $Fe + Cr + C$  مقاومت خوردگی بهتری در محیط‌های اکسید کننده خواهد داشت.  
 $Fe + Cr + Ni + C$  مقاومت خوردگی بهتری در محیط‌های اکسید کننده و بازی دارد.  
 $Fe + Cr + Ni + Mo + C$  مقاومت خوردگی بهتری در محیط‌های اکسید کننده و بازی دارد، به علاوه در برابر یون کلرید مقاوم است.  
 $Fe + Cr + Ni + Tr + C$  مقاوم در برابر محیط اکسید کننده و غیر حساس به پوسیدگی جوش  
به اینها فولادهای زنگ نزن (*Stainless steels*) می‌گویند.

فولاد زنگ نزن به شرطی در برابر خوردگی مقاوم است که به نحو صحیحی استفاده شود.  
با این که انتخاب مواد، بهترین راه جلوگیری از خوردگی است ولی از لحاظ اقتصادی مناسب نیست. مثلاً تانتال و *pt* گران است)

- ✓ فولادهای زنگ نزن برای محیط‌های اسید نیتریک یا اسید اکسید کننده، اسید سولفوریک حاوی اکسیژن
- ✓ نیکل و آلیاژهای آن برای محیط‌های بازی یا خنثی
- ✓ سرب برای اسید سولفوریک رقیق (ضعیف)
- ✓ قلع برای محیط آب مقطر
- ✓ تانتال در مواردی که خوردگی بسیار کم نیاز باشد، نظیر داخل بدن
- ✓ مونل (آلیاژ مس - نیکل) برای اسید فلوریدریک
- ✓ ؟؟؟؟ (*Ni - Mo*) اسید کلریدریک
- ✓ آلیاژهای *Al* برای محیط‌های خنثی
- ✓ *Ti* و آلیاژهای آن محیط‌های اکسید کننده قوی

ب) فلزات خالص: از مقاومت خوب خوردگی برخوردارند اگر مشکل خواص مکانیکی نداشته باشیم. می‌توانیم از فلزات خالص استفاده کنیم).  
مثال:

استفاده از ظرف‌های آلومینیوم برای کسب مقطر و پراکسید هیدروژن  
در صفر ناخالصی در حد  $0/5\%$  می‌تواند موجب پراکسید هیدروژن شود.  
(ج) غیر فلزات: نظیر لاستیک‌ها، پلاستیک‌ها، چوب، سرامیک، گرانتیت.  
لاستیک‌ها از نظر حرارت محدودیت دارند. در اسید سولفوریک مقاومت کمی دارند. ولی در اسید کلریدریک مقاومت خوب از خود نشان می‌دهند.  
از لحاظ خواص مکانیکی پائین هستند.  
غیر فلزات هم می‌توانند جزء اصلی قطعه و هم به عنوان پوشش اضافه شوند.

### 4-2- تغییر شرایط محیطی

از آنجا که خوردگی به صورت تأثیر محیط بر فلز تعریف شد یا می‌توان ؟؟؟؟؟ عوض کرده یا محیط را عوض کرده و یا چگونگی تأثیر فلز بر محیط را متوقف نمود.

a- تغییر (کاهش) درجه حرارت: در اکثر مواقع کاهش درجه حرارت موجب کاهش خوردگی می‌شود.

چون در دماهای پایین‌تر واکنش‌ها با نرخ کمتری انجام می‌شود ولی در برخی موارد می‌تواند کاهش دما افزایش خوردگی را به همراه داشته باشد و این امر به علت تأثیر دما بر انحلال اکسیژن در ماده و محیط است.

مثال: سرعت خوردگی فولاد در آب

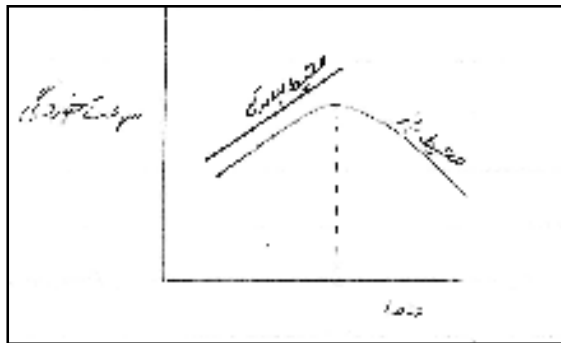
علت کاهش سرعت خوردگی خروج اکسیژن از محیط است.

