



دانشگاه بیرجند  
دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مکانیک گرایش ساخت و تولید

طراحی ابزار در فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی

**توسط:**

محمد رضا خبازی

**استاد راهنما:**

دکتر سید یوسف احمدی بروغنی

دکتر حسین امیرآبادی

شهریور ۱۳۸۹

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

صور جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

فرم شماره ۱۰

با تاییدات خداوند متعال جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی کارشناسی ارشد خانم / آقای محمدرضا خبازی به شماره دانشجویی: ۸۶۲۳۳۱۰۰۲۳ رشته: مکانیک گرایش: ساخت و تولید دانشکده: فنی و مهندسی تحت عنوان: طراحی ابزار در فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی با استفاده از شبیه سازی انحلال آندی

به ارزش: ۶ واحد در ساعت ۶۴ : روز: یکشنبه مورخ: ۱۱/۷/۱۹

با حضور اعضای محترم جلسه دفاع و نماینده تحصیلات تکمیلی به شرح ذیل تشکیل گردید:

سمت	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
استاد راهنمای اول	دکتر سید یوسف احمدی بروغنی	استادیار	
استاد راهنمای دوم	دکتر حسین امیرآبادی	استادیار	
استاد مشاور اول			
استاد مشاور دوم			
داور اول	دکتر خلیل خلیلی	استادیار	
داور دوم	دکتر سید حجت هاشمی	دانشیار	
نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر حسین زان	استادیار	

نتیجه ارزیابی دفاع که منوط به ارائه اصلاحات پیشنهادی توسط هیئت داوران حداکثر ظرف مدت یکماه پس از تاریخ دفاع می باشد، به شرح زیر مورد تایید قرار گرفت:

نات قبول (با درجه بسیار خوب و امتیاز: ۱۸،۲۵)    نات دفاع مجدد    نات غیر قابل قبول  
 ۱- عالی (۱۹-۲۰)    ۲- بسیار خوب (۱۸-۱۸/۹۹)    ۳- خوب (۱۶-۱۷/۹۹)    ۴- قابل قبول (۱۴-۱۵/۹۹)

(بدیهی است عواقب آموزشی ناشی از عدم ارائه به موقع اصلاحات مزبور به عهده دانشجو می باشد)

## سپاس گزاری

سپاس خداوند کریم را که مرا یاری فرمود تا قدمی در راه علم و دانش بردارم . از اساتید راهنمای ارجمندم جناب آقای دکتر سید یوسف احمدی و جناب آقای دکتر حسین امیرآبادی که در این راه دشوار صبورانه مرا همراهی کرده‌اند صمیمانه قدردانی و تشکر می‌کنم. همچنین از خانواده محترم و همسر گرامیم که با شکیبایی و تشویق‌های فراوانشان همواره یاور من بوده‌اند، کمال تشکر را دارم.

## چکیده

فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی یکی از فرآیندهای ماشینکاری غیرسنتی می‌باشد که با توجه به قابلیت‌هایش به شکل گسترده‌ای در صنایعی همچون صنایع نظامی، خودرو، هوا فضا و مهندسی پزشکی کاربرد وسیعی یافته است. از دشواری (سعی و خطا) طراحی ابزار می‌توان به عنوان یکی از مشکلات اصلی واقع بر مسیر توسعه این فرآیند نام برد. در این فرآیند شکل ابزار دقیقاً همانند شکلی که می‌باید در قطعه کار ایجاد شود نمی‌باشد. به علت ماهیت پیچیده فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی، طراحی شکل ابزار بدون نیاز به طی مراحل آزمون و خطا در شرایط ماشینکاری حقیقی امکان پذیر نمی‌باشد. در این تحقیق به منظور کاستن مراحل پر هزینه آزمون و خطا جهت طراحی ابزار در فرآیند ECM یک روش عددی بر پایه روش المان محدود پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی مشتمل بر دو بخش اصلی است اول پیش‌بینی شکل آند برای حدس اولیه ابزار و دوم اصلاح ابزار حاصل از حدس اولیه به منظور رسیدن به ابزاری با دقت مورد نظر، که روش اصلاحی مورد استفاده در این قسمت روش حساسیت می‌باشد. نتایج حاصل از روش پیشنهادی جهت طراحی ابزار به دو شیوه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌اند. اول مقایسه ابزارهای متفاوتی که برای یک شکل مشخص از آندهایی با جنس‌های مختلف طراحی شده‌اند و دوم مقایسه ابزار طراحی شده با نمونه ای که در تحقیق دیگری طراحی شده است. نتایج حاصله بیانگر صحت و دقت تحقیق انجام شده می‌باشند.

فصل اول.....	۱
۱- معرفی فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی.....	۲
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- الکترولیز.....	۵
۳-۱- تشریح مشخصات ECM.....	۷
۴-۱- اصول اولیه کار.....	۱۰
۵-۱- مزایا و محدودیت‌ها.....	۱۱
۶-۱- کاربردهای فرآیند.....	۱۱
۷-۱- خواص مکانیکی قطعات ماشینکاری شده توسط ECM.....	۱۲
۸-۱- پرداخت سطح در ECM.....	۱۳
۹-۱- دقت و کنترل ابعادی.....	۱۳
۱۰-۱- طراحی ابزار.....	۱۴
فصل دوم.....	۱۶
۲- مروری بر تحقیقات انجام شده.....	۱۷
۱-۲- مقدمه.....	۱۷
۲-۲- تحقیقات انجام گرفته در خصوص طراحی ابزار.....	۱۷
فصل سوم.....	۲۰
۳- روش‌های متداول در طراحی ابزار و پیش‌بینی شکل آند.....	۲۱
۱-۳- مقدمه.....	۲۱
۲-۳- حل به کمک تحلیل.....	۲۱
۱-۲-۳- روش آشفستگی.....	۲۲
۲-۲-۳- روش متغیر مختلط.....	۲۴
۳-۳- تحلیل به روش کسینوس.....	۳۰
۴-۳- تحلیل به روش‌های آنالوگ.....	۳۲
۱-۴-۳- روش آنالوگ مخزن الکترولیت.....	۳۳

