

شبیه‌سازی کامپیوتری فرآیند شکل‌دهی شیارهای داخل لوله به روش الکتروشیمیایی

رمضانعلی مهدوی نژاد

استادیار گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

حمیدرضا حسنی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۲/۴/۲۸، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۳/۲/۱۵، تاریخ تصویب ۸۳/۷/۱۱)

چکیده

ماشینکاری الکتروشیمیایی یک روش مناسب و موثر در ماشینکاری اشکال پیچیده است که می‌توان این روش را برای جنسهای سخت بکار برد. از مزایای این روش، ماشینکاری سطوحی است که دسترسی به آنها مشکل و یا غیر ممکن است. بدین ترتیب یکی از روشهای مناسب برای ماشینکاری خان درون لوله اسلحه‌هایی با کالیبر متوسط و بالا روش الکتروشیمیایی است. در این مقاله شبیه‌سازی سطوح ماشینکاری شده بوسیله این روش با استفاده از مدل ریاضی حاصل از دانش الکتروشیمیایی انجام گرفته و معادلات حاکم به روش عددی حل انجام شده‌اند. معادلات حاکم از نوع معادلات دیفرانسیل غیرخطی بوده که به روش تفاضل محدود رانج کوتا حل شده‌اند. همچنین نتایج عملی این پروسه بر اساس پارامترهای ماشینکاری ذکر شده و در پایان نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج حاصل از آزمایشات عملی مقایسه گردیده است. این مقایسه نشان می‌دهد که مدل حاصل انطباق خوبی با نتایج عملی دارد.

واژه‌های کلیدی: ماشینکاری الکتروشیمیایی - شبیه‌سازی - گپ ماشینکاری - خان لوله

مقدمه

ECM یک روش ماشینکاری غیر سنتی است که عمدتاً برای ماشینکاری مواد سخت و هادی جریان الکتریسیته بخصوص در مواردی که ایجاد حفره‌ها و شکلهای پیچیده مدنظر باشد استفاده می‌شود. علیرغم مزایای فراوان، این روش، روش ساده‌ای برای ماشینکاری نیست. دو مشکل اساسی در حین عملیات ECM وجود دارد که یکی طراحی ابزار مناسب و دیگری انتخاب پارامترهای ماشینکاری است. در اغلب موارد برای بدست آوردن این پارامترها از روش‌های وقت‌گیر سعی و خطا برای تنظیم پارامترهای ورودی با توجه به شکل ابزار استفاده می‌شود. بدین ترتیب کمپانی‌ها و مراکز مختلف علمی، تحقیقات وسیعی را به منظور بهینه‌سازی پارامترها و کاهش هزینه ماشینکاری آغاز کردند. در این راستا یکی از روش‌هایی که می‌تواند در مراحل نخستین طراحی پروسه ECM استفاده شود شبیه‌سازی توسط کامپیوتر می‌باشد. در دهه ۱۹۹۰ آقای Kozak و همکارانشان طی مقالاتی نتایج عملیات شبیه‌سازی که روی روشهای سنتی و CNC ماشینکاری الکتروشیمیایی انجام داده بودند را

ارائه کردند بطوریکه با استفاده از دانش الکتروشیمیایی و نیز روش‌های عددی توانستند سطوح ماشینکاری شده را بوسیله کامپیوتر شبیه‌سازی کنند [۱ و ۲]. پارامترهای زیادی از قبیل پارامترهای الکتریکی (مانند ولتاژ و دانسیته جریان)، پارامترهای هیدرولیکی (مانند فشار و سرعت الکترولیت)، دمای الکترولیت، سرعت ابزار، گپ بین دو الکترود و ... در شکل نهایی قطعه کار موثر هستند [۳]. روشی که در این مقاله استفاده شده مسائل پایه‌ای ساخت به روش ECM را به ترتیب زیر در برمی‌گیرد:

- شبیه‌سازی تغییر شکل قطعه کار در طول ماشینکاری با پروفیل ثابت ابزار و طراحی ابزار برای شکل قطعه کار.
- انتخاب بهینه پارامترهای موثر در این روش.
- شبیه‌سازی فرآیند ECM.
- انجام تستهای لازم جهت مقایسه نتایج و ارزیابی مدل. دانش پایه‌ای مورد استفاده به صورت دو فرم اطلاعات می‌باشد [۴]:

۱- اطلاعاتی که شامل اصول، روابط ریاضی و مشخصه‌های روش‌های مختلف ECM می‌باشد.

۲- سایر اطلاعات که شامل قوانین می‌باشند.

ترتیب ابزار باید دارای حرکت‌های خطی و چرخشی باشد بطوریکه سرعت‌های خطی و چرخشی وابسته به هم بوده و بر اساس گام مورد نظر بدست می‌آیند. ابزار مورد نظر به صورت استوانه‌ای بوده به طوریکه روی بدنه اصلی آن چند شیار ایجاد می‌شود که سطوح ماشینکاری را فاصله بین شیارها تشکیل می‌دهند. در درون شیارهای مذکور مواد ایزوله کننده قرار می‌گیرند تا از ماشینکاری سطوح آن جلوگیری شود. مقطع ابزار مذکور در شکل (۱-ب) نشان داده شده است. باید به این نکته اشاره کرد که ابزار و لوله مورد نظر هیچ‌گونه حرکت جانبی نسبت به هم ندارند یعنی ابزار بوسیله حرکت‌های چرخشی و خطی درون لوله رفته و شیارهای مورد نظر را ماشینکاری می‌کند. بدنه اصلی ابزار توسط یک دنباله که برای تزریق الکترولیت به درون گپ بکار می‌رود تکمیل می‌شود. مدل ابزار در شکل (۲) نشان داده شده است.

مدل ریاضی فرآیند ماشینکاری

همانطور که گفته شد پارامترهای زیادی در این فرآیند نقش دارند. در این فرآیند ابزار دارای سطح کوچکی است به طوریکه سطح ماشینکاری کننده هر شیار با شیار بعدی از طریق مواد ایزوله کننده جدا می‌شود (مطابق با اشکال ۱-ب و ۲) و به علاوه این سطوح دارای طول و ضخامت کوچکی هستند. لذا می‌توان از تأثیر پارامترهای هیدرودینامیکی و دمای الکترولیت به خاطر کم بودن عمق ماشینکاری و نیز حباب‌های تشکیل شونده در طول فرآیند صرف‌نظر کرد [۳]. به عبارت دیگر فرض بر این است که الکترولیت دارای فشار و سرعت مناسب بوده و کلیه پارامترهای مذکور که مهمترین آنها تغییر دما و هیدروژن تشکیل یافته در حین فرآیند است حذف می‌شوند. لازم به ذکر است که این موارد باعث تغییر هدایت الکتریکی الکترولیت شده و نهایتاً غیریکنواختی ماشینکاری را سبب می‌شود که در این فرآیند می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. از مهمترین پارامترهایی که در این پروسه نقش اصلی را ایفا می‌کند ولتاژ است که در سراسر گپ دارای مقادیر مختلفی می‌باشد با توجه به شکل (۳) در طول گپ رابطه زیر برقرار است [۶]:

$$\nabla^2 u = 0 \rightarrow \text{div}(\text{gradu}) = 0$$

(۱)

