



بررسی اثر کوپلینگ متقابل در پایه‌های موقعیت‌دهی نانو دارای مفصل خمشی با عملکرد پیزوالکتریک

عباس شفیعی^۱، پیمان مصدق^{۲*}، سعید بشاش^۳، نادر جلیلی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۳- محقق پسادکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا، ایالت پنسیلوانیا، آمریکا

۴- استاد مهندسی مکانیک و صنایع، دانشگاه نورث ایسترن، ایالت ماساچوست، آمریکا

*اصفهان، صندوق پستی ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶ mosadegh@cc.iut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۶ مرداد ۱۳۹۲

پذیرش: ۱۸ مهر ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۰ فروردین ۱۳۹۳

کلید واژگان:

پایه موقعیت‌دهی نانو

عملگر پیزوالکتریک

کوپلینگ مکانیکی

آنالیز المان محدود

اصطکاک

پایه‌های موقعیت‌دهی نانو با سینماتیک موازی و دارای محرک پیزوالکتریک، به‌طور گسترده در ابزارهای دقیق اندازه‌گیری، همچون میکروسکوپ پراب پویشی مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از عمده‌ترین نقص‌های این وسایل، حرکت کوپل شده بین محورهای مختلف آن‌هاست، به این معنا که حرکت محور در یک جهت، در تداخل با حرکت محورهای دیگر قرار می‌گیرد و منجر به آشفتگی‌های نامطلوب می‌شود. در این پژوهش بررسی دینامیکی این سیستم به‌صورت تحلیلی، تجربی و آنالیز المان محدود به‌منظور بررسی علل عمده اثرات متقابل کوپلینگ مکانیکی، انجام شده است. تحلیل‌ها برای یک مدل سه‌بعدی انجام شده که شامل یک قسمت الاستیک متحرک در مرکز می‌باشد و توسط چهار مفصل به یک چارچوب ثابت متصل است. عملگرهای پیزوالکتریک مدل شده، به‌صورت استوانه‌ای بین قسمت متحرک مرکزی و چارچوب ثابت جاسازی شده‌اند. شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار آباکوس، برای دو ضریب اصطکاک مختلف و همچنین حالت‌هایی که تغییر در ماده چارچوب، ماده عملگر و هندسه پایه ایجاد شود، انجام گرفته است. در این شبیه‌سازی مشاهده شد که اصلی‌ترین دلیل در نسبت کوپلینگ، چرخش پیزوالکتریک‌ها به‌علت اصطکاک بین پیزوالکتریک‌ها و تغییر در هندسه چارچوب است.

Study of cross-coupling effect in piezo-flexural Nanopositioning stages

Abbas Shafiee¹, Peiman Mosaddegh^{2*}, Saeid Bashash³, Nader Jalili⁴

1- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Pennsylvania State University, University Park, PA, USA

4- Department of Mechanical and Industrial Engineering, Northeastern University, Boston, MA, USA

*P.O.B. 84156-83111 Isfahan, mosadegh@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 07 August 2013
Accepted 10 October 2013
Available Online 09 April 2014

Keywords:

Nanopositioning Stage
Piezoelectric Actuator
Mechanical Cross-Coupling
Finite Element Analysis
Friction

ABSTRACT

Parallel piezo-flexural Nanopositioning stages are extensively used in advanced nano-scale imaging and manipulation applications such as scanning probe microscopy systems. One of the major deficiencies of these devices is the coupled motion between their different axes. That is, the motion of stage in one direction interferes with motions in the other directions, leading to undesirable disturbances. In this paper, analytical, dynamic, experimental, and finite element analyses are carried out to investigate the major root cause of the cross-coupling effect. Using ABAQUS FEA software, a 3D model of the stage has been developed. Model consists of a central elastic body connected to the fixed frame through four flexural hinges. A cylindrical stack of multiple piezoelectric layers is placed between the moving central body and the fixed frame. Simulations are carried out for two different friction coefficients in the contact surfaces of the piezoelectric layers, and for different frame materials. It is observed that the main cause of the cross-coupling effect is the rotation of piezoelectric stack due to its friction with the stage moving in the tangential direction, concurrent with a change in the geometry of the stage.

۱- مقدمه

توسعه پیدا کرده‌اند. پایه‌های موقعیت‌دهی نانو دارای محرک پیزوالکتریک، به‌طور گسترده، در ابزارهای دقیق اندازه‌گیری مانند میکروسکوپ پراب پویشی^۱، میکروسکوپ نیروی اتمی^۲ و در کل وسایلی که به جابه‌جایی با

تعداد زیادی از پایه‌های خمشی، که با پیزوالکتریک تحریک می‌شوند، در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی و شرکت‌های تجاری مانند فیزیک اینسترومنت^۱

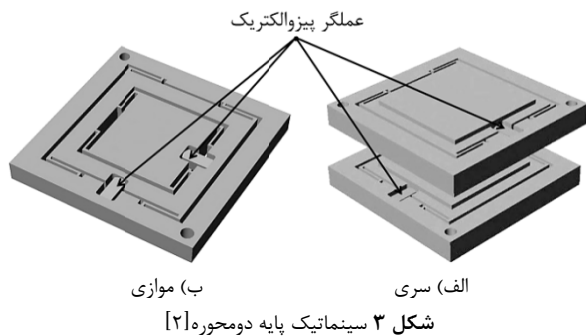
2- Scanning Probe Microscopy (SPM)
3- Atomic Force Microscopy (AFM)

1- Physik Instrumente

Please cite this article using:

A. Shafiee, P. Mosaddegh, S. Bashash, N. Jalili, Study of cross-coupling effect in piezo-flexural Nanopositioning stages, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 1-8, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



