

کنترل نانو عملگر پیزوالکتریک با استفاده از تئوری فلکسوالکتریک وابسته به اندازه

حسین واقف پور، هادی آروین بروجنی*، یعقوب طادی بنی

گروه مهندسی مکانیک جامدات، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۲۵
بازنگری: ۱۳۹۷/۰۴/۱۵
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۱۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۶/۲۰

کلمات کلیدی:

نانوتیر پیزوالکتریک
تئوری فلکسوالکتریک وابسته به اندازه
کنترل پسخورد
کنترل فازی

خلاصه: در این مقاله برای اولین بار از کنترل پسخورد و کنترل فازی به منظور ردگیری مسیر دلخواه انتهای یک نانوتیر طراهی پیزوالکتریک به عنوان یک نانو عملگر استفاده شده است. معادلات حرکت بشکل معادلات دیفرانسیل با مشتقات پاره‌ای به کمک تئوری فلکسوالکتریک مرتبه بالا وابسته به اندازه استخراج گردیده است. به منظور دستیابی به معادلات حاکم، فرمولاسیون غیرخطی برای نانوتیر اویلر-برنولی پیزوالکتریک با در نظر گرفتن غیرخطی‌گری فون-کارمن به کار گرفته شده است. معادلات غیر خطی به کمک حساب تغییرات و اصل همیلتون بدست آمده است. برای تبدیل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای به معادلات دیفرانسیل معمولی روش گسسته‌سازی گلرکین پیاده سازی شده است. با استفاده از متغیرهای فضای حالت، مدل فضای حالت نانوتیر برای طراحی کنترل کننده مناسب بدست آورده شده است. سپس طراحی کنترل پسخورد بدون انتگرال گیر، کنترل پسخورد حالت با انتگرال گیر و کنترل فازی برای کنترل انتهای نانو عملگر به منظور ردگیری مسیر دلخواه صورت پذیرفته است. در پایان اثر ورودی‌های متفاوت (سینوسی و پله) به همراه اغتشاش (ضربه) بر روی کنترلرهای طراحی شده با استفاده از شبیه سازی کامپیوتری شرح داده شده است. با توجه به یافته‌های این مقاله می‌توان بیان نمود که به ترتیب کنترلر فازی، کنترلر پسخورد حالت با انتگرال گیر و کنترلر پسخورد حالت بدون انتگرال گیر بهترین عملکرد را داشته‌اند.

۱- مقدمه

مکانیکی و الکتریکی در قیاس با ابعاد میکرو از خود نشان می‌دهند [۱۴-۱۲]. این خواص جدید فرصت استفاده از اینگونه مواد را در تجهیزات مختلفی با ابعاد نانو مانند تشدیدکننده‌ها [۱۵]، ترانزیستورها [۱۶]، دیودهای نوری [۱۷] و حسگرهای شیمیایی [۱۸] ایجاد می‌کند. از مواد پیزوالکتریک در سازه‌ها به منظور مستهلک نمودن مد ارتعاشی، کنترل ردگیر و به تاخیر انداختن کماتش نیز استفاده می‌گردد [۲۲-۱۹]. سازه‌های تیر شکل با مقیاس‌های مختلف کاربردهای فراوانی در مهندسی دارند. بنابراین مطالعه نانوتیرهای پیزوالکتریک محاسن زیادی در بر دارد. یانگ و همکاران [۲۳-۲۵] به تحلیل ژیرسکوپ پیزوالکتریک، رفتار سه بعدی تیرهای الکتروالاستیک با مقطع چهارگوش با استفاده از حل‌های سری توانی دوپل و عملگرهای هدفمند پیزوالکتریک پرداختند. ژو و همکاران [۲۶] به مطالعه تغییر شکل تیرهای خمیده که با لایه‌های پیزوالکتریک محصور شده بودند پرداختند. وانگ و کوئک [۲۷ و ۲۸] ارتعاشات آزاد تیرهای اویلر-برنولی با عملگرهای پیزوالکتریک را مورد بررسی قرار دادند. در سال‌های اخیر جهت استخراج معادلات حاکم بر نانو سازه‌ها از تئوری‌های محیط پیوسته مرتبه بالا استفاده شده است. از مهمترین این تئوری‌ها

تیرها و ورق‌ها در صنعت و به طور خاص در سیستم‌های میکرو/نانو الکترومکانیک بصورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱ و ۲]. در سیستم‌های نانو الکترومکانیک، نانوتیرهای طراهی به شکل وسیعی به عنوان نانو عملگر و نانو حسگر و یا به منظور تولید انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳ و ۴]. در ابعاد میکرو مواد پیزوالکتریک به دلیل کوپل خواص مکانیکی و الکتریکی توجه زیادی به خود جلب نموده‌اند که این خواص در ابعاد نانو هم جالب توجه هستند [۵]. آزمایش‌های متعدد نشان داده‌اند که اثر پیزوالکتریک می‌تواند در مواد غیرپیزوالکتریک (دی الکتریک) نیز در ابعاد نانو ایجاد گردد [۶]. بنابراین تجهیزات ساخته شده از مواد پیزوالکتریک و دی الکتریک در مقیاس میکرو یا نانو برای دسته وسیعی از تجهیزات الکترومکانیکی جهت کنترل اغتشاش و ارتعاش [۷]، تولید انرژی [۸]، ذخیره داده‌ها [۹]، وسایل سرما ساز [۱۰] و حسگرهای شبکه [۱۱] مورد استفاده قرار می‌گیرند. می‌توان دریافت مواد با مقیاس نانو همانند مواد پیزوالکتریک خواص جدیدی مانند خواص

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hadi.arvin@sku.ac.ir



تشدیدکننده میکروالکترومکانیک توسط سو و هگازی [۴۹] برای مشخص نمودن تاثیر کاهش دامنه نوسان پارامتر تحریک بر روی کنترل آشوب مورد بررسی قرار گرفت. سلیم و همکاران [۵۰] کنترل حلقه بسته یک تشدید کننده میکروالکترومکانیک را در نظر گرفتند و ناحیه بهین عملکرد آن را بدست آوردند. وطن خواه و همکاران [۵۱] مسئله پایداری مرزی با در نظر گرفتن قانون کنترل مرزی خطی به منظور پایداری ارتعاشات یک میکرو تیر غیر کلاسیک را مورد بررسی قرار دادند. نگوین و کرایلوف [۵۲] یک الگوریتم کنترل غیر خطی را به منظور تنظیم دامنه نوسان یک تیر میکروالکترومکانیک تحت یک تحریک پارامتری ارائه نمودند.

همانطور که از مرور منابع دیده می شود هرچند که تعدادی تحقیق در زمینه تحلیل دینامیکی و ارتعاشی نانوتیرهای غیر کلاسیک در سال های اخیر صورت گرفته است، ردگیری نانوتیر پیزوالکتریک با در نظر گرفتن تئوری های غیر کلاسیک شامل اثر اندازه و اثر فلکسوالکتریک مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا در این مقاله برای نخستین بار براساس تئوری پیزوالکتریسته وابسته به اندازه، معادلات ارتعاشی نانوتیر طره ای اوپلر-برنولی که تحت ولتاژ خارجی قرار گرفته است به منظور استخراج معادلات مناسب برای طراحی کنترلر پیاده سازی می گردد (بخش دوم). سپس معادلات حاکم و شرایط مرزی با استفاده از حساب تغییرات و اصل همپلتون بدست آورده می شود (بخش دوم). از روش گلرکین برای کاهش مرتبه معادلات دیفرانسیل با مشتقات پاره ای به معادلات دیفرانسیل معمولی استفاده می گردد (بخش دوم). در ادامه الگوریتم های کنترل ردگیری برای نانوتیر طره ای پیزوالکتریک طراحی می گردد (بخش سوم). پس از آن نتایج شبیه سازی برای سه کنترل کننده طراحی شده، بدست آمده و با هم مقایسه خواهند گردید (بخش چهارم). در پایان نتایج در بخش پنجم مورد بحث قرار خواهند گرفت.

۲- معادلات حاکم

۲-۱- مدل غیر کلاسیک پیزوالکتریسته

طرحواره نانوتیر پیزوالکتریک در شکل ۱ آورده شده است:

براساس مدل پیزوالکتریسته وابسته به اندازه، انرژی کرنشی مواد پیزوالکتریک ایزوتروپیک الاستیک با تغییر شکل کوچک در حجم V به صورت رابطه (۱) بیان می گردد [۴۰]:

$$U = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_{ji} e_{ij} + \mu_{ji} \kappa_{ij} - D_i E_i) dv \quad (1)$$

در جایی که σ_{ji} ، e_{ij} ، μ_{ji} و κ_{ij} بترتیب نشان دهنده، تانسور تنش

می توان به تئوری تنش کوپل [۲۹ و ۳۰]، تئوری گرادیان کرنش [۳۱]، تئوری الاستیسیته غیرمحل [۳۲] و مدل الاستیسیته سطح [۳۳] اشاره نمود. با توجه به توسعه های اخیر در سازه های میکرو/نانو الکترومکانیک، تئوری های وابسته به اندازه با اثر کوپل مکانیکی و الکتریکی مانند تئوری وابسته به اندازه پیزوالکتریک ارائه شده اند. تئوری پیزوالکتریسته در ابعاد میکرو رابطه بین قطبیت الکتریکی و کرنش غیریکنواخت در مواد نامتقارن مرکزی را می تواند نشان دهد [۳۴]. حال آنکه برخی تحقیقات نشان می دهند که خواص پیزوالکتریک وابسته به اندازه و کوپل خطی الکترومکانیک در دی الکتریک های ایزوتروپیک نیز ایجاد می گردد [۳۵-۳۸]. همچنین تئوری کلاسیک نمی تواند اثر وابستگی به اندازه را شرح دهد، بنابراین توسعه تئوری وابسته به اندازه پیزوالکتریک که برای نانو سازه ها قابل استفاده باشد و شامل گرادیان مرتبه بالا از تغییر شکل باشد ضروری به نظر می رسد. وانگ و همکاران [۳۹] بر اساس تئوری تنش کوپل یک تئوری وابسته به اندازه ارائه نمود. آنها اثر گرادیان پیچشی را در نظر گرفتند و فرمولاسیونی معرفی کردند که در آن قطبیت الکتریکی وابسته به گرادیان پیچی میکروسکوپی بود. قطبیت در مواد دی الکتریک نه تنها به تانسور کرنش بلکه به تانسور انحناء نیز بستگی دارد. بنابراین می توان گفت اثر فلکسوالکتریک در تمام دی الکتریک ها اتفاق می افتد [۴۰]. از این جهت تئوری های دیگری نیز ارائه شدند [۴۱ و ۴۲]. براساس فرمولاسیون الکترومکانیک، حاج اسفندیاری و دارگوش [۴۳] یک تئوری پیزوالکتریک وابسته به اندازه را بیان نمودند که در آن به بیان رفتار مواد در مقیاس کوچک پرداخته شده است. ایشان در این تئوری، مدل پیزوالکتریک وابسته به اندازه یا اثر فلکسوالکتریک که به تانسور انحناء وابسته است را استخراج نمودند. تعدادی از محققان با استفاده از این تئوری معادلات نانوتیر پیزوالکتریک را استخراج و مورد بررسی قرار دادند [۴۲]. طادی [۴۴] با استفاده از تئوری پیزوالکتریک وابسته به اندازه حاج اسفندیاری مبادرت به استخراج معادلات و تحلیل ارتعاشات آزاد، کماتش و خمش نانوتیر هدفمند پیزوالکتریک نمود. تعداد زیادی از تجهیزات نانو الکترومکانیک از اجزاء مرتعش به عنوان حسگر و عملگر به منظور دستیابی به عملکرد بالا استفاده می کنند. در این زمینه تحقیقات متعددی در خصوص کنترل اینگونه سیستم ها انجام گرفته است. بیشتر تمرکز این تحقیق ها بر روی کنترل پایداری بوده است. وانگ [۴۵] کنترل پس خورد ارتعاشات در میکروتیر طره ای با عملگر الکترواستاتیک را مورد ارزیابی قرار داد. السالم و یونس [۴۶] و [۴۷] پایداری تشدیدکننده میکروالکترومکانیک در نزدیکی نقطه پولین را با به کارگیری کنترلر تاخیر زمانی مورد مطالعه قرار دادند. همچنین اثر بهره کنترل بر روی عملگر الکتریکی نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۴۸]. کنترل آشوب

