

## بررسی تأثیر الکترولیت و ولتاژ در ماشین کاری الکتروشیمیایی ترکیب بین فلزی Ni-50%Ti

حمیدرضا عسگری بیدهندی

عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، گروه مواد، دزفول، ایران

hr.asgari@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۰۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۲/۱۲)

### چکیده

در این پژوهش، تأثیر ولتاژ اعمالی و الکترولیت در فرآیند ماشین کاری الکتروشیمیایی نایتینول بررسی شده است. بدین منظور، ابتدا پتانسیل فروپاشی فیلم اکسیدی ( $E_{transpassive}$ ) با استفاده از پلاریزاسیون سیکی تعیین شده و سپس انحلال آندی آلیاژ نایتینول (50%Ni - 50%Ti) با استفاده از دستگاه پتانسیواستات در سه محلول مختلف با پایه نمک طعام اشباع انجام گردید. ولتاژ ماشین کاری از ۲ ولت تا حدود ۳۰ ولت (پتانسیل‌های بالاتر از  $E_{transpassive}$ ) تغییر داده شده است. پارامترهای مورد بررسی، سرعت ماشین کاری (چگالی جریان تولید شده)، شاخصه‌های نمودار جریان بر حسب زمان و کیفیت نهایی سطح (صافی‌سنجی) بوده است. دیده شد که فرآیند تصمیم‌گیری چند شاخصه می‌تواند برای انتخاب یک الکترولیت و ولتاژ مناسب برای ECM استفاده شود. مناسب‌ترین الکترولیت با توجه به پارامترهای کمی و کیفی، مربوط به الکترولیت  $2/4 \text{ gr/lit NaF} + 300 \text{ gr/lit NaCl}$  در حدود ۲۲ تا ۲۶ ولت می‌باشد. زبری موجود بر روی سطح ماشین کاری شده تا حدود زیادی مربوط به ریزساختار نایتینول می‌باشد.

### واژه‌های کلیدی:

ماشین کاری الکتروشیمیایی (ECM)، انحلال آندی، نایتینول، فرآیند تصمیم‌گیری چند شاخصه (MADM).

### ۱- مقدمه

آلیاژ را از سایر مواد متمایز می‌سازد [۲]. خواص مکانیکی عالی نایتینول- خاصیت سوپر الاستیسیته (۵۰٪ کرنش الاستیک قبل از شکست)، کرنش سختی بسیار زیاد، چقرمگی بالا و گرانروی- قابلیت ماشین کاری را در این آلیاژ بسیار پایین آورده است [۳]. برای غلبه بر این مشکل فرآیندهای ماشین کاری جدیدی مانند ماشین کاری الکتروشیمیایی (ECM) و ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM) توسعه یافته‌اند [۴-۶].

آلیاژ نایتینول، ترکیبی بین فلزی با نسبت‌های اتمی برابر Ni و Ti می‌باشد که البته با توجه به خواص مورد انتظار گاهی عناصر آلیاژی دیگری نیز به آن اضافه می‌شود [۱]. این آلیاژ مدول الاستیک بالایی داشته، بسیار سخت بوده و مقاومت به خوردگی عالی دارد. همچنین خاصیت حافظه‌داری در این آلیاژ، انعطاف‌پذیری مناسب و مقاومت عالی در برابر خستگی، این

کلوئیدی در گپ ماشین کاری می‌باشد که ممکن است باردار شده، به سوی الکترودها حرکت کرده و از ماشین کاری جلوگیری نماید. کلرید سدیم از مهم‌ترین الکترولیت‌های لجن‌زا است که در بیشتر موارد بکارگیری آن نتایج رضایت‌بخشی به همراه دارد. هدایت الکتریکی کلرید سدیم در طول عملیات تقریباً ثابت باقی می‌ماند، چرا که رسانایی الکتریکی آن نسبت به تغییرات pH حساس نمی‌باشد. قابلیت کالیبراسیون الکترولیت‌های نمک طعام به همین دلیل بسیار مطلوب بوده و نسبت به اسیدها و قلیاها (الکترولیت‌های غیر لجن‌زا) که رسانایی الکتریکی آنها نسبت به تغییرات pH حساس است، ارجحیت دارد. اسیدها برای ماشین کاری مولیدن و بازها برای ماشین کاری مولیدن و تنگستن به کار می‌روند. محلول‌های اسیدی قوی، مانند اسید سولفوریک، در بعضی از موارد سطوحی با پرداخت خوب ایجاد می‌کنند.

در مورد آلیاژهایی چون آهن، نیکل و تیتانیوم سه منطقه فعال خوردگی، پسیو و ترانس‌پسیو قابل تمیز دادن می‌باشد. عملیات ماشین کاری الکتروشیمیایی با توجه به سرعت ماشین کاری و یا صافی سطح مطلوب در گستره‌ای از ولتاژ انجام می‌شود که فلز در منطقه ترانس‌پسیو برای سرعت بالاتر و یا پسیو برای سطحی صاف‌تر باشد. سرعت‌های بالای ماشین کاری در منطقه ترانس‌پسیو قابل دسترسی است. در منطقه فعال، سرعت باربرداری پایین بوده و از طرف دیگر سطح کاملاً ناهموار و زبری ایجاد می‌شود.

برای ماشین کاری مواد مختلفی از ECM استفاده شده است. والتر<sup>۱</sup> و همکارانش [۶] برای ماشین کاری سرمت‌های زمینه تیتانیومی از الکترولیت نترات سدیم اشباع استفاده کرده است. چگالی‌های جریان بیش از ۳۵ آمپر بر سانتی‌متر مربع و پتانسیل‌های اعمالی کمتر از ۱۰ ولت بوده‌اند. با توجه به سلامتی بودن ذرات تقویت‌کننده، وجود چنین چگالی جریان بالایی مورد نیاز می‌باشد.

