



بررسی تجربی و عددی ارتعاشات آزاد پنل استوانه‌ای هوشمند دولایه آلومینیوم/پیزوالکتریک

مهدی سعادت‌فر^{1*}، علی سلیمانی²، آرش کریم‌پور صومعه‌دل³، سیامک اسماعیل‌زاده خادم⁴

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه قم، قم

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، نجف آباد

3- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

4- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* قم، صندوق پستی 3716146611 qom.ac.ir m.saadatfar@

چکیده

مواد پیزوالکتریک در اشکال مختلفی همچون ورق مستطیلی، دایروی، حلقوی و پنل‌های استوانه‌ای کاربرد روزافزونی در صنایع برای هوشمندسازی سازه‌ها پیدا کرده‌اند. در این مقاله به تحلیل تجربی و عددی ارتعاشات آزاد یک پنل استوانه‌ای هوشمند دولایه متشکل از یک لایه فلزی و یک لایه پیزوالکتریک در شرایط مرزی و هندسی مختلف پرداخته می‌شود. ابتدا یک پنل پیزوالکتریک به عنوان عملگر برای استفاده در شرایط مورد نظر آماده‌سازی و در راستای شعاعی قطبی می‌شود. سپس پنل استوانه‌ای دو لایه با اضافه کردن لایه آلومینیومی ساخته شده و از سه روش مختلف به صورت تجربی فرکانس طبیعی آن در شرایط مرزی آزاد اندازه‌گیری می‌شود. در مرحله بعد پنل یادشده در یک نرم‌افزار المان محدود مدل‌سازی شده و از مقایسه نتایج المان محدود با نتایج تجربی مشاهده می‌شود که انطباق مناسبی بین آن‌ها وجود دارد، همچنین دقت و محدودیت‌های روش‌های تجربی استفاده شده مورد بحث قرار می‌گیرند. در نهایت تأثیر شرایط مرزی مختلف ساده و گیردار و همچنین پارامترهای هندسی از قبیل ضخامت، عرض و شعاع پنل بر فرکانس طبیعی با استفاده از مدل المان محدود تحلیل می‌شود.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 29 آبان 1396

پذیرش: 25 اسفند 1396

ارائه در سایت: 23 فروردین 1397

کلیدواژه‌ها:

پنل پیزوالکتریک

آزمون تجربی ارتعاش آزاد

مدل‌سازی المان محدود

فرکانس طبیعی

Experimental and numerical analysis of free vibration of smart two-layered Aluminum/Piezoelectric cylindrical panel

Mahdi Saadatfar^{1*}, Ali Soleimani², Arash Karimpour soumedel³, Siamak Esmaeilzade Khadem⁴

1- Department of Mechanical Engineering, University of Qom, Qom, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Najafabad branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

4- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 3716146611 Qom, Iran, m.saadatfar@qom.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 20 November 2017

Accepted 16 March 2018

Available Online 12 April 2018

Keywords:

Piezoelectric Panel

Free Vibration

Experimental Testing

Finite Element Modeling

Natural Frequency

ABSTRACT

Piezoelectric materials, in different shapes such as rectangular plate, annular plate, circular plate and cylindrical shell, have increasing application in industries in order to create smart structures. In this article, experimental and numerical analysis of free vibration of a two-layered cylindrical panel with metal and piezoelectric layer in different boundary condition is carried out. First, a single PZT-4 layer is polarized in the radial direction. Using the piezoelectric layer and an Aluminum layer, a two-layered smart panel is prepared. Then, the first natural frequency of the hybrid panel with free boundary condition is measured experimentally in three different ways. The hybrid panel is simulated in finite element software (Abaqus). Results show good agreement between different experimental methods, as well as, between finite element model and experimental results. The accuracy, limitations and merits of different experimental methods are discussed completely. The results show that the natural frequency can be achieved accurately by excitation of actuator layer. Finally, the influence of different boundary conditions as well as geometrical parameter such as radius, length and thickness of smart cylindrical panel are investigated using the finite element software.

فراوانی به عنوان حسگر و عملگر دارد. از جمله این کاربردها می‌توان به پایش شرایط عملکردی سیستم‌ها یا میرا کردن ارتعاشات یک سیستم اشاره کرد. در سال‌های اخیر سازه‌های هوشمند با لایه‌های پیزوالکتریک کاربردهای فراوانی در صنایع هوافضا و نظامی پیدا کرده‌اند [1، 2].

1- مقدمه

اثر پیزوالکتریک¹ توانایی برخی مواد برای تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی و تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی است که کاربردهای

¹ Piezoelectric effect

تغییرات لایه تابعی مدرج صدق نماید. وکیلی‌تهامی و همکاران [18] به طراحی بهینه پوسته استوانه‌ای هدفمند با لایه پیزوالکتریک تحت بار متحرک پرداختند. سعادت‌فر و آقای [20,19] در مقالاتی به بررسی رفتار استاتیکی پوسته استوانه‌ای هوشمند تابعی مدرج سه لایه با اتصال ناقص⁵ بین لایه‌ها در میدان مغناطیسی پرداختند. همچنین اثر شرایط محیطی حرارت و رطوبت بر تنش‌های پوسته استوانه هوشمند تابعی مدرج چند لایه توسط سعادت‌فر و آقای [21] با استفاده از روش تفاضل مربعات بررسی شد. به تازگی سعادت‌فر [22] پل استوانه هوشمند تابعی مدرج با تغییرات خواص نمایی دارای دو لایه پیزوالکتریک حسگر و عملگر تابعی مدرج تحت بارها و شرایط محیطی ترکیبی را تحلیل کرده است. در این مقاله اتصال ناقص بین لایه‌های حسگر و عملگر با لایه میانی به طور کامل در نظر گرفته شده است، همچنین تنش‌های هایگروترمال⁶ و جابه‌جایی‌ها با وجود میدان مغناطیسی در حالتی بررسی شده است که پل روی تکیه‌گاه الاستیک قرار دارد.

در زمینه بررسی آزمایشگاهی استفاده از پیزوالکتریک در ارتعاشات، ویلسون و بوگی [23] روشی تجربی را ارائه دادند که در آن از پیزوالکتریک برای تحریک سازه‌های کوچک استفاده می‌شود. کیو و همکاران [24] به بررسی المان محدود و تجربی استفاده از پیزوالکتریک‌ها برای تحریک ارتعاشی ورق نازک مستطیلی پرداختند. جوسته و همکاران [25] به تحلیل تئوری و آزمایشگاهی استفاده از حسگر پیزوالکتریک در بررسی ارتعاشات تیر نازک پرداختند. پیانا و همکاران [26] استفاده از صفحات نازک دایروی پیزوالکتریک را برای تحریک ارتعاشی تیر نازک بلند با تکیه‌گاه‌های ساده را مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. بایستیستا و همکاران [27] اثرات دما بر عملکرد ارتعاشی حسگرهای پیزوالکتریک را مورد مطالعه تجربی قرار دادند. برداشت انرژی از ارتعاشات تیر یکسر درگیر با وصله پیزوالکتریک در جریان سیال توسط سبحانی‌راد و افشارفرد [28] مطالعه تجربی شد. پرساس و همکاران [29] امکان استفاده از وصله‌های نازک پیزوالکتریک برای تحریک ارتعاشی سازه‌های زیر آب را بررسی تجربی کردند.