برنولی به صورت رابطه (۵) بدست می‌آید:

$$e_{11} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^2 = \frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \quad (5)$$

۲-۲- معادلات حرکت حاکم

با در نظر گرفتن رابطه (۱) و جایگذاری مولفه‌های غیر صفر رابطه‌های

(۲) و (۴) و اعمال رابطه (۳)، وریشن انرژی کرنشی به صورت رابطه (۶) حاصل می‌گردد.

$$\begin{aligned} \delta U = & \int_V \left(\sigma_{11} \delta e_{11} + \nu \mu_{12} \delta \kappa_{21} \right) dV = \\ & \int_0^L \left\{ \begin{array}{l} (EI + \xi \mu l^\nu A) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \\ EA \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\nu} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^\nu \right) \frac{\partial y}{\partial x} \right) \\ - \nu \frac{\partial E_{11}}{\partial x^\nu} \end{array} \right\} \delta y dx \\ & + \int_0^L \left\{ -EA \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\nu} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^\nu \right) \right\} \delta u dx \\ & + \left\{ \begin{array}{l} -(EI + \xi \mu l^\nu A) \frac{\partial^\nu y}{\partial x^\nu} \\ + EA \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\nu} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^\nu \right) \frac{\partial y}{\partial x} \\ + \nu \frac{\partial E_{11}}{\partial x} \end{array} \right\} \delta y \Big|_0^L \\ & + \left\{ EA \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\nu} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^\nu \right) \right\} \delta u \Big|_0^L + \\ & \left\{ (EI + \xi \mu l^\nu A) \frac{\partial^\nu y}{\partial x^\nu} - \nu E_{11} \right\} \delta \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) \Big|_0^L + \\ & \int_V \left\{ \varepsilon \left(\frac{\partial^\nu \Phi}{\partial x^\nu} + \frac{\partial^\nu \Phi}{\partial z^\nu} \right) + \nu \frac{\partial f}{\partial z} \frac{\partial^\nu y}{\partial x^\nu} \right\} \delta \Phi dV \\ & - \int_{-\frac{b}{\nu}}^{\frac{b}{\nu}} \int_{-\frac{h}{\nu}}^{\frac{h}{\nu}} \varepsilon \frac{\partial \Phi}{\partial x} \delta \Phi dy dz \Big|_0^L - \\ & \int_{-\frac{b}{\nu}}^{\frac{b}{\nu}} \int_{-\frac{h}{\nu}}^{\frac{h}{\nu}} \left(\varepsilon \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \nu f \frac{\partial^\nu y}{\partial x^\nu} \right) \delta \Phi dy dx \Big|_{-h/\nu}^{h/\nu} \end{aligned} \quad (6)$$

که در آن E_{11} به صورت زیر تعریف می‌گردد:



شکل ۱: شمای نانو عملگر پیزوالکتریک تحت ولتاژ V_0

Fig. 1. A schema of piezoelectric nano actuator subjected to voltage V_0

کویل، تانسور کرنش، تانسور تنش کلاسیک و تانسور انحناء می‌باشند. D_i و E_i نیز به ترتیب نشان دهنده بردار جابجایی الکتریکی و میدان الکتریکی می‌باشند. $\sigma_{ji}, \mu_{ji}, \kappa_{ij}$ از طریق رابطه (۲) بدست می‌آیند [۴۰]:

$$\begin{aligned} \sigma_{ji} &= \lambda e_{kk} \delta_{ij} + \nu \mu e_{ij}, \\ \mu_{ji} &= \varepsilon_{ijk} \mu_k, \\ \kappa_{ij} &= \frac{1}{\nu} (\omega_{i,j} - \omega_{j,i}), \\ D_i &= \varepsilon E_i + \xi f \kappa_i \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن $\kappa_i = \frac{1}{2} \varepsilon_{ijk} \kappa_{ij}$ ، $\omega_i = \frac{1}{2} \varepsilon_{ijk} \omega_{k,j}$ همچنین λ و μ ثابت‌های لامه، $f, 1$ و ε برتیب ضریب فلکسوالکتریک، پارامتر اثر اندازه و ثابت دی‌الکتریک هستند. از طرفی رابطه بین میدان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی به صورت رابطه (۳) قابل بیان است [۱۶]:

$$E_i = -\Phi_{,i} \quad (3)$$

میدان جابجایی را نیز براساس تئوری تیر اویلر-برنولی با توجه به شکل ۱ می‌توان به صورت رابطه (۴) نوشت [۴۴]:

$$\begin{aligned} u_x(x, z, t) &= u(x, t) - z \frac{\partial y(x, t)}{\partial x}, \\ u_y(x, z, t) &= 0, \\ u_z(x, z, t) &= y(x, t) \end{aligned} \quad (4)$$

که در این رابطه $y(x, t)$ تغییر شکل عرضی در امتداد محور z و $u(x, t)$ تغییر شکل طولی در امتداد محور x برای تار خنثی می‌باشند. بر مبنای غیرخطی‌گری فون-کارمن رابطه کرنش-جابجایی در تیر اویلر-

با جایگذاری رابطه‌های (۶) و (۷) در رابطه (۸) و برابر صفر قرار دادن ضرایب تغییر شکل‌های مکانیکی و الکتریکی روابط (۹) تا (۱۱) و شرایط مرزی وابسته (روابط (۱۲) تا (۱۵)) حاصل می‌گردند:

$$\delta u: EA \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right) - \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (۹)$$

$$\delta y: \left(EI + 4\mu l^2 A \right) \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - EA \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right) \frac{\partial y}{\partial x} - 2 \frac{\partial^2 E_{11}}{\partial x^2} + F_{11} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - H_{11} \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} = 0 \quad (۱۰)$$

$$\delta \Phi: \varepsilon \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right) + 2 \frac{\partial f}{\partial z} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) = \rho_e \quad (۱۱)$$

$$\delta u: \delta u \left[EA \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right) \right]_0^L = 0 \quad (۱۲)$$

$$\delta y: \delta y \left[\begin{array}{l} \left(EI + 4\mu l^2 A \right) \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} \\ -EA \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right) \frac{\partial y}{\partial x} \\ -2 \frac{\partial E_{11}}{\partial x} - H_{11} \frac{\partial^3 y}{\partial x \partial t^2} \end{array} \right]_0^L = 0 \quad (۱۳)$$

$$\delta \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right): \delta \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) \left[\begin{array}{l} \left(EI + 4\mu l^2 A \right) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \\ -2E_{11} \end{array} \right]_0^L = 0 \quad (۱۴)$$

$$E_{11} = \int_{-h/2}^{h/2} \int_{-b/2}^{b/2} f \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) dy dz$$

با در نظر گرفتن میدان جابجای تیر اویلر-برنولی، رابطه (۵)، وردش انرژی جنبشی نانوتیر نیز در حضور انتگرال تغییرات زمان با رابطه (۷) بیان می‌گردد.

$$\int_{t_0}^{t_1} \delta T dt = \int_{t_0}^{t_1} \delta \times \left\{ \frac{1}{2} \int_0^L \left[\int_A \rho \left(\left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} \right)^2 \right) dA dx \right] dt = \int_{t_0}^{t_1} \delta \left\{ \frac{1}{2} \int_0^L \left[\int_A \rho \left(\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 - 2z \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial^2 y}{\partial t \partial x} + z^2 \left(\frac{\partial^2 y}{\partial t \partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right)^2 \right) dA dx \right] dt = \right. \quad (۷)$$

$$\left. \int_{t_0}^{t_1} \left\{ -\int_0^L \left(F_{11} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \delta u dx - \int_0^L \left(F_{11} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - H_{11} \frac{\partial^4 y}{\partial t^2 \partial x^2} \right) \delta y dx \right\} dt - \int_{t_0}^{t_1} H_{11} \frac{\partial^3 y}{\partial t^2 \partial x} dt \delta y \Big|_0^L \right.$$

در رابطه (۷) بترتیب F_{11} و H_{11} به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشند:

$$(F_{11}, H_{11}) = \int_{-b/2}^{+b/2} \int_{-h/2}^{+h/2} \rho(1, z^2) dy dz$$

۲-۳- اصل همیلتون

با اعمال اصل همیلتون، رابطه (۸)، معادلات حرکت و شرایط مرزی مربوطه بدست می‌آید [۴۲]:

$$\int_{t_0}^{t_1} (\delta T - \delta U) dt = 0 \quad (۸)$$

$$\delta\Phi : \delta\Phi|_0^L = 0 \quad (20)$$

حال با فرض ثابت بودن f و صفر بودن دانسیته شارژ دی‌الکتریک،
 $\rho_e = 0$ ، رابطه (۱۱) به صورت رابطه زیر ساده می‌گردد:

$$\delta\Phi : \varepsilon \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (21)$$

که به آن معادله ماکسول گویند. حل این معادله با شرایط مرزی متناظر
 آن، یعنی رابطه‌های (۱۹) و (۲۰)، به صورت رابطه (۲۲) فرض می‌گردد [۳۲
 و ۵۴-۵۳]:

$$\Phi(x, z, t) = \cos(\beta z) \hat{\Phi}(x, t) + \frac{V_0(t)}{h} z \quad (22)$$

که در رابطه (۲۲)، $\beta = \frac{\pi}{h}$ است. با جایگذاری رابطه (۲۲) در تعریف
 $E_{11} = fV_0 b$ ، E_{11} خواهد شد و لذا دارای مقدار ثابتی است و بدین ترتیب

$$\frac{\partial^2 E_{11}}{\partial x^2} = 0 \quad \text{و} \quad \frac{\partial E_{11}}{\partial x} = 0$$

خواهد گردید.

