



## شبیه‌سازی انحلال آندی در ماشین‌کاری الکتروشیمیایی و طراحی ابزار توسط روش حساسیت

حسین امیرآبادی<sup>۱</sup>، سید یوسف احمدی بروغنی<sup>۱</sup> و سید محمد امام<sup>۲\*</sup><sup>۱</sup> دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۲۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۱۱/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۱۲

## چکیده

فرآیند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی، از جمله فرآیندهای ماشین‌کاری غیر سنتی است که به علت برتری‌های خاص این روش، در صنایع مختلف از جایگاه منحصر به فردی برخوردار شده است. این فرآیند، بر پایه انحلال آندی استوار است و به علت عدم تماس ابزار با قطعه کار، هیچگونه سایش و نیروی براده‌برداری متوجه ابزار نمی‌باشد؛ لذا این امر، یکی از مهمترین مزایای ماشین‌کاری الکتروشیمیایی است. با توجه به پیچیدگی این فرآیند، هنوز روش قابل قبولی برای پیش‌بینی شکل قطعه‌کار حاصله برای یک ابزار مشخص و همچنین طراحی ابزار برای یک حفره مشخص وجود ندارد. استفاده از روش‌های مرسوم آزمون و خطا جهت استخراج شکل قطعه‌کار و ابزار مربوطه، زمانبر و پرهزینه است. جهت طراحی و همچنین پیش‌بینی پارامترهای ذکر شده، می‌توان با شبیه‌سازی فرآیند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی، ضمن کاهش هزینه‌ها با صرف زمان کمتری بر این مشکل غلبه کرد؛ لذا در این مقاله، میزان انحلال آندی فرآیند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی در هر گام زمانی توسط روش المان محدود مدل‌سازی و در نتیجه فرآیند ماشین‌کاری شبیه‌سازی شده است. سپس با استفاده از نتایج مدل شبیه‌سازی شده و روش حساسیت، الگوریتم استخراج شکل بهینه ابزار جهت رسیدن به قطعه‌کار مورد نظر بیان گردیده است. نتایج بدست آمده، گویای توانایی بسیار بالای روش پیشنهادی در این تحقیق جهت شبیه‌سازی فرآیند الکتروشیمیایی و طراحی ابزار است.

**کلمات کلیدی:** ماشین‌کاری الکتروشیمیایی؛ انحلال آندی؛ طراحی ابزار؛ شبیه‌سازی المان محدود؛ روش حساسیت.

### Simulation of Anodic Dissolution in Electro-Chemical Machining and Tool Design using Sensitivity Method

H. Amirabadi<sup>1</sup>, S. Y. Ahmadi Broghani<sup>1</sup>, and S. M. Emam<sup>2,\*</sup><sup>1</sup> Assoc. Prof., Mech. Eng., University of Birjand, Birjand, Iran.<sup>2</sup> Assis. Prof., Mech. Eng., Birjand University of Technology, Birjand, Iran.

## Abstract

The electro-chemical machining process (ECM) is one of the non-traditional machining processes used in various industries for the certain advantages it has. This machining process is based upon the anodic dissolution. Having no contact between work piece and tool that leads to a less tool wear and eliminating the cutting forces are some of the most important benefits of electro-chemical machining. There is still no acceptable method available to predict the workpiece shape for a specific tool and also a desired tool for a given cavity because of the complexity of this process, while using the conventional trial and error method to extract the shape of the workpiece and the tool is time-consuming and costly. Simulation of the electro-chemical machining process is a useful method to overcome these problems, and it lets us design and predict the noted parameters, while cost reduction and time improvement are achievable. In this work, anodic dissolution in each time step is simulated using the finite element method to simulate the electro-chemical machining process. By using the results of the simulated model and the sensitivity algorithm, extraction of an improved tool shape and a desired workpiece are possible. The results obtained demonstrate the ability of the method proposed for simulation of the electro-chemical machining process and design tool.

**Keywords:** Electrochemical Machining; Anodic Dissolution; Tool Design; FEM; Sensitivity Method.

## ۱- مقدمه

ماشین کاری الکتروشیمیایی، از انحلال الکتروشیمیایی کنترل شده جهت براده برداری استفاده می‌کند و از مهمترین روش‌های ماشین کاری غیرسنتی محسوب می‌شود. در این روش، نرخ براده برداری مستقل از خواص مکانیکی قطعه کار بویژه سختی قطعه مورد ماشین کاری است. توانایی این فرآیند در ماشین کاری سطوح هندسی پیچیده، نرخ بالای برداشت ماده و عدم ایجاد تنش‌های پسماند در قطعه، از دیگر برتری‌های این فرآیند می‌باشند [۱-۳].

رفتار پیچیده فرآیند ماشین کاری الکتروشیمیایی، باعث بوجود آمدن مشکلاتی در استفاده از این روش ماشین کاری شده است. یکی از مهمترین این موارد، رسیدن به دقت ابعادی بالای قطعه کار در فرآیند است. با توجه به ماهیت فرآیند که مبتنی بر برداشت اتم از سطح قطعه کار است، فرآیند از دقت ذاتی بالایی برخوردار است، ولی عدم توانایی در پیش‌بینی دقیق شکل حاصل از فرآیند ماشین کاری، باعث می‌شود تا دقت حاصل از ماشین کاری، تحت تاثیر این موضوع قرار گیرد؛ بنابراین پیش‌بینی شکل نهایی قطعه کار، دارای اهمیت فراوانی است [۴]. از دیگر مشکلات موجود در استفاده از ماشین کاری الکتروشیمیایی، بالا بودن هزینه‌های ماشین کاری شامل، راه‌اندازی فرآیند براده برداری و نیروی متخصص است. پیش‌بینی دقیق شکل حاصل از فرآیند می‌تواند منجر به کاهش مراحل آزمون و خطای لازم برای رسیدن به شکل نهایی باشد که در نتیجه کاهش هزینه‌های تولید را در بر خواهد شد [۵-۶]. در راستای تلاش‌های انجام گرفته جهت پیش‌بینی شکل آند، می‌توان به روش ساده کسینوس<sup>۱</sup> اشاره کرد [۷]. این روش برای ابزارهایی با پروفیل ملایم از کارایی قابل قبولی برخوردار است. همچنین می‌توان به روش‌های دیگری مثل، آنالوگ تانک الکترولیت<sup>۲</sup> اشاره کرد که برای پیش‌بینی شکل آند، به صورت تجربی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸]. روش‌های تحلیلی از دیگر تکنیک‌هایی می‌باشند که با توجه به محدودیت‌های سایر روش‌های پیشین، استفاده آن‌ها برای شکل‌های محدودی صورت می‌گیرد. در راستای رفع این محدودیت‌ها، روش‌های عددی