انجام آزمون مودال در آزمایشگاه‌های موجود دارای محدودیت‌هایی است که در بخش آزمون تجربی به آن‌ها اشاره می‌شود. همچنین برای مواد هوشمند پیزوالکتریک روش‌های دیگری نیز وجود دارد که هم در صنایع کشور و هم در آزمایشگاه‌های دانشگاه‌های کشور به کار گرفته می‌شوند، اما تحلیل نتایج و دقت هر کدام از این روش‌ها محل بحث و بررسی است که براساس اطلاعات نویسندگان تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله به تحلیل تجربی و عددی ارتعاشات آزاد یک پل استوانه هوشمند دولایه متشکل از یک لایه آلومینیومی و یک لایه پیزوالکتریک در شرایط مرزی و هندسی مختلف پرداخته شده است. ابتدا یک پل استوانه دو لایه ساخته شده و از سه روش مختلف فرکانس طبیعی اول آن در شرایط مرزی آزاد اندازه‌گیری شده است. در مرحله بعد پل در نرم‌افزار آباکوس⁷ مدل‌سازی شده و همراه با نتایج آزمون تجربی مورد بحث قرار گرفته است. در نهایت تأثیر شرایط مرزی مختلف از قبیل آزاد و گیردار و همچنین اثر پارامترهای هندسی مثل نسبت‌های طول به شعاع، طول به ضخامت و همچنین گشودگی‌های مختلف بر فرکانس طبیعی پل با آباکوس مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

برای پیش‌بینی رفتار سازه‌های متشکل از ماده هوشمند تحت بارگذاری‌های متفاوت و همچنین تعیین عمر و دوره زمانی سرویس و نگهداری آن‌ها به تحلیل استاتیکی و دینامیکی این سازه‌ها نیاز است. چنین تحلیل‌هایی معمولاً از طریق آزمون‌های تجربی ارتعاشات و یا با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزارهای المان محدود انجام می‌شود. یکی از تست‌های مهم برای حصول اطمینان از صحت ساخت و کارکرد قطعات برای کاربردهای دینامیکی، آزمون مودال¹ است که هدف از انجام آن تعیین مشخصات دینامیکی یک جسم به خصوص فرکانس‌های طبیعی آن است. انجام آزمون تجربی در برخی شرایط مرزی و هندسی متفاوت بسیار سخت و نامطمین است. از سوی دیگر از روش حل عددی المان محدود به منظور حل بسیاری از مسائل متنوع مهندسی استفاده می‌گردد که ممکن است رفتارهای مختلفی از قبیل پایداری، گذر، خطی و غیرخطی را داشته باشند. توانایی تحلیل المان محدود در انجام تحلیل‌های پیچیده و ارائه نتایج دقیق باعث شده است که به عنوان یک ابزار مناسب برای جایگزینی آزمون تجربی در شرایط دشوار و همچنین صحت‌سنجی روش آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گیرد.

در زمینه تحلیل تئوری سازه‌های هوشمند با لایه‌های پیزوالکتریک مقالات و تحقیقات زیادی وجود دارد [3-5]. در این بخش به مقالات ارائه شده در زمینه پوسته‌ها و پل‌های استوانه‌ای اشاره می‌شود. در زمینه پل‌های هوشمند پیزوالکتریک دانش‌مهر و همکار [6] حل استاتیکی پل‌های چندلایه ضخیم با دو لایه پیزوالکتریک را مورد توجه قرار دادند. لیو [7] در تحلیلی مشابه به بررسی ارتعاشات پوسته دو انحنایی از مواد تابعی مدرج² و کنترل آن توسط لایه‌های پیزوالکتریک پرداخت. شاکری [8] پوسته استوانه‌ای چندلایه با یک لایه پیزوالکتریک در حالت استاتیکی را بررسی کرد. ساویز و همکاران [9] حل الاستیسیته سه بعدی پوسته استوانه‌ای لایه‌ای همراه با لایه‌های پیزوالکتریک در دو طرف پوسته تحت بارهای دینامیکی را بررسی کردند. یاس و همکاران [10] پوسته استوانه‌ای بسته چندلایه با یک لایه پیزوالکتریک با بارگذاری رینگ در حالت استاتیکی را بررسی کردند. کومار و همکاران [11] رفتار دینامیکی و استاتیکی پوسته استوانه‌ای لایه‌ای و دارای لایه‌های پیزوالکتریک را با در نظر گرفتن اثرات حرارتی بررسی کردند. جوان‌بخت و همکاران [12] با هدف تحلیل تقریبی استوانه‌ای با طول محدود و شرایط مرزی ساده و با خواص مواد تابعی مدرج که در دو طرف آن صفحات پیزوالکتریک قرار دارد به حل الاستیسیته دوبعدی آن پرداختند. در حل ارائه‌شده از سری فوریه در بعد طولی و المان محدود در بعد شعاعی کمک گرفته شده است. اکبری و همکار رفتار استاتیکی [13] و دینامیکی [14] یک پوسته استوانه‌ای ساخته شده از مواد تابعی مدرج را بررسی نمودند که در دو طرف آن لایه‌های پیزوالکتریک قرار گرفته است. تمامی شرایط مرزی پوسته از نوع ساده در نظر گرفته شده و تحلیل ترموالاستیک³ سه‌بعدی در حالت استاتیکی و دینامیکی انجام شده است. آن‌ها برای حل معادلات از روش تفاضل مربعات⁴ استفاده کردند و تنش، جابه‌جایی و میدان حرارت را به‌دست آوردند. علی‌بیگللو [15,16] در مقالاتی به تحلیل الاستیک و ترموالاستیک پوسته‌های استوانه‌ای از جنس مواد تابعی مدرج و احاطه شده با لایه‌های پیزوالکتریک در شرایط مرزی مختلف پرداخت. وانگ [17] در مقاله دیگری استوانه تابعی مدرج با دو لایه پیزوالکتریک را بررسی کرد که تحت بار حرارتی هستند و سعی کرد راه‌حلی ارائه دهد که برای هر نوع تابع برای

⁵ Imperfect Bonding⁶ Hygrothermal⁷ Abaqus¹ Modal Testing² Functionally Graded Materials³ Thermoelastic⁴ Differential Quadrature

2- آزمون تجربی

در آزمون تجربی انجام شده یک پل استوانه دولایه هوشمند ساخته شد و سپس رفتار دینامیکی آن مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. ماده پیزوالکتریک PZT-4 سخت از محصولات شرکت فوجی¹ ژاپن انتخاب و تهیه شد.

1-1 انتخاب ماده پیزوالکتریک مناسب

بیان نکاتی در مورد انتخاب ماده پیزوالکتریک مورد استفاده لازم است. مواد پیزوالکتریک براساس کیفیت و نحوه ساخت به دو دسته نرم² و سخت³ تقسیم می‌شوند که اگرچه در ظاهر فرمول یکسانی دارند، اما در عمل خواص متفاوتی نشان می‌دهند. پیزوالکتریک‌های نرم دارای ضرایب کوپل الکترومکانیکی بالا، ثوابت پیزوالکتریک بزرگ، نفوذپذیری بالا، ضریب دی‌الکتریک بالا، افت دی‌الکتریک بالا، ضریب کیفیت مکانیکی پایین و رفتاری غیرخطی است. پیزوالکتریک‌های نوع نرم نسبت به نوع سخت جابه‌جایی بزرگ‌تری ایجاد می‌کنند و پهنای باند وسیع‌تری دارند، اما پسماند بزرگ‌تری در رفتارشان نشان می‌دهند و بسیار حساس به از بین رفتن دوقطبی‌هایشان هستند و دمای کوری پایینی دارند. اتلاف انرژی، مقاومت الکتریکی و نفوذپذیری بالا باعث می‌شود که این مواد معمولاً در کاربردهای حسگری استفاده شوند و در کاربردهای عملگری مورد استفاده نباشند. برخلاف پیزوالکتریک‌های نرم، پیزوالکتریک‌های سخت ضرایب کوپل الکترومکانیکی، ثوابت پیزوالکتریک، نفوذپذیری، ضریب دی‌الکتریک و افت دی‌الکتریک پایینی دارند. در عوض ضریب کیفیت مکانیکی بالا و رفتاری تقریباً خطی دارند و در برابر بارهای مکانیکی بالا و ولتاژهای بالا مقاوم‌تر هستند. دوقطبی‌هایشان دیرتر از بین می‌رود و دمای کوری بالایی دارند. آن‌ها معمولاً برای کاربرد عملگری مورد استفاده قرار می‌گیرند.

