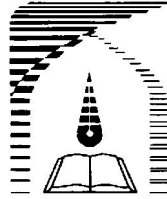


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه تربیت مدرس  
دانشکده فنی و مهندسی

رساله دکتری مهندسی مکانیک - ساخت و تولید

مطالعه فرآیند افزودن ذرات پودر به سیال دی‌الکتریک و بررسی اثرات آن  
بر روی مشخصه‌های خروجی فرآیند EDM در ماشینکاری ترکیب بین‌فلزی  
**TiAl**

بهزاد جباری پور

استاد راهنما:

دکتر محمد حسین صادقی

اساتید مشاور:

دکتر محمد رضا شبگرد

دکتر سید محمد مهدی هادوی

دی ۱۳۹۱



بسمه تعالی

## تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای بهزاد جباری پور رساله ۲۴ واحدی خود را با عنوان مطالعه فرآیند افزودن ذرات پودر به سیال دی الکتریک و بررسی اثرات آن بر روی مشخصه های خروجی فرآیند EDM در ماشینکاری ترکیب بین فلزی TiAl در تاریخ ۱۳۹۱/۱۰/۱۳ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی مکانیک - ساخت و تولید پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر محمدحسین صادقی	استاد	
استاد مشاور	دکتر محمدرضا شیگرد	دانشیار	
استاد مشاور	دکتر سیدمحمد مهدی هادوی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر امیر حسین بهروش	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر یوسف حجت	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر مجید قریشی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر رمضانعلی مهدوی نژاد	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر امیر حسین بهروش	دانشیار	

## دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

**مقدمه:** با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عنوان پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

**ماده ۱-** حقوق مادی و معنوی پایان‌نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

**ماده ۲-** انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه / رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

**تبصره:** در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه / رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

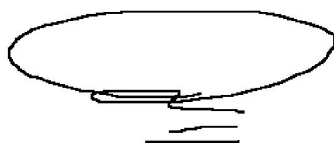
**ماده ۳-** انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان‌نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آیین‌نامه‌های مصوب انجام می‌شود.

**ماده ۴-** ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

**ماده ۵-** این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم‌الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می‌شود.

نام و نام خانوادگی: بهزاد جباری پور

امضاء



## آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی- پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل رساله دکتری بهزاد جباری پور در رشته مهندسی مکانیک- ساخت و تولید است که در سال ۱۳۹۱ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر محمد حسین صادقی و مشاوره جناب آقای دکتر محمد رضا شبگرد و جناب آقای دکتر سید محمد مهدی هادوی از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

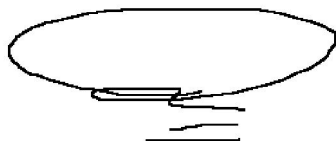
ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب بهزاد جباری پور دانشجوی رشته مهندسی مکانیک- ساخت و تولید مقطع دکتری تخصصی تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: بهزاد جباری پور

تاریخ و امضا: ۹۱/۱۱/۲۰



## تقدیم به

همسر عزیزم که با شکیبایی و محبت مرا یاری و همراهی نمود.

پدر و مادر فداکارم که همواره تکیه‌گاه و در طول دوران تحصیل، مشوق من بوده‌اند.

خواهر و برادرم که همیشه مایه دلگرمی من هستند.

## تشکر و قدردانی

بر خود واجب می‌دانم که از زحمات، کمکه‌ها و راهنمایی‌های استاد عزیزم جناب آقای دکتر محمد حسین صادقی صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم و از خداوند متعال تندرستی و موفقیت روز افزون ایشان را خواستارم.

و همچنین از یاری و مشورتهای اساتید بزرگوارم جناب آقای دکتر محمد رضا شبگرد و جناب آقای دکتر سید محمد مهدی هادوی کمال تشکر را دارم و از پروردگارم برای این عزیزان عمری پر برکت و موفقیت خواستارم.

## چکیده

ترکیب بین فلزی  $\gamma$ -TiAl به علت مزیت‌هایی همچون چگالی پایین، مدول الاستیسیته بالا، مقاومت زیاد در برابر اکسیداسیون، خوردگی و احتراق، استحکام کششی و خزشی مناسب در دمای بالا، در صنایعی نظیر هوافضا، توربین‌سازی، موتورهای جت و اتومبیل‌سازی، مورد توجه قرار گرفته است. ماشینکاری این دسته از مواد با روشهای سنتی بسیار مشکل است. در این مورد، می‌توان از روشهای غیرسنتی مانند ماشینکاری تخلیه الکتریکی (EDM) استفاده نمود. یکی از روشهای بهبود مشخصه‌های خروجی فرآیند EDM، روش افزودن پودر رسانا و یا نیمه‌رسانا به سیال دی‌الکتریک و انجام ماشینکاری تخلیه الکتریکی می‌باشد که به اختصار PMEDM نامیده شده است. نتایج نشان می‌دهد در هنگام استفاده از الکترودهای آلومینیومی، نرخ سایش ابزار به طور متوسط ۴.۴ برابر بیشتر از نرخ سایش ابزارهای مسی و ۸ برابر بیشتر از نرخ سایش ابزارهای گرافیتی است. در هنگام استفاده از الکترودهای گرافیتی، نرخ براده‌برداری از TiAl به طور متوسط ۵.۹ برابر بیشتر از نرخ براده‌برداری با ابزارهای مسی و ۱۱ برابر بیشتر از ابزارهای آلومینیومی است. با توجه به نتایج EDS و XRD درصد وزنی بیشتر عناصر آلومینیوم و اکسیژن در حالت ماشینکاری به کمک ابزار آلومینیومی منجر به شکل‌گیری ترکیبات اکسیدی بیشتر می‌گردد ولی در هنگام ماشینکاری به کمک ابزار گرافیتی، فازهای کاربیدی بیشتری بر روی سطح ماشینکاری شده به وجود می‌آید که این فازهای مختلف شیمیایی منجر به تغییرات میکروسختی در مقطع جانبی نمونه ماشینکاری شده می‌گردد. در فرآیند PMEDM، پودر آلومینیوم بهترین توپوگرافی سطح، کمترین زبری و نرخ سایش ابزار را ایجاد می‌کند و بعد از آن به ترتیب پودرهای سیلیکون‌کارباید، گرافیت، کروم و آهن قرار دارند. شکل پالسهای ولتاژ مربوط به PMEDM، کاملاً متفاوت از شکل پالس ولتاژ مربوط به EDM است. با افزودن ذرات پودر، به ازای هر تک پالس ورودی ولتاژ، چندین مسیر مختلف تخلیه الکتریکی ایجاد می‌شود و منجر به افزایش فرکانس جرقه‌زنی یا به عبارت دیگر توزیع انرژی حاصل از تخلیه الکتریکی می‌گردد. بر اساس نتایج EDS و با توجه به نوع پودر استفاده شده در فرآیند PMEDM حدود ۵ تا ۱۰ درصد از عناصر پودر به لایه سطحی نمونه



