

## مطالعه مقاومت در مقابل خوردگی اتمسفری آلیاژ WE54

نقی پروینی احمدی، رسول آذری خسروشاهی و پرویز محمد پرتوی حلاج

**چکیده:** در این مقاله برای مطالعه خوردگی اتمسفری آلیاژ WE54، ابتدا بعد از یکسری مرجع شناسی محلول‌های خورنده انتخاب شدند. آزمایشات خوردگی نمونه‌ها در داخل محلول‌های مزبور ابتدا به روش پتانسیو استاتیک، سپس به روش اندازه‌گیری کاهش وزن انجام یافت. برای بررسی نوع خوردگی از میکروسکپ نوری استفاده شد. نتایج آزمایشات نشان می‌دهند که محیط‌های بسیار قلیایی کربناتی اثری روی این آلیاژ ندارد. در منطقه نزدیک pH خنثی عاری از یون‌های فلزات سنگین و کلرور این آلیاژ مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهد، در صورتی که در محیط‌های بسیار اسیدی حاوی یون‌های فلزات سنگین و محیط قلیایی کلریدی مقاومتی در مقابل خوردگی از خود نشان نمی‌دهد. نوع خوردگی حاکم در اکثر محلول‌ها به طور کلی خوردگی مرز دانه ای است. همراه این خوردگی در بعضی نقاط نمونه‌ها خوردگی حفره‌ای نیز مشاهده می‌شود که این خوردگی در مرحله پایانی آزمایش کاهش وزن در محیط کلریدی فراگیر می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** خوردگی اتمسفری، آلیاژ WE54، پتانسیو استات، خوردگی مرز دانه‌ای، خوردگی حفره‌ای

### ۱. مقدمه

آلیاژ WE54 به دلیل سبکی (حدود ۷۰٪ آلومینیم) و برخوردار بودن از استحکام ویژه بالاتر از آلومینیم و آلیاژهای آن‌ها اخیراً در صنایع هوافضا و خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرد [1-3]. این آلیاژ ضمن برخوردار بودن از خواص مکانیکی مطلوب در دمای محیط، در شرایط عملیات حرارتی  $T_6$  در دماهای بالا (حدود  $300^\circ\text{C}$ ) مقاومت خزشی خوبی از خود نشان می‌دهد [4-5]. در این مقاله خوردگی اتمسفری این آلیاژ مورد مطالعه قرار گرفت. بعد از یکسری مرجع شناسی محلول‌های کم و بیش خورنده باوای [6] به عنوان محلول‌های آزمایشات خوردگی الکتروشیمیایی مورد استفاده قرار گرفتند. باوای در مقاله خود نشان داده است که از مطالعه خوردگی الکتروشیمیایی نمونه‌های فلزی در این محلول‌ها نتایج بسیار خوبی حاصل می‌شود. س. داگبرت و همکارانش [7] محلول‌های مزبور را

نسخه اصلی مقاله در تاریخ ۱۳۸۲/۱۰/۲۸ و پس از بازنگری‌های لازم، در تاریخ ۱۳۸۳/۱۰/۲۹ به تصویب نهایی رسیده است.

سرپرستی داوری‌ها توسط دبیر تخصصی، دکتر گلستانی‌فرد صورت گرفته و مقاله توسط ایشان برای چاپ توصیه شده است.

دکتر نقی پروینی احمدی، دانشیار دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، [parvini@sut.ac.ir](mailto:parvini@sut.ac.ir)

دکتر رسول آذری خسروشاهی، استادیار دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، [khosroshahi@sut.ac.ir](mailto:khosroshahi@sut.ac.ir)

پرویز محمد پرتوی حلاج، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، [partovi@sut.ac.ir](mailto:partovi@sut.ac.ir)

در مطالعه خوردگی اتمسفری فولادهای گالوانیزه مورد استفاده قرار داده و نشان دادند که محلول‌های مزبور برای مطالعه اتمسفری نمونه‌ها بسیار معقول هستند.

### ۲. روش تحقیق و آزمایشات

نمونه‌های در ابعاد  $1 \times 1 \times 1$  سانتی متر، بعد از عملیات حرارتی  $T_6$  (هموژن سازی در  $525^\circ\text{C}$  به مدت ۸ ساعت، کوآینچ کردن در آب  $60^\circ\text{C}$  و عملیات رسوب سختی در  $250^\circ\text{C}$  به مدت ۱۶ ساعت) تا سمباده ۲۵۰۰ پولیش کاری شده، سپس در داخل الکل سفید توسط دستگاه اولتراسونیک تمیز شده، وزنشان اندازه‌گیری شد. بعد از غوطه‌ورسازی آن‌ها در محلول‌های خورنده در فواصل زمانی مشخص وزن آن‌ها مجدداً اندازه‌گیری شد. لازم به توضیح است که برای هر گروه آزمایش اندازه‌گیری کاهش وزن به ازای هر سانتیمتر مربع سطح نمونه مقدار ۴۰ میلی لیتر محلول به مدت بیست و چهار ساعت مورد استفاده قرار گرفت. قبل از اندازه‌گیری وزن، نمونه‌ها به مدت ۱ دقیقه در محلول حاوی ۱۸۰ گرم بر لیتر اسید کرومیک گرم قرار داده شد تا اکسیدهای تشکیل یافته از روی سطح نمونه‌ها زدوده شود [8-10].

اندازه‌گیری پتانسیو استاتیک نسبت به یک الکتروود کلرور پتاسیم اشباع (KCl 4.7 N) به کمک یک منبع تغذیه اتوماتیک برنامه‌ریزی شده (ساخت داخل) انجام یافت. بعد از تعیین پتانسیل تعادل هر یک از نمونه‌ها در محلول‌های آماده شده، پتانسیل آندی به مقدار  $+150$  میلی ولت به مدت ۶۰ دقیقه اعمال شد. بعد از انجام این

است که مشاهدات سطح نمونه بعد از ۵ روز غوطه‌وری در محلول مزبور نشان می‌دهد که سطح نمونه‌ها به صورت بسیار سطحی خشن شده است.

