

تأثیر یون فلوئوراید بر حفره‌دار شدن سیم‌های ارتودنسی NiTi و NiTiNb در محلول کلراید

راضیه توسلیان^۱، مصطفی میرجلیلی^۲، محمد هادی مؤید^{۳*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

^۲ استادیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

^۳ استاد گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

* نویسنده مسئول: mhmoayed@um.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۶

چکیده

به منظور حفظ سلامت دندان‌ها در طول عملیات ارتودنسی، به بیماران دهان‌شویه‌های فلوئوراید تجویز می‌شود. از این حیث تأثیر یون فلوئوراید بر خوردگی سیم‌های ارتودنسی حائز اهمیت می‌باشد. در مطالعه حاضر تأثیر یون فلوئوراید بر حفره‌دار شدن سیم‌های ارتودنسی NiTi و NiTiNb در محلول حاوی یون کلراید توسط آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و پلاریزاسیون پتانسیواستاتیک بررسی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که سیم ارتودنسی NiTi در محلول حاوی یون کلراید دچار خوردگی حفره‌ای می‌شود و اضافه شدن یون فلوئوراید به محلول با افزایش پتانسیل حفره‌دار شدن به مقادیر مثبت‌تر، حاکی از قابلیت بازدارندگی این یون را می‌کند، به طوری که با کاهش غلظت یون کلراید و افزودن یون فلوئوراید، پتانسیل خوردگی حفره‌ای افزایش می‌یابد. سیم ارتودنسی NiTiNb علی‌رغم اینکه در محلول فلوئوراید رفتار پسیو نشان داد در محلول حاوی یون فلوئوراید و کلراید دچار خوردگی حفره‌ای شده است.

کلمات کلیدی: خوردگی حفره‌ای، یون کلراید، یون فلوئوراید، سیم ارتودنسی NiTi، سیم ارتودنسی NiTiNb

The Effect of Fluoride Ion on the Pitting Corrosion of NiTi and NiTiNb Orthodontic Archwires in Chloride Solution

R. Tavasolian ¹, M. Mirjalili ², M. H. Moayed ^{3*}

¹ Student of M.Sc, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Faculty of Engineering, University of Ferdowsi.

² Assistant Professor, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Faculty of Engineering, University of Ferdowsi.

³ Professor, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Faculty of Engineering, University of Ferdowsi.

* Corresponding Author: mhmoayed@um.ac.ir

Submission: 2016, 09, 27 Acceptance: 2017, 03, 06

Abstract

Using fluoride mouth washes is recommended to protect the teeth during orthodontic treatment. Therefore it is important to investigate the effect of fluoride ion on the pitting corrosion of orthodontic archwires. The aim of this study is to investigate the effect of fluoride ion on the corrosion behaviour of NiTi and NiTiNb orthodontic archwires in chloride solution by means of potentiodynamic and potentiostatic polarisation techniques. Results revealed that NiTi orthodontic wire is susceptible to pitting corrosion in chloride solution. Fluoride ion was found to have an inhibition effect and its addition increases the pitting potential for NiTi wire. The pitting potential increases also by increment in the F⁻/Cl⁻ concentration ratio. NiTiNb orthodontic archwire shows passivity behaviour in sole fluoride solutions; however, its pitting corrosion was observed in solution containing both chloride and fluoride ions.

Keywords: Pitting corrosion, Chloride ion, Fluoride ion, NiTi orthodontic archwire, NiTiNb orthodontic archwire;

۱- مقدمه

قبل از دهه ۱۹۵۰، از طلا و دیگر آلیاژهای گران بها مثل پلاتین و پالادیم برای اهداف ارتودنسی استفاده می‌شد. اگرچه آلیاژهای طلا به علت خواص مکانیکی، مقاومت به خوردگی و زیست‌سازگاری بسیار بالا بهترین انتخاب بودند اما از لحاظ قیمت مقرون به صرفه نبودند. بنابراین مواد جایگزین مثل فولاد زنگ نزن، آلیاژهای NiTi (Elgiloy) Co-Cr-Ni و بتا تیتانیم معرفی شدند. اخیراً آلیاژ NiTi (نایتانول) به علت بازگشت فتری عالی و مدول الاستیکی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. آلیاژهای نایتانول به دلیل اثر حافظه‌داری، سوپرالاستیسیته، انعطاف پذیری، زیست‌سازگاری خوب و مقاومت به خوردگی عالی کاربردهای فراوانی در شاخه‌های پزشکی دارند [۲]. تشکیل لایه‌ی اکسید TiO_2 بر سطح این آلیاژ، منجر به افزایش مقاومت به خوردگی آن خواهد شد [۳].

آلیاژهایی که در محیط بدن به کار گرفته می‌شوند، اگر دچار خوردگی شوند، یون‌های فلزی آزاد می‌کنند که منجر به وقوع واکنش‌های خطرناک از جمله تغییر رنگ بافت مجاور، سوزش و واکنش‌های آلرژیک می‌شود. محیط دهان به دلیل حضور ترکیبات کلراید، نوسانات دمایی (از ۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد) و تغییرات pH، مناسب خوردگی فلزات است که منجر به تخریب و انحلال کامل یا جزئی فلز می‌شود. همچنین خوردگی به شدت عمر خستگی و استحکام نهایی سیم‌های ارتودنسی را کاهش می‌دهد. آلیاژهای نایتانول به دلیل اثر پسیویتی به وسیله تشکیل لایه اکسید TiO_2 ، مقاومت به خوردگی بالایی دارند [۵].