ماشینکاری شده افزوده می‌گردد و منجر به تولید فازهای شیمیایی مختلف می‌گردد. مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی برای نمونه‌هایی که توسط پودرهای گرافیت و کروم ماشینکاری می‌شوند، به ترتیب حدود سه و دو برابر مقاومت به خوردگی نمونه ماشینکاری شده بدون استفاده از ذرات پودر است. ذرات پودر آلومینیوم با اندازه ۲ میکرون به دلیل سبک‌تر بودن نسبت به ذرات پودر با اندازه ۲۰ و ۶۳ میکرون و توزیع راحت‌تر در فاصله بین الکترودها، انرژی حاصل از تخلیه الکتریکی را بیشتر توزیع می‌کنند و به همین دلیل نرخ براده‌برداری افزایش چشمگیری دارد. پودر آلومینیوم در شرایط آزمایش شده بهینه، منجر به افزایش ۸۸٪ نرخ براده‌برداری، کاهش ۴۵٪ زبری سطح و کاهش ۶۷٪ نرخ سایش ابزار نسبت به حالت بدون پودر شده است. در تحلیل حرارتی، از سه هندسه نیم‌کروی، سهمیگون دایروی و انتگرالی برای تخمین پروفیل حفره ماشینکاری استفاده گردید. میانگین درصد خطای پیش‌بینی نرخ براده‌برداری نسبت به مقادیر تجربی ارائه شده توسط شرکت *AGIE* در شرایط ماشینکاری معین، برای روش انتگرالی برابر با ۱۵.۱۱٪، برای روش سهمیگون دایروی برابر با ۱۴.۱۲٪ و برای روش نیم‌کره برابر با ۷۰.۵۶٪ می‌باشند. در حالت *PMEDM* و با تغییر جریان و زمان روشنی پالس مقادیر تحلیلی نرخ براده‌برداری با مقادیر تجربی اندازه‌گیری شده در این رساله مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند که مطابقت بسیار خوبی نشان می‌دهند. با توجه به نتایج تجربی و تحلیلی، عامل اصلی افزایش نرخ براده‌برداری در حالت *PMEDM* به ازای شرایط بهینه پودر، توزیع انرژی تخلیه الکتریکی توسط ذرات پودر می‌باشد. افزایش فرکانس جرقه‌زنی به مفهوم افزایش تعداد تخلیه‌های الکتریکی بر روی سطح قطعه کار به ازای یک پالس ورودی ولتاژ می‌باشد و سرعت براده‌برداری را بهبود می‌بخشد. با این تفاوت که دانسیته انرژی تخلیه شده به واسطه این جرقه‌های مضاعف به ازای یک پالس ولتاژ کمتر می‌باشد. توزیع انرژی تخلیه الکتریکی و کاهش دانسیته انرژی تخلیه شده الکتریکی روی سطح قطعه کار، سبب تولید حفره‌های کم عمق‌تر و به عبارتی کاهش زبری سطح می‌شود.

**واژگان کلیدی:** *EDM*، *PMEDM*، نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار، میکروسختی، زبری

سطح، توپوگرافی سطح، *EDS*، *XRD*، شکل پالس الکتریکی، مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی، تحلیل حرارتی.