### ۳-۳. اثر محلول پ ( $\text{NaHCO}_3$ ۰/۰۱ مولار با $\text{pH} = ۸/۵$ )

هر چند که کاهش وزن نمونه‌ها در محلول مزبور در مقایسه با محلول الف ( $\text{pH} = ۱/۵$ ) حدود ۲۰ برابر کمتر است، ولی میزان خوردگی در این محلول همیشه ۲ برابر بیشتر از محلول ب ( $\text{pH} = ۵/۵$ ) است (شکل ۵، منحنی پ). از سوی دیگر مشاهده می‌شود که آهنگ تغییرات منحنی‌های پتانسیواساتیک و به‌ویژه منحنی-های کاهش وزن هر دو محلول شباهت بسیار زیادی به همدیگر دارند. هم‌چنین مشاهده می‌شود که میزان عبور جریان آندی (شکل ۷) در این محلول (محلول با  $\text{pH} = ۸/۵$ ) بسیار زیادتر از محلول ب است. از این رو می‌توان قبول کرد که قدرت هدایت این محلول سبب شدت بیشتر خوردگی نسبت به محلول قبلی شده است. علی‌رغم اینکه جریان در هر دو محلول سیر نزولی دارد. مشاهده یک خوردگی ضعیف در این محلول از یک طرف به  $\text{pH}$  قلیایی و عدم وجود یون‌های کلرور مربوط است. از سوی دیگر مورفولوژی سطح بعد از آزمایش پتانسیواساتیک (شکل ۸) نشان می‌دهد که سطح نمونه به صورت بسیار شدید اچ شده، به عبارت دیگر خوردگی مرزخانه ای اتفاق افتاده است. ولی مشاهدات سطح بعد از پنج روز غوطه‌وری در محلول مزبور نشان می‌دهد که سطح نمونه به صورت بسیار سطحی خشن شده است. به نظر می‌رسد که یک قشر هیدروکسید کربناتی روی سطح تشکیل یافته که سطح فلز را تا حدودی در مقابل خوردگی حفاظت می‌کند.

### ۳-۴. اثر محلول ج ( $\text{NaCl}$ ۰/۵ مولار با $\text{pH} = ۹/۵$ )

رفتار آلیاژ در این محلول با ۳ محلول قبلی بسیار متفاوت است. میکروگرافی سطح بعد از آزمایش پتانسیواساتیک نشان می‌دهد که محلول نمونه‌ها را پرداخت می‌دهد (شکل ۹). مشاهدات اولیه نشان می‌دهند که عموماً نوع خوردگی مرزخانه ای است. به همراه خوردگی مرزخانه ای آثاری از خوردگی حفره دار شدن نیز مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه یک جریان آندی بسیار شدید ولی با سیری کاهنده در ابتدای آزمایش بر سیستم حاکم است، ولی در انتهای آزمایش تغییرات افزایشنده و کاهنده جریان به صورت بسیار شدید مشاهده می‌شود (شکل ۱۰ الف و ب). علت رفتار مزبور بعد از آزمایش غوطه‌وری کاهش وزن نمونه‌ها آشکار شد. به طوری که از شکل ۵ منحنی ج مشاهده می‌شود کاهش وزن نمونه‌ها در چهار روز اول آزمایش در حد محلول ب و حتی کمتر از آن است. در صورتی-که در مرحله بعدی بدون اینکه از ضخامت نمونه‌ها کاسته شود وزن نمونه‌ها به شدت کاهش می‌یابد. مشاهدات سطح نمونه با چشم غیر مسلح نشان می‌دهد که تمام سطوح نمونه‌ها (سطوح

آزمایش، بلافاصله سطح نمونه‌ها توسط یک میکروسکپ نوری نوع OLYMPUS PMG3 مورد بررسی قرار گرفت. ترکیب شیمیایی و  $\text{pH}$  محلول‌هایی که در این آزمایشات مورد استفاده قرار گرفتند به شرح زیر است:

الف)  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ۰/۱ نرمال،  $\text{ZnSO}_4$  ۰/۱ مولار یا  $\text{pH} = ۱/۵$

ب) اسید پتاسیم فتالات با  $\text{pH} = ۵/۵$ . تنظیم  $\text{pH}$  توسط  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ، ۰/۰۱ مولار

پ)  $\text{NaHCO}_3$ ، ۰/۰۱ مولار با  $\text{pH} = ۸/۵$ . تنظیم  $\text{pH}$  توسط  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ، ۰/۰۱ مولار

ج)  $\text{NaCl}$ ، ۰/۵ مولار با  $\text{pH} = ۹/۵$

د)  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ، ۰/۱ مولار با  $\text{pH} = ۱۱/۵$

مشخصه‌های بسیار مهم این محلول‌ها عبارتند از:  $\text{pH}$ : (مابین ۱/۵ تا ۱۱/۵) و وجود و یا عدم وجود بعضی عناصر مثل کلرورها (محلول ج)، کربنات‌ها (محلول د) و یا فلزات سنگین (محلول الف)، محلول‌هایی با این شرایط می‌توانند نقش یک محیط زیست کم و بیش آلوده را بازی نمایند. بدین ترتیب این محلول‌ها سبب یکسری واکنش‌های فیزیکو شیمیایی می‌شوند که این واکنش‌ها می‌توانند مشابه واکنش‌های جاری در محیط زیست طبیعی زندگی امروزی باشند.