2-2 ضرایب مواد پیزوالکتریک

برای این که خواص مواد پیزوالکتریک بهتر قابل مقایسه و انتخاب باشد، همه شرکت‌های تولیدکننده قطعات پیزوالکتریک، محصولات خود با مشخص کردن این ضرایب و البته تعداد دیگری از ثوابت ماده معرفی می‌کنند؛ در حالی که در روابط تئوری و نرم‌افزارها معمولاً ضرایب را به شکل دیگری استفاده می‌کنند. معادلات ساختاری مواد پیزوالکتریک به شکل رابطه (1) بیان می‌شود [22,21].

$$\{\sigma\} = [c^E]\{S\} - [e]\{E\} \quad (1)$$

$$\{D\} = [e]\{S\} + [\epsilon^S]\{E\}$$

در این روابط σ , D , E , c^E , e و ϵ^S به ترتیب معرف تنش، جابه‌جایی الکتریکی، کرنش، میدان الکتریکی، سفتی (اندازه‌گیری شده در میدان الکتریکی ثابت)، ضرایب الکتریکی و ضرایب دی‌الکتریک (اندازه‌گیری شده در کرنش ثابت) هستند. برای تبدیل ضرایبی که معمولاً در شناسنامه مواد پیزوالکتریک توسط شرکت‌ها ارائه می‌شود به ضرایبی که در رابطه بالا معرفی شد و معمولاً در روابط تئوری مورد استفاده قرار می‌گیرند، باید از روابط (2) استفاده شود [30].

$$[c^E] = [s^E]^{-1}$$

$$[e] = [s^E]^{-1}[d] \quad (2)$$

$$[\epsilon^S] = [\epsilon^T] - [d]^T[s^E]^{-1}[d]$$

در روابط بالا d , ϵ^T و ϵ^S ماتریس نرمی، شارژ الکتریکی و ضرایب دی‌الکتریک

(اندازه‌گیری شده در تنش ثابت) هستند. جدول 1 تعدادی از ضرایب مورد نیاز را نشان می‌دهد که از شناسنامه قطعه استخراج شده است. با استفاده از روابط ارائه شده برای تبدیل ضرایب ماده، ضرایب پیزوالکتریک تهیه شده به صورت جدول 2 به دست می‌آیند. خواص ماده آلومینیوم مورد استفاده نیز برابر با $E=70\text{GPa}$, $\rho=2700\text{kg/m}^3$ و $\nu=0.3$ است.

2-3 آماده‌سازی پل

با برش پل کامل پیزوالکتریک، پل با زاویه 135 درجه تهیه شد که البته به دلیل تردی بسیار بالای پیزوالکتریک تهیه‌شده، این کار مستلزم دقت بالا و ابزار مناسب است. پل به دست آمده دارای شعاع داخلی 25 میلی‌متر، ضخامت 5 میلی‌متر و طول 15 میلی‌متر است. ضخامت لایه آلومینیومی نیز 5 میلی‌متر در نظر گرفته شد.

از سوی دیگر اغلب استوانه‌های پیزوالکتریک موجود، با توجه به موارد استفاده در راستای طولی الکتروذغاری و قطبی شده‌اند؛ بنابراین محل الکترودها و جهت قطبی شدن⁴ نیز باید تغییر کند. برای الکتروذغاری معمولاً از نقره استفاده می‌شود که به دو روش می‌تواند روی قطعه نشانده شود. اگر از روش پاشش استفاده شود، الکترودها بسیار ظریف و هموار خواهد بود، اما قابلیت لحیم‌کاری برای اتصال سیم حامل جریان ندارد. در حالی که اگر از روش دوغاب نقره استفاده شود الکترودها قابلیت لحیم‌کاری خواهند داشت. به همین دلیل از روش دوغاب نقره استفاده شد. به این منظور پل در دوغابی از نقره فرو برده شده و سپس به مدت 1 ساعت در کوره با دمای 700 درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا نقره روی سطح پل پخته شود. اکنون با حذف پوشش‌های نقره در سطوح جانبی پل، الکترودهای سطح داخلی و خارجی آماده هستند (شکل 1).

جدول 1 ثوابت مادی PZT-4 [31]

مقدار	علامت اختصاری	مشخصه
1400	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	ثوابت دی‌الکتریک
1900	$\epsilon_{22}^T/\epsilon_0$	
1900	$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	
854.8	$\epsilon_0 (\times 10^{-12})$	
3.0	δ	ثابت اتلاف انرژی
29.0	ν	ضریب پواسون
23	$Y_{33}^E = 1/S_{33}^E$	مدول الاستیسیته (GPa)
64	$Y_{22}^E = 1/S_{22}^E$	
83	$Y_{11}^E = 1/S_{11}^E$	
7800	ρ	چگالی (kg/m^3)
71	K_{33}	ضریب کوپل ($\times 10^{-2}$)
1400	Q_m	ثابت کیفیت مکانیکی
634	$d_{15} = d_{24}$	ثوابت شارژ ($\times 10^{-12} \text{ C/N}$)
288	d_{33}	
-133	$d_{31} = d_{32}$	

جدول 2 خواص مادی PZT-4

مقدار	مشخصه	مقدار	مشخصه
4.136	c_{11} (GPa)	9.71	c_{12}
8.71	c_{13}	4.136	c_{22}
8.71	c_{23}	6.113	c_{33}
25.23	c_{55}	2.33	c_{66}
6-6	$e_{11}(\text{C/m}^2)$	6-6	e_{21}
9.13	e_{31}	95.14	e_{53}
95.14	e_{42}	$2 \times 10^{-9} \cdot 7$	$\epsilon_{11}(\text{C/Vm})$
$2 \times 10^{-9} \cdot 7$	ϵ_{22}	$6 \times 10^{-9} \cdot 6$	ϵ_{33}

⁴ Polarization

¹ Fuji piezoceramic Co.

² Soft

³ Hard



Fig. 3 Two-layered panel

شکل 3 پنل دولایه

2-4- روش انجام آزمایش

رفتار ارتعاشی پنل پس از آماده‌سازی پنل با توجه به امکانات و شرایط موجود مورد آزمایش قرار گرفت. برای تحلیل رفتار ارتعاشی پنل باید فرکانس‌های طبیعی آن تعیین شوند. برای تعیین فرکانس طبیعی پنل از سه روش آزمون متفاوت استفاده شده است که هر کدام شرح داده می‌شوند.

2-4-1- روش مقاومتی

روش‌های مکانیکی تعیین فرکانس طبیعی برای فرکانس‌های بالا دارای محدودیت‌هایی است. به این دلیل در بسیاری از صنایع کشور از روش غیرمکانیکی برای تعیین فرکانس‌های طبیعی قطعات پیزوالکتریک استفاده می‌شود که در این روش از دستگاهی به نام تحلیلگر افزایش مقاومت⁷ استفاده می‌شود. این دستگاه با عبور ولتاژ با فرکانس‌های مختلف از داخل قطعه پیزوالکتریک و تحریک آن می‌تواند فرکانس‌های طبیعی را تعیین نماید که در نقاط با کمترین مقاومت قرار دارند. برای تعیین محدوده فرکانس طبیعی اول سازه، رفتار مقاومتی پنل تهیه شده با استفاده از دستگاه یادشده بررسی شد (شکل 4). به این منظور پنل بین دو الکتروود دستگاه قرار داده شده و ولتاژ با فرکانس‌های متفاوت از داخل آن عبور داده شد.

2-4-2- روش تحریک لایه عملگر

روش دیگر برای تعیین فرکانس طبیعی سازه و همچنین مشاهده تأثیر لایه هوشمند، استفاده از تحریک نوسانی برای لایه پیزوالکتریک است. به منظور



(a)

پس از انجام مرحله بالا لازم است که راستای قطبی شدن پنل در راستای شعاعی قرار بگیرد. به همین منظور پنل در حمام روغن¹ قرار داده شده و دو الکتروود آن به منبع با ولتاژ بالا متصل شد. در این‌جا دقت به این نکته ضروری است که خواص مکانیکی آن با عوض شدن راستای قطبی پنل تغییر نمی‌کند، اما برای این‌که بتوان از حداکثر ظرفیت پیزوالکتریک استفاده کرد باید به همان ضریب شارژ پیزوالکتریک (d_{33}) پیشین برسیم. به معنای ساده‌تر باید قطبی شدن با همان شدت پیشین انجام پذیرد. اگر d_{33} کمتر از مقدار اولیه آن باشد، ظرفیت پیزوالکتریک کم می‌شود و اگر شدت قطبی کردن و ولتاژ اعمالی زیاد باشد، باعث شکستن پنل می‌شود؛ بنابراین برای قطبی کردن PZT-4، ولتاژ اعمالی مرحله به مرحله افزایش داده شد و در هر مرحله d_{33} اندازه‌گیری شد. زمانی که ولتاژ به 10 kV رسید، d_{33} حداکثر مقدار خود را به دست آورد. اندازه‌گیری d_{33} در هر مرحله توسط دستگاهی به نام d_{33} متر² انجام شد (شکل 2). اکنون پنل قطبی شده در راستای شعاعی با الکتروودهای داخلی و خارجی آماده است.