محیط دهان به علت خواص یونی، حرارتی، میکروبیولوژی و آنزیمی، مستعد تخریب فلزات است. علاوه بر این برای دستیابی به سلامت دهان و دندان در طول درمان ارتودنسی، به بیماران دهان‌شویه‌های فلوئوراید تجویز می‌شود. دهان‌شویه‌های فلوئوراید حاوی ۰/۰۵ و ۰/۲٪ فلوئوراید هستند و اغلب به صورت هفته‌ای و روزانه تجویز می‌شوند [۶]. یون فلوئوراید اثر مضری بر مقاومت به خوردگی آلیاژهای تیتانیم دارد. این یون با از بین بردن لایه محافظ TiO_2 سبب تخریب و انحلال فلز پایه می‌شود. تاکنون تحقیقات زیادی در مورد تأثیر یون فلوئوراید و کلراید بر رفتار خوردگی سیم‌های ارتودنسی NiTi انجام شده است. لی و همکاران به تأثیر یون فلوئوراید و کلراید بر روی رفتار خوردگی سیم‌های ارتودنسی نایتانول پرداختند. نتایج حاصل نشان می‌دهند که سیم ارتودنسی NiTi در محلول حاوی یون فلوئوراید رفتار پسیو دارد و با افزایش غلظت یون فلوئوراید شدت جریان پسیویتی افزایش می‌یابد. سیم مذکور در محلول حاوی کلراید خوردگی حفره‌ای نشان می‌دهد و با افزایش

غلظت این یون پتانسیل حفره‌دار شدن کاهش می‌یابد، در حالی که شدت جریان پسیویتی ثابت می‌ماند. همچنین محلول حاوی یون کلراید و فلوئوراید اثر مخرب‌تری بر مقاومت به خوردگی حفره‌ای سیم ارتودنسی NiTi دارد. شدت جریان خوردگی و پسیویتی در این محلول افزایش می‌یابد و تصاویر حاصل از SEM خوردگی حفره‌ای و خوردگی کامل را نشان داده است [۶]. میرجلیلی و همکاران به بررسی رفتار خوردگی سیم‌های ارتودنسی نایتانول در محلول مشابه بزاق در حضور یون فلوئوراید پرداخته است. نتایج حاصل از پلاریزاسیون نشان می‌دهند که سیم ارتودنسی نایتانول در محلول مشابه بزاق دهان پسیو است و در محلول مشابه بزاق به همراه یون فلوئوراید دچار خوردگی حفره‌ای می‌شود. در حضور یون فلوئوراید شدت جریان پسیویتی و شدت جریان خوردگی افزایش می‌یابد. که افزایش شدت جریان پسیویتی به افزایش عیوب لایه اکسید در حضور یون فلوئوراید نسبت داده می‌شود [۷]. مقاومت به خوردگی آلیاژهای Ni-Ti، Ni-Ti-Co و Ti-6Al-4V در محلول مشابه بزاق Fusayama Meyer با غلظت‌های مختلف فلوئوراید بررسی شده است. گزارش شده است که آلیاژ Ti-6Al-4V در محلول مشابه بزاق دهان مقاومت به خوردگی بالایی دارد، در صورتی که آلیاژهای Ni-Ti، Ni-Ti-Co و Ti-6Al-4V در محلول بزاق حاوی فلوئوراید و اسید فلوئوریک خوردگی موضعی نشان می‌دهند. یون فلوئوراید باعث شکستن لایه محافظ آلیاژهای تیتانیم می‌شود که در نهایت منجر به وقوع خوردگی حفره‌ای می‌گردد [۸]. هروی و همکاران نیز به تأثیر یون فلوئوراید بر روی رفتار خوردگی سیم‌های ارتودنسی نایتانول از شرکت‌های Gac، Dentaurum و Global پرداخته‌اند. طبق نتایج تمامی آرج وایرها در محلول بزاق مصنوعی پسیو است و افزودن یون فلوئوراید به محلول بزاق مصنوعی باعث کاهش مقاومت به خوردگی سیم ارتودنسی Dentaurum می‌گردد. همچنین علی‌رغم کاهش مقاومت به خوردگی با افزایش غلظت یون فلوئوراید، پتانسیل حفره‌دار شدن بسیار بالاتر از پتانسیل حفره‌دار شدن معمول دهان است که بیانگر بی‌خطر بودن استفاده روتین دهان‌شویه‌ی فلوئوراید در بیماران ارتودنسی است [۹].

در مطالعه‌ی حاضر تأثیر یون کلراید و فلوئوراید بر رفتار خوردگی سیم‌های ارتودنسی NiTi و NiTiNb توسط آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و پلاریزاسیون پتانسیواستاتیک بررسی شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این مطالعه از دو نوع سیم ارتودنسی با قطر ۰/۴ میلی متر استفاده شده است. اولی سیم ارتودنسی NiTi از شرکت آلمانی Dentaurum صرفاً برای تست‌های پلاریزاسیون با پتانسیل متغیر و دومی سیم

تمامی آزمون‌های الکتروشیمی انجام شده در این پژوهش، با استفاده از دستگاه پتانسیواستات Gill AC و همچنین در دمای محیط صورت پذیرفت. سلول سه الکتروده به عنوان سلول الکتروشیمیایی مورد استفاده در تمامی آزمون‌های پلاریزاسیون انتخاب شد. در این سلول، الکترود کاری سیم ارتودنسی، الکترود کمکی صفحه‌ی پلاتین با سطح مقطع 2cm^2 و الکترود مرجع الکترود اشباع کالومل است. شکل ۱، نمای شماتیکی سلول مذکور را نمایش می‌دهد. به منظور اندازه‌گیری پتانسیل وقوع خوردگی حفره‌ای، آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک انتخاب و اجرا شد. پیش از انجام هر آزمون، با هدف دست‌یابی به پتانسیل پایدار نمونه در محلول و محاسبه‌ی پتانسیل مدار باز، نمونه‌ها به مدت ۶۰۰ ثانیه در محلول نگه داشته شده و پتانسیل آن ثبت شد. آزمون پلاریزاسیون

ارتودنسی NiTiNb از شرکت فرانسوی Ortho Force برای تمامی تست‌ها در این تحقیق استفاده شده است. ترکیب شیمیایی هر دو سیم بر حسب درصد وزنی در جدول ۱ و ۲ آمده است. در مرحله آماده سازی، سطح سیم‌ها با روش آلتراسونیک به مدت ۱۵ دقیقه در دمای محیط در استون شست و شو داده شد. پس از خشک کردن سطح نمونه‌ها، به منظور جلوگیری از وقوع خوردگی در محل برش، ناحیه‌ی موردنظر با موم^۱ آب بندی شد. به منظور انجام آزمون‌ها، ۲ سانتی‌متر از طول سیم ارتودنسی در محلول قرار گرفت. برای انجام آزمون‌های الکتروشیمی، محلول حاوی یون کلراید و فلوئوراید مطابق غلظت‌های جدول ۳ و ۴ تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. سدیم کلراید و سدیم فلوئوراید مورد نیاز در مرحله‌ی آماده سازی، با خلوص آزمایشگاهی بوده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سیم ارتودنسی NiTi [۷]

