

# دومین کنگره مشترک سیستمهای فازی و هوشمند ایران

## 2nd Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems

۷ الی ۹ آبان ماه ۱۳۸۷ 28-30 October 2008



امین ثقفی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک  
دانشکده‌ی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

[a.i.saghafi@gmail.com](mailto:a.i.saghafi@gmail.com)

سیدمصطفی کلّامی هریس

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق کنترل  
دانشکده‌ی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

[sm.kalami@gmail.com](mailto:sm.kalami@gmail.com)

مجید معاونیان

دانشیار گروه مهندسی مکانیک  
دانشکده‌ی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

[moaven@um.ac.ir](mailto:moaven@um.ac.ir)

چکیده- تکنولوژی‌های اندازه‌گیری با دقت و حساسیت بالا، به شدت نیاز به ایزولاسیون ارتعاشی به منظور بدست آوردن نتایج و جواب‌های دقیق دارند. این موضوع در کاربردهای صنعتی گوناگون از قبیل ساخت و تست نیمه هادی‌ها (wafer) در ابعاد نانو، در زمینه‌های بیولوژی سلولی و در بررسی‌های ساختار ملکولی مواد با استفاده از میکروسوپ‌های الکترونی (SEM)، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. کارایی و عملکرد تمام این موارد توسط ارتعاشات مکانیکی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. پایه‌های ارتعاشی غیرفعال در بسیاری از موارد برای نگهداری تجهیزات و به منظور حفاظت آن از ارتعاشات ناخواسته استفاده می‌گردند. در این مقاله به ایزولاسیون فعال تجهیزات حساس ارتعاشی پرداخته می‌شود. کنترل فعالی را که با استفاده از معیارهای کنترل  $H_\infty$  و توسط Particle Swarm Optimization (PSO)، پیشنهاد شده‌است، ارائه و کاربرد آن در ایزولاسیون یک میکروسکوپ اتمی بررسی می‌گردد. کنترلر مورد استفاده به صورت فیدبک ثابت خروجی اعمال و سپس بهینه‌سازی مورد نیاز برای بهینه کردن پاسخ فرکانسی سیستم، با استفاده از الگوریتم PSO انجام و درخاتمه نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها ارائه گردیده است.

کلید واژه- Particle Swarm Optimization (PSO)، ایزولاسیون فعال، میکروسکوپ اتمی، کنترل  $H_\infty$ ، کنترل ارتعاشات.

غیرفعال در بسیاری از موارد برای نگهداری تجهیزات و به منظور حفاظت آن از ارتعاشات پایه مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک چالش عمده از نظر استاتیکی، ساختن یک پایه با سختی بالا برای نصب کردن و تحمل تجهیزات و از نظر دینامیکی تا حد ممکن نرم برای ایزوله کردن بهتر تجهیزات می‌باشد. انجام دادن این کار با نصب پایه‌ی الاستومتریکی غیرفعال مشکل بوده که این موضوع توسط Crede [1]، و Ungar [2]، بررسی شده است. راه حل‌های ایزولاسیون فعالی از قبیل دمپینگ Skyhook [3]، مورد استفاده قرار گرفته است، که معمولا مبنی بر نصب پایه‌ها و مکانیزم‌های محرک می‌باشد. در سیستم‌های ضدارتعاشی فعال سیگنال‌ها به وسیله‌ی آشکارسازهای ارتعاشی حساس، دریافت گردیده و ارتعاشات با استفاده از کنترلرهای فیدبک و به وسیله‌ی تحریک‌های محرک الکتروپنایمیک کاهش می‌یابند. Fuller و همکارانش [4]، یک فهم کلی و پیش