از طرفی از اثر اینرسی محوری، $\rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ ، بدلیل فرکانس‌های
 طبیعی بسیار بالاتر طولی (ω_a) در برابر فرکانس‌های عرضی (ω_L) صرف
 نظر می‌گردد [۴۴ و ۵۴-۵۳]. به منظور شفاف سازی بیشتر این مهم، در
 شکل ۵ در بخش ۴ نسبت فرکانس اول طولی به سه فرکانس پایه عرضی
 برای نسبت‌های متفاوت پارامتر اثر اندازه به ضخامت نانوتیر نمایش داده

شده است. با این فرض و در نظر گرفتن روابط (۹) و (۱۰)
 به صورت روابط (۲۳) و (۲۴) قابل بازنویسی می‌باشند:

$$EA \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right) = 0 \quad (23)$$

$$(EI + 4\mu l^2 A) \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - EA \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right) \frac{\partial y}{\partial x} \right) + F_{11} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - H_{11} \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} = 0 \quad (24)$$

$$\delta\Phi : \delta\Phi \left[\int_A \varepsilon \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) dA \right]_0^L = 0, \quad (15)$$

$$\delta\Phi \left[\int_A \left[\varepsilon \frac{\partial \Phi}{\partial z} + 2f \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) \right] dA \right]_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} = 0$$

بدین ترتیب شرایط مرزی (روابط (۱۲) تا (۱۴)) برای یک نانوتیر
 یکسرگیردار مطابق رابطه‌های (۱۶) تا (۱۸) قابل بیان است.

$$u|_0 = 0, \quad \left[EA \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right) \right]_0^L = 0 \quad (16)$$

$$y|_0 = 0, \quad \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) \Big|_0 = 0$$

$$(EI + 4\mu Al^2) \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} - EA \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right) \frac{\partial y}{\partial x} - 2 \frac{\partial E_{11}}{\partial x} - H_{11} \frac{\partial^3 y}{\partial x \partial t^2} \Big|_0^L = 0 \quad (17)$$

$$[(EI + 4\mu Al^2) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - 2E_{11}] \Big|_0^L = 0 \quad (18)$$

در این مقاله با در نظر گرفتن اثر معکوس پیزوالکتریک، فرض می‌گردد
 که پتانسیل الکتریکی $\Phi(x, z, t)$ با توجه به شکل ۱ در بالا و پایین
 نانوتیر دارای مقدار مشخصی باشد یعنی در بالای نانوتیر دارای مقدار
 $V_0/2$ و در پایین آن دارای مقدار $-V_0/2$ باشد و لذا با معین بودن
 میدان در این دو قسمت وردش میدان در بالا و پایین نانوتیر صفر خواهد شد
 یعنی شرط مرزی دوم در رابطه (۱۵) بصورت رابطه (۱۹) ساده خواهد شد:

$$\delta\Phi : \delta\Phi \Big|_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} = 0 \quad (19)$$

همچنین با فرض اینکه ابتدا و انتهای نانوتیر نیز عایق نباشد، شرط
 مرزی اول رابطه (۱۵) بصورت زیر ساده می‌گردد:

$$\bar{y}|_0 = 0, \left. \frac{\partial \bar{y}}{\partial \bar{x}} \right|_0 = 0,$$

$$\left[\left(1 + 4 \frac{\mu A l^2}{EI} \right) \frac{\partial^3 \bar{y}}{\partial \bar{x}^3} - \bar{H} \frac{\partial^3 \bar{y}}{\partial \bar{x} \partial \tau^2} \right] \Bigg|_0^l \quad (29)$$

$$\left[\left(1 + 4 \frac{\mu A l^2}{EI} \right) \frac{\partial^2 \bar{y}}{\partial \bar{x}^2} \right] \Bigg|_0^l = 0$$

$$\left[- \left(2 \frac{b L^2 f}{EI h} \right) V_0(\tau) \right] \Bigg|_0^l = 0$$

به گونه ای که در این رابطه ها $\bar{F} = F_{11} \frac{(\lambda + 2\mu)I}{EI \rho A}$ و

$\bar{H} = H_{11} \frac{(\lambda + 2\mu)I}{L^2 EI \rho A}$ می باشد. لازم بذکر است چون طبق تعریف $F_{11} = \rho A$ و $\lambda + 2\mu$ نیز برابر E می باشد، $\bar{F} = 1$ می باشد. در

ضمن برای نانوتیر با مقطع مستطیل شکل $(h \times b)$ $\bar{H} = \rho \frac{bh^3}{12}$ ،

می باشد و بدین ترتیب $\bar{H} = \frac{h^2}{12L}$ حاصل می گردد که در این صورت طبق

داده های مورد استفاده در این مقاله، ارائه شده در جدول ۱، $\bar{H} = 2 \times 10^{-4}$

می گردد که در مقایسه با $\bar{F} = 1$ قابل صرف نظر بوده و لذا در فرم گسسته

معادلات از اینرسی دورانی صرف نظر می شود.

۲-۴- گسسته سازی و کاهش مرتبه معادلات

کاهش مرتبه با گسسته سازی معادله دیفرانسیل با مشتق پاره ای (رابطه

(۲۸)) و شرایط مرزی (رابطه (۲۹)) به سیستم با درجه آزادی محدود صورت

می پذیرد. براساس روش گلرکین تغییر شکل عرضی نانوتیر پیزوالکتریک

به صورت رابطه (۳۰) تخمین زده می شود [۵۲]:

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^n q_i(t) \phi_i(x) \quad (30)$$

که در آن $q_i(t)$ ، اُمین مختصه عمومی و $\phi_i(x)$ نشان دهنده اُمین

شکل مود میرانشده بوده که حاصل از ارتعاشات آزاد خطی است و به صورت

رابطه (۳۱) در نظر گرفته می شود [۵۲]:

حال با در نظر گرفتن رابطه (۲۳) می توان نتیجه گرفت که

دارای مقداری ثابت در کل طول نانوتیر است. از طرفی با توجه به شرط مرزی دوم رابطه (۱۶) مقدار این ثابت در انتهای نانوتیر برابر صفر است. بدین ترتیب:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 = 0 \quad (25)$$

در کل طول نانوتیر برقرار است. به رابطه به دست آمده در رابطه (۱۵)

شرط گسترش ناپذیری تیرها گفته می شود. لذا با توجه به رابطه (۲۵) ترم

$-EA \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right) \frac{\partial y}{\partial x}$ در رابطه (۲۴) صفر خواهد شد.

بنابراین در این صورت معاله حاکم بر نانو تیر پیزوالکتریک به صورت

رابطه (۲۶) قابل بیان است:

$$\left(EI + 4\mu A l^2 \right) \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + F_{11} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - H_{11} \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} = 0 \quad (26)$$

به منظور عمومی سازی، با تعریف متغیرهای بدون بعد معرفی شده در

رابطه (۲۷)،

$$\bar{y} = \frac{y}{h}, \quad \bar{x} = \frac{x}{L}, \quad \tau = t \sqrt{\frac{(\lambda + 2\mu)I}{\rho A L^4}} \quad (27)$$

صورت بدون بعد معادله حاکم، رابطه (۲۶)، و شرایط مرزی وابسته،

رابطه های (۱۷) و (۱۸)، با در نظر گرفتن $E_{11} = f V_0 b$ و رابطه (۲۵)

و $\frac{\partial E_{11}}{\partial x} = 0$ به ترتیب بصورت روابط (۲۸) و (۲۹) استخراج می گردند.

$$\left(1 + 4 \frac{\mu A l^2}{EI} \right) \frac{\partial^4 \bar{y}}{\partial \bar{x}^4} + \bar{F} \frac{\partial^2 \bar{y}}{\partial \tau^2} - \bar{H} \frac{\partial^4 \bar{y}}{\partial \bar{x}^2 \partial \tau^2} = 0, \quad (28)$$

$$u(t) = V_0(t) \quad (35)$$

با به کارگیری بردار حالت (رابطه (۳۴)) و ورودی (رابطه (۳۵)) مدل فضای حالت عملگر پیزوالکتریک مطابق رابطه (۳۶) قابل بیان است.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t), \mathbf{x}(0) = (\mathbf{q}_0^T, \dot{\mathbf{q}}_0^T)^T \quad (36)$$

که در رابطه (۳۶)

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times n} & \mathbf{I}_{n \times n} \\ -\hat{\mathbf{M}}^{-1}\hat{\mathbf{K}} & \mathbf{0}_{n \times n} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times 1} \\ \hat{\mathbf{M}}^{-1}\hat{\mathbf{B}} \end{bmatrix} \quad (37)$$

می‌باشند. به منظور طراحی کنترلر، خیز انتهای عملگر پیزوالکتریک، به عنوان خروجی کنترلر در نظر گرفته می‌شود و به صورت رابطه (۳۸) بیان می‌گردد:

$$y = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (38)$$

که در آن

$$\mathbf{C} = [\phi_1(1)\phi_2(1)\dots\phi_n(1)\mathbf{0}_{1 \times n}] \quad (39)$$

می‌باشد.

۳-۲- کنترل پسخورد حالت

مشخصه‌های دینامیکی مهم مانند پایداری، نسبت میرایی و فرکانس طبیعی مطلوب با پراکنندگی مقادیر ویژه ماتریس \mathbf{A} در صفحه S تخمین زده می‌شود. بطور کلی هدف این است که پارامترها به گونه‌ای تنظیم گردند که سیستم رفتار مطلوب از خود نشان دهد.

