

## تحلیل دینامیکی رفتار یک فعال‌ساز مبتکاری بر پایه رفتار ماده مغناطوکشسان

پویا عبدالله زاده

صابر عزیزی

سیدحامد حسینی\*

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

### چکیده

در این مقاله تحلیل دینامیکی رفتار یک فعال‌ساز برپایه پدیده مغناطوکشسانی معرفی شده‌است. این مدل شامل یک تیر یک سر گیردار است که از فولاد تشکیل شده است و یک لایه متگلس 2650SC به عنوان ماده مغناطوکشسان روی آن قرار داده شده‌است. این تیر زمانی که در یک میدان آهنربایی قرار گیرد به علت تغییر ساختار داخلی لایه مغناطوکشسان بر اثر اعمال میدان آهنربایی، دچار تغییر شکل و خمش می‌شود که از این تغییر شکل برای عملیات فعال‌سازی استفاده می‌شود. در این مقاله معادلات حرکت سیستم با استفاده از نظریه غیرخطی تیر اویلر-برنولی و روش نیوتن استخراج شده است. بر این اساس رفتار دینامیکی مدل فعال ساز پیشنهادی و رابطه بین موقعیت سر تیر تحت تاثیر میدان آهنربایی و نیز تاثیر ضریب میرایی تیر بر پاسخ گذرا و جای گیری مکان انتهایی تیر بررسی گردیده است. مدل ارایه شده در این مقاله نیازی به هیچ‌گونه ادوات راه‌انداز ندارد و می‌توان از آن به صورت از راه دور استفاده کرد. معادلات دینامیکی به دست آمده در این تحقیق نیز، می‌تواند به عنوان ابزاری برای طراحی فعال‌سازها استفاده شود. **واژه های کلیدی:** فعال ساز، ماده مغناطوکشسان، تیر یک سر گیر دار، تیر مرکب، رفتار دینامیکی، متگلس.

## On the Dynamics of an Innovative Actuator Based On Magneto-strictive Material

P. Abdollahzadeh

S. Azizi

S. H. Hoseini

Department of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran.

Department of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran.

Department of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran.

### Abstract

A novel type of actuator based on the magnetostriction phenomena is proposed. This model consists of a cantilever beam made of steel which is laminated with Metglas 2605sc as the magnetostrictive material. The beam deflects while it is located in a magnetic field, because of the shape changes in the magnetostrictive layer. This beneficial deformation can be used to design an actuator. The nonlinear Euler-Bernoulli beam theory is implemented by means of Newton's second law. The dynamic response of the proposed model of the actuator beam and specially the relation between the position of the beam tip under the influence of magnetic field and also the effect of the damping coefficient on the transient response and stabilization of the tip of the beam, which is assumed to be end effector, are obtained. The proposed model in this paper needs no connections and driving instruments and can be used remotely, moreover achieved nonlinear dynamical equations in this study can be used as a design tool for these kinds of actuators.

**Keywords:** Actuator, Magnetostrictive Material, Cantilever Beam, Compound beam, Dynamic Response, Metglas.

### ۱- مقدمه

فعال‌سازهایی که از این دسته از مواد در ساختار آنها استفاده شده است، معمولاً دارای بدنه انعطاف‌پذیری هستند و فعال‌سازهای نرم<sup>۳</sup> نامیده می‌شوند و برای استفاده در کاربردهایی که با مواد آسیب پذیر و شکننده سر و کار دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند و کاربردهای گوناگونی در رباتیک، مهندسی پزشکی و کشاورزی دارند [۲]. این ویژگی از یک سو و قابلیت تطابق این فعال‌سازها با ادوات و فناوری میکروالکترومکانیکی از سوی دیگر باعث توجه روزافزون به آنها شده است. ونگ و همکاران در مورد فعال‌سازهای پیزوالکتریک مطالعه کرده و انواع خمشی تک‌لایه<sup>۴</sup> و دولایه<sup>۵</sup> را مقایسه و اثر لایه فلزی بر روی بازده آنها را مورد بررسی قرار داده‌اند [۳]. کینگ و همکاران انواع مختلف فعال‌سازهای مبتنی بر پیزوالکتریک را بررسی و مقایسه نمودند [۴]. چوی و همکاران یک فعال ساز خطی بر پایه الاستومر

فعال‌سازها<sup>۱</sup> قسمتی از یک ماشین هستند که یک مکانیزم یا سیستم را به حرکت درآورده یا کنترل می‌کنند. آنها یکی از انواع انرژی را به انرژی مکانیکی تبدیل کرده و باعث ایجاد حرکت می‌شوند. انواع مختلفی از فعال سازها مانند هیدرولیکی، نیوماتیکی، الکتریکی، حرارتی، آهنربایی و یا مکانیکی در صنایع استفاده می‌شوند که هر کدام مزایا و معایبی نسبی دارند و بسته به نوع کارکرد از هر کدام می‌توان استفاده نمود. در سال‌های اخیر با پیشرفت علم مواد، مواد جدیدی کشف و معرفی شده‌اند که قابلیت‌های مختلفی داشته و در مقابل عوامل خارجی مختلف رفتار متفاوتی از خود بروز می‌دهند. برخی از این مواد مانند پیزوالکتریک‌ها، فروالکتریک‌ها و آلیاژهای هوشمند<sup>۲</sup> در طراحی فعال سازها نیز مورد استفاده قرار گرفتند [۱].

