

## کنترل خمینه لغزشی دینامیکی برای میکروسکوپ تونلی روبشی

این مقاله به کنترل مسیر حرکت روبش در میکروسکوپ تونلی روبشی می پردازد که می تواند در نانو فناوری، مانند جابجایی در مقیاس نانو با استفاده از میکروسکوپیهای پروب روبشی کاربرد داشته باشد. بدین منظور دو رویکرد برای کنترل ارائه شده است. اولی روش کنترل وارونگی مبتنی بر مدل است که به منظور مقایسه نتیجه خمینه لغزشی دینامیکی با یک مرجع موثق، ذکر شده است. دومی کنترل خمینه لغزشی دینامیکی است. در این مقاله نشان داده شده است که کنترل مد لغزشی برای میکروسکوپ تونلی روبشی قابل اعمال نیست. کنترل خمینه لغزشی دینامیکی امکان اعمال مد لغزشی را برای هر مدل غیر مینیمم فازی که صفرهایی در نیمه سمت راست صفحه مختلط دارد را فراهم می سازد. مزیت اصلی خمینه لغزشی دینامیکی همانند مد لغزشی، مقاوم بودن آن در برابر اغتشاش، نا معینی و دینامیکهای مدل نشده می باشد که فرمول بندی کامل آن برای حالت مدل‌های خطی ارائه شده است. در مقایسه نتایج دو روش کنترل ارائه شده مشاهده می شود که خمینه لغزشی دینامیکی نتیجه بهتری نسبت به کنترل وارونگی مبتنی بر مدل از خود نشان می دهد.

مجتبی شانی<sup>۱</sup>

کارشناس ارشد

محسن بهرامی<sup>۲</sup>

استاد

محرم حبیب نژاد کورایم<sup>۳</sup>

استاد

بهروز ابراهیمی<sup>۴</sup>

استادیار

واژه های راهنما: میکروسکوپ تونلی روبشی (STM)، کنترل مد لغزشی، کنترل خمینه لغزشی دینامیکی، کنترل وارونگی مبتنی بر مدل، غیر مینیمم فاز

### ۱- مقدمه

از زمان معرفی STM در سال ۱۹۸۱ و AFM در سال ۱۹۸۵ انواع متنوعی از میکروسکوپیهای بر پایه پروب با عنوان SPM توسعه یافته است [۱]. میکروسکوپ تونلی روبشی (STM) دستگاهی است که برای بررسی ساختار و برخی از خواص سطوح مواد رسانا، مواد بیولوژیکی که تا حدی رسانا هستند و همچنین لایه های نازک نارسانا که روی زیر لایه رسانا نشانده شده اند، در حد ابعاد زیر نانومتر، بکار می رود [۲]. حرکت روبشی

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران mojtaba.shani@yahoo.com

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر mbahrami@aut.ac.ir

<sup>۳</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران hkorayem@iust.ac.ir

<sup>۴</sup> استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری ebrahimi@aut.ac.ir

در میکروسکوپ تونلی روبشی توسط یک اسکنر (رویشگر) پیزو تیوب انجام می شود [۳]. بستگی به نوع ساخت، پروب یا به پیزو الکتریک تیوب متصل است و یا نمونه به انتهای سطح آزاد پیزو الکتریک تیوب متصل شده است [۴].

ابتدا به چند مورد از کارهایی که در زمینه کنترلی انجام شده است اشاره می شود. Gawthrop و همکارانش [۴] به منظور جلوگیری از رزونانس از کنترل مبتنی بر مدل فیزیکی استفاده کرده اند. Tan و همکارانش [۵] از کنترل PID استفاده کرده اند. مزیت اصلی این روش در این است که قادر است بر اثر خزش و پسماند فائق آید و در عین سادگی، دقت قابل قبولی دارد. Devasia و همکارانش [۶] سابقه و پیشینه تحقیق در زمینه موضوعات کنترلی مربوط به موقعیت دهی در مقیاس نانو را آورده اند و مواردی از استفاده کنترل مد لغزشی یا خمینه لغزشی دینامیکی<sup>۱</sup> برای موقعیت دهی در میکروسکوپهای پروب روبشی گزارش کرده اند. Tien و همکارانش [۷] و Kim و همکارانش [۸] در مواردی که حرکت میکروسکوپ متناوب بوده است از کنترل تکرار شونده استفاده کرده اند این روش باعث کاهش اثر پسماند شده است. Bhikkaji و همکارانش [۹] از روش کنترل بدون سنسور استفاده کرده اند در این روش با توجه به اینکه ۲ جفت پیزو الکتریک در ساختار پیزو تیوب وجود دارد از یک جفت به عنوان محرک و از جفت دیگر به عنوان سنسور استفاده می شود. Tan و Baras [۱۰] از کنترل تطبیقی استفاده کرده اند. Sebastian و Salapaka [۱۱] در مواردی که تغییرات پارامترها و دینامیکهای مدل نشده و اثر کوپلینگ مد نظر بوده است از کنترل مقاوم استفاده کرده اند. بشاش و جلیلی [۱۲] و Li و Bechhoefer [۱۳] از کنترل پیش خور استفاده کرده اند در این روش از معکوس مدل استفاده می شود تا ورودی کنترلی مطلوب تولید شده و به مدل اعمال گردد. Liawa و همکارانش [۱۴] کنترل مد لغزشی را به محرک پیزو الکتریک اعمال کرده اند. بهرامی و ابراهیمی [۱۵] طراحی کنترل مد لغزشی را برای وسایل پرنده با مدل مینیمم فاز، انجام داده اند.

در این مقاله در بخش ۲ اساس کار میکروسکوپ تونلی روبشی<sup>۲</sup> شرح داده شده است. در بخش ۳ مدل دینامیکی اسکنر میکروسکوپ تونلی روبشی آمده است. در بخش ۴ روش کنترل وارونگی مبتنی بر مدل<sup>۳</sup> برای میکروسکوپ تونلی روبشی ذکر شده است. در بخش ۵ کنترل مد لغزشی معمولی در فرم رگولاتور و نتیجه آن برای میکروسکوپ تونلی روبشی بیان شده است. در بخش ۶ کنترل خمینه لغزشی دینامیکی برای میکروسکوپ تونلی روبشی و مقایسه نتیجه آن با کنترل وارونگی مبتنی بر مدل آورده شده است و نهایتاً مقاله با نتیجه گیری در بخش ۷ به پایان رسیده است.

اهمیت عملی و صنعتی و کاربردی این مقاله، اعمال کنترل خمینه لغزشی دینامیکی بر یک مدل غیر مینیمم فاز است که علاوه بر نانو تکنولوژی در سایر صنایع استراتژیک مانند هوافضا نیز می تواند کاربرد داشته باشد. اهمیت علمی این مقاله در این است که راه را برای اعمال کنترل خمینه لغزشی دینامیکی برای مدل‌های خطی غیر مینیمم فاز باز می کند همچنین از این مقاله می توان برای اعمال کنترل خمینه لغزشی دینامیکی برای مدل‌های غیر خطی غیر مینیمم فاز به عنوان پژوهش‌های بعدی نیز استفاده کرد.

<sup>1</sup> Dynamic Sliding Manifold

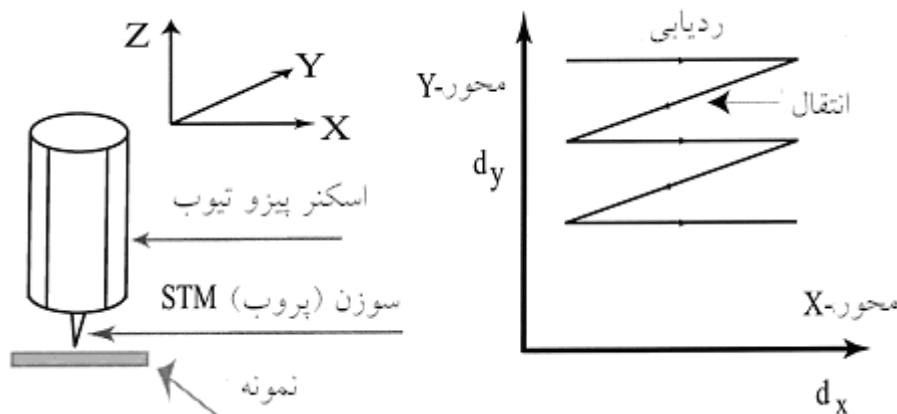
<sup>2</sup> Scanning Tunneling Microscope

<sup>3</sup> Model-Based Inversion

نوآوری ارائه شده در این مقاله، کنترل خمینه لغزشی دینامیکی و کنترل مد لغزشی معمولی برای میکروسکوپ تونلی روبشی با استفاده از معیار  $ITAE$ <sup>۱</sup> می باشد و نیز مقایسه نتیجه خمینه لغزشی دینامیکی با کنترل مد لغزشی معمولی و کنترل وارونگی مبتنی بر مدل می باشد. همچنین تبدیل فرمول بندی کامل کنترل خمینه لغزشی دینامیکی از حالت غیر خطی به خطی می باشد.

