



# کنترل خیز میکروتیر دوسردرگیر تحت تاثیر شوک‌های مکانیکی با استفاده از خطی‌سازی پسخورد

وحید معرفت خلیل‌آباد

مربی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه  
v.marefat@uut.ac.ir, 57197-97734 پستی صندوق

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 29 تیر 1395  
پذیرش: 12 شهریور 1395  
ارائه در سایت: 11 مهر 1395

کلید واژگان:

ارتعاشات  
خطی‌سازی پسخورد  
میکروتیر  
شوک مکانیکی  
ناپایداری کشش داخل

## چکیده

در این مقاله کنترل‌کننده‌ای با روش خطی‌سازی پسخورد برای کنترل خیز میکروتیری که تحت تاثیر شوک‌های مکانیکی می‌باشد، طراحی شده است. شوک‌های سینوسی، دندان‌اره‌ای و پالس مربعی به عنوان سیگنال مرجع به نمایندگی از شوک‌های موجود در طبیعت که پیچیده و شامل هارمونیک‌های مختلفی هستند، انتخاب شده و برای ارزیابی رفتار سیستم استفاده شده‌اند. میکروتیر مابین دولایه الکتروود قرار دارد و هر یک از الکتروودها با ولتاژ متفاوتی باعث تحریک و کشش میکروتیر می‌شوند. لایه الکتروود فوقانی به منظور کنترل میکروتیر تعبیه شده است. برای بررسی نحوه رفتار میکروتیر در مقابل این شوک‌ها، ابتدا مدل دینامیکی حاکم بر میکروتیر استخراج شده است، سپس معادلات بدست آمده بوسیله روش گلرکین گسسته‌سازی شده‌اند. پس از گسسته‌سازی پاسخ میکروتیر به هر یک از شوک‌های مرجع ترسیم شده است. مدل غیرخطی بدست آمده با استفاده از شکل حالت اول میکروتیر استخراج و منبأی طراحی کنترلر قرار گرفته است. با استفاده از روش خطی‌سازی پسخورد کنترلر غیرخطی طراحی شده و دینامیک مرتبه دوم مناسبی همراه با آن به رفتار میکروتیر اعمال می‌شود. در نهایت با کمک شبیه‌سازی عددی، کارایی کنترل‌کننده نسبت به ورودی‌های مختلف سنجیده می‌شود. شبیه‌سازی‌ها نشان دهنده قابلیت کنترلر طراحی شده در مقابله با اثرات نامطلوب شوک و به تاخیر انداختن پدیده ناپایداری کشش داخل می‌باشد.

## Control of a Clamped-Clamped Microbeam under Mechanical Shock Effects Using Feedback Linearization Technique

Vahid Marefat Khalilabad

School of Mechanical Engineering, Urmia University of Technologies, Urmia, Iran  
\* P.O.B. 57197-97734, Urmia, Iran, v.marefat@uut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 19 July 2016  
Accepted 02 September 2016  
Available Online 02 October 2016

#### Keywords:

Vibrations  
Feedback Linearization  
Microbeam  
Mechanical Shock  
Pull-in Instability

### ABSTRACT

In this paper a nonlinear controller is designed for micro-beam's deflections under mechanical shock effects. The micro-beam is supposed to undergo mechanical shocks. Mechanical shocks are one of the failure sources and the controller is to considerably suppress shock's unfavorable effects. Half-Sine, rectangular and triangular pulses are chosen as reference shock signals to represent true complicated shock signals in nature which consist of different harmonics. Two layers of electrodes are placed in both sides of the micro-beam and are used to actuate the micro-beam by different voltage levels. Upper layer is specifically meant for control purpose. Nonlinear equations governing micro-beam's deflection dynamics are derived, discretized by Galerkin method to a set of nonlinear duffing type ODEs and used to investigate micro-beams response to each shock input signal. Controller design is based on a simple nonlinear model formed by micro-beam's first mode shape. Proper second order behavior is generated by feedback linearization method as controller logic. Finally, controller performance and shock rejecting capability are evaluated by numerical simulations. Controller is shown to be very effective in diminishing shock unfavorable effects and postponing pull-in instability by numerical simulations.

### 1- مقدمه

فرکانس‌های طبیعی بالا نقش مهمی در افزایش حساسیت و بازه عملیاتی تجهیزات میکرو الکترو مکانیکی دارد. این ادوات شامل گستره وسیعی از فیلترها و سویچ‌های فرکانس رادیویی، رزوناتورها، عملگرهای حرارتی، حسگرهای میکرو الکترو مکانیکی و ... می‌باشد. میکروتیرهای رزونانسی از اواسط 1980 میلادی به عنوان ترانسدیوسرهای مکانیکی استفاده شده‌اند [1]. در سال 1990-1991 با حمایت آژانس پروژه‌های تحقیقاتی پیشرفته دفاعی<sup>3</sup> (DARPA) دکتر لارسن اولین سویچ میکرو الکترو

میکروتیرهای دوسردرگیر به دلیل سهولت در ساخت، نقش سازه‌ای مهمی در بسیاری از سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی<sup>1</sup> (MEMS) دارند. سهولت در ساخت آنها ناشی از وجود روش‌های میکروماشین‌کاری<sup>2</sup> سطحی می‌باشد. از ویژگی‌های این تیرها که آنها را برای استفاده در سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی مطلوب می‌گرداند، فرکانس‌های طبیعی نسبتاً بالای آنها است.

<sup>1</sup> Micro Electro Mechanical Systems

<sup>2</sup> Surface Micromachining

<sup>3</sup> Defense Advanced Research Projects Agency

Please cite this article using:

V. Marefat Khalilabad, Control of a Clamped-Clamped Microbeam under Mechanical Shock Effects Using Feedback Linearization Technique, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 69-76, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

است. این فرایند با طراحی شیوه‌هایی برای تست اثرات شوک و بررسی مکانیزم‌های خرابی آغاز شده [14,13] و برای محافظت از میکروسازه‌ها در برابر شوک ایده‌هایی از ایزولاسون شوک بوسیله بسته بندی گرفته تا تکنیک‌هایی برای محافظت در برابر اثرات شوک مطرح شده است [15]. در کارهای بعدی پاسخ‌های دینامیکی سیستم بسته‌بندی ابزارهای میکرو الکترو مکانیکی در زمان تست سقوط، مورد ارزیابی قرار گرفته است [16]. از ایده‌های دیگری که در این زمینه مطرح شده استفاده از روش‌های طراحی برای مصونیت در برابر شوک بوسیله الگوریتم ژنتیک می‌باشد [17]. تلاش‌های انجام گرفته در زمینه غلبه بر اثرات شوک و ناپایداری دینامیکی که بیان شد، غیرعامل<sup>3</sup> بوده‌اند.

در تحقیق حاضر کنترلی برای غلبه بر اثرات شوک و افزایش بازه ناپایداری دینامیکی طراحی شده است. برای کنترل میکروتیر عملگر استاتیکی دیگری در جهت مخالف عملگر سابق تعبیه شده و با اعمال بار مناسب از بوجود آمدن پدیده چسبیدن تیر به عملگر زیرین جلوگیری می‌شود. این عمل بازه تحمل شوک و ناپایداری را افزایش می‌دهد.

