

ساخت و کالیبراسیون یک حسگر پیزوالکتریک بی سیم جهت اندازه‌گیری تنش‌های دینامیکی در سازه‌های فولادی

مهدی فهیمی علی‌آباد^۱، مجتبی لزگی نظرگاه^۲، سعید سعیدی امین‌آبادی^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

۲- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

۳- مربی، مهندسی مکترونیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

* سبزوار، صندوق پستی ۳۹۷-۹۶۱۷۹۷۶۸۷، m.lezgy@hsu.ac.ir

چکیده

در این مطالعه، برای اندازه‌گیری ارتعاشات دینامیکی سازه‌های فولادی یک حسگر پیزوالکتریک بی‌سیم ساخته شده است. برخلاف استفاده گسترده از حسگرهای پیزوالکتریک در مهندسی هوافضا، کاربرد این حسگرها در سازه‌های متداول فلزی مورد استفاده در مهندسی عمران بسیار اندک است. هدف از این تحقیق بررسی عملکرد حسگرهای پیزوالکتریک بی‌سیم جهت ارزیابی و پایش سلامت سازه‌ها و قطعات فولادی است. بدین منظور، یک شبکه الکتریکی بی‌سیم برای ثبت ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک طراحی و ساخته شده است. سپس، حسگر پیزوالکتریک و شبکه بی‌سیم همراه آن با استفاده از چسب روی یک پروفیل فولادی از قبل آماده شده، نصب گردیده است. بارهای مکانیکی مختلفی بر روی نمونه فولادی اعمال شده و ولتاژ استخراج شده از حسگر بی‌سیم پیزوالکتریک در کامپیوتر ذخیره می‌شود. رابطه‌ای ریاضی بین دامنه بار اعمال شده و ولتاژ خروجی ارائه شده است. نتایج آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد که حسگر پیزوالکتریک ساخته شده قادر است بزرگا و الگوی بارهای دینامیکی اعمال شده به پروفیل فولادی را با دقت کافی پیش‌بینی نماید.

واژگان کلیدی

حسگر، پیزوالکتریک، شبکه بی‌سیم، سازه فولادی، پایش سلامت سازه

Fabrication and calibration of a wireless piezoelectric sensor for measurement of dynamic stresses in steel structures

M. Fahimi-Aliabad, M. Lezgy-Nazargah, S. Saeidi-Aminabadi

Abstract

In this study, a wireless piezoelectric sensor is fabricated for measurement of dynamic vibrations of steel structure. In contrast to widespread usage of piezoelectric sensors in the aerospace engineering, the application of these sensors in usual civil engineering structures is very rare. This study aims to evaluate the performance of wireless piezoelectric sensors for applications in the structural health monitoring of steel structures. To reach this aim, a wireless electrical network is firstly designed and fabricated for capturing the output voltage of the piezoelectric element. Then, the piezoelectric element and associated wireless network were installed on a prepared steel profile by using epoxy. Different mechanical loads are applied to the steel sample and the voltage induced in the piezoelectric element is saved on a computer. The mathematical relation between the amplitude of applied load and output voltage is determined. The results of experimental tests show that the fabricated piezoelectric sensor can predict the pattern of applied dynamic loads with enough accuracy.

Keywords

Piezoelectric, Sensors, Wireless network, Steel structures, Health monitoring

قطعات مکانیکی و سازه‌های فلزی همواره در معرض نیروهای دینامیکی غیرقابل پیش‌بینی قرار دارند. جهت اطمینان از ایمنی و دوام سازه در طول عمر خدمت آن، لازم است موضوع پایش سلامت سازه‌ها^۱ به جدیت دنبال گردد. با استفاده از پایش سلامت یک سازه که در واقع همان اندازه‌گیری دائم پاسخ سازه در طول زمان و تحت شرایط مختلف بارگذاری می‌باشد، می‌توان اطلاعات قابل اعتمادی از وضعیت و عملکرد آن سازه بدست آورد. کنترل پایش سلامت سازه از آن جهت مهم است که با استفاده از داده‌های لحظه به لحظه از پاسخ سازه می‌توان از آسیب‌های احتمالی آن آگاه شد و از انتشار و گسترش خرابی در سازه جلوگیری نمود. علاوه بر این با کمک سیستم‌های پایش سلامت سازه می‌توان امکان تصمیم‌گیری در مورد اینکه سازه چه زمانی نیاز به تعمیر و بازسازی جزئی و چه زمانی نیاز به تخریب و بازسازی کلی دارد را فراهم نمود. تعیین عمر مفید باقی مانده یک سازه از جمله دیگر مزایای استفاده از سیستم‌های پایش سلامت سازه‌ها می‌باشند. حسگرها یکی از اجزای مهم یک سیستم پایش سلامت سازه می‌باشند که وظیفه‌ی جمع‌آوری و انتقال اطلاعات از سازه به پردازشگر مرکزی را برعهده دارند. اغلب جهت اندازه‌گیری ارتعاشات سازه از کرنش‌سنج‌های الکتریکی استفاده می‌شود. این کرنش‌سنج‌ها از طریق مقاومت الکتریکی قادر به پیش‌بینی تغییر شکل‌های سازه هستند. علی‌رغم مزیت‌های این نوع کرنش‌سنج‌ها، کرنش‌سنج الکتریکی جهت پیش‌بینی بارهای دینامیکی سازه خیلی مناسب نمی‌باشد و دقت آنها بیشتر در محدوده‌ی بارهای استاتیکی است. بعد از کشف ماده‌ای معدنی کریستالی در سال ۱۸۸۰ میلادی، که امروزه به نام پیزوالکتریک^۲ نامیده می‌شود، محققین متوجه شدند که در صورت قرار گرفتن این ماده معدنی در معرض بارهای مکانیکی، کریستال پلاریزه شده و کشش و فشار باعث ایجاد ولتاژ متناسب با نیرو اعمالی می‌شود. در واقع این مواد قابلیت تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی و بالعکس را دارند [۱]. این قابلیت باعث استفاده گسترده از این مواد بعنوان حسگر^۳ و عملگر^۴ در سیستم‌های کنترل فعال و پروژه‌های پایش سلامت سازه شده است.