## ۲- اساس کار میکروسکوپ تونلی روبشی

عملیات روبش معمولی شامل دو بخش می شود ۱- بخش اول که در حین آن مسیر حرکت مطلوب از قبل آماده شده است و باید به دقت ردیابی شود. این اغلب به عنوان بخش روبش فعال یا بخش ردیابی<sup>۲</sup> خروجی، اشاره می شود. ۲- بخش دوم که در حین آن مسیر حرکت ردیابی زیاد مهم نیست و در عوض، خروجی باید به مقدار از قبل معین شده بر گردانده شود به طوریکه روبش فعال می تواند تکرار شود. این بخش ردیابی دوباره یا بخش خروجی در حال انتقال<sup>۳</sup> است. این روبش فعال و بخش ردیابی دوباره در عملیات جاروب کردن، تکرار می شود. به طوریکه که مسیر حرکت در بخش روبش فعال با توجه به کاربرد، مشخص شده می باشد. باید توجه شود که مسیر حرکت خروجی در حین ردیابی دوباره اغلب تعیین شده نیست و به منظور بهینه سازی عملکرد می تواند انتخابی باشد [۱۶]. اساس عملیات STM در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- اساس اسکنر میکروسکوپ تونلی روبشی [۱۶]

اسکنر پیزو تیوب، سوزن<sup>۴</sup> را بر روی سطح نمونه حرکت می دهد تا جریان تونلی (برای ولتاژ اعمالی) بین سوزن STM و نمونه اندازه گیری شود. بنابراین جریان تونلی اندازه گیری شده به طور مستقیم مربوط به خصوصیات سطح نمونه است و برای شکل دادن تصویر خصوصیات سطح نمونه استفاده می شود. حساس ترین قطعه STM اسکنر پیزو است که پروپ STM را روی سطح نمونه موقعیت دهی می کند. اسکنر پیزو، پروپ STM را موازی سطح نمونه (محورهای X-Y) و عمود بر سطح نمونه (محور Z) می تواند حرکت دهد.

<sup>1</sup> Integral of time multiplied by absolute magnitude of error

<sup>2</sup> Tracking

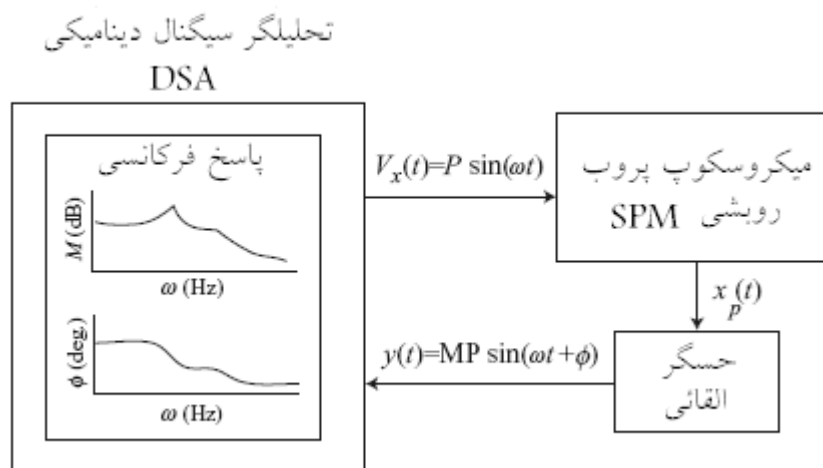
<sup>3</sup> Transition

<sup>4</sup> Tip

خطا در موقعیت دهی سوزن STM می تواند به اغتشاش در تصاویر اکتسابی منجر شود. به ویژه ارتعاشات القا شده در حین حرکت می تواند به خطاهای قابل توجه موقعیت دهی و اغتشاش در تصویر، در عملیات با سرعت بالای STM منجر شود. تکنیکهای اصلاح بعدی (پردازش تصویر) برای پاک کردن اثر خطای موقعیت دهی می تواند اعمال شود. اگر چه رویکردهای پردازش بعضاً ممکن است باعث بر خورد سوزن به نمونه گردد و نمی تواند استفاده شود. به عنوان مثال در عملیتهای ساخت نانو، جبران توسط رویکردهای پردازشی بعدی از اعوجاج در قطعه ساخته شده نمی تواند جلوگیری کند. علاوه بر این خطای موقعیت دهی اگر بزرگ باشد می تواند به آسیب نمونه یا سوزن (حتی در عملیتهای تصویر برداری) منجر شود. بنابراین مهم است که موقعیت دهی پروب STM در حین روبش سطح نمونه به دقت انجام گیرد. [۱۶]

### ۳- مدل اسکنر میکروسکوپ تونلی روبشی

دینامیک اسکنر STM در جهت x با استفاده از دستگاه تحلیلگر دینامیکی سیگنال<sup>۱</sup> (DSA) به طور تجربی مدل شده است. یک ولتاژ ورودی  $\hat{u}(t)$  تولید شده با DSA به منظور راندن اسکنر STM در جهت x با دامنه جابجایی میکرومتر اعمال می شود. سیگنال موقعیت اندازه گیری شده توسط یک حسگر القایی ادی-کارنت که قدرت تفکیک پذیری دینامیکی ایستای ۵ آنگستروم را دارد به DSA بازخورد داده می شود. پاسخ فرکانسی تجربی به دست آمده توسط DSA برای تعیین مدل سیستم استفاده می شود. فرآیند تجربی تعیین پاسخ فرکانسی محرک پیرو تیوب<sup>۲</sup> به طور شماتیکی در شکل (۲) نشان داده شده است.

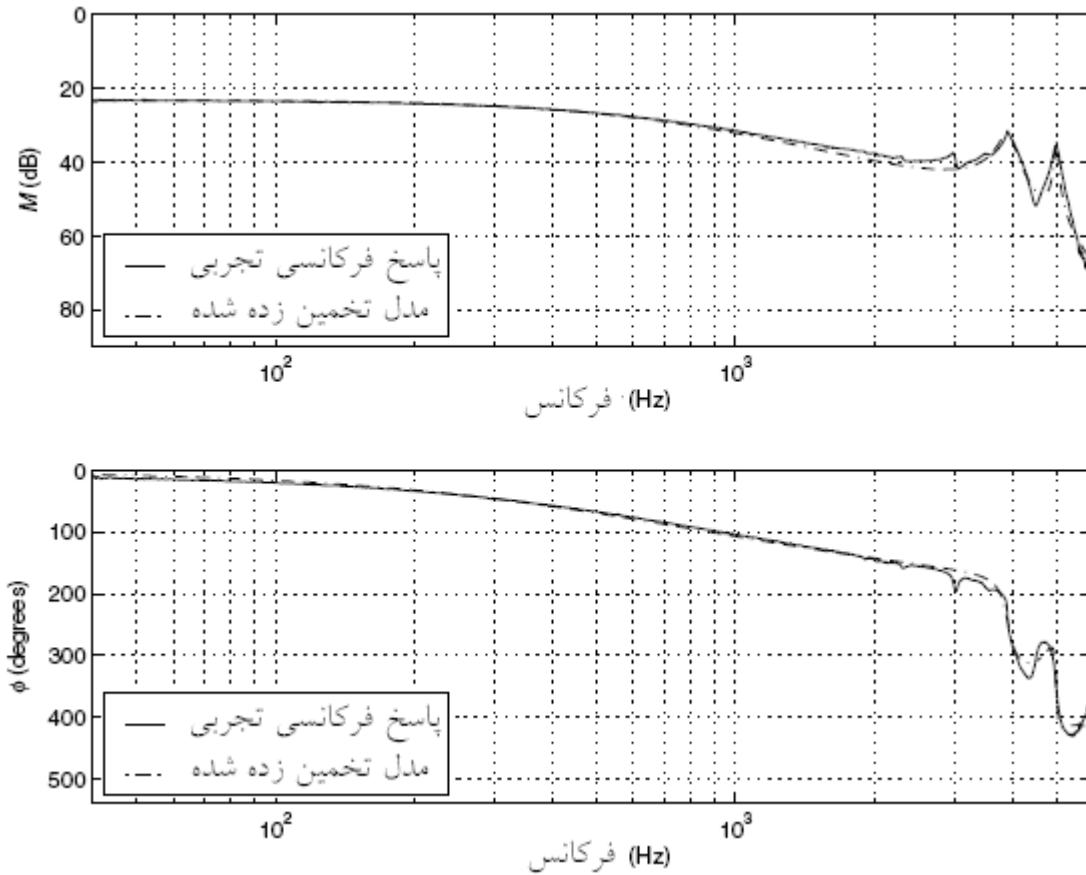


شکل ۲- نمای شماتیکی فرآیند بدست آوردن مدل [۳]

نمودارهای تجربی ضریب دامنه و فاز، نسبت به فرکانس برای تحریک کننده پیرو تیوب در راستای محور x به اضافه پاسخ فرکانسی مدل تخمین زده شده در شکل (۳) رسم شده است. خط پیوسته بیانگر داده های تجربی و خط نقطه نتیجه مدل تخمین زده شده می باشد [۳].