۳۵	۳-۴-۲- روش آنالوگ صفحه رسانا
۳۸	۳-۵- روش‌های حل عددی
۳۸	۳-۵-۱- روش تفاضل محدود
۴۱	۳-۵-۲- روش المان محدود
۴۷	فصل چهارم
۴۷	۴- طراحی ابزار
۴۸	۴-۱- مقدمه
۴۸	۴-۲- هدف از طراحی ابزار
۴۹	۴-۳- معرفی نرم‌افزار مطلب
۴۹	۴-۴- اصول حاکم بر فرآیند ECM و طراحی ابزار
۵۰	۴-۴-۱- اضافه ولتاژ
۵۲	۴-۵- طراحی ابزار
۵۴	۴-۶- شبیه‌سازی
۵۵	۴-۶-۱- قانون فارادی و سرعت انحلال آندی
۵۵	۴-۶-۲- روش درصد وزنی
۵۶	۴-۶-۳- شبیه‌سازی
۵۹	۴-۷- طراحی ابزار
۵۹	۴-۷-۱- روش حساسیت
۶۱	۴-۷-۲- اعمال روش حساسیت
۶۶	فصل پنجم
۶۶	۵- بحث و نتیجه‌گیری
۶۷	۵-۱- مقدمه
۶۷	۵-۲- شبیه‌سازی انحلال آندی پره توربین
۶۹	۵-۳- طراحی ابزار برای آندهای متفاوت
۷۱	۵-۴- بررسی دقت نتایج حاصل از طراحی ابزار
۷۳	۵-۵- بحث و نتیجه‌گیری
۷۵	۵-۶- پیشنهادات

## فهرست جداول

- جدول ۱-۱: عمر خستگی قطعه کار پس از ماشینکاری الکتروشیمیایی تحت تنش  $\pm 386 \text{MN/m}^2$  ..... ۱۲
- جدول ۱-۵: پارامترهای ورودی و مشخصات فلز آند ..... ۶۸
- جدول ۲-۵: مشخصات عناصر آندها ..... ۷۰
- جدول ۳-۵: پارامترهای اصلی ورودی به برنامه ..... ۷۰
- جدول ۴-۵: پارامترهای مورد استفاده جهت طراحی ابزار معرفی شده در شکل ۵-۶ ..... ۷۱



- شکل ۱-۱: الکترولیز آهن..... ۶
- شکل ۲-۱: آند و کاتد در ماشینکاری الکتروشیمیایی..... ۱۰
- شکل ۳-۱: نمایش شماتیک اثر الکترولیت‌های مختلف بر رابطه بازده جریان و شدت جریان..... ۱۴
- شکل ۱-۳: شکل ایجاد شده بر روی آند به وسیله کاتد نوک تیز..... ۲۴
- شکل ۲-۳: تصویر یک کاتد با انتهای تخت و دیواره‌های عایق شده..... ۲۶
- شکل ۳-۳: کاتد دیوار مستقیم با پهنای محدود غیرعایق و قسمت بالای عایق..... ۲۷
- شکل ۴-۳: پهنای  $w$  به عنوان تابعی از اضافه برش کل  $h_{\infty}$ ..... ۳۰
- شکل ۵-۳: اصول کلی روش  $\cos\theta$ ..... ۳۰
- شکل ۶-۳: طراحی کاتد به روش  $\cos\theta$ ..... ۳۱
- شکل ۷-۳: تجهیزات مورد استفاده در روش آنالوگ مخزن الکترولیت..... ۳۳
- شکل ۸-۳: موقعیت اولیه و میانی کاتد و آند با روش آنالوگ مخزن الکترولیت..... ۳۴
- شکل ۹-۳: نمایش روش آنالوگ صفحه رسانا..... ۳۵
- شکل ۱۰-۳: روش صفحه رسانا..... ۳۶
- شکل ۱۱-۳: شرایط مرزی بر روی مرز آند..... ۳۷
- شکل ۱۲-۳: شکل‌های آندی که توسط یک کاتد فرم یافته‌اند..... ۳۷
- شکل ۱۳-۳: نقاط مش تعریف‌کننده شکل آند و کاتد توسط مختصات  $i_j$ ..... ۳۸
- شکل ۱۴-۳: روش المان محدود، مش با طول ضلع  $a$  و مختصات عمومی  $Q(i,j)$ ..... ۳۹
- شکل ۱۵-۳: نمایش روش درونیابی خطی به منظور محاسبه پتانسیل الکتریکی در نقطه  $Q$ ..... ۴۰
- شکل ۱۶-۳: مش‌بندی و شماره‌گذاری..... ۴۲
- شکل ۱۷-۳: الگوریتم طراحی ابزار به کمک روش فاکتور اصلاحی..... ۴۴
- شکل ۱-۴: شرایط مرزی حاکم در ECM..... ۵۲
- شکل ۲-۴: الگوریتم شبیه‌سازی انحلال آندی..... ۵۳
- شکل ۳-۴: الگوریتم طراحی ابزار..... ۵۴
- شکل ۴-۴: الگوریتم شبیه‌سازی انحلال آندی..... ۵۶
- شکل ۵-۴: ترسیم محدوده گپ..... ۵۷
- شکل ۶-۴: مش‌بندی محدوده گپ بین ابزار و قطعه کار..... ۵۸
- شکل ۷-۴: زاویه  $\theta$  بین عمود بر سطح آند و جهت پیشروی ابزار..... ۵۸
- شکل ۸-۴: انحلال قطعه کار پس از ۲۰ ثانیه با فرض گام زمانی به طول ۵ ثانیه..... ۵۹
- شکل ۹-۴: روش حساسیت..... ۶۰
- شکل ۱۰-۴: الگوریتم طراحی ابزار..... ۶۲
- شکل ۱۱-۴: کاتد آفست یافته..... ۶۳