نیز توسعه پیدا کردند. روش‌هایی بر پایه اجزاء محدود، راه‌حلی قدرتمند برای تحلیل عددی طیف گسترده‌ای از مسایل مهندسی است. تحلیل تنش و تغییر شکل سازه‌های بزرگ و پیچیده، بررسی مسایل انتقال حرارت و جریان سیال از جمله موارد شبیه‌سازی شده توسط اجزاء محدود است [۹]. تا کنون روش‌هایی بر پایه المان محدود در تحلیل عددی فرآیند ماشین کاری الکتروشیمیایی پیشنهاد شده است [۱۰-۱۱]. به عنوان مثال، می‌توان به استفاده از روش‌های عددی برای شبیه‌سازی سه بعدی تغییر شکل الکتروود در فرآیندهای ماشینکاری الکتروشیمیایی اشاره کرد [۱۲] که در آن تغییر شکل الکتروود با جابجا کردن هر گره در جهت چگالی جریان‌های محلی بر اساس قانون فارادی استخراج می‌شود؛ همچنین با شبیه‌سازی اجزاء محدود فرآیند الکتروشیمیایی پالسی، دلایل بهبود دقت و صحت این فرآیند در برابر ماشین کاری الکتروشیمیایی با جریان مستقیم مورد بحث قرار گرفته شده است [۱۳]. در تحقیق انجام شده توسط لوا و همکارانش [۱۴] نیز، از شبیه‌سازی اجزا محدود برای استخراج ابزار مورد نیاز جهت تولید قطعه کار با اشکال مختلف استفاده شده است. همچنین روش‌هایی بر پایه حجم محدود<sup>۳</sup> برای مدل‌سازی فرآیند الکتروشیمیایی نیز استفاده شده است [۱۵]. در این تحقیقات، ضمن معرفی اصول اولیه روش حجم محدود، الگوریتم‌هایی برای شبیه‌سازی دو بعدی فرآیند ماشین کاری الکتروشیمیایی بر اساس قوانین حاکم بر این فرآیند، ارائه شده است که امکان پیش‌بینی شکل قطعه کار پس از ماشین کاری را فراهم می‌کند.

در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار متلب، برنامه‌ای بر پایه روش المان محدود نوشته شده است که تمامی پارامترهای دخیل در فرآیند ماشین کاری الکتروشیمیایی در نظر گرفته شده، هر یک از آنها قابلیت تغییر و کنترل دارند. با کاهش طول بازه‌های زمانی در هر مرحله می‌توان به نتایج دقیق‌تر جهت پیش‌بینی شکل قطعه کار دست یافت. همچنین امکان عایق کردن هر قسمت از قطعه کار و یا ابزار در دسترس است. در نهایت، با استفاده از نتایج مدل شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار متلب و با بکارگیری روش حساسیت، الگوریتم

<sup>۱</sup>  $\cos(\theta)$ <sup>۲</sup> Electric tank analogue<sup>۳</sup> Finite-Difference Method (FDM)

ج- شرایط ماشین‌کاری، پایدار در نظر گرفته می‌شوند و از تاثیرات جریان الکترولیت، به وجود آمدن حباب‌های هیدروژن و تغییر رسانش الکترولیت بر اثر گرمایش الکترولیت صرف نظر شده است.

د- از اثر اضافه ولتاژ صرف نظر شده است؛ بنابراین سطوح الکترودها هم پتانسیل می‌باشند.

در ادامه، به معرفی سه معادله اصلی حاکم بر فرآیند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی پرداخته می‌شود.

رابطه ۱، بیان‌کننده معادله لاپلاس است که حل این معادله، منجر به حاصل شدن پتانسیل  $\phi$  در هر نقطه از الکترولیت به ویژه روی سطوح الکترودها می‌شود [۱۶].

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

رابطه ۲، معرف قانون اهم است؛ در این رابطه،  $J$  چگالی جریان حاصل از پتانسیل بدست آمده از معادله لاپلاس است و  $k_e$  رسانش الکترولیت است [۱۶].

$$J = -k_e \nabla \phi \quad (2)$$

رابطه ۳، قانون فارادی است که برای بدست آوردن نرخ انحلال آندی استفاده می‌شود.  $A$  وزن اتمی،  $Z$  ظرفیت اتمی،  $\rho_a$  چگالی فلز آند و  $F$  ثابت فارادی است [۱۶].

$$\dot{r}_a = \left( \frac{A}{Z\rho_a F} \right) J \quad (3)$$

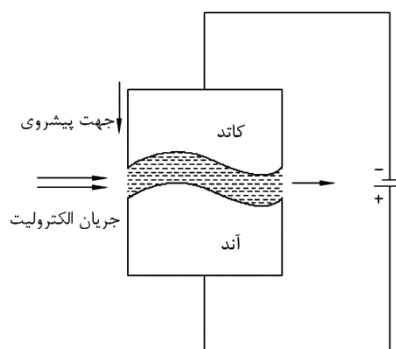
در فرآیند الکتروشیمیایی، انحلال فلز در اثر یک اختلاف پتانسیل خارجی و ایجاد جریان الکتریکی حاصل می‌شود. افزایش جریان الکتریکی، موجب افزایش اختلاف بین ولتاژ حالت پایدار و ولتاژ در حال عملکرد می‌شود. اختلاف بین ولتاژ در حال عملکرد و حالت پایدار به عنوان اضافه ولتاژ شناخته می‌شود. در تمام فرآیندهای الکتروشیمیایی سه نوع اضافه ولتاژ شامل، فعال‌سازی، تمرکز و مقاومت وجود دارند که در ادامه مختصراً به معرفی هر یک پرداخته شده است.