از دیگر عمده‌ترین نقص‌های پایه‌های موازی، حرکت کوپل شده بین محورهای مختلف آن‌هاست، به این معنا که حرکت محور در یک جهت، در تداخل با حرکت محورهای دیگر قرار می‌گیرد که منجر به آشفتگی‌های نامطلوب می‌شود. این اثر را می‌توان با تغییر در مشخصات پایه بهبود بخشید. المصطفی و همکارش [۹] آنالیز المان محدود به منظور مطالعه رفتار مفصل خمشی با حرکت کنترل شده، در نوعی از پایه موقعیت‌دهی نانو که در ماشین‌کاری دقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد، انجام داده‌اند. آن‌ها با تغییر در ابعاد پایه دریافتند که می‌توان فرکانس تشدید، جابه‌جایی، تنش‌ها، و نیروی اعمالی به مفصل‌ها را برای دستیابی به حرکت مناسب پایه، کنترل و بهینه کرد. سان و همکارانش [۱۰] با طراحی نوعی از سیستم موقعیت‌دهی نانو با دو درجه آزادی و آنالیز المان محدود بر روی آن نشان دادند که نیروی محرک، سفتی و فرکانس طبیعی سیستم با کاهش طول و افزایش عرض مفصل‌ها زیاد می‌شود، این درحالی است که ماکزیمم تنش در مفصل‌ها نیز افزایش می‌یابد. لیو همکارش [۶] فرایند طراحی و ساخت یک پایه دو محوره موازی، محرک با پیزوالکتریک همراه با ویژگی‌هایی مانند غیرکوپل و ساختار سینماتیکی به هم پیوسته، برای کاربردهای میکرو و نانو ارائه کرده‌اند. آن‌ها مدل تحلیلی جهت ارزیابی عملکرد مکانیکی پایه برای روابط سینماتیکی، استاتیکی، سفتی، و ظرفیت بار انجام دادند که نتایج آن‌ها با نتایج آنالیز المان محدود مورد تایید قرار گرفت. برای بهبود موقعیت‌دهی، مدل ریاضی جدیدی برای کنترل محرک‌های پیزوالکتریک توسط رو و همکارش [۱۱] ارائه شده است که با استفاده از این مدل، دقت نتایج آزمایشگاهی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است.

در کارهای انجام گرفته قبلی، تأثیر اصطکاک در لایه‌های عملگر پیزوالکتریک بررسی نشده است و همچنین از پایه‌هایی متفاوت با این پژوهش جهت آنالیز استفاده شده است. در این پژوهش، بررسی دینامیکی پایه موقعیت‌دهی نانو به‌صورت تحلیلی، تجربی و آنالیز المان محدود، جهت بررسی علل عمده اثرات متقابل کوپلینگ مکانیکی انجام شده که برای این شبیه‌سازی از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. تحلیل‌ها برای یک مدل سه‌بعدی انجام شده که این مدل شامل یک قسمت الاستیک متحرک در مرکز می‌باشد و توسط چهار مفصل به یک چارچوب ثابت متصل است. عملگر پیزوالکتریک مدل شده نیز، شامل هفت قرص پیزوالکتریک به‌صورت استوانه‌ای است که روی هم قرار گرفته‌اند و بین قسمت متحرک مرکزی و چارچوب ثابت، جاسازی شده‌اند. شبیه‌سازی برای دو ضریب اصطکاک مختلف و همچنین، حالت‌هایی که تغییر در ماده چارچوب، ماده عملگر و هندسه پایه ایجاد شود، انجام گرفته است. در این شبیه‌سازی، مشاهده شد که اصلی‌ترین دلیل در نسبت کوپلینگ، چرخش پیزوالکتریک‌ها به‌علت اصطکاک بین پیزوالکتریک‌ها و تغییر در هندسه چارچوب است.

دقت میکرو یا نانو نیاز دارند، استفاده می‌شوند [۱]. نمونه‌ای از این پایه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

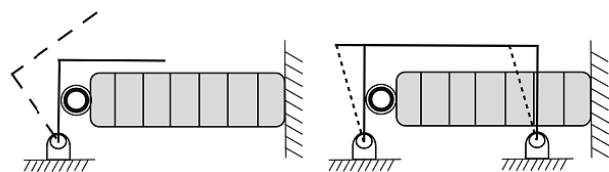
در این پایه‌ها از دو مکانیزم به‌منظور تقویت جابه‌جایی عملگر پیزوالکتریک استفاده می‌شود که در شکل ۲ نشان داده شده است. عموماً به این نوع مکانیزم‌ها، مکانیزم مفصل خمشی می‌گویند که در آن به‌جای مفصل‌های مکانیکی قدیمی از خواص تغییر شکل الاستیک مواد استفاده می‌کنند که باعث می‌شود دقت موجود در جابه‌جایی پایه‌های پیزوالکتریک، از بین نرود. همچنین استفاده از این مفصل‌ها جابه‌جایی روان، عدم نیاز به روانکاری، دقت بالا، و عدم لقی را نیز به‌همراه دارد [۴].

از دیدگاه سازه‌های سینماتیکی، پایه‌های دو محوره (پایه‌هایی که دارای دوجوهره آزادی در جهت x و y هستند) به دودسته سینماتیک سری^۱ و موازی^۲ طبقه‌بندی می‌شوند (شکل ۳). در پایه‌های سری، پایه‌های خطی یک‌درجه آزادی به‌طور متوالی روی هم قرار گرفته‌اند تا تعداد درجه آزادی مورد نظر ایجاد شود. در نتیجه، جابه‌جایی کل صرفاً با جابه‌جایی آخرین پایه مشخص می‌شود [۵]. از فواید پایه‌های سینماتیک سری، ساختار ساده و کنترل ساده آن به‌علت عملکرد مستقل دو پایه است. از نقص‌های سینماتیک سری، نیاز به فضای بالا، کاهش سفتی با افزایش تعداد درجه آزادی، اینرسی بالا، فرکانس طبیعی پایین، دینامیک نامتقارن محورهای x و y ، و جمع شدن خطاها می‌باشد. در مقابل، پایه‌های سینماتیک موازی توسط اجزایی که به هم متصل شده‌اند، به‌طور همزمان حرکت می‌کنند. با این روش، عملکردی با اینرسی کم و در نتیجه فرکانس تشدید بالا، ظرفیت تحمل بار بالا، رفتار دینامیکی معین محورهای x و y ، پاسخ سریع پایه، نرخ پویایی بالا، و دقت بالا به‌دست می‌آید. بنابراین پایه‌های موازی به‌علت دلایل ذکرشده، برای موقعیت‌دهی میکرو و نانو مناسب‌تر به‌نظر می‌رسد [۶].