<sup>1</sup> Dynamic Signal Analyzer

<sup>2</sup> Piezo-Tube Actuator



شکل ۳- نمودار بوده تحریک کننده پیزو تیوب [۳]

تابع تبدیل اسکندر STM در جهت x به صورت زیر یافته شده است.

$$\frac{d_x(s)}{\hat{u}(s)} = K_{zp} \frac{\prod_{q=1}^4 (s - z_q)}{\prod_{r=1}^6 (s - p_r)} = G_{STM} \quad (1)$$

$\hat{u}$  در معادله (۱) ولتاژ ورودی (با واحد ولت) و  $d_x$  موقعیت اسکندر در جهت x (با واحد آنگستروم) می باشد. همچنین مقدار بهره در تابع تبدیل  $K_{zp} = 0.2928$  است و صفرهای تابع تبدیل راست صفحه مختلط قرار دارد و مدل غیر مینیمم فاز است. قطبهای تابع تبدیل عبارتند از  $z_q = \{0.9274 \pm 4.1659i, -0.2484 \pm 3.0434i\}$  می باشند. همانطور که مشخص است دو صفر در سمت راست صفحه مختلط قرار دارد و مدل غیر مینیمم فاز است. قطبهای تابع تبدیل عبارتند از  $p_r = \{-0.0188 \pm 3.1326i, -0.0857 \pm 2.4570i, -0.7263, -0.3198\}$  و متغیر لاپلاس  $s$  با واحد  $\frac{rad}{10^{-4} sec}$  (به منظور کاهش خطاهای عددی در شبیه سازی) می باشد. پس از محاسبه تابع تبدیل، یک فیلتر پائین گذر مرتبه یک با فرکانس قطع ۷۵۰ هرتز ( $G_f = a/(s+a)$ ) به منظور افزایش پایداری به مدل اضافه شده است. نهایتاً تابع تبدیل کلی استفاده شده برای طراحی مسیر حرکت بهینه روبش در معادله (۲) داده شده است. [۱۶]

$$\frac{d_x(s)}{u(s)} = \frac{a}{s+a} G_{STM} := G_{sys}, \quad a = 0.4712 \quad (2)$$

### ۳-۱- نمایش فضای حالت مدل اسکندر میکروسکوپ تونلی روبشی

نمایش فضای حالت سیستم با مدل معادله (۲) به صورت زیر است.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (3)$$

که ماتریس های  $A$  و  $B$  و  $C$  در معادله (۴) مشخص است.

$$A = \begin{bmatrix} -1.2551 & -16.3151 & -18.5534 & -64.9970 & -62.4928 & -13.7771 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.4712 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.47124 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C = [0 \quad 0.2928 \quad -0.3976 \quad 7.7922 \quad -2.4137 \quad 49.7190 \quad 0]$$

و

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5 \quad x_6 \quad x_7]^T \quad (5)$$

که در آن  $x_7$  حالت مربوط به فیلتر می باشد. [۱۶]

### ۴- کنترل وارونگی مبتنی بر مدل

در نظر بگیرید مدل یک سیستم نا متغیر با زمان به صورت معادله (۳) توصیف شده باشد که باید سیستمی با معادله زیر را ردیابی کند.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{ref}(t) &= Ax_{ref}(t) + Bu_{ff}(t) \\ y_{track}(t) &= Cx_{ref}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

با استفاده از رویکردهای وارونگی مبتنی بر مدل، سیستم (۳) باید به فرم ردیابی خروجی تبدیل شود. بدین منظور از تغییر مختصات  $\Phi$  به صورت معادله (۷) استفاده می شود. ماتریس  $\Phi$  سیستم معادله (۳) را به سیستم معادله (۹) تبدیل می کند به عبارت دیگر ماتریس تبدیل همانندی می باشد و نقش  $M$  در معادله (۱۹) را دارد.

$$\Phi \begin{bmatrix} \xi \\ \eta_s \\ \eta_u \end{bmatrix} = x \quad (7)$$

و قانون کنترلی به صورت معادله (۸) تعریف می شود.

$$u_{ff} = \hat{B}_s \eta_s(t) + \hat{B}_u \eta_u(t) + \hat{B}_\xi \Delta_d(t) \quad (۸)$$

$\eta_u$  و  $\eta_s$  در مورد میکروسکوپ تونلی روبشی ماتریس های  $2 \times 1$  می باشند که مولفه های بردار حالت در فرم ردیابی خروجی می باشند و ضرایب آن با مشخص شدن ماتریس  $\Phi$  معین می شود. سیستم (۳) در فرم ردیابی خروجی به صورت معادلات (۹) می باشد.

$$\begin{aligned} \dot{\xi}(t) &= \dot{\xi}_d(t) \\ \begin{bmatrix} \dot{\eta}_s \\ \dot{\eta}_u \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_s & 0 \\ 0 & A_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_s \\ \eta_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_s \\ B_u \end{bmatrix} \Delta \\ y &= \hat{C} \xi \end{aligned} \quad (۹)$$

به طوریکه در مورد میکروسکوپ تونلی روبشی  $\xi$  به صورت زیر تعریف می شود.

$$\xi := \left[ y \quad \frac{dy}{dt} \quad \frac{d^2 y}{dt^2} \right]^T \quad (۱۰)$$

و  $\Delta$  به صورت زیر است.

$$\Delta := \left[ y \quad \frac{dy}{dt} \quad \frac{d^2 y}{dt^2} \quad \frac{d^3 y}{dt^3} \right]^T \quad (۱۱)$$

$y_d$  خروجی مطلوب می باشد که باید ردیابی شود. با جاگذاری  $y_d$  به جای  $y$  در معادلات (۱۰) و (۱۱) می توانیم  $\xi_d$  و  $\Delta_d$  را محاسبه کنیم. پس از انجام محاسبات لازم، مسیر حرکت مرجع به صورت زیر اثبات می شود.

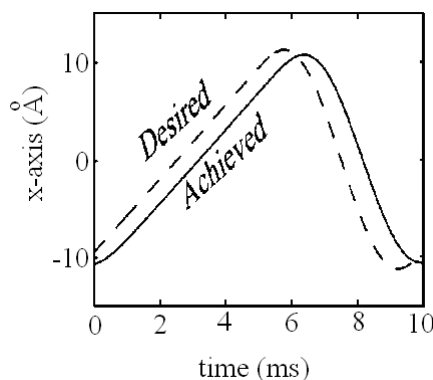
$$x_{ref}(t) = \begin{cases} \Phi \begin{bmatrix} e^{A_s(t-t_0)} \eta_s(t_0) + \int_{t_0}^t e^{A_s(t-\tau)} B_s \Delta d\tau \\ e^{-A_u(t_i-t)} \eta_u(t_i) - \int_t^{t_i} e^{-A_u(\tau-t)} B_u \Delta d\tau \end{bmatrix} & t_0 < t < t_i \\ e^{A(t-t_i)} x(t_i) + \int_{t_i}^t \{ e^{A(t-\tau)} B u(\tau) \} d\tau & t_i \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (۱۲)$$

برای اثبات معادله (۱۲) و جزئیات بیشتر می توان به [۱۶] مراجعه کرد. نتیجه حاصل از روش وارونگی مبتنی بر مدل برای حالتی که زمان رفت و برگشت یکسان در نظر گرفته شده است در شکل (۴) نشان داده شده است.

در شکل (۴) قسمت مربوط به ردیابی (از لحظه  $t_0 = 0$  تا  $t_i = 6$  میلی ثانیه) خط راست می باشد و قسمت مربوط به انتقال (از لحظه  $t_i = 6$  تا  $t_f = 10$  میلی ثانیه) یک معادله درجه ۵ به صورت معادله (۱۳) می باشد.

$$y(t) = \sum_{i=0}^5 a_i t^i \quad (۱۳)$$

ضرایب  $a_i$  با توجه به مختصات نقاط ابتدا و انتها، قابل محاسبه است. همانطور که در شکل (۴) مشخص است در نتیجه حاصل از روش کنترل وارونگی مبتنی بر مدل، خطای حالت ماندگار وجود دارد. در صورتی که هدف ردیابی دقیق ورودی باشد در این مورد، این روش قادر به حذف خطای ماندگار نمی باشد.



