

ارزیابی رفتار خوردگی تیتانیوم خالص تجارتي در محیط‌های شبيه‌سازی شده بدن با استفاده از تکنیک الکتروشیمیایی امپدانس (EIS)

فرهاد غروی^۱ و عبدالله افشار^۲

۱- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی

۲- استاد، دانشگاه صنعتی شریف تهران

Farhad_gharavi@yahoo.com

چکیده

در این تحقیق با بررسی ماهیت و رفتار فیلم روئین تشکیل شده بر روی سطح تیتانیوم خالص تجارتي (CP Ti)، رفتار خوردگی تیتانیوم خالص تجارتي در محلول‌های شبيه‌سازی شده Ringer و PBS مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. بررسی‌ها در پتانسیل خوردگی (E_{Corr}) و در زمان‌های مختلف انجام شد. با بررسی طیف‌های امپدانس توسط نرم‌افزار Zsimp3.2 مدار معادل فرآیند مشخص گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که فیلم روئین تشکیل شده در محلول شبيه‌سازی شده Ringer از فشردگی و یکنواختی بیشتری نسبت به محلول PBS برخوردار می‌باشد. فیلم روئین تشکیل شده در محلول شبيه‌سازی شده Ringer در پتانسیل خوردگی دارای مقاومت (R_p) بالاتر و ظرفیت خازنی (C_p) کمتر نسبت به محلول PBS می‌باشد. در فصل مشترک فیلم روئین و محلول‌های شبيه‌سازی شده، یک حالت دی‌الکتریک برقرار بوده که این حالت دی‌الکتریک در محلول Ringer بیشتر از محلول PBS می‌باشد. فیلم روئین تشکیل شده در محلول Ringer نسبت به محلول PBS در پتانسیل خوردگی از ضخامت بیشتر، سرعت رشد کمتر و دوام و پایداری بیشتری با گذشت زمان برخوردار می‌باشد.

واژه‌های کلیدی:

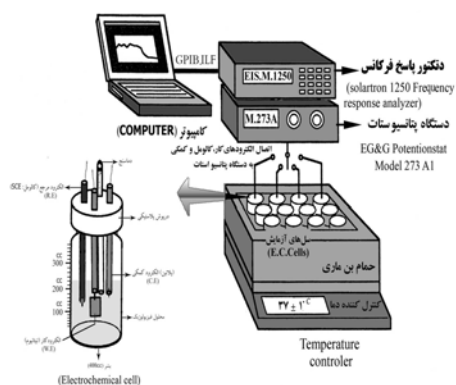
تیتانیوم خالص تجارتي، خوردگی، فیلم روئین، محیط‌های شبيه‌سازی شده بدن، طیف نگاری الکتروشیمیایی امپدانس (EIS).

۱- مقدمه

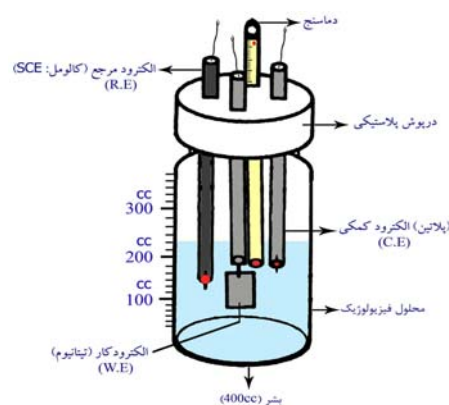
افزون‌تر کرده است. تیتانیوم و آلیاژهای آن در هنگام قرارگیری در محیط‌های شبيه‌سازی شده به‌خصوص در حضور اکسیژن به‌طور خود به خودی یک فیلم اکسید سطحی بر روی سطح آنها تشکیل خواهد شد.

این فیلم اکسیدی دارای ضخامتی در حدود چند نانومتر و معمولاً دارای ترکیب دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) آمورف می‌باشد.

تیتانیوم و آلیاژهای آن از مهمترین مواد کاشتنی (Implants) مورد استفاده در بدن انسان می‌باشد چرا که با داشتن خصوصياتی همچون مقاومت به خوردگی خوب، خواص مکانیکی مطلوب و سازگاری زیستی آن با بدن انسان به‌علت عدم تولید هیچ‌گونه واکنش‌های مضرى در بدن انسان کاربرد آنها را روز به روز



شکل (۲): تجهیزات به کاررفته جهت ارزیابی خوردگی.



شکل (۱): شمایی از سل مورد استفاده.

طیف نگاری الکتروشیمیایی امپدانس (EIS) می‌باشد. از این تکنیک جهت بررسی و مطالعه رفتار روئین شوندگی خود به خود فلزات در الکترولیت‌ها تغییرات ایجاد شده در فیلم‌های اکسیدی محافظ سطح تشکیل شده بر روی فلزات و آلیاژها، استفاده می‌کنند.