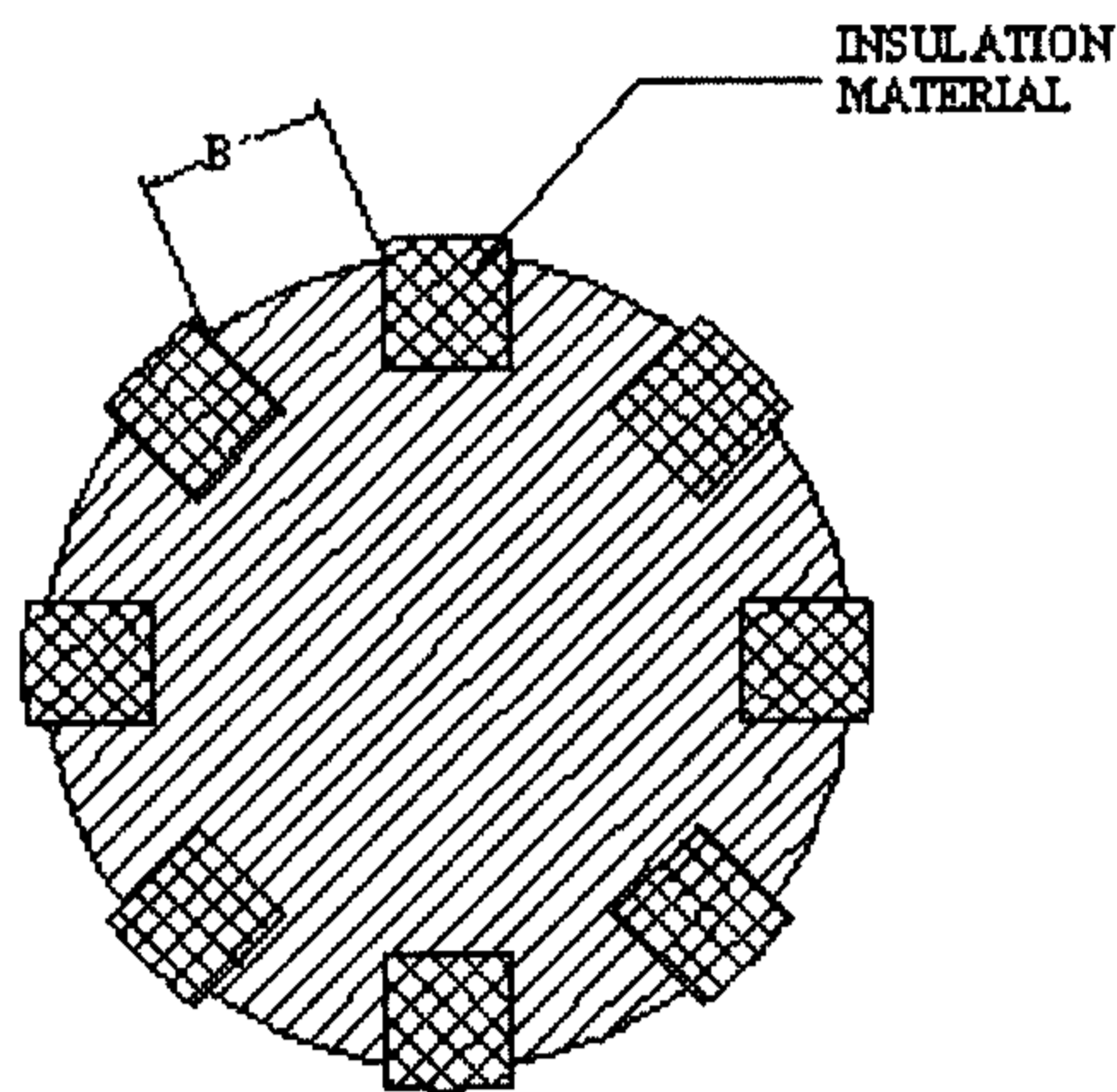
نوع اول اطلاعات، اطلاعاتی است که برای تمامی روش‌های ECM ثابت بوده و به اصل فرآیند الکتروشیمیایی که در همه روش‌ها استفاده می‌شود برمی‌گردد. ولی فرم دوم اطلاعات به جنس الکترولیت، نوع ماده قطعه کار، محدودیتهای ابزار و ... که خاص یک روش مثلاً خان‌زنی می‌باشد مربوط است.

مهمترین مسئله در ECM بدست آوردن شکل و ابعاد مورد نیاز قطعه کار در محدوده تolerانس می‌باشد. زمان و مراحل مربوط به این هدف می‌تواند بطور مستقیم و یا غیر مستقیم کاهش پیدا کند. در این تحقیق سطوح ماشینکاری شده شیارهای درون لوله اسلحه دوشکابوسیله یک مدل ریاضی برگرفته از دانش پایه روش الکتروشیمیایی و با استفاده از روش‌های محاسبات عددی بصورت کامپیوتری شبیه‌سازی شده و سپس با استفاده از این شبیه سازی ابزار مناسب طراحی و ساخته شده است بطوریکه توسط یکسری آزمایشات عملی ابزار و همچنین شبیه سازی مذکور مورد ارزیابی قرار گرفته اند. خان لوله اسلحه معمولاً به شکل شیارهایی بصورت مارپیچ با گام مشخص و مقطعی بصورت شکل (۱-الف) می‌باشد.

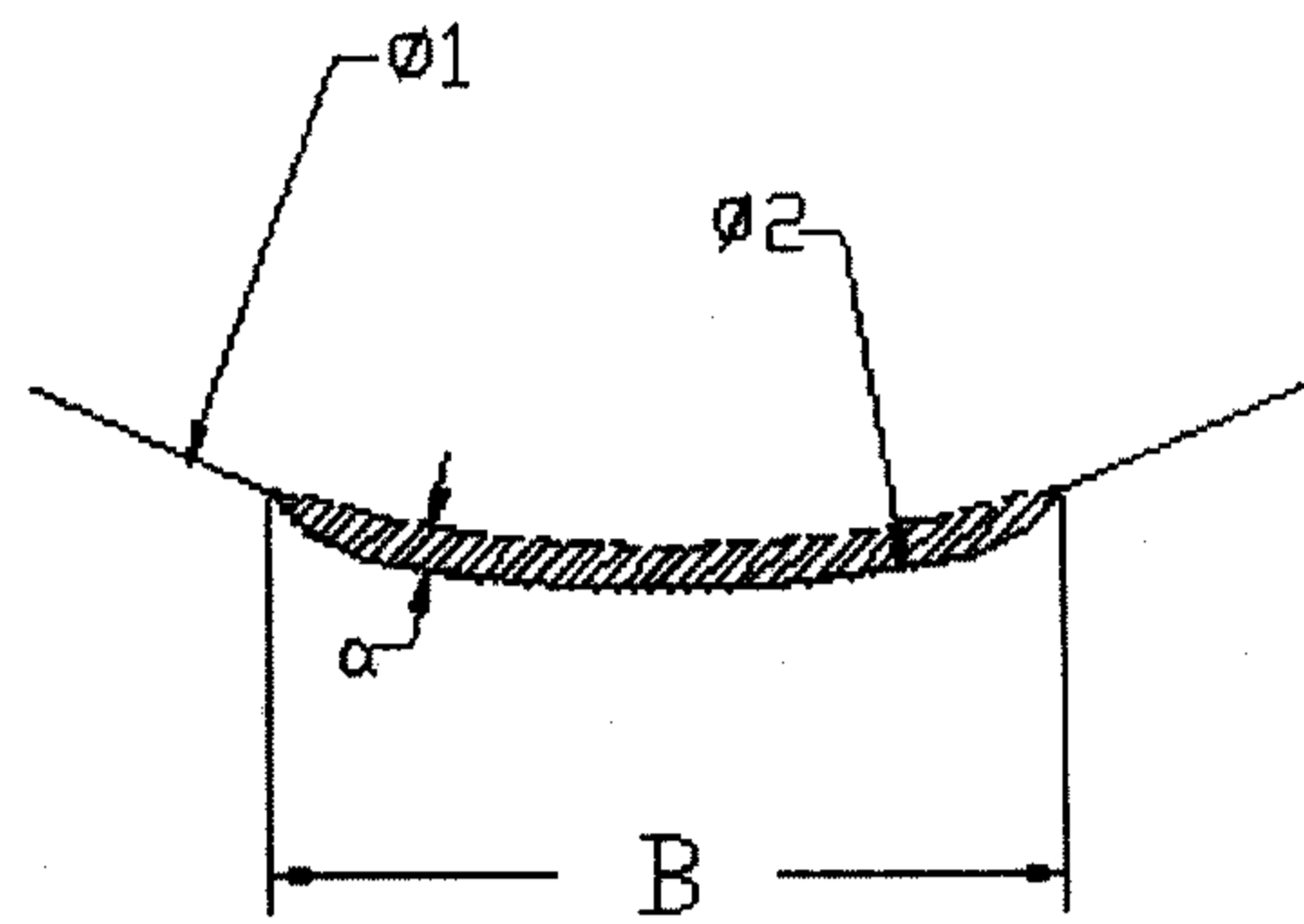
طراحی ابزار

ECM با براده‌برداری غیر مکانیکی قادر است هر ماده هادی الکتروسیسته را صرف‌نظر از خواص مکانیکی از قبیل سختی، تردی و نرمی با سرعت زیاد ماشینکاری نماید. در این روش ماشینکاری به منظور بهینه‌سازی پارامترهای خروجی ماشینکاری (از قبیل سرعت براده‌برداری، صافی سطح، فرسایش نسبی ابزار و تolerانس ابعادی)، انتخاب پارامترهای ماشینکاری از یک طرف و طراحی و ایزولاسیون مناسب ابزار از طرف دیگر حائز اهمیت می‌باشند [۵]. در راستای طراحی ابزار و متعاقب آن حفظ و کنترل ابعادی قطعه کار، کاهش هزینه تمام شده ماشینکاری و نیز محدودیت انعطاف‌پذیری سیستمهای تولید از مشکلات مهم به شمار می‌روند [۶].