مقاله حاضر به شرح زیر مرتب شده است. در بخش 2 مفهوم شوک و سیگنال‌های مرجع شوک معرفی می‌شود. در بخش 3 مدل دینامیکی میکروتیر استخراج، سپس بوسیله روش گلرکین گسسته‌سازی شده است. در قسمت 4 با منطبق خطی‌سازی پسخورد کنترلی برای کنترل رفتار خیز میکروتیر طراحی شده و حاصل اعمال کنترل رفتار میکروتیر در بخش 5 شبیه‌سازی شده است. در نهایت نتایج حاصله در بخش 6 مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

## 2- شوک در میکروتیر

شوک را می‌توان به عنوان نیرویی که ناگهان و در بازه زمانی کوتاهی در مقایسه با ثابت زمانی طبیعی سازه به میکروتیر وارد می‌شود، تعریف کرد [18]. پارامترهای اساسی پالس شوک عبارتند از مقدار بیشینه، دوره زمانی و شکل شوک. با استفاده از روش‌های مختلفی می‌توان پاسخ سیستم را به بارهای شوک وارده تعیین کرد. استفاده از پاسخ طیفی (رویکرد حوزه فرکانس) یا پاسخ زمانی سیستم (رویکرد حوزه زمان) برای تعیین پاسخ به ورودی شوک متعارف است. در این بخش فرض شده است که میکروتیر درون بسته‌بندی قرار دارد که در مسیر انتقال نیروی شوک به میکروتیر، تغییری در نیروی شوک ایجاد نمی‌کند. نیروی شوک بوسیله تکیه‌گاه‌های آن به سازه میکروتیر اعمال می‌شود [19]، بنابراین تحریک پایه دقیقاً مانند اعمال شتاب شوک به عنوان نیروی گسترده بر میکروتیر می‌باشد.

یونس و همکاران [11] تاریخچه مفصلی از مطالعات انجام شده در این حوزه را ارائه داده‌اند. توابع شوک معرفی شده در این مرجع به عنوان توابع شوک ورودی استفاده شده‌اند. توابع شکل موج شوک در شکل 1 نشان داده شده و با معادلات (1-الف) تا (1-ج) معرفی شده‌اند.

در معادلات شکل موج معرفی شده  $T$  بازه اعمال شوک،  $u(t)$  تابع پله واحد و  $r(t)$  تابع رمپ واحد می‌باشد. تابع (1-الف) مرتبط با پالس شوک نیمه سینوسی، تابع (1-ب) مرتبط با پالس شوک مثلثی و تابع (1-ج) مرتبط با پالس شوک مستطیلی می‌باشد.

$$g(t) = \sin\left(\frac{\pi}{T}t\right)u(t) + \sin\left[\frac{\pi}{T}(t-T)\right]u(t-T) \quad (1-الف)$$

$$g(t) = 2[r(t) - 2r(t-T/2) + r(t-T)]/T \quad (1-ب)$$

مکانیکی را که به طور خاص برای کاربردهای میکروویو طراحی شده بود، ساخت [2]. هرچند این طرح قابلیت اطمینان کمی داشت اما تا بازه فرکانسی 50 گیگاهرتز عملکرد عالی از خود نشان می‌داد. با افزایش نیاز و تقاضا برای ابزارهای میکرو الکترو مکانیکی در کاربردهای ارتباطات بی سیم، تقاضا برای فاکتورهای فرکانس بالا و معیار کیفی افزایش یافت. تا اینکه در اواسط دهه نود روزناتورهای میکرو الکترو مکانیکی به عنوان جایگزین‌هایی برای روزناتورهای با اندازه بزرگ مطرح شدند [3].

با توجه به اینکه روش‌های متعددی برای عملگری<sup>1</sup> ابزارهای میکرو الکترو مکانیکی وجود دارد اما به دلیل سادگی و کارایی بالاتر و بهتر، روش عملگری الکترواستاتیکی در مقایسه با سایر روش‌ها توسعه یافته‌تر است [4]. در این روش میکروتیر توسط جریان DC بایاس، خیز پیدا کرده سپس به وسیله جریان هارمونیک AC حول فرکانس طبیعی خود ارتعاش می‌کند [3]. مسئله اساسی در این روش تنظیم صحیح بار الکتریکی در محدوده‌ای است که پایداری کشتش داخل<sup>2</sup> را تضمین کند [5]. در صورت ایجاد ناپایداری، میکروتیر کشیده شده و به الکتروتود می‌چسبد در نتیجه باعث خرابی وسیله خواهد شد. میکروتیرها به دلیل داشتن قابلیت تحمل خیزهای بزرگ در وسط تیر، نسبت به تیرهای ماکرو رفتار غیرخطی‌تری دارند. بنابراین برای بررسی دقیق‌تر رفتار این تیرها، ناپایداری دینامیکی با استفاده از مدلی غیر خطی تحلیل شده است [6]. علاوه بر بررسی اثرات بارگذاری‌های مکانیکی بر ناپایداری کشتش داخل، اثرات بارگذاری‌های الکترواستاتیکی نیز بر پایین آمدن آستانه پایداری دینامیکی کشتش داخل بررسی شده است [7].

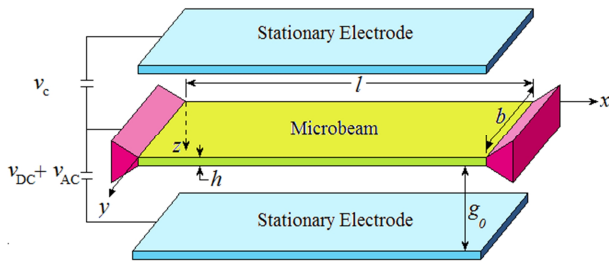
امروزه سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی در حال رشد و گسترش هستند و علاوه بر مسئله پایداری یکی دیگر از مهمترین مسائل حساسی که بر تجاری‌سازی آنها اثر دارد، قابلیت اطمینان آنها تحت تاثیر شوک و ضربه‌های مکانیکی است. شوک‌ها در فازهای ساخت، توزیع و عملیات این وسیله دیده می‌شوند. معیار سخت‌گیرانه‌ای که در صنایع خودروسازی برای ابزارهای شامل قطعات میکرو الکترو مکانیکی جهت مقاومت در برابر افتادن بر روی سطوح سخت وضع شده است، دلیلی بر اهمیت این موضوع می‌باشد [8]. شوک‌های مکانیکی قادر به ایجاد بارهای دینامیکی بزرگی روی سازه هستند که می‌تواند باعث ترک، شکست یا متلاشی شدن قطعه شود. اینها خود باعث خرابی مکانیکی یا الکتریکی خواهند شد. از اتفاقات مهمی که برای اعضای میکرو الکترو مکانیکی در طول شوک می‌افتد معلق شدن و خمش میکروتیر سپس برخورد آن با بخش الکتروتود ثابت وسیله و ایجاد اتصال کوتاه می‌باشد [9]. برخلاف دستگاه‌های بزرگ، خرابی سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی به معنی به وجود آمدن شکست در سازه به علت تنش‌های بالا نیست و می‌تواند در اثر اتصال کوتاه سیستم نیز به وجود آید. این خاصیت به دلیل ساختار سیلیکونی یا پلی‌سیلیکونی اکثر قطعات میکروسازه‌ای می‌باشد. این مواد و به تبع آن میکروسازه‌ها در برابر تنش‌های خمشی ناشی از شتاب‌های شوک بسیار مقاوم هستند و شکست در آنها اتفاق نادری است [10]. گام نخست در غلبه بر اثرات نامطلوب شوک بررسی پاسخ دینامیکی میکروسازه‌ها تحت تاثیر شوک‌های مختلف در شرایط کاری متفاوت می‌باشد. از این رو دینامیک غیرخطی تیر دوسردرگیر استخراج شده و پس از شبیه‌سازی، پاسخ‌های دینامیکی میکروتیر به سه نوع شوک مکانیکی متفاوت بررسی شده است [12,11].