پس از اعمال ولتاژ برای انحلال آندی، الکتروود آند یونیزه می‌شود و نرخ یونیزه شدن باید بیشتر از تخلیه یون‌هایش باشد؛ بنابراین اختلاف پتانسیل نیز نسبت به حالت پایدار تغییر می‌کند که این مقدار، به اضافه ولتاژ فعال‌سازی معروف است. در حین انحلال آندی زمانی که نرخ انحلال فلز بالاتر از نرخ است که یون‌های فلز می‌توانند از سطح الکتروود دور شوند، شرایطی حاصل می‌شود که در آن یک تمرکز گرادیان

استخراج شکل بهینه ابزار جهت رسیدن به قطعه کار مورد نظر بیان گردیده است.

## ۲- ماشین‌کاری الکتروشیمیایی

ماشین‌کاری الکتروشیمیایی، یک فرآیند انحلال آندی بر پایه قوانین فارادی است. این فرآیند برخلاف آبکاری الکتروشیمیایی، قطعه کار آند و ابزار کاتد است؛ بنابراین با شروع فرآیند ماشین‌کاری، ماده از آند جدا می‌شود که این فرآیند، انحلال الکتروشیمیایی نام دارد. برای جبران پیشروی گپ، کاتد با نرخ ثابت و مشخص به سمت آند حرکت می‌کند. وجود جریان الکترولیت در فاصله بین الکتروود، محصولات واکنش را از گپ بین الکتروودها دور می‌کند [۱۶]. شکل ۱، اصول کلی فرآیند را نمایش می‌دهد.



شکل ۱- اصول فرآیند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی

## ۲-۱- قوانین حاکم بر تغییر شکل الکترودها

با توجه به پیچیدگی ماشین‌کاری الکتروشیمیایی، برای حل مسائل مربوط به پیش‌بینی شکل آند و یا طراحی شکل کاتد، نیاز به در نظر گرفتن فرضیات متعددی جهت ساده‌سازی فرآیند است. سپس به کمک معادلات اصلی حاکم بر فرآیند، حل صورت می‌گیرد. در این مقاله، برای حل مسئله پیش-بینی شکل آند توسط شبیه‌سازی فرآیند، فرضیات زیر در نظر گرفته شده‌اند [۱۷].

الف- قطعه‌کار به صورت یک ماده همگن در نظر گرفته شده است.

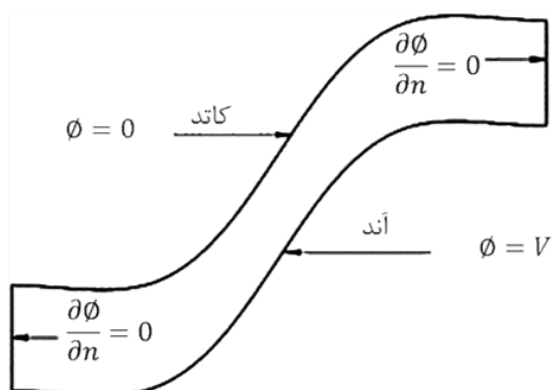
ب- بازده جریان ۱۰۰٪ فرض شده است؛ بدین معنی که تمامی جریان صرف انحلال آندی می‌شود.

در نظر گرفت و در نتیجه شرایط مرزی حاکم بر الکترودها عبارت خواهند بود [۱۸]:

$$\begin{aligned} \phi &= 0 \rightarrow \text{بر روی کاتد} \\ \phi &= V \rightarrow \text{بر روی آند} \\ \frac{\partial \phi}{\partial n} &= 0 \rightarrow \text{بر روی مرز عایق} \end{aligned} \quad (5)$$

$V$  اختلاف پتانسیل اعمال شده و  $\phi$  پتانسیل الکتریکی در هر نقطه است.  $\frac{\partial \phi}{\partial n}$  نشان‌دهنده تغییرات پتانسیل الکتریکی در راستای بردار نرمال مرز چپ و راست است.

در شکل ۲، شرایط مرزی اعمال شده در این مقاله، طبق رابطه ۵ مشاهده می‌شود. با توجه به قوانین حاکم بر فرآیند ماشین‌کاری در این بخش و همچنین شرایط مرزی مورد نظر، انحلال آندی شبیه‌سازی خواهد شد. این موضوع، در بخش بعد شرح داده خواهد شد. هدف از شبیه‌سازی انحلال آندی، استخراج اطلاعات مورد نیاز هنگام ماشین‌کاری جهت طراحی ابزار برای رسیدن به شکل قطعه کار مشخص است. طراحی ابزار با استفاده از روش حساسیت، توسط نتایج استخراج شده از شبیه‌سازی صورت می‌گیرد.



شکل ۲- شرایط مرزی حاکم در ماشین‌کاری الکتروشیمیایی

### ۳- شبیه‌سازی انحلال آندی

فرآیند شبیه‌سازی انحلال آندی، عملیاتی ناپیوسته است و در هر مرحله با در نظرگیری زمان مشخص، میزان انحلال آندی در آن زمان مشخص می‌شود؛ بنابراین زمان انحلال آندی به عنوان پارامتر ورودی برای برنامه تعریف می‌شود که با کوچک کردن طول بازه زمانی، دقت افزایش ولی زمان شبیه‌سازی نیز افزایش می‌یابد. در شکل ۳، الگوریتم شبیه‌سازی انحلال آندی نشان شده است.

یونی در لایه نازکی از الکترولیت که روی سطح الکتروود قرار دارد، حاصل می‌شود و این لایه، لایه پخشی<sup>۱</sup> نام دارد. در اثر تمرکز گرادیان، تغییراتی در اختلاف پتانسیل بین الکترودها نسبت به حالت پایدار ایجاد می‌گردد که به اختلاف عددی بین پتانسیل حالت پایدار و مقدار جدید، اضافه ولتاژ تمرکز گویند. اضافه ولتاژ مقاومت معمولاً به عنوان افت ولتاژی است که در اثر لایه ضخیمی از الکترولیت و یا در اثر لایه فیلم (به عنوان مثال یک فیلم اکسید) بر روی سطح الکترودها ایجاد می‌شود و مقدار آن عملاً به میزان جریان الکتریکی اعمال شده روی الکترودها و رسانش الکتریکی الکترولیت بستگی دارد [۱۸].