### ۱- مقدمه

امروزه تکنولوژی‌های مهم و حساس نیاز به بررسی و مطالعه‌ی دقیق شرایط محیطی را دارند. تولید، ساخت و تست قطعات و قسمت‌های کوچک و همچنین تحقیقات و جستجو برای تولیدات با تلورانس بالا و نیز در مواردی با دقت و آشکارسازی بالا یک امر مهم در کاربردهای صنعتی مختلف می‌باشد. به عنوان مثال در صنعت نیمه هادی‌ها (wafer) تست ساختار نیم هادی‌ها با قدرت تفکیک در ابعاد نانو مورد استفاده قرار می‌گیرد. دانشمندان و محققان علم مواد ساختار ملکولی مواد جدید را با میکروسکوپ‌های الکترونی (SEM) اسکن و بررسی می‌کنند. کارایی و عملکرد تمام این موارد توسط ارتعاشات مکانیکی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. متأسفانه ارتعاشات مکانیکی یک پدیده‌ی فیزیکی می‌باشد که نمی‌توان آنرا حذف کرد. پایه‌های ارتعاشی

از ایزولاسیون تجهیزات ارائه می‌گردد، برای این منظور ایزولاسیون میکروسکوپ اتمی (AFM) ارائه و مدل و مسئله‌ی کنترلی معرفی خواهد شد. در بخش سوم، یک معرفی اجمالی از الگوریتم PSO بیان می‌گردد. در بخش چهارم نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده برای این سیستم ارائه شده است.

## ۲- ارائه‌ی مدل و تعریف مسئله

میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) برای بررسی و بزرگنمایی بالای سطح نمونه‌های مواد مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. چالش عمده در مورد AFM بر روی تعلیق و ایزولاسیون آن از پایه می‌باشد. تکنولوژی AFM قادر به بررسی سطح در ابعاد نانو می‌باشد. در نتیجه برای داشتن دقت مناسب، میکروسکوپ اتمی باید در محدوده‌ی پایینی از نویزها و اغتشاشات سطح کار کند. برای حمایت AFM در برابر ارتعاشات سازه آنرا روی مجموعه‌ی ایزوله شده مطابق شکل (۱) قرار می‌دهند [18].

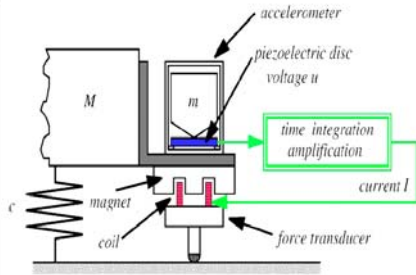
سیستم‌های ایزوله‌ی غیر فعال به صورت ترکیب موازی فنر و دمپر معرفی می‌شوند. برای سیستم‌های ایزوله‌ی ارتعاشی فعال، دمپر ویسکوز با یک مکانیزم تحریک کننده جایگزین می‌شود. در شکل (۲) یک مجموعه‌ی سنسور-محرك (sensor-actuator-unit) نمایش داده شده است. سیگنال‌ها به وسیله‌ی آشکارسازهای ارتعاشی حساس (مثلا به وسیله‌ی شتاب سنج با صفحه‌ی پیزوالکتریک [18])، تولید می‌شود و سپس در یک سیکل جریان می‌یابد.



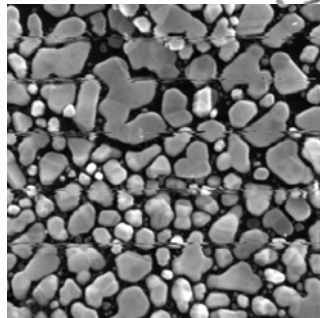
شکل ۱. میکروسکوپ اتمی بر روی یک سیستم ایزولاسیون فعال [18]

