

"یادداشت مهندسی"

# کنترل ترکیبی موقعیت/نیروی بازوی مکانیکی ماکرو/میکرو در نصب سطحی قطعات برد مدار چاپی با استفاده از کنترل فازی

محمد رضا کریمی<sup>۱</sup>      یداله فرزانه<sup>۲\*</sup>

گروه مکانیک، واحد مشهد،  
دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۶)

## چکیده

در حال حاضر قطعات الکترونیکی بسیار نازک و شکننده هستند و مونتاژ آن‌ها بر روی بردهای مدار چاپی بسیار حساس شده است. در صورت اعمال نیروی بیش از حد مجاز، احتمال معیوب شدن قطعات و شکستگی آن‌ها وجود دارد. بنابراین استفاده از سازوکاری با توانایی کنترل نیرو در هنگام نصب ضروری است. به کارگیری سازوکاری با عضو بزرگ (ماکرو) برای حرکت‌های طولانی و عضو کوچک (میکرو) برای حرکت‌های کوتاه و ظریف، کنترل نیروی مناسب و همچنین سرعت بالا در نصب را به همراه خواهد داشت. عضو ماکرو با کنترل مکان به سرعت به سطح مدار چاپی نزدیک می‌شود و پس از آن عضو میکرو حرکتش را آغاز می‌کند. با برخورد عضو میکرو به سطح مدار چاپی، روش کنترلی از کنترل موقعیت به کنترل نیرو تغییر می‌یابد و امکان نصب قطعه را با نیروی کنترل شده فراهم می‌کند. جهت کنترل سیستم در ابتدا از کنترل کننده تناسبی- مشتقی استفاده شده است. در ادامه کنترل کننده فازی برای کنترل سیستم انتخاب شده است. با استفاده از کنترل فازی نیرو و مکان، کنترل بهتری فراهم شده است و از شکل‌گیری اغتشاشات در هنگام نصب قطعات جلوگیری شده است. همچنین نحوه تغییر نیرو و زمان برخورد با سرعت هد نصب مورد بررسی قرار گرفت و بهینه‌ترین سرعت برخورد محاسبه شد.

**واژه‌های کلیدی:** نصب سطحی، سازوکار ماکرو/میکرو، کنترل نیرو، کنترل کننده فازی

## Hybrid Position/Force Control of the Macro/Micro Manipulator for Assembly of PCB Utilizing Fuzzy Control

M. R. Karimi<sup>1</sup>

Y. Farzaneh<sup>2\*</sup>

Department of Mechanical Engineering,  
Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

(Received: 24/October/2019; Accepted: 26/January/2020)

### ABSTRACT

Currently, electronic components are very thin as well as fragile and their assembly on PCB boards is highly sensitive. The components may be damaged and broken in response to an excessive force. Therefore, it is necessary to use a mechanism with force control ability. A mechanism with a large member (macro) for long movements and a small member (micro) for short and delicate movements, is selected to provide accurate force control as well as high speed in installation. The macro member is rapidly approaches the surface of the PCB with the position control and then the micro member initiate its movement. As the micro member contacts the surface of the PCB, the position control is switched to force control and enables the installation of the device with controlled force. At the first attempt, PID controller is used. Thereafter, the fuzzy controller is selected to control the system. The fuzzy controller has a better performance and reduces the disturbances during installation. The relation between maximum contact force and contact time with velocity is also investigated and optimal velocity is determined.

**Keywords** Surface Mounting, Macro/Micro Mechanism, Force Control, Fuzzy Controller

<sup>۱</sup> - کارشناس ارشد: mechanic.mrk@gmail.com

<sup>۲</sup> - استادیار (نویسنده پاسخگو): ya\_farzaneh@mshdiau.ac.ir

## ۱- مقدمه

میکرو و قطعه را حرکت می‌دهد درحالی‌که عملگر میکرو با حرکتی کنترل‌شده و هوشمند به‌منظور جلوگیری از نیروهای تماسی زیاد بین قطعات الکترونیکی و برد مدار چاپی، حرکت می‌نماید. این سازوکار به علت نوسانات بالا در حین نصب صدمات زیادی به قطعات وارد می‌آورد. همچنین لی و همکارانش [۱] در مقاله‌ای دیگر، استفاده از سازوکار ماکرو/میکرو را پیشنهاد داده‌اند. ولی به‌منظور کنترل بهتر نیرو و موقعیت از کنترل‌کننده PID استفاده نموده‌اند که تا حدودی از به وجود آمدن نوسانات جلوگیری به عمل آورده است. در مقاله دیگری از لی و همکارانش [۲] روشی مبتنی بر تصویربرداری با دقت بالا استفاده شده است. عمل کنترل از طریق تصاویر پردازش‌شده توسط دوربین انجام می‌شود. در این روش از دو دوربین که یکی تراشه را تصویربرداری و دیگری به برد مدار چاپی متصل و مکان تراشه در برد مدار چاپی را تصویربرداری می‌نماید، استفاده شده است. این سیستم نصب دارای هزینه ساخت و تعمیرات بالای هست و به علت محدودیت و سرعت عمل پایین کاربرد چندانی ندارد. در مقاله حاضر، کنترل ترکیبی موقعیت-نیرو سازوکار ماکرو/میکرو توسط کنترل‌کننده فازی انجام شده است. استفاده از این کنترل‌کننده مانع به وجود آمدن نوسانات و اغتشاشات بالا می‌گردد و از صدمه به قطعات برد مدار چاپی جلوگیری به عمل می‌آورد.

در این پژوهش ابتدا به بررسی و تشریح چگونگی کارکرد سازوکار ماکرو/میکرو پرداخته می‌شود و در ادامه نیروی اعمال‌شده به هد نصب به همراه مدل‌سازی و شبیه‌سازی سازوکار مذکور با استفاده از دو کنترل‌کننده PID و فازی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. در انتها عملکرد دو کنترل‌کننده PID و فازی با یکدیگر مقایسه می‌گردند.

## ۲- سازوکار ماکرو/میکرو

طراحی بازوهای مکانیکی سبک وزن با فضای کاری بزرگ و قابلیت حرکت روی یک مسیر با دقت و سرعت بالا در بسیاری از کاربردهای ربات نظیر کاربردهای فضایی و جابجایی زباله‌های هسته‌ای و جوشکاری‌های دقیق و همچنین مونتاژ قطعات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از یک بازوی مکانیکی با اعضای کوچک و صلب (بخش میکرو) در انتهای یک بازوی مکانیکی با اعضای بلند

با توجه به اینکه قطعات الکترونیکی به سمت ظریف و نازک شدن پیش می‌روند و نسبت به گذشته به‌طور قابل‌توجهی از وزن و ابعاد آن‌ها کم شده است، بنابراین به همان اندازه ظرافت آن‌ها بیشتر و در مقابل نیروهای خارجی آسیب‌پذیرتر شده‌اند [۱]. در حال حاضر، روش مونتاژ قطعات الکترونیک از طریق سوراخ‌کاری برد الکترونیکی منسوخ شده و استفاده از روش نصب سطحی توسط بازوی مکانیکی<sup>۱</sup> متداول شده است. روش نصب به‌وسیله بازوی مکانیکی به این صورت است که ابتدا توسط هد نصب متصل شده به بازوی مونتاژ، قطعه الکترونیکی از محل تغذیه با استفاده از مکش جذب‌شده، سپس توسط یک موتور سرو بر بالای محل نصب هدایت می‌گردد. در ادامه قطعه توسط بازو به پایین هدایت می‌گردد تا اینکه قطعه به سطح برد مدار چاپی<sup>۲</sup> برخورد کرده و در آنجا نصب می‌گردد و در نهایت نیز با قطع و کیوم، عمل مونتاژ به اتمام می‌رسد [۲]. از آنجا که نیروی تماس به وجود آمده در حین برخورد قطعه با سطح می‌تواند باعث شکست قطعه شود بنابراین باید به این نیرو توجه زیادی نمود و از کنترل‌کننده مناسب استفاده نمود. باوجود رشد و پیشرفت علم، هنوز این نقیصه به‌طور قطع رفع نگردیده است و به دلیل اغتشاشات به وجود آمده در ابتدای برخورد ممکن است قطعه با آسیب مواجه گردد.