- شکل ۵-۱: مرحله اول شبیه‌سازی انحلال آندی پره توربین ..... ۶۸
- شکل ۵-۲: میزان انحلال آند پس از گذشت ۲۵ ثانیه با گام زمانی به طول ۵ ثانیه ..... ۶۸
- شکل ۵-۳: انحلال آندی پس از ۱۸۰ ثانیه و ایجاد فاصله تعادلی ..... ۶۹
- شکل ۵-۴: انحلال آندی پس از ۲۰۰ ثانیه و ثابت بودن فاصله تعادلی ..... ۶۹
- شکل ۵-۵: ابزارهای مختلف طراحی شده برای آندهایی با جنس‌های متفاوت ..... ۷۰
- شکل ۵-۶: ابزار طراحی شده برای آند با پروفیل ملایم ..... ۷۲
- شکل ۵-۷: مقایسه بین ابزار طراحی شده و ابزار موجود ..... ۷۲
- شکل ۵-۸: مقایسه بین ابزار طراحی شده و ابزار موجود پس از اصلاح شکل آند ..... ۷۳
- شکل ۵-۹: منحنی‌های مختلف اسپری لاین مشخص شده با چهار قید انتهایی ..... ۷۵
- شکل ۵-۱۰: سطح ایجاد شده ناشی از حرکت منحنی اسپری لاین ..... ۷۵
- شکل ۵-۱۱: حفره ناشی از حرکت دورانی اسپری لاین در ECM ..... ۷۶

# فصل اول

معرفی فرآیند ماشینکاری

الکتروشیمیایی

اختراع روش‌های براده‌برداری از زمان‌های اولیه وجود داشته است. ابتدا اجسام به وسیله دست و با ابزاری که از استخوان، چوب یا سنگ ساخته شده بود بریده می‌شدند. قدیمی‌ترین ابزار بیش از دو و نیم میلیون سال قدمت دارد. در یک دوره یک میلیون ساله با استفاده از فلزات ابتدایی مثل آهن و برنز پیشرفت‌هایی در دست افزارها به دست آمد. در واقع تا قرن هفدهم ابزار با دست و یا با روش‌های مکانیکی بسیار اولیه به کار می‌رفتند. واگن‌ها، کشتی‌ها، لوازم و ابزارهای ابتدایی با این روش تولید می‌شدند.

پس از آنکه آب، بخار و سپس برق به عنوان منابع انرژی مفید شناخته شدند ماشین ابزارهای موتوری ساخته شده و به سرعت در بسیاری از کارها جایگزین عملیات دستی شدند. با پیشرفت این روش‌ها و با بهسازی فولادهای آلیاژی که در ساخت ابزار به کار می‌رفت در قرن‌های هفدهم و هیجدهم صنعت ماشین ابزار جدیدی به وجود آمد [۱].

جان ویلکینسون<sup>۱</sup> در سال ۱۷۷۴ نقش عمده‌ای در این صنعت پیدا کرد. او ماشین دقیقی برای داخل تراشی سیلندرهای موتور بخار ساخت و به این ترتیب بر یکی از مشکلات ماشین‌های ابزار اولیه که منبع انرژی آنها بخار بود چیره شد. بیست و سه سال بعد هنری مادسلی<sup>۲</sup> با اختراع یک ماشین تراش پیچ‌بری باعث پیشرفت بیشتری در ماشینکاری شد.

ماشین تراش و فرز داخل تراشی نمونه‌های معمولی از ماشین‌های چرخشی هستند. این ماشین‌ها یکی از هفت نوع اصلی ماشین ابزارها محسوب می‌شوند. دومین ماشین ابزار ابتدایی توسط جیمز اسمیت<sup>۳</sup> اختراع شد، ابزاری برای صفحه‌تراشی یا صفحه‌تراشی دروازه‌ای. ماشین‌های مدرن که بر مبنای این دستگاه ساخته شده‌اند برای ماشینکاری سطوح تخت، شیارها، گوشه‌کار، شیار T شکل و سطوح زاویه‌دار با ابزارهای یک نقطه‌ای به کار می‌روند. سومین مجموعه ماشین ابزارها، ماشین مته‌کاری است. این دستگاه توسط یک مته مارپیچ سوراخ‌تراشی می‌کند. پنجمین نوع ماشین ابزار که در اواخر قرن نوزدهم معرفی شد ماشین سنگ‌زنی بود. در این نوع از ماشین‌های ابزار از یک چرخ یا تسمه ساینده برای برداشتن تراشه از قطعات فلزی استفاده می‌شود. دو نوع ماشین ابزار باقیمانده ماشین‌های اره و پرس‌ها هستند. اره‌های

<sup>1</sup> John Wilinkson

<sup>2</sup> Henry Modslly

<sup>3</sup> Jame Smith

نواری و دیسکی برای بریدن شکل‌ها در صفحات فلزی، ساخت طرح‌های داخلی و یا خارجی و برش‌های زاویه‌ای به کار می‌روند. آخرین نوع ماشین ابزار دارای یک بازوی محرک است که به یک سندان یا پایه فشرده می‌شود تا قطعه با عملیاتی مثل برش، پولک زنی، خم و کشش شکل‌دهی شود.

