

# آزمایشگاه خوردگی و پوشش

دکتر محبوبه آزادی  
دانشکده مهندسی مواد و متالورژی  
دانشگاه سمنان

## بارم

۱- گزارشکار

۲- تمارین

۳- فعالیتهای کلاسی

## منابع

- [1] Pierre R. Roberge, "Handbook of corrosion engineering", McGraw- Hill, 2000.
- [2] Peabody's, "Control of pipeline corrosion", NACE international the corrosion society, 2001.
- [3] Ahmad. Zaki, "Principles of corrosion engineering and corrosion control", Elsevier science and technology books, 2006.
- [4] Pierre R. Roberge, "Corrosion Engineering Principles and Practice", McGraw- Hill, 2008.

# نحوه اندازه گیری خوردگی

- بازرسی چشمی
- کاهش وزن / آزمون پاشش نمک
- پولاریزاسیون Tafel
- امپدانس الکتروشیمیایی

# خوردگی در پوشش ها

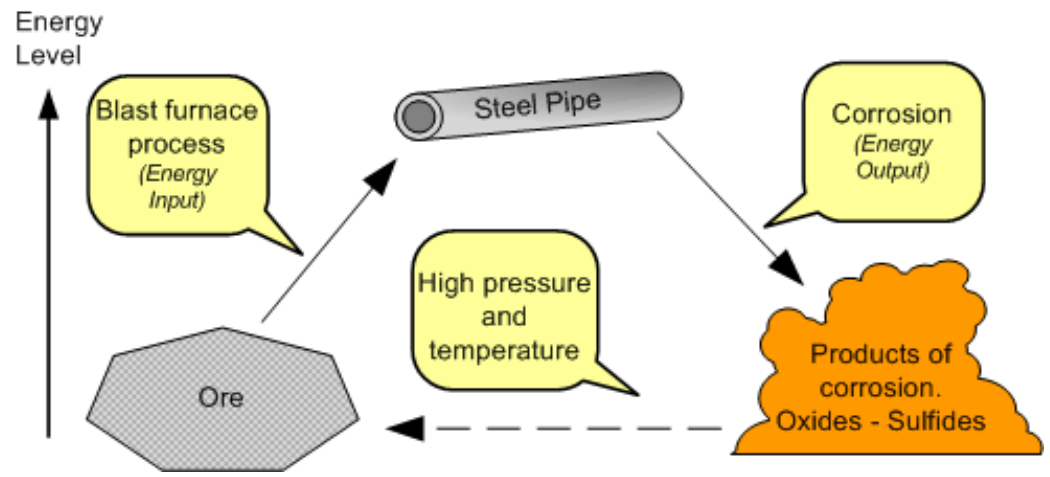
- پوشش دهی آندایزینگ
- رسوب دهی الکتریکی

تعریف خوردگی  
CORROSION

Corrodere



By Mojtaba Habibi Rad (Ph.D.)



## خوردگی پلاستیک

وقوع خوردگی در PVC استحکام یافته با فایبرگلس  
در اثر وجود تنش و تماس با یک محیط خورنده



By Mojtaba Habibi Rad (Ph.D.)



## خوردگی پلاستیک

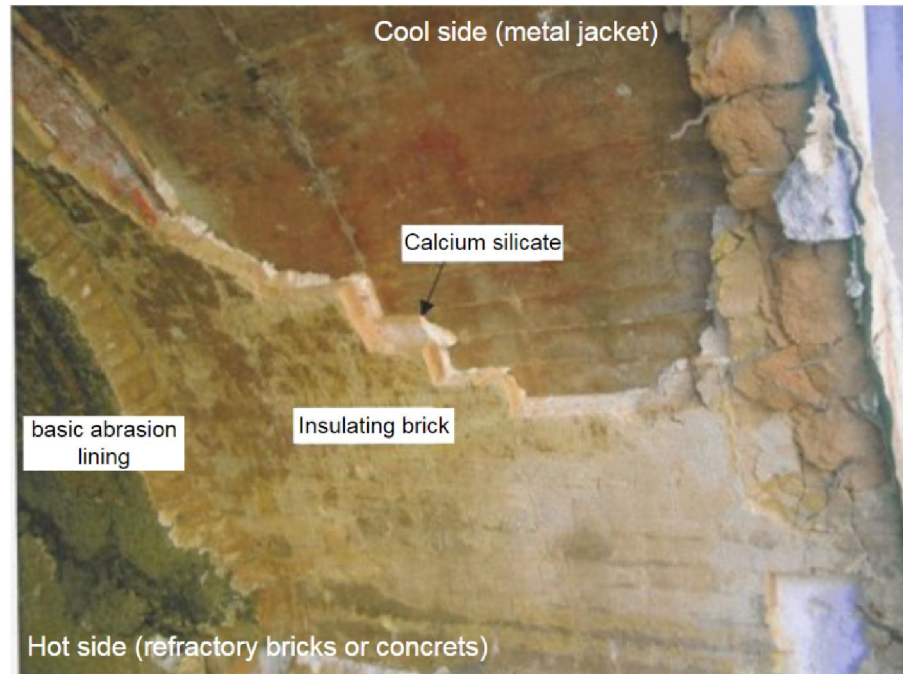
خوردگی در لوله‌ی آب از جنس پلی‌اتیلن  
در اثر حضور ترکیبات ضدعفونی‌کننده



By Mojtaba Habibi Rad (Ph.D.)

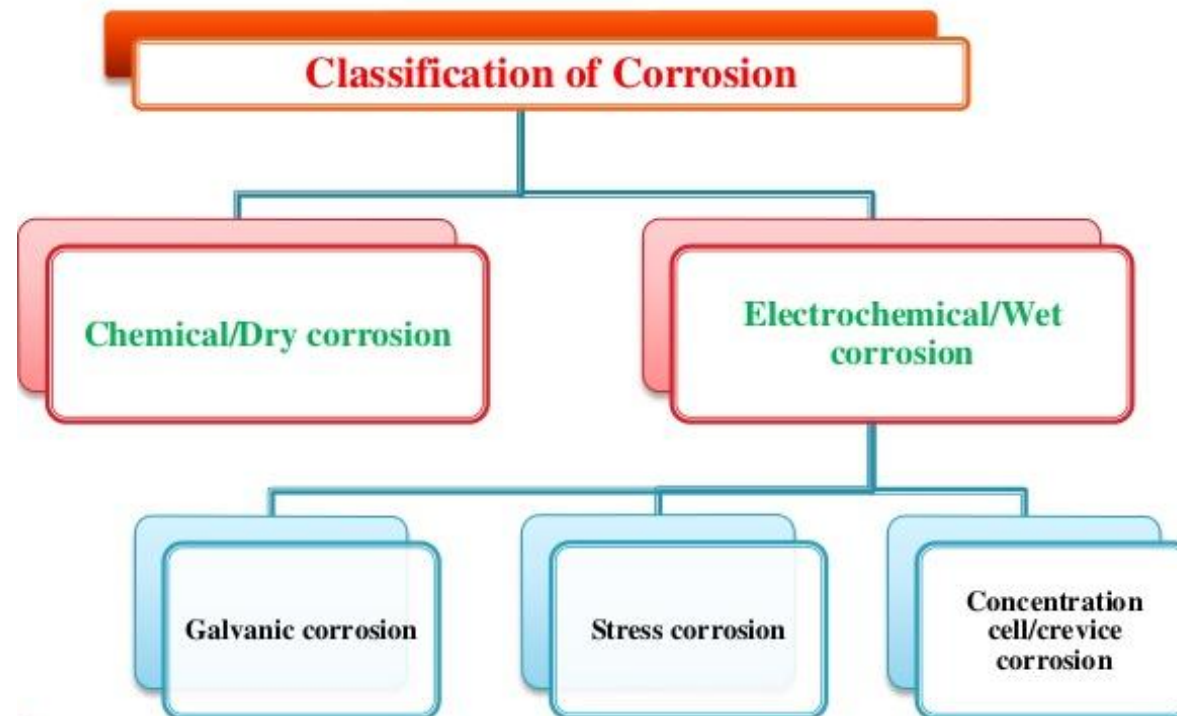


**Figure 2.** Photo showing ozone cracking of a bias ply tire.

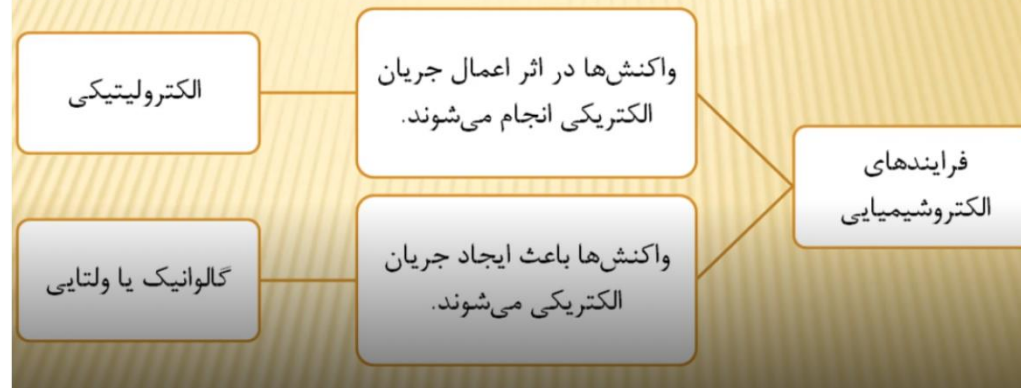




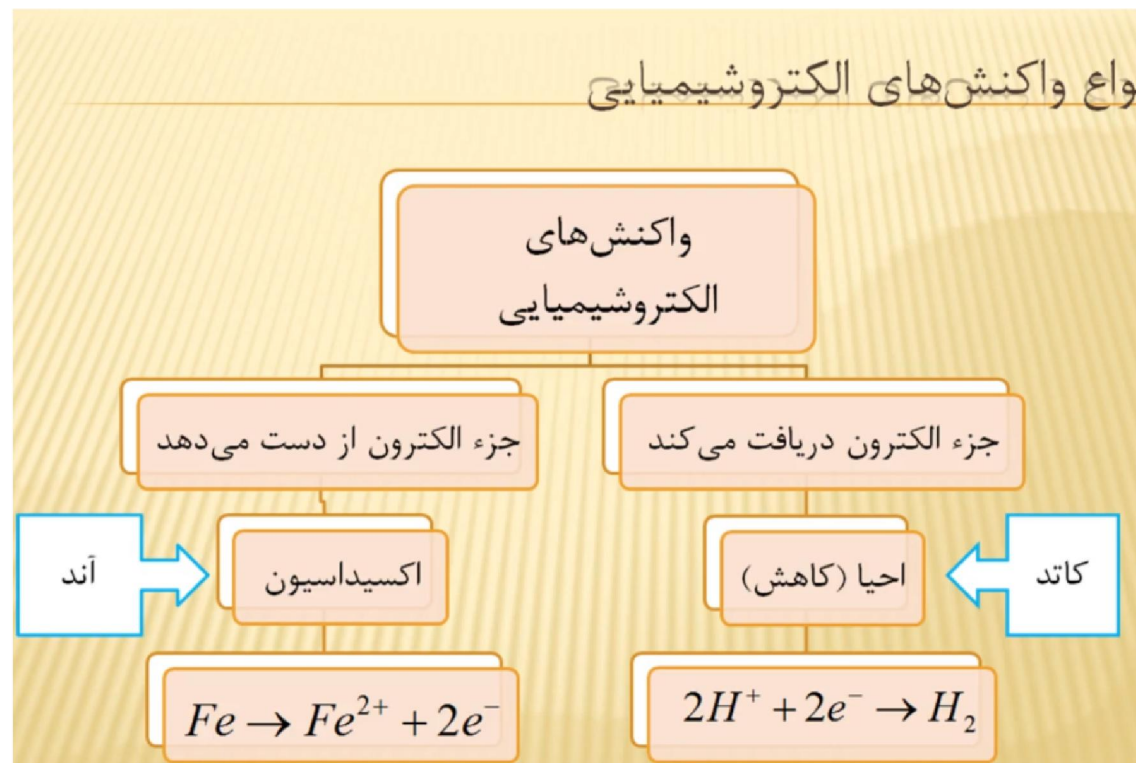
By Mojtaba Habibi Rad (Ph.D.)



## انواع فرایندهای الکتروشیمیایی



## انواع واکنش‌های الکتروشیمیایی



## نتیجه‌ی مهم

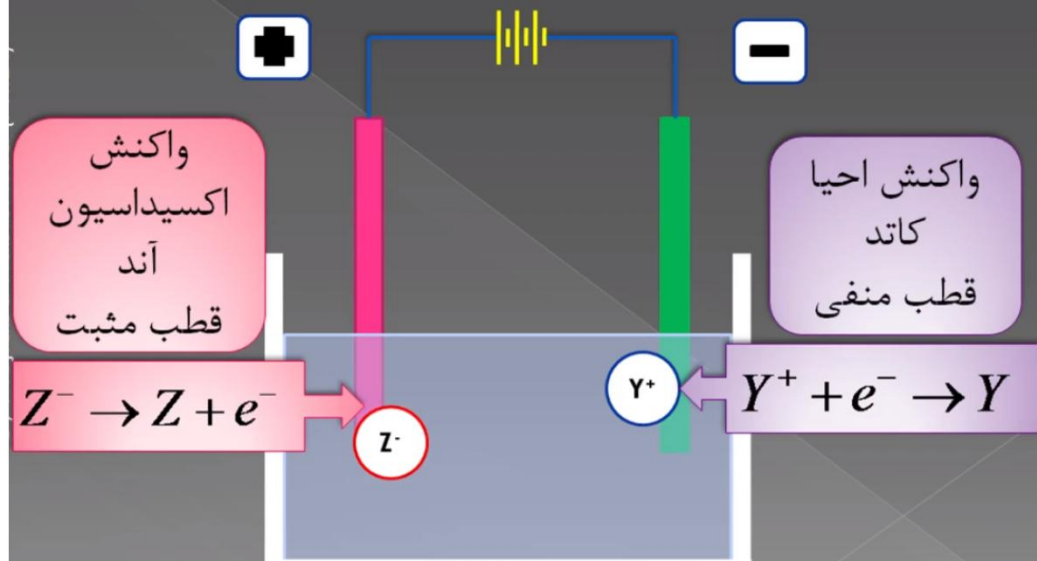
✘ آند لزوماً همیشه قطب منفی نیست. آند جایی ست که اکسیداسیون در آن رخ می‌دهد.

✘ کاتد لزوماً همیشه قطب مثبت نیست. کاتد جایی ست که احیا در آن رخ می‌دهد.

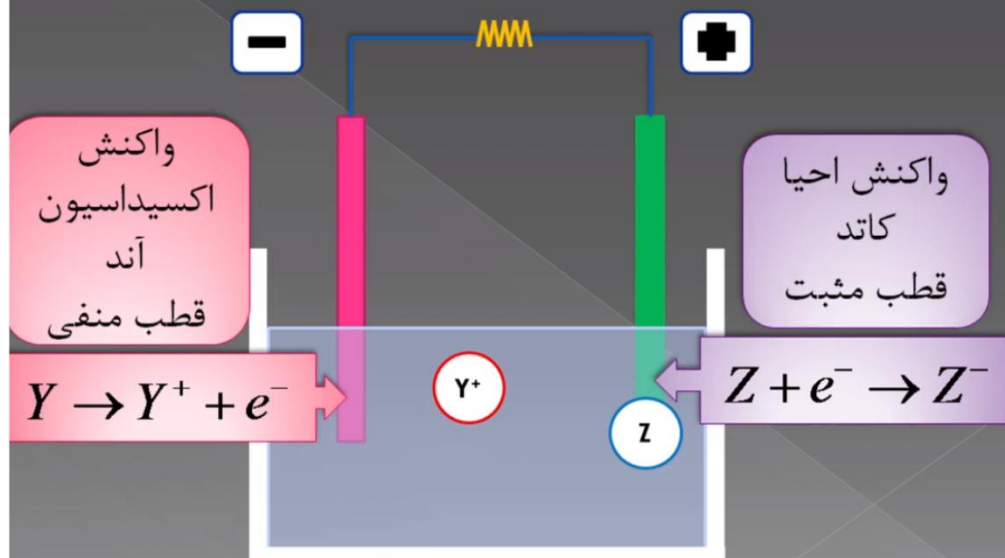
✘ هم آند و هم کاتد می‌توانند بسته به نوع فرایند قطب مثبت یا منفی باشند.



# پیل الکتروشیمیایی (الکترولیتیکی)



# پیل الکتروشیمیایی (گالوانیک یا ولتایی)



انواع مولدات الکتریکائی

۱) گالوانی : انرژی شیمیائی به انرژی الکتریکی  
(دستی)

۲) کترولیس : انرژی الکتریکی به انرژی شیمیائی

## CLASSIFICATIONS OF CORROSION

Corrosion can be classified into three categories based on the environment.

**Atmospheric Corrosion:** The types of atmospheres are described as rural, industrial, or marine.

**Aqueous Corrosion:** Carbon steel pipes are used to transport water and are often submerged in water. The higher the acidity level of the water, the faster the corrosion rate of attack.

**Soil Corrosion:** The rate of soil corrosion on carbon steel varies. Soil with high moisture content, high acidity, high dissolved salts, and high electrical conductivity are the most corrosive.

## Types of Metal Corrosion

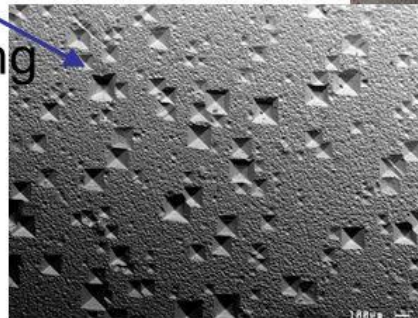
- Uniform attack
- Galvanic
- Crevice
- Pitting
- Intergranular
- Selective leaching
- Erosion
- Stress corrosion
- Hydrogen embrittlement



homerepair.about.com



homerepair.about.com



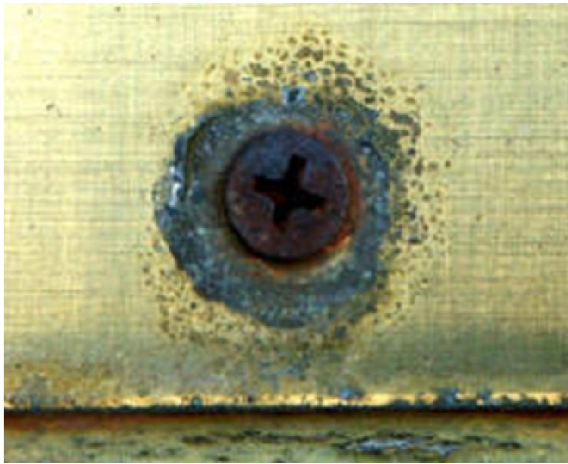
Universite Pierre et Marie Curie

# جلسه اول

بازدید چشمی



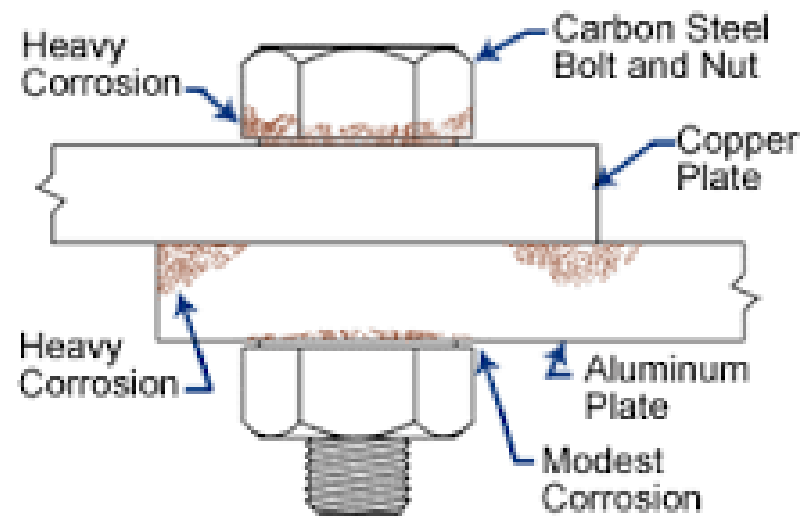
General corrosion



Galvanic corrosion



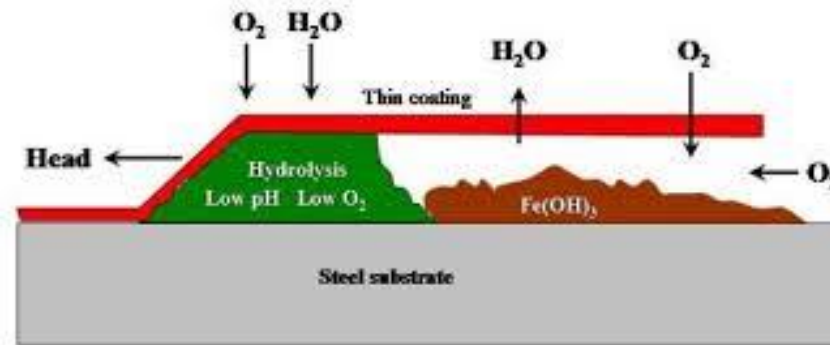
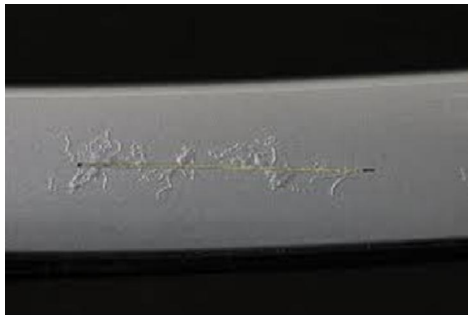




**Effects of Galvanic Corrosion**



Crevice corrosion

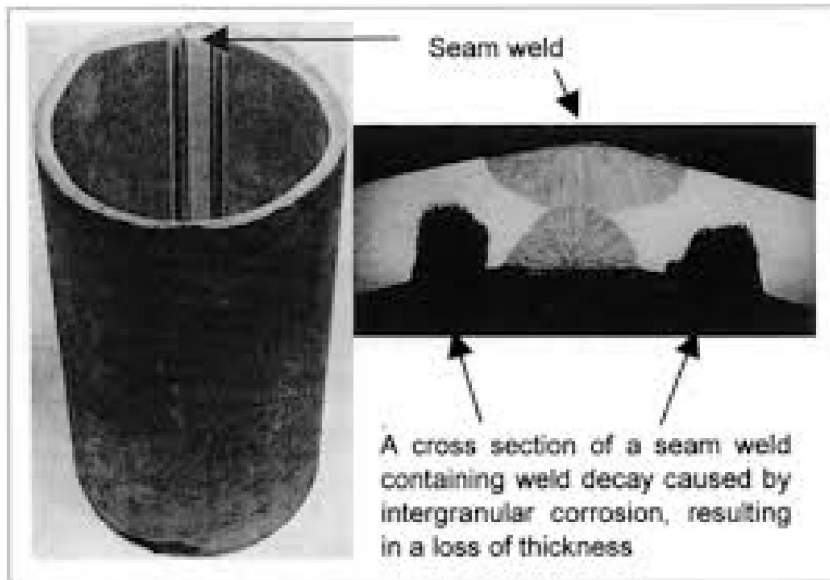
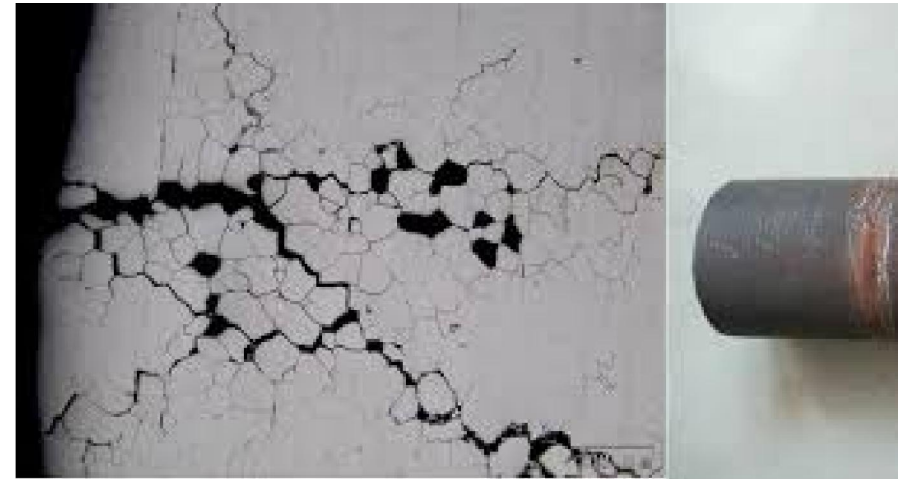
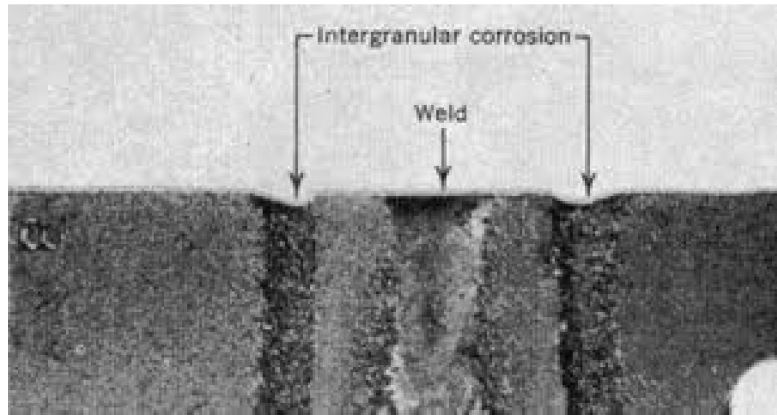


Cross sectional view of a corrosion filament on a steel substrate

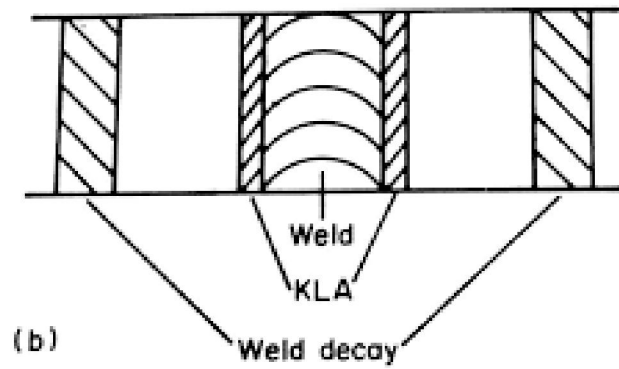
Filiform corrosion



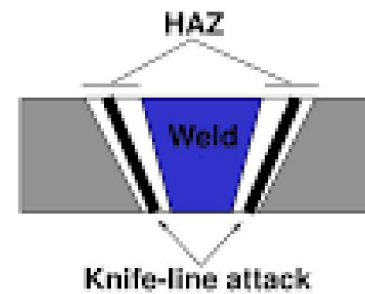
Pitting corrosion



Weld decay



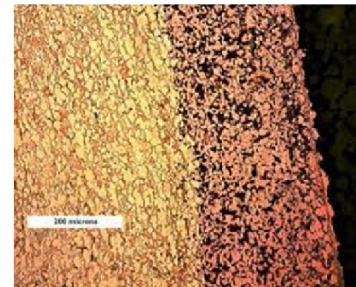
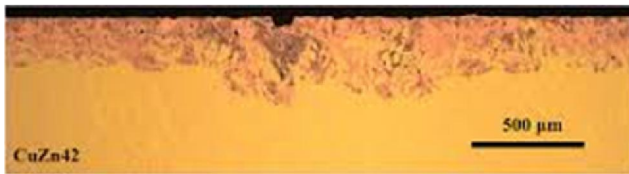
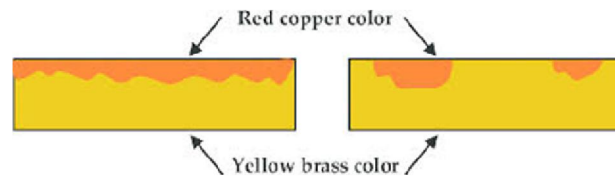
## Knife-Line Attack in the HAZ



- $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  precipitate in HAZ
  - Band where peak temperature is 800-1600°F
- Can occur even in stabilized grades
  - Peak temperature dissolves titanium carbides
  - Cooling rate doesn't allow them to form again

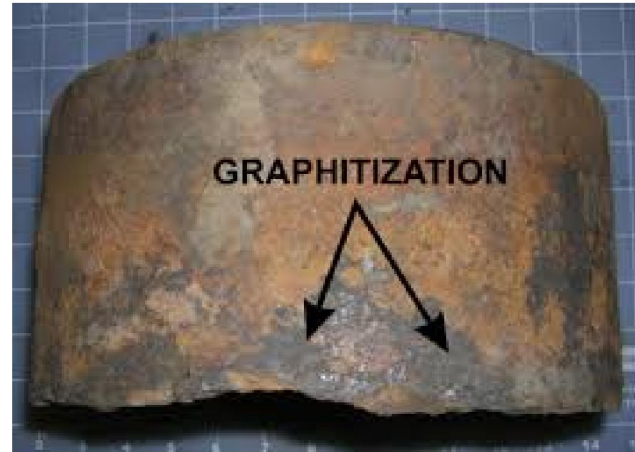


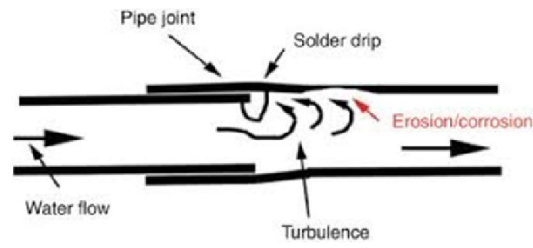
Copper Deposits on the surface of the brass



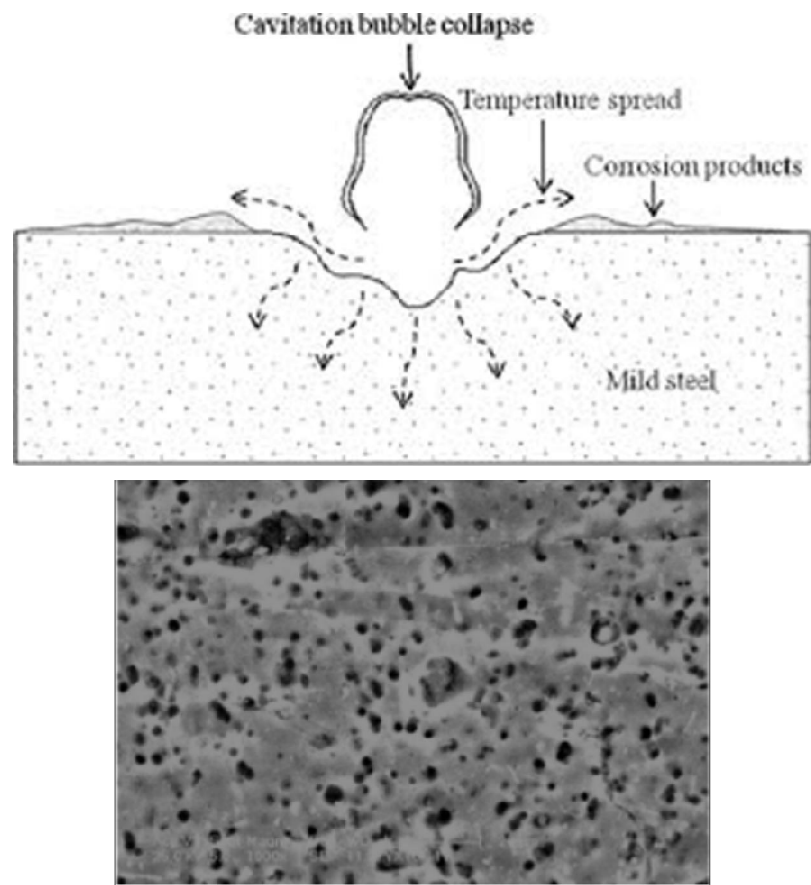
Dealloying corrosion



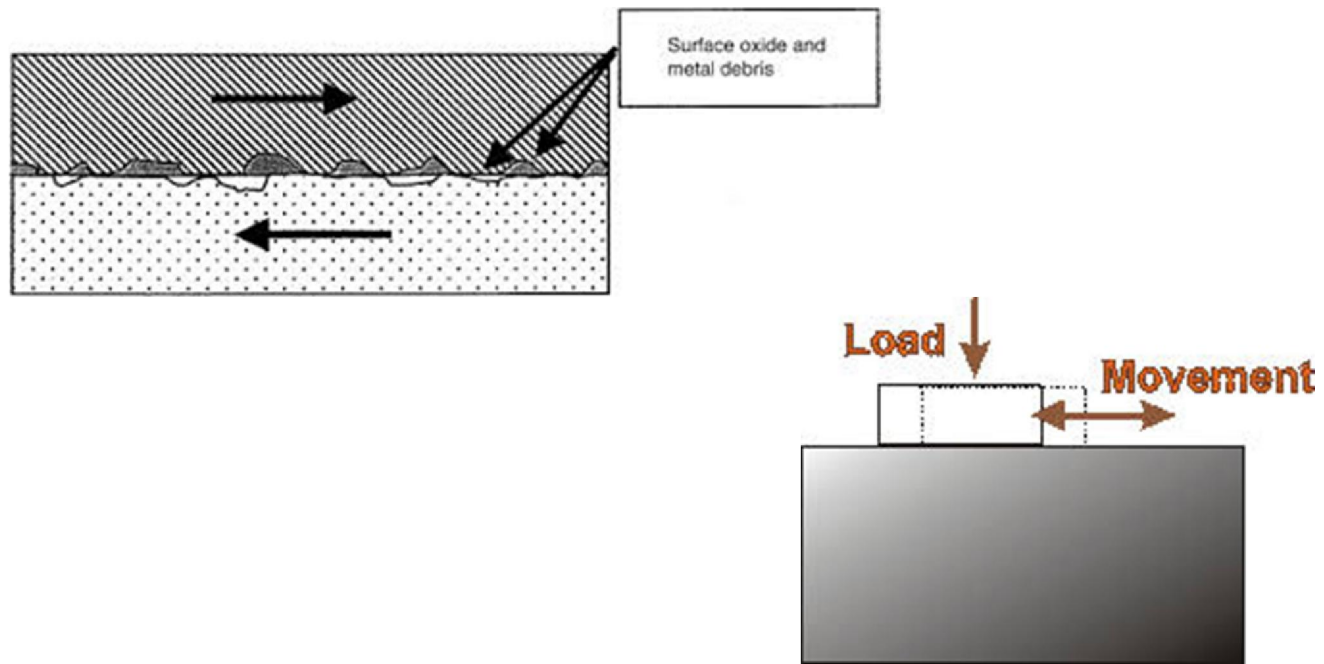




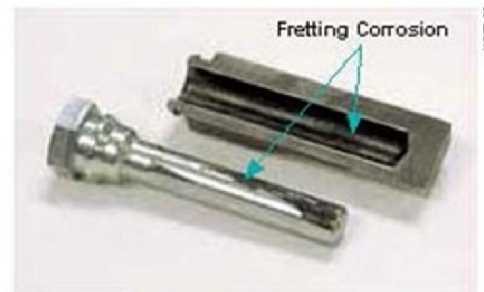
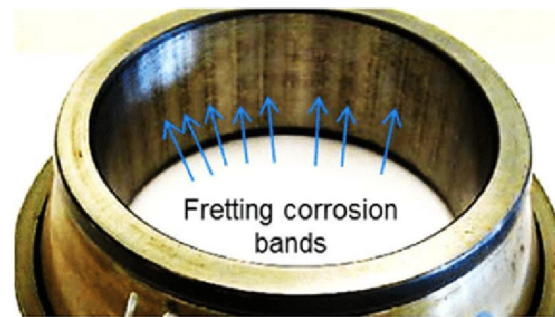
Erosion corrosion



Cavitation damage



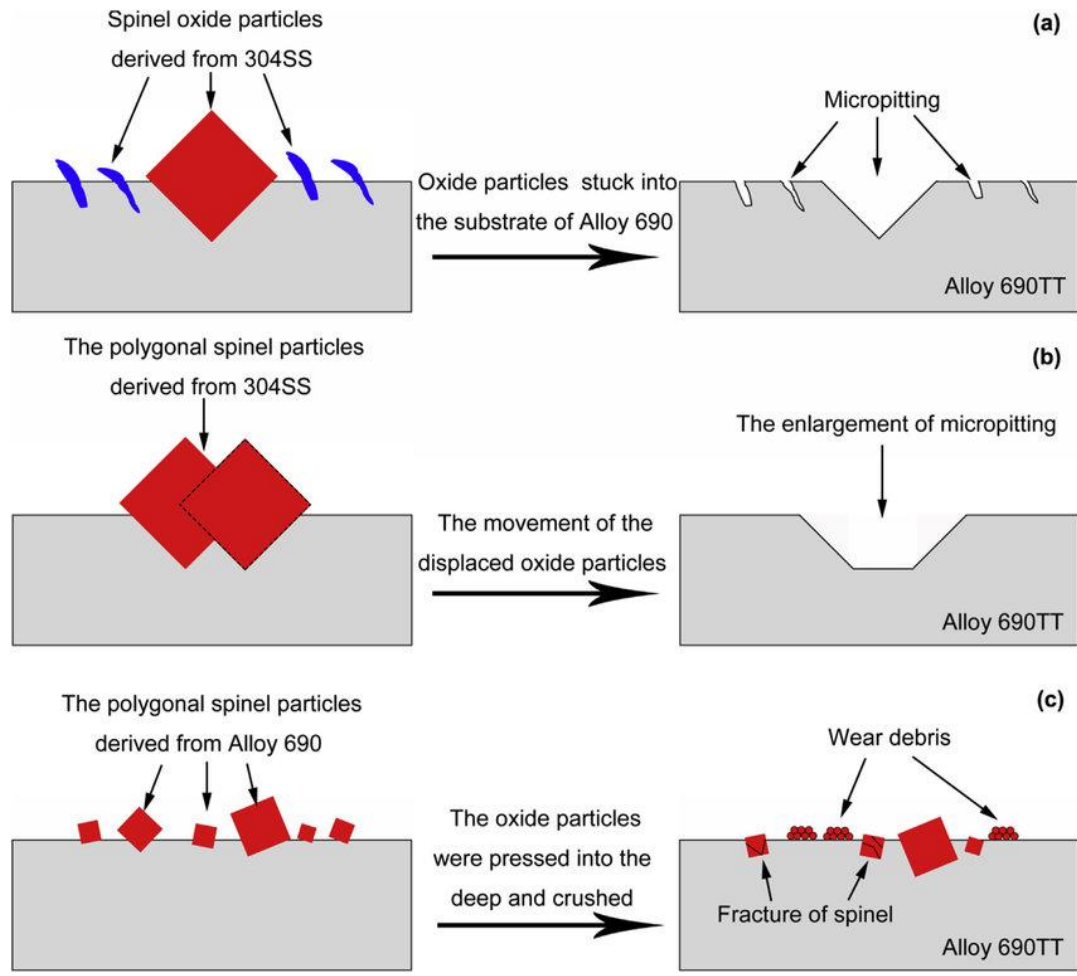
Fretting corrosion



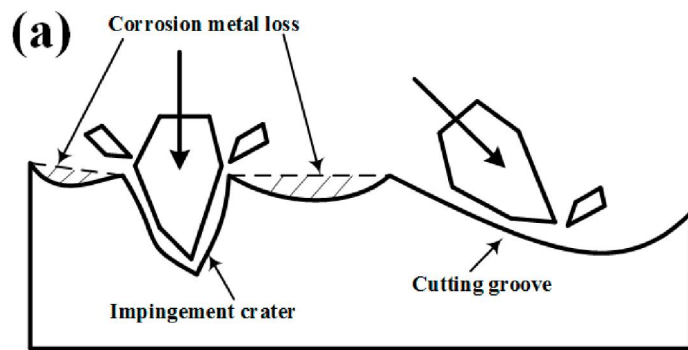
Excessive fretting corrosion and wear on caliper guide pins can result from using the improper guide pin lubricant.



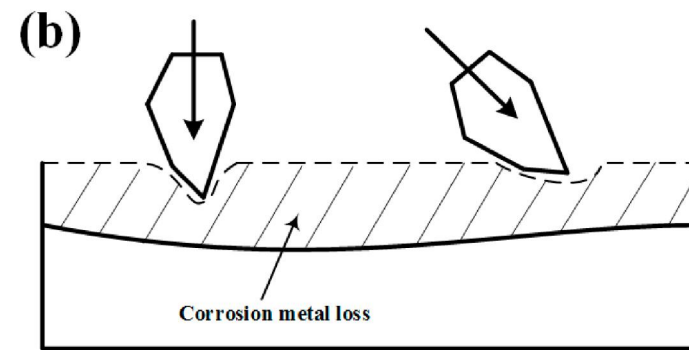
Fretting corrosion



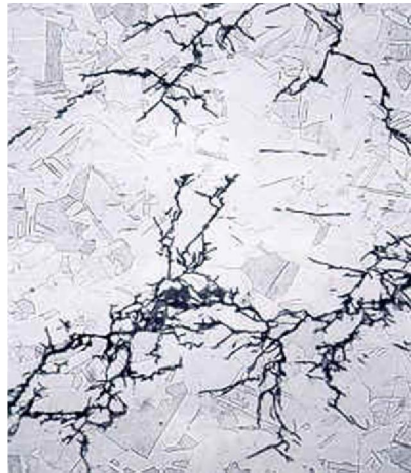
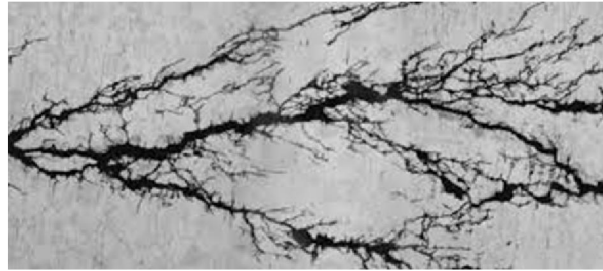
Fretting corrosion= False brinelling



**Erosion dominated**

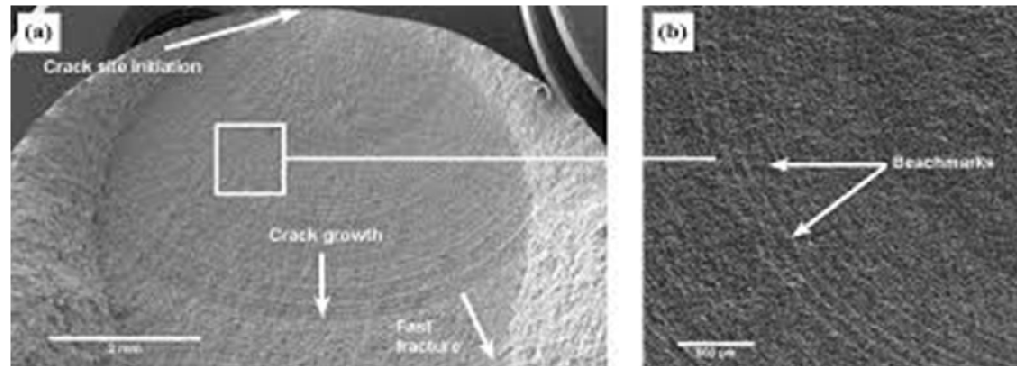


**Corrosion dominated**

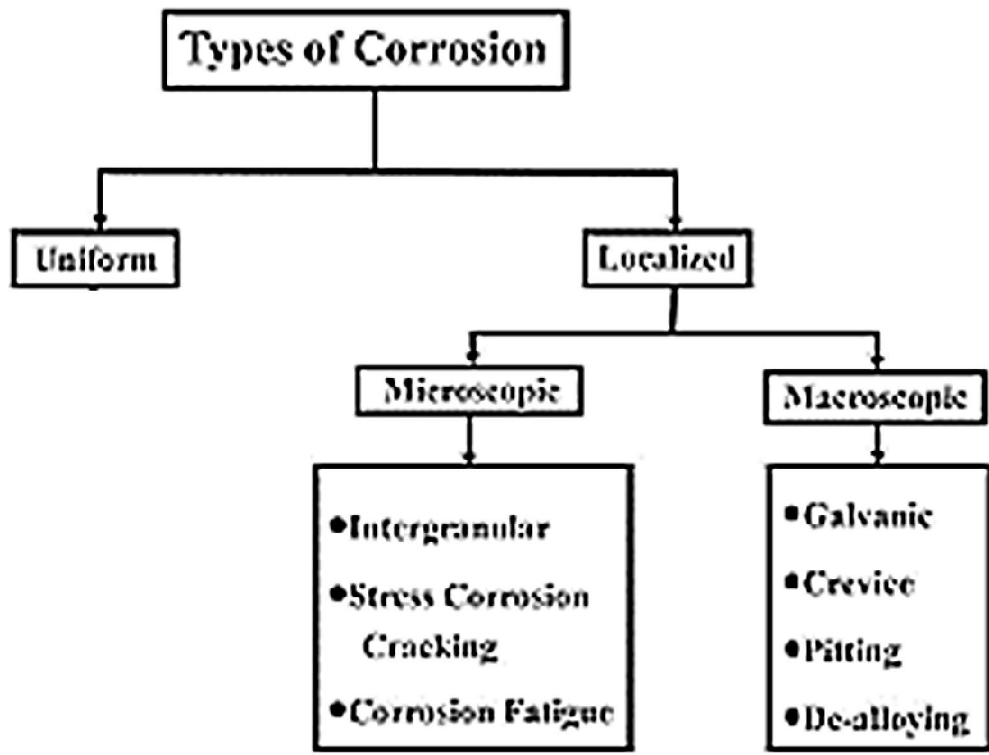


SCC





Fatigue corrosion



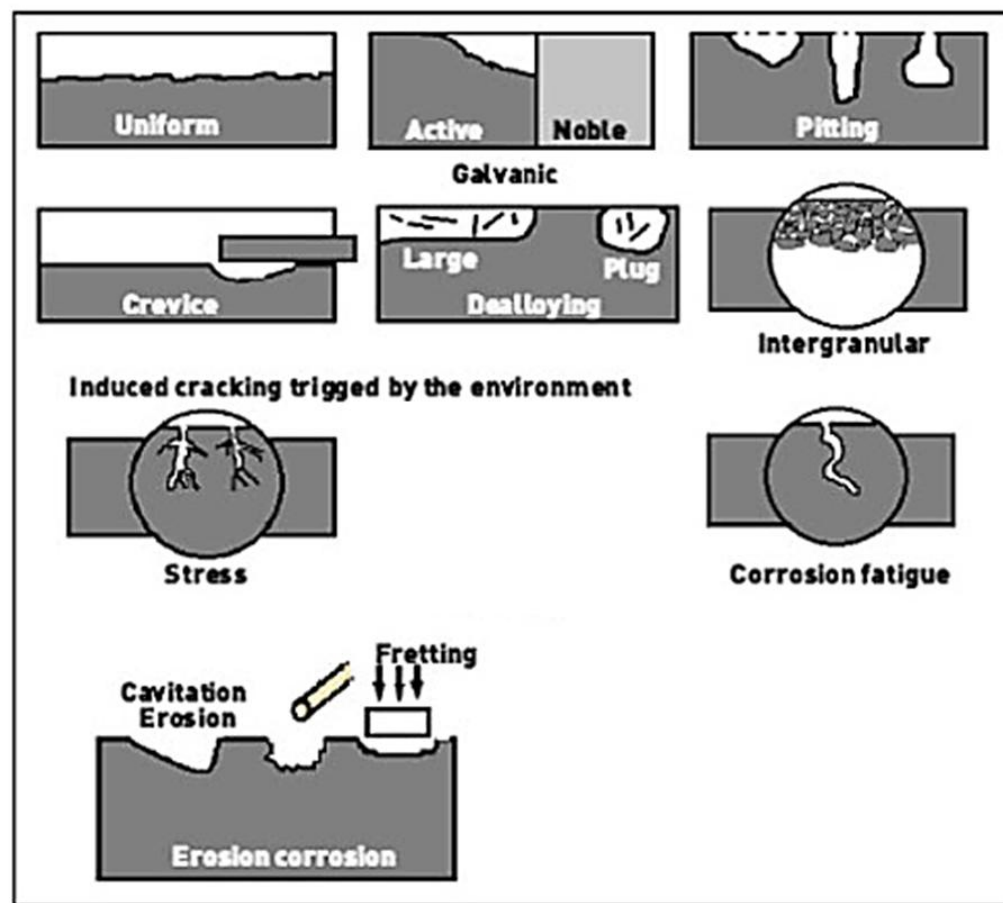
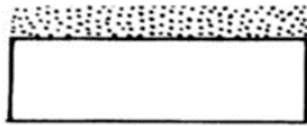
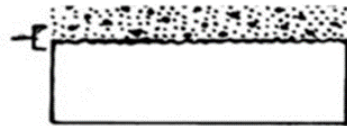


Fig.4 - Illustration of different types of corrosion. Adapted from [51].