۲- روش تحقیق

جهت تهیه الکتروود کاری از ورق تیتانیوم خالص تجارتي با ترکیب شیمیایی مطابق جدول (۱) نمونه‌هایی با سطح مقطع $1 \times 2 \times 2$ میلی‌متر بریده شد و سپس با استفاده از کاغذ سنباده‌های SiC با شماره‌های ۲۴۰، ۳۶۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ در نهایت توسط دوغاب آلومینای ۰/۵ میکرون تا حاصل شدن یک سطح صاف و صیقلی پولیش شدند.

هر کدام از نمونه‌ها جهت غوطه‌ور کردن در درون محلول‌ها به یک سیم مسی متصل شدند. محل اتصال نمونه‌ها با سیم مسی جهت جلوگیری از اتصال گالوانیک، توسط یک چسب عایق پوشانده شدند. یک الکتروود کالومل اشباع و یک الکتروود پلاتین به ترتیب به‌عنوان الکتروود مرجع و الکتروود کمکی به کار گرفته شدند. میزان pH محلول Ringer برابر با ۷/۸ و مقدار pH محلول PBS برابر با ۸ تعیین گردید.

زمان‌های در نظر گرفته شده جهت انجام آزمایشات برابر با ۱، ۳، ۵، ۱۵، ۱۹، ۲۴، ۳۰، ۴۰، ۴۸، ۷۲ ساعت در نظر گرفته شد.

در کاربردهای پزشکی ترکیب شیمیایی و پایداری لایه محافظ سطحی بسیار مهم بوده چرا که سطح مواد کاشتنی در تماس مستقیم با محیط شبیه‌سازی شده و بافت‌های بیولوژیک قرار خواهد داشت. خوردگی و انحلال فیلم اکسیدی محافظ سطحی دو مکانیزمی می‌باشند که می‌توان برای آزاد شدن یون‌های فلزی در بدن انسان بیان نمود. آزاد شدن یون‌های فلزی در بدن می‌تواند تولید واکنش‌های خطرناکی با بافت‌های مجاور نمایند. بنابراین تولید این واکنش‌های خطرناک باعث عدم سازگاری زیستی مواد کاشتنی در بدن انسان خواهد شد.

بررسی‌ها نشان داده‌است که فیلم اکسید محافظ تشکیل شدن بر روی سطح تیتانیوم و آلیاژهای آن در محیط‌های و پایداری آن، نقش بسیار مهمی در شناسائی رفتار و مقاومت به خوردگی تیتانیوم و آلیاژهای آن که به‌عنوان مواد کاشتنی در بدن به کار می‌روند، ایفا می‌کند. بنابراین خوردگی و به تناسب آن انحلال فیلم‌های محافظ تشکیل شده بر روی تیتانیوم و آلیاژهای آن از جمله پارامترهای مهمی می‌باشند که در استفاده از این گونه مواد کاشتنی بایستی مورد توجه قرار بگیرند.

لذا با بررسی رفتار و سرعت خوردگی و ارزیابی ماهیت و خصوصیات فیلم محافظ سطحی تشکیل شده می‌توان در مورد خصوصیات و توانائی استفاده از تیتانیوم و آلیاژهای آن در بکارگیری به‌عنوان مواد کاشتنی در بدن انسان اظهار نظر نمود. بهترین روش و تکنیک الکتروشیمیایی که می‌توان از آن جهت بررسی رفتار و ماهیت فیلم اکسید سطحی استفاده نمود، تکنیک

جدول (۱): آنالیز ترکیب شیمیایی ورق تیتانیوم خالص تجارتي.

عنصر	Ti	Al	Mo	V	Mn	Fe	Zr	Nb	Cr	Cu	Sn
درصد	Rem.	۰/۳	<۰/۵	<۰/۱	<۰/۱	۰/۰۵	<۰/۱	<۰/۵	<۰/۰۲	<۰/۰۵	۰/۰۲

جدول (۲): ترکیب شیمیایی محلول‌های شبیه‌سازی شده مورد استفاده.

محلول	NaCl	KCl	CaCl ₂	NaHCO ₃	Na ₂ HPO ₄	KH ₂ PO ₄
Ringer	۹/۰	۰/۴۵	۰/۲۵	۰/۲۰	-	-
PBS	۸/۰	۰/۲	-	-	۳/۰	۰/۲

(R_s) (ناحیه مقاومتی) خواهد بود. همچنین در ناحیه وسیعی از فرکانس‌های پائین و میانی در منحنی‌های بد-فاز ارائه شده در شکل (۴) دیده می‌شود که نمودار $\log|Z|$ بر حسب $\log(f)$ به صورت یک خط با شیب تقریباً برابر با -۱ در حال کاهش می‌باشد و مقدار زاویه فازی تقریباً نزدیک به ۹۰- درجه خواهد بود.