<sup>3</sup> Soft Actuator

<sup>4</sup> Unimorph

<sup>5</sup> Bimorph

<sup>1</sup> Actuator

<sup>2</sup> Shape Memory Alloy (SMA)

معرفی و تحلیل دینامیکی انجام شده را با نتایج تجربی مقایسه نمودند [۵]. هالوران و همکاران انواع مختلف فعال‌سازهای از جنس الاستومتر را مرور و آنها را مقایسه کردند [۶]. ایکاردی و همکاران نوعی فعال‌ساز خمشی با استفاده از آلیاژهای هوشمند طراحی و روابط سینماتیکی حاکم را با استفاده از معادلات متشکله<sup>۱</sup> این آلیاژها به دست آوردند [۷]. نوع دیگری از فعال‌سازها که تحقیقاتی در سال‌های اخیر بر روی آنها انجام شده است، فعال‌سازهای مغناطوکشسان هستند. پدیده مغناطوکشسانی اولین بار توسط ژول در سال ۱۸۴۲ گزارش شد و به خاصیتی از مواد فرومغناطیس اطلاق می‌شود که زمانی که ماده در یک میدان آهنربایی قرار گیرد باعث ایجاد تغییر شکل در آن می‌شود. این تغییر شکل به دلیل چرخش و تغییر جهت‌گیری دامنه‌های آهنربایی کوچک موجود در ماده، اتفاق می‌افتد. این مواد به دلیل این توانایی ویژه کاربردهای مختلفی مانند حس کردن<sup>۲</sup> و فعال کردن<sup>۳</sup> پیدا کرده اند که اولایی و همکاران چندین نمونه از این کاربردها را مرور کردند [۸].

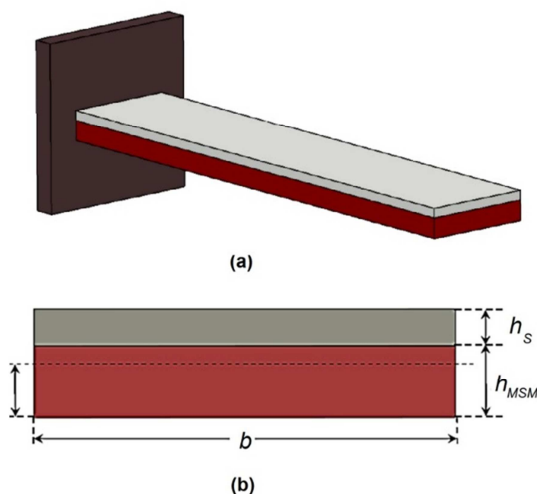
قربانپور و همکاران در سال ۲۰۱۵، به بررسی ارتعاشات آزاد یک صفحه از جنس ماده مغناطوکشسان با استفاده از مدل برشی مرتبه بالای مثلثی پرداختند [۹]. قربانپور و همکاران همچنین در سال ۲۰۱۶ یک صفحه با شکل دوزنقه‌ای از جنس مغناطوکشسان که ضخامت آن به صورت خطی متغیر بود را مورد مطالعه قرار دادند. آنها معادلات حرکت را با استفاده از نظریه تغییر شکل برشی درجه اول بدست آورده و برای افزودن به دقت نتایج پارامتر اصلاح برش را مورد استفاده قرار دادند [۱۰]. توشیوکی و همکاران فعال‌سازی بر پایه ماده مغناطوکشسان با دو درجه آزادی معرفی نمودند که به وسیله جریان الکتریسیته کار می‌کرد [۱۱]. تن و همکاران مدل دینامیکی ابداعی بر پایه کوپل کردن عملگر پریساج به معادله دیفرانسیل معمولی<sup>۴</sup>، برای توضیح رفتار پسماند<sup>۵</sup> در فعال‌سازهایی با ساختار مغناطوکشسان ارائه دادند [۱۲]. گرانولد و همکاران نوعی فعال‌ساز بر پایه ماده مغناطوکشسان طراحی کرده و بوسیله روش المان محدود شبیه‌سازی و با نتایج تجربی دستگاه ساخته شده مقایسه نمودند [۱۳]. کومار و همکاران با استفاده از روشهای المان محدود به تحلیل و بررسی یک تیر با دو لایه آلومینیوم و ترفنول-دی پرداخته و مدل خطی برای این نوع فعال‌ساز ارائه دادند [۱۴]. نوعی دریاچه دینامیکی سروو با فعال-ساز مغناطوکشسان نیز توسط کاروناندی و همکاران، طراحی و ساخته شد و نتایج آزمایشات تجربی با شبیه‌سازی که توسط نرم‌افزار Matlab انجام شده بود مقایسه شد [۱۵].