Devasia و همکارانش [۲] با چندین معیار گوناگون به بهینه کردن طول و مکان عملگرهای پیزوالکتریک روی تیرهای یکنواخت پرداخت کردند. آن‌ها معیارهای مختلف خود را برای تیر با تکیه‌گاه ساده همراه با عملگرهای پیزوالکتریک اجرا نموده و به مزیت معیار تابع خطی درجه دو نسبت به معیار کنترل‌پذیری

رسیدند. Cheng و همکارانش [۳] ورق چندلایه پیزوالکتریک که خواص آن در راستای ضخامت ناهمگن بوده، ولی نسبت به صفحه میانی دارای تقارن می‌باشد را مورد ارزیابی قرار دادند. این محققین معادلات بر رفتار الکترومکانیکی ورق چندلایه پیزوالکتریک را با استفاده از تئوری پیزوالاستیسیته بدست آورده و یک حل تحلیلی برای آن ارائه نمودند. Oh و همکارانش [۴] تحلیل ارتعاشی و پس‌کمانش ورق‌های کامپوزیتی پیزوالکتریک تحت بارهای حرارتی را بررسی کردند. آن‌ها از تئوری لایه‌گون^۵ برای مدلسازی میدان‌های جابجایی ورق استفاده نمودند. این محققین چیدمان و ویژگی‌های هندسی مختلفی برای لایه‌های پیزوالکتریک در نظر گرفته و حالت بهینه که موجب کاهش پس‌کمانش تحت بارهای حرارتی می‌شود را پیدا نمودند.

Sung [۵] کنترل تیر با تکیه‌گاه ساده تحت جرم متحرک را مورد بررسی قرار داد. او معادلات دینامیکی مبتنی بر تئوری تیر اوایلر-برنولی^۶ را با روش مدهای فرضی به فرم فضای حالت^۷ درآورده و با بکارگیری کنترل‌کننده‌های چند ورودی-چند خروجی انحنای تیر در اثر جرم متحرک را کاهش داد. وی برای تعیین مکان بهینه عملگرهای پیزوالکتریک از تابع رگولاتور^۸ خطی مرتبه دو^۹ استفاده کرده و مکان دو عملگر وصل شده به پایین تیر را تعیین کرده است. Gao و Shen [۶] به بررسی کنترل ارتعاشات گذرای ورق کامپوزیتی با محرک پیزوالکتریک پرداختند. آن‌ها در این تحقیق از تئوری تغییرشکل‌های برشی مرتبه اول^{۱۰} استفاده کردند و به بررسی تأثیر تعداد و محل محرک‌های پیزوالکتریک در ارتعاشات گذرای ورق کامپوزیتی پرداختند. Liew و همکارانش [۷] به تحلیل دینامیکی و کنترل فعال ورق کامپوزیتی با عملگر و حسگر پیزوالکتریک پرداختند. آن‌ها در این تحقیق از تئوری تغییرشکل‌های برشی مرتبه اول بمنظور استخراج معادلات حاکم استفاده کردند و برای تحلیل، روش بدون مش‌بندی گالرکین^{۱۱} را بکار گرفتند. این محققین همچنین بر روی تأثیر محل قطعات پیزوالکتریک روی پاسخ دینامیکی سیستم تحقیقاتی انجام دادند و بهترین محل‌ها را با توجه به کنترل فعال ورق ارائه دادند.

Shu [۸] ارتعاشات آزاد ورق کامپوزیتی با لایه پیزوالکتریک را بررسی کرده و برای به دست آوردن میدان جابه‌جایی و پتانسیل الکتریکی از حل خصوصی معادلات تعادل سه‌بعدی الاستیسیته و معادله شارژ الکتریکی استفاده نمود. او در تحقیق خود به یافتن فرکانس‌های طبیعی ورق پرداخت و برای بررسی صحت پاسخ‌ها، آن‌ها را با نتایج حاصل از حل دقیق معادلات سه‌بعدی الاستیسیته مقایسه نمود. Jin و همکارانش [۹]



یک تکنیک بهینه‌سازی کنترل فازی بر مبنای الگوریتم ژنتیک را برای کنترل ارتعاش بهینه ساختارهای پوسته‌ای استوانه‌ای با عملگرها و حسگرهای پیزوالکتریک پیشنهاد کردند. متغیرهای هندسی قطعات پیزوالکتریک شامل محل جاگیری و اندازه عملگرها و حسگرهای پیزوالکتریک با استفاده از نظریه مجموعه‌ها^{۱۲} پردازش شد. همچنین آن‌ها توزیع‌های بهینه قطعات پیزوالکتریک براساس مودهای ارتعاشی مختلف را بررسی نمودند. Zhang و همکارانش [۱۰] ارتعاشات سه بعدی ورق کامپوزیت با لایه پیزوالکتریک را بررسی نمودند. آن‌ها در این تحلیل از روش تربیع دیفرانسیلی^{۱۳} برای حل معادلات سه بعدی پیزوالاستیسیته استفاده کردند. Li و همکارانش [۱۱] به بررسی ارتعاشات غیرخطی تیرهای هدفمند^{۱۴} با لایه‌های پیزوالکتریک تحت تأثیر میدان حرارتی و نیز اثرات لایه‌های پیزوالکتریک، و خواص تابعی متغیر بر روی فرکانس سیستم پرداختند.

Tavakolpour و همکارانش [۱۲] یک کنترل فعال ارتعاش با ترکیب عملگرهای پیزوالکتریک فعال و کنترل خودآموز برای ساختار ورق انعطاف‌پذیر ارائه کردند. آن‌ها ورق انعطاف‌پذیر را با استفاده از روش تفاضل محدود مدل‌سازی کرده و درستی آن را با مقایسه فرکانس‌های طبیعی به دست آمده با استفاده از مدل و نتایج تحقیقات قبلی ارزیابی کردند. Loghmani و همکارانش [۱۳] کنترل فعال ارتعاشات یک پوسته استوانه‌ای را با استفاده از المان‌های پیزوالکتریک به صورت تئوری و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. این محققین ابتدا مدل دینامیکی یک استوانه با تکیه‌گاه‌های ساده را با استفاده از اصل همیلتون^{۱۵} استخراج نمودند. سپس معادلات دیفرانسیل حاکم بر رفتار پوسته استوانه‌ای به روش رایلی-ریتز^{۱۶} گسسته‌سازی شده‌اند. لقمانی و همکاران فرکانس‌های طبیعی^{۱۷} سیستم را با مدل‌سازی در نرم‌افزار ANSYS و همچنین با آنالیز مودال^{۱۸} تجربی محاسبه نمودند. آنان در نهایت جهت کاهش ارتعاشات سیستم، یک کنترل‌کننده پیشخور تطبیقی^{۱۹} بر روی کامپیوتر طراحی کردند. Lezgy-Nazargah و همکارانش [۱۴] یک مدل اجزا محدود با درجات آزادی کم برای تحلیل استاتیکی و دینامیکی تیرهای پیزوالکتریک غیرهمگن ارائه نمودند. Lezgy-Nazargah [۱۵] همچنین یک روش حل تحلیلی برای مسأله خمش استوانه‌ای ورق‌های چندلایه ساخته شده از مواد پیزوالکتریک غیرهمگن ارائه نمود. رفتار دینامیکی تیرهای ساندویچی شامل لایه‌های پیزوالکتریک با مود عملکرد برشی نیز در مرجع [۱۶] توسط Lezgy-Nazargah بررسی شده است.