با توجه به تعریف انواع اضافه ولتاژ، شرایط پایداری برای معادلات ۱ تا ۳ (معادلات حاکم بر فرآیند)، مورد بحث قرار خواهند گرفت. افت پتانسیل در لایه پخشی مربوط به اضافه ولتاژ تمرکز اهمی است. در حجم الکترولیت خارج از لایه پخشی می‌توان فرض کرد که تمام گرادیان‌های تمرکز<sup>۲</sup> بر اثر تلاطم الکترولیت از بین می‌روند. متعاقباً قانون اهم می‌تواند به صورت رابطه ۴ اعمال شود که در این رابطه،  $K_e$  رسانش الکترولیت و  $E$  میدان الکتریکی است [۱۸].

$$J = K_e E \quad (4)$$

اگر ضخامت لایه پخشی و میزان افت پتانسیل در اثر آن به قدر کافی کوچک فرض شوند، می‌توان میزان رسانش الکتریکی الکترولیت را در همه جا برابر با مقدار  $E$  فرض کرد، همچنین رسانش الکتریکی الکترولیت در همه جا یکسان فرض می‌شود. از گرم شدن الکترولیت و ایجاد حباب‌های گاز هیدروژن که به ترتیب میزان رسانش الکتریکی الکترولیت را زیاد و کم می‌کنند به علت حرکت و تلاطم کافی الکترولیت، صرف‌نظر می‌شود. استفاده از قانون فارادی نیز به این معنا است که تمام جریان موجود روی آند صرف انحلال فلز آند شده، عمل دیگری در اثر این جریان صورت نمی‌گیرد. اکنون با در نظرگیری شرایط و فرض‌های فوق‌الذکر، می‌توان از قوانین اهم و فارادی برای حل مسائل تعیین شکل الکترودها در این فرآیند پرداخت؛ بنابراین طبق رابطه ۵ با توجه فرضیات ذکر شده می‌توان سطوح الکترودها را هم پتانسیل

<sup>1</sup> Diffusion Layer

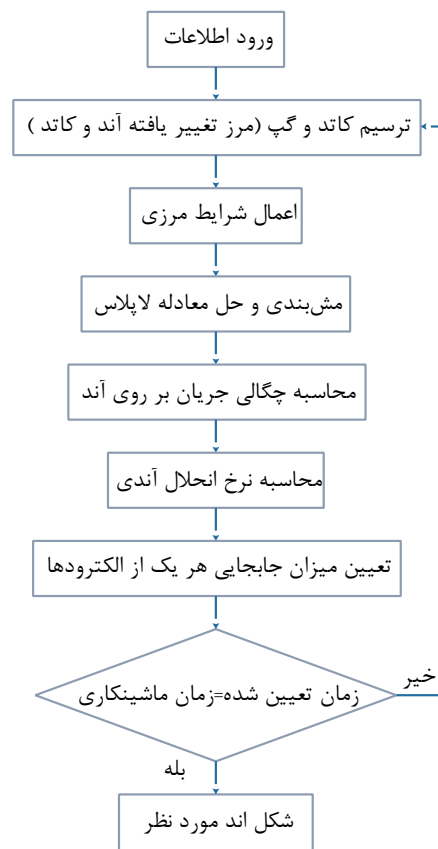
<sup>2</sup> Concentration Gradients

می‌شود. درجه منحنی عبوری از این نقاط نیز، جزء پارامترهای ورودی و قابل تغییر برنامه است.

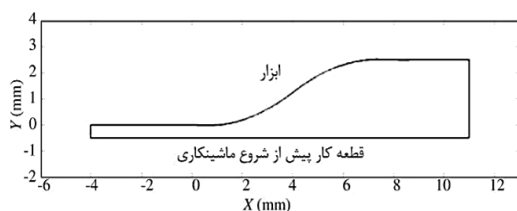
پس از انتخاب منحنی عبوری از سطح ابزار، نقطه متناظر با کمترین مقدار  $y$  منحنی ابزار مشخص می‌شود. همچنین با توجه به گپ اولیه، فاصله سطح قطعه کار نسبت به ابزار مشخص می‌شود. سپس از دو نقطه با  $x$  کمینه و  $x$  بیشینه، به عنوان دو انتهای ابزار دو پاره خط عمود بر سطح قطعه کار برای محصور کردن گپ ترسیم می‌شود. شکل ۴، نشان‌دهنده این مرحله برای یک ابزار مشخص است.

موارد ذکر شده در حالتی صادق می‌باشند که مرحله دوم در تکرار اول برنامه قرار داشته باشد و در حالتی که مرحله دوم در تکرارهای بعدی برنامه باشد، دیگر سطح قطعه کار (آند) خط صافی نخواهد بود و با توجه به میزان انحلال، سطح جدید جایگزین خواهد شد. همچنین سطح ابزار نیز با توجه به نرخ پیشروی در نظر گرفته شده، به سمت قطعه کار حرکت داده می‌شود.

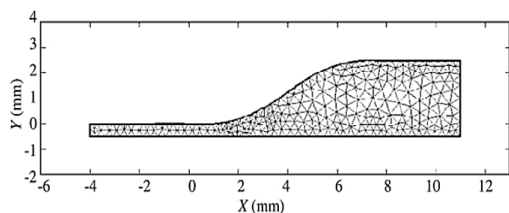
در مرحله سوم، شرایط مرزی ذکر شده در رابطه ۵ بر مزر ابزار و قطعه کار و قسمت‌های انتهایی گپ اعمال می‌شود. در مرحله چهارم، ابتدا محدوده گپ مطابق شکل ۵ مش‌بندی می‌شود.



شکل ۳- الگوریتم شبیه سازی انحلال آندی



شکل ۴- ترسیم محدوده گپ



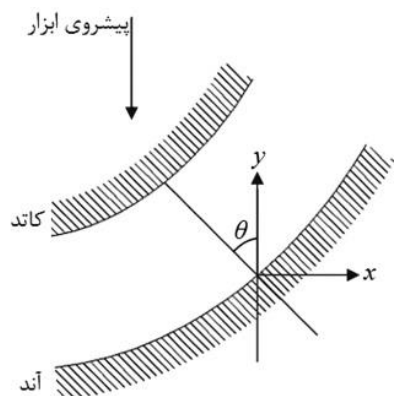
شکل ۵- مش‌بندی محدوده گپ بین ابزار و قطعه کار

برای مش‌بندی گپ از المان‌های مثلثی ساده تعریف شده توسط نرم افزار متلب استفاده می‌شود. از پارامترهای مهمی که در این قسمت قابل تغییر است، تعداد دفعات تجدید و