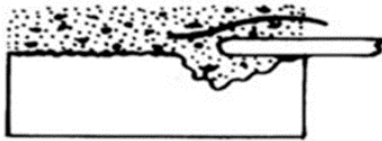
Uniform



Intergranular



Galvanic



Crevice



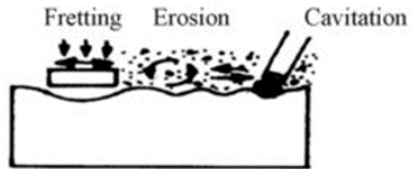
Pitting



Stress corrosion



Corrosion fatigue



Cavitation, erosion and fretting

## TYPES OF PITTING CORROSION:

### TROUGH PITS

Narrow, deep



Shallow, wide



Elliptical



Vertical grain attack



### SIDEWAY PITS

Subsurface

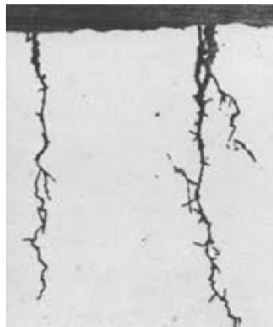


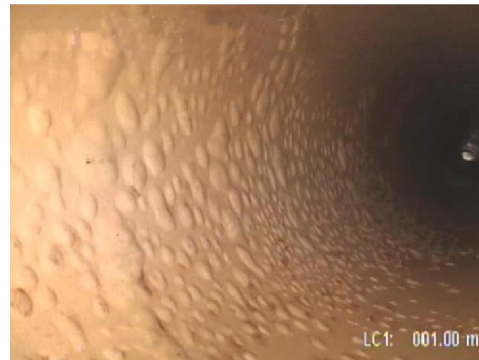
Undercutting

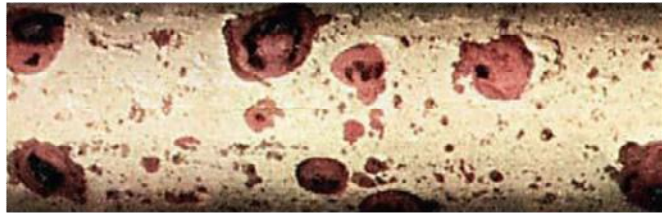


Horizontal grain attack





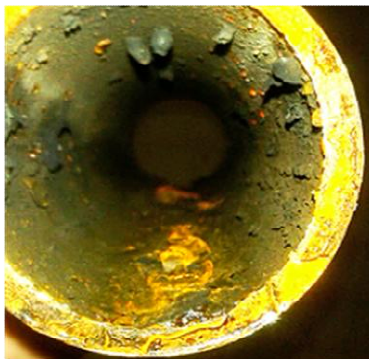
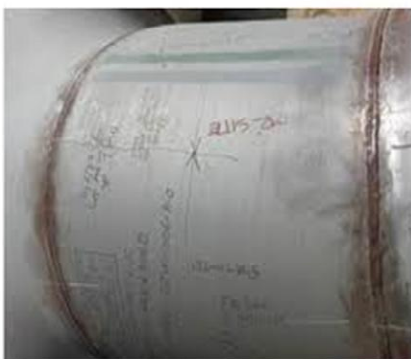






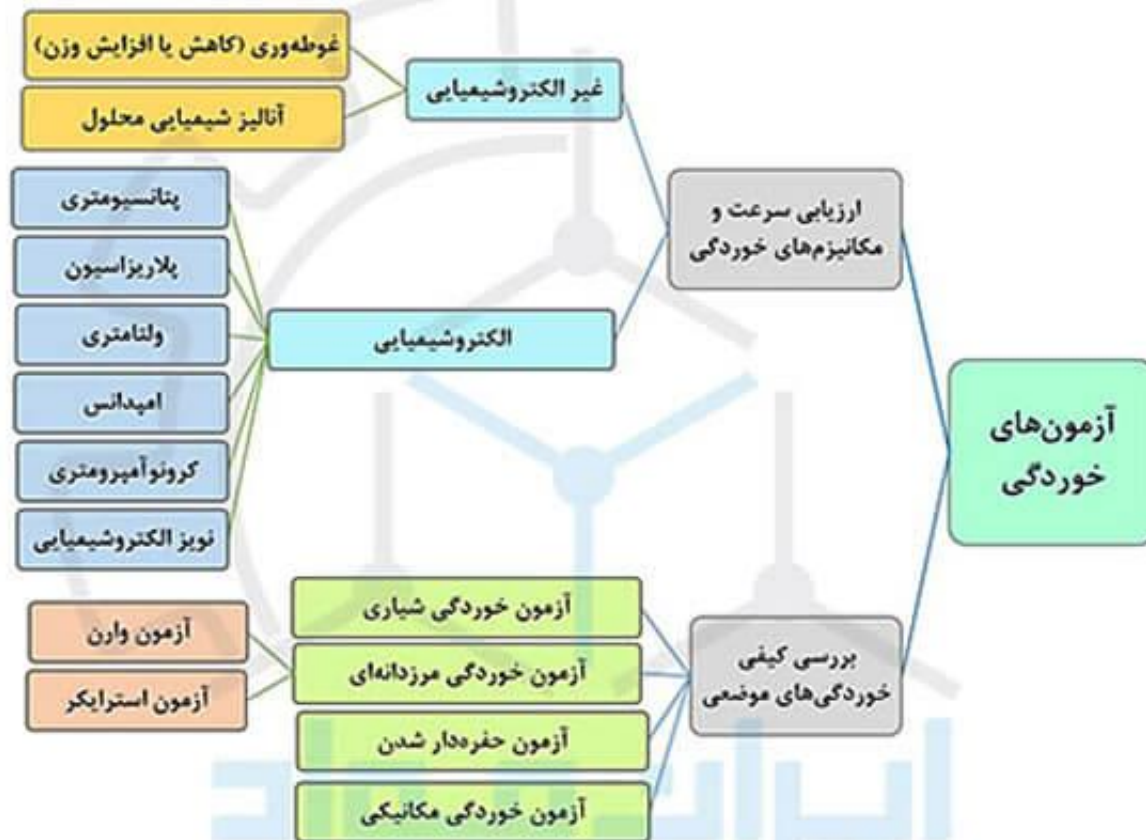
## تکلیف آزمون اول

نوع خوردگی در عکس های ذیل را حدس بزنید و توضیح مختصری در مورد علت چرایی و مکانیزم آن بیان کنید.



# جلسه دوم

کاهش ضخامت / وزن

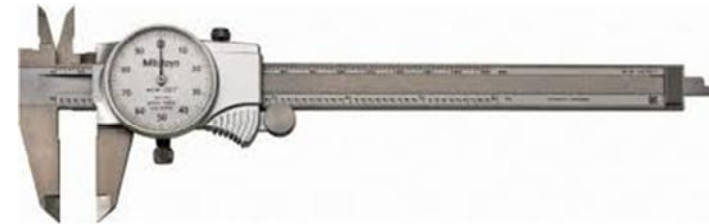


# آزمون کاهش وزن / ضخامت

- ضخامت سنج التراسونیک
- آزمون غوطه وری برای کاهش وزن

# ضخامت سنج: پایلوت

خوردگی یکنواخت / عمومی



# ضخامت سنج التراسونیک: پایلوت

[Material Thickness Meter PCE-TG 250](#)

خوردگی یکنواخت / عمومی



# ضخامت سنج التراسونیک: پایلوت

خوردگی یکنواخت / عمومی



## آزمون غوطه‌وری<sup>۱</sup> یا کاهش وزن<sup>۲</sup>

### هدف

اندازه‌گیری آهنگ خوردگی به روش غوطه‌وری یا کاهش وزن

### تئوری

آزمونهای غوطه‌وری یا کاهش وزن متداولترین، ساده‌ترین و ارزاترین آزمونهایی هستند که برای اندازه‌گیری آهنگ خوردگی فلزات و آلیاژها استفاده می‌شوند. این آزمونها را می‌توان در شرایط مختلف مانند دمای اتاق، دمای کار، دمای بالا، تحت دمش هوا، در غیاب هوا، در حال سکون و یا حرکت محیط خورنده، غوطه‌وری متناوب یا پیوسته ... انجام داد. انتخاب شرایط آزمون بستگی به شرایط کار در عمل دارد.



# آزمون غوطه وری برای کاهش وزن: آزمایشگاهی

- ساده ترین روش اندازه گیری سرعت خوردگی یک فلز در محیط خورنده، تمیز کردن فلز از چربی و محصولات خوردگی، توزین اولیه آن و قرار دادن در محیط خورنده در مدت زمان مشخص و در نهایت تمیز کردن محصولات خوردگی و توزین مجدد فلز می باشد. با داشتن کاهش وزن فلز، می توان متوسط سرعت خوردگی (mpy=mills per year) را محاسبه کرد.
- از مزایای آزمایش کاهش وزن، ارزان و ساده بودن نمونه وامکان پذیری بررسی آنالیز محصولات خوردگی و انجام تست در آزمایشگاه می باشد. بهر حال نیاز به قرار گیری نمونه به مدت بسیار زیاد در محیط خورنده اصلی می باشد تا اندازه گیری سرعت خوردگی با دقت همراه شود. نمونه‌ها دارای شکل های مختلفی بوده و می توانند به صورت ورق، رینگ، استوانه ای باشند. در صنعت نمونه ها را با استفاده از یک نگهدارنده که ایزوله الکتریکی است، در محیط قرار می گیرند.

# Standards

- ASTM C694-90a(2016)

Standard Test Method for Weight Loss (Mass Loss) of Sheet Steel During Immersion in Sulfuric Acid Solution

- ASTM D3377 - 04(2018)

Standard Test Method for Weight Loss of Solventless Varnishes

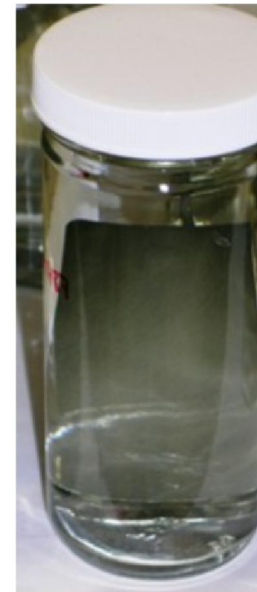
- ASTM G31 - 72(2004)

Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals

# Immersion and Partial Immersion Corrosion Tests

## ASTM G-316

- γ Sanded and methanol cleaned metal panels
- γ Immersed in containers filled with water-based solutions/electrolytes with or without added treatment ('Control')
- γ Weight loss was determined or panels were visually evaluated for the presence of corrosion after cleaning according to ASTM G-1.7



## مواد و تجهیزات مورد نیاز

(۱) ترازوی دقیق (تا ۰,۰۰۱ گرم)

(۲) میکروسکوپ نوری

(۳) نمونه‌های مسطح (ورقه‌ای) مسی، آهنی، آلومینیمی، برنجی که در دسترس باشد به ابعاد

و ضخامت مناسب (مثلاً  $۵۰ \times ۵۰ \times ۲$  میلیمتر) و به تعداد ۱۸ نمونه از هر کدام

(۴) استون یا الکل

(۵) کاغذ سنباده ۱۲۰، ۳۲۰، ۴۰۰ و ۵۰۰

(۶) آب مقطر و نمک طعام (محلول ۳,۵ درصد سدیم کلرید)

(۷) اسید کلریدریک ۵ درصد و اسید سولفوریک ۵ درصد (محلول اسیدی)

## مراحل کلی در اجرای تست خوردگی

- ۱) آماده سازی نمونه های آزمایش  
اولین مرحله در تمامی آزمون های خوردگی، آماده سازی نمونه های آزمایش است. نمونه های آزمون می توانند به صورت مربع، مستطیل و یا دیسکی باشند.
- ۲) وزن کردن و مشخص کردن ابعاد نمونه ها
- ۳) چربی زدایی نمونه ها
- ۴) قرار دادن نمونه در شرایط آزمایش
- ۵) تمیز کردن نمونه ها پس از آزمایش

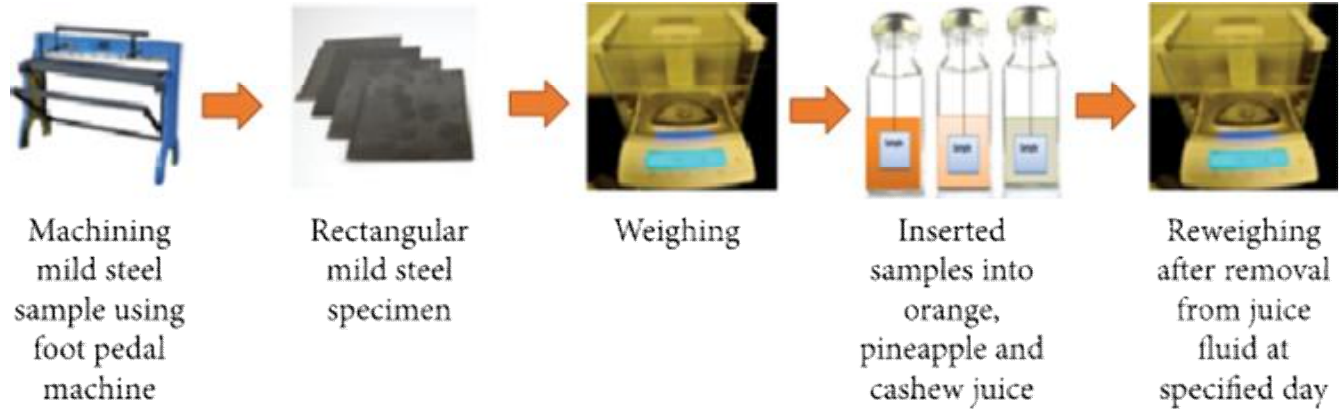
## روش آزمون

سطوح نمونه‌ها را با کاغذهای سنباده به ترتیب ۱۲۰، ۳۲۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کاملاً پولیش و تمیز کرده به ترتیب از ۱ تا ۱۸ شماره زده و سپس در محلول استون یا الکل شسته و آن‌گاه نمونه‌ها را خشک کنید. وزن و مساحت تمام نمونه‌ها به طور دقیق اندازه گرفته شود.

از شماره ۱ تا ۶، نمونه‌ها را در محلول سدیم کلرید ۳٫۵ درصد از شماره ۷ تا ۱۲، نمونه‌ها را در محلول ۵ درصد اسید کلوئیدی و از شماره ۱۳ تا ۱۸، نمونه‌ها را در محلول ۵ درصد اسید سولفوریک قرار دهید.

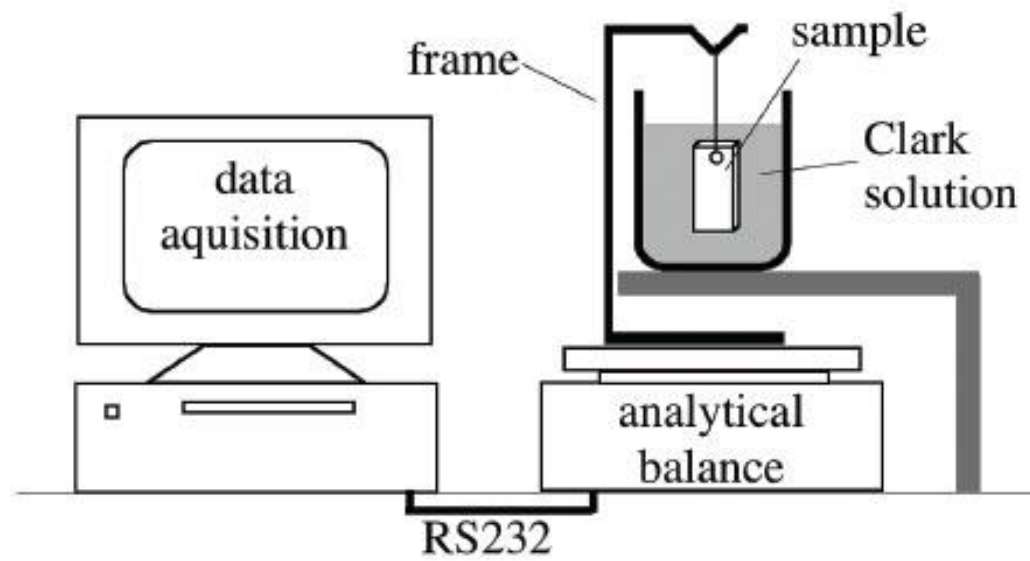
الف) نمونه‌های شماره ۱، ۷ و ۱۳ را هر ۲۴ ساعت یک بار برای مدت ۱۴۴ ساعت از محلول خارج کرده و پس از تمیز کردن سطح آنها از محصولات خوردگی، آنها را شسته، خشک کرده و پس از وزن کردن دوباره به محلول برگردانید.

ب) نمونه‌های ۲، ۸ و ۱۴ را پس از ۴۸ ساعت، نمونه ۳، ۹ و ۱۵ را پس از ۷۲ ساعت، نمونه‌های ۴، ۱۰ و ۱۶ را پس از ۹۶ ساعت و نمونه‌های ۵، ۱۱ و ۱۷ را پس از ۱۲۰ ساعت و نمونه‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ را پس از ۱۴۴ ساعت از محلول خارج کرده، پس از تمیز کردن سطح آنها از محصولات خوردگی، آنها را شسته، خشک کرده و وزن کنید.









**Figure 1.** Experimental scheme for *in situ* weight loss measurements during oxide dissolution of corroded samples in Clark solution.

چدن نودولار در محیط نمکی ۳.۵ درصد نمک طعام  
کاهش وزن بر حسب گرم و زمان غوطه وری بر حسب ساعت

					weight loss			
		1	4	24	48	72	136	175
castiron		0.01	0.01	0.04	0.06	0.08	0.11	0.14
PN		0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08
PN-CL		0	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05

چدن نودولار در محیط اسید هیدروکلریک ۱ مولار  
کاهش وزن بر حسب گرم و زمان غوطه وری بر حسب ساعت

		12	24	48	72	100	122
castiron		0.01	0.02	0.03	0.04	0.34	0.69
PN		0.02	0.05	0.09	0.12	0.4	0.73
PN-CL		0.03	0.07	0.12	0.16	0.43	0.72

## خواسته‌های آزمون

۱) نمودار تغییر (کاهش) وزن و عمق نفوذ خوردگی (mpy) را بر حسب زمان برای هر یک از نمونه‌ها در محلولهای مختلف در شرایط زیر رسم کنید.

۲) اگر تفاوتی در نتایج مشاهده می‌شود، آن را توضیح دهید.

۳) سطح تمامی نمونه‌ها را توسط میکروسکوپ نوری مطالعه کرده و اگر اختلافی در اثرات خوردگی دیده شد، گزارش کرده، آن را توضیح دهید.

# آزمون غوطه وری برای کاهش وزن

$$CR_{mpy} = \frac{534\Delta W}{DA T}$$

$$mpy = \frac{534 W}{D A T}$$

where,

mpy = general corrosion rate, mils/year

W = weight loss in milligrams

D = alloy density, gm/cc

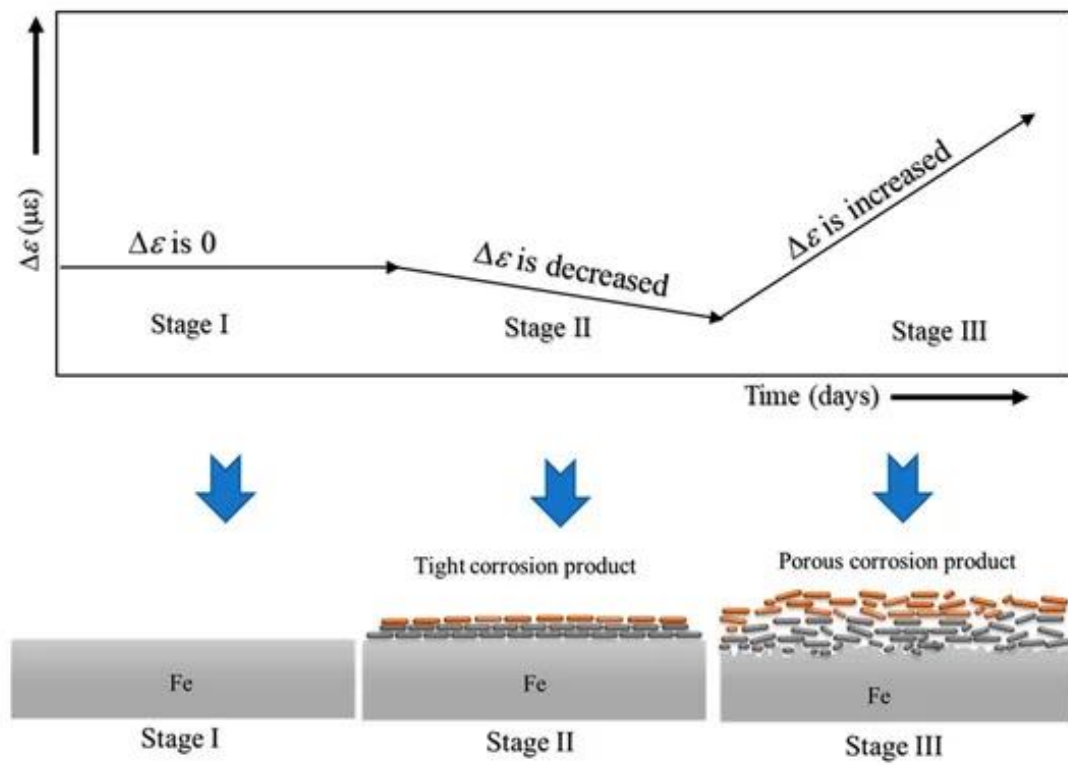
A = exposed coupon area, sq. in.

T = exposure time, hr

<sup>1</sup> mils (1 mil = 0.001 inch) per year (mpy)

## IMPORTANCE OF CORROSION DATA

- |                      |  |
|----------------------|--|
| ➤ <i>5 mpy</i>       | <i>Good corrosion resistant material</i>     |
| ➤ <i>5 to 50 mpy</i> | <i>Low corrosion resistant material</i>      |
| ➤ <i>50 mpy</i>      | <i>Unsuitable as constructional material</i> |



همچنین سطح نمونه را پس از انجام آزمون غوطه‌وری توسط میکروسکوپ بررسی کرده و نوع خوردگی (یکتواخت، حفره‌ای، بین دانه‌ای ...) را مشخص می‌کنند.

# Weight Loss Testing

Glass fibers (no sizing), Metals without coating



Weigh



Immersion

- Temperature
- Concentration
- Duration



Weigh again



Microscopic  
analysis

## تمرین

- (۱) واکنشهای خوردگی (آندی و کاتدی) مس، آهن و آلومینیم در محلول آبی / سدیم کلرید، اسید کلریدریک و اسید سولفوریک را بنویسید.
- (۲) با استفاده از نمودار شکل ۴، آهنگهای خوردگی محاسبه شده در این آزمون را برحسب mdd و ipm بدست آورید.
- (۳) توضیح دهید که اگر آهنگ خوردگی فلز Pb برحسب mdd بیشتر از آهنگ خوردگی فلز Zn برحسب mdd باشد، آیا می توان نتیجه گرفت که مقاومت خوردگی فلز Pb کمتر از مقاومت خوردگی فلز Zn است. (شرایط آزمون در هر دو حالت یکسان است).
- (۴) آیا می توان از نتایج آزمون کاهش وزن، برای ارزیابی مقاومت فلزات در برابر خوردگی حفره ای استفاده کرد.





A



B



C



D



E



F



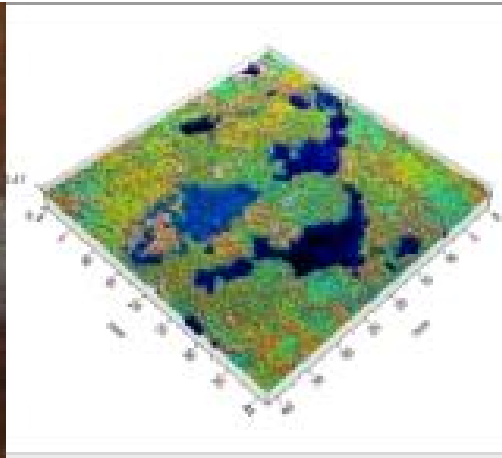
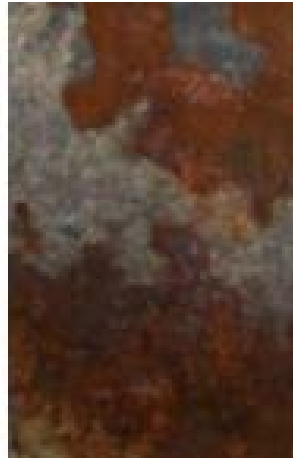
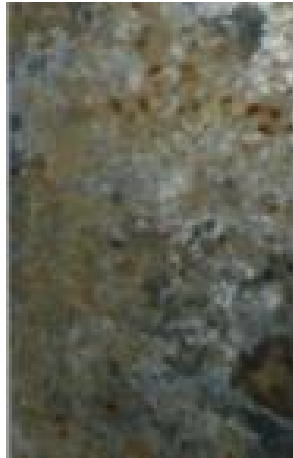
G

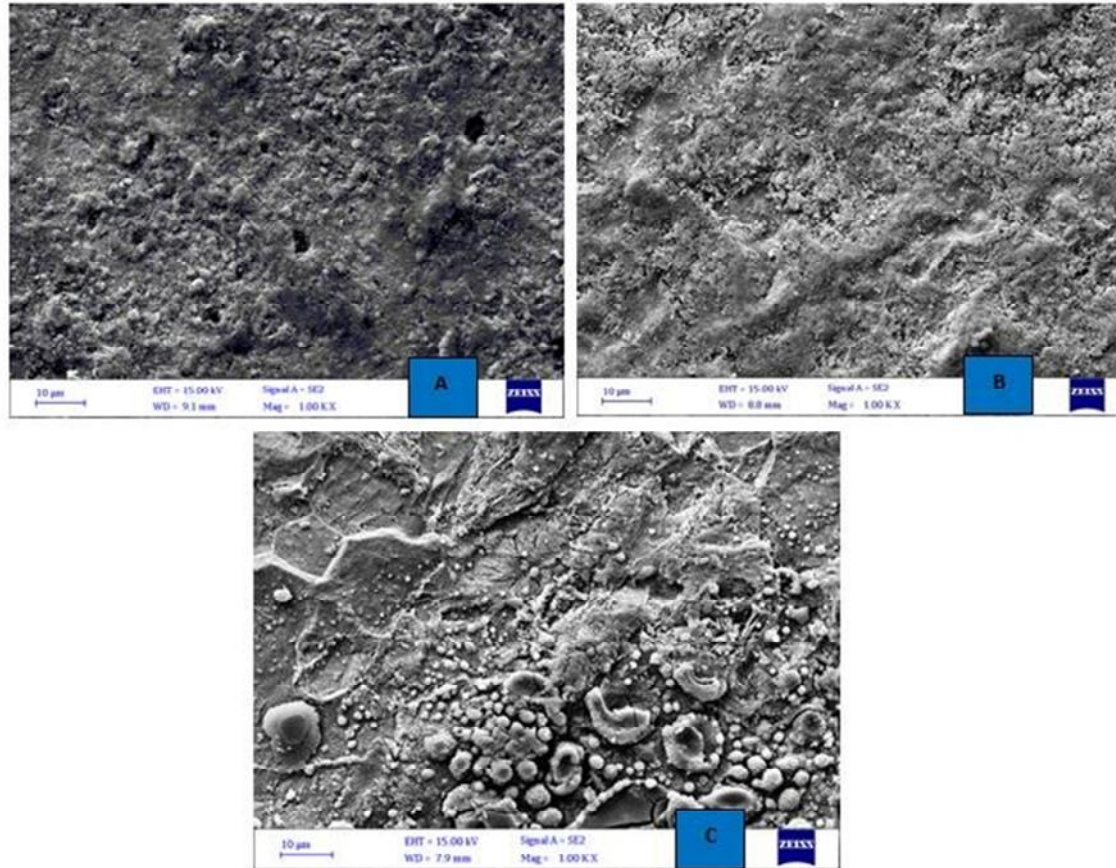


H



I





**SEM images of corroded surface**

# جلسه سوم

تست اسپری نمک

# تست اسپری نمک

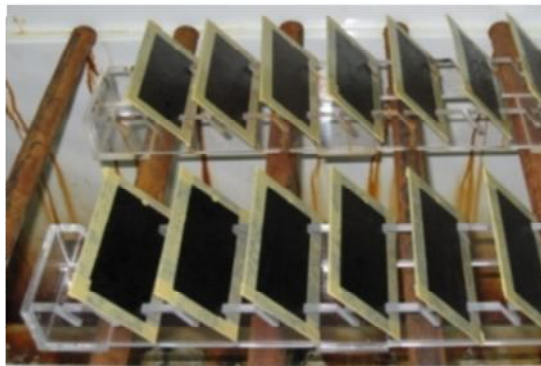
- **آزمون افشانه نمک یا تست سالت اسپری یا تست اسپری نمک** یک روش استاندارد تست خوردگی است که برای بررسی مقاومت مواد فلزی و پوشش‌های به کار رفته برای ممانعت از خوردگی استفاده می‌شود.
- افشانه نمک یک روش سریع آزمون خوردگی می‌باشد که حمله‌ای خورنده را به نمونه‌های پوشش داده شده به منظور ارزیابی (معمولاً مقایسه‌ای) پوشش استفاده شده صورت می‌دهد. محصولات خوردگی بعد از مدت زمان از قبل تعیین شده ارزیابی می‌شوند. مدت زمان آزمون بستگی به مقاومت پوشش/فلز به رفته دارد. معمولاً هرچه مقاومت پوشش/فلز بیشتر باشد، زمان آزمایش بیشتر خواهد بود.
- آزمون افشانه نمک یکی از متداول‌ترین و قدیمی‌ترین آزمون‌های خوردگی می‌باشد.
- **ASTM B117** نخستین استاندارد شناخته شده بین‌المللی افشانه نمک می‌باشد که در سال ۱۹۳۹ منتشر شد. استانداردهای مهم دیگر **ISO 9227**، **IS Z2371** و **ASTM G85** می‌باشند.

## تست اسپری نمک

- ابزار این آزمون متشکل از یک محفظه بسته می‌باشد که در آن محلول آب نمک ۵ درصد به کمک هوای فشرده و از طریق نازل (های) اسپری کننده اتمیزه می‌شود. این کار، محیطی خورنده از مه‌آب نمک متراکم در محفظه ایجاد می‌کند به طوری که نمونه‌هایی که در این محیط قرار می‌گیرند شرایط خورنده شدیدی را تجربه می‌کنند. حجم این محفظه‌ها بسته به سازنده آن متفاوت است. یک اجماع عمومی تاریخی وجود دارد که محفظه‌های بزرگتر می‌توانند محیط تست همگن تری را فراهم نمایند.



دستگاه اسپری نمک



دستگاه اسپری نمک



# تست اسپری نمک

پوشش‌هایی که می‌توانند با این روش ارزیابی شوند عبارتند از:

- سطوح فسفاته
- روی و آبکاری روی - آلیاژ
- آبکاری کروم، نیکل، مس و قلع
- پوشش‌هایی که به صورت الکترولیتی اعمال نشده‌اند
- پوشش‌های آلی، مثل بازدارنده‌های خوردگی
- پوشش‌های رنگ

# تست اسپری نمک






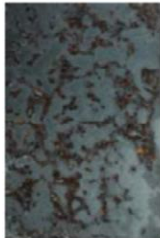



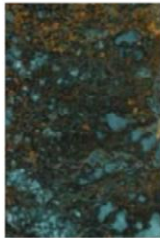
# تست اسپری نمک



# تست اسپری نمک



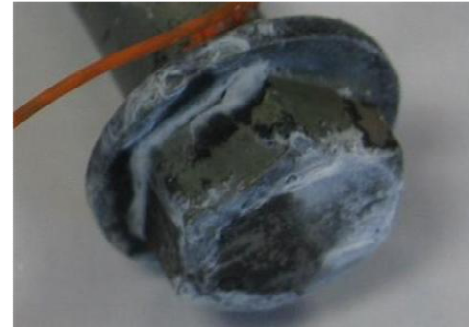
## تست اسپری نمک

			
As coat	24 hours exposure	48 hours exposure	72 hours exposure
Degree of corrosion 0%	Degree of corrosion 4.40%	Degree of corrosion 8.95%	Degree of corrosion 27.74%
			
96 hours exposure	120 hours exposure	144 hours exposure	168 hours exposure
Degree of corrosion 42.05%	Degree of corrosion 50.93%	Degree of corrosion 57.02%	Degree of corrosion 63.05%

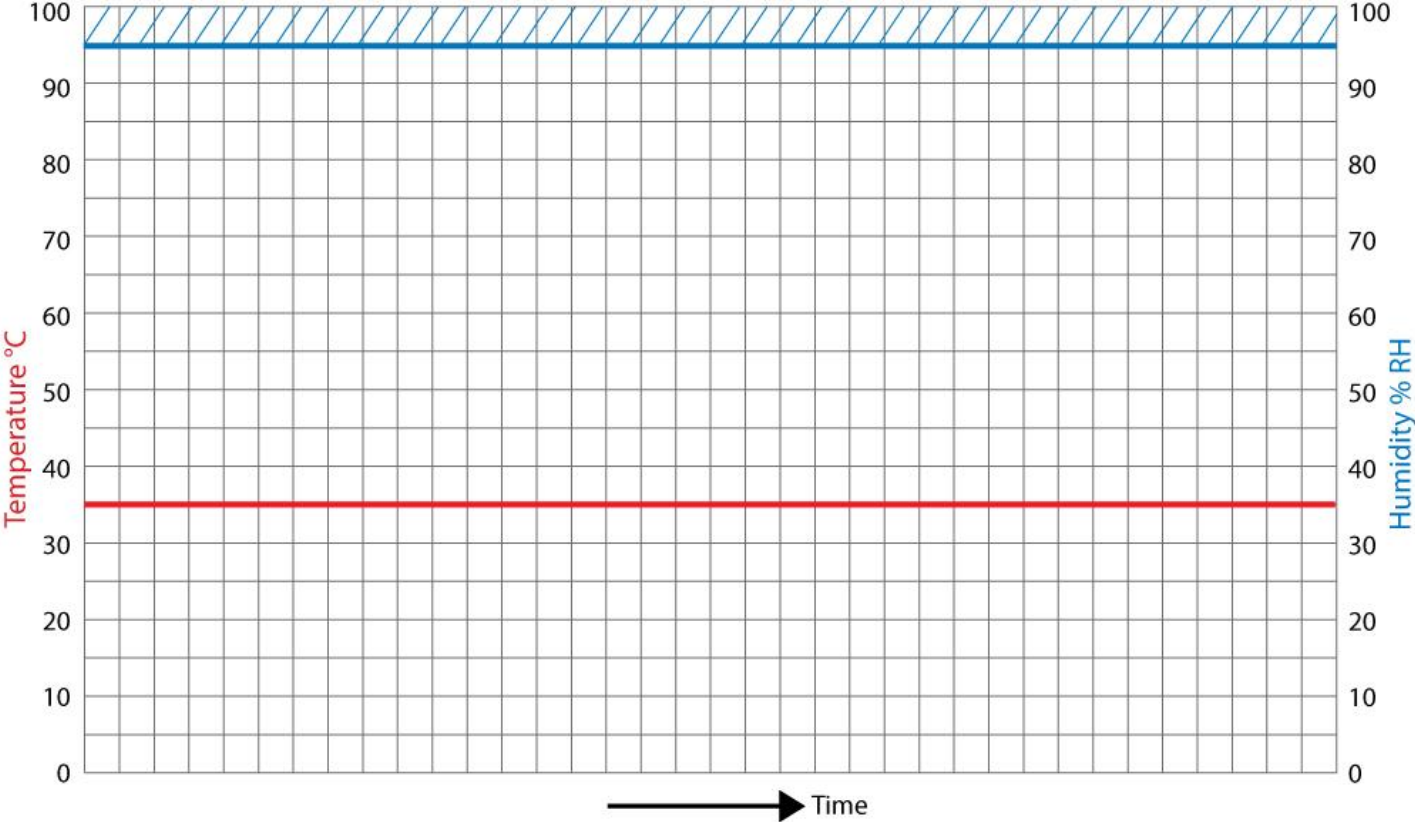
# تست اسپری نمک

Chamber construction, testing procedure and testing parameters are standardized under national and international standards, such as [ASTM B 117](#) and [ISO 9227](#).

These standards describe the necessary information to carry out this test; testing parameters such as [temperature](#), [air pressure of the sprayed solution](#), [preparation of the spraying solution](#), [concentration](#), [pH](#).



# ASTM G85 A1

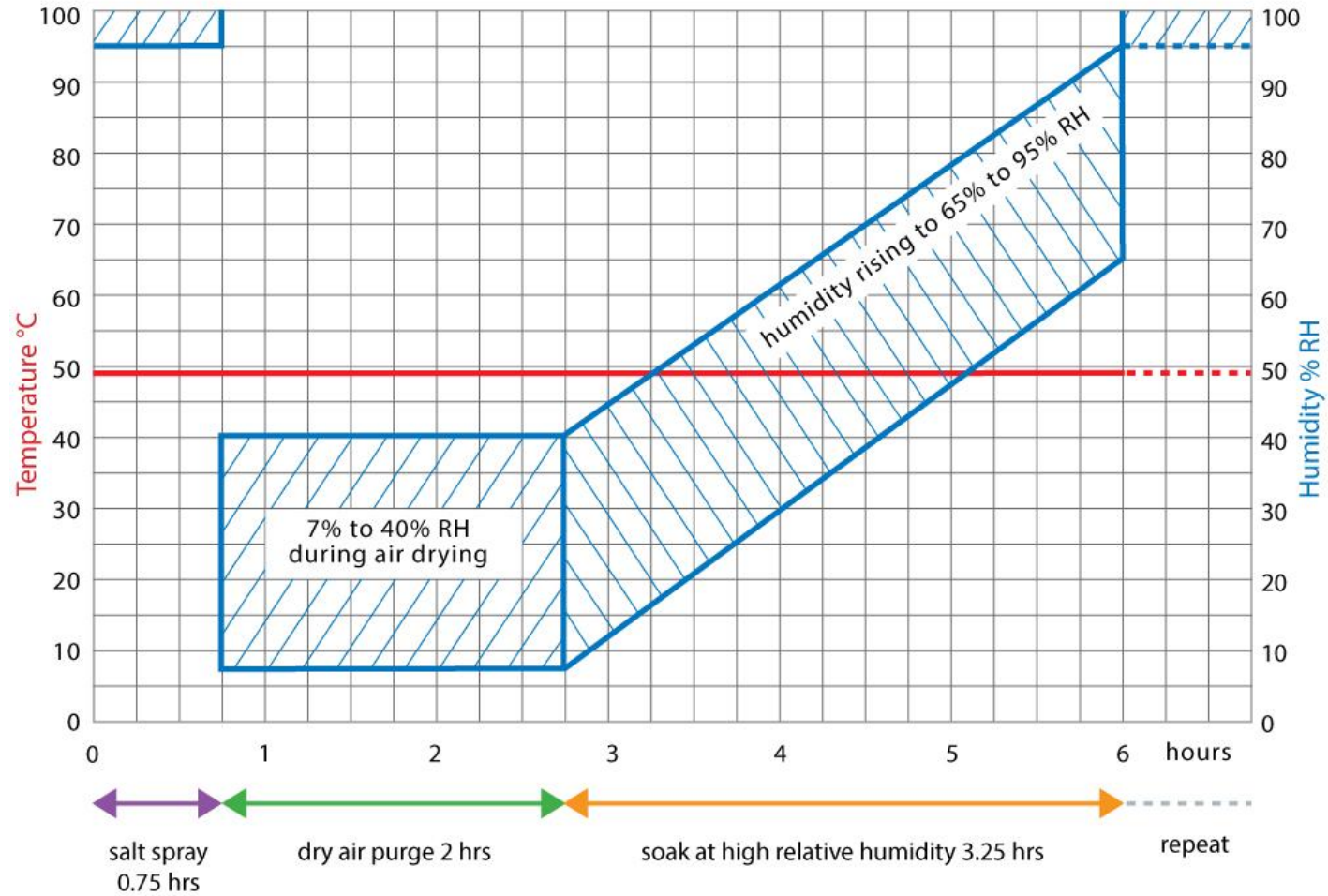


### **ASTM G85 Annex A1 – Acetic Acid Salt Spray Test (non-cyclic)**

This test can be used to determine the relative resistance to corrosion of **decorative chromium plating on steel and zinc based die casting** when exposed to **an acetic acid salt spray climate at an elevated temperature**. This test is also referred to as an ASS test. Test specimens are placed in an enclosed chamber and exposed to a continuous **indirect spray of salt water solution**, prepared in accordance with the requirements of the test standard and acidified (**pH 3.1–3.3**) by the addition of acetic acid. This spray is set to fall-out on to the specimens at a rate of 1–2 ml/80 cm<sup>2</sup>/hour, in a chamber temperature of **35 °C**. This climate is maintained under **constant steady state conditions**. The test duration is variable.



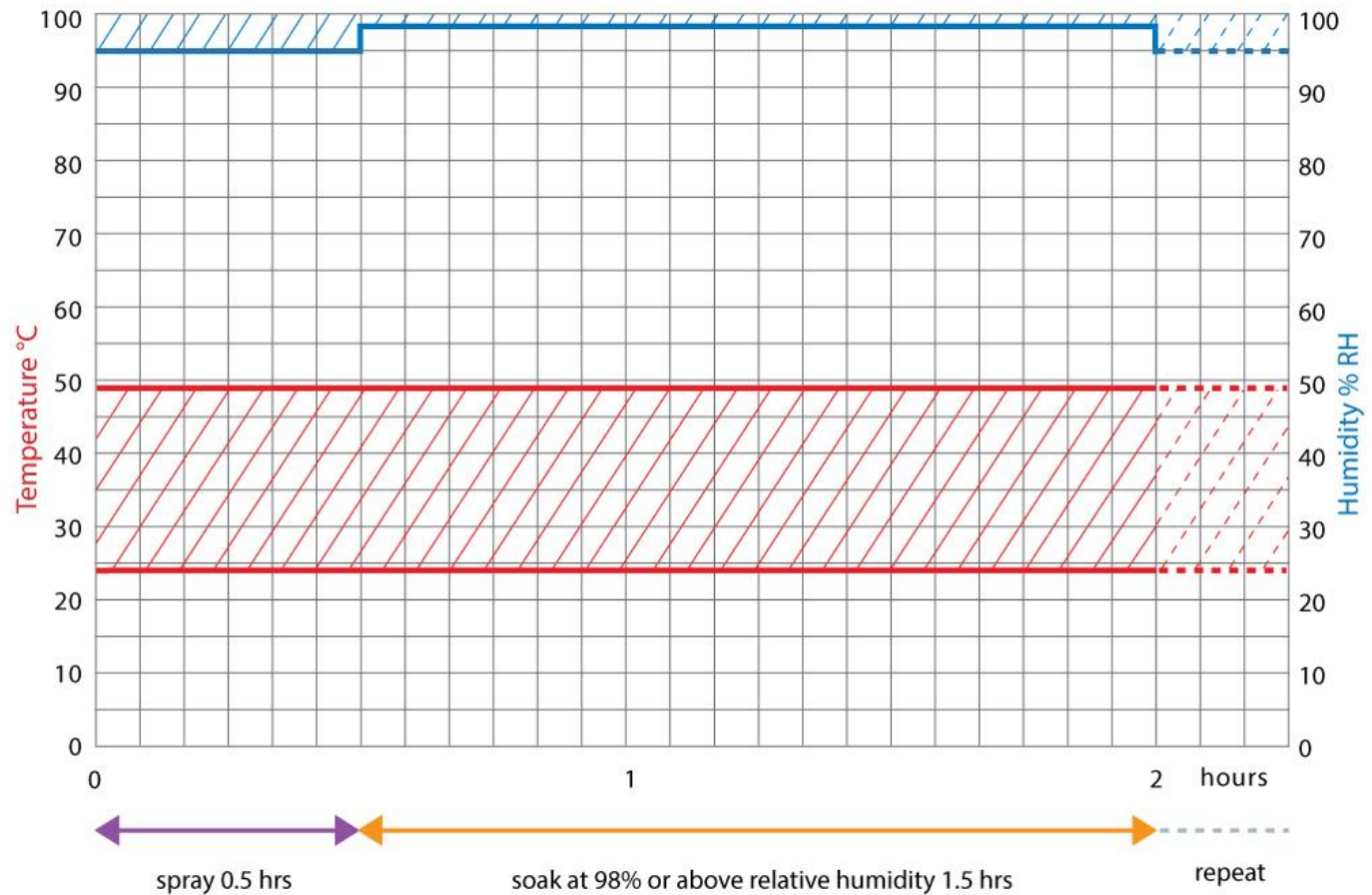
# ASTM G85 A2



## **ASTM G85 Annex A2 – Acidified Salt Fog Test (cyclic).**

This test can be used to test the relative resistance to corrosion of aluminium alloys when exposed to a changing climate of acetic acid salt spray, followed by air drying, followed by high humidity, all at an elevated temperature. This test is also referred to as a MASTMAASIS test. Test specimens are placed in an enclosed chamber, and exposed to a changing climate that comprises the following 3 part repeating cycle. 0.75 hours exposure to a continuous indirect spray of salt water solution, prepared in accordance with the requirements of the test standard and acidified (pH 2.8–3.0) by the addition of acetic acid. This spray is set to fall-out on to the specimens at a rate of 1–2 ml/80 cm<sup>2</sup>/hour. This is followed by a 2 hour exposure to an air drying (purge) climate. This is followed by 3.25 hours exposure to a high humidity climate which gradually rises to between 65% RH and 95% RH. The entire test cycle is at a constant chamber temperature of 49 °C. The number of cycle repeats and therefore the test duration is variable.

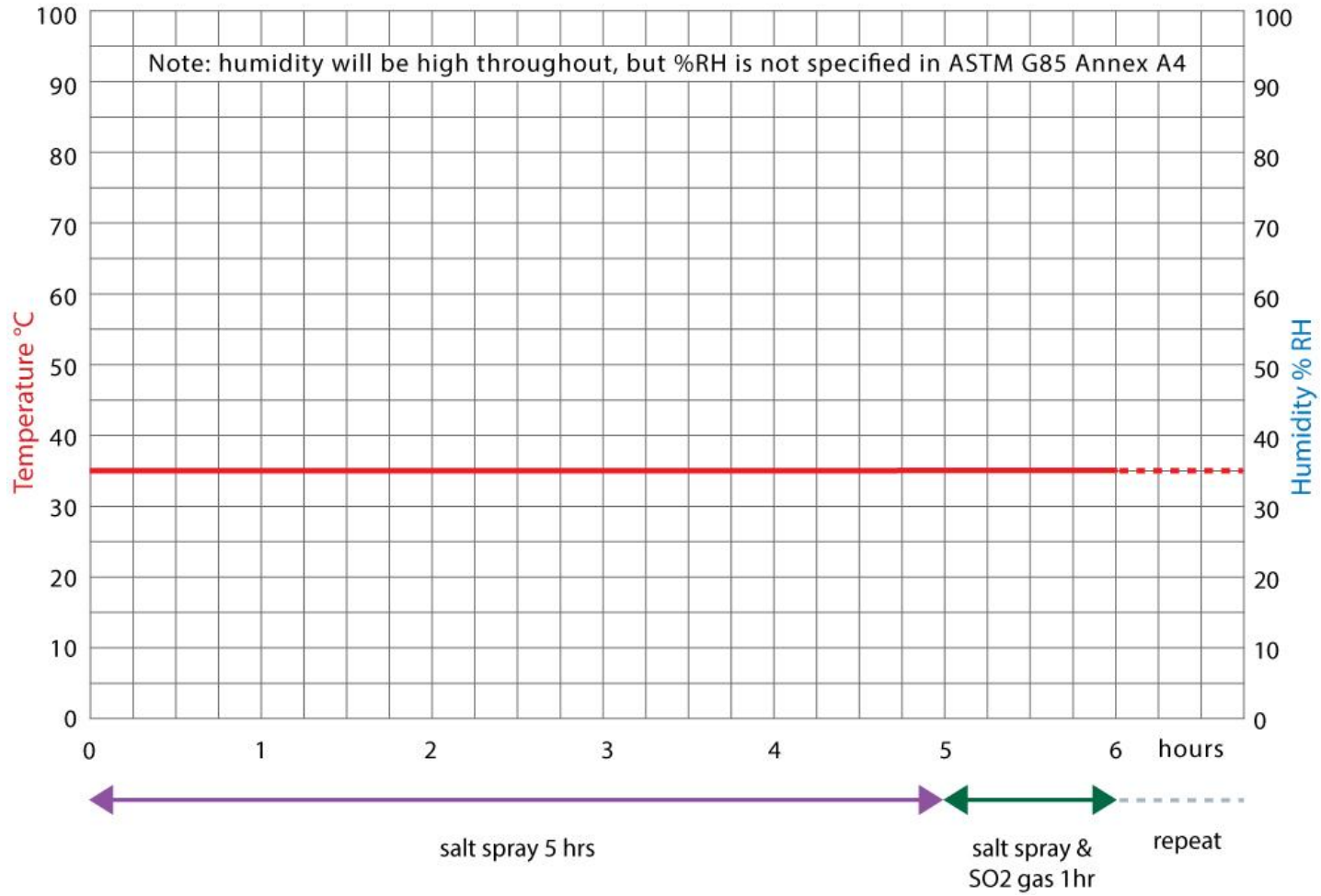
# ASTM G85 A3



### **ASTM G85 Annex A3 – Seawater Acidified Test (cyclic)**

This test can be used to test the relative resistance to corrosion of **coated or uncoated aluminium alloys and other metals**, when exposed to a changing climate of **acidified synthetic seawater spray**, followed by a high humidity, both at an elevated temperature. This test is also referred to as a SWAAT test. Test specimens are placed in an enclosed chamber, and exposed to a changing climate that comprises **the following 2 part repeating cycle**. First, a 30 minute exposure to a continuous indirect spray of synthetic seawater solution, prepared in accordance with the requirements of the test standard and acidified (pH 2.8–3.0) by the addition of acetic acid. This spray is set to fall-out on to the specimens at a rate of 1–2 ml/80 cm<sup>2</sup>/hour. This is followed by a 90 minute exposure to a high humidity climate (above 98% RH). The entire test cycle is at a constant chamber temperature of 49 °C (may be reduced to 24–35 °C for organically coated specimens). **The number of cycle repeats and therefore the test duration is variable**

# ASTM G85 A4 A



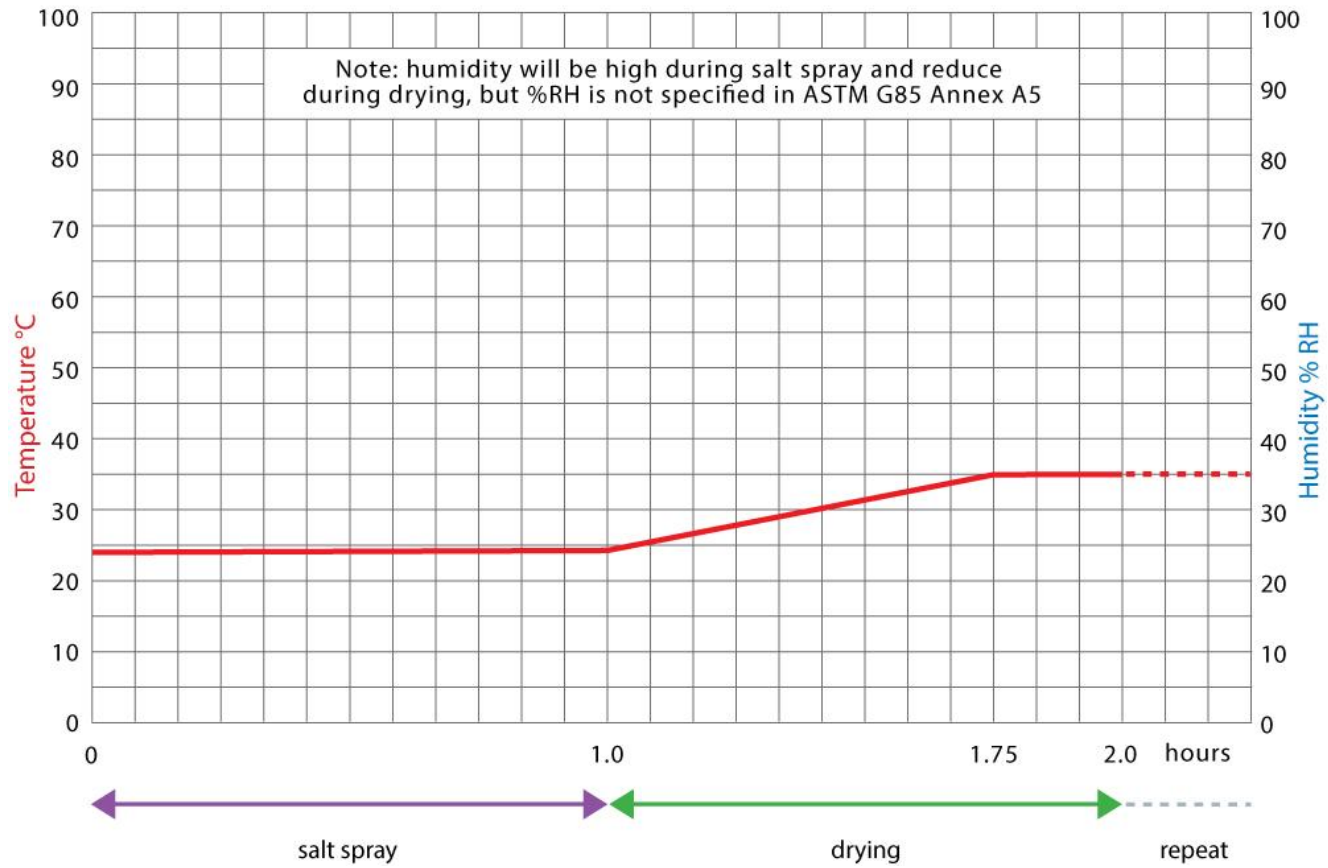
### **ASTM G85 Annex A4 – SO<sub>2</sub> Salt Spray Test (cyclic)**

This test can be used to test the relative resistance to corrosion of product samples that are likely to encounter a **combined SO<sub>2</sub>/salt spray/acid rain environment** during their usual service life. Test specimens are placed in an enclosed chamber, and exposed **to 1 of 2 possible changing climate cycles**. In either case, the exposure to salt spray may be salt water spray or synthetic sea water prepared in accordance with the requirements of the test standard. The most appropriate test cycle and spray solutions are to be agreed between parties.