لی<sup>۲</sup> و همکارانش برای ایجاد شیارهایی در ابعاد میکرو از دو نوع الکترولیت NaCl و NaNO<sub>3</sub> با درصدهای مختلف استفاده کرده

در فرآیند EDM یک تخلیه الکتریکی بین الکتروود و قطعه کاری که در یک ماده دی‌الکتریک قرار داده شده‌اند، برقرار شده، مقادیر اندکی از فلز را ذوب کرده، تبخیر می‌نماید و توسط سیال دی‌الکتریک از محل منتقل می‌شوند. سرعت ماشین کاری در EDM به دلیل ذات فرآیند بسیار پایین بوده و ایجاد کیفیت سطحی مطلوب به همراه دقت بالای ابعادی در اشکال سه بعدی بر روی آلیاژهایی نظیر نایتینول بسیار مشکل است. البته مزیت عمده EDM، ماشین کاری سرمایه‌ها است [۶]. به دلیل قابلیت ساخت اشکال پیچیده سه بعدی از مواد سخت، استفاده از فرآیند ماشین کاری الکتروشیمیایی (Electro-Chemical Machining: ECM) به طور روزافزونی در صنایع مواد زیستی، هواپیمایی و هوافضا در حال گسترش است [۸-۴]. در فرآیند ECM قطعه کار در یک مدار الکتریکی قرار می‌گیرد. قطعه کار (آند)، الکتروود (کاتد)، اتصال الکتریکی بین آند و کاتد و یک الکترولیت رسانا که قطعه کار در آن خورده می‌شود، اجزای مختلف مدار ECM هستند. به منظور ماشین کاری قطعه کار و برداشت ماده، از ابزار یا الکتروودی که قبلاً به شکل مناسبی درآمده است، استفاده می‌شود. در حین انجام فرآیند، سیال الکترولیت به گپ کوچکی که بین ابزار و قطعه کار وجود دارد، پمپ می‌شود. با عبور جریان الکتریکی از مدار الکتریکی که در بالا به آن اشاره شد، قطعه کار در محل‌های نزدیک به سطح الکتروود خورده می‌شود. ولتاژ اعمالی در مدار، نوع الکترولیت و pH آن، چگالی جریان، فاصله بین کاتد و قطعه کار، سرعت جریان الکترولیت و دما از اصلی‌ترین متغیرهای این فرآیند به شمار می‌روند [۲].

به طور کلی الکترولیت‌های ماشین کاری و آبکاری را می‌توان به دو دسته الکترولیت‌های لجن‌زا و الکترولیت‌های غیر لجن‌زا تقسیم‌بندی کرد. الکترولیت‌های لجن‌زا، محلول نمک‌های معدنی مانند کلرید سدیم و کلرید پتاسیم می‌باشند. این الکترولیت‌ها تولید هیدروکسید می‌نمایند که حالت لجن داشته و بر روی قطب مثبت می‌نشینند. یکی از پدیده‌های زیان‌باری که ممکن است در الکترولیت‌های لجن‌زا به وجود آید، تشکیل لجن

وزن هر یک از پارامترها کار می‌کند. البته ارتباط بین پارامترهای مختلف نیز در نظر گرفته می‌شود [۹].

## ۲- مواد و روش‌ها

نمونه‌های نایتینولی مورد استفاده در این پژوهش دارای ترکیب شیمیایی  $50\%Ti - 50\%Ni$  بوده‌اند. الکترولیت‌های مورد استفاده در این تحقیق با توجه به الکترولیت‌های استاندارد برای ماشین کاری الکتروشیمیایی آلیاژهای نیکل و آلیاژهای تیتانیوم انتخاب شده [۴-۲ و ۸] و در جدول (۲) لیست شده‌اند. در ابتدا نمودارهای پلاریزاسیون سیکنی نایتینول با استفاده از دستگاه AutoLab PGSTAT30 در هر یک از الکترولیت‌ها به دست آمد. پتانسیل نمونه‌ها از مقادیر منفی تا مثبت ۹ ولت و با نرخ  $0.1$  ولت بر ثانیه تغییر داده شده و جریان خوردگی نمونه‌ها توسط دستگاه ثبت گردید. هدف از این کار تعیین حدود پتانسیل فروپاشی فیلم اکسیدی بر روی سطح نایتینول و خوردگی الکترولیت‌های مختلف بوده است.

سپس ماشین کاری الکتروشیمیایی در هر یک از الکترولیت‌ها با استفاده از یک دستگاه پولیش STRUERS LECTROPOL-5 که قابلیت رسم نمودار چگالی جریان نسبت به زمان (آمپرومتری) را دارد، انجام شد. پتانسیل اعمالی از ۳ ولت تا ۴۰ ولت تغییر داده شد. کاتد از جنس فولاد زنگ‌نزن و مساحت آن ۶ سانتی‌متر مربع بود که در مقایسه با مساحت قطعات نایتینولی  $0.5$  سانتی‌متر مربع بزرگ می‌باشد. فاصله آند تا کاتد در تمام آزمایشات ۱ سانتی‌متر ثابت نگه داشته شده است. از روی شکل نمودار آمپرومتری می‌توان در مورد سرعت باربرداری و همچنین کیفیت سطحی اظهار نظر کرد. معیار زبری سطح متوسط  $Ra$  نیز در سه جهت مختلف روی نمونه اندازه‌گیری شده و متوسط آنها اعلام شد. در نهایت برای هر یک از پارامترهای اندازه‌گیری شده (شامل سرعت باربرداری، یکنواختی باربرداری، زبری سطح و وجود حفره) مطابق فرآیند تصمیم‌گیری چند شاخصه، رابطه‌ای لحاظ شده و با توجه به اهمیت آن پارامتر در کیفیت، ضریبی نیز در نظر گرفته شد. با توجه به نمره نهایی، می‌توان

