

## مدل سازی دینامیکی سیستم موقعیت دهنده دومحوره با دقت نانومتری با استفاده از الگوریتم ژنتیک

سعید بیات<sup>1</sup>، محمد هروی<sup>1</sup>، حسین نجات پیشکناری<sup>2\*</sup>، حسن سالاریه<sup>2</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

\*nejat@sharif.ir, 11365-11155 صندوق پستی

### چکیده

امروزه سکویهای موقعیت دهنده با دقت نانو از جایگاه خاصی در صنایع پیشرفته برخوردارند. در این تحقیق سعی بر مدل سازی دینامیکی یک سکوی موقعیت دهنده با دقت نانو شده است. این سکوی در دانشگاه صنعتی شریف طراحی اولیه ای آن صورت گرفته و در این مرحله به بررسی دینامیکی آن پرداخته شده است. در پژوهش حاضر، مکانیزم به صورت دو بعدی در نظر گرفته شده است. ابتدا مدل سکوی در نرم افزار کامسول مدل سازی شده است. مدل به دست آمده در کامسول به عنوان مدل مرجع در نظر گرفته شده و سپس یک مدل 10 درجه آزادی برای آن در نظر گرفته شد. برای مدل در نظر گرفته شده، ماتریس های جرم، سفتی و میرایی به کمک روش شناسایی پارامترها به دست آمد. در نهایت مدل به دست آمده به ازای دو مجموعه سیگنال ورودی با مدل کامسول صحت سنجی شد. نتایج نشان داد که در فرکانس های پایین، مدل به دست آمده به خوبی مدل کامسول را تقریب می زند. در حالی که در فرکانس های بالا این تقریب با مقداری خطا همراه بود. به علاوه فرکانس طبیعی اول مدل تحلیلی به دست آمده با فرکانس اول مدل کامسول مقایسه شد که خطای تقریب در حد قابل قبولی بود.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 23 دی 1396  
پذیرش: 27 اسفند 1396  
ارائه در سایت: 30 فروردین 1397  
کلید واژگان:  
مکانیزم انعطاف پذیر  
سکوی موقعیت دهنده با دقت نانو  
مدل سازی دینامیکی

## Dynamical modeling and control of an xy nano-positioner with flexural mechanism using a genetic algorithm

Saeid Bayat, Mohammad Heravi, Hossein Nejat Pishkenari\*, Hassan Salarieh

Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 11365-11155 Tehran, Iran, nejat@sharif.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 13 January 2018  
Accepted 18 March 2018  
Available Online 19 April 2018

#### Keywords:

Flexural Mechanism  
Nano-positioner  
Dynamical modeling

### ABSTRACT

Nowadays, nano-positioners play an important role in such advanced technologies as atomic force microscopy, genetic manipulation, nano-metrology, nano-fabrication, semi-conductors, and etc. In this paper, a dynamical model has been derived for an XY nano-positioner which had been designed and fabricated in Sharif University of Technology. Because of the way it had been designed, the mentioned mechanism has been considered as a planar one. First, a finite element model has been developed in Comsol multi-physics software as the reference model which would be used in the next steps. In the next step, a lumped 10-degree-of-freedom model – whose mass, stiffness, as well as damping matrices would be obtained through parameter identification methods – was proposed in order to estimate the Comsol model. The derived analytical model was verified by the Comsol model for two sets of inputs: a high-frequency set and a low-frequency one. At low frequencies, the error of estimation was negligible, while, at the high frequency, the error was considerable. By using genetic algorithm, the error in high frequencies was reduced to an acceptable amount. At last, the first natural frequency of the lumped model was verified by that of the finite element model, showing an acceptable amount of error.