The first climate cycle comprises a continuous indirect spray of neutral (pH 6.5–7.2) salt water/synthetic seawater solution, which falls-out on to the specimens at a rate of 1–2 ml/80 cm<sup>2</sup>/hour. During this spraying, the chamber is dosed with SO<sub>2</sub> gas at a rate of 35 cm<sup>3</sup>/minute/m<sup>3</sup> of chamber volume, for 1 hour in every 6 hours of spraying. The entire test cycle is at a constant chamber temperature of 35 °C. The number of cycle repeats and therefore the test duration is variable.

The second climate cycle comprises 0.5 hours of continuous indirect spray of neutral (pH 6.5–7.2) salt water/synthetic seawater solution, which falls-out on to the specimens at a rate of 1–2 ml/80 cm<sup>2</sup>/hour. This is followed by 0.5 hours of dosing with SO<sub>2</sub> gas at a rate of 35 cm<sup>3</sup>/minute/m<sup>3</sup> of chamber volume. This is followed by 2 hours of high humidity soak. The entire test cycle is at a constant chamber temperature of 35 °C. The number of cycle repeats and therefore the test duration is variable.

# ASTM G85 A5



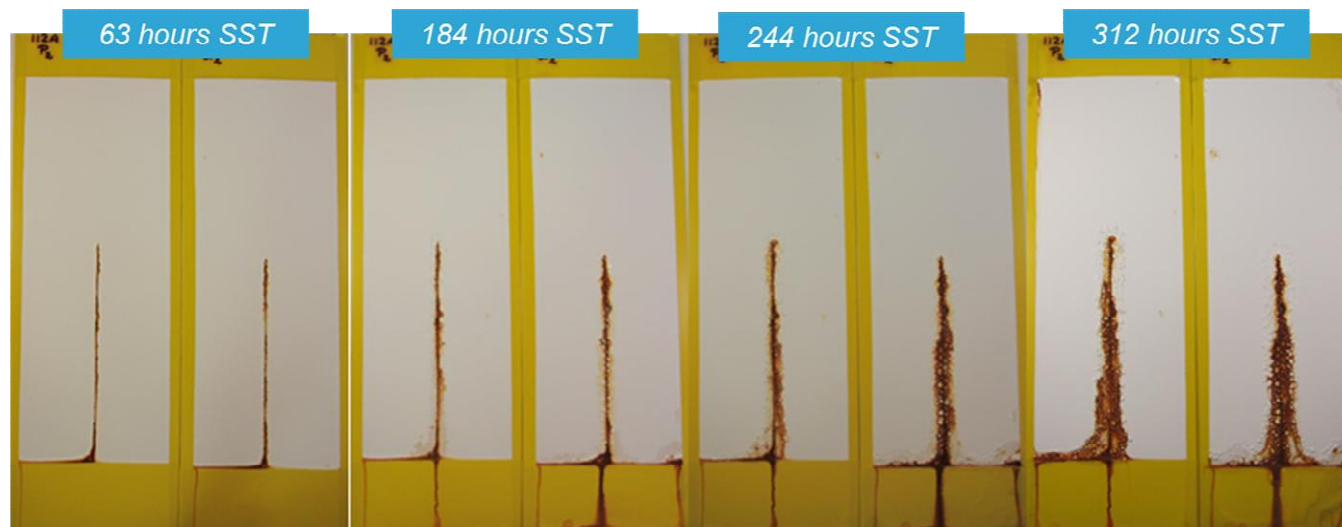
### **ASTM G85 Annex A5 – Dilute Electrolyte Salt Fog/Dry Test (cyclic)**

This test can be used to test the relative resistance to corrosion of **paints on steel when exposed to a changing climate of dilute salt spray at ambient temperature, followed by air drying at elevated temperature.** It is a popular test in the surface coatings industry, where it is also referred to as the PROHESION test. Test specimens are placed in an enclosed chamber, and exposed to a changing climate with the following 2-part cycle. First, a 1-hour exposure to a continuous indirect spray of salt water solution, prepared in accordance with the requirements of the test standard and acidified (pH 3.1–3.3) by the addition of acetic acid. This spray is set to fall on the specimens at a rate of 1–2 ml/80 cm<sup>2</sup>/hour, in an ambient chamber temperature (21–27 °C). This is followed by a 1-hour exposure to an air drying (purge) climate at 35 °C. The cycle repeats until the desired duration has been achieved



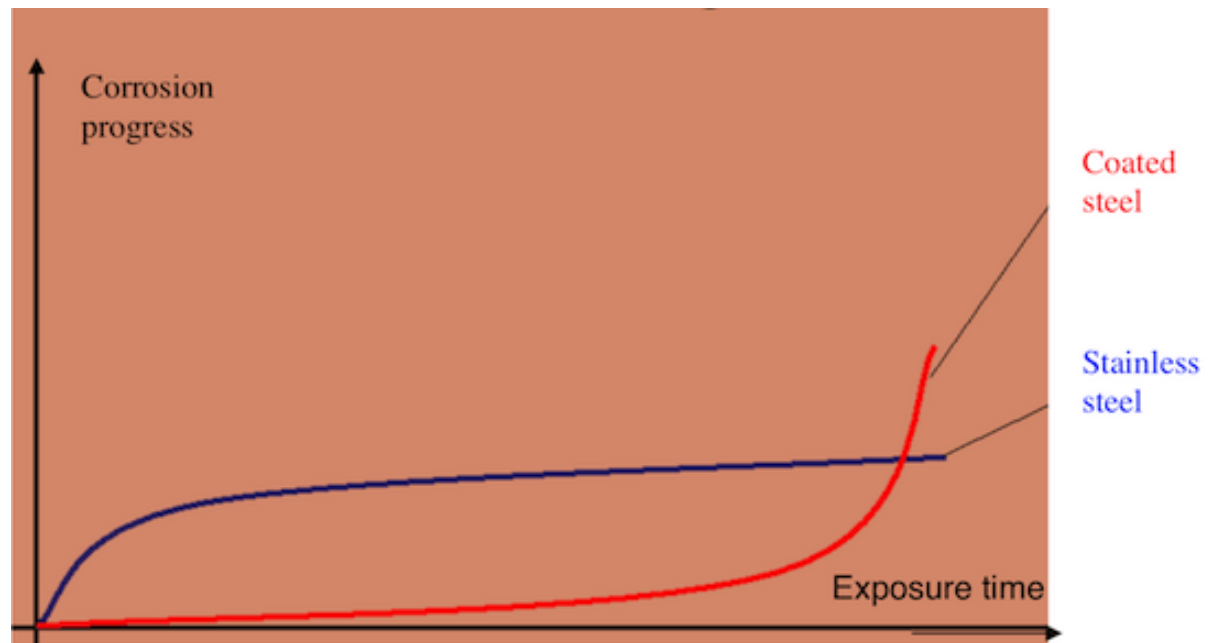
## Corrosion Testing

*Salt Spray Testing (ASTM B117) on a white DTM formula with no anti-corrosive pigments: DFT 1.5-2.0 mils*



*Polished CRS Unpolished CRS*

Parameter	Value
Chamber temperature/°C	35
pH	6.65
Quantity of salt solution collected/(mL·h <sup>-1</sup> )	1.5
Concentration of NaCl solution	3.5%
Air pressure/kPa	96.53–124.11
Component loading in chamber position/(°)	30
Duration of test/h	100



Test items	RUSPERT®	Zinc-nickel plating (Galvalume® Chromate)	Hot dip galvanizing
<p><b>Before tests</b></p>			
<p><b>Salt Spray Test After 1,000 hours</b></p> <p><small>Test method: 5% concentrated salt mist continuously sprayed in accordance with the JIS Z 2371 standard</small></p>			

YAS CO.

EG After 70 h



<http://yaran-sanat.com>

## Simple Salt Spray Corrosion Test Comparison:

---

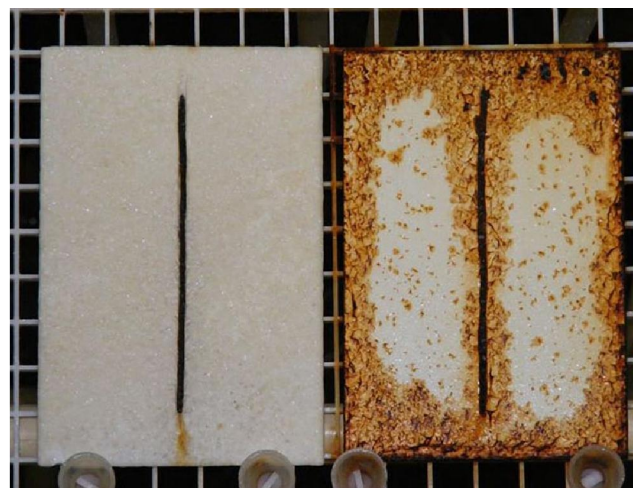
Observation up to red rust	ER 308L Corrosion Results	EC 409 (K409TIT) Corrosion Results
Up to 24 Hrs	No white and red rust observed	No white and red rust observed
Up to 48 Hrs	No white and red rust observed	No white and red rust observed
Up to 72 Hrs	Approximately 15% red rust observed	Approximately 15% red rust observed

**Salt Spray Corrosion Test Condition**

- 1.Solution-5% NaCL
- 2.pH-6.5 to 7.5 (actual 6.8)
- 3.Temp-35°C
- 4.RH-95%
- 5.Duration-72 Hrs
6. Fog Collection-1.7 MI Per Hour

Salt Spray Corrosion Test Method-ASTM B117

این آزمون مطابق استاندارد ASTM B117 انجام می گیرد. در این آزمون پوشش برای ساعت های مختلف در یک محیط مه نمکی قرار می گیرد. قبل از شروع آزمون پوشش می تواند با روش های x cut و v cut خراش داده شده و شدت آزمون افزایش یابد.



Outline

Highlights

Abstract

Keywords

1. Introduction

2. Methodology

3. Results and discussion

4. Conclusions

[CRedit authorship contribution statement](#)

[Declaration of competing interest](#)

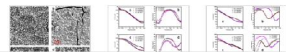
[Acknowledgements](#)

[Data availability statement](#)

[References](#)

[Show full outline](#) ▾

Figures (7)



Surface and Coatings Technology

Available online 6 July 2020, 126157

In Press, Journal Pre-proof



# The effect of exposure conditions on performance evaluation of post-treated anodic oxides on an aerospace aluminium alloy: Comparison between salt spray and immersion testing

B.J. Usman <sup>a</sup>, F. Scenini <sup>a, b</sup>, M. Curioni <sup>a, b</sup> 

[Show more](#) ▾

<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126157>

[Get rights and content](#)

Under a Creative Commons license

[open access](#)

## Highlights

- The effects of exposure condition on anticorrosion performance were



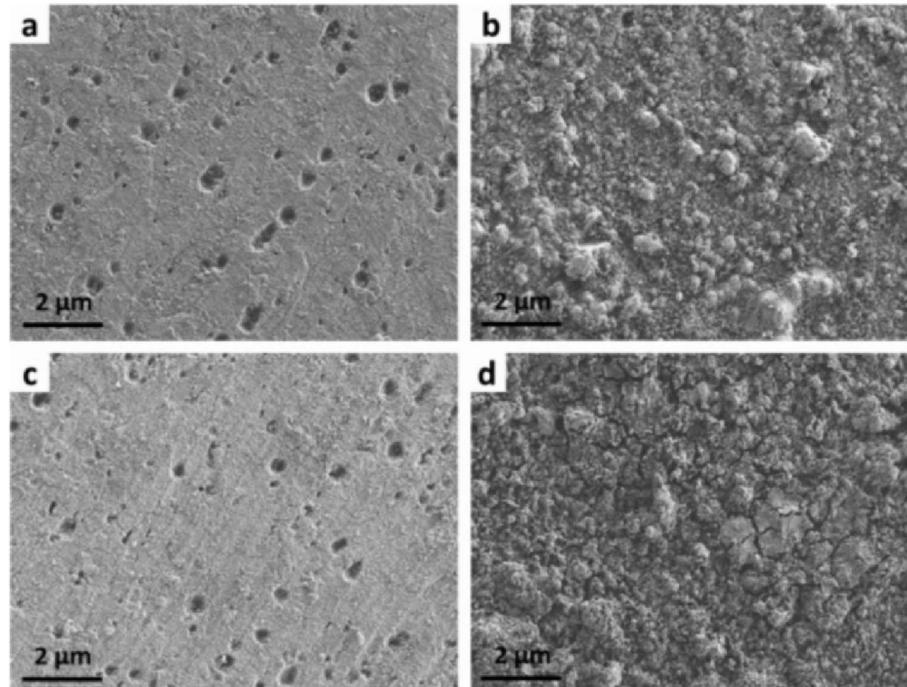


Fig. 4. Secondary electron SEM micrographs for the AA-2024-T3 specimens anodized at (a, b) 14V and (c, d) 7V and sealed with cerium nitrate, after corrosion under immersion (a, c) and salt-spray (b, d).

## **تکلیف جلسه سوم**

- بررسی خلاصه (شامل معرفی، نتایج آزمون و تحلیل نمودار) یک مقاله لاتین در مورد آزمون سالت اسپری
- کاربرد تست سالت اسپری در صنعت

# جلسه چهارم

تست پولاریزاسیون

# آزمون پولاریزاسیون

- روش دیگری که برای اندازه گیری سرعت خوردگی مورد استفاده قرار می گیرد استفاده از منحنی پولاریزاسیون می باشد. روشهای پولاریزاسیون در مقایسه با روش کاهش وزن نیاز به زمان کمتری داشته و سریعتر انجام می شوند.

- آزمون پولاریزاسیون تافلی

- آزمون مقاومت پولاریزاسیون خطی

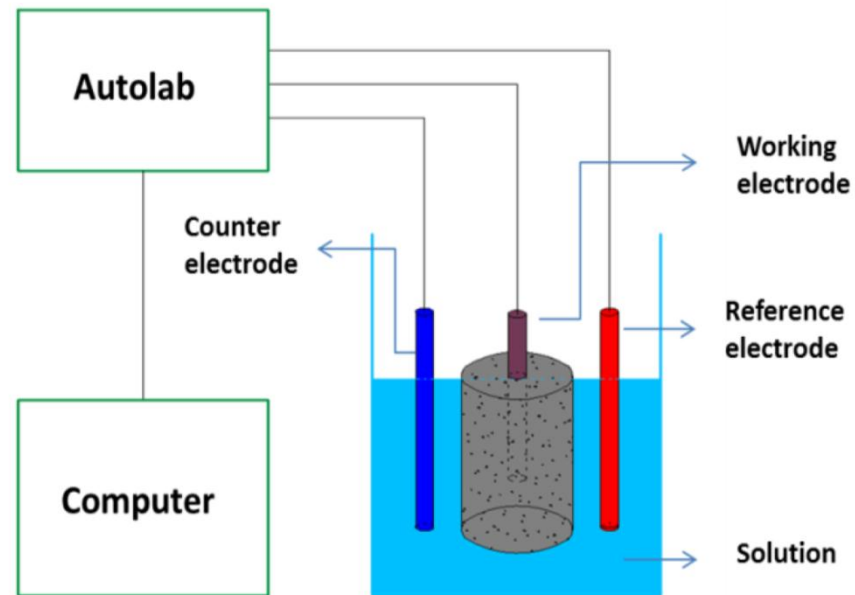
ASTM G3-14(2019)

Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing

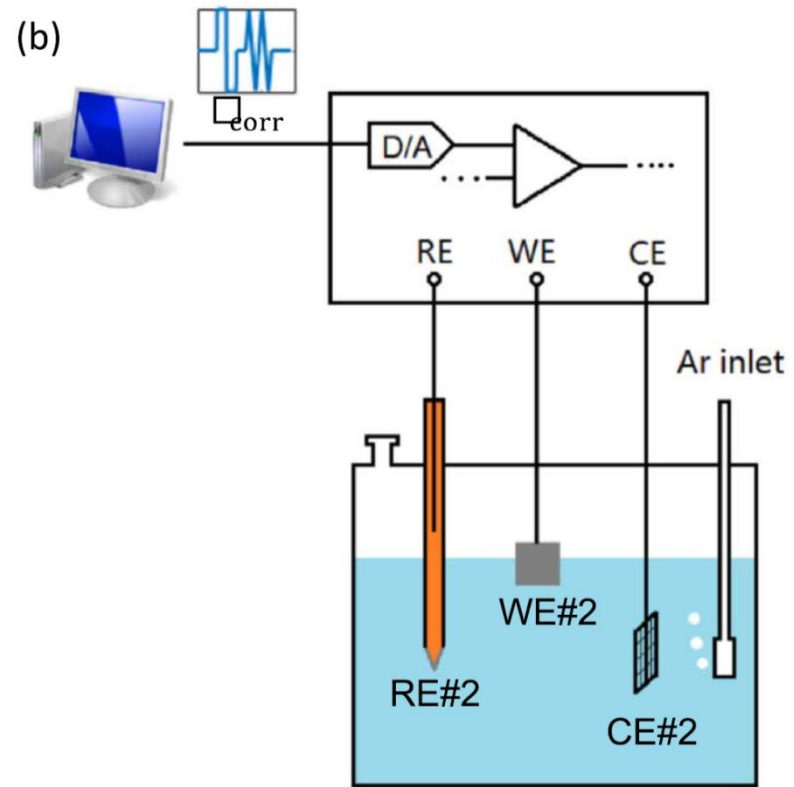
**ASTM G5: Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements**

ASTM G5-14(2021)

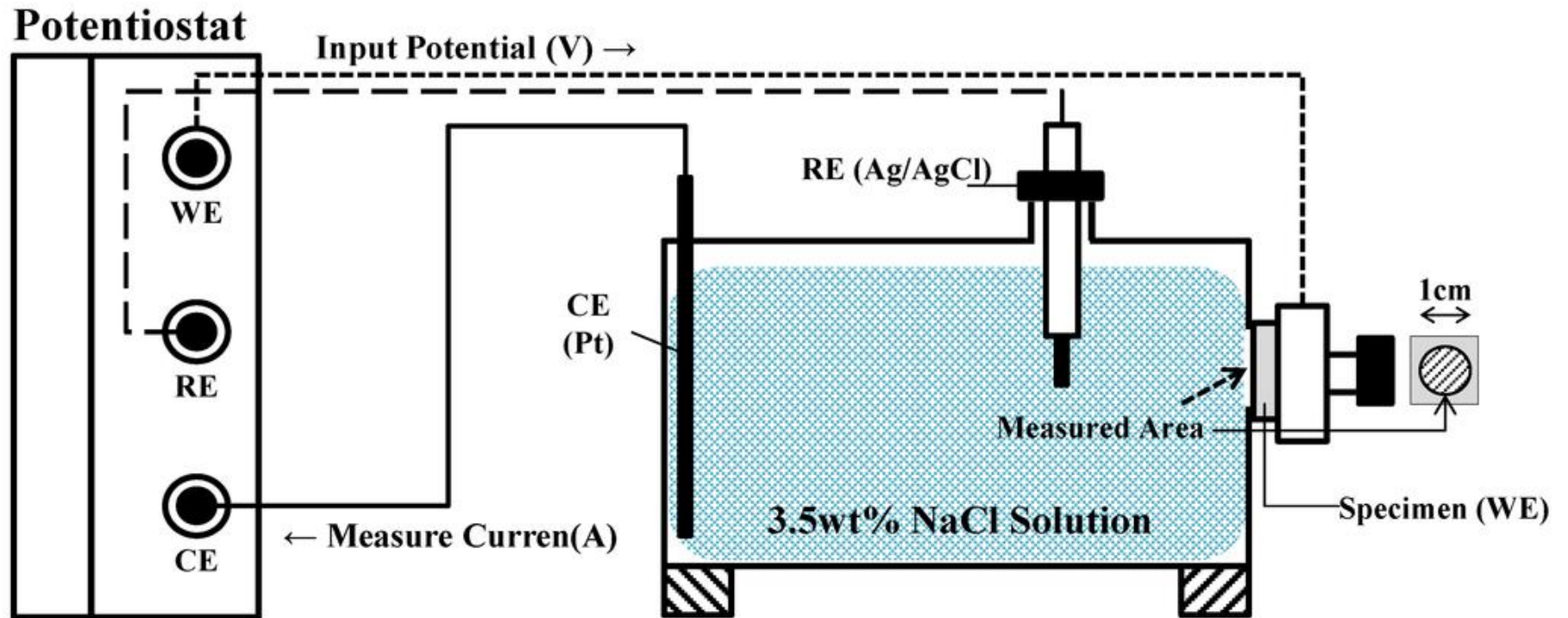
Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements



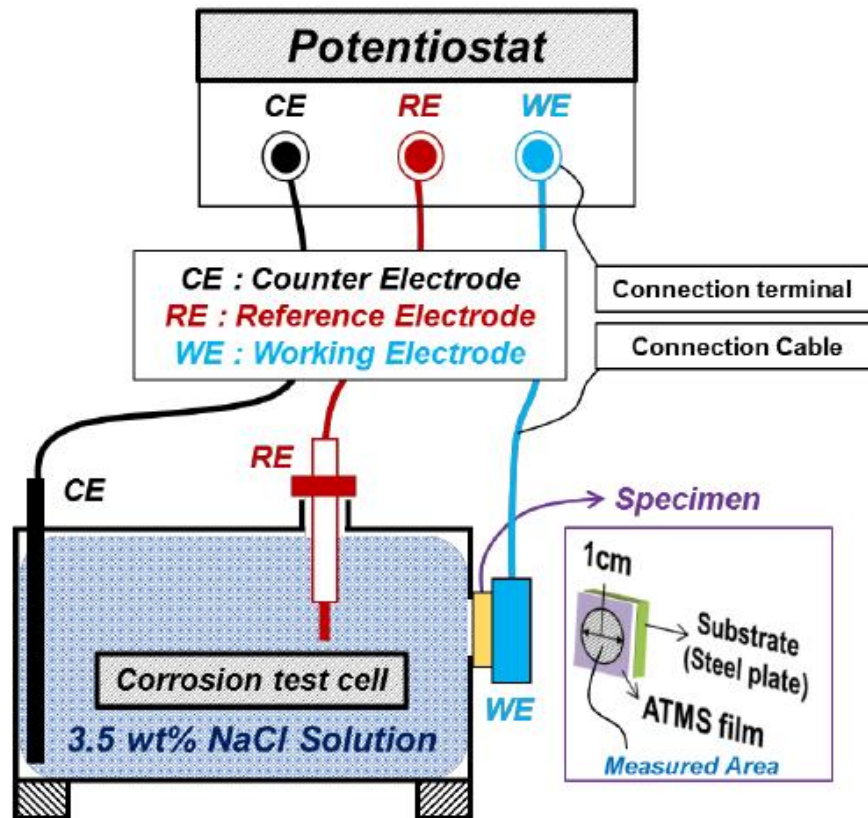
**Fig. 2.** Schematic of electrochemical cell use.



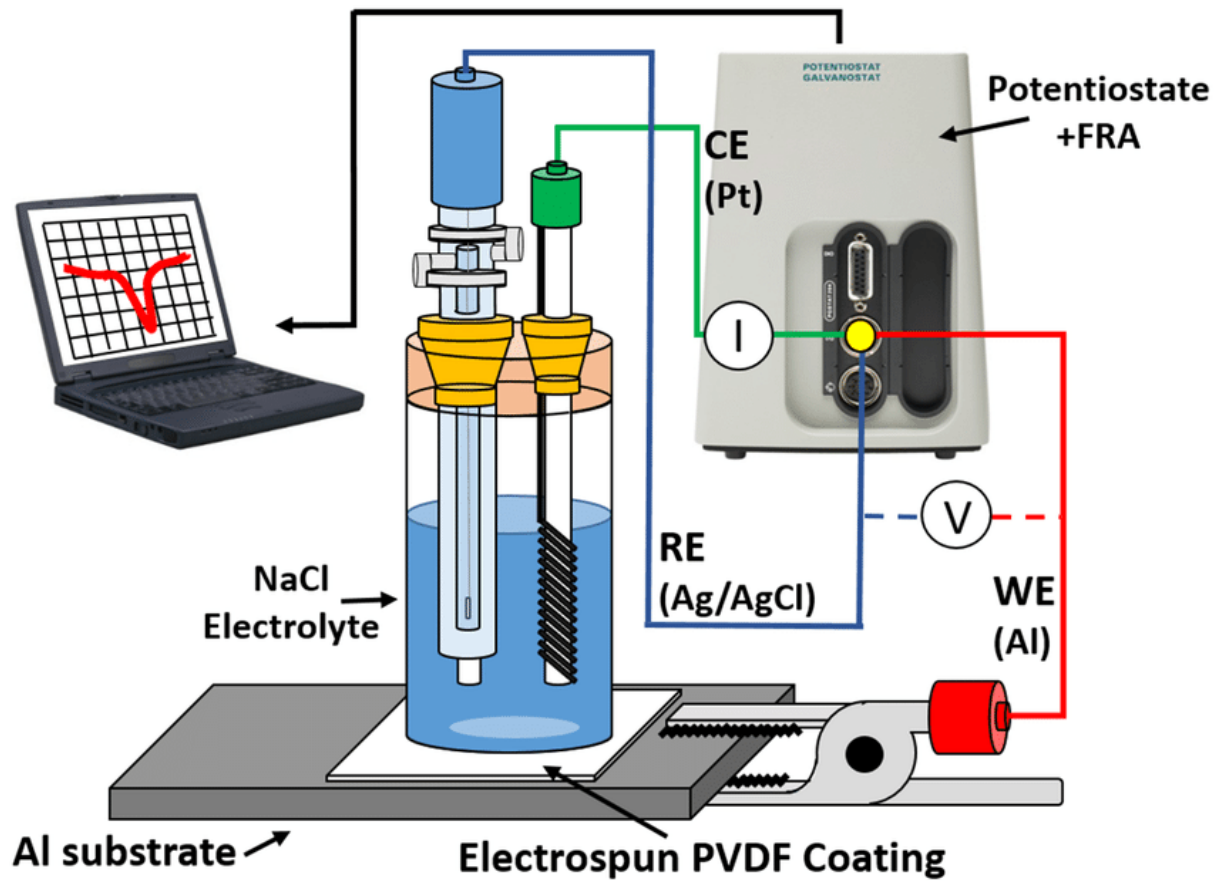
# آزمون پولاریزاسیون



# آزمون پولاریزاسیون







# Activation Polarization

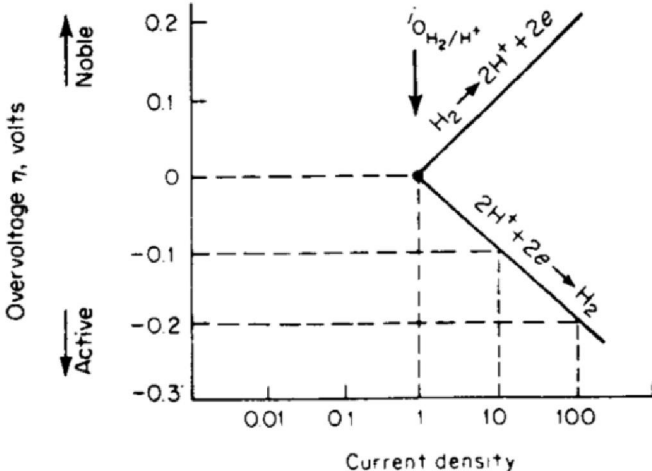
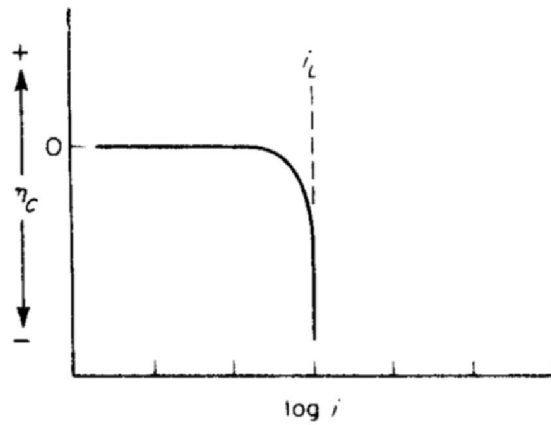


Figure 9-13 Activation-polarization curve of a hydrogen electrode.

$$\eta_a = \pm \beta \log \frac{i}{i_0}$$

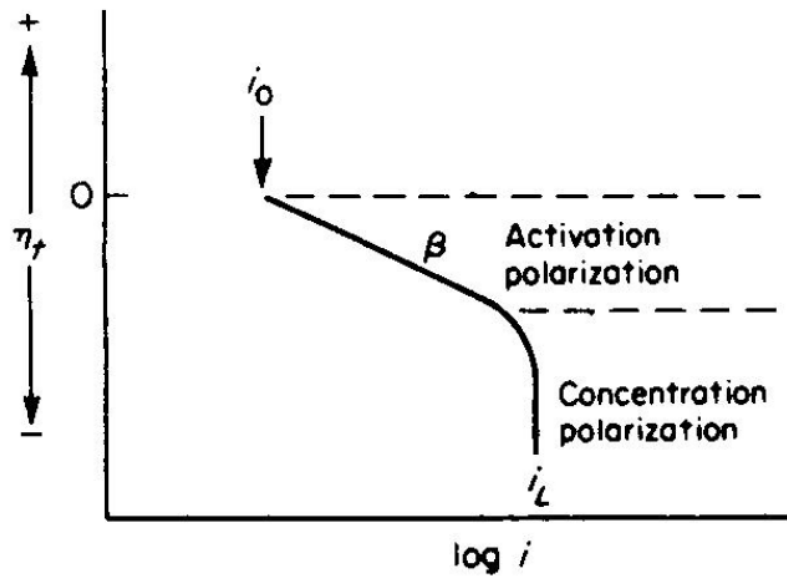
## Concentration Polarization

$$\eta_c = 2.3 \frac{RT}{nF} \log \left( 1 - \frac{i}{i_L} \right)$$



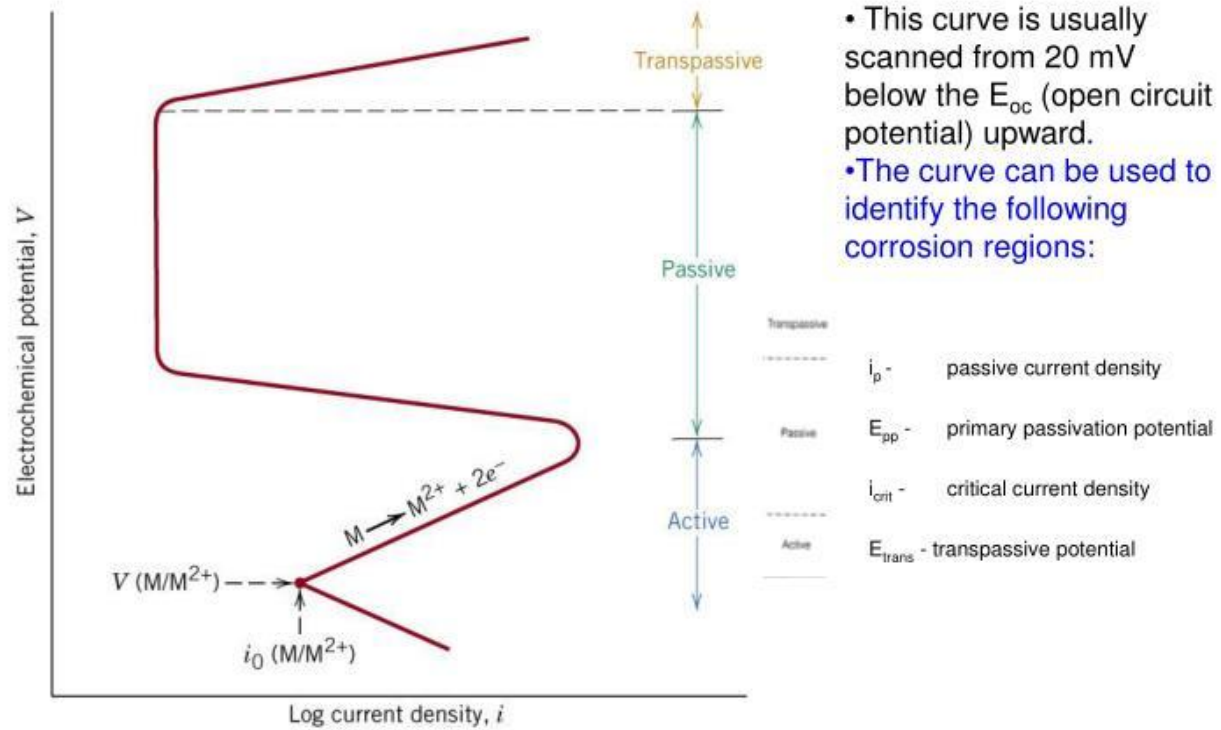
**Figure 9-15** Concentration polarization curve (reduction process).

## Combined Polarization



**Figure 9-17** Combined polarization curve—activation and concentration polarization.

# Anodic Polarization Curve -1

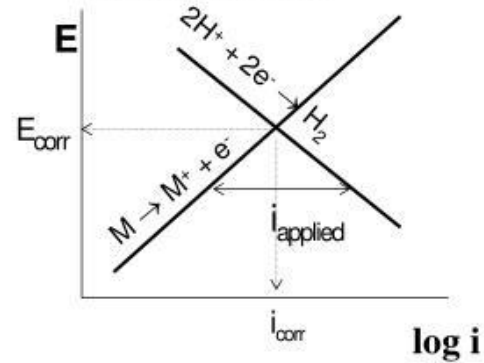


# آزمون پولاریزاسیون تافلی

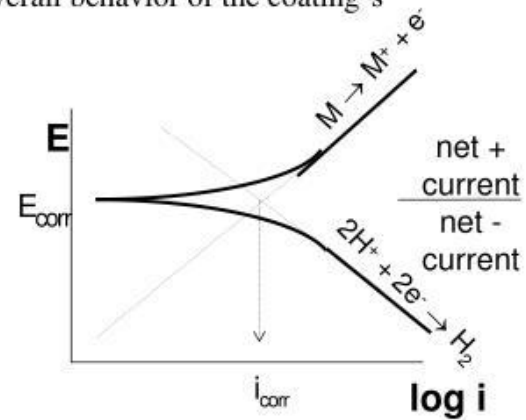
- رابطه تافل با کنترل اکتیواسیون فرآیندهای آندی و کاتدی مرتبط می باشد. برای یک واکنش الکتروشیمیایی تحت کنترل اکتیواسیون، منحنی های پولاریزاسیون در صفحه مختصات  $E$  بر حسب  $\log(i)$  بصورت خطی بوده که رفتار تافل نامیده می شود. برون یابی شیب منحنی های کاتدی و آندی تافل می توان پتانسیل خوردگی را بدست آورد. نقطه تقاطع نشان دهنده دانسیته جریان خوردگی یا سرعت خوردگی می باشد.

# Potentiodynamic Curves

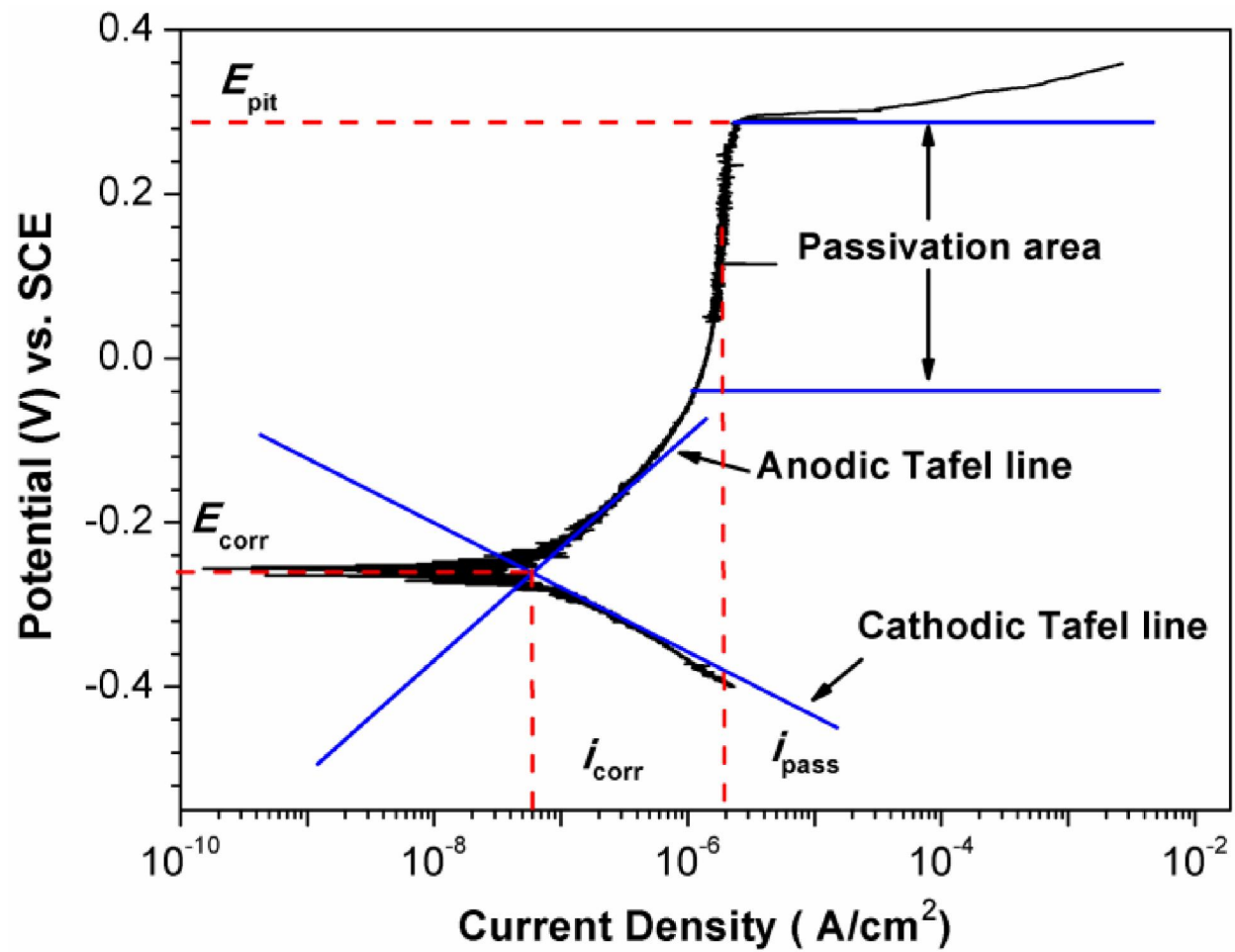
- An electrochemical test that measures the current response to an applied potential over a large potential range
- this test is used to analyze the overall behavior of the coating's corrosion protection



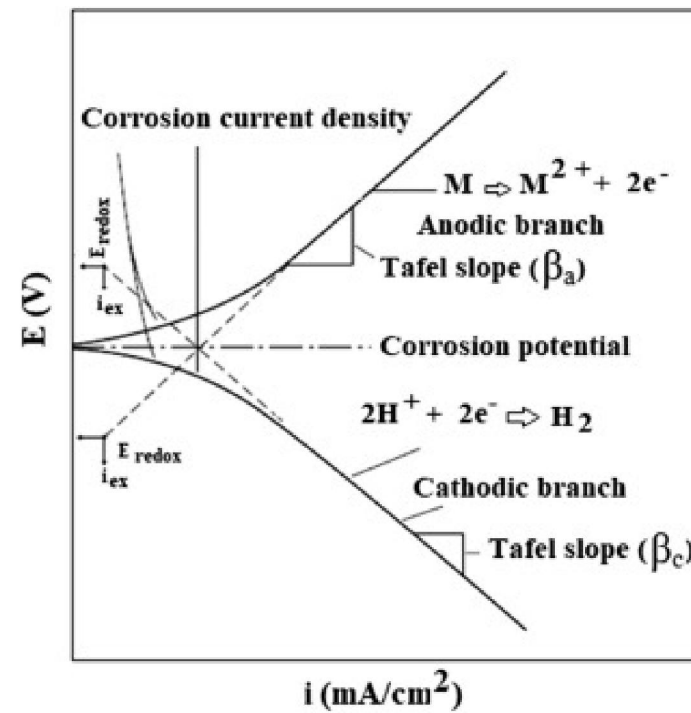
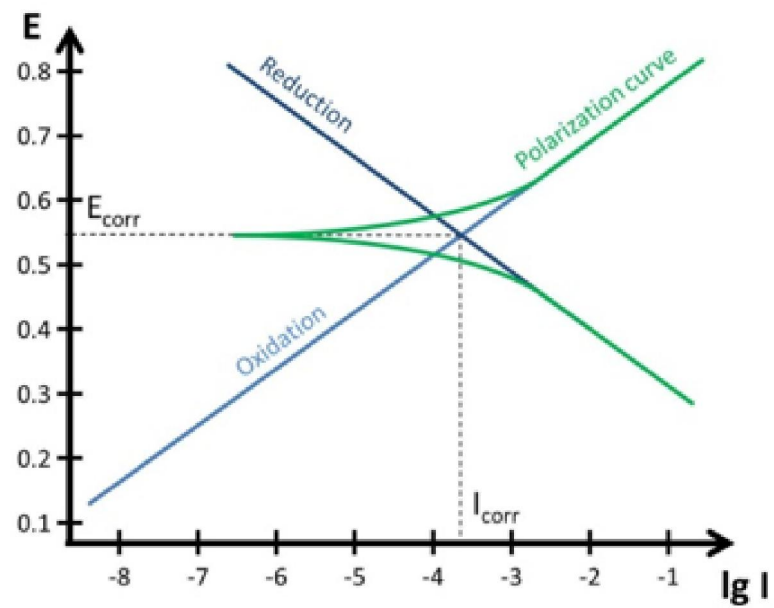
**Evan's Diagram**

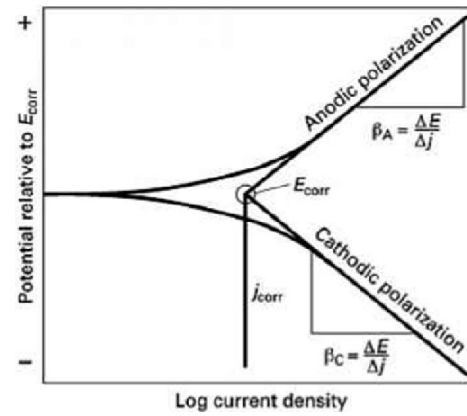
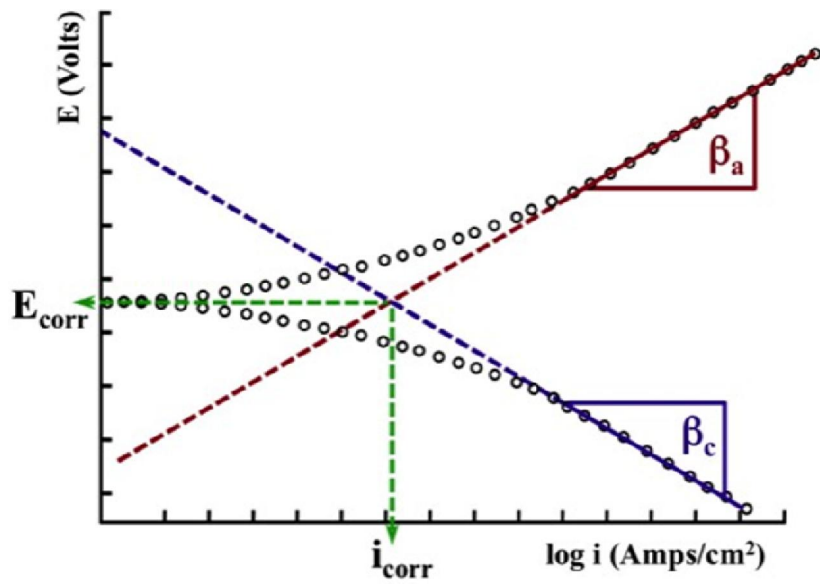


