



دانشکده مکانیک  
گروه طراحی کاربردی

# کنترل فعال ارتعاشات سازه‌های پیزوالکتریک هوشمند

دانشجو: میثم عبدی

استاد راهنما:  
دکتر اردشیر کرمی محمدی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

خرداد ۸۸

تقدیم به پدر و مادرم

شایسته است از زحمات خالصانه استاد محترم جناب آقای دکتر اردشیر کرمی محمدی که در طول تحقیق و تدوین پایان نامه اینجانب را حمایت و راهنمایی کردند کمال قدردانی و تشکر را نمایم.

## چکیده

در این پژوهش به بررسی سازه‌های پیزوالکتریک هوشمند و دو روش عمده کنترل و سرکوب ارتعاشات در این سازه‌ها پرداخته شده است: (۱) سرکوب ارتعاشات سازه‌ها با استفاده از مدار شانت انفعالی پیزوالکتریک (۲) کنترل فعال ارتعاشات سازه‌ها توسط سنسور و عملگر پیزوالکتریک.

به دلیل نسبتاً جدید بودن موضوع، ابهامات زیادی در این زمینه وجود دارد که در این پایان نامه سعی در برطرف شدن آنها شده است. اما هدف اصلی از انجام این پژوهش یافتن تکنیکی عملی و در عین حال ساده برای مدلسازی و کنترل سازه‌های پیزوالکتریک هوشمند با دو روش ذکر شده می‌باشد. بدین منظور پس از بیان ریاضی معادلات المان محدود سیستم‌های حلقه بسته، از نرم افزار المان محدود ANSYS برای مدلسازی این سازه‌ها استفاده شده و هر جا نیاز به به تعریف و اعمال کنترلر می‌باشد، دستورات کنترلی توسط APDL با مدل المان محدود ANSYS تلفیق شده است. به عنوان نمونه ساده‌ای از سازه‌های هوشمند، یک تیر یکسزگیردار با وصله‌های متقارن پیزوالکتریک متصل به آن بررسی شده است. برای بررسی رفتار سازه‌های پیزوالکتریک تحت میرایی مدار شانت انفعالی، از آنالیز هارمونیک در محدوده فرکانسهای طبیعی سازه استفاده شده است. در بررسی رفتار فعال سازه‌ها با سنسور و عملگر پیزوالکتریک، از آنالیز گذرا استفاده شده و توسط آن پاسخ ارتعاشات آزاد و اجباری تیر بررسی شده است. از جمله اینکه پاسخ تیر هوشمند به بارهای متحرک بر روی تیر شبیه سازی و بررسی شده است.

**کلمات کلیدی:** پیزوالکتریک، سازه انعطاف پذیر، سازه هوشمند، المان محدود، کنترل فعال ارتعاشات

## مقالات مستخرج از این پایان نامه

- M. Abdi, A. Karami Mohammadi, “Numerical Simulation and Active Vibration Control of Piezoelectric Smart Structures”, *International review on Mechanical Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp.175-181, 2009.
- M. Abdi, A. Karami Mohammadi, M. Abbsi, “Effect of Actuator Placement on Dynamic Response of a Smart Beam”, *16<sup>th</sup> Annual International Conference on Mechanical Engineering*, Kerman, Iran, 2008.

## فهرست

صفحه

چکیده.....	أ
مقالات مستخرج از پایان نامه.....	ب
فهرست نمودارها و عکسها.....	و
فهرست جداول.....	ز
<b>۱- مقدمه</b> .....	۱
۱-۱ هدف پایان نامه .....	۵
۲-۱ محتوای پایان نامه.....	۶
<b>۲- پیشینه تحقیق</b> .....	۸
۱-۲ سرکوب ارتعاشات سازه‌ها توسط مدار شانت انفعالی پیزوالکتریک.....	۸
۲-۲ کنترل فعال ارتعاشات سازه‌ها توسط سنسور و عملگر پیزوالکتریک.....	۱۱
۳-۲ الگوریتمهای کنترلی.....	۱۴
۴-۲ مدلسازی و کنترل فعال ارتعاشات سازه‌ها به کمک ANSYS.....	۱۶
<b>۳- مواد و سازه های هوشمند</b> .....	۲۰
۱-۳ مواد هوشمند .....	۲۰

۲۳	..... سازه‌های هوشمند
۲۵	..... اجزای مختلف سازه هوشمند
۲۹	..... <b>۴- مبانی پیزوالکتریسیته</b>
۲۹	..... ۱-۴ تاریخچه کشف پیزوالکتریسیته
۳۰	..... ۲-۴ مبانی پیزوالکتریسیته
۳۳	..... ۳-۴ معادلات ساختاری
۳۴	..... ۱-۳-۴ یک بعدی
۳۴	..... ۱-۳-۳-۴ قطبی سازی
۳۶	..... ۲-۳-۳-۴ پیزوالکتریسیته
۳۸	..... ۲-۳-۴ پیزوالکتریسیته خطی
۴۰	..... ۴-۴ فرمولبندی المان محدود
۴۲	..... ۵-۴ المانهای پیزوالکتریک در ANSYS
۴۴	..... <b>۵- سرکوب ارتعاشات سازه‌ها توسط مدار شانت انفعالی پیزوالکتریک</b>
۴۴	..... ۱-۵ مقدمه
۴۷	..... ۲-۵ مدل‌سازی ریاضی مدارهای شانت القایی رزونانس
۵۰	..... ۱-۲-۵ مدار شانت با مقاومت و القاگر سری
۵۱	..... ۲-۲-۵ بهینه سازی پارامترهای مدار شانت
۵۲	..... ۳-۵ مدل سازی المان محدود سازه های پیزوالکتریک با مدار شانت $R-L$

۵۴	.....۴-۵ بررسی موردی
۵۵	.....۱-۴-۵ خواص ماده پیزوالکتریک
۵۶	.....۲-۴-۵ مدل المان محدود سازه در ANSYS
۶۶	.....۶- کنترل فعال ارتعاشات سازه‌ها توسط سنسور و عملگر پیزوالکتریک
۶۶	.....۱-۶ مقدمه
۶۹	.....۲-۶ مدل المان محدود سازه هوشمند
۷۲	.....۳-۶ مدل‌سازی المان محدود تیر هوشمند توسط ANSYS
۷۴	.....۴-۶ طراحی کنترل
۷۷	.....۵-۶ ارتعاشات آزاد تیر هوشمند
۸۱	.....۶-۶ ارتعاشات اجباری تیر هوشمند
۸۱	.....۱-۶-۶ پاسخ تیر به بارهای ضربه‌ای
۸۱	.....۱-۶-۶ پاسخ تیر به بارهای پله‌ای
۸۵	.....۳-۶-۶ پاسخ تیر به بارهای سینوسی
۸۷	.....۴-۶-۶ پاسخ تیر به بارهای متحرک
۹۰	.....۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۹۰	.....۱-۷ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۹۲	.....۲-۷ پیشنهاداتی برای ادامه تحقیقات در این زمینه
۹۴	.....مراجع



## فهرست نمودارها و عکسها

صفحه

۶	شکل تیر پیزوالکتریک هوشمند	۱-۱
۲۵	اجزای تشکیل دهنده سازه هوشمند	۱-۳
۲۸	نمونه آزمایشگاهی یک خریای هوشمند	۲-۳
۲۸	تیر یکسرگردار هوشمند و پاسخ ارتعاشات سیستمهای بدون کنترل و کنترل شده	۳-۳
۳۱	خاصیت پیزوالکتریسته	۱-۴
۳۲	تک-کریستال و چند-کریستال	۲-۴
۳۲	قطبی کردن سرامیک جهت تولید اثر پیزوالکتریک	۳-۴
۳۳	نمونه های مختلف اثر پیزوالکتریک	۴-۴
۳۵	بارهای موجود در یک خازن مسطح حاوی دی الکتریک	۵-۴
۴۳	المانهای پیزوالکتریک در ANSYS	۶-۴
۴۵	a- مدار شانت مقاومتی b- مدار شانت رزونانس	۱-۵
۴۶	مدارهای شانت (a) سری (b) موازی	۲-۵
۴۸	جریان فیدبک PZT حاصل از امپدانس شانت	۳-۵
۵۱	مدار شانت R-L سری	۴-۵
۵۲	سازه در نظر گرفته شده برای آنالیز و مدار الکتریکی معادل	۵-۵
۶۰	مدل المان محدود سازه با مدار شانت R-L سری	۶-۵
۶۱	شش مد اول ارتعاشی سازه	۷-۵
۶۲	پاسخ فرکانسی سازه پیش از اتصال مدار شانت	۸-۵
۶۲	پاسخ فرکانسی سازه در مجاورت مد ارتعاشی دوم در اندوکتانس بهینه ( $L_{opt} = 15.12 H$ )	۹-۵
۶۴	پاسخ فرکانسی سازه با مدار شانت میزان شده برای سرکوب مد اول	۱۰-۵
۶۴	پاسخ فرکانسی سازه با مدار شانت میزان شده برای سرکوب مد دوم	۱۱-۵
۶۵	پاسخ فرکانسی سازه با مدار شانت میزان شده برای سرکوب مد چهارم (سومین مد خمشی)	۱۲-۵
۶۵	پاسخ فرکانسی سازه با مدار شانت میزان شده برای سرکوب مد پنجم (چهارمین مد خمشی)	۱۳-۵
۶۸	تیر یکسرگردار هوشمند	۱-۶
۷۳	مدل المان محدود تیر هوشمند	۲-۶
۷۴	دیاگرام بلوکی سیستم حلقه بسته	۳-۶
۷۶	فلوچارت اعمال کنترلی	۴-۶