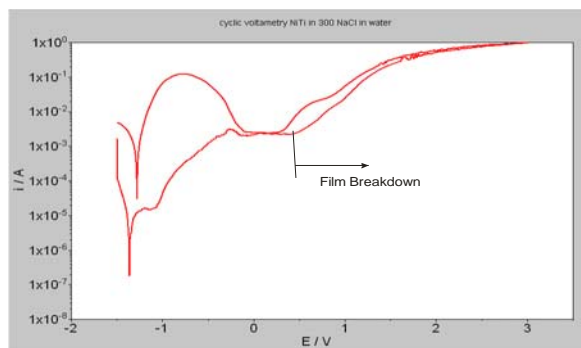
است. به دلیل وجود یون  $Cl^-$  ماشین کاری با نمک NaCl به تنهایی بسیار مشکل بوده و با اضافه کردن نمک‌های دیگر این مشکل را مرتفع نموده‌اند. بازده جریان الکتریکی در الکترولیت NaCl نزدیک به  $100\%$  می‌باشد و برای تولیدات سری با سرعت بالا مناسب است [۷].

در تحقیق پیش رو ماشین کاری الکتروشیمیایی نایتینول در محیط نمک طعام اشباع و همچنین محیط‌های نمک طعام اشباع به همراه جزء دوم رباینده<sup>۳</sup> که برای متمرکز نمودن دامنه ماشین کاری اضافه می‌شوند، انجام شده است. از الکترولیت‌های دو جزئی برای میکروماشین کاری الکتروشیمیایی که دقتی در حد چند میکرون دارد استفاده می‌شود [۳].

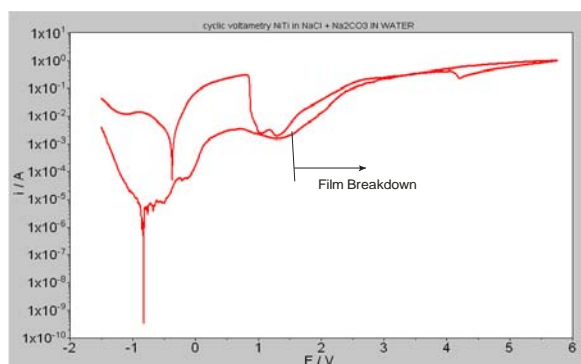
در ابتدا، با توجه به تفاوت‌های ساختاری ماشین کاری در گستره فعال، پسیو و ترانس‌پسیو فلز، با استفاده از آزمون پلاریزاسیون سیکنی در هر یک از الکترولیت‌ها، محدوده‌های خوردگی نایتینول در الکترولیت‌ها به دست می‌آید.

پس از آن، در پتانسیل‌های مختلف، نمودار آمپرومتری نایتینول تهیه شده و با استفاده از خصوصیات این نمودار، زبری سطح اندازه‌گیری گردیده روی نمونه‌های ماشین کاری شده و چگالی جریان خوردگی، بر اساس فرآیند تصمیم‌گیری چند معیاری<sup>۴</sup>، پتانسیل و الکترولیت مناسب برای ECM معرفی می‌گردد. در فرآیند تصمیم‌گیری چند معیاری، تصمیم‌گیری در مورد وقوع عملی و یا انجام کاری، بر مبنای وزن نسبی هر یک از پارامترها صورت می‌گیرد. مراحل فرآیند تصمیم‌گیری چند شاخصه در جدول (۱) آورده شده است [۹].

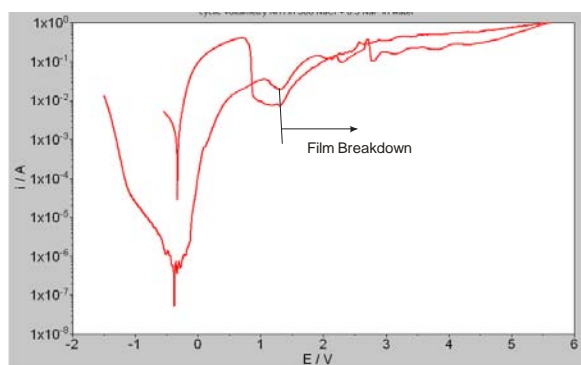
روابط و وزن‌ها با توجه به انتظارات و توقعات از پارامترها تعیین می‌شوند و احتمالاً برای هر فردی متمایز از دیگران است. فرآیند تصمیم‌گیری چند شاخصه، دارای روش‌های گوناگونی بوده و حتی ممکن است حل مسئله با هر یک از این روش‌ها نیز جوابی منحصر به فرد و متفاوت ارائه دهد؛ بنابراین انتخاب نوع روش حل نیز مهم و حیاتی است. در این پژوهش از روش تصمیم‌گیری چند شاخصه<sup>۵</sup> استفاده شده است که برای حل مسائل "انتخاب شرایط خاص" از بین شرایط مختلف و بر مبنای



شکل (۱): نمودار پلاریزاسیون سیکلی نایتینول در محلول آبی  $300 \text{ gr/Lit NaCl}$  (نمودار رفت، شاخه پایینی است).