یکی از مشکلات پایه‌های موقعیت‌دهی که با پیزوالکتریک تحریک می‌شوند، رفتار غیرخطی و غیر قابل کنترل بودن آن‌هاست که این رفتار از پدیده هیسترسیس^۴ و خزش که در عملگرهای پیزوالکتریک رخ می‌دهد، نشأت می‌گیرد. پدیده هیسترسیس از خاصیت فروالکتریک ماده پیزوالکتریک و پدیده خزش نیز از خودمیزانی آهسته حوزه کریستال‌ها در یک میدان الکتریکی ثابت و در یک زمان مشخص، ناشی می‌شود [۸، ۷، ۲].



شکل ۱ نمونه‌ای از پایه خمشی (M-۸۴۰ هگزا لایت) [۲]



شکل ۲ مکانیزم‌های خمشی جهت تقویت جابه‌جایی عملگر پیزوالکتریک [۳]

- 1- Flexure hinge mechanism
- 2- Serial kinematic
- 3- Parallel kinematic
- 4- Hysteresis

۲- مدل سازی دینامیکی پایه موقعیت‌ده

عملگرهای پیزوالکتریک عموماً دارای سفتی بالا و در نتیجه دارای فرکانس طبیعی بالا هستند. همچنین فرکانس کاری پایه‌های خمشی تحریک شده با پیزوالکتریک، معمولاً کمتر از اولین فرکانس تشدید آن است. به همین دلیل این پایه‌ها با مدل پارامتر متمرکز به‌طور دقیق توصیف می‌شوند. از این رو می‌توان پایه موقعیت‌دهی نانو که در یک جهت تحریک می‌شود، مطابق با شکل ۴، توسط رابطه (۱) بیان کرد:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (1)$$

در رابطه فوق، f نیروی غیرخطی معادل اعمال شده به پایه، m جرم مؤثر کل پایه، c ضریب میرایی مؤثر و k سختی مؤثر است [۱۲].

اگر اپراتور غیرخطی هیسترسیس H (رابط بین ولتاژ و شتاب تحریک) ورودی سیستم محسوب شود، f برابر خواهد شد با [۱۲]:

$$f(t) = m \cdot H\{\dot{v}(t)\} \quad (2)$$

در نتیجه رابطه (۱) به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = H\{\dot{v}(t)\} \quad (3)$$

که در آن x و v به ترتیب نمایانگر جابه‌جایی سیستم و ولتاژ ورودی است. ζ و ω_n نیز به ترتیب نسبت میرایی و فرکانس طبیعی سیستم هستند. این رابطه اثر هیسترسیس و دینامیک را یک‌جا لحاظ می‌کند. در فرکانس‌های کاری پایین می‌توان اثر دینامیک سیستم (اثر میرایی و اینرسی) را نادیده گرفت و رابطه (۳) را به‌صورت زیر نوشت:

$$\omega_n^2x(t) = H\{\dot{v}(t)\}, (\omega_n^2 \ll 2\zeta\omega_n \ll 1) \quad (4)$$

بیشتر کنترل‌کننده‌های پیش‌خوراند معکوس^۲ در فرکانس‌های کاری پایین مبتنی بر تقریبی که در رابطه (۴) وجود دارد، عمل می‌کنند [۳].

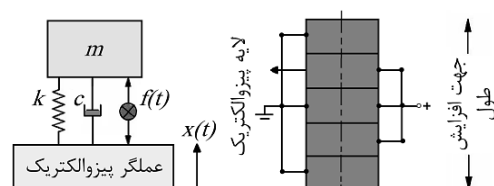
زمانی که محور دیگر تحریک شده باشد رابطه (۵) جهت نشان دادن پدیده کوپلینگ برای محور خنثی، به‌کاربرده می‌شود [۱۲].

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = \omega_n^2C\{v(t)\} \quad (5)$$

در این رابطه $x(t)$ جابه‌جایی محور خنثی، $v(t)$ جابه‌جایی محور تحریک شده و $C\{v(t)\}$ نمایانگر عملکرد غیرخطی پدیده کوپلینگ است. شایان ذکر است در حدود ۰/۳ درصد حرکت یک محور، از طریق پدیده کوپلینگ به محور دیگر منتقل می‌شود که این درصد انتقال حرکت می‌تواند باعث کاهش دقت گردد. برای به‌دست آوردن روابط، هنگامی که هر دو محور تحریک می‌شوند، می‌توان از اصل جمع‌پذیری هیسترسیس و اثر کوپلینگ استفاده کرد. از این رو دو رابطه (۶-الف) و (۶-ب)، حرکت دو محوره یک پایه را معرفی می‌کند.

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta_x\omega_{nx}\dot{x}(t) + \omega_{nx}^2x(t) = \omega_{nx}^2(H_x\{v_x(t)\} + C_{yx}\{v_y(t)\} + D_x(t)) \quad (6\text{-الف})$$

$$\ddot{y}(t) + 2\zeta_y\omega_{ny}\dot{y}(t) + \omega_{ny}^2y(t) = \omega_{ny}^2(H_y\{v_y(t)\} + C_{xy}\{x(t)\} + D_y(t)) \quad (6\text{-ب})$$



الف) شماتیک ب) مدل دینامیکی معادل

شکل ۴ عملکرد (خطی) پیزوالکتریک

که $D_{x/y}(t)$ نمایانگر اغتشاشات خارجی بر روی سیستم و اندیس‌های x و y پارامترها، اپراتورها و ورودی‌ها را متناظر با هر کدام از محورها نمایش می‌دهد [۱۳].