### 1- مقدمه

دانشگاه صنعتی شریف طراحی مکانیزم آن به انجام رسیده است. در پژوهش انجام شده، هدف طراحی یک سکوی موقعیت دهنده با دقت نانو بوده است، به گونه ای که اثرات بین محوری به مقدار قابل قبولی کاهش یافته و به علاوه فرکانس مد اول سامانه به میزان کافی بالا باشد. کاری که قرار است در ادامه ی کار پژوهش قبلی انجام شود، مدل سازی دینامیکی مکانیزم به منظور تحلیل رفتار آن و بررسی کارایی کنترلرهای صنعتی بر روی آن است. کاربرد این نوع سکوی موقعیت دهنده برای استفاده در میکروسکوپ های اتمی، نانو ماشین کاری و بیونانو تکنولوژی می باشد.

موقعیت دهی با دقت نانو، فناوری کنترل موقعیت مکانی اجسام با دقتی از مرتبه ی نانومتر است. امروزه این فناوری به عنوان یکی از ارکان پژوهش و تولید در ابعاد میکرومتری و نانومتری به کمک پژوهشگران و تولیدکنندگان آمده و تولید بسیاری از محصولات پیشرفته و انجام بسیاری از پژوهش های دور از تصور را ممکن ساخته است.

هدف از انجام این پروژه، مدل سازی دینامیکی یک سیستم موقعیت دهی با دقت نانو است. این پروژه در راستای ادامه یک پروژه ی دیگر می باشد که در

اعمال نیروها می باشد و  $\Delta_{stage}$  نشانگری است که جابه جایی مرکز سکو را ثبت می کند.

جنس سکو از آلومینیوم 7075-T6 می باشد. همین طور جرم و سفتی معادل قطعات پیزو از مرجع [7] استخراج شده است.

**2-2- بررسی همگرایی مش**

یکی از مواردی که در المان محدود باید در نظر گرفته شود، مش بندی صحیح است. برای این که مش بندی مناسب به دست آید، فرکانس طبیعی و همچنین جابجایی سیستم، به ازای مش بندی های مختلف مقایسه شده است. روند کار به این صورت بوده است که میزان فرکانس طبیعی و جابه جایی سکو به ازای مش بندی های مختلف اندازه گیری شده و روند همگرایی آن معیار انتخاب مش بندی مناسب بوده است.

شکل 2 بررسی همگرایی مش به ازای مش بندی های مختلف را نشان می دهد. در این شکل محور عمودی نشان دهنده فرکانس طبیعی و محور افقی نشان دهنده تعداد درجات آزادی می باشد. توجه شود که تعداد درجات آزادی وابسته به تعداد المان ها و مرتبه ی تابع شکلی است که برای المان ها در نظر گرفته می شود. در این شکل مش بندی نشان داده شده به عنوان مش بندی مورد نظر انتخاب شده است. شکل 3 این مش بندی را نشان می دهد.

**3- مدل 10 درجه آزادی**

در ادامه یک مدل 10 درجه آزادی برای تخمین مدل کامسول پیشنهاد شده است. شکل 4- الف مدل کامسول و شکل 4- ب مدل 10 درجه آزادی را نشان می دهد. این مدل از 5 جرم متمرکز تشکیل شده که در راستای افقی و عمودی می توانند جابه جا شوند.