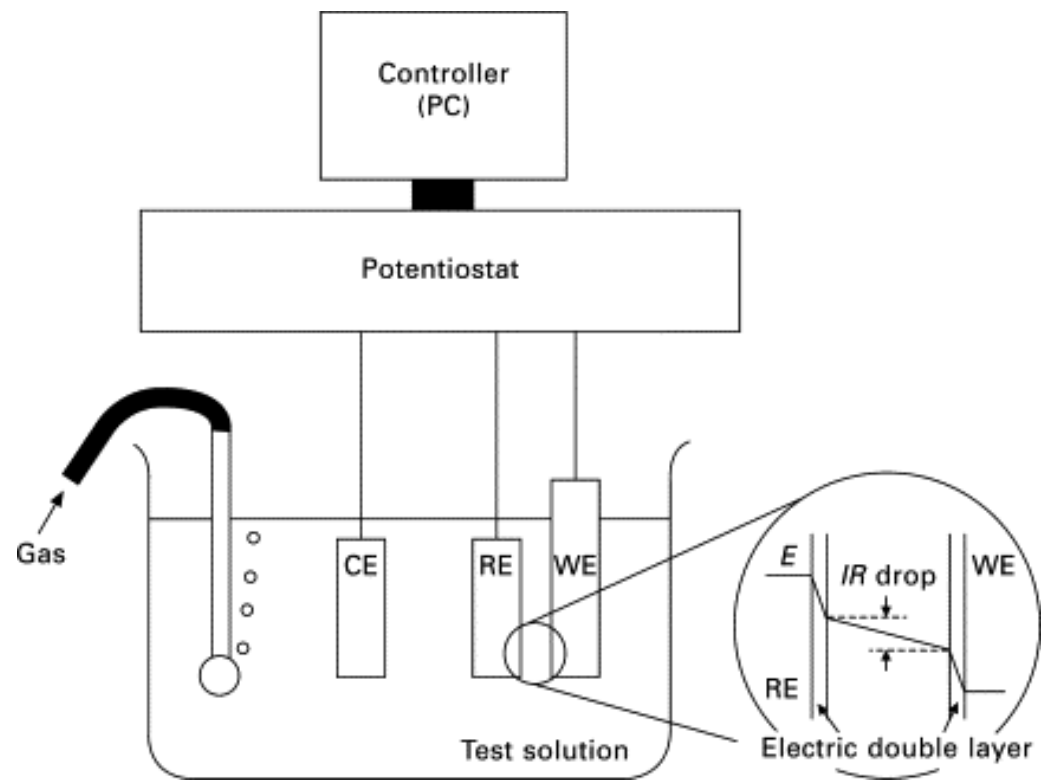
**Polarization Curve**

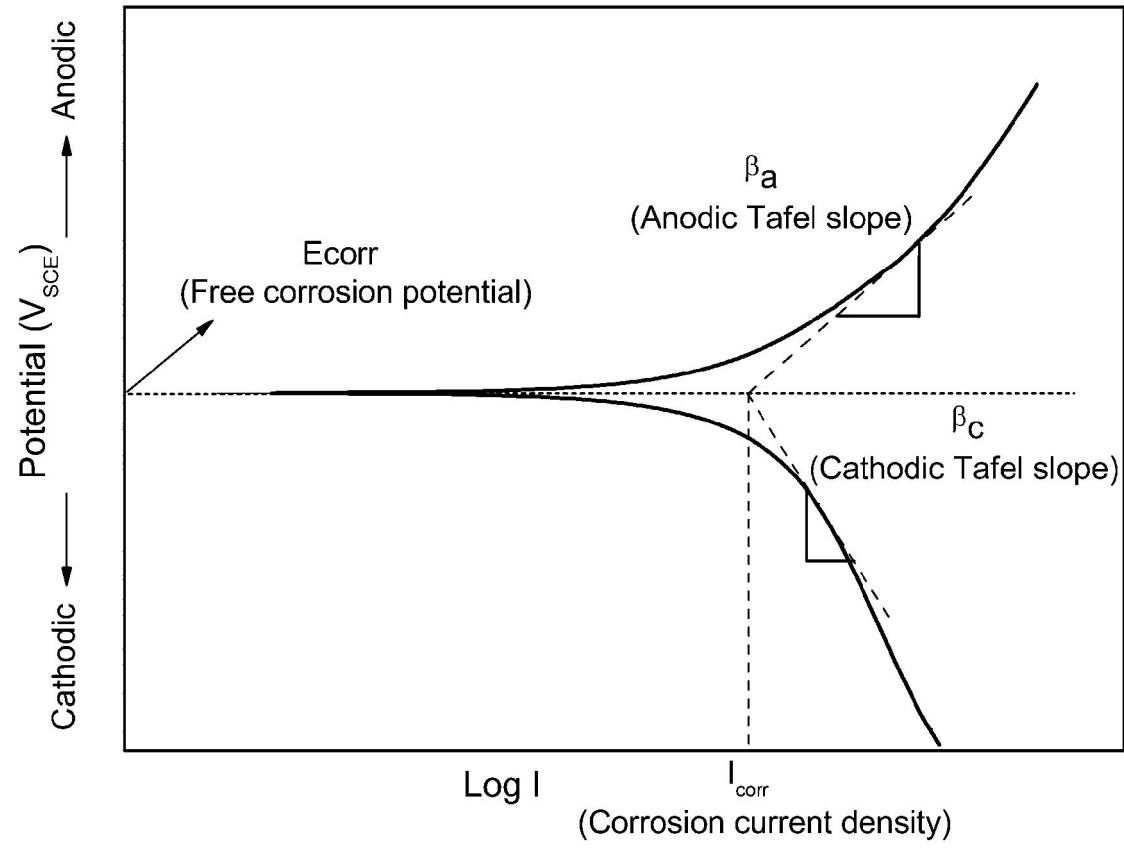


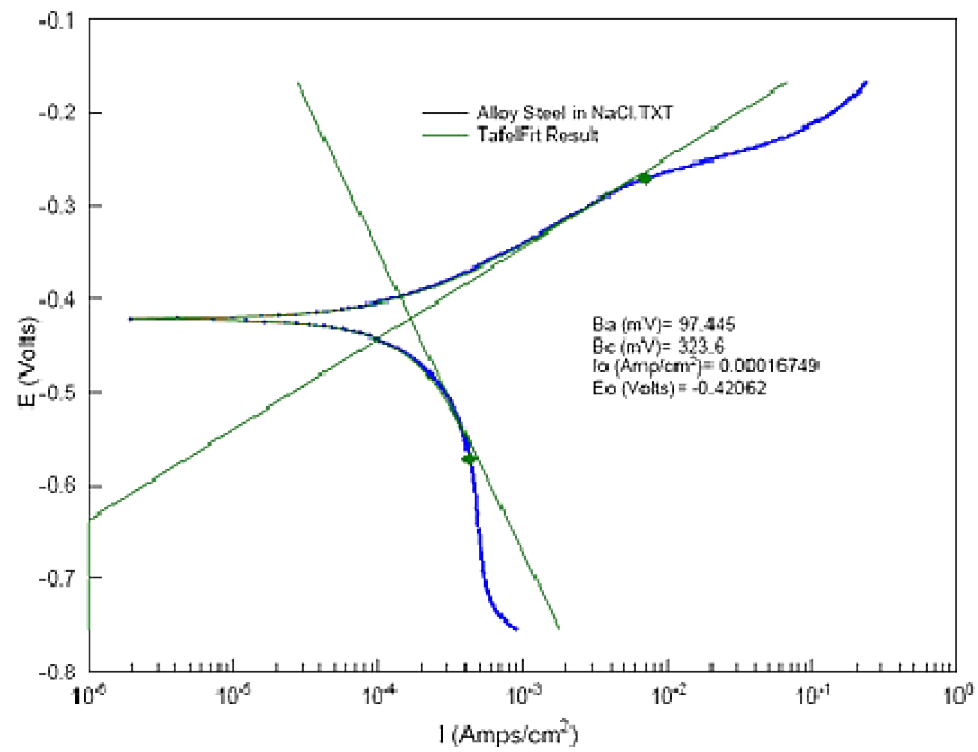


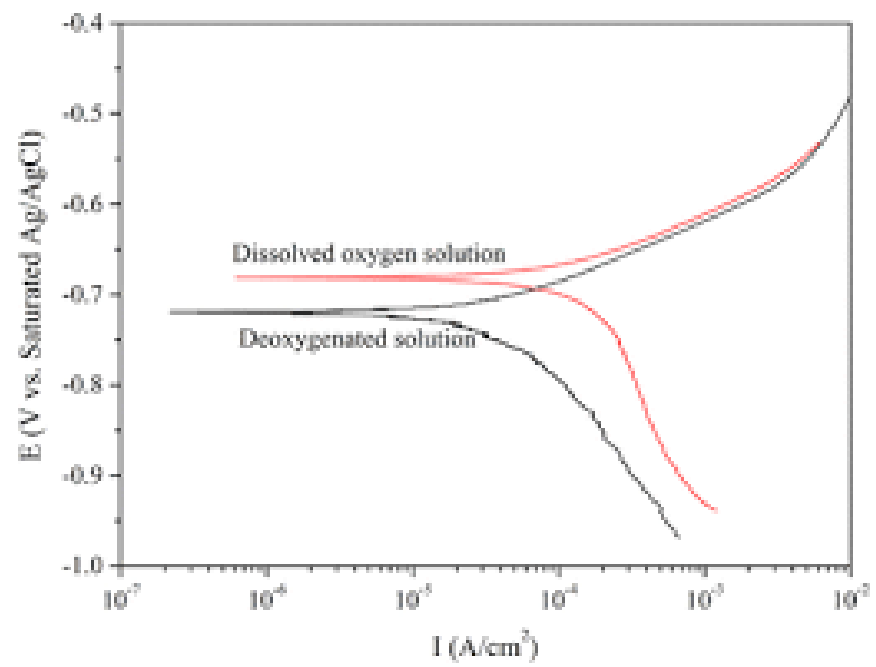


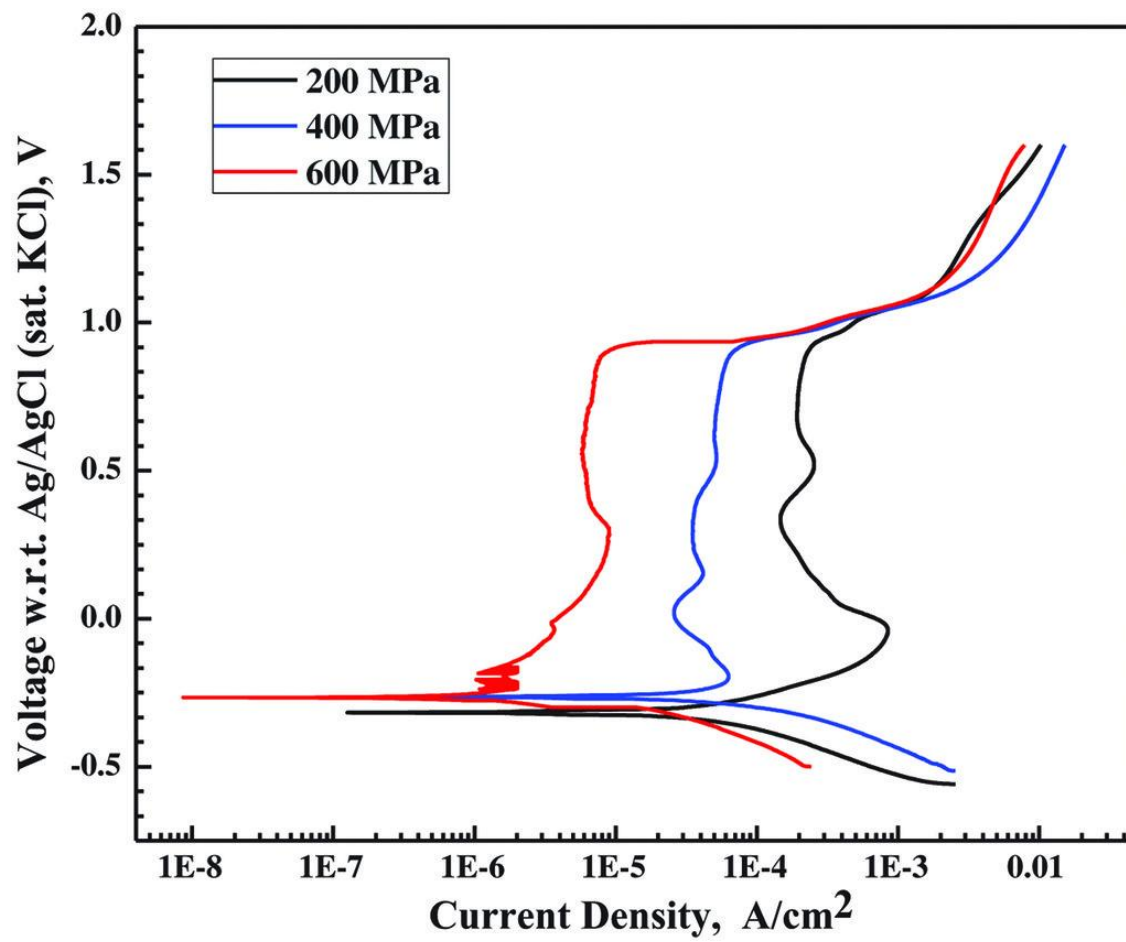


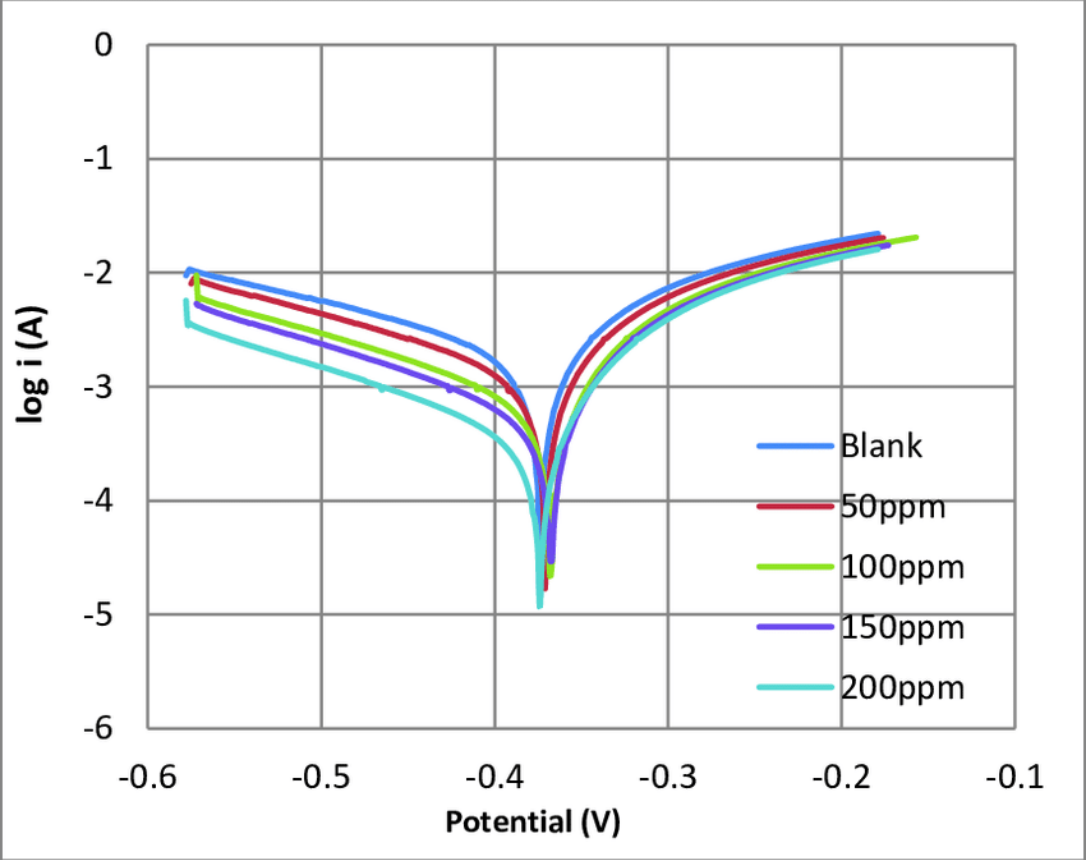




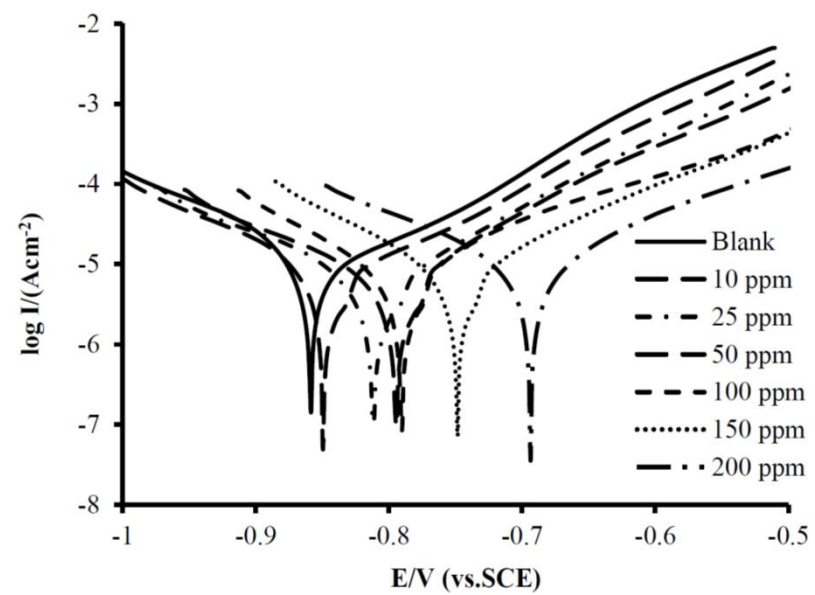




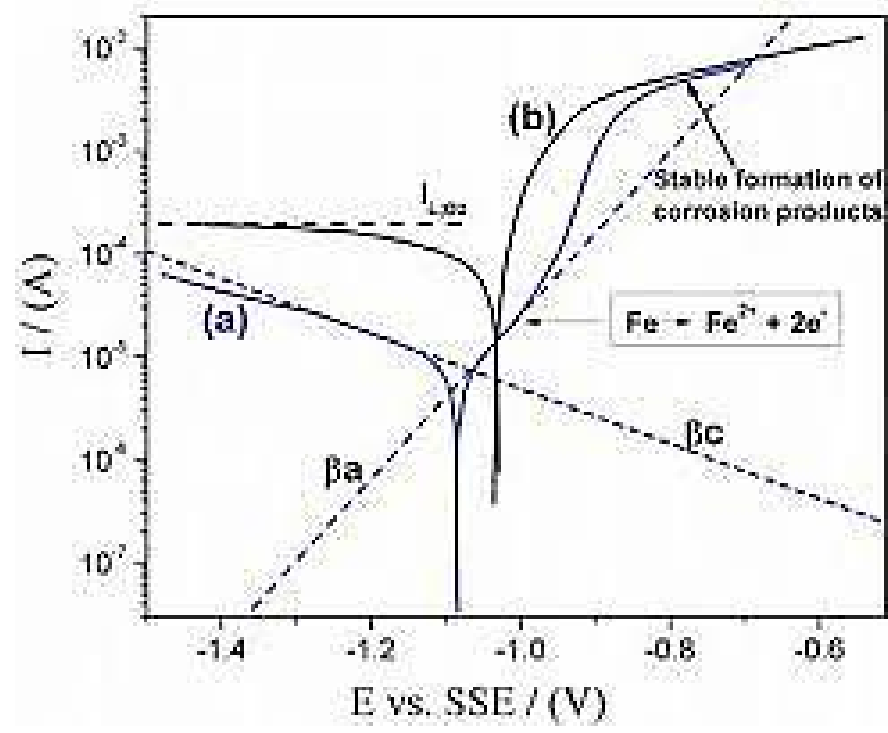








شکل ۲- نمودارهای پلاریزاسیون تاغل فولاد A105 در آب دریا در شرایط بدون بازدارنده و در حضور غلظت‌های مختلف بازدارنده DEG



$R_p$   
( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )

$\beta_c$   
( $\text{v} \cdot \text{dec}^{-1}$ )

$\beta_a$   
( $\text{v} \cdot \text{dec}^{-1}$ )

$I_{\text{corr}}$   
( $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ )

$E_{\text{corr}}$   
( $\text{V}_{\text{vs,SC}}$   
E)

**معادله تافل** ( Tafel equation ) ارتباط بین یک واکنش الکتروشیمیایی با **اورپتانسیل** را نشان می‌دهد. این معادله ابتدا به صورت تجربی بدست آمده و سپس از لحاظ نظری اثبات شد. معادله تافل به نام شیمی‌دان آلمانی **ژولیوس تافل** نامگذاری شده‌است.

معادله تافل برای تک‌الکتروود به صورت زیر بیان می‌شود:

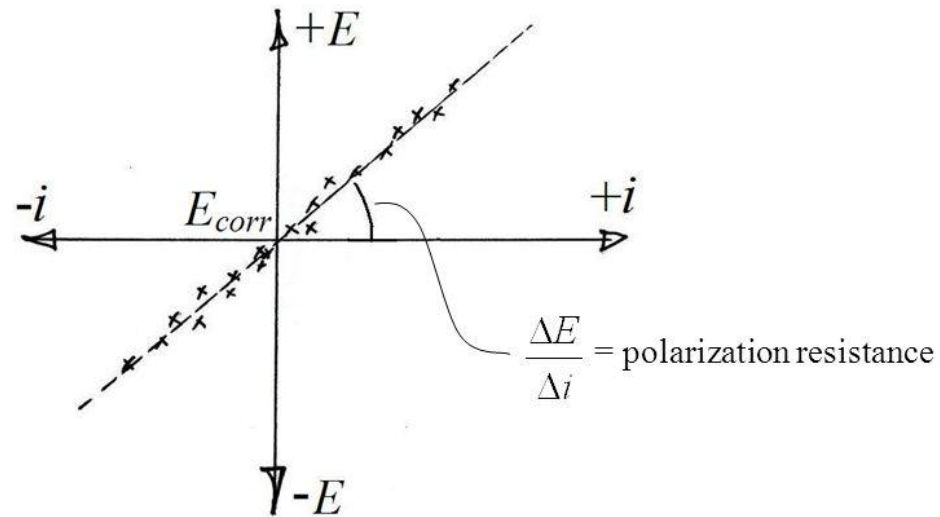
$$\Delta V = A \times \ln \left( \frac{i}{i_0} \right)$$

که در آن  $\Delta V$  اورپتانسیل (V)،  $A$  شیب تافل (V)،  $i$  دانسیته جریان ( $A/m^2$ ) و  $i_0$  دانسیته جریان تبادل ( $A/m^2$ ) است.

خوردگی خیلی کم عملی بوده و می تواند بطور دائم برای کنترل سرعت خوردگی یک سیستم در حین کار بکار رود (بدست آوردن یک منحنی پولاریزاسیون ۱۰ دقیقه یا کمتر طول می کشد). اگرچه این روش خیلی سریع و دقیق است، ولی محدودیتهای زیادی را بایستی تا جریانهای بیشتری ادامه داد. در بسیاری سیستمها این کار امکانپذیر نیست زیرا با پولاریزاسیون غلظتی و اثرات مختلف دیگر تداخل خواهد نمود. <sup>(۲)</sup> بعلاوه، این روش تنها در سیستمهایی که حاوی یک واکنش احیاء می باشند قابل استفاده است. در صورتیکه بیش از یک واکنش احیاء وجود داشته باشد، منطقه تافل نامشخص خواهد شد. بطور خلاصه، روش تافل خیلی مفید است و در بعضی شرایط برای اندازه گیری سریع سرعت خوردگی می تواند بکار رود.

## linear polarization resistance corrosion test

Remember: during linear polarization measurements we plot  $E$  vs  $i$  (**not**  $\log i$ ) around the corrosion potential:



## Polarization Resistance, $R_p$

- This electrochemical technique enables the measurement of the instantaneous corrosion rate. It quantifies the amount of metal per unit of area being corroding in a particular instant.
- The method is based on the observation of the linearity of the polarization curves near the potential ( $E_{corr}$ ). The slope expresses the value of the polarization resistance ( $R_p$ ) if the increment is close to zero.
- This  $R_p$  value is related to the corrosion current ( $I_{corr}$ ) by means of the expression:

$$R_p = \left( \frac{\Delta E}{\Delta I} \right)_{\Delta E \rightarrow 0} \quad i_{corr} = \frac{1}{R_p} \frac{BaBc}{2.303(Ba + Bc)}$$

-  $Ba$  and  $Bc$  are the Tafel Slopes and are approximated to both be .1 V

Where  $A$  is the area of metal surface evenly polarized and  $B$  is a constant that may vary from 13 to 52 mV. For steel embedded in concrete, the best fit with parallel gravimetric losses results in  $B = 26$  mV for actively corroding steel, and a value of  $B = 52$  mV, when the steel is passivated.

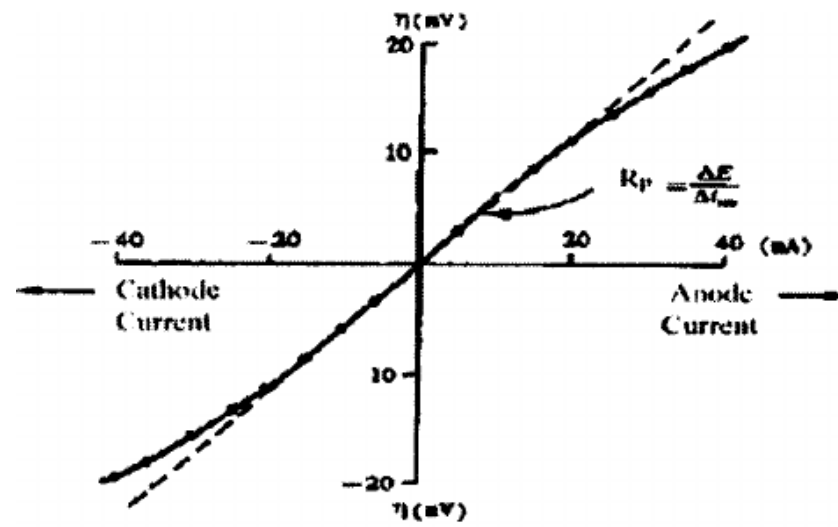
$$I_{corr} = \frac{B}{R_p \cdot A}$$

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303 I_{\text{corr}} (\beta_a + \beta_c)}$$

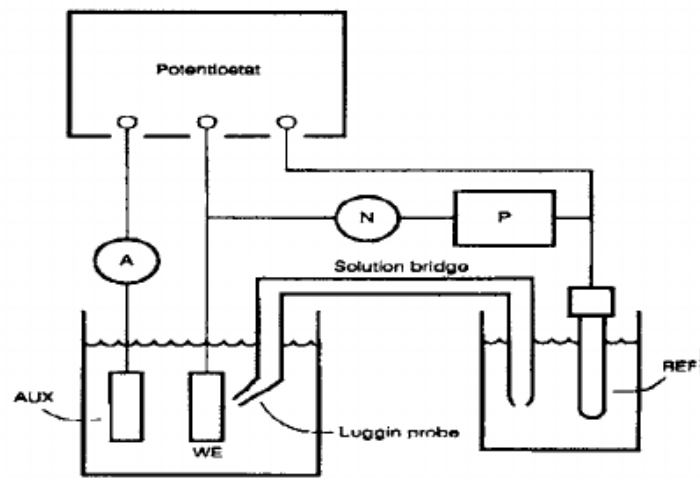
Rearranging of above equation, we get

$$I_{\text{corr}} = \frac{1}{2.303 R_p} \left( \frac{\beta_a \beta_c}{\beta_a + \beta_c} \right)$$





(a)



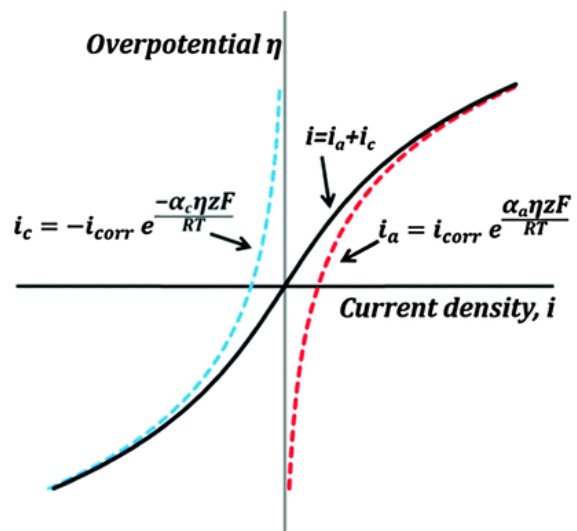
(b)

These are two different electrochemical techniques to measure the corrosion rate and investigate the corrosion behavior of a desired working electrode.

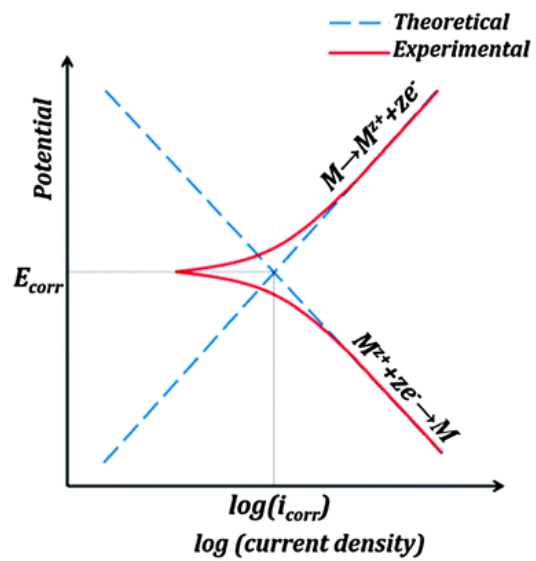
1- in LPR ( Linear polarization resistance)you need to polarize the working electrode **from -20 mV to +20 mV with respect to the OCP** (open circuit potential or equilibrium potential) but in Potentiodynamic Polarization resistance(PPR) method you need to polarize the working electrode **from about -250 mV up to +250 mV with respect to the OCP.**

2- in LPR you need to measure the slope of the **E-I curve** in order to get polarization resistance and then by using the Stern-Geary equation you can get the **corrosion current density** but in potentiodynamic polarization method you can find **the corrosion current on the curve of E-Log i**

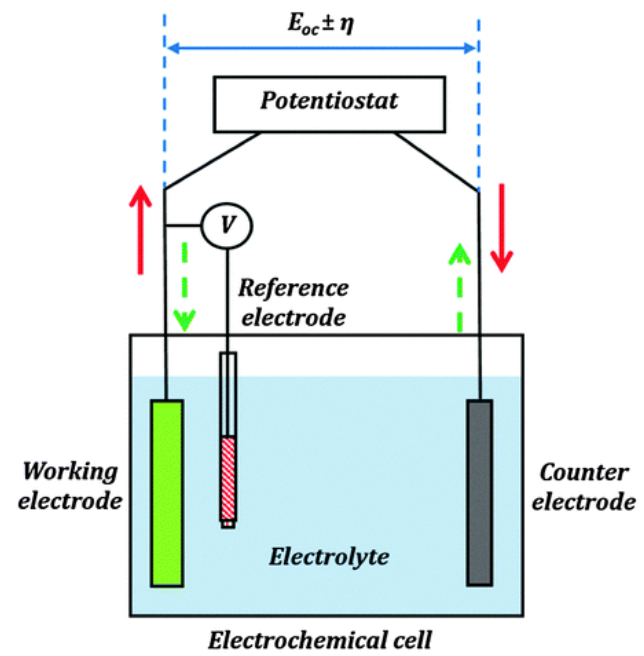
3-The LPR has minimal sample damage while the PPR has higher damage to sample.



(a)



(b)



(c)

## Instrument and Electrodes



Figure 13: OrigaFlex OGF500

### Electrode setup

Reference Electrode (REF)	Calomel Type: OGR003
Counter Electrode (AUX)	Platinum wire $\varnothing$ 1mm Type: OGV005
Working Electrode (WRK)	Iron Nail
Electrolyte	NaCl 2M
Instrument	OrigaFlex OGF500
Software	OrigaMaster



Figure 14: Electrochemical cell

**REF**  
*Calomel*



**AUX**  
*Platinum wire Ø1 mm*

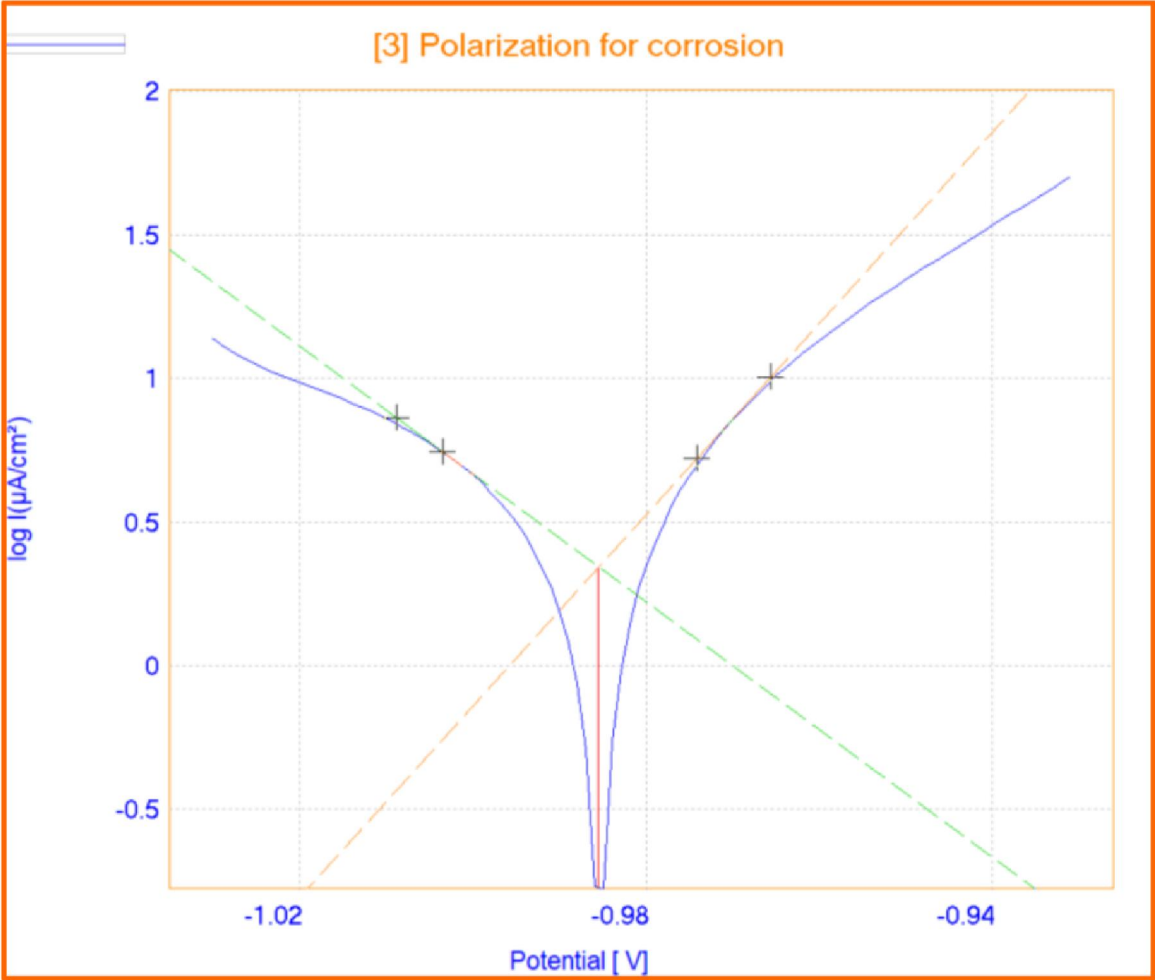


**WRK**  
*Iron Nail*











The Parameter of the Polarization test is shown in figure 1.

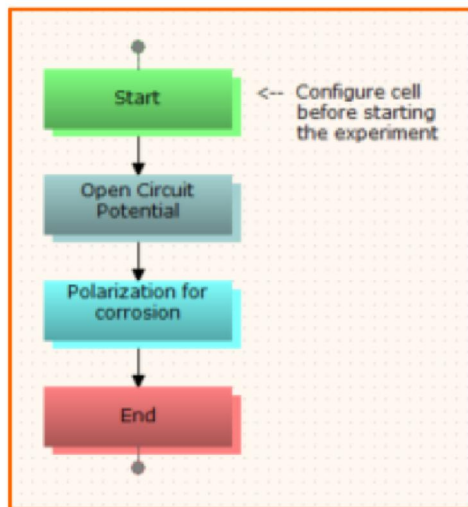
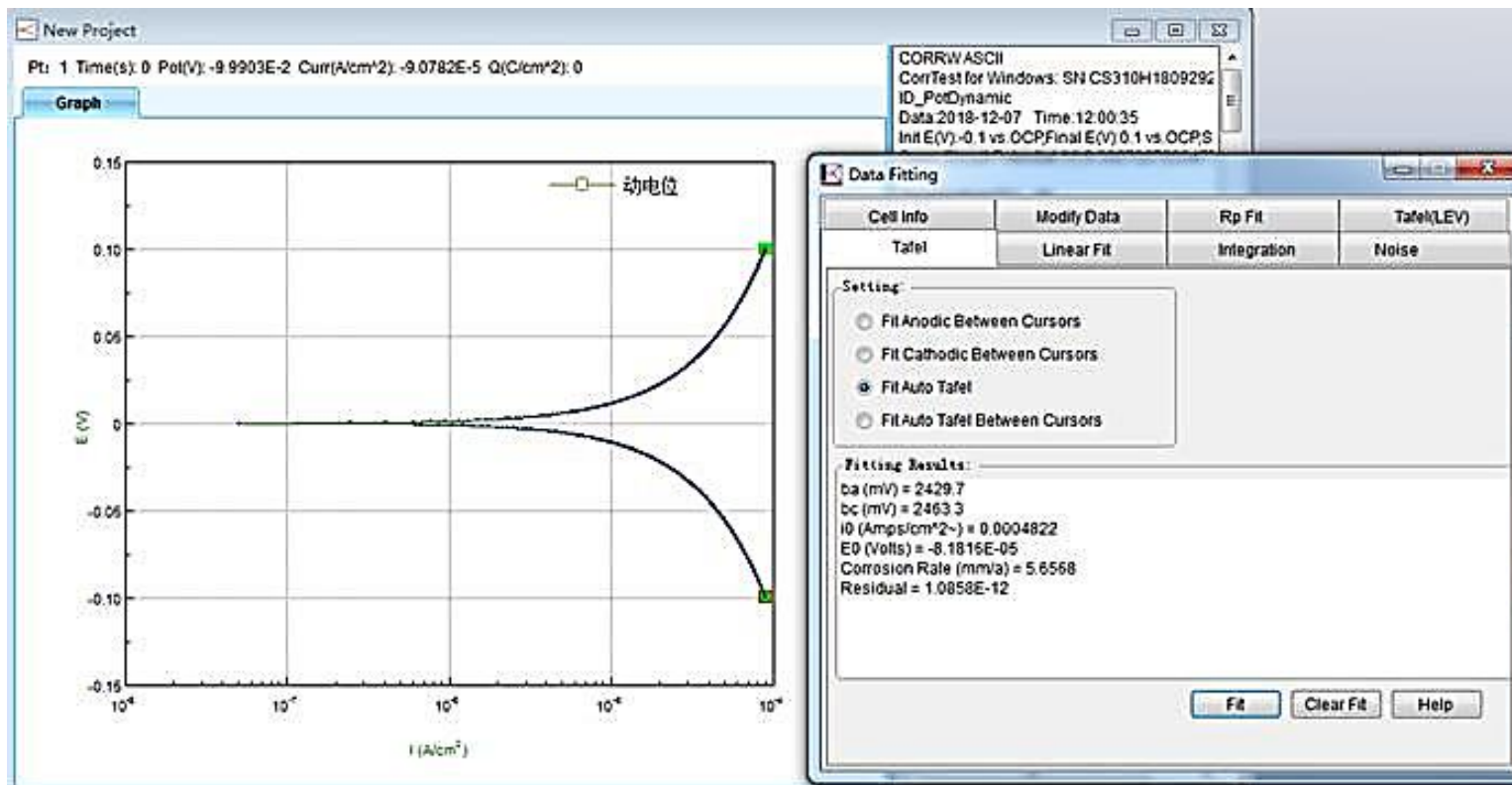


Figure 1: The sequence

Properties	
Display all Details Graph	
<b>Polarization for corrosion</b>	
Waiting time (sec.)	20
Stabilisation time (sec.)	4
Scan rate (mV/sec.)	0.1666
Initial potential (mV)	free
⊕ Potential 1 (mV)	-50, FREE
⊕ Potential 2 (mV)	50, FREE
Maximum range	Auto
Minimum range	Auto
Analog Filter	Auto
Open circuit at end	Yes

Figure 2: The parameters



## **تکلیف جلسه سوم**

- بررسی الکترودهای مرجع

- کشیدن نمودار در فایل اکسل و بررسی خروجی و تحلیل

این نمودار شامل بررسی خوردگی فولاد در حضور بازدارنده و عدم حضور بازدارنده در محیط اسیدی است.

# جلسه چهارم

تست امپدانس الکتروشیمیایی

# آزمون امپدانس الکتروشیمیایی

## طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

یکی از روش‌های بررسی سرعت خوردگی است. اساس کار این روش اندازه‌گیری امپدانس جریان متناوب در دامنه‌ای از فرکانس است.

در این روش پتانسیل کوچکی به صورت متغیر با زمان به نمونه اعمال شده و جریان اندازه‌گیری شده و امپدانس سیستم و زاویه فاز امپدانس تعیین می‌شود.

واربورگ اولین کسی بود که مفهوم امپدانس را به سیستم‌های الکتروشیمیایی توسعه داد. اما Epelboin و همکارانشان برای اولین بار در دهه ۱۹۶۰ میلادی آنالیز سیستم دینامیک مدرن را معرفی کردند. مانسفلد و کندیگ اولین کسانی بودند که اصطلاح «طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی» را در مقاله خود بکار بردند.

# آزمون امپدانس الکتروشیمیایی

از کاربردهای طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

تعیین سرعت خوردگی

بررسی پوشش‌ها و ممانعت‌کننده‌ها

و بررسی لایه پسیو

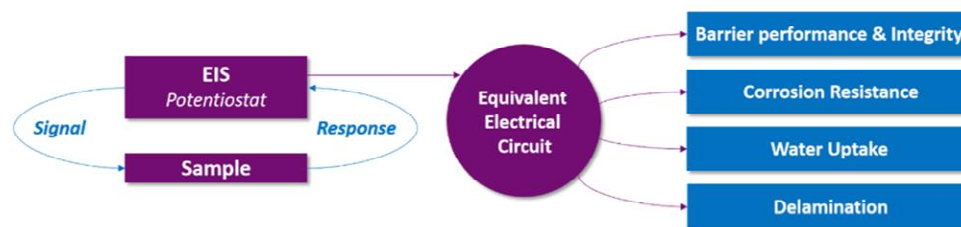
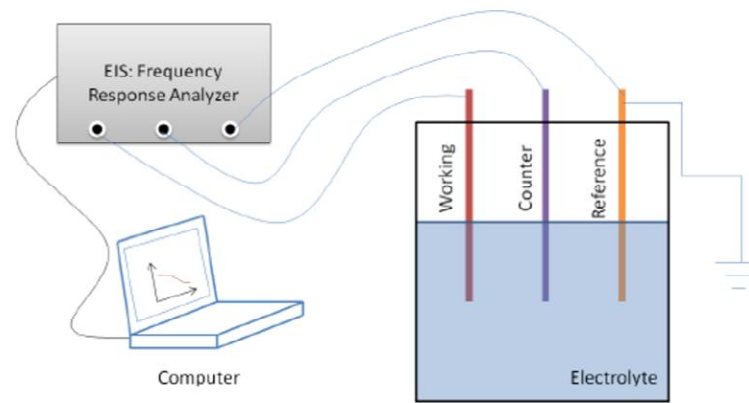
این تکنیک الکتروشیمیایی غیر مخرب بوده است.

# آزمون امپدانس الکتروشیمیایی

در این روش، پتانسیل اعمال شده به سیستم با مدولاسیون یک موج سینوسی کوچک، دچار اختلال شده و پاسخ به صورت جریان سینوسی بر حسب تابعی از فرکانس مدولاسیون اندازه گیری می شود. امپدانس به صورت نسبت ولتاژ به جریان سیگنال تعریف می شود.

تفسیر طیف امپدانس با استفاده از مدارهای معادل انجام می شوند. اجزای سلول و سطوح تماس به صورت مولفه های الکتریکی مانند مقاومت ها و خازن ها نمایش داده می شوند. با تطابق طیف امپدانس اندازه گیری شده، با مدار معادل می توان مقادیر عددی پارامترهایی مانند مقاومت اجزای سلول، خازن های تشکیل شده روی مرزها و امپدانس در الکترولیت را به دست آورد.

## ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY





## **ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY.**

### **Advantages.**

1. *Useful on high resistance materials such as paints and coatings.*
2. *Time dependent data is available.*
3. *Non- destructive.*
4. *Quantitative data available.*
5. *Use service environments.*

### **Disadvantages.**

1. *Expensive.*
2. *Complex data analysis for quantification.*

## Different types of EIS measurements

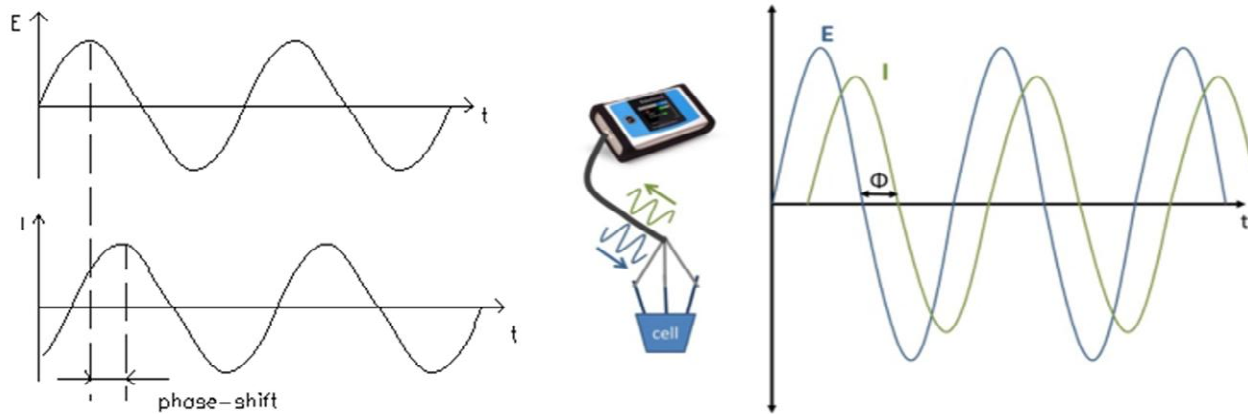
- *Standard EIS (ISO 16773) measures barrier performance and **water uptake** during immersion, and gives relevant results within three weeks. It can be extended for even longer-term testing.*

***ISO 16773:** Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) on **coated and uncoated metallic specimens***

- *Accelerated EIS (ISO 17463) applies electrical stress to promote delamination and speed up corrosion processes. This approach is very useful for barrier performance comparison in only 24 hours.*

***ISO 17463:** **Paints and varnishes**-Guidelines for the determination of anticorrosive properties of **organic coatings** by accelerated cyclic electrochemical technique.*

## Sinusoidal Current Response in a Linear System



The excitation signal, expressed as a function of time, has the form of:

$$E(t) = E_0 \cos(\omega t)$$

$E(t)$  is the potential at time  $t$ ,  $E_0$  is the amplitude of the signal, and  $\omega$  is the radial frequency. The relationship between radial frequency  $\omega$  (expressed in radians/second) and frequency  $f$  (expressed in Hertz (1/sec)).

$$\omega = 2\pi f$$

## AC Circuit Theory and Representation of Complex Impedance Values

Ohm's law defines resistance in terms of the ratio between voltage  $E$  and current  $I$ .

$$R = \frac{E(t)}{I(t)}$$

The relationship is limited to only one circuit element -- the ideal resistor.  
An ideal resistor has several simplifying properties:

## Complex writing

$$\omega = 2\pi f \quad E_t = E_0 \sin(\omega t) \quad I_t = I_0 \sin(\omega t + \phi) \quad Z = \frac{E_t}{I_t} = \frac{E_0 \sin(\omega t)}{I_0 \sin(\omega t + \phi)} = Z_0 \frac{\sin(\omega t)}{\sin(\omega t + \phi)}$$

Using Eulers relationship

$$\exp(j\phi) = \cos\phi + j\sin\phi$$

It is possible to express the impedance as a complex function.