ولی در محیط‌های بسته امکان خروج اکسیژن از محیط نیست و اکسیژن عامل انجام دهنده واکنش کاتدی است.

اگر در محیط بسته باشیم، کاهش دما مؤثر است ولی اگر در محیط باز باشیم، در شرایطی کاهش دما موجب افزایش خوردگی است.

b- کم کردن تلاطم و سرعت سیال محیط ← وقتی خوردگی سایش داریم.

c- ایجاد تلاطم در محیط ← وقتی خوردگی حفره‌ای داریم.



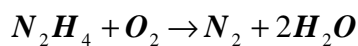
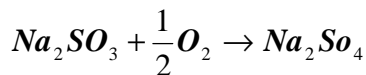
وقتی خوردگی حفره‌ای داریم، علت آن ایجاد سکون است، پس می‌تواند ایجاد تلاطم، مفید باشد.

بر عکس اگر خوردگی سایشی داشتیم، علت خوردگی، سرعت زیاد یا تلاطم است، پس از بین بردن تلاطم مفید است.

d- خارج کردن اکسیژن از محیط: که یک روش قدیمی است، گر چه روشی قدیمی است ولی تکنیک جدید است در قدیم آب را از فراهه‌ها

عبور می‌دادند، در حال حاضر، از گاز خنثی یا سیستم خلاء یا ممانعت کننده‌ها استفاده می‌شود.

به عنوان مثال :



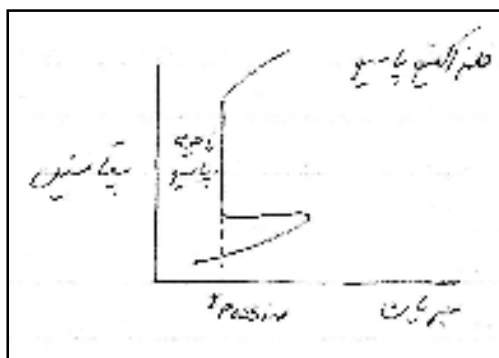
در اینجا عامل واکنش کاتدی که اکسیژن استاز محیط خارج می‌شود. (استثناء در این مورد خوردگی فولادهای زنگ نزن است).

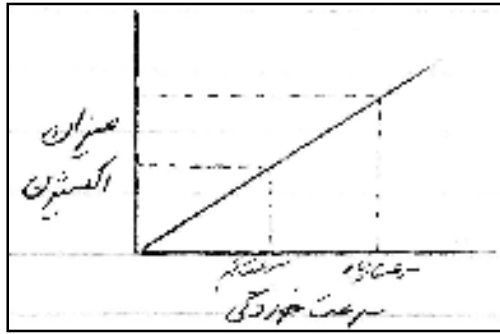
فولادهای زنگ نزن مستعد به تشکیل فیلم پاسیو است. تشکیل فیلم محافظ مستلزم حضور اکسیژن است با سرعت نسبتاً پایین خورده می‌شود. با خروج اکسیژن دیگر فیلم پاسیو تشکیل نمی‌شود.

در این حالت خروج اکسیژن باعث افزایش سرعت خوردگی می‌شود. اگر تمام اکسیژن را خارج کنیم و اگر هیچ اکسیژن نداشته باشیم خوردگی

نداریم ولی اگر اکسیژن کم باشد فیلم پاسیو تشکیل نمی‌شود و خوردگی زیاد داریم.

ولی اگر فلز اکتیو داشته باشیم، کاهش سرعت خوردگی با کاهش اکسیژن همراه است.





e- استفاده از ممانعت کننده‌ها: به طور کلی ممانعت کننده، یک ماده شیمیایی است که به مقدار کمی به محیط اضافه می‌شود، برای کاهش یا توقف خوردگی این ممانعت کننده‌ها را بر اساس مکانیزم کار تقسیم بندی می‌کنند.