لذا قبل از هر چیز می‌بایست ابزاری را برای این کار طراحی نمود. طراحی ابزار در روش الکتروشیمیایی بر پایه اصل کسینوس (قرینه‌سازی) استوار است. بطوریکه قرینه حفره ماشینکاری شونده روی سطح ابزار ایجاد و ماشینکاری بوسیله این ابزار انجام می‌شود [۶]. بدین



ب) مقطع ابزار خانزنی



الف) مقطع شیار لوله اسلحه

عرض سطوح ماشینکاری کننده ابزار: B' عرض خان لوله اسلحه: B
 قطر کف خان: ϕ_2 قطر داخلی لوله: ϕ_1
 عمق ماشینکاری: $M = \frac{\phi_2 - \phi_1}{2}$

شکل ۱: مقاطع ابزار خانزنی و شیار داخلی لوله .

$$i_A = K_o \cdot \frac{U - E}{d} \quad (3)$$

برای شبیه سازی فرآیند مذکور ابتدا باید مسیر طی شده مشخص گردد. این مسیر که برای رسیدن به فرم ابزار و پارامترهای ورودی ماشینکاری طی می شود در دیاگرام (۱) نشان داده شده است . همچنین باید نوع سیستم مختصات معین گردد که به علت استوانه ای بودن ابزار و قطعه کار، مختصات استوانه ای مناسب به نظر می رسد. با توجه به اینکه همیشه گپ نرمال بین هر نقطه قطعه کار با نقطه متناظرش بر روی ابزار که کمترین فاصله را نسبت به آن دارد تشکیل می شود در نتیجه ماشینکاری در جهت شعاعی انجام شده (جهت ماشینکاری در این پروسه از جهت حرکت ابزار مستقل می باشد) و در دستگاه مختصات مذکور مؤلفه R نقاط روی سطح لوله تغییر می کند و سطح ماشینکاری کننده را بوجود می آورد لذا می توان گپ نرمال را به صورت زیر تعریف کرد:

$$d = R - R_s \quad (4)$$

که در آن u ولتاژ در طول گپ ماشینکاری است. با استفاده از شرایط مرزی می توان این معادله را حل و ولتاژ را در طول گپ ماشینکاری بدست آورد:

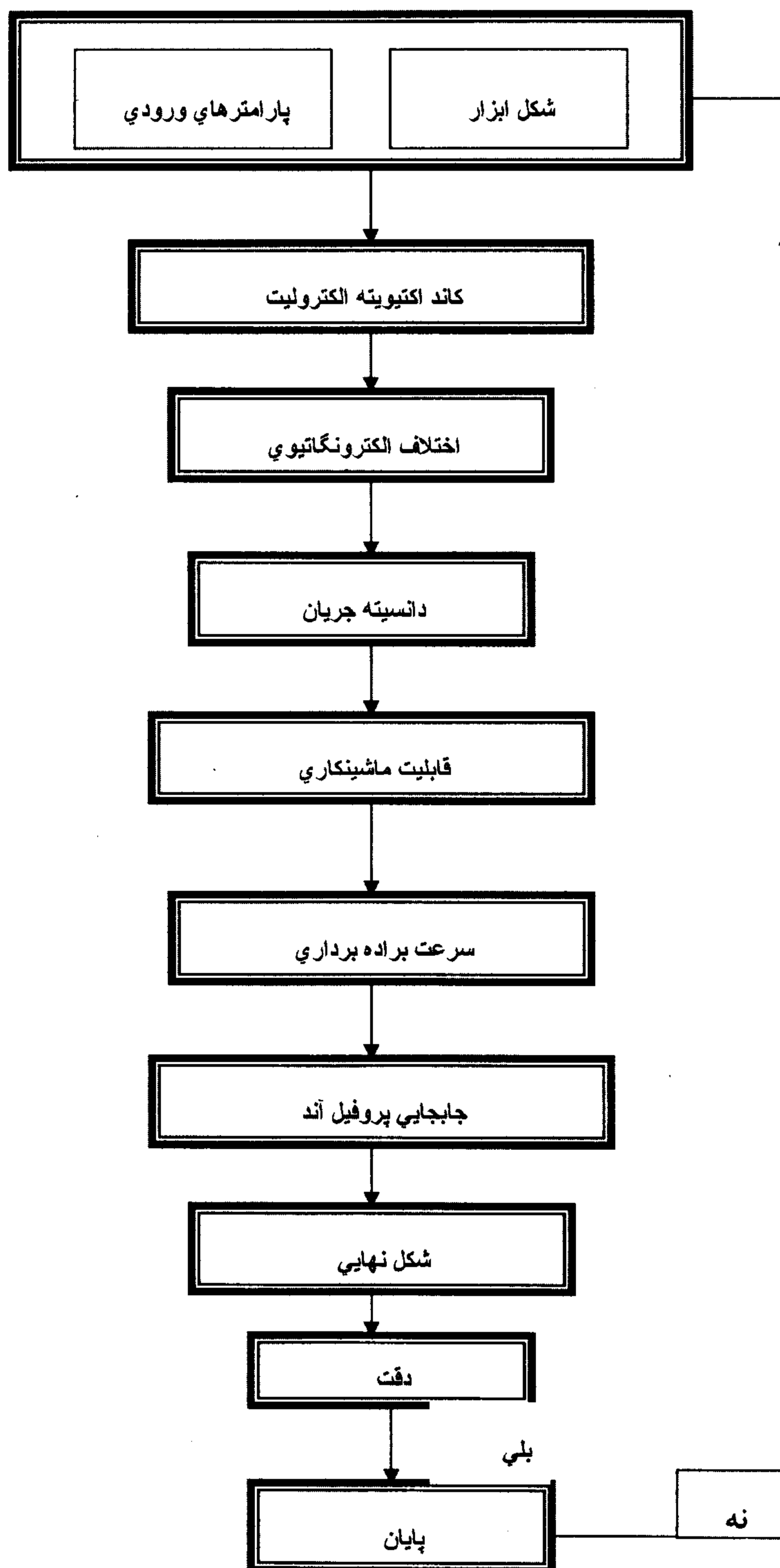
شرایط مرزی عبارتند از:

$$u = U - E \quad \text{در روی آند (لوله)}$$

که در آن U ولتاژ بین دو الکترود متاثر از مدار خارجی و $E = E_a - E_c$ می باشد. در رابطه اخیر E_a ، انرژی نگاتیوی آند و E_c انرژی نگاتیوی کاتد می باشد. شرط مرزی دیگر بر روی کاتد می باشد که $u = 0$ است. با بدست آوردن ولتاژ می توان دانسیته جریان را روی آند (لوله) بدست آورد [۶].

$$i_a = k_o |\nabla u|_A \quad (2)$$

که در آن k_o ضریب هدایت الکتریکی الکترولیت می باشد. حل معادله بالا و اعمال شرایط مرزی در حال حرکت که توسط تغییر موقعیت نسبت به قطعه کار بوجود می آید، پیچیده می باشد. بنابراین می توان با ساده سازی جریان را در طول گپ، خطی در نظر گرفت [۴]. به طوریکه اگر فاصله گپ نرمال را برای هر نقطه d در نظر بگیریم دانسیته جریان روی آند از رابطه زیر بدست می آید:



دیاگرام ۱: فرم کلی مراحل طی شده شبیه‌سازی.