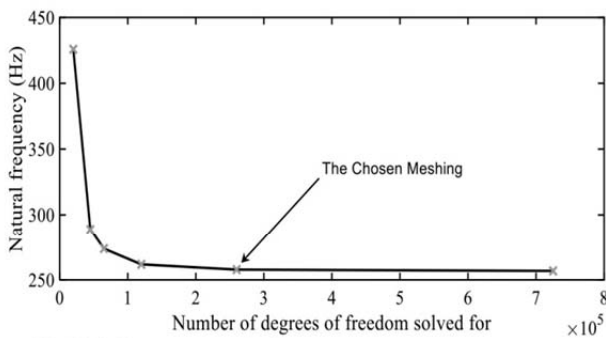


Fig. 2 Mesh convergence study

شکل 2 بررسی همگرایی مش

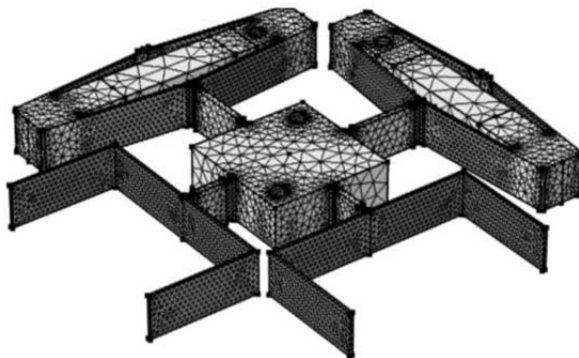


Fig. 3 The meshing used in Comsol model

شکل 3 مش بندی مورد استفاده در نرم افزار کامسول

در زمینه های ممز و نمز به خاطر مسائل مربوط به ساخت، به جای استفاده از مکانیزم های صلب بیشتر از مکانیزم های انعطاف پذیر استفاده می شود [1]. در مکانیزم های انعطاف پذیر، به جای استفاده از مفاصل معمولی مانند مفاصل لولایی، از مفاصل انعطاف پذیر استفاده می شود. در مفاصل انعطاف پذیر با نازک کردن اتصال دو جزء مرتبط به صورت مناسب، درجه ی آزادی مورد نیاز را فراهم می کنند.

برای مدل سازی مکانیزم های انعطاف پذیر از دو راهبرد کلی استفاده می شود. اولین راهبرد در صورتی مناسب است که مکانیزم ساخته شده و در اختیار باشد. در این راهبرد، پاسخ فرکانسی سیستم به دست می آید و به کمک پاسخ فرکانسی به دست آمده به طراحی کنترلر پرداخته می شود این راهبرد به عنوان مثال توسط [3,2] برای مدل سازی مورد استفاده قرار گرفته اند. راهبرد دوم بیشتر برای مکانیزم هایی که هنوز ساخته نشده اند مورد استفاده قرار می گیرد. این راهبرد که در مرجع [4] به آن پرداخته شده است به ساده سازی مکانیزم انعطاف پذیر تأکید دارد. به عبارت دیگر مکانیزم انعطاف پذیر را که به دلیل انعطاف موجود در لینک ها و مفاصل دارای بی نهایت درجه آزادی است، با تعداد محدودی جرم، فنر و دمپر مدل می کنند. این روش مدل سازی در مقالات [6,5] استفاده شده است.

نوآوری پژوهش حاضر بیشتر از جنبه ی مکانیزم مورد استفاده است. همان طور که گفته شد، این مکانیزم به گونه ای طراحی شده است که اثرات بین محوری در آن کمینه شده و به علاوه، سعی در افزایش فرکانس های ارتعاشی آن شده است. چون شرایط آزمایشی برای این مکانیزم وجود ندارد، راهبرد دوم برای آن در نظر گرفته شده است؛ یعنی این مکانیزم با تعداد محدودی جرم، فنر و دمپر معادل سازی خواهد شد.

**2- مدل سازی در نرم افزار کامسول**

**1-2- شرایط مرزی، بارگذاری و نشانگرها**

شکل 1 نحوه ی اعمال شرایط مرزی، بارگذاری ها و نشانگرها را نشان می دهد. در این شکل در محل های هاشور خورده قید ثابت<sup>1</sup> اعمال شده است.  $F_p$  محل