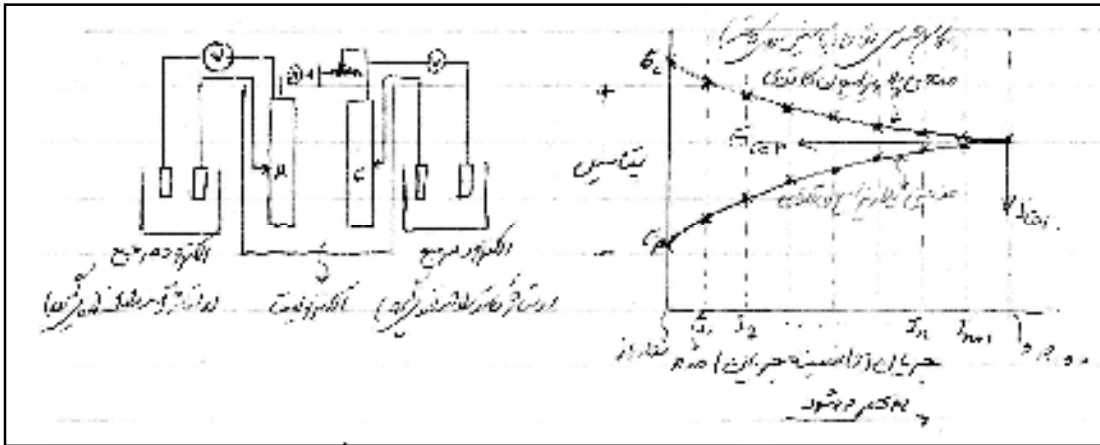
- متداولترین تقسیم بندی بر اساس کار ممانعت کننده است.
- 1- جذب سطحی: این ممانعت کننده‌ها روی سطح فلزی می‌نشینند و بر روی واکنش‌های آندی یا کاتدی یا هر دو اثر می‌گذارند. پر مصرف‌ترین نوع ممانعت کننده هستند و بیشتر از خانواده آمینها هستند.
  - 2- ممانعت کننده از نوع کاهش دهنده واکنش کاتدی احیا نیدروژن: بر روی واکنش‌های احیا هیدروژن اثر می‌گذارند. پس مخصوص محیط‌های اسیدی هستند (آرسیک، آنتراموان و فسفر).
  - 3- ممانعت کننده از نوع اکسیژن زداها: مخصوص محیط‌هایی است که واکنش احیا، آزاد شدن اکسیژن است. مثل هیدرازین و سولفید سدیم. اگر نوع 2 به محیط بازوی و نوع 3 به محیط‌های اسیدی اضافه شود، هیچ اثری ندارد.
  - 4- اکسید کننده‌ها: مثل ترکیبات کرومات و نیترات که مخصوص فلزات و آلیاژهایی هستند که بتوانند به حالت غیر فعال درآیند با اضافه کردن اکسید کننده‌ها به فلزات همواره سرعت خوردگی شدیداً زیاد می‌شود.
  - 5- ممانعت کننده از نوع فاز بخار: برای خوردگی اتمسفری به کار می‌رود به این صورت که ابتدا بخار شده و سپس به صورت کندانس بر روی تجهیزات می‌نشینند و از خوردگی جلوگیری می‌کند.
- تفاوت آن با نوع 1 آن است که این نوع در محیط اتمسفری و نوع 1 در محیط آبی کاربرد دارند.

#### نکاتی در رابطه با استفاده از ممانعت کننده‌ها:

- 1- ممانعت کننده باید در محیط بسته استفاده شود. نمی‌توان مثلاً به منبع آب ممانعت کننده اضافه کرد تا از خوردگی خطوط لوله جلوگیری شود. چون اقتصادی نیست. معمولاً به سیستم‌های بسته مثل دیگهای بخار اضافه می‌شود.
- 2- ممانعت کننده معمولاً سمی هستند. نمی‌توان در مواد غذایی یا آب استفاده کرد.
- 3- ترکیب شیمیایی ممانعت کننده‌ها معمولاً مشخص نیستند ولی شرایط کاری آنها دقیقاً مشخص است (مقدار - محیط - شرایط)
- 4- در استفاده از مقدار یا درصد ممانعت کننده‌ها باید دقیقاً دقت شود دقیقاً بر اساس دستورالعمل
- ضرر و زیاد دقت نکردن به این مورد بسیار زیاد است. مثلاً اگر ممانعت کننده‌های اکسید کننده به صورت کافی مصرف شوند آند و کاتدهای موضعی تشکیل می‌شوند و خوردگی به مراتب شدیدتر است. در مورد نوع جذب سطحی نیز همین مسأله را داریم.
- 5- مقدار ممانعت کننده لازم برای شروع جلوگیری از خوردگی معمولاً بیشتر از مقدار لازم برای ارائه جلوگیری از خوردگی است مقدار اولیه به مراتب بیشتر است، بعد باید همواره مقدار کمتری به صورت پیوسته یک اضافه می‌شود.
- مثلاً در مورد چهارم (اکسید کننده) باید سرعت خوردگی بالا افزایش مقدار اکسید کننده زیاد شود تا فیلم تشکیل شود با تشکیل فیلم مقدار اکسید کننده کمتری نیاز داریم تا بتوانیم، سرعت خوردگی کمتری داشته باشیم.