## ۳. نتایج آزمایشات و بحث

### ۳-۱. اثر محلول الف ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ۰/۱ نرمال، $\text{ZnSO}_4$ ۰/۱ مولار یا

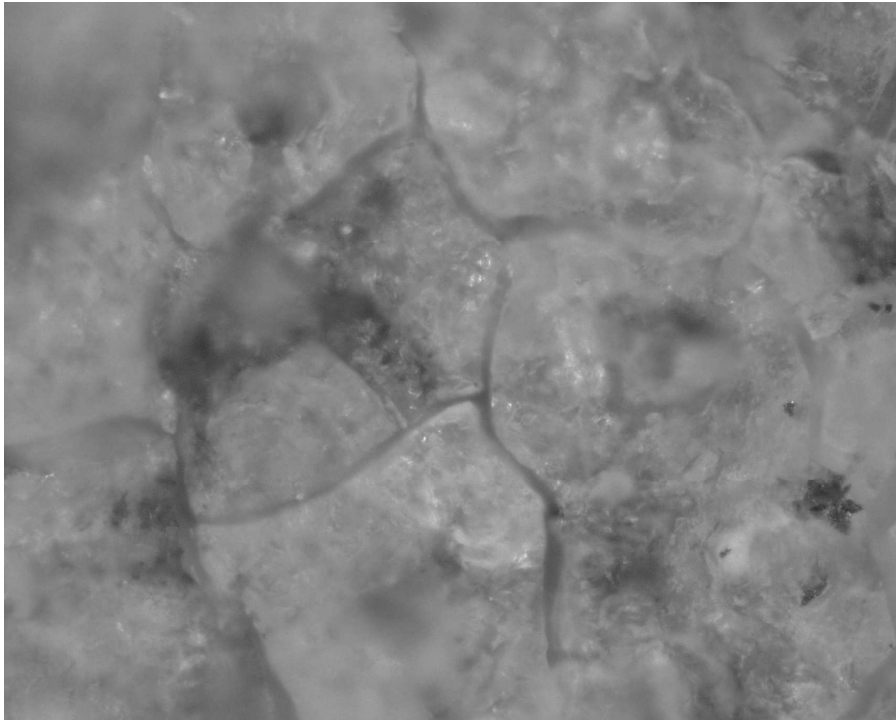
$\text{pH} = ۱/۵$  )

آلیاژ در محلول مزبور به شدت خورده می‌شود. مشاهدات میکروسکوپی بعد از آزمایش پتانسیواساتیک نشان می‌دهند که خوردگی مرزخانه ای به وقوع پیوسته است (شکل ۱).

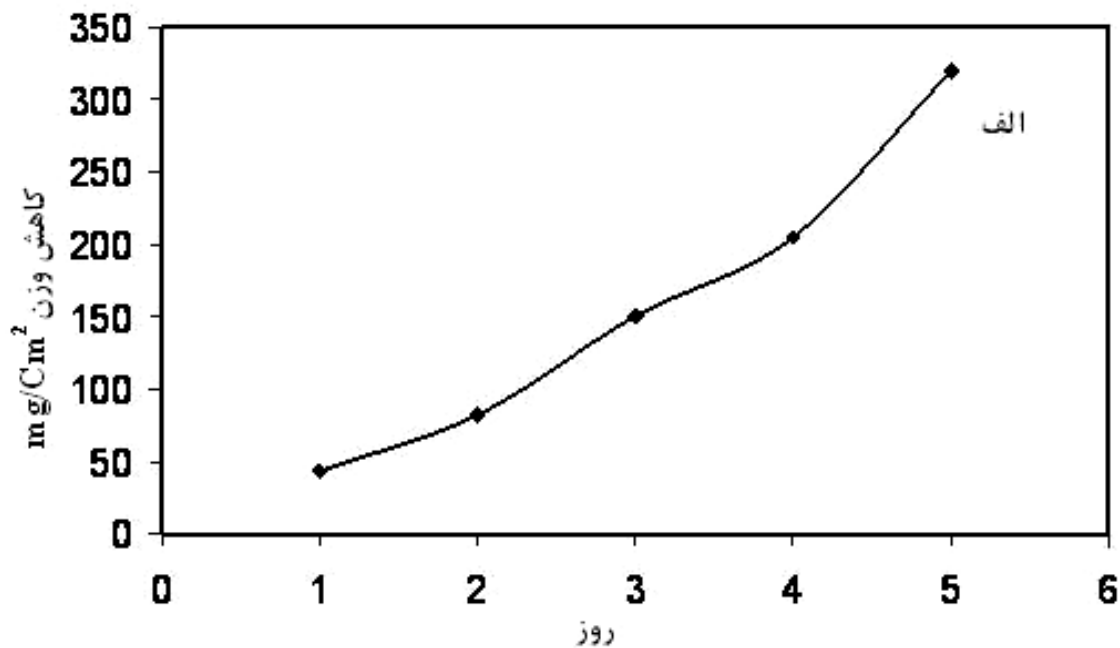
نتایج آزمایش غوطه‌وری نشان می‌دهد که وزن نمونه‌ها در محلول مزبور به شدت کم می‌شود (شکل ۲). با اعمال یک پتانسیل آندی ثابت ( $+۱۵۰\text{mV}$ ) جریان آندی نمونه‌ها نیز تقریباً به صورت خطی در محدوده نشان داده شده در شکل ۳ افزایش می‌یابد. مشاهدات مزبور را می‌توان طبیعی تلقی کرد زیرا محلول یک  $\text{pH}$  بسیار اسیدی داشته، حاوی فلز سنگین مثل روی است.

### ۳-۲. اثر محلول ب ( اسید پتاسیم فتالات با $\text{pH} = ۵/۵$ )

اثر خوردگی این محلول به مراتب کمتر از محلول قبلی است (محلول الف). مشاهده می‌شود که در نتیجه اعمال یک پتانسیل آندی ثابت ( $+۱۵۰\text{mV}$ ) جریان آندی کاهش می‌یابد (شکل ۴). در نتیجه، کاهش وزن نمونه‌ها نیز در این محلول حدود ۵۰ برابر کمتر از محلول قبلی است (شکل ۵ منحنی ب). ولی به طوریکه شکل ۶ نشان می‌دهد نوع خوردگی با نتایج آزمایش قبلی کمی متفاوت است. به نظر می‌رسد در شرایط مزبور نیز خوردگی مرزخانه ای اتفاق افتاده ولی عمق شیارها بسیار سطحی می‌باشند. لازم به توضیح