شکل (۲): نمودار پلاریزاسیون سیکلی نایتینول در محلول آبی  $300 \text{ gr/lit NaCl} + 3/3 \text{ gr/lit Na}_2\text{CO}_3$  (نمودار رفت، شاخه پایینی است).



شکل (۳): نمودار پلاریزاسیون سیکلی نایتینول در محلول آبی  $300 \text{ gr/Lit NaCl} + 2/4 \text{ gr/Lit NaF}$  (نمودار رفت، شاخه پایینی است).

جدول (۱): مراحل فرآیند تصمیم‌گیری چند شاخصه [۹].

الف- شناسایی و ارزیابی	
۱-	شناسایی شرکت کنندگان و تصمیم‌گیرندگان
۲-	شناسایی گزینه‌های موجود
۳-	شناسایی شاخص‌ها و پارامترها
۴-	انتخاب یک روش از روش‌های MADM
۵-	ارزیابی گزینه‌ها توسط تصمیم‌گیرندگان
ب- وزن‌دهی به پارامترها و شاخص‌ها	
۱-	برقراری ارتباط مستقیم بین شاخص‌ها و نتیجه با استفاده از روابط ریاضی که شاخص‌ها را قبل از وزن‌دهی هم‌تراز می‌نمایند.
۲-	وزن‌دهی به شاخص‌ها با استفاده از اطلاعات عینی و اهمیت آنها در ذهن تصمیم‌گیرنده
ج-	انتخاب گزینه مؤثر با استفاده از روش انتخاب شده
د-	آنالیز حساسیت
ه-	انتخاب گزینه نهایی

جدول (۲): الکترولیت‌های ماشین‌کاری الکتروشیمیایی نایتینول.

ردیف	الکترولیت
۱	$300 \text{ gr/lit NaCl} + 2/4 \text{ gr/lit NaF}$
۲	$300 \text{ gr/lit NaCl}$
۳	$300 \text{ gr/lit NaCl} + 3/3 \text{ gr/lit Na}_2\text{CO}_3$

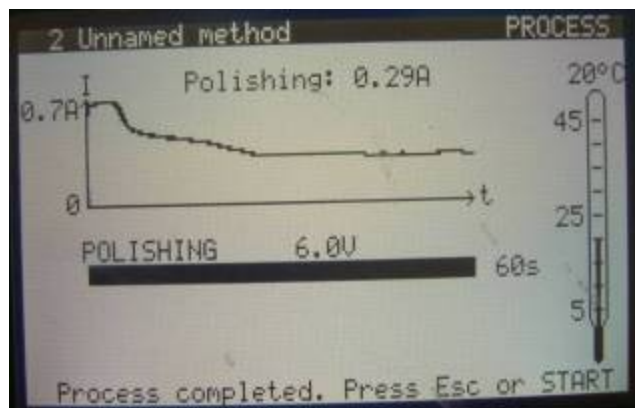
الکترولیتی را از بین الکترولیت‌های مورد بررسی انتخاب نمود.

### ۳- نتایج و بحث

نمودارهای پلاریزاسیون سیکلی مربوط به نایتینول در هر یک از الکترولیت‌ها در شکل‌های (۱)، (۲) و (۳) آمده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، نایتینول در هر سه الکترولیت مورد بحث دچار فروپاشی لایه اکسیدی محافظ<sup>۶</sup> می‌گردد؛ پس سه ناحیه فعال خوردگی، پسیو و ترانس‌پسیو در هر سه الکترولیت قابل ایجاد بوده و می‌توان ماشین‌کاری را در هر یک از این نواحی انجام داد. داده‌های استخراج شده از نمودارهای پلاریزاسیون سیکلی در جدول (۳) آورده شده است. نایتینول در هر سه

جدول (۳): اطلاعات به دست آمده از منحنی های پلاریزاسیون نایتینول در الکترولیت های نمکی.

الکترولیت	$i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$E_{corr}$ (mV)	$E_{passivation}$ (mV)	$E_{transpassive}$ (mV)
۱ ۳۰۰ gr/lit NaCl + ۲/۴ gr/lit NaF	$۲/۱۵ \times ۱۰^{-۶}$	-۳۷۸	۱۰۵۱	۱۳۶۹
۲ ۳۰۰ gr/lit NaCl	$۲/۰۰ \times ۱۰^{-۶}$	-۱۳۶۰	-۲۵۴	۴۴۶
۳ ۳۰۰ gr/lit NaCl + ۳/۳ gr/lit Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	$۳/۲۶ \times ۱۰^{-۷}$	-۸۵۲	۷۵۳	۱۳۲۹



شکل (۴): نمودار مربوط به ماشین کاری الکتروشیمیایی یکی از نمونه ها در الکترولیت نمک طعام اشباع در ولتاژ ۶ ولت.

الکترولیت در ولتاژهای بالاتر از ۲ ولت در منطقه ترانسپسیو می باشد. بنابر این همه تست های ECM در ولتاژهای بیشتر از ۲ ولت انجام می گیرد که سرعت باربرداری بالا باشد. یک نمونه از نمودار آمپرومتری حاصل از ماشین کاری الکتروشیمیایی در شکل (۴) نشان داده شده است. نتایج حاصل از ECM نایتینول در الکترولیت های مختلف (که هر یک نموداری شبیه به نمودار شکل (۴) داشته اند) به همراه نمرات هر یک از پارامترهای مؤثر در تعیین کیفیت در جداول (۴) تا (۶) آورده شده است. در مورد نمره دهی به نمودارهای آمپرومتری باید به نکات زیر توجه شود:

۱- وجود نوسان در منحنی به معنای ناپایداری باربرداری در پتانسیل تست و محلول مورد نظر می باشد. در این صورت در حین تست، لایه های پسیو بر روی فلز ایجاد شده و این لایه دچار فروپاشی شده و سپس دوباره تشکیل می گردد.