Saviz و Roomi [۱۷] کنترل ارتعاشات پانل استوانه‌ای مرکب چند لایه تحت بار دینامیکی با بکارگیری عملگر پیزوالکتریک بهینه را بررسی نمودند. در این مرجع نویسندگان ابتدا معادلات دینامیکی حاکم را براساس فرضیات تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول^{۲۰} و مدل تک لایه‌ی معادل با تغییر شکل‌های برشی متفاوت برای پوسته و وصله‌ی پیزو استخراج نموده و سپس به منظور حل معادلات دینامیک سازه، از روش المان محدود استفاده کردند. Saviz و Roomi برای یافتن محل و اندازه بهینه برای عملگر پیزوالکتریک از معیار حداکثر کنترل‌پذیری استفاده نمودند. طبق قانون کنترلی مورد استفاده، ولتاژ اعمال شده به وصله پیزوالکتریک متناسب با برآیند مولفه‌های سرعت در نقطه محل نصب حسگر می‌باشد. Ascione و همکارانش [۱۸] با استفاده از یک تئوری زیگزاگ اصلاح شده^{۲۱}، رفتار استاتیکی غیرخطی تیرهای مرکب شامل قطعات عملگر پیزوالکتریک را بررسی نمودند. تکنیک‌های مختلف استفاده از مواد پیزوالکتریک جهت پایش سلامت سازه‌ها به طور کامل در مرجع [۱۹] مرور شده‌اند.

با وجود مزیت‌های فراوان حسگرهای پیزوالکتریک، مطالعات تجربی اندکی جهت استفاده عملی از این حسگرها و کالیبراسیون آن‌ها جهت استفاده در سازه‌ها و قطعات فلزی انجام شده است. هدف از تحقیق پیش‌رو، بررسی امکان استفاده از حسگرهای پیزوالکتریک بی‌سیم جهت اندازه‌گیری ارتعاشات دینامیکی سازه‌ها و قطعات فولادی و کالیبراسیون آن‌ها می‌باشد. در واقع این تحقیق پاسخی به این پرسش است که آیا با توجه به ضعف کرنش‌سنج‌های الکتریکی در اندازه‌گیری ارتعاشات دینامیکی سازه‌ها، آیا حسگر پیزوالکتریک بی‌سیم جایگزینی مناسبی برای آنها می‌باشد یا خیر. روش تحقیق به صورت آزمایشگاهی است، بدین منظور ابتدا نمونه‌ای از یک پروفیل فولادی تهیه و حسگر پیزوالکتریک بر روی آن نصب گردید. سپس پروفیل فولادی در دستگاه سرو-هیدرولیک^{۲۲} (دستگاه بارگذاری‌های دینامیکی و استاتیکی)، تحت انواع بارهای دینامیکی (سینوسی، مثلثی، مربعی و ...) قرار گرفت. رفتار مکانیکی متناسب با هر بار اعمال شده به سازه از طریق حسگر پیزوالکتریک به صورت سیگنال‌های الکتریکی و از طریق یک مدار الکتریکی بی‌سیم ساخته شده به یک کامپیوتر منتقل و ذخیره گردید. با مقایسه میان سیگنال ورودی به نمونه فولادی و نیز سیگنال خروجی حسگر، تلاش شده است تا رابطه‌ای ریاضی میان بار مکانیکی و ولتاژ خروجی ارائه شود.

۲- جزئیات طراحی و ساخت حسگر پیزوالکتریک

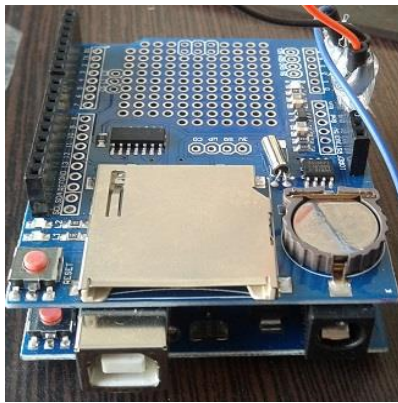
بی‌سیم

جهت اندازه‌گیری ارتعاشات مکانیکی از یک المان سرامیکی دایره‌ای پیزوالکتریک (PZT) استفاده شده است. سطح المان دایره‌ای پیزوالکتریک با پوششی از نقره به عنوان الکترود پوشانده شده است. قطر و ضخامت ورق‌های پیزوالکتریک به ترتیب ۲۵ میلی‌متر و ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد. از آنجایی که در این پژوهش از یک حسگر پیزوالکتریک دایره‌ای که بر روی وجه جانبی پروفیل فولادی نصب شده است، استفاده شده است لذا با اعمال نیروی عمودی به پروفیل فولادی توسط دستگاه، یک تنش طولی در پروفیل بوجود آمده که سبب یک تغییر شکل در صفحه عمود بر جهت قطبش^{۲۲} حسگر پیزو می‌گردد و در نتیجه جهت قطبش عرضی می‌باشد.

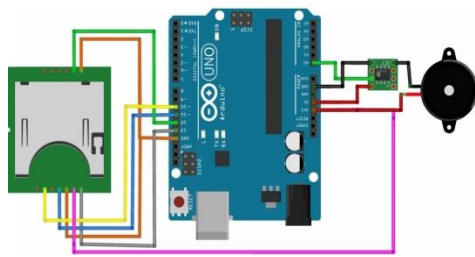
برای ثبت ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک، یک مدار الکتریکی طراحی شده است. این مدار الکتریکی می‌تواند سیگنال‌های خروجی حسگر پیزوالکتریک را اندازه‌گیری و بدون استفاده از سیم جهت ثبت، به یک کامپیوتر بفرستد و یا در حافظه تعبیه شده ثبت کند. دستگاه ثبت ولتاژ به همراه جزئیات مدار الکتریکی آن به ترتیب در شکل (۱-الف و ب) نشان داده شده‌اند. همانطور که در شکل (۱-الف) دیده می‌شود مدار از دو قسمت اصلی تشکیل شده که قسمت زیرین برد اصلی آردوینو و قسمت بالایی، شیلد نصب شده بر روی آن می‌باشد که توانایی ثبت داده‌ها در حافظه و ارسال همزمان داده‌ها به رایانه را به وسیله ماژول وای‌فای^{۲۳} می‌دهد. تأمین برق مدار نیز از طریق اتصال برد به وسیله درگاه USB-B و با کابل به درگاه USB رایانه انجام می‌گیرد. همانطور که در شکل (۱-ب) مشاهده می‌گردد سیگنال خروجی از سنسور به وسیله یک برد تقویت‌کننده پیش از پردازش تقویت می‌شود. پردازش داده‌ها در رایانه نیز می‌تواند به وسیله نرم‌افزار مخصوص برد آردوینو^{۲۴} انجام پذیرد.