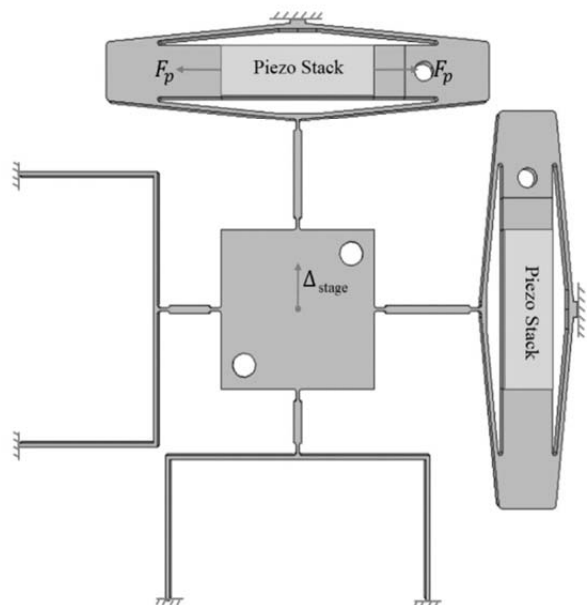


Fig. 1 Boundary condition, the loading and probes

شکل 1 شرایط مرزی، بارگذاری و پرابها

<sup>1</sup> Fixed

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & m_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

در این معادله، جرم های  $m_1$  و  $m_2$  پارامترهایی هستند که در قسمت های بعدی به روش شناسایی پارامترها به دست می آیند.

**3-3- به دست آوردن ماتریس میرایی C**

در این مقاله از مدل میرایی ریلی استفاده شده است. این مدل ماتریس میرایی را به صورت معادله ی (4) پیشنهاد می دهد.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (4)$$

پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  در قسمت بعد به کمک روش شناسایی پارامترها به دست می آیند.

**3-4- تخمین پارامترها**

برای شناسایی این پارامترها نیاز به یک مدل مرجع است. در این پژوهش مدل کامسول به عنوان مدل مرجع در نظر گرفته شده و از جواب های آن برای شناسایی پارامترهای ذکر شده استفاده شده است. روند شناسایی پارامترها به این ترتیب است که ابتدا به مدل کامسول یک سری ورودی غنی<sup>1</sup> داده می شود و خروجی آن ثبت می شود. در ادامه به کمک نرم افزار متلب و با استفاده از ورودی غنی و جواب به دست آمده از کامسول، پارامترهای مربوطه شناسایی می شوند.

شناسایی پارامترها به کمک نرم افزار متلب و روش الگوریتم ژنتیک انجام شده است و مقدار اولیه پارامترها توسط الگوریتم حداقل مربعات غیرخطی حساب شده و قرار داده شده است.

در شکل 5، نحوه تغییر پارامترهای نرمال شده ی سیستم و در شکل 6، تابع هزینه رسم شده اند. همان طور که مشاهده می شود با تغییر پارامترها در طی اجرای الگوریتم ژنتیک، تابع هزینه کاهش یافته و حدوداً از مرحله 30 به بعد، با همگرا شدن الگوریتم ژنتیک، مقدار پارامترها هم ثابت مانده و به دست آمده اند.

پارامترهای به دست آمده توسط الگوریتم ژنتیک، در جدول 1 آورده شده اند. با به دست آمدن این پارامترها، مدل تحلیلی به صورت کامل به دست آمده است. در قسمت بعدی به صحت سنجی این مدل پرداخته شده است.

**4- صحت سنجی مدل به دست آمده**

نتایج مدل به دست آمده با نتایج نرم افزار کامسول صحت سنجی شده است.

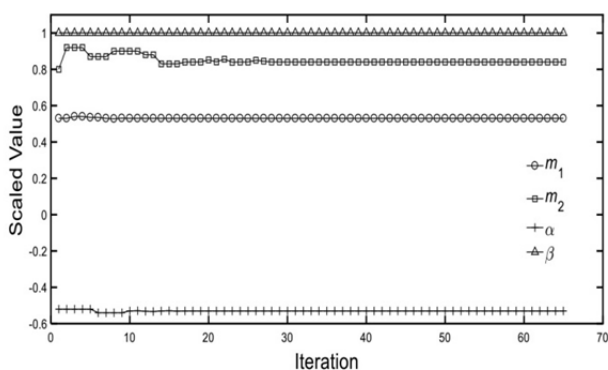


Fig. 5 changing in parameters during Genetic algorithm execution  
شکل 5 تغییر پارامترها در حین اجرای الگوریتم ژنتیک