این ویژگی حاکی از آن است که یک فیلم روئین با رفتار خازنی و به صورت Thin film و غیر فشرده و متراکم بر روی سطح تیتانیوم خالص تجارتي در محلول‌های شبیه‌سازی شده Ringer و PBS تشکیل شده است [۱-۶].

طیف‌های امپدانس حاصل شده در محلول‌های شبیه‌سازی شده Ringer و PBS در پتانسیل خوردگی توسط نرم افزار Zsimp3.2 تحلیل و مدار معادل مربوطه مشخص گردید. شکل (۵) مدار معادل مشخص شده را نشان می‌دهد. بررسی‌ها نشان داد که مدار معادل حاصل شده همانند مدار معادل پیشنهادی سایر محققین در این زمینه می‌باشد [۱۱-۱۰، ۸، ۷، ۴، ۳، ۱].

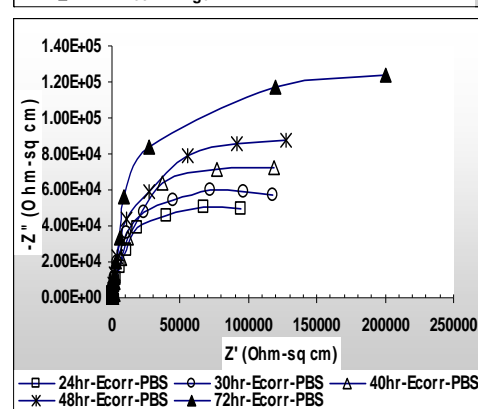
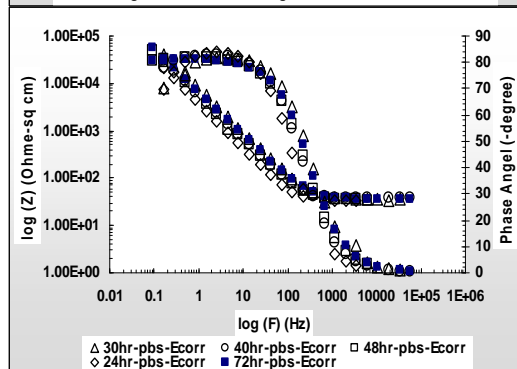
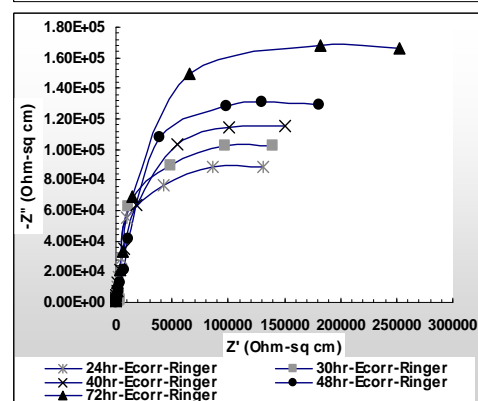
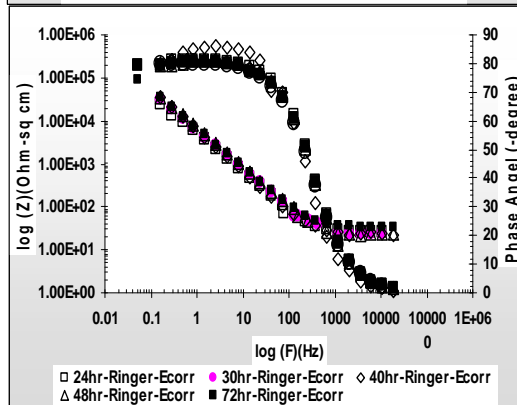
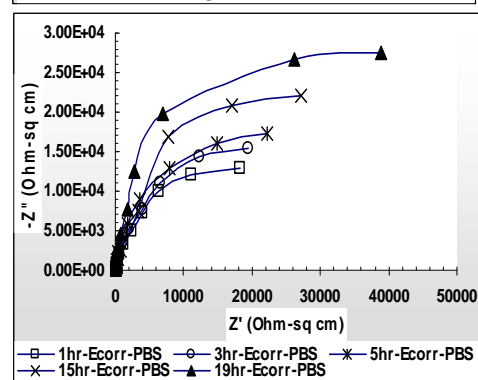
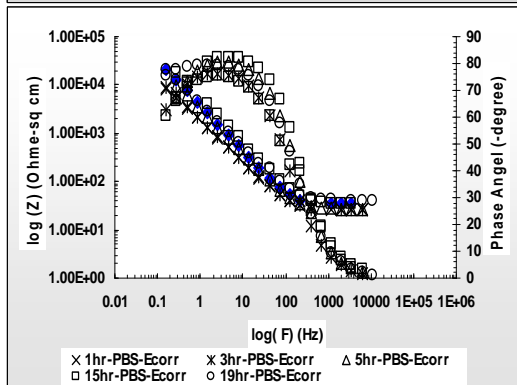
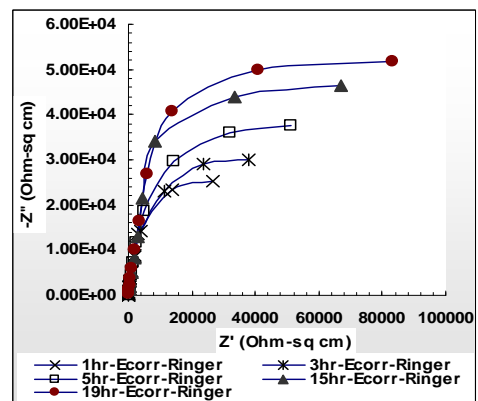
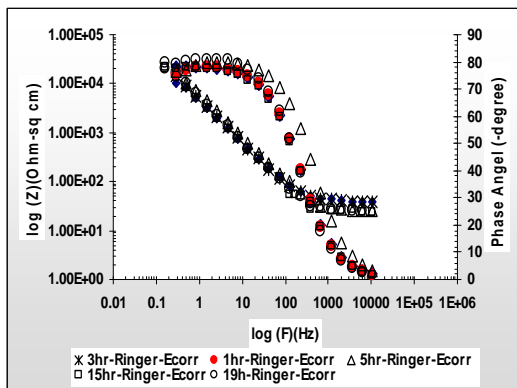
جهت بررسی خصوصیات و مکانیزم تشکیل فیلم روئین حاصل شده بر روی سطح تیتانیوم خالص تجارتي در محلول‌های شبیه‌سازی شده Ringer و PBS تحت شرایط پتانسیل خوردگی، مقادیر عددی هر کدام از اجزاء مدار معادل که مربوط به لایه تشکیل شده می‌باشند، با استفاده از نرم افزار Zsimp 3.2 محاسبه گردید. مقادیر به دست آمده در جدول (۳) ارائه شده است.