جهت رفع مشکل برخورد نامناسب قطعه به سطح برد، در اغلب مقالات ارائه‌شده از یک یا دو عملگر ترکیبی جهت مونتاژ استفاده می‌کنند. در ابتدا سازوکاری با یک عملگر جهت رفع این مشکل توسط ماکیتا و کادانو [۳] ارائه گردید که در آن عمل مونتاژ توسط ربای با چهار درجه آزادی انجام می‌گرفت. بازوی این ربات در جهات  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  حرکت می‌نماید و در راستای  $Z$  نیز دوران می‌کند. سازوکار کنترل نیرو به‌وسیله فنر به‌منظور کنترل بار فشاری از طرف بازوی مونتاژ پیشنهاد شده است. با توجه به سادگی سازوکار و عدم وجود کنترل‌کننده مناسب این سازوکار با موفقیت قابل‌قبولی همراه نگردید. در مقاله شیم و همکاران [۴]، استفاده از سازوکار ماکرو/میکرو پیشنهاد شده است که در این سازوکار عملگر ماکرو با یک حرکت طویل و کلی، عملگر

<sup>1</sup> manipulator<sup>2</sup> PCB

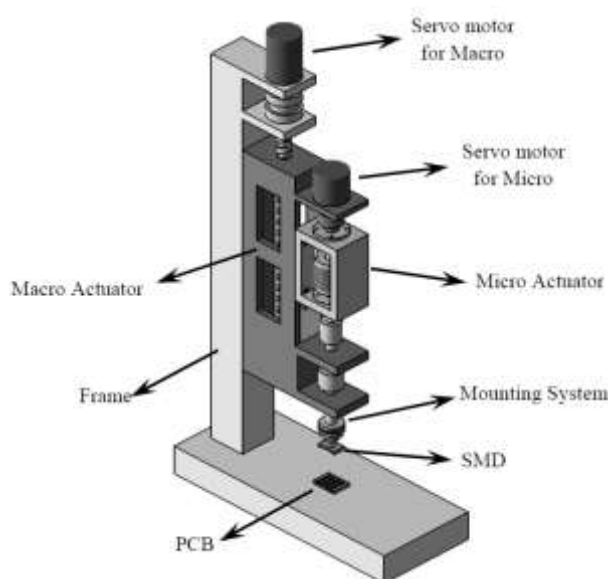
## ۲-۲- عملگر میکرو

در این عملگر از یک موتور سرو جهت چرخش قطعات و همچنین یک موتور مغناطیسی<sup>۱</sup> جهت انتقال قطعات از نزدیکی برد مدار چاپی تا نصب کامل آنها استفاده می‌گردد. موتور سرو به قسمت عمودی عملگر ماکرو متصل شده است و نیروی چرخشی توسط چهار پین به بلوک عملگر میکرو انتقال می‌دهد. موتور مغناطیسی که بر اساس نیروی لورنتس عمل می‌نماید، از یک هسته داخلی طویل با پوشش آلومینیومی تشکیل شده است. سیم‌پیچ نیز در اطراف آن جهت القای حرکت الکترومغناطیسی پیچیده شده است. حس‌گر نیرو برای تنظیم و ثابت نگه‌داشتن نیروی تماسی و همچنین حس‌گر موقعیت جهت اندازه‌گیری دقیق تعبیه شده است. عملگر میکرو در مسافت‌های کوتاه و با سرعت پایین عمل می‌نماید، بنابراین کنترل نیرو توسط این عملگر انجام می‌گیرد. عملگر میکرو با خصوصیات جرم کم، اینرسی پایین، اصطکاک کم، سرعت پایین، حرکت در مسافت‌های کم و حرکت بسیار ظریف و کنترل شده توسط موتور مغناطیسی باعث می‌شود در هنگام تماس، نیروهای تماسی به وجود آمده در حین مونتاژ کمتر و کنترل شده تر باشند. این عملگر نیز با توجه به پروفایل ورودی به حرکت درمی‌آید.

## ۲-۳- نیروی عملگر میکرو

نیروی اعمالی از طرف عملگر میکرو بر طبق جریان ورودی به سیم‌پیچ  $(i)$  و موقعیت بین مگنت و سیم‌پیچ  $(x)$  به دست می‌آید. در واقع  $x$  موقعیت نسبی بین مگنت داخلی و سیم‌پیچ متحرک عملگر میکرو است. برای هر موقعیت  $x$  یک جریان متفاوت به سیم‌پیچ وارد می‌شود. در صورت تماس دو جسم باهم، نیروی جبران‌کننده توسط موتور مغناطیسی اعمال می‌شود. این نیرو بر اساس نیروی اندازه‌گیری شده توسط حس‌گر نیرو<sup>۲</sup> و توسط موتور مغناطیسی تولید می‌شود. موتور مغناطیسی بر اساس جریان ورودی به سیم‌پیچ تولید نیرو می‌نماید، با تغییر موقعیت  $x$  جریان ورودی تغییر می‌کند و در نتیجه نیروی اعمالی نیز تغییر می‌کند. به‌طور خلاصه در سیستم نصب سطحی با توجه به پروفایل سرعت ورودی، عملگر ماکرو با سرعت‌بالا

و ارتجاعی (بخش ماکرو) می‌تواند راهی برای نیل به اهداف فوق باشد. چنین آرایشی را بازوی مکانیکی ماکرو/میکرو می‌نامند [۵]. بنابراین از عملگر ماکرو که دارای جرم و سرعت بیشتری نسبت به عملگر میکرو است در حرکت‌های طولانی استفاده و از عملگر میکرو که جرم کمتری دارد در حرکت‌های کوتاه و ظریف استفاده می‌شود. این سازوکار در شکل ۱ آورده شده است.



شکل (۱): سازوکار ماکرو/میکرو

## ۲-۱- عملگر ماکرو

عملگر ماکرو توسط یک سرو موتور و یک مفصل بال اسکرو با توجه به پروفایل ورودی حرکت می‌کند.

مفصل بال اسکرو با استفاده از ساچمه‌هایی که در بین گام پیچ‌های آن قرار دارد حرکت را بسیار آسان و راحت می‌نماید. هنگامی که عملگر ماکرو شروع به حرکت می‌کند، عملگر میکرو قطعه الکترونیکی را همراه خود به نزدیکی برد مدار چاپی انتقال می‌دهد، در این شرایط کنترل موقعیت فعال است. حرکت تا وقتی صورت می‌گیرد که عملگر ماکرو تا نزدیکی برد مدار چاپی برسد، هنگامی که ماکرو دارای شتاب منفی جهت توقف کردن است، عملگر میکرو شروع به حرکت می‌نماید، پس از حرکت عملگر میکرو، عملگر ماکرو از حرکت باز می‌ایستد. از خصوصیات این عملگر می‌توان به جرم و سرعت بیشتر نسبت به عملگر میکرو و حرکت در مسافت‌های زیاد اشاره نمود.