شکل ۴- نتیجه حاصل از روش کنترل وارونگی مبتنی بر مدل [۱۶]

## ۵- کنترل مد لغزشی معمولی

در نظر بگیرید مدل خطی اسمی یک سیستم به صورت زیر داده شده باشد.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (14)$$

به طوریکه مرتبه ماتریس  $B$ ،  $m$  می باشد و  $(A, B)$  کنترل پذیر می باشند. تعریف تابع سوئیچ مرتبط به صورت معادله (۱۵) می باشد.

$$\hat{s}(t) = Sx(t) \quad (15)$$

قانون ورودی کنترلی به صورت معادله (۱۶) می باشد.

$$u = -\Omega \text{sign}(\hat{s}(t)) \quad (16)$$

معادله (۱۴) در فرم منظم به صورت معادله (۱۷) بیان می شود.

$$\dot{z}_1(t) = A_{11}z_1(t) + A_{12}z_2(t) \quad (17)$$

$$\dot{z}_2(t) = A_{21}z_1(t) + A_{22}z_2(t) + B_2u(t)$$

و تابع لغزش به صورت معادله (۱۸) است.

$$\hat{s}(t) = S_1z_1(t) + S_2z_2(t) \quad (18)$$

به طوریکه تغییر مختصات با ماتریس متعامد  $M$  تعریف می شود.

$$z(t) = Mx(t) \quad (19)$$

ماتریس  $M$  فرمهای متنوعی می تواند داشته باشد. از آنجایی که مرتبه ماتریس  $B$  را  $m$  فرض می کنیم می

توانیم ماتریس  $B$  را به صورت معادله (۲۰) تجزیه کنیم. [۱۷]

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

به طوریکه  $B_1 \in \mathcal{R}^{(n-m) \times m}$  و  $B_2 \in \mathcal{R}^{m \times m}$  و  $\det B_2 \neq 0$  و  $n$  تعداد متغیر حالت  $x(t)$  می باشد. آنگاه یک

فرم تبدیل مختصات غیر همگن به صورت معادله (۲۱) می تواند باشد. [۱۸]



$$M = \begin{bmatrix} I_{n-m} & -B_1 B_2^{-1} \\ 0 & B_2^{-1} \end{bmatrix} \quad (21)$$

ماتریسهای زیر بلوک معادله (۱۷) می توانند به صورت معادله های (۲۲) به دست آورده شوند.

$$MAM^T = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad MB = \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

به همین صورت المانهای تابع لغزش به صورت زیر است.

$$SM^T = [S_1 \quad S_2] \quad (23)$$

در حین حرکت لغزشی تابع سوئیچ کاملاً برابر با صفر خواهد شد. از معادله (۱۸) داریم.

$$S_1 z_1(t) + S_2 z_2 = 0 \quad (24)$$

و از معادله (۲۴) داریم.

$$z_2(t) = -S_2^{-1} S_1 z_1(t) = -K z_1(t) \quad (25)$$

جایی که  $K \in \mathbb{R}^{m \times (n-m)}$  به صورت معادله (۲۶) تعریف می شود.

$$K = S_2^{-1} S_1 \quad (26)$$

و با کنار هم قرار دادن معادله (۲۵) در کنار  $\dot{z}_1$  به معادله (۲۷) می رسیم.

$$\begin{aligned} \dot{z}_1(t) &= A_{11} z_1(t) + A_{12} z_2(t) \\ z_2(t) &= -K z_1(t) \end{aligned} \quad (27)$$

معادله (۲۷) یک سیستم مرتبه  $n-m$  است که در آن  $z_2$  نقش سیگنال کنترلی فیدبک خطی تمام حالت را دارد. با جاگذاری  $\dot{z}_1$  در  $z_2$  نهایتاً به معادله (۲۸) می رسیم.

$$\dot{z}_1(t) = (A_{11} - A_{12} K) z_1(t) \quad (28)$$

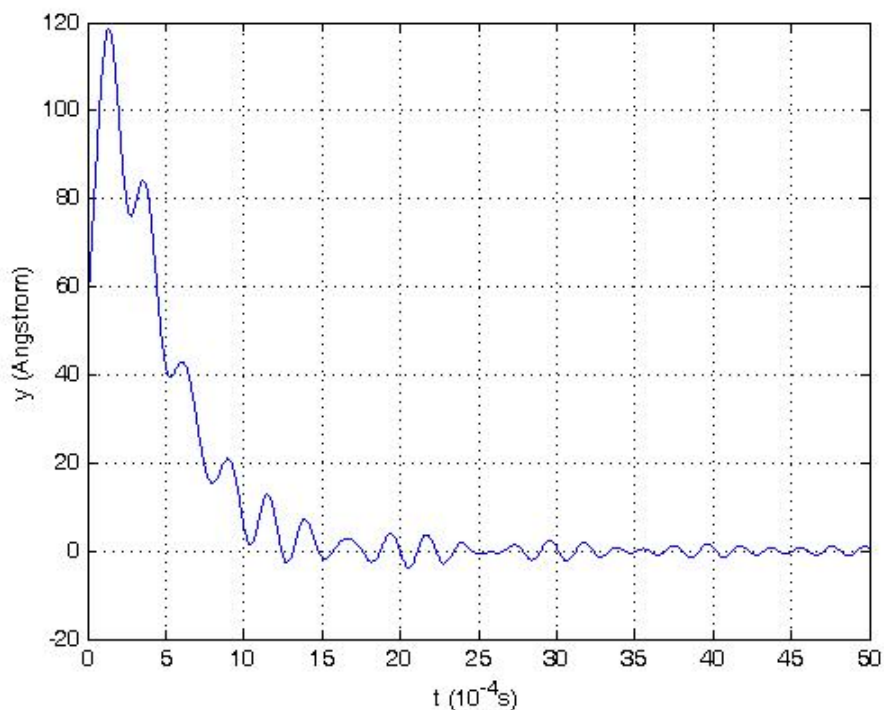
حداقل ملزومات طراحی این است که پایداری مجانبی باید در حین حرکت لغزشی تضمین شود به طوریکه وقتی  $t \rightarrow \infty$  داشته باشیم  $z_1 \rightarrow 0$ . شرط تضمین، تنظیم  $K = S_2^{-1} S_1$  به منظور دادن  $(n-m)$  قطب منفی برای سیستم حلقه بسته (۲۸) است. سایر درجات آزادی اضافی ممکن است برای سرعت بیشتر در تعقیب ورودی در حین مد لغزشی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین سیستم (۲۸) هر چقدر بیشتر در برابر نا معینی<sup>۱</sup> ساختاری، مقاوم باشد به همان اندازه در برابر نا معینی غیر ساختاری<sup>۲</sup> نیز مقاوم خواهد بود. لازم به ذکر است به طور کلی در سیستم لغزشی، نا معینی ساختاری می تواند تأثیری روی پاسخ سیستم نداشته باشد اما وارد شدن هر نا معینی غیر ساختاری می تواند تأثیر مستقیم بر روی پاسخ سیستم داشته باشد. بنابراین حداقل کردن اثر هر سیگنال غیر ساختاری، مطلوب است. با انتخاب  $S_2 = I_m$ ، ماتریس صفحه  $S$  به صورت معادله (۲۹) تعیین می شود. [۱۷]

$$S = [K \quad I_m] M \quad (29)$$

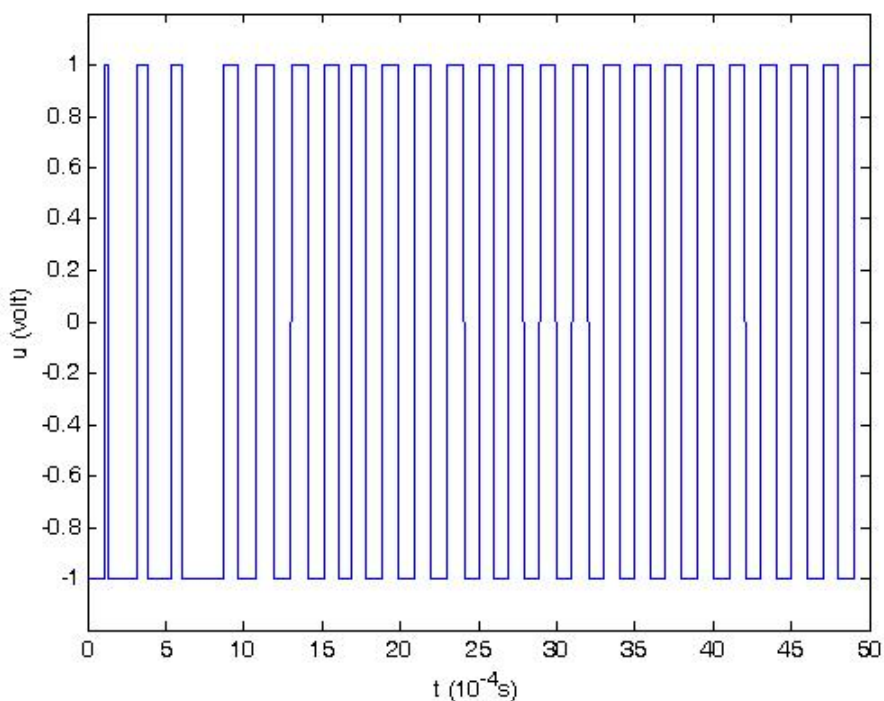
این رویکرد محاسبه روند فرم  $K$  به  $S$  را بهینه می کند چرا که در این صورت فقط به دنبال  $S_1$  باید باشیم بنابراین امکان خطای محاسباتی را کاهش می دهد. نتیجه حاصل از شبیه سازی در شکل (۵) نشان داده شده است و ورودی کنترلی آن در شکل (۶) نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Uncertainty