جهت کاهش اثرات شوک‌های مکانیکی ایده‌های متفاوتی مطرح شده

<sup>1</sup> Actuation

<sup>2</sup> Pull-in Stability

<sup>3</sup> Passive



**Fig. 2** Schematic of clamped-clamped Microbeam suspended between two layers of piezoelectric

شکل 2 شماتیک میکروتیر دوسردرگیر پیزوالکتریک پوشش داده شده توسط دولایه الکترو

$$c = \frac{\hat{c}l^4}{ET}, N = \frac{\hat{N}l^2}{EI}, w = \frac{\hat{w}}{g_0}, x = \frac{\hat{x}}{l}$$

$$t = \hat{t} \sqrt{\frac{EI}{\rho b h l^4}}, \Omega = \hat{\Omega} \sqrt{\frac{\rho b h l^4}{EI}}, T = \sqrt{\frac{\rho b h l^4}{EI}} \quad (3)$$

در نهایت معادله خیز میکروتیر بی‌بعد تحت تاثیر تحریک الکترواستاتیک متناوب و مستقیم در معادله (4) نشان داده شده است. در این معادله  $\alpha_3$  نماینده پارامتر بی‌بعد شوک بوده و بر اساس این پارامتر می‌توان دید اثر شوک به طرز قابل توجهی با افزایش طول تیر یا با کاهش ضخامت آن افزایش می‌یابد. این گزاره با نتایج تحلیل‌های نظری و اندازه‌گیری‌های تجربی همخوانی دارد [11].

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c \frac{\partial w}{\partial t} - [\alpha_1 \Gamma(w, w) + N] \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{\alpha_2 [V_{DC} + V_{AC} \sin(\Omega t)]^2}{(1-w)^2} - \frac{\alpha_2 V_c^2}{(1+w)^2} + \alpha_3 g(t)$$

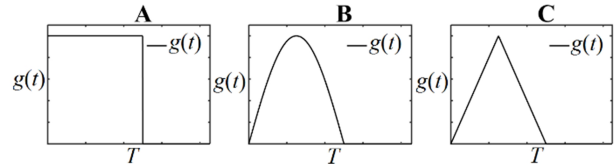
$$\Gamma(w, w) = \int_0^1 \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx$$

$$\alpha_1 = \frac{A g_0}{2l}, \alpha_2 = \frac{\epsilon b l^4}{2g_0^3 EI}, \alpha_3 = \frac{F_0 l^4}{g_0 EI} \quad (4)$$

در گام بعد پس از ضرب طرفین معادله (4) در مخرج مشترک طرف راست  $(1-w)^2$  سپس گسسته‌سازی معادله حاصل به شکل سیستمی از معادلات دیفرانسیل عادی در حوزه زمان با درجات آزادی محدود، مدلی کاهش مرتبه یافته تولید شده است. برای این منظور توابع شکل حالت<sup>2</sup> میکروتیر نامیرای خطی، به عنوان توابع پایه در فرایند گسسته‌سازی گلرکین استفاده شده‌اند. در تحقیق حاضر از روش گلرکین متعارف استفاده شده است اما روش‌های دیگری نیز در این زمینه ارائه شده‌اند که بر پایه اعمال روش گلرکین به‌طور مستقیم بر روی معادله دیفرانسیل حاکم می‌باشند [23]. در این بخش خیز میکروتیر به صورت ترکیبی از توابع گسسته که بر پایه توابع شکل حالت تیر ساخته شده‌اند، به شکل نشان داده شده در معادله (5) گسسته شده است.

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^n q_i(t) \varphi_i(t) \quad (5)$$

تابع  $q_i(t)$  مختصات عمومی<sup>3</sup>  $\varphi_i(t)$  و تابع  $\varphi_i(t)$  نیز آمین تابع شکل حالت نامیرای خطی میکروتیر مستقیم می‌باشد. در صورتی که طرفین معادله (4) را در  $\varphi_i(t)$  ضرب کرده و معادله (5) در آن جاگذاری شود سپس از معادله حاصل در بازه  $x = 0.1$  انتگرال‌گیری گردد، مدل کاهش مرتبه یافته میکروتیر به شکل معادله حاصل می‌شود. پاسخ میکروتیر را به ورودی شوک، تحریک الکترو پایه و تحریک الکترو کنترلی می‌توان با انتگرال‌گیری از معادلات دیفرانسیل عادی بدست آمده در حوزه زمان، سپس جاگذاری پاسخ



**Fig. 1** Simple Shock pulses used to represent real shock pulses. A) Rectangular Pulse, B) Half-Sine Pulse, C) Triangular Pulse

شکل 1 پالس‌های ساده شوک که برای مدل کردن بارهای واقعی شوک استفاده شده اند. A) پالس مستطیلی، B) پالس نیمه سینوسی، C) پالس مثلثی

$$g(t) = u(t) + u(t-T) \quad (ج-1)$$

### 3- مدل میکروتیر دوسردرگیر تحت تاثیر شوک

مدل غیرخطی پیشنهادی مرجع [20] برای تیر دوسردرگیری که بین دو لایه از پیزوالکتریک به صورت سرتاسری پوشش داده شده است و در شکل 2 نمایش داده شده، استفاده شده است. در این مدل لایه‌های پیزوالکتریک در سرتاسر طول میکروتیر بر روی سیلیکون خالص قرار گرفته‌اند. لایه‌های زیرین و فوقانی توسط جریان‌های مستقیم DC و متناوب AC که با نمادهای  $V_{DC}$  و  $V_{AC}$  نمایش داده می‌شود، تحریک می‌شوند. دامنه ولتاژ متناوب با  $V_{AC}$  و فرکانس آن با نماد  $\hat{\Omega}$  نمایش داده می‌شود. ولتاژ اعمال شده به لایه فوقانی که به منظور کنترل رفتار میکروتیر استفاده شده است با نماد  $V_c$  نمایش داده شده است. زمان، طول، ضخامت، عرض و ممان اینرسی میکروبیوم با  $a, h, l, \hat{t}$  و  $I$  مشخص می‌شوند.  $E, \epsilon_0$  و  $\rho$  به ترتیب مدول یانگ، ضریب معادل پیزوالکتریک و چگالی سیلیکون هستند و  $g_0$  فاصله بین میکروتیر و پیزوالکتریک می‌باشد. میکروتیر در معرض میرایی لزوج که می‌تواند در اثر میرایی لایه فشرده شده<sup>1</sup> باشد، قرار دارد [21]. علاوه بر این، میرایی فیلم فشرده سیال در میکروتیر رزوناتور با بکارگیری تئوری میکروپولار در کارهای بعدی مورد بررسی قرار گرفته و در آن اثرات پارامترهایی چون عدد فشرده‌گی، فشار محیط و همینطور پارامترهای هندسی میکروتیر روی اختلاف مقادیر کیفیت مورد بررسی قرار گرفته است [22]. این اثر با ضریب میرایی معادل  $\hat{c}$  بر واحد طول تخمین زده می‌شود. پارامتر  $\hat{N}$  بسته به مثبت یا منفی بودن، متناظر با بار محوری کششی یا فشاری وارد بر میکروتیر می‌باشد. دستگاه مختصات مطابق شکل 2 به صفحه میانی انتهای سمت چپ میکروتیر متصل شده است و خیز میکروتیر در طول محور  $z$  با نماد  $\hat{w}(x, t)$  نمایش داده می‌شود. برای اعمال اثر شوک بر میکروتیر به پیشنهاد مرجع [11] از توابع پالس بر واحد طول با دامنه  $F_0$  و شکل  $g(\hat{t})$  که در معادلات (1-الف) تا (1-ج) معرفی شده‌اند استفاده می‌شود.