<sup>1</sup> Rich Input

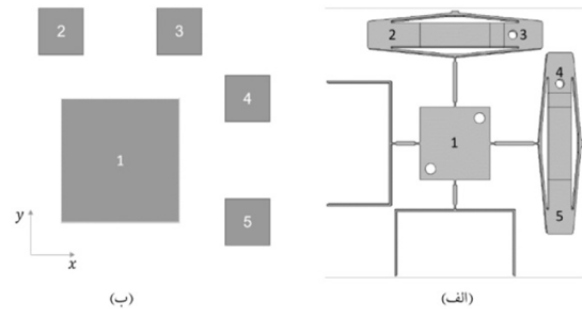


Fig. 4 (a) Comsol model (b) Lumped model

شکل 4 (الف) مدل کامسول (ب) مدل 10 درجه آزادی

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = \vec{F} \quad (1)$$

معادله ی (1)، معادله ی حاکم بر مدل 10 درجه آزادی را نشان می دهد. در این معادله  $M$  ماتریس  $10 \times 10$  جرم،  $C$  ماتریس  $10 \times 10$  میرایی و  $K$  ماتریس  $10 \times 10$  سفتی می باشد. بردار  $X$  نشان دهنده ی درجه آزادی جرم ها و بردار  $F$  نشان دهنده نیروی وارده بر جرم ها می باشد. در ادامه ماتریس های جرم، سفتی و میرایی به دست آمده اند.

**3-1- به دست آوردن ماتریس سفتی K**

برای به دست آوردن ماتریس سفتی، ابتدا ماتریس نرمی محاسبه شده است. برای این منظور در نرم افزار کامسول در هر مرحله به هر یک از جرم ها در راستای افقی یا عمودی نیرو وارد شده و سپس جابه جایی بقیه ی جرم ها به دست آمده است. از این طریق در هر مرحله یک ستون از ماتریس نرمی حاصل شده است. در نهایت با معکوس کردن ماتریس نرمی، ماتریس سفتی حاصله، در معادله ی (2) به دست می آید. در این رابطه، ابتدا ستون های اول تا پنجم و سپس ستون های ششم تا دهم آورده شده است.

$$K(:,1:5) = \begin{bmatrix} 0.1700 & -0.0021 & -0.0597 & 0.0076 & 0.0047 \\ -0.0021 & 0.1700 & 0.9694 & -0.0197 & -0.9740 \\ -0.0597 & 0.9694 & 17.91 & 0.9011 & -14.81 \\ 0.0076 & -0.0197 & 0.9011 & 0.557 & 0.895 \\ 0.00447 & -0.9740 & -14.81 & 0.895 & 17.94 \\ -0.007 & -0.02 & -0.88 & -0.515 & -0.907 \\ -0.021 & -0.002 & 0.041 & -0.006 & -0.057 \\ -0.972 & 0.035 & 0.735 & -0.039 & -0.862 \\ -0.019 & 0.002 & -0.04 & 0.005 & 0.057 \\ 0.969 & -0.07 & -0.86 & 0.05 & 1.07 \end{bmatrix}$$

$$K(:,6:10) = \begin{bmatrix} -0.007 & -0.021 & -0.972 & -0.019 & 0.969 \\ -0.02 & -0.002 & 0.035 & 0.002 & -0.07 \\ -0.88 & 0.041 & 0.735 & -0.04 & -0.86 \\ -0.515 & -0.006 & -0.039 & 0.005 & 0.05 \\ -0.907 & -0.057 & -0.862 & 0.057 & 1.07 \\ 0.557 & 0.0058 & 0.039 & -0.006 & -0.06 \\ 0.0058 & 0.557 & -0.901 & -0.515 & -0.894 \\ 0.039 & -0.901 & 17.92 & 0.89 & -14.8 \\ -0.006 & -0.515 & 0.89 & 0.556 & 0.91 \\ -0.06 & -0.894 & -14.8 & 0.91 & 17.93 \end{bmatrix} \quad (2)$$

**3-2- به دست آوردن ماتریس جرم M**

به خاطر این که جرم های 2، 3، 4 و 5 در شکل 4 مشابه هستند، می توان جرم آن ها را با هم برابر در نظر گرفت. بنابراین ماتریس جرم به فرم معادله ی (3) خواهد بود.