<sup>2</sup> Unmatched



شکل ۵- تنظیم کننده مد لغزشی



شکل ۶- ورودی کنترلی برای تنظیم کننده مد لغزشی

همانطور که مشاهده می شود شکل (۵) غیر قابل قبول است و دلیل آن هم این است که خروجی میکروسکوپ همانطور که در بخش ۲ و ۴ توضیح داده شده است یک منحنی صاف همانند شکل (۴) یا شکل (۷) می باشد و نیز فاقد هر گونه حرکت زیگ زاگ می باشد همچنین ورودی کنترلی در شکل (۶) نشان

دهنده وجود کنترل مد لغزشی نمی باشد. به طور کلی شکل (۵) نشان می دهد که طراحی کنترل مد لغزشی معمولی برای مدل های غیر مینیمم فاز با محدودیت جدی همراه می باشد و در مورد میکروسکوپ تونلی روبشی امکان پذیر نمی باشد.

## ۶- خمینه لغزشی دینامیکی

بسیاری از سیستمهای کنترل واقعی در عمل غیر مینیمم فاز هستند. یک سیستم کنترل یک ورودی یک خروجی<sup>۱</sup> غیر مینیمم فاز است اگر تابع تبدیل ورودی- خروجی آن صفرهایی در سمت راست صفحه مختلط داشته باشد. در صورتیکه سیستم شامل قطب سمت راست باشد این روش قابل استفاده نمی باشد. طبیعت غیر مینیمم فاز یک دستگاه، استفاده از تکنیکهای قدرتمند کنترل را محدود می کند و این برای ردیابی ورودی، مشکل ایجاد می کند. در این بخش به استفاده از کنترل کننده های خمینه لغزشی دینامیکی برای ردیابی خروجی غیر مینیمم فاز اشاره می شود. در روش ارائه شده نیازی به دوباره تعریف سازی<sup>۲</sup> خروجی یا حل معادلات دیفرانسیل نا پایدار نخواهد بود. روش ارائه شده، تلفیقی از دو روش کنترلی مد لغزشی معمولی (غیر حساس نسبت به اغتشاش<sup>۳</sup>) و طراحی جبران ساز دینامیکی معمولی (سازگار با اغتشاش غیر ساختاری) می باشد که امکان ردیابی خروجی غیر مینیمم فاز را در حالت لغزشی میسر می سازد. [۱۹]

اکثر روابط این بخش از مرجع [۱۹] می باشد که از تبدیل شدن روابط از حالت غیر خطی به حالت خطی حاصل شده است. این کار با صفر قرار دادن ترمهای غیر خطی در روابط بدست آمده است.

### ۶-۱- فرمول بندی مساله

دستگاه خطی غیر مینیمم فاز زیر در نظر گرفته می شود.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Gx \end{aligned} \quad (30)$$

به طوریکه  $x \in \mathbb{R}^n$  بردار حالت می باشد و  $u \in \mathbb{R}^1$  تابع کنترل می باشد و  $y \in \mathbb{R}^1$  خروجی کنترل شده می باشد.  $A$  و  $B$  و  $G$  ماتریس ثابتی نسبت به ابعاد می باشند.  $\{A, B\}$  کنترل پذیر می باشند. ما می خواهیم کنترلر مد لغزشی را بصورت زیر تعیین کنیم.

$$u = \begin{cases} u^+, & \mathfrak{I}(x, e, t) > 0, \\ u^-, & \mathfrak{I}(x, e, t) < 0, \end{cases} \quad (31)$$

جایی که  $\mathfrak{I}(x, e, t) = 0$  به عنوان عملگر دینامیکی، معادله خمینه لغزشی می باشد. که بر روی بردار حالت متغیر  $x$  و خطای ردیابی خروجی  $e(t) = y^*(t) - y(t)$  عمل می کند.  $u^+, u^-$  توابع پیوسته از  $x$  و  $t$  به منظور برآورده کردن اهداف زیر هستند.

<sup>1</sup> SISO

<sup>2</sup> Redefinition

<sup>3</sup> Disturbance

- خروجی  $y(t)$  سیستم خطی غیر مینیمم فاز (۳۰) باید به طور مجانبی در مد لغزشی، مسیر حرکت خروجی مرجع داده شده  $y^*(t)$  را ردیابی کند. به طوریکه

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|y^*(t) - y(t)\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = 0$$

- ردیابی خروجی با جایدی مقادیر ویژه دلخواه در خمینه لغزشی دینامیکی باید خطی باشد.
- وجود مد لغزشی در خمینه لغزشی دینامیکی باید فراهم گردد.

## ۶-۲- حل مساله

با استفاده از تبدیل غیر همگن معادلات (۳۲) همانند معادلات (۱۹) - (۲۲)

$$M = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} x^1 \\ x^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} x, \quad (32)$$

$$MAM^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \quad MB = \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \end{bmatrix},$$

$$GM^{-1} = [G_1 \quad G_2],$$

سیستم داده شده در معادله (۳۰) به صورت (۳۳) نوشته می شود (فرم بلوک کانونی).

$$\begin{cases} \dot{x}^1 = A_{11}x^1 + A_{12}x^2 \\ \dot{x}^2 = A_{21}x^1 + A_{22}x^2 + b_2u \\ y = G_1x^1 + G_2x^2 \end{cases} \quad (33)$$

به طوریکه  $x^1 \in \mathbb{R}^{n-1}, x^2 \in \mathbb{R}^1, b_2 \neq 0$

از آنجایی که طبق رابطه (۳۵) در حین حرکت لغزشی  $x^2 = -\sigma$  مقدار مشخص و شناخته شده ای دارد می توان  $x^2$  را به عنوان ورودی کنترل مجازی فرض کرد. لذا تابع تبدیل زیر در نظر گرفته می شود.

$$\frac{Y(s)}{X_2(s)} = G_1 [sI - A_{11}]^{-1} A_{12} + G_2 \quad (34)$$

که صفرهایی در نیمه سمت راست صفحه مختلط دارد. بسیار روشن است که کاربرد مستقیم کنترلر مد لغزشی معمولی برای ردیابی خروجی در سیستم داده شده در معادله (۳۳) به دلیل طبیعت غیر مینیمم فاز بودن دستگاه، امکان پذیر نیست. با در نظر گرفتن متغیر حالت  $x^2$  به عنوان ورودی کنترل مجازی در گام اول طراحی کنترل کننده، خمینه لغزشی دینامیکی به صورت زیر معرفی می شود.

$$\mathfrak{S} = x^2 + \sigma = 0 \quad (35)$$

تابع  $\sigma$  به عنوان عملگر دینامیکی طراحی می شود و روی خطای ردیابی  $e$  عمل می کند. با فرض اینکه مد لغزشی در سیستم تعریف شده با معادله (۳۳) روی خمینه لغزشی دینامیکی (معادله (۳۵)) موجود باشد. حرکت سیستم در معادله (۳۳) در این خمینه توسط معادله (۳۶) توصیف می شود.

$$\begin{cases} \dot{x}^1 = A_{11}x^1 - A_{12}\sigma \\ y = G_1x^1 - G_2\sigma \end{cases} \quad (36)$$

باید توجه داشت که در رابطه با معادله (۳۴) روشن است که سیستم تعریف شده با معادله (۳۶) با ورودی کنترل مجازی  $\sigma$  و خروجی  $y$  هنوز غیر مینیمم فاز است. هر چند سیستم داده شده با معادله (۳۶) خطی است ولی مساله ردیابی خروجی غیر مینیمم فاز می تواند با طراحی جبرانساز دینامیکی خطی حل شود. به منظور فراهم کردن ردیابی خروجی مطلوب در سیستم داده شده با معادله (۳۳) روی خمینه لغزشی دینامیکی (معادله (۳۵)) با در نظر گرفتن معادله (۳۶) تابع  $\sigma$  طراحی می شود و به عنوان عملگر دینامیکی  $W(s) = Q(s)/P(s)$  روی خطای ردیابی خروجی  $e$  به صورت زیر عمل می کند.

$$\sigma = W(s)e \quad (37)$$

به طوریکه  $Q(s)$  و  $P(s)$  چند جمله ای های متغیر  $s$  هستند که بر متغیر لاپلاس برای سیستم های خطی نا متغیر با زمان منطبق است به طوریکه  $sF(s) = L[\frac{d}{dt}f(t)]$