The potential is described as,

$$E_t = E_0 \exp(j\omega t)$$

and the current response as,

$$I_t = I_0 \exp(j\omega t - \phi)$$

The impedance is then represented as a complex number,

$$Z(\omega) = \frac{E}{I} = Z_0 \exp(j\phi) = Z_0 (\cos\phi + j\sin\phi)$$

## Complex writing

$$Z(t) = \frac{E(t)}{I(t)} = \frac{E_0 \cos(\omega t)}{I_0 \cos(\omega t - \phi)} = Z_0 \frac{\cos(\omega t)}{\cos(\omega t - \phi)}$$

Using Eulers relationship  $\exp(i\phi) = \cos \phi + i \sin \phi$

It is possible to express the impedance as a complex function.  
The potential is described as,

$$E(t) = E_0 \exp(j\omega t)$$

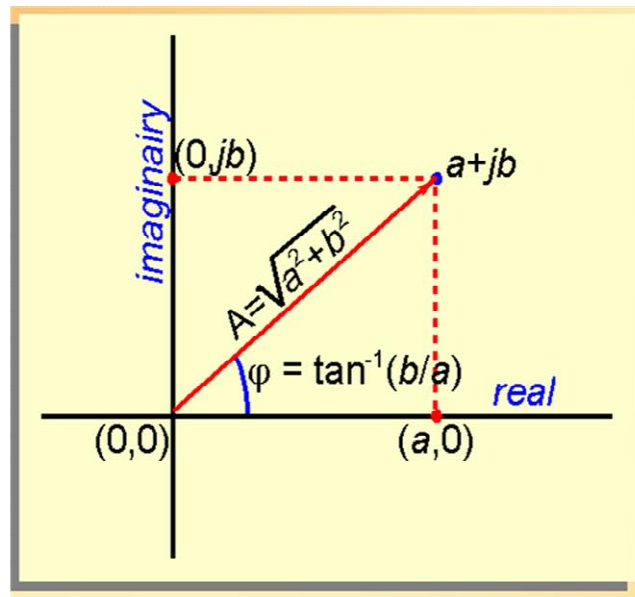
and the current response as,

$$I(t) = I_0 \exp(i\omega t - i\phi)$$

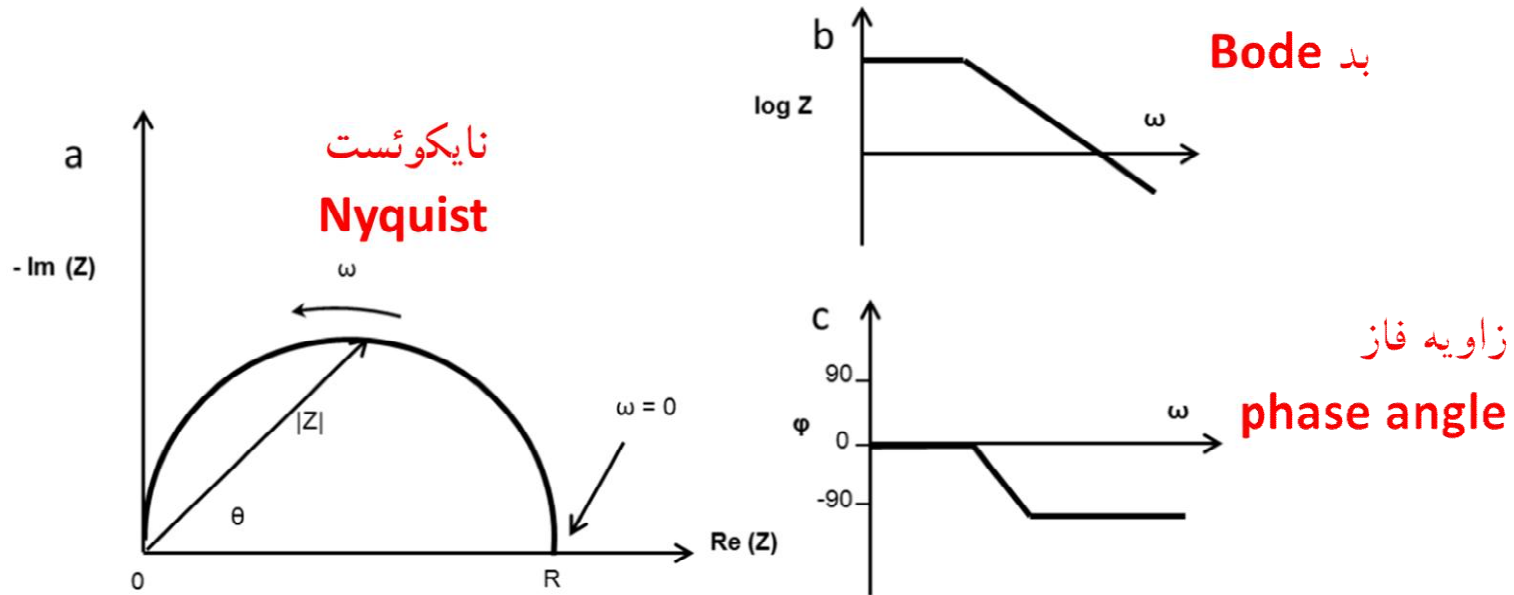
The impedance is then represented as a complex number,

$$Z = \frac{E}{I} = Z_0 \exp(i\phi) = Z_0 (\cos \phi + i \sin \phi)$$

## Impedance Modulus



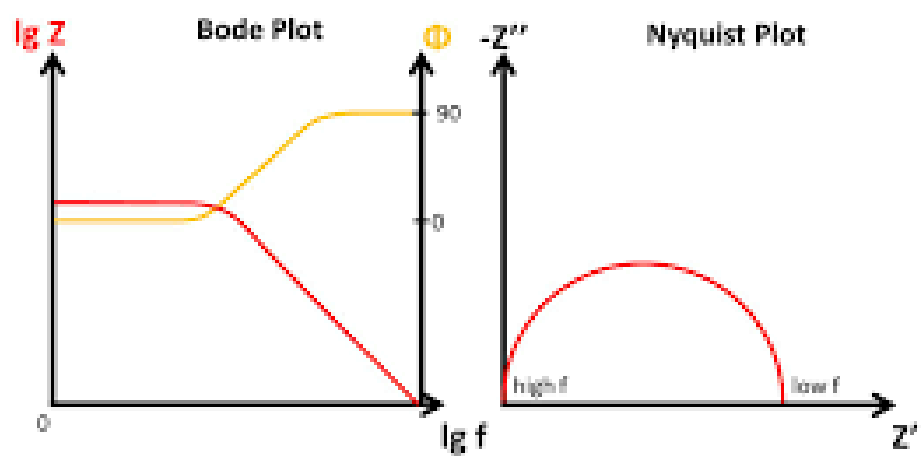
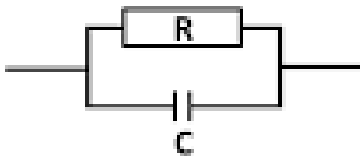
# خروجی آزمون امیدانس الکتروشیمیایی



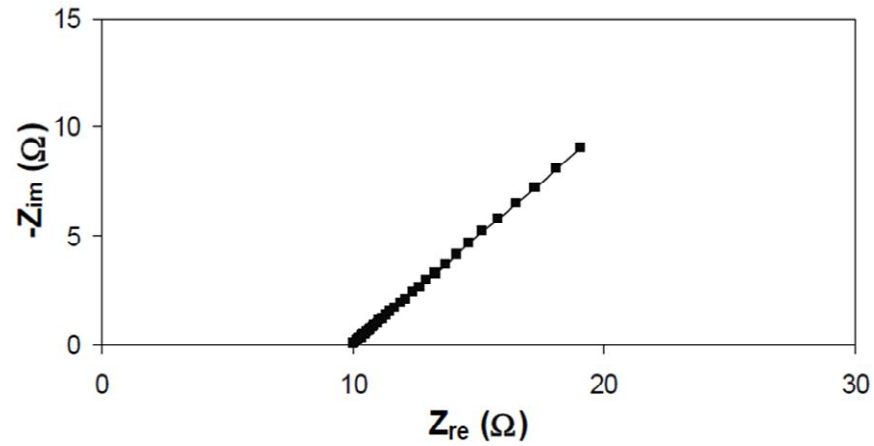
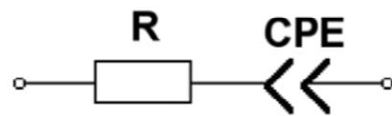


**Table** Parameters of the equivalent circuit elements

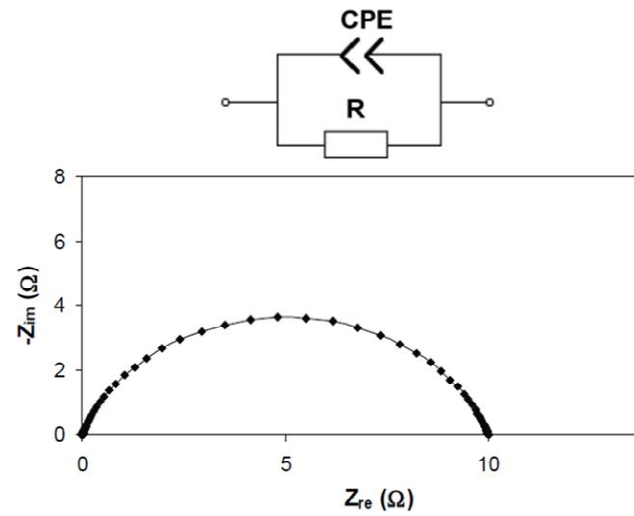
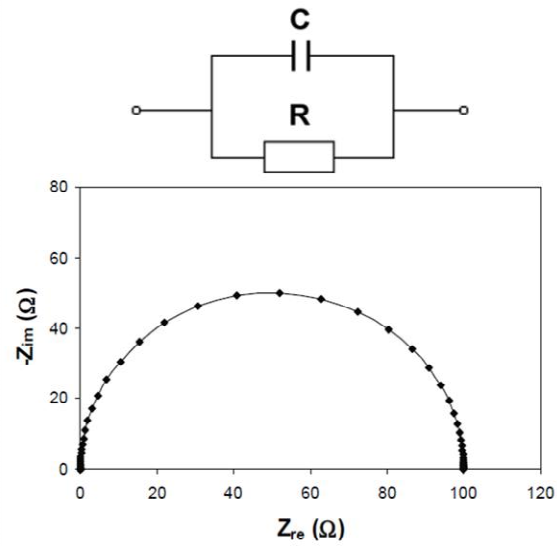
<b>Element</b>	<b>Name</b>	<b>Parameters</b>	<b>Units</b>
R	Resistance	$R$	$\Omega$
C	Capacitance	$C$	$F = \Omega^{-1}s$
L	Inductance	$L$	$H = \Omega s$
W	Warburg element	$\sigma$	$\Omega s^{-1/2}$
BW	Bounded Warburg	$\sigma$	$\Omega s^{-1/2}$
		$R_0$	$\Omega$
CPE	Constant phase element	$q$	$\Omega^{-1}s^n$
		$n$	1



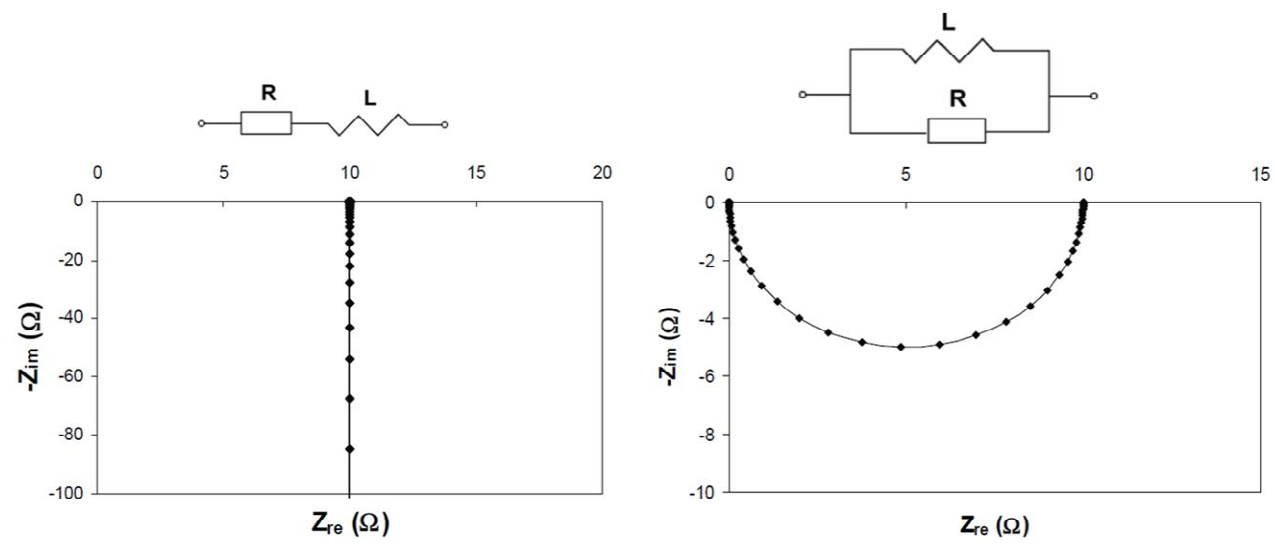
# *Resistance and CPE*



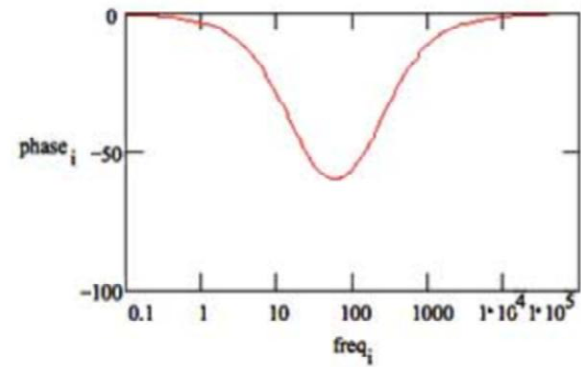
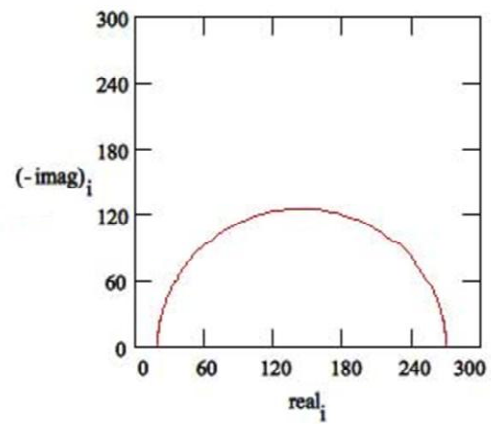
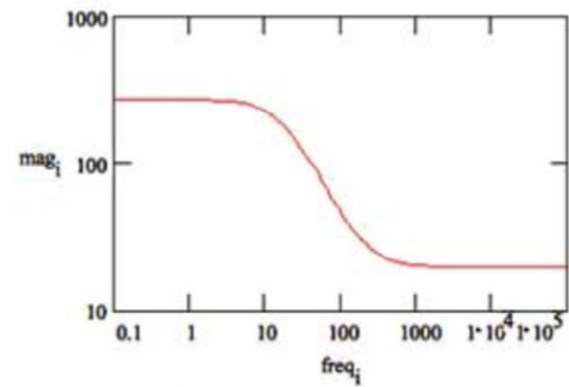
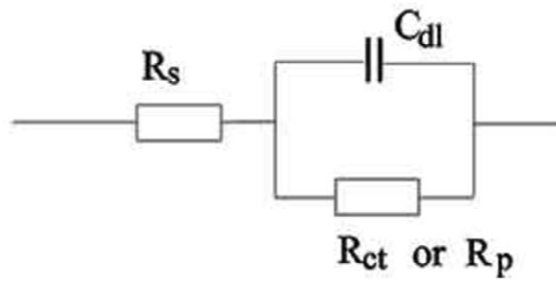
# Resistor and CPE (capacitor) in parallel

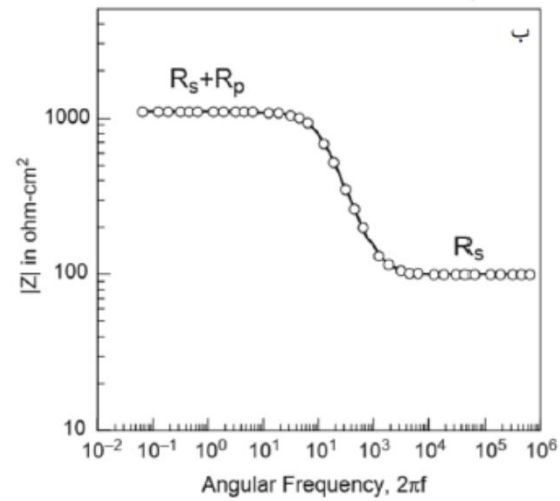
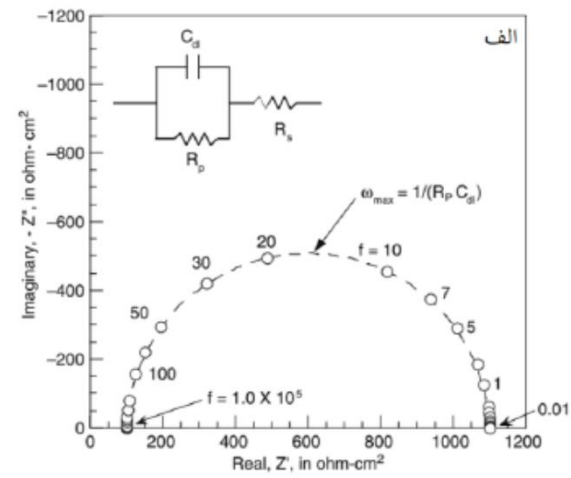


## *RL in Series and RL in Parallel*



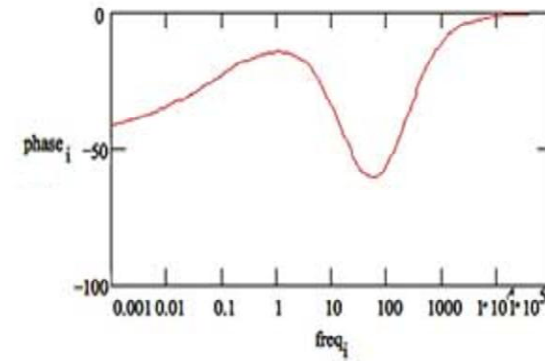
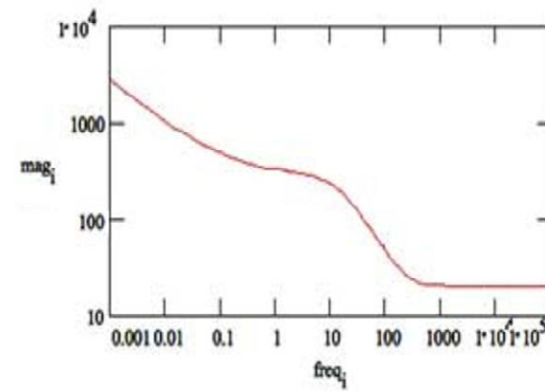
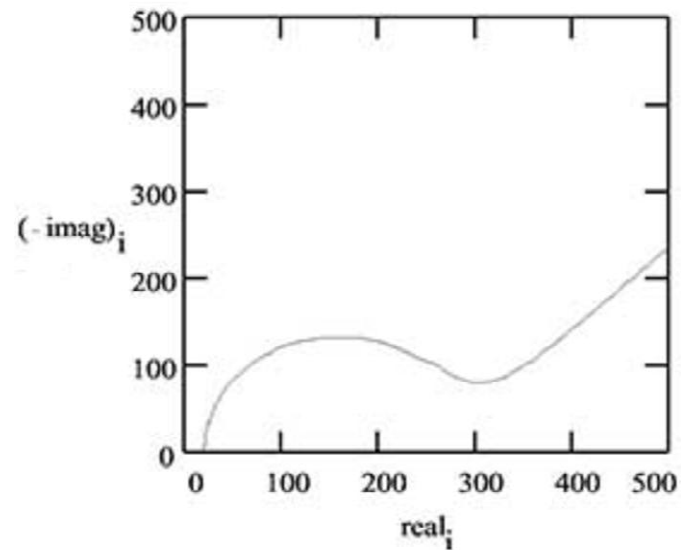
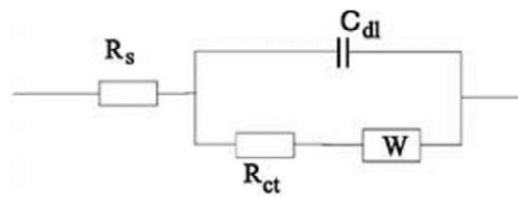
## Randles cell



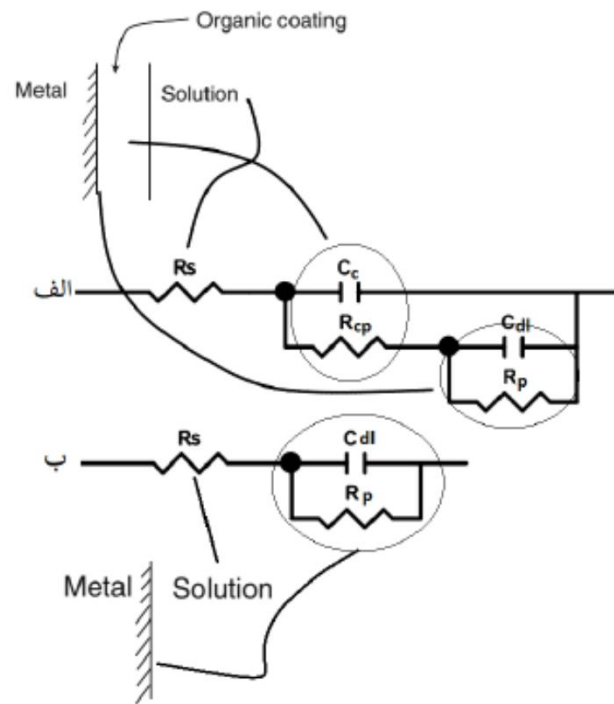


شکل ۴- نمونه ای از نمودارهای نایکوئیست (الف) و نمودار باد معادل آن [2].

## Mixed kinetic and diffusion control

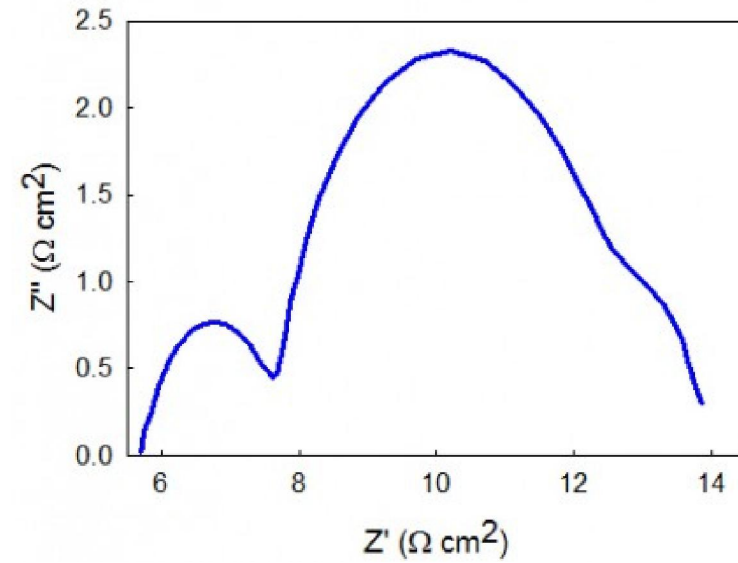
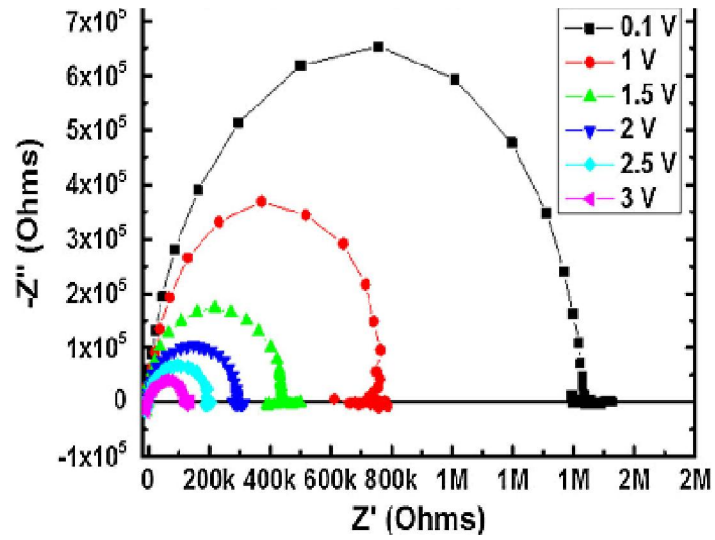






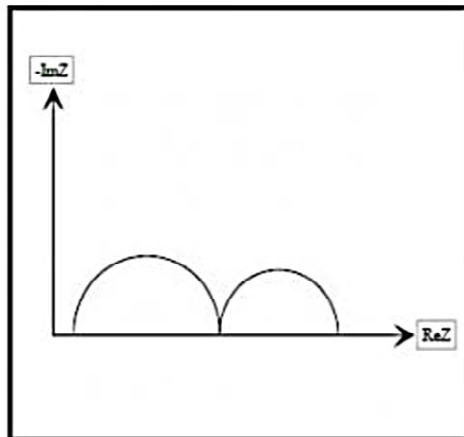
شکل ۳- مدل مدار معادل باتونیر (الف) و مدل مدار معادل ساده شده رندلز (ب). اقتباس از [1,2] و بازترسیم.

# آزمون امپدانس الکتروشیمیایی



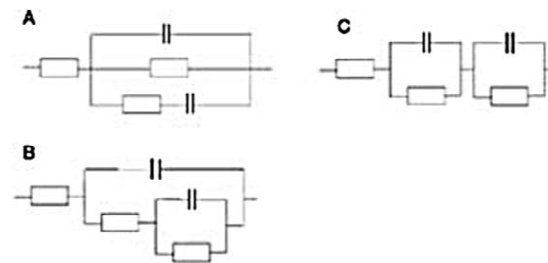
نمودار نایکوئست

## Other circuits



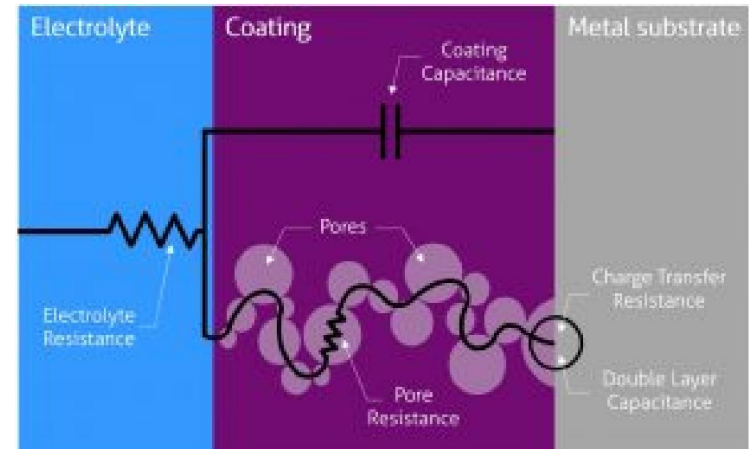
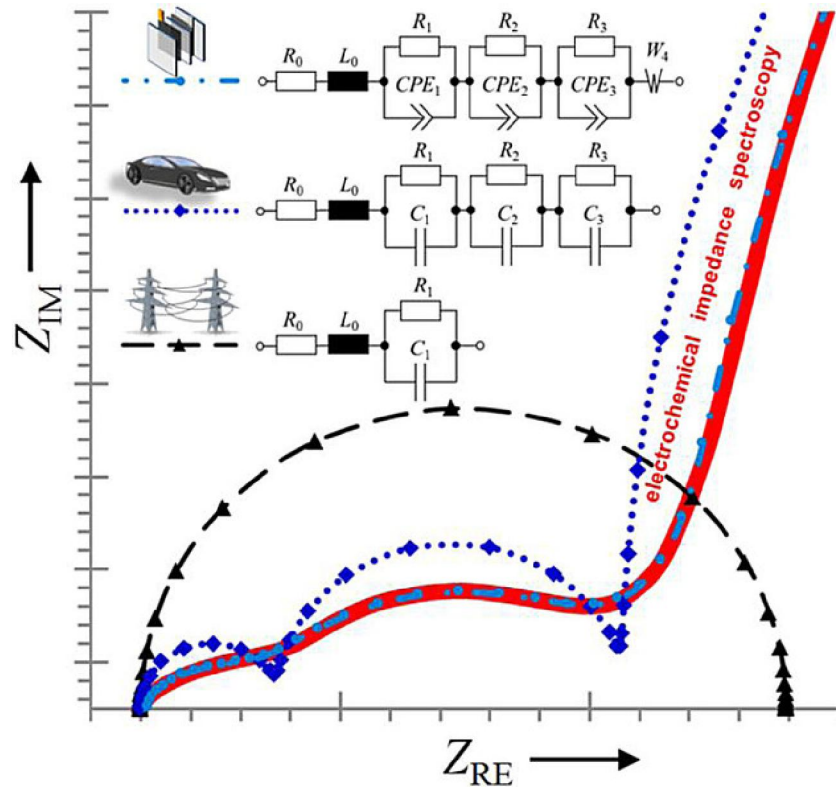
**Figure** Two Time Constant Spectrum

This spectrum can be modeled by any of the equivalent circuits shown



**Figure** Equivalent Circuit Models with Two Time Constants

# آزمون امپدانس الکتروشیمیایی

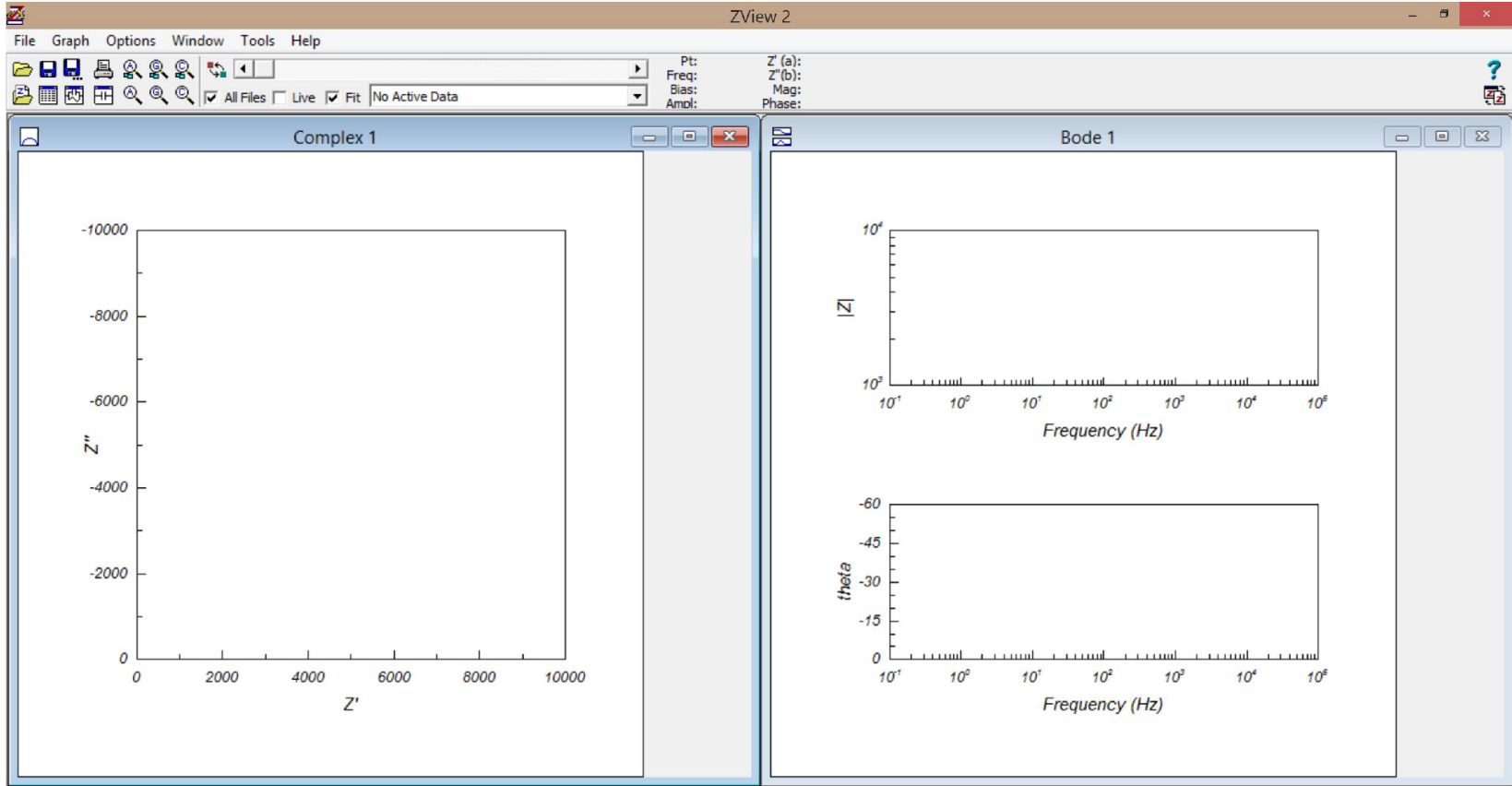


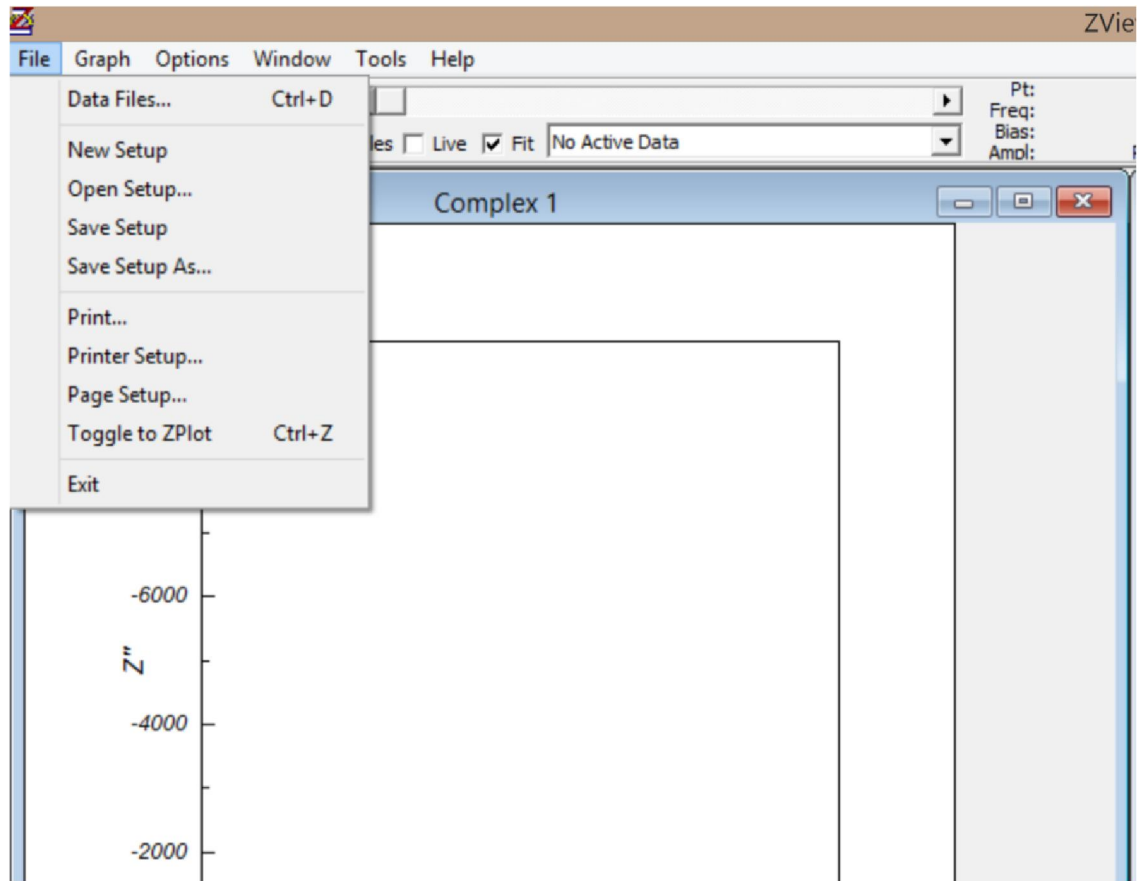
# آزمون امیدانس الکتروشیمیایی

برنامه های مورد استفاده

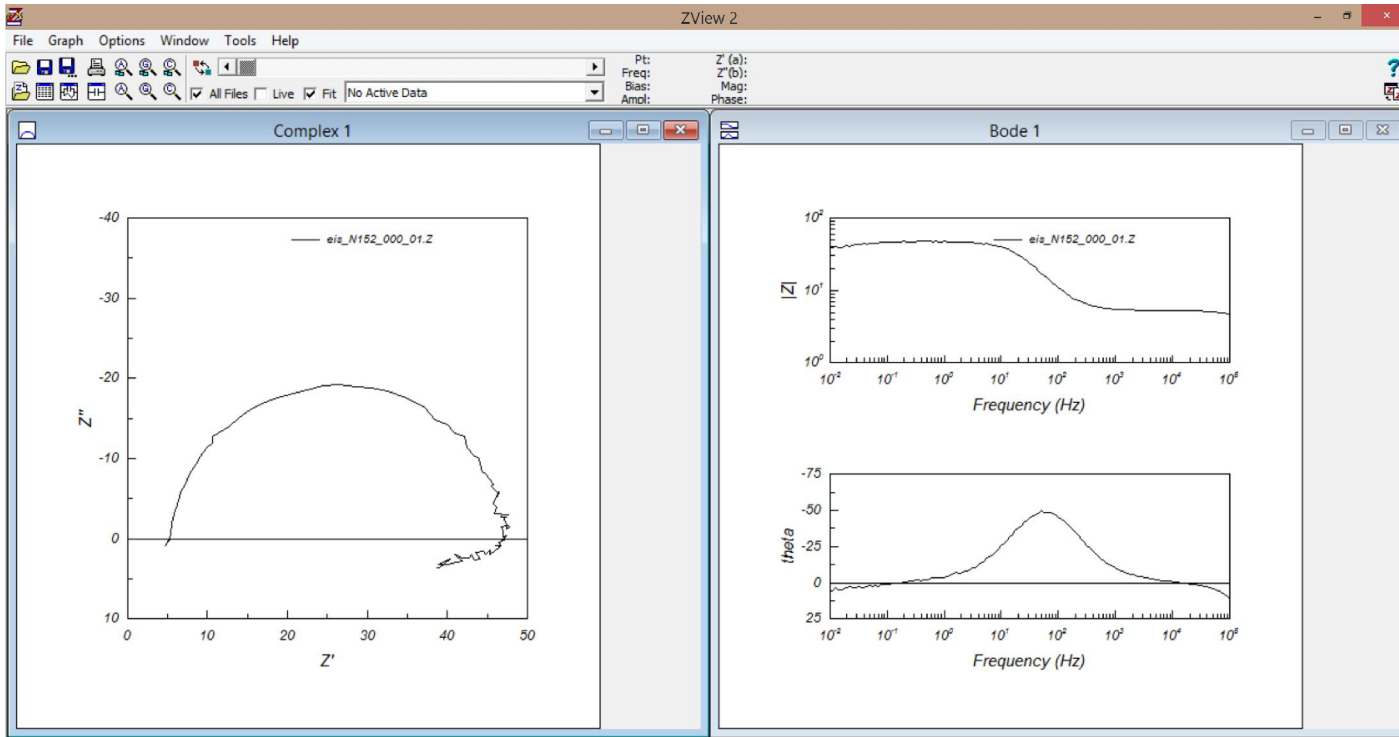
- 1- ZView software (Scribner Associates)
- 2- ZSimpWin software
- 3- Gamry software
- 4-Zfit software