آزمایشات در دو محلول شبیه‌سازی شده Ringer و PBS که ترکیب شیمیایی آنها در جدول (۲) ارائه شده است، انجام گرفت. هر کدام از محلول‌های مذکور در حجمی برابر با یک لیتر (1000cc) تهیه شدند. جهت هر آزمایش میزان حجم محلول مورد نظر برابر با 20 cc انتخاب گردید.

منحنی‌های نایکوئیست و بد و بد-فاز در محدوده فرکانس 0.01-10⁵Hz با مقدار تحریک 10mV برای هر یک از نمونه‌ها رسم شدند. طیف‌های امپدانس توسط نرم افزار Zsimp 3.2 تحلیل و شبیه‌سازی شده و نهایتاً مدار معادل مربوطه پیشنهاد شد. تمامی آزمایشات در یک سل سه الکترودی و در دو پتانسیل خوردگی (E_{Corr}) و روئین (+450mV) و با استفاده از یک پتانسیواستات EG&G (PAR) مدل 273A و یک دتکتور پاسخ فرکانس EG&G مدل 1025 انجام شد.

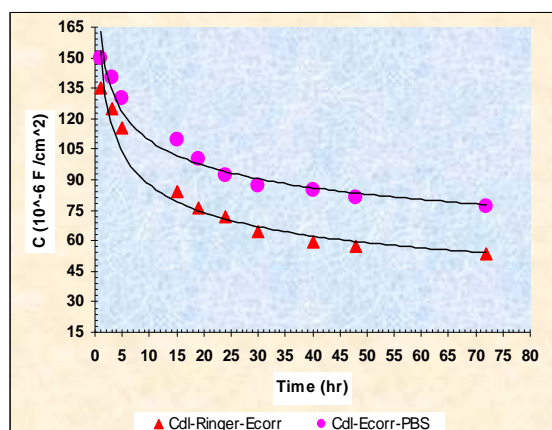
۳- نتایج و مباحث

شکل‌های (۳) و (۴) منحنی‌های نایکوئیست، بد و بد-فاز تیتانیوم خالص تجارتي در محلول‌های شبیه‌سازی شده Ringer و PBS در پتانسیل خوردگی (E_{Corr}) را نشان می‌دهند. با توجه به شکل‌های (۳) و (۴) می‌توان عنوان نمود که در فرکانس‌های بالا (10²-10³Hz) بر روی منحنی بد-فاز یک خط راست با زاویه فازی نزدیک به صفر درجه در نمودارهای $\log|Z|$ بر حسب $\log(f)$ مشاهده می‌شود که این حالت گویای مقاومت الکترولیت