مرحله بعد اتصال دو لایه به یکدیگر است. بیشتر چسب‌های موجود دارای مدول الاستیسیته پایینی هستند که در صورت استفاده از آن‌ها ممکن است بر عملکرد پنل تأثیر منفی گذارد. به همین دلیل از نوعی چسب اپوکسی³ از محصولات شرکت ویکون⁴ استفاده شد. در صورتی که این چسب با شرایط صحیح و نسبت سخت‌کننده⁵ به رزین⁶ 15 به 100 استفاده شود و 24 ساعت تحت بار یکنواخت قرار گیرد به استحکام کششی 22 MPa و مدول الاستیسیته 8 MPa خواهد رسید [32]. نکته مهم در مورد استفاده از این چسب برای رسیدن به حداکثر استحکام، رعایت دقیق نسبت رزین و سخت‌کننده است. پنل دولایه آماده‌شده در شکل 3 قابل مشاهده است.



Fig. 1 a- Cylindrical panel with electrodes, b- Aluminum cylindrical panel

شکل 1 الف- پنل PZT-4 پس از الکتروود گذاری، ب- پنل آلومینیوم


 Fig. 2 d_{33} meter

 شکل 2 d_{33} متر

⁷ Impedance gain analyzer

¹ Oil Bath

² d_{33} meter

³ Plastic Metal Weicon BL

⁴ Weicon

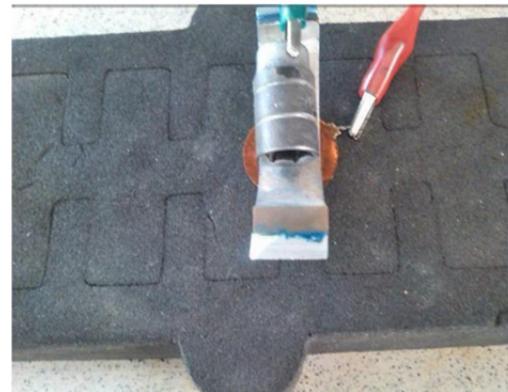
⁵ Hardener

⁶ Resin



Fig. 5 Function generator and voltage amplifier

شکل 5 مولد تابع و تقویت‌کننده ولتاژ



(b)

Fig. 4 a- Impedance gain analyzer, b- cylindrical panel in Impedance gain analyzer

شکل 4 الف- دستگاه تحلیلگر افزایش مقاومت، ب- پل در دستگاه تحلیلگر افزایش مقاومت



(a)



(b)

Fig. 6 a- Piezoelectric layer excitation, b- Modal testing with hammer

شکل 6 الف- تحریک لایه پیزوالکتریک، ب- آزمون مودال با چکش

به پل وارد شد. نیروی وارد شده به قطعه به وسیله مبدل نیروی⁵ موجود در داخل چکش و ارتعاش سازه از طریق شتاب‌سنج به نرم‌افزار منتقل شد. در نرم‌افزار نمودار تابع پاسخ فرکانسی⁶ (FRF) رسم شد که نسبت دامنه شتاب به دامنه نیرو برحسب فرکانس است. فرکانس طبیعی پل از این نمودار قابل استخراج است.

3- مدل‌سازی المان محدود

در ادامه این مقاله پارامترهای θ , R , L , N و M به ترتیب به عنوان زاویه

بررسی رفتار دینامیکی سازه هوشمند، لایه هوشمند به عنوان عملگر در نظر گرفته شده و تحت یک اختلاف ولتاژ نوسانی قرار گرفت. جابه‌جایی شعاعی یک نقطه از سطح بیرونی لایه آلومینیومی تحت این ارتعاش اجباری به دست آمده و مورد تحلیل قرار گرفت. به این منظور از یک مولد تابع¹ برای تولید اختلاف ولتاژ نوسانی استفاده شد. خروجی این مولدها ضعیف است، پس باید با استفاده از یک تقویت‌کننده² این ولتاژ افزایش یابد تا لایه پیزوالکتریک به اندازه‌ای سازه را تحریک کند که ارتعاش سازه قابل اندازه‌گیری باشد. شکل 5 تصاویر مولد تابع و تقویت‌کننده مورد استفاده را نشان می‌دهد.

اکنون خروجی‌های تقویت‌کننده به الکترودهای دو طرف پیزوالکتریک متصل می‌شوند. به منظور ایجاد شرایط مرزی آزاد، پل با استفاده از یک نخ آویزان شد. شکل 6 وضعیت پل را در زمان آزمایش نشان می‌دهد. با نصب یک شتاب‌سنج مطابق شکل پاسخ ارتعاشی سازه به تحریک اعمال شده ثبت می‌گردد. شتاب‌سنج با کابل به یک دیجیتال‌کننده اطلاعات³ وصل و اطلاعات آنالوگ پس از دیجیتال شدن به رایانه و نرم‌افزار پالس‌لب‌شاپ⁴ منتقل شد. اکنون شرایط برای انجام این مرحله از آزمایش مهیا شده است.

در این مرحله لایه پیزوالکتریک با اختلاف ولتاژ 800 ولت تحت تحریک نوسانی سینوسی قرار گرفت و پاسخ ارتعاشی سازه برای فرکانس‌های تحریک مختلف اندازه‌گیری و ثبت گردید. به تدریج که فرکانس تحریک افزایش پیدا می‌کند، صدای ارتعاش پل به راحتی قابل شنیدن است. این صدا زمانی که به فرکانس طبیعی نزدیک می‌شویم شدیدتر می‌شود و پس از آن دوباره کاهش می‌یابد.

2-4-3- روش مکانیکی

استفاده از تحریک چکش یکی از آزمایش‌های مرسوم برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی سازه‌ها است. در این آزمایش تحریک به صورت ضربه‌ای است، از آنجایی که ضربه در حوزه فرکانسی دارای محدوده وسیعی از فرکانس‌هاست؛ بنابراین با یک آزمایش می‌توان محدوده وسیعی از فرکانس‌ها را تحریک نمود و فرکانس‌های طبیعی سازه در این محدوده به دست خواهند آمد. در این آزمایش با استفاده از چکش مخصوص ضربه‌ای در راستای شعاعی

¹ Function generator

² Amplifier

³ Data logger

⁴ Pulse Labshop

⁵ Force transducer

⁶ Frequency response function

در مورد تحریک لایه پیزوالکتریک، آزمایش با فرکانس‌های تحریک مختلفی انجام شد تا نتایج آن‌ها مقایسه شود، اما به دلیل این که تفاوت قابل توجهی بین نتایج آن‌ها وجود نداشت، فقط دو مورد از آن‌ها در این بخش گزارش می‌شود. در یک مورد فرکانس تحریک (6110 هرتز) به فرکانس طبیعی نزدیک بوده و در مورد دیگر فرکانس تحریک (84 هرتز) از فرکانس طبیعی دور است. شکل 9 نمودار پاسخ فرکانسی سازه را در اثر تحریک لایه پیزوالکتریک با فرکانس تحریک 84 هرتز نشان می‌دهد. از تحلیل نمودار می‌توان به این نتیجه رسید که فرکانس طبیعی اول سازه 6250 هرتز است. شکل 10 نمودار پاسخ فرکانسی سازه را در اثر تحریک لایه پیزوالکتریک با فرکانس تحریک 6110 هرتز نشان می‌دهد. از این آزمایش فرکانس طبیعی اول سازه برابر با 6242 هرتز به دست آمده است. قابل توجه است که در این آزمایش دامنه ارتعاشات در فرکانس طبیعی اول نسبت به آزمایش پیشین افزایش داشته است که این موضوع به دلیل نزدیک بودن فرکانس تحریک به فرکانس طبیعی اول سازه است. فرکانس طبیعی دوم سازه نیز از این آزمایش به دست آمده و برابر 18304 هرتز است که به دلیل نزدیک بودن فرکانس تحریک به فرکانس طبیعی اول، دامنه ارتعاشات در فرکانس اول بیشتر بوده یا به عبارتی فرکانس طبیعی اول بر بقیه فرکانس‌ها غالب است. همچنین فرکانس طبیعی سوم سازه نیز از این نمودار استخراج شده و برابر با 24448 هرتز است. این فرکانس نقش کمی در ارتعاشات سازه داشته که به دلیل غالب بودن فرکانس طبیعی اول است.