با در نظر گرفتن سیستم مطابق با رابطه‌های (۳۶) تا (۳۹)، با ورودی مرجع R ، ورودی کنترلی $u(t)$ برای تضمین ردگیر خروجی $y(t)$ به

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (R - y(t)) = 0$$

گونه‌ای طراحی می‌گردد که

فرض می‌گردد کلیه متغیرهای حالت قابل اندازه‌گیری هستند و ماتریس \mathbf{A} کنترل پذیر است. مطابق بلوک دیاگرام سیستم در شکل ۲ ورودی کنترلی $u(t)$ شامل ترکیب خطی از متغیرهای حالت بوده و شامل پسخورد سیستم نیز می‌باشد. این پسخورد رفتار دینامیکی سیستم را تخمین می‌زند. از طرف دیگر پسخورد متغیر R به همراه بهره K_I بر رفتار استاتیکی سیستم مؤثر است.

$$\phi_i(x) = \cosh(r_i x) - \cos(r_i x) + \frac{\cos(r_i) + \cosh(r_i)}{\sin(r_i) + \sinh(r_i)} \times (\sin(r_i x) - \sinh(r_i x)) \quad (31)$$

که در آن $r_i^4 = \frac{\omega_i^2}{(\frac{EI + 4\mu l^2 A}{F})^2}$ است و Γ_i ، ω_i آمین ریشه معادله

مشخصه $\cos(r)\cosh(r) = -1$ [۵۲] و ω_i ، آمین فرکانس طبیعی خطی نانوتیر می‌باشند.

با در نظر گرفتن فرآیند معمول روش گلرکین، معادله دیفرانسیل معمولی حاکم بر نانوتیر پیزوالکتریک به صورت رابطه (۳۲) بدست می‌آید:

$$\hat{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \hat{\mathbf{K}}\mathbf{q}(t) = \hat{\mathbf{B}}V_0(t) \quad (32)$$

در رابطه (۳۲) $\hat{\mathbf{M}}$ ، $\hat{\mathbf{K}}$ و $\hat{\mathbf{B}}$ به ترتیب بردار وابسته به زمان مختصات عمومی، ماتریس جرم و ماتریس سختی می‌باشند. مولفه‌های ماتریس‌های $\hat{\mathbf{M}}$ و $\hat{\mathbf{K}}$ و بردار $\hat{\mathbf{B}}$ با رابطه (۳۳) بیان می‌گردند.

$$\hat{M}_{ij} = \bar{F} \int_0^1 \phi_i \phi_j dx, \quad (33)$$

$$\hat{K}_{ij} = \left(1 + \frac{4\mu l^2 A}{EI} \right) \int_0^1 \phi_i'' \phi_j'' dx$$

$$\hat{B}_j = \left(\frac{2bL^2 f}{EIh} \right) \phi_j'(1)$$

۳- کنترل ردگیر عملگر پیزوالکتریک

در این بخش هدف کنترل انتهای نانوتیر پیزوالکتریک به عنوان یک عملگر جهت ردگیری مسیر دلخواه است. برای هدف کنترلی مذکور ابتدا معادله دیفرانسیل سیستم یعنی رابطه (۳۲) در قالب فضای حالت بیان می‌گردد.

۳-۱- مدل فضای حالت

بردار فضای حالت و ولتاژ اعمالی به عملگر به عنوان ورودی کنترلر به صورت رابطه‌های (۳۴) و (۳۵) معرفی می‌گردند:

$$\mathbf{x}(t) = (\mathbf{q}^T, \dot{\mathbf{q}}^T)^T \in \mathbb{R}^{2n} \quad (34)$$

دیاگرام شکل ۳ آورده شده است باشد. در این بلوک دیاگرام متغیر کنترل y با ورودی مرجع R مقایسه می‌گردد و خطای کنترل e پسخورد می‌شود و سپس انتگرال آن گرفته می‌شود. از بهره پسخورد K_I نیز در این حالت انتگرال گیری می‌شود. با توجه به بلوک دیاگرام حلقه بسته (شکل ۳) با این پیکربندی، می‌توان دریافت که بردار بهره \mathbf{K} حاوی پارامترهای بازخورد است.

با در نظر گرفتن شکل ۳ معادله حلقه بسته سیستم به صورت روابط (۴۳) تا (۴۶) بدست می‌آید:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = [\mathbf{A} - \mathbf{BK}] \mathbf{x}(t) - \mathbf{BK}_I \varepsilon(t), \quad (43)$$

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$$

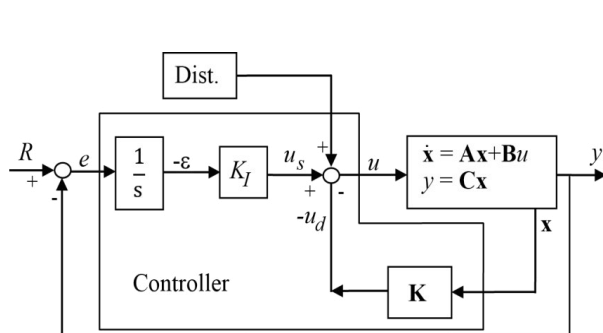
$$y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (44)$$

$$\varepsilon(t) = y(t) - R(t) \quad (45)$$

$$u(t) = u_d(t) + u_s(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t) - K_I \varepsilon(t) \quad (46)$$

شکل ماتریسی روابط (۴۳) تا (۴۶) به صورت رابطه‌های (۴۷) و (۴۸) بازنویسی می‌گردد:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \dot{\varepsilon}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ \mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \varepsilon(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -1 \end{bmatrix} R(t) \quad (47)$$



شکل ۳: بلوک دیاگرام سیستم کنترل پسخورد انتگرال حالت

Fig. 3. Block diagram of the integral state feedback control system

$$u(t) = u_d(t) + u_s(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t) + K_I R(t) \quad (40)$$

پس از جایگذاری ورودی کنترل، رابطه (۴۰)، در رابطه (۳۶) سیستم حلقه بسته‌ای مطابق رابطه (۴۱) بدست می‌آید:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = [\mathbf{A} - \mathbf{BK}] \mathbf{x}(t) + \mathbf{BK}_I R(t) \quad (41)$$

که دارای شرایط اولیه $\mathbf{x}(t_0)$ و خروجی

$$y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (42)$$

می‌باشد.

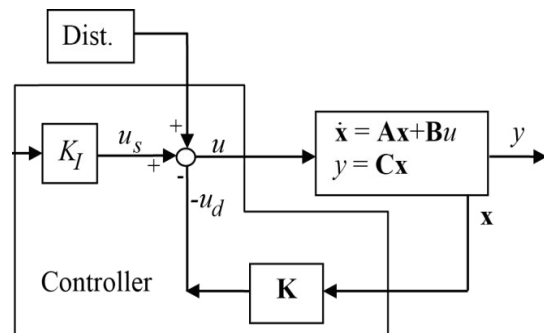
جهت کنترل رفتار دینامیکی و استاتیکی مشخصه‌های زیر فرض می‌گردد:

- رفتار دینامیکی حلقه بسته باید با قطب‌های مورد نیاز مشخص گردد.
- در حالت پایا خطای کنترل باید حذف گردد. بدین ترتیب،

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \mathbf{C} \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{x}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} R(t)$$

می‌گردد. برای دستیابی به بردار پسخورد \mathbf{K} ، بهره پسخورد K_I می‌تواند از رابطه (۴۱) محاسبه گردد. بدین ترتیب سیستم حلقه بسته شکل ۲ رفتار استاتیکی مطلوب با خطای کنترل صفر را نشان می‌دهد.

در این مورد کنترل کننده نسبت به خطای کنترل خیلی مقاوم نیست به این دلیل که از این خطا، پسخوردی وجود ندارد. نامعینی‌ها در مدل و یا اغتشاش‌های خارجی ممکن است مسبب خطای کنترل ماندگار شوند. به منظور حل این مشکل یک راه حل می‌تواند مشابه آنچه که در بلوک



شکل ۲: بلوک دیاگرام سیستم کنترل پسخورد حالت

Fig. 2. Block diagram of the state feedback control system

(۶) IF $e = Z$ and $\dot{e} = N$ THEN $u = SN$

(۷) IF $e = N$ and $\dot{e} = P$ THEN $u = N$

(۸) IF $e = N$ and $\dot{e} = Z$ THEN $u = LN$

(۹) IF $e = N$ and $\dot{e} = N$ THEN $u = VLN$

در جاییکه e ، \dot{e} و u بترتیب خطا، مشتق خطا و ورودی کنترل و N, P و Z بترتیب معرف مثبت، منفی و صفر می‌باشند. همچنین منظور از حروف L, VL و S بترتیب خیلی زیاد، زیاد و کم می‌باشد. بنابراین در قوانین فازی فوق منظور از عبارت $IF e = P$ and $\dot{e} = P$ THEN $u = VLP$ ، اگر خطا مثبت باشد و مشتق خطا نیز مثبت باشد آنگاه ورودی کنترل خیلی بزرگ مثبت در نظر گرفته می‌شود، است.

برای ایجاد پایگاه داده زبانی، محدوده توابع عضویت خطا و تغییر خطا (ورودی‌های کنترل کننده فازی و خروجی‌های نانوتیر) به نواحی فازی تقسیم می‌گردد. انواع توابع عضویت را می‌توان بسته به نوع مساله انتخاب نمود. در این پژوهش برای کمیت‌های ورودی و خروجی توابع عضویت مثلثی متقارن انتخاب شده است (شکل ۴). همچنین به منظور غیر فازی سازی کمیت‌های خروجی کنترلر فازی، از غیر فازی ساز مرکز سطح استفاده شده است.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش برای ارزیابی نتایج الگوریتم‌های کنترلی فرض شده برای یک نانوعملگر پیزوالکتریک ساخته شده از $BaTiO_3$ با متغیرهای سیستمی بیان شده در جدول ۱ شبیه سازی عددی صورت پذیرفته است. در ابتدا به منظور بررسی دلیل حذف اینرسی طولی در این مقاله نسبت فرکانس اول طولی به سه فرکانس عرضی پایه برای نسبت‌های مختلف پارامتر اثر اندازه به ضخامت نانوتیر در گستره پارامترهای مورد استفاده در این مقاله در شکل ۵ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد این نسبت برای فرکانس طبیعی عرضی اول در کمترین مقدار در حدود ۱۸ و برای فرکانس طبیعی عرضی سوم در حدود ۵ می‌باشد. لذا اینرسی طولی در این مقاله در مقایسه با اینرسی عرضی قابل صرف نظر است.

در ادامه به انجام مراحل شبیه‌سازی عددی پرداخته می‌شود. مرحله اول در روش طراحی مکان هندسی قطب‌ها انتخاب مکان مطلوب قطب‌های حلقه بسته است. اغلب مواقع مکان قطب‌ها براساس میزان فراجاهش مجاز و زمان نشست مطلوب به کمک آزمایش تعیین می‌گردد. در این مقاله به منظور دستیابی به فراجهشی معادل با عرض نانوتیر و زمان نشست حدود یک ثانیه

$$\bar{u}(t) = -[\mathbf{K} \quad K_I] \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \varepsilon(t) \end{bmatrix} \quad (۴۸)$$

با معرفی ماتریس‌های جدید حالت به صورت:

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ \mathbf{C} & 0 \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{K}}_I = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -1 \end{bmatrix}, \quad (۴۹)$$

$$\bar{\mathbf{K}} = [\mathbf{K} \quad K_I], \bar{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \varepsilon(t) \end{bmatrix}$$

روابط (۴۷) و (۴۸) را می‌توان به صورت رابطه‌های (۵۰) و (۵۱) بازنویسی نمود.