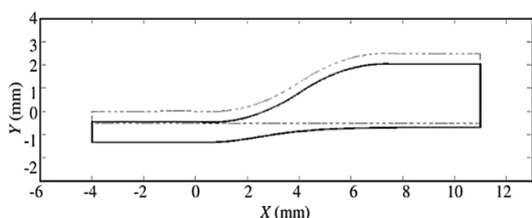
مرحله اول در الگوریتم ذکر شده، ورود اطلاعات اولیه لازم جهت برنامه شبیه‌سازی است. این اطلاعات شامل، شکل ابزار، طول بازه زمانی، نرخ پیشروی ابزار، ظرفیت فلز آند، جرم اتمی فلز آند، جرم فلز آند، اختلاف پتانسیل و در نهایت فاصله ابزار و قطعه کار (گپ آغازین فرآیند شبیه سازی) است. شکل ابزار توسط مختصات  $x$  و  $y$  نقاط واقع روی سطح ابزار تعریف می‌شود. اختلاف پتانسیل در فرآیند ماشین‌کاری در حدود ۱۰ ولت است و در برخی موارد جهت شکستن لایه سطحی اکسید، این ولتاژ تا ۵۰ ولت در شروع ماشین‌کاری افزایش می‌یابد؛ لذا حداکثر ولتاژ قابل تعریف برای برنامه ۹۹ ولت در نظر گرفته شده است.

مرحله دوم ترسیم شکل گپ، توسط برنامه است. در این مرحله، ابتدا منحنی اسپلیانی<sup>۱</sup> با درجه مشخص (معمولا درجه ۳) از نقاط مشخص شده به عنوان سطح ابزار عبور داده

<sup>۱</sup> Spline



شکل ۶- شماتیک فرآیند انحلال آندی جهت محاسبه میزان جابجایی سطح آند



شکل ۷- انحلال قطعه کار پس از ۲۰ ثانیه در بازه زمانی به طول ۵ ثانیه

در مرحله هشتم زمان سپری شده با زمان کل ماشینکاری مقایسه می‌شود و در صورتی که زمان شبیه‌سازی برابر با زمان کل ماشین کاری باشد، شبیه‌سازی متوقف شده و شکل نهایی آند مشخص می‌شود. در غیر این صورت، مراحل اول الی هشتم تا رسیدن به زمان تعیین شده تکرار می‌شود.

#### ۴- طراحی ابزار با استفاده از روش حساسیت

روش حساسیت<sup>۱</sup> یکی از الگوریتم‌های کارآمد در بهینه‌سازی مسائل مهندسی است. در تحقیق حاضر، با تحلیل بازخورد خطای موجود بین آند حاصل از شبیه‌سازی و آند مورد نظر، شکل اولیه ابزار اصلاح می‌شود؛ لذا روش حساسیت جهت ایجاد این بازخورد در برنامه طراحی ابزار استفاده شده است [۱۹]. طراحی ابزار در این فرآیند، به معنی منطبق شدن آند حاصل از شبیه‌سازی بر آند مورد نظر است و برای رسیدن به این هدف، شکل ابزار باید در هر مرحله تصحیح شود.

اصلاح مش است که با افزایش این پارامتر، مش حاصله متراکم‌تر خواهد شد؛ در نتیجه دقت محاسبات افزایش می‌یابد، ولی انجام محاسبات نیز، به شکل قابل توجهی زمانبر خواهد شد. پس از اعمال مش و استخراج اطلاعات هر یک از گره‌ها، معادله لاپلاس حل می‌شود و مقادیر پتانسیل مربوط به هر یک از گره‌های مش به همراه مختصات آن مشخص می‌شود.

مرحله پنجم شامل، اعمال قانون اهم به منظور محاسبه میزان چگالی جریان روی سطح آند است. در این مرحله، گرادیان پتانسیل روی گره‌های مش واقع بر سطح آند محاسبه می‌شود. چگالی جریان از حاصل ضرب گرادیان پتانسیل در رسانش الکترولیت استخراج می‌شود.

در مرحله ششم با اعمال قانون فارادی و استفاده از چگالی جریان حاصل از قانون اهم، نرخ انحلال آندی محاسبه می‌شود. سایر پارامترهای مورد نیاز جهت محاسبه نرخ انحلال شامل، پارامترهای ورودی برنامه می‌باشند.

در مرحله هفتم، جابه‌جایی مرز هر یک از الکترودها (آند و کاتد) محاسبه می‌شود. تغییر موقعیت مرز قطعه کار با استفاده از نرخ انحلال آندی محاسبه شده در مرحله قبل حاصل می‌شود. با توجه به اینکه انحلال در هر دو جهت  $x$  و  $y$  صورت می‌گیرد. با توجه به شکل ۶ برای محاسبه جابه‌جایی هر یک از نقاط واقع بر سطح آند، نیاز به محاسبه میزان جابه‌جایی نقاط در راستای  $x$  و  $y$  خواهد بود که این جابه‌جایی، توسط رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

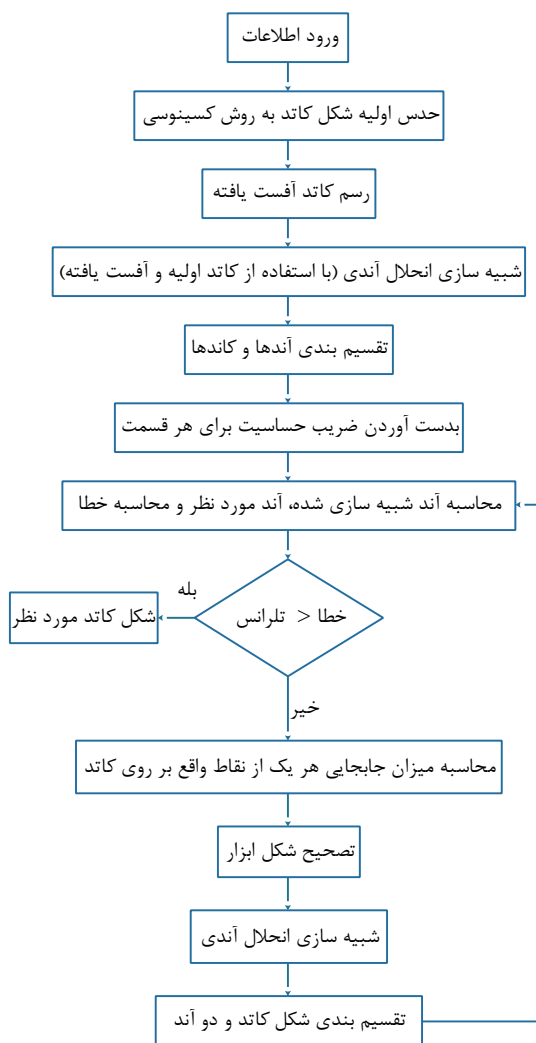
$$\begin{aligned} x_{i+1} &= x_i + \dot{r}_a \sin \theta \times t \\ y_{i+1} &= y_i - \dot{r}_a \cos \theta \times t \end{aligned} \quad (6)$$