در این مقاله یک مدل ابداعی فعال‌ساز با ساختار ماده مغناطوکشسان ارائه گردیده که می‌توان آن را به دو صورت از راه دور و بدون هیچ سیستم فعال‌ساز و ارتباط خارجی و یا با قرار دادن آن در مرکز یک سیم پیچ که با عبور جریان الکتریکی یک میدان آهنربایی ایجاد می‌کند، به کار گرفت. برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی تیر، معادلات حرکت این سیستم مطابق نظریه غیرخطی تیر اوپلر-برنولی

استخراج گردیده است. برای تحلیل رفتار دینامیکی غیر خطی فعال‌ساز پیشنهادی، معادلات حرکت استخراج شده با روش گلرکین و شکل مودهای طبیعی نامبرای تیر یک‌سرگیردار مورد محاسبه قرار گرفته است.

## ۲- مدل سازی فعال‌ساز مغناطوکشسان

در فعال‌سازها، دامنه فعال‌سازی و مقدار حرکت عملگر انتهایی<sup>۶</sup> نسبت به حالت اولیه دارای اهمیت است. از این رو سیستم فعال‌ساز به صورت یک تیر فرض شد که در یک بعد می‌تواند خمش و دامنه قابل قبولی داشته باشد. با در نظر گرفتن شرایط مرزی مختلف ممکن برای یک تیر، می‌توان نتیجه گرفت که بهترین حالت ممکن، می‌تواند تیری باشد که یک سر آن آزاد و سر دیگر آن به صورت گیردار است. بنابراین به عنوان سیستم پیشنهادی مورد مطالعه، یک تیر یک‌سرگیردار در نظر گرفته شد که از دو لایه با عرض و طول همسان تشکیل شده است. یک لایه از جنس فولاد که با یک لایه متگلس 2650SC به عنوان ماده مغناطوکشسان پوشانیده شده است. سیستم مفروض در شکل ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱- الف) مدل ارائه شده فعال‌ساز (ب) سطح مقطع تیر

برای بدست آوردن معادلات حرکت تیر معرفی شده ابتدا باید هندسه آن قبل و بعد از تغییر شکل بررسی گردد. شکل اولیه و تغییر شکل یافته تیر و همچنین جابجایی‌های طولی و عرضی و نیروهای موثر بر مقطع آن در شکل ۲ داده شده است. تیرهای یک‌سرگیرداری که هیچ نیروی محوری به آنها اعمال نمی‌شود، کرنشی را در صفحه میانی تحمل نمی‌کنند.

<sup>1</sup>Constitutive equation

<sup>2</sup> sensing

<sup>3</sup> actuating

<sup>4</sup> Ordinary differential equation (ODE)

<sup>5</sup> Hysteresis

<sup>6</sup>End Effector

می‌توان محاسبه نمود.

$$M = b \left( \int_{-z}^{h_s - z} \sigma_{MSM} z dz + \int_{h_s - z}^{h_s + h_{MSM} - z} \sigma_s z dz \right) \quad (7)$$

$$m = b(h_s \rho_s + h_{MSM} \rho_{MSM}) \quad (8)$$

زیرنویس‌های  $S$  و  $MSM$  برای نمایش فولاد و ماده مغناطوکشسان استفاده شده است و  $\rho$  و  $\sigma$  به ترتیب چگالی جرم و تنش را نشان می‌دهد. رابطه بین تنش و کرنش برای هر ماده از معادلات زیر استخراج می‌گردد.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{MSM} \\ B \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{MSM}^H & -e \\ e^* & \mu^s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ H \end{Bmatrix} \quad (9)$$

$$\sigma_s = E_s \varepsilon \quad (10)$$

در میدان آهنربایی ثابت و  $e$  و  $e^*$  دو پارامتر ثابت مربوط به خاصیت ماده مغناطوکشسان هستند.  $\mu^s$ ،  $B$ ،  $H$  و  $\varepsilon$  نیز به ترتیب نشانگر ضریب تراوایی خلا، چگالی جریان آهنربایی، شدت میدان آهنربایی و کرنش می‌باشد. پارامترها و ثوابت برای ماده مغناطوکشسان مطابق استاندارد تعیین می‌گردند [۱۸]. با توجه به شکل ۲ کرنش را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود.

$$\varepsilon = -z \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (11)$$

با جایگذاری معادلات (۹-۱۱) در معادله (۷) و با مد نظر داشتن معادله (۱۱)، رابطه گشتاور خمشی به شکل معادله زیر تعیین می‌گردد.

$$M = b \left( E_{I_{eq}} \frac{\partial}{\partial x} \theta + \gamma H(t) (\bar{H}(x) - \bar{H}(x-l)) \right) \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)،  $\bar{H}$  تابع هوی ساید و  $E_{I_{eq}}$  سختی خمشی معادل است که به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$E_{I_{eq}} = \frac{b}{3} (E_s ((h_s - \bar{z})^3 - \bar{z}^3) + E_{MSM} ((h_{MSM} + h_s - \bar{z})^3 - (h_s - \bar{z})^3)) \quad (13)$$