۷۸	پاسخ ارتعاشات آزاد سیستمهای حلقه باز و حلقه بسته	۵-۶
۷۸	تغییرات زمان نشست ارتعاشات ( $t_s$ ) و ولتاژ تحریک ( $V_a$ ) نسبت به بهره کنترلر ( $K_P$ )	۶-۶
۷۹	پاسخ فرکانسی تیر در سیستم حلقه باز	۷-۶
۷۹	پاسخ فرکانسی سیستمهای حلقه باز و حلقه بسته در محدوده مد اول ارتعاشی	۸-۶
۸۰	مقایسه پاسخ ارتعاشات آزاد تیر در روش ارائه شده با ANSYS و روشهای عددی و تجربی مراجع [36] و [53]	۹-۶
۸۳	جابجایی نوک تیر در بارگذاری ضربه‌ای	۱۰-۶
۸۳	ولتاژهای سنسور و عملگر در سیستم حلقه بسته در بارگذاری ضربه‌ای	۱۱-۶
۸۴	جابجایی نوک تیر در بارگذاری پله‌ای	۱۲-۶
۸۴	ولتاژهای سنسور و عملگر در سیستم حلقه بسته در بارگذاری پله‌ای	۱۳-۶
۸۶	بارگذاری متحرک بر تیر هوشمند	۱۴-۶
۸۷	جابجایی نوک تیر در بارگذاری سینوسی	۱۵-۶
۸۷	ولتاژهای سنسور و عملگر در سیستم حلقه بسته در بارگذاری سینوسی	۱۶-۶
۸۸	جابجایی نوک تیر در یک بارگذاری متحرک	۱۷-۶
۸۸	ولتاژهای سنسور و عملگر در سیستم حلقه بسته در یک بارگذاری متحرک	۱۸-۶

## فهرست جداول

۶۳	پارامترهای بهینه مدار شانت در مدهای مختلف خمشی	۱-۵
۷۴	سه فرکانس طبیعی اول تیر	۱-۶

# فصل ۱

## مقدمه

مبحث کنترل در کاربردهایی که به وزن کم، مصرف انرژی کمتر، راحتی اداره و عملکرد ایمن تر احتیاج دارد بسیار مورد توجه قرار دارد. اگرچه کنترل سازه انعطاف پذیر بیشتر در کاربردهای فضایی از قبیل ماهواره‌های انرژی خورشیدی<sup>۱</sup>، آنتن‌های بزرگ و روباتهای فضایی بزرگ مورد استفاده قرار دارد، اما در کاربردهای زمینی از قبیل روباتهای سرعت بالا، پلهای بزرگ و ... به همان اندازه مورد توجه قرار دارد.

با وجود برخی قابلیت‌های ذکر شده، وزن کم عموماً سستی و نازکی سازه را ایجاب می‌کند که معمولاً طولانی شدن زمان ارتعاشات، خستگی و ناپایداری، دشواری در موقعیت دهی دقیق<sup>۲</sup> و تعقیب نیرو<sup>۳</sup> که در کنترل ارتعاشات، موقعیت، شکل و نیرو اهمیت دارند را در پی دارد. بکارگیری سازه‌های انعطاف‌پذیر نیازمند کنترلرهای پیشرفته است تا بر این مشکلات غلبه کند.

---

<sup>۱</sup> Potential solar power satellites

<sup>۲</sup> Accurate position

<sup>۳</sup> Force tracking

کنترل سازه‌های انعطاف پذیر از زمینه‌های تحقیقاتی در حال پیشرفت در چند دهه اخیر بوده است. در میان مسائل کنترلی مختلف، کنترل ارتعاشات نه تنها ذاتاً مهم و قابل توجه است، بدلیل اینکه به بسیاری اعمال سازه‌ای انعطاف پذیر از قبیل کنترل موقعیت، شکل و نیرو که معمولاً هرکدام به نوعی ارتعاشات را تجربه می‌کنند مربوط می‌باشد، دارای اهمیت مضاعف است.

دو روش کلی برای کنترل ارتعاشات سازه‌ها پیشنهاد شده است: کنترل فعال<sup>۱</sup> و کنترل غیر فعال<sup>۲</sup>. در روش کنترل غیر فعال، میرایی سازه با استفاده از دمپ‌های غیر فعال یا توسط موادی با ویسکوالاستیسیته مطلوب افزایش می‌یابد. این روش می‌تواند وزن کلی سازه را به میزان قابل توجهی افزایش دهد و برای مدهای ارتعاشی با فرکانس بالا مناسب می‌باشد.

در یک روش فعال سنسورها و عملگرها<sup>۳</sup> با سازه انعطاف پذیر مجتمع شده و با یک برنامه کنترلی عمل می‌کنند. یک نکته مهم در کنترل فعال سیستم، انتخاب سنسور و عملگر می‌باشد. در سالهای اخیر با استفاده از "مواد هوشمند"<sup>۴</sup> از قبیل مواد پیزوالکتریک<sup>۵</sup>، آلیاژهای حافظه دار<sup>۶</sup>، سیالات حساس به میدان الکتریکی<sup>۷</sup> و ... نسل جدیدی از سنسورها و عملگرها توسعه یافته است که قادر به احساس و تشخیص

---

<sup>1</sup> Active control

<sup>2</sup> Passive control

<sup>3</sup> Actuator

<sup>4</sup> Smart materials

<sup>5</sup> Piezoelectric materials

<sup>6</sup> Shape memory alloys

<sup>7</sup> Electrorheological fluids

خودکار تغییرات محیط و پاسخ به این تغییرات توسط یک سری اعمال و تحریکات می‌باشند. گرچه تعاریفی که تاکنون از مواد هوشمند ارائه شده مبهم می‌باشد، اما این مواد یک سری مشخصات مشترک دارند که آنها را در یک مقوله جای داده است که به عنوان مثال می‌توان به طبیعت گسترده این مواد و قابلیت تجمع آنها با زیرسازه اشاره نمود. این مواد می‌توانند به صورت گسترده ای با سازه‌های انعطاف پذیر ترکیب شوند تا "سازه‌های هوشمند"<sup>۱</sup> شکل گیرد.

در میان مبدل‌های<sup>۲</sup> مختلف هوشمند، سنسورها و عملگرهای گسترده پیزوالکتریک بدلیل مزایایی از قبیل جرم کم و تأثیر دینامیکی انفعالی، پهنای باند بالا، هزینه پایین، سهولت اتصال بر روی سازه یا جاسازی در داخل سازه انعطاف‌پذیر، قابلیت کنترل در محدوده فرکانسی گسترده و ... بیشتر از همه قابل توجه می‌باشند. استفاده از پیزومبدل‌های گسترده باعث پیدایش شیوه‌های جدید در کنترل فعال سازه‌های انعطاف پذیر که اغلب سیستم‌های پیوسته<sup>۳</sup> در نظر گرفته می‌شوند شده است.

همانطور که اشاره شد در یک روش معروف کنترل فعال، قطعات پیزوالکتریک بعنوان سنسور و عملگر به سازه متصل می‌شوند و با استفاده از یک سیستم کنترلی حلقه بسته<sup>۴</sup> قادر به احساس ارتعاشات و تحریک سازه در جهت میرا کردن آن می‌باشند. تکنیک معروف دیگر، استفاده از میرایی مدار خارجی شانت

---

<sup>1</sup> Smart structures

<sup>2</sup> Transducer

<sup>3</sup> distributed parameter systems

<sup>4</sup> Closed loop control system

الکتريکی  $R-L$  می‌باشد، بطوریکه سنسورهای پیزوالکتریک متصل به سازه، انرژی مکانیکی حاصل از اغتشاشات سازه را به انرژی الکتريکی تبدیل می‌کنند که سپس این انرژی الکتريکی توسط قانون ژول در یک مقاومت  $R$  به گرما مستهلک می‌شود. یک القاگر  $L$  هم برای میزان کردن فرکانس مدار شانت با فرکانس اغتشاشات نیاز است.

مدلسازی و آنالیز سازه‌های هوشمند با استفاده از روشهای مختلفی انجام شده است. محققین بسیاری از طبیعت پیوسته مواد پیزوالکتریک استفاده نموده کنترلرهای پیوسته ای برای اشکال ساده ای از سازه‌های هوشمند با فرضهای ساده شونده طراحی نموده اند. اما این موضوع بدلیل پیچیدگی تحلیل بطور کامل بررسی نشده است. از طرفی توسعه روشهای محاسباتی قدرتمند در سالهای اخیر و همگام با آن پیشرفت سخت افزار و نرم افزارهای کامپیوتری باعث شده که محققین بسیاری به سمت روشهای عددی<sup>1</sup> روی آورند. از جمله روشهای مؤثر عددی که به تحلیل سیستمهای پیوسته از طریق گسسته سازی معادلات آن می پردازد، روش اجزاء محدود<sup>2</sup> (FEM) می‌باشد. برخی المانهای پیزوالکتریک در نرم افزارهای تجاری اجزاء محدود از قبیل ANSYS و ABAQUS آورده شده که امکان مدلسازی المان محدود یک سازه انعطاف پذیر با سنسورها و عملگرهای پیزوالکتریک مجتمع با آن را فراهم می سازد.

---

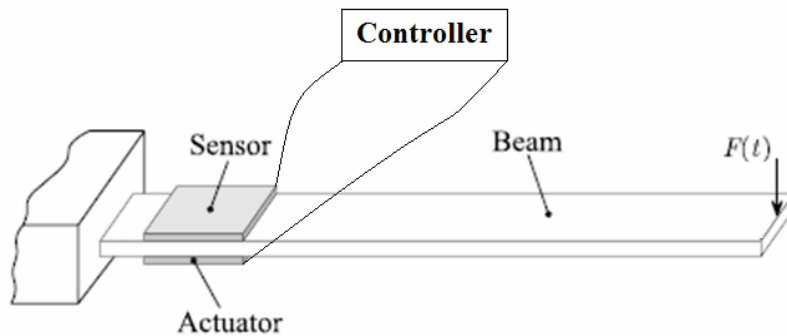
<sup>1</sup> Numerical methods

<sup>2</sup> Finite Element Method

علیرغم برخی نتایج در این زمینه‌ها، هنوز به یک مدل دینامیکی قابل اطمینان، و یک کنترلر مؤثر با قابلیت طراحی آسان برای کاربردهای واقعی و همچنین یک مدل بهینه از شکل و محل قرارگیری مبدل‌ها در کنترل فعال سازه‌های انعطاف پذیر با استفاده از المانهای پیزوالکتریک نیاز است.