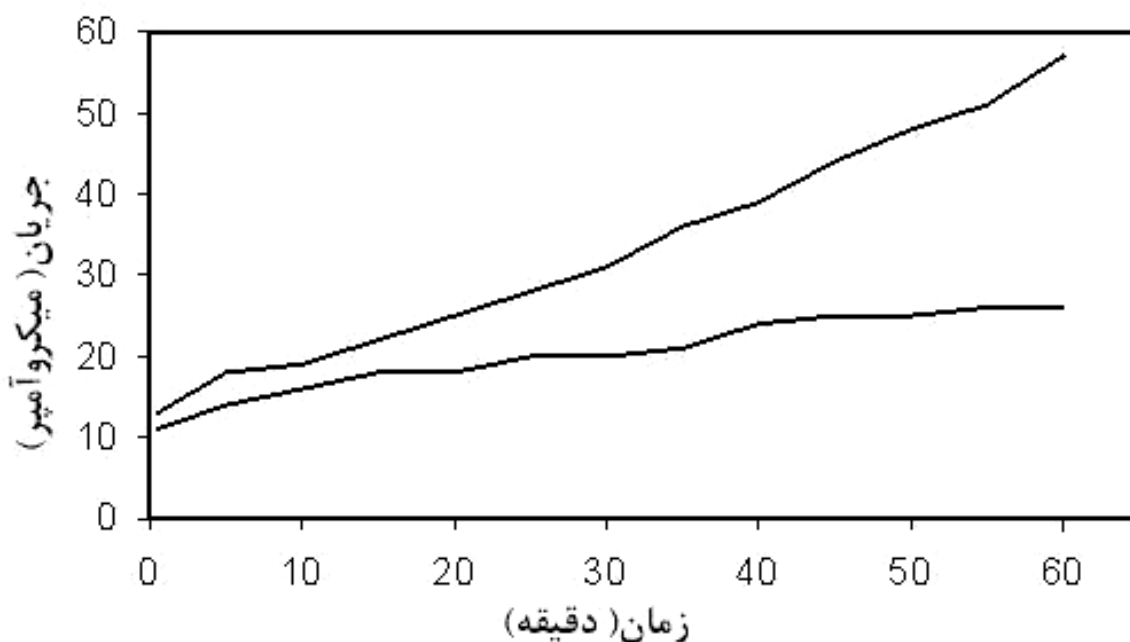
شکل ۱. میکروگرافی نمونه بعد از آزمایش پتانسیو استاتیک در محلول الف به مدت یک ساعت.  $\times 200$



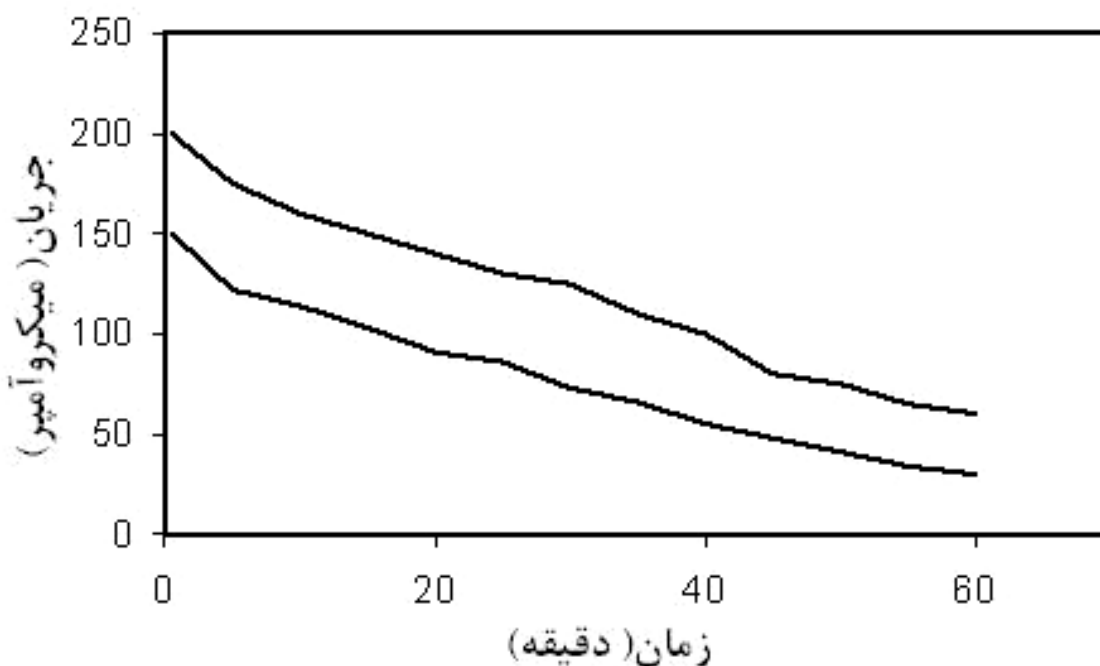
شکل ۲. کاهش وزن نمونه بعد از آزمایش غوطه وری در محلول الف ( $\text{pH}=1/5$ )

خوردگی مرزخانه ای در روی نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود. خوردگی نمونه‌ها در این محلول در روزهای اول بسیار سطحی و حتی قابل صرف نظر کردن می‌باشد، در صورتی که از روز چهارم به بعد یک خوردگی شدید روی نمونه‌ها اتفاق می‌افتد که به صراحت می‌توان گفت که آلیاژ WE54 در محیط مزبور اصلاً مقاومت ندارد. عامل

افقی و عمودی) متخلخل شده اند. به عبارت دیگر خوردگی حفره دار شدن روی سطوح نمونه‌ها اتفاق افتاده است. نتایج این مطالعه را می‌توان بدین شرح خلاصه کرد: هر چند که خوردگی مرزخانه ای در مراحل اولیه آزمایشات بر سیستم حاکم است ولی در مراحل پایانی خوردگی حفره دار شدن فراگیر می‌شود، به طوری که آثاری از



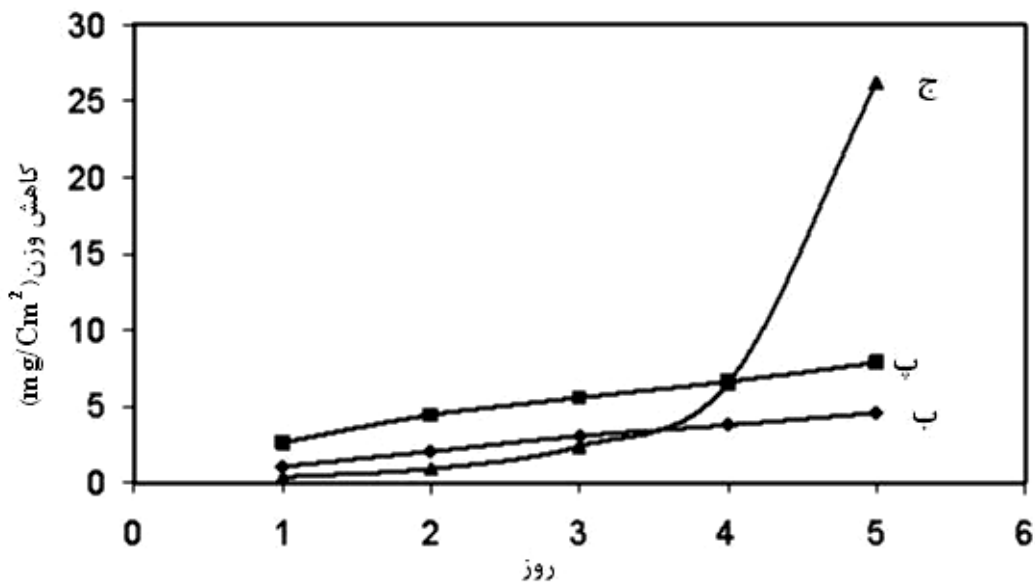
شکل ۳. تغییرات جریان آندی (ما بین دو منحنی) نمونه در محلول الف (pH=1/5)