به منظور تولید کردن عملگر دینامیکی (معادله (۳۷)) رفتار خطای ردیابی خروجی در سیستم حلقه بسته معادله (۳۶) و (۳۷) مورد بررسی قرار می گیرد. [۲۰]

$$E(s) = \frac{P(s)Y^*(s)}{P(s) - G_2Q(s) - G_1(sI - A_{11})^{-1}A_{12}Q(s)} \quad (38)$$

چند جمله ای های  $Q(s)$  و  $P(s)$  باید به منظور فراهم کردن شرایط دلخواه به ردیابی خروجی مطلوب غیر مینیمم فاز در خمینه لغزشی دینامیکی طراحی شود (معادله (۳۷) و (۳۵)). به طوریکه:

- هر جابدهی قطبهای معادله مشخصه سیستم کنترل حلقه بسته (معادله (۳۸)) باید در نیمه سمت چپ صفحه مختلط فراهم شود (معادله (۳۹)).

$$P(s) - G_2Q(s) - G_1(sI - A_{11})^{-1}A_{12}Q(s) = 0 \quad (39)$$

- خطای ردیابی خروجی  $e$  در حالت دائمی باید به سمت صفر میل بکند. تئوری مشهور مقدار نهایی  $e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = 0$  که اگر  $E(s)$  قطبهایی در نیمه سمت چپ صفحه مختلط داشته باشد (با حداکثر یک قطب در مبدأ)، می تواند به عنوان شرایط عدم پذیرش به صورت زیر استفاده شود.

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{P(s)Y^*(s)}{P(s) - G_2Q(s) - G_1(sI - A_{11})^{-1}A_{12}Q(s)} = 0 \quad (40)$$

اگر  $\{A, B\}$  جفتهای کنترل پذیر باشند جفتهای  $\{A_{11}, \sigma\}$  نیز کنترل پذیرند برای اینکه  $A_{11}$  زیر مجموعه ماتریس  $A$  است. در این مورد هر جابدهی مطلوب مقادیر ویژه معادله مشخصه (۳۹) می تواند متعاقباً با انتخاب چند جمله ای  $Q(s)$  و  $P(s)$  فراهم گردد. اگر نوع  $y^*(t)$  برای  $t \rightarrow \infty$  شناخته شده باشند (پله، شیب، سینوسی و غیره) شرایط معادله (۴۰) به سادگی می تواند فراهم گردد.

به منظور فراهم کردن مد لغزشی در سیستم داده شده با معادله (۳۳) با شرایط مطلوب معادله (۳۸) و (۴۰) در خمینه لغزشی دینامیکی (معادله (۳۵) و (۳۷)) تابع کنترل  $u^+$  و  $u^-$  باید مشخص شود. شرایط مشهور وجود مد لغزشی معادله (۴۱) است.

$$\Im \cdot \Im < -\rho |\Im|, \rho > 0 \quad (41)$$

معادله (۴۱) در مجاورت خمینه لغزشی (معادله (۳۵) و (۳۷)) باید در نظر گرفته شود. در این مورد خمینه لغزشی در زمان محدود  $t_r = |\mathfrak{Z}(0)|/\rho$  خواهد رسید و پس از آن مسیر حرکت سیستم روی خمینه باقی خواهد ماند.  $\mathfrak{Z}(0)$  مقدار داخلی خمینه لغزشی (معادله (۳۵) و (۳۷)) است. شرایط در معادله (۴۱) برای سیستم داده شده به معادله (۳۳) محاسبه شده و به معادلات زیر تبدیل شده اند.

$$\begin{cases} u^+ < -\frac{1}{b_2} [\dot{\sigma} + \rho + A_{21}x^1 + A_{22}x^2] \\ u^- > -\frac{1}{b_2} [\dot{\sigma} - \rho + A_{21}x^1 + A_{22}x^2] \end{cases} \quad (42)$$

به طوریکه  $b_2$  مثبت فرض شده است و  $\rho$  هر عدد مثبتی می تواند باشد. از معادلات (۴۲) روشن است که  $u^+$  و  $u^-$  کراندار (قابل تشخیص) است اگر  $\dot{\sigma}$  کراندار باشد. در این حالت حرکت سیستم داده شده با معادله (۳۳) در خمینه لغزشی دینامیکی (معادله (۳۵) و (۳۷)) موجود است. نکته تعیین کننده این است که  $\dot{\sigma}$  کراندار باشد. بدین منظور  $\dot{\sigma}$  از معادلات (۳۷) و (۳۸) تابع به صورت زیر مشخص می شود.

$$\dot{\sigma} = L^{-1} \left\{ s \frac{Q(s)P(s)Y^*(s)}{P(s)[P(s) - G_2Q(s) - G_1(sI - A_{11})^{-1}A_{12}Q(s)]} \right\} \quad (43)$$

روشن است که تبدیل لاپلاس معکوس در معادله (۴۳) تابع کراندار خواهد داد اگر

- منحنی ردیابی خروجی  $y^*(t)$  کراندار باشند.

- مخرج معادله (۴۳) ریشه در نیمه سمت راست صفحه مختلط و بیش از یک ریشه در مرکز نداشته باشد.

بدین ترتیب قضیه زیر ثابت می شود.

### قضیه

فرض کنید که عملگر دینامیکی  $W(s) = Q(s)/P(s)$  مطابق شرایط معادلات (۳۹) و (۴۰) و (۴۳) طراحی شده باشد و کنترل نا پیوسته (معادلات (۳۱) و (۳۵) و (۳۷)) به منظور موجودیت شرایط مد لغزشی (معادله (۴۲)) تعیین شده است. آن وقت مد لغزشی در خمینه لغزشی دینامیکی موجود است. به طوریکه

$$\mathfrak{Z} = M_2x + \frac{Q(s)}{P(s)}e = 0 \quad (44)$$

و ردیابی خطی خروجی مجانبی با جایدهی مقادیر ویژه مطلوب برای سیستم غیر مینیمم فاز معادله (۳۰) فراهم می گردد. [۱۹]

معمولاً بهتر است به عنوان ورودی کنترلی از اشباع<sup>۱</sup> استفاده شود. بدین منظور ورودی کنترلی به صورت معادله (۴۵) می باشد که در آن  $\Omega$  ضریب کنترلی و  $\varepsilon$  پهناى باند است. [۲۱]

$$u = -\Omega \text{sat}\left(\frac{\mathfrak{Z}}{\varepsilon}\right) \quad (45)$$

<sup>1</sup> Saturation

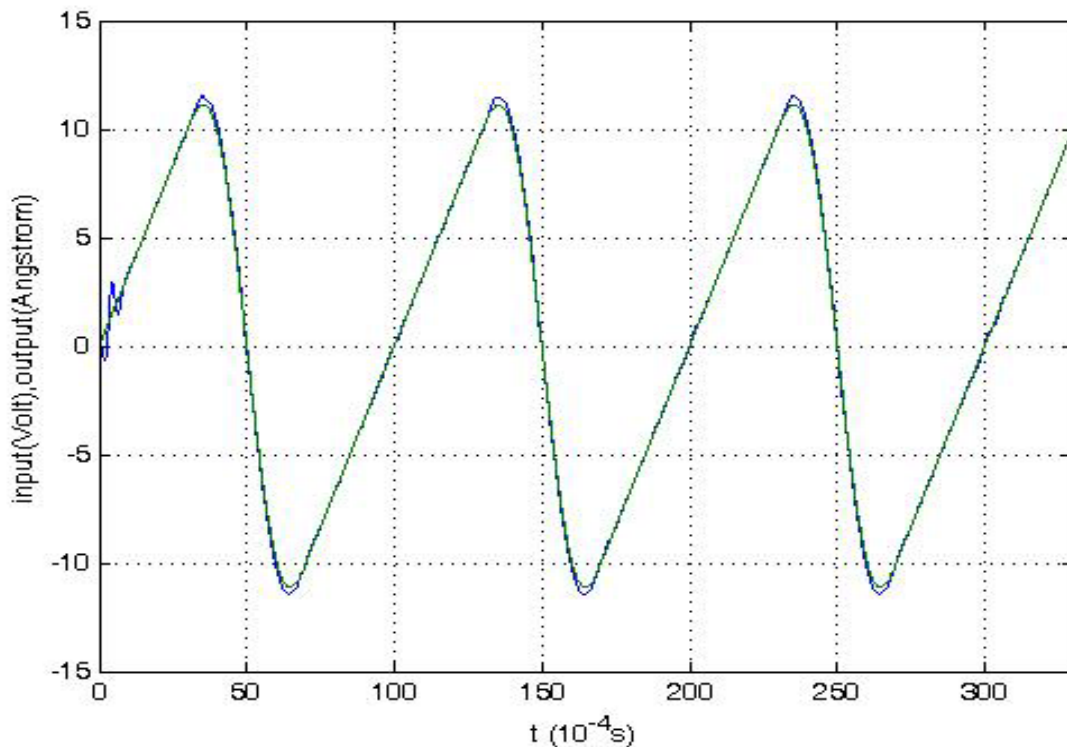
به منظور شبیه سازی خمینه لغزشی دینامیکی برای میکروسکوپ تونلی روبشی، عملگر دینامیکی، طبق معیار  $ITAE$  طراحی گردیده است. از آنجایی که انتخاب قطبها طبق معیار  $ITAE$  بوده است لذا نتیجه حاصل از روش خمینه لغزشی دینامیکی، بهینه نیز می باشد. شاخص رفتاری  $ITAE$  به صورت معادله (۴۶) می باشد و ضرایب بهینه معادله مشخصه برای مرتبه های ۲ تا ۶ در جدول (۱) نشان داده شده است. [۲۲]

$$ITAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad (46)$$

جدول ۱- ضرایب بهینه معادله مشخصه طبق معیار  $ITAE$  برای ورودی شیب [۲۲]