## فهرست مطالب

عنوان.....	صفحه
فصل ۱ مقدمه.....	۱
۱-۱- مبانی ماشینکاری به روش EDM.....	۱
۲-۱- فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک ذرات پودر.....	۳
۱-۲-۱- معرفی و مکانیزم فرآیند PMEDM.....	۳
۲-۲-۱- پارامترهای موثر در فرآیند PMEDM.....	۶
۳-۱- تیتانیوم.....	۷
۴-۱- ترکیب بین فلزی آلومیناید تیتانیوم گاما.....	۸
۱-۴-۱- معرفی.....	۸
۲-۴-۱- نیازهای صنعتی.....	۱۰
۱-۲-۴-۱- موتور هواپیما.....	۱۰
۲-۲-۴-۱- هوافضا.....	۱۰
۳-۲-۴-۱- موتور اتومبیل.....	۱۱
۴-۲-۴-۱- کاربردها.....	۱۱
۵-۱- پیشینه تحقیقات در مورد ماشینکاری ترکیب بین فلزی $\gamma$ -TiAl.....	۱۲
۶-۱- پیشینه تحقیقات در مورد فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر.....	۱۴
۷-۱- پیشینه مدلسازی فرآیند EDM و PMEDM.....	۱۸
۸-۱- مراحل و بخشهای کلی رساله جاری.....	۲۱
فصل ۲ ریخته‌گری، عملیات حرارتی و کنترل کیفی ترکیب بین فلزی TiAl.....	۲۳
۱-۲- آماده سازی مواد اولیه برای ریخته‌گری TiAl.....	۲۳
۲-۲- ریخته‌گری شمشهای $\gamma$ -TiAl.....	۲۴
فصل ۳ آزمایشهای تجربی.....	۳۲
۱-۳- مقدمه.....	۳۲
۲-۳- تجهیزات اصلی استفاده شده در فصل تجربی.....	۳۳
۳-۳- کل آزمایشهای ماشینکاری طراحی شده در فصل تجربی.....	۴۱
۴-۳- تاثیر جنس الکتروود ابزار در ماشینکاری تخلیه الکتریکی ترکیب بین فلزی TiAl.....	۴۳
۱-۴-۳- شرایط تجربی آزمایشها.....	۴۳
۲-۴-۳- زبری سطح نمونه‌های ماشینکاری شده.....	۴۶
۳-۴-۳- نرخ براده‌برداری و نرخ سایش ابزار در نمونه‌های ماشینکاری شده.....	۴۷
۴-۴-۳- آنالیز EDS بر روی سطح نمونه‌های ماشینکاری شده $\gamma$ -TiAl.....	۴۹
۵-۴-۳- آنالیز XRD بر روی سطح نمونه‌های ماشینکاری شده $\gamma$ -TiAl.....	۵۲

۵۵	۳-۴-۶- سختی سنجی نمونه‌های ماشینکاری شده توسط الکترودهای ابزار مختلف
۵۹	۳-۵- قابلیت ماشینکاری تخلیه الکتریکی ترکیب بین فلزی <i>TiAl</i>
۵۹	۳-۵-۱- شرایط آزمایشها تجربی
۶۰	۳-۵-۲- بررسی نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح
۶۰	۳-۵-۲-۱- نرخ براده‌برداری و نرخ سایش ابزار
۶۶	۳-۵-۲-۲- زبری سطح نمونه‌های ماشینکاری شده
۶۸	۳-۵-۳- بررسی توپوگرافی سطح نمونه‌های ماشینکاری شده
۷۲	۳-۶- بررسی تاثیر انواع پودرها بر روی مشخصات خروجی
۷۲	۳-۶-۱- تجهیزات و مواد اولیه
۷۴	۳-۶-۲- نتایج آزمایشها و بحث
۷۴	۳-۶-۲-۱- زبری سطح
۷۶	۳-۶-۲-۲- نرخ سایش ابزار
۷۷	۳-۶-۲-۳- نرخ براده‌برداری
۷۹	۳-۶-۲-۴- توپوگرافی سطح
۸۳	۳-۶-۲-۵- پالسه‌های ماشینکاری
۸۷	۳-۶-۲-۶- تاثیر انواع مختلف پودرها بر روی نوع عناصر تشکیل شده
۸۹	۳-۶-۲-۷- تاثیر انواع پودرها بر روی فازهای شیمیایی تشکیل شده
۹۱	۳-۶-۲-۸- مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی نمونه‌های ماشینکاری شده
۹۹	۳-۷- مقایسه فرآیندهای <i>EDM</i> و <i>PMEDM</i> در شرایط ماشینکاری مختلف
۹۹	۳-۷-۱- مقدمه
۹۹	۳-۷-۲- ماشینکاری بدون کمک پودر ( <i>EDM</i> )
۱۰۱	۳-۷-۳- آزمایشهای ماشینکاری <i>PMEDM</i> برای تعیین غلظت و اندازه ذرات پودر
۱۰۲	۳-۷-۴- بررسی نرخ براده‌برداری در آزمایشهای <i>PMEDM</i>
۱۰۵	۳-۷-۵- بررسی زبری سطح در آزمایشهای <i>PMEDM</i>
۱۰۶	۳-۷-۶- بررسی نرخ سایش ابزار در آزمایشهای <i>PMEDM</i>
۱۰۸	۳-۷-۷- آزمایشهای ماشینکاری <i>PMEDM</i> در غلظت و اندازه ذرات بهینه پودر
۱۱۲	۳-۷-۸- مقایسه نرخ براده‌برداری در آزمایشهای ماشینکاری <i>EDM</i> و <i>PMEDM</i>
۱۱۵	فصل ۴ تحلیل حرارتی فرآیندهای ماشینکاری <i>EDM</i> و <i>PMEDM</i>
۱۱۵	۴-۱- مدل‌های هدایت حرارتی
۱۱۵	۴-۲- معادله دیفرانسیل انتقال حرارت هدایت
۱۱۸	۴-۳- روش حل معادله دیفرانسیل انتقال حرارت هدایت
۱۱۹	۴-۴- شبکه بندی
۱۲۰	۴-۵- گسسته سازی