## ۱-۱ هدف پایان نامه

مهمترین هدف این پایان نامه شبیه سازی اجزاء محدود سازه‌های پیزوالکتریک هوشمند توسط نرم افزار ANSYS و بررسی دو مورد از مهمترین تکنیکهای کنترل و سرکوب ارتعاشات در سازه‌های هوشمند پیزوالکتریک می‌باشد. در راه رسیدن به این هدف لازم است که یک مدل از سیستم مجتمع به دست آید. یک تیر انعطاف پذیر با مبدل‌های پیزوالکتریک متصل به آن به عنوان سازه هوشمند فرض می‌شود. اگرچه تیر انعطاف پذیر که در سازه‌های پیچیده بزرگ، بازوهای مکانیکی با اتصالات انعطاف پذیر و ... کاربرد دارد، یکی از رایج ترین سازه‌هایی است که در این زمینه مطالعه شده است، هنوز هم مسائل جالب توجه بسیاری مربوط به ایجاد یک مدل اجزاء محدود بیانگر سیستم واقعی، یافتن کنترلرهای ساده و عملی و همچنین بررسی پاسخ سازه هوشمند به تحریک‌های مختلف خارجی باقی می‌ماند. در بخش بعد توضیح مختصری از فصلهای پایان نامه که مراحل رسیدن به هدف این تحقیق را پوشش می‌دهد ارائه شده است.



شکل ۱-۱ تیر پیزوالکتریک هوشمند

## ۲-۱ محتوی پایان نامه

پیشینه‌ای از تحقیق، شامل سرکوب ارتعاشات سازه‌ها توسط مدار شانت انفعالی پیزوالکتریک، کنترل فعال ارتعاشات سازه‌ها توسط سنسور و عملگر پیزوالکتریک، الگوریتم‌های کنترلی، و مدل‌سازی و کنترل فعال سازه‌های هوشمند با استفاده از نرم افزار المان محدود ANSYS، در فصل دوم ارائه شده است.

در فصل سوم به تعریف مواد هوشمند به عنوان یکی از اجزاء ضروری در یک سازه هوشمند پرداخته شده و برخی از مهمترین مواد هوشمند معرفی شده است. در ادامه بحث، سازه‌های هوشمند معرفی شده و اجزاء ضروری آن بیان شده است.

در فصل چهارم مواد پیزوالکتریک به عنوان محبوب ترین و پرکاربردترین مواد هوشمند مورد استفاده در سازه‌های هوشمند معرفی شده و به دنبال آن معادلات ساختاری حاکم بر این مواد بدست آمده است. روابط المان محدود بیان کننده رفتار دینامیکی مواد با استفاده از معادلات ساختاری بدست آمده است.



فصل پنجم به بررسی روشهای سرکوب ارتعاشات سازه‌ها با استفاده از مدار شانت انفعالی پیزوالکتریک پرداخته شده است. در ابتدا مدلسازی ریاضی این سازه‌ها با تحلیل امپدانس سازه انجام گرفته و در ادامه بحث، یک تکنیک مدلسازی این سازه‌ها توسط ANSYS ارائه شده و با استفاده از روشهای بهینه سازی مدار شانت، آنالیز هارمونیک این سازه‌ها در اطراف فرکانسهای طبیعی سازه بررسی شده است.

در فصل ششم تکنیک دیگر کنترل ارتعاشات سازه‌ها توسط مواد پیزوالکتریک، یعنی کنترل فعال سازه‌ها توسط سنسور و عملگر پیزوالکتریک معرفی شده است. معادلات المان محدود بیان کننده رفتار ارتعاشی این سازه‌ها در وضعیت کنترل شده، بدست آورده شده است. سپس یک تکنیک مدلسازی این سازه‌ها توسط ANSYS بعلاوه یک استراتژی کنترل فعال آنها که قابلیت تلفیق با حل المان محدود ANSYS را داراست ارائه شده است. در ادامه یک تیر یکسرگردار هوشمند در ANSYS مدل شده و با استفاده از استراتژی پیشنهاد شده، ارتعاشات آزاد و همچنین اجباری این تیر شامل پاسخ به بارگذاریهای ضربه، پله، سینوسی و بارهای متحرک بررسی شده است.

در پایان یک جمعبندی کلی از پایان نامه و نتیجه‌گیری از تحقیقات انجام شده بر روی سازه‌های هوشمند پیزوالکتریک به همراه یک سری پیشنهادات برای ادامه تحقیقات در این زمینه در فصل هفتم آورده شده است.

## فصل ۲

### پیشینه تحقیق

#### ۱-۲ سرکوب ارتعاشات سازه‌ها توسط مدار شانت انفعالی<sup>۱</sup> پیزوالکتریک

سرکوب ارتعاشات سازه‌ای توسط مدارهای شانت پیزوالکتریک به دلایل زیادی از جمله وزن کم، کاربری آسان و کارایی بالا در سالهای اخیر بسیار مورد توجه بوده است. انواع مختلفی از مدارهای شانت موجود می‌باشد، از جمله مقاومتی، القایی، خازنی و سوئیچ شده. اما آنچه در این پایان نامه بیشتر مورد توجه است مدار شانت القایی<sup>۲</sup> می‌باشد. یک مدار شانت ایجاد یک مدار القاگر-خازن ( $LC$ ) رزونانت می‌کند، بنابراین مدار شانت رزونانت<sup>۳</sup> نامیده می‌شود که رفتار آن مشابه جاذب ارتعاشات مکانیکی<sup>۴</sup> می‌باشد. عملکرد سیستم بدین ترتیب می‌باشد که سنسور پیزوالکتریک انرژی مکانیکی ارتعاشات را به انرژی الکتریکی تبدیل کرده و این انرژی در مدار شانت به صورت گرما مستهلک می‌شود.

---

<sup>1</sup> Passive shunt circuit

<sup>2</sup> Inductive shunt circuit

<sup>3</sup> Resonant shunt circuit

<sup>4</sup> Mechanical vibration absorber

راه کار مدار شانت انفعالی اولین بار طی تحقیقات گسترده‌ای توسط هاگود و ون فلاتو<sup>1</sup> [1] بررسی شد و تاکنون به عنوان استاندارد مدار شانت انفعالی شناخته شده است. بررسی‌های اولیه در تحقیقات هاگود نشان داد که شانت مقاوم کمترین کاهش ارتعاشات را در میان عرض باند موجب می‌شود. سپس یک مقاومت و القاگر که بصورت سری متصل بودند و نسبت به ظرفیت الکتریکی سنسور پیزوالکتریک میزان شده بودند باعث تقلیل ارتعاشات در عرض باند باریک اطراف یک مد ارتعاشی شد. با کمی اصلاحات، هاگود نشان داد که این مدار شانت رزونانت مشابه جاذب ارتعاشات عمل می‌کند. بدین لحاظ قوانین میزان سازی مدار شانت انفعالی برپایه تکنیکهای میزان سازی اصلی در تئوری نقاط ثابت که برای جاذبه‌های ارتعاشات توسط دن هارتوگ<sup>2</sup> [2] معرفی شده بود، ارائه شد. لائو<sup>3</sup> [3] با در نظر گرفتن تبدیل و اتلاف انرژی مدل جدیدی را توسعه داد که رفتار میرایی مواد پیزوالکتریک را مشخص می‌کرد. معادلات بدست آمده، بار مقاومت بهینه، بیشترین نسبت میرایی و تغییر فرکانس رزونانس را پیشبینی می‌کرد.

در پی بهبود طرح اولیه، طراحی‌های مختلفی برای مدار شانت انفعالی ارائه شد. وو و بیکوس<sup>4</sup> [4] و [5] مدار سری R-L را بصورت موازی طراحی نمودند و بهبود اندکی در کارکرد آن بدست آوردند. طرح مدار

---

<sup>1</sup> Hagood and von Flotow

<sup>2</sup> Den Hartog

<sup>3</sup> Law

<sup>4</sup> Wu and Bicos

شانت انفعالی توسط هولکمپ<sup>۱</sup> [6] به یک مدل چند مده ارتقا پیدا کرد که در آن شانت‌های متعددی بهم متصل بودند تا در سیستم، مدهای ارتعاشی بیشتری مستهلک شوند. از آنجا که قوانین تحلیلی به فرم بسته برای میزان سازی در دست نبود، هولکمپ از یک روش بهینه سازی عددی برای میزان سازی صحیح مدار شانت استفاده نمود. تسای و وانگ<sup>۲</sup> [7] شبکه پیزوالکتریک پیوندی فعال- غیر فعال<sup>۳</sup> را ارائه دادند. مدار شانت نه تنها قادر به ایجاد میرایی غیر فعال بود، بلکه در صورت میزان سازی صحیح قادر به افزودن توانایی عمل فعال به سیستم بود. ساروانس<sup>۴</sup> [8] میرایی ورق‌های کامپوزیتی با لایه‌های پیزوالکتریک شانت مقاوتی چندگانه را بررسی نمود. او نشان داد که با میزان کردن صحیح مدار شانت مقاومتی می‌توان به کنترل ارتعاشات مدهای انتخابی سیستم دست یافت. کیم<sup>۵</sup> و همکاران [9] کد المان محدودی را توسعه دادند که بیانگر طرح‌های فعال و غیر فعال در ارتعاشات غیرخطی پنل‌های کامپوزیتی بود و توسط این کد تأثیر کاهش ارتعاشات با استفاده از یک مدار شانت R-L سری بررسی شد. آگنی<sup>۶</sup> و همکاران [10] روشی برای مدلسازی مدارهای شانت پیزوالکتریک متصل به سازه‌های الاستیک و ایروالاستیک ارائه دادند. این مدلسازی هم امکان کنترل چند موده ارتعاشات و هم امکان کنترل انتخابی فعال- غیر فعال را فراهم

---

<sup>1</sup> Holkamp

<sup>2</sup> Tsai and wang

<sup>3</sup> Hybrid active-passive piezoelectric network

<sup>4</sup> Saravanos

<sup>5</sup> Kim

<sup>6</sup> Agneni

می‌ساخت. پارک<sup>۱</sup> و همکاران [11] روش جاذب ارتعاشات مکانیکی را برای کنترل ارتعاشات محفظه یک CD-ROM با استفاده از مدار شانت پیزوالکتریک بکار بردند. آنها همچنین با استفاده از آنالیز ادمیتانس<sup>۲</sup> اثر مدار شانت پیزوالکتریک را بر کاهش ارتعاشات چند موده<sup>۳</sup> محفظه بررسی نمودند [12].