۲- شیب مثبت در نمودار، نشان دهنده افزایش سرعت باربرداری با گذشت زمان است. در این حالت، کالبره کردن مقدار

باربرداری با زمان مشکل خواهد بود.

۳- شیب منفی در نمودار، نشان دهنده کاهش سرعت ماشین کاری با گذشت زمان است. در این حالت، کالبره کردن باربرداری با زمان مشکل می باشد. به علاوه اینکه با گذشت زمان ضخامت لایه اکسیدی افزایش یافته و به احتمال قوی، این لایه پس از ضخیم شدن یا از خوردگی بیشتر جلوگیری کرده و یا دچار فروپاشی و تولید پیک در نمودار می کند.

۴- وجود پیک در نمودار به معنی افزایش ناگهانی مقدار ماده برداشته شده و ایجاد حفره بر روی سطح است. با پسیو شدن حفره، پیک خاتمه می یابد.

۵- ثابت بودن تغییرات چگالی جریان آندی با زمان (عدم وجود نوسان در نمودار)، حالتی بهینه برای ماشین کاری الکتروشیمیایی است. در این حالت به سادگی می توان از روی زمان ماشین کاری، نرخ باربرداری را محاسبه کرد. همچنین، در این صورت سطحی صاف تولید می شود.

جدول (۴): اطلاعات مربوط به ولتاژهای مختلف اعمال شده بر روی نایتینول در الکترولیت ۳۰۰ gr/lit NaCl.

ولتاژ	۳	۶	۹	۱۲	۱۵	۱۸	۲۰	۲۲	۲۴	۲۶
چگالی جریان واقعی (صفر تا ۶ آمپر)	۰/۰۱	۰/۴	۱/۲	۲	۲/۸۷	۳/۸۲	۴/۵	۵/۲۷	۶/۰۸	۵/۹۱
چگالی جریان تعدیل شده (نمره از ۲۰)	۰/۸۲	۵/۱۶	۸/۹۴	۱۱/۵۵	۱۳/۸۳	۱۵/۹۶	۱۷/۳۲	۱۸/۷۴	۲۰/۱۳	۱۹/۸۵
وجود نوسانات (نمره از ۶)	۵	۵	۵	۵	۵	۶	۶	۶	۶	۶
وجود پیک (نمره از ۶)	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶
عدم وجود شیب در یک دقیقه (نمره از ۸)	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷
زبری سطح تعدیل شده با رابطه (Ra / ۶/۲۵)	۲/۲۹	۲/۳۳	۲/۲۹	۲/۲۹	۲/۵۱	۲/۷۸	۳/۱۷	۳/۴۷	۳/۹۳	۴/۳۷
جمع امتیاز - کیفیت مقایسه‌ای	۲۱/۱	۲۵/۵	۲۹/۲	۳۱/۸	۳۴/۳	۳۷/۷	۳۹/۵	۴۱/۲	۴۳/۱	۴۳/۲

جدول (۵): اطلاعات مربوط به ولتاژهای مختلف اعمال شده بر روی نایتینول در الکترولیت ۳۰۰ gr/lit NaCl + ۲/۴ gr/lit NaF.

ولتاژ	۳	۶	۹	۱۲	۱۴	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲	۲۴	۲۶
چگالی جریان (صفر تا ۶ آمپر)	۰/۰۵	۰/۳۸	۱/۱۷	۱/۹۹	۲/۵۳	۳/۳	۳/۹۳	۴/۵	۵/۳	۶/۰۷	۶/۰۵
چگالی جریان تعدیل شده (نمره از ۲۰)	۱/۸۳	۵/۰۳	۸/۸۳	۱۱/۵۲	۱۲/۹۹	۱۴/۸۳	۱۶/۱۹	۱۷/۳۲	۱۸/۸۰	۲۰/۱۲	۲۰/۰۸
وجود نوسانات (نمره از ۶)	۶	۵/۵	۵/۵	۵/۵	۵/۵	۶	۵	۵	۵	۵/۵	۵/۵
وجود پیک (نمره از ۶)	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶
عدم وجود شیب در یک دقیقه (نمره از ۸)	۷/۵	۷/۵	۸	۸	۸	۷/۵	۸	۷/۵	۷/۵	۸	۸
زبری سطح تعدیل شده با رابطه (Ra / ۶/۲۵)	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۳	۳/۱۳	۶/۲۵	۸/۹۶	۱۱/۰۴	۱۲/۷۱	۱۵/۰۰
جمع امتیاز - کیفیت مقایسه‌ای	۲۲/۲	۲۴/۹	۲۹/۲	۳۱/۹	۳۳/۳	۳۷/۵	۴۱/۴	۴۴/۸	۴۸/۳	۵۲/۳	۵۴/۶

بالاترین نمره برای صافی سطح (عکس زبری)، ۱۵ در نظر گرفته شده است.

همانگونه که در جداول (۴) تا (۶) مشاهده می‌شود، مطابق یک قاعده کلی هر چه ولتاژ اعمالی در الکترولیت مشخصی بیشتر شود، کیفیت کلی ECM بالاتر خواهد بود. در مورد الکترولیت  $300 \text{ gr/lit NaCl} + 3/3 \text{ gr/lit Na}_2\text{CO}_3$  در ولتاژهای بالاتر از ۲۴ ولت، کیفیت ECM در مقایسه با ماشین کاری در سایر الکترولیت‌ها افت می‌نماید. این امر که از نوسانات زیاد در نمودارهای آمپرومتری ناشی شده است، ممکن است به دلیل ریزساختار ناهمگن نایتینول باشد.