معادله حاکم بر رفتار خیز میکروتیر با معادله شماره (2) توصیف می‌شود. توابع دینامیک میکروتیر و توابع تحریک الکتروها مستخرج از مرجع [20] و توابع شوک نیز مستخرج از مرجع [11] می‌باشد.

$$EI \frac{\partial^4 \hat{w}}{\partial \hat{x}^4} + \rho A \frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial \hat{t}^2} + \hat{c} \frac{\partial \hat{w}}{\partial \hat{t}} - \left[ \frac{EA}{2l} \int_0^1 \left( \frac{\partial \hat{w}}{\partial \hat{x}} \right)^2 d\hat{x} + \hat{N} \right] \frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial \hat{x}^2} = \frac{\epsilon_0 b [V_{DC} + V_{AC} \sin(\hat{\Omega} \hat{t})]^2}{2(g_0 - \hat{w})^2} - \frac{\epsilon_0 b V_c^2}{2(g_0 + \hat{w})^2} + F_0 g(\hat{t}) \quad (2)$$

برای بی‌بعدسازی معادله (2) از پارامترهای بی‌بعد زیر استفاده می‌شود.

<sup>2</sup> Mode Shape

<sup>3</sup> Generalized Coordinate

<sup>1</sup> Squeeze-Film Damping

در معادله (6) با توجه به وجود توان چهارم  $w$  حاصل از ضرب مخرج مشترک سمت راست معادله (4) در طرفین به اضافه توان دوم  $w$  موجود در تابع گاما یا  $\Gamma(w, w)$  و ضرب در مشتق دوم موقعیت نسبت به جابجایی  $\partial^2 w / \partial x^2$  در مجموع انتظار مشاهده بخشی از معادله با هفت مرتبه ضرب  $q$  در هم وجود دارد.

یونس و همکاران نشان دادند که استفاده از معادله مرتبه چهار و بالاتر برای گرفتن پاسخ مناسب دینامیکی از میکروتیر دوسردرگیر مناسب است [24]. جهت طراحی کنترلر از مدل مرتبه اول که ساده‌تر می‌باشد استفاده می‌شود.

در ادامه برای مدل کردن تیر تنها از شکل حالت اول استفاده می‌شود. با توجه به اینکه وظیفه کنترلر طراحی شده مقابله با اغتشاشات، سیگنال‌های مخالف و عدم قطعیت‌های موجود در مدل‌سازی می‌باشد، بنابراین استفاده از مدل مرتبه اول برای طراحی کنترلر و در نهایت تست کنترلر بر روی مدل دقیق‌تر معقول می‌باشد. رابطه کلی با در نظر گرفتن یک شکل حالت به شکل معادله (7-الف) می‌باشد. تابع (7-ب) برای ساده‌سازی شکل معادلات نهایی معرفی شده است.

$$\begin{aligned} & (\ddot{q} + c\dot{q}) \left( \int_0^1 \varphi^2 dx - 2q^2 \int_0^1 \varphi^4 dx \right. \\ & \left. + q^4 \int_0^1 \varphi^6 dx \right) = \alpha_1 q^7 \int_0^1 \dot{\varphi}^2 dx \int_0^1 \varphi^5 \varphi'' dx \\ & + q^5 \left( N \int_0^1 \varphi^5 \varphi'' dx - \int_0^1 \varphi^5 \varphi^{iv} dx \right. \\ & \left. - 2\alpha_1 \int_0^1 \dot{\varphi}^2 dx \int_0^1 \varphi^3 \varphi'' dx \right) + q \left( N \int_0^1 \varphi \varphi'' dx \right. \\ & \left. - \int_0^1 \varphi \varphi^{iv} dx \right) + q^3 \left( 2 \int_0^1 \varphi^3 \varphi^{iv} dx + \alpha_1 \right. \\ & \left. \times \int_0^1 \dot{\varphi}^2 dx \int_0^1 \varphi \varphi'' dx - 2N \int_0^1 \varphi^3 \varphi'' dx \right) \\ & + \alpha_2 [V_{DC} + V_{AC} \sin(\Omega t)]^2 \left( \int_0^1 \varphi dx + 2q \right. \\ & \left. \times \int_0^1 \varphi^2 dx + q^2 \int_0^1 \varphi^3 dx \right) - \alpha_2 V_c^2 \left( \int_0^1 \varphi dx \right. \\ & \left. - 2q \int_0^1 \varphi^2 dx + q^2 \int_0^1 \varphi^3 dx \right) + \alpha_2 g(t) \\ & \times \left( \int_0^1 \varphi dx - 2q^2 \int_0^1 \varphi^3 dx + q^4 \int_0^1 \varphi^5 dx \right) \end{aligned} \quad (7-الف)$$

$$\begin{aligned} H(t) = & \left\{ \alpha_1 q^7 \int_0^1 \dot{\varphi}^2 dx \int_0^1 \varphi^5 \varphi'' dx + q^5 \right. \\ & \times \left( N \int_0^1 \varphi^5 \varphi'' dx - \int_0^1 \varphi^5 \varphi^{iv} dx - 2\alpha_1 \right. \\ & \left. \times \int_0^1 \dot{\varphi}^2 dx \int_0^1 \varphi^3 \varphi'' dx \right) + q \left( N \int_0^1 \varphi \varphi'' dx \right. \\ & \left. - \int_0^1 \varphi \varphi^{iv} dx \right) + q^3 \left( 2 \int_0^1 \varphi^3 \varphi^{iv} dx + \alpha_1 \right. \\ & \left. \times \int_0^1 \dot{\varphi}^2 dx \int_0^1 \varphi \varphi'' dx - 2N \int_0^1 \varphi^3 \varphi'' dx \right) \\ & - \alpha_2 [V_{DC} + V_{AC} \sin(\Omega t)]^2 \left( \int_0^1 \varphi dx \right. \\ & \left. - 2q \int_0^1 \varphi^2 dx + q^2 \int_0^1 \varphi^3 dx \right) \left. \right\} \\ & \times \left( \int_0^1 \varphi^2 dx - 2q^2 \int_0^1 \varphi^4 dx + q^4 \int_0^1 \varphi^6 dx \right)^{-1} \end{aligned} \quad (7-ب)$$