	Ti%	Ni%
NiTi	۴۷/۳۰	۵۲/۶۵

جدول ۲- ترکیب شیمیایی اسمی سیم ارتودنسی NiTiNb

	Ti%	Ni%	Nb%	Cu%	Fe%	Co%	Cr%
NiTiNb	۵۰-۷۰	۳۰-۵۰	۱۰-۲۰	۵-۱۰	۱-۵	۱-۵	<۳/۰

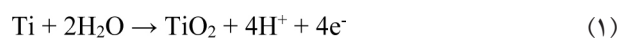
جدول ۳- محلول آزمایش برای سیم ارتودنسی NiTi

نوع محلول	غلظت (mol l ⁻¹)				
NaCl	۰/۰۵	۰/۰۳۷	۰/۰۲۵	۰/۰۱۳	-
NaF	-	۰/۰۱۳	۰/۰۲۵	۰/۰۳۷	۰/۰۵

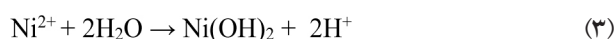
جدول ۴- محلول آزمایش برای سیم ارتودنسی NiTiNb

نوع محلول	غلظت (mol l ⁻¹)				
NaCl	۰/۲۵	۰/۱۸۷	۰/۱۲۵	۰/۰۶۳	-
NaF	-	۰/۰۶۳	۰/۱۲۵	۰/۱۸۷	۰/۲۵

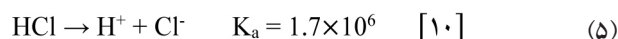
لایه اکسید TiO_2 مطابق واکنش (۱) بر سطح سیم باشد، زمانی که این لایه محافظ در اثر عیوب سطحی مثل حل شدن آخال‌ها به صورت موضعی شکسته شود، انحلال فلز مطابق واکنش (۲) انجام می‌پذیرد.



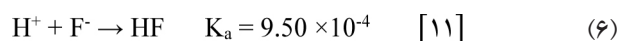
در اثر تجمع کاتیون‌ها در داخل حفره، واکنش هیدرولیز شدن (۳) صورت می‌گیرد و با آزاد کردن پروتون باعث کاهش pH می‌گردد.



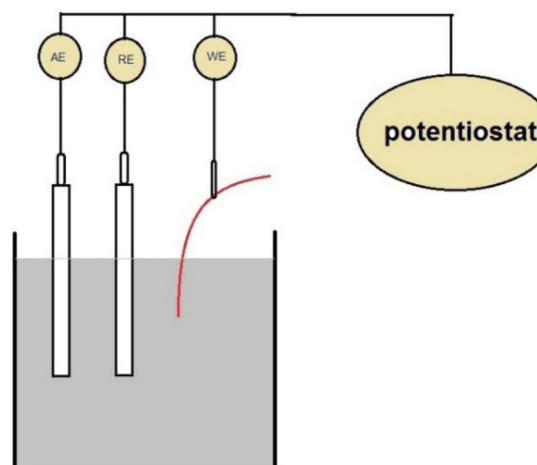
با اسیدی شدن محلول، انحلال شدیدتر در داخل حفره اتفاق می‌افتد. از طرفی امکان دارد واکنش (۴) در حضور یون کلراید انجام پذیرد. از آنجایی که HCl تولید شده اسید قوی است تمایل به انجام واکنش در جهت عکس دارد (۵)، به این ترتیب یون کلراید باعث کاهش pH داخل حفره می‌شود و تخریب فلز شدیدتر صورت می‌گیرد.



در حضور یون فلوئوراید امکان دارد واکنش (۶) به وقوع بپیوندد و با مصرف پروتون واکنش (۳) باعث افزایش pH محلول شود. از آنجایی که اسید تولید شده، بسیار ضعیف است تمایل به مصرف پروتون دارد [۴].



بنابراین به راحتی می‌توان علت کاهش پتانسیل حفره دار شدن در حضور یون کلراید و افزایش پتانسیل حفره دار شدن در حضور یون فلوئوراید را استنباط کرد. با توجه به اینکه وقوع فرآیند خوردگی حفره‌ای یک فرآیند احتمالی بوده در نتیجه پتانسیل‌های حفره دار شدن نیز مقدار آماری خواهد بود. از این رو به منظور تعیین محدوده‌ی پتانسیل وقوع خوردگی حفره‌ای، آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای هر غلظت ۹ مرتبه تکرار شد. نتایج حاصل از این آزمون‌ها به صورت منحنی تجمع در شکل ۳ نمایش داده شده است. تابع توزیع تجمعی به صورت



شکل ۱- نمای شماتیک سلول الکتروشیمیایی سه الکترودی مورد استفاده در آزمون پلاریزاسیون.

پتانسیودینامیک از ۱۰۰ میلی ولت پایین‌تر از پتانسیل خوردگی تا پتانسیل حفره دار شدن و افزایش ناگهانی جریان صورت پذیرفت. سرعت رویش در تمامی آزمون‌ها 1 mV/s در نظر گرفته شد. آزمون پلاریزاسیون پتانسیواستاتیک با هدف تعیین زمان القا طراحی شد. به منظور انجام این آزمون، ابتدا پتانسیل مدار باز نمونه با هدف برقراری حالت پایدار پتانسیل به مدت ۶۰۰ ثانیه اندازه‌گیری و سپس فرآیند پلاریزاسیون با اعمال پتانسیل 350 mV به سطح نمونه و به مدت زمان حداکثر ۱ ساعت انجام شد. با هدف مشاهده محل تشکیل حفرات، بررسی‌های میکروسکوپی توسط میکروسکوپ نوری OLYMPUS BX60M مجهز به دوربین دیجیتال صورت پذیرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک