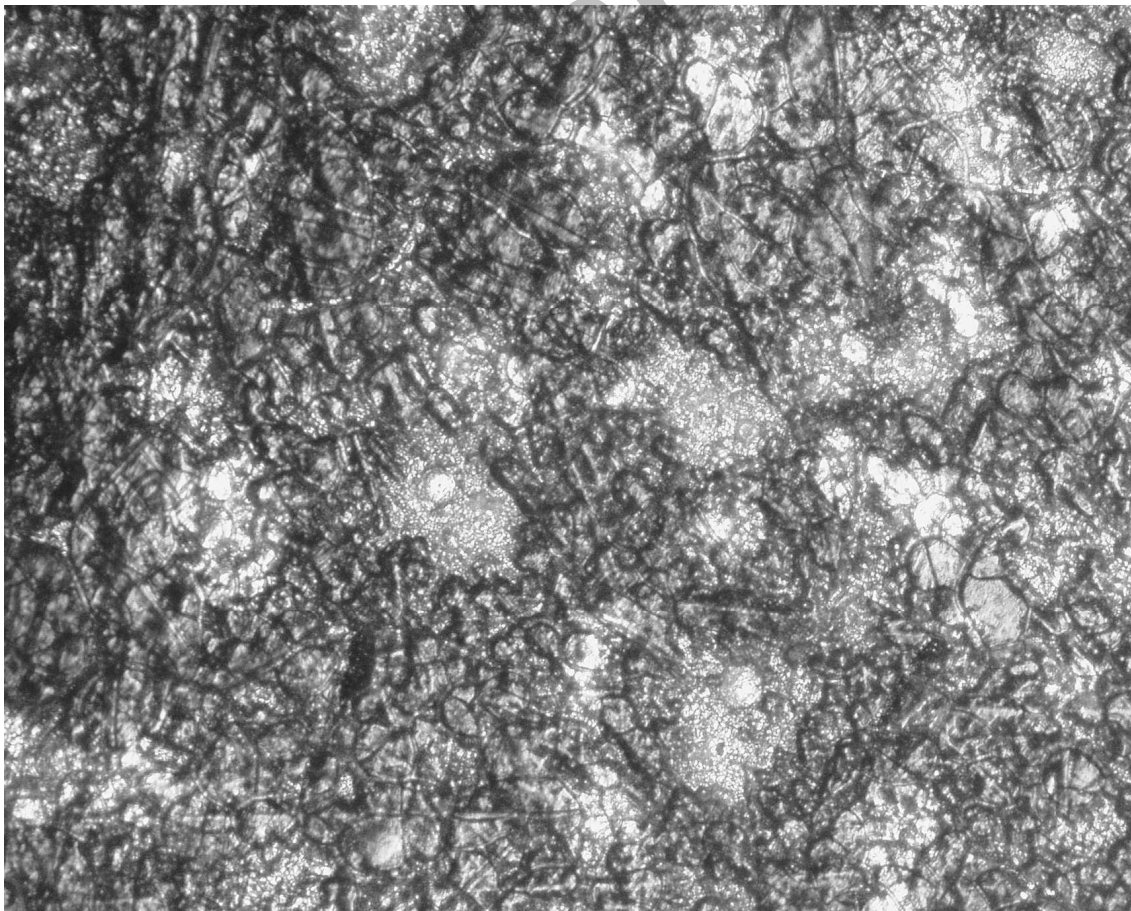
شکل ۴. تغییرات جریان آندی (ما بین دو منحنی) نمونه در محلول ب (pH=5.5)

می‌توان قبول کرد که مرحله حفره داری شدید در این مرحله اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر در شرایط رسم این منحنی (شکل ۱۰)، ۲۲۰ دقیقه معادل چهار روز آزمایش غوطه‌وری کاهش وزن است.

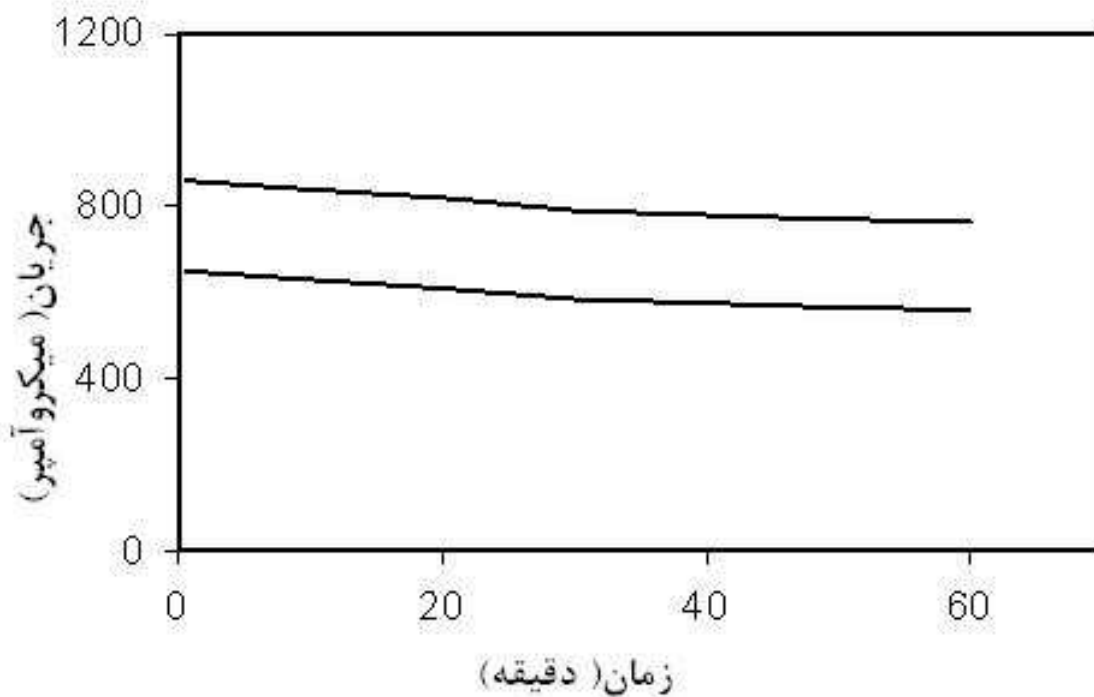
اصلی خوردگی در این محلول یون‌های کلر است. از سوی دیگر به طوری که از شکل ۱۰ الف و ب مشاهده می‌شود، بعد از حدود ۲۲۰ دقیقه آزمایش پتانسیواستاتیک افت شدید جریان اتفاق افتاده سپس تغییرات جریان به صورت باریکه‌های متناوب ادامه می‌یابد. از این رو