$$Z_1 = \frac{|V_p \cdot t - L| - |L - V_p \cdot t|}{2} \quad (8)$$

$$Z_2 = \frac{V_p \cdot t + L - |V_p \cdot t - L|}{2} \quad (9)$$

$$\theta_1 = \frac{W}{V_p} \cdot Z - B \quad (10)$$

$$\theta_2 = \frac{W}{V_p} \cdot Z + B \quad (11)$$

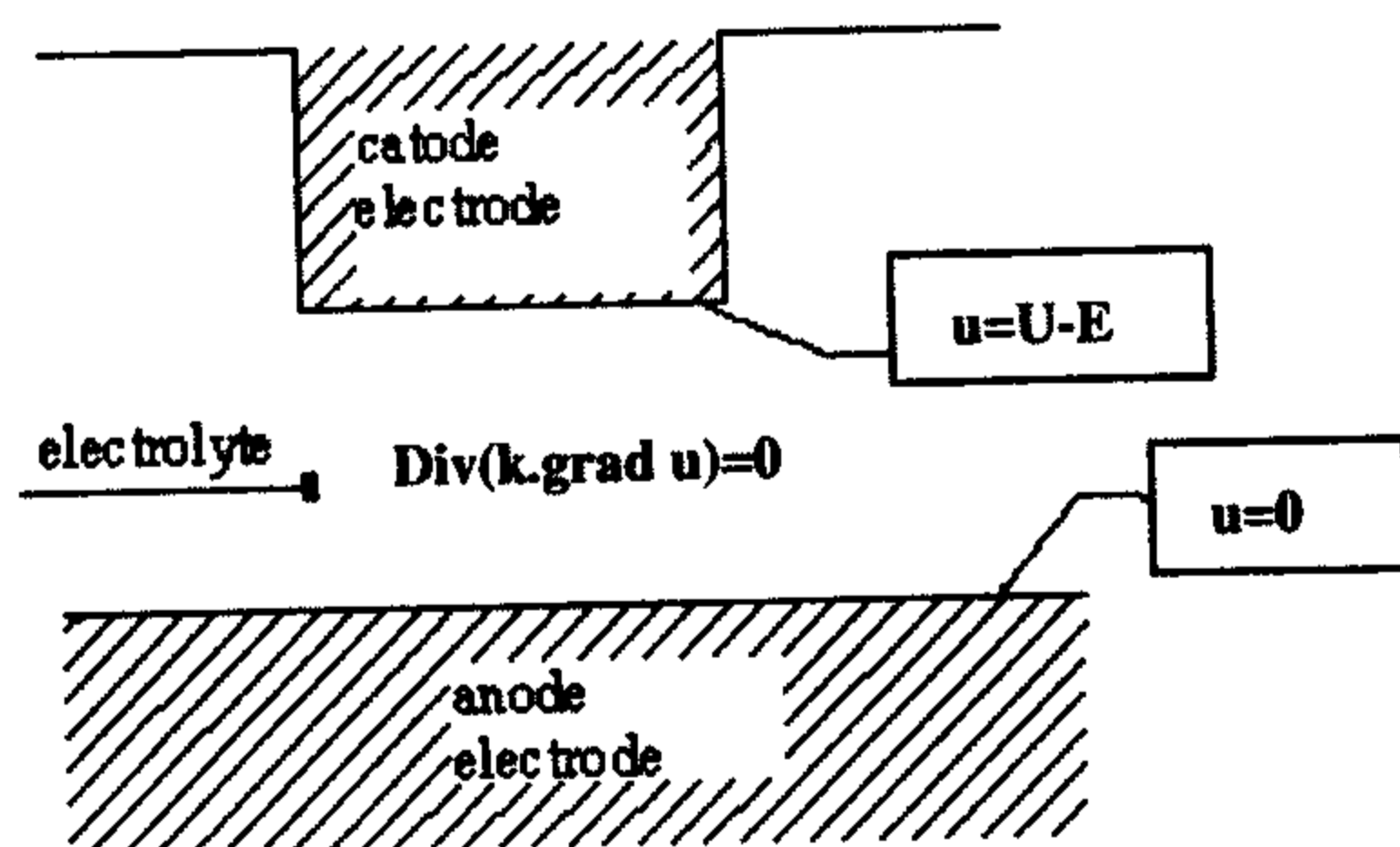
L: طول ابزار

V_p : سرعت خطی ابزار

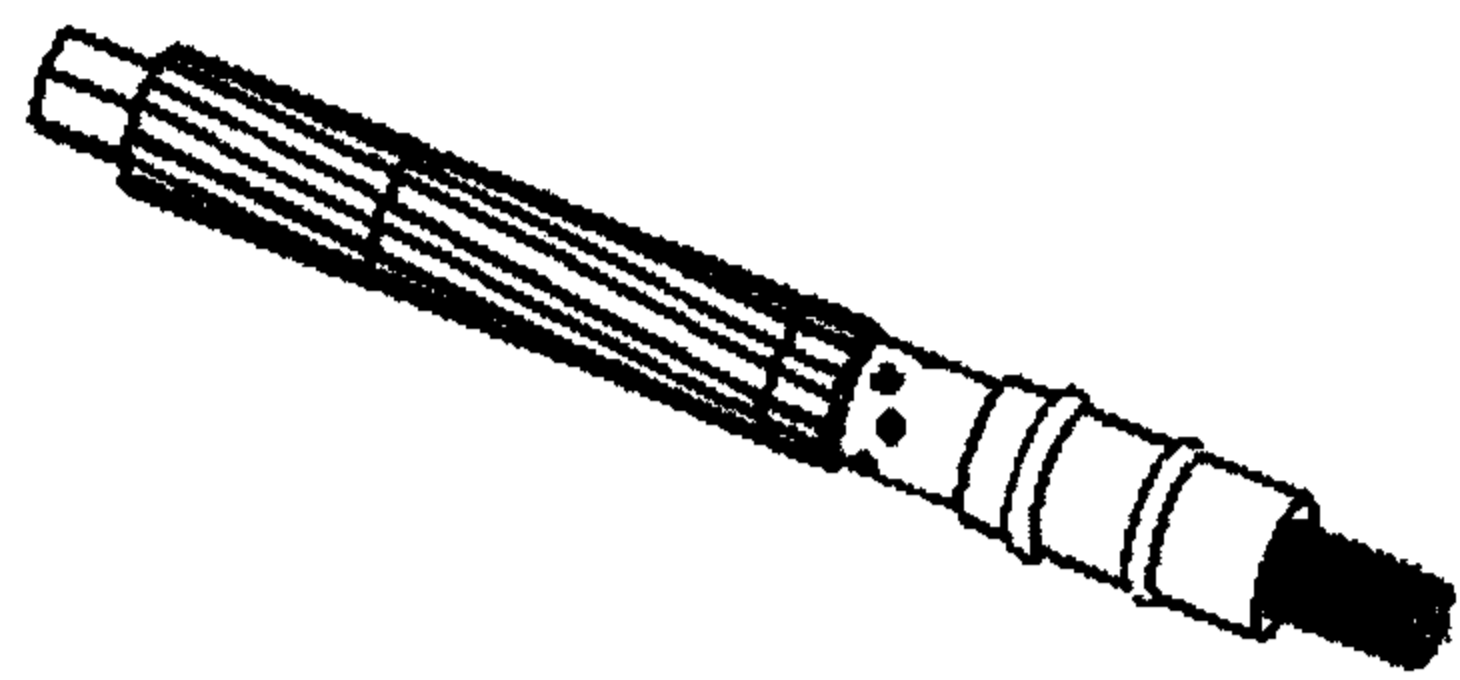
W: سرعت چرخشی ابزار

B: عرض خان لوله (شکل ۱- الف)

لازم به ذکر است در روش تفاضل محدود زمان را به بازه‌های کوچک تقسیم کرده و در آن بازه‌ها معادلات را به راه‌های مختلف این روش حل نموده بطوریکه در هر بازه مقدار بدست آمده (در اینجا R)، با مقادیر بازه‌های قبل جمع می‌گردد. در این کار چون موقعیت ابزار و قطعه کار نسبت به هم تغییر می‌کند در نتیجه در هر بازه زمانی یکسری از نقاط روی سطح توسط حرکت چرخشی و خطی ابزار نسبت به لوله تحت ماشینکاری قرار می‌گیرد که در معادلات بالا بر اساس بازه زمانی که در نظر می‌گیریم ($t = t_1, t_2, \dots, t_n$) در هر بازه یکسری از نقاط روی سطح در نظر گرفته می‌شود و بقیه نقاط ثابت باقی می‌مانند.



شکل ۳: نمایش رابطه ولتاژ نسبت به اندازه گپ.



شکل ۲: مدل ابزار لحاظ شده.

که R_s شعاع ابزار بوده و R مؤلفه شعاع نقاط روی سطح لوله می‌باشد که در طول ماشینکاری تغییر می‌کند.