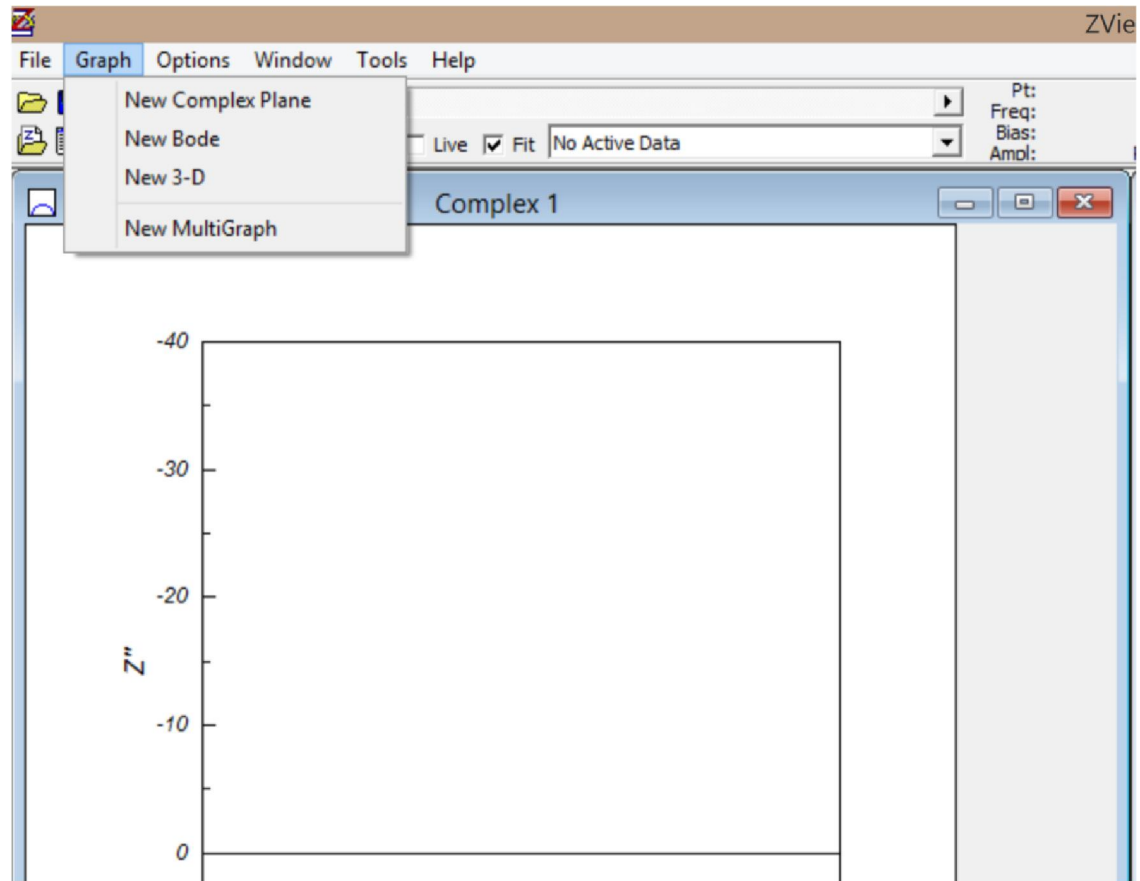
Z-view Software

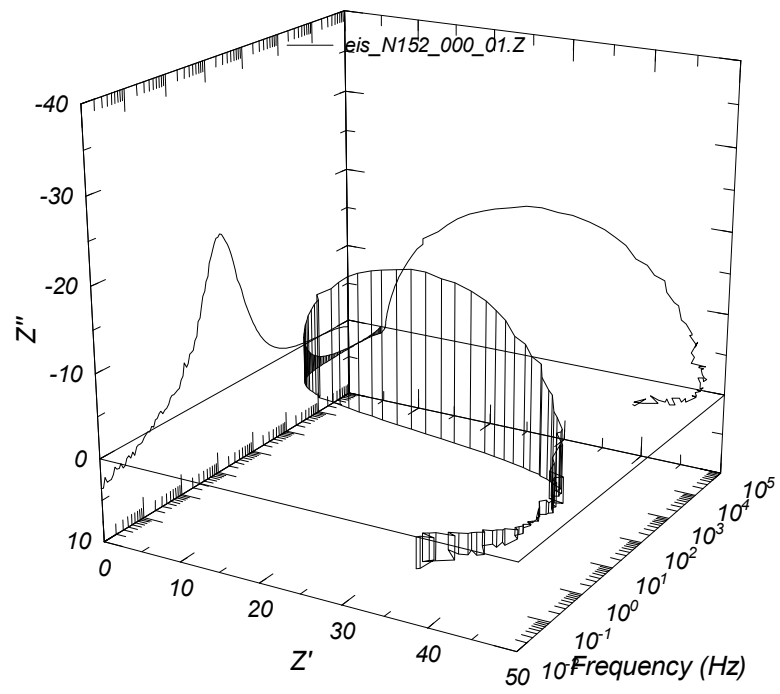


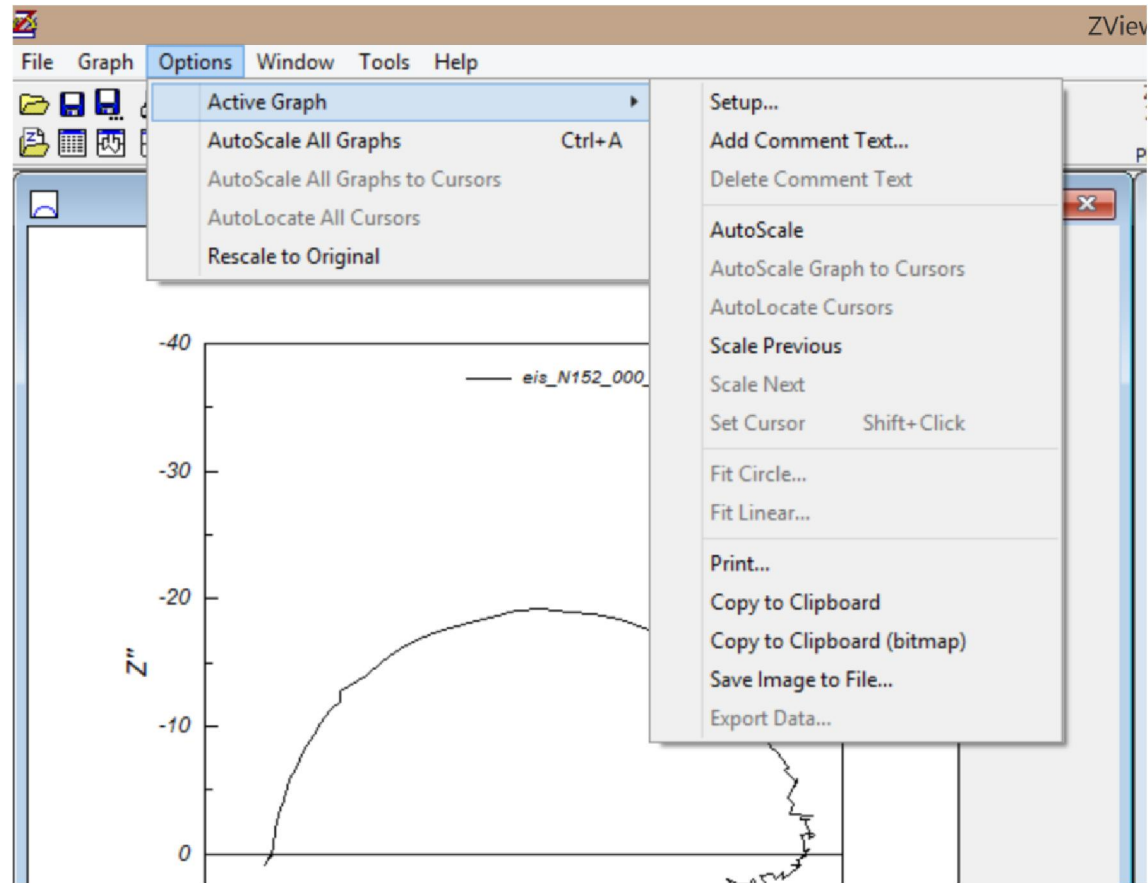


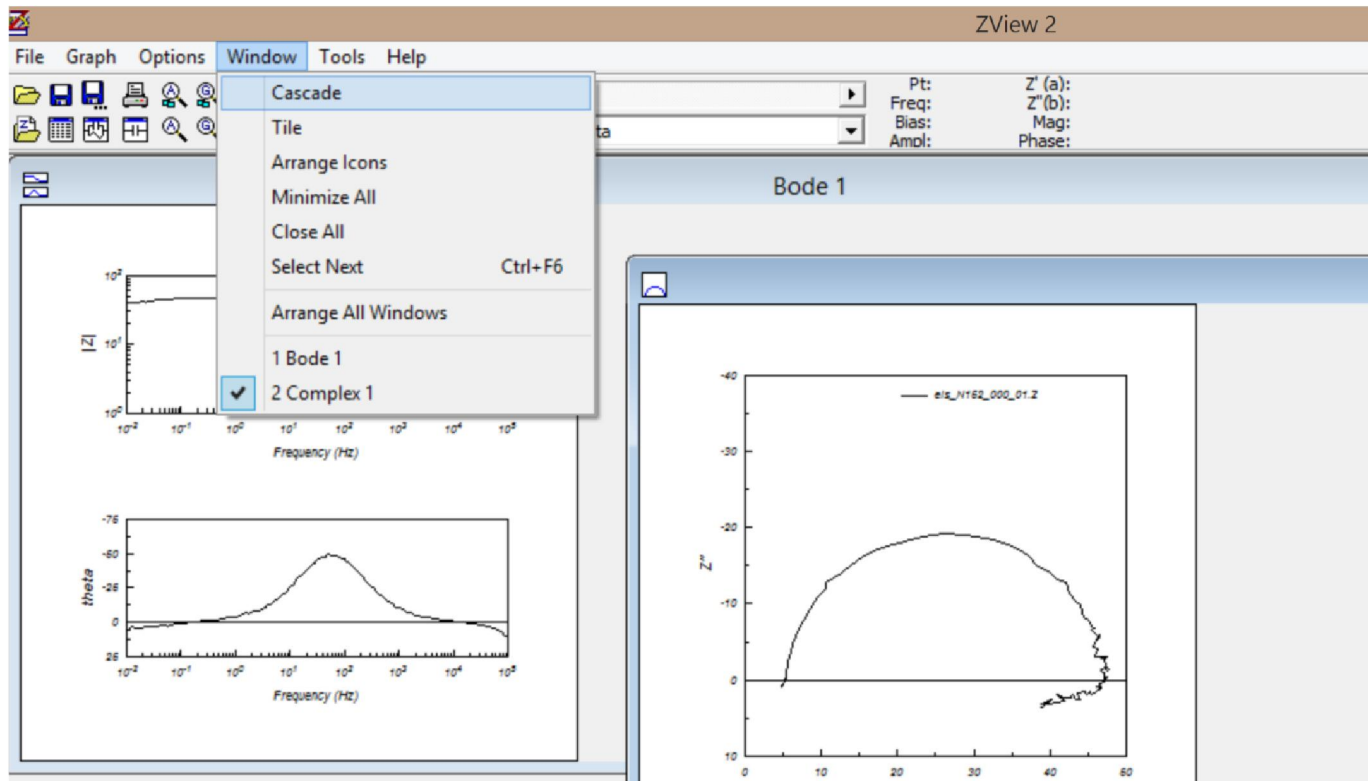


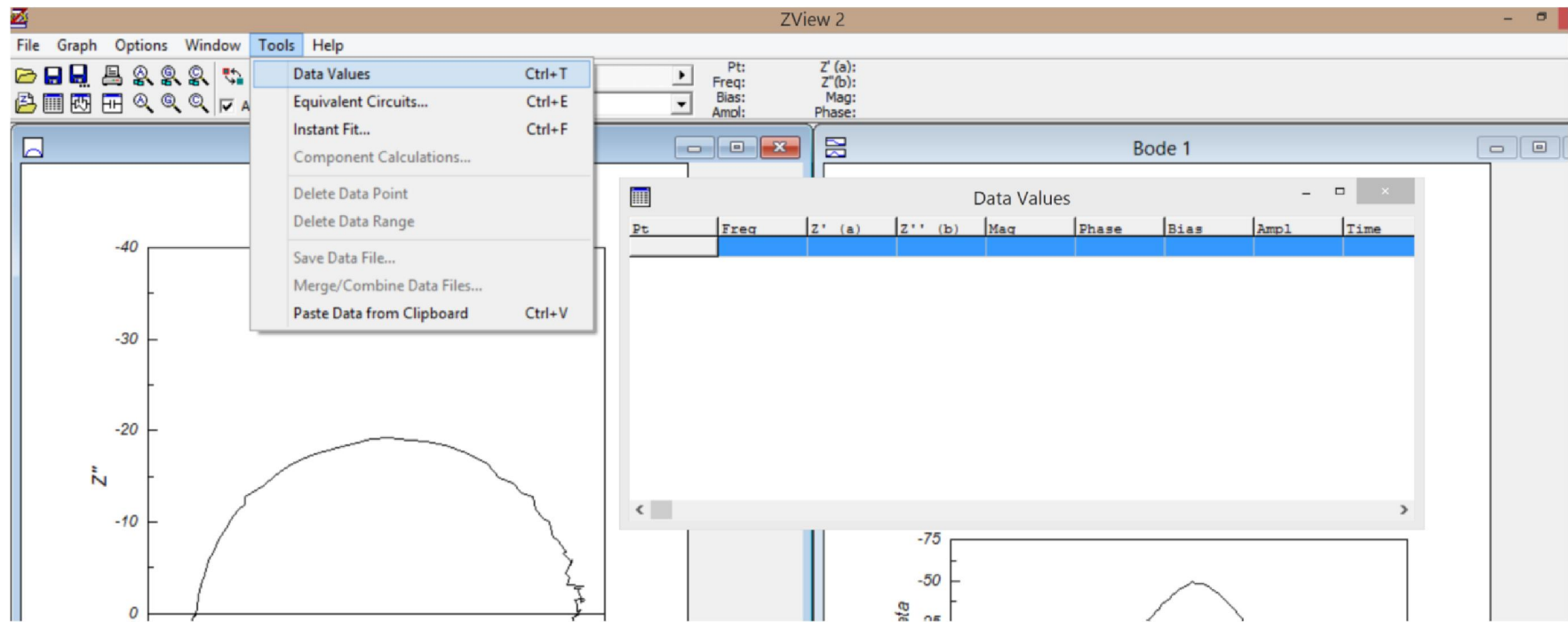


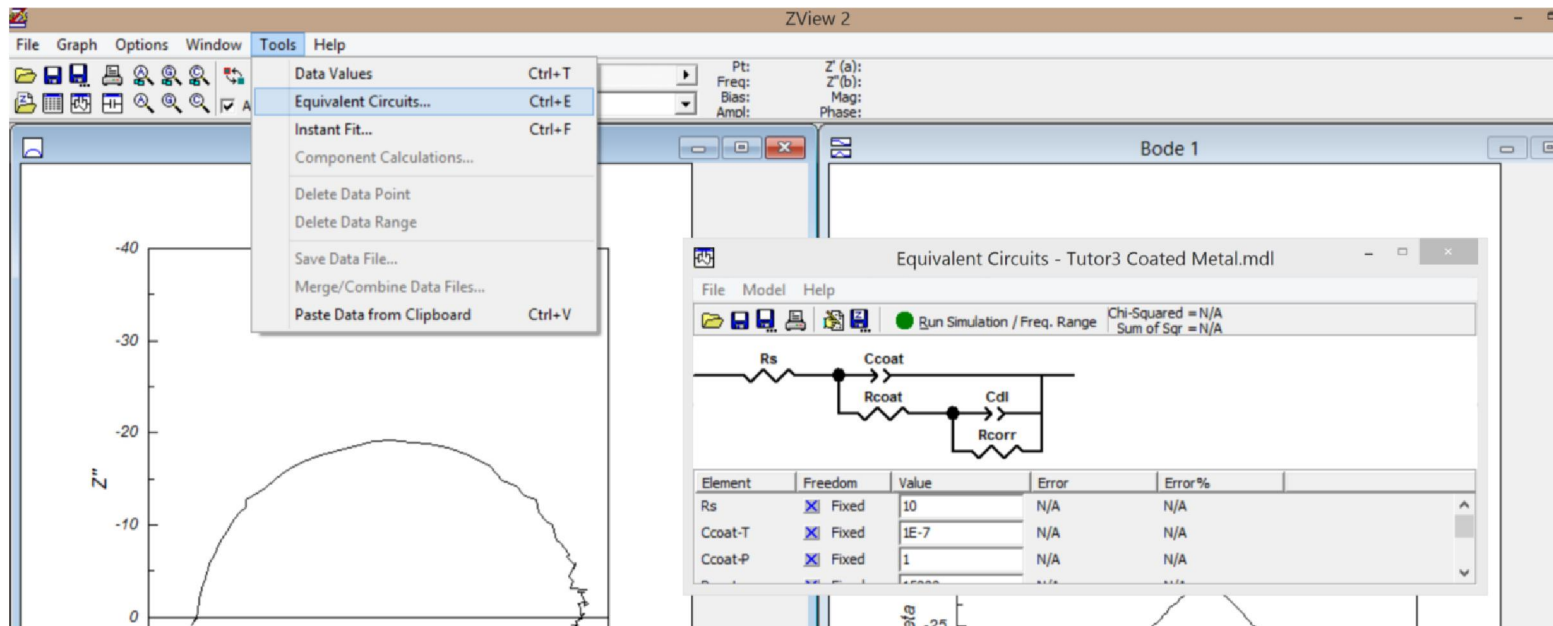


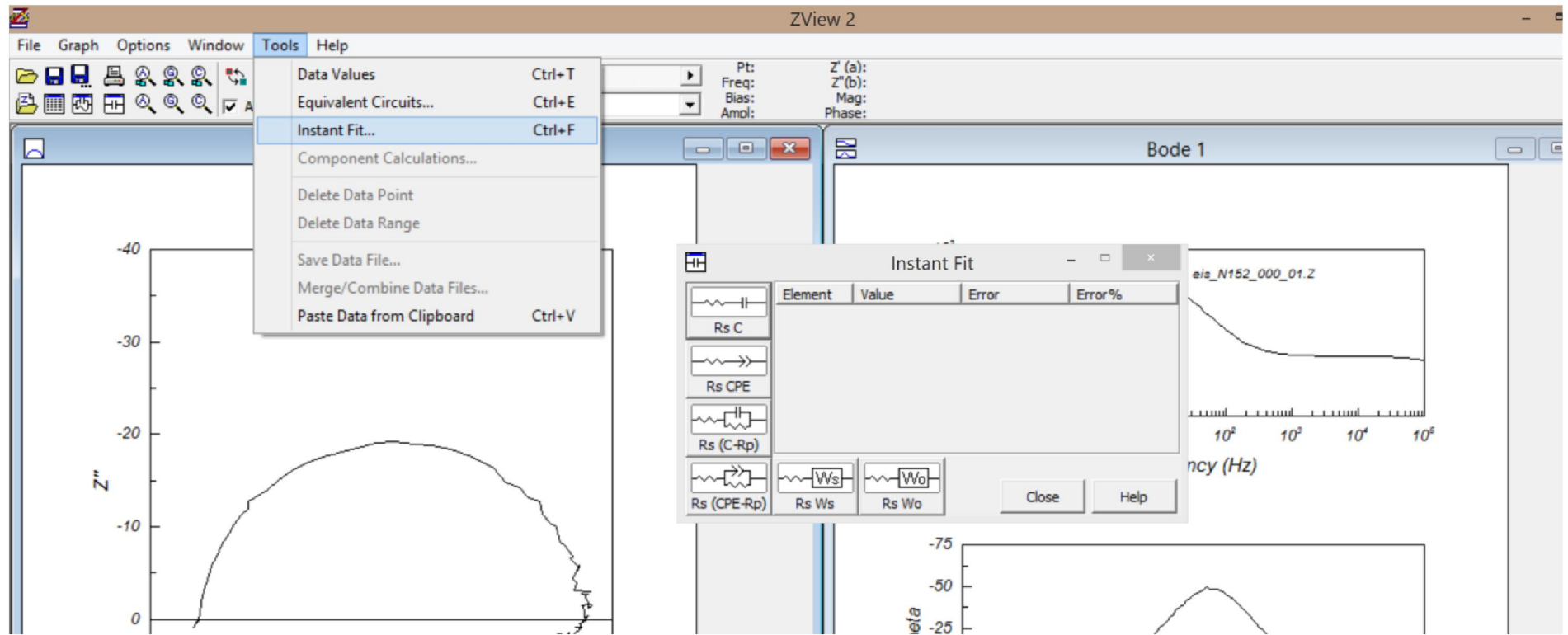




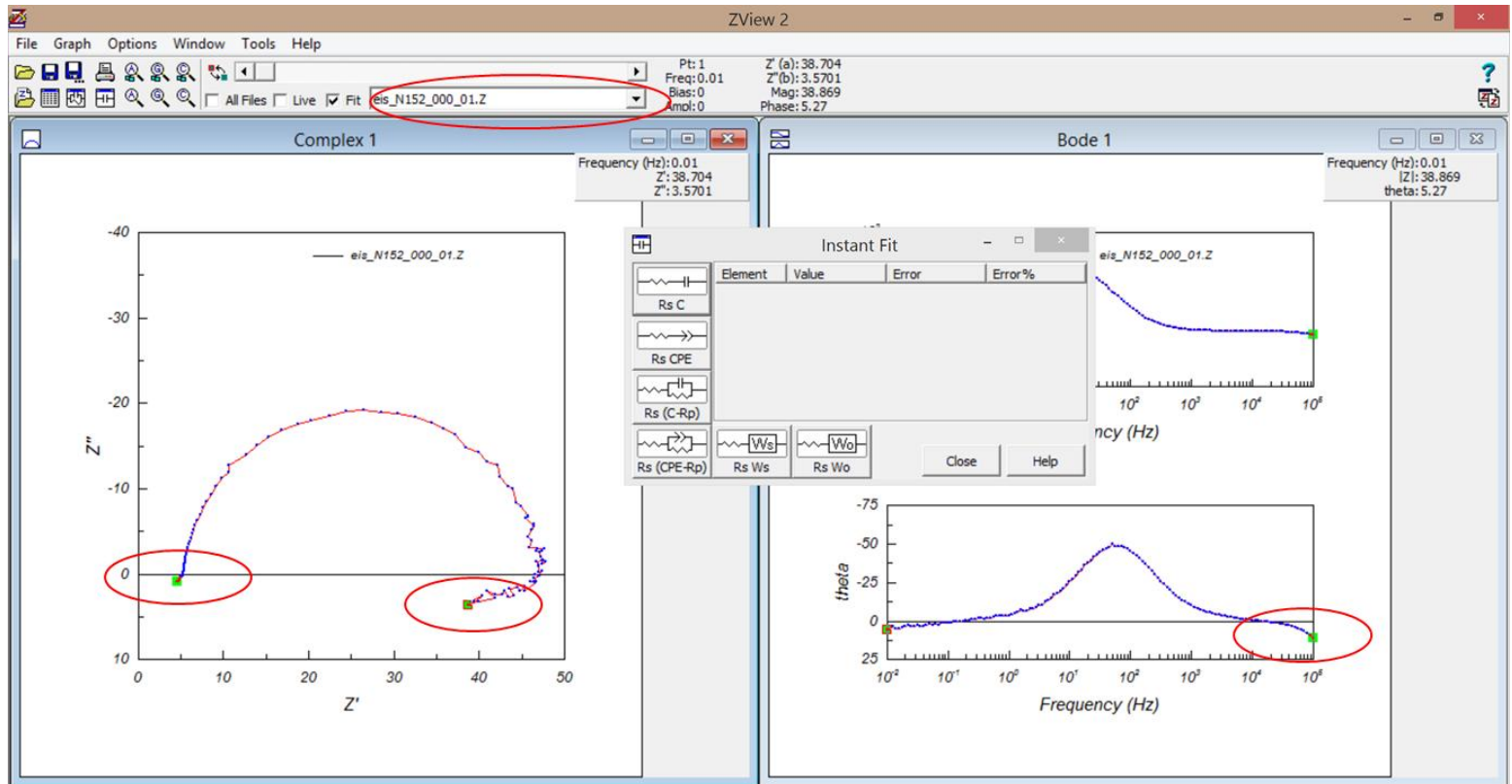


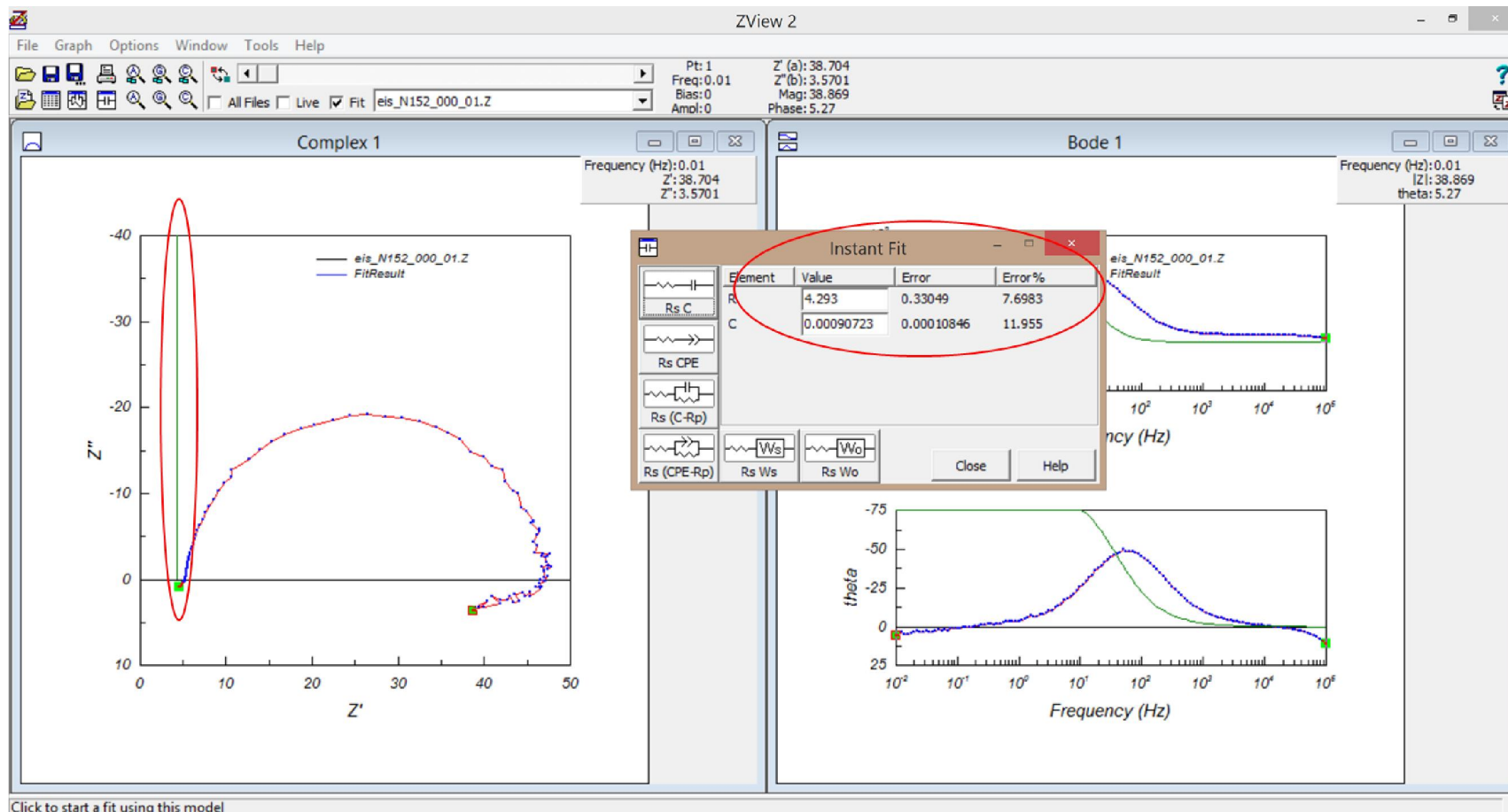


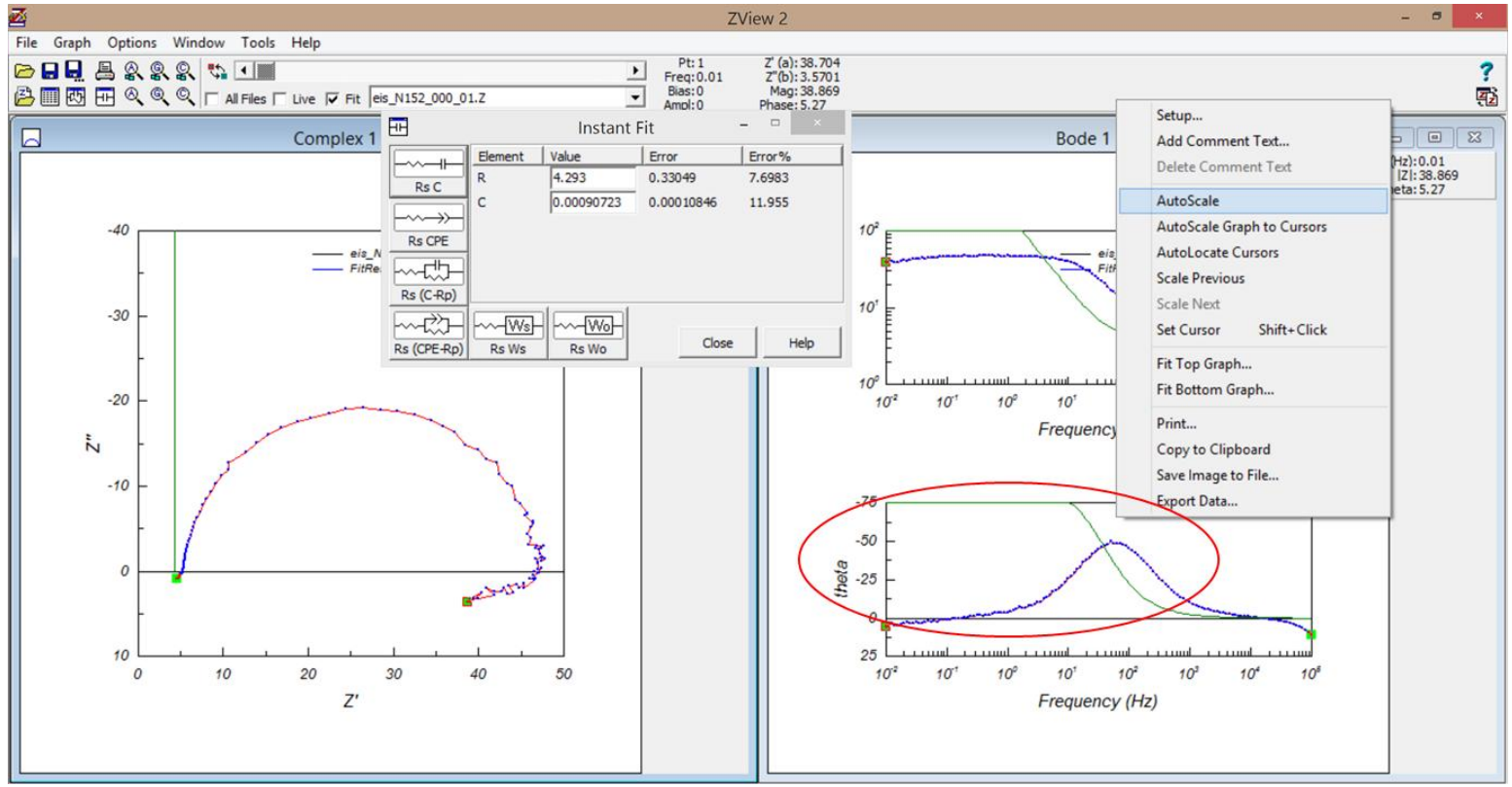


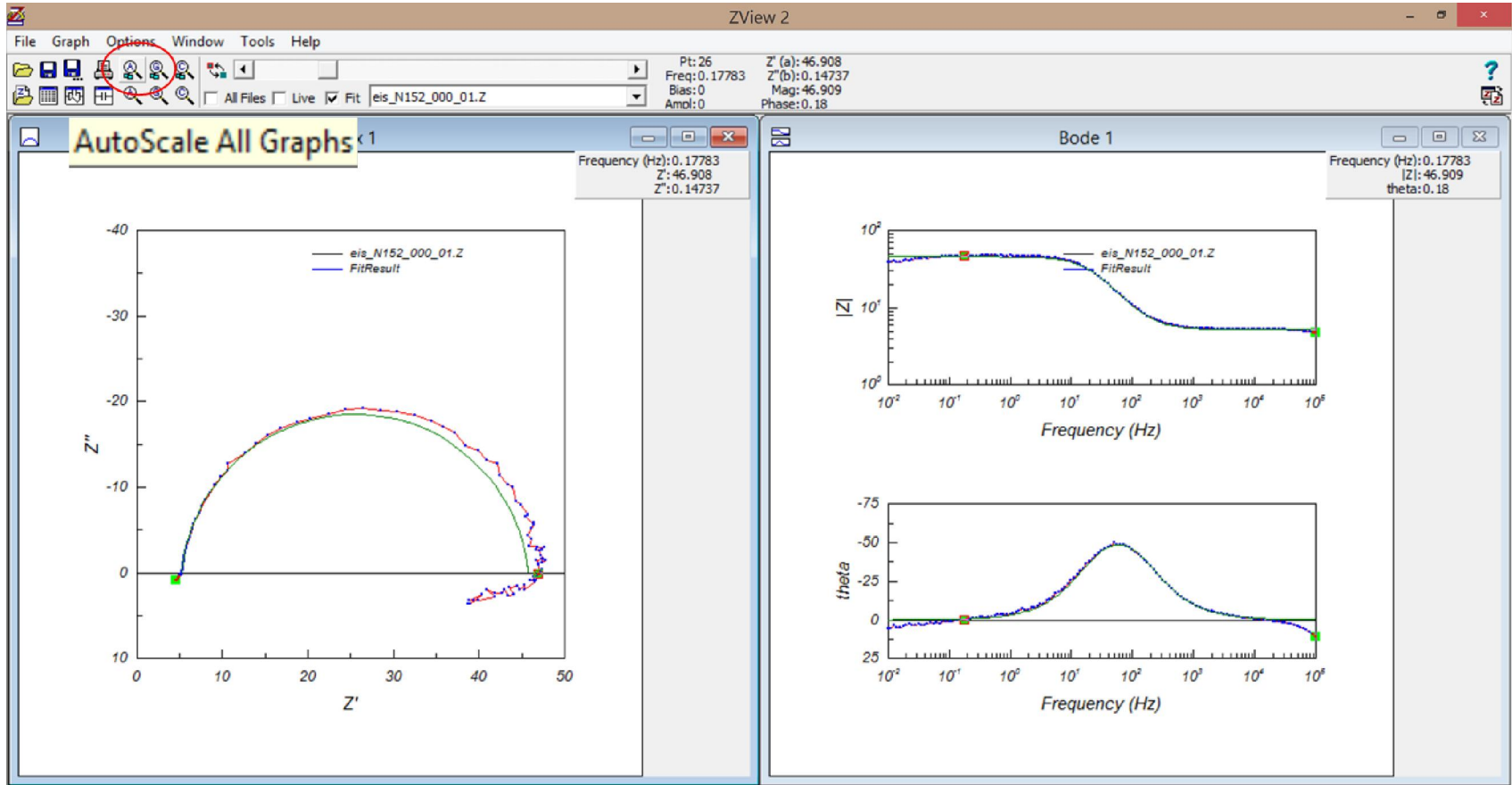


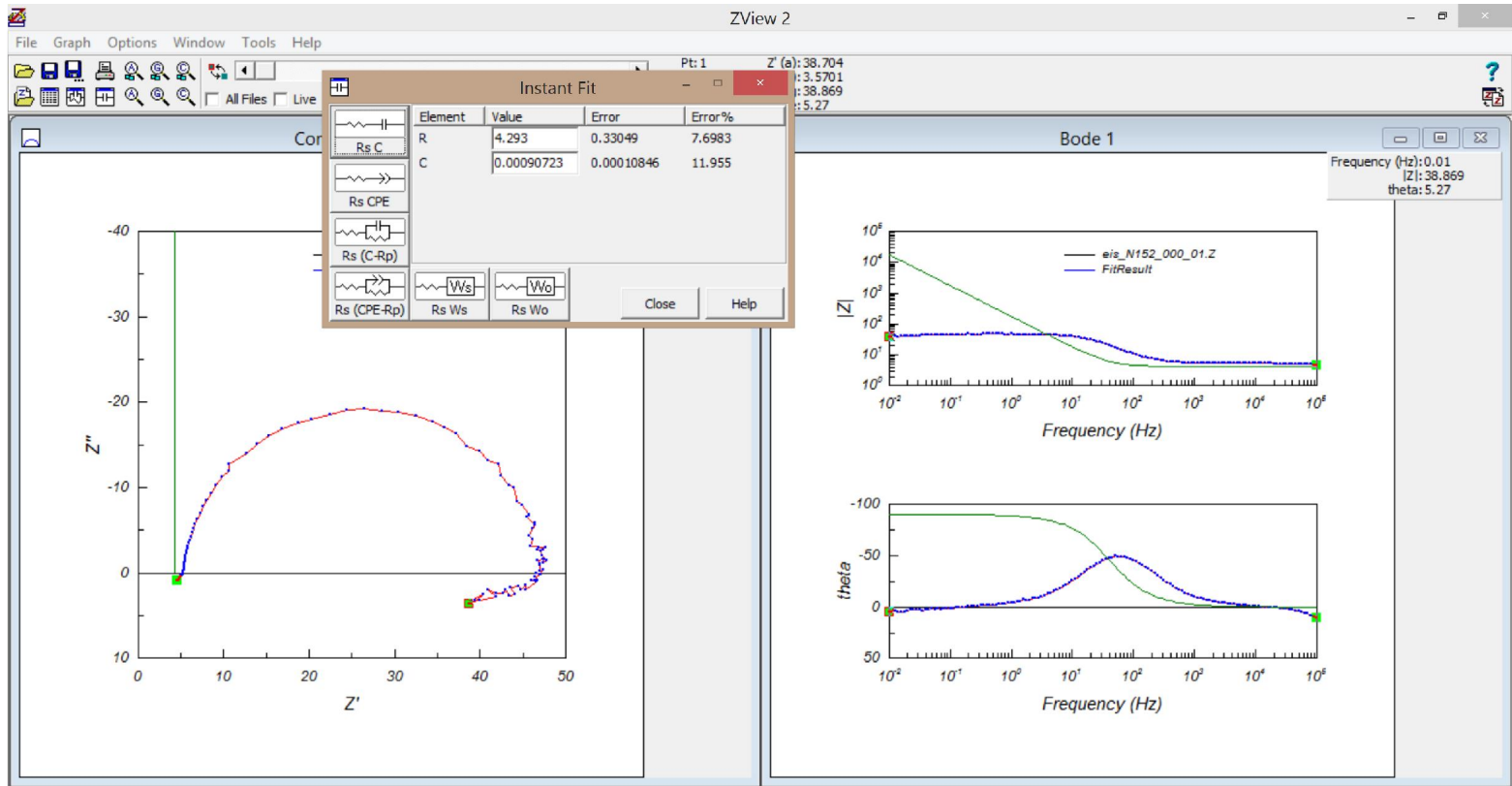


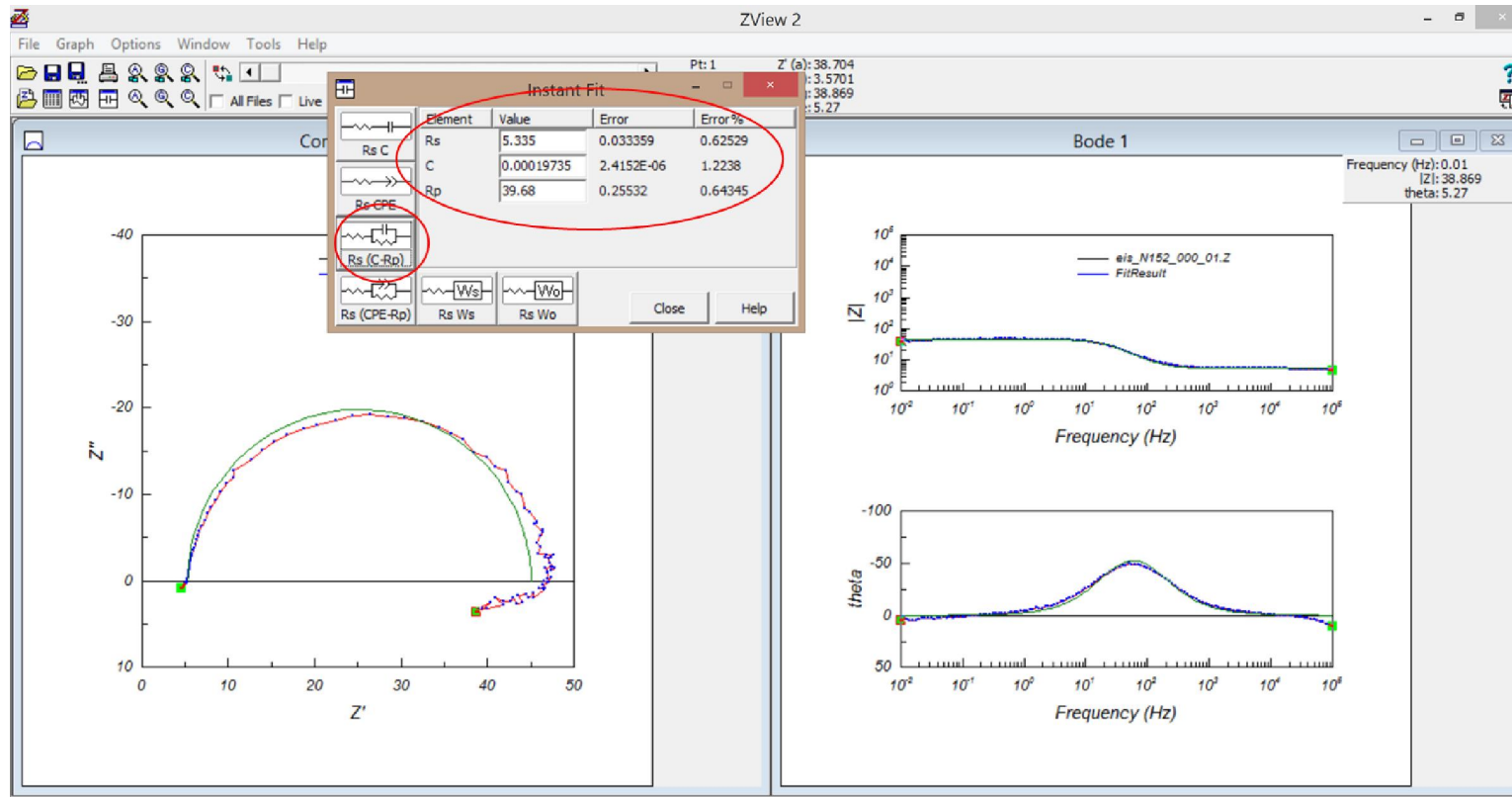


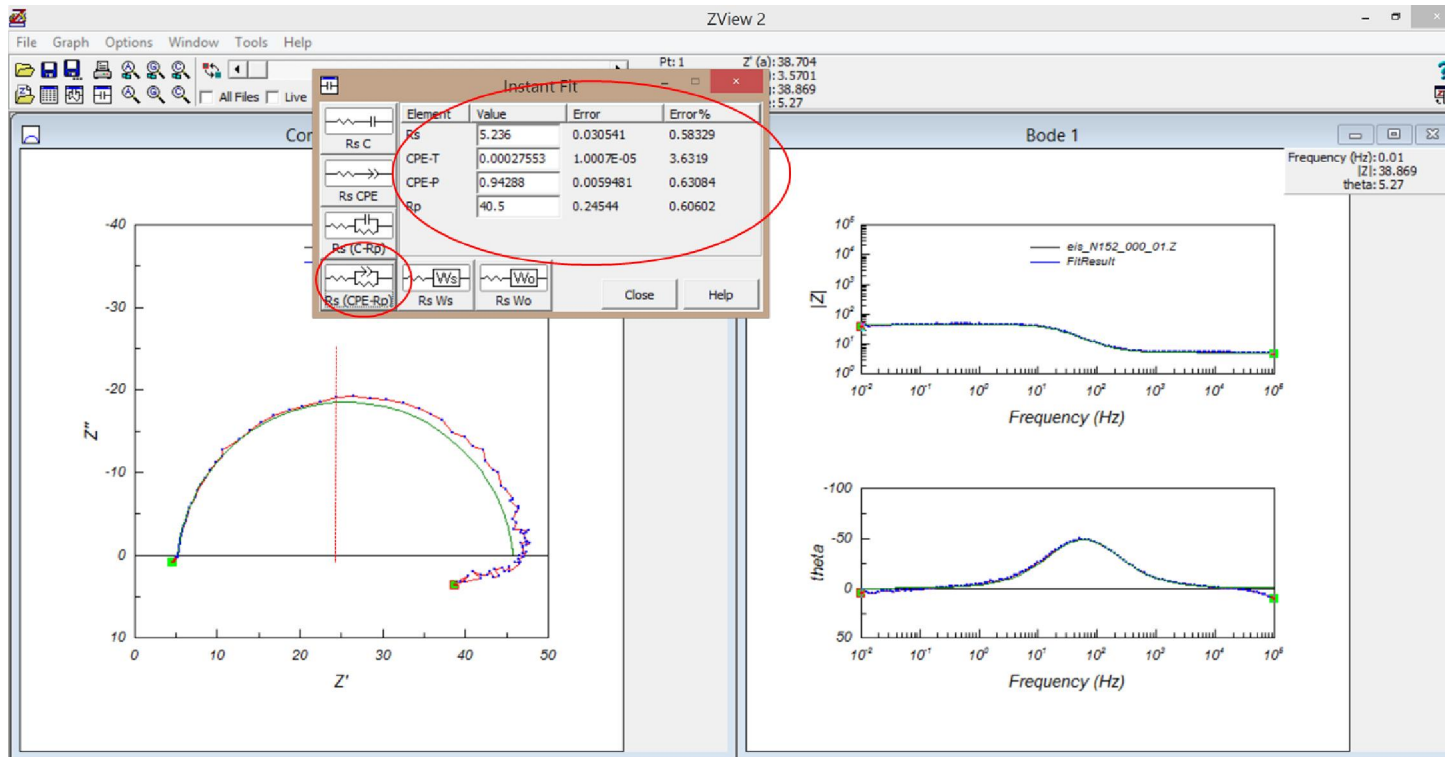


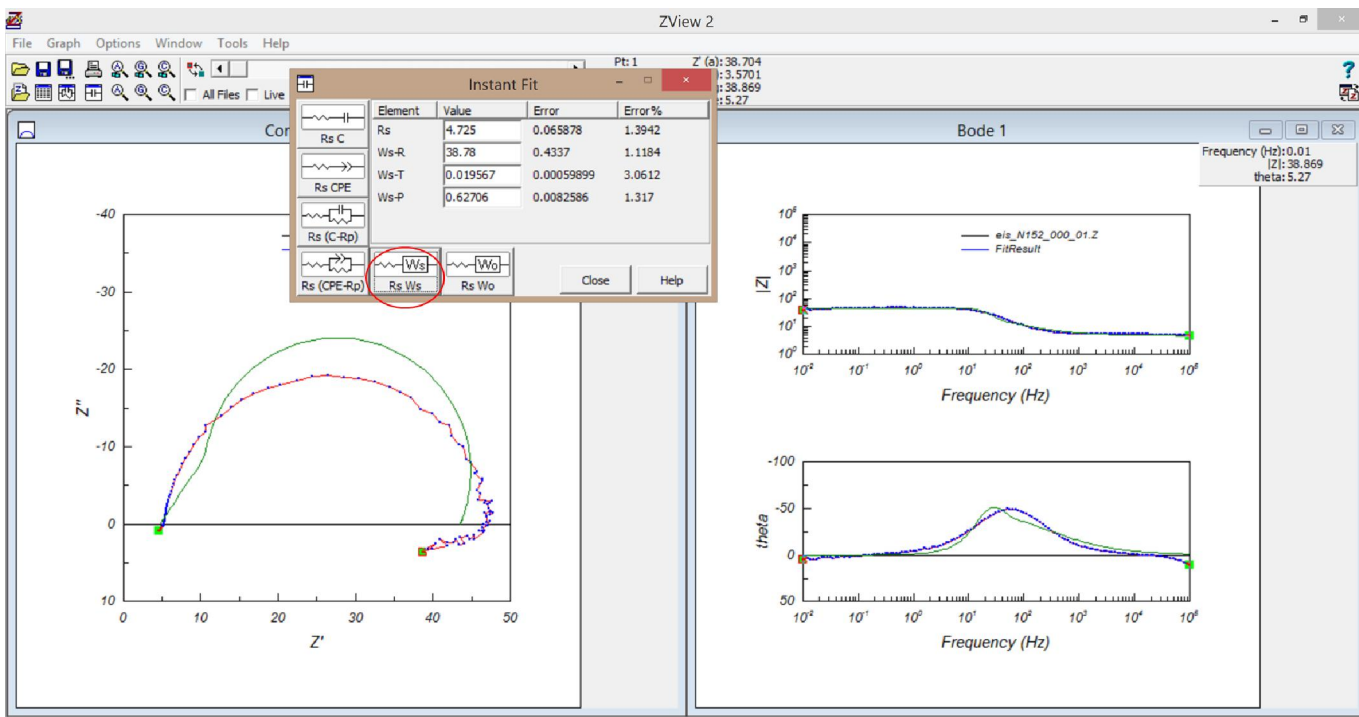




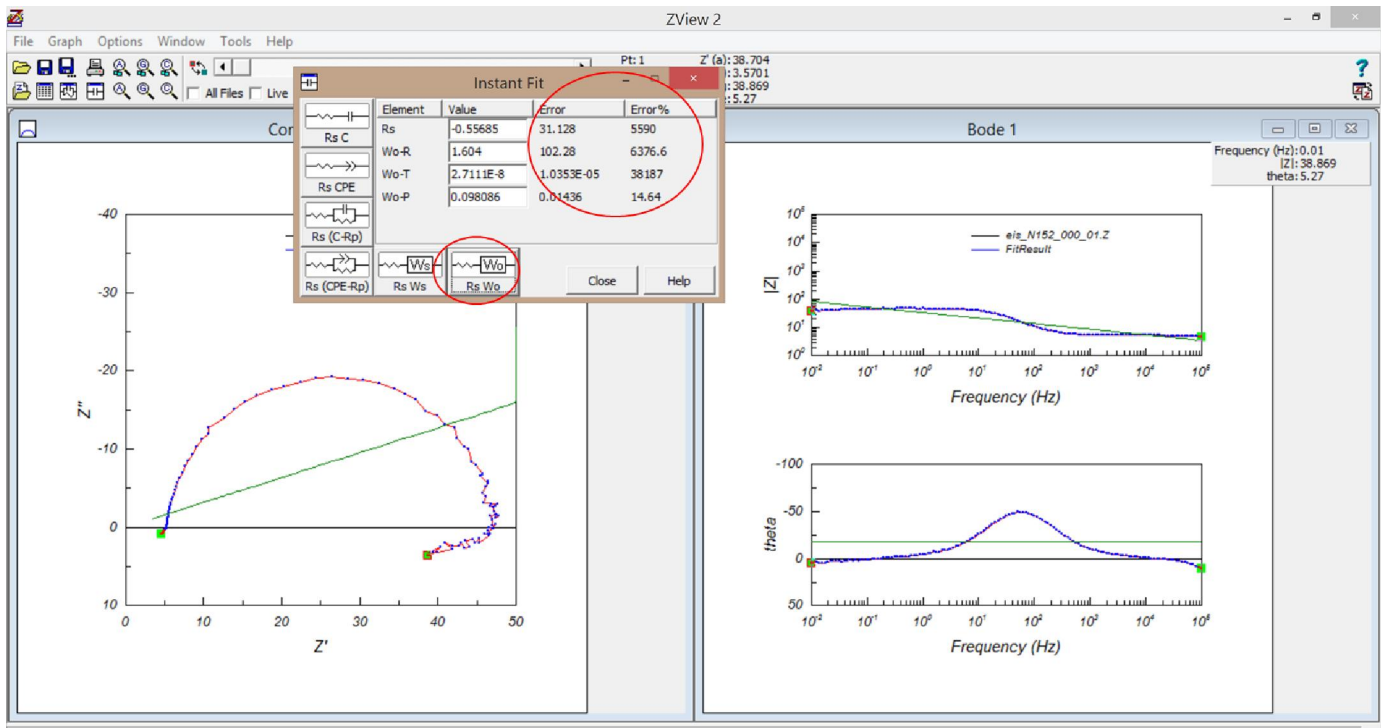


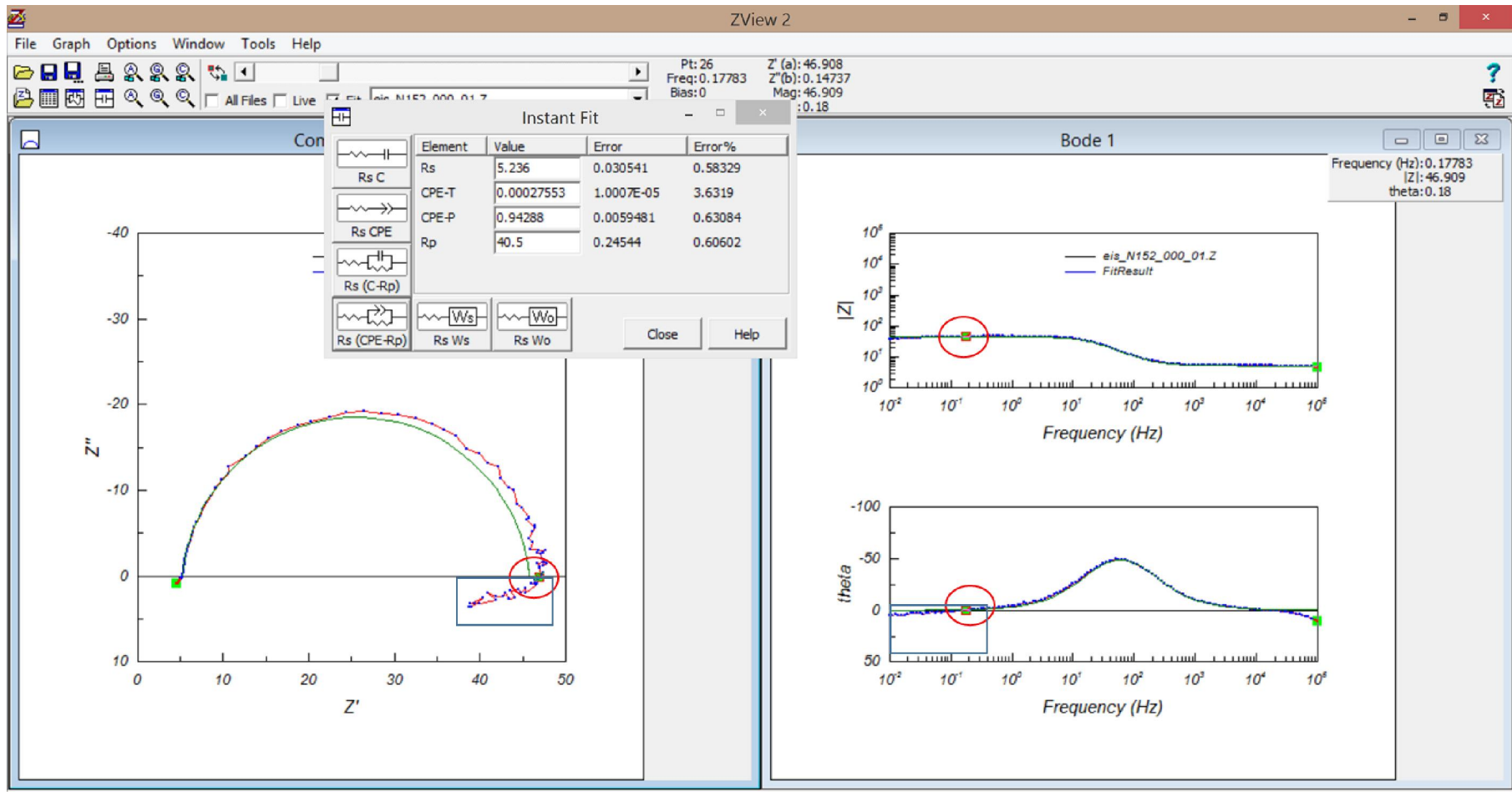


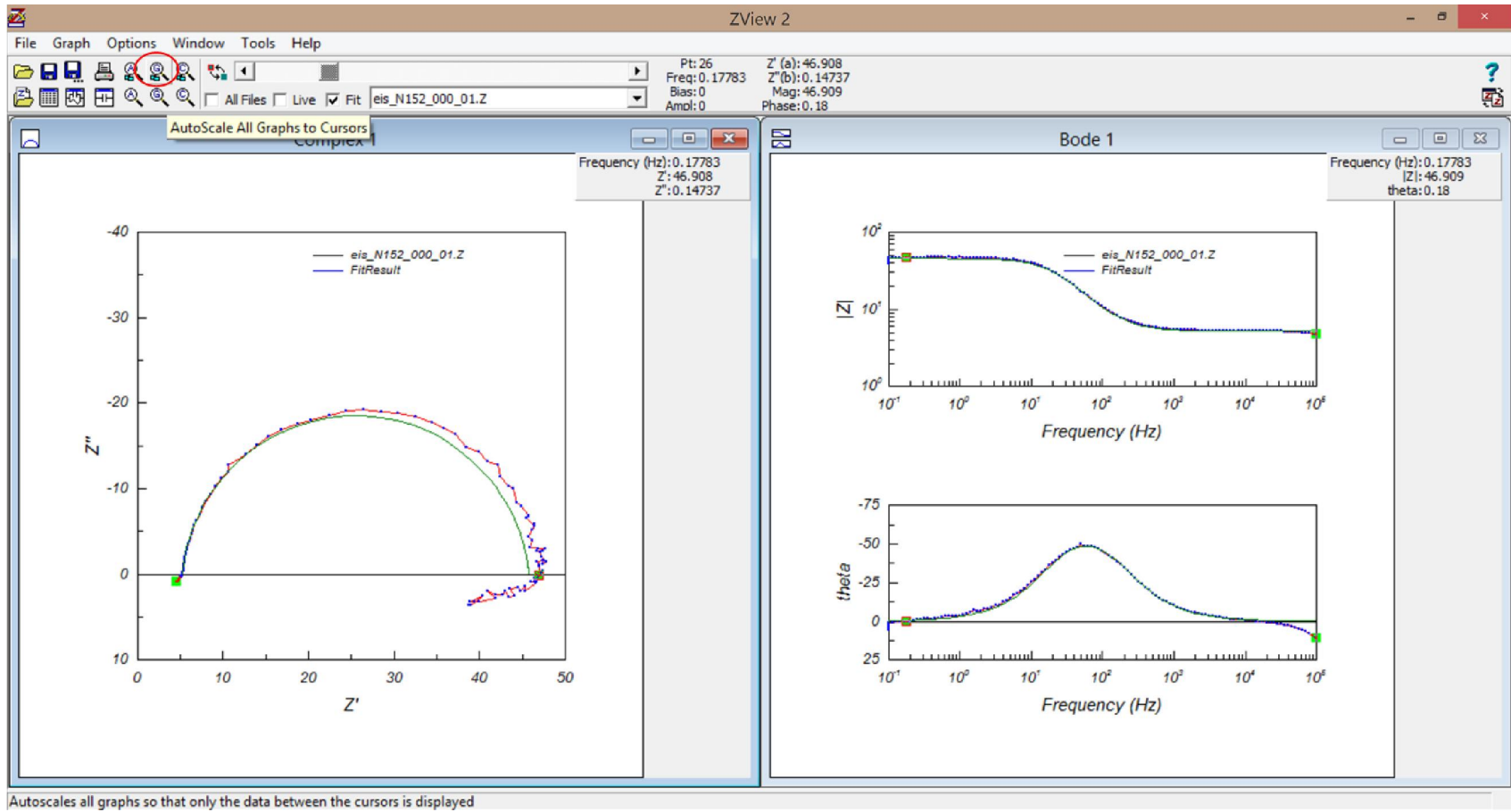












ZView 2

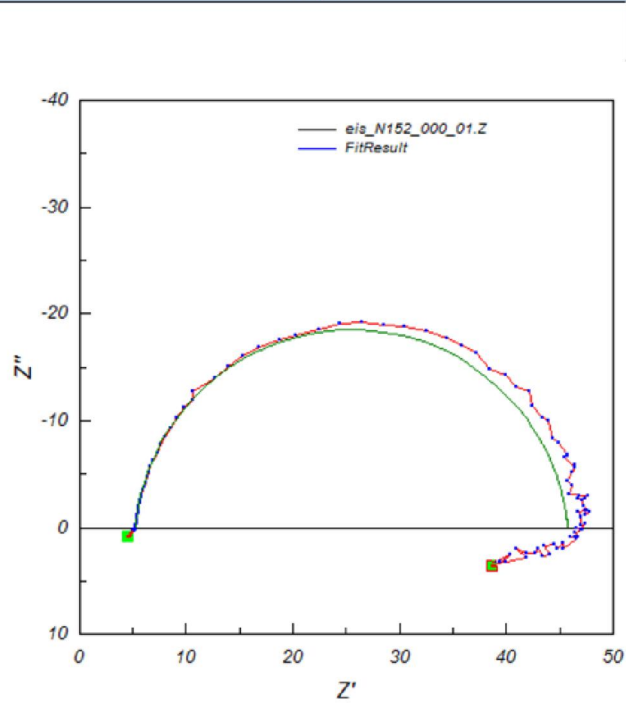
File Graph Options Window Tools Help



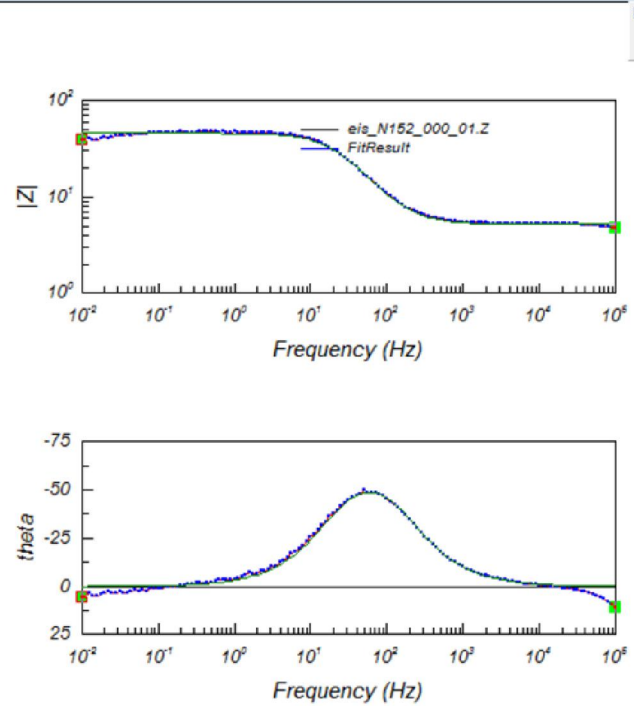
Pt: 1  
Freq: 0.01  
Bias: 0  
Amp: 0  
Z'(a): 38.704  
Z'(b): 3.5701  
Mag: 38.869  
Phase: 5.27