در واقع در گستره‌ای از ولتاژ، یکی از فازهای موجود در ریزساختار پسیو می‌شود. با گذشت زمان و باربرداری از نواحی مجاور این قسمت از فلز جدا شده و جریان به دلیل در معرض قرار گرفتن قسمت‌های زیرین افزایش می‌یابد. دیاگرام فازی

چگالی جریان آندی، برای سرعت بخشیدن به فرآیند ECM اهمیت زیادی دارد، از این رو با توجه به نمرات سایر پارامترها، برای چگالی جریان ۶ آمپر بر سانتی‌متر مربع، نمره ۲۰ در نظر گرفته شده است. چگالی جریان‌های بیشتر از ۴/۵ آمپر بر سانتی‌متر مربع نیز باید نمره‌ای بالا داشته باشند، از این رو فرمول تعدیل شده نمره برای چگالی جریان به صورت (۱) در نظر گرفته شده است که در آن  $i$  چگالی جریان آندی بوده و برای چگالی جریان  $6 \text{ A/cm}^2$ ،  $\text{Mark}(i) = 20$  می‌باشد.

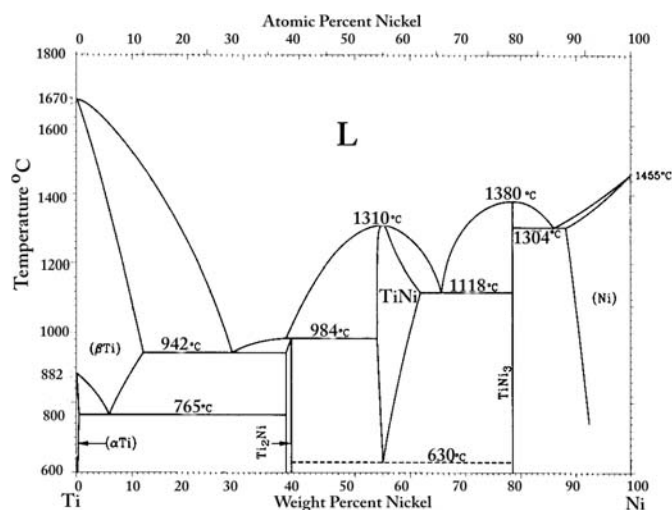
$$\text{Mark}(i) = 8.165 \times \sqrt{i} \quad (1)$$

زبری سطح در ماشین کاری مطلوب نبوده و به همین جهت باید عکس آن برای نمره‌دهی به کار رود. از آنجا که تفاوت نمرات مستقیم زبری سطح با یکدیگر کم می‌باشد از فرمول تعدیل شده (۲) برای زبری سطح استفاده شده است.

$$\text{Mark}(R_a) = 6.25 / R_a \quad (2)$$

جدول (۶): اطلاعات مربوط به ولتاژهای مختلف اعمال شده بر روی نایتینول در الکترولیت  $3.00 \text{ gr/lit NaCl} + 3/3 \text{ gr/lit Na}_2\text{CO}_3$ .

ولتاژ	۳	۶	۹	۱۲	۱۴	۱۸	۲۰	۲۲	۲۴	۲۶	۲۸	۳۰
چگالی جریان (صفر تا ۶ آمپر)	۰/۰۱	۰/۳	۱/۰۴	۱/۸	۲/۳۶	۳/۶	۴/۱۷	۴/۵۷	۵/۴۲	۵/۷۶	۵/۲۵	۶/۱۱
چگالی جریان تعدیل شده (نمره از ۲۰)	۰/۸۲	۴/۴۷	۸/۳۳	۱۰/۹۵	۱۲/۵۴	۱۵/۴۹	۱۶/۶۷	۱۷/۴۵	۱۹/۰۱	۱۹/۶۰	۱۸/۷۱	۲۰/۱۸
وجود نوسانات (نمره از ۶)	۶	۴/۵	۵/۵	۵	۵	۵/۵	۵/۵	۵	۴	۳/۵	۲	۳
وجود پیک (نمره از ۶)	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۵	۴/۵	۳	۴
عدم وجود شیب در یک دقیقه (نمره از ۸)	۸	۶	۷/۵	۷/۵	۷	۷/۵	۶	۶	۶	۶	۷/۵	۷/۵
زبری سطح تعدیل شده با رابطه (Ra / ۶/۲۵)	۱/۶۶	۱/۶۷	۱/۶۵	۱/۶۷	۱/۶۸	۲/۰۸	۲/۱۰	۲/۱۰	۲/۲۸	۲/۳۱	۲/۵۲	۱/۲۵
جمع امتیاز - کیفیت مقایسه‌ای	۲۲/۵	۲۲/۶	۲۹/۰	۳۱/۱	۳۲/۲	۳۶/۶	۳۶/۳	۳۶/۶	۳۶/۳	۳۵/۹	۳۳/۷	۳۵/۹



شکل (۵): دیاگرام فازی نیکل - تیتانیوم [۱۰].