$\dot{r}_a$  نرخ انحلال آندی،  $\theta$  زاویه بین محور عمود بر سطح قطعه کار و جهت پیشروی ابزار در جهت مثبت مثلثاتی و  $t$  طول بازه زمانی بر حسب ثانیه است. با توجه به نرخ پیشروی ابزار، میزان جابه‌جایی مرز کاتد توسط رابطه ۷ به آسانی محاسبه می‌شود. در این رابطه،  $f$  نرخ پیشروی ابزار است و اندیس  $i$  نشان‌دهنده تعداد تکرار است.

$$y_{i+1} = y_i - tf \quad (7)$$

پس از محاسبه انحلال آندی و در نتیجه جابه‌جایی هر یک از نقاط کاتد و آند، از نقاط حاصله اسپیلاین‌هایی مطابق شکل ۷ عبور داده می‌شود.

<sup>۱</sup> Sensitivity Method



شکل ۹- الگوریتم طراحی ابزار توسط روش حساسیت

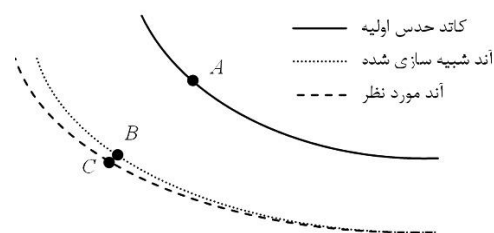
$$A^i = A^{(i-1)} + \varepsilon SN \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)،  $i$  معرف تعداد تکرار و  $\varepsilon$  خطای شکل است که این پارامتر معرف فاصله بین نقطه  $B$  و  $C$  است. در شکل ۹، الگوریتم نحوه طراحی ابزار با استفاده از روش اصلاحی حساسیت نشان داده شده است.

### ۵- نتایج

جهت اعتبار سنجی و بررسی صحت برنامه‌های نوشته شده در این بخش، ابتدا دو کاتد (ابزار) برای دو آند با شکل‌های متفاوت طراحی شده است. هدف از طراحی کاتد اول، بررسی نتایج حاصل از تغییر خواص مواد تشکیل دهنده آند و تأثیر آن بر شکل ابزار مورد نیاز و گپ بین کاتد و آند است. سپس

مطابق شکل ۸، نقطه  $A$  روی ابزار مربوطه، نقطه  $B$  متقابلش روی آند شبیه‌سازی و  $C$ ، نقطه واقع روی آند مورد نظر تعریف می‌شود. اگر  $B$  بر  $C$  منطبق نشود، بدین معنی است که ابزار موجود نمی‌تواند آند مورد نظر تولید کند؛ بنابراین نقطه  $A$  باید به منظور انطباق نقاط  $B$  و  $C$  با توجه به ضریب حساسیت شکل جابه‌جا شود. برای تعریف این ضریب، باید شکل اولیه‌ای برای ابزار و همچنین آفست<sup>۱</sup> مشخصی نسبت به شکل اولیه ابزار در نظر گرفته شود.



شکل ۸- شماتیک طراحی ابزار توسط روش حساسیت

از آنجایی که رابطه متناظر بین نقاط واقع روی کاتد و آند خطی نیست، بنابراین ضریبی تحت عنوان ضریب حساسیت شکل برای این جابه‌جایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت، طراحی کاتد بدین معنی است که تمام نقاط حاصل از آند شبیه‌سازی شده با تolerانس مشخصی روی نقاط آند مورد نظر منطبق شوند. ابزار آفست یافته با استفاده از رابطه ۸ بدست خواهد آمد.

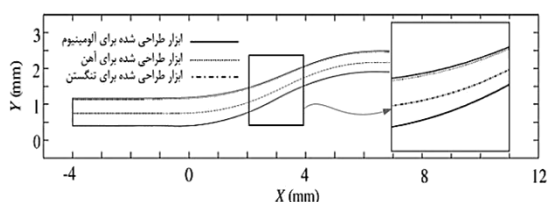
$$A_\delta = A + \frac{1}{\cos\theta} \sigma N \quad (8)$$

$\theta$  زاویه بین محور عمود بر سطح کاتد با جهت پیشروی کاتد،  $\sigma$  میزان آفست و  $N$  برداری که در جهت عمود بر سطح کاتد است. با در نظر گرفتن ابزار آفست یافته، شبیه‌سازی مجدداً انجام می‌گیرد و نقاط آند حاصله تحت عنوان  $A_\delta$  معرفی می‌شوند و ضریب حساسیت شکل به کمک رابطه ۹ محاسبه می‌شود.

$$S = \frac{|A_\delta - A|}{|B_\delta - B|} \quad (9)$$

حال اگر  $B$  روی  $C$  منطبق شود، نقطه متناظر  $A$  نیاز به تغییر موقعیت ندارد. در غیر این صورت، موقعیت  $A$  باید با توجه به رابطه ۱۰ تغییر کند.