۳- روش انجام آزمایش

پروفیل فولادی تهیه شده برای آزمایش اندازه‌گیری ارتعاشات دینامیکی یک قوطی فلزی به ابعاد $60 \times 60 \times 4$ میلیمتر می‌باشد که مقطع آن از هر طرف توسط تسمه جوش شده است. پروفیل فولادی مورد آزمایش در شکل (۲) نشان داده شده است. پیزوالکتریک توسط چسب مخصوص فلز به سطح سازه متصل می‌شود. حسگر بر روی وجه جانبی پروفیل فولادی و در وسط آن نصب شده است چرا که توزیع تنش در وسط پروفیل



(الف)



(ب)

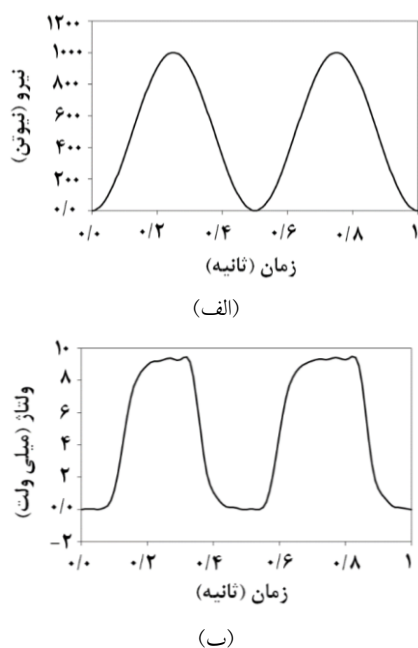
شکل ۱- (الف) مدار الکتریکی ساخته شده جهت ثبت ولتاژ حسگر پیزوالکتریک، (ب) نمایش شماتیک جزئیات مدار الکتریکی اندازه‌گیری و ثبت ولتاژ

یکنواخت‌تر بوده و همچنین به دور از نواحی خط جوش می‌باشد که حاوی مقادیری تنش پسماند است. در صورت اعمال تنش فشاری به پروفیل فولادی توسط دستگاه، کرنش محوری در پروفیل فولادی ایجاد شده و این کرنش می‌تواند سبب قطبش عرضی در حسگر پیزوالکتریک گردد.

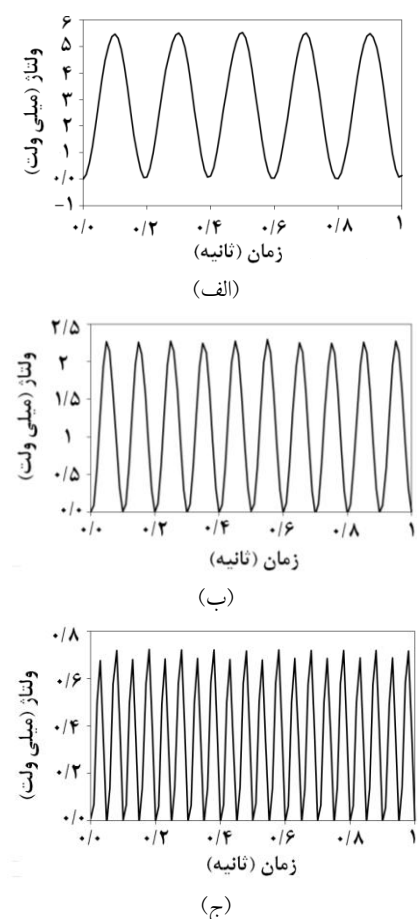


شکل ۲- پروفیل فولادی و محل اتصال حسگر پیزوالکتریک

در این تحقیق برای اعمال بارهای دینامیکی به سازه از دستگاه سرو-هیدرولیک استفاده شده است. بارهای دینامیکی اعمال شده توسط این دستگاه شامل بارهای هارمونیک، تصادفی، مثالی و مربعی می‌باشد. پروفیل فولادی داخل دستگاه

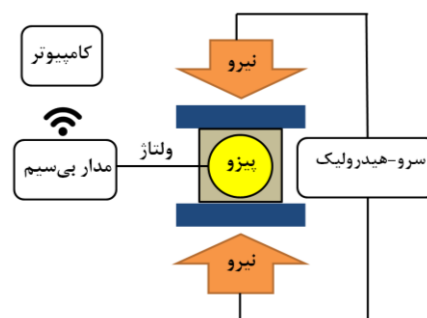


شکل ۳- نمایش شماتیک نحوه انجام آزمایش
شکل ۴- نمودارهای (الف) نیرو- زمان و (ب) ولتاژ- زمان بار سینوسی با فرکانس ۲ هرتز



شکل ۵- نمودارهای ولتاژ- زمان حسگر تحت بار سینوسی با فرکانس‌های مختلف: (الف) ۵ هرتز، (ب) ۱۰ هرتز و (ج) ۲۰ هرتز

سرو-هیدرولیک قرار می‌گیرد. در اثر اعمال بار دینامیکی در پروفیل فولادی، حسگر پیزوالکتریک دچار کرنش شده و متناسب با آن ولتاژی ایجاد می‌نماید، که این ولتاژ خروجی از طریق مدار بی‌سیم به کامپیوتر منتقل شده و ذخیره می‌گردد. جزئیات و نحوه انجام آزمایش به طور شماتیک در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- نمایش شماتیک نحوه انجام آزمایش

۴- نتایج تست‌ها و بحث

۴-۱- پاسخ حسگر به بارگذاری هارمونیک

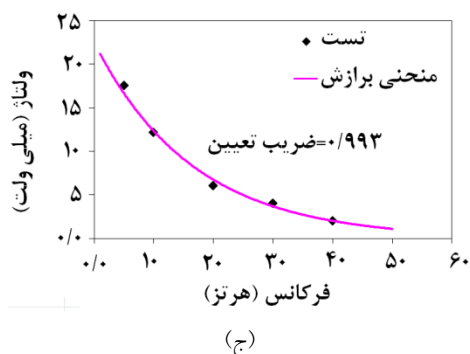
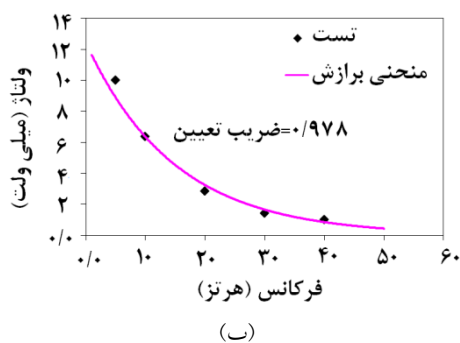
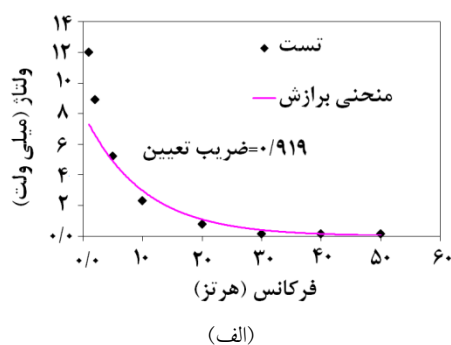
در این قسمت پاسخ حسگر پیزوالکتریک تحت بارهای سینوسی با مقادیر مختلف دامنه و فرکانس مورد مطالعه قرار گرفته است. ابتدا، یک نیروی فشاری سینوسی با بزرگی ۱۰۰۰ نیوتن و فرکانس ۲ هرتز به سازه وارد شده است. در شکل (۴) نمودار نیرو- زمان و ولتاژ- زمان نمایش داده شده است.