زمینه‌ای در مورد ایزولاسیون فعال ارتعاشات ارائه داده راهکار و استراتژی‌های مختلفی بیان نمودند که شامل استفاده از پس‌خور و پیش‌خور برای سیستم‌های تحت ارتعاشات پیرودیگ و نیز ارتعاشات اتفاقی بود. Stobener و Gaud [5] و Hurlebaus و Gaud [6]، یک محرک پیزوالکتریک را با استفاده از المان محدود و به منظور تشریح و بررسی رفتار سیستم‌های ایزولاسیون ارتعاشی با یک درجه آزادی ارائه دادند. مکانیزم محرک می‌تواند به صورت سری و یا موازی با پایه‌ی غیر فعال قرار گیرد. Beard و همکارانش [7]، اولین پیکربندی با کوپلینگ یک محرک پیزوالکتریک و به صورت سری با پایه‌ی غیر فعال را بررسی کردند. استفاده از محرک‌های پیزوالکتریک محدود به ایزولاسیون سازه‌هایی با دامنه‌ی حرکتی کوچک پایه می‌گردد. یک مطالعه‌ی آزمایشی توسط Serrand و Elliott [8]، بر روی ایزولاسیون فعال ساختار تجهیزات صلب با استفاده از لرزاننده‌های الکترومگنتیک که به طور موازی با دو پایه‌ی غیر فعال نصب گردیده، انجام شده است. Kim و همکارانش [9]، و Huang [10]، یک بررسی تئوری و آزمایشی از سیستم‌های ایزولاسیون ارتعاشی فعال ارائه دادند. در مطالعات آنها یک کنترل فیدبک سرعت نامتمرکز (decentralized velocity feedback) به کار گرفته شد که به موجب آن هر محرک الکترودینامیک به طور مستقل با فیدبک کردن سرعت مطلق در مکان مشابه، کار می‌کرد. Preumont و همکارانش [11,12]، فیدبک سرعت و فیدبک شتاب بکار گرفته شده توسط دمپر skyhook را برای ایزولاسیون ساختارهای انعطاف پذیر، مقایسه کردند. یک مدل‌سازی سیستم‌های ایزولاسیون فعال توسط Muller و همکارانش [13]، ارائه گردید. به هر حال مدل آنها محصور به جابجایی عمودی سیستم بود. Beadle و همکارانش [14] یک مدل کاملتر با دو صفحه‌ی صلب که دارای ۴ محرک افقی و ۴ محرک عمودی بود را در نظر گرفتند.

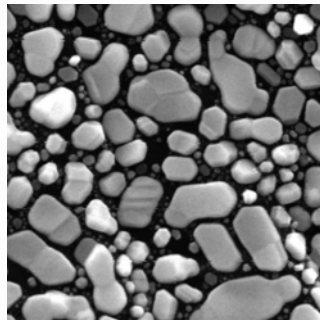
در این مقاله طراحی مکانیزم‌های محرک با کنترل فیدبک و نیز کاربرد آن در سیستم‌های ایزولاسیون ارتعاشی فعال مورد بررسی قرار می‌گیرد. کنترل فعالی با استفاده از معیارهای کنترل  $H_\infty$  طراحی شده و روش بهینه‌سازی گروه ذرات (Particle Swarm Optimization) یا به اختصار PSO [15-17] برای بهینه کردن این معیار کنترلی، مورد استفاده قرار گرفته است. در بخش دوم، یک مثال کاربردی



شکل ۲. مجموعه‌ی سنسور-محرك در سیستم ایزولاسیون فعال [18]

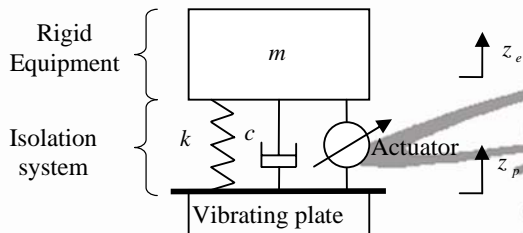


(الف)



(ب)

شکل ۳. تصاویر گرفته شده توسط یک میکروسکوپ اتمی: (a) بدون سیستم ایزولاسیون. (b) دارای سیستم کنترل ایزولاسیون فعال. [18]



شکل ۴. مدل ایزولاسیون فعال سیستم های ارتعاشی

کنترلی که برای کنترل سیستم مورد استفاده قرار گرفته

است، به صورت فیدبک ثابت خروجی محقق شده است.