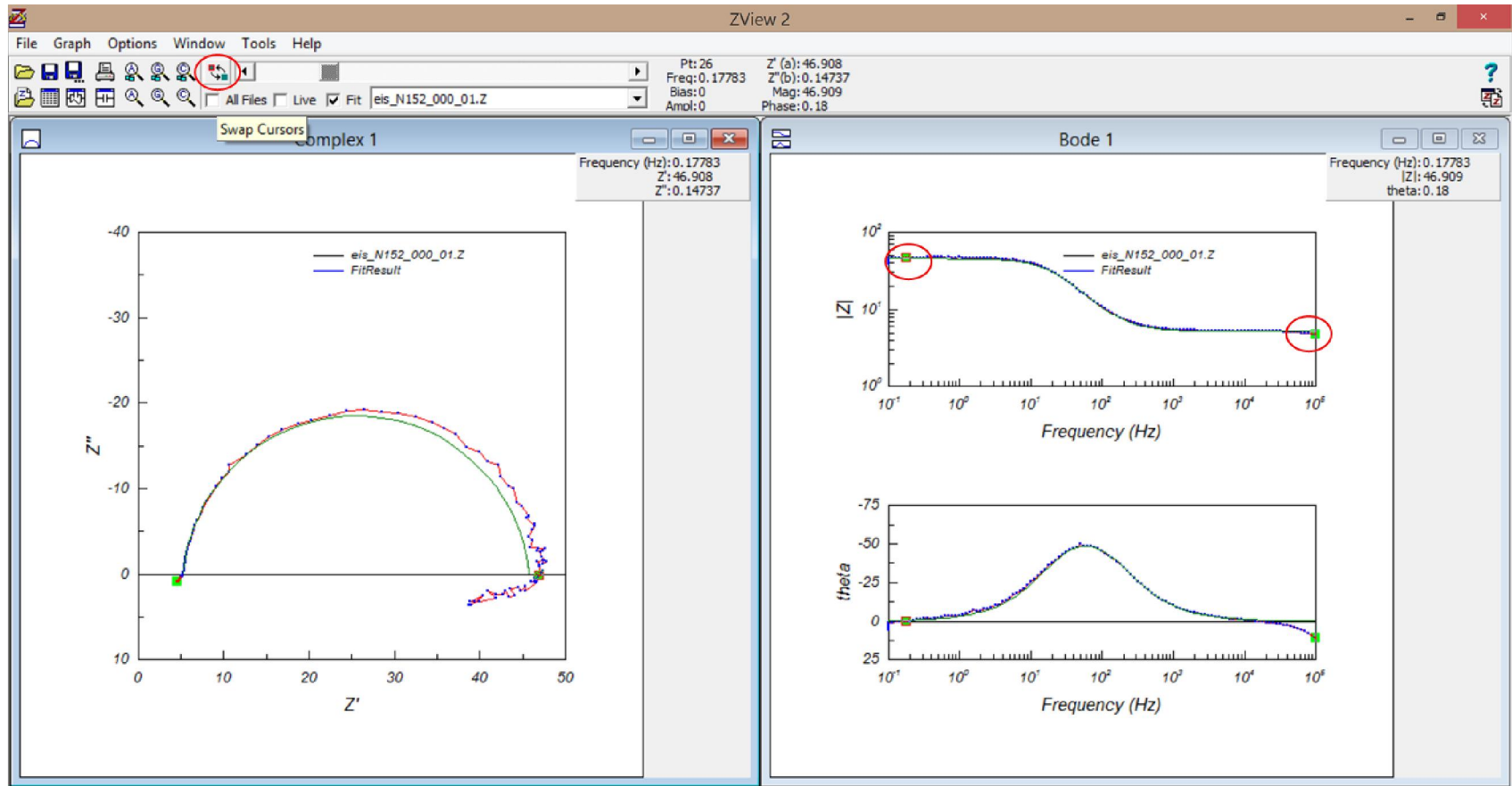
AutoLocate All Cursors

Complex 1

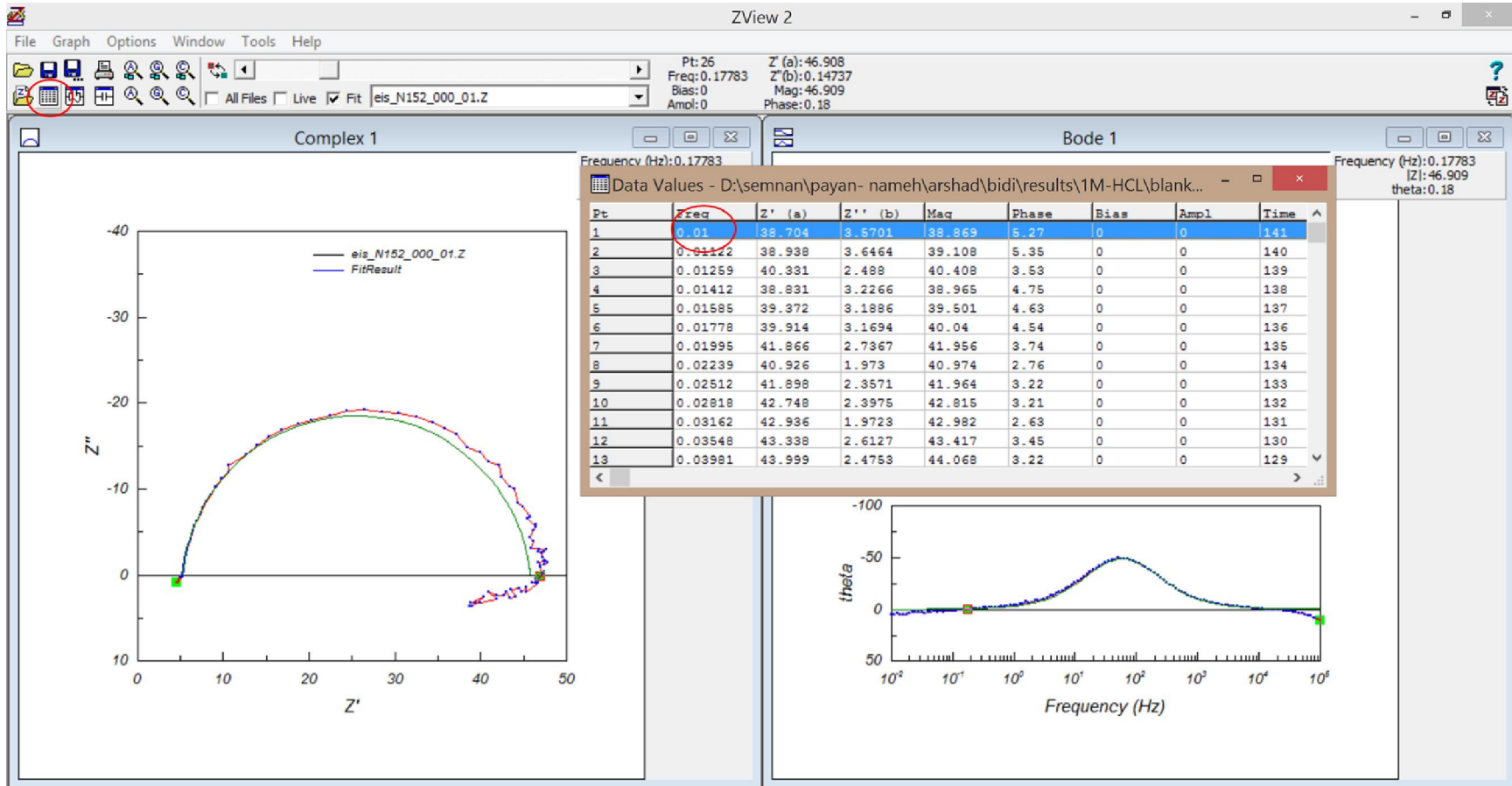


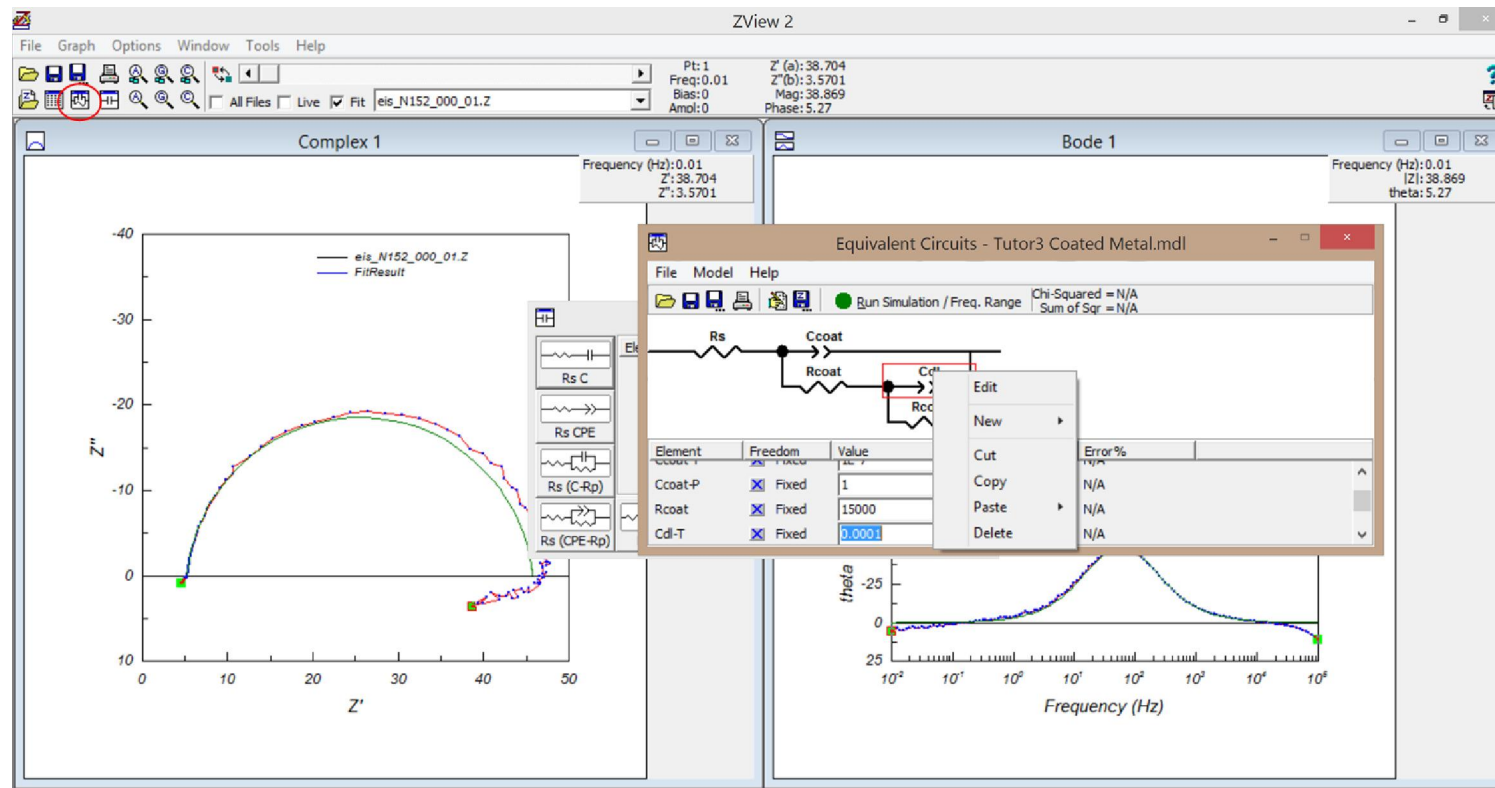
Bode 1

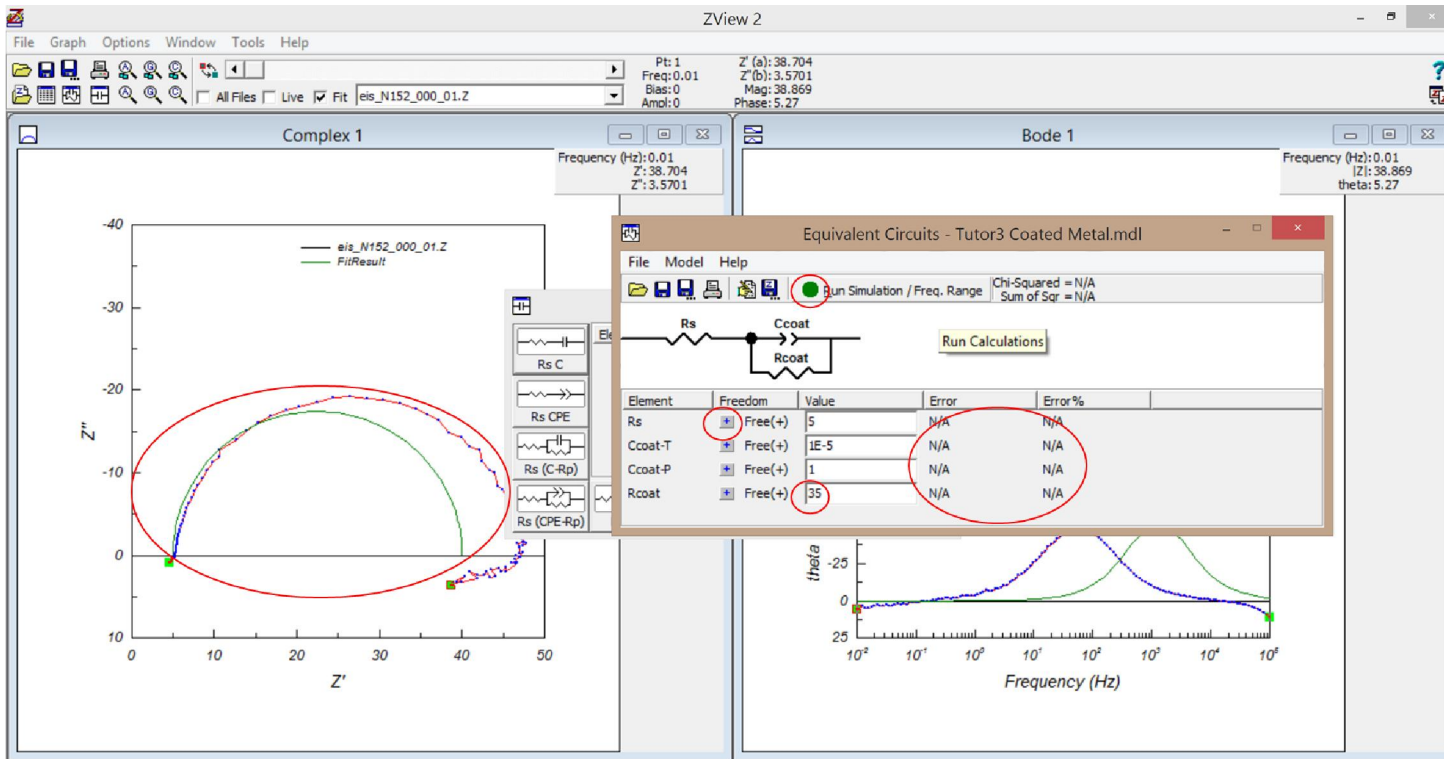




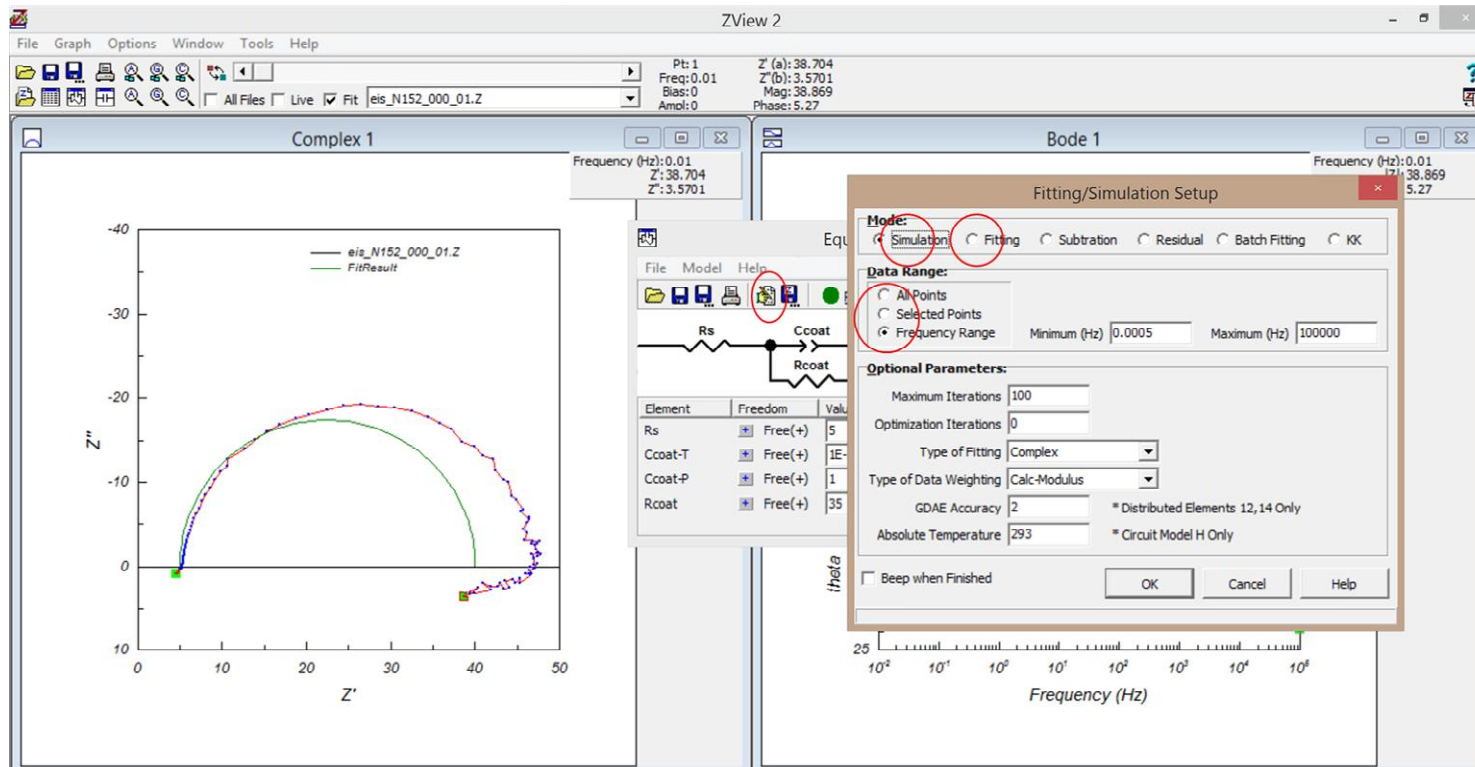
Swap the placement of the primary and secondary data cursors

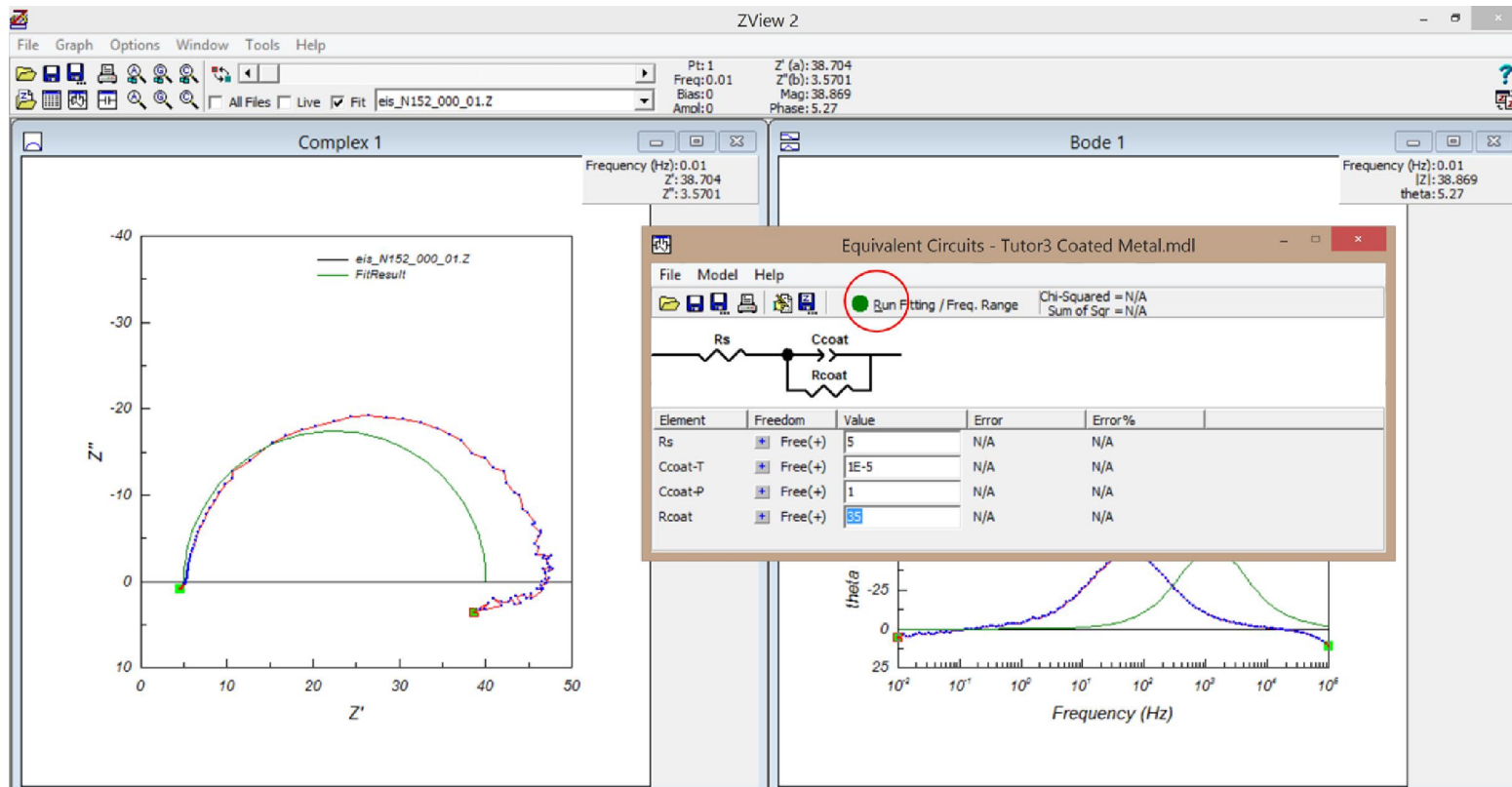


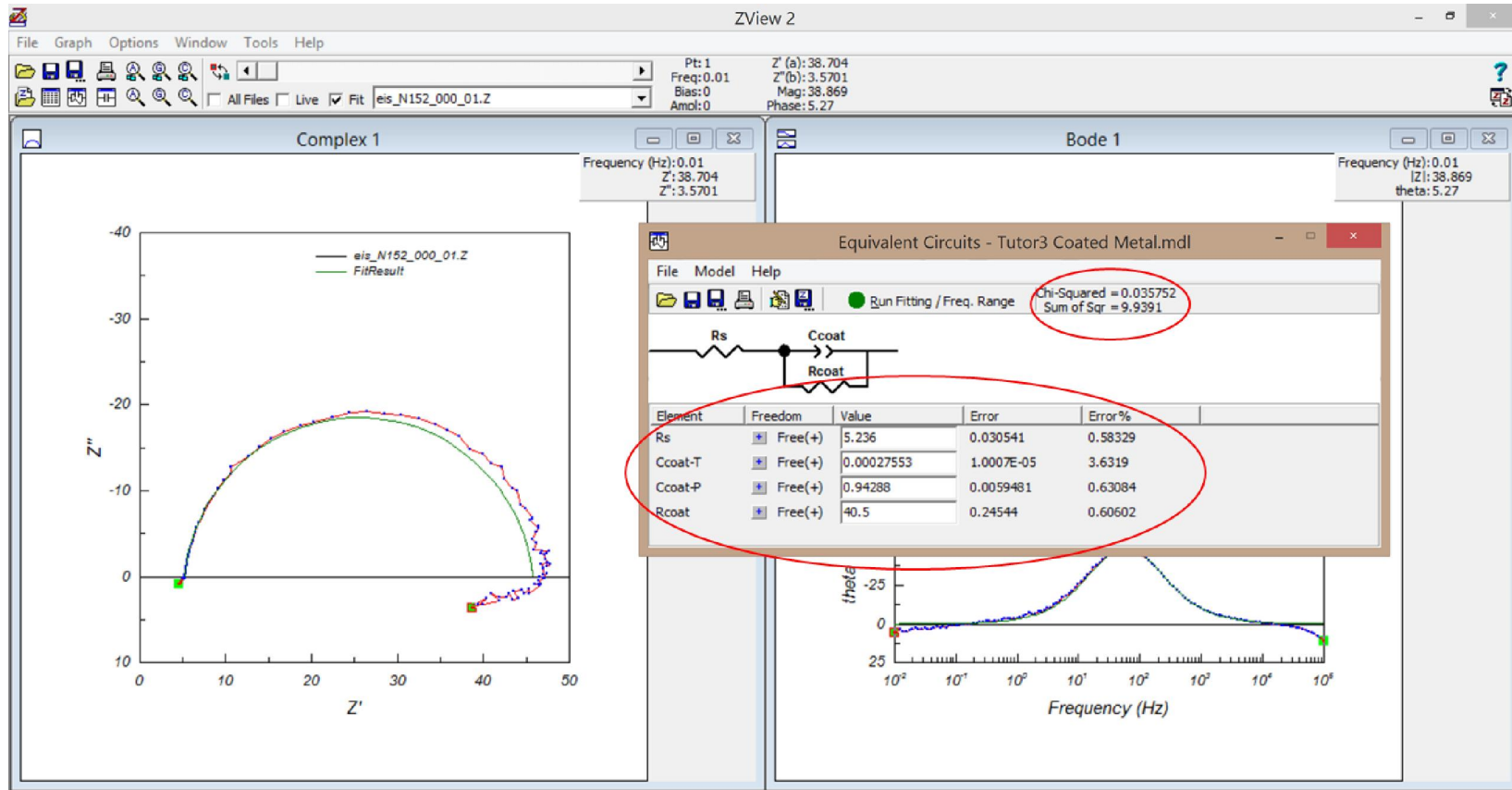


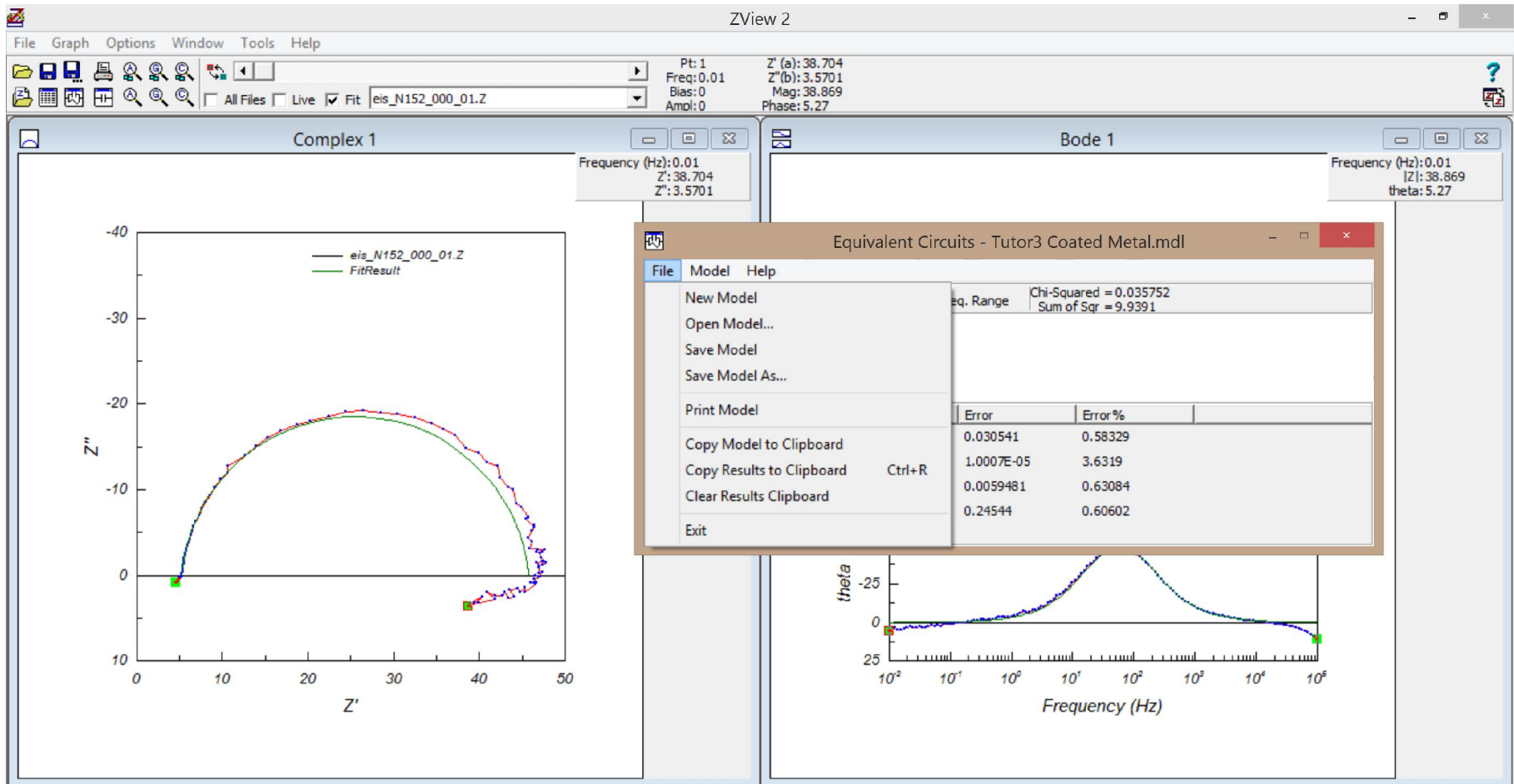


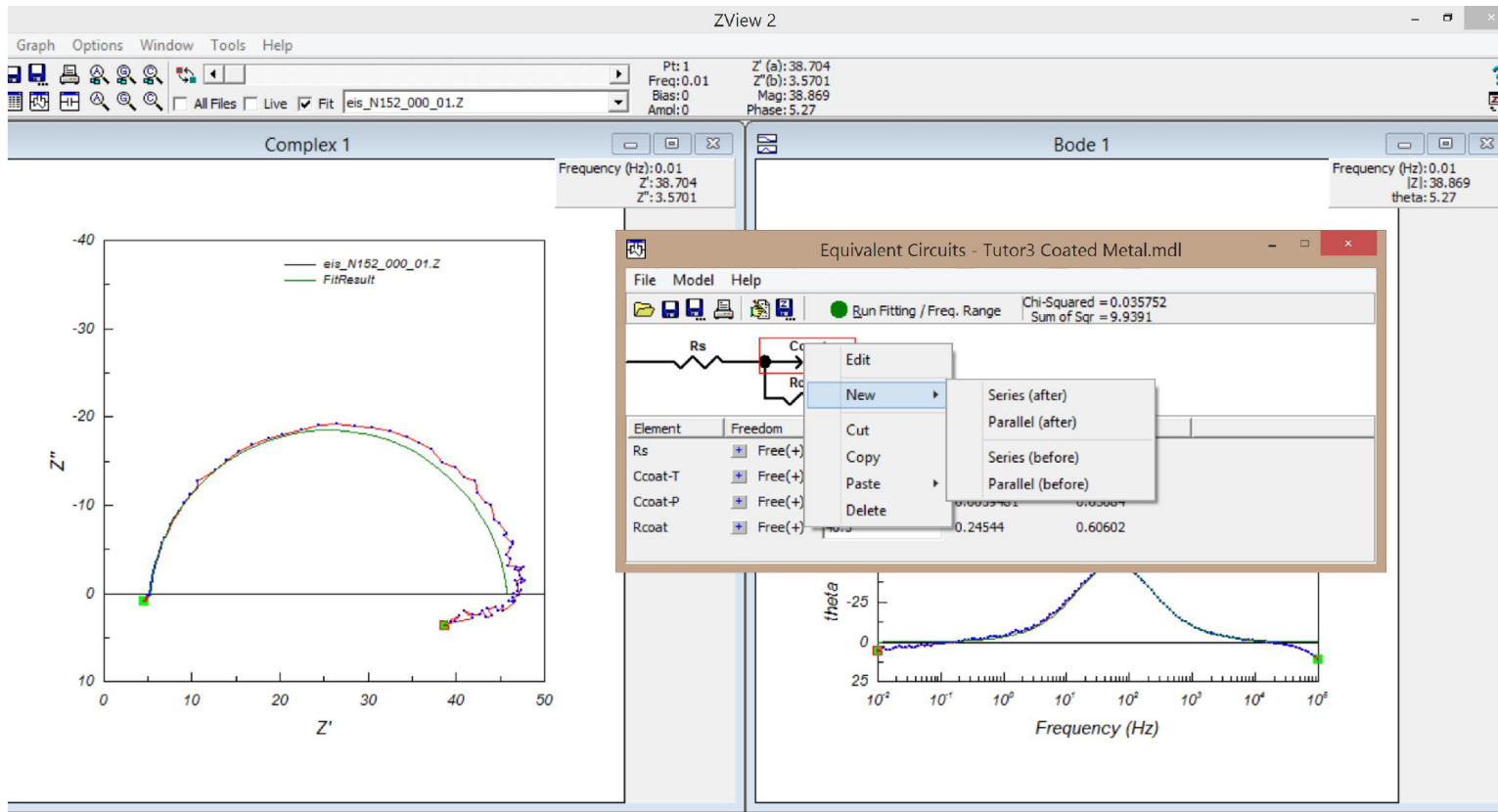


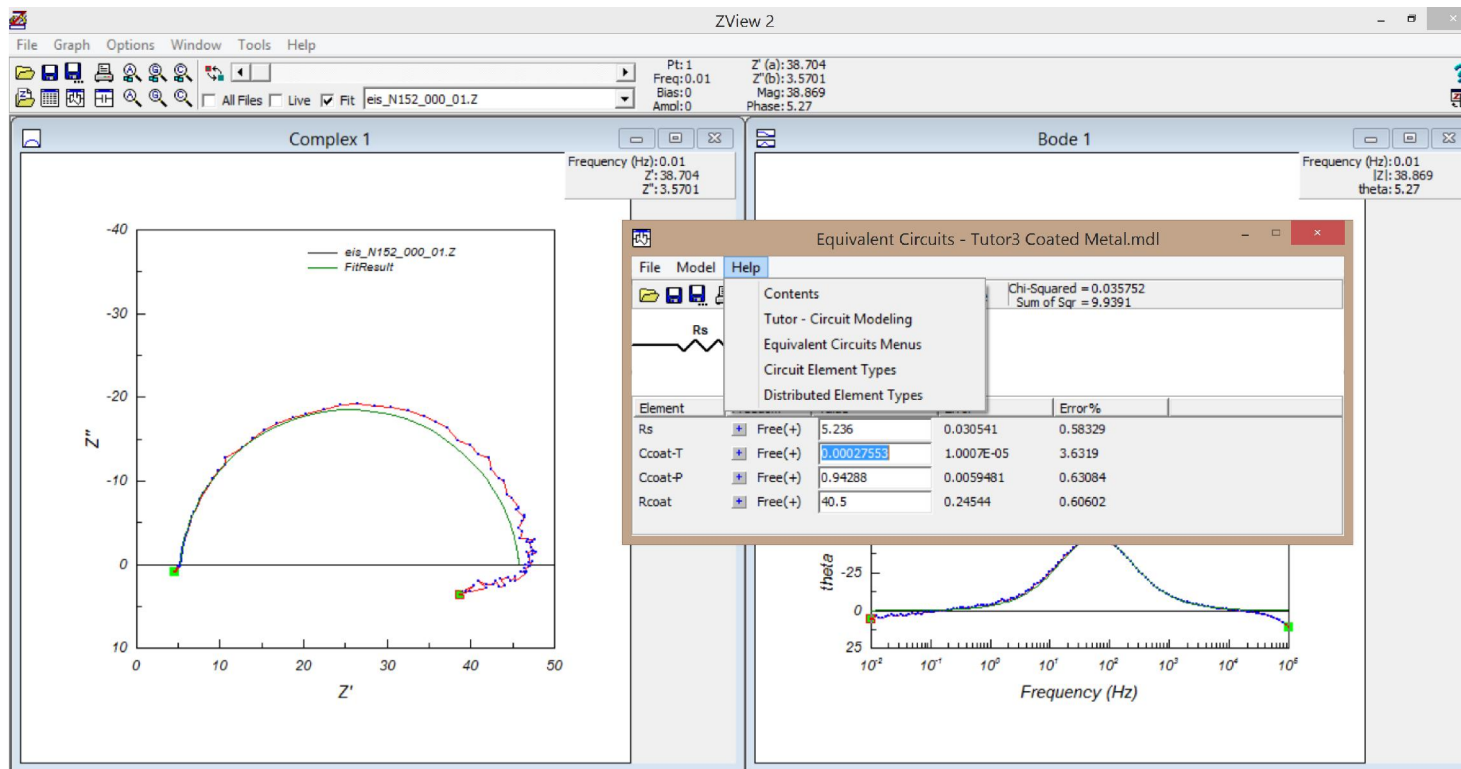












## **تکلیف جلسه چهارم**

- کشیدن نمودار در فایل اکسل و بررسی خروجی و تحلیل

این نمودار شامل بررسی خوردگی فولاد در حضور بازدارنده و عدم حضور بازدارنده در محیط اسیدی است.

# جلسه پنجم

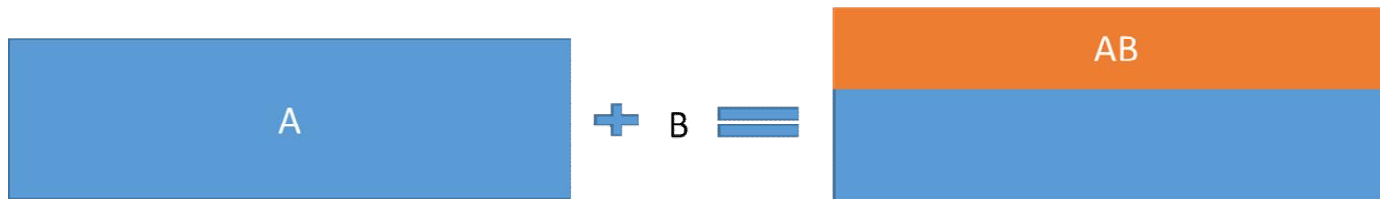
پوشش اندایزینگ



پوشش های تبدیلی

**Conversion coatings**

- اصطلاح پوشش تبدیلی به پوشش هایی اطلاق می شود که از طریق واکنش لایه های اتمی سطح فلزات با آنیون هایی که از واسطه مناسبی انتخاب شده اند، روی سطح فلزات ایجاد می شوند.
- بنابراین فرآیند تشکیل پوشش تبدیلی **یک فرآیند خوردگی کنترل شده ای** است که به طریق مصنوعی ایجاد شده است و نهایتاً بر روی سطح فلز لایه ای را ایجاد می کند.



پوشش های تبدیلی به سه روش انجام می شود که عبارتند از:  
اکسیداسیون آندی (آندایزینگ)، فسفاتة کردن، کروماتة کردن

پوشش های تبدیلی فقط به منظور لایه ی برای حفاظت از خوردگی استفاده نمیشوند بلکه به عنوان لایه ای سخت و مقاوم به سایش و یا لایه ای که خاصیت رنگ پذیری و چسبندگی دارد بر روی فلزات عاری از این خاصیت مثل آلومینیوم انجام میشود. ساختار متخلخل پوشش های تبدیلی سبب بروز چنین خاصیتی می شود.

فرایند های تشکیل پوششهای تبدیلی را می توان به **فرایند های شیمیائی** که در آنها پوشش با غوطه وری ساده فلز در محلول ایجاد می شود و **فرایند های الکتروشیمیائی ( آندی )** طبقه بندی کرد .

در فرایند های الکتروشیمیائی **جریان الکتریکی** عامل اصلی کنترل کننده فرایند است و فلز تحت عملیات ، **نقش آند را دارد (آندایزینگ)** و کاتد معمولا از جنس گرافیت، سرب است. **در صورتی** که واکنش ها شیمیایی باشد مثل فسفات و کرومات حضور آند و کاتد معنایی ندارد.

آندایزینگ

**Anodizing process**

# What is Anodizing?

It is an electrochemical oxidation of the aluminum surface to produce a stable film of aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

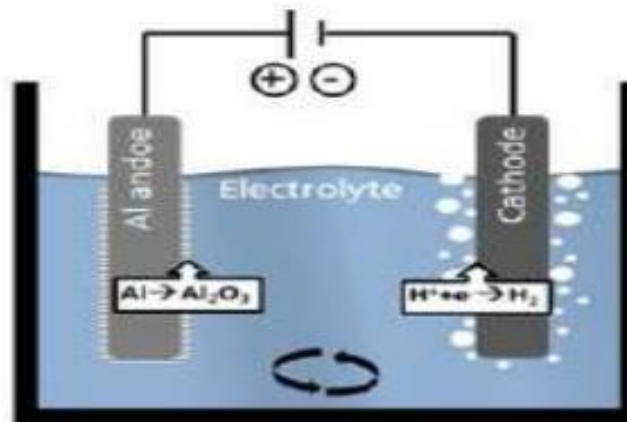
- q Aluminum is “rusted”
  - artificially and uniformly
- q Electricity and Chemicals required
  - electrical current passes through aluminum immersed in an acid solution

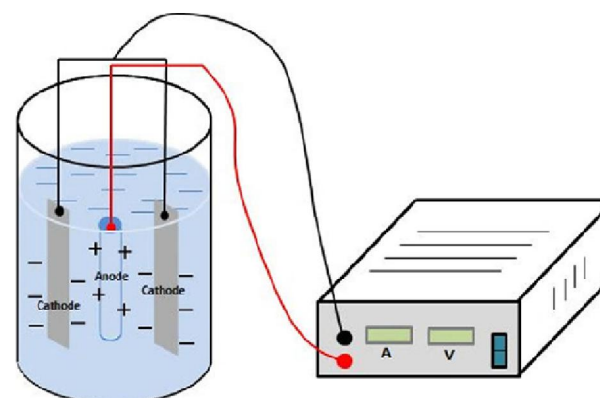
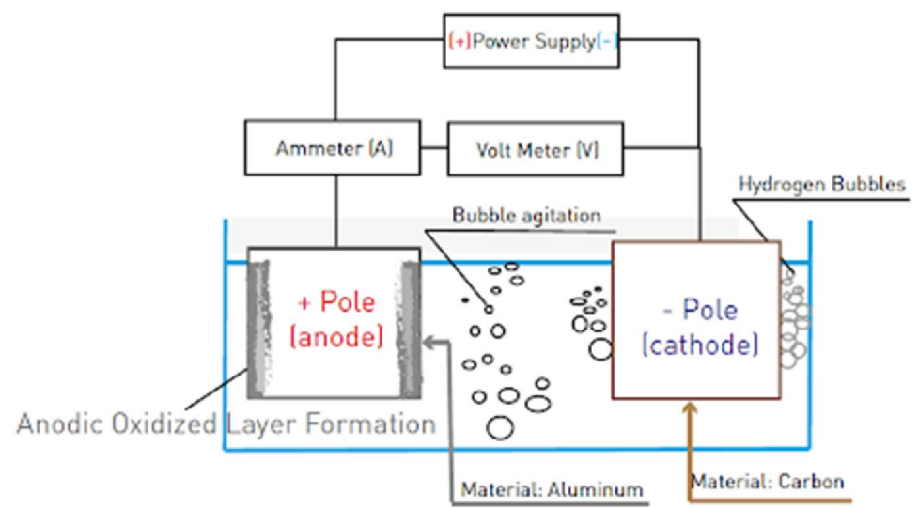


# ANODIZING

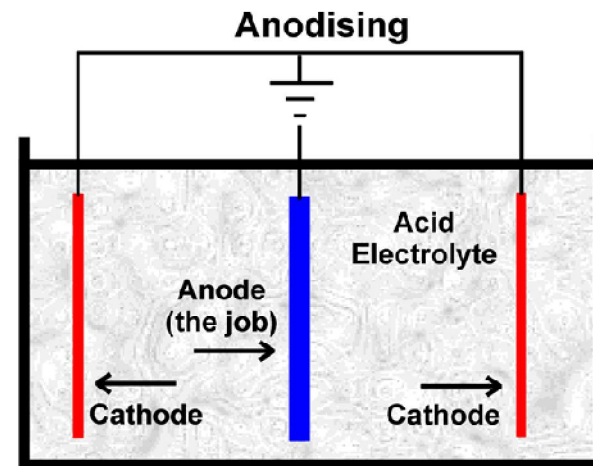
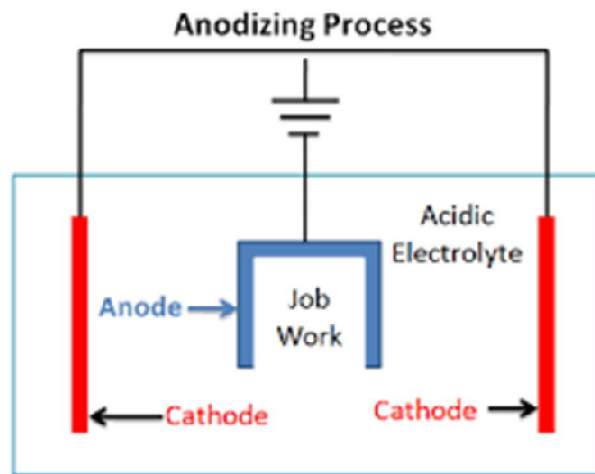
## Anodizing Process

- When aluminum is anodized conventionally, direct electrical current (DC) is passed through a bath of sulphuric acid -- the electrolyte -- while the aluminum being treated serves as the anode. This produces a clear film of aluminum oxide on the aluminium's surface.