۳- آزمایش تجربی

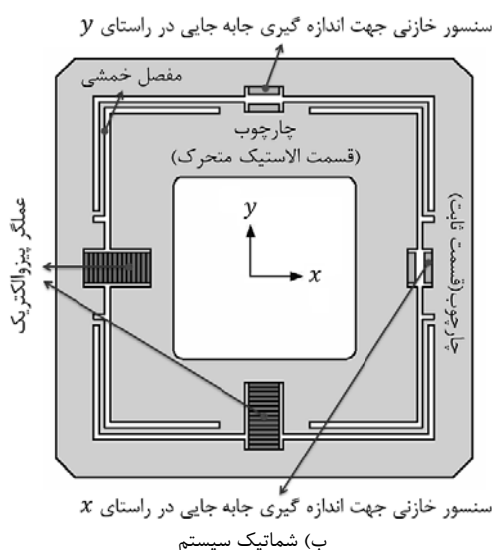
۳-۱- معرفی سیستم‌های استفاده شده در آزمایش

سیستم‌های خمشی متحرک با عملکرد پیزوالکتریک جهت ایجاد حرکت در چند محور با دقت میکرو و نانو توسعه یافته‌اند. این سیستم‌ها شامل عملگرهای پیزوالکتریکی هستند که معمولاً از سرب-زیرکونات-تیتانیوم^۳ تهیه می‌شوند و به مکانیزم خمشی متصل هستند [۱۳]. سیستم موقعیت‌دهی نانو مورد استفاده در این تحقیق، از مدل P-733.2CL ساخته شرکت فیزیک اینسترومنت می‌باشد. شکل ۵ این سیستم را نشان می‌دهد.

این سیستم پیزو، دارای دو محور موازی است و همچنین دارای سنسورهای موقعیت‌یاب خازنی با دقت کمتر از یک نانومتر است [۲]. همان‌طور که در شکل ۵-ب نشان داده شده است، عملگرهای پیزوالکتریک در دو جهت عمود برهم قرار گرفته‌اند و به‌طور همزمان، حرکت در دو راستای x و y را ایجاد می‌کنند. چون هر دو عملکرد یک پایه را جابه‌جا می‌کنند، به این سیستم، سینماتیک موازی گفته می‌شود. سنسور خازنی که در سمت راست قرار گرفته است، جابه‌جایی در راستای x و سنسور خازنی که در قسمت بالایی قرار گرفته است، جابه‌جایی در راستای y را اندازه‌گیری می‌کند. مفصل‌های خمشی این پایه‌ها توسط ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی^۴ ایجاد می‌شوند [۹].



الف) نمونه واقعی سیستم

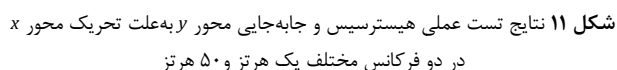
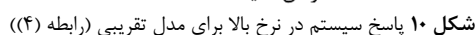
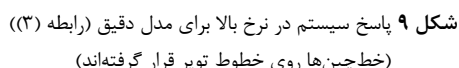
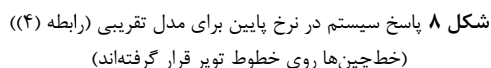


ب) شماتیک سیستم

شکل ۵ سیستم موقعیت‌دهی نانو مدل P-733.2CL از شرکت فیزیک اینسترومنت [۱۳]

3- PZT
4- EDM

1- Lumped parameters
2- Inverse feed-forward controller



تبدیل کننده دیجیتال به آنالوگ

تبدیل کننده آنالوگ به دیجیتال

سیگنال E-500

تقویت کننده

پیزوالکتریک

جابه جایی پایه

سینسور خازنی

تبدیل کننده آنالوگ به دیجیتال

سیگنال E-509

تبدیل کننده دیجیتال به آنالوگ

سخت افزار DS1103 dSPACE®

میز کنترل

شکل ۶ نحوه اتصال دستگاه‌های آزمایش

۳-۲- بررسی مدل دینامیکی

۳-۳- بررسی اثر کوپلینگ در حرکت دو محوره

شکل ۷ پاسخ سیستم در نرخ پایین برای مدل دقیق (رابطه (۳))
(خط‌چین:ها، روی خطوط توپ قرار گرفته‌اند)

به‌علت نامتقارن بودن اجزای سیستمی که در قسمت آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است، شبیه‌سازی در یک فضای سه‌بعدی انجام شده است. شکل ۱۳ نقشه قرص پیزوالکتریک و شکل ۱۴ نقشه چارچوب را نشان می‌دهند. توجه شود اندازه‌ها بر حسب میلی‌متر هستند.

در جدول ۱ خواص فیزیکی چارچوب و قرص پیزوالکتریک برای مدل بررسی شده آورده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، در این سیستم از هفت قرص پیزوالکتریک استفاده شده که قرص‌ها به‌ترتیب از بالا به پایین در شکل نامگذاری شده‌اند.

در نرم‌افزار شبیه‌ساز، نحوه تماس قرص‌های پیزو با یکدیگر و همچنین قرص پیزوی شماره یک با قسمت متحرک چارچوب و قرص پیزوی شماره هفت با قسمت ثابت چارچوب، از نوع اصطکاک کلمب تعریف و از نفوذ سطوح در یکدیگر، جلوگیری شده است. مقادیر ضرایب اصطکاک برای دو حالت مختلف، در جدول ۲ نشان داده شده است.

پس به‌طور خلاصه حالت اول و دوم مربوط به ضرایب مختلف ضریب اصطکاک بین قرص‌های پیزوالکتریک می‌باشد.

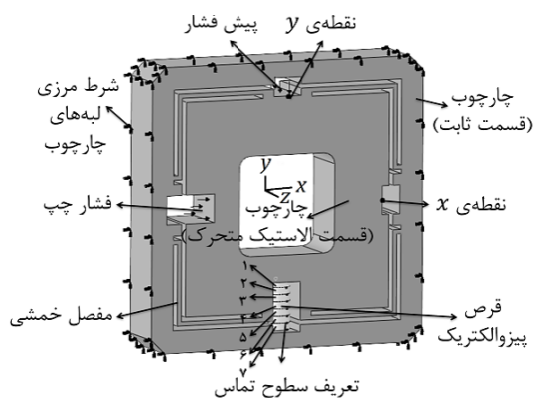
آنالیز المان محدود را می‌توان برای بررسی اثر سوراخ مربع شکل داخلی چارچوب یا بررسی اثرات تغییر ماده برای چارچوب و یا سرامیک پیزوالکتریک انجام داد. بنابراین می‌توان حالت‌های زیر را نیز در نظر گرفت.