معادله (7-الف)، یک معادله دیفرانسیل عادی مرتبه دو بوده و برای اینکه قابلیت حل آن وجود داشته باشد باید از صفر نبودن ضریب  $\ddot{q}$  اطمینان حاصل شود. ضریب  $\ddot{q}$  تابعی درجه دو است و تعیین علامت تابع دلتای آن که در معادله (8) نشان داده شده، اطلاعات مفیدی در مورد وضعیت ریشه‌های آن

آن در رابطه تابع (5) برای محاسبه خیز میکروتیر  $w(x, t)$  بدست آورد.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^M q_i \int_0^1 \varphi_i^{iv} \varphi_p dx - 2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M q_i q_j q_k \\ & \times \int_0^1 \varphi_i \varphi_j \varphi_k^{iv} \varphi_p dx \\ & + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M q_i q_j q_k q_l q_m \\ & \times \int_0^1 \varphi_i \varphi_j \varphi_k \varphi_l \varphi_m^{iv} \varphi_p dx \\ & - 2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M q_i q_j \dot{q}_k \int_0^1 \varphi_i \varphi_j \varphi_k \varphi_p dx \\ & + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M q_i q_j q_k q_l \dot{q}_m \\ & \times \int_0^1 \varphi_i \varphi_j \varphi_k \varphi_l \varphi_m \varphi_p dx + \sum_{i=1}^M \dot{q}_i \int_0^1 \varphi_i \varphi_p dx \\ & + c \sum_{i=1}^M q_i \int_0^1 \varphi_i \varphi_p dx - 2c \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M q_i q_j \dot{q}_k \\ & \times \int_0^1 \varphi_i \varphi_j \varphi_k \varphi_p dx - \alpha_1 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M q_i q_j q_k \\ & \times \int_0^1 \varphi_i' \varphi_j' dx \int_0^1 \varphi_k'' \varphi_p dx \\ & + c \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M q_i q_j q_k q_l \dot{q}_m \\ & \times \int_0^1 \varphi_i \varphi_j \varphi_k \varphi_l \varphi_m \varphi_p dx \\ & + 2\alpha_1 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M q_i q_j q_k q_l q_m \\ & \times \int_0^1 \varphi_i' \varphi_j' dx \int_0^1 \varphi_k \varphi_l \varphi_m'' \varphi_p dx \\ & - \alpha_1 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \sum_{o=1}^M q_i q_j q_k q_l q_m q_n q_o \\ & \times \int_0^1 \varphi_i' \varphi_j' dx \int_0^1 \varphi_k \varphi_l \varphi_m \varphi_n \varphi_o'' \varphi_p dx \\ & - N \sum_{i=1}^M q_i \int_0^1 \varphi_i'' \varphi_p dx + 2N \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M q_i q_j q_k \\ & \times \int_0^1 \varphi_i \varphi_j \varphi_k'' \varphi_p dx \\ & - N \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M q_i q_j q_k q_l q_m \\ & \times \int_0^1 \varphi_i \varphi_j \varphi_k \varphi_l \varphi_m'' \varphi_p dx \\ & = \alpha_2 [V_{DC} + V_{AC} \sin(\Omega t)]^2 \left( \int_0^1 \varphi_p dx \right. \\ & \left. + 2 \sum_{i=1}^M q_i \int_0^1 \varphi_i \varphi_p dx + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M q_i q_j \int_0^1 \varphi_i \varphi_j \varphi_p dx \right. \\ & \left. - \alpha_2 V_c^2 \left( \int_0^1 \varphi_p dx - 2 \sum_{i=1}^M q_i \int_0^1 \varphi_i \varphi_p dx \right. \right. \\ & \left. \left. + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M q_i q_j \int_0^1 \varphi_i \varphi_j \varphi_p dx \right) + \alpha_2 g(t) \left( \int_0^1 \varphi_p dx \right. \right. \\ & \left. \left. - 2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M q_i q_j \int_0^1 \varphi_i \varphi_j \varphi_p dx \right. \right. \\ & \left. \left. + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M q_i q_j q_k q_l \int_0^1 \varphi_i \varphi_j \varphi_k \varphi_l \varphi_p dx \right) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

ارائه می‌دهد.

$$\Delta' = \left( \int_0^1 \varphi^4 dx \right)^2 - \int_0^1 \varphi^6 dx \int_0^1 \varphi^2 dx < 0 \quad (8)$$

در معادله (8) تابع شکل حالت تیر، اولین تابع شکل حالت بوده و ضرایب ثابت آن در رابطه (9) تعریف می‌شود [18]. تابع (9) بر اساس تعریف تابع شکل حالت تیر با شرایط اولیه مرتبط با میکروتیر دوسردرگیر حاصل شده است.

$$\begin{aligned} \varphi_n = & c_1 e^{\beta_n l \frac{x}{l}} + c_2 e^{-\beta_n l \frac{x}{l}} + c_3 \sin\left(\beta_n l \frac{x}{l}\right) \\ & + c_4 \cos\left(\beta_n l \frac{x}{l}\right) \\ n = & 1 \rightarrow \beta_n l = 4.7300 \\ c_1 = & 1, c_2 = 113.3002, c_3 = 112.3002 \\ c_4 = & -114.3002 \end{aligned} \quad (9)$$

از آنجاییکه با استفاده از تابع (9) علامت تابع دلتا منفی است بنابراین نگرانی از بابت صفر شدن ضریب  $\varphi$  وجود ندارد. در نهایت با تقسیم طرفین بر ضریب  $\varphi$  و با استفاده از تابع (7-الف) معادله (10) حاصل شده است.

$$\begin{aligned} \ddot{q} + c\dot{q} = & H(t) + \left[ -\alpha_2 V_c^2 \left( \int_0^1 \varphi dx - 2q \int_0^1 \varphi^2 dx \right. \right. \\ & + q^2 \int_0^1 \varphi^3 dx \left. \right) + g(t) \alpha_3 \left( \int_0^1 \varphi dx - 2q^2 \int_0^1 \varphi^3 dx \right. \\ & + q^4 \int_0^1 \varphi^5 dx \left. \right) \left. \right] \left( \int_0^1 \varphi^2 dx - 2q^2 \int_0^1 \varphi^4 dx \right. \\ & \left. + q^4 \int_0^1 \varphi^6 dx \right)^{-1} \end{aligned} \quad (10)$$

#### 4- طراحی کنترل‌کننده با روش خطی‌سازی پسخورد

کنترل‌کننده‌ای بر اساس منطق خطی‌سازی پسخورد طراحی شده است. ایده اصلی این روش تبدیل دینامیک غیرخطی سیستم به دینامیک تماماً یا نسبتاً خطی می‌باشد [25] تا بتوان از روش‌های طراحی کنترلر خطی برای آن استفاده کرد. در این روش معادلات سیستم به شکل معادله (11) است که در آن  $\bar{x}$  بردار حالت و  $\bar{v}$  بردار ورودی کنترلی می‌باشد.

$$\dot{\bar{x}} = f(\bar{x}) + g(\bar{x})\bar{v} \quad (11)$$

در صورتی که تابع  $g(\bar{x})$  معکوس پذیر باشد می‌توان کنترلر را به شکل معادله (12) تعریف کرد. با این تعریف می‌توان بخش‌های غیرخطی سیستم را حذف کرده و دینامیک دلخواه را با استفاده از ورودی  $\bar{v}$  به سیستم اعمال کرد.