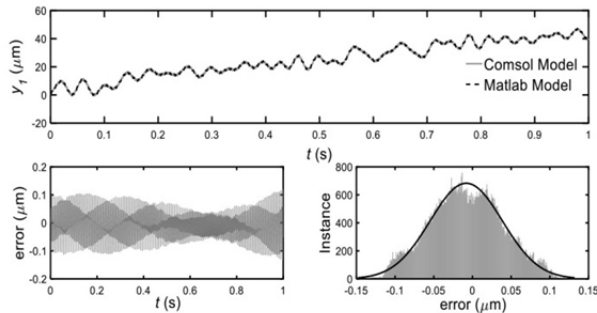


Fig. 8 system response to low frequencies after Genetic algorithm execution

شکل 8 پاسخ سیستم در فرکانس پایین بعد از اجرای الگوریتم ژنتیک

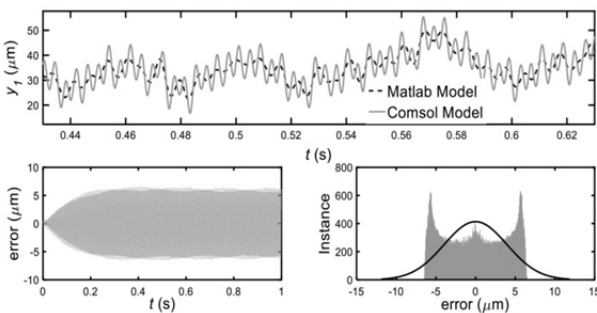


Fig. 9 system response to high frequencies before Genetic algorithm execution

شکل 9 پاسخ سیستم در فرکانس بالا قبل از اجرای الگوریتم ژنتیک

تحلیلی مقایسه شده است.

4-3-1- فرکانس طبیعی مدل کامسول

شکل 11 فرکانس طبیعی اول به دست آمده از مدل کامسول را نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشخص است، فرکانس طبیعی برابر 257.8 Hz به دست آمده است.

4-3-2- فرکانس طبیعی مدل تحلیلی

برای به دست آوردن فرکانس طبیعی مدل تحلیلی از روابط فصل دوم مرجع [8] استفاده شده است. ابتدا فرکانس طبیعی بدون میرایی به دست آمده است. برای این کار می توان رابطه ی (4) را نوشت:

$$\omega_i = \sqrt{M^{-1}K} \xrightarrow{\text{فرکانس طبیعی اول}} \omega_1 = 1600.8 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 254.7 \text{ Hz} \quad (5)$$

همان طور که در مشاهده می شود، فرکانس طبیعی اول در حد 1.2% با مدل کامسول اختلاف دارد. در جدول 2، فرکانس طبیعی مدل تحلیلی و مدل کامسول با هم مقایسه شده اند.

5- نتیجه گیری

در این مقاله، موارد زیر به ترتیب صورت گرفت.

جدول 2 مقایسه فرکانس طبیعی اول مدل تحلیلی و مدل کامسول

Table 2 comparison of the first natural frequency between the analytical model and the cmsol model