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\mathbf{x}}}(t) &= \bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{x}}(t) + \bar{\mathbf{B}}u(t) + \bar{\mathbf{K}}_I R(t), \\ \bar{\mathbf{x}}(t_0) &= \bar{\mathbf{x}}_0 \end{aligned} \quad (۵۰)$$

$$u(t) = -\bar{\mathbf{K}}\bar{\mathbf{x}}(t) \quad (۵۱)$$

در حالت سیستم حلقه بسته با جایگذاری معادله (۵۱) در معادله (۵۰) معادله (۵۲) بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\mathbf{x}}}(t) &= [\bar{\mathbf{A}} - \bar{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{K}}]\bar{\mathbf{x}}(t) + \bar{\mathbf{K}}_I R(t), \\ \bar{\mathbf{x}}(t_0) &= \bar{\mathbf{x}}_0 \end{aligned} \quad (۵۲)$$

که با سیستم پسخورد استاندارد همانند است.

۳-۳- کنترل فازی

سیستم فازی دربرگیرنده استراتژی کنترل و مولفه‌های آن است. برای کنترل کننده فازی متناسب با خطای کنترل $e(t) = R(t) - y(t)$ و مشتق زمانی خطا به عنوان ورودی \dot{e} و $u(t)$ به عنوان خروجی می‌توان قانون اساسی کنترل را بصورت زیر بیان نمود:

(۱) IF $e = P$ and $\dot{e} = P$ THEN $u = VLP$

(۲) IF $e = P$ and $\dot{e} = Z$ THEN $u = LP$

(۳) IF $e = P$ and $\dot{e} = N$ THEN $u = P$

(۴) IF $e = Z$ and $\dot{e} = P$ THEN $u = SP$

(۵) IF $e = Z$ and $\dot{e} = Z$ THEN $u = Z$

Table 1. The electro-mechanical and geometrical specifications of the piezoelectric nano ac

جدول ۱: خواص الکترومکانیکی و هندسی نانوعملگر پیزوالکتریک

طول تیر	عرض تیر	ضخامت تیر	فاکتور اندازه	ضریب فلکسوالکتریک	ثابت لامه	ثابت لامه
L	b	h	l	f	μ	λ
۳۰۰ (mm)	۱۰ (mm)	۱۵ (mm)	$0.2h$	$5e^{-12}$ (C/m)	۴۲٫۹ (GPa)	۴۵٫۲ (GPa)

قطب‌های مطلوب به ترتیب برای کنترل پسخورد و کنترل پسخورد انتگرالی بصورت $[-2+4j, -2-4j, -10]$ و $[-2+4j, -2-4j, -10]$ بدست آمده‌اند. جهت جداسازی معادلات حرکت مود اول نانوتیر در نظر گرفته شده است. پاسخ‌های دینامیکی نانوعملگر پیزوالکتریک در سه حالت کنترل پسخورد حالت، کنترل پسخورد انتگرال حالت و کنترل فازی ممدانی شبیه‌سازی شده است. با استفاده از روش اکرمین بهره کنترل K به صورت زیر بدست آمده است:

- کنترل پسخورد حالت:

$$K = [32.9543, 892.2049, 2.2305 \times 10^3]$$

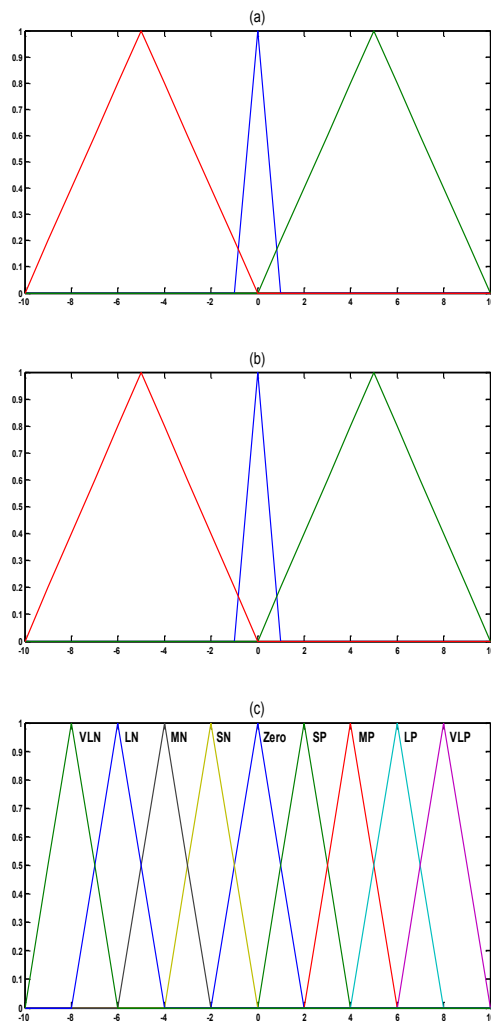
- کنترل پسخورد انتگرال حالت:

$$K = [0.8955, 0.3123, 2.2305] \times 10^4$$

شکل ۶ پاسخ حلقه باز سیستم (از پسخورد حالت برای کنترل استفاده نمی‌گردد) در غیاب اغتشاش و شکل ۷ ردگیری نانوعملگر حلقه بسته (از پسخورد حالت برای کنترل استفاده می‌گردد) با ورودی سینوسی را نشان می‌دهد که در ثانیه ۵ ام، اغتشاشی به شکل ضربه (با دامنه‌ی ۱۵ برابر ضخامت نانوتیر) به سیستم اعمال شده است.

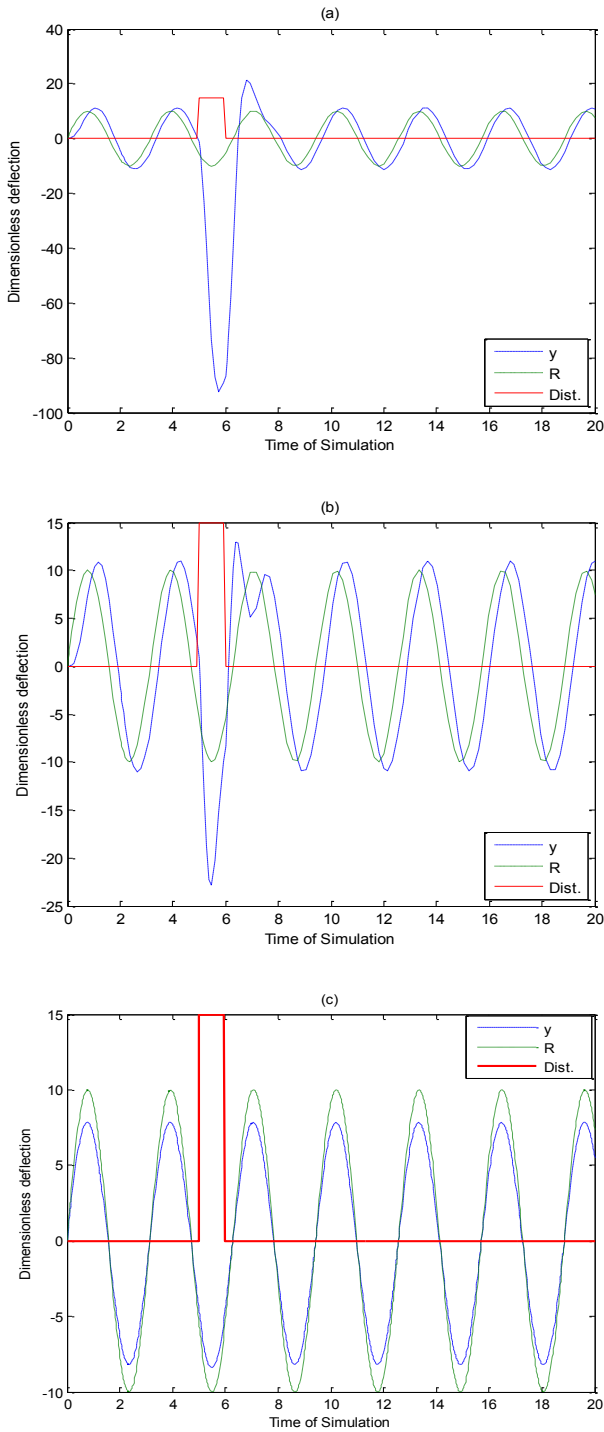
از شکل ۶ می‌توان نتیجه گرفت که در غیاب اغتشاش ردگیری در سیستم حلقه باز بخوبی انجام نمی‌پذیرد و بدیهی است در سیستم حلقه باز بدلیل عدم استفاده از پسخورد با اعمال اغتشاش مسیر دچار اختلال بیشتری نیز می‌گردد. حلقه بسته امکان پذیر است حال آنکه زمان نشست و مقاوم بودن سیستم متفاوت است.

با توجه به شکل ۷ (سیستم حلقه بسته) می‌توان دریافت در کنترلر با پسخورد حالت (SFC)، شکل ۷-ا، ردگیری مسیر دلخواه (R) با خطا صورت



شکل ۴: توابع عضویت (a) ورودی خطا (b) ورودی تغییرات خطا و (c) ولتاژ خروجی

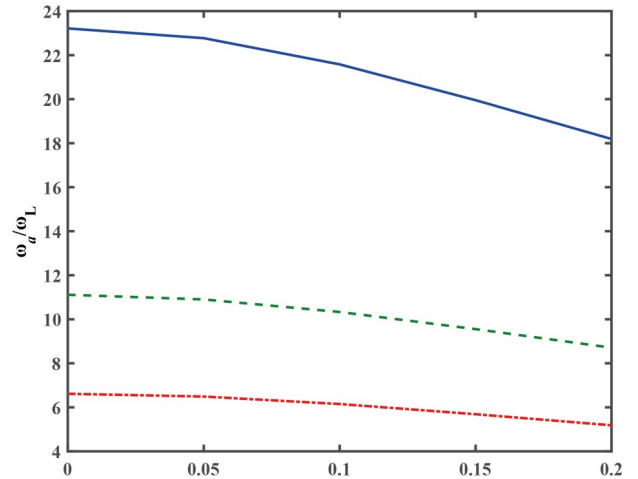
Fig. 4. Membership functions a) error input b) error derivative input c) input voltage