$$\bar{v} = -g^{-1}(\bar{x})[f(\bar{x}) + \bar{v}] \quad (12)$$

سیگنال کنترلی با تحریک لایه الکتروود فوقانی حاصل می‌شود و این تحریک به شکل  $V_c^2$  خود را در معادله (10) نشان می‌دهد. توان دوم این سیگنال به معنی عدم توانایی در تولید اعداد منفی در صورت نیاز است. این موضوع با توجه به اینکه لایه فوقانی تنها قادر به جذب میکروتیر و ناتوان از دفع آن می‌باشد قابل توجه است. برای حصول شکل پاسخ مطلوب در سیستم خطی شده باید میرایی و فرکانس طبیعی نامیرای دلخواه نیز در معادلات وارد شوند. با توجه به این خواسته‌ها می‌توان سیگنال کنترلی را با حل معادله (13) به دست آورد.

$$\begin{aligned} u_c - c'q - kq = & H(t) - \alpha_2 V_c^2 \left( \int_0^1 \varphi dx \right. \\ & - 2q \int_0^1 \varphi^2 dx + q^2 \int_0^1 \varphi^3 dx \left. \right) \left( \int_0^1 \varphi^2 dx \right. \\ & \left. - 2q^2 \int_0^1 \varphi^4 dx + q^4 \int_0^1 \varphi^6 dx \right)^{-1} \end{aligned} \quad (13)$$

در معادله (13) ترم‌های  $-c'q - kq$  برای ایجاد میرایی و فرکانس طبیعی نامیرای دلخواه در سیستم در نظر گرفته شده‌اند و سیگنال  $u_c$  نیز کنترلر

خطی مطلوب می‌باشد. پس از حل معادله (13) سیگنال کنترلی  $V_c$  به شکل معادله (14) تولید می‌شود. در صورتی که ترم درون رادیکال منفی باشد  $V_c = 0$  در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} V_c = & \left[ (H(t) + c'q + kq - u_c) \left( \int_0^1 \varphi^2 dx \right. \right. \\ & - 2q^2 \int_0^1 \varphi^4 dx + q^4 \int_0^1 \varphi^6 dx \left. \right) \alpha_2^{-1} \left( \int_0^1 \varphi dx \right. \\ & \left. - 2q^2 \int_0^1 \varphi^3 dx + q^4 \int_0^1 \varphi^5 dx \right)^{-1} \left. \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (14)$$

با توجه به اینکه تابع شوک اغتشاشی و غیرقابل پیش‌بینی است بنابراین در طراحی کنترلر در نظر گرفته نشده و در نهایت قابلیت کنترلر در مقابله با شوک بررسی می‌شود.

انتخاب پارامترهای کنترلر براساس دستیابی به نسبت میرایی 0.7 و فرکانس طبیعی نامیرای 10 برای تیر خطی شده می‌باشد، بنابراین میرایی و ضریب فنریت دلخواه به شکل  $c = 2 \times 0.7 \times 10 - c$  و  $k^2 = 10^2$  در نظر گرفته می‌شوند. برای کنترلر مطلوب نیز از یک کنترلر تناسبی انتگرالی به شکل معادله (15) استفاده می‌شود.

$$\begin{aligned} u_c = & k_p e_q + k_i \int e_q dt \\ q_{des} = & \frac{W_{des}}{W_{max}}, e_q = q_{des} - q \end{aligned} \quad (15)$$

#### 5- شبیه‌سازی

پاسخ خیز میکروتیر به ورودی‌های شوک متفاوت معرفی شده، بدون حضور سیگنال کنترلی و تحریک متناوب یا مستقیم از طرف الکتروودها، در شکل 3، نمایش داده شده است. در این شبیه‌سازی پاسخ میکروتیر در بازه زمانی 10 ثابت زمانی میکروتیر محاسبه و ترسیم شده است. پاسخ خیز میکروتیر به ترتیب در بخش‌های a، b و c به ورودی شوک نیمه سینوسی با اندازه 1000g، شوک مثلثی با اندازه 970g و شوک مستطیلی با اندازه 1000g ترسیم شده است. دلیل انتخاب اندازه 970g برای شوک مثلثی وجود ناپایداری کشش داخل در مقدار 1000g برای این شوک می‌باشد. می‌توان دید وجود شوک قادر است پدیده ناپایداری را به مقدار قابل ملاحظه‌ای نزدیک گرداند.

فرکانس شوک ورودی کمتر از فرکانس طبیعی اول سیستم است بنابراین همانطور که در شکل 3 نیز مشاهده می‌شود اثر سوپرهارمونیک روی پاسخ سیستم دارد. البته با توجه به در نظر گرفتن حالت اول تیر در مدل کاهش مرتبه داده شده عملاً بررسی فرکانس‌های شوک بزرگتر از فرکانس حالت اول منوط به در نظر گرفتن حالت‌های بیشتر در سیستم کاهش مرتبه داده شده می‌شود.

در گام دوم شبیه‌سازی، پاسخ خیز میکروتیر به شوک‌های مستطیلی، مثلثی و نیمه سینوسی در حضور کنترلی تناسبی انتگرالی طراحی شده برای سیستم خطی شده، محاسبه شده است. این پاسخ‌ها در شکل 4، شکل 5 و شکل 6 نمایش داده شده‌اند. لازم به ذکر است که در این شکل‌ها تمامی شوک‌ها با اندازه 1000g وارد شده‌اند. در صورتی که تیر به سمت الکتروود کنترل‌کننده خیز بردارد امکان کنترل آن وجود ندارد زیرا الکتروود توان جذب میکروتیر و نه دفع آن را دارد. در چنین مواقعی از تحریک الکتروود زیرین می‌توان برای کنترل خیز میکروتیر استفاده کرد.

در شکل 4 پاسخ میکروتیر به ورودی مستطیلی نمایش داده شده است. در این حالت می‌توان دید کنترلر بدون خطای حالت ماندگار توان دنبال کردن سیگنال مبنا را دارد. دلیل این قابلیت، حضور کنترلر تناسبی انتگرالی است که سیستم حلقه بسته را تبدیل به سیستم نوع یک کرده است.

قابلیت دنبال کردن ورودی پله را بدون خطای حالت ماندگار ندارد. این خاصیت در پاسخ ترسیم شده مشهود است.

در این مرحله وجود خطای حالت ماندگار در مقایسه با مزیت بدست آمده برای مقابله با شوک اهمیت ندارد. در صورت تمایل می‌توان کنترلی طراحی کرد تا خطای حالت ماندگار نیز از بین برود ولی در این مجال نیازی به آن نیست. در شکل 6 پاسخ میکروتیر به ورودی سینوسی دیده می‌شود. در این شکل نیز به دلیل نوع یک بودن سیستم حلقه بسته می‌توان گفت شکل پاسخ معقول و منطقی است.

### 6- نتیجه گیری

در این پژوهش، پس از مدل‌سازی دینامیک میکروتیر پاسخ آن به ورودی‌های شوک متفاوت بررسی شده است. در بررسی‌های به عمل آمده نشان داده شد که وجود شوک می‌تواند خیزهای حداکثری بی‌بعد نزدیک به یک بوجود آورد که به راحتی می‌تواند باعث ناپایداری کشش داخل میکروتیر و در نتیجه اختلال در عملکرد آن شود. برای فائق آمدن بر این مشکل و به منظور کنترل خیز میکروتیر کنترلی با منطق خطی‌سازی پس‌خورده طراحی شد.