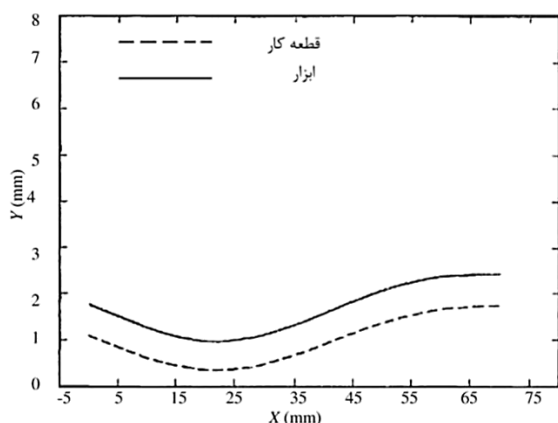
<sup>۱</sup> Offset



شکل ۱۰- ابزارهای مختلف طراحی شده برای آندهایی با جنس‌های متفاوت

### ۵-۲- مقایسه ابزار طراحی شده با نمونه موجود

جهت بررسی صحت و دقت تحقیق انجام شده، از نتایج حاصل از ماشین‌کاری با استفاده از ابزار مشابه کمک گرفته شده است [۱۷]. دلیل انتخاب طرح موجود در این مرجع برای مقایسه، یکسان بودن اصول طراحی ابزار در هر دو تحقیق است. شکل ۱۱، نشان دهنده ابزار طراحی شده در منبع ذکر شده، جدول ۳ در بردارنده پارامترهای اصلی در نظر گرفته شده جهت طراحی ابزار آن می‌باشند.



شکل ۱۱- ابزار طراحی شده برای قطعه‌کاری با شکل ملایم [۱۷]

### جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده جهت طراحی

ابزار معرفی شده در شکل ۱۱

پارامتر ورودی	مقدار
رسانش الکترولیت	۰/۰۲(Ω/mm)
نرخ پیشروی	۰/۰۲۶۵(mm/s)
اختلاف پتانسیل اعمالی	۱۸(V)
طول زمانی هر بازه	۵(S)
طول کل زمان ماشینکاری	۲۰۰(S)
وزن اتمی	۳۶
چگالی	۰/۰۰۵(g/mm <sup>3</sup> )
ظرفیت اتمی	۲

برای حفره دارای فرم مشخص، ابزار مناسب طراحی و با شکل ابزار بدست آمده از نتایج تحقیق مشابه مقایسه گردید [۱۷].

### ۵-۱- طراحی ابزار برای آندهای متفاوت

در فرآیند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی فقط قطعات کاری رسانا را می‌توان ماشینکاری کرد. نرخ برداشت ماده، وابسته به خواص الکتروشیمیایی آند (قطعه) است. در این فرآیند، اندازه فاصله گپ مورد نیاز برای ابزار با توجه به جنس قطعه- کار تنظیم می‌شود. به منظور بررسی تأثیر تفاوت در جنس آند بر ابزار طراحی شده، برای آندهایی با شکل یکسان، ولی جنس‌های متفاوت با استفاده از الگوریتم‌های ذکر شده در قسمت قبل، ابزار طراحی شد. تمام پارامترهای ورودی به غیر از پارامترهای مربوط به جنس آند یکسان در نظر گرفته شدند. جنس‌های انتخاب شده برای آند شامل، آلومینیوم، آهن و تنگستن می‌باشند. در جدول ۱، مشخصات مربوط به آندهای فوق آورده شده است. در جدول ۲، مقادیر پارامترهای اصلی ورودی به برنامه نشان داده شده است.

### جدول ۱- خواص مواد آندهای شبیه سازی شده

جنس آند	وزن اتمی	چگالی(g/mm <sup>3</sup> )	ظرفیت
آلومینیوم	۲۶/۹۷	۲/۶۷×۱۰ <sup>-۳</sup>	۳
آهن	۵۵/۵۸	۷/۸۶×۱۰ <sup>-۳</sup>	۲
تنگستن	۱۸۳/۸۵	۱۹/۳×۱۰ <sup>-۳</sup>	۶

### جدول ۲- پارامترهای اصلی ورودی به برنامه

پارامتر ورودی	مقدار
رسانش الکترولیت	۰/۰۲(Ω/mm)
نرخ پیشروی	۰/۰۲(mm/s)
اختلاف پتانسیل اعمالی	۱۶(V)
گپ اولیه	۰/۵(mm)
طول زمانی هر بازه	۵(S)
طول کل زمان ماشینکاری	۱۲۵(S)

در شکل ۱۰، ابزار طراحی شده با توجه به هر یک از آندها و پارامترهای ورودی ذکر شده نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، گپ حاصل برای تنگستن کمترین مقدار و برای آلومینیوم، بیشترین مقدار را دارا است که این تفاوت به علت جرم اتمی، چگالی و ظرفیت عناصر است.



### ۶- بحث و نتیجه گیری

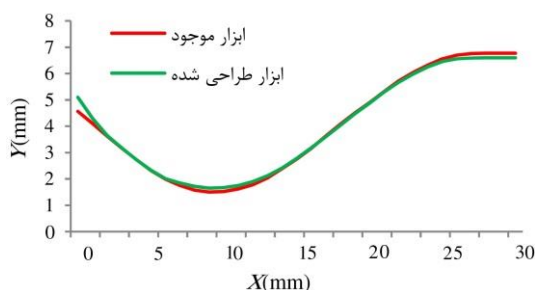
هدف از این تحقیق، طراحی ابزار در فرآیند ماشین‌کاری الکتروشیمیایی است. روش مورد استفاده بر پایه، شبیه‌سازی المان محدود و استفاده از روشی جهت ایجاد بازخورد خطای بین آند حاصل از شبیه‌سازی و آند مورد نظر استوار است. روش حساسیت، روش استفاده شده جهت ایجاد بازخورد خطا است. از برتری‌های این روش، پیش‌بینی شکل نهایی ابزار با توجه به پارامترهای مورد استفاده در فرآیند است که در سایر فرآیندهای عددی، فقط خطوط هم‌پتانسیل معرف سطح ابزار پس از طراحی حاصل می‌گردند. هر یک از این خطوط مذکور، نشان‌دهنده سطح ابزار با در نظرگیری شرایط ماشین‌کاری هستند. از معایب این روش، می‌توان به طولانی بودن زمان مورد نیاز جهت طراحی ابزار اشاره کرد که حاصل از حلقه‌های تکرار در برنامه برای رسیدن به طراحی ابزار است. همچنین تکرار تعریف شده برای یکسانی آند حاصل از شبیه‌سازی و آند مورد نظر، به شکل قابل ملاحظه‌ای بر طول این زمان تأثیر گذار است. برای فرمول بندی فرآیند، فرضیات اولیه‌ای در نظر گرفته شد که نسبت به شرایط واقعی ماشین‌کاری تا حدی متفاوت است و پروفیل ابزار طراحی شده به کمک روش مورد استفاده در تحقیق و سایر تحقیقات مشابه نمی‌تواند دقیقاً منحنی منطبق بر سطح ابزار در شرایط ماشین‌کاری واقعی باشد. هدف اصلی، نزدیک شدن هر چه بیشتر به پروفیل اصلی است که این امر، منجر به کاستن از مراحل فرآیند آزمون و خطا در طراحی ابزار می‌شود. با توجه به هزینه بالا ماشین‌کاری، طراحی ابزار به کمک محاسبات عددی گام بزرگی در کاهش این هزینه‌ها و زمان رسیدن به طراحی نهایی ابزار است.