حالت سوم: تغییر در ماده چارچوب از آلومینیوم به فولاد با مدول ینگ ۲۱۰ گیگاپاسکال و نسبت پواسون ۰/۳ و خواص اصطکاکی مشابه با خواص اصطکاکی حالت اول.

حالت چهارم: تغییر در خواص سرامیک پیزوالکتریک با مدول ینگ ۱۱ گیگاپاسکال و نسبت پواسون ۰/۳۴ و خواص اصطکاکی مشابه با خواص اصطکاکی حالت اول.

جدول ۱ خواص مکانیکی چارچوب و قرص پیزوالکتریک [۲]

اجزای پایه	جنس	مدول ینگ (گیگاپاسکال)	نسبت پواسون
چارچوب	آلومینیوم	۶۸/۹	۰/۳۳
قرص پیزوالکتریک	سرامیک PICMA® P-885	۳۶	۰/۳۴



شکل ۱۵ مدل مونتاژ شده اجزا و اعمال شرایط مرزی، فشار و تماس بین سطوح در نرم‌افزار آباکوس

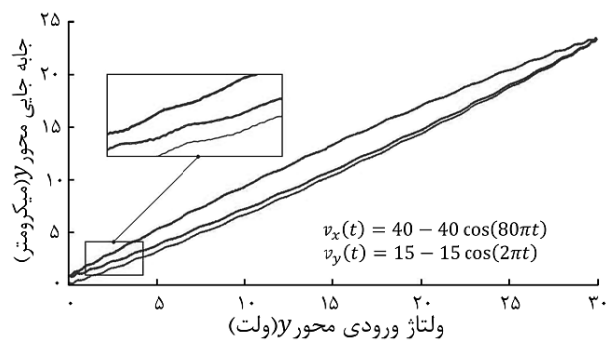
جدول ۲ ضریب اصطکاک پیزوها با یکدیگر و پیزوی یک و هفت با چارچوب [۲]

حالت اصطکاکی	پیزو با پیزو	پیزوی ۷ با چارچوب	پیزوی یک با چارچوب
	(قسمت ثابت)	(قسمت الاستیک متحرک)	
اول	۰/۱	۰/۷	۰/۷
دوم	۰/۵	۰/۷	۰/۷

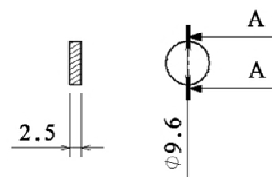
تنها هیستریسیس روی پاسخ یک محور تأثیرگذار است، بلکه پدیده کوپلینگ نیز باعث مختل شدن در پاسخ خواهد شد و پاسخ کلی هر کدام از محورها از روابط (۶) به‌دست می‌آید [۱۴]. نتایج برای وقتی که محور y با فرکانس یک هرتز و محور x با فرکانس ۴۰ هرتز تحریک می‌شود نیز به‌دست آمده‌اند که در شکل ۱۲ نشان داده شده‌است. همچنین در این شکل مشاهده می‌شود که حرکت محور با فرکانس بالا، موجی با دامنه کوچک بر پاسخ محور با فرکانس کم القا می‌کند که این اثر نامطلوب بایستی به طریقی کنترل گردد [۱۴].

۴- آنالیز المان محدود

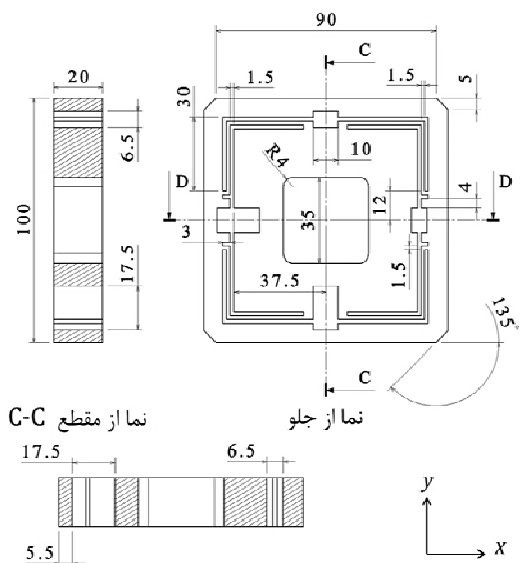
در این پژوهش برای انجام فرآیند شبیه‌سازی از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده‌است. این نرم‌افزار قادر است نمونه را در فضای دو یا سه‌بعدی مدل کند.



شکل ۱۲ نتایج تست عملی هیستریسیس و جابه‌جایی محور y با فرکانس یک هرتز، موقعی که محور x با فرکانس ۴۰ هرتز تحریک می‌شود

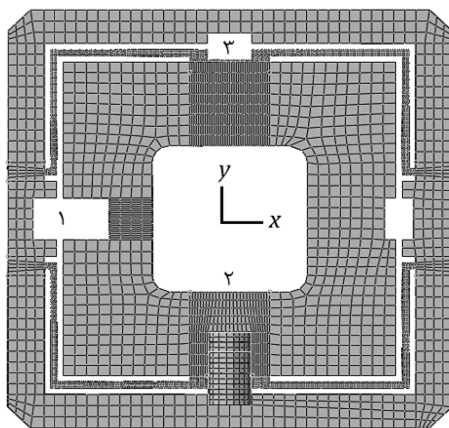


شکل ۱۳ نقشه قرص پیزوالکتریک جهت ایجاد مدل (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

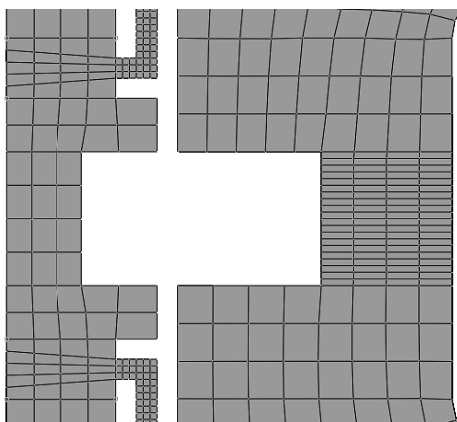


شکل ۱۴ نقشه چارچوب از نماهای مختلف جهت ایجاد مدل (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

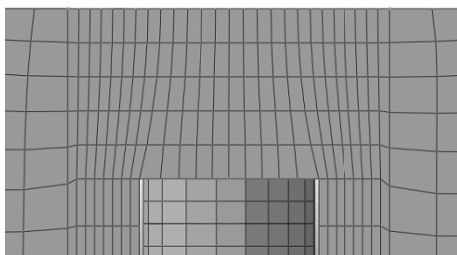
در موقعیت‌دهی نانو می‌گردد.