حلقه‌ی فیدبک به یک محرك الکتروپنیامیکی ختم می‌شود

که یک نیروی جبرانی برای خنثی کردن حرکت قطعات

ایزوله شده اعمال می‌کند. در نتیجه ارتعاشات با استفاده از

کنترلرهای فیدبک با تحریک‌های محرك الکتروپنیامیکی

کاهش می‌یابد. همچنین اسکن صورت گرفته توسط

میکروسکوپ اتمی تحت سیستم کنترلی فعال و غیر فعال

در شکل (۳) نشان داده شده است که تفاوت‌های بین

سیستم ایزوله شده و ایزوله نشده را آشکار می‌کند [18].

همان طور که مشاهده می‌شود بدون ایزوله کردن فعال،

نویزها و اغتشاشات بر روی آنالیز و تصویر تاثیر می‌گذارد و

تحلیل درستی به وجود نمی‌آید. در حالیکه ایزولاسیون فعال

تصویر واضح‌تری ایجاد می‌کند.

مدلی که برای شبیه‌سازی‌های آتی استفاده شده است، به

صورت نشان داده شده در شکل (۴) می‌باشد. در این مدل،

$M$  جرم تجهیزات و  $m$  جرم سیستم تحریک کننده و

ملحقات آن می‌باشند. عناصر غیر فعال تعلیق، عبارتند از

یک فنر با ضریب سختی ثابت  $k$  و یک میراگر با ضریب

میرایی  $c$ .  $z_p$  و  $z_e$  نیز به ترتیب میزان حرکت تجهیزات

و میزان جابجایی پایه‌ی ارتعاشی می‌باشد. بخش فعال

سیستم تعلیق،  $u$  می‌باشد که به صورت نیروی فیزیکی و

معمولا به واسطه‌ی عملگرهای هیدرولیکی یا مغناطیسی

برای کنترل عملکرد سیستم به آن اعمال می‌شود. معادلات

دیفرانسیل حاکم بر سیستم به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$(M + m)\ddot{z}_e + c(\dot{z}_e - \dot{z}_p) + k(z_e - z_p) = u \quad (1)$$

با در نظر گرفتن متغیرهای حالت سیستم فوق به صورت

زیر داریم:

$$x_1 = z_e - z_p, \quad x_2 = \dot{z}_e \quad (2)$$

و بردار حالت سیستم به صورت  $x = [x_1 \ x_2]^T$  تعریف

می‌شود. متغیرهای حالت  $x_1$  و  $x_2$  به ترتیب جابجایی نسبی

و سرعت نوسان تجهیزات می‌باشند. تحریک ایجاد شده

توسط پایه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$w = \frac{dz_p}{dt} \quad (3)$$

و به عنوان ورودی اغتشاش در نظر گرفته شده است.

$$C_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad D_{21} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad D_{22} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

از جمع‌بندی معادلات (۴)، (۵) و (۶) نتیجه می‌شود:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ z \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ w \\ u \end{pmatrix} \quad (7)$$

قانون کنترلی که برای به دست آوردن عملکرد مناسب در این سیستم استفاده شده است، به صورت زیر می‌باشد:

$$u = Ky = [k_1 \quad k_2] \begin{bmatrix} z_e - z_p \\ \dot{z}_e \end{bmatrix} \quad (8)$$

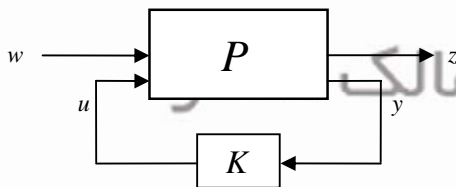
تابع تبدیل معادل با مدل فضای حالت (۷)، عبارت است از:

$$P(s) = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} (sI - A)^{-1} [B_1 \quad B_2] + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$= \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix}$$

که در آن  $P_{11}$  یک تابع تبدیل ماتریسی، با ۲ سطر و یک ستون می‌باشد. اگر سیستم حلقه بسته‌ای به صورت نشان داده شده در شکل (۵) مورد استفاده قرار بگیرد، تابع تبدیل حلقه بسته‌ی سیستم از  $w$  به  $z$ ، به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد [19]:

$$T_{zw}(s) = P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21} \quad (10)$$