#### انواع ممانعت کننده‌ها

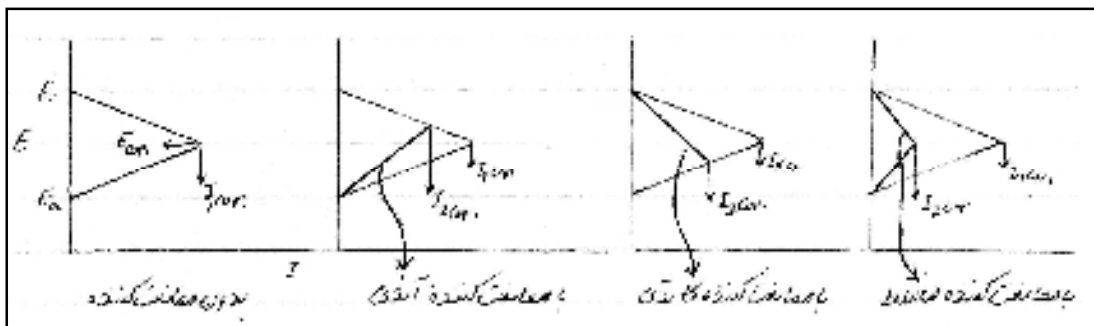
- 1- ممانعت کننده آندی
- 2- ممانعت کننده کاتدی
- 3- ممانعت کننده مختلط (آندی - کاتدی)



نمودارهای پتانسیل - جریان (نمودارهای پلاریزاسیون):

- 1- مدار باز باشد: هیچ جزئی از مدار عبور نمی کند، پتانسیل های  $A$  و  $C$  در حالت استراحت می خوانند یا *Open potential rest* (potential)
- 2- مدار بسته و مقاومت زیادی در مدار داریم. چون مقاومت زیاد در مدار داریم جریان کمی از مدار عبور می کند. عبور جریان موجب پلاریزه شدن الکترودها می شود.
- 3- در حالت مدار بسته مقاومت مدار را به طور پله ای کاهش داده و در هر حالت پتانسیل ها را می خوانیم. ملاحظه می شود جریان عبور از مدار بیشتر و پتانسیل ها به یکدیگر نزدیک می شود.
- 4- مقاومت مدار را به سمت صفر میل می دهیم.  $R \rightarrow 0$  یا اتصال کوتاه  $\leftarrow$  پتانسیل آند به پتانسیل کاتد جریان مدار خارجی:  $I_{cor}$

$$\frac{I_{cor}}{\text{سطح آند}} = (i_{anode}) \text{ دانستیه جریان آندی} = \frac{I_{cor}}{\text{سطح کاتد}} = (i_{ath}) \text{ دانستیه جریان کاتدی}$$



ممکن است سختی ممانعت کننده ها بالا یا پائین برود.

### 3-4- طراحی

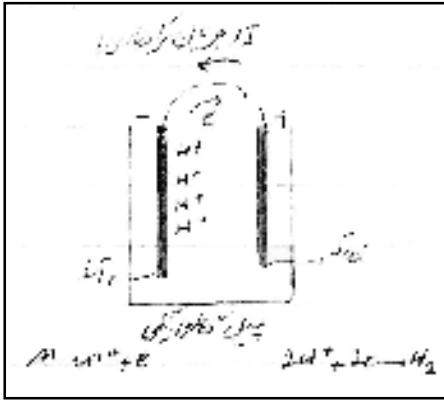
- طراحی صحیح یا تغییر طراحی یا تغییر شکل سیستم، خوردگی را کاهش می دهد. مثلاً تعویض مرتب قطعات
- 1- استفاده از جوشکاری به جاس میخ پرچ
  - 2- طراحی به نحوی که تخلیه کامل مخازن و سیستم امکان پذیر باشد.
  - 3- طراحی به نحوی که امکان تعویض قطعات سریعاً وجود داشته باشد.
  - 4- اجتناب از تنش های حرارتی
  - 5- اجتناب از تنش های مکانیکی
  - 6- اجتناب از اتصالات گالوانیکی
  - 7- کاهش شیبها و تغییر مسیرهای ناگهانی
  - 8- جلوگیری از ورود ناخالصی های هوا و مواد دیگر به داخل سیستم.