مدل	فرکانس طبیعی اول
مدل تحلیلی	254.7 Hz
مدل اجزا محدود	257.8 Hz

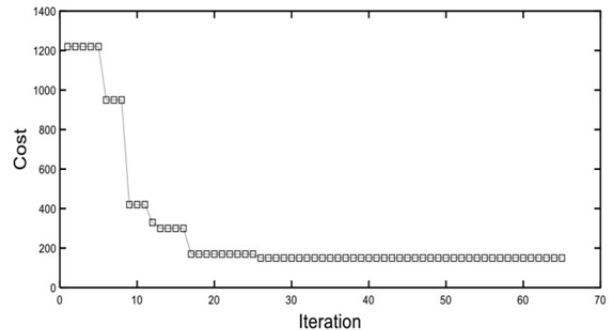


Fig. 6 changing in cost function during Genetic algorithm execution

شکل 6 تغییر تابع هزینه در حین اجرای الگوریتم ژنتیک

جدول 1 مقادیر پارامترهای تخمین زده شده

Table 1 The value of estimated parameters

پارامتر	مقدار
$\alpha$	0.62777
$\beta$	1e-4
$m_1$	32.103 gr
$m_2$	1.05 gr

برای این کار در مرحله ی اول یک مجموعه ورودی با فرکانس پایین (25 rad/s) به مدل کامسول و مدل تحلیلی اعمال شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده اند. در مرحله ی بعد همین کار به ازای ورودی فرکانس بالا (1000 rad/s) صورت گرفته است. در مرحله ی نهایی فرکانس طبیعی اول مدل کامسول با فرکانس طبیعی اول مدل تحلیلی مقایسه شده است.

4-1- مقایسه ی در فرکانس پایین

شکل های 7 و 8، مقایسه ی نتایج کامسول و مدل تحلیلی را به ازای ورودی فرکانس پایین (25 rad/s) نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، دقت تخمین قبل از اجرای الگوریتم ژنتیک در برابر 98.5% و بعد از اجرای الگوریتم ژنتیک برابر 99.8% بوده است.

4-2- مقایسه در فرکانس های بالا

شکل 9 و شکل 10، مقایسه ی نتایج کامسول و مدل تحلیلی را به ازای ورودی فرکانس پایین (1000 rad/s) نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، دقت تخمین قبل از اجرای الگوریتم ژنتیک برابر 92.73% و بعد از اجرای الگوریتم ژنتیک برابر 99.1% بوده است.

4-3- مقایسه فرکانس طبیعی

در این قسمت فرکانس طبیعی اول مدل کامسول با فرکانس طبیعی اول مدل

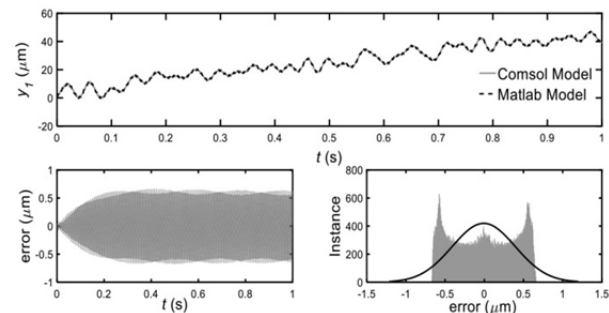


Fig. 7 system response to low frequencies before Genetic algorithm execution

شکل 7 پاسخ سیستم در فرکانس پایین قبل از اجرای الگوریتم ژنتیک

6- خطای تخمین در حد 0.9% بین مدل اجزا محدود و مدل 10 درجه آزادی در فرکانس های بالا؛

7- خطای 1.2% بین فرکانس طبیعی اول مدل تحلیلی با مدل کامسول (جدول 2).

دستاورد اصلی این پژوهش، ارائه ی یک مدل تحلیلی برای طراحی مشاهده گر ها و کنترلر هایی می باشد که قرار است بر روی سیستم واقعی پیاده سازی شود.

6- فهرست علائم

- $C$  ماتریس میرایی (Ns/m)
- $\vec{F}$  نیرو (N)
- $K$  ماتریس سفتی (N/m)
- $M$  ماتریس جرم (kg)
- $\vec{x}$  درجه آزادی (m)

علائم یونانی

- $\alpha$  ضریب ماتریس M در میرایی ریلی
- $\beta$  ضریب ماتریس K در میرایی ریلی
- $\omega_i$  فرکانس طبیعی نام بدون میرایی (rad/s)

7- مراجع

[1] D. C. Kemeny, L. L. Howell, S. P. Magleby, Using compliant mechanisms to improve manufacturability in MEMS, *Proceeding of American Society of Mechanical Engineers*, pp. 247-254.