لازم به ذکر است فقط نقاطی از روی سطح لوله که در محدوده شیارهای ایجاد شونده (خانها) می‌باشند تغییر می‌کنند و بقیه نقاط که بین شیارها می‌باشند ثابت باقی مانده و شعاع آنها برابر با شعاع لوله در زمان قبل از ماشین

کاری می‌باشد. رابطه زیر را می‌توان برای بدست آوردن تغییرات R بکار برد که یک معادله دیفرانسیل غیر خطی است [۴]:

$$\frac{dR}{dt} = k_o \cdot k_v \cdot \frac{U - E}{d} |\text{grad}R| \quad (5)$$

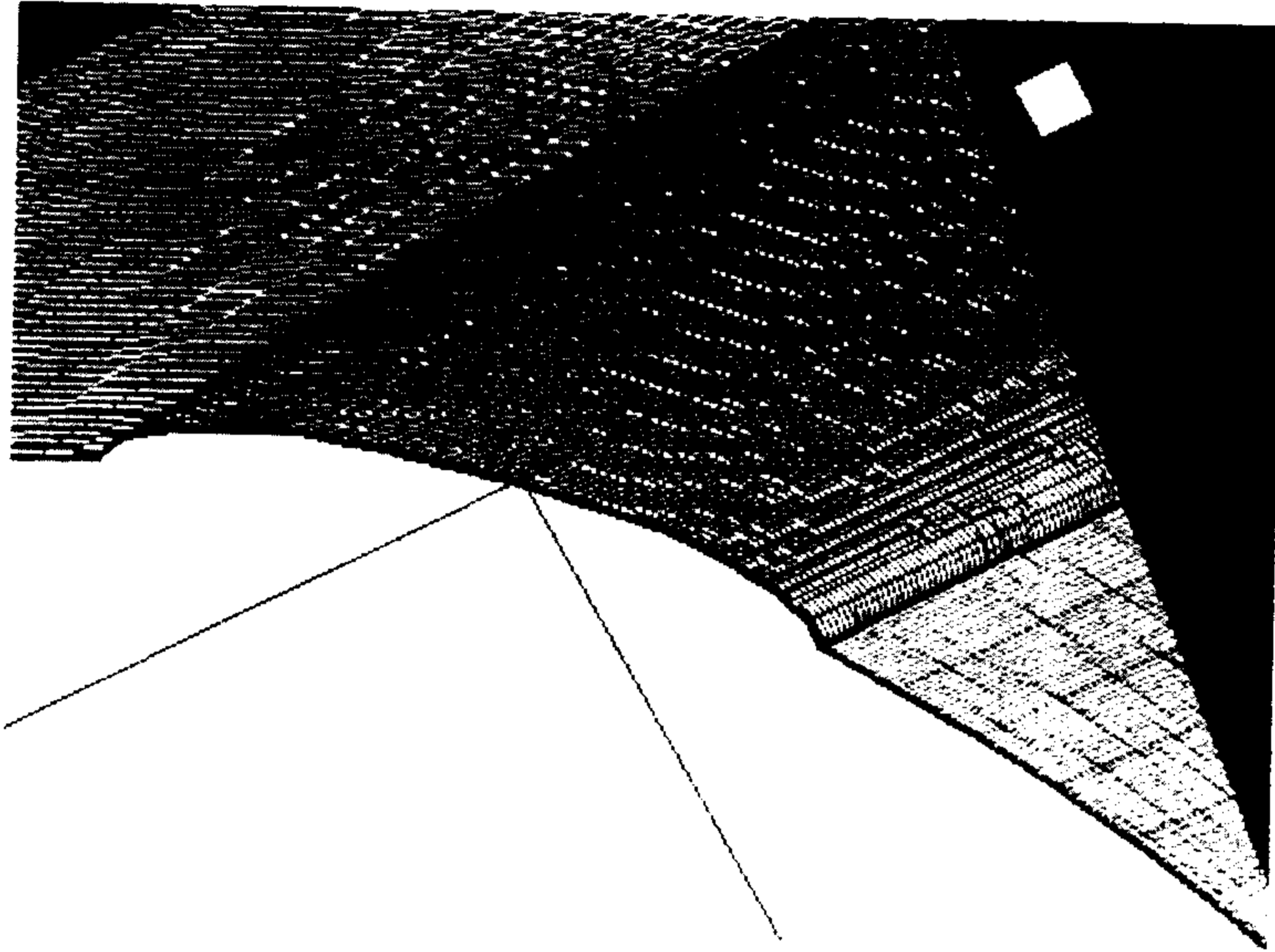
$$\frac{dR}{dt} = k_o \cdot k_v \cdot \frac{U - E}{d} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{R^2} \left(\frac{dR}{d\theta}\right)^2 + \left(\frac{dR}{dZ}\right)^2} \quad (6)$$

که در این معادله R_o شعاع لوله در زمان $t = 0$ بوده که برای تمام نقاط روی سطح داخلی آن ثابت و برابر با این مقدار می‌باشد. همچنین K_v ضریب قابلیت ماشینکاری است که مشخصه قطعه کار در رابطه بالا بوده و توسط درصد و نیز ظرفیت عناصر مختلف درون آلیاژ لوله تعیین می‌شود. این معادله دارای شرایط مرزی اولیه می‌باشد که به ترتیب زیر است:

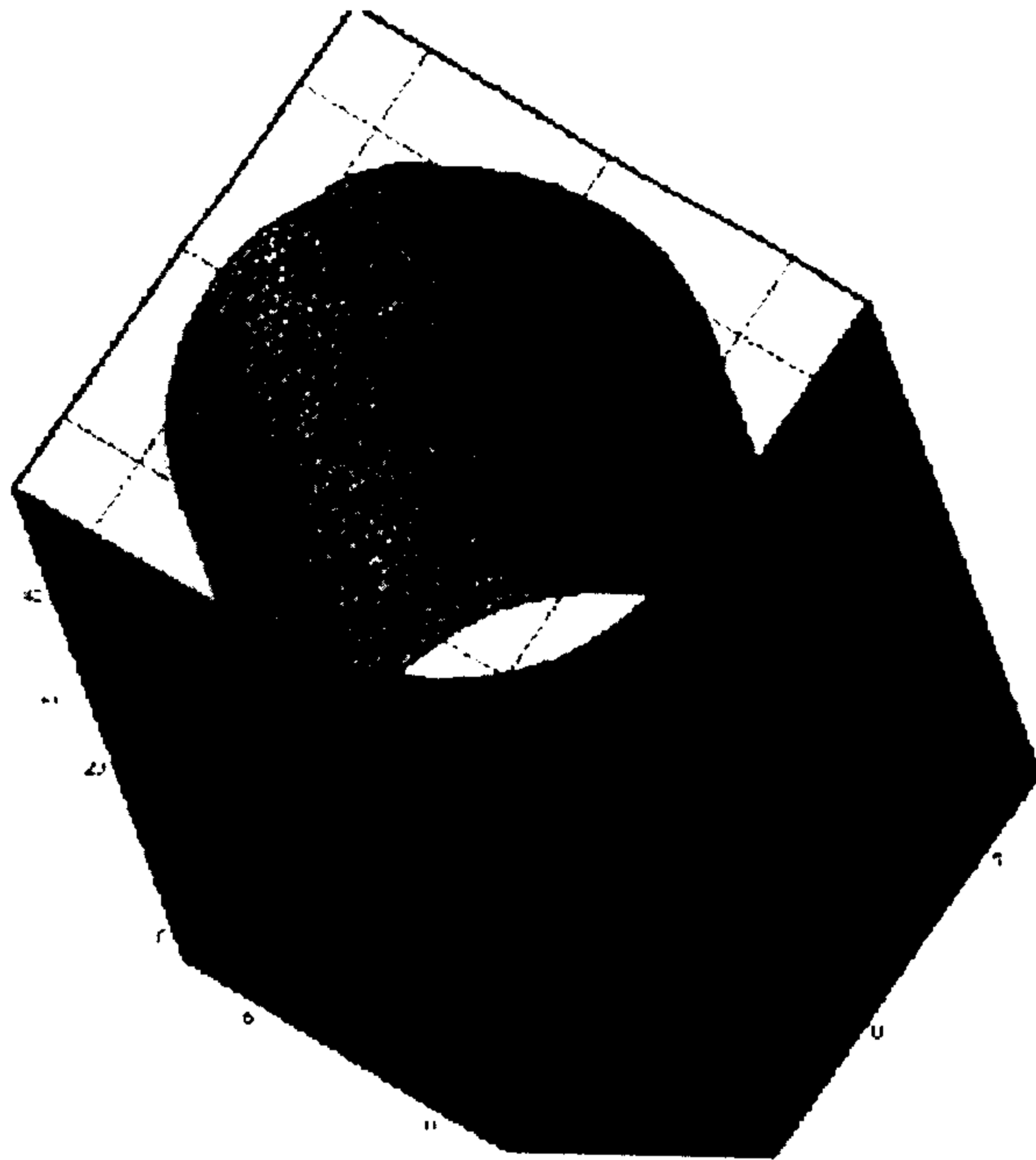
$$(R = R_o)_{t=0} \quad (7)$$

همچنین معادله دارای شرایط مرزی متغیر بشرح

زیر می‌باشد:



شکل ۴: مقطع شیار حاصل از شبیه‌سازی.