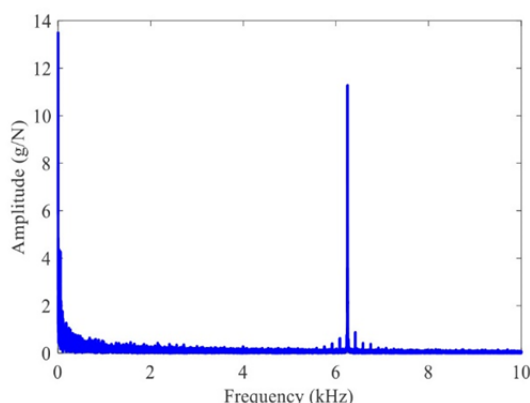


Fig. 9 Frequency response for 84 Hz excitation frequency

شکل 9 پاسخ فرکانسی برای فرکانس تحریک 84 هرتز

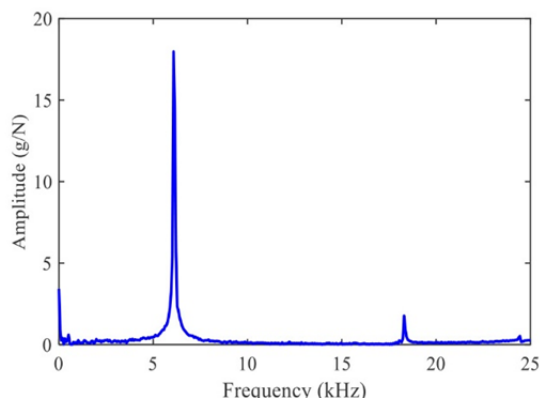


Fig. 10 Frequency response for 6110 Hz excitation frequency

شکل 10 پاسخ فرکانسی برای فرکانس تحریک 6110 هرتز

کمان، عرض پل، شعاع پل، نسبت شعاع میانگین به ضخامت پل، مقدار فرکانس طبیعی و شماره فرکانس طبیعی در نظر گرفته شده است. مدل المان محدود سه‌بعدی پل در نرم‌افزار آباکوس آماده و مش‌بندی شد. با توجه به این که در مدل واقعی از چسب با مدول الاستیسیته بالا استفاده می‌شود، می‌توان این‌گونه فرض کرد که لایه‌ها در اتصال کامل نسبت به هم قرار داشته و هیچ‌گونه حرکت نسبی بین سطوح وجود ندارد؛ بنابراین برای اتصال از قید تایی¹ استفاده شده است. جسم در شرایط مرزی آزاد (FFFF) و گیردار-آزاد (CFCF) تحلیل می‌شود که در شرایط مرزی CFCF، سطوح راستای θ در حالت گیردار و سطوح راستای طولی در حالت آزاد قرار دارند (شکل 7).

4- تحلیل نتایج

بیان این نکته ضروری است که آزمون‌های ارتعاشی به ویژه در فرکانس‌های بالا شدیداً حساس و متأثر از محیط هستند. به خصوص زمانی که لایه پیزوالکتریک تحریک می‌شود، به دلیل این که ارتعاشات ایجاد شده چندان قوی نیستند، هرگونه نویز از محیط اطراف می‌تواند نتایج را تحت تأثیر قرار دهد. به همین دلیل آماده کردن شرایط آزمایش یکی از مراحل مهم در این بخش است، همچنین در تحلیل نتایج و نمودارهای به دست آمده باید به عوامل محیطی دقت نمود که در نتایج تأثیرگذار هستند.

نمودار به دست آمده از دستگاه تحلیلگر افزایش مقاومت در شکل 8 نشان داده شده است. براساس نمودار، فرکانس طبیعی اول سازه در محدوده 5986 هرتز و فرکانس دوم و سوم آن در محدوده‌های 17981 و 23975 هرتز است.



Fig. 7 Discretization of smart panel

شکل 7 مش‌بندی پل هوشمند

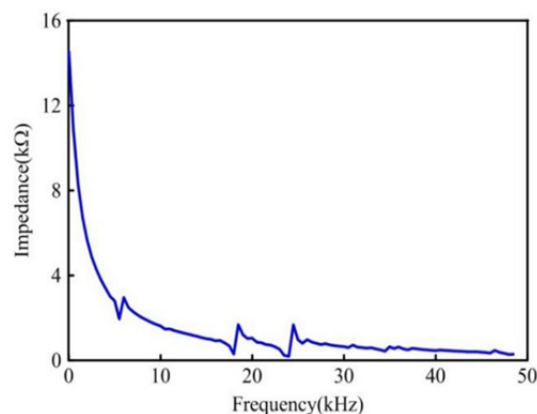


Fig. 8 Frequency analysis according to impedance

شکل 8 تحلیل فرکانسی براساس مقاومت

¹ Tie

بیشتری دارد. نکته دوم این‌که تحریک لایه پیزوالکتریک از نوع گسترده است، اما تحریک ضربه‌ای با چکش نقطه‌ای است. پس اختلاف اندکی بین دو روش طبیعی است. نکته سوم این‌که فرکانس طبیعی قطعه و حداقل مقاومت الکتریکی آن الزاماً همیشه هم‌زمان نیستند؛ بنابراین اختلاف بین نتایج حاصل از آزمایش مکانیکی و مقاومتی دور از ذهن نیست.

برای استفاده از روش چکش مکانیکی نیاز به تجهیزات خاص آزمایش است و از سویی چکش‌ها دارای محدودیت فرکانسی در تحریک سازه‌ها هستند. انجام آزمایش چکش نیاز به مهارت برای اعمال ضربه مناسب به سازه دارد که این کار برای سازه‌های کوچک مشکل‌تر خواهد بود. اعمال تحریک توسط چکش باید به گونه‌ای باشد که مودهای مختلف سازه تحریک شوند که بدین منظور نباید محل اعمال ضربه بر گره‌ها قرار گیرد که مستلزم این است که ضربه‌ها در محل‌های مختلفی اعمال و نتایج با یکدیگر مقایسه شوند تا اطمینان حاصل گردد که همه فرکانس‌های طبیعی به دست آمده‌اند. با توجه به نتایج بسیار خوب و دقیق آزمایش با تحریک لایه پیزوالکتریک می‌توان این روش را به عنوان جایگزین مناسبی برای روش چکش استفاده کرد. با توجه به این‌که پیزوالکتریک توسط اختلاف ولتاژ تحریک می‌شود می‌توان تحریک‌های متنوعی مانند سینوسی، جاروب سینوسی¹ و تصادفی نیز اعمال کرد. البته در این تحقیق استفاده از تحریک‌های متنوع به دلیل محدودیت مولد تابع امکان‌پذیر نبود. از طرفی در آزمایش تحریک لایه پیزوالکتریک مانند آزمایش چکش نیازی به شخص ماهر برای اعمال تحریک وجود ندارد. از دیگر مزایای تحریک به کمک لایه پیزوالکتریک این است که تحریک به طور گسترده² بر سازه اعمال می‌شود و نگرانی بابت عدم تحریک یک مود خاص نیز برطرف می‌شود. البته در آزمایش مودال با تحریک لرزاننده³ نیز می‌توان از تحریک‌های متنوع استفاده کرد، ولی تحریک لرزاننده نیز نقطه‌ای بوده و طور گسترده اعمال نمی‌شود؛ بنابراین در سازه‌هایی که پیزوالکتریک در ساختار آن سازه وجود دارد، استفاده از تحریک پیزوالکتریک به عنوان عملگر بسیار آسان‌تر بوده و تجهیزات و هزینه کمتری نیاز دارد.

روش مقاومتی نیز با وجود این‌که دارای محدودیت خاصی برای فرکانس‌های بالا نیست، اما دقت پاسخ‌های به دست آمده از آن کمتر از دو روش دیگر است؛ بنابراین می‌توان پیشنهاد کرد که از این روش برای فرکانس‌های بالا استفاده کرد که حسگرهای⁴ ارتعاش‌سنج قادر به اندازه‌گیری در آن محدوده نیستند. افزایش محدوده فرکانسی حسگرهای ارتعاش‌سنج بسبب افزایش قیمت آن‌ها شده و انجام آزمایش پرهزینه خواهد بود که در چنین مواقعی استفاده از روش مقاومتی می‌تواند توجیه‌پذیر باشد.

از جدول 3 مشاهده می‌شود که در حالتی که فرکانس تحریک عملگر از فرکانس طبیعی سازه دورتر است دقت پاسخ‌ها بیشتر است که این موضوع به دلیل تأثیر پدیده تشدید⁵ بر پاسخ سازه است؛ بنابراین در استفاده از روش تحریک لایه عملگر باید فرکانس تحریک در نزدیکی یکی از فرکانس‌های طبیعی سازه نباشد. با توجه به سهولت تغییر فرکانس در مولد تابع می‌توان فرکانس‌های مختلف تحریک را مورد آزمایش قرار داد تا از صحت نتایج اطمینان یافت.