$\gamma$  نیز به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

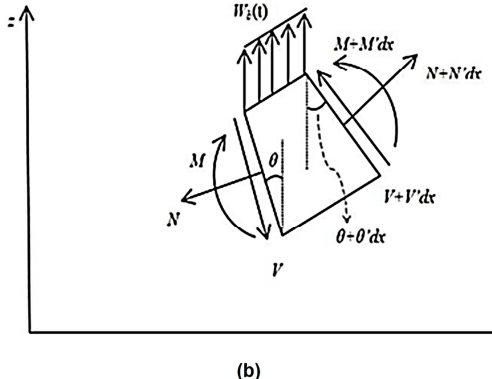
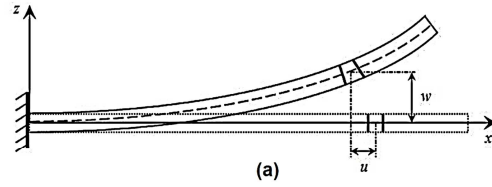
$$\gamma = \frac{be}{2} ((h_{MSM} - \bar{z})^2 - \bar{z}^2) \quad (14)$$

با وارد کردن معادله (۱۲) در معادلات (۴-۶) و اعمال معادلات (۱-۳) و سپس بسط روابط مثلثاتی به روش تیلور، معادله حرکت به صورت رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial w(x,t)}{\partial x} \int_0^x m \left( \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \int_0^x \left( \frac{\partial w(x,t)}{\partial x} \right)^2 dx \right) \right) \right) \right. \\ & \left. - E_{I_{eq}} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\partial w(x,t)}{\partial x} \left( \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \right)^2 \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{\partial^3 w(x,t)}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 w(x,t)}{\partial x^3} \left( \frac{\partial w(x,t)}{\partial x} \right)^2 \right] \right. \\ & \left. + \gamma H(t) \left[ \left( \frac{d}{dx} \delta(x) - \frac{d}{dx} \delta(x-l) \right) \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w(x,t)}{\partial x} \right)^2 \right] + (\delta(x) - \delta(x-l)) \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{\partial w(x,t)}{\partial x} \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \right] + J \left( \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4 \partial t^2} \right) \right. \\ & \left. + F_{ext} = m \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} \right] \quad (15) \end{aligned}$$

که مقادیر مرزی نیز بدین شکل نوشته می‌شوند:

$$w(0,t) = 0 \quad \frac{\partial}{\partial x} w(0,t) = 0 \quad (16)$$



شکل ۲- الف) جابجایی طولی و عرضی ب) نمودار آزاد مقطع تغییر شکل یافته تیر

رابطه بین جابجایی طولی و عرضی در این تیرها به صورت زیر تعیین می‌گردد [۱۶-۱۷].

$$\frac{\partial}{\partial x} u(x,t) = \sqrt{1 - \left( \frac{\partial}{\partial x} w(x,t) \right)^2} - 1 \quad (1)$$

که در آن  $u$  و  $w$  به ترتیب جابجایی طولی و عرضی می‌باشد. معادله حرکت این سیستم با کمک قانون دوم نیوتون به دست می‌آید. با انتگرال‌گیری از رابطه (۱) نسبت به  $x$  و سپس دو بار مشتق گرفتن نسبت به زمان، رابطه بین شتاب طولی و عرضی به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} u(x,t) = \int_0^x \left( \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \sqrt{1 - \left( \frac{\partial}{\partial x} w(x,t) \right)^2} \right) \right) dx \quad (2)$$

براساس فرضیات به تصویر کشیده شده در شکل ۲ معادلات زیر توسط نایفه و همکاران ارائه شده است [۱۵].

$$\begin{aligned} \cos \theta &= 1 + \frac{\partial}{\partial x} u(x,t) \\ \sin \theta &= \frac{\partial}{\partial x} w(x,t) \\ \theta &= \theta(x,t) \end{aligned} \quad (3)$$

با در نظر گرفتن معادله (۳) و با استفاده از قانون دوم نیوتون معادلات (۴-۶) حاصل می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial x} (N \cos \theta) - \frac{\partial}{\partial x} (V \sin \theta) = m \frac{\partial^2}{\partial t^2} u(x,t) \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (N \sin \theta) + \frac{\partial}{\partial x} (V \cos \theta) + F_{ext} = m \frac{\partial^2}{\partial t^2} w(x,t) \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} M + V = J \frac{\partial^2}{\partial t^2} \theta(x,t) \quad (6)$$

که  $m$ ،  $M$ ،  $N$  و  $V$  به ترتیب نشانگر جرم در واحد طول، گشتاور خمشی، ممان اینرسی واحد طول، نیروی محوری و نیروی برشی وارد بر مقطع تیر بوده و گشتاور خمشی و جرم واحد طول را به صورت زیر