۱۲۱	۶-۴- شرط همگرایی
۱۲۱	۷-۴- روند حل و ورودی ها و پارامترهای مورد نیاز
۱۲۱	۷-۴-۱- خواص فیزیکی قطعه کار
۱۲۲	۷-۴-۲- ابعاد میدان حل
۱۲۲	۷-۴-۳- شرایط ماشینکاری
۱۲۲	۷-۴-۴- فرکانس جرقه ( <i>Spark Frequency</i> )
۱۲۳	۷-۴-۵- شار حرارتی ورودی به قطعه کار ( $q$ )
۱۲۶	۷-۴-۶- محاسبه شعاع چشمه حرارتی
۱۲۸	۷-۴-۷- درصد افت انرژی حرارتی در قطعه کار ( $F_c$ )
۱۲۹	۴-۸- توضیح اجمالی در مورد رابط گرافیکی کاربر ( <i>GUI</i> ) نوشته شده
۱۳۱	۴-۹- هندسه حفره حاصل از ماشینکاری
۱۳۴	۴-۱۰- محاسبه نرخ براده برداری
۱۳۶	۴-۱۱- صحت سنجی کد حرارتی نوشته شده
۱۳۷	۴-۱۲- مقایسه معروفترین مدل‌های حرارتی <i>EDM</i>
۱۳۷	۴-۱۲-۱- مشخصات کلی مدل <i>EDM</i> ارائه شده در این تحقیق
۱۴۲	۴-۱۲-۲- مقایسه هندسه و پروفیل حفره حاصل از ماشینکاری در مدل‌های مختلف
۱۴۳	۴-۱۳- مقایسه مقادیر تجربی و تحلیلی نرخ براده برداری در حالت <i>PMEDM</i>
۱۵۱	۴-۱۴- بررسی و مقایسه منحنی‌های توزیع دما در حالات <i>EDM</i> و <i>PMEDM</i>
۱۵۱	۴-۱۴-۱- بررسی تاثیر شدت جریان پالس
۱۵۵	۴-۱۴-۲- بررسی تاثیر زمان روشنی پالس
۱۵۸	۴-۱۵- مقایسه پروفیل حفره ماشینکاری شده در فرآیندهای <i>EDM</i> و <i>PMEDM</i>
۱۶۲	فصل ۵ نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات
۱۶۲	۵-۱- نتیجه گیری
۱۶۷	۵-۲- ارائه پیشنهاداتی برای ادامه تحقیقات
۱۶۸	منابع و مراجع

## فهرست علائم و نشانه ها

$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	ضریب نفوذ حرارتی
K (W/m°C)	ضریب رسانش حرارتی
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	دانسیته
C (J/kg°C)	ظرفیت گرمایی ویژه
T (°C)	دما
t (s)	زمان
I <sub>dis</sub> (A)	جریان لحظه‌ای تخلیه الکتریکی
V <sub>dis</sub> (V)	ولتاژ لحظه‌ای تخلیه الکتریکی
V <sub>mach</sub> (V)	ولتاژ ماشینکاری
V <sub>opc</sub> (V)	ولتاژ مدار باز
I <sub>pulse</sub> (A)	جریان پالس
T <sub>on</sub> (μs)	زمان روشن‌پالی
T <sub>off</sub> (μs)	زمان خاموشی پالس
F <sub>c</sub>	درصد انرژی حرارتی منتقل شده به کاتد
T <sub>m</sub> (°C)	دمای ذوب
P (W)	توان تخلیه الکتریکی
q (W/m <sup>2</sup> )	شار حرارتی
r <sub>s</sub> (μm)	شعاع چشمه حرارتی
r <sub>c</sub> (μm)	شعاع حفره ماشینکاری شده
d <sub>c</sub> (μm)	عمق حفره ماشینکاری شده
V <sub>c</sub> (mm <sup>3</sup> )	حجم حفره ماشینکاری شده
T <sub>d</sub> (μs)	زمان تاخیر جرقه
NOP	تعداد پالسهای ماشینکاری
SF	ضریب فرکانس جرقه‌زنی
E (J)	انرژی حرارتی

## فهرست جدول‌ها

عنوان.....	صفحه
جدول (۱-۲) درصد وزنی تیتانیوم و آلومینیوم برای ریخته‌گری ۶ نمونه.....	۲۴
جدول (۲-۲) نتایج چگالی سنجی و تعیین درصد وزنی تیتانیوم و آلومینیوم پس از ریخته‌گری.....	۲۶
جدول (۳-۲) نتایج سختی سنجی نمونه‌های ریخته‌گری شده.....	۲۷
جدول (۴-۲) اطلاعات مربوط به فازهای مختلف نمودار تعادلی تیتانیوم-آلومینیوم [54].....	۲۹
جدول (۱-۳) آزمایشهای ماشینکاری طراحی و انجام شده در چهار بخش مختلف فصل تجربی.....	۴۲
جدول (۲-۳) خواص فیزیکی و مکانیکی ترکیب بین‌فازی $\gamma$ -TiAl [14] و [17].....	۴۳
جدول (۳-۳) دانسته اندازه‌گیری شده و مشخصات فیزیکی الکترودهای ابزار.....	۴۵
جدول (۴-۳) پارامترهای ماشینکاری مورد استفاده در آزمایشها تجربی.....	۴۵
جدول (۵-۳) سختی فازهای شیمیایی تشکیل شده روی سطح قطعات ماشینکاری شده [57].....	۵۷
جدول (۶-۳) پارامترهای ماشینکاری مورد استفاده در آزمایشها.....	۵۹
جدول (۷-۳) پارامترهای ورودی ماشینکاری در آزمایشها تجربی.....	۷۲
جدول (۸-۳) خواص فیزیکی و ترموفیزیکی پودرها [57].....	۷۴
جدول (۹-۳) پارامترهای حاصل از فیت کردن نمودارهای امپدانسی.....	۹۵
جدول (۱۰-۳) شرایط ورودی و نتایج حاصل از آزمایشهای ماشینکاری بدون کمک پودر.....	۱۰۰
جدول (۱۱-۳) شرایط ثابت ماشینکاری در حین آزمایشهای بدون کمک پودر (EDM).....	۱۰۱
جدول (۱۲-۳) شرایط ورودی فرآیند و نتایج حاصل از آزمایشهای ماشینکاری PMEDM.....	۱۰۲
جدول (۱۳-۳) شرایط ثابت ماشینکاری در حین آزمایشهای به کمک پودر (PMEDM).....	۱۰۲
جدول (۱۴-۳) تنظیمات ورودی فرآیند و نتایج حاصل از آزمایشهای PMEDM.....	۱۰۹
جدول (۱۵-۳) شرایط ثابت ماشینکاری در حین آزمایشهای به کمک پودر (PMEDM).....	۱۱۰
جدول (۱-۴) پارامترها و شرایط ماشینکاری استفاده شده در مرجع [47].....	۱۳۶
جدول (۲-۴) مقایسه مدل‌های حرارتی معروف و تحقیق جاری.....	۱۳۹
جدول (۳-۴) پیش‌بینی نرخ براده‌برداری توسط هندسه‌های مختلف.....	۱۴۱
جدول (۴-۴) خواص فیزیکی و حرارتی ماده قطعه کار $\gamma$ -TiAl [74].....	۱۴۳