### 4-4- حفاظت کاتدی

تجهیزاتی که در حال خورده شدن هستند را کاتد می‌کنیم. الکترون به آن‌ها می‌فرستیم.

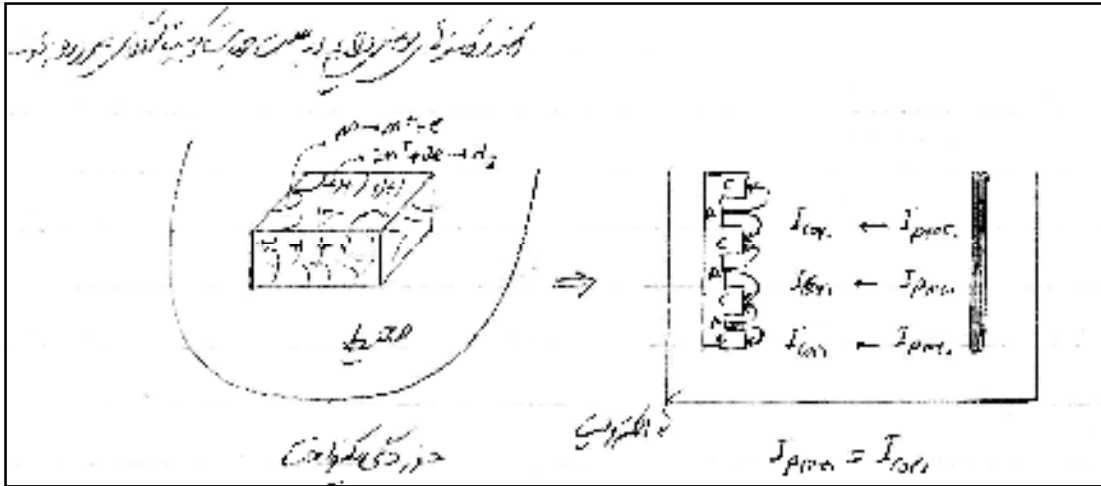
جریان از آند وارد الکترولیت می‌شود ← خوردگی داریم.

جریان از الکترولیت وارد کاتد می‌شود ← خوردگی نداریم.



هر کجا جریان از فلز وارد الکترولیت شد، خوردگی داریم و هر کجا جریان از الکترولیت وارد فلز شد، حفاظت داریم.

← در حفاظت کاتدی کاری می‌کنیم که جریان از محیط وارد تجهیزات می‌شود.



ما محاسبه می‌کنیم چه جریانی از فلز خارج می‌شود، همان جریان را از بیرون به داخل فلز می‌فرستیم تا خنثی شود، این مسأله همان حفاظت کاتدی است.

بستگی به این که چگونه جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی تأمین می‌شود و از چه منبعی برای دستیابی به جریان و پتانسیل مورد نیاز استفاده می‌شود، دو نوع سیستم حفاظت کاتدی داریم.

1- استفاده از منبع **DC** خارجی (سیستم اعمالی جریان) (**Impressed current**)

2- استفاده از یک آند فدا شونده (سیستم آند فدا شونده) (**Sarificial Anode**)

یک فلز در مقایسه با تجهیزات آند باشد.

حفاظت کاتدی در محیط‌هایی که امکان برقراری جریان باشد، استفاده می‌شود (مثلاً در هوا که امکان جریان نیست، نمی‌توان استفاده کرد، مخزن‌های ??? تجهیزات زیر زمین و دریا و ...)