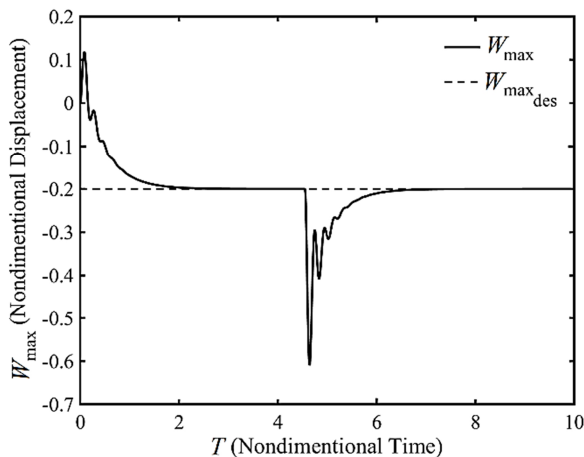


Fig. 4 Controller effect on micro-beam's response to rectangular shock pulse of 1000g amplitude

شکل 4 پاسخ میکروتیر به ورودی شوک مستطیلی با دامنه 1000g در حضور کنترلر تناسبی انتگرالی

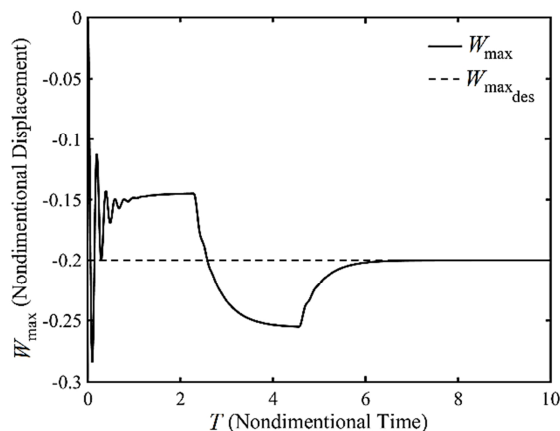


Fig. 5 Controller effect on micro-beam's response to triangular shock pulse of 1000g amplitude

شکل 5 پاسخ میکروتیر به ورودی شوک مثلثی با دامنه 1000g در حضور کنترلر تناسبی انتگرالی

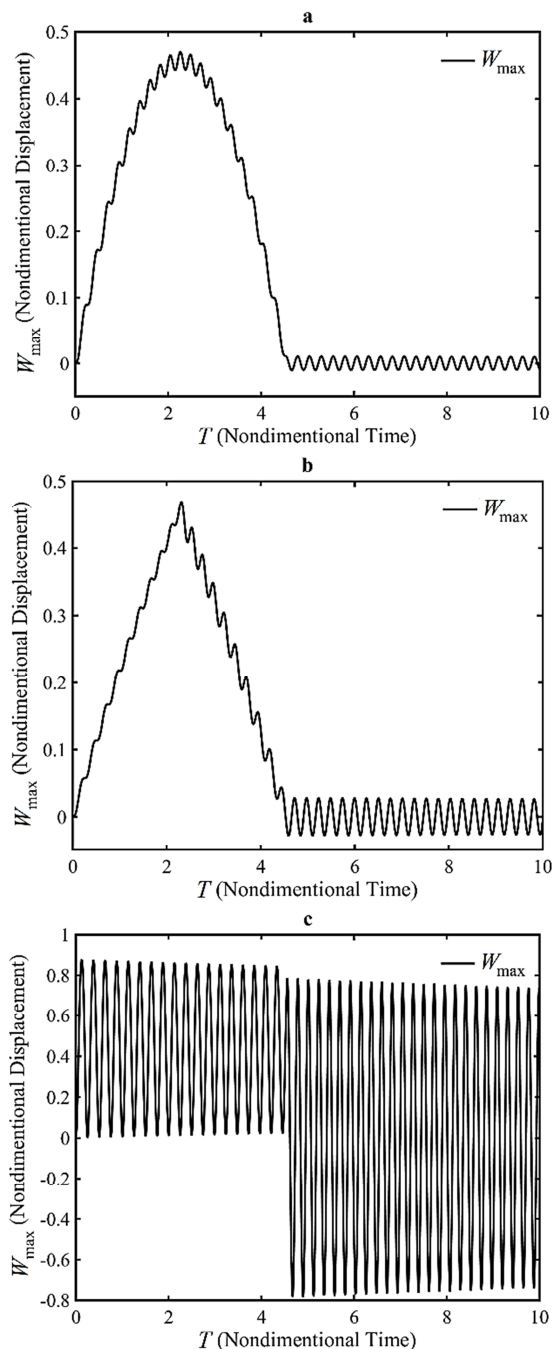


Fig. 3 Micro-beam's response to shock input without controller or actuation signal interference, a) Micro-beam's response to half-sine shock pulse of 1000g amplitude, b) Micro-beam's response to triangular shock pulse of 1000g amplitude, c) Micro-beam's response to rectangular shock pulse of 950g amplitude

شکل 3 پاسخ میکروتیر به ورودی شوک بدون حضور سیگنال کنترلی و تحریک الکتریکی، (a) پاسخ میکروتیر به ورودی شوک نیمه سینوسی با دامنه 1000g، (b) پاسخ میکروتیر به ورودی شوک مثلثی با دامنه 1000g، (c) پاسخ میکروتیر به ورودی شوک مستطیلی با دامنه 970g

در شکل 5 پاسخ تیر به شوک مثلثی دیده می‌شود. بهبود رفتار پاسخ با حضور کنترلر در مقایسه با شکل 3 بخش b مشهود است. دلیل عدم توانایی کنترلر در دنبال کردن نقطه مرجع<sup>1</sup>، نوع سیستم حلقه بسته است. سیستم نوع یک