[2] Y. K. Yong, S. S. Aphale, S. O. R. Moheimani, Design, Identification, And Control Of A Flexure-Based XY Stage For Fast Nanoscale Positioning, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, Vol. 8, No. 1, pp. 46-54, 2009.

[3] M. Maroufi, A. G. Fowler, A. Bazaei, S. O. R. Moheimani, High-stroke silicon-on-insulator MEMS nanopositioner: Control design for non-raster scan atomic force microscopy, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 86, No. 2, pp. 023705, 2015.

[4] L. L. Howell, S. P. Magleby, B. M. Olsen, *Handbook of Compliant Mechanisms*, pp. 29-79: Wiley, 2013.

[5] S. Awtar, G. Parmar, Design of a Large Range XY Nanopositioning System, *Proceeding of ASME*, pp. 387-399.

[6] S. Awtar, *Synthesis and Analysis of Parallel Kinematic XY Flexure Mechanisms*, 126 Thesis, 2004.

[7] M. Goldfarb, N. Celanovic, Modeling piezoelectric stack actuators for control of micromanipulation, *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 17, No. 3, pp. 69-79, 1997.

[8] S. S. Rao, *Vibration of Continuous Systems*, pp. 33-67, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006.

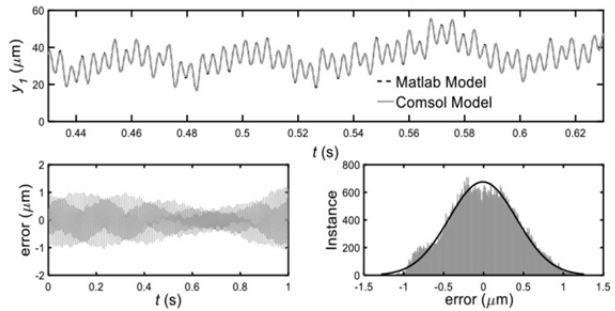


Fig. 10 system response to high frequencies after Genetic algorithm execution

شکل 10 پاسخ سیستم در فرکانس بالا بعد از اجرای الگوریتم ژنتیک

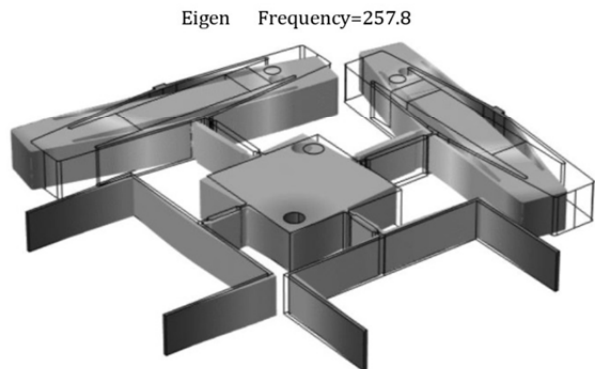


Fig. 11 First natural frequency in Comsol model

شکل 11 فرکانس طبیعی اول در مدل کامسول

- 1- ارائه ی یک مدل اجزا محدود در نرم افزار کامسول به عنوان مدل مرجع؛
- 2- پیشنهاد یک مدل 10 درجه آزادی برای تخمین مدل مرجع؛
- 3- شناسایی پارامترهای مدل 10 درجه آزادی به کمک الگوریتم ژنتیک؛
- 4- صحت سنجی خروجی ها و فرکانس طبیعی 2 مدل. نتایج این پژوهش به صورت زیر است.
- 5- خطای تخمین در حد 0.2% بین مدل اجزا محدود و مدل 10 درجه آزادی در فرکانس های پایین؛