شکل ۵. ساختار عمومی کنترل [19]

طبق تئوری کنترل  $H_\infty$ ، می‌توان با کمینه کردن  $\|T_{zw}(j\omega)\|_\infty$ ، مقدار خروجی‌ها را در نزدیکی صفر نگه داشت. در واقع هدف نهایی از حل این مسئله، یافتن  $K$  به نحوی است که مقدار  $\|T_{zw}(j\omega)\|_\infty$  کمترین مقدار ممکن را داشته باشد. به این ترتیب می‌توان امیدوار بود که ورودی نامطلوب  $w$  کمترین تأثیر را در خروجی‌های سیستم داشته باشد و مستقل از این که مقدار  $w$  چقدر باشد، می‌توان مقدار خروجی‌ها را در نزدیکی صفر نگه داشت [19].

هدف کلی از کنترل سیستم فوق، کم کردن اثر اغتشاش بر روی متغیرهای حالت سیستم می‌باشد. معادله‌ی حالت سیستمی که دینامیک آن با معادله‌ی (۱) معرفی شد، به صورت زیر می‌باشد:

$$\dot{x} = Ax + B_1w + B_2u \quad (4)$$

که در آن ماتریس‌های  $A$ ،  $B_1$  و  $B_2$  عبارتند از:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{M+m} & -\frac{c}{M+m} \end{pmatrix}, \quad B_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ c \end{pmatrix}, \quad B_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

هدف از این سیستم کنترلی، کاهش سرعت و شتاب قسمت‌های ایزوله شده می‌باشد که در نتیجه‌ی کاهش مقادیر جابجایی و نیروی وارده بر این قطعات کاهش می‌یابد. خروجی‌های سیستم کنترل به ترتیب به صورت  $dz_e/dt$ ،  $d^2z_e/dt^2$  قابل تعریف هستند. خروجی‌های فوق در بردار خروجی‌ها جمع‌آوری می‌شوند و معادله‌ی خروجی حالت را به صورت زیر ارائه می‌دهند:

$$z = C_1x + D_{11}w + D_{12}u \quad (5)$$

و ماتریس‌های  $C_1$ ،  $D_{11}$  و  $D_{12}$  عبارتند از:

$$C_1 = \begin{pmatrix} -k & -c \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad D_{11} = \begin{pmatrix} c \\ 0 \end{pmatrix}, \quad D_{12} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

از طرفی متغیرهای حالت قابل اندازه‌گیری در سیستم شامل جابجایی نسبی تجهیزات نسبت به پایه‌ی ارتعاشی و نیز سرعت حرکت نوسانی تجهیزات می‌باشند. در این سیستم، متغیرهایی که اندازه‌گیری می‌شوند، به عنوان ورودی کنترل کننده مورد استفاده قرار می‌گیرند. متغیرهای قابل اندازه‌گیری در حالت کلی به صورت معادلات زیر قابل بیان هستند.

$$y = C_2x + D_{21}w + D_{22}u \quad (6)$$

که ماتریس‌های  $C_2$ ،  $D_{21}$  و  $D_{22}$  عبارتند از:

در این شبیه‌سازی جرم میکروسکوپ و سیستم محرک، ضریب میرایی و سختی فنر به ترتیب برابر  $M + m = 60kg$ ،  $c = 40 \frac{Ns}{m}$  و  $k = 1.3e4 \frac{N}{m}$  در نظر گرفته شده است. پارامترهایی که برای الگوریتم PSO نظر گرفته شده‌اند، عبارتند از:

$$N_{pop} = 50, \quad c_1 = 3, \quad c_2 = 1, \quad w_j = 0.99^j \quad (13)$$

منظور از  $N_{pop}$  تعداد کل ذراتی است که در PSO وجود دارند. همانطور که مشاهده می‌شود ضریب اینرسی نیز به صورتی تعیین شده است که دارای روند کاهشی باشد. برای مقادیری از  $K$  که باعث ناپایدار شدن سیستم می‌شوند، مقدار تابع هزینه به عنوان یک جریمه، برابر با  $\infty$  در نظر گرفته شده است. در واقع تابع هزینه‌ای که PSO آن را کمینه می‌کند دارای شکل زیر است:

$$f(k_1, k_2) = \begin{cases} T_{zw}(j \omega | K = [k_1 \quad k_2])_{\infty}, & T_{zw}(s) \text{ is stable} \\ \infty, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

از نظر عملی روی بهره‌ی کنترلی  $K$  که در مسیر فیدبک مورد استفاده است، محدودیت‌هایی وجود دارد. به عنوان ۲ نمونه برای شرایط  $\|K\|_{\infty} \leq 10000$ ،  $\|K\|_{\infty} \leq 50000$  شبیه‌سازی انجام شده است. مقدار بهینه‌ی کنترل‌کننده‌ی فیدبک خروجی ثابت، برای دو قید مذکور به صورت زیر به دست آمده‌اند:

$$K_{opt,1} = [-10000 \quad -2075.6] \quad \text{s.t.} \quad \|K\|_{\infty} \leq 10000$$

$$K_{opt,2} = [-50000 \quad -5018.9] \quad \text{s.t.} \quad \|K\|_{\infty} \leq 50000$$

مقادیر بهینه‌ای که برای  $\|T_{zw}(j \omega)\|_{\infty}$  به دست آمده‌اند، در دو حالت فوق عبارتند از:

$$K = [-10000 \quad -2075.6] \Rightarrow \|T_{zw}(j \omega)\|_{\infty} = 21.391$$

$$K = [-50000 \quad -5018.9] \Rightarrow \|T_{zw}(j \omega)\|_{\infty} = 17.121$$

الگوریتم PSO بهترین جواب‌های ممکن را با شرایط فوق برای مسئله یافته است و به بهینه‌ی سراسری مسئله همگرا شده است. در شکل‌های (۶) و (۷) پاسخ فرکانسی خروجی‌های مختلف نسبت به ورودی اغتشاش در دو حالت فوق و همچنین در حالت حلقه باز ( $K=0$  یا  $u=0$ ) ترسیم شده‌اند. شکل‌های (۶) و (۷) تاثیرات کاهش اغتشاش با استفاده از کنترل فعال را نشان می‌دهد. انتخاب سیستم کنترلی فعال باعث کاهش پیک های موجود در سیستم حلقه باز می‌شود و حداکثر تغییرات را در محدوده‌ی مجاز

الگوریتم PSO که یکی از روش‌های بهینه‌سازی تصادفی موجود در بین روش‌های هوش مصنوعی و به گروه روش‌های هوش جمعی یا Swarm Intelligence متعلق است. در این روش، یک جریان اطلاعاتی بین ذرات به وجود می‌آید و در یک همکاری جمعی، بهترین جواب توسط آن‌ها پیدا می‌شود. غالباً رفتاری که حیوانات گروهی از خود نشان می‌دهند، ترکیبی از چند قانون ساده است و با شبیه‌سازی این قوانین، الگوریتم PSO به وجود آمده است. این الگوریتم در سال ۱۹۹۵ و توسط کندی و ابراهام معرفی گردیده است و امروزه دارای کاربردهای فراوانی در حل مسائل مختلف علمی و فنی می‌باشد. در این الگوریتم مجموعه‌ای از ذرات، که جواب‌های پیشنهادی الگوریتم برای مسئله می‌باشند، طی مراحل مختلف الگوریتم، به بهترین جواب ممکن همگرا می‌شوند. هر ذره دارای دو خاصیت اساسی موقعیت و سرعت می‌باشد. موقعیت هر ذره یک فضای جستجو است و سرعت حرکت ذره نیز به صورت یک بردار در نظر گرفته می‌شود. در مرحله‌ی ابتدایی الگوریتم، نقاط به صورت تصادفی در فضا ایجاد می‌شوند و دارای سرعت‌های تصادفی هستند. در هر مرحله از الگوریتم، سرعت و موقعیت هر ذره تغییر داده می‌شود [15-17]. معادلات حاکم بر این تغییرات به صورت زیرنمایش داده می‌شوند:

$$x_{j+1}^i = x_j^i + v_j^i \quad (11)$$

$$v_{j+1}^i = w_j v_j^i + c_1 r_1 (x_j^{i,best} - x_j^i) + c_2 r_2 (x_j^{g,best} - x_j^i) \quad (12)$$

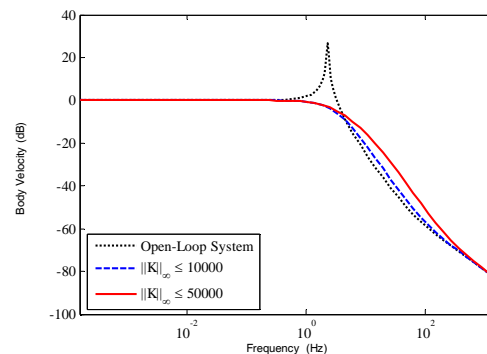
که در آن  $x_j^i$  و  $v_j^i$  به ترتیب موقعیت و سرعت ذره‌ی  $i$ ام در مرحله‌ی  $j$ ام از الگوریتم هستند. ضریب ثابت  $w_j$  که به نام ضریب اینرسی نامیده می‌شود، عددی در بازه‌ی  $[0,1]$  است و معمولاً طی اجرای الگوریتم به تدریج کاهش می‌یابد. همچنین  $x_j^{i,best}$  بهترین موقعیت تجربه شده توسط ذره‌ی  $i$ ام تا مرحله‌ی  $j$ ام و  $x_j^{g,best}$  بهترین موقعیت تجربه شده توسط همه‌ی ذرات تا تکرار  $j$ ام است. ضرایب  $c_1$  و  $c_2$  نیز، ضرایب یادگیری هستند که با مقدار ثابت و در بازه‌ی  $[0,4]$  اختیار می‌شوند و غالباً  $c_1 + c_2 = 4$  است.  $r_1$  و  $r_2$  نیز اعداد تصادفی در بازه‌ی  $[0,1]$  با توزیع یکنواخت هستند.

نگه می‌دارد. برای داشتن بهترین سیستم کنترلی باید از بهره‌ی کنترلی بالاتری استفاده کرد. واضح است از یک حد به بالاتر، افزایش بهره تفاوت زیادی در کیفیت جواب‌ها به وجود نمی‌آورد. در نتیجه افزایش بهره‌ی کنترلی تا محدوده‌ی خاصی معقول و دارای توجیه مهندسی می‌باشد.

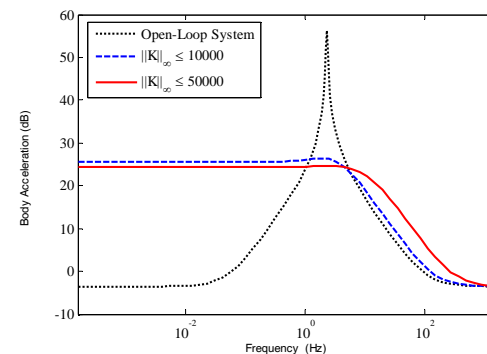
مطلوب کنترلی می‌باشد. به طور کلی بهترین کارایی ایزولاسیون با استفاده از سیستم‌های فعال در ترکیب با پایه‌های غیرفعال بدست می‌آید.