نرم افزار المان محدود ANSYS با دارا بودن المانهای پیزوالکتریک و همچنین مدار، قابلیت تحلیلهای گذرا و هارمونیک را در سیستمهای متشکل از وصله‌های پیزوالکتریک<sup>۴</sup> و مدار الکتریکی داراست. با استفاده از این قابلیت و بکاربردن تکنیکهای بهینه سازی، عده ای از محققین به بررسی رفتار سازه‌ها تحت میرایی مدار شانت پیزوالکتریک پرداخته اند [13-14].

## ۲-۲ کنترل فعال ارتعاشات<sup>۵</sup> سازه‌ها توسط سنسور و عملگر پیزوالکتریک

در بسیاری موارد که سیستم به کارکرد کنترلی بالاتری احتیاج داشته باشد، لازم است که از کنترل فعال ارتعاشات استفاده شود. بدین منظور لازم است که مواد پیزوالکتریک به عنوان سنسور و عملگر در یک

---

<sup>1</sup> Park

<sup>2</sup> Admittance analysis

<sup>3</sup> Multi-mode vibration reduction

<sup>4</sup> Piezoelectric patches

<sup>5</sup> Active vibration control

حلقه کنترلی بکار روند تا ارتعاشات سرکوب شود. از این رو به یک مدل ریاضی از کل سازه شامل سنسورها و عملگرها احتیاج است.

بیلی و هابرد<sup>۱</sup> [15] آغازگر تحقیقات در زمینه کاربرد سازه‌های هوشمند در کنترل فعال ارتعاشات بودند. آنها با استفاده از روش دوم لیپانوف یک کنترلر پیوسته برای کاهش ارتعاشات یک تیر انعطاف پذیر طراحی کردند. کراولی و دی لوئیس<sup>۲</sup> [16] سازه‌های انعطاف پذیر مجتمع با عملگرهای پیزوالکتریک را طی دو مرحله تحلیل کردند. در مرحله اول یک مدل دینامیکی از تیر را بدون در نظر گرفتن عملگرهای پیزوالکتریک توسعه دادند و سپس با محاسبه نیروی تعمیم یافته از یک مدل استاتیکی تنش-کرنش از لایه پیزوالکتریک، اثر عملگر پیزوالکتریک را به آن اضافه نمودند. لی و مون<sup>۳</sup> [17] لایه‌های پیزوالکتریک را به عنوان سنسورها و عملگرهای مودال تشریح کردند. این بدان معناست که لایه‌های پیزوالکتریک هنگامی که به عنوان عملگر استفاده شوند، نیروهای مودال در نظر گرفته می‌شوند و هنگامی که به عنوان سنسور استفاده شوند، بارهای مودال در نظر گرفته می‌شوند. با استفاده از طبیعت متعامد شکل مدها، حل ویژه معادلات مختلف جزئی مربوط به ارتعاشات سازه که بیانگر برهم کنش میان لایه پیزوالکتریک و یک ورق انعطاف پذیر بود بدست آمد.

---

<sup>1</sup> Bailey and Hubbart

<sup>2</sup> Crawley and de Luis

<sup>3</sup> Lee and Moon

واژ<sup>1</sup> [18] با استفاده از تکنیکهای بکار برده شده در [16] و [17] یک مجموعه روابط برای برهم کنش میان یک تیر انعطاف پذیر و تعدادی وصله پیزوالکتریک متصل به آن بدست آورد. این تحقیق برای بررسی تأثیر شکل وصله‌های پیزوالکتریک در کارکرد سنسوری یا عملگری انجام شده بود. تحقیقات او نشان داد که تأثیر شکل وصله‌های پیزوالکتریک هم مربوط به محل قرار گیری آنها و هم مربوط به ابعاد آنها می-باشد و آنها را بصورت یک تابع تشریح کرد. این معادلات هنگام محاسبه فضای حالت<sup>2</sup> سازه انعطاف پذیر و وصله‌های پیزوالکتریک متصل به آن که در طراحی استراتژی کنترل برای میرایی فعال ارتعاشات کاربرد دارند پر اهمیت می‌باشند.

للو<sup>3</sup> و همکاران [19] چگونگی بهینه کردن جایگاه وصله‌های پیزوالکتریک بر روی ورق را تشریح کردند. سان<sup>4</sup> و همکاران [20] تأثیر مکان نصب وصله پیزوالکتریک را بصورت تجربی در یک بازوی مکانیکی تک لینکی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که هرچه عملگر پیزوالکتریک به سمت ریشه لینک نزدیکتر متصل شود، تأثیر آن در میرایی ارتعاشات بیشتر خواهد بود.

---

<sup>1</sup> Vaz

<sup>2</sup> State space

<sup>3</sup> Leleu

<sup>4</sup> Sun

## ۲-۳ الگوریتمهای کنترلی:

این بخش به مرور الگوریتمهایی که برای کنترل حرکت و میرایی فعال ارتعاشات در سازه‌های انعطاف پذیر بکار رفته اند اختصاص دارد.

لو و مون<sup>۱</sup> [21] دو حلقه فیدبک مجزا برای کنترل موقعیت و میرایی بکار بردند. آنها نتیجه گرفتند که کنترلر ساده اما مقاوم است، از آنجا که توسط فیدبک شتاب اثر دینامیک غیر خطی و غیر قطعی را حذف می‌کند و با استفاده از فیدبک حرکت پایه، میرایی بیشتری به سیستم می‌افزاید. نوتیک<sup>۲</sup> و همکاران [22] از تنظیم کننده درجه دو خطی<sup>۳</sup> (LQR) و روش کنترل فیدبک شتاب استفاده کردند. چوالریو و آستین<sup>۴</sup> [23] از قوانین کنترل غیرخطی برای کنترل ارتعاشات استفاده نمودند. بنکس<sup>۵</sup> و همکاران [24] از کنترل جبران کننده گوسین درجه دو خطی<sup>۶</sup> (LQG) استفاده نمودند تا یک تیر یکسر گیر دار را توسط وصله پیزوالکتریک کنترل کنند. چن<sup>۷</sup> و همکاران [25] از الگوریتم LQR استفاده نمودند و آرایش بهینه مواد پیزوالکتریک را بر اساس مشخصه شاخص کنترل<sup>۸</sup> و یک تابع هزینه<sup>۹</sup> بررسی کردند. کیم<sup>۱۰</sup> و همکاران

---

<sup>1</sup> Lew and Moon

<sup>2</sup> Knotik

<sup>3</sup> Linear Quadratic Regulator

<sup>4</sup> Chevallereau and Aoustin

<sup>5</sup> Banks

<sup>6</sup> Linear Quadratic Gaussian

<sup>7</sup> Chen

<sup>8</sup> Control performance specifications

<sup>9</sup> Cost function

<sup>10</sup> Kim



[26] یک تیر یکسرگیردار انعطاف پذیر با یک جرم متحرک را بررسی نمودند و یک روش کنترل حرکت نقطه به نقطه متشکل از یک کنترلر فیدبک و فیدفرورد ارائه نمودند تا به موقعیت‌یابی دقیق سیستم دست یابند.

اخیراً از روشهای کنترل مقاوم<sup>1</sup> از قبیل کنترل  $H_2$ ،  $H_\infty$ ، جایدھی قطب مقاوم<sup>2</sup>، و قیود پایداری  $D^3$  برای کنترل سازه‌های بزرگ انعطاف پذیر فضایی استفاده شده است. این امر بدلیل قابلیت این کنترلرهاست که می‌توانند سیستم را بطور مقاوم در حضور عدم قطعیت‌های کراندار<sup>4</sup>، پایدار کنند در حالی که بطور همزمان به طراح اجازه می‌دهد تا نیازمندیهای عملکرد را مشخص کند [27]. کار<sup>5</sup> و همکاران [28] گزارش دادند که  $H_\infty$  بر پایه طراحی کنترل مقاوم می‌تواند مدهای ارتعاشی مرتبه پایین را بدون هیچگونه ناپایداری حاصل از چشمپوشی مدهای مرتبه بالا، سرکوب کند. کنترلر بر روی یک برج انعطاف پذیر به همراه یک جرتقیل اعمال شد و نشان داده شد که سیستم در برابر تغییرات پارامتر مقاوم می‌باشد. پارک<sup>6</sup> و همکاران [29] طرح کنترل  $H_\infty$  را برای کنترل ارتعاشات و موقعیت بکار بردند. آنها همچنین از یک کنترلر بر پایه منطق فازی<sup>7</sup> برای تویی یک مفصل استفاده کردند و نتیجه گرفتند که یک طرح کنترل دوگانه از ترکیب

---

<sup>1</sup> Robust control

<sup>2</sup> Robust pole assignment

<sup>3</sup> D-stability constraints

<sup>4</sup> Bounded uncertainties

<sup>5</sup> Kar

<sup>6</sup> Park

<sup>7</sup> Fuzzy logic based controller

یک  $H_\infty$  و یک منطق فازی نتایج مؤثری در سرکوب ارتعاشات و کنترل موقعیت حاصل می‌کند. حلیم و مهیمانی<sup>۱</sup> [30] کنترلی را با کمینه کردن نرم  $H_\infty$  فضایی<sup>۲</sup> طراحی کردند. آنها این کنترلر را بر روی یک تیر با تکیه گاه‌های ساده و تعدادی وصله پیزوالکتریک آزمایش نمودند و یک تغذیه<sup>۳</sup> به جملات آن افزودند تا عدم قطعیت‌های مربوط به کاهیدگی مدل<sup>۴</sup> را کاهش دهد. نتایج تجربی نشان داد که این کنترلر نسبت به کنترلر  $H_\infty$  عملکرد بهتری در سرکوب ارتعاشات سازه‌ای دارد. وانگ<sup>۵</sup> و همکاران [31] از روش جدیدی برای کنترل مقاوم  $H_\infty$  با استفاده از جایدهی قطب منطقه‌ای<sup>۶</sup> گزارش دادند. آنها یک بازوی مکانیکی چهار عضوی ساختند و با مقایسه نتایج شبیه سازی و نتایج تجربی نشان دادند که کنترل مقاوم  $H_\infty$  در پیگیری دقت<sup>۷</sup> عملکرد بهتری نسبت به کنترل سنتی LQR دارد.