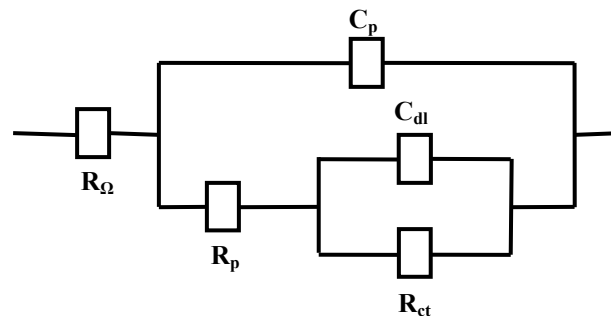


شکل (۴): منحنی‌های بد-فاز تیتانیوم خالص تجارتي در محلول‌های Ringer و PBS در زمان‌های مختلف تحت شرایط پتانسیل خوردگی.

شکل (۳): منحنی‌های نایکوئیست تیتانیوم خالص تجارتي در محلول‌های Ringer و PBS در زمان‌های مختلف تحت شرایط پتانسیل خوردگی.



شکل (۶): نمودار تغییرات ظرفیت خازنی لایه دوگانه با زمان در محلول‌های Ringer و PBS در پتانسیل خوردگی.



R_p resistance of the passive film
 R_Ω ohmic resistance of the electrolyte
 C_p capacitance of the passive film
 C_{dl} double-layer capacitance
 R_{ct} charge-transfer resistance

شکل (۵): مدار معادل طراحی شده.

حفاظتی خوب و مطلوب فیلم اکسید تیتانیوم بر روی سطح در پتانسیل خوردگی می‌باشد [۱۲، ۸، ۷، ۵، ۳، ۱].
 با توجه به شکل (۷) مشاهده می‌شود که مقاومت انتقال بار (R_{ct}) با افزایش زمان در پتانسیل خوردگی در محلول Ringer نسبت به محلول PBS از مقدار بالاتری برخوردار می‌باشد. میزان افزایش R_{ct} در محلول‌های Ringer و PBS در شرایط پتانسیل خوردگی، حاکی از اولاً کاهش انتقال الکترون در عرض فصل مشترک و جذب و انتقال یون‌ها و مولکول‌های آب و محلول‌های شبیه‌سازی شده در سطح فیلم روئین خواهد بود و ثانیاً میزان نرخ خوردگی تیتانیوم خالص تجارتي در محلول Ringer به مراتب بالاتر از محلول PBS در شرایط پتانسیل خوردگی می‌باشد. این حالت ناشی از خواص مطلوب و مفید فیلم روئین تشکیل شده بر روی سطح تیتانیوم خالص تجارتي در محلول Ringer نسبت به PBS در پتانسیل خوردگی خواهد بود.

بنابراین افزایش مقدار R_{ct} در محلول Ringer در شرایط پتانسیل خوردگی نسبت به محلول PBS، باعث کاهش نرخ خوردگی تیتانیوم خالص تجارتي در محلول Ringer نسبت به PBS شده است [۱۲، ۸، ۷، ۵، ۳، ۱].

از مشاهده شکل (۸) می‌توان عنوان نمود که میزان مقاومت فیلم روئین (R_p) در محلول‌های شبیه‌سازی شده Ringer نسبت به PBS در شرایط پتانسیل خوردگی بالاتر می‌باشد.

شکل (۶) نمودار تغییرات ظرفیت خازنی لایه دوگانه (C_{dl}) را با زمان برای محلول‌های Ringer و PBS در پتانسیل خوردگی نشان می‌دهند. همانطور که از شکل (۶) مشاهده می‌شود میزان ظرفیت خازنی لایه دوگانه (C_{dl}) در محلول‌های Ringer و PBS در پتانسیل خوردگی با افزایش زمان در حال کاهش باشد. میزان کاهش بیشتر C_{dl} نسبت به زمان در محلول Ringer در پتانسیل خوردگی نسبت به محلول PBS مربوط به ایجاد یک حالت دی‌الکتریک قوی‌تر در فصل مشترک فیلم روئین-الکترولیت می‌باشد.

به‌وجود آمدن حالت دی‌الکتریک در فصل مشترک باعث عدم تماس مستقیم فلز پایه (تیتانیوم خالص تجارتي) با محیط‌های شبیه‌سازی شده و نیز باعث عدم نفوذ یون‌ها از درون فیلم روئین و رسیدن به سطح فلز پایه می‌باشد. به‌وجود آمدن حالت دی‌الکتریک در فصل مشترک فیلم - الکترولیت باعث کاهش میزان جذب اکسیژن به سطح فیلم و در نتیجه باعث کاهش تمایل واکنش بین فلز پایه با اکسیژن و تشکیل اکسید TiO_2 خواهد شد.