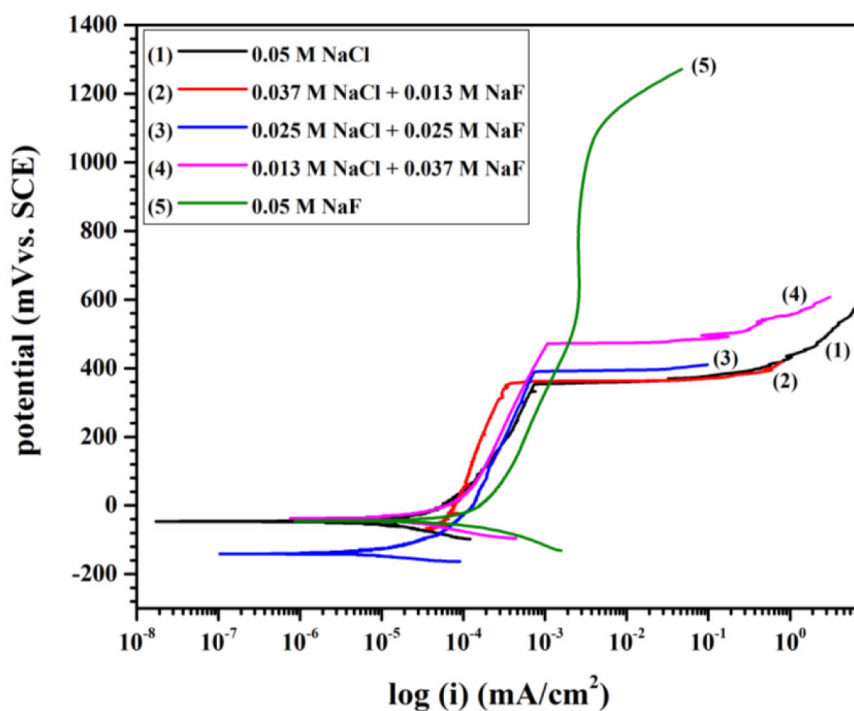
پس از آن‌که نمونه‌ها به مدت ۶۰۰ ثانیه در حالت پتانسیل مدار باز قرار گرفتند، آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک بر روی نمونه‌ها در پنج غلظت مختلف صورت پذیرفت. شکل ۲ منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک را برای سیم ارتودنسی NiTi در غلظت‌های مختلف از سدیم کلراید و سدیم فلوئوراید نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کمترین پتانسیل حفره دار شدن مربوط به محلول حاوی ۰/۰۵ مولار یون کلراید است. با افزودن یون فلوئوراید و با کاهش غلظت یون کلراید، پتانسیل حفره دار شدن افزایش می‌یابد. در نهایت سیم ارتودنسی NiTi در محلول حاوی ۰/۰۵ مولار یون فلوئوراید رفتار پسیو دارد و خوردگی حفره‌ای در این محلول رخ نمی‌دهد.

اگر فرض شود علت رفتار پسیویتی سیم ارتودنسی NiTi، تشکیل

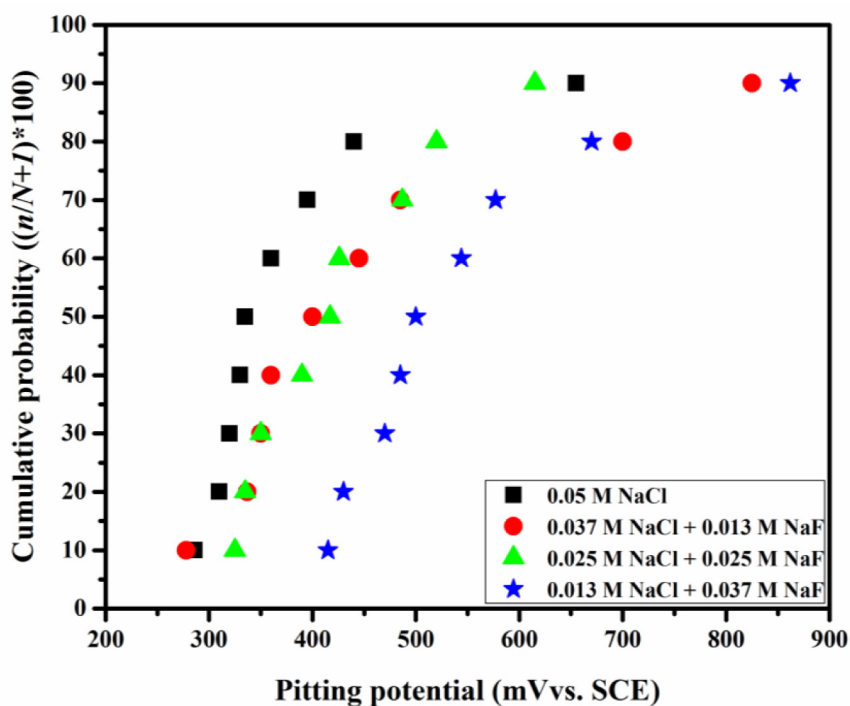
زیر تعریف می‌شود [۱۲]: در این رابطه، n شماره‌ی هر آزمون و N تعداد کل آزمون‌ها

$$\text{Cumulative Probability} = n/(N+1) \times 100 \quad (7)$$

می‌باشد.



شکل ۲- منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای سیم ارتودنسی NiTi.



شکل ۳- نمودار تجمعی آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای سیم ارتودنسی NiTi.

حفره‌ای این آلیاژ غلظت یون‌های محلول تغییر داده شد. شکل ۶ تأثیر یون فلوئوراید را بر خوردگی سیم ارتودنسی NiTiNb را در محلول حاوی یون کلراید را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در عدم حضور یون کلراید، محلول حاوی یون فلوئوراید منجر به خوردگی حفره‌ای آلیاژ مذکور نشده است و افزایش شدت جریان در پتانسیل ۱۲۰۰ میلی‌ولت به واسطه اکسیداسیون آب در اثر واکنش (۹) می‌باشد. لازم به یادآوری است فراروینگی این آلیاژ تنها به واسطه اکسیداسیون آب و نه تولید کرومات از انحلال اکسید کروم در فولادهای زنگ‌نزن می‌باشد [۱۳].