## ۲-۴ مدل‌سازی و کنترل فعال ارتعاشات سازه‌ها به کمک ANSYS

این بخش مروری است بر برخی فعالیت‌های انجام شده در زمینه مدل‌سازی سازه‌های هوشمند توسط نرم افزار تجاری المان محدود ANSYS. اگرچه این بخش از لحاظ مفهوم کلی از بخش‌های پیشین این فصل

---

<sup>1</sup> Halim and Moheimani

<sup>2</sup> Special  $H_\infty$  norm

<sup>3</sup> Feed

<sup>4</sup> Truncated model

<sup>5</sup> Wang

<sup>6</sup> Truncated model

<sup>7</sup> Regional pole assignment

جدا نیست، اما چون تأکید اصلی این پایان نامه در مدل سازی سازه‌های هوشمند توسط ANSYS می‌باشد، این بخش بطور مجزا ارائه شده است.

روش المان محدود، ابزاری قدرتمند و پذیرفته شده در تحلیل سازه‌های پیچیده می‌باشد. این روش همچنین قابلیت اجتماع اعضای فعال سیستم (عملگرها و سنسورهای پیزوالکتریک) را با بخشهای کلاسیک سیستم که همان سازه اصلی می‌باشد، داراست و در این زمینه المانهای محدود خاصی برای بیان اثر پیزوالکتریک توسعه یافته است [32]. المان‌های پیزوالکتریک در برخی نرم افزارهای تجاری المان محدود از قبیل ANSYS و ABAQUS موجود می‌باشند. در مورد مدلسازی و آنالیز سازه‌های هوشمند پیزوالکتریک، نرم افزار ANSYS از قدرت بالاتری برخوردار بوده و بیشتر مقالات منتشر شده در این زمینه با استفاده از ANSYS انجام گرفته است. زبان طراحی پارامتری ANSYS (APDL)، امکان جمع‌بندی دستورات کنترلی با حل ANSYS را فراهم می‌سازد.

وانگ<sup>۱</sup> [33] کارایی نرم افزار ANSYS در مدلسازی سازه‌های هوشمند را مورد بررسی قرار داد و از آن برای کنترل شکل استاتیکی سازه‌های کامپوزیتی استفاده نمود. در این پژوهش، روش المان محدود بعنوان ابزاری بسیار مؤثر در تحلیل سازه‌های هوشمند شناخته شد. بر خلاف روشهای تحلیلی، این روش آنالیز کامل کوپل شده ترمو-مکانیکی-الکتریکی را برای سازه‌های هوشمند پیشنهاد می‌کرد.

---

<sup>1</sup> Wang

یمن<sup>۱</sup> و همکاران [34,35] کنترل فعال ارتعاشات تیر و صفحه توسط عملگرهای پیزوالکتریک را بصورت عددی و تجربی بررسی نمودند. نرم افزار ANSYS برای ساختن مدل المان محدود صفحه هوشمند بمنظور بدست آوردن جایگاه بهینه سنسورها و عملگرهای پیزوالکتریک در سازه اصلی بکار رفته بود. با استفاده از مدل تجربی یک کنترلر تک ورودی- تک خروجی  $H_{\infty}$  برای سرکوب ارتعاشات صفحه هوشمند طراحی شده بود.

زو<sup>۲</sup> و همکاران [36] سازه‌های هوشمند (تیر و صفحه هوشمند) را با استفاده از ANSYS مدل‌سازی کردند و طراحی کنترل بهینه را در فضای حالت بدست آمده از آنالیز مودال المان محدود با انتقال معادلات آن به محیط MATLAB انجام دادند.

کاراگوله<sup>۳</sup> و همکاران [37] جمع‌بندی دستورات کنترلی را با حل ANSYS با استفاده از دستورات APDL تحقق بخشیدند و توسط آن کنترل فعال ارتعاشات یک تیر هوشمند با سنسور کرنش سنج<sup>۴</sup> و عملگر پیزوالکتریک را شبیه سازی نمودند. آنها گزارش دادند که مدل‌سازی سازه‌های هوشمند، و معین کردن بهره فیدبک با استفاده از نرم افزارهای تجاری المان محدود از قبیل ANSYS امکان پذیر می‌باشد، حتی برای سازه‌های پیچیده.

---

<sup>1</sup> Yaman

<sup>2</sup> Xu

<sup>3</sup> Karagülle

<sup>4</sup> Strain gauge

دونگ<sup>۱</sup> و همکاران [38] از یک تکنیک تشخیص سیستم به نام تکنیک "تشخیص فیلتر مشاهده گر-کالمن<sup>۲</sup> (OKID)" در شبیه سازی عددی و مطالعه کنترل فعال سازه‌های هوشمند پیزوالکتریک استفاده کردند. بر اساس پاسخ سازه که توسط روش المان محدود بدست آمده بود، یک مدل فضای حالت از سیستم خطی معادل توسط روش OKID توسعه داده شده بود. در طراحی کنترل از الگوریتم LQG استفاده شده بود تا ارتعاشات یک تیر هوشمند با عملگر پیزوالکتریک و سنسور سرعت را سرکوب کند. دستورات کنترلی با استفاده از APDL به مدل المان محدود مجتمع شده بود.

---

<sup>1</sup> Dong

<sup>2</sup> Observer/Kalman filter identification

## فصل ۳

### مواد و سازه‌های هوشمند

با توجه به اینکه یکی از کاربرد اصلی مواد و سازه‌های هوشمند کنترل فعال ارتعاشات می‌باشد، که هدف اصلی این تحقیق است، در این فصل به مرور این موضوع پرداخته شده است. مواد و سازه‌های هوشمند زمینه جدید و مهیجی در علوم مهندسی ایجاد نموده است و همانطور که توسط راجرز<sup>۱</sup> [39] اشاره شده است می‌توان آنرا "طلوع عصر مواد/سازه‌های جدید" نامید. بدلیل جدید بودن موضوع تحقیق هنوز ابهاماتی در زمینه تعریف و کاربرد مواد و سازه‌های هوشمند وجود دارد که در ادامه تلاش به تعریف روشن و بررسی کاربردهای این مواد انجام گرفته است.

#### ۳-۱ مواد هوشمند:

در میان تعریف‌های مختلفی که برای مواد هوشمند آورده شده است، تعاریف زیر پرمعنی تر بنظر می-

رسند:

---

<sup>۱</sup> Rogers

- تاکاگی<sup>۱</sup> [40] مواد هوشمند را اینگونه تعریف کرد: "موادی که به تغییرات محیطی با بهینه ترین وضع ممکن پاسخ داده و توابع خاص خود را نسبت به تغییرات آشکار می کنند".
  - شاهین پور<sup>۲</sup> [41] مواد هوشمند را اینگونه تعریف کرد: "موادی که بطور خودکار و ذاتی قادر به احساس یا تشخیص تغییرات محیط خود بوده و به آن تغییرات توسط نوعی تحریکات یا اقدامات پاسخ می دهند". در تعریف او هوشمندترین مواد، اسیدهای زیستی ریبونوکلیک<sup>۳</sup> (RNA's) و دیوکسیریبونوکلیک<sup>۴</sup> (DNA's) بوده و مواد مهندسی در آخر لیست قرار گرفته است.
- برای روشنتر شدن موضوع می توان ورستور ZnO را به عنوان یک ماده هوشمند مهندسی مورد استفاده در خطوط انتقال قدرت مثال زد. این ماده برای محافظت خطوط انتقال قدرت در برابر ولتاژهای بالا استفاده می شود. هنگامی که این وسیله در معرض آذرخش قرار می گیرد مقاومت الکتریکی آن کاهش یافته و جریان به زمین منتقل می شود. پس از قطع ولتاژ بالا به حالت اولیه باز می گردد.
- مواد زیر از جمله مواد هوشمندی هستند که در انجمن مواد و سازه های هوشمند پذیرفته شده اند.
- پیزوالکتریک: این مواد در اثر اعمال میدان الکتریکی تغییر شکل می دهند و برعکس.

---

<sup>1</sup> Takagi

<sup>2</sup> Shahinpoor

<sup>3</sup> RiboNucleic

<sup>4</sup> DeoxyriboNucleic

- الکترواسترکتیو<sup>۱</sup>: این مواد دارای خواصی مشابه با پیزوالکتریکها هستند که در آنها تغییرات مکانیکی متناسب با مربع میدان الکتریکی می‌باشد.
- مگنتواسترکتیو<sup>۲</sup>: با اعمال میدان مغناطیسی در این مواد کرنش مکانیکی ایجاد می‌شود و برعکس.
- آلیاژهای حافظه دار<sup>۳</sup>: هنگامیکه این مواد تحت یک میدان حرارتی قرار می‌گیرند متحمل یک انتقال فاز می‌شوند که باعث ایجاد تغییر شکل در ماده می‌گردد. این مواد در دمای پایین به فاز مارتنزیت<sup>۴</sup> انتقال می‌یابند و با حرارت دادن به فاز اصلی خود (آستنیت<sup>۵</sup>) باز می‌گردند.
- سیالات حساس به میدان الکتریکی<sup>۶</sup> (ER): ویسکوزیته این مواد در میدان الکتریکی تغییر می‌کند.
- سیالات حساس به میدان مغناطیسی<sup>۷</sup> (MR): ویسکوزیته این مواد در میدان مغناطیسی تغییر می‌کند.