<sup>1</sup> VCM

<sup>2</sup> Load cell

$$x(t) = x_1(t) - x_2(t) \quad (۱)$$

برای تحلیل دینامیکی هر کدام از اعضاء (میکرو و ماکرو) بایستی ابتدا معادلات دینامیکی آن‌ها را بیان نمود. برای عملگر ماکرو:

$$M\ddot{x}_1 = -k_1x_1 - b_1\dot{x}_1 - k_2x_2 - b_2\dot{x}_2 + f_1 + f_2 \quad (۲)$$

و برای عملگر میکرو:

$$m\ddot{x} = -k_2x_2 - b_2\dot{x}_2 + f_2 \quad (۳)$$

به منظور تشریح بهتر رفتار دینامیکی و کنترلی سیستم، مدل فضای حالت سیستم با انتخاب جابجایی و سرعت عملگر ماکرو، جابجایی نسبی و سرعت نسبی عملگر میکرو به عنوان متغیرهای حالت به صورت رابطه (۴) استخراج می‌شود.

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{y}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_1 & -b_1 & -k_2 & -b_2 \\ M & M & M & M \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ M & M \\ 0 & 0 \\ 1 & m-M \\ m & mM \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (۴)$$

#### ۲-۵- چگونگی انجام مونتاژ

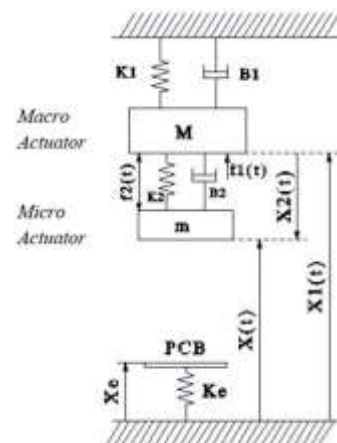
مراحل نصب سطحی توسط سازوکار ماکرو/میکرو به صورت شماتیک در شکل ۳ توضیح داده شده است.

در شکل ۳(a) ابتدای حرکت عملگر ماکرو با شتاب مثبت نشان داده شده است و در شکل ۳(b) عملگر ماکرو به فاصله معین تا سطح برد مدار چاپی، شروع به متوقف شدن با شتاب منفی می‌کند ولی عملگر میکرو در این لحظه شروع به حرکت با سرعت ثابت می‌نماید تا اینکه عملگر ماکرو پس از مسافت کوتاهی همانند شکل ۳(c) به طور کامل متوقف می‌شود. در شکل ۳(d) برخورد قطعه الکترونیکی متصل به میکرو با سطح برد مدار چاپی اتفاق می‌افتد و در این لحظه در صورتی که نیروی تماس بیشتر از نیروی پیش‌فرض باشد حالت کنترل موقعیت به حالت کنترل نیرو تبدیل می‌گردد و در نهایت عملیات نصب به اتمام می‌رسد.

شروع به حرکت می‌کند و عملگر میکرو و قطعه الکترونیکی را تا نزدیکی سطح برد مدار چاپی پیش می‌برد. تا اینکه عملگر ماکرو شتاب منفی می‌گیرد و قبل از توقف آن عملگر میکرو شروع به حرکت با سرعت ثابت، بر اساس پروفایل ورودی به آن می‌کند و قطعه را تا برد مدار چاپی هدایت می‌کند. در این وضعیت کنترل موقعیت فعال است و موقعیت بر اساس پروفایل ورودی به آن کنترل می‌گردد. پس از برخورد اگر نیروی تماس بیشتر از مقدار پیش‌فرض (gf ۲۰) باشد، حالت کنترل موقعیت به حالت کنترل نیرو تغییر پیدا می‌کند. از این لحظه به بعد مقدار نیروی تماسی بایستی جهت عدم صدمه زدن به قطعات کنترل گردد. که در این پژوهش با توجه به اینکه مقدار مجاز نیرو با احتساب ضریب اطمینان نباید از gf ۱۰۰ بیشتر گردد لذا مقدار نیروی ورودی به آن جهت کنترل نیروی تماسی برابر gf ۱۰ قرار داده شده است.

#### ۲-۴- مدل سازی با سیستم جرم و فنر

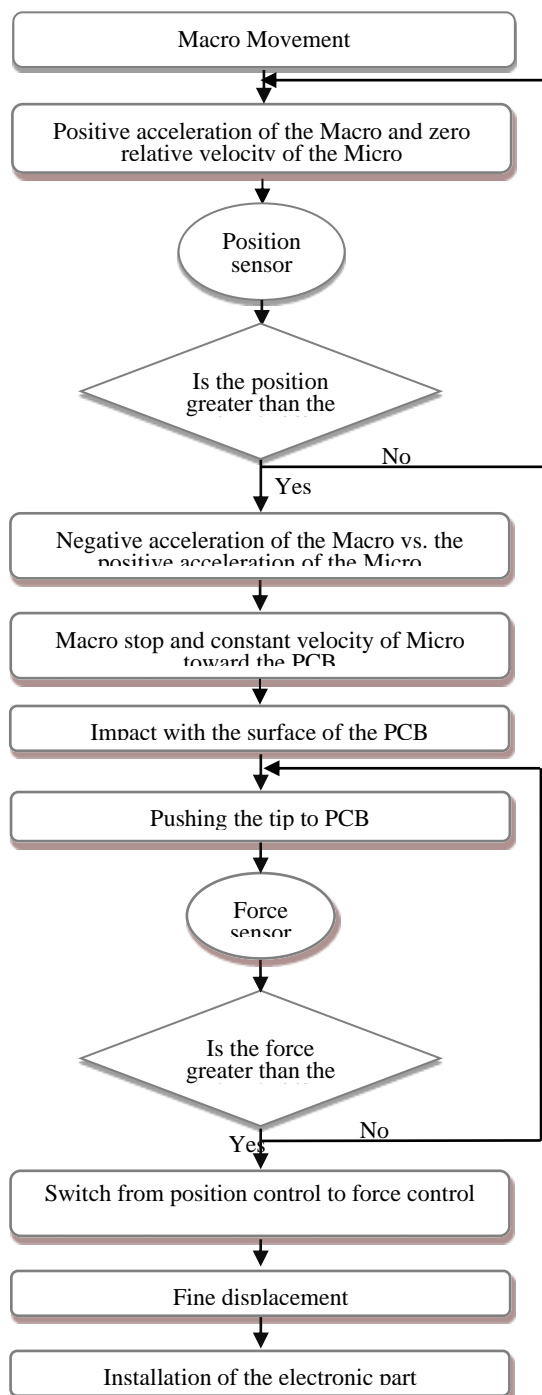
سازوکار مذکور را می‌توان با یک سیستم جرم فنر مشابه شکل ۲ شبیه‌سازی نمود [۶ و ۷]. در این سیستم، ماکرو به عنوان یک جرم و میکرو به عنوان یک جرم دیگر در نظر گرفته می‌شود و در بین آن‌ها از فنر و میراگر استفاده می‌شود. سطح برد مدار چاپی با فنر با سختی بالا مدل شده است.



شکل (۲): مدل سازی با سیستم جرم و فنر.