به وسیله این ماشین‌ها می‌توان قطعات را تا تolerانس  $\pm 0.025\text{mm}$  براده‌برداری و شکل‌دهی کرد (دقت  $\pm 0.005\text{mm}$  توسط ماشین‌های لپینگ دقیق قابل دستیابی است). به طور خلاصه تولید توسط ماشین ابزارهای مرسوم بر مبنای تکنیک‌های زیر است: (الف) براده‌برداری مواد اضافه از قطعه به صورت تراشه، (ب) برش ماده، (ج) فشردن قطعات به شکل دلخواه [۲].

در قرن نوزدهم و بیستم پدیده‌های فیزیکی کشف شدند که در هنگام اختراع این ماشین‌ها ناشناخته بودند. در برخی از موارد اصول این پدیده‌ها در ایجاد یک روش کاملاً جدید ماشینکاری که بر اساس براده‌برداری مرسوم نبود به کار رفته است. از سوی دیگر این اصول فیزیکی کشف شده برای غلبه بر مشکلات صنعتی جدید مثل ماشینکاری مواد و آلیاژهای جدید که طبیعتاً ماشینکاری آنها با ماشین‌های ابزار مرسوم مشکل و گاه غیرممکن است به کار می‌روند. اسنوویس و همکارانش (۱۹۸۶) [۱] موادی سخت‌تر، چقرمه‌تر و با استحکام بیشتر، مثل آلیاژهای استحکام بالای مقاوم در برابر حرارت، کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف، سرامیک‌ها، استالیت‌ها (آلیاژهای پایه کبالت) و کاربیدها را برای تولید معرفی کرده‌اند. خواص مکانیکی این مواد مانع سختی در برابر ماشینکاری آنها با روش‌های مرسوم است. بنابراین روش‌های ماشینکاری مختلفی که تحت تأثیر استحکام مکانیکی مواد نباشند مورد توجه هستند. کاربرد این روش‌های جدید تحت تأثیر عوامل دیگری مثل رسانایی گرمایی و الکتریکی جنس قطعه کار، دمای ذوب و معادل الکتروشمیایی آن است.

علاوه بر مشکل ماشینکاری قطعات خیلی سخت، مواد جدید اغلب باید به شکل‌های پیچیده‌ای ماشینکاری شوند و این کار توسط روش‌های مرسوم ممکن نیست. روش‌های پیشرفته‌ای ارائه شده که شکل‌های پیچیده را به راحتی ماشینکاری می‌کنند [۱،۳].

روش‌های ماشینکاری که تحت عنوان ماشینکاری غیرسنتی شناخته می‌شوند روش‌هایی می‌باشند که با توجه به اصول کشف شده در فیزیک و شیمی در قرن نوزدهم و بیستم پایه‌گذاری شده‌اند. لغت ماشینکاری غیر سنتی به گستره‌ای از فرآیندهای گرمایی، شیمیایی، الکتریکی و مکانیکی در برداشت ماده اشاره دارد. انگیزه گسترش روش‌های ماشینکاری غیر سنتی از انقلاب در مواد، تقاضا برای استانداردهای جدید در کارایی و دوام تولیدات، اشکال پیچیده در تولیدات مهندسی برای مقاصد خاص و فرض سایش ابزار و ملاحظات اقتصادی پدیدار شد. روش‌های ماشینکاری غیر سنتی همچنین به منظور ارضاء گرایش به افزایش دقت ابعاد و بهبود کیفیت سطح توسعه یافتند. به علت اینکه این روش‌های ماشینکاری غیر سنتی ارائه دهنده راهکارهای نوینی در برآورده‌سازی تقاضای تکنولوژی‌های پیشرفته نو ظهور در بسیاری از گستره‌ها بودند ایده‌های مهندسیین طراح نیاز به محدود شدن به روش‌های ماشینکاری غیر سنتی نداشتند و یکی از مهمترین این موارد گرایش به استفاده از مواد مهندسی سخت و غیر قابل ماشینکاری با روش‌های سنتی می‌باشد. آلیاژهای مقاوم به حرارت و دارای کارایی بالا معمولاً با استفاده از روش‌های سنتی به سختی ماشینکاری می‌شوند اما روش‌های ماشینکاری غیر سنتی معمولاً به

خوبی در مقابل این مواد عمل می‌کنند. دلیل دیگری برای انتخاب روش‌های ماشینکاری غیر سنتی، ماشینکاری طرح‌هایی می‌باشد که معمولاً در ماشینکاری‌های سنتی سخت و یا غیر ممکن می‌باشند. ایجاد هندسه‌های پیچیده و ماشینکاری مکان‌های غیرقابل دسترسی از دیگر توانمندی‌های روش‌های ماشینکاری غیر سنتی می‌باشند. روش‌های ماشینکاری غیر سنتی توانایی تولید و ماشینکاری سوراخ‌های خاص را دارا می‌باشند این روش‌ها می‌توانند سوراخ‌هایی با مقطع شکل‌دار، سوراخ‌های مخروطی و سوراخ‌هایی با نسبت طول به قطر بالا را ماشینکاری کنند. از دیگر برتری‌های این روش‌ها، سایش ابزار پایین و یا صفر می‌باشد برخی از روش‌ها توانایی ماشینکاری پیوسته را دارند که در تئوری دارای سایش ابزار صفر هستند. و این خواص و توانایی‌های روش‌های ماشینکاری غیر سنتی یک گستره بدون محدودیت در طراحی و ساخت را برای مهندسين مهيا می‌سازند.