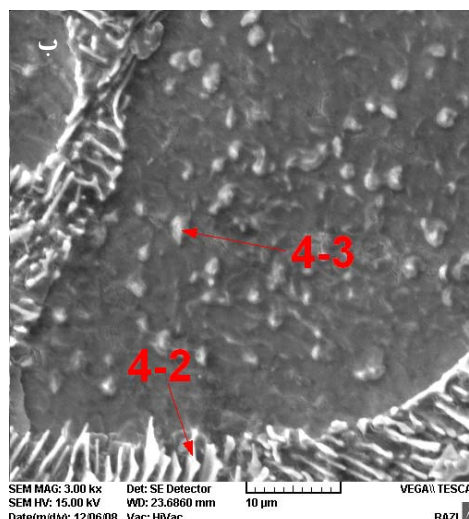
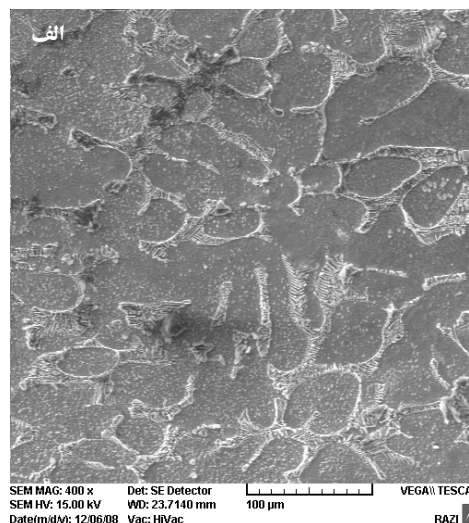
فازهای تیتانیوم  $\alpha$ ،  $\text{Ti}_2\text{Ni}$  و  $\text{TiNi}_3$  خواهد بود. ریزساختار به دست آمده از میکروسکوپ SEM (شکل ۶- الف و ب) نیز ساختاری متشکل از سه فاز را نشان می‌دهد. یک فاز زمینه پیوسته، یک فاز تیغه‌ای و یک فاز که به صورت ذراتی در زمینه پیوسته وجود دارد.

آنالیزهای EDS از نقاط 2-4 و 3-4 شکل (۶- ب) در جدول (۷- الف و ب) آورده شده است. با توجه به آنالیزهای EDS

نیکل - تیتانیوم در شکل (۵) آمده است [۱۰]. با استفاده از دیاگرام فازی شکل (۵) مشاهده می‌گردد که در حین سرد شدن مذاب این ترکیب، ابتدا ترکیب بین‌فلزی  $\text{TiNi}$  از مذاب جدا شده، پس از آن ترکیب  $\text{Ti}_2\text{Ni}$  و سپس تیتانیوم فلزی (فاز  $\beta$ ) منجمد می‌گردد. با کم شدن درجه حرارت تا دماهای حدود ۸۰۰ و همچنین حدود ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، به ترتیب، تیتانیوم فاز  $\beta$  و  $\text{TiNi}$  تجزیه شده و در نهایت ساختار شامل

جدول (۷): الف) آنالیز EDS از نقطه 4-2 و ب) آنالیز EDS از نقطه 4-3.

الف) آنالیز طیف از نقطه 4-2				
عنصر	سری	unn. C wt %	norm. C wt %	Atom. C atom %
کربن	سری K	۶/۶۹	۷/۲۸	۲۵/۳۱
تیتانیوم	سری K	۴۹/۷۰	۵۴/۰۵	۴۷/۱۶
نیکل	سری K	۳۵/۵۵	۳۸/۶۷	۲۷/۵۲
Total: /۹۱/۹				
ب) آنالیز طیف از نقطه 4-3				
عنصر	سری	unn. C wt %	norm. C wt %	Atom. C atom %
کربن	سری K	۴/۱۶	۴/۲۹	۱۶/۴۴
تیتانیوم	سری K	۴۶/۹۹	۴۸/۴۶	۴۶/۵۴
نیکل	سری K	۴۵/۸۰	۴۷/۲۴	۳۷/۰۱
Total: /۹۷/۰				



شدن را ایجاد می‌کند. کربن فقط در الکترولیت  $300 \text{ gr/lit NaCl} + 3/3 \text{ gr/lit Na}_2\text{CO}_3$  وجود دارد و این مشکل در دو الکترولیت دیگر به وجود نمی‌آید. بهترین کیفیت سطحی و نرخ باربرداری در الکترولیت  $\text{NaCl} + 2/4 \text{ gr/lit NaF}$   $300 \text{ gr/lit}$  و ولتاژهای ۲۴ و ۲۶ ولت به دست می‌آید. در الکترولیت  $300 \text{ gr/lit NaCl}$ ، تغییرات کیفیت بر حسب ولتاژ خطی بوده و با افزایش ولتاژ، چگالی جریان و همچنین شاخصه‌های کیفیت بهبود می‌یابند. در الکترولیت  $300 \text{ gr/lit NaCl} + 2/4 \text{ gr/lit NaF}$  نیز همین شرایط برقرار است. همچنین به دلیل وجود یون فلئور در الکترولیت، کیفیت سطحی ماشین کاری بهبود قابل توجهی می‌یابد [۱۲].

#### ۴- نتیجه گیری

با توجه به آزمایشات انجام شده، مشاهده شد که ترکیب بین فلزی نایتینول در الکترولیت نمک طعام اشباع و الکترولیت‌های دو جزئی که جزء اصلی آنها نمک طعام اشباع می‌باشد، در ولتاژهای بیش از ۲ ولت دچار فروپاشی فیلم اکسیدی می‌شوند؛ به همین دلیل برای ماشین کاری الکتروشیمیایی نایتینول می‌توان از این نمک‌ها استفاده کرد.