$x_1$  به موقعیت مطلق عملگر ماکرو اشاره می‌کند (البته نسبت به فریم دستگاه) و  $x_2$  به موقعیت نسبی قسمت متحرک عملگر میکرو نسبت به فریم متحرک عملگر ماکرو اشاره می‌نماید و در نهایت موقعیت انتهای هد نصب  $x(t)$  به وسیله رابطه ۱ محاسبه می‌گردد:

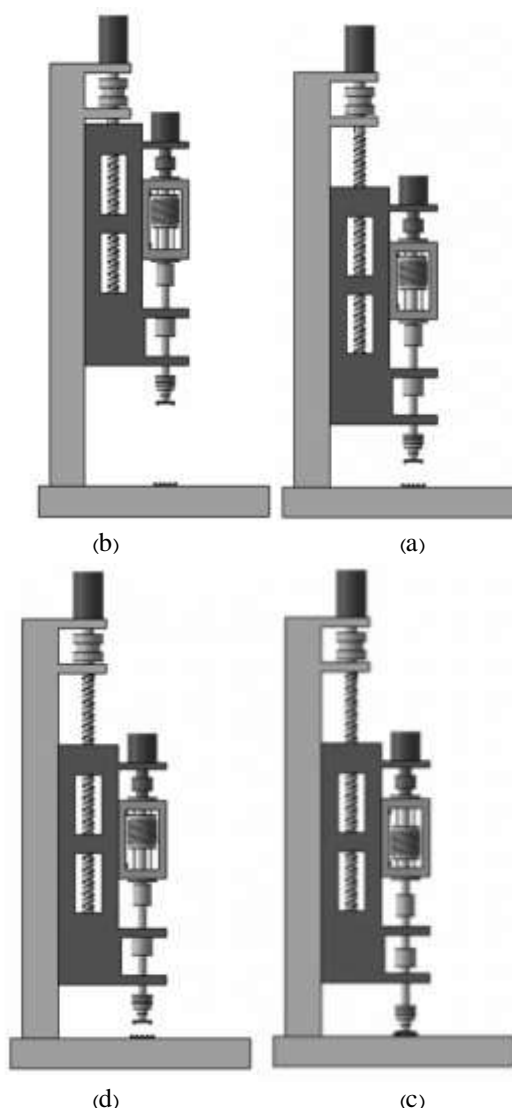
پیدا می‌کند و نیروی تماس در یک حد مجاز و تنظیم شده (۱۰۰ gf) ثابت می‌ماند. این نیروی ثابت توسط موتور مغناطیسی تولید می‌گردد.



شکل (۴) نمودار جریان نصب سطحی قطعه الکترونیکی

### ۳- طراحی کنترل کننده‌ها

سازوکار ماکرو/میکرو با سیستم کنترل ترکیبی کنترل می‌گردد. در بخش ۳-۱، کنترل موقعیت و کنترل نیرو



شکل (۳): مراحل نصب سطحی توسط سازوکار ماکرو/میکرو.

(a) حرکت ماکرو با شتاب مثبت، (b) شتاب منفی ماکرو و شروع حرکت میکرو، (c) توقف ماکرو و سرعت ثابت میکرو، (d) برخورد با PCB و کنترل نیرو تماس

در شکل ۴ نیز مراحل انجام نصب به صورت نمودار جریان بیان گردیده است. حرکت ماکرو توسط سازوکار بال اسکرو تعریف شده است و با استفاده از حسگر موقعیت، این حسگر، ماکرو تا ۸۵ درصد مسافت کل حرکت می‌کند. در ادامه میکرو با کمک اینرسی حرکتی ماکرو با سرعت ثابت حرکت می‌نماید در حالی که ماکرو در آستانه توقف است تا اینکه هد نصب با سطح برد مدار چاپی برخورد می‌نماید. در این لحظه اگر نیروی برخورد از مقدار پیش‌فرض بیشتر باشد کنترل موقعیت به کنترل نیرو تغییر

### ۳-۲- کنترل کننده فازی

ورودی‌های کنترل کننده‌های فازی به نحوی انتخاب شده‌اند که بهترین اطلاعات را برای سیستم کنترلی و ایجاد قواعد فازی در برداشته باشند. ورودی در حالت کنترل موقعیت ماکرو، اختلاف موقعیت واقعی عملگر ماکرو از موقعیت مطلوب آن و سرعت عملگر ماکرو است. در حالت کنترل موقعیت میکرو نیز اختلاف موقعیت واقعی عملگر میکرو از موقعیت مطلوب آن و سرعت عملگر میکرو به‌عنوان دو ورودی در نظر گرفته شده‌اند. در حالت کنترل نیروی تماس، ورودی‌های کنترل اختلاف نیروی تماس واقعی از مطلوب و مشتق اختلاف نیروی تماس واقعی از مطلوب است.

### ۳-۲-۱- کنترل کننده موقعیت عملگر

با توجه به اینکه موقعیت هد نصب در عمل مونتاژ قطعات الکترونیکی در سازوکار ماکرو/ میکرو از بالا به پایین می‌آید و در واقع اگر موقعیت مبنا یا صفر، هنگام شروع حرکت ماکرو در نظر گرفته شود این نتیجه گرفته می‌شود که موقعیت هد نصب همیشه در حالت منفی است. به‌طور کلی هنگامی که موقعیت واقعی از موقعیت مطلوب جلوتر (پایین‌تر) باشد، یعنی اختلاف موقعیت واقعی از موقعیت مطلوب مثبت است، بنابراین بایستی نیرویی در خلاف جهت حرکت ماکرو به ماکرو اعمال گردد تا موقعیت واقعی بر موقعیت مطلوب منطبق شود و همچنین برعکس آن هم هنگامی که هد نصب عقب‌تر (بالا‌تر) از موقعیت مطلوب آن باشد بنابراین به نیرویی نیاز دارد تا بتواند جبران عقب‌ماندگی عملگر ماکرو را بنماید، بنابراین نیرویی در جهت حرکت به ماکرو اعمال می‌گردد. با توجه به توضیحات بیان شده، در کنترل فازی علاوه بر موقعیت، از ورودی دیگری که سرعت عملگر است نیز استفاده شده است. بنابراین می‌توان با بسط دادن این منطق به این قوانینی رسید که هنگامی که هد نصب جلوتر (پایین‌تر) از مکان مطلوب خود باشد باید نیرویی در خلاف جهت حرکتش به آن اعمال شود، حال این نیرو چقدر است؟ با توجه به ورودی دوم اگر سرعت در جهت حرکت باشد مقدار نیروی اعمالی بایستی زیاد باشد ولی اگر سرعت در خلاف جهت حرکت باشد، نیروی چندانی جهت اعمال در خلاف جهت حرکت ماکرو نیاز نیست. در سرعت‌های بالا که در خلاف جهت حرکت باشد می‌توان حتی نیرو را صفر در نظر گرفت. مقدار نیروی اعمالی علاوه بر میزان اختلاف موقعیت عملگر ماکرو به میزان سرعت عملگر ماکرو نیز بستگی دارد و با

توسط کنترل کننده PID انجام می‌شود و در بخش ۳-۲ از کنترل کننده فازی جهت بهبود رفتار سیستم استفاده می‌گردد.