مجموعه روش‌های ماشینکاری غیر سنتی به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند [۲].

فرآیندهای ماشینکاری مکانیکی: ماشینکاری با جت ذرات ساینده<sup>۱</sup> (AJM)، ماشینکاری آلتراسونیک<sup>۲</sup> (USM)، ماشینکاری با جت آب<sup>۳</sup> (WJM)، ماشینکاری با جت آب ساینده<sup>۴</sup> (AWJM)، پرداخت کاری سایشی مغناطیسی<sup>۵</sup> (MAF).

فرآیندهای ماشینکاری ترموالکتریک: ماشینکاری با قوس پلاسما<sup>۶</sup> (PAM)، ماشینکاری با اشعه لیزر<sup>۷</sup> (LBM)، ماشینکاری با اشعه الکترونی<sup>۸</sup> (EBM)، ماشینکاری با تخلیه الکتریکی<sup>۹</sup> (EDM)، ماشینکاری با اشعه یونی<sup>۱۰</sup> (IBM).

فرآیندهای ماشینکاری الکتروشیمیایی و شیمیایی: ماشینکاری الکتروشیمیایی<sup>۱۱</sup> (ECM)، ماشینکاری شیمیایی<sup>۱۲</sup> (ChM)، ماشینکاری فتوشیمیایی<sup>۱۳</sup> (PCM).

در میان فرآیندهای ماشینکاری غیرسنتی ذکر شده فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی (ECM) یکی از فرآیندها بالقوه می‌باشد. این روش در حل مشکلات ذکر شده در خصوص فرآیندهای ماشینکاری سنتی بسیار توانمند است. در این راستا می‌توان به برخی از توانایی‌های این روش اشاره مختصری داشت.

<sup>1</sup> Abrasive Jet Machining

<sup>2</sup> Ultra Sonic Machining

<sup>3</sup> Water Jet Machining

<sup>4</sup> Abrasive Water Jet Machining

<sup>5</sup> Magnetic Abrasive Finishing

<sup>6</sup> Plasma Arc Machining

<sup>7</sup> Laser Beam Machining

<sup>8</sup> Electro Beam Machining

<sup>9</sup> Electro Discharge Machining

<sup>10</sup> Ion Beam Machining

<sup>11</sup> ElectroChemical Machining

<sup>12</sup> Chemical Machining

<sup>13</sup> Photo Chemical Machining

با توجه به اولین مشکل در فرآیندهای ماشینکاری سنتی که مواجه شدن با مشکل ماشینکاری مواد سخت و مقاوم به حرارت می‌باشد فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی کاملاً مستقل از سختی و در کل خواص فیزیکی و مکانیکی قطعه کار می‌باشد. علاوه بر این فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی قدرت ماشینکاری اشکال بسیار پیچیده و منحنی شکل را در یک مرحله ماشینکاری دارا می‌باشد [۱]. در این فرآیند سایش تئوری ابزار برابر با صفر می‌باشد. بنابراین می‌توان تنها از یک ابزار برای ماشینکاری تعداد زیادی قطعه استفاده کرد [۳].

ماشینکاری الکتروشیمیایی پروسه‌ای برای برداشت ماده به وسیله انحلال الکتروشیمیایی می‌باشد. این روش شبیه فرآیند آبکاری الکتریکی می‌باشد با این تفاوت که جریان برعکس می‌باشد و ماده برداشته می‌شود.

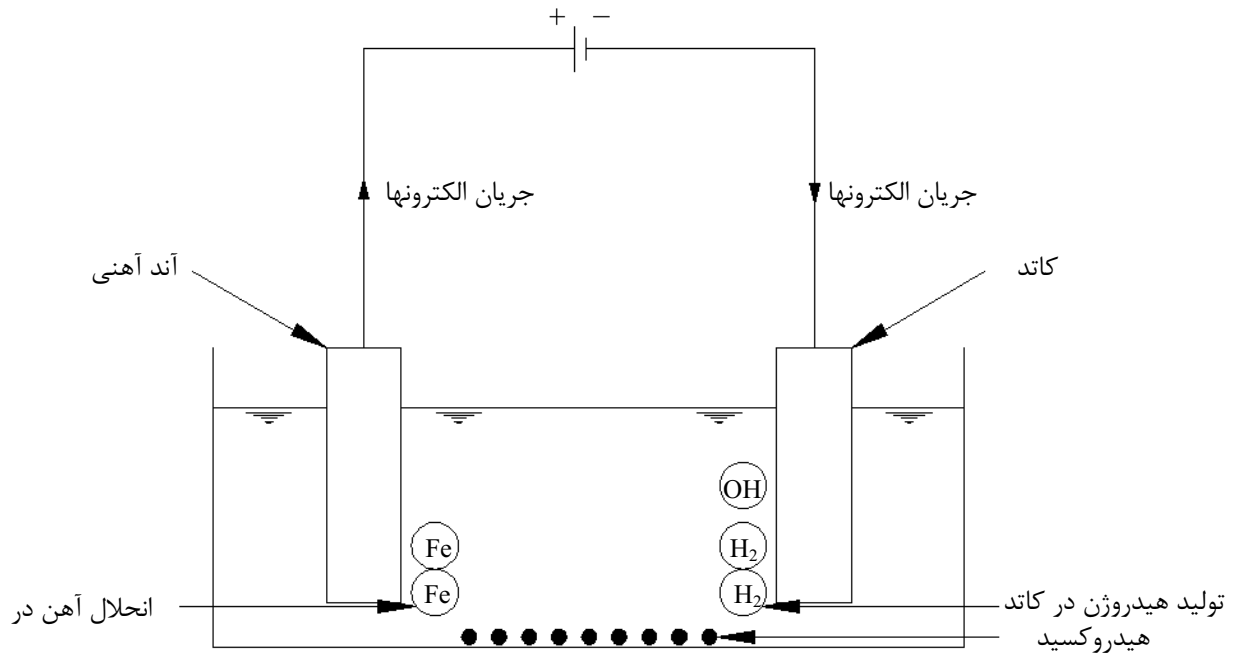
با توجه به معرفی اولیه‌ای که از فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی و توانایی‌های آن به عمل آمد در ادامه به شکل مفصل‌تری به معرفی این فرآیند پرداخته خواهد شد.