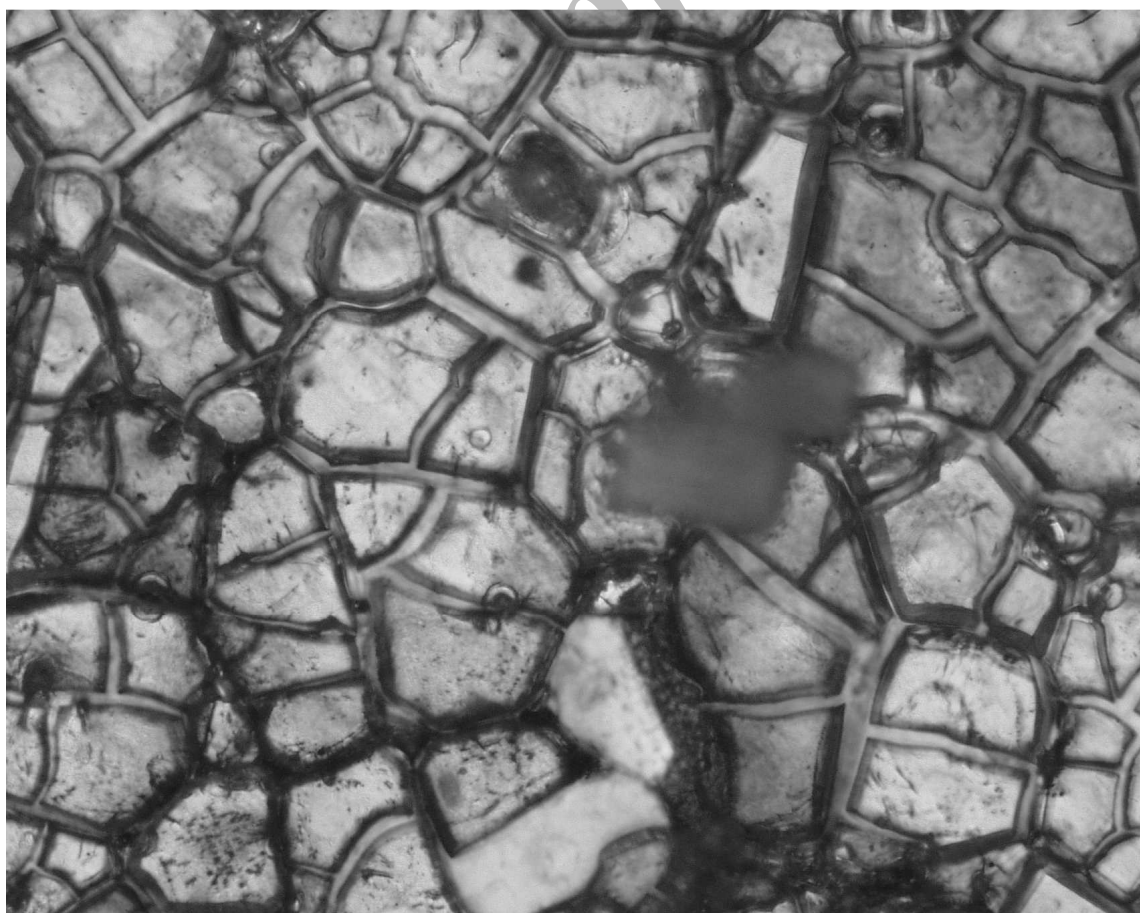
شکل ۵. کاهش وزن نمونه‌ها بعد از آزمایش غوطه‌وری. منحنی ب) محلول با pH=۵/۵، منحنی پ) محلول با pH=۸/۵، منحنی ج) محلول با pH=۹/۵