### ۳-۱- کنترل کننده PID

حرکت سینوسی شکل عملگر ماکرو با توجه به پروفایل حرکتی ورودی آن توسط کنترل کننده‌ی PID کنترل می‌گردد. هرکدام از مقادیر بهره کنترل پس از تنظیم نمودن آن‌ها توسط بخش تنظیم خودکار نرم‌افزار متلب، در زیر آورده شده است:

$$P=92000 \quad , \quad I=30000 \quad , \quad D=279$$

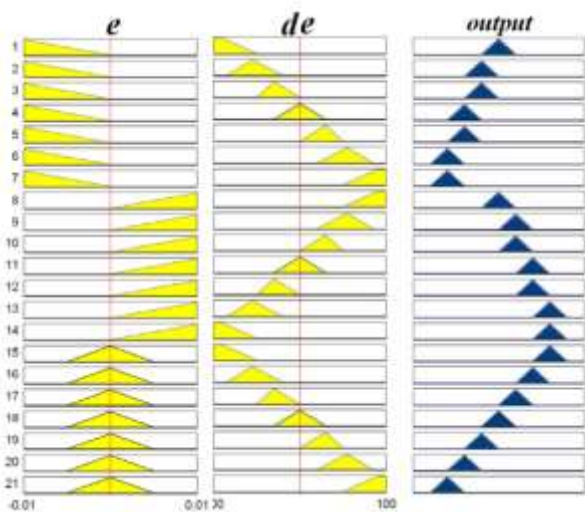
با توجه به اینکه موقعیت مطلوب به‌صورت یک تابع بر اساس زمان داده شده است می‌توان یک بازخور مکان برای کنترل موقعیت ماکرو به وجود آورد. اختلاف مکان مطلوب و مکان واقعی به‌عنوان داده‌ای برای کنترل کننده PID استفاده می‌گردد. این کنترل کننده با ورودی داده شده به آن، خروجی‌ای از جنس نیرو به داخل مدار وارد می‌نماید و باعث می‌گردد که اختلاف مکان واقعی از مکان مطلوب به صفر میل نماید. سپس برای عملگر میکرو با استفاده از یک بازخور، مکان واقعی از مکان مطلوب کسر می‌شود. مکان مطلوب توسط پروفایل ورودی، به آن داده می‌شود. اختلاف مکان به‌عنوان ورودی PID برای کنترل موقعیت عملگر میکرو عمل می‌نماید. ضرایب بهره کنترل PID برای کنترل موقعیت عملگر میکرو در زیر داده شده است.

$$P=45000 \quad , \quad I=10500 \quad , \quad D=-25$$

برای ایجاد نیروی تماسی در الگوریتم کنترلی، مقدار مسافت شروع کل حرکت از مقدار موقعیت هد نصب کم می‌شود. در هنگام برخورد با برد مدار چاپی حالت کنترل موقعیت به حالت کنترل نیرو تغییر پیدا می‌کند. سیستم کنترل بدین صورت است که تا یک مقدار معین از نیروی به وجود آمده که توسط حس‌گر نمایش داده می‌شود حالت کنترل موقعیت فعال است. ورودی کنترل کننده نیرو همان اختلاف نیروی مطلوب از واقعی است که توسط کنترل‌گر PID تنظیم می‌گردد. مقادیر بهره‌های کنترل کننده نیروی میکرو که در نرم‌افزار متلب تنظیم شده‌اند در زیر آورده شده است:

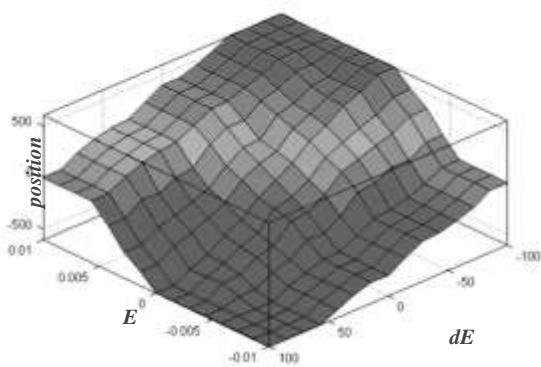
$$P=10 \quad , \quad I=650 \quad , \quad D=10$$

به‌طور خلاصه قوانین فازی کنترل موقعیت عملگرها در شکل ۶ آمده است.



شکل (۶): قوانین کنترل کننده فازی برای کنترل موقعیت عملگرها.

می‌توان سطح کنترل ایجاد شده را به‌صورت شکل ۷ نمایش داد.



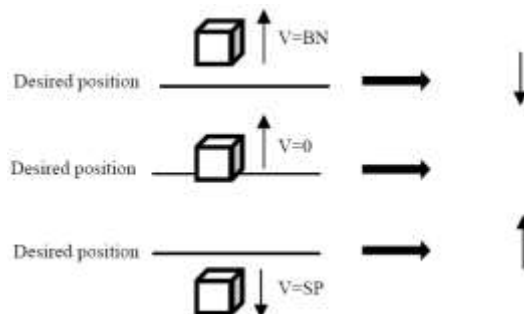
شکل (۷): سطح کنترل موقعیت توسط کنترل کننده فازی

### ۲-۲-۳- کنترل کننده نیروی تماس

کنترل نیروی تماس در بسیاری از کاربردها به‌طور موفقیت‌آمیزی مورد استفاده قرار گرفته است [۸-۱۱]. در کنترل فازی نیروی تماس، از دو ورودی اختلاف نیروی واقعی از مطلوب و مشتق اختلاف نیروی واقعی از مطلوب استفاده شده است.

در این کنترل که در شکل ۸ قوانین آن به‌صورت شماتیک آورده شده است، هنگامی که اختلاف نیرو واقعی از مطلوب بیشتر از صفر باشد، نیاز به اعمال نیرو در جهت موافق هست و بالعکس. همچنین اگر این اختلاف برابر صفر باشد آنگاه با توجه به مشتق اختلاف نیرو واقعی از مطلوب، نیرو

توجه به این مقادیر نیروی خروجی تعیین می‌شود. در شکل ۵ چند نمونه از حالات مختلف این قانون بیان گردیده است.



شکل (۵): چند نمونه از حالات قانون کنترل موقعیت فازی

از توابع عضویت مثلثی برای تعریف ورودی‌ها و خروجی استفاده شده است. تعداد توابع عضویت و بازه تغییرات آن‌ها در جداول ۱ الی ۳ آمده است.

### جدول (۱): توابع عضویت برای خطای موقعیت در

کنترل موقعیت.

تابع عضویت	مفهوم	حدود بازه
N	منفی	$-0/1, -0/1, -0/0/1, 0$
ZE	صفر	$-0/0/0/5, 0, 0/0/0/5$
P	مثبت	$0, 0/0/0/1, 0/0/1, 0/0/1$

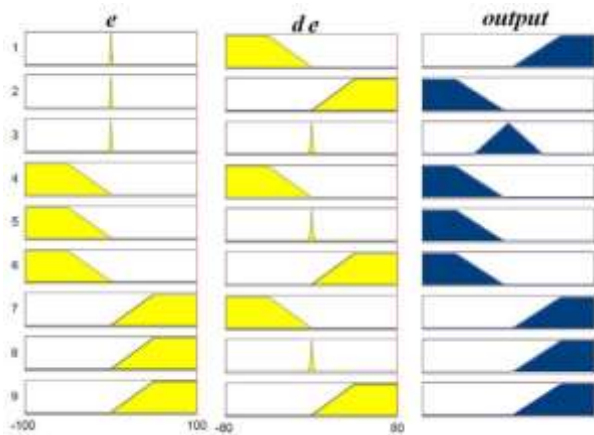
### جدول (۲): توابع عضویت برای سرعت در کنترل موقعیت

تابع عضویت	مفهوم	حدود بازه
BN	منفی بزرگ	$-100, -100, -90, -50$
MN	منفی متوسط	$-88, -55, -20$
SN	منفی کوچک	$-50, -30, 0$
ZE	صفر	$-30, 0, 30$
SP	مثبت کوچک	$0, 30, 50$
MP	مثبت متوسط	$20, 55, 85$
BP	مثبت بزرگ	$50, 90, 100, 100$

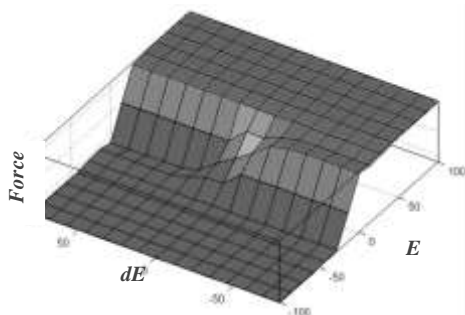
### جدول (۳): توابع عضویت برای خروجی در کنترل موقعیت

تابع عضویت	مفهوم	حدود بازه
BN	منفی بزرگ	$-800, -600, -400$
MN	منفی متوسط	$-600, -400, -200$
SN	منفی کوچک	$-400, -200, 0$
ZE	صفر	$-200, 0, 200$
SP	مثبت کوچک	$0, 200, 400$
MP	مثبت متوسط	$200, 400, 600$
BP	مثبت بزرگ	$400, 600, 800$

به طور خلاصه قوانین فازی کنترل نیروی تماس در شکل ۹ و سطح کنترل در شکل ۱۰ آمده است.