## ۱-۲- الکترولیز

فرآیند شیمیایی که در آن جریان الکتریکی از بین دو رسانای غوطه‌ور در یک محلول مایع عبور می‌کند الکترولیز نامیده می‌شود. یک کاربرد عمومی الکترولیز فرآیند آبکاری الکتریکی است که در آن یک پوشش فلزی بر روی یک سطح فلزی که به صورت کاتدی قطبی شده می‌نشیند. شدت جریان به کار رفته حدوداً  $2 \times 10^{-2} \text{Acm}^{-2}$  است و ضخامت پوشش به ندرت بیش از  $10 \mu\text{m}$  می‌شود. در اینجا منظور از شدت جریان، جریان روی سطح عملیاتی است. مثالی برای عملیات انحلال آندی، پولیش الکتریکی است که در آن قطعه آند یک سلول الکتریکی است. ناصافی‌های سطح حل شده و با برداشته شدن آنها سطح تخت و پولیش می‌شود. شدت جریان معمولی در این عملیات  $10^{-2} \text{Acm}^{-2}$  است و حل کردن با برداشتن ناصافی‌هایی به کوچکی  $2-10 \mu\text{m}$  انجام می‌شود. در آبکاری و پولیش الکتریکی، الکترولیت با سرعت کم و بدون هم خوردن عمل می‌کند.

در ماشینکاری الکتروشیمیایی (ECM) از آنجا که یک فرآیند انحلال آندی است مشابه پولیش الکتریکی می‌باشد. ولی سرعت براده‌برداری در فرآیند پولیش کردن بسیار کمتر از سرعت مورد نیاز در ماشینکاری الکتروشیمیایی است. برای تشریح روش عمل ECM و نحوه شکل دادن فلزات با این عمل، الکترولیز آهن در کلرید سدیم آبدار بحث می‌شود.

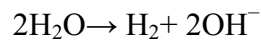
هنگامی که اختلاف پتانسیل بین الکترودها ایجاد می‌شود ممکن است واکنش‌های متعددی در آند و کاتد انجام شود. و البته عملاً واکنش‌های خاصی اتفاق می‌افتند. که دلیل آن را می‌توان با انرژی موجود برای هر واکنش توضیح داد. در این مثال واکنش آندی انحلال آهن می‌باشد (شکل ۱-۱):



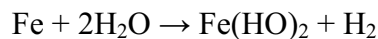
شکل ۱-۱: الکترولیز آهن [۱]



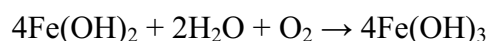
واکنش کاتدی تولید گاز هیدروژن و یون‌های هیدروکسید است.



در نتیجه این واکنش‌های الکتروشیمیایی یون‌های فلزی با یون‌های هیدروکسید ترکیب شده و هیدروکسید آهن تولید می‌شود. بنابراین واکنش کلی عبارت است از:



هیدروکسید فرو ممکن است با آب و اکسیژن ترکیب شده و هیدروکسید فریک تولید کند:



لازم به تأکید است که این واکنش قسمتی از الکترولیز نیست. در این ترکیب الکترولیت - فلز، الکترولیز شامل انحلال آهن در آند و تولید هیدروژن در کاتد است و عمل دیگری در الکترودها اتفاق نمی‌افتد.

در اینجا می‌توان به نتایج مشخصی در خصوص ECM دست یافت:



۱. از آنجا که فلز آند به صورت الکتروشیمیایی حل می‌شود سرعت انحلال یا ماشینکاری آن با توجه به قوانین الکترولیز فارادی فقط به وزن اتمی  $A$ ، ظرفیت  $Z$ ، جریان عبوری  $I$ ، و مدت زمان عبور جریان  $t$ ، بستگی دارد. سرعت انحلال به سختی و یا سایر مشخصات فلز بستگی ندارد.
۲. از آنجا که فقط گاز هیدروژن در کاتد ایجاد می‌شود شکل این الکتروود در حین الکترولیز تغییر نمی‌کند. و این موضوع بارزترین مشخصه در فرآیند شکل‌دهی فلز با ECM است.

### ۱-۳- تشریح مشخصات ECM

با استفاده از قانون فارادی می‌توان دو موضوع ذکر شده را کامل‌تر توضیح داد. اگر  $m$  جرم فلز حل شده باشد، چون  $m = v\rho_a$  (که در آن  $v$  حجم مربوطه و  $\rho_a$  چگالی فلز آند است)، سرعت حجمی براده‌برداری فلز آندی  $v$  با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{v} = \frac{AI}{ZF\rho_a} \quad (1-1)$$

اگر عملیات ماشینکاری یک قطعه آهنی با سرعت معمولی،  $10^{-8} \times 2/6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  در نظر گرفته شود. برای اینکه این سرعت براده‌برداری در ECM به دست آید، جریان سلول باید حدود  $700 \text{ A}$  باشد. جریان‌های به کار رفته در ECM در همین حدود و در اغلب اوقات تا دو برابر آن هستند. شدت جریان متوسط معمولاً  $50-150 \text{ A/cm}^2$  است [۱].