لذا میزان ضخامت فیلم روئین نیز کاهش خواهد یافت. همچنین این افزایش مقدار Z با زمان نشان دهنده کاهش میزان ظرفیت خازنی لایه دوگانه می‌باشد و لذا ایجاد حالت دی‌الکتریک به‌وجود آمدن در فصل مشترک حاکی از خواص

جدول (۳): مقادیر عددی اجزاء مدار معادل.

زمان (ساعت)	محلول Ringer				محلول PBS			
	R_{ct} ($K\Omega/cm^2$)	C_{dl} ($\mu F/cm^2$)	C_p ($\mu F/cm^2$)	R_p ($K\Omega/cm^2$)	R_{ct} ($K\Omega/cm^2$)	C_{dl} ($\mu F/cm^2$)	C_p ($\mu F/cm^2$)	R_p ($K\Omega/cm^2$)
1	135	125	160	88.8	150	100	130	105
3	125	150	191	79.6	140	115	140	99
5	115.8	180	251	70.4	130	123	155	91
15	84	258	416	58.2	110	160	285	77
19	76.2	300	474	50.5	100	200	332	73.4
24	72	335	507	43.6	92	247	373	66
30	64.3	354	567	41.3	87	256	400	61
40	59.3	375	640	38.3	85	295	460	56.1
48	57.2	400	700	34.4	81	314	483	53
72	53.5	440	800	33	77	360	560	50

نمودارهای تغییرات ضخامت فیلم روئین در شکل (۱۰) ارائه شده است. جهت تعیین میزان ضخامت فیلم روئین از رابطه زیر استفاده شده است [۱۳، ۱۰، ۹، ۶، ۲، ۱].

$$D = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S / C \quad (1)$$

ضخامت لایه: $D = (nm)$ ثابت دی الکتریک نسبی فیلم اکسید $\epsilon: (60 \text{ Cm}^{-1})$
 $\epsilon_0: (8/9 \times 10^{-14} \text{ F/ Cm}^{-1})$ ضریب دی الکتریک فیلم اکسیدی
 $S: (\text{Cm}^2)$ مقطع
 $C: (10^{-6} \text{ F/ Cm}^2)$ ظرفیت خازنی لایه

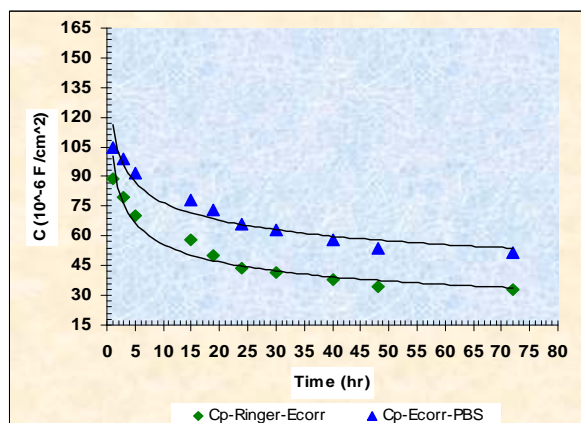
همان گونه که از شکل (۹) مشاهده می شود، ضخامت فیلم روئین (D) در هر دو محلول Ringer و PBS در شرایط پتانسیل خوردگی با گذشت زمان افزایش داشته است. بایستی توجه نمود که این افزایش با گذشت زمان به طور اندک و تدریجی خواهد بود.

همچنین افزایش تدریجی ضخامت فیلم روئین با گذشت زمان ناشی از افزایش رشد فیلم روئین (با سرعت پائین) به علت کاهش تدریجی و اندک میزان ظرفیت خازنی فیلم روئین (C_p) خواهد بود. بنابراین هر چه میزان ظرفیت خازنی فیلم روئین کاهش یابد، میزان ضخامت فیلم و به تناسب آن رشد فیلم روئین (با سرعت پائین) افزایش می یابد.

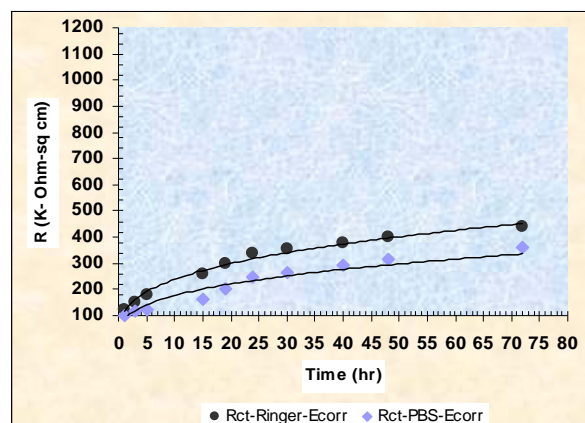
بالا بودن مقاومت به خوردگی تیتانیوم خالص تجارتي در این حالت به علت کاهش سرعت انحلال فیلم روئین و آزاد شدن یون تیتانیوم (Ti^{+3}) از تیتانیوم خالص تجارتي در محلول های Ringer و PBS و همچنین به علت سرعت رشد پائین فیلم روئین تشکیل شده بر روی سطح تیتانیوم خالص تجارتي در محلول های شبیه سازی شده می باشد [۱۲، ۸، ۷، ۵، ۳، ۱].