شکل (۹): قوانین کنترل کننده فازی برای کنترل نیرو



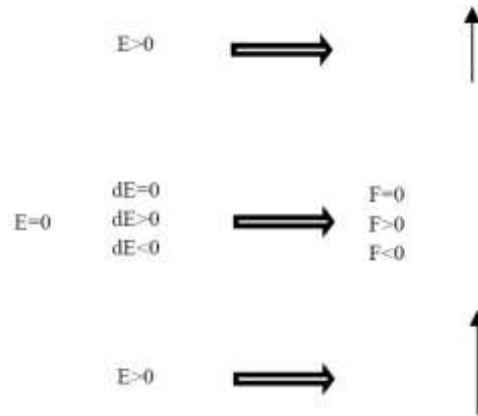
شکل (۱۰): سطح کنترل نیرو توسط کنترل کننده فازی

۴- شبیه سازی عملکرد کنترل کننده‌ها

در سازوکار پیشنهادی، عملگر میکرو هنگامی شروع به حرکت می‌نماید که سرعت عملگر ماکرو در قبل از توقف برابر با سرعت اولیه عملگر میکرو شود. سرعت ثابت عملگر میکرو در این سازوکار برابر با ۲ cm/s است، لذا این عملگر هنگامی شروع به حرکت می‌کند که عملگر ماکرو در انتهای حرکتش با شتاب منفی در حال متوقف شدن باشد و در زمانی که عملگر ماکرو به سرعت ۲ cm/s می‌رسد عملگر میکرو با توجه به سرعتی که از حرکت عملگر ماکرو می‌گیرد شروع به حرکت می‌کند بنابراین در این لحظه از نوسانات انتقال حرکت از ماکرو به میکرو کاسته می‌شود.

در بخش‌های ۱-۴ و ۲-۴ به ترتیب نتایج کنترل موقعیت و نیرو به وسیله کنترل کننده‌های PID و فازی و مقایسه آن‌ها با یکدیگر نمایش داده شده است و در بخش ۳-۴ نیز نتایج

جبرانی اعمال می‌گردد بدین صورت که اگر مشتق اختلاف برابر صفر باشد نیروی اعمال شده به هد نصب همان مقدار تنظیم شده ۱۰۰ gf است و نیاز به نیروی جبرانی نیست. ولی در صورتی که مشتق اختلاف بزرگ‌تر از صفر باشد نیاز به نیرویی مخالف نیروی اعمال شده است. اگر مشتق اختلاف کمتر از صفر باشد نیرویی موافق جهت جبران نیروی اعمال شده به برد مدار چاپی مورد نیاز است. دامنه هر کدام از توابع عضویت ورودی‌ها و توابع عضویت خروجی در جداول ۴ الی ۶ آمده است.



شکل (۸): چند نمونه از حالات قانون کنترل نیروی فازی.

جدول (۴): توابع عضویت برای اختلاف نیروی واقعی از مطلوب.

مفهوم	حدود بازه	تابع عضویت
منفی	-۱۵۰، -۱۵۰، -۵۰، ۰	N
صفر	-۱، ۰، ۱	ZE
مثبت	۰، ۵۰، ۱۵۰، ۱۵۰	P

جدول (۵): توابع عضویت برای مشتق خطای نیرو

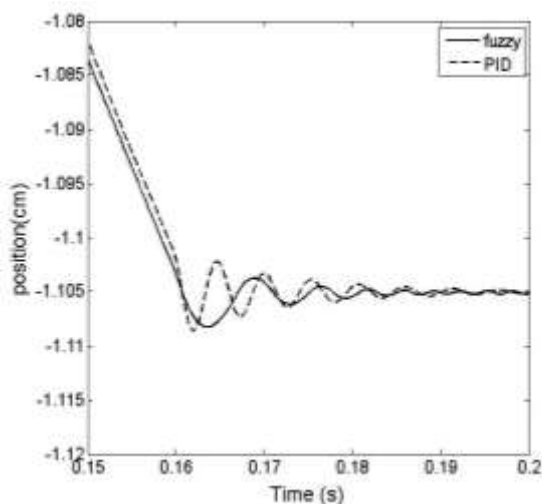
مفهوم	حدود بازه	تابع عضویت
منفی	-۸۰، -۸۰، -۴۰، -۰/۲	N
صفر	-۲، ۰، ۲	ZE
مثبت	۰/۲، ۴۰، ۸۰، ۸۰	P

جدول (۶): توابع عضویت خروجی کنترل نیرو

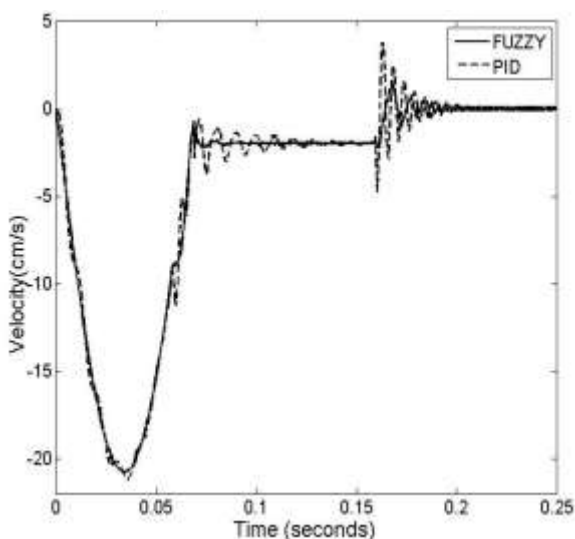
مفهوم	حدود بازه	تابع عضویت
منفی	-۱۵۰، -۱۵۰، -۶۰، -۵	N
صفر	-۴۰، ۰، ۴۰	ZE
مثبت	۵۰، ۶۰، ۱۵۰، ۱۵۰	P



می‌آید که در شکل ۱۴ مقایسه این پارامتر توسط کنترل‌کننده‌های فازی و PID به خوبی نمایش داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود اغتشاش و آشفتگی سرعت هد نصب در کنترل‌کننده فازی کمتر از کنترل‌کننده PID است و با توجه به اینکه عملگر میکرو بایستی با سرعت ثابت حرکت نماید، کنترل‌کننده فازی کنترل بهتری در عملگر میکرو جهت ثابت بودن سرعت دارد.



شکل (۱۳): موقعیت هد نصب در کنترل‌کننده‌های فازی و PID.