با توجه به اختلاف اندک بین نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مختلف و تحلیل آباکوس، مدل ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس مورد اطمینان بوده و

نتیجه حاصل از آزمایش مودال با چکش در شکل 11 نشان داده شده است. مطابق آن چه در شکل نشان داده شده است، فرکانس طبیعی اول در 6272 هرتز قرار دارد. با توجه به محدودیت چکش مورد استفاده در این آزمایش، فرکانس‌های بالای 10 kHz تحریک نشده‌اند و بنابراین فقط فرکانس طبیعی اول از این روش قابل محاسبه بوده است. افزایش دامنه ارتعاشات در فرکانس‌های نزدیک به صفر مربوط به مود حرکت جسم صلب است که در اجسام با شرایط تکیه‌گاهی آزاد وجود دارد.

نتایج به دست آمده از روش‌های مختلف تجربی و روش المان محدود در جدول 3 نشان داده شده‌اند. همچنین مقادیر فرکانس‌های طبیعی اول تا سوم به دست آمده از آزمایش و آباکوس نیز در جدول 4 آورده شده است. مشاهده می‌شود که نتایج آباکوس و روش‌های مختلف تجربی، هم‌خوانی بسیار خوبی دارند.

دقت به سه نکته در مقایسه نتایج روش‌های تجربی متفاوت ضروری است. نکته اول این‌که روش تحریک در فرکانس طبیعی به دست آمده مؤثر است. برای تعیین فرکانس طبیعی باید سازه در محدوده‌ای از فرکانس‌های مختلف تحریک شود. تحریک ضربه‌ای با چکش محدوده‌ای از فرکانس‌ها را تحریک می‌کند، در حالی که تحریک لایه پیزوالکتریک در یک فرکانس ثابت انجام می‌شود؛ بنابراین نتایج به دست آمده با استفاده از تحریک چکش دقت

جدول 3 فرکانس طبیعی اول از روش‌های مختلف

Table 3 First natural frequency by different method		
روش	فرکانس طبیعی اول	اختلاف با آزمون چکش (%)
مقاومتی	5986 Hz	55.4
آزمون چکش	6272 Hz	
تحریک پیزوالکتریک	6110 Hz	0.47
	84 Hz	35.0
آباکوس	6292 Hz	32.0

جدول 4 مقایسه فرکانس‌های طبیعی در شرایط مرزی آزاد

Table 4 Comparison of natural frequencies of smart panel with free boundary condition

روش	فرکانس طبیعی اول (Hz)	فرکانس طبیعی دوم (Hz)	فرکانس طبیعی سوم (Hz)
تحریک پیزوالکتریک	6250	18304	24448
آباکوس	6292	18494	24856
اختلاف (%)	67.0	04.1	67.1

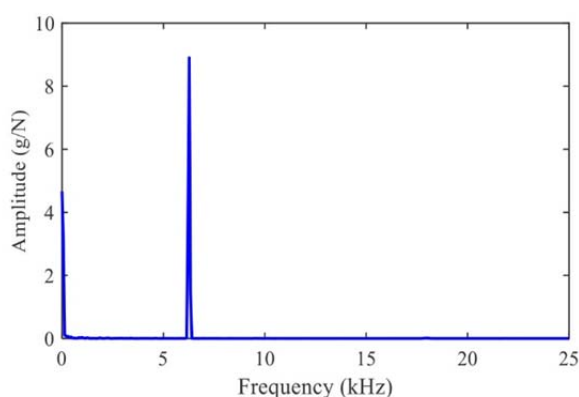


Fig. 11 Frequency response for excitation with hammer

شکل 11 پاسخ فرکانسی با تحریک چکش

¹ Swipe sinus

² Distributed

³ Shaker

⁴ Sensors

⁵ Resonance

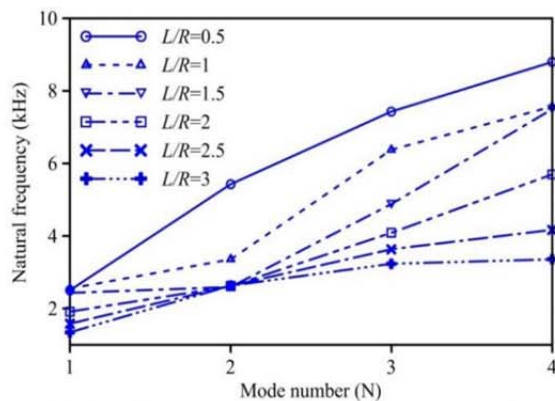


Fig. 13 Natural frequencies of panel with free boundary condition, ($\theta = 3\pi/4$, $S=5$)

شکل 13 فرکانس‌های طبیعی پل در شرایط مرزی آزاد، ($\theta=3\pi/4$, $S=5$)

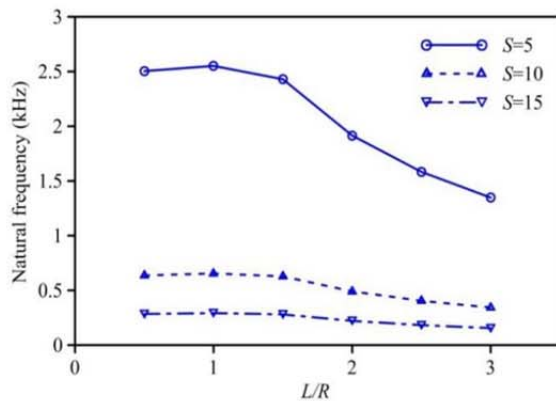


Fig. 14 Effect of radius and length of panel on the first natural frequency ($\theta=3\pi/4$)

شکل 14 تأثیر شعاع و طول پل بر اولین فرکانس طبیعی ($\theta=3\pi/4$)

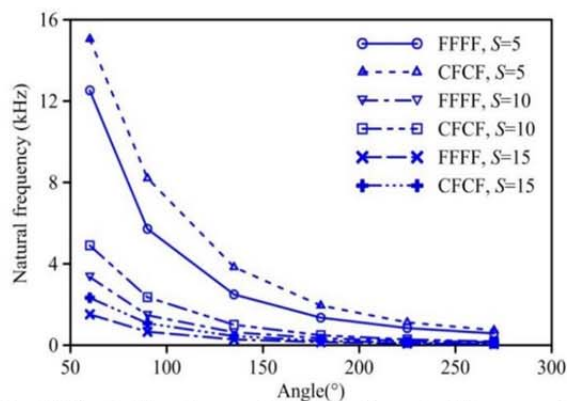


Fig. 15 Effect of boundary condition on the first natural frequency of panel, ($L=15$ mm)

شکل 15 تأثیر شرایط مرزی بر فرکانس طبیعی اول پل ($L=15$ mm)

لایه فلزی و یک لایه پیزوالکتریک در شرایط مرزی و هندسه مختلف پرداخته شد. نتایج زیر از این تحقیق قابل استخراج است:

- از هر سه روش مقاومتی، تحریک لایه عملگر و تحریک با چکش برای اندازه‌گیری فرکانس‌های طبیعی با دقت قابل قبولی می‌توان استفاده کرد.
- دقت روش مقاومتی کمتر از دو روش دیگر است، اما در فرکانس‌های بالا محدودیت کمتری دارد.

می‌توان برای تحلیل‌های بیشتر و بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر فرکانس طبیعی از آن استفاده نمود. شکل 12 نشان‌دهنده این است که مقدار اولین فرکانس طبیعی با افزایش زاویه پل در یک نسبت شعاع میانگین به ضخامت پل (S) ثابت کاهش می‌یابد. نمودار نشان می‌دهد که نرخ این کم شدن با افزایش زاویه گشودگی نیز کاهش می‌یابد. هر چه S کوچک‌تر باشد فرکانس طبیعی اول در یک گشودگی ثابت بزرگ‌تر است. در واقع فرکانس طبیعی پل‌های نازک مقدار کمتری است که نتیجه منطقی است. همچنین مقدار این افزایش نیز با کاهش S بزرگ‌تر خواهد بود. شکل 13 فرکانس‌های طبیعی در چهار مود اول را برای پل‌های با نسبت طول به شعاع میانگین مختلف نشان می‌دهد. از این نمودار می‌توان دریافت که فرکانس‌های طبیعی با افزایش نسبت طول پل به شعاع میانگین کاهش می‌یابند، اما تغییرات فرکانس طبیعی در مدهای مختلف روند یکسان و مشخصی نشان نمی‌دهد که این موضوع به دلیل ماهیت متفاوت مدهای طبیعی است. با توجه به این که تأثیر L/R در تغییر شکل‌های پیچشی و خمشی متفاوت است، تأثیر آن بر فرکانس‌های متناظر با مدهای پیچشی و خمشی نیز متفاوت خواهد بود. با تحلیل نتایج حاصل از شکل 14 می‌توان دریافت که فرکانس‌های طبیعی با افزایش نسبت S کاهش می‌یابند. در شکل 15 فرکانس‌های طبیعی قطعه در شرایط مرزی مختلف بررسی شده و نتیجه می‌شود که مقدار این فرکانس‌ها در شرایط مرزی دوسرگیردار بیشتر از آزاد است. تأثیر شرایط مرزی بر فرکانس طبیعی با افزایش مقدار زاویه پل و همچنین افزایش نسبت S کاهش می‌یابد. در واقع هر چه پل دارای گشودگی کمتری باشد مرزهای گیردار به هم نزدیک شده و بیشتر مانع ارتعاش با فرکانس پایین پل می‌شوند.