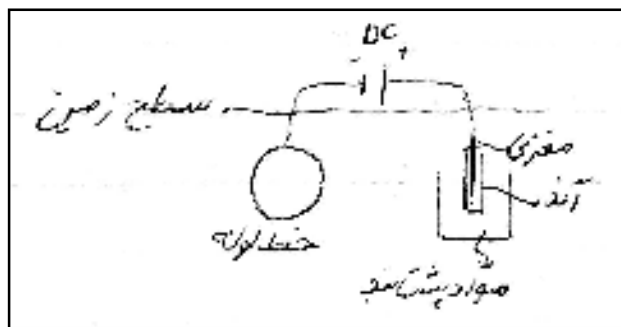
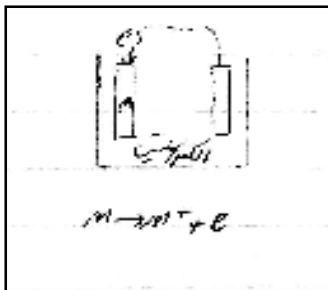
در این روش سعی می‌کنیم با وارد کردن الکترون روی تجهیزات از خروج جریان از تجهیزات به داخل الکترولیت (محیط) جلوگیری کنیم. مجبوریم  $e$  را از مواد خارجی وارد فلز کنیم.

برای این کار نیاز داریم، الکتروود دیگری داشته باشیم و آن را وصل کنیم به فلز.

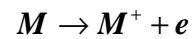
**حفاظت کاتدی با استفاده از آند فدا شونده:**

از آندهایی نظیر **AL, Zn, Mg** (فلزات فعالتر می‌شوند) استفاده می‌شود.

معمولاً به طور خالص استفاده نمی‌شود و معمولاً آلیاژهای این‌ها را استفاده می‌کنند چون سریع تمام می‌شوند در مورد **Al** ممکن است پاسیو شود



دانستیه جریان خوردگی:  $i_o$



$$I = i_o \times A$$

$$I' = \frac{\Delta E (eV)}{\sum R}$$

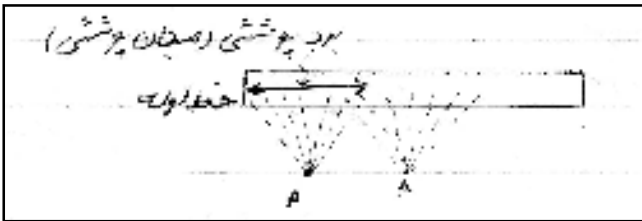
برای حفاظت  $I' = I$

اگر قرار بود، خوردگی اتفاق بیفتد، داشتیم:  $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$

اما با آمدن الکترون باعث می شود واکنش به سمت چپ برود و دیگر خوردگی نخواهیم داشت.

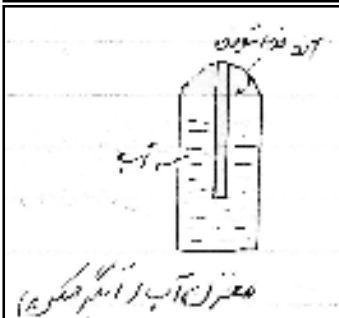
اگر قرار است آند داخلی زمین قرار بگیرد باید آن را داخل پشت بند قرار داده . پشت بند عمدتاً مواد جاذب رطوبت هستند، از طرفی سطح آند را زیادتر می کند، پشت بند از متلاشی شدن آند جلوگیری می کند.

$$R = r \frac{l}{s}$$



مثال:

مخزن آب (آبگرمکن)



حفاظت کاتدی را همراه پوشش استفاده می کنیم.

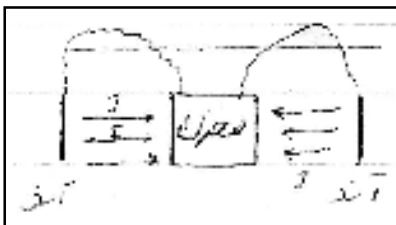
هر بار که حفاظت کاتدی انجام می دهیم باید پوشش استفاده کنیم.

به علت  $A$  (سطح مورد پوشش) زیرا هر چه  $A$  بیشتر باشد،  $I$  بیشتر است پس باید آند قویتر استفاده کرد لذا معمولاً برای جاهایی که پوشش ندارد از حفاظت استفاده می شود.

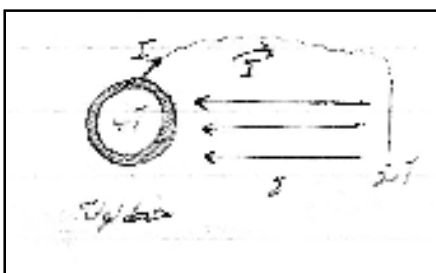
در وسط آند فیله ای (مغزی) قرار می دهیم، تا از متلاشی شدن آند جلوگیری شود. به عنوان یک ??? دارند، عمل می کند.

ما آند را طوری طراحی می کنیم که به طور یکنواخت جریان را روی تجهیزات بفرستد.