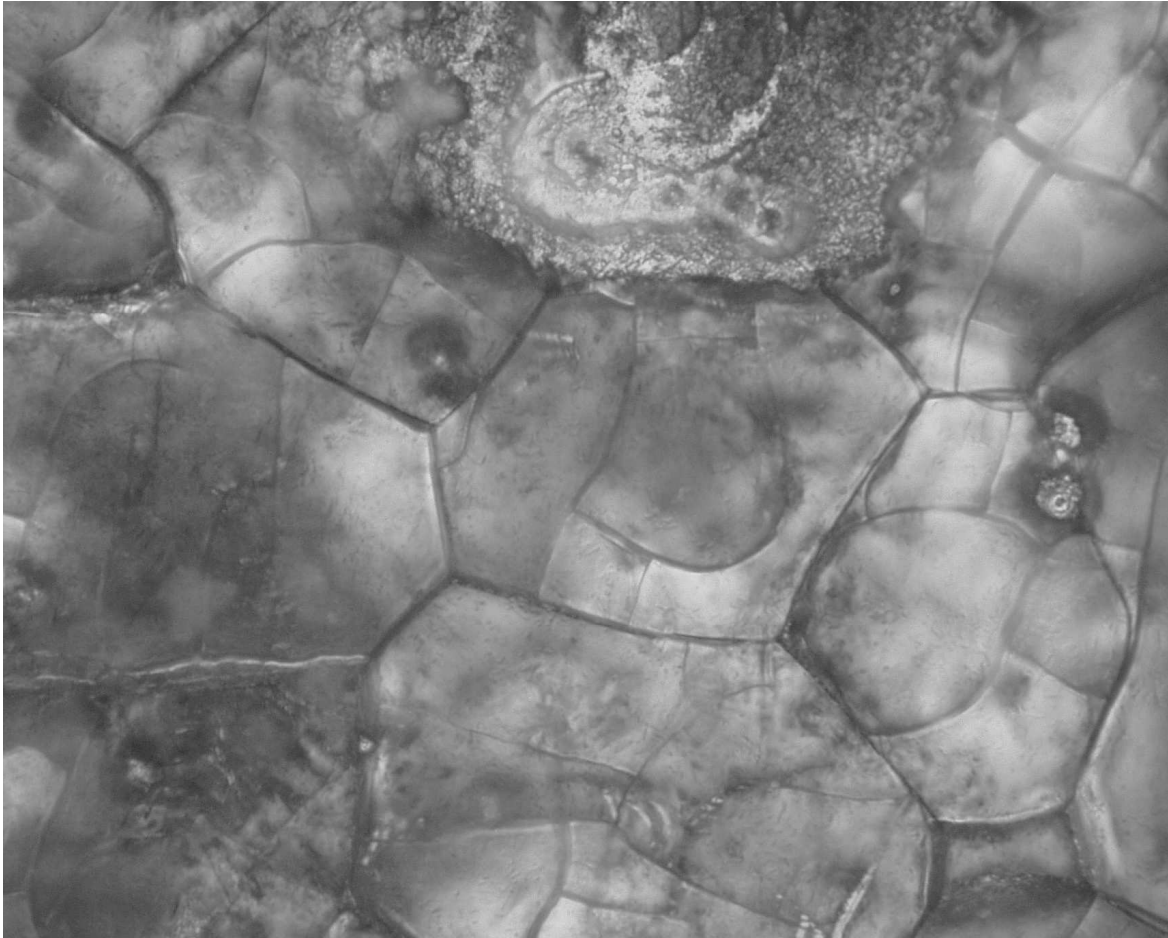
شکل ۶. میکروگرافی نمونه بعد از آزمایش پتانسیو استاتیک در محلول ب به مدت یک ساعت. ۲۰۰×



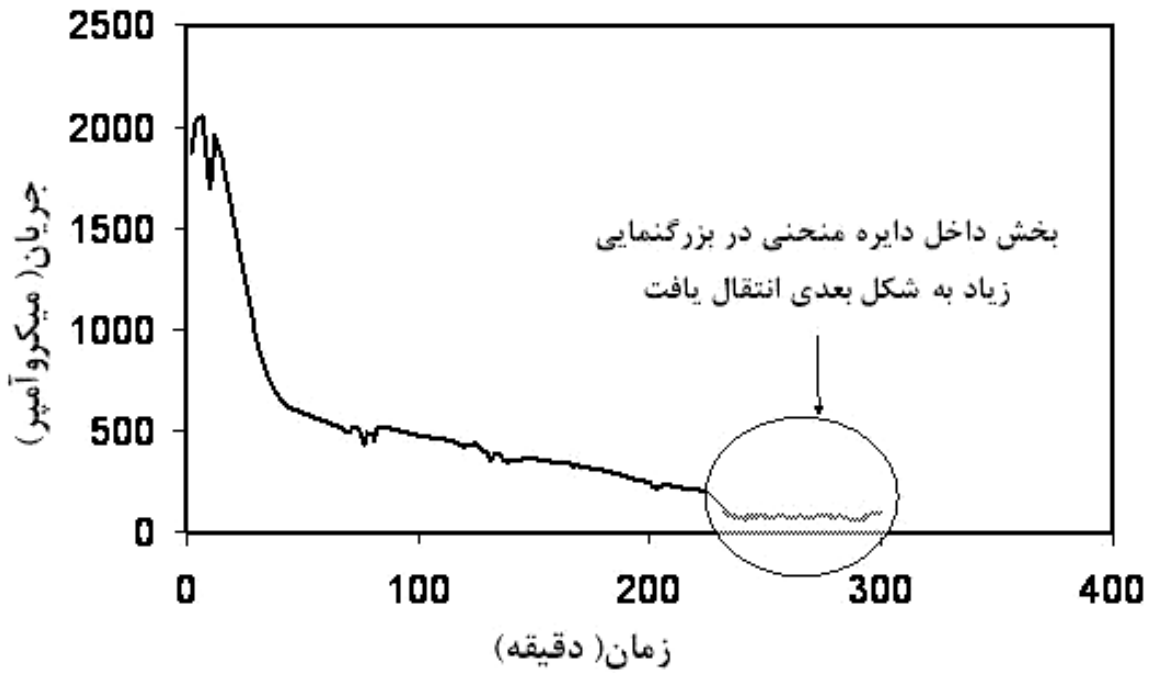
شکل ۷. تغییرات جریان آنودی (ما بین دو منحنی) نمونه در محلول پ (pH=۸/۵).



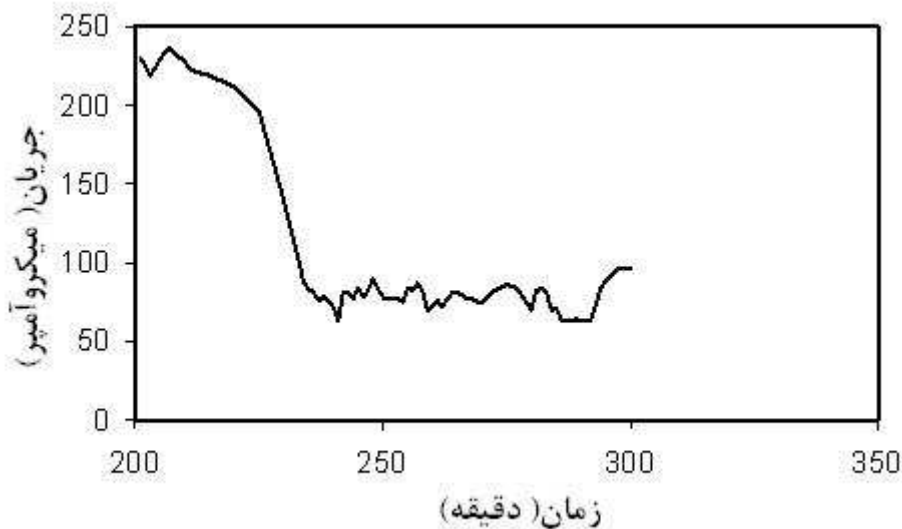
شکل ۸. میکروگرافی نمونه بعد از آزمایش پتانسیواستاتیک در محلول پ به مدت یک ساعت. ×۲۰۰



شکل ۹. میکروگرافی نمونه بعد از آزمایش پتانسیواستاتیک در محلول ج به مدت یک ساعت.  $\times 500$



شکل ۱۰ الف. تغییرات جریان آندی نمونه در محلول پ (۵ / ۹ pH).