همچنین در ادامه نتایج، دامنه بار سینوسی اعمال شده برابر با مقدار ثابت ۱۰۰۰ نیوتن نگه داشته شده و هم‌زمان فرکانس‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ هرتز برای آن در نظر گرفته شد. خروجی حسگر در شکل (۵-الف، ب و ج) نشان داده شده است.

با مشاهده شکل‌های (۴) و (۵) ملاحظه می‌گردد که حسگر پیزوالکتریک می‌تواند الگوی بارهای سینوسی وارده بر قطعه فلزی را به خوبی پیش‌بینی کند. با دقت در نمودارهای نمایش داده شده همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس بار ورودی، دامنه ولتاژ خروجی حسگر کاهش می‌یابد. قابل ذکر است که نویزها و اغتشاشات خروجی حسگر با استفاده از فیلتر میانگین متحرک ۲۵ موجود در نرم‌افزار MATLAB حذف شده‌اند.

برای اینکه بین دامنه نیروی ورودی و ولتاژ خروجی یک رابطه پیدا شود، یک بار سینوسی با فرکانس ثابت ۵ هرتز و دامنه

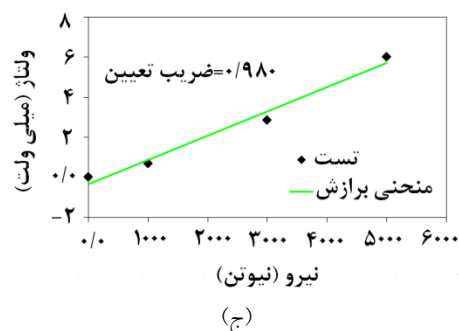
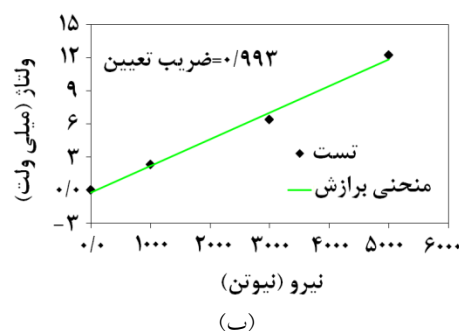
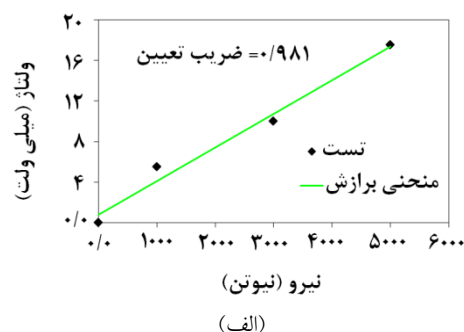
مقدار ثابت ۱۰۰۰ نیوتن لحاظ شده و فرکانس آن در محدوده ۱ تا ۵۰ هرتز متغیر در نظر گرفته شد. تغییرات دامنه ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک در مقابل فرکانس در شکل (۷-الف) نشان داده شده است. این آزمایش برای بار سینوسی با دامنه ثابت ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ نیوتن و فرکانس متغیر ۱ تا ۵۰ هرتز نیز مجدداً تکرار شد و نتایج آن در شکل (۷-ب و ج) نشان داده شده است.



شکل ۷- تغییرات دامنه ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک در مقابل فرکانس: (الف) دامنه نیروی ورودی ۱۰۰۰ نیوتن، (ب) دامنه نیروی ورودی ۳۰۰۰ نیوتن و (ج) دامنه نیروی ورودی ۵۰۰۰ نیوتن

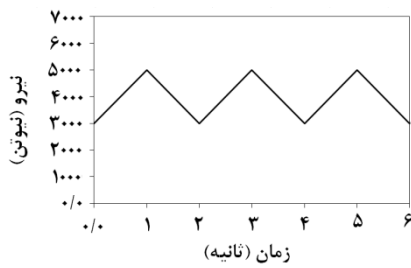
با توجه به نمودارهای ۷-الف تا ۷-ج مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس بار ورودی، دامنه ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک به صورت نمایی کاهش می‌یابد. پس از انجام

متغیر بین ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ نیوتن به حسگر اعمال گردید. نتایج حاصل در شکل (۶-الف) نشان داده شده است. این آزمایش برای بارهای سینوسی با فرکانس‌های ثابت ۱۰ و ۲۰ هرتز و دامنه متغیر مجدداً تکرار گردید. نتایج بدست آمده در شکل (۶-ب و ج) نشان داده شده‌اند. نمودارهای شکل (۶-الف، ب و ج) نشان می‌دهند که صرف‌نظر از مقدار فرکانس بار اعمالی، رابطه‌ای خطی بین دامنه نیروی ورودی و ولتاژ خروجی در فرکانس‌های مختلف وجود دارد.

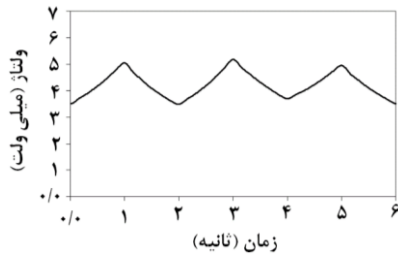


شکل ۶- تغییرات دامنه نیروی ورودی در برابر دامنه ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک برای بارهای با فرکانس مختلف: (الف) فرکانس ۵ هرتز، (ب) فرکانس ۱۰ هرتز و (ج) فرکانس ۲۰ هرتز

رابطه‌ای بین دامنه ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک و فرکانس نیروی وارد شده نیز بررسی شده است. برای رسیدن به این هدف، دامنه بار سینوسی اعمال شده به قطعه فولادی برابر



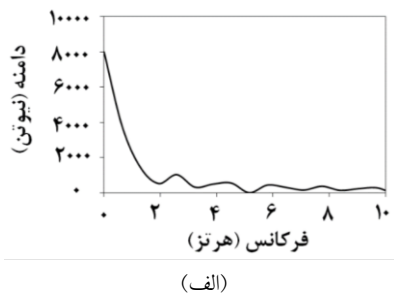
(الف)



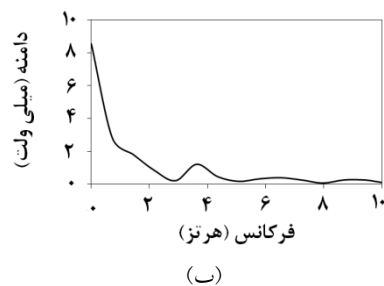
(ب)

شکل ۸- پاسخ حسگر به بار مثلی تناوبی با دامنه‌ی تغییرات ۲۰۰۰ نیوتن و زمان تناوب ۲ ثانیه: (الف) نیرو- زمان و (ب) ولتاژ- زمان

شکل (۹) نتایج تبدیل فوری گسسته نمودارهای زمانی نشان داده شده در شکل (۸) را نشان می‌دهد. این نمودارها امکان مقایسه بهتر محتوای فرکانسی سیگنال ورودی و خروجی را میسر می‌سازد. چنانچه مشاهده می‌شود، تطابق مناسبی میان ورودی تعریف شده و خروجی حسگر وجود دارد.