شکل ۵: نمای ماریج شیار درون لوله حاصل از شبیه‌سازی.

جدول ۱: نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی و آزمایشهای عملی (عمق ماشینکاری برحسب ولتاژهای مختلف).

ولتاژ	8.5	9.25	10	11.5	14
عمق ماشینکاری (شبیه‌سازی)	0.142	0.151	0.16	0.178	0.207
عمق ماشینکاری (عملی)	0.13	0.17	0.175	0.18	0.209

جدول ۲: نتایج بدست آمده از شبیه سازی و آزمایشهای عملی (عمق ماشینکاری بر حسب سرعتهای مختلف ابزار).

سرعت ابزار	2.3	3.05	3.633	4.366	4.966
عمق ماشینکاری (شبیه سازی)	0.292	0.235	0.206	0.178	0.16
عمق ماشینکاری (عملی)	0.3	0.245	0.23	0.195	0.175

$$RS(ave) = (12/2 + 12/6) / 2 = 6/2$$

$$B' = B \times \frac{RS}{R} = 2/53 \times 6/26/5 = 2/4$$

۹ - سطوح داخلی لوله مش بندی شده است این مش از نوع مستطیلی $Z \times \theta$ بوده بطوریکه $\theta = 0/01 \text{ rad}$ و $Z = 0/1 \text{ mm}$ می باشد.

۱۰ - ولتار گپ ماشینکاری معادل 10 V در نظر گرفته شده است.

شرایط مذکور به غیر از جنس ابزار و لوله و گام شیارهای آن برا ساس سعی و خطا توسط مدلسازی مذکور تعیین شده است بطوریکه شیارهای بدست آمده با مقادیر گفته شده در بند ۸ مطابقت داشته و نیز گام آن با تلرانسی حدودی $\pm 10 \text{ mm}$ با بند ۷ مطابقت داشته باشد. با توجه به شرایط مذکور پروسه شبیه سازی شده است. اشکال (۴) و (۵) به ترتیب نشان دهنده مقطع شیار و شکل ماریچ آن می باشد

آزمایشهای عملی

برای بررسی نتایج حاصل از شبیه سازی یکسری آزمایشهای عملی انجام شده است. لازم به ذکر است که این آزمایشها توسط دستگاه ECM موجود در صنایع هوا و فضا وابسته به وزارت دفاع و ساخت کشور بلغارستان صورت گرفته است.

کلیه مشخصات ابزار، قطعه کار و الکترولیت استفاده شده در تست ها مطابق آنچه در قسمت شبیه سازی گفته شد می باشد. لازم به ذکر است ابزار به روش ماشینکاری تولید شده و همچنین نحوه ایزولاسیون آن بصورت اتصال پیچی و پرسی قطعات پلاستیکی از جنسی بنام Acrylic به ابزار انجام شده است. این قطعات نیز به روش ماشینکاری تولید شده است. در این آزمایشات فشار الکترولیت 24 bar و سرعت ورودی آن 30 mm/s می باشد نتایج این آزمایشات در جداول (۱) و (۲) بیان شده است در جدول (۱) عمق ماشینکار (M) بر حسب ولتاژهای مختلف بوده که از هر دو روش شبیه سازی و

شبیه سازی مدل ریاضی

می توان مدل ریاضی و رابطه مذکور را بوسیله روشهای مختلفی از جمله روش تفاضل محدود (FDM)، روش المان محدود (FEM) و روش المان مرزی (BEM) شبیه سازی کرد. در این مقاله برای شبیه سازی شیارهای درون لوله با استفاده از مدل ریاضی مذکور از روش تفاضل محدود استفاده شده است. زیرا فرم معادله بصورت معادله دیفرانسیل غیر خطی بوده و روش انتخابی مخصوص حل این نوع معادلات می باشد. نتایج این فرآیند بر حسب شرایط زیر بدست آمده است:

۱- جنس ابزار از برنج (60% Cu-40% Zn) به شماره استاندارد C 28000 می باشد.

۲- جنس الکترولیت از محلول نمک طعام در آب با غلظت $(\frac{gr}{lit})$ 120 بوده که در دمای 32° C استفاده

$$\text{می شود. } (K_o = 0/017 \frac{1}{\Omega \cdot mm})$$

۳ - جنس قطعه کار (لوله اسلحه) از فولاد آلیاژی به شماره استاندارد 1.2726 می باشد.

$$(K_v = 0/028 \frac{mm^3}{A \cdot S})$$

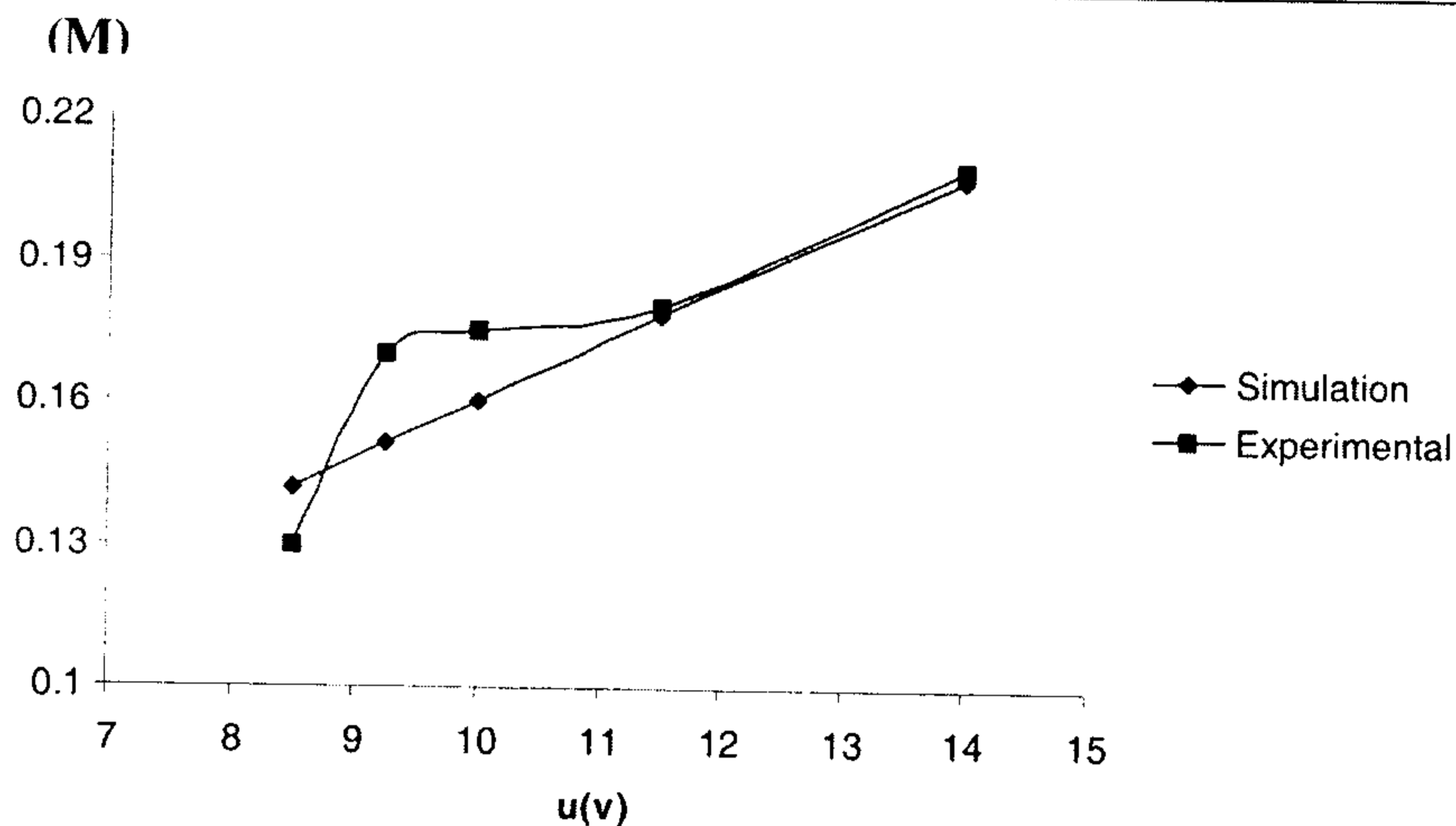
۴ - قطر داخلی لوله $13/05 \text{ mm}$ می باشد.