با مشاهده شکل (۹) می توان دریافت که میزان ظرفیت خازنی فیلم روئین (C_p) برای شرایط پتانسیل خوردگی در محلول های Ringer و PBS با گذشت زمان کاهش می یابد. میزان این کاهش با گذشت زمان به طور اندک خواهد بود. این کاهش تدریجی و اندک، گواه بر سرعت رشد پائین فیلم روئین تشکیل شده بر روی سطح تیتانیوم خالص تجارتي در محلول های Ringer و PBS در شرایط پتانسیل خوردگی می باشد. از طرفی پائین بودن سرعت رشد فیلم روئین، نشان دهنده میزان پایداری و دوام فیلم روئین با گذشت زمان می باشد [۹، ۸، ۷، ۵، ۱].

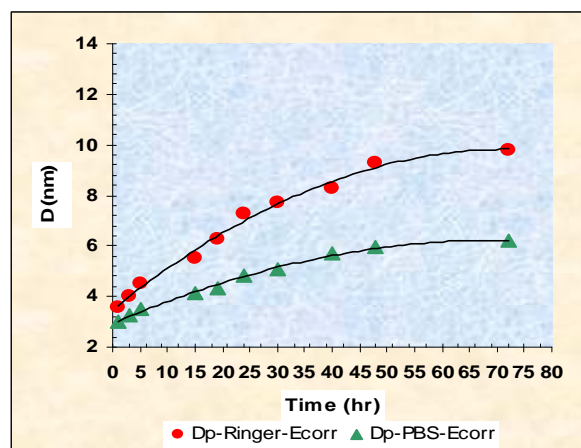
جهت بررسی دقیق تر ماهیت فیلم روئین تشکیل شده بر روی سطح تیتانیوم خالص تجارتي در محلول های شبیه سازی شده Ringer و PBS تحت شرایط پتانسیل خوردگی، نمودار تغییرات ضخامت فیلم روئین با زمان ترسیم شد.



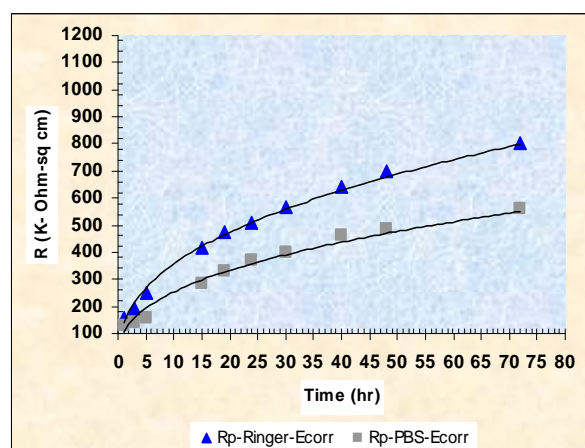
شکل (۹): نمودار تغییرات ظرفیت خازنی فیلم روئین با زمان در محلول‌های Ringer و PBS در پتانسیل خوردگی.



شکل (۷): نمودار تغییرات مقاومت انتقال بار با زمان در محلول‌های Ringer و PBS در پتانسیل خوردگی (E_{Corr}).



شکل (۱۰): نمودار تغییرات ظرفیت خازنی فیلم روئین تشکیل شده با زمان در محلول‌های Ringer و PBS در پتانسیل خوردگی (E_{Corr}).



شکل (۸): نمودار تغییرات مقاومت فیلم روئین تشکیل شده با زمان در محلول‌های Ringer و PBS در پتانسیل خوردگی (E_{Corr}).

تیتانیوم خالص تجارتي در محلول‌های شبیه‌سازی شده Ringer و PBS تأیید گردید.