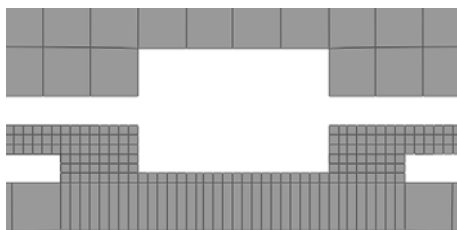
الف) مش بندی پایه



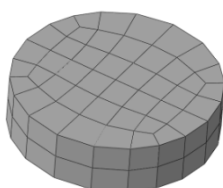
ب) مش بندی منطقه ۱



ج) مش بندی منطقه ۲



د) مش بندی منطقه ۳



ه) مش بندی قرص پیزوالکتریک

شکل ۱۶ نحوه مش بندی

حالت پنجم: تغییر در هندسه چارچوب با سوراخ مربعی داخلی به طول ۲۶/۲۵ میلی‌متر با شعاع گوشه سه میلی‌متر و خواص ماده مشابه جدول ۱ و خواص اصطکاکی حالت اول.

شرط مرزی طوری بر لبه‌های چارچوب اعمال گردیده است که هر شش درجه آزادی لبه‌های چارچوب در فضا مقید شده است.

در شبیه‌سازی عددی به جای اینکه به قرص‌های پیزوالکتریک ولتاژ اعمال شود و در نتیجه آن، جابه‌جایی قسمت متحرک چارچوب و ایجاد فشار بین پیژوها و چارچوب را به دنبال داشته باشد، می‌توان از یک پیش‌فشار برای ایجاد نیروی اصطکاک بین قرص‌های پیژو با یکدیگر و قرص پیژوی شماره یک و هفت با چارچوب استفاده کرد. مقدار پیش‌فشار مدل شده برابر ۲۷ کیلوپاسکال است که به‌طور استاتیکی و ملایم^۱، در مدت ۰/۰۵ ثانیه اعمال شده است. عملگر پیزوالکتریک سمت چپ در شکل ۱۵ که باعث حرکت قسمت متحرک چارچوب در راستای x می‌شود، با اعمال یک فشار از سمت چپ مدل شده است و مقدار این فشار برابر ۱۷۵ کیلوپاسکال است که این فشار نیز به صورت استاتیکی و ملایم در مدت یک ثانیه پس از پیش‌فشار به آن اعمال شده است. پس از کل مدت زمان بارگذاری، ابتدا پیش‌فشار پس از ۰/۰۵ ثانیه و سپس با گذشت یک ثانیه فشار سمت چپ از روی قسمت متحرک چارچوب برداشته می‌شود تا یک چرخه بارگذاری و باربرداری کامل گردد.

با توجه به شکل ۱۵، x نقطه‌ای است که جابه‌جایی در راستای x و y نقطه‌ای است که جابه‌جایی در راستای y را اندازه‌گیری می‌کند. در واقع این دو نقطه در نرم‌افزار مانند سنسورهای خازنی در آزمایش عمل می‌کنند.

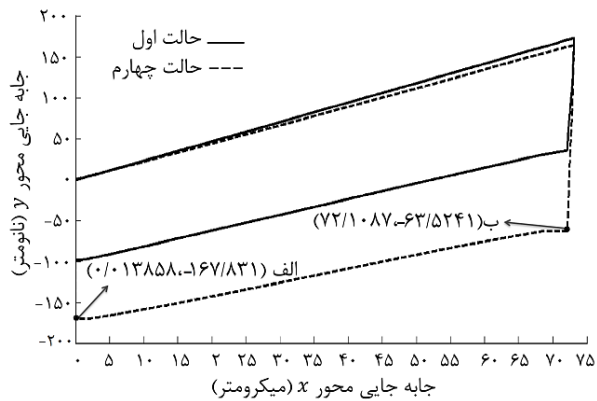
نوع المان به کار گرفته شده در مش‌بندی از نوع C3D8R است که یک المان مکعبی هشت گرهی با ۲۴ درجه آزادی است و قابلیت تغییر شکل برشی عرضی را دارا می‌باشد [۱۵]. مش‌بندی نقاط مختلف چارچوب و قرص به ترتیب در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

۵- نتایج

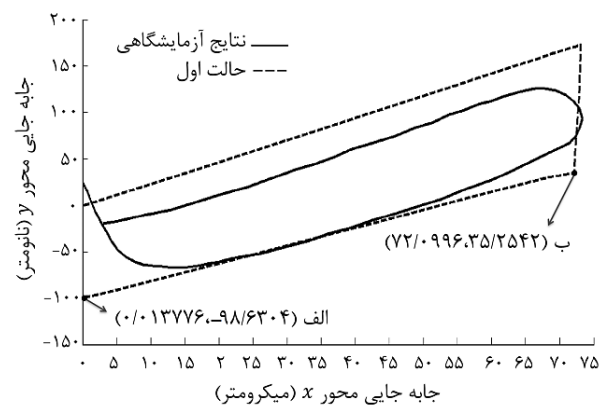
مقایسه نمودارهای کوپلینگ مکانیکی برای نتایج آزمایشگاهی و پنج حالت ذکر شده در قسمت ۴ در شکل‌های ۱۷، ۱۹، ۲۰، ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده است. نقطه الف در تصاویر بیانگر اتمام مرحله بارگذاری پیش‌فشار و نقطه ب بیانگر اتمام مرحله کل بارگذاری است. عدم تطبیقی که بین دو نمودار در شکل ۱۷ وجود دارد، به علت عدم در نظر گرفتن پدیده هیسترسس و خزش و ساده‌سازی‌هایی است که در شبیه‌سازی انجام شده است. در حالت‌های شبیه‌سازی، از داده‌ها و نمودار حالت اول که با نتیجه آزمایشی با تقریب خوبی تطبیق داده شده است، استفاده می‌کنیم.