<sup>1</sup> Set point

- [4] V. K. Varadan, K. J. Vinoy, K. A. Jose, *RF MEMS and their applications*: pp. 45-50, West Sussex, England, John Wiley & Sons, 2003.
- [5] M. Younis, E. Abdel-Rahman, A. Nayfeh, Static and dynamic behavior of an electrically excited resonant microbeam, in *Proceeding of Structural Dynamics, and Materials Conference*, the 43rd AIAA Structures, Denver, Colorado, pp. 1298-1305, 2002.
- [6] A. H. Nayfeh, M. I. Younis, E. M. Abdel-Rahman, Dynamic pull-in phenomenon in MEMS resonators, *Nonlinear dynamics*, Vol. 48, No. 1-2, pp. 153-163, 2007.
- [7] M. I. Younis, R. Miles, D. Jordy, Investigation of the response of microstructures under the combined effect of mechanical shock and electrostatic forces, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 2463, 2006.
- [8] U. Wagner, J. Franz, M. Schweiker, W. Bernhard, R. Müller-Fiedler, B. Michel, O. Paul, Mechanical reliability of MEMS-structures under shock load, *Microelectronics Reliability*, Vol. 41, No. 9, pp. 1657-1662, 2001.
- [9] D. M. Tanner, J. Walraven, K. Helgesen, L. W. Irwin, F. Brown, N. F. Smith, N. Masters, MEMS reliability in shock environments, *Proceeding of Reliability Physics Symposium, Proceedings*, 38th Annual IEEE International, USA, Florida, pp. 129-138, 2000.
- [10] O. Millet, D. Collard, L. Buchailot, Reliability of packaged MEMS in shock environment: crack and striction modeling, *Proceeding of Symposium on Design, Test, Integration, and Packaging of MEMS/MOEMS 2002*, International Society for Optics and Photonics, Cannes-Mandelieu, France, pp. 696-703, 2002.
- [11] M. I. Younis, F. Alsaleem, D. Jordy, The response of clamped-clamped microbeams under mechanical shock, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 42, No. 4, pp. 643-657, 2007.
- [12] Y. Lu, Y. Cheng, Y. Sun, Numerical Simulation of Shock Resistant Microsystems (MEMS), *Modern Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 48-54, 2014.
- [13] J. Knapp, E. Altmann, J. Niemann, K.-D. Werner, Measurement of shock events by means of strain gauges and accelerometers, *Measurement*, Vol. 24, No. 2, pp. 87-96, 1998.
- [14] M. Sheehy, J. Punch, S. Goyal, M. Reid, M. Lishchynska, G. Kelly, The failure mechanisms of micro-scale cantilevers under shock and vibration stimuli, *Strain*, Vol. 45, No. 3, pp. 283-294, 2009.
- [15] W. Sang, L. Sangwoo, C. Noel, N. Khalil, *Vibration isolation and shock protection for MEMS*, PhD Thesis, Department of Electrical Engineering, University of Michigan, USA, 2009.
- [16] C. Yang, B. Zhang, D. Chen, L. Lin, Drop-shock dynamic analysis of MEMS/package system, *Proceeding of 23rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, IEEE, Hong Kong, pp. 520-523, 2010.
- [17] H. R. Sabouhi, M. Baghelani, Design of a shock immune MEMS acceleration sensor and optimization by genetic algorithm, *Journal of Basic Applied Scientific Research*, Vol. 2, No. 10, pp. 10480-10488, 2012.
- [18] W. Thomson, *Theory of vibration with applications*, pp. 237-240, California, CRC Press, 1996.
- [19] E. Suhr, Could shock tests adequately mimic drop test conditions?, *Journal of Electronic Packaging*, Vol. 124, No. 3, pp. 170-177, 2002.
- [20] S. Azizi, M. R. Ghazavi, G. Rezazadeh, I. Ahmadian, C. Cetinkaya, Tuning the primary resonances of a micro resonator, using piezoelectric actuation, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 76, No. 1, pp. 839-852, 2014.
- [21] A. H. Nayfeh, M. I. Younis, A new approach to the modeling and simulation of flexible microstructures under the effect of squeeze-film damping, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 170, 2003.
- [22] M. Ghanbari, S. Hossainpour, G. Rezazadeh, Effect of fluid media on vibration of a microbeam resonator using micropolar theory, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 205-210, 2014. (in Persian)
- [23] M. Fathalilou, M. Rezaee, A comparison between two approaches for solving the governing nonlinear equation of vibrations of electrostatic micro-sensors, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 101-107, 2016. (in Persian)

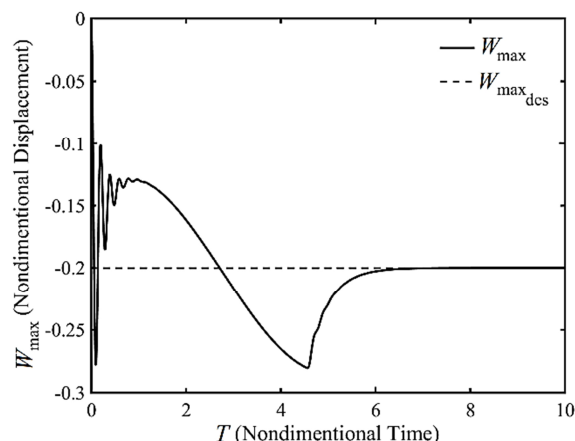


Fig. 6 Controller effect on micro-beam's response to half-sine shock pulse of 1000g amplitude

شکل 6 پاسخ میکروتیر به ورودی شوک نیمه سینوسی با دامنه 1000g در حضور کنترلر تناسبی-انترگرالی

حاصل اعمال کنترلر طراحی شده به میکروتیر که از طریق کنترل ولتاژ لایه الکتروود فوقانی اعمال شد، بهبود قابل توجهی در رفتار میکروتیر در حضور شوک بود. به راحتی می‌توان بهبود محسوس رفتار خیز حداکثری میکروتیر را با مقایسه نتایج بدست آمده قبل و بعد از اعمال کنترلر مشاهده کرد. وجود این کنترلر می‌تواند قابلیت تحمل شوک‌های بسیار بزرگتری را بدون مواجه شدن با پدیده ناپایداری کشش داخل ایجاد کند. این مقاله درصدد معرفی کنترلر فعال به عنوان ابزاری قدرتمند جهت مقابله با اثرات نامطلوب شوک‌های مکانیکی می‌باشد. از نتایج حاصله علاوه بر غلبه بر اثر نامطلوب شوک حفظ نقطه تنظیم<sup>1</sup> مطلوب توسط کنترلر نیز می‌باشد. از مزایای عمده کنترلر فعال نسبت به روش‌های غیرفعال مانند جاذب‌های ارتعاشی، می‌توان به این مورد اشاره کرد که جاذب‌های ارتعاشی برپایه خاصیت فنر و دمپری جاذب ارتعاشی، عمل کرده و محدود به ورودی‌های خاص می‌باشد و قابلیت تغییر در نقطه تنظیم را ندارد، اما کنترلر فعال، قابلیت دنبال کردن انواع ورودی‌ها، قابلیت تطابق با شرایط متفاوت و تغییرات در دینامیک و قابلیت مقابله با اغتشاشات را داراست. در عین حال باید به هزینه بالای اعمال روش‌های کنترلر فعال نسبت به کنترلرهای غیرفعال اشاره کرد و در نظر داشت که بسته به مورد استفاده ممکن است کنترلر فعال توجیه اقتصادی نداشته باشند. استفاده از کنترلرهای غیرخطی متفاوت مانند کنترلر مد لغزشی و ... همچنین اعمال آنها به مدل‌های با مرتبه بالاتر و مقایسه نتایج گام بعدی پژوهش حاضر می‌باشد.

## 7- مراجع

- [1] M. Elwenspoek, R. J. Wiegerink, *Mechanical microsensors*: pp. 14-17, Verlag Berlin Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2001.
- [2] L. E. Larson, R. H. Hackett, M. A. Melendes, R. F. Lohr, Micromachined microwave actuator (MIMAC) technology-a new tuning approach for microwave integrated circuits, in *Proceeding of the Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symposium Digest*, IEEE, pp. 27-30, 1991.
- [3] J. R. Clark, F. D. Bannon III, A.-C. Wong, C. T. Nguyen, Parallel-resonator HF micromechanical bandpass filters, in *Proceeding of Solid State Sensors and Actuators, Transducers'97*, IEEE, Chicago, pp. 1161-1164, 1997.

<sup>1</sup> Set Point

- 672-680, 2003.
- [25] J.-J. E. Slotine, W. Li, *Applied Nonlinear Control*, pp. 207-220, Englewood Cliff, New Jersey, Prentice-Hall, 1991.
- [24] M. I. Younis, E. M. Abdel-Rahman, A. Nayfeh, A reduced-order model for electrically actuated microbeam-based MEMS, *Microelectromechanical Systems, Journal of*, Vol. 12, No. 5, pp.