سپس آندها طوری توزیع می شوند که جریان را به طور یکنواخت روی تجهیزات بفرستد.



جریان همیشه از سطح خارجی عبور می کند، بنابراین سطح خارجی حفاظت می شود. برای این که سطح داخل حفاظت شود باید داخل خط لوله هم آنرا بگذاریم.



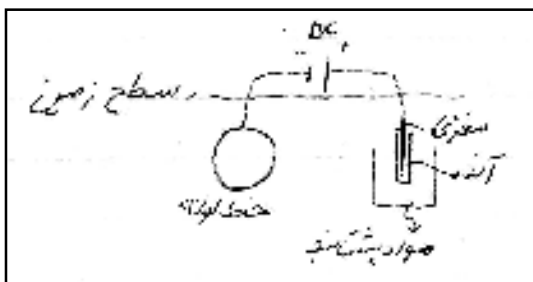
### حفاظت کاتدی با استفاده از منبع خارجی DC:

در این روش دیگر لازم نیست از آندی که مصرف می شود، استفاده نمود.

در اینجا از آندهای نظیر چدن پر سیلیسیم ، آلیاژهای آهن (فولادی)، پلاتین، قلع، سرب (به صورت آلیاژی) گرانتیت

قطب مثبت به آند

قطب منفی به تجهیزات



پارامترهای مشخص کننده  $DC: V$  (ولتاژ) و  $P$  (توان)

$i_0$ : دانستیه جریان خوردگی

$A$ : سطح مورد حفاظت (سطح پوشش داده شده)

$I = i_0 \times A$ : جریان خوردگی که معادل جریان مورد نیاز برای حفاظت است.

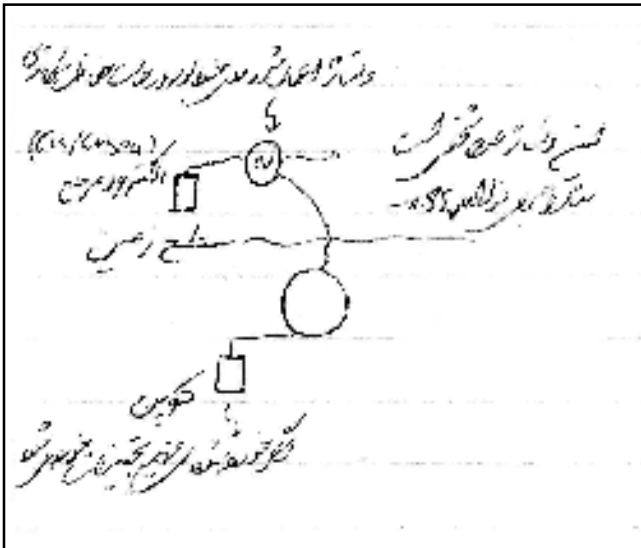
$V = I \cdot \sum R$  ولتاژ مورد نیاز : مجموع مقاومت مدار

$r = \sum R \cdot I^2$  توان مورد نیاز

**برای کنترل حفاظت کاتدی:**

- 1- اندازه گیری پتانسیل تجهیزات (سریع)
- 2- استفاده از کوپن (طولانی)

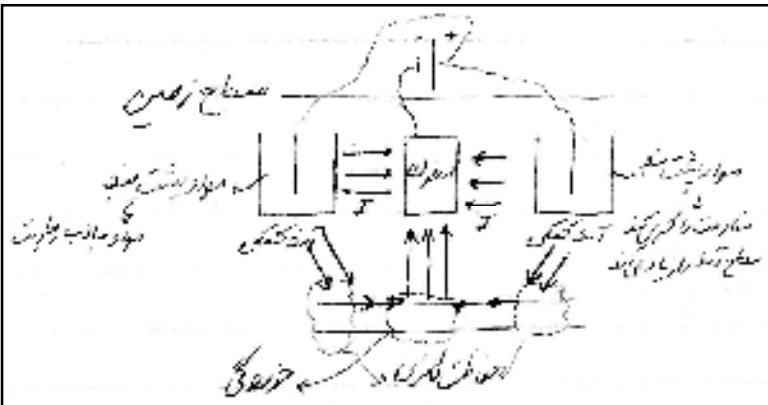
معمولاً هر دو را باهم انجام می دهند.