شکل 16 شکل‌مدهای¹ اول تا چهارم را برای پل در شرایط مرزی آزاد نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مود اول خمشی و مود دوم پیچشی و مدهای سوم و چهارم نیز کوپل پیچشی-خمشی است. شکل 17 شکل مدهای اول تا چهارم را برای پل در شرایط مرزی دو سر گیردار نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مدهای اول تا سوم مدهای خمشی بوده و مود چهارم کوپل خمشی-پیچشی است. مقایسه این دو شکل نشان‌دهنده تأثیر شرایط مرزی بر نوع تغییر شکل در هر یک از مدهاست.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی ارتعاشات آزاد یک پل هوشمند دولایه متشکل از یک

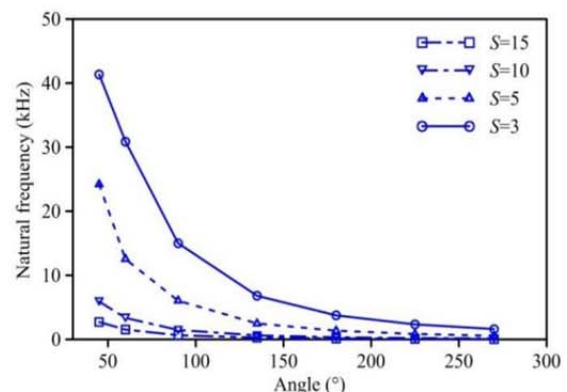
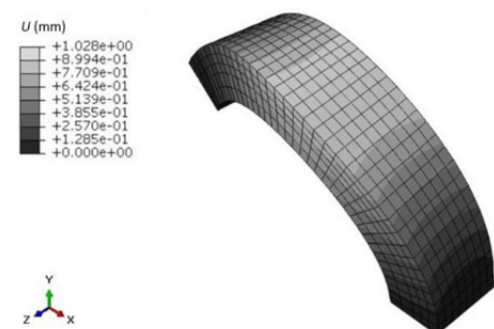


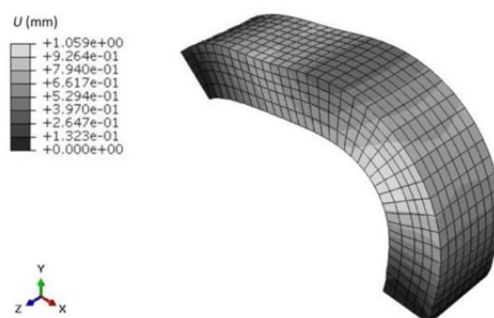
Fig. 12 First natural frequency with free boundary condition ($L=15$ mm)

شکل 12 نخستین فرکانس طبیعی در شرایط مرزی آزاد ($L=15$ mm)

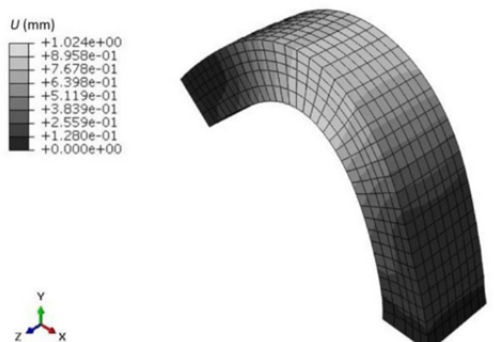
¹ Mode shapes



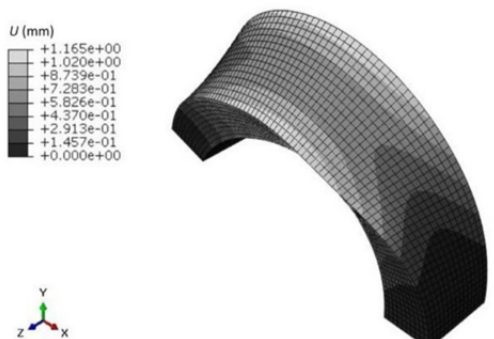
a) First mode
(الف) مود اول



b) Second mode
(ب) مود دوم



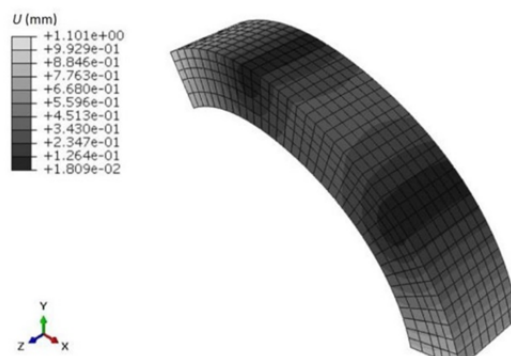
c) Third mode
(ج) مود سوم



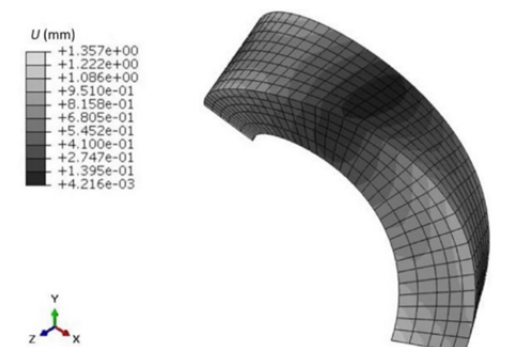
d) Forth mode
(د) مود چهارم

Fig. 17 free vibration Mode shapes of panel with CF boundary condition, $\theta=140$, $S=3$

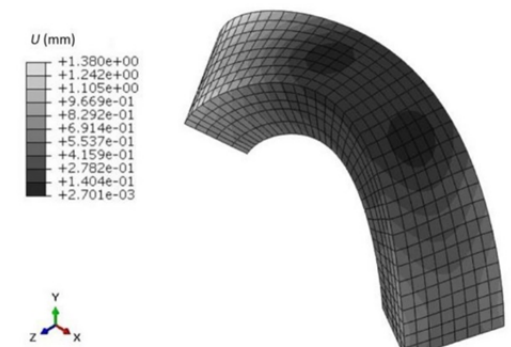
شکل 17 شکل‌مدهای ارتعاشات آزاد پل با شرایط مرزی گیردار - آزاد، $\theta=140$ و $S=3$



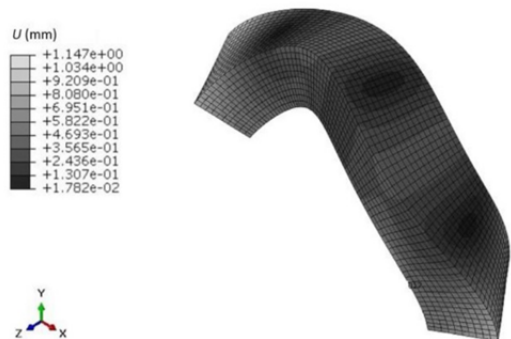
a) First mode
(الف) مود اول



b) Second mode
(ب) مود دوم



c) Third mode
(ج) مود سوم



d) Forth mode
(د) مود چهارم

Fig. 16 Mode shapes of free vibration of panel with free boundary condition, $\theta=140$, $S=3$