(الف)



(ب)

شکل ۹- تبدیل فوری پاسخ حسگر به بار مثلی تناوبی با دامنه‌ی تغییرات ۲۰۰۰ نیوتن و زمان تناوب ۲ ثانیه: (الف) نیرو-فرکانس، (ب) ولتاژ-فرکانس

برازش منحنی بر روی داده‌های آزمایشگاهی نمایش داده شده در شکل‌های (۶-الف، ب و ج) و (۷-الف، ب و ج)، رابطه زیر بین ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک و نیروی وارده نتیجه‌گیری می‌شود:

$$\Delta V = 0.0078e^{H(\omega)}\Delta F \quad (1)$$

که در آن:

$$H(\omega) = -0.000545\omega^3 + 0.0188\omega^2 - 0.2516\omega \quad (2)$$

در رابطه فوق ΔF دامنه نیروی ورودی برحسب نیوتن و ΔV دامنه ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک برحسب میلی‌ولت است. همچنین نیز ω فرکانس بار اعمال شده و ولتاژ خروجی دستگاه اندازه‌گیری ارتعاشات دینامیکی بر حسب هرتز می‌باشد. این رابطه بر اساس برازش داده‌های آزمایشگاهی و استفاده از تابع نمایی بدست آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار ضریب تعیین^{۲۶} (رگرسیون) دقت خوبی را دارا می‌باشد. با توجه به اینکه هر بار مکانیکی دلخواه را می‌توان با استفاده از سری فوری^{۲۷} برحسب مجموع تعدادی بار هارمونیک با فرکانس‌های متفاوت بیان نمود، از رابطه‌ی (۱) نیز می‌توان جهت پیش‌بینی ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک تحت هر نوع بارگذاری استفاده نمود.

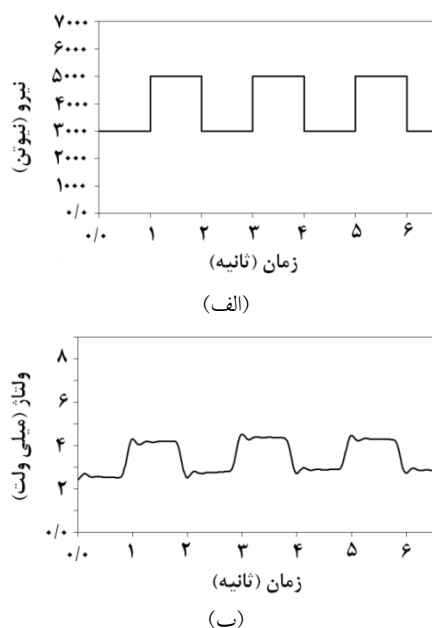
۴-۲- پاسخ حسگر پیزوالکتریک به بارگذاری مثلی متناوب

یک بار تناوبی مثلی با دامنه‌ی تغییرات ۲۰۰۰ نیوتن و زمان تناوب ۲ ثانیه از طریق دستگاه سرو-هیدرولیک به قطعه فولادی اعمال شد (شکل ۸-الف). ولتاژ خروجی اندازه‌گیری شده در شکل ۸-ب) نشان داده شده است. با دقت در نمودارهای نشان داده شده در شکل (۸) مشاهده می‌شود که شکل ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک مشابه شکل بار دینامیکی اعمال شده است. به منظور بررسی دقیقتر محتوای فرکانسی و مشاهده مقدار خطا موجود در سیگنال خروجی حسگر، از تبدیل فوری گسسته^{۲۷} استفاده شده است. مطابق تبدیل فوری گسسته، داده‌های گسسته خروجی حسگر $V(n)$ قابل بیان به صورت زیر در فضای فرکانسی می‌باشند:

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} V(n)e^{-jn\omega} \quad (3)$$

۳-۴- پاسخ حسگر پیزوالکتریک به بارگذاری مستطیلی متناوب

در این آزمایش، ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک نسبت به بارگذاری مستطیلی متناوب بررسی شده است. به همین منظور یک نیروی مستطیلی با دامنه‌ی تغییرات ۲۰۰۰ نیوتن و زمان تناوب ۲ ثانیه از طریق دستگاه سرو-هیدرولیک به سازه اعمال گردید. خروجی حسگر در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



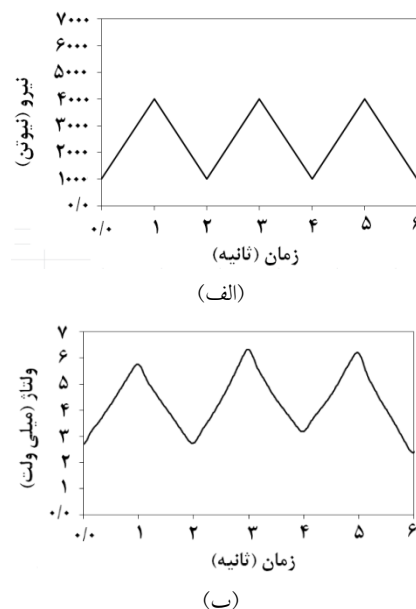
شکل ۱۲- پاسخ حسگر به بار مستطیلی تناوبی با دامنه‌ی تغییرات ۲۰۰۰ نیوتن و زمان تناوب ۲ ثانیه: (الف) نیرو- زمان و (ب) ولتاژ- زمان

به منظور مقایسه بهتر محتوای فرکانسی سیگنال ورودی و خروجی، نتایج تبدیل فوریه نمودارهای وابسته به زمان فوق در شکل (۱۳) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که محتوای فرکانسی و دامنه‌ی سیگنال ورودی حسگر در حالت کلی تطابق مناسبی با مقادیر نظیر خروجی حسگر دارند.