شکل ۷: ردگیری نانوعملگر پیزوالکتریک با ورودی سینوسی و اغتشاش ضربه در ثانیه

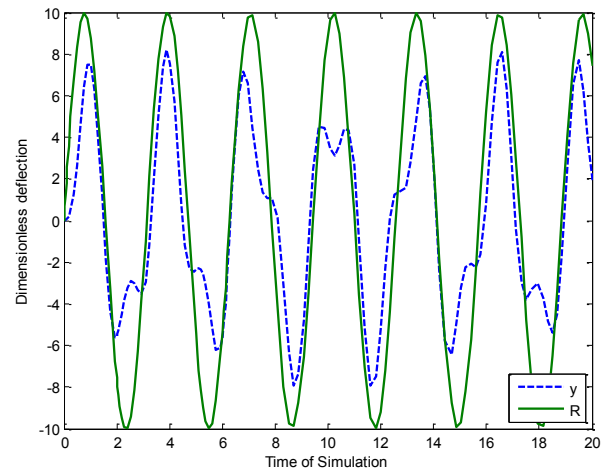
۵ام (a) کنترل پسخورد حالت (b) کنترل پسخورد انتگرال حالت (c) کنترل فازی

Fig. 7. Tip tracking of the piezoelectric nano actuator for a sinusoidal wave reference input with an impulse disturbance at time 5-second, a) the state feedback control, b) the integral state feedback control and c) the Mamdani fuzzy control



شکل ۵: نسبت فرکانس طبیعی طولی، ω_a ، به فرکانس طبیعی عرضی، ω_L ، نانوتیر برای مد اول (خط پر)، مد دوم (خط چین) و مد سوم (خط نقطه)

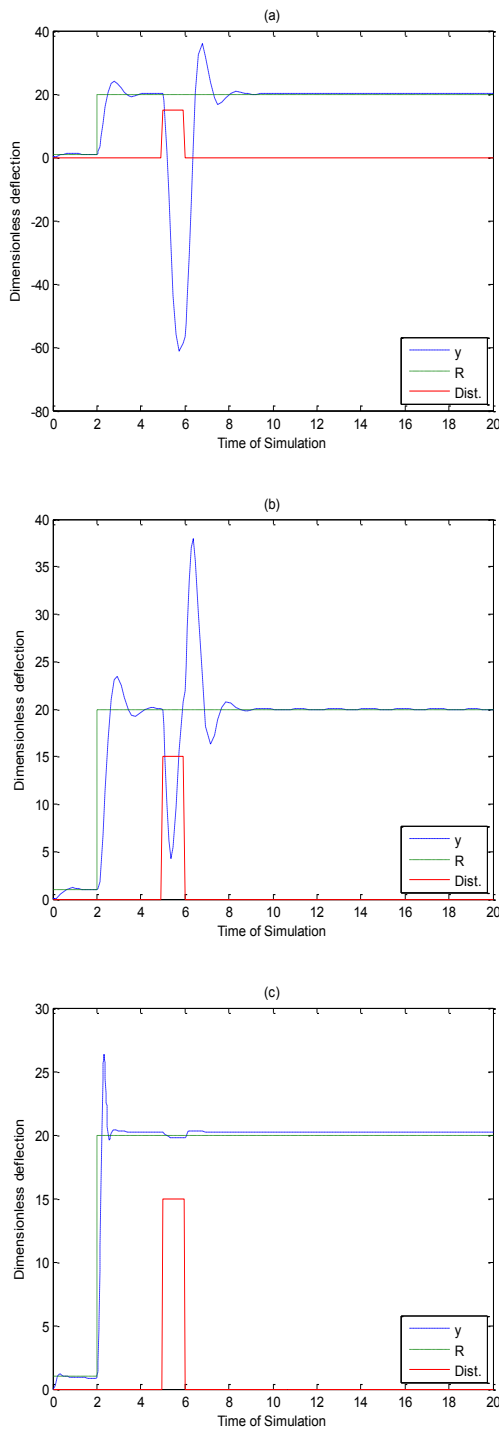
Fig. 5. Axial natural frequency, ω_a , to lateral natural frequency, ω_L , ratio of nano beam for the first mode (solid-lines), second mode (dashed-lines) and third mode (dotted-dashed-lines)



شکل ۶: پاسخ حلقه باز نانوعملگر پیزوالکتریک

Fig. 6. Open-loop response of the piezoelectric nano actuator

می‌پذیرد و با اعمال اغتشاش (ضربه) در ثانیه ۵ از شبیه سازی، ردگیری با دامنه نوسان زیاد و زمان نشست کم صورت می‌پذیرد. در همین راستا می‌توان گفت در کنترلر با پسخورد انتگرال حالت (ISFC)، شکل ۷-b، ردگیری مسیر دلخواه (R) با دامنه نوسان کمتر (حدود ۳۸) و زمان نشست



شکل ۸: ردگیری نانوعملگر پیزوالکتریک با ورودی پله و اغتشاش ضربه در ثانیه ۵^{ام}

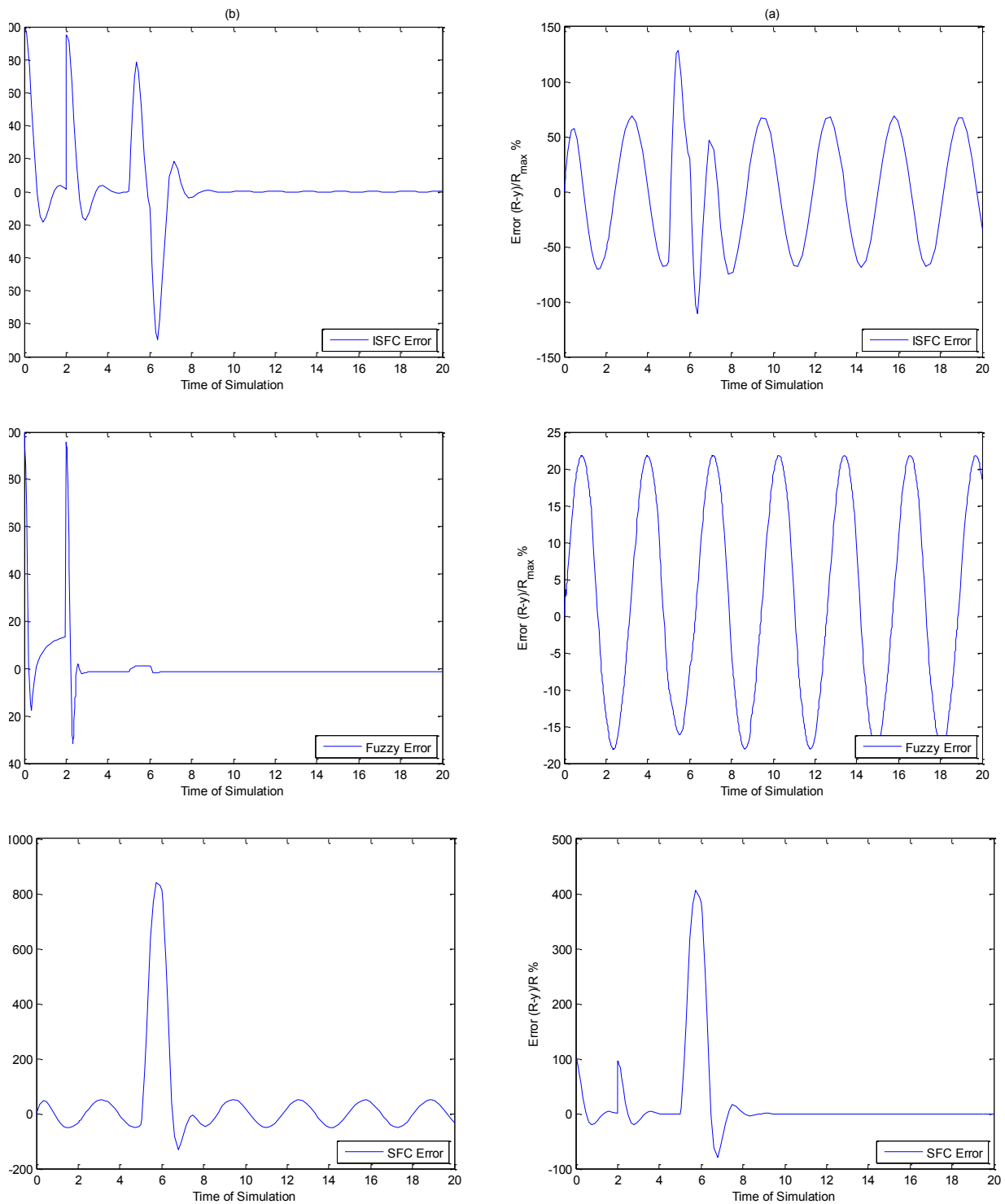
(a) کنترل پسخورد حالت (b) کنترل پسخورد انتگرال حالت (c) کنترل فازی

Fig. 8. Tip tracking of the piezoelectric nano actuator for a step reference input with an impulse disturbance at time 5-second, a) the state feedback control, b) the integral state feedback control and c) the Mamdani fuzzy control

بیشتر (۸ ثانیه) نسبت به کنترلر با پسخورد حالت اتفاق می‌افتد. با بررسی شکل ۷-۸ دیده می‌شود که کنترلر فازی ردگیری بهتری نسبت به دو کنترلر پسخورد حالت و پسخورد انتگرال حالت از خود نشان می‌دهد. همچنین ملاحظه می‌گردد که کنترلر فازی مقاومت بسیار خوبی در مواجهه با اغتشاش از خود نشان می‌دهد که در طراحی کنترلرها از اهمیت بالایی برخوردار است. شکل ۸ ردگیری نانوعملگر با ورودی پله با دامنه ۲۰ برابر ضخامت نانوتیر (درعمل امکان اعمال چنین ورودی وجود ندارد و صرفاً به منظور مشاهده هرچه بهتر کارایی کنترلرهای طراحی شده در نظر گرفته شده است که خود باعث خطای ردگیری اولیه در هر سه کنترلر گردیده است) را نشان می‌دهد که در ثانیه ۵^{ام}، اغتشاشی به شکل ضربه به سیستم اعمال شده است. همانطور که در خصوص ورودی سینوسی گفته شد در این شکل نیز می‌توان دید که کنترلر فازی ردگیری بهتری نسبت به دو کنترلر پسخورد حالت و پسخورد انتگرال حالت از خود نشان می‌دهد. همچنین ملاحظه می‌گردد که کنترلر فازی مقاومت بسیار خوبی در مواجهه با اغتشاش از خود نشان می‌دهد که در طراحی کنترلرها از اهمیت بالایی برخوردار است.