پس از حل مسئله توسط نرم‌افزار، تغییر شکل پایه با بزرگنمایی ۲۰ برای حالت اول، و در موقعیت نقطه ب، در شکل ۱۸ نمایش داده شده است. همچنین نتایج تحلیل تنش نشان دادند که مفصل‌های خمشی در محل اتصال به چارچوب دچار بیشترین تنش هستند.

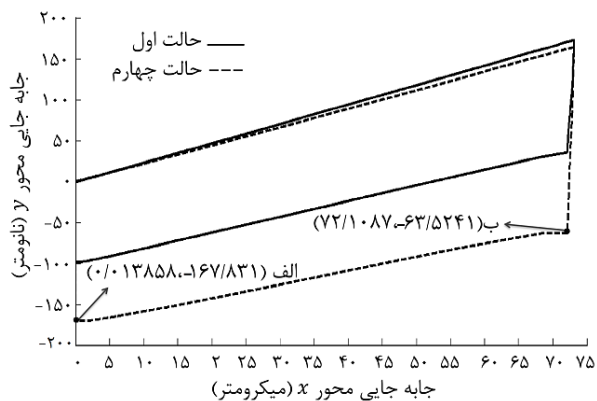
همان‌طور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌گردد، به علت نیروی قوی اصطکاکی بین قرص‌های پیژو، ابتدا جدایش لحظه‌ای پیژوها از یکدیگر و سپس چرخش آن‌ها صورت گرفته است. در پی این پدیده، تغییر ناگهانی جابه‌جایی در راستای y برای پایه متحرک نانو بوجود می‌آید. در شکل ۱۷ که اصطکاک کم است، پیژوها به راحتی روی هم می‌لغزند و مشکل جدایی پیژوها از هم وجود ندارد. همچنین با بررسی شکل ۱۹ مشاهده می‌شود که با زیاد شدن اصطکاک، تغییر ناگهانی جابه‌جایی پایه نانو در راستای y تا ۱۴۵/۴۷۷۸ نانومتر افزایش می‌یابد که این تغییر ناگهانی جابه‌جایی منجر به مختل شدن



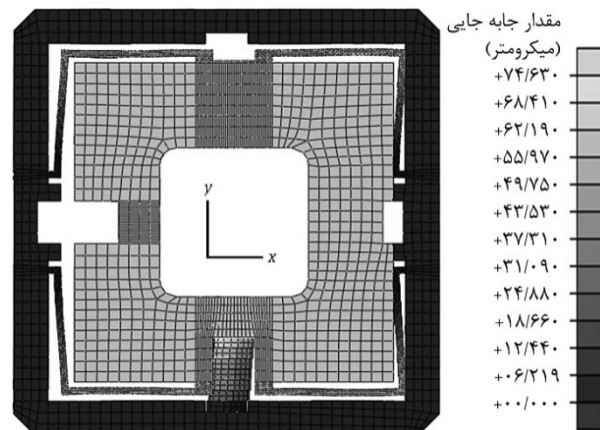
شکل ۲۱ مقایسه حالت چهارم با حالت اول



شکل ۱۷ مقایسه حالت اول با نتیجه آزمایشی



شکل ۲۲ مقایسه حالت پنجم با حالت اول



شکل ۱۸ نحوه تغییر شکل در پایه

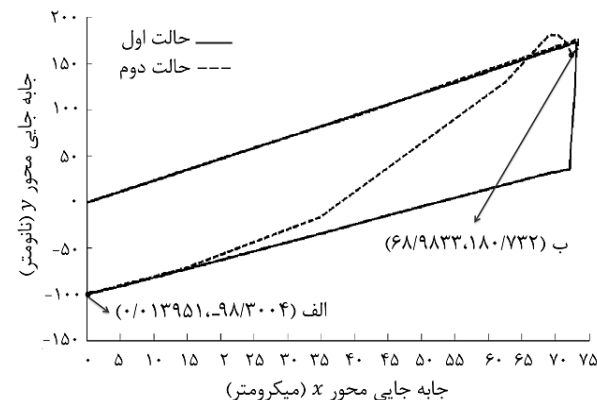
از بررسی شکل ۲۰، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مدول یانگ چارچوب و در نتیجه افزایش سختی و فرکانس پایه، میزان جابه‌جایی پایه در هر دو راستای x و y کاهش یافته، این در حالی است که نسبت کوپلینگی که بین دو محور برقرار بوده، ثابت مانده است و روابط (۶) نیز بیانگر این مطلب نیز هستند.

شکل ۲۱ نشان می‌دهد که تغییر سرامیک پیزوالکتریک با مدول یانگ کمتر، می‌تواند جابه‌جایی عملکرد پیزوالکتریک و در نتیجه جابه‌جایی پایه را افزایش دهد که این نتیجه با روابط موجود برای عملگرهای پیزوالکتریک سازگاری دارد.

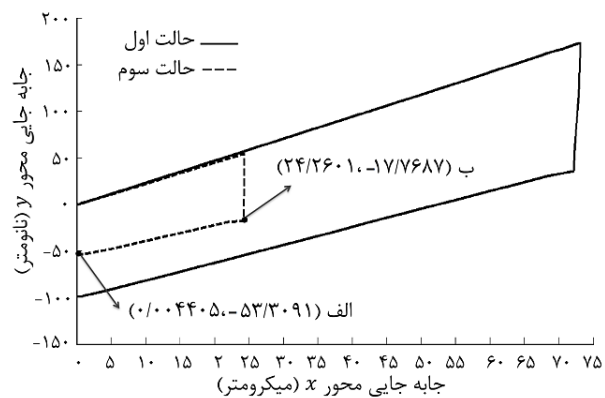
با مشاهده شکل ۲۲ مشخص می‌شود که با تغییر در ابعاد سوراخ داخلی چارچوب، نسبت کوپلینگ بین دو محور تغییر می‌کند. پس تنها راه برای تغییر در نسبت کوپلینگ بین دو محور، افزایش اصطکاک بین قرص‌های پیزوالکتریک همراه با تغییر در ابعاد پایه است.