## فهرست شکل‌ها

عنوان.....	صفحه
شکل (۱-۱) ایجاد جرقه در فرآیند EDM [1].....	۱
شکل (۲-۱) فازهای مختلف عملیات تخلیه الکتریکی [1].....	۲
شکل (۳-۱) نمایش شماتیک مکانیزم ماشینکاری PMEDM [3].....	۵
شکل (۴-۱) فرکانس جرقه‌زنی الف) EDM ب) PMEDM [3].....	۵
شکل (۵-۱) نمایش شماتیک EDM برای تک پالس الف) بدون پودر ب) با پودر [4].....	۶
شکل (۶-۱) دیاگرام استخوان ماهی برای فرآیند PMEDM [5].....	۶
شکل (۷-۱) کاربرد آلیاژهای تیتانیومی در موتور هواپیما [8].....	۷
شکل (۸-۱) دیاگرام فازی Ti-Al [10].....	۹
شکل (۹-۱) روتور توربین کم فشار (LPT) از یک موتور ۷۴۷ شامل پره‌های $\gamma$ ریخته‌گی [10].....	۱۲
شکل (۱۰-۱) پره‌های گاما توربین کم فشار (LPT) پس از فرایند ریخته‌گری [10].....	۱۲
شکل (۱۱-۱) شماتیک فرآیند ماشینکاری EDM [43].....	۱۹
شکل (۱-۲) تسمه‌های پاکسازی شده تیتانیومی و آلومینیومی.....	۲۴
شکل (۲-۲) دستگاه ریخته‌گری کوره ذوب قوسی تحت خلاء (VAR).....	۲۵
شکل (۳-۲) شش قرص ریخته‌گری شده.....	۲۵
شکل (۴-۲) درصد وزنی تیتانیوم در شش نمونه قبل و بعد از عملیات ریخته‌گری.....	۲۶
شکل (۵-۲) تصاویر متالوگرافی از سطح نمونه‌های ریخته‌گری شده (بزرگنمایی $200\times$ ).....	۲۸
شکل (۶-۲) تصاویر متالوگرافی از سطح نمونه شماره ۵ ریخته‌گری شده پس از عملیات حرارتی.....	۲۹
شکل (۷-۲) آنالیز XRD از سطح نمونه ریخته‌گری و عملیات حرارتی شده شماره ۵.....	۳۰
شکل (۸-۲) یک شمش ریخته‌گری شده $\gamma$ -TiAl - جهت عملیات ماشینکاری.....	۳۱
شکل (۱-۳) تصویری از دستگاه اسپارک شارمیلز.....	۳۳
شکل (۲-۳) تصویری از دستگاه اسپارک تهران اکرام.....	۳۴
شکل (۳-۳) میکروسکوپ الکترونی (SEM) استفاده شده برای بررسی توپوگرافی سطح.....	۳۴
شکل (۴-۳) دستگاه آنالیزور EDS استفاده شده در آزمایشها.....	۳۵
شکل (۵-۳) دستگاه آنالیزور XRD استفاده شده در آزمایشها.....	۳۵
شکل (۶-۳) دستگاه اندازه‌گیری میکروسختی استفاده شده در آزمایشها.....	۳۶
شکل (۷-۳) دستگاه اسیلوسکوپ دیجیتال متصل به ماشین اسپارک.....	۳۶
شکل (۸-۳) ترازوی دیجیتال استفاده شده برای توزین نمونه‌های قطعه‌کار و الکترودهای ابزار.....	۳۷