$s^2 + 3.2\omega_n s + \omega_n^2$
$s^3 + 1.75\omega_n s^2 + 3.25\omega_n^2 s + \omega_n^3$
$s^4 + 2.41\omega_n s^3 + 4.93\omega_n^2 s^2 + 5.14\omega_n^3 s + \omega_n^4$
$s^5 + 2.19\omega_n s^4 + 6.50\omega_n^2 s^3 + 6.30\omega_n^3 s^2 + 5.24\omega_n^4 s + \omega_n^5$
$s^6 + 6.12\omega_n s^5 + 6.71\omega_n^2 s^4 + 8.58\omega_n^3 s^3 + 7.07\omega_n^4 s^2 + 6.76\omega_n^5 s + \omega_n^6$

شکل (۷) نتیجه شبیه سازی را در ۳ سیکل نشان می دهد.

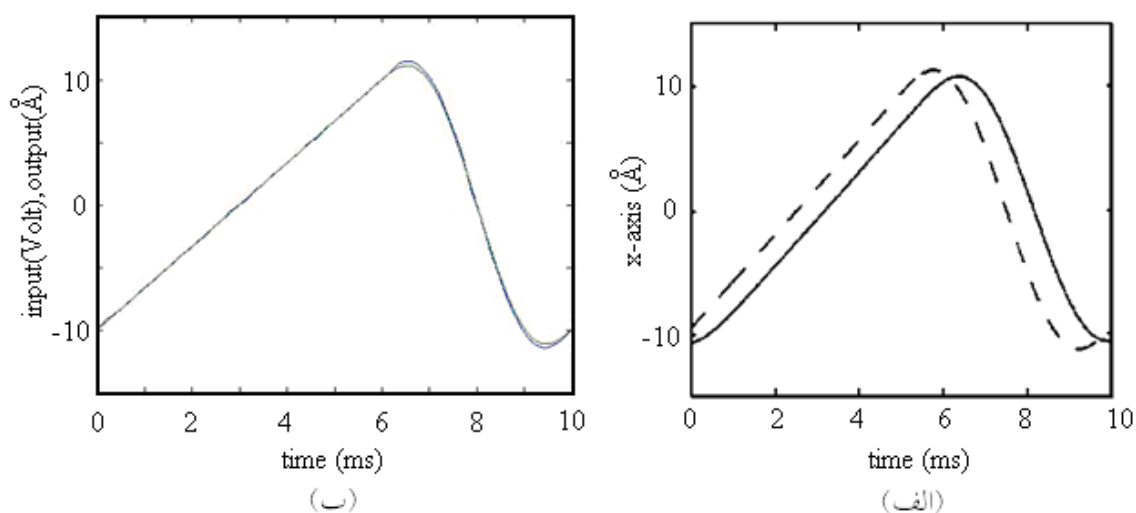


شکل ۷- نتیجه حاصل از خمینه لغزشی دینامیکی

همانطور که مشخص است خمینه لغزشی دینامیکی به خوبی ورودی را ردیابی می کند و رفتار قابل قبولی از خود نشان می دهد. از آنجایی که کنترل مد لغزشی معمولی قادر به این کار نیست شکل (۷) نشان از

کارآمدی بالای این روش دارد. به طوریکه امکان اعمال مد لغزشی برای مدل غیر مینیمم فاز میکروسکوپ تونلی روبشی را فراهم کرده است.

به منظور مقایسه راحتتر، نتیجه کنترل وارونگی مبتنی بر مدل با نتیجه خمینه لغزشی دینامیکی در کنار یکدیگر در شکل (۸) نشان داده شده است. شکل (۸-ب) نتیجه حاصل از خمینه لغزشی دینامیکی را در سیکل دوم از شکل (۷) با واحد زمان تبدیل شده به میلی ثانیه نشان می دهد. به طوریکه در شکل (۸-الف) مشاهده می شود در نتیجه حاصل از کنترل وارونگی مبتنی بر مدل خطای حالت ماندگار وجود دارد و کنترل خمینه لغزشی دینامیکی نتیجه بسیار بهتری در مقایسه با آن از خود نشان می دهد و موفق به حذف خطای حالت ماندگار شده است.



شکل ۸- نتیجه حاصل از دو روش کنترلی (الف) کنترل وارونگی مبتنی بر مدل [۱۶] (ب) خمینه لغزشی دینامیکی

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا با ذکر اساس کار میکروسکوپ تونلی روبشی به نحوه محاسبه مدل اسکندر میکروسکوپ تونلی روبشی پرداخته شده است. مدل میکروسکوپ تونلی روبشی از مقاله دیگری اقتباس شده است. به منظور کنترل حرکت میکروسکوپ تونلی روبشی ۳ روش کنترلی ارائه شده است. اولی کنترل وارونگی مبتنی بر مدل می باشد که به منظور مقایسه نتیجه خمینه لغزشی دینامیکی با یک مرجع موثق آورده شده است. در نتیجه حاصل از این روش خطای حالت ماندگار وجود دارد. دومی کنترل مد لغزشی معمولی است که نتیجه آن غیر قابل قبول بوده است و نشان می دهد که کنترل مد لغزشی معمولی برای میکروسکوپ تونلی روبشی قابل اعمال نیست. سومی کنترل خمینه لغزشی دینامیکی به همراه فرمولبندی کامل آن برای حالت خطی است که نوآوری ارائه شده در این مقاله می باشد. در مقایسه با دو روش قبلی این روش نتیجه بهتری نسبت به هر دو داشته است و در مقایسه با کنترل وارونگی مبتنی بر مدل موفق به حذف خطای حالت ماندگار گردیده است. خمینه لغزشی دینامیکی امکان اعمال کنترل مد لغزشی را برای مدل‌های غیر مینیمم فاز فراهم می سازد و مقاوم بودن آن در برابر اغتشاش، دینامیکهای مدل نشده و نا معینی مزیت اصلی این روش می باشد در صورتیکه کنترل وارونگی مبتنی بر مدل فاقد ویژگی مقاوم بودن می باشد.



## مراجع

- [1] Bhushan, B., “*Springer Handbook of Nanotechnology*”, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, Chapter 22, pp. 593-596, (2007).
- [۲] اسدی فرد، ر. تیلکی، ر. رنجبر، م. دینی، م. عرب، ا. قجاوند، م. مرادی، ا. واحدی مقدم، ا. آشنایی با تجهیزات آزمایشگاهی فناوری نانو: اندازه گیری و تعیین مشخصات"، ویرایش سوم، ستاد ویژه توسعه فناوری نانو، (۱۳۸۴).
- [3] Bishop, R.H., “*The Mechatronics Handbook: Mechatronic System Control, Logic, and Data Acquisition*”, Second Edition, CRC Taylor & Francis Group, USA, Chap. 3, pp. 41-51, (2008).
- [4] Gawthrop, P.J., Bhikkaji, and B., Moheimani, S.O.R., “Physical-model-based Control of a Piezoelectric Tube for Nano-scale Positioning Applications”, *Mechatronics*, Vol. 20, Issue 1, pp. 74-84, Feb, (2010).
- [5] Tan, K. K., Lee, T. H., and Zhou, H. X., “Micro-positioning of Linear Piezoelectric Motors Based on a Learning Nonlinear PID Controller”, *IEEE/ASME Trans. Mechatron*, Vol. 6, No. 4, pp. 428–36, Dec. (2001).
- [6] Devasia, S., Eleftheriou, E., and Moheimani, S.O.R., “A Survey of Control Issues in Nanopositioning”, *IEEE Trans. on Control Sys. Tech*, Vol. 15, No. 5, pp. 802-823, Sep. (2007).
- [7] Tien, S., Zou, Q., and Devasia, S., “Iterative Control of Dynamics-coupling-caused Errors in Piezoscanners During High-speed AFM Operation”, *IEEE Trans. Control Syst. Technol*, Vol. 13, No. 6, pp. 921–931, Nov, (2005).
- [8] Kim, K.S., Lin, Z., Shrotriya, P., Sundararajan, S., and Zou, Q., “Iterative Control Approach to High-speed Force-distance Curve Measurement using AFM: Time-dependent Response of PDMS Example”, *Ultramicroscopy*, Vol. 108, pp. 911– 920, (2008).
- [9] Bhikkaji, B., Ratnam, M., and Moheimani, S. O. R., “PVPF Control of Piezoelectric Tube Scanners”, *Sensors Actuators A-Phys*, Vol. 132, No. 2, pp. 700–712, Apr. (2007).
- [10] Tan, X., and Baras, J. S., “Adaptive Identification and Control of Hysteresis in Smart Materials”, *IEEE Trans. Autom. Control*, Vol. 50, No. 6, pp. 827–839, Jun. (2005).
- [11] Sebastian, A., and Salapaka S. M., “Design Methodologies for Robust Nanopositioning”, *IEEE Trans. Control Syst. Technol*, Vol. 13, No. 6, pp. 868–876, Nov. (2005).
- [12] Bashash, S., and Jalili, N., “Intelligence Rules of Hysteresis in the Feedforward Trajectory Control of Piezoelectrically-driven Nanostagers”, *J. Micromechan. Microeng*, Vol. 17, No. 2, pp. 342–349, Feb, (2007).