---

<sup>1</sup> Electrostrictive

<sup>2</sup> Magnetostrictive

<sup>3</sup> Shape memory alloys

<sup>4</sup> Martensite

<sup>5</sup> Austenite

<sup>6</sup> ElectroRheological Fluids

<sup>7</sup> MagnetoRheological Fluids



- فیبر نوری<sup>۱</sup>: این فیبرها از تراکم، فاز، فرکانس و قطبی کردن نوسانات استفاده کرده و بدین وسیله کرنش، دما، میدانهای الکتریکی و مغناطیسی، فشار و دیگر کمیت‌های قابل اندازه‌گیری توسط آنها تعیین می‌شود. این مواد سنسورهای فوق‌العاده‌ای هستند.
  - پلیمرهای الکترواکتیو<sup>۲</sup>: در اثر اعمال میدان الکتریکی تغییر شکل می‌دهند و در کاربردهایی نظیر تقلید رفتار ماهیچه‌ها استفاده می‌شوند.
  - کامپوزیت‌های هوشمند<sup>۳</sup>: با ترکیب دو یا چند ماده هوشمند مجزا و ادغام توانایی‌های هر یک از آنها می‌توان به کامپوزیت‌های هوشمند جدیدی دست یافت.
- در میان مواد هوشمند، پیزوالکتریک‌ها بیشترین محبوبیت را دارا می‌باشند. این مواد سبک وزن، ارزان قیمت و با کاربری آسان بوده و با قابلیت احساس و تحریک، کاربرد فراوانی در کنترل فعال و غیر فعال سازه‌ها دارند.

### ۲-۳ سازه‌های هوشمند:

تاکنون تعاریف زیادی از سازه‌های هوشمند توسط محققین ارائه شده است:

---

<sup>1</sup> Optical fibers  
<sup>2</sup> Electroactive polimers  
<sup>3</sup> Smart composites

- در یک تعریف مهندسی از سازه‌های هوشمند توسط کراولی<sup>۱</sup> [42] این سازه‌ها بعنوان زیر مجموعه سازه‌های فعال<sup>۲</sup> در نظر گرفته شده که دارای سیستمهای عملگر و سنسور گسترده<sup>۳</sup> بعلاوه توابع کنترل گسترده و همچنین ساختار محاسباتی می‌باشند. این تعریف خیلی محدود کننده بوده و بسیاری از مستندات که در زمینه مواد و سازه‌های هوشمند وجود دارد اما در آنها از عملگرها و سنسورهای گسترده و سیستمهای کنترل گسترده استفاده نشده را مستثنی می‌کند.
- یک تعریف دیگر از سازه‌های هوشمند توسط کالشاو<sup>۴</sup> [43] ارائه شده: یک سازه با سنسورها و عملگرهای تعبیه شده در سازه اصلی که یک بخش لازم از مشخصه‌های رفتاری سیستم را شکل می‌دهد. گرچه این تعریف با بسیاری از کاربردهای سازه‌های هوشمند مطابقت دارد، اما با سازه‌های هوشمندی که در آن سنسور و عملگر تعبیه نشده است سازگاری ندارد.
- اسپیلمن<sup>۵</sup> [44] سازه‌های هوشمند را بعنوان سازه‌های غیر زیستی که صفات زیر را دارا می‌باشند تعریف نمود:

۱- یک هدف تعریف شده

---

<sup>1</sup> Crawley

<sup>2</sup> Active structures

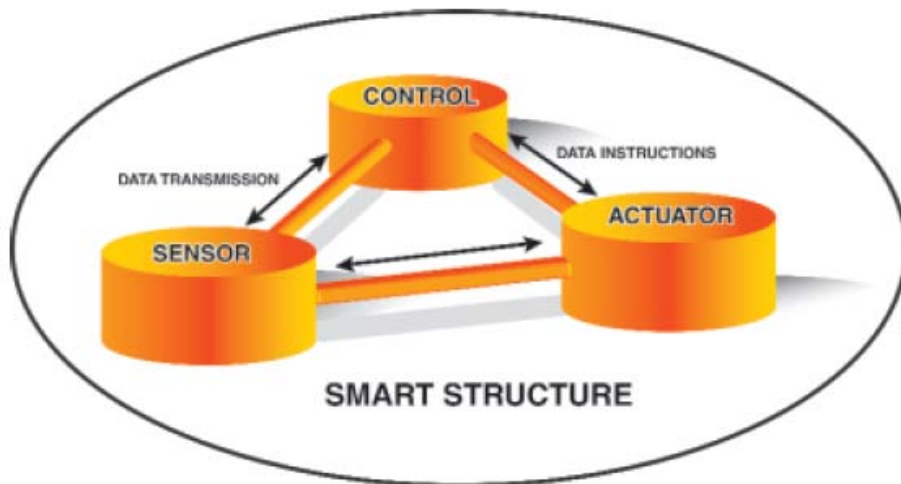
<sup>3</sup> Distributed actuator and sensor systems

<sup>4</sup> Culshaw

<sup>5</sup> Spillman

۲- وسیله و لزوم رسیدن به هدف

۳- داشتن یک الگوی زیستی برای عملکرد خود



شکل ۱-۳ اجزای تشکیل دهنده سازه هوشمند [45]

۳-۲-۱ اجزای مختلف سازه هوشمند:

یک سازه هوشمند از پنج قسمت اصلی تشکیل شده است که عبارتند از [45]:

- جمع آوری اطلاعات (حس لامسه): هدف این قسمت جمع آوری اطلاعات خام مورد نیاز برای

حس کردن و مشاهده شرایط سازه می باشد.

- انتقال اطلاعات (عصبهای حسی): هدف این قسمت انتقال اطلاعات خام به واحد کنترل و فرمان مرکزی یا محلی می‌باشد.

- واحد کنترل و فرمان (مغز): وظیفه این بخش مدیریت و کنترل کل سیستم به وسیله تحلیل اطلاعات، دستیابی به نتیجه مناسب و صدور فرمان لازم می‌باشد.

- انتقال دستورها (عصبهای محرک): وظیفه این بخش انتقال دستورها و تصمیم‌ها به اعضای سازه می‌باشد.

- وسایل عمل‌کننده (ماهیچه‌ها): این قسمت با دریافت فرمان از واحد کنترل عکس‌العمل مناسب انجام می‌دهد.

همانطور که در شکل (۱-۳) نشان داده شده، عمل احساس یک نیاز ضروری برای یک سازه هوشمند است. در سیستمهای زیستی، خروجی سنسور می‌تواند به شکلهای مختلف وجود داشته باشد. اما در سیستمهای ساخت بشر مرسومترین خروجی برای سنسور به شکل یک سیگنال الکتریکی می‌باشد. بنابراین- این یک سنسور معمولاً یک مبدل می‌باشد که یک فرم خاص از انرژی را به یک سیگنال الکتریکی تبدیل

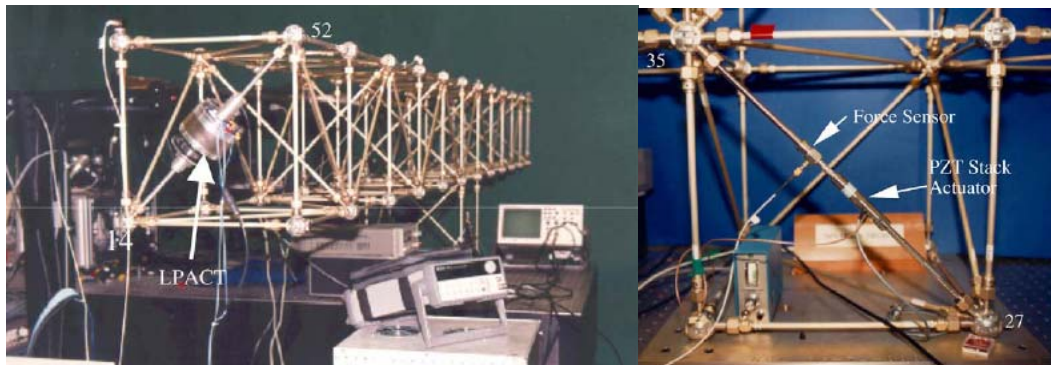
می‌کند. فیبرهای نوری محبوب ترین نوع سنسورها می‌باشند. از مواد پیزوالکتریک هم بطور گسترده به عنوان سنسور استفاده می‌شود.

همانند سنسورها، عملگرها نیز یک جزء ضروری سازه‌های هوشمند می‌باشند. یک عملگر ایجاد یک حرکت مکانیکی قابل کنترل از فرمهای دیگر انرژی می‌کند. معمولاً از مواد فرو<sup>۱</sup> در ساخت انواع عملگرها استفاده می‌شود. آلیاژهای حافظه دار مانند NiTi، مواد پیزوالکتریک، الکترواسترکتیو، و همچنین سیالات حساس به میدان الکتریکی، از جمله مواد مرسوم برای استفاده به عنوان عملگر می‌باشند.

نمونه ای از یک سازه هوشمند در شکل (۳-۲) نشان داده شده است. این سازه آزمایشگاهی که برای شبیه‌سازی اغتشاشات داخل یک فضاپیما ساخته شده است، شامل یک خرپا می‌باشد که داخل آن یک سازه هوشمند برای کنترل فعال ارتعاشات جاسازی شده است. در ابتدا یک عملگر که داخل خرپا نصب شده باعث تحریک مدهای ارتعاشی سازه می‌شود. با در نظر گرفتن یک مبدل نیرو به عنوان سنسور و یک قطعه PZT (نوعی ماده پیزوالکتریک) بعنوان عملگر، یک کنترلر برای سرکوب ارتعاشات خرپا توسط یک سازه فعال طراحی شده است.