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش از آنالیز دینامیکی پایه به‌صورت تجربی مشاهده شد که در فرکانس‌های پایین می‌توان اثر اینرسی و میرایی را در پایه نادیده گرفت. یکی از مشکلات سیستم‌های انعطاف‌پذیر با سینماتیک موازی، غیرخطی بودن پدیده کوپلینگ بین دو محور است و این مشکل از آرایش نامتقارن عملگرها بوجود می‌آید. به این معنا که وقتی پایه در یک جهت حرکت می‌کند، محرکی که در جهت دیگر است، با فشار بالایی که بین سطح متحرک و قسمت ساکن ایجاد می‌کند، می‌تواند منجر به چرخش و تغییر شکل پیزوالکتریک‌ها شود و این به‌علت نیروی قوی اصطکاکی و پیش‌بار قوی می‌باشد. از طرف دیگر، محرک‌های پیزوالکتریک ممکن است به‌خاطر نیروی



شکل ۱۹ مقایسه حالت دوم با حالت اول



شکل ۲۰ مقایسه حالت سوم با حالت اول

- [3] N. Jalili, *Piezoelectric-Based Vibration Control From Macro to Micro/Nano Scale Systems*, First Ed., pp. 151-154 and pp. 322-328, New York: Springer, 2010.
- [4] W. Xu, T. King, Flexure hinges for piezoactuator displacement amplifiers: flexibility, accuracy, and stress considerations, *Precision Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 4-10, 1996.
- [5] D. Kang, K. Kim, D. Kim, J. Shim, D. G. Gweon, J. Jeong, Optimal design of high precision XY-scanner with nanometer-level resolution and millimeter-level working range, *Mechatronics*, Vol. 19, No. 4, pp. 562-570, 2009.
- [6] Y. Li, Q. Xu, A novel piezoactuated XY stage with parallel, decouple, and stacked flexural structure for Micro-Nanopositioning, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 58, No. 8, pp. 3601-3615, 2011.
- [7] S. Bashash, N. Jalili, Underlying memory-dominant nature of hysteresis in piezoelectric materials, *Journal of Applied Physics*, Vol. 100, No. 1, pp. 014103(1-6), 2006.
- [8] S. Bashash, N. Jalili, A polynomial-based linear mapping strategy for compensation of hysteresis in piezoelectric actuators, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control (Transactions of the ASME)*, Vol. 130, No. 3, pp. 031008 (1-10), 2008.
- [9] A. Elmoustafa, M. G. Lagally, Flexural-hinge guided motion nano-positioner stage for precision machining: finite element simulations, *Precision Engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 77-81, 2001.
- [10] L. N. Sun, L. Ma, W. B. Rong, Y. Gao, Design and analysis on a 2-DOF nanopositioning stage, *Optics and precision Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 406-411, 2006.
- [11] C. Ru, L. Sun, Improving positioning accuracy of piezoelectric actuators by feed forward hysteresis compensation based on a new mathematical model, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 76, No. 9, pp. 095111-095118, 2005.
- [12] S. Bashash, N. Jalili, Robust multiple frequency trajectory tracking control of piezoelectrically driven micro/nanopositioning systems, *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, Vol. 15, No. 5, pp. 867-878, 2007.
- [13] S. Bashash, N. Jalili, Robust adaptive control of coupled parallel piezoflexural nanopositioning stages, *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, Vol. 14, No. 1, pp. 11-20, 2009.
- [14] S. Bashash, *Modeling and control of piezoactive micro and nano systems*, PhD Thesis, Clemson University, Clemson, South Carolina (SC), 2007.
- [15] ABAQUS, Standard version 6.11, User's manual, 2011.

برشی تولید شده روی هم بلغزند. در نتیجه ترکیب اثرات لغزش و فشار و چرخش، بر حرکت پایه در جهات دیگر اثر می‌گذارد. همچنین مشاهده شد که اثر کوپلینگ در فرکانس تشدید بیشتر نمایان است. ضریب اصطکاک بین قرص‌های پیزوالکتریک، خود نیز یک عامل مهم در جابه‌جایی پایه نانو در راستای Y است و با کاهش این ضریب می‌توان دقت پایه نانو را بالا برد. در این پژوهش شبیه‌سازی برای دو ضریب اصطکاک مختلف و همچنین حالت‌هایی که تغییر در ماده چارچوب، ماده عملکرد، و هندسه پایه ایجاد شود، انجام گرفته است. با تغییر در ماده تشکیل‌دهنده چارچوب یا سرامیک‌های پیزوالکتریک فقط میزان جابه‌جایی پایه تغییر می‌کند و تنها راه برای تغییر در نسبت کوپلینگ بین دو محور، افزایش اصطکاک بین قرص‌های پیزوالکتریک همراه با تغییر در ابعاد پایه است.

۷- تشکر و قدردانی

نویسنده اول مقاله از آقای مهندس علیرضا حبیب‌اللهی که با نظرات خود ایشان را در رسا بودن هر چه بیشتر متن علمی مقاله کمک شایانی کرده‌اند، قدردانی می‌نماید. همچنین لازم می‌داند از مسئول سایت دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان، آقای مهندس فریدون کبیری که ایشان را در فراهم نمودن تجهیزات لازم برای مرحله آنالیز المان محدود یاری کرده‌اند، تشکر نماید.

۸- مراجع

- [1] N. Bonnail, D. Tonneau, F. Jandard, G. A. Capolino, H. Dallaporta, Variable structure control of a piezoelectric actuator for a scanning tunneling microscope, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 51, No. 2, pp. 354-363, 2004.
- [2] *PI Catalog 2014, Piezo Nano Positioning*, Accessed 10 August 2013; http://www.physikinstrumente.com/en/pdf_extra/PI_Precision_Motion_Control_Piezo_Positioning_Complete_Catalog_2014.