برای بدست آوردن شدت جریان‌های بالا می‌توان مشخصات دیگر سلول ECM، رسانایی الکترولیت و فاصله بین الکتروودها را بررسی کرد. این پارامترها به وسیله قانون اهم جریان  $I$  عبوری از یک رسانا با ولتاژ مؤثر  $V$  تناسب مستقیم دارد:

$$V = IR \quad (2-1)$$

در رابطه بالا  $R$  مقاومت رسانا است. تجربیات کسب شده در الکترولیز نشان می‌دهد که الکترولیت‌ها رسانای الکتریکی هستند. اگر چه ممکن است مقاومت الکترولیت چند صدم اهم باشد ولی قانون اهم در اینجا نیز صادق است.

مقاومت  $R$  یک رسانای یکنواخت تناسب مستقیم با طول  $h$  (فاصله آند و کاتد) و نسبت عکس با سطح مقطع  $A$  دارد. بنابراین:

$$R = \frac{h\rho}{A} \quad (3-1)$$

که در آن  $P$  ثابت تناسب است. اگر رسانا مکعبی با ابعاد  $1\text{ cm}$  باشد آنگاه  $R = P$  مقاومت ویژه نامیده می‌شود. عکس مقاومت ویژه، رسانایی ویژه است که اغلب با علامت  $\kappa$  نمایش داده می‌شود. اگر معادلات ۱-۲ و ۱-۳ با هم ترکیب شوند روابط زیر برای شدت جریان متوسط  $J$ ، جریان  $I$ ، مساحت سطح ماشینکاری شده  $A$ ، اختلاف پتانسیل مؤثر  $V$ ، فاصله دهانه بین الکترودها  $h$  و رسانایی الکترولیت  $\kappa_e$  بدست می‌آید:

$$J = \frac{I}{A} = \frac{\kappa_e V}{h} \quad (4-1)$$

در عمل مقدار  $J$  حدود  $50\text{ Acm}^{-2}$  است. برای بدست آوردن چنین شدت جریانی باید سلولی ساخت که مقدار  $\kappa_e$  و  $V$  در آن زیاد و  $h$  کم باشد. البته حتی در الکترودهای قوی هم مقدار  $\kappa_e$  معمولی است. اگر مقدار جریان زیاد باشد توان مورد نیاز و شرایط دیگر، استفاده از ولتاژهای بالا را محدود می‌کند و در عمل معمولاً ولتاژ  $10-20\text{ V}$  است. اگر  $V=10\text{ V}$  و  $\kappa_e = 0.2\text{ }\Omega^{-1}\text{ cm}^{-1}$  باشد برای دستیابی به  $50\text{ Acm}^{-2}$   $J=50$  فاصله  $h$  باید  $0.4\text{ mm}$  باشد و این فاصله برای شکل‌دهی دقیق آند ضروری است. در هنگام حل شدن آند این فاصله با حرکت مکانیکی یک الکتروده به سمت الکتروده دیگر ثابت نگه داشته می‌شود. اگر مقدار متغیرهای فرآیند مطابق مقادیر بالا باشد برای حفظ فاصله  $0.4\text{ mm}$  سرعت پیشروی کاتد حدود  $0.2\text{ mms}^{-1}$  خواهد بود [۱].

تجمع محصولات فلزی و گازی الکترولیز در فاصله کوچک ماشینکاری نامطلوب است. اگر رشد این حالت کنترل نشود ممکن است بین دو الکتروده اتصال کوتاه ایجاد شود. برای جلوگیری از این اتفاق الکترولیت از فاصله بین الکترودها پمپ می‌شود تا محصولات الکترولیز را از آن موضع خارج کند. حرکت اجباری الکترولیت برای از بین بردن اثرات گرمایش الکترولیت و گاز هیدروژن که حاصل از عبور جریان است ضروری می‌باشد. گرم شدن باعث افزایش رسانایی مؤثر الکترولیت کاهش رسانایی مؤثر هیدروژن می‌شود. اثر گرمایش ژول راه ساده و مناسبی برای بدست آوردن سرعت الکترولیت ارائه می‌دهد. اگر برای کنترل افزایش دما الکترولیت هم زده نشود، در فاصله کاری الکترولیت به نقطه جوش می‌رسد. اگر کل گرمای تولید شده توسط عبور جریان در الکترولیت باقی بماند افزایش دما  $\delta T$  در طول  $\delta x$  فاصله کاری از قوانین ژول و اهم به شکل زیر به دست می‌آید:

$$\delta T = \frac{J^2 \delta x}{\kappa_e \rho_e c_e U} \quad (5-1)$$

که در آن  $U$  سرعت الکترولیت،  $\rho_e$  چگالی الکترولیت و  $c_e$  گرمای ویژه است.