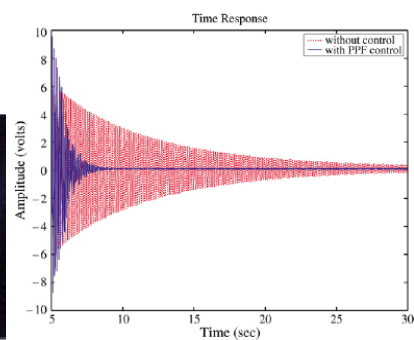
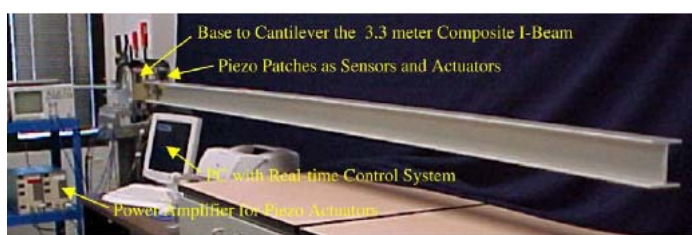
---

<sup>۱</sup> Ferroic materials



شکل ۲-۳ نمونه آزمایشگاهی یک خرابای هوشمند [46]

کاربرد دیگری از سازه‌های هوشمند که مورد توجه بسیاری از محققین می‌باشد در تیرهای یکسرگردار انعطاف پذیر است که یک نمونه آزمایشگاهی از آن در شکل (۳-۳) نشان داده شده است. در این سیستم از یک قطعه پیزوسرامیک بعنوان عملگر جهت سرکوب ارتعاشات استفاده شده که با اعمال کنترل‌رهایی از قبیل فیدبک موقعیت مثبت<sup>۱</sup>، باعث افزایش میرایی ۱۰۰٪ در سازه شده است.



شکل ۳-۳ تیر یکسرگردار هوشمند و پاسخ ارتعاشات سیستم‌های بدون کنترل و کنترل شده [46]

<sup>1</sup> Positive position feedback

## فصل ۴

### مبانی پیزوالکتریسیته و معادلات حاکم

#### ۴-۱ تاریخچه کشف پیزوالکتریسیته

معنای لغوی پیزوالکتریسیته، الکتریسیته فشار است که از لغت یونانی piezo به معنای فشار گرفته شده است. این پدیده در سال ۱۸۸۰ توسط پیر و جاکو کوری<sup>۱</sup> کشف شد. در مطالعاتی که ابتدا بر روی تورمالین<sup>۲</sup> و سپس بر روی کوارتز، نیشکر، نمک راشل<sup>۳</sup> و توپاز<sup>۴</sup> انجام شد، برادران کوری نشان دادند که در اثر فشار یا تنش اعمال شده به این مواد بار الکتریکی ایجاد می‌شود. بدین وسیله می‌توان با اعمال فشار، کسری از ولت تا چندین هزار ولت ایجاد کرد. برادران کوری پدیده پیزوالکتریسیته معکوس را پیشبینی نکردند و این پدیده در سال ۱۸۸۱ توسط لیپمن<sup>۵</sup> با استفاده از اصول ترمودینامیک استخراج شد. ولی بلافاصله برادران کوری آنرا با آزمایشات خود تأیید کردند. طی این پدیده با اعمال میدان الکتریکی می‌توان در ماده پیزوالکتریک جابجایی یا تنش ایجاد کرد.

---

<sup>1</sup> Pierre Curie and Jacques Curie

<sup>2</sup> Tourmaline

<sup>3</sup> Rochelle salt

<sup>4</sup> Topaz

<sup>5</sup> Lippmann

پس از کشف پدیده پیزوالکتریسیته تحقیقات به صورت گسترده بر روی این مواد ادامه یافت. اولین کاربرد جدی پیزوالکتریک در طی جنگ جهانی اول رخ داد. در سال ۱۹۱۷ پائول لانگوئین<sup>۱</sup> و همکاران فرانسوی اقدام به ساخت یک ردیاب اولتراسونیک زیردریایی<sup>۲</sup> کردند. این مجموعه شامل دو ترانسدیوسر متشکل از آرایش ماتریسی کریستالهای کوارتز بود که از یکی برای ارسال امواج اولتراسونیک و از دیگری برای دریافت امواج ارسال شده استفاده می‌شد. با محاسبه اختلاف زمانی موج فرستاده و برگشتی فاصله هدف اندازه گیری می‌شد.

#### ۲-۴ مبانی پیزوالکتریسیته:

پیزوالکتریک به موادی اطلاق می‌شود که دارای خاصیت زیر باشند:

هنگامیکه ماده تحت تنش یا کرنش مکانیکی قرار گیرد بار الکتریکی تولید شود (اثر پیزوالکتریک یا ژنراتور یا اثر مستقیم)، برعکس هنگامیکه یک میدان الکتریکی در جهت قطبی شده به ماده پیزوالکتریک اعمال شود باعث تولید تنش یا کرنش مکانیکی (تا ۰.۴٪ تغییر در حجم) می‌شود (اثر الکترواسترکتیو یا موتور یا اثر معکوس). از اینرو اثر مستقیم در سنسورهایی از قبیل بعضی میکروفون‌ها، شتابسنج‌ها، ردیاب-

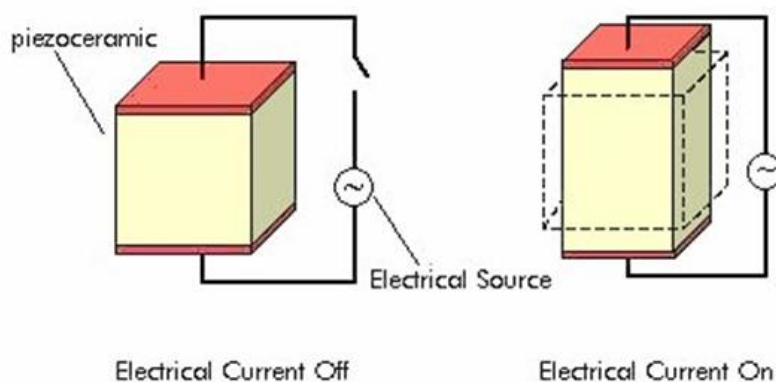
---

<sup>۱</sup> Paul Langevin

<sup>۲</sup> Ultrasonic submarine detector



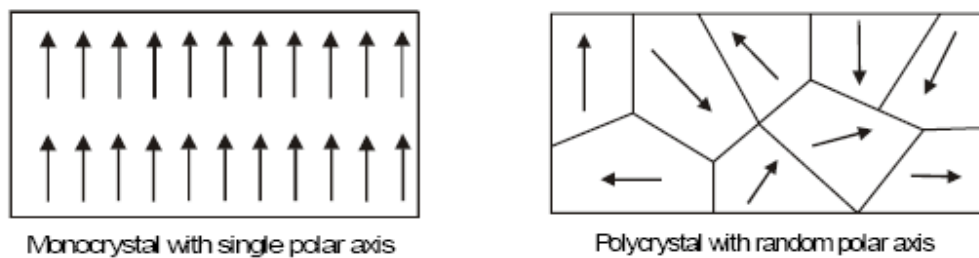
های صوتی و مبدل‌های فراصوتی مناسب است، درحالی‌که اثر معکوس در محرک‌هایی از قبیل جوشگرهای فراصوتی و موتورهای فراصوتی مناسب می‌باشد.



شکل ۴-۱ خاصیت پیزوالکتریسیته

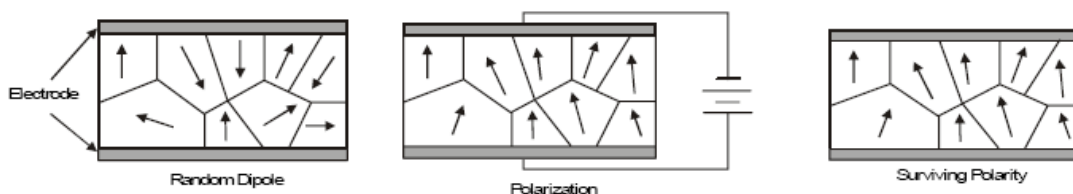
این خاصیت در کریستالهایی دیده می‌شود که مرکز تقارن هندسی ندارند مانند کوارتز ( $SiO_2$ ) و نمک راشل. برای بررسی بیشتر این موضوع ملکولهای مجزای تشکیل دهنده کریستال را در نظر می‌گیریم. هر ملکول دارای یک قطبش است، یک سر ملکول بار منفی و سر دیگر آن بار مثبت دارد و دوقطبی نامیده می‌شود. محور قطبی خطی فرضیست که از میان مرکز دو قطب ملکول می‌گذرد. در یک تک-کریستال محور قطبی تمام دوقطبی‌ها در یک جهت قرار می‌گیرند. به این کریستال متقارن گفته می‌شود چون اگر کریستال را از هر نقطه به دو تکه کنیم محورهای قطبی دو تکه در یک جهت قرار می‌گیرند که همان جهت کریستال اولیه می‌باشد. در یک چند-کریستال نواحی مختلفی با محورهای قطبی متفاوت وجود

دارد. بدین دلیل نامتقارن اتلاق می‌شوند چون هیچ نقطه ای نیست که بتوان کریستال را به دو تکه با محورهای قطبی همجهت تقسیم کرد. شکل (۲-۴) این مفهوم را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴ تک-کریستال و چند-کریستال

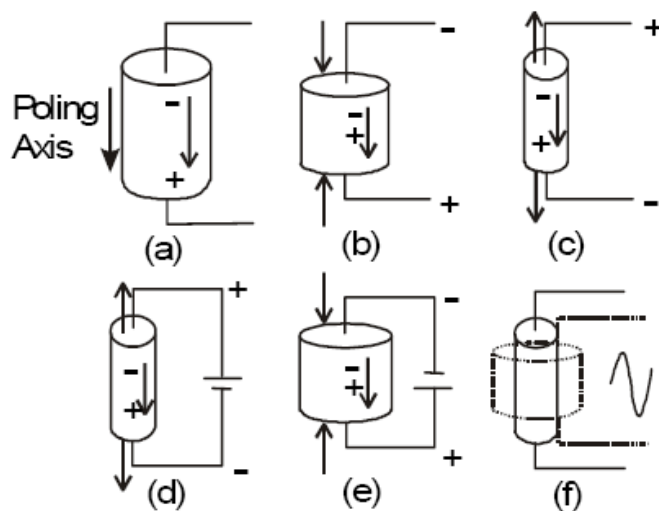
برای تولید اثر پیزوالکتریک، چند-کریستال را تحت اعمال یک میدان الکتریکی قوی حرارت می‌دهند. حرارت باعث حرکت آزادانه تر ملکولها شده و میدان الکتریکی باعث شکل گرفتن ملکولها تقریباً در یک جهت می‌شود (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۴ قطبی کردن سرامیک جهت تولید اثر پیزوالکتریک

پس از قطبی کردن، سرامیک دارای اثر پیزوالکتریک می‌باشد. شکل (۴-۴) اثر پیزوالکتریک را نشان می‌دهد. شکل (a) ماده پیزوالکتریک بدون تنش یا بار می‌باشد. اگر ماده فشرده شود، ولتاژی با پلاریته

یکسان با ولتاژ قطبی کردن، میان الکترودها پدیدار می‌شود (b). اگر ماده کشیده شود ولتاژی متضاد با پلاریته قطب دهی پدیدار می‌شود (c). برعکس اگر ولتاژ اعمال شود ماده تغییر شکل می‌دهد. ولتاژی با پلاریته متضاد با پلاریته قطب دهی باعث انبساط ماده می‌شود (d)، ولتاژ با پلاریته یکسان با پلاریته قطب دهی باعث فشرده شدن ماده می‌شود (e). همچنین اگر به ماده پیزوالکتریک سیگنال AC اعمال شود، ماده با فرکانس سیگنال ارتعاش خواهد کرد (f).