### مراجع

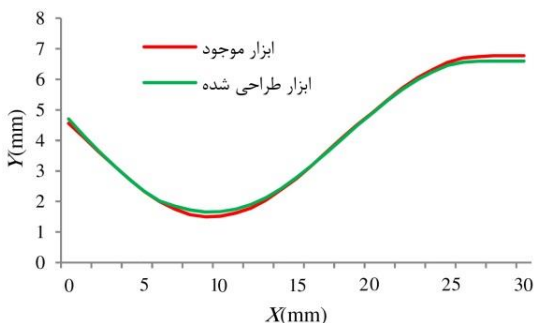
- [1] Davydov AD, Volgin VM, Lyubimov VV (2004) Electrochemical machining of metals: fundamentals of electrochemical shaping. Russ J Electrochem 40(12): 1230-1265.
- [2] Rajurkar KP, Sundaram MM, Malshe AP (2013) Review of electrochemical and electrodischarge machining. Procedia CIRP: 613-26.
- [3] Pa PS, Hocheng H (2013) Electrochemical machining. In: Adv Analysis of Nontraditional Machining (107-257). Springer, New York.

در شکل ۱۲، نتایج حاصل از دو ابزار طراحی شده در این تحقیق و ابزار موجود در تحقیق مشابه نشان شده است. با توجه به شکل ۱۲ در قسمت شروع منحنی در  $X=0$ ، اختلاف قابل ملاحظه‌ای در راستای محور  $Y$  بین ابزار طراحی شده و ابزار موجود قابل مشاهده است. علت این اختلاف، محدود در نظر گرفتن آند و ابزار از لحاظ هندسی است. در واقع فقط گپ بین ابزار و قطعه کار شبیه‌سازی می‌شود که این امر، موجب به وجود آمدن اثرات انتهایی (شروع و پایان منحنی) روی آند شبیه‌سازی شده و متعاقباً ابزار طراحی شده می‌شود. با در نظر گرفتن این اثرات، بیشینه اختلاف بین دو منحنی که در ابتدای منحنی ( $X=0$ ) مشاهده می‌شود، به  $0/58$  میلی‌متر می‌رسد.

به منظور کاهش اثرات انتهایی ذکر شده برای طراحی ابزار، آند با همان شیب انتهایی به مقدار  $5$  میلی‌متر از هر طرف ادامه داده شده است. در مرحله بعد، ابزار موجود و ابزار طراحی شده در محدوده مورد نظر، مطابق شکل ۱۳ مقایسه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اختلاف موجود در ابتدای ابزار کاهش یافته است. در این حالت، بیشینه تفاوت بین دو نقطه متقابل دو ابزار به  $0/17$  میلی‌متر می‌رسد.



شکل ۱۲- مقایسه بین ابزار طراحی شده و ابزار تحقیق مشابه



شکل ۱۳- مقایسه بین دو ابزار پس از اصلاح شکل آند

- [12] MPurcar M, Bortels L, Van den Bossche B, Deconinck J (2004) 3D electrochemical machining computer simulations. *J Mat Proc Tech* 149(1): 472-478.
- [13] Kozak J, Rajurkar KP, Ross RF (1991) Computer simulation of pulse electrochemical machining (PECM). *J Mat Proc Tech* 28(1): 149-157.
- [14] Lu J, Riedl G, Kiniger B, Werner EA (2014) Three-dimensional tool design for steady-state electrochemical machining by continuous adjoint-based shape optimization. *Chem Eng Sci* 106: 198-210.
- [15] Barak-Shinar D, Rosenfeld M, Abboud S (2004) Numerical simulations of mass-transfer processes in 3D model of electrochemical sensor. *J Electrochem Soc* 151(12): H261-H266.
- [16] McGeough JA (1974) principles of electrochemical machining. Wiley & Sons, New York.
- [17] Bhattacharyya S, Ghosh A, Mallik AK (1997) Cathode shape prediction in electrochemical machining using a simulated cut-and-try procedure. *J Mat Proc Tech* 66(1): 146-152.
- [18] Chang CS, Hourng L W (2001) Two-dimensional two-phase numerical model for tool design in electrochemical machining. *J app electrochem* 31(2): 145-154.
- [19] Laporte E, Le Tallec P (2012) Numerical methods in sensitivity analysis and shape optimization. Springer Science & Business Media.
- [4] H El-Hofy HAG (2013) Fundamentals of machining processes: conventional and nonconventional processes. CRC press.
- [5] Klocke F, Zeis M, Klink A (2012, April) Technological and economical capabilities of manufacturing titanium-and nickel-based alloys via Electrochemical Machining (ECM). In *Key Eng Mat* 504: 1237-1242.
- [6] Klocke F, Zeis M, Klink A, Veselovac D (2012) Technological and economical comparison of roughing strategies via milling, EDM and ECM for titanium-and nickel-based blisks. *Procedia CIRP* 2: 98-101.
- [7] Tipton H (1964) in: *Proceedings of the Fifth Machine Tool Design Conference*. 2nd edn. Oxford: Pergamon Press.
- [8] Tipton H (1971) Calculation of tool shape for ECM in fundament of Electrochemical Machining. In *Electrochemical Society Softbound Symposium Series*, Princeton, Edited by CI Faust.
- [9] Chandrupatla TR, Belegundu AD (2002) *Introduction to finite elements in engineering*. 3rd edn. Prentice Hall.
- [۱۰] مروج س م، میرزایی ا، شیروانی ح (۱۳۸۵) شبیه‌سازی ماشینکاری الکتروشیمیایی (ECM). چهاردهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.
- [۱۱] قبادی م، فدایی تهرانی ع (۱۳۸۹) کاربرد روش المان محدود در طراحی ابزار ماشینکاری الکتروشیمیایی مغناطیسی. هجدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه شریف، تهران.