220	110	مدول یانگ (GPa) E
—	$0.3 \times \pi^2$	ضریب تراوایی خلا $\mu^s$

در این فعال ساز همانند سایر فعال سازهای موجود، مکان انتهای تیر یک سرگردار به عنوان نقطه اعمال نیرو در نظر گرفته شده است. نحوه اعمال میدان آهنربایی خارجی بر روی تیر می تواند به اشکال مختلف باشد. در این تحقیق پاسخ تیر و مکان نقطه عمل نهایی فعال ساز تحت تاثیر میدان های آهنربایی ثابت و متغیر و تاثیر ضریب میرایی تیر در پاسخ گذرای سیستم بررسی خواهد شد. از آنجایی که فعال ساز ارائه شده یک مدل ابداعی نظریه بوده و هنوز نمونه ای از آن ساخته نشده است، امکان مقایسه نتایج نظریه با نتایج تجربی فراهم نیست. برای بررسی صحت نتایج عددی حاصله، از قانون پایستگی انرژی استفاده شد. زمانی که تیر در اثر نیروی خارجی تغییر شکل می دهد، انرژی به صورت انرژی کرنشی در آن ذخیره می گردد. با فرض قرار دادن تیر مذکور در میان یک سیم پیچ که با گذر جریان از آن میدان آهنربایی تولید می شود که این میدان آهنربایی نیز به نوبه خود باعث ایجاد تغییر شکل در تیر می شود. طبق قانون پایستگی انرژی مقدار انرژی تولید شده سیم پیچ باید صرف تغییر شکل تیر شده و به صورت انرژی کرنشی در آن ذخیره شود. در این مقایسه چند جریان الکتریسیته مختلف به سیم پیچ اعمال شد و هر یک از انرژی های مذکور محاسبه و با یکدیگر مقایسه شد. جدول ۲. همانگونه که در جدول مشاهده می شود، نتایج حاصل برای دو انرژی با هم دیگر هم خوانی قابل قبولی دارد.

جدول ۲ - انرژی میدان آهنربایی سیم پیچ و انرژی کرنشی تیر

انرژی کرنشی (J)	انرژی میدان آهنربایی (J)
0.0658	0.0656
0.0624	0.0626
0.0649	0.0649
0.0532	0.0538
0.0710	0.0708

زمانی که یک میدان آهنربایی با شدت میدان ثابت به صورت آنی بر روی تیری که در مکان اولیه خود قرار دارد اعمال شود، پاسخ کلی سیستم با ضرایب میرایی مختلف تیر تغییر خواهد کرد. زمانی که ضریب میرایی مقدار بالایی داشته باشد پاسخ سیستم و پایدار شدن مکان نقطه عمل نهایی تیر زودتر و با نوسانات کمتر صورت می پذیرد و نوع پاسخ سیستم از نوع فوق میرا خواهد بود ولی با کاهش مقدار ضریب میرایی پاسخ به سمت زیرمیرا میل کرده و جایگیری نقطه عمل انتهایی در نقطه مدنظر در زمان طولانی تری اتفاق خواهد افتاد. شکل ۳ تاثیر ضرایب مختلف میرایی بر پاسخ سیستم در میدان با شدت ثابت 4.5 کیلوآمپر بر متر را نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود در ضریب میرایی  $D = 1 \times 10^{-4}$  پاسخ فوق میرا بوده و هیچ گونه نوسانی در مکان نقطه تاثیر نهایی با گذشت زمان مشاهده نمی شود و پاسخ با رفتار نمایی کاهنده به مقدار ثابتی میل می کند. به ازاء مقادیر کمتر ضریب میرایی، پاسخ زیرمیرا شده و نوسان های میرا شونده ایجاد می گردد.

برای حل معادله حرکت سیستم، از روش گلرکین و شکل موده های طبیعی نامیرای تیر یک سرگردار استفاده می شود. برای این منظور، مطابق روشی که عزیز و همکاران [۱۹] استفاده کرده اند، جابجایی عرضی تیر را می توان به این شکل نوشت.

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^n q_i(t) \varphi_i(x) \quad (17)$$

که در آن  $q_i$  مختصات عمومی و  $\varphi_i$  شکل موده های طبیعی تیر است. با جایگذاری جواب تقریبی معادله (۱۷) در معادله (۱۵) و ضرب طرفین در تابع شکل مود و سپس انتگرال گیری در طول تیر و مساوی قرار دادن آن با صفر برای کمینه کردن مقدار خطا همانند روش گلرکین معادله زیر حاصل خواهد شد.

$$M_{nl} q(t) (q(t) \dot{q}(t) + q(t)^2) - K_{nl} q(t)^3 - K_I q(t) - SH(t) q(t)^2 - TH(t) + F_r = M_I \ddot{q}(t) \quad (18)$$

که در آن نقطه های بالای توابع نشان دهنده مشتق آن تابع نسبت به زمان است و ضرایب این معادله به صورت زیر تعریف می گردند.

$$M_{nl} = - \int_0^l m \varphi(x) \left[ \varphi''(x) \int_0^x \int_0^x \varphi(x)^2 dx dx + \varphi'(x) \int_0^x \varphi'(x)^2 dx \right] dx$$

$$K_I = \int_0^l EI_{eq} \varphi''''(x) dx$$

$$S = \int_0^l \gamma \varphi(x) \left[ \frac{1}{2} \varphi'(x)^2 \left( \frac{d}{dx} \delta(x) - \frac{d}{dx} \delta(x) \right) + \varphi'(x)^2 \varphi''(x)^2 (\delta(x) - l) \right] dx \quad (19)$$

$$T = \int_0^l \gamma \varphi(x) \left( \frac{d}{dx} \delta(x) - \frac{d}{dx} \delta(x-l) \right) dx$$