- [13] Li, Y., and Bechhoefer, J., "Feedforward Control of a Closed-loop Piezoelectric Translation Stage for Atomic Force Microscope", *Rev. Sci. Instrum*, Vol. 78, pp. 1–8, Jan, (2007).
- [14] Liawa, H.C., Shirinzadeh, B., and Smith, J., "Enhanced Sliding Mode Motion Tracking Control of Piezoelectric Actuators", *Sensors and Actuators A*, Vol. 138, pp. 194–202, (2007).
- [۱۵] بهرامی، م. ابراهیمی، ب. "کاربرد کنترل مقاوم مد لغزشی در وسایل پرنده"، رساله دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۸۷).
- [16] Perez, H., Zou, Q., and Devasia, S., "Design and Control of Optimal Scan Trajectories: Scanning Tunneling Microscope Example", *ASME J. Dynamic Syst. Measur. Control*, Vol. 126, pp. 178-197, (2004).
- [17] Edwards, C., and Spurgeon, S.K., "*Sliding Mode Control: Theory and Applications*", Taylor & Francis, London, (1998).
- [18] Utkin, V., Guldner, J., and Shi, J., "*Sliding Mode Control in Electro-mechanical Systems*", Taylor & Francis, London, (1999).
- [19] Shtessel, Y.B., "Nonlinear Non Minimum Phase Output Tracking via Dynamic Sliding Manifolds", *J. Franklin Inst.* Vol. 335, No. 5. pp. 841-850, (1998).
- [20] Shtessel, Y.B., "Nonlinear Output Tracking in Conventional and Dynamic Sliding Manifolds", *IEEE Trans. Autom. Control*, Vol. 42, pp. 1282-1286, (1997).
- [21] Bahrami, M., Ebrahimi, B., and Roshanian, J., "Dynamic Sliding Mode Autopilot for Nonlinear Non-minimum Phase Flight Vehicle", *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci*, Vol. 51, No. 174, pp. 236-243, (2009).
- [22] Graham, D., and Lathrop, R.C., "The Synthesis of Optimum Response: Criteria and Standard Forms", *Trans. of the AIEE* 72, pp. 273-288, (1953).

## فهرست نمادهای انگلیسی

$a$  : ثابت فیلتر

$a_i$  : ضرایب ثابت معادله چند جمله ای مسیر حرکت

$A$  : ماتریس حالت

$A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}$  : زیر ماتریس های حالت در فرم منظم

$A_s, A_u$  : زیر ماتریس حالت در فرم ردیابی خروجی

$b_2$  : زیر ماتریس ورودی در فرم منظم

$B$  : ماتریس ورودی

$B_1, B_2$  : زیر ماتریس ورودی

$B_s, B_u$  : زیر ماتریس ورودی در فرم ردیابی خروجی

$\hat{B}_s, \hat{B}_u, \hat{B}_\xi$  : ماتریس ضرایب ورودی کنترلی در فرم ردیابی خروجی

$C$  : ماتریس خروجی

$\hat{C}$  : ماتریس خروجی در فرم ردیابی خروجی

$d_x$  : موقعیت اسکندر در جهت  $x$  [انگستروم]

$e$  : خطا

$e_{ss}$  : خطای حالت ماندگار

$e^A$  : ماتریس انتقال حالت  $A$

$E$  : تبدیل لاپلاس خطا

$G$  : ماتریس خروجی

$G_1, G_2$  : زیر ماتریس خروجی در فرم منظم

$G_f$  : تابع تبدیل فیلتر

$G_{STM}$  : تابع تبدیل اسکندر میکروسکوپ تونلی روبشی

$G_{sys}$  : تابع تبدیل کلی

$I$  : ماتریس واحد (همانی)

$K$  : ماتریس فیدبک حالت

$K_{cp}$  : بهره تابع تبدیل

$m$  : مرتبه ماتریس  $B$

$M$  : ماتریس تبدیل مختصات (همانندی)

$M_1, M_2$  : زیر ماتریس تبدیل مختصات

$n$  : تعداد متغیر حالت

$p_r$  : قطب تابع تبدیل

$P, Q$  : چند جمله ای عملگر دینامیکی

$\Re$  : نشانگر تعداد بعد

$s$  : متغیر تبدیل لاپلاس  $[\frac{rad}{10^{-4} sec}]$

$\hat{s}$  : تابع سوئیچ

$S$  : ماتریس تابع سوئیچ

$S_1, S_2$  : زیر ماتریس تابع سوئیچ

$t$  : متغیر زمان  $[10^{-4} sec]$

$t_0, t_i, t_f$  : ثابت زمانی

$t_r$  : زمان رسیدن خمینه لغزشی دینامیکی

$T$  : ترانهاده ماتریس

$u$  : ورودی [ولت]

- $\hat{u}$  : ورودی اسکندر
- $u_{ff}$  : ورودی کنترلی در فرم ردیابی خروجی
- $u^+$  : حد بالای ورودی کنترلی
- $u^-$  : حد پائین ورودی کنترلی
- $W$  : عملگر دینامیکی
- $x$  : بردار حالت
- $x_1 \dots x_7$  : متغیر حالت
- $x_{ref}$  : بردار حالت مرجع
- $x^1, x^2$  : زیر ماتریس متغیر حالت جدید در خمینه لغزشی دینامیکی
- $X_2$  : تبدیل لاپلاس  $x^2$
- $y$  : خروجی [آنگستروم]
- $y_{track}$  : خروجی مطلوب در فرم ردیابی خروجی
- $y^*$  : خروجی مطلوب در خمینه لغزشی دینامیکی
- $Y$  : تبدیل لاپلاس  $y$
- $z$  : بردار حالت جدید در مد لغزشی معمولی
- $z_1, z_2$  : زیر ماتریس متغیر حالت جدید در مد لغزشی معمولی
- $z_q$  : صفر تابع تبدیل

### نمادهای یونانی

- $\Delta$  : ماتریس مشتقات خروجی
- $\Delta_d$  : ماتریس مشتقات خروجی مطلوب
- $\varepsilon$  : پهنای باند [هرتز]
- $\Phi$  : ماتریس تبدیل سیستم به فرم ردیابی خروجی
- $\eta_u, \eta_s$  : مولفه های بردار حالت جدید در فرم ردیابی خروجی
- $\tilde{\mathcal{J}}$  : خمینه لغزشی دینامیکی
- $\rho$  : ضریب بررسی شرط وجود مد لغزشی
- $\sigma$  : تابع عملگر دینامیکی
- $\Omega$  : ضریب کنترلی
- $\xi$  : مولفه بردار حالت در فرم ردیابی خروجی شامل مشتقات خروجی
- $\xi_d$  :  $\xi$  در حالت خروجی مطلوب
- $\omega_n$  : فرکانس طبیعی نامیرا  $[\frac{rad}{10^{-4} sec}]$

**Abstract**

This article addresses control of scan trajectory in scanning tunneling microscope which can be used in nano technology such as nano-scale displacement measurement. For this purpose, two control methods are presented and applied. The first method is model-based inversion control to compare results with dynamic sliding manifold control from literature. The second method is dynamic sliding manifold. It is shown here, that sliding mode control is not applicable for scanning tunneling microscope. Dynamic sliding manifold control applies sliding mode for any non-minimum phase model which has zeroes in the right half of the complex plane. The main advantage of dynamic sliding manifold like sliding mode is robustness against disturbance, uncertainty and unmodeled dynamics. Complete formulation for the linear model case is presented. Comparing the results of both control methods shows that the dynamic sliding manifold has better outcome than model-based inversion control.