جهت بررسی مناسب‌تر خطای کنترلرها در مورد پاسخهای مشاهده شده در شکل‌های ۷ و ۸، خطای کنترل تمامی کنترلرکننده‌ها در شکل ۹ به نمایش گذاشته شده است. با توجه به شکل ۹ می‌توان پی‌برد که همان‌گونه که انتظار می‌رفت برای هر دو ورودی مرجع سینوسی و پله کنترل پسخورد حالت، کنترلرکننده مقاوم خوبی نیست و نسبت به اغتشاش وارده شده به سیستم حساسیت بالایی دارد. از این منظر کنترلر پسخورد انتگرال حالت عملکرد مطلوبتری نسبت به کنترلر پسخورد حالت در هر دو ورودی از خود نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۹ مشخص است برای هر دو ورودی اعمال شده به سیستم، کنترل فازی عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد و میزان خطای ردگیری برای ورودی سینوسی با وجود اغتشاش با دامنه بزرگ، حدود بیست درصد بوده است.

در عمل به منظور هدایت نانوعملگر پیزوالکتریک بر مسیر دلخواه، می‌بایست ولتاژ ورودی مناسبی اعمال گردد. جهت مشاهده ولتاژ مورد نیاز کنترلرها در حالت‌های مختلف پاسخهای مشاهده شده در شکل‌های ۷ و ۸، منحنی ولتاژ ورودی نسبت به زمان شبیه‌سازی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که در کنترلرکننده‌های پسخورد حالت و پسخورد انتگرال حالت هنگام بروز اغتشاش برای دستیابی مجدد به ردگیری مسیر ولتاژ بسیار بالایی (حدود 10^5 ولت) نیاز می‌باشد که ممکن است از ولتاژ شکست نانوعملگر بیشتر باشد. این بدان معناست که

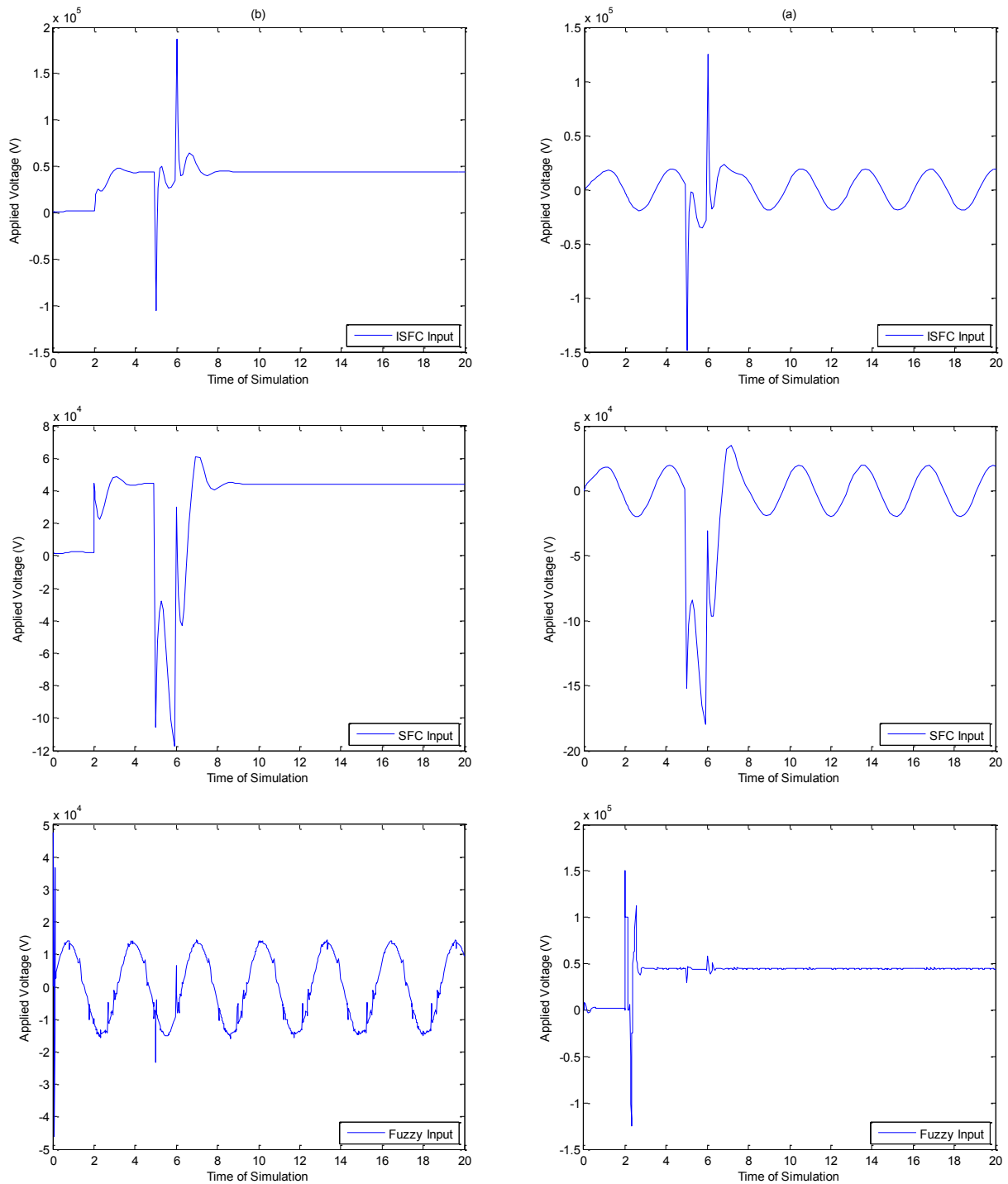


شکل ۹: خطای ردگیری نانوعملگر پیزوالکتریک (a) ورودی سینوسی (b) ورودی پله

Fig. 9. Tip tracking error of the piezoelectric nano actuator for a) a sinusoidal wave reference input and b) a step reference

اعمال چنین ضربیهی به سیستم باعث فروپاشی آن می‌گردد. از سوی دیگر با بررسی شکل ۱۰ می‌توان دریافت که در هر دو ورودی سینوسی و پله، با اعمال اغتشاش، ولتاژ ورودی کنترلر فازی نسبت به دو کنترلر دیگر کمترین

در این شرایط ردگیری مسیر امکان پذیر نمی‌باشد. لازم بذکر است که در این مقاله به منظور امکان نمایش کارایی کنترلرها مقدار پالس اغتشاش بسیار زیاد (۱۵ برابر ضخامت تیر) در نظر گرفته شده است. بدیهی است



شکل ۱۰: ولتاژ ورودی (a) ورودی سینوسی (b) ورودی پله

Fig. 10. Input voltage a) a sinusoidal wave reference input and b) a step reference input

کاهش ضخامت تیر و یا استفاده از تیرهای هدفمند پیشنهاد می‌گردد. بدین منظور در این قسمت در شکل ۱۱ شبیه سازی جامع عددی که جهت بررسی اثر ضخامت نانوعملگر بر روی ورودی کنترل صورت گرفته ارائه شده است.

تغییرات را از خود نشان می‌دهد که این امر به دلیل مقاوم بدون کنترلر فازی در برابر اغتشاش است. در عمل برای کاهش اثر اغتشاش بر ولتاژ ورودی راهکارهایی از جمله

ولتاژ ورودی کنترلر فازی ندارد. در انتها ملاحظه گردید می‌توان با کاهش ضخامت نانوتیر ولتاژ کنترل را کاهش و به ولتاژ مناسبی جهت جلوگیری از رسیدن به ولتاژ شکست نانوعملگر تیر دست یافت.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
D_i	بردار جابجایی الکتریکی، C/m^2
E_i	میدان الکتریکی، V/m
e_{ij}	تانسور کرنش، m/m
f	ضریب فلکسوالکتریک، C/m
u_i	بردار جابجایی، m
علائم یونانی	
ϵ	ثابت دی‌الکتریک، C/Vm
λ	ثابت لامه، P_a
μ	ثابت لامه، P_a
μ_{ij}	تانسور تنش کوپل، P_a
σ	تانسور تنش کلاسیک، P_a
ϕ	پتانسیل الکتریکی، V/m^2

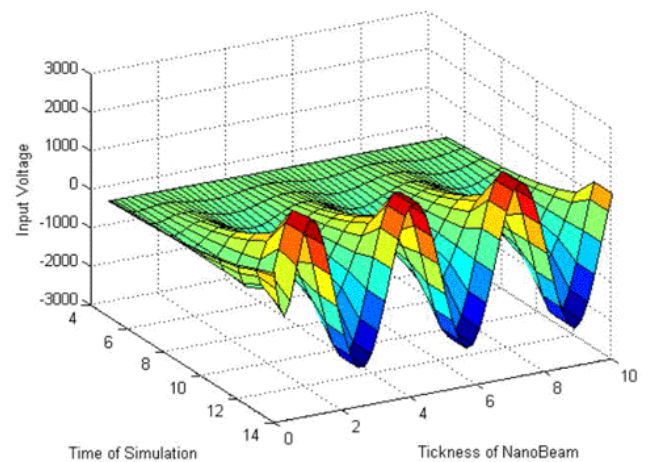
منابع

- [1] H.G. Craighead, Nanoelectromechanical systems, Science, 290(5496) (2000) 1532-1535.
- [2] P. Janphuang, R. Lockhart, N. Uffer, D. Briand, N.F. de Rooij, Vibrational piezoelectric energy harvesters based on thinned bulk PZT sheets fabricated at the wafer level, Sensors and Actuators A: Physical, 210 (2014) 1-9.
- [3] S. Park, X. Gao, Bernoulli–Euler beam model based on a modified couple stress theory, Journal of Micromechanics and Microengineering, 16(11) (2006) 2355.
- [4] Z.L. Wang, J. Song, Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays, Science, 312(5771) (2006) 242-246.
- [5] A. Lazarus, O. Thomas, J.-F. Deü, Finite element reduced order models for nonlinear vibrations of piezoelectric layered beams with applications to NEMS, Finite

همانطور که انتظار می‌رود با کاهش ضخامت، ولتاژ ورودی بشکل معناداری کاهش می‌یابد و بدین ترتیب می‌توان با انتخاب مناسب ضخامت نانوتیر از رسیدن به ولتاژ شکست نانوعملگر جلوگیری نمود.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای نخستین بار ردگیری نانوعملگر با اثر پیزوالکتریک معکوس براساس تئوری فلکسوالکتریک وابسته به اندازه مورد بررسی قرار گرفت. به کمک اصل همپلتون و با در نظر گرفتن غیرخطی‌گری فون-کارمن، معادلات حاکم بر نانوتیر پیزوالکتریک بعنوان نانو عملگر استخراج گردید. با استفاده از روش گلرکین، معادلات با مشتقات پاره‌ای حاکم، گسسته‌سازی گردید. معادلات حاصل به شکل معادلات دیفرانسیل معمولی بازنویسی شدند. سه کنترل کننده متفاوت برای ردگیری مسیر دو ورودی مرجع (سینوسی و پله) طراحی گردیدند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، نشان داده شد که در هر دو ورودی سینوسی و پله، کنترلر فازی نسبت به دو کنترلر دیگر در برابر اغتشاش اعمالی عملکرد مطلوب‌تری از خود نشان داد. همچنین دیده شد که با اعمال اغتشاش با دامنه بزرگ، به منظور ردگیری مسیر در کنترلرهای پسخورد حالت و پسخورد اتنگرالی حالت نیاز به اعمال ولتاژ کنترلی بسیار زیاد می‌باشد که ممکن است از تحمل سیستم خارج باشد. حال آنکه بدلیل مقاوم بودن کنترلر فازی، اغتشاش ورودی اثر محسوسی بر