$$M_I = \int_0^l \varphi(x) (m \varphi(x) - J \varphi''(x)) dx$$

$$F_r = F_{ext} \int_0^l \varphi(x) dx$$

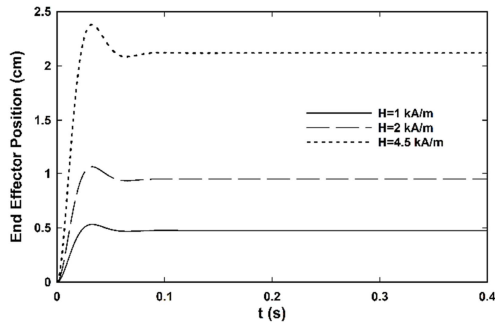
در معادلات (۱۹)، علامت های پریم نمایان گر مشتق نسبت به  $x$  است.

### ۳- نتایج و بحث

به منظور بررسی پاسخ سیستم، مقادیر ذکر شده در جدول ۱ برای خواص مکانیکی و هندسی فعال ساز ارائه شده مورد استفاده قرار گرفت.

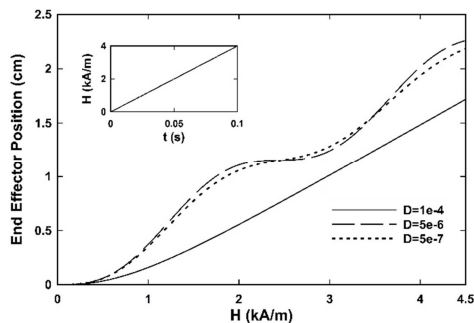
جدول ۱- خواص هندسی و مکانیکی

مشخصات	متگلس 2650SC	فولاد
ضخامت (mm) h	0.2	0.8
طول (mm) l	200	200
پهنای (mm) b	10	10
چگالی ( $\text{kg/m}^3$ ) $\rho$	7320	7850



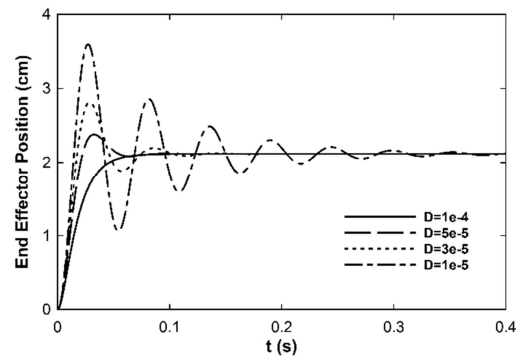
شکل ۵ - تاریخچه زمانی مکان نقطه تاثیر نهایی تحت تاثیر میدان آهنربایی با چند شدت متفاوت و ضریب میرایی  $D = 5 \times 10^{-5}$

اعمال میدان آهنربایی به فعال‌ساز همیشه به صورت آنی نبوده و برای به دست آوردن حرکت آرام در آن و انجام کارهای فعال‌سازی و استفاده از آن در پنجه‌ها، میدان آهنربایی باید به صورت آهسته و متغیر با زمان تغییر یابد. دو نمودار ۴ و ۵ نمایان‌گر وضعیتی است که میدان آهنربایی با شدت میدان ثابت به صورت آنی به تیر اعمال شود. شکل ۶ مربوط به زمانی است که شدت میدان آهنربایی اعمالی به صورت خطی با زمان افزایش یابد. در این نمودار شدت میدان آهنربایی از مقدار اولیه صفر به صورت خطی با زمان تغییر کرده و تغییر شکل تیر با ضرایب میرایی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود به ازاء شدت میدان آهنربایی بیشتر از یک کیلوآمپر بر متر تغییرات جابجایی سر تیر نسبت به تغییر شدت میدان آهنربایی تقریباً خطی است. در ضریب میرایی  $D = 1 \times 10^{-4}$  که پاسخ فوق‌میرا بوده هیچ‌گونه نوسانی حول این خط مشاهده نمی‌شود. به ازاء مقادیر کمتر ضریب میرایی که پاسخ زیرمیرا می‌باشد، جابجایی سر تیر نسبت به تغییرات شدت میدان آهنربایی حول یک خط راست نوسانی می‌باشد.



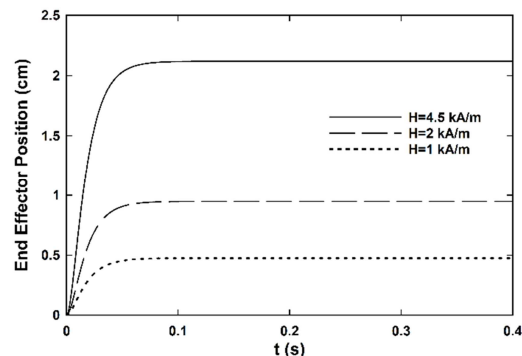
شکل ۶ تغییرات جابجایی سر تیر با تغییر شدت میدان آهنربایی نسبت به چند ضریب میرایی مختلف

زمانی که شدت میدان آهنربایی متغیر با زمان بوده و ضریب میرایی سیستم نیز پایین باشد سرعت تغییر شدت میدان نیز بر جای‌گیری نقطه عمل‌انتهای تیر تاثیر گذار است؛ برای مشاهده این اثر در سیستمی با ضریب میرایی  $5 \times 10^{-7}$  شدت میدان آهنربایی در بازه‌های زمانی مختلف به مقدار بیشینه ۴.۵ کیلوآمپر بر متر رسانیده شده و مکان‌انتهای تیر محاسبه شد. نمودار مربوطه در شکل ۷ آورده شده است.