شکل (۱۴): سرعت هد نصب در کنترل‌کننده‌های فازی و PID

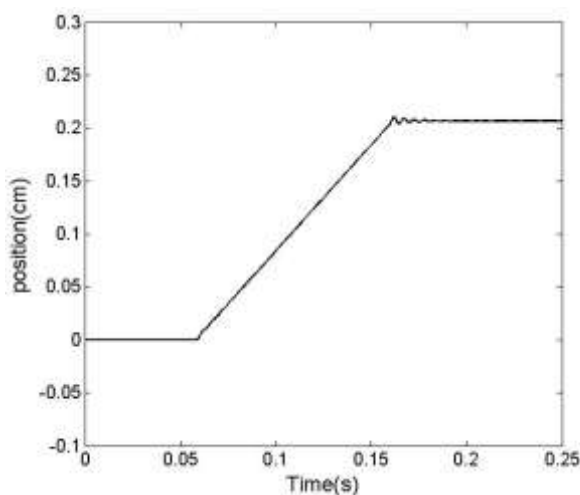
#### ۲-۴- کنترل نیرو

همان‌طور که در بخش قبل بیان گردید بایستی در جهت سالم ماندن و صدمه ندیدن قطعات، نیروی تماس در هنگام نصب کنترل گردد لذا باید مقدار مطلوب نیروی تماس به

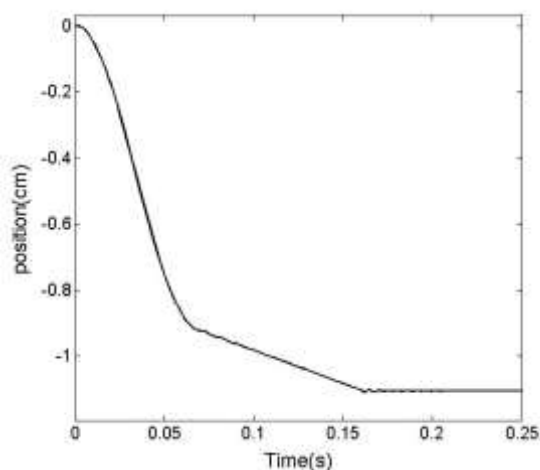
تغییرات سرعت میکرو بر روند کنترل موقعیت و نیروی تماس نشان داده شده است.

#### ۱-۴- کنترل موقعیت

نمودار حرکتی هرکدام از عملگرها در حالت‌های استفاده از کنترل فازی و PID در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آورده شده است.



شکل (۱۱): موقعیت نسبی عملگر میکرو نسبت به ماکرو در کنترل‌کننده‌های فازی و PID



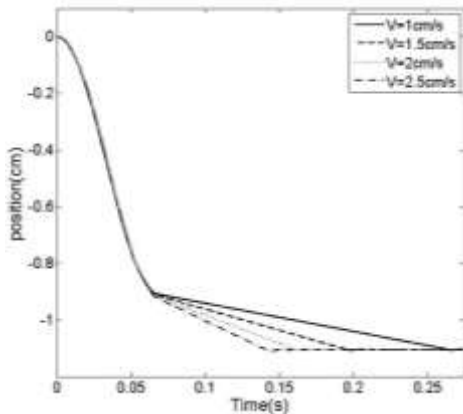
شکل (۱۲): موقعیت مطلق عملگر میکرو (هد نصب) در کنترل‌کننده‌های فازی و PID

در شکل ۱۳ موقعیت هد نصب با بزرگنمایی نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که شروع حرکت در عملگر میکرو در حالت استفاده از کنترل‌کننده PID دارای نوسان است که البته در کنترل‌کننده فازی، نوسانات کمتری دیده می‌شود. سرعت هد نصب نیز مانند موقعیت هد نصب، از برآیند سرعت‌های نسبی میکرو و مطلق ماکرو به دست

### ۳-۴- تغییرات نیروی تماس و موقعیت با مقدار سرعت برخورد

مقدار نیروی به وجود آمده در هنگام برخورد، به سرعت جسم برخوردکننده و همچنین سختی سطح برخورد بستگی دارد. در مبحث قبل مقدار نیرو و موقعیت هد نصب با داشتن سرعت عملگر میکرو برابر  $2 \text{ cm/s}$  به دست آمد. اکنون با تغییر سرعت‌های ثابت مختلفی از عملگر میکرو، مقدار نیروی تماس و همچنین موقعیت هد نصب بررسی می‌شود.

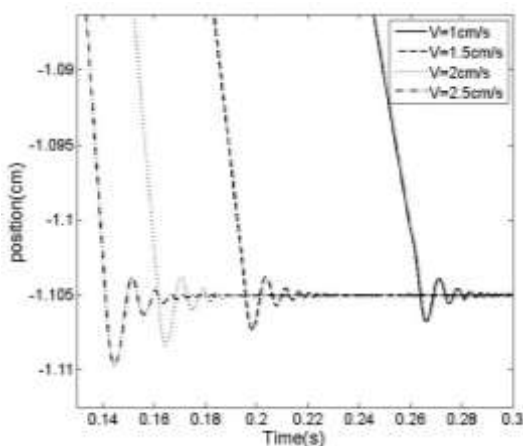
شکل ۱۶ موقعیت هد نصب در سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش سرعت، هد نصب سریع‌تر به موقعیت دلخواه خود می‌رسد.



شکل (۱۶): موقعیت هد نصب در سرعت‌های مختلف

برخورد در کنترل کننده فازی

با بررسی دقیق‌تر موقعیت هد نصب در شکل ۱۷، افزایش دامنه در سرعت‌های بالاتر کاملاً مشهود است.

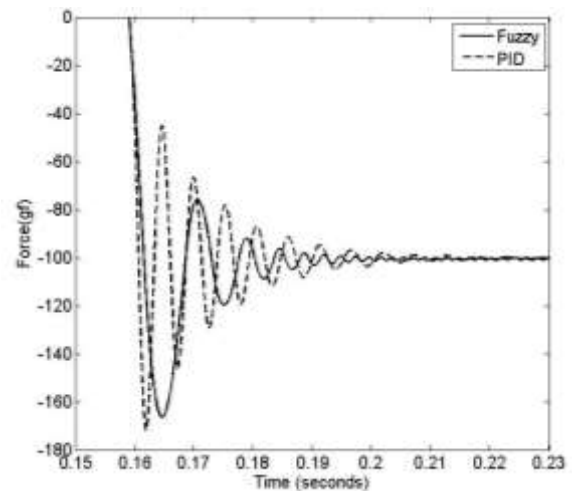


شکل (۱۷): موقعیت هد نصب در سرعت‌های مختلف

برخورد در کنترل کننده فازی (بزرگنمایی شده)

سیستم داده شود که در این سیستم کنترلی این مقدار برابر  $100 \text{ gf}$  است [۲].

با توجه به شکل ۱۵ مقدار نیروی تماس در کنترل کننده PID نسبت به فازی بیشتر است و دیرتر نیز به حالت پایدار می‌رسد. در ابتدای حرکت به علت نبود نیروی تماس طبیعتاً مقدار نیروی تماس صفر است. بیشترین مقدار در کنترل فازی برابر  $165 \text{ gf}$  و در کنترل کننده PID این مقدار برابر با  $172 \text{ gf}$  است.



شکل (۱۵): نیروی تماس در کنترل کننده‌های فازی و PID

به طور خلاصه می‌توان میزان بهبود کنترل کننده فازی نسبت به PID را در جدول ۷ مشاهده نمود. ردیف سوم جدول ۷ درصد بهبود کنترل کننده فازی را نسبت به کنترل کننده PID بیان می‌کند.

جدول (۷): مقایسه کنترل کننده فازی با PID

فرکانس نوسانات هد نصب (Hz)	زمان توقف در نصب (sec)	بیشترین سرعت در برخورد (cm/sec)	بیشترین نیروی برخورد (gf)
۲۰۰	۰/۲	۳/۷	۱۷۳
۱۱۱	۰/۱۸	۱/۱	۱۶۳
٪ ۴۴/۵	٪ ۱۰	٪ ۷۰/۳	٪ ۵/۷۸

با بررسی جدول ۷ مشخص می‌شود که کنترل کننده فازی تمامی معیارهای عملکردی را بهبود داده است. با کنترل مناسب نیرو در کنترل کننده فازی نوسانات هد نصب تقریباً نصف شده است که باعث کاهش سرعت برخورد و همچنین نیروی برخورد شده است.