### مراجع

- [1] C.E. Crede, "Chapter 30: Theory of Vibration Isolation," in C.M. Harris (Ed.), *Shock and Vibration Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1995.
- [2] E.E. Ungar, "Chapter 11: Vibration Isolation," in L. Beranek and I.L. Ver (Eds.), *Noise and Vibration Control Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., Chichester, 1992.
- [3] D. Karnopp, "Active and semi-active vibration isolation," in *Journal of Mechanical Designs*, American Society of Mechanical Engineers, Vol. 117, pp. 177-185, 1995.
- [4] C. Fuller, S. Elliot, P. Nelson, *Active Control of Vibration*, Academic Press, London, 1996.
- [5] U. Stobener, L. Gaul, "Piezoelectric stack actuator: Fe-modeling and application for vibration isolation," in A. Preumont (Ed.), *Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Responsive Systems for Active Vibration Control*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 255-265, 2001.
- [6] S. Hurlebaus, L. Gaul, "Smart structure dynamics," in *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 20, No. 2, pp. 255-281, 2006.
- [7] M.J. Beard, A.H. Von Flotow, D.W. Schubert, "A practical product implementation of an active/passive vibration isolation system," in *Proceedings of IUTAM Symposium on the Active Control of Vibration*, University of Bath, UK, pp. 101-108, 1994.
- [8] M. Serrand, S.J. Elliott, "Multichannel feedback control for the isolation of base-excited vibration," in *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 234, No. 4, pp. 681-704, 2000.
- [9] S.M. Kim, S.J. Elliott, M.J. Brennan, "Decentralized control for multichannel active vibration isolation," in *IEEE Transactions on Control Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 93-100, 2001.
- [10] X. Huang, S.J. Elliott, M.J. Brennan, "Active isolation of a flexible structure from base vibration," in *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 263, pp. 357-376, 2003.
- [11] A. Preumont, *Vibration Control of Active Structures*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1997.
- [12] A. Preumont, A. Francois, P. De Man, V. Piefort, "Spatial filters in structural control," in *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 265, pp. 61-79, 2003.
- [13] T. Muller, S. Hurlebaus, U. Stöbener, L. Gaul, "Modelling and control of an active vibration isolation system," in *Proceedings of the International Modal Analysis Conference*, IMAC, Orlando, FL, 2005.
- [14] B.M. Beadle, S. Hurlebaus, U. Stöbener, L. Gaul, "Modelling and parameter identification of an anti-vibration system," in *Proceedings of SPIE: Smart Structures and Structural Health Monitoring*, SPIE, 2005.
- [15] S. Olariu and A. Y. Zomaya, *Handbook of Bioinspired Algorithms and Applications*, Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
- [16] R. Poli, J. Kennedy and T. Blackwell, "Particle Swarm Optimization: An Overview," in *Swarm Intelligence*, Vol. 1, pp. 33-57, Springer, 2007.
- [17] N. Nedjah and L. Mucedo Mourelle, *Swarm Intelligent Systems*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [18] U. Stöbener, Halcyonics GmbH, *Active Vibration Isolation for highly Sensitive Measurement Equipment*, Adaptronic Congress, 03-04 May, Göttingen, 2006.
- [19] Sigurd Skogestad and Ian Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design (2nd Edition)*, Wiley-Interscience, 2005.



شکل ۶. پاسخ فرکانسی سرعت حرکت تجهیزات نسبت به اغتشاش



شکل ۷. پاسخ فرکانسی شتاب حرکت تجهیزات نسبت به اغتشاش

### ۵- نتیجه‌گیری

ایزوله کردن ارتعاشات تجهیزات و وسایل اندازه‌گیری حساس از ارتعاشات سازه با گسترش علم اهمیت پیدا کرده است. با توجه به طبیعت ارتعاشات سازه، سیستم‌های ایزوله‌ی فعال به طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله ایزولاسیون فعال تجهیزات حساس مثل میکروسکوپ‌های اتمی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. کنترل فعالی بر اساس معیار  $H_\infty$  و بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم PSO انجام و نتایج حاصل از آن ارائه گردید. طراحی مکانیزم‌های محرک با کنترل فیدبک و نیز کاربرد آن در سیستم‌های ایزولاسیون ارتعاشی فعال نتایج قابل قبولی را به همراه دارد. نتایج بدست آمده حاکی از عملکرد