شکل 16 شکل‌مدهای ارتعاشات آزاد پل با شرایط مرزی آزاد، $\theta=140$ و $S=3$

- روش تحریک لایه هوشمند با رعایت جوانب استفاده، با دقت بسیار خوب می‌تواند جایگزین روش آزمون چکش شود که دارای محدودیت‌هایی است.
- در یک نسبت شعاع میانگین به ضخامت پل (S) ثابت، مقدار اولین فرکانس طبیعی با افزایش زاویه پل کاهش می‌یابد. نرخ این کاهش با افزایش زاویه کمتر می‌شود.
- در یک پل با زاویه گشودگی ثابت، هرچه نسبت شعاع میانگین به ضخامت پل (S) کوچک‌تر باشد فرکانس طبیعی اول بزرگ‌تر است که مقدار این افزایش با کاهش S نیز بزرگ‌تر خواهد بود.
- مقدار کاهش فرکانس طبیعی اول با افزایش نسبت طول پل به شعاع میانگین کمتر می‌شود.
- تأثیر شرایط مرزی بر فرکانس طبیعی با افزایش مقدار زاویه پل و همچنین افزایش نسبت S کاهش می‌یابد.
- 6- مراجع**
- [1] P. P. Friedmann, Magnetostrictively actuated control flaps for vibration reduction in helicopter rotors-design considerations for implementation, *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 33, No. 10-11, pp. 1203-121, 2011.
 - [2] R. G. Loewy, Recent developments in smart structures with aeronautical applications, *Smart Materials and Structures*, Vol. 6, No. 5, pp. 11-42, 1997.
 - [3] S. Hosseini Hashemi, H. Akhavan, M. Fadaee, Exact closed-form free vibration analysis of moderately thick rectangular functionally graded plates with two bonded piezoelectric layers, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 57-74, 2011. (in Persian فارسی)
 - [4] M. Saadatfar, M. Aghaei-Khafri, Thermoelastic analysis of a rotating functionally graded cylindrical shell with functionally graded sensor and actuator layers on an elastic foundation placed in a constant magnetic field, *Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 27, No. 4, pp. 512-527, 2016.
 - [5] GH. Rahimi, H. Toorani, M. S. Gazor, Analysis vibrations of two-direction functionally graded beam with integrated piezoelectric layers on resting elastic foundation using differential quadrature, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 9, pp. 58-68, 2013. (in Persian فارسی)
 - [6] R. Daneshmehr, M. Shakeri, Piezoelectricity solution for thick laminated shell panel under cylindrical bending, *Mechanical Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 123-141, 2004.
 - [7] K. M. Liew, X. Q. He, S. Kitipornchai, Finite element method for the feedback control of FGM shells in the frequency domain via piezoelectric sensors and actuators, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 193, No. 3-5, pp. 257-273, 2004.
 - [8] M. Shakeri, M. R. Saviz, M. Yas, Three-dimensional elasticity solution for thick laminated cylinder with piezoelectric layer, *Mechanical Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 5-18, 2005.
 - [9] M. R. Saviz, M. Shakeri, M. H. Yas, Three-dimensional elasticity analysis of a laminated cylindrical shell with piezoelectric layer under dynamic loads, *Mechanical Engineering Science*, Vol. 221, No. 12, pp. 1507-1519, 2007.
 - [10] M. H. Yas, M. Shakeri, M. R. Saviz, Elasticity solution of laminated cylindrical shell with piezoelectric layer under local ring load, *Key Engineering Materials*, Vol. 334-335, No. 1, pp. 917-920, 2007.
 - [11] R. Kumar, B. K. Mishra, S. C. Jain, Static and dynamic analysis of smart cylindrical shell, *Finite Element Analysis and Design*, Vol. 45, No. 1, pp. 13-24, 2008.
 - [12] M. Javanbakht, M. Shakeri, S. N. Sadeghi, A. R. Daneshmehr, The analysis of functionally graded shallow and non-shallow shell panels with piezoelectric layers under dynamic load and electrostatic excitation based on elasticity, *Mechanics-A/Solids*, Vol. 30, No. 6, pp. 983-991, 2011.
 - [13] R. Akbari Alashti, M. Khorsand, Three-dimensional thermo-elastic analysis of a functionally graded cylindrical shell with piezoelectric layers by differential quadrature method, *Pressure Vessel and Piping*, Vol. 88, No. 5-7, pp. 167-180, 2011.
 - [14] R. Akbari Alashti, M. Khorsand, Three-dimensional dynamo-thermo-elastic analysis of a functionally graded cylindrical shell with piezoelectric layers by DQ-FD coupled, *Pressure Vessel and Piping*, Vol. 96-97, No. 1, pp. 49-67, 2012.
 - [15] A. Alibeigloo, Thermoelastic solution for static deformations of functionally graded cylindrical shell bonded to thin piezoelectric layers, *Composite Structures*, Vol. 93, No. 2, pp. 961-972, 2011.
 - [16] A. Alibeigloo, V. Nouri, Static analysis of functionally graded cylindrical shell with piezoelectric layers using differential quadrature method, *Composite Structures*, Vol. 92, No. 8, pp. 1775-1785, 2010.
 - [17] H. M. Wang, Thermally induced piezothermoelastic fields of a smart sandwich cylindrical structure with a functionally graded interlayer, *Thermal Stresses*, Vol. 37, No. 5, pp. 585-603, 2014.
 - [18] F. Vakili-Tahami, R. Hassannejad Qadim, A. Mohammad Alizadeh Fard, M. Raminnia, Optimum design of functionally graded cylindrical shell with piezoelectric layer under moving load, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 291-300, 2015. (in Persian فارسی)
 - [19] M. Saadatfar, M. Aghaei-Khafri, On the behavior of a rotating functionally graded hybrid cylindrical shell with imperfect bonding subjected to hygrothermal condition, *Thermal Stresses*, Vol. 38, No. 8, pp. 854-881, 2015.
 - [20] M. Saadatfar, M. Aghaei-Khafri, On the magneto-thermo-elastic behavior of a FGM cylindrical shell with pyroelectric layers featuring interlaminar bonding imperfections rested in an elastic foundation, *Solid Mechanics*, Vol. 7, No. 3, pp. 344-363, 2015.
 - [21] M. Saadatfar, M. Aghaei-Khafri, Hygrothermal analysis of a rotating smart exponentially graded cylindrical shell with imperfect bonding supported by an elastic foundation, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 43, No. 1, pp. 37-50, 2015.
 - [22] M. Saadatfar, Effect of multiphysics conditions on the behavior of an exponentially graded smart cylindrical shell with imperfect bonding, *Meccanica*, Vol. 50, No. 8, pp. 2135-2152, 2015.
 - [23] C. J. Wilson, D. B. Bogy, An experimental modal analysis technique for miniature structures, *Vibration and Acoustics*, Vol. 118, No. 1, pp. 1-9, 1996.
 - [24] J.F. Qiu, Y. Zhao, Q. Li, Analysis and experimental research on natural frequency of cantilever piezoelectric vibrator Mechatronics, *Proceedings of Fifth Asia International Symposium on Mechatronics*, Guilin, China October 7-10, 2015.
 - [25] B. R. Jooste, H. J. Viljoen, S. L. Rohde, N. F. J. van Rensburg, Experimental and theoretical study of vibrations of a cantilevered beam using a ZnO piezoelectric sensor, *Vacuum Science and Technology A*, Vol. 14, No. 3, pp. 714-719, 1996.
 - [26] G. Piana, E. Lofrano, A. Carpinteri, A. Paolone, G. Ruta, Experimental modal analysis of straight and curved slender beams by piezoelectric transducers, *Meccanica*, Vol. 51, No. 11, pp. 2797-2811, 2016.
 - [27] F. G. Baptista, D. E. Budoya, V. A. D. de Almeida, J. A. C. Ulson, An experimental study on the effect of temperature on piezoelectric sensors for impedance-based structural health monitoring, *Sensors*, Vol. 14, No. 1, pp. 1208-1227, 2014.
 - [28] S. Sobhanirad, A. Afsharfard, Experimental study of galloping-based energy harvesting system using piezoelectric materials, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 207-216, 2017. (in Persian فارسی)
 - [29] A. Presas, D. Valentin, E. Egusquiza, C. Valero, M. Egusquiza, M. Bossio, On the use of PZT patches as exciters in modal analysis: Application to submerged structures, *Proceedings*, Vol. 1, No. 2, pp. 1-7, 2017.
 - [30] M. Saadatfar, *Stress and vibration analysis of a functionally graded cylindrical panel bonded with smart layers*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Khaje Nasir Toosi University of Technology, Tehran, 2015. (in Persian فارسی)
 - [31] PZT-4 material properties produced by Fuji Ceram Corporation, Accessed on 30 October 2017; http://www.fujicera.co.jp/managed/wpcontent/themes/fujicera/digitalbook/en/elements/index_h5.html#2.
 - [32] Plastic metal BL adhesive properties, Accessed on 30 October 2017; <http://www.veicon.com/pages/ca/products/adhesive/2cadhesive/plastic-metal/veicon-ceramic-bl.php>.