اگر برای ساده‌سازی از افزایش دمای حاصل از رسانایی الکترولیت صرف نظر شود با انتگرال‌گیری از معادله ۵-۱ خواهیم داشت:

$$U = \frac{J^2 L}{\kappa_e \rho_e c_e \Delta T} \quad (6-1)$$

که در آن  $L$  طول الکتروود و  $\Delta T$  اختلاف دمای بین ورود و خروج الکترولیت در فاصله کاری است. برای مثال مقادیر  $J=50 \text{ Acm}^{-2}$ ،  $L = 10^2 \text{ mm}$ ،  $\kappa_e = 0.2 \text{ } \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ،  $\rho_e = 1/1 \text{ gcm}^{-3}$  و  $c_e = 4/18 \text{ Jg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  را در نظر بگیرید. همچنین با فرض اینکه دمای ورودی  $25^\circ \text{C}$  است در نظر داشته باشید که  $\Delta T$  باید کمتر از  $75^\circ \text{C}$  باشد تا از جوشش سیال در نقطه خروج جلوگیری شود. مقدار سرعت بدست آمده از معادله ۶-۱ برای حفظ این شرایط  $3/6 \text{ ms}^{-1}$  است. سرعت محلول الکترولیت در فاصله کاری در ECM در دامنه  $3-30 \text{ ms}^{-1}$  است. و اکنون به محاسبه فشار لازم برای دستیابی به این سرعت‌ها پرداخته می‌شود. جریان الکترولیت بین دو الکتروود ECM اغلب آشفته است. معیار آشفته بودن جریان این است که:

$$Re > 2300$$

که در آن:

$$Re = \rho_e \frac{\bar{u} d_h}{\mu} \quad (7-1)$$

$Re$  عدد رینولدز است. در این رابطه  $\bar{u}$  سرعت متوسط،  $d_h$  قطر متوسط هیدرولیکی کانال برای جریان الکترولیت و  $\mu$  ویسکوزیته مطلق الکترولیت است که معمولاً مقدار آن  $1/19 \text{ cP}$  می‌باشد. مقدار افت فشار اصطکاکی در کانال جریان به طول  $L$  (طول الکتروود) در جریان توربولانت به شکل زیر به دست می‌آید:

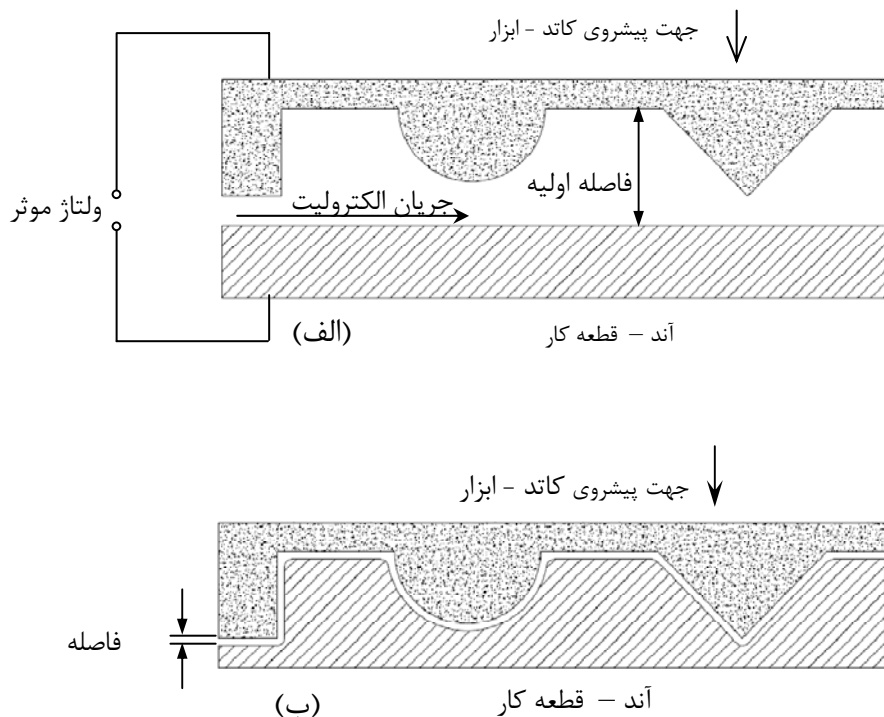
$$\frac{1}{2} \frac{f L \rho_e \bar{u}^2}{d_h} \quad (8-1)$$

که در آن ضریب اصطکاک  $f$  برحسب عدد رینولدز عبارت است از:

$$f = \frac{0.3164}{Re^{1/4}} \quad (9-1)$$

## ۱-۴- اصول اولیه کار

همانگونه که در شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود، در روش ECM قطعه کار آند و ابزار کاتد یک سلول الکترولیتی هستند و اختلاف پتانسیلی که اغلب در حدود ۱۰V است بین آنها ایجاد می‌شود. برای اینکه شکل کاتد در حین الکترولیز تغییر نکند یک الکترولیت مناسب (مثل محلول NaCl آبدار) به کار می‌رود. برای خارج کردن محصولات ماشینکاری و همچنین برای جلوگیری از اثرات ناخواسته مثل تولید گاز کاتدی و گرمایش الکتریکی، الکترولیتی با رسانایی حدوداً  $0.2 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$  و سرعت تقریبی  $3-30 \text{ms}^{-1}$  از فاصله بین الکترودها پمپ می‌شود. سرعت براده‌برداری از آند تقریباً نسبت معکوس با فاصله الکترودها دارد. با پیشرفت ماشینکاری و حرکت همزمان کاتد با سرعت معمولی (مثلاً  $0.2 \text{mms}^{-1}$ ) به طرف آند، پهنای دهانه در طول الکترودها به مقدار ثابت پایدار می‌رسد. در این شرایط شکلی که تقریباً قرینه‌ی کاتد است، در آند ایجاد می‌شود. پهنای دهانه باید حدوداً  $0.4 \text{mm}$  و شدت جریان متوسط باید  $50-150 \text{Acm}^{-2}$  باشند.



شکل ۱-۲: آند و کاتد در ماشینکاری الکتروشیمیایی الف- در شروع فرآیند، ب- در پایان فرآیند