- شکل (۹-۳) دستگاه زبری سنج استفاده شده در آزمایشها ..... ۳۷
- شکل (۱۰-۳) Set up مورد استفاده در اندازه گیری مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی ..... ۳۸
- شکل (۱۱-۳) تجهیزات ماشینکاری در آزمایشهای PMEDM ..... ۴۰
- شکل (۱۲-۳) نمونه‌های آماده شده TiAl از شمش ریخته‌گری شده ..... ۴۳
- شکل (۱۳-۳) الکترودهای ابزار از جنس مس، آلومینیوم و گرافیت ..... ۴۴
- شکل (۱۴-۳) نحوه بستن و به کارگیری الکتروود ابزار و قطعه کار ..... ۴۶
- شکل (۱۵-۳) زبری سطح نمونه‌های ماشینکاری شده TiAl با استفاده از سه نوع الکتروود ابزار ..... ۴۷
- شکل (۱۶-۳) نرخ سایش ابزار در ماشینکاری نمونه‌های TiAl با استفاده از سه نوع الکتروود ابزار ..... ۴۸
- شکل (۱۷-۳) نرخ براده‌برداری در ماشینکاری نمونه‌های TiAl با استفاده از سه نوع الکتروود ابزار ..... ۴۹
- شکل (۱۸-۳) آنالیز EDS بر روی سطح ماشینکاری شده توسط الکتروود آلومینیومی ..... ۵۰
- شکل (۱۹-۳) آنالیز EDS بر روی سطح ماشینکاری شده توسط الکتروود مسی ..... ۵۱
- شکل (۲۰-۳) آنالیز EDS بر روی سطح ماشینکاری شده توسط الکتروود گرافیتی ..... ۵۱
- شکل (۲۱-۳) آنالیز XRD بر روی سطح ماشینکاری نشده نمونه TiAl ..... ۵۳
- شکل (۲۲-۳) آنالیز XRD بر روی سطح ماشینکاری شده TiAl توسط ابزار آلومینیومی ..... ۵۳
- شکل (۲۳-۳) آنالیز XRD بر روی سطح ماشینکاری شده TiAl توسط ابزار مسی ..... ۵۴
- شکل (۲۴-۳) آنالیز XRD بر روی سطح ماشینکاری شده TiAl توسط ابزار گرافیتی ..... ۵۵
- شکل (۲۵-۳) منحنی‌های میکروسختی برای مقطع عرضی نمونه‌های ماشینکاری شده ..... ۵۶
- شکل (۲۶-۳) الکترودهای مسی مورد استفاده در آزمایشهای ماشینکاری ..... ۵۹
- شکل (۲۷-۳) نحوه بستن و ساعت کردن الکتروود ابزار و قطعه کار ..... ۶۰
- شکل (۲۸-۳) نمودار اثرات اصلی پارامترهای ورودی بر روی مقادیر میانگین نرخ براده‌برداری ..... ۶۱
- شکل (۲۹-۳) نمودار اثرات اصلی پارامترهای ورودی بر روی مقادیر میانگین نرخ سایش ابزار ..... ۶۱
- شکل (۳۰-۳) نمودار اثرات اصلی پارامترهای ورودی بر روی مقادیر میانگین زبری سطح ..... ۶۱
- شکل (۳۱-۳) نمودار تغییرات نرخ براده‌برداری با توجه به تغییرات جریان پالس ..... ۶۳
- شکل (۳۲-۳) نمودار تغییرات نرخ براده‌برداری با توجه به تغییرات زمان روشنی پالس ..... ۶۴
- شکل (۳۳-۳) نمودار تغییرات نرخ سایش ابزار با توجه به تغییرات زمان روشنی پالس ..... ۶۵
- شکل (۳۴-۳) نمودار تغییرات زبری سطح با توجه به تغییرات جریان ..... ۶۶
- شکل (۳۵-۳) علائم پدیده آراک بر روی سطوح ماشینکاری شده نمونه قطعه کار و الکتروود ابزار ..... ۶۷
- شکل (۳۶-۳) نمودار تغییرات زبری سطح با توجه به تغییرات زمان روشنی پالس ..... ۶۷
- شکل (۳۷-۳) اثر تغییرات جریان پالس بر روی توپوگرافی سطح اسپارک شده ..... ۷۰



- شکل (۳-۳۸) اثر تغییرات زمان روشنی پالس بر روی توپوگرافی سطح اسپارک شده ..... ۷۱
- شکل (۳-۳۹) شکل و پروفیل ذرات پودر استفاده شده ..... ۷۳
- شکل (۳-۴۰) زبری سطح ماشینکاری شده برای انواع پودرها در غلظتهای مختلف ..... ۷۵
- شکل (۳-۴۱) نرخ سایش الکتروود ابزار برای انواع پودرها در غلظتهای مختلف ..... ۷۷
- شکل (۳-۴۲) نرخ براده برداری از قطعه کار برای انواع پودرها در غلظتهای مختلف ..... ۷۸
- شکل (۳-۴۳) توپوگرافی سطح نمونه‌های ماشینکاری شده در حالت EDM و PMEDM ..... ۸۱
- شکل (۳-۴۴) توپوگرافی سطح ماشینکاری شده به کمک پودر آلومینیوم در غلظتهای مختلف ..... ۸۲
- شکل (۳-۴۵) شکل نوعی پالس ولتاژ در حالت ماشینکاری بدون پودر (EDM) ..... ۸۴
- شکل (۳-۴۶) شکل نوعی پالسهای ولتاژ در حالت ماشینکاری به کمک پودر آلومینیوم ..... ۸۶
- شکل (۳-۴۷) نتایج حاصل از آنالیزهای EDS برای سطوح ماشینکاری شده ..... ۸۸
- شکل (۳-۴۸) نتایج حاصل از آنالیزهای XRD برای سطوح ماشینکاری شده ..... ۹۱
- شکل (۳-۴۹) نمودار امیدانس نمونه ماشینکاری شده در نفت پ ..... ۹۴
- شکل (۳-۵۰) مدار معادل پیشنهاد شده برای فیت نمودارهای امیدانس حاصل در این تحقیق ..... ۹۴
- شکل (۳-۵۱) تاثیر انواع پودرها بر مقادیر  $R_1$ ،  $R_2$ ،  $R_3$  و  $R_{total}$  حاصل از آزمایشهای امیدانس ..... ۹۷
- شکل (۳-۵۲) مقادیر نرخ براده برداری به ازای تغییرات غلظت و اندازه پودر ..... ۱۰۳
- شکل (۳-۵۳) مقادیر زبری سطح به ازای تغییرات غلظت و اندازه پودر ..... ۱۰۵
- شکل (۳-۵۴) مقادیر نرخ سایش ابزار به ازای تغییرات غلظت و اندازه پودر ..... ۱۰۷
- شکل (۳-۵۵) نرخ براده برداری بر حسب تغییرات جریان در زمانهای روشنی پالس مختلف ..... ۱۱۱
- شکل (۳-۵۶) نرخ براده برداری بر حسب تغییرات زمان روشنی پالس در جریانهای مختلف ..... ۱۱۱
- شکل (۳-۵۷) نرخ براده برداری برای حالات EDM و بهینه PMEDM به ازای جریان ۸ آمپر ..... ۱۱۲
- شکل (۳-۵۸) نرخ براده برداری برای حالات EDM و بهینه PMEDM به ازای جریان ۱۲ آمپر ..... ۱۱۲
- شکل (۳-۵۹) نرخ براده برداری برای حالات EDM و بهینه PMEDM به ازای جریان ۱۶ آمپر ..... ۱۱۳
- شکل (۳-۶۰) نرخ براده برداری برای حالات EDM و بهینه PMEDM به ازای جریان ۲۴ آمپر ..... ۱۱۳
- شکل (۳-۶۱) نرخ براده برداری برای حالات EDM و بهینه PMEDM به ازای جریان ۳۲ آمپر ..... ۱۱۳
- شکل (۴-۱) نمایش محورهای مختصات بر روی میدان حل استوانه‌ای در مختصات استوانه‌ای ..... ۱۱۶
- شکل (۴-۲) صفحه میدان حل ..... ۱۱۹
- شکل (۴-۳) توزیع گوسی شار حرارتی بر روی سطح قطعه کار ..... ۱۲۴
- شکل (۴-۴) منحنی تغییرات شعاع منبع حرارتی نسبت به زمان روشنی پالس ..... ۱۲۷
- شکل (۴-۵) منوی وارد کردن پارامترها و مقادیر ورودی ..... ۱۳۰