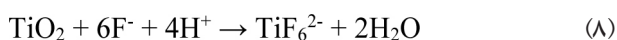


۳-۲- نتایج آزمون پلاریزاسیون پتانسیو استاتیک

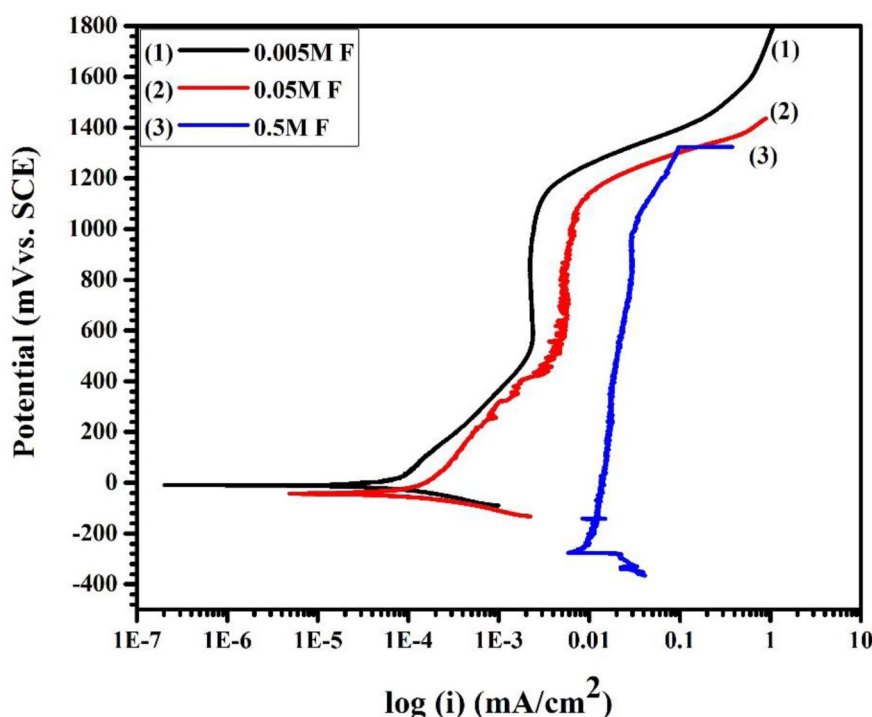
هدف از انجام آزمون پلاریزاسیون پتانسیو استاتیک تنها تعیین زمان لازم برای ایجاد یک حفره پایدار می‌باشد. هنگامی که یک حفره پایدار تشکیل شود و رشد کند، جریان به طور پیوسته زیاد می‌شود و دیگر افت جریان نخواهیم داشت. خوردگی حفره‌ای نیازمند دوره‌ی کمون یا زمان القا برای جوانه‌زنی حفرات پایدار می‌باشد. مقدار زمان لازم برای ایجاد یک حفره پایدار به نام زمان القا موسوم است [۱۴]. شکل ۷ نمونه‌ی شماتیک از آزمون پلاریزاسیون پتانسیو استاتیک است که محدوده‌ی زمانی که یک حفره پایدار تشکیل می‌شود را نشان می‌دهد. مقدار این زمان القا، اندازه‌ی مقاومت فلز را در

بر اساس این منحنی می‌توان روند افزایش پتانسیل حفره‌دار شدن، را با افزودن یون فلوئوراید مشاهده کرد. واضح است که یون کلراید اثر مخربی بر خوردگی حفره‌ای سیم ارتودنسی NiTi دارد.

شکل ۴ منحنی پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک برای سیم ارتودنسی NiTi در محلول فلوئوراید با غلظت‌های ۰/۰۰۵ و ۰/۰۵ و ۰/۵ مولار را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت یون فلوئوراید شدت جریان پسیویتی افزایش می‌یابد. افزایش غلظت یون فلوئوراید سبب تضعیف لایه پسیو و به دنبال آن افزایش شدت جریان پسیویتی می‌گردد [۶]. افزایش شدت جریان پسیویتی به افزایش عیوب لایه اکسید در حضور یون فلوئوراید نسبت داده می‌شود که مطابق واکنش (۸) تضعیف لایه اکسید صورت می‌گیرد [۷].



شکل ۵ منحنی پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک را برای سیم ارتودنسی NiTiNb در غلظت‌های مختلف از فلوئوراید و کلراید نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود این آلیاژ در محلول مشابه سیم ارتودنسی NiTi، رفتار کاملاً پسیو دارد و تنها در محلول ۰/۰۵ مولار یون کلراید خوردگی حفره‌ای اتفاق می‌افتد. این نتایج نشان می‌دهد که سیم ارتودنسی NiTiNb مقاومت به خوردگی بالاتری نسبت به سیم ارتودنسی NiTi دارد. دلیل این امر، احتمالاً تشکیل لایه اکسید Nb₂O₅ و TiO₂ است. از آنجایی که سیم ارتودنسی NiTiNb در غلظت‌های قبل رفتار پسیو داشت، به منظور بررسی رفتار خوردگی

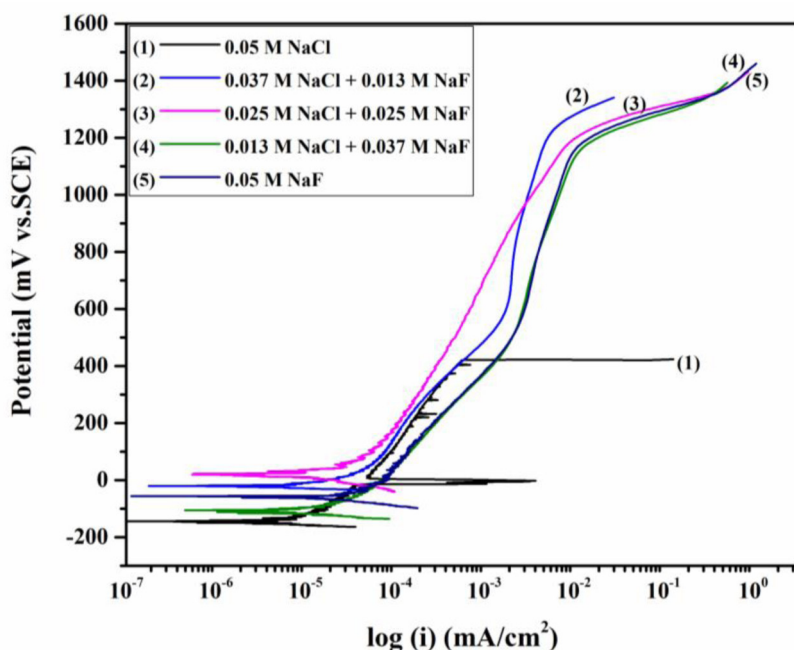


شکل ۴- منحنی پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک برای سیم ارتودنسی NiTi در محلول فلوئوراید با غلظت‌های ۰/۰۰۵ و ۰/۰۵ و ۰/۵ مولار.