### اثرات جریان های سرگردان (Stray current):

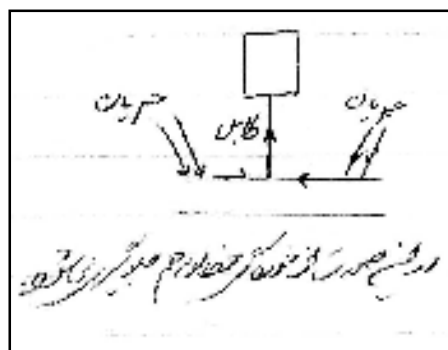
در تمام مواردی که از منابع تغذیه DC استفاده می شود وجود دارد جریان سرگردان جریانی است که از مسیر تعیین شده برای آن عبور نمی کند. این پدیده موجب می شود، حفاظت روی مخزن تضعیف شود.

ورود جریان های سرگردان به آن و سپس خروج آن قسمتی که جریان از لوله خارج می شود آند شده و خورده می شود.



### برای برطرف کردن:

- 1- خط لوله و مخزن را توسط یک کابل به یکدیگر وصل می کنیم (خط لوله و مخزن را یک سیستم می کنیم) در این صورت خط لوله هم حفاظت می شود.
- 2- جریان اعمال شده را در حد مورد نیاز افزایش دهیم.



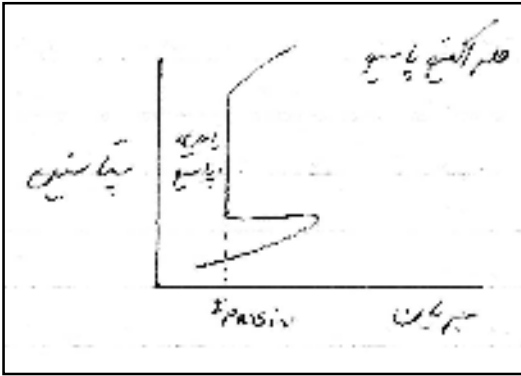
منابع تغذیه : منبع جریان مورد نیاز

- 1- استفاده از منابع DC
- 2- استفاده از ژنراتورهای دیزلی
- 3- استفاده از رگتیفایر (رگتیفایر جریان AI را به DC تبدیل می کند)
- 4- استفاده از باتری خورشیدی
- 5- استفاده از ژنراتورهای بادی

یادآوری: هر جا که جریان از قطعه وارد می شود، خوردگی داریم و عکس آن حفاظت داریم.

#### 4-5- حفاظت آندی

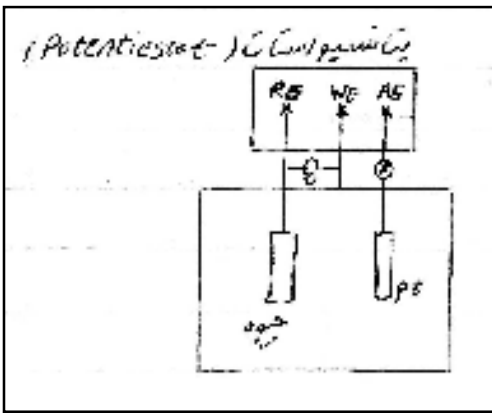
بر خلاف حفاظت کاتدی سعی می‌شود تجهیزات را آند کنیم. یعنی اعمال پتانسیل نسبت به بیان دیگر تجهیزات به قطب مثبت منبع DC وصل می‌شود.



$$I_{passin} = I_{cor} = I_{prot}$$

جریان حالت پسیو (*passive current*)

در داخل پتانسیواستات  $V$  و  $A$  وجود دارد اما برای اطمینان از  $A$  و  $V$  بررسی استفاده شود.



در پتانسیواستات داریم:

- الکتروود کار، نمونه Working electrode
- الکتروود مرجع Reference electrode
- الکتروود کمکی Auxilary electrode

پتانسیل را اندازه می‌گیریم → پتانسیل اعمال شده روی تجهیزات است. پتانسیل الکتروود مرجع ثابت است

جریان اعمال کنیم → حضور فیلم پسیو همراه با افزایش زیاد در مقاومت است

$$I = \frac{V}{\sum R} \Rightarrow I \downarrow$$

مقایسه حفاظت آندی و کاتدی:

- |                           |  |
|---------------------------|--|
| حفاظت آندی                | حفاظت کاتدی                            |
| محیطها خورنده ضعیف تا قوی | 1- نوع محیط: محیط خورنده ضعیف تا متوسط |