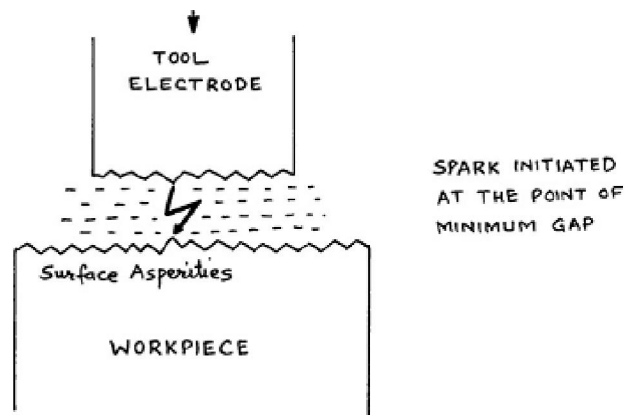
- شکل (۶-۴) منوی نمایش ابعاد حفره، کانتور و منحنیهای توزیع دما در سطح و عمق قطعه کار..... ۱۳۱
- شکل (۷-۴) منوی انتخاب هندسه حفره ماشینکاری شده و محاسبه نرخ براده برداری..... ۱۳۱
- شکل (۸-۴) هندسه حفره ماشینکاری شده به ازای هر جرقه..... ۱۳۲
- شکل (۹-۴) سطح محدوده مذاب حاصل از فرآیند هدایت حرارتی..... ۱۳۳
- شکل (۱۰-۴) تقسیم سطح مذاب به نواحی کوچکتر..... ۱۳۴
- شکل (۱۱-۴) تغییرات ولتاژ و جریان الکتریکی در طی زمان پالس ماشینکاری..... ۱۳۵
- شکل (۱۲-۴) نرخ براده برداری نسبت به شدت جریان (مقایسه تحقیق جاری و مرجع [47])..... ۱۳۷
- شکل (۱۳-۴) نرخ براده برداری نسبت به زمان روشنی پالس (مقایسه تحقیق جاری و مرجع [47])..... ۱۳۷
- شکل (۱۴-۴) شماتیک مدل‌های حرارتی EDM و نوع منبع شار حرارتی..... ۱۳۸
- شکل (۱۵-۴) هندسه نیم-حفره ماشینکاری شده مربوط به مدل‌های EDM متفاوت..... ۱۴۳
- شکل (۱۶-۴) نرخ براده برداری نسبت به تغییرات جریان و ضریب فرکانس جرقه زنی..... ۱۴۵
- شکل (۱۷-۴) نرخ براده برداری نسبت به تغییرات جریان و ضریب فرکانس جرقه زنی..... ۱۴۵
- شکل (۱۸-۴) نرخ براده برداری نسبت به تغییرات جریان و ضریب فرکانس جرقه زنی..... ۱۴۶
- شکل (۱۹-۴) نرخ براده برداری نسبت به تغییرات جریان و ضریب فرکانس جرقه زنی..... ۱۴۶
- شکل (۲۰-۴) نرخ براده برداری نسبت به تغییرات جریان و ضریب فرکانس جرقه زنی..... ۱۴۷
- شکل (۲۱-۴) نرخ براده برداری نسبت به تغییرات زمان روشنی پالس و ضریب فرکانس جرقه زنی..... ۱۴۷
- شکل (۲۲-۴) نرخ براده برداری نسبت به تغییرات زمان روشنی پالس و ضریب فرکانس جرقه زنی..... ۱۴۸
- شکل (۲۳-۴) نرخ براده برداری نسبت به تغییرات زمان روشنی پالس و ضریب فرکانس جرقه زنی..... ۱۴۸
- شکل (۲۴-۴) نرخ براده برداری نسبت به تغییرات زمان روشنی پالس و ضریب فرکانس جرقه زنی..... ۱۴۹
- شکل (۲۵-۴) نرخ براده برداری نسبت به تغییرات زمان روشنی پالس و ضریب فرکانس جرقه زنی..... ۱۴۹
- شکل (۲۶-۴) تاثیر شدت جریان پالس بر توزیع دما در جهت شعاعی (r)..... ۱۵۳
- شکل (۲۷-۴) تاثیر شدت جریان پالس بر توزیع دما در جهت عمقی (z)..... ۱۵۴
- شکل (۲۸-۴) تاثیر زمان روشنی پالس بر توزیع دما در جهت شعاعی (r)..... ۱۵۶
- شکل (۲۹-۴) تاثیر زمان روشنی پالس بر توزیع دما در جهت عمقی (z)..... ۱۵۷
- شکل (۳۰-۴) پروفیل پیش‌بینی شده حفره حاصل از ماشینکاری..... ۱۵۸
- شکل (۳۱-۴) پروفیل پیش‌بینی شده حفره حاصل از ماشینکاری..... ۱۵۹
- شکل (۳۲-۴) پروفیل پیش‌بینی شده حفره حاصل از ماشینکاری..... ۱۵۹