۵ - ابزار بصورت مخروطی با قطر کوچک $12/2 \text{ mm}$ و قطر بزرگ $12/6 \text{ mm}$ میباشد. همچنین طول قسمت ماشینکاری کننده آن 60 mm می باشد لازم به ذکر است که مخروطی بودن ابزار به علت ثابت نگهداشتن گپ ماشینکاری در طول فرآیند بوده و بدینوسیله از پدیده کاویتاسیون جلوگیری میشود.

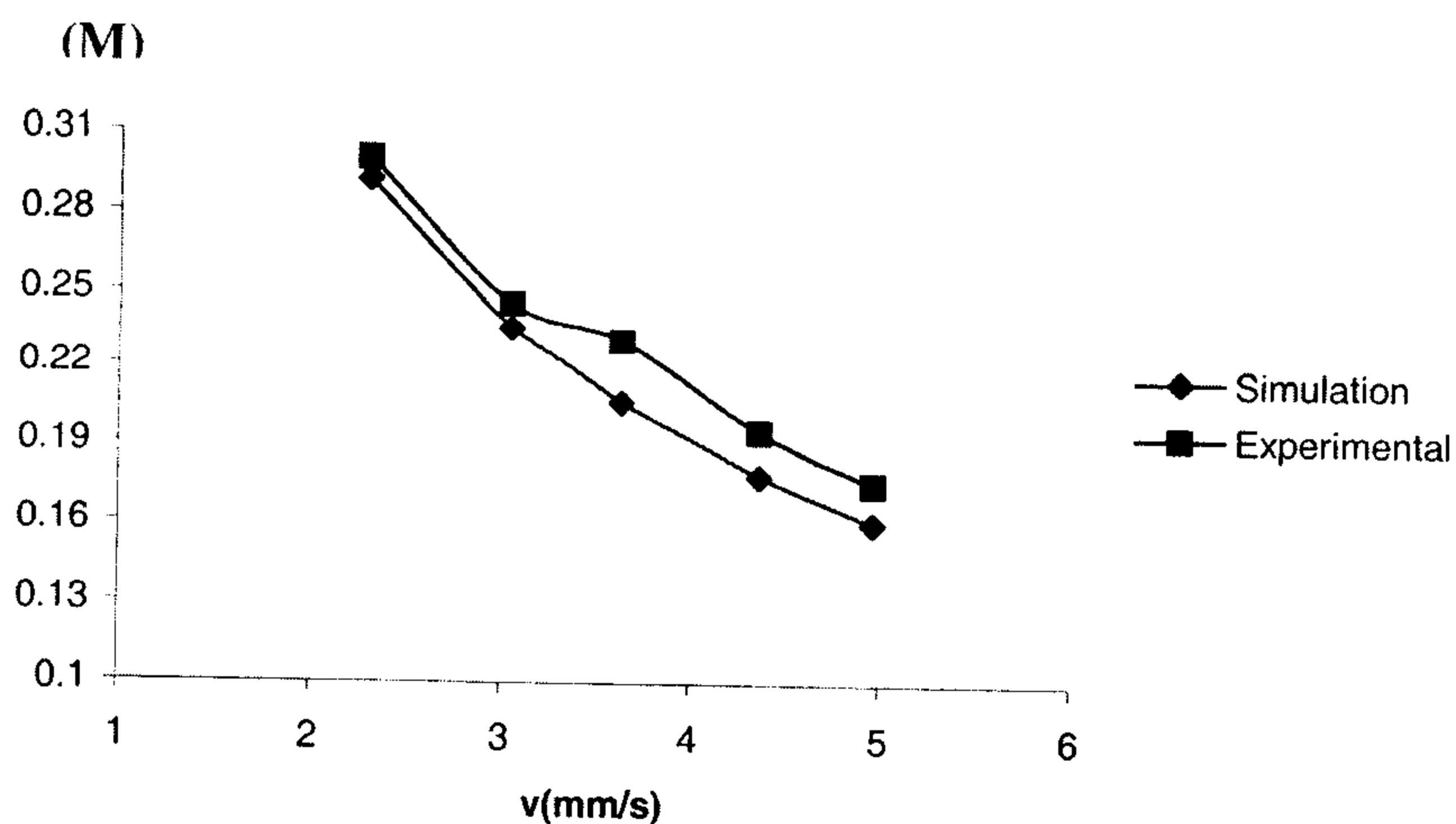
۶ - سرعت خطی ابزار 5 mm/s در نظر گرفته شده است.

۷ - شیارهای مورد نظر دارای گام 381 mm بوده که به اندازه 50 mm از یک شیار شبیه سازی شده است.

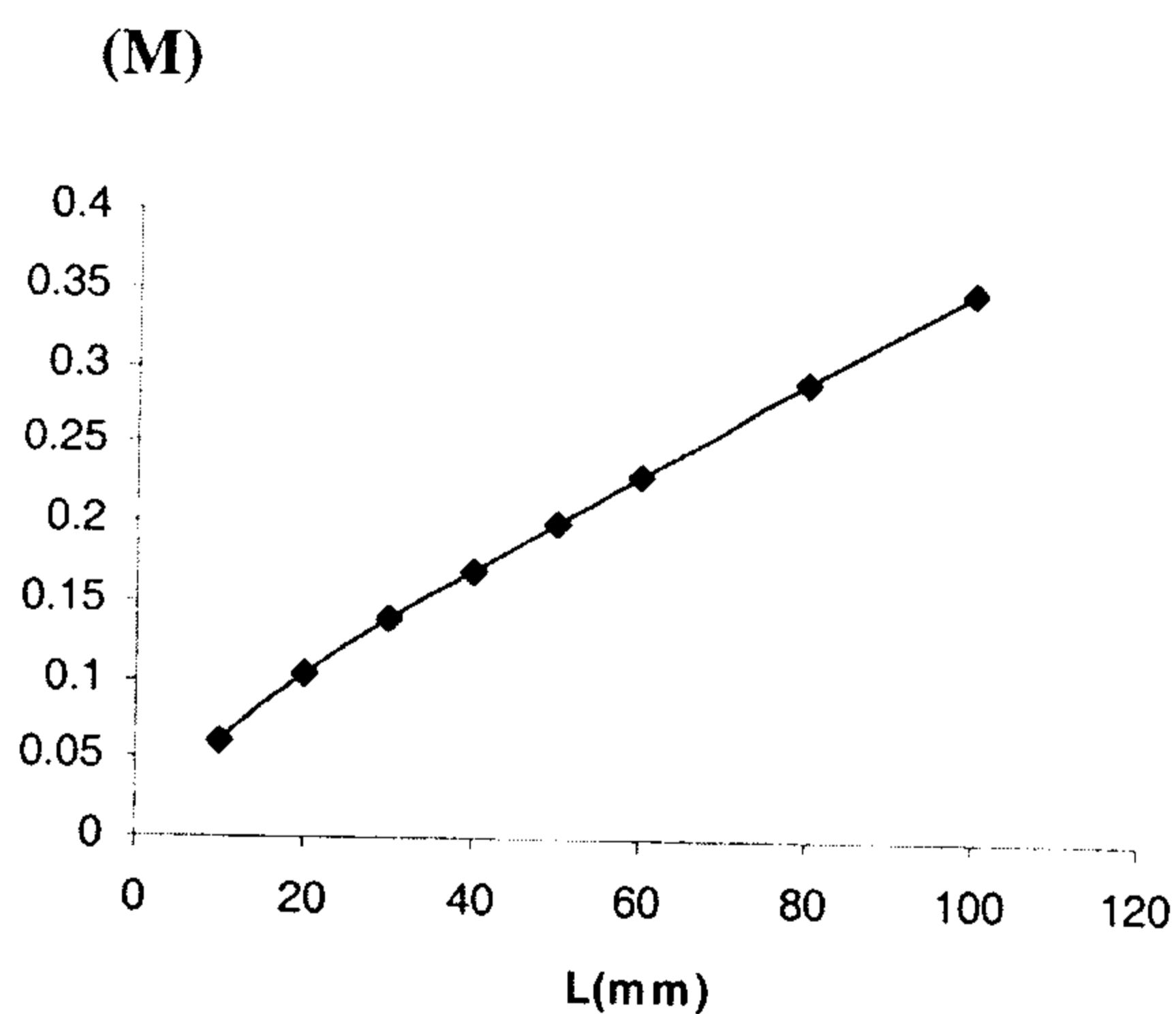
۸ - ضخامت سطوح ماشینکاری کننده ابزار با توجه به در شکل (۱-ب) عبارتست از:



شکل ۶: منحنی تغییرات عمق ماشینکاری بر حسب ولتاژ (بر اساس نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌های عملی).