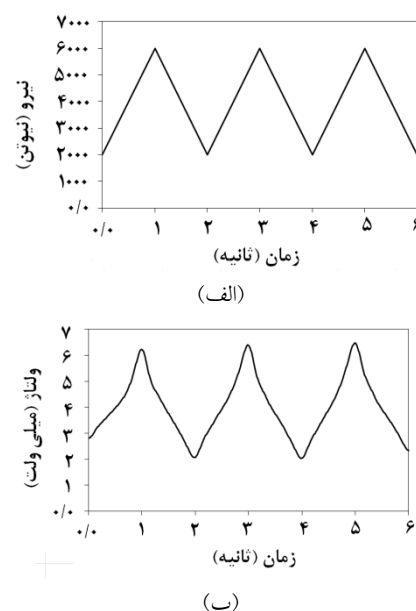
در آزمایش فوق، دامنه‌ی تغییرات نیروی وارده برابر ۲۰۰۰ نیوتن می‌باشد. این آزمایش برای نیروی متناوب مستطیلی با دامنه‌ی تغییرات ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ نیوتن نیز تکرار و پاسخ حسگر پیزوالکتریک بررسی گردید. نتایج به ترتیب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده‌اند.

با دقت در نمودارهای (۱۳) تا (۱۵) در می‌یابیم که دستگاه اندازه‌گیری ارتعاشات دینامیکی، توانایی خوبی در پیش‌بینی شکل بار مستطیلی تناوبی وارده به سازه را دارد. همچنین اختلاف

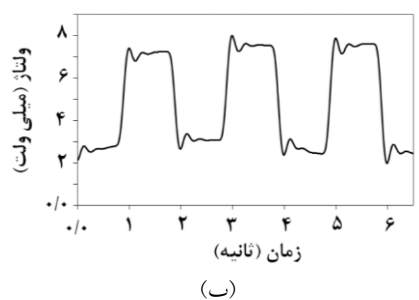
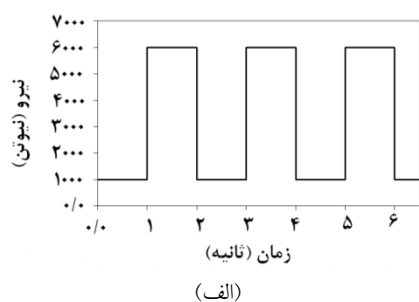
پاسخ حسگر پیزوالکتریک به بارهای مثلثی با دامنه‌ی تغییرات ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ نیوتن و زمان تناوب ۲ ثانیه بررسی و نتایج در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد شکل ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک نیز تقریباً مشابه همان الگوی نیروی ورودی می‌باشد.



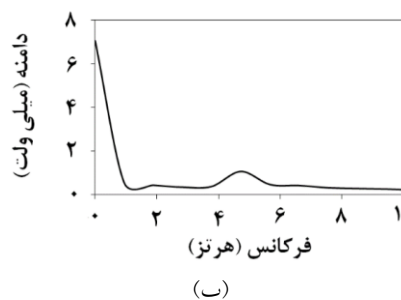
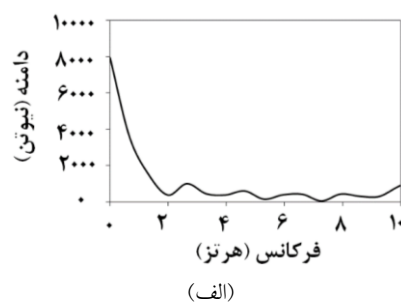
شکل ۱۰- پاسخ حسگر به بار مثلثی تناوبی با دامنه‌ی تغییرات ۳۰۰۰ نیوتن و زمان تناوب ۲ ثانیه: (الف) نیرو- زمان، (ب) ولتاژ- زمان



شکل ۱۱- پاسخ حسگر به بار مثلثی تناوبی با دامنه‌ی تغییرات ۴۰۰۰ نیوتن و زمان تناوب ۲ ثانیه: (الف) نیرو- زمان و (ب) ولتاژ- زمان



شکل ۱۵- پاسخ حسگر به بار مستطیلی تناوبی با دامنه‌ی تغییرات ۵۰۰۰ نیوتن و زمان تناوب ۲ ثانیه: (الف) نیرو-زمان و (ب) ولتاژ-زمان

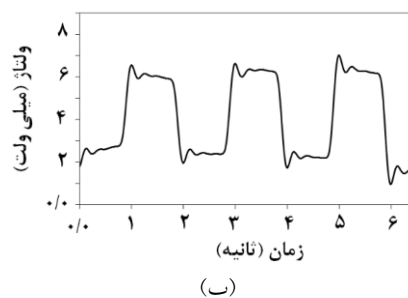
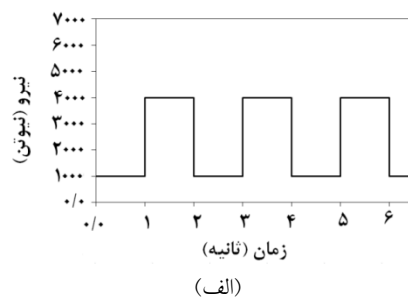


شکل ۱۳- تبدیل فوریه پاسخ حسگر به بار مستطیلی تناوبی با دامنه‌ی تغییرات ۲۰۰۰ نیوتن و زمان تناوب ۲ ثانیه: (الف) نیرو-فرکانس و (ب) ولتاژ-فرکانس

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک حسگر بی‌سیم پیزوالکتریک و مدار الکتریکی جهت اندازه‌گیری ارتعاشات دینامیکی سازه‌های فولادی ساخته شد. یک پروفیل فولادی متشکل از یک قوطی فلزی به ابعاد $60 \times 60 \times 4$ میلیمتر که توسط دو تسمه که در دو انتهای قوطی جوش شده بود، تهیه گردید. سپس حسگر پیزوالکتریک توسط چسب فلز به وسط سازه متصل شد. عملکرد و کارایی حسگر پیزوالکتریک با آزمون‌های آزمایشگاهی بررسی گردید. به‌همین منظور بارهای دینامیکی با الگوی‌های مختلف هارمونیک، مثلثی و مستطیلی تناوبی از طریق یک دستگاه سرو-هیدرولیک به قطعه اعمال و ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک از طریق مدار الکتریکی بی‌سیم محاسبه و سپس به کامپیوتر انتقال داده شده و ذخیره گردید.