شکل ۱۱: ولتاژ ورودی نسبت به ضخامت نانوعملگر پیزوالکتریک

Fig. 11. Input voltage versus the nano actuator thickness during the simulation time

- solution growth and functional properties, *Nano Research*, 4(11) (2011) 1013-1098.
- [15] S.M. Tanner, J.M. Gray, C. Rogers, K.A. Bertness, N.A. Sanford, High-Q GaN nanowire resonators and oscillators, *Applied Physics Letters*, 91(20) (2007) 203117.
- [16] P. Fei, P.-H. Yeh, J. Zhou, S. Xu, Y. Gao, J. Song, Y. Gu, Y. Huang, Z.L. Wang, Piezoelectric potential gated field-effect transistor based on a free-standing ZnO wire, *Nano letters*, 9(10) (2009) 3435-3439.
- [17] J.H. He, C.L. Hsin, J. Liu, L.J. Chen, Z.L. Wang, Piezoelectric gated diode of a single ZnO nanowire, *Advanced Materials*, 19(6) (2007) 781-784.
- [18] Q. Wan, Q. Li, Y. Chen, T.-H. Wang, X. He, J. Li, C. Lin, Fabrication and ethanol sensing characteristics of ZnO nanowire gas sensors, *Applied Physics Letters*, 84(18) (2004) 3654-3656.
- [19] H. Tzou, *Piezoelectric shells: Distributed sensing and control of continua: vol. 19*, in, Springer Science & Business Media, 2012.
- [20] B. Zheng, J. Yang, Vibration analysis of base structure on SINS using PZT actuators, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 20(6) (2012) 901-913.
- [21] J. Yang, *The mechanics of piezoelectric structures*, World Scientific, 2006.
- [22] J. Yang, W. Zhang, A thickness-shear high voltage piezoelectric transformer, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 10(2) (1999) 105-121.
- [23] J. Yang, H. Fang, Q. Jiang, Analysis of a ceramic bimorph piezoelectric gyroscope, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 10(6) Elements in Analysis and Design, 49(1) (2012) 35-51.
- [6] M. Majdoub, P. Sharma, T. Cagin, Enhanced size-dependent piezoelectricity and elasticity in nanostructures due to the flexoelectric effect, *Physical Review B*, 77(12) (2008) 125424.
- [7] F. Casadei, L. Dozio, M. Ruzzene, K.A. Cunefare, Periodic shunted arrays for the control of noise radiation in an enclosure, *Journal of sound and vibration*, 329(18) (2010) 3632-3646.
- [8] W. Al-Ashtari, M. Hunstig, T. Hemsell, W. Sextro, Enhanced energy harvesting using multiple piezoelectric elements: theory and experiments, *Sensors and Actuators A: Physical*, 200 (2013) 138-146.
- [9] P. Vettiger, M. Despont, U. Drechsler, U. Durig, W. Haberle, M.I. Lutwyche, H.E. Rothuizen, R. Stutz, R. Widmer, G.K. Binnig, The "Millipede"—More than thousand tips for future AFM storage, *IBM Journal of Research and Development*, 44(3) (2000) 323-340.
- [10] T. Wu, Modeling and design of a novel cooling device for microelectronics using piezoelectric resonating beams, (2003).
- [11] Z. Hao, B. Liao, An analytical study on interfacial dissipation in piezoelectric rectangular block resonators with in-plane longitudinal-mode vibrations, *Sensors and Actuators A: Physical*, 163(1) (2010) 401-409.
- [12] Z.L. Wang, ZnO nanowire and nanobelt platform for nanotechnology, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 64(3-4) (2009) 33-71.
- [13] K.-I. Park, S. Xu, Y. Liu, G.-T. Hwang, S.-J.L. Kang, Z.L. Wang, K.J. Lee, Piezoelectric BaTiO₃ thin film nanogenerator on plastic substrates, *Nano letters*, 10(12) (2010) 4939-4943.
- [14] S. Xu, Z.L. Wang, One-dimensional ZnO nanostructures:

- theory, *Composite Structures*, 94(6) (2012) 2038-2047.
- [33] R. Ansari, V. Mohammadi, M.F. Shojaei, R. Gholami, S. Sahmani, Postbuckling characteristics of nanobeams based on the surface elasticity theory, *Composites Part B: Engineering*, 55 (2013) 240-246.
- [34] W.G. Cady, *Piezoelectricity: Volume Two: An Introduction to the Theory and Applications of Electromechanical Phenomena in Crystals*, Courier Dover Publications, 2018.
- [35] T. Mishima, H. Fujioka, S. Nagakari, K. Kamigaki, S. Nambu, Lattice image observations of nanoscale ordered regions in Pb (Mg_{1/3}Nb_{2/3}) O₃, *Japanese journal of applied physics*, 36(9S) (1997) 6141.
- [36] L.E. Cross, Flexoelectric effects: Charge separation in insulating solids subjected to elastic strain gradients, *Journal of Materials Science*, 41(1) (2006) 53-63.
- [37] S. Baskaran, X. He, Q. Chen, J.Y. Fu, Experimental studies on the direct flexoelectric effect in α -phase polyvinylidene fluoride films, *Applied Physics Letters*, 98(24) (2011) 242901.
- [38] G. Catalan, A. Lubk, A. Vlooswijk, E. Snoeck, C. Magen, A. Janssens, G. Rispens, G. Rijnders, D.H. Blank, B. Noheda, Flexoelectric rotation of polarization in ferroelectric thin films, *Nature materials*, 10(12) (2011) 963-967.
- [39] G.-F. Wang, S.-W. Yu, X.-Q. Feng, A piezoelectric constitutive theory with rotation gradient effects, *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 23(3) (2004) 455-466.
- [40] A.R. Hadjesfandiari, Size-dependent piezoelectricity, *International Journal of Solids and Structures*, 50(18) (2013) 2781-2791.
- [41] R. Maranganti, N. Sharma, P. Sharma, Electromechanical (1999) 459-473.
- [24] J. Yang, Equations for the extension and flexure of a piezoelectric beam with rectangular cross section and applications, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 9(4) (1998) 409-420.
- [25] J. Yang, H. Xiang, Thermo-electro-mechanical characteristics of functionally graded piezoelectric actuators, *Smart Materials and Structures*, 16(3) (2007) 784.
- [26] Y. Zhou, T.R. Nyberg, G. Xiong, S. Li, H. Zhou, Analysis of finite deformation of curved beams bonded with piezoelectric actuating layers, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28(12) (2017) 1553-1564.
- [27] Q. Wang, S. Quek, A model for the analysis of beams with embedded piezoelectric layers, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 13(1) (2002) 61-70.
- [28] Q. Wang, S. Quek, Flexural vibration analysis of sandwich beam coupled with piezoelectric actuator, *Smart Materials and Structures*, 9(1) (2000) 103.
- [29] H. Zeighampour, Y.T. Beni, Size-dependent vibration of fluid-conveying double-walled carbon nanotubes using couple stress shell theory, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 61 (2014) 28-39.
- [30] H. Zeighampour, Y.T. Beni, Analysis of conical shells in the framework of coupled stresses theory, *International Journal of Engineering Science*, 81 (2014) 107-122.
- [31] M.K. Zeverdejani, Y.T. Beni, The nano scale vibration of protein microtubules based on modified strain gradient theory, *Current Applied Physics*, 13(8) (2013) 1566-1576.
- [32] L.-L. Ke, Y.-S. Wang, Z.-D. Wang, Nonlinear vibration of the piezoelectric nanobeams based on the nonlocal

- and Control, 133(3) (2011) 031011.
- [48] S. Shao, K. Masri, M.I. Younis, The effect of time-delayed feedback controller on an electrically actuated resonator, *Nonlinear Dynamics*, 74(1-2) (2013) 257-270.
- [49] M.S. Siewe, U.H. Hegazy, Homoclinic bifurcation and chaos control in MEMS resonators, *Applied Mathematical Modelling*, 35(12) (2011) 5533-5552.
- [50] A. Seleim, S. Towfighian, E. Delande, E. Abdel-Rahman, G. Heppler, Dynamics of a close-loop controlled MEMS resonator, *Nonlinear Dynamics*, 69(1-2) (2012) 615-633.
- [51] R. Vatankhah, A. Najafi, H. Salarieh, A. Alasty, Boundary stabilization of non-classical micro-scale beams, *Applied Mathematical Modelling*, 37(20-21) (2013) 8709-8724.
- [52] Q.C. Nguyen, S. Krylov, Nonlinear tracking control of vibration amplitude for a parametrically excited microcantilever beam, *Journal of Sound and Vibration*, 338 (2015) 91-104.
- [53] M. Komijani, J. Reddy, M. Eslami, Nonlinear analysis of microstructure-dependent functionally graded piezoelectric material actuators, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 63 (2014) 214-227.
- [54] A. Jandaghian, O. Rahmani, An analytical solution for free vibration of piezoelectric nanobeams based on a nonlocal elasticity theory, *Journal of Mechanics*, 32(2) (2016) 143-151.
- coupling in nonpiezoelectric materials due to nanoscale nonlocal size effects: Green's function solutions and embedded inclusions, *Physical Review B*, 74(1) (2006) 014110.
- [42] Z. Yan, L. Jiang, Size-dependent bending and vibration behaviour of piezoelectric nanobeams due to flexoelectricity, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(35) (2013) 355502.
- [43] A.R. Hadjesfandiari, G.F. Dargush, Couple stress theory for solids, *International Journal of Solids and Structures*, 48(18) (2011) 2496-2510.
- [44] Y. Tadi Beni, Size-dependent electromechanical bending, buckling, and free vibration analysis of functionally graded piezoelectric nanobeams, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 27(16) (2016) 2199-2215.
- [45] P. Wang, Feedback control of vibrations in a micromachined cantilever beam with electrostatic actuators, *Journal of Sound and Vibration*, 213(3) (1998) 537-550.
- [46] F.M. Alsaleem, M.I. Younis, Stabilization of electrostatic MEMS resonators using a delayed feedback controller, *Smart Materials and Structures*, 19(3) (2010) 035016.
- [47] F. Alsaleem, M.I. Younis, Integrity analysis of electrically actuated resonators with delayed feedback controller, *Journal of Dynamic Systems, Measurement,*