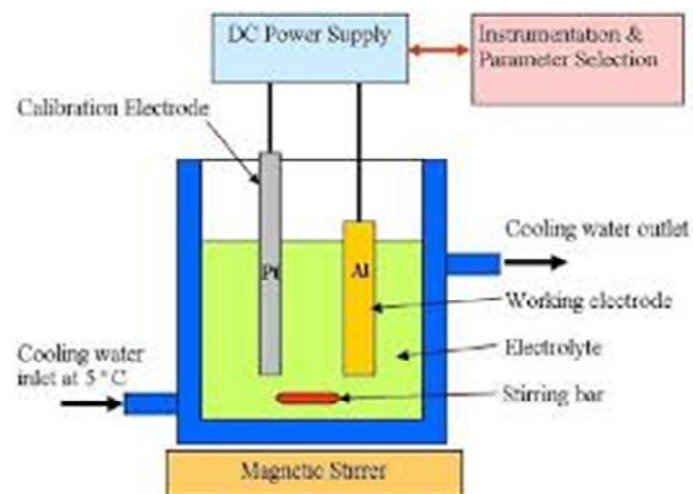






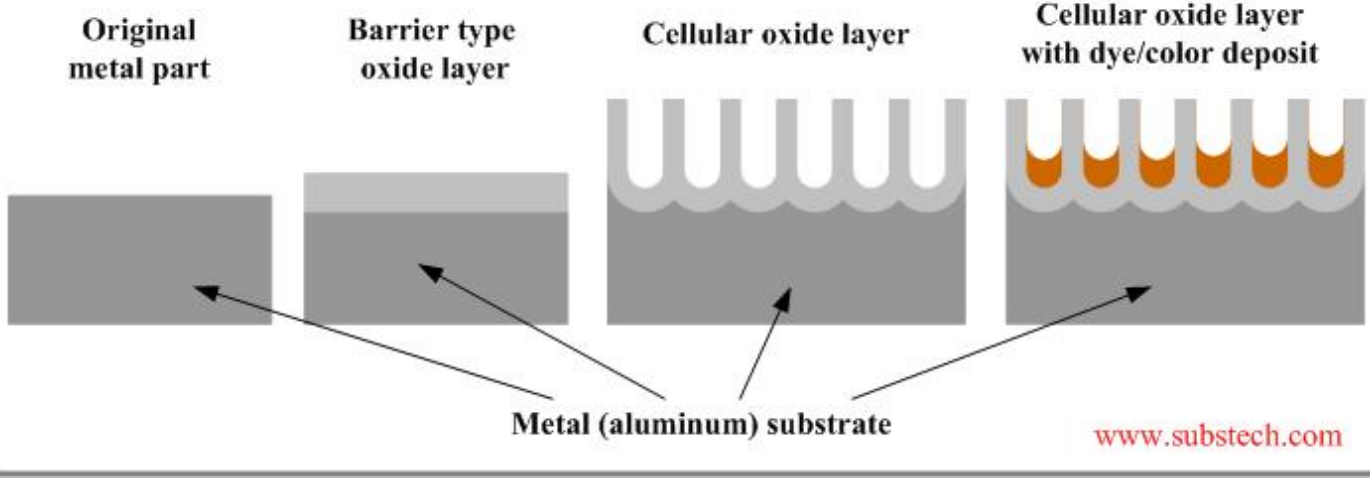


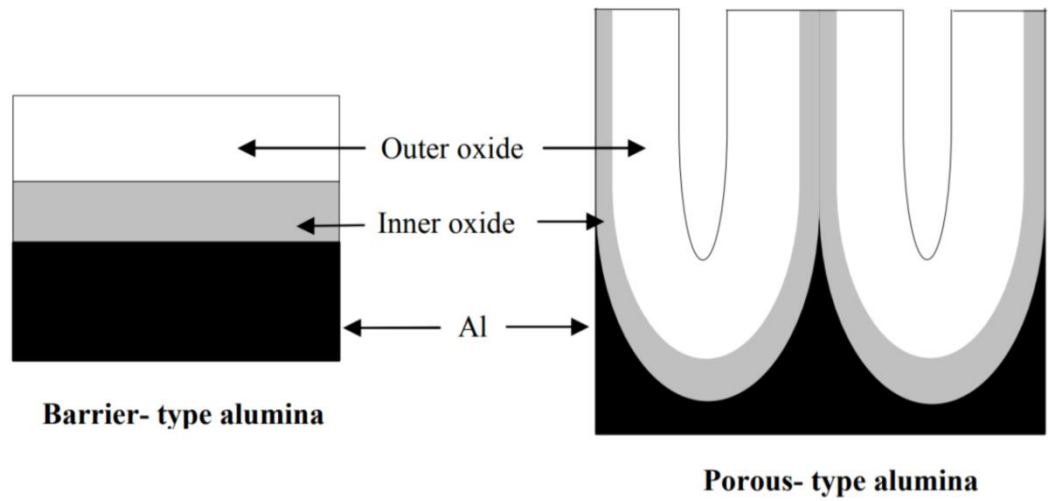
مشکلی که در استفاده از روش آندایزینگ وجود دارد این است که این واکنش یک واکنش گرماده است یعنی حرارت تولید میکند. بنابراین دمای الکترولیت افزایش پیدا میکند و زمانی که دما افزایش یابد، لایه ای که ایجاد میشود بیشتر درون الکترولیت حل میشود. برای جلوگیری از انحلال لایه، محلول را باید خنک کنیم به همین دلیل در اطراف سل سیستم های خنک کننده قرار میدهند تا دما را کنترل کنند.



گاهی اوقات در دماهای زیر صفر هم میتوان عمل آندایزینگ را انجام داد. در این دماها لایه های اکسیدی که ایجاد میشود سخت است که این نوع اکسیداسیون آندی را برای پیستون های موتور خودرو چون در معرض اصطکاک زیادی هستند، انجام میدهند.

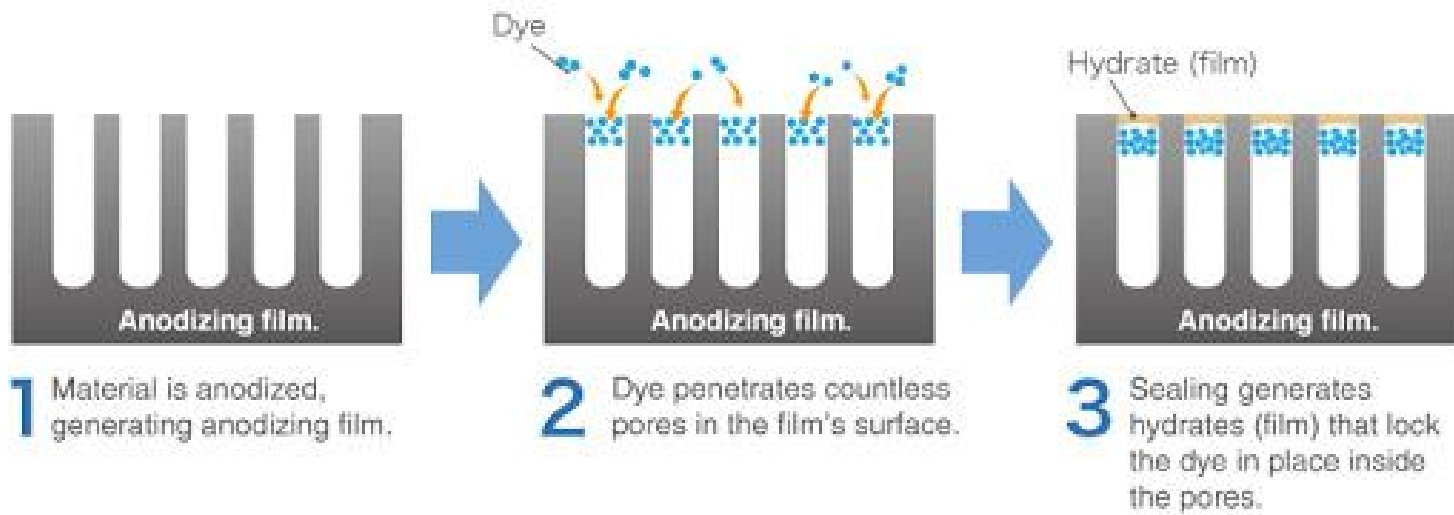
## Anodizing

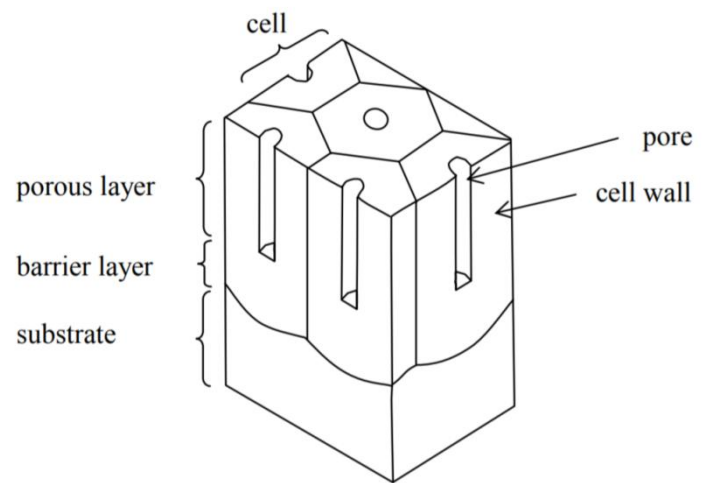




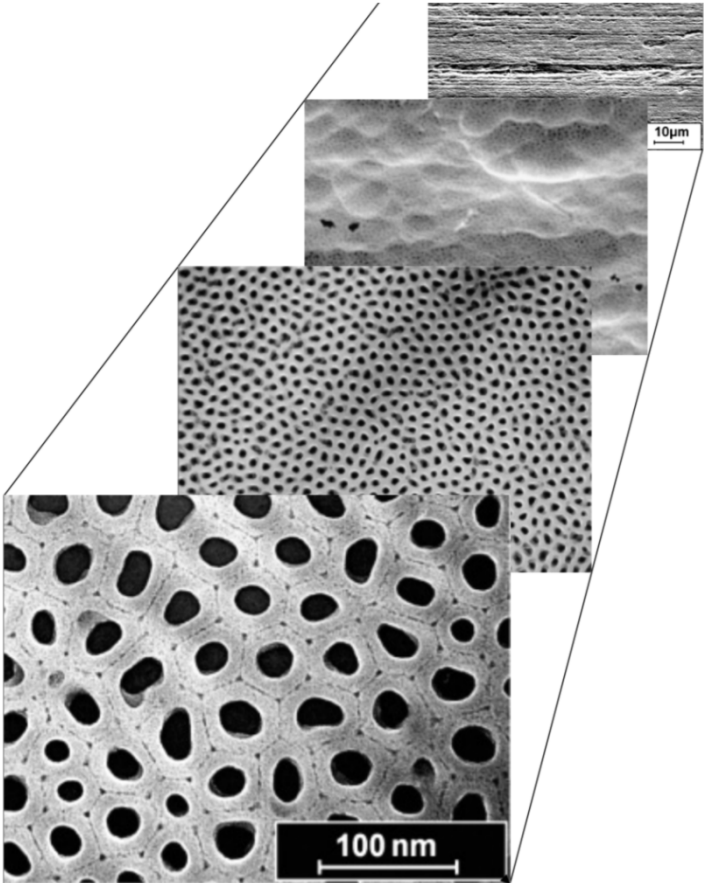
**Barrier-type alumina**

**Porous-type alumina**

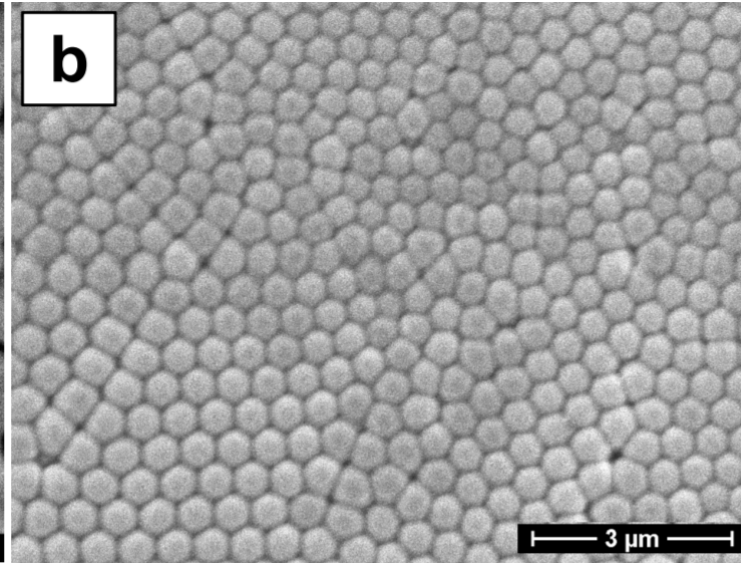
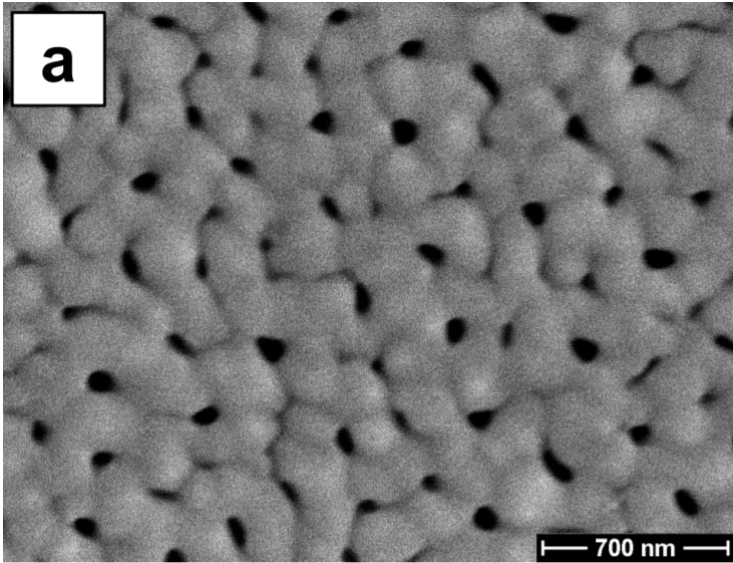


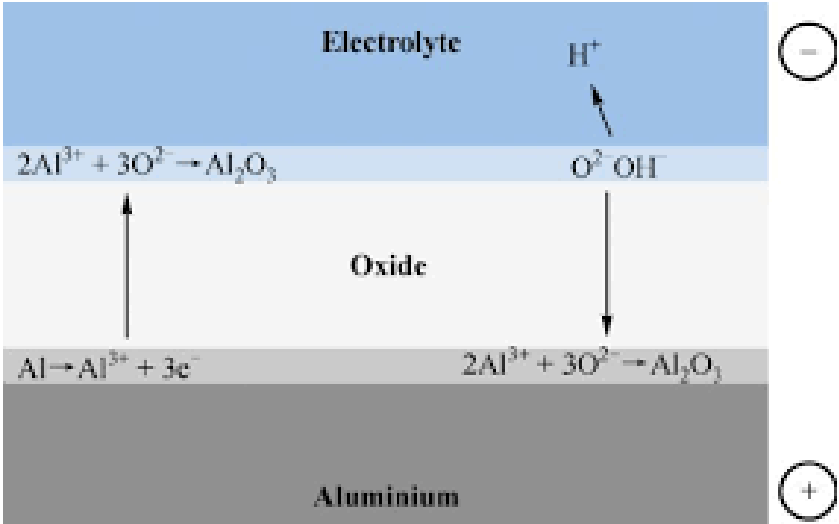


*Schematic diagram of a porous film, according to [16].*









# ANODIZING

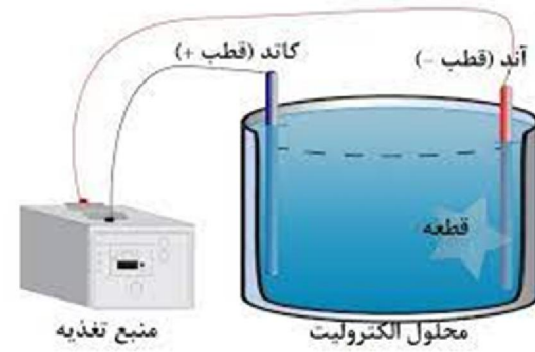
## Anodizing Process



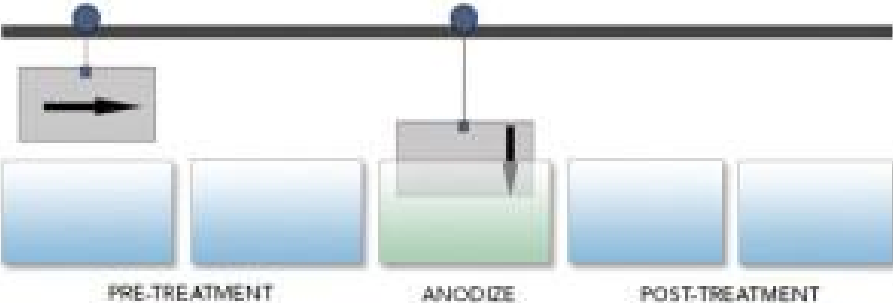
## ۲-۳- روش انجام آزمایش

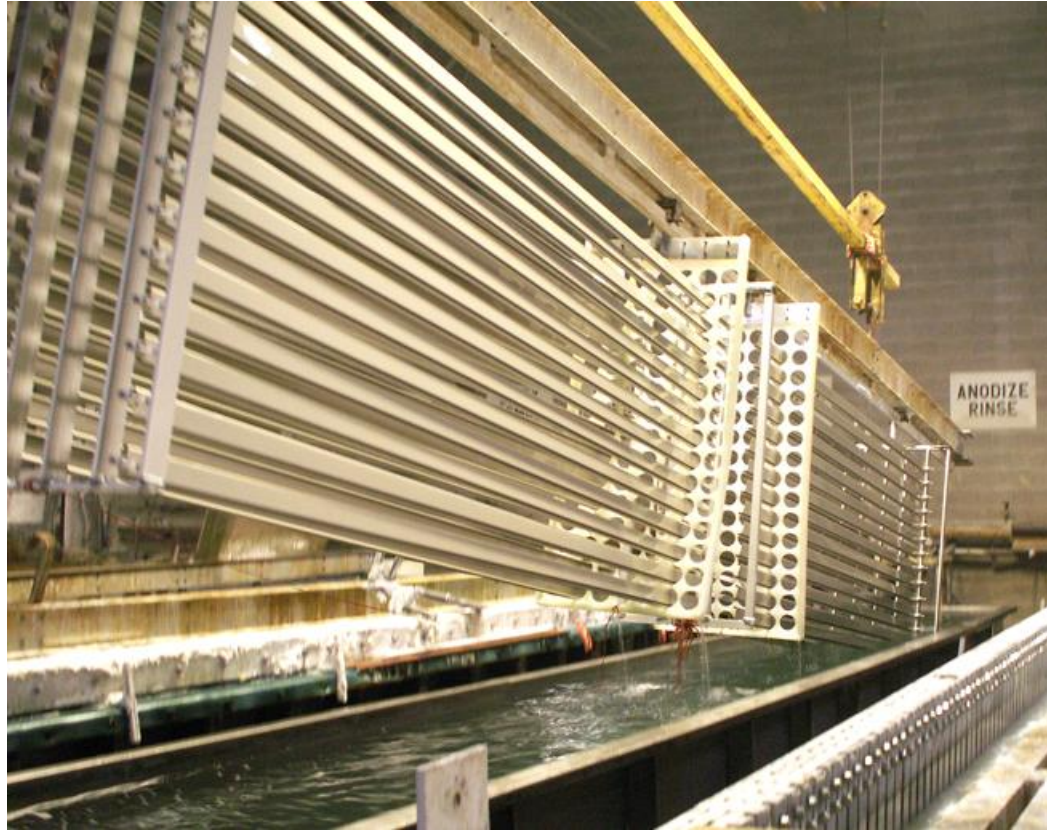
ابتدا قطعات را با سمباده شماره ۶۰ تا ۲۵۰۰ می‌زنیم. سپس با پودر آلومینا کار پولیش را انجام می‌دهیم. با استفاده از ۶ بشر جداگانه کار آماده‌سازی و اسید شویی و چربی‌گیری را انجام می‌دهیم. پس از هر مرحله شستشو با آب را مقطر انجام می‌شود. در بشر اول از اسیدسولفوریک برای اسید شویی استفاده کردیم. در بشر دوم برای تمیز کردن از آب مقطر استفاده می‌کنیم. در بشر سوم هم‌جهت شستشو دوباره از آب مقطر استفاده می‌کنیم. در بشر چهارم برای چربی زدایی از استون استفاده کردیم. در نهایت شستشو در آب مقطر انجام شد و قطعه در حمام جهت آندایزینگ قرار دادیم.

آندایزینگ در یک سلول الکتروشیمیایی با حجم حمام ۳۰۰ میلی‌لیتر با اسیدسولفوریک ۱۰ درصد وزنی انجام گرفت. فولاد ضدزنگ در جایگاه کاتد و قطعه‌ی آلومینیمی در جایگاه آند قرار گرفت. پتانسیل اعمالی و جریان اعمالی به ترتیب ۲۰ ولت و ۵۹۳ آمپر بر دسی متر مربع تنظیم شد.



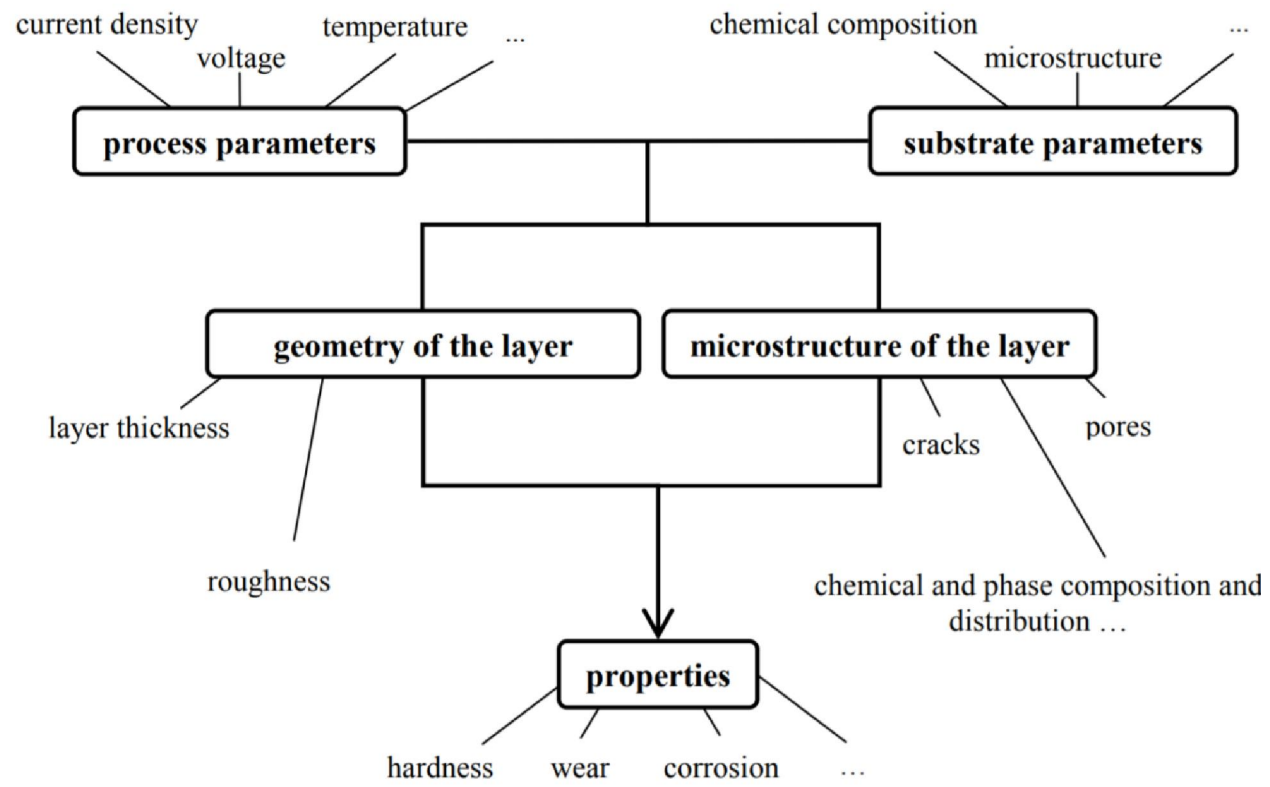
**ALUMINUM BATCH ANODIZING LINE**







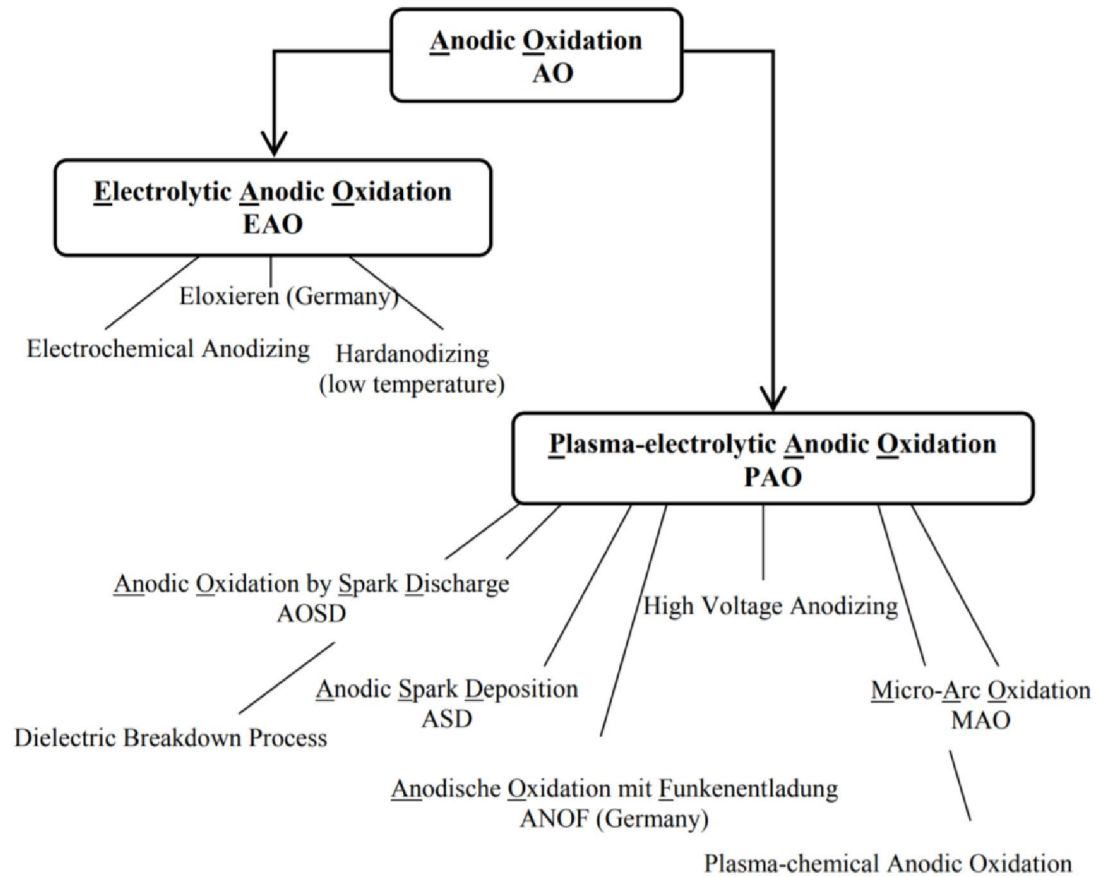




**Table 1.1:** Alumina oxide forms [39]

Name	Crystalline form	Density (g/cm <sup>3</sup> ) / Crystal system	Remark
Corundum	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	3.97 / hexagonal	found in nature
Boehmite	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$	3.44 / ortho-rhombic	
Gibbsite	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot(\text{H}_2\text{O})_3$	2.42 / monoclinic	
Diaspore	$\beta\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot(\text{H}_2\text{O})$	3.4 / ortho-rhombic	no occurrence in nature
Bayerite	$\beta\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot(\text{H}_2\text{O})_3$	2.53 / monoclinic	
Gamma alumina	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	/	anhydrous alumina with ill-defined structure

Metal	Anodizing ratio ( $\text{\AA}V^{-1}$ )
Tantalum	16.0
Niobium	22.0
Zirconium	20 ~ 27
Tungsten	18
Silicon	4 - 8
Aluminum	10.0 in 15 % sulfuric acid 11.8 in 2 % oxalic acid 11.9 in 4 % phosphoric acid 12.5 in 3 % chromic acid 13 ~ 13.7 in barrier-type electrolytes



- ۱- آندایزینگ در محلول اسید سولفوریک و اسید فسفریک چه تفاوتی دارد؟
- ۲- آیا زیرلایه آلومینیومی به صورت خالص و یا آلیاژی در اندازه حفرات موثر است؟
- ۳- بررسی خلاصه یک مقاله در مورد آندایزینگ (تحلیل نتایج)

# جلسه ششم

تست آبخاری

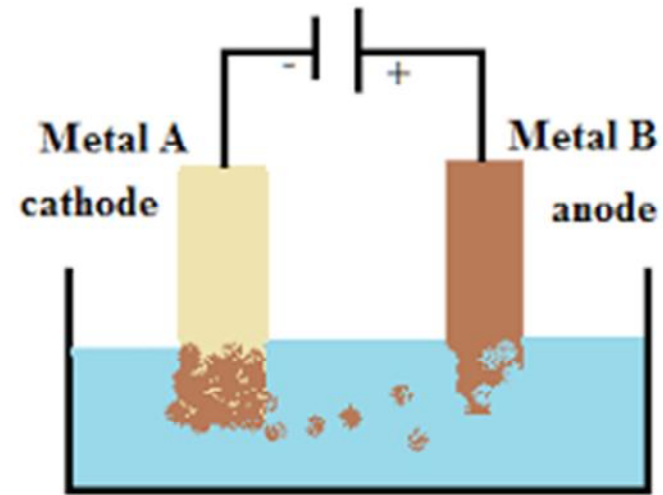
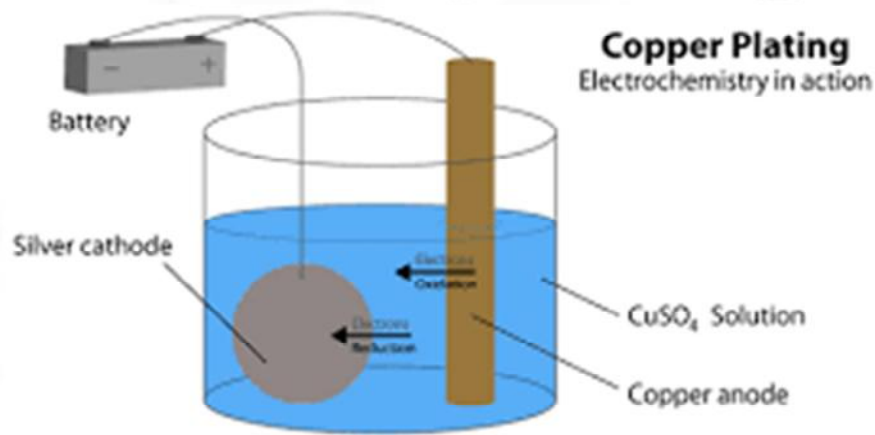
# رسوب دهی الکتریکی

آبکاری فرایند روکش دهی فلزی است که با احیا کاتیون به وسیله جریان الکتریکی و نشانیدن آن به صورت یک لایه روی ماده‌ای دیگر مانند فلز است. این فرایند برای افزایش ویژگی‌هایی مانند مقاومت در برابر سایش و خوردگی یا برای اهداف تزئینی به کار می‌رود.

کاتد قطعه‌ای است که قرارست لایه رویش بنشیند، و آند فلزی‌ست که روکش است. این دو به وسیله الکترولیت با هم ارتباط الکتریکی دارند و با به‌کاربردن یکسوکننده جریان مستقیم باعث انحلال اتم‌های آن می‌شود. در سوی دیگر، این اتم‌ها با احیا در فصل مشترک کاتد و الکترولیت، بر روی آن رسوب می‌کنند. سرعت انحلال اتم‌ها از آند و احیای آنها در کاتد برابر است.

# رسوب دهی الکتریکی

## Electroplating





# رسوب دهی الکتریکی

رسوب گذاری الکترولیتی یک روش قدرتمند جهت پوشش دهی سطح می باشد. خواص مهم رسوب های الکترولیتی شامل مقاومت سایشی، سختی، شکل پذیری، تخلخل، تنش های داخلی، چسبندگی پوشش و مقاومت به خوردگی است. همه این خواص و مشخصات می توانند به وسیله انتخاب مناسب یک تعدادی از متغیرها از قبیل دما، غلظت اجزاء، PH الکترولیت، چگالی جریان، شرایط جریان الکترولیت و استفاده از افزودنی های الکترولیت تغییر کنند. ایجاد یک پوشش سطح به روش رسوب گذاری الکترولیتی ممکن است شامل یک تعداد از فرآیندهای مهم باشد، شامل آماده سازی زیر لایه، تشکیل پوشش و پرداخت نهایی. به علاوه فلزات خالص، آلیاژها (دوگانه، سه گانه و پیچیده)، لایه های اکسید، پلیمرهای رسانا و لایه های کامپوزیت با استفاده از روش های الکترولیتی می توانند تولید گردند.

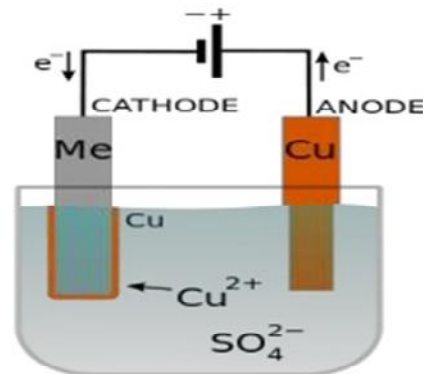
# رسوب دهی الکتریکی

یک محدوده وسیعی از کاربردهای مهندسی می‌توانند به وسیله روش رسوب گذاری الکترولیتی تولید گردند و شامل پوشش‌های رسانا برای صنعت الکترونیک، لایه‌های تریبولژیکال برای مهندسی مکانیک و ساختارهای نانو برای شبه رساناهای مغناطیسی مخصوص و کاربردهای بصری می‌باشد. پوشش‌ها به فلزی، کامپوزیت و آندی شده گروه‌بندی می‌گردند، که این گروه‌بندی با تأکید بر روی ارتباط بین شرایط فرایند و مشخصات رسوب می‌باشد.

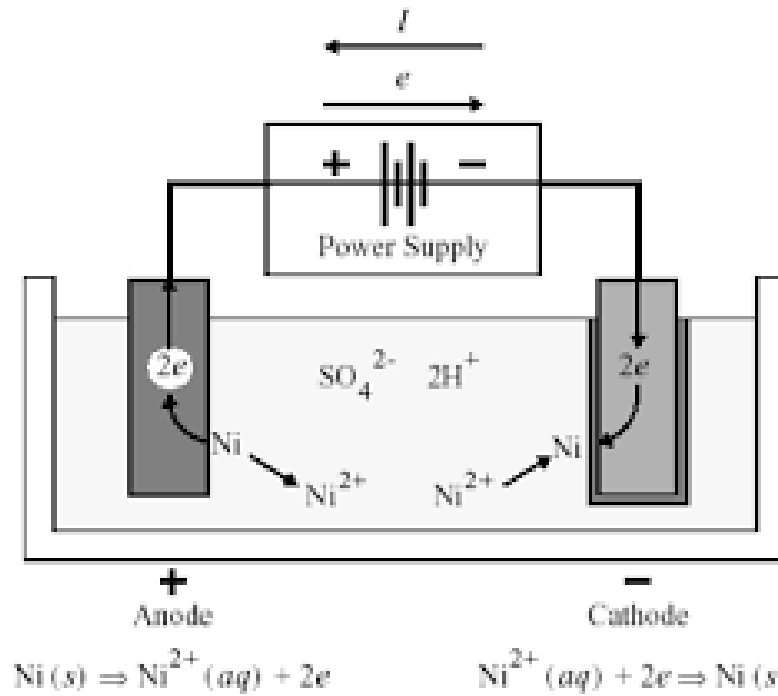
# رسوب دهی الکتریکی

## ELECTRODEPOSITION

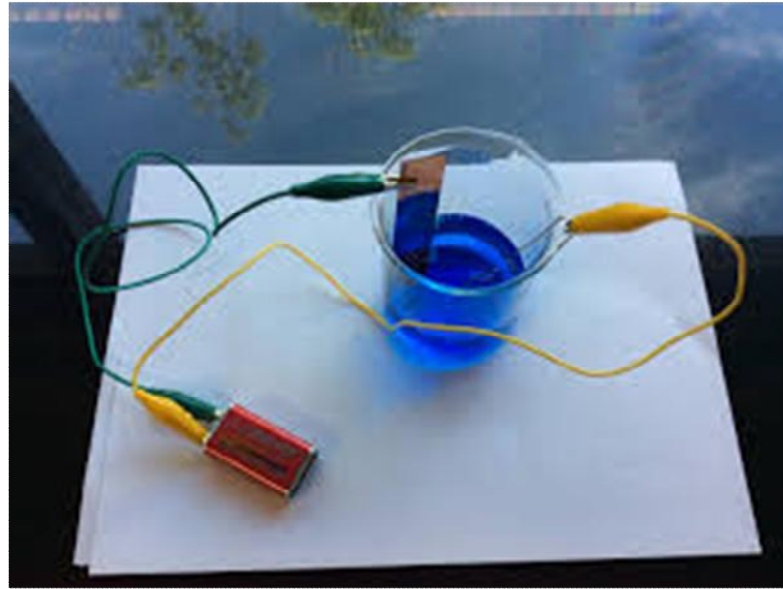
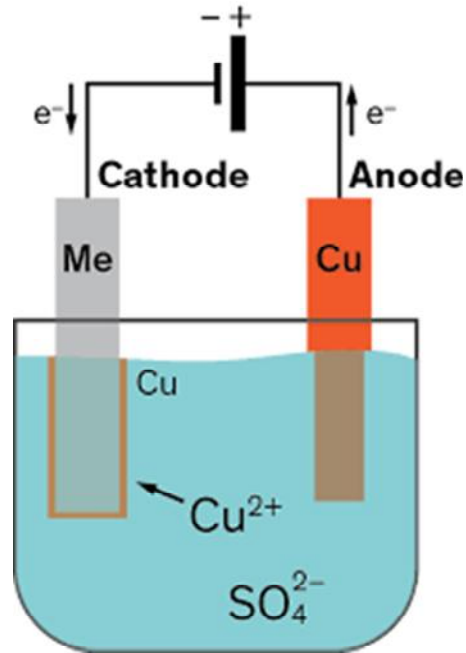
- Electroplating is often also called "electrodeposition".
- It's a process using electrical current to reduce cations of a desired material from a solution and coat that material as a thin film onto a conductive substrate surface.
- The overall process is also known as electrolysis.



# رسوب دهی الکتریکی



# رسوب دهی الکتریکی



## روش انجام آزمایش

درفرايند پوشش دهی سطح فلز باید کاملاً تمیز و صیقلی باشد که برای رسیدن به چنین شرایطی مراحل زیر را بر روی قطعه فولادی انجام دادیم:

۱- سمباده زنی (به کمک سمباده هایی با مش ۴۰۰ تا ۱۲۰۰) و سپس پولیش کاری.

۲- چربی زدائی به کمک محلول آستن.

۳- آبکشی در محلول آب مقطر.

۴- آبکشی مجدد در محلول آب مقطر.

۵- اسید شویی توسط محلول ۱۰٪ اسید سولفوریک ( برای این منظور قطعه به مدت ۵۰ ثانیه در محلول اسیدی قرار گرفت).

۶- آب کشی در محلول آب مقطر.

۷- آب کشی مجددا در محلول آب مقطر.

بعد از آماده سازی قطعه مورد نظر برای آماده سازی حمام مراحل زیر را انجام می‌دهیم:

۱- شستشوی کامل وان آبکاری قطعه مورد نظر.

۲- تهیه محلول حمام که شامل ترکیبات زیر است:

۲۰۰ سی سی آب مقطر

۷ گرم پودر سفید رنگ اسید بوریک

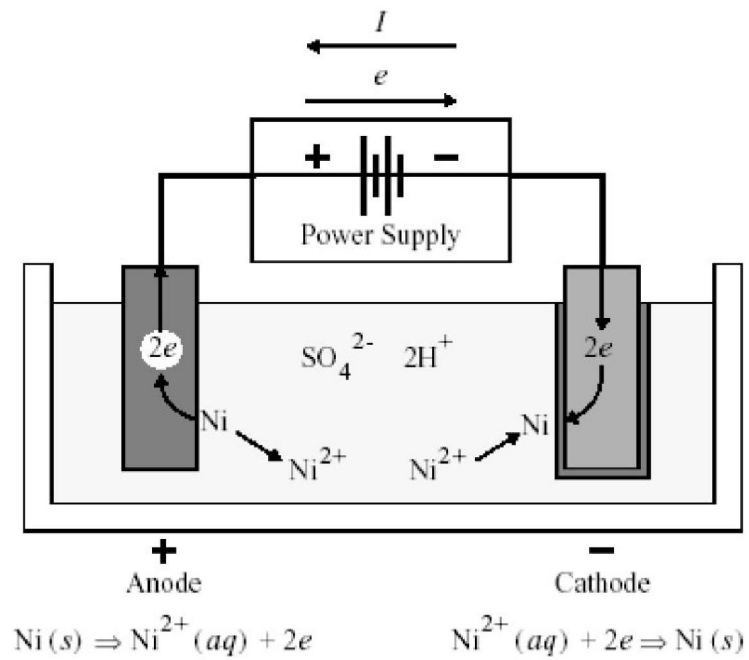
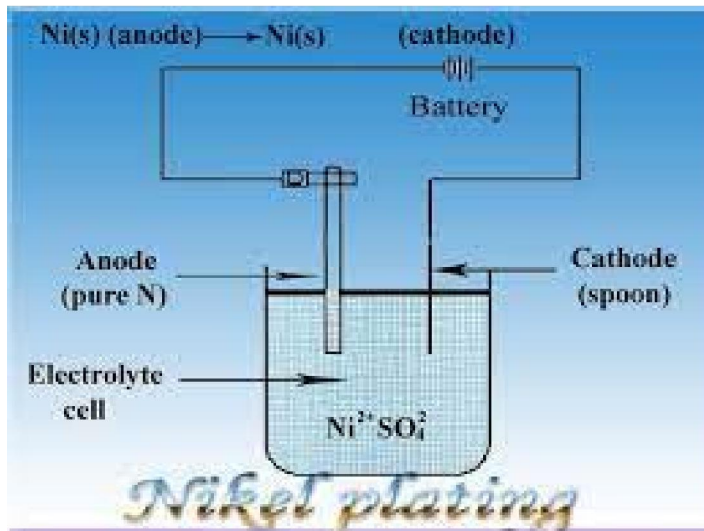
۹ گرم کلرید نقره

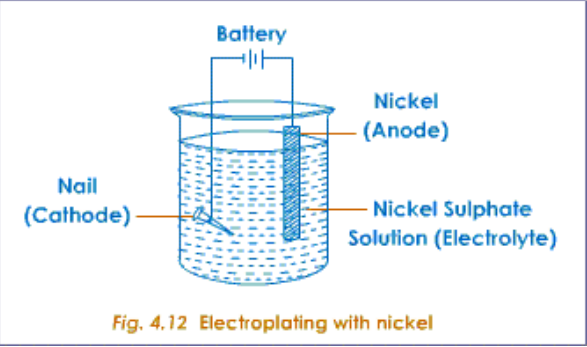
۵۶ گرم سولفات نیکل

<b>Components</b>	<b>Concentration</b>
Nickel sulfate	200 -300 g/L
Nickel chloride	50 g/L
Boric acid	40 g/L
pH	4 – 4.5

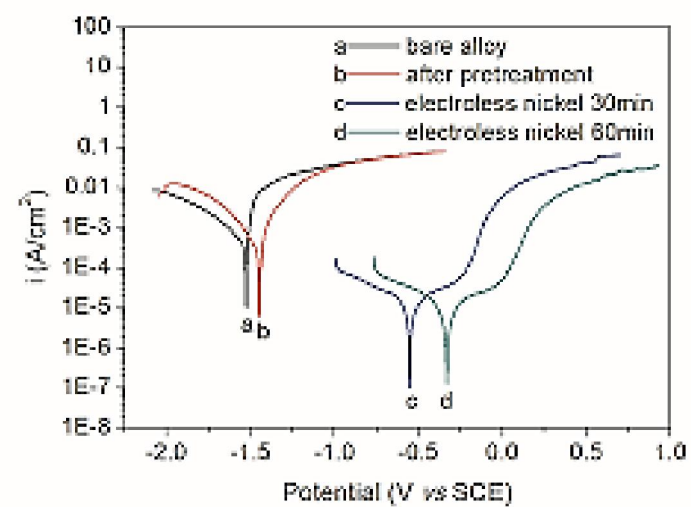
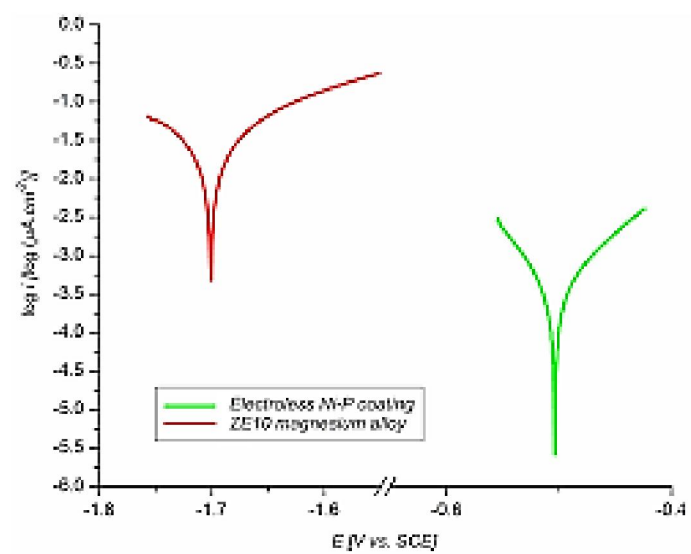


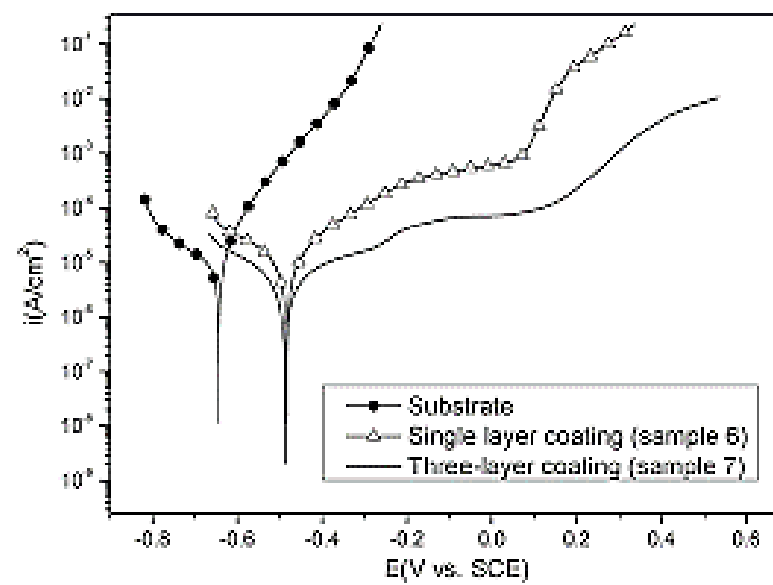
<b>Electroplating Condition</b>	<b>Standard Parameter</b>	<b>Actual parameter</b>
Temperature of electroplating	50 - 60°C	53°C
P.H of electrolyte	3.5 - 5	4.8
Size of bath	-	50 liters
Sample size	-	20cm x 2cm
Period of electroplating	Max. 30 min.	0.5-1 min.
Number of anodes	At least 2	2
Area of anodes	Double cathodes area at least	2 (625 cm <sup>2</sup> )
Area of the cathode (sample)	Less than anodes area	40 cm <sup>2</sup>
The cathodic current efficiencies CCE	High	89%
Nickel bath type	Watts bath	Commercial watts bath
Range of anode and cathode	Minimum 2.5cm	25 cm

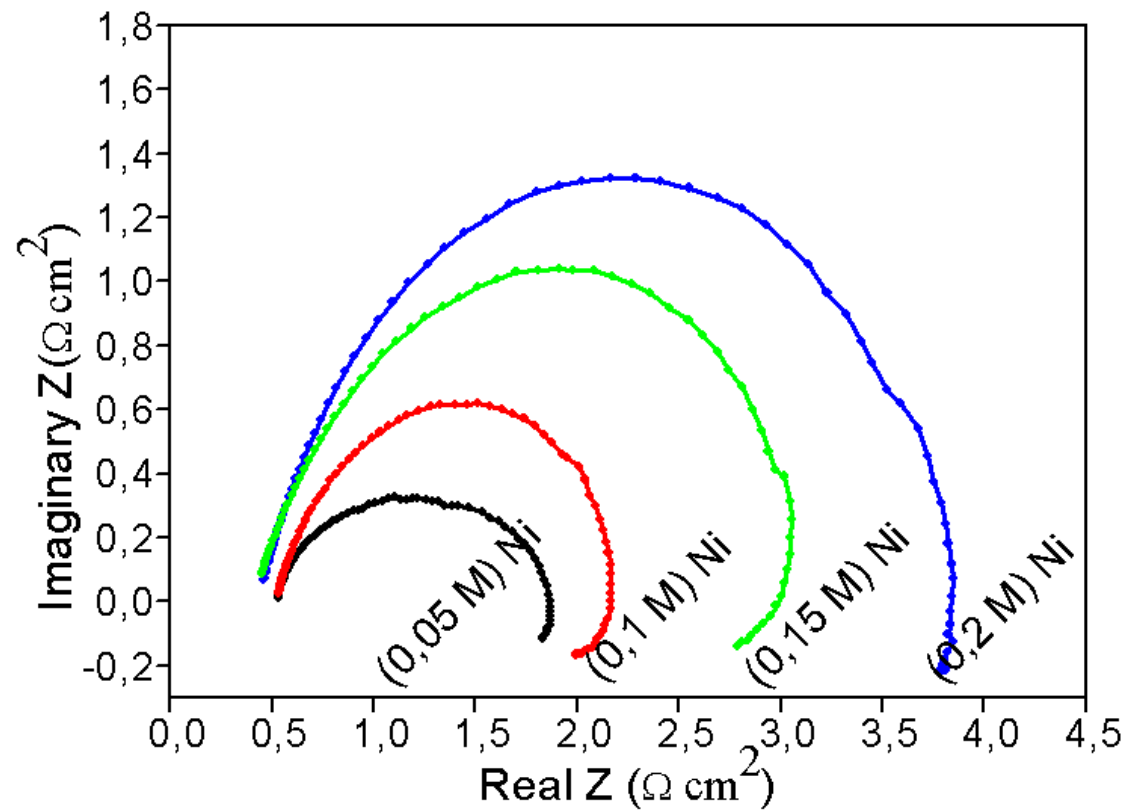












- ۱- بررسی خلاصه یک مقاله در مورد نتایج خوردگی یک پوشش نیکلی (تحلیل نتایج)
- ۲- کاربرد پوشش آبکاری نیکل در صنعت را نام ببرید؟
- ۳- چه جنس دیگری از پوشش آبکاری در صنعت میتواند مورد استفاده قرار گیرد؟