شکل ۳ - تاریخچه زمانی مکان نقطه تاثیر برای ضرایب میرایی مختلف

در فعال‌سازها سعی بر آن است که با اعمال یک ورودی مشخص به سیستم، نقطه اعمال نیرو به مکان مشخصی انتقال یابد. در این فعال‌ساز نیز با تنظیم میدان آهنربایی اطراف آن مکان‌انتهای تیر کنترل می‌گردد. بنابراین در این قسمت با اعمال چندین بار خارجی با شدت‌های مختلف اثرات آن بر روی مکان‌انتهای تیر بررسی می‌گردد. همانگونه که در شکل‌های ۴ و ۵ قابل مشاهده است برای بررسی تاثیر شدت میدان آهنربایی اعمال شده بر روی میزان جابجایی و تغییر شکل تیر، چندین میدان با شدت‌های متفاوت بر روی تیر اعمال شد و تاریخچه زمانی سر تیر با دو ضریب میرایی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. ضرایب میرایی به نحوی انتخاب شده‌اند که امکان ایجاد حالت فوق‌میرا و زیرمیرا فراهم گردد. همانطور که در تصاویر مشاهده می‌شود افزایش شدت میدان آهنربایی اعمالی تقریباً به صورت خطی باعث افزایش مکان نقطه تاثیر نهایی می‌گردد. همچنین تغییرات شدت میدان آهنربایی اعمالی تغییر محسوسی در شمایل نمودار تاریخچه زمانی مکان نقطه تاثیر نهایی ایجاد نمی‌کند.

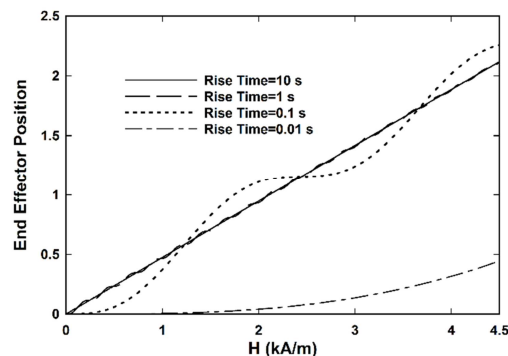


شکل ۴ - تاریخچه زمانی مکان نقطه تاثیر نهایی تحت تاثیر میدان آهنربایی با چند شدت متفاوت و ضریب میرایی  $D = 1 \times 10^{-4}$

گشتاور خمشی (kgms-1)	$M$
نیروی محوری وارد بر مقطع (N)	$N$
تابع مختصات عمومی (s)	$q$
زمان (s)	$t$
جابجایی طولی (m)	$u$
نیروی برشی وارد بر مقطع (N)	$V$
جابجایی طولی (m)	$w$
ارتفاع خط خنثی سطح مقطع تیر (m)	$\bar{z}$
کرنش	$\varepsilon$
زاویه انحراف (degrees)	$\theta$
چگالی (kgm-3)	$\rho$
تنش (Nm-2)	$\sigma$
تابع شکل مود نرمال	$\varphi$
ماده مغناطوکشسان	MSM
فولاد	S

## ۶- مراجع

- [1] Wilson S. A., Jourdain R. P., Zhang Q., Dorey R. A., Bowen C. R., Willander M., Wahab Q. U., Al-hilli S. M., Nur O., Quandt E., Johansson C., Pagounis E., Kohl M., Matovic J., Samel B., Wijngaart W., Jager E. W. H., Carlsson D., Djinovic Z., Wegener M., Moldovan C., Iosub R., Abad E., Wendlandt M., Rusu C. and Persson K., New Materials for Micro-scale Sensors and Actuators. *Materials Science and Engineering, R Reports*, Vol. 56, No. 1, pp. 1-129, 2007.
- [2] Asaka K. and Okuzaki H. O., *Soft Actuators: materials, modeling, applications, and future perspectives*. Springer Japan, Tokyo, 2014.
- [3] Wang Q. M. and Cross L. E., Performance analysis of piezoelectric cantilever bending actuators. *Ferroelectrics*, Vol. 215, No. 1, pp. 187-213, 1998.
- [4] King T. G., Preston M. E., Murphy B. J. M. and Cannell D. S., Piezoelectric ceramic actuators: A review of machinery applications. *Precision Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 131-136, 1990.
- [5] Choi H. R., Ryew S., Jung K. M., Kim H. M., Jeon J. W., Nam J. D., Maeda R. and Tanie K., Soft actuator for robotic applications based on dielectric elastomer: quasi-static analysis. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, DC, USA, 2002.
- [6] O'Halloran A., O'Malley F. and McHugh P., A review on dielectric elastomer actuators, technology, applications, and challenges. *Journal of Applied Physics*, Vol. 104, No. 7, pp. 071101, 2008.
- [7] Icardi U., Large bending actuator made with SMA contractile wires: theory, numerical simulation and experiments. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 32, No. 3, pp. 259-267, 2001.
- [8] Olabi A. G. and Grunwald A., Design and application of magnetostrictive materials. *Materials & Design*, Vol. 29, No. 2, pp. 469-483, 2008.
- [9] Arani A. G., Maraghi Z. K. and H. K. Arani, Vibration control of tapered magnetostrictive plate considering shear correction factor. *Scientia Iranica. Transaction B, Mechanical Engineering*, Vol. 23, No.4, pp. 1741, 2016.
- [10] Arani A. G., Maraghi Z. K. and Arani H. K., Vibration control of magnetostrictive plate under multi-physical loads via trigonometric higher order shear deformation theory. *Journal of Vibration and Control*, Vol. 23, No. 19, pp. 3057-3070, 2017.