شکل ۱۰. ب. تغییرات جریان آندی نمونه در محلول پ (۹/۵ pH).

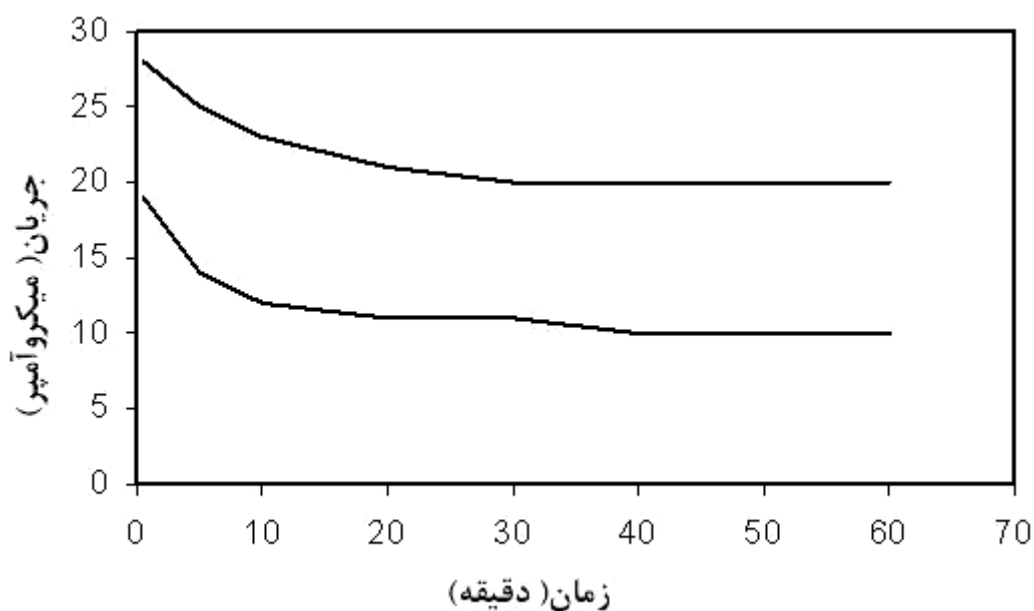
#### ۴. نتیجه‌گیری

مطالعات انجام یافته را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- ۱- از آزمایشات متفاوت نتایج متشابه حاصل می‌شود.
- ۲- آلیاژ WE54 در محیط بسیار اسیدی (pH=۱/۵) حاوی یون‌های فلزات سنگین (Zn) و در محیط قلیایی کلریدی به شدت خورده می‌شود.
- ۳- میزان خوردگی این آلیاژ در مناطق نزدیک pH خنثی (۸/۵-۵/۵) عاری از یون‌های فلزات سنگین و کلرور بسیار کم است.
- ۴- در محیط کربناتی با درجه قلیایی زیاد اثری از خوردگی روی این آلیاژ مشاهده نمی‌شود.

#### ۳-۵. اثر محلول د (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>، ۰/۱ مولار با pH=۱۱/۵)

در این محلول اثری از خوردگی روی نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود. آزمایش غوطه‌وری نیز نشان می‌دهد که بعد از ۲۴۰ ساعت غوطه‌وری وزن نمونه‌ها کاهش نمی‌یابد جریان آندی در شرایط مشابه به شدت کاهش می‌یابد (شکل ۱۱).  
عدم خوردگی نمونه‌ها در شرایط مزبور از یک طرف به pH زیاد و از طرف دیگر به عدم وجود کلرور در محلول مورد آزمایش و به احتمال زیاد به تشکیل یک لایه بسیار نازک هیدروکسید کربناتی مربوط است.



شکل ۱۱. تغییرات جریان آندی (ما بین دو منحنی) نمونه در محلول د (۱۱/۵ pH)



*corrosion atmosphérique des revêtements base de zinc*”, Métaux corrosion, volume 55, p.346-369.1981,.

[7] Dagbert C., Boulif R. and Gabrillae J., “*Influence des éléments d'addition présents dans les bains de galvanisation sur la résistance a la corrosion atmosphérique d'aciers galvanisés*” Matériaux et techniques, Juillet-août 1990, pp.11-16.

[8] Mathieu S., Rapin C., Haza J. and Steinmetz P., “*Corrosion behavior of high pressure die-cast and semi-solid cast AZ91D alloys*”, Corrosion Science, 44(2002), 2737-2756.

[9] Daloz D., Steinmetz P. and Michot G., “*Corrosion behavior of solidified magnesium-aluminum-zinc alloys*”, Corrosion, 53(12), (1993), 944-954.

[10] ASM Metals Handbook, Ninth editions, Vol. 13, *Corrosion*, Page 742, 1987.

### مراجع

[1] Leontis T.E., “*The properties of sand cast magnesium rare earth alloys*”, Trans. Aime, 1949, 185, 968.

[2] Unsworth W., “*The role of rare earth elements in the development of magnesium base alloys*” International journal of materials and product technology, 1989, 359.

[3] Suto T., Takahashi I., Tezuka H. and Kamio A., “*Precipitation structures of Mg-Y alloys*”, Journal of Japan Institute of Light metals, 1992, 42(12), 804-809.

[4] King J.F. and Thistlethwaite S., “*New corrosion resistant wrought magnesium alloys*”, DGM informationsgesellschaft verlag, 1992, B.L. Mordike and F. Helmann, eds. 327-334

[5] Khosroshahi R. A., *Ph.D. thesis*, 1997, University of Manchester.

[6] Bavay J.C., Maille P., Dreulle N. and Dreulle P., “*Une méthode électrochimique pour contrôla de la résistance a la*

Archive of SID