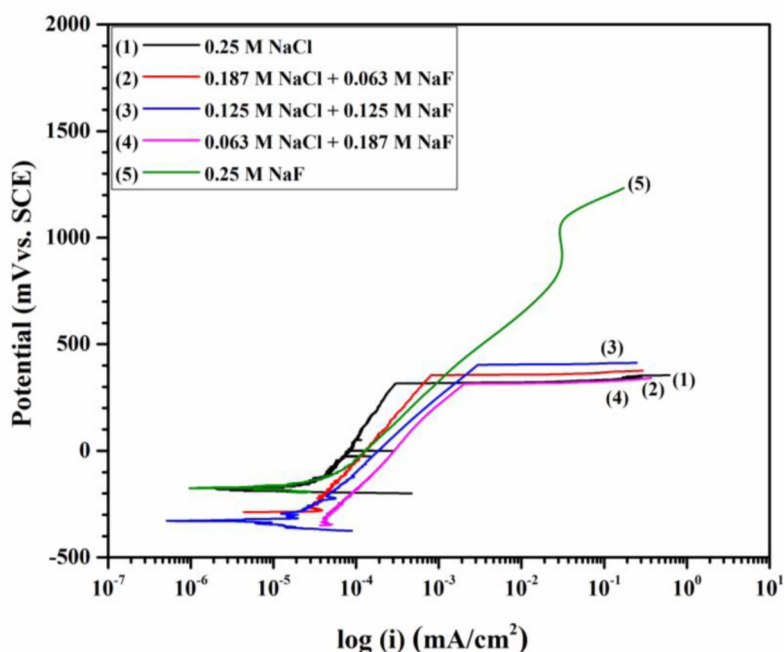
در شکل ۸ منحنی پلاریزاسیون پتانسیواستاتیک برای محلول ۰/۲۵ مولار فلوئوراید آمده است که نشان می‌دهد سیم ارتودنسی NiTiNb در این محلول کاملاً پسیو بوده است. همان‌گونه که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود جریان آندی روند کاهشی دارد. کاهش خطی جریان با گذشت زمان به رشد لایه اکسید TiO_2 نسبت داده می‌شود. شیب منحنی $\log(i) - \log(t)$ در ناحیه‌ی اول برابر ۰/۷۵- می‌باشد. بر

مقابل حفره‌دار شدن در یک پتانسیل خاص نشان می‌دهد. هر چه این زمان بیشتر باشد، مقدار مقاومت نمونه در مقابل حفره‌دار شدن بیشتر خواهد بود.

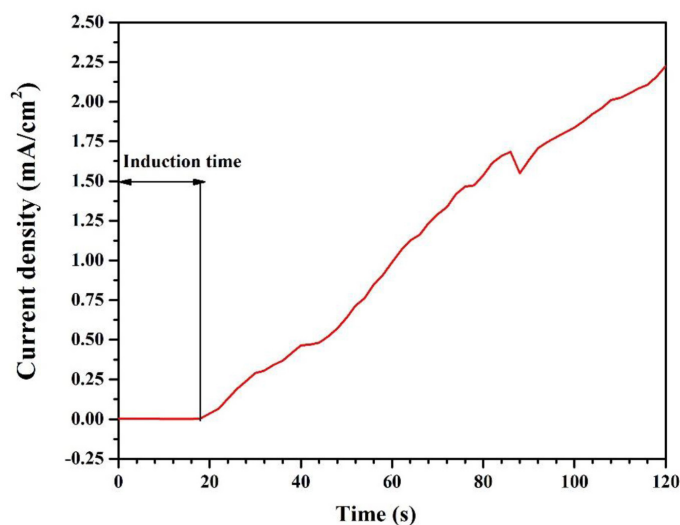
آزمون پلاریزاسیون پتانسیواستاتیک در پتانسیل ۳۵۰ mV انجام پذیرفت و مدت زمان لازم برای رسیدن به یک حفره‌ی پایدار اندازه‌گیری شده است. برای هر محلول پنج تکرار انجام شده است.



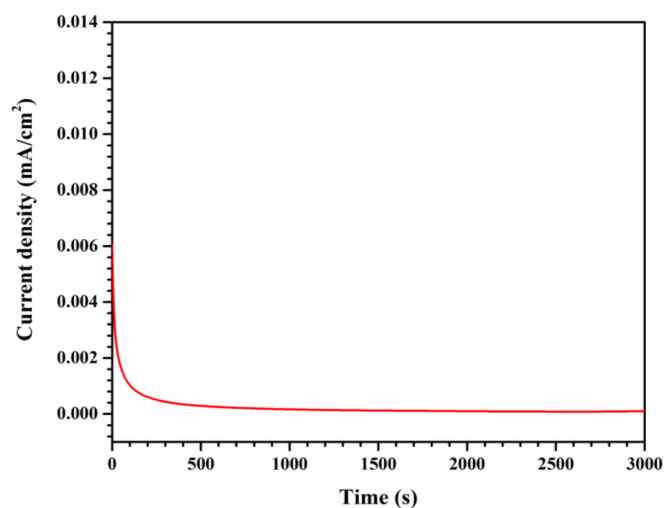
شکل ۵- منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای سیم ارتودنسی NiTiNb.



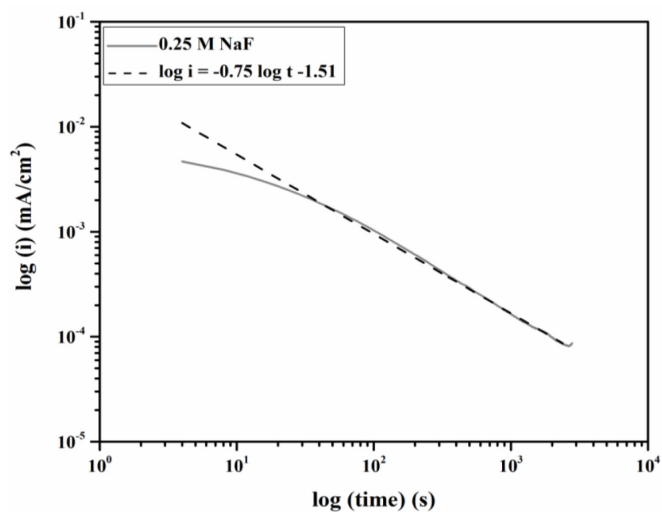
شکل ۶- منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای سیم ارتودنسی NiTiNb در غلظت‌های جدید.



شکل ۷- نمایش شماتیک یک آزمون پلاریزاسیون پتانسیواستاتیک. زمان القا برای رسیدن به یک حفره‌ی پایدار در شکل نشان داده شده است.



شکل ۸- منحنی پلاریزاسیون پتانسیواستاتیک سیم ارتودنسی NiTiNb در محلول ۰/۲۵ مولار فلوئوراید.



شکل ۹- تغییرات $\log(i) - \log(t)$ به دست آمده از منحنی پلاریزاسیون پتانسیواستاتیک سیم ارتودنسی NiTiNb در محلول ۰/۲۵ مولار فلوئوراید.