با توجه به روند مشاهده شده در جدول ۸، کاهش زمان نشست در تضاد با کاهش بیشترین نیرو است. برای بهینه کردن هم‌زمان زمان نشست و بیشترین نیرو، این دو معیار به بازه صفر تا یک نگاشت می‌شود و منحنی‌های حاکم بر رفتار آن‌ها میان‌یابی می‌شوند.

معادله (۵) نحوه تغییرات زمان نشست نرمالایز شده را با توجه به سرعت بیان می‌کند.

$$t_{nor.} = 0.4545 v^2 - 2.2273 v + 2.75 \quad (5)$$

معادله (۶) نحوه تغییرات بیشترین نیروی نرمالایز شده را با توجه به سرعت بیان می‌کند.

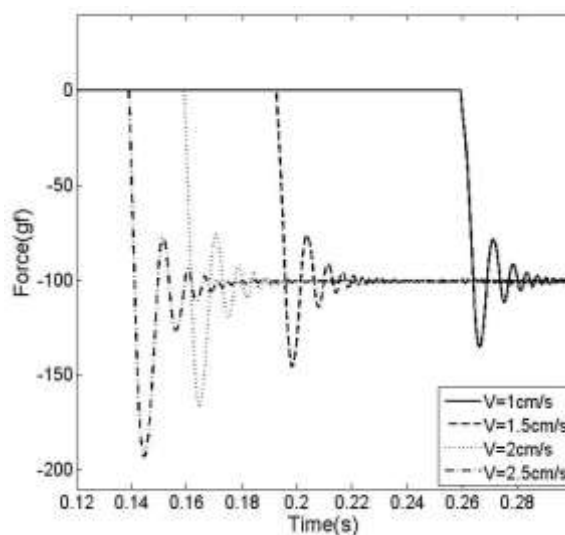
$$x(t) = x_1(t) - x_2(t) \quad f_{nor.} = 0.2727 v^2 - 0.2818 v + 0.0045 \quad (6)$$

با توجه به این که هر دو معادله نرمالایز شده‌اند، مقدار بهینه سرعت با در نظر گرفتن دو معادله (۵) و (۶) به صورت هم‌زمان به دست می‌آید. مقدار بهینه سرعت برابر با  $1/6726 \text{ m/s}$  است.

#### ۵- نتایج و جمع‌بندی

مهم‌ترین عامل در شکست قطعات الکترونیکی نیروی تماس کنترل نشده است. کنترل نیروی ایدئال زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار بیشترین نیرو اختلاف چندانی با مقدار پایدار نداشته باشد. علاوه بر این پارامتر، زمان رسیدن به پایداری نیرو نیز حائز اهمیت است، به عبارت دیگر هرچه قدر مقدار این زمان کمتر باشد کنترل بهتری انجام شده است. در این پژوهش مقدار بیشترین نیرو در کنترل‌کننده فازی نسبت به مقدار مشابه در کنترل‌کننده PID به میزان  $5/78$  درصد کاهش پیدا کرده است. علاوه بر این زمان توقف هد نصب  $10$  درصد کمتر شده است و فرکانس نوسانات در زمان برخورد هد نصب  $44/5$  درصد کاهش یافته است. بنابراین، کنترل‌کننده فازی عملکرد بهتری نسبت به کنترل‌کننده PID داشته و اغتشاشات نیرویی کمتری در سیستم به وجود می‌آورد. با بررسی نحوه تغییرات سرعت برخورد با بیشترین نیرو و زمان نشست، مقدار بهینه سرعت برخورد مقدار  $1/6726 \text{ m/s}$  به دست آمد.

شکل ۱۸ مقدار نیروی تماسی در سرعت‌های مختلف برخورد را بررسی می‌کند. اگر سرعت عملگر میکرو کمتر از  $2 \text{ cm/s}$  باشد بیشترین مقدار نیروی تماس کاهش می‌یابد. برای سرعت‌های عملگر بیشتر از  $2 \text{ cm/s}$ ، بالاترین مقدار نیروی تماس افزایش چشم‌گیری دارد.



شکل (۱۸): مقدار نیروی تماسی در سرعت‌های مختلف برخورد در کنترل‌کننده فازی

#### ۴-۴- انتخاب بهینه سرعت برخورد

در بخش قبل مشاهده شده که با افزایش سرعت هد نصب، زمان رسیدن آن به PCB کاهش می‌یابد و در عین حال نیروی تماس افزایش می‌یابد. جدول ۸ نحوه تغییرات را به طور خلاصه نشان می‌دهد.

جدول (۸): تغییرات زمان نشست هد نصب و بیشترین نیرو با افزایش سرعت هد نصب

سرعت	زمان نشست	بیشترین نیروی تماس
۱	۰/۳	۱۴۰
۱/۵	۰/۲۳	۱۵۰
۲	۰/۲۱	۱۷۰
۲/۵	۰/۱۹	۱۹۵

7. Selzo M. R., Moore C. J., Hossain M. M., Palmeri M. L., Gallippi C. M., "On the quantitative potential of viscoelastic response (VisR) ultrasound using the one-dimensional mass-spring-damper model," *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, Vol. 63, pp. 1276-1287, 2016.
8. Sala G., Valente G., Formentini A., Papini L., Gerada D., Zanchetta P., Tani A., Gerada C., "Space vectors and pseudoinverse matrix methods for the radial force control in bearingless multisector permanent magnet machines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 65, pp. 6912-6922, 2018.
9. Vidal C., Infante V., and Vilacaca P., "Monitoring of the mechanical load and thermal history during friction stir channelling under constant position and constant force control modes," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 49, pp. 323-334, 2020.
10. Rani M., Kumar N., Singh H. P., "Motion/force control scheme for electrically driven cooperative multiple mobile manipulators," *Control Engineering Practice*, Vol. 88, pp. 52-64, 2019.
11. Sangdani M. H., Tavakolpour-Saleh A. R., "Modeling and Control of a Vision-Based Target Tracker Robot with Active Force Control Capability," *Journal of Aerospace mechanics*, Vol. 13, pp. 89-98, 2016. (In Persian)

## ۶- مراجع

1. Lee D.-Y. and Cho H., "Precision force control via macro/micro actuator for surface mounting system, in: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*," IEEE, pp. 2227-2232, 2002.
2. Lee D.-Y., Jang K.-N., and Cho H., "A visual servoing method for high-precision chip mounting technology," in: *Optomechatronic Systems IV, International Society for Optics and Photonics*, pp. 295-305, 2003.
3. Makita S., Kadono Y., Maeda Y., Miura S., Kunioka I., and Yoshida K., "Manipulation of submillimeter-sized electronic parts using force control and vision-based position control," in: *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, pp. 1834-1839, 2007.
4. Shim J. H. and Cho Y.-I., "Intelligent force control of a microchip packaging system," in: Y. Katagiri (Ed.) *Optomechatronic Micro/Nano Devices and Components*, pp. 109.101-109, 2006.
5. Shim J. H., Im Cho Y., "Intelligent Force Control of a Flip Chip Mounting System," *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, 4 (2004) 316-321.
6. Adediji A. C., Essegbey J., "Fuzzy Logic-based Robust Control of a Flexible two-mass System (1990 ACC Benchmark Problem)," in: *Midwest Artificial Intelligence and Cognitive Science Conference*, Citeseer, 2012.