فرآیند تصمیم‌گیری چند شاخصه می‌تواند برای انتخاب یک الکترولیت و ولتاژ مناسب برای ECM استفاده شود. با استفاده از

شکل (۶): تصویر SEM از سطح نایتینول پس از ماشین کاری، الف) ریزساختار چند فاز، ب) بزرگمایی بیشتر از همان تصویر (نقاط نشان داده شده در شکل، آنالیز EDS شده‌اند).

احتمالاً فاز زمینه پیوسته، غنی از نیکل ( $\text{TiNi}_3$ ) است. نیکل در ساختار آلیاژ نیکل-تیتانیوم به صورت ترجیحی خورده می‌شود و ساختار باقیمانده اکسید تیتانیوم می‌باشد [۱]. فاز تیغه‌ای شکل احتمالاً تیتانیوم فاز  $\alpha$  و فاز ذره‌ای،  $\text{Ti}_2\text{Ni}$  است. تیتانیوم فاز  $\alpha$  در ولتاژهای بیشتر از ۱۰۰ ولت دچار فروپاشی لایه اکسیدی می‌شود [۱۱].

همانگونه که در آنالیزها مشاهده می‌شود، درصد کربن زیادی روی سطح وجود دارد که وجود این کربن بر روی سطح، پسو



"Electrochemical Dissolution of Hard Metal Alloys", *Electrochimica Acta*, Vol. 72, pp. 7732-7737, 2007.

- [7] E. S. Lee, J. W. Park and Y. H. Moon, "A Study on Electrochemical Micromachining for Fabrication of Microgrooves in an Air-Lubricated Hydrodynamic Bearing", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 20, pp. 720-726, 2002.
- [8] C. L. Chu, R. M. Wang, T. Hu, L. H. Yin, Y. P. Pu, P. H. Lin, S. L. Wu, C. Y. Chung, K. W. K. Yeung and P. K. Chu, "Surface Structure and Biomedical Properties of Chemically Polished and Electropolished NiTi Shape Memory Alloys", *Materials Science and Engineering C*, Vol. 28, pp. 1430-1434, 2008.

[۹] ر. جاویدی صباغیان، م. ب. شریفی و ح. رجیبی مشهدی، "مقایسه دو روش تعیین وزن شاخص‌ها در تصمیم‌گیری چند شاخصه در اولویت‌بندی و انتخاب ساختگاه مناسب سد"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، ۱۴ تا ۱۶ اردیبهشت ۱۳۸۹.

- [10] H. Baker, *ASM Handbook Volume 3 Alloy Phase Diagrams*, p. 2-319, ASM International, 1992.
- [11] H. R. A. Bidhendi, M. J. Hadianfard and S. M. M. Hadavi, "Corrosion Study of Different Metallic Biomaterials in Hank's Solution", *Proceedings of the First International Congress of Iranian Corrosion*, Iran, May 2007.
- [12] J. Fay Wilson, *Practice & Theory of Electrochemical Machining*, p. 132, R. E. Kreiger Pub., 1982.

## ۶- پی‌نوشت

- 1- Walther
- 2- Lee
- 3- Scavenger
- 4- Multi Criteria Decision Making
- 5- Multi Attribute Decision Making
- 6- Protective Layer Breakdown

این روش، الکترولیت  $300 \text{ gr/lit NaCl} + 2/4 \text{ gr/lit NaF}$  و ولتاژ ۲۴ ولت و ۲۶ ولت، مناسب‌ترین شرایط از بین شرایط آزمایش شده بوده‌اند. در این الکترولیت، صافی سطح خوبی به دست آمده و سرعت ماشین‌کاری نیز مناسب می‌باشد. زبری سطح ایجاد گردیده بر روی سطح ECM شده، تا حدودی ناشی از زیرساختار نایتینول و چند فاز بودن آن است. تصاویر SEM سطح تطابق خوبی با ریزساختار مورد انتظار از نایتینول دارند. همچنین نوسانات چگالی جریان آندی نایتینول در الکترولیت  $300 \text{ gr/lit NaCl} + 3/3 \text{ gr/lit Na}_2\text{CO}_3$  به واسطه پسیو و کنده شدن یا پسیو و ترانس‌پسیو شدن فاز تیتانیوم  $\alpha$  و یا  $\text{Ti}_2\text{Ni}$  است.

## ۵- مراجع

- [1] W. Simka, M. Kaczmarek, A. Baron-Wiechec, G. Nawrat, J. Marciniak and J. Zak, "Electropolishing and Passivation of NiTi Shape Memory Alloy", *Electrochimica Acta*, Vol. 55, pp. 2437-2441, 2010.
- [2] M. Wei-Dong, M. Xu-Jun, W. Xin-Lu and L. Hua-Chu, "Electropolishing Parameters of NiTi Alloy", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 16, pp. s130-sl32, 2006.
- [3] X. Z. Ma, L. Zhang, G. H. Cao, Y. Lin and J. Tang, "Electrochemical Micromachining of Nitinol by Confined-Etchant-Layer Technique", *Electrochimica Acta*, Vol. 52, pp. 4191-4196, 2007.
- [4] A. Hascalik and U. Caydas, "A Comparative Study of Surface Integrity of Ti-6Al-4V Alloy Machined by EDM and AECG", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 190, pp. 173-180, 2007.
- [5] D. E. Collett, R. C. Hewson-Browne and D. W. Windle, "A Complex Variable Approach to Electrochemical Machining Problems", *Journal of Engineering Mathematics*, Vol. 4, pp. 29-37, 1970.
- [6] B. Walther, J. Schilm, A. Michaelis and M. M. Lohrengel,