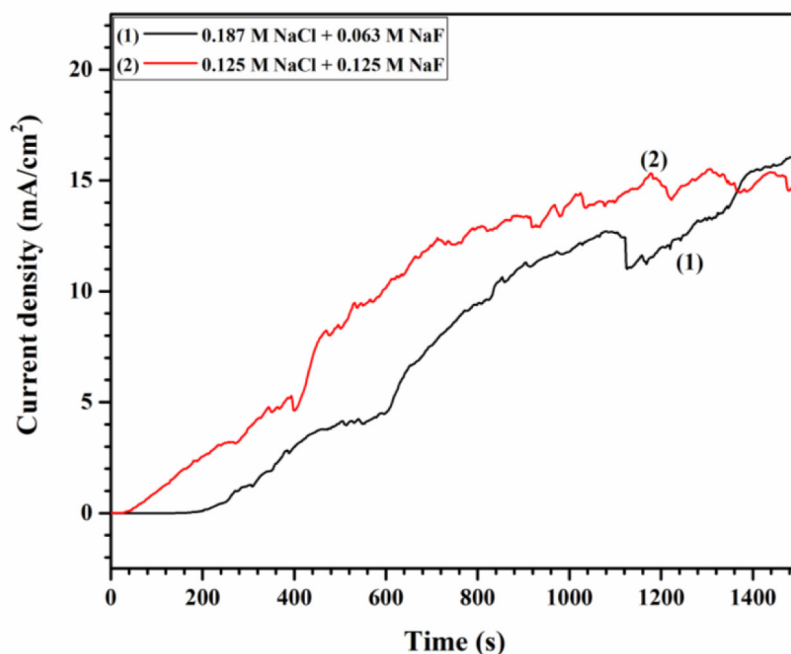
باشد، لایه اکسید تشکیل شده پایدارتر است [۱۵].

$$i = A.t^b \rightarrow \log i = a + b \log t \quad (10)$$

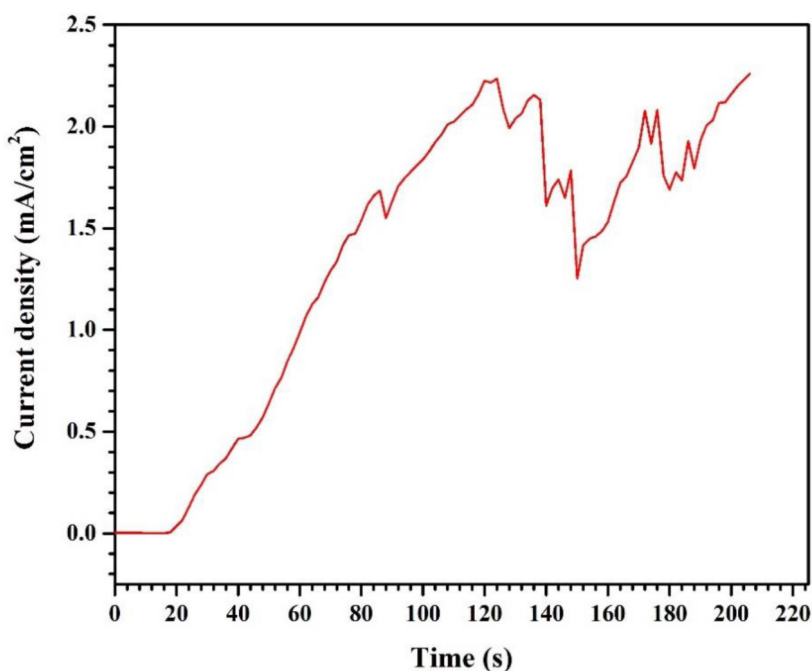
شکل ۱۰ منحنی پلاریزاسیون پتانسیواستاتیک برای محلول

۰/۱۲۵ M NaCl + ۰/۱۲۵ M NaF و ۰/۱۸۷ M NaCl + ۰/۰۶۳ M NaF

اساس رابطه‌ی (۱۰) که توسط گالول ارائه شده است هر چه مقدار b به ۱- نزدیک‌تر باشد بیان‌گر تشکیل لایه‌ی پسیو بسیار محافظ و با عیوب کم است [۴]. خانم رن و همکاران نیز بیان کردند که کاهش خطی جریان با گذشت زمان به رشد لایه‌ی اکسید نسبت داده می‌شود و هر چه شیب نمودار $\log(i) - \log(t)$ به عدد ۱- نزدیک‌تر



شکل ۱۰- منحنی پلاریزاسیون پتانسیواستاتیک برای محلول ۰/۱۲۵ M NaCl + ۰/۱۲۵ M NaF و محلول ۰/۱۸۷ M NaCl + ۰/۰۶۳ M NaF