نتایج بدست آمده نشان داد که حسگر پیزوالکتریک بی‌سیم بسیار حساس بوده و قادر به تولید سیگنال‌های (ولتاژ خروجی) قوی و دقیق در محدوده وسیعی از فرکانس‌ها می‌باشد. بررسی نتایج نشان داد که در صورت ثابت بودن فرکانس بار اعمال شده به حسگر بی‌سیم پیزوالکتریک، رابطه خطی بین بزرگای ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک و بزرگای بار مکانیکی اعمال شده به آن وجود دارد. این موضوع برای بارهای مکانیکی که فرکانس آنها در محدوده بین ۲ تا ۴۰ هرتز قرار دارند، بررسی و تایید گردید. همچنین بررسی نتایج، نشان داد که در صورت ثابت



شکل ۱۴- پاسخ حسگر به بار مستطیلی تناوبی با دامنه‌ی تغییرات ۳۰۰۰ نیوتن و زمان تناوب ۲ ثانیه: (الف) نیرو-زمان و (ب) ولتاژ-زمان

جزئی بین الگوی بار وارده و الگوی پیش‌بینی شده توسط ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک را می‌توان به عدم توانایی دستگاه سرو-هیدرولیک در اعمال دقیق بار مستطیلی به سازه و نیز اختلاف فاز ذاتی المان‌های حسگر پیزوالکتریک در تولید سیگنال خروجی (به‌ویژه در زمان تناوب‌های پایین) نسبت داد.

- [8] Shu, X. (2005), "Free vibration of laminated piezoelectric composite plates based on an accurate theory", *Composite structures*, Vol. 67, pp. 375-382.
- [9] Jin, Z., Yang, Y. and Soh, C.K. (2005), "Application of fuzzy GA for optimal vibration control of smart cylindrical shells", *Smart Materials and Structures*, Vol. 14, pp. 1250.
- [10] Zhang, Z., Feng, C. and Liew, K.M. (2006), "Three-dimensional vibration analysis of multilayered piezoelectric composite plates", *International Journal of Engineering Science*, Vol. 44, pp. 397-408.
- [11] Li, S.R., Su, H. and Cheng, C.J. (2009), "Free vibration of functionally graded material beams with surface-bonded piezoelectric layers in thermal environment", *Applied Mathematics and Mechanics*, Vol. 30, pp. 969-982.
- [12] Tavakolpour, A.R., Mailah, M., Darus, I.Z.M. and Tokhi, O. (2010), "Self-learning active vibration control of a flexible plate structure with piezoelectric actuator", *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 1, pp. 516-532.
- [13] Loghmani, A., Danesh, M., Keshmiri, M. and Savadi Mofrad, M.M. (2014), "Adaptive Feedforward Controller for Active Vibration Control of a Cylindrical Shell Using Piezoelectric Patches", 4th International Conference on Acoustics and Vibration, December, Tehran, Iran.
- [14] Lezgy-Nazargah, M. Vidal, P. and Polit, O. (2013), "An efficient finite element model for static and dynamic analyses of functionally graded piezoelectric beams", *Composite Structures*, Vol. 104, pp. 71-84.
- [15] Lezgy-Nazargah, M. (2015), "A three-dimensional exact state-space solution for cylindrical bending of continuously non-homogenous piezoelectric laminated plates with arbitrary gradient composition", *Archives of Mechanics*, Vol. 67, pp. 25-51.
- [16] Lezgy-Nazargah, M. (2016), "Efficient coupled refined finite element for dynamic analysis of sandwich beams containing embedded shear-mode piezoelectric layers", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 23, pp. 337-352.
- [17] Saviz, M. and Roomi, V. (2018), "Vibration control of laminated cylindrical panel with optimal piezoelectric patch", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, pp. 100-111.
- [18] Ascione, A., Gherlone, M. and Orifici, A.C. (2022), "Nonlinear static analysis of composite beams with piezoelectric actuator patches using the Refined Zigzag Theory", *Composite Structures*, Vol. 282, pp. 115018.
- [19] Jiao, P., Egbe, L.J.I., Xie, Y., Nazar, A.M. and Alavi, A.H. (2020) "Piezoelectric Sensing Techniques in Structural Health Monitoring: A State-of-the-Art Review", *Sensors*, Vol. 20, pp. 3730.

¹⁶ Rayleigh-Ritz

¹⁷ Natural frequencies

¹⁸ Modal analysis

¹⁹ Adaptive feedforward controller

²⁰ Refined zig-zag theory

²¹ Servo-hydraulic

²² Polarization

²³ Wi-Fi

²⁴ Arduino board

²⁵ Moving average filter

²⁶ Coefficient of determination

²⁷ Fourier series

بودن دامنه بار اعمال شده به حسگر پیزوالکتریک، دامنه ولتاژ خروجی با افزایش فرکانس ورودی به صورت نمایی کاهش می‌یابد. با اندازه‌گیری ارتعاشات دینامیکی توسط دستگاه ساخته شده مشخص شد، رابطه ساده $\Delta V = 0.0078e^{H(\omega)}\Delta F$ بین ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک و نیروی اعمالی برقرار است که $\Delta F, H(\omega) = -0.000545\omega^3 + 0.0188\omega^2 - 0.2516\omega$ دامنه نیروی ورودی برحسب نیوتن، ΔV دامنه ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک برحسب میلی‌ولت، ω فرکانس نیروی اعمال شده و ولتاژ خروجی برحسب هرتز می‌باشد. با استفاده از رابطه‌ی فوق می‌توان ولتاژ خروجی حسگر پیزوالکتریک تحت هر بارگذاری دلخواه و بلعکس را پیش‌بینی نمود.

۶- مراجع

- [1] Tiersten, H.F. (2013), "Linear piezoelectric plate vibrations: Elements of the linear theory of piezoelectricity and the vibrations piezoelectric plates", Springer.
- [2] Devasia, S., Meressi, T., Paden, B. and Bayo, E. (1993), "Piezoelectric actuator design for vibration suppression: placement and sizing", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 16, pp. 859-864.
- [3] Cheng, Z.Q., Lim, C.W. and Kitipornchai, S. (1999), "Three-dimensional exact solution for inhomogeneous and laminated piezoelectric plates", *International Journal of Engineering Science*, Vol. 37, pp. 1425-1439.
- [4] Oh, I.K., Han, J.H. and Lee, I. (2000), "Postbuckling and vibration characteristics of piezolaminated composite plate subject to thermo-piezoelectric loads", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 233, pp. 19-40.
- [5] Sung, Y.G. (2002), "Modelling and control with piezoactuators for a simply supported beam under a moving mass", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 250, pp. 617-626.
- [6] Gao, J.X. and Shen, Y.P. (2003), "Active control of geometrically nonlinear transient vibration of composite plates with piezoelectric actuators", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 264, pp. 911-928.
- [7] Liew, K.M., He, X.Q., Tan, M.J. and Lim, H.K. (2004), "Dynamic analysis of laminated composite plates with piezoelectric sensor/actuator patches using the FSDT mesh-free method", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46, pp. 411-431.

پی‌نوشت

¹ Structural health monitoring

² Piezoelectric

³ Sensor

⁴ Actuator

⁵ Layer-wise

⁶ Euler-Bernoulli

⁷ State-space

⁸ Regulator

⁹ Quadratic

¹⁰ First-order shear deformation theory

¹¹ Galerkin

¹² Set theory

¹³ Differential quadrature

¹⁴ Functional

¹⁵ Hamilton's principle