۳- به دلیل پائین بودن ظرفیت خازنی لایه دو گانه (C_{dl})، یک حالت دی‌الکتریک در فصل مشترک فیلم روئین-الکترولیت در محلول‌های شبیه‌سازی شده Ringer و PBS برای شرایط پتانسیل خوردگی وجود خواهد داشت. این حالت دی‌الکتریک در محلول Ringer در شرایط پتانسیل خوردگی به علت پائین بودن مقدار ظرفیت خازنی لایه دو گانه نسبت به محلول PBS بیشتر خواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

۱- طیف‌های امپدانس رسم شده برای تیتانیوم خالص تجارتي در محلول‌های شبیه‌سازی شده Ringer و PBS برای شرایط پتانسیل خوردگی با مدار معادل فرآیند که مطابق با مدار معادل پیشنهادی سایر محققین می‌باشد، انطباق قابل قبولی را از خود نشان دادند.
۲- براساس مدار معادل فرآیند و انطباق آن با طیف‌های امپدانس ترسیم شده، وجود یک فیلم روئین تشکیل شده بر روی سطح

- [4] Claudia, E.B. and Marino, "EIS characterization of a Ti-dental implant in artificial saliva media: dissolution process of the oxide barrier", *Journal of Electro analytical Chemistry*, Vol. 568, PP. 115-120, 2004.
- [5] Mihai, V., "Corrosion susceptibility of implant materials Ti-5Al-4V and Ti-6Al-4Fe in artificial extra-cellular fluids", *Electrochimica Acta*, Vol. 49, PP. 2113-2121, 2004.
- [6] Shukla, A.K. and Balasubramaniam, R., "Properties of passive film formed on CP titanium, Ti-6Al-4V and Ti-13.4Al-29Nb alloy in simulated human body conditions", *Intermetallics*, PP. 1-7, 2004.
- [7] Delgado Alvarado, C., "A study of the corrosion resistance of gamma titanium aluminide in Ringer's solution, 3/5wt% NaCl and sea water", *University of Puerto Rico, Mayaguez Campus*, 2005.
- [8] Sittig, C. and Wieland, M. "Characterization and properties of titanium implant surface", *Laboratory for surface science and technology, Department of Materials, ETH Zurich*, 2003.
- [9] Ibris, N., "EIS study of Ti and its alloy in biological media", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 526, PP. 53-62, 2002.
- [10] Black Wood, D.J., "Influence of the space charge region on electrochemical impedance measurements on passive oxide films on titanium", *Electrochimica Acta*, Vol. 46, PP. 563-569, 2000.
- [11] Wang, C.X., Wang, M. and Zhao, X., "Nucleation and growth of apatite on chemically treated titanium alloy: an electrochemical impedance spectroscopy study", *Biomaterials*, Vol. 24, PP. 3069-3077, 2003.
- [12] Santana Lopez, A. and Mirza-Rosca J., "Electrochemical impedance spectroscopy technique in prediction of the implant titanium alloys behavior", *European cells and materials*, Vol. 5, PP.12-14, 2003.
- [13] Schmidt, A., Densie, S., "Effect of fluoride ions on Ti6Al4V alloy passivation in lactated Ringer's solution", *Materials Research*, Vol.6, No. 2, PP. 227-231, 2003.
- ۴- بالاتر بودن میزان مقاومت انتقال بار (R_{ct}) برای محلول Ringer در شرایط پتانسیل خوردگی نسبت به محلول PBS، ضمن تأیید وجود حالت دی الکتریک در فصل مشترک فیلم روئین - الکترولیت، نشان دهنده پائین تر بودن دانسیته شدت جریان خوردگی و نرخ خوردگی تیتانیوم خالص تجارتي در محلول Ringer نسبت به محلول PBS می باشد.
- ۵- فیلم روئین تشکیل شده در محلول Ringer در شرایط پتانسیل خوردگی نسبت به محلول PBS دارای ضخامت بیشتری می باشد.
- ۶- فیلم روئین تشکیل شده بر روی سطح تیتانیوم خالص تجارتي در محلول شبیه سازی شده Ringer در شرایط پتانسیل خوردگی نسبت به محلول PBS از سرعت رشد پائین تر و پایداری و دوام بالاتری برخوردار می باشد.
- ۷- تیتانیوم خالص تجارتي در محلول شبیه سازی شده Ringer در شرایط پتانسیل خوردگی نسبت به محلول PBS از مقاومت به خوردگی بالاتری برخوردار است چراکه فیلم روئین تشکیل شده در محلول Ringer از مقاومت (R_p) بالاتر و ظرفیت خازنی (C_p) کمتری برخوردار می باشد.
- ### ۵- مراجع
- [1] Gonzalez, J.E.G. and Mirza-Rosca, J.C., "Study of the corrosion behavior of titanium and some of its alloys for biomedical and dental implant application", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 471, PP. 109-115, 1999.
- [2] Aziz-Kenneth, M. and Conroy, G., "Electrochemical studies on the stability and corrosion resistance of titanium -based implant materials", *Biomaterials*, Vol. 22, PP.1531-1539, 2001.
- [3] Metikos-Hukovic, M. and Kwokal, A., "The influence of niobium and vanadium on passivity of titanium-based implants in physiological solution", *Biomaterials*, Vol. 24, PP.3765-3775, 2003.