شکل ۱۱- منحنی پلاریزاسیون پتانسیواستاتیک برای محلول ۰/۱۸۷ M NaF + ۰/۰۶۳ M NaCl

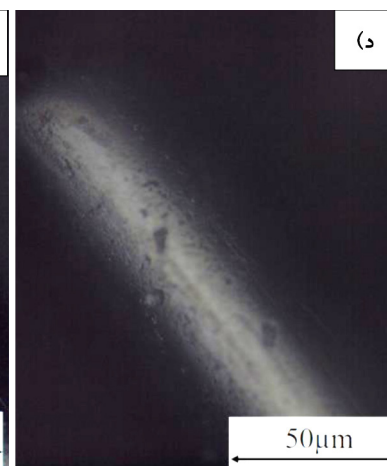
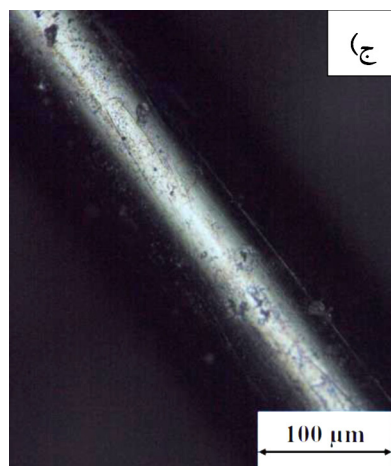
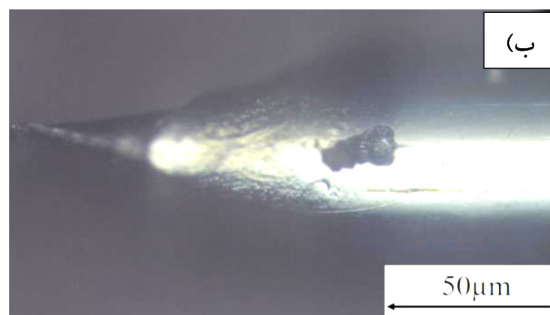
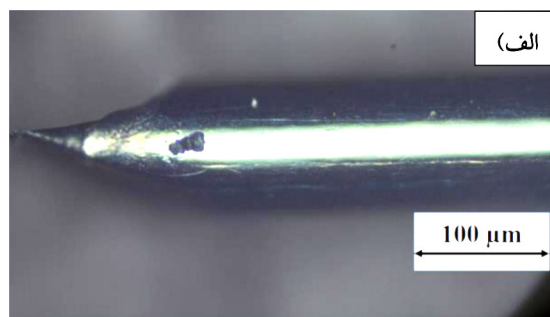
بازگشت شدت جریان، آزمون قطع شده و نمونه مورد بررسی میکروسکوپی قرار گرفت. مشاهدات حاکی از تشکیل حفره در نقاط مختلف و به صورت پراکنده است. شکل ۱۲، نمایانگر حفرات تشکیل شده در سطح سیم ارتودنسی NiTi در محلول ۰/۰۵ مولار کلراید می‌باشد. حفرات حاصل به شکل کروی و بدون الگوی خاصی در مناطق مختلف سیم وجود داشتند. شکل (۱۲ الف) حفره تشکیل شده در انتهای سیم، و شکل (۱۲ ب) حفره تشکیل شده در مرکز سیم را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تفاوتی بین حفرات تشکیل شده در مناطق مختلف نمی‌باشد.

را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زمان القا به ترتیب ۲۰۰ ثانیه و ۵۰ ثانیه می‌باشد و پس از این دوره زمانی حفرات پایدار تشکیل می‌شوند.

شکل ۱۱ منحنی پلاریزاسیون پتانسیواستاتیک برای محلول $0.187 \text{ M NaF} + 0.063 \text{ M NaCl}$ را نشان می‌دهد. در این محلول نیز تقریباً پس از ۲۰ ثانیه حفرات پایدار تشکیل می‌شوند.

۳-۳- تصاویر میکروسکوپ نوری

با انجام آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و تشکیل حفره‌ی پایدار، به محض وقوع خوردگی و افزایش ناگهانی و بدون



شکل ۱۲- حفرات تشکیل شده در سطح سیم ارتودنسی NiTi در محلول ۰/۰۵ مولار کلراید. الف) انتهای سیم در بزرگنمایی ۲۰۰ (ب) انتهای سیم در بزرگنمایی ۵۰۰ (ج) مرکز سیم در بزرگنمایی ۲۰۰ (د) مرکز سیم در بزرگنمایی ۵۰۰.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش حاکی از آن است که، سیم ارتودنسی NiTi در محلول حاوی یون فلوئوراید رفتار کاملاً پسیو دارد و در محلول حاوی یون کلراید دچار خوردگی حفره‌ای می‌شود. یون فلوئوراید برای سیم‌های ارتودنسی NiTi خاصیت بازدارندگی دارد و با افزایش غلظت این یون و کاهش غلظت یون کلراید، پتانسیل حفره‌دار شدن افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت یون فلوئوراید، شدت جریان پسیویتی سیم‌های ارتودنسی NiTi به اندازه ده برابر افزایش می‌یابد. سیم ارتودنسی NiTiNb در محلول حاوی یون فلوئوراید رفتار کاملاً پسیو دارد و در محلول حاوی یون کلراید و فلوئوراید دچار خوردگی حفره‌ای می‌شود.

مراجع

- [1] B. Subhashchandra, History of orthodontics, Jaypee brothers medical publishers (P) LTD, 1st Ed., 2013.
- [2] W.R. Proffit, H.W. Fields, D.M. Sarver, Contemporary Orthodontics, Mosby Elsevier, 4th Ed., 2007.
- [3] N. Schiff, B. Grosogeat, M. Lissac, F. Dalard, Biomaterials Journal, Vol. 23, No. 9, 2002, Pp. 1995–2002.
- [4] M.G. Alvarez, J.R. Galvele, Pitting Corrosion, Shreir's Corrosion, Elsevier, Oxford, 2010, Pp. 772-800.
- [5] T. P. Chaturvedi, Corrosion behavior of orthodontic alloys, PhD thesis., Banaras Hindu University Varanasi, 2013.
- [6] X. Li, J. Wang, Influence of fluoride and chloride on corrosion behavior of NiTi orthodontic wires, Acta Biomaterialia, Vol. 3, 2007, Pp 807–815.
- [7] M. Mirjalili, M. Momeni, N. Ebrahimi, M.H. Moayed, Comparative study on corrosion behaviour of nitinol and stainless steel orthodonticwires in simulated saliva solution in presence of fluoride ions, Materials Science and Engineering, Vol. 33, 2013, Pp. 2084–2093.
- [8] Y. Oshida, F. Farzin, Response of Ti-Ni alloys for dental biomaterials to conditions in the mouth, Shape memory alloys for biomedical applications, Woodhead publishing limited, 2008.
- [9] F. Heravi, M. H. Moayed, N. Mokhber, Effect of fluoride on Ni-Ti and stainless steel orthodontic archwire, Journal of dentistry of tehran university of medical sciences, Vol. 12, 2015, Pp. 49-59.
- [10] A. R. W. Marsh, W. J. McElory, The Dissociation constant Henry's law constant of HCl in aqueous solution, Atmospheric Environment, Vol. 19, No. 7, 1985 Pp. 1075-1080.
- [11] A. K. Covinaton, The dissociation constant of HF, Journal of Chemical Education, Vol. 49, 1972, Pp. 554- 556.
- [12] N. Laycock, P. Laycock, P. Scarf, D. Krouse, Applications of statistical analysis techniques in corrosion experimentation, Testing, Inspection and monitoring, Shreir's corrosion, Elsevier, Oxford, 2010, Pp. 1549-1574.
- [13] E. Mc Cafferty, Introduction to corrosion science. Springer science & business media, 2010.
- [14] G. T. Burstein, Passivity and localized corrosion, Shreir's corrosion, Elsevier, Oxford, 2010, Pp. 731-752.
- [15] L. Wang, K. Daub, Z. Qin, J.C. Wren, Effect of dissolved ferrous iron on oxide film formation on carbon steel, Electrochimica Acta, Vol. 76, 2012, Pp. 208-217.