شکل ۷: منحنی تغییرات عمق ماشینکاری بر حسب سرعت خطی ابزار (بر اساس نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌های عملی).



شکل ۸: منحنی تغییرات عمق ماشینکاری بر حسب طول مؤثر ابزار (بر اساس نتایج شبیه‌سازی).

مجموعه صنایع دفاع گنج‌هایی که ولتاژ و سرعت و ... را نشان می‌دهند از نوع گنج‌های ساعتی بوده و تعیین هر کدام از پارامترها تا محدوده دهم عدد بصورت چشمی و تقریبی می‌باشد که باعث خطا در این پارامترها و نیز اعمال خطای بسیار اندک (در حدود چند میکرون) در نتایج می‌شود در مورد علت دوم کلیه ابعاد از لوله‌های آزمایش شده توسط دستگاه CMM موجود در صنایع جنگ‌افزار سازی اندازه‌گیری شده که به علت کم بودن محیط خانهای ایجاد شده نسبت به محیط داخلی لوله (هر چند از پروبهای قطر کوچک استفاده شد) ممکن است خطایی تا حدود $\pm 0/01$ در نتایج اندازه‌گیری قطر کف شیارها وجود داشته باشد که این خطا نیز باعث اختلاف بین نتایج عملی و شبیه‌سازی می‌شود. در کل می‌توان اشاره کرد که خطاهای بدست آمده به خاطر ناتوانی در تعیین دقیق کلیه ابعاد و پارامترهای استفاده شده در هر دو روش می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر یک الکتروود ECM به منظور ایجاد خان در لوله اسلحه دوشکا شبیه سازی کامپیوتری شده و سپس نمونه ای از آن ساخته و آزمایشاتی توسط آن انجام شده است نتایج حاصل از آزمایشات نشان می‌دهند که مدل حاصل انطباق خوبی با نتایج داشته که این امر نشان‌دهنده این مطلب است که با در دسترس بودن دانش پایه الکتروشیمیایی و نیز تعیین پارامترهای موثر در عملیات ماشینکاری به راحتی می‌توان فرآیندهای مورد نظر را شبیه‌سازی کامپیوتری کرده و پارامترهای مختلف ماشینکاری از جمله ولتاژ، سرعت براده برداری، فشار الکتروولت و غیره را تعیین نمود. بدین ترتیب با شبیه سازی کامپیوتری و تغییر پارامترهای مربوط به شکل ابزار و ماشینکاری، این روش می‌تواند به راحتی جایگزین روش پرهزینه سعی و خطا گردد.

قدردانی و تشکر

در اینجا لازم است از صنایع جنگ‌افزارسازی و صنایع هوا و فضا وابسته به سازمان صنایع دفاع که کلیه امکانات و هزینه‌ها را برای انجام آزمایشات عملی فراهم کردند تشکر و قدردانی به عمل آید.

عملی بدست آمده است. همچنین در جدول (۲) همین نتایج بر حسب سرعت‌های مختلف ابزار بیان شده است. لازم به ذکر است که در آزمایشات عملی جدول (۱) سرعت ابزار ثابت و برابر 5 mm/s بوده و همچنین در جدول (۲)، ولتاژ ثابت و برابر 10 V می‌باشد.

بحث

اشکال (۶) تا (۸) تاثیر پارامترهای ولتاژ، سرعت خطی ابزار و طول مؤثر ابزار را بر روی عمق ماشینکاری (M) نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل (۶) مشخص شده با افزایش ولتاژ عمق ماشینکاری نیز افزایش می‌یابد. زیرا افزایش ولتاژ باعث افزایش دانسیته جریان می‌شود. همچنین با توجه به شکل (۷) با افزایش سرعت خطی، عمق ماشینکاری کاهش می‌یابد زیرا با افزایش سرعت، زمان ماشینکاری کاهش یافته که این امر باعث کاهش عمق ماشینکاری می‌شود. با افزایش طول مؤثر ابزار عمق ماشینکاری نیز افزایش می‌یابد (شکل ۸). زیرا با افزایش طول ابزار سطح ماشینکاری کننده در هر بازه زمانی افزایش یافته و به تبع آن عمق ماشینکاری افزایش می‌یابد یعنی چون سطح در حال ماشینکاری بین ابزار و قطعه‌کار در واحد زمان افزایش می‌یابد در نتیجه براده‌برداری بیشتری در واحد زمان انجام گرفته و متعاقباً عمق ماشینکاری افزایش می‌یابد. برای مقایسه نتایج آزمایشات عملی و نتایج شبیه سازی فرآیند همانطور که در منحنی های اشکال (۶) و (۷) و همچنین جداول (۱) و (۲) مشاهده می‌گردد اختلاف منحنی‌های حاصل از این دو روش ناچیز می‌باشد این اختلاف در نقاط متعدد منحنی‌ها که بر حسب ولتاژهای مختلف در منحنی شکل (۶) و سرعت‌های مختلف در منحنی شکل (۷) می‌باشد در محدوده $0/002-0/025 \text{ mm}$ از عمق ماشینکاری تغییر می‌کند بطوریکه این تغییرات روند خاصی ندارند یعنی بر حسب زیاد شدن سرعت ابزار و یا ولتاژ تغییر منظمی را نشان نمی‌دهند. مقدار خطای نتایج شبیه‌سازی نسبت به نتایج عملی حداکثر ۱۵٪ می‌باشد. علت خطاهای بدست آمده که مقدار آنها تقریباً ناچیز می‌باشد اولاً به خاطر ناتوانی در تعیین دقیق پارامترهای استفاده شده است. ثانیاً اندازه‌گیری دقیق ابعادی شیارهای بدست آمده میسر نمی‌باشد. در مورد علت اول در دستگاه استفاده شده در

مراجع

- 1 - Davygdow, D. A. and Kozak, J. (1990). *Hhgi ele etarctrolacimehc gnipahs*, Nauk Moscow, (in Russian).
- 2 - Kozak, J., Ruszaj, A., Dabrowski, L. and Slawinski, R. (1995). "Computer simulation of 3-D numerically controlled electrochemical machining (ECM – CNC) with spherical tool electrode." *Proceeding of the 11th International Conference on Computer Aided Production Engineering*, London, September 20-21, PP. 205-210.
- 3 - Kozak, J. (1998). "Mathematical models for computer simulation of electrochemical machining process." *J. Materials Processing Technology*, Vol. 76, No. 1-3, PP. 170-173.
- 4 - Kozak, J., Budzynski, A. F. and Domanowski, P. (1998). "Computer simulation electrochemical shaping (ECM-CNC) using a tool electrode." *J. Materials Processing Technology*, Vol. 76, PP. 161-164.
- 5 - Kozak, J., Rajurkar, K. P., Ruszaj, A. and Slawinski, R. (1998). "Sculptured Surface Finishing NC-Electrochemical machining with ball-end electrode." *Adv. Technol. Mach. Equipment*, Vol. 22, No. 1, PP. 53-74.
- 6 - MC Gough, (1974). *Prnciples of electrochemical machining*, Champan and Hall, London.
- 7 - Drozda, T. and Wick, C. (1983). *Tool and manufacturing engineers handbook*, Vol. 1, (SME), USA.