# فصل ۱

## مقدمه

### ۱-۱- مبانی ماشینکاری به روش EDM

ماشینکاری به کمک تخلیه الکتریکی<sup>۱</sup> یا EDM که به فرسایش جرقه‌ای نیز موسوم است یک روش براده‌برداری غیر سنتی است که در آن بین دو الکترود به نام ابزار و قطعه‌کار که در فاصله معین و کنترل شده‌ای از یکدیگر قرار دارند و فضای بین آنها را سیالی به نام دی‌الکتریک پر کرده است، در نزدیکترین فاصله بین ابزار و قطعه‌کار، جرقه الکتریکی تولید و باربرداری صورت می‌گیرد. با این روش می‌توان مواد هادی و نیمه‌هادی را ماشینکاری نمود. از مزایای این روش عدم وابستگی به سختی ماده، پلیسه‌دار نبودن قطعه‌کار، عدم نیاز به نیروی مکانیکی، امکان ماشینکاری در زوایا و جهات مختلف و نیز در مواردی عدم نیاز به قید و بند، را می‌توان نام برد.



شکل (۱-۱) ایجاد جرقه در فرآیند EDM [1]

بر اساس تئوری ترموالکتریکی مهمترین عاملی که براده‌برداری از قطعه‌کار را توجیه می‌کند، دمای بسیار بالای ناشی از شدت زیاد جریان تخلیه می‌باشد. یک جرقه منفرد که در فضای بسیار کوچک میان الکترود و قطعه‌کار رخ می‌دهد، سبب ذوب شدن اندکی از فلز و بخار شدن آن می‌شود، که در این حالت حفره کوچکی روی سطح ماده ایجاد می‌شود.

به طور کلی عمل تخلیه الکتریکی دارای ۳ فاز اصلی است [1]:

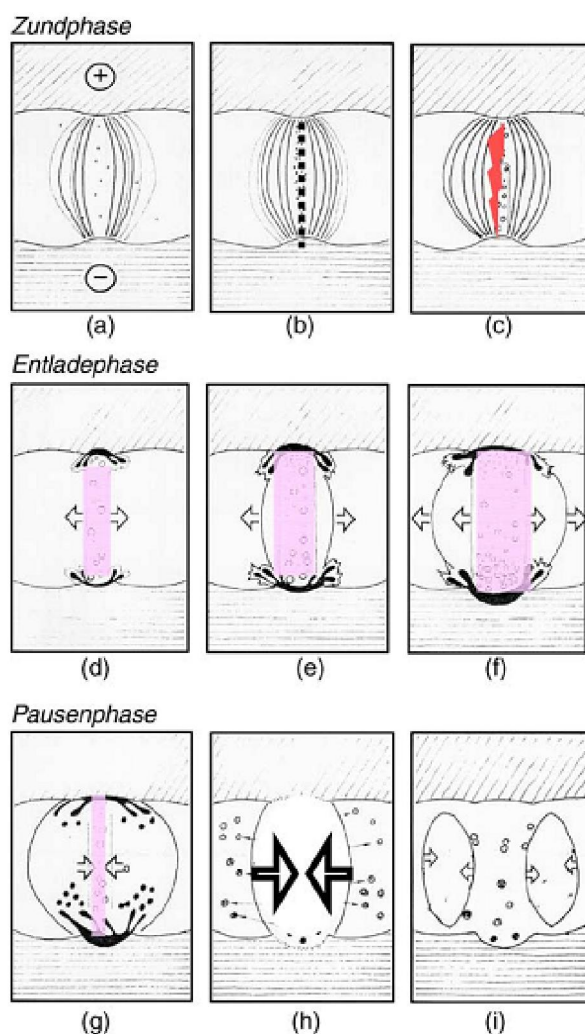
۱ Electrical Discharge Machining (EDM)

۱- فاز آماده شدن برای تخلیه الکتریکی

۲- فاز تخلیه الکتریکی

۳- فاز زمانی مابین تخلیه‌ها

**فاز آماده شدن برای تخلیه الکتریکی:** هنگامی که ولتاژ ژنراتور برقرار می‌شود، میدان الکتریکی مابین الکترود ابزار و قطعه‌کار به بالاترین حد خود می‌رسد و این میدان در جایی که فاصله مابین الکترود و قطعه‌کار کم است، دارای بیشترین مقدار است. محل‌هایی که دارای بیشترین غلظت براده‌ها و مواد زائد هستند، از لحاظ جرقه‌زنی مستعدتر هستند. شکل (۱-۲) فازهای مختلف عملیات تخلیه الکتریکی را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۲) فازهای مختلف عملیات تخلیه الکتریکی [1]