شکل ۷ مکان نقطه عمل نهایی با میدان آهنربایی متغیر با زمان با شیب های مختلف برای ضریب میرایی  $D = 5 \times e^{-7}$

## ۴- نتیجه گیری

در این مقاله دینامیک غیر خطی یک فعال ساز ابداعی با ساختار ماده مغناطوکشسان تحت تاثیر میدان آهنربایی بررسی گردید. مدل ارایه شده متشکل از یک تیر یک سرگیردار با یک لایه فولاد و یک لایه متگلس 2650SC بود که با اعمال میدان آهنربایی خارجی عمل فعال سازی را به صورت از راه دور و بدون هیچ ارتباطی انجام می دهد. ابتدا معادلات حرکت غیر خطی سیستم با استفاده از قانون دوم نیوتون استخراج شده و از طریق حل این معادلات به صورت عددی، رابطه بین شدت میدان آهنربایی و مکان انتهای تیر، نوع اعمال این میدان و همچنین تاثیر ضریب میرایی بر ثبات مکان انتهای تیر در محل مورد نظر، بدست آمد. در مواردی که میدان آهنربایی به صورت آنی اعمال گردد و یا متغیر با زمان باشد و ضریب میرایی به اندازه ای کوچک باشد که پاسخ سیستم تحت میرا باشد، باید احتیاط را رعایت کرد چرا که ممکن است مکان انتهای تیر جابجایی بیشتر از مقداری که مدنظر است را داشته باشد و صدماتی ایجاد کند. فعال ساز ارایه شده فاقد هر گونه سیستم محرکه خارجی و ارتباطی با محیط اطراف بوده و به راحتی با تغییر شدت میدان آهنربایی خارجی می توان آن را از راه دور کنترل کرد. فعال ساز ارائه شده، کاربردهای صنعتی زیادی از جمله استفاده در بازوها و گیره های رباتیک و در جایی که امکان اتصال فیزیکی ادوات کنترلی نباشد، دارد. همچنین نتایج این تحقیق می توان به عنوان ابزاری برای طراحی این نوع فعال سازها مورد استفاده قرار بگیرد.

## ۵- نمادها

$b$	پهنای تیر (m)
$B$	چگالی جریان آهنربایی (T)
$e$	ثابت ماده مغناطوکشسان
$e^*$	ثابت ماده مغناطوکشسان
$E$	مدول یانگ (Nm-2)
$E_{eq}$	سختی خمشی معادل
$h$	ارتفاع سطح مقطع تیر (m)
$H$	شدت میدان آهنربایی (Am-1)
$l$	طول تیر (m)
$m$	جرم واحد طول (kg)

- [11] Ueno T. and Higuchi T., Two-DOF Micro Magnetostrictive Bending Actuator for Wobbling Motion. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 44, No. 11, pp. 4078-4080, 2008.
- [12] Tan X. and Baras J. S., Modeling and control of hysteresis in magnetostrictive actuators. *Automatica*, Vol. 40, No. 9, pp. 1469-1480, 2004.
- [13] Grunwald A. and Olabi A. G., Design of a magnetostrictive (MS) actuator. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 144, No. 1, pp. 161-175, 2017.
- [14] Kumar J. S., Ganesan N., Swarnamani S. and Padmanabhan C., Active control of beam with magnetostrictive layer. *Computers & Structures*, Vol. 81, No. 13, pp. 1375-1382, 2003.
- [15] Karunanidhi S. and Singaperumal M., Design, analysis and simulation of magnetostrictive actuator and its application to high dynamic servo valve. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 157, No. 2, pp. 185-197, 2010.
- [16] Nayfeh A. H., *Linear and nonlinear structural mechanics*. John Wiley & Sons, New York, 2004.
- [17] Younis M. I., *Mems linear and nonlinear statics and dynamics*. Springer Science & Business Media, New York, 2014.
- [18] Cain M. G. and Stewart M., *Characterisation of ferroelectric bulk materials and thin films*. Springer, New York, 2014.
- [19] Azizi S., Ghazavi M. R., Rezazadeh G., Ahmadian I. and Cetinkaya C., Tuning the Trimary Resonances of a Micro Resonator using Piezoelectric Actuation. *Nonlinear Dynamics*, Vol. 76, No. 1, pp. 839-852, 2013.