شکل ۴-۴ نمونه های مختلف اثر پیزوالکتریک

### ۳-۴ معادلات ساختاری

در این بخش ابتدا با دید الکترواستاتیکی به مواد، معادلات ساختاری یک بعدی بدست آورده می‌شود. سپس معادلات پیزوالکتریک خطی بیان می‌شود.

#### ۴-۳-۱- یک بعدی

#### ۴-۳-۳-۱- قطبی سازی [47]

رابطه میان بار الکتریکی  $\pm Q$  بوجود آمده بر روی دو صفحه رسانای موازی که مابین آنها خلاء می‌باشد و ولتاژ اعمالی  $\phi_0$  توسط پارامتری به نام ظرفیت الکتریکی بصورت  $C_0 = Q/\phi_0$  تعریف می‌شود. اگر خلاء با یک ماده عایق جایگزین شود و در همان لحظه منبع الکتریکی قطع شود، ولتاژ  $\phi < \phi_0$  بر روی ورقها مشاهده می‌شود (آزمایش فاراده، ۱۸۳۷). بار الکتریکی کلی روی ورقها تغییر نکره است که مستلزم این

است که ظرفیت الکتریکی سیستم افزایش یافته باشد  $C = Q/\phi > C_0 = Q/\phi_0$ .

ظرفیت القایی به سطح ورقها  $\Omega$  و فاصله میان آنها  $d$  بستگی دارد و برای خلاء بصورت  $C_0 = \epsilon_0 \Omega / d$  تعریف می‌شود که در آن  $\epsilon_0 = (36\pi 10^9)^{-1} F/m$  ثابت دی الکتریک یا ضریب گذردهی خلاء می‌باشد. بطور مشابه برای یک دی الکتریک دلخواه نتیجه می‌شود  $C = \epsilon \Omega / d$  که در آن  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$  مقدار مطلق ثابت دی الکتریک ماده و  $\epsilon_r$  مقدار نسبی آن می‌باشد.

برای توضیح آزمایش فاراده فرضیه مقابل در نظر گرفته شده است: "در یک دی الکتریک ایده آل، قطبش تنها توسط اعمال میدان الکتریکی ایجاد می‌شود.

اعمال یک ولتاژ  $\phi_0$  باعث ایجاد میدان الکتریکی یکنواخت  $E$  و در نتیجه پیدایش بار  $\pm Q = \pm b\Omega$  بر روی سطوح می‌شود ( $b$  چگالی بار بر روی سطوح می‌باشد). هنگامی که ماده دی‌الکتریک جایگزین می‌شود، تحت میدان الکترواستاتیکی قطبی می‌شود. دو نوع بار تشخیص داده می‌شود (شکل ۴-۵): بارهای آزاد  $Q_1$  و بارهای مقید  $Q_2$ . بارهای مقید  $Q_2$  بطور موضعی توسط بارهای قطبی شده داخل دی‌الکتریک جبران می‌شوند و تنها بارهای آزاد  $Q_1$  در ولتاژ  $\phi$  شریک هستند:

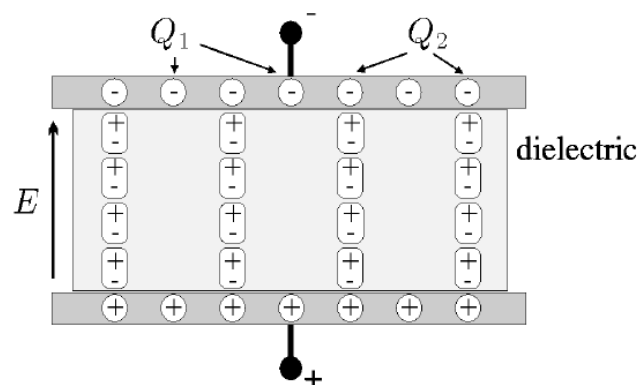
$$\phi = \frac{Q}{C} = \frac{Q}{\epsilon_r C_0} = \frac{Q_1}{C_0} \quad (1-4)$$

بار کلی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q = Q_1 + Q_2 = \frac{Q}{\epsilon_r} + Q\left(1 - \frac{1}{\epsilon_r}\right) \quad (2-4)$$

و چگالی بار:

$$b = \frac{b}{\epsilon_r} + b\left(1 - \frac{1}{\epsilon_r}\right) \quad (3-4)$$



شکل ۴-۵: بارهای موجود در یک خازن مسطح حاوی دی‌الکتریک [48]

تعاریف زیر را در نظر بگیرید:

$$D = b \quad \text{میدان جابجایی الکتریکی} \quad (4-4)$$

$$P = b\left(1 - \frac{1}{\epsilon_r}\right) \quad \text{قطبش} \quad (5-4)$$

$$E = \frac{\phi}{d} = \frac{Q}{\epsilon_r C_0} \frac{1}{d} = \frac{b}{\epsilon_r \epsilon_0} = \frac{b}{\epsilon} \quad \text{میدان الکتریکی} \quad (6-4)$$

که نتیجه می‌دهد:

$$D = \epsilon E = \epsilon_0 E + P \quad (7-4)$$

و

$$P = (\epsilon - \epsilon_0)E \quad (8-4)$$

#### ۴-۳-۳-۲ پیزوالکتریسیته [47]

در یک جسم تک بعدی بدون تنش، جابجایی الکتریکی  $D$  (بار بر واحد سطح که با واحد  $\text{Cb/m}^3$  بیان

می‌شود) توسط رابطه (۷-۴) به میدان الکتریکی  $E$  ( $\text{V/m}$ ) و قطبش  $P$  ( $\text{Cb/m}^3$ ) مربوط می‌شود.

بطور مشابه در یک جسم الاستیک تک‌بعدی که در میدان الکتریکی صفر قرار گرفته است، رابطه میان

تنش  $T$  ( $\text{N/m}^2$ ) و کرنش  $S$  بصورت زیر می‌باشد:

$$T = cS \quad (9-4)$$

که در آن  $c$  سختی ماده (مدول یانگ) می‌باشد.

در یک ماده پیزوالکتریک، معادلات ساختاری الکتریکی و مکانیکی کوپل می‌باشند. کرنش  $S$  در این مواد توسط اثر مستقیم پیزوالکتریک باعث ایجاد قطبش  $eS$  می‌گردد و قطبش کلی تولید شده بصورت زیر می‌باشد:

$$P = (\varepsilon - \varepsilon_0)E + eS \quad (10-4)$$

بطور عکس میدان الکتریکی اعمالی  $E$  تمایل به همتراز کردن دوقطبی‌ها دارد و توسط اثر معکوس باعث ایجاد تنش  $-eE$  در ماده می‌شود. معادلات کوپل شده در نهایت به فرم زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{cases} T = c^E S - eE & (a) \\ D = eS + \varepsilon^S E & (b) \end{cases} \quad (11-4)$$

در رابطه (a) ثابت پیزوالکتریک  $e$  تنش را به میدان الکتریکی  $E$  در غیاب کرنش مکانیکی ربط می‌دهد و منظور از  $c^E$  سختی در میدان الکتریکی ثابت می‌باشد. در رابطه (b)،  $e$  بار الکتریکی بر واحد سطح  $D$  را به کرنش در میدان الکتریکی صفر (الکترودهای مدار کوتاه) ربط می‌دهد.  $e$  با واحد  $\text{NV}^{-1}\text{m}^{-1}$  یا  $\text{Cb/m}^2$  بیان می‌شود.  $\varepsilon^S$  ضریب گذردهی در کرنش ثابت می‌باشد. رابطه (a) نقطه آغاز برای تدوین معادله عملگر پیزوالکتریک و رابطه (b) برای سنسور پیزوالکتریک می‌باشد.

#### ۴-۳-۲ پیزوالکتریسیته خطی [47]

یک مشخصه مواد پیزوالکتریک در قیاس با مواد هوشمند دیگر، رفتار خطی آنها در یک محدوده مشخص

می‌باشد. در پیزوالکتریسیته خطی، معادلات خطی الاستیسیته توسط ضرایب پیزوالکتریک با معادله بار

الکترواستاتیک کوپل شده است. روابط پیزوالکتریسیته خطی به شکل زیر می‌باشند:

$$\begin{aligned}\{T\} &= [c^E]\{S\} - [e]^T\{E\} \\ \{D\} &= [e]\{S\} + [\varepsilon^S]\{E\}\end{aligned}\quad (۱۲-۴)$$

یا

$$\begin{aligned}\{S\} &= [s^E]\{T\} + [d]^T\{E\} \\ \{D\} &= [d]\{T\} + [\varepsilon^T]\{E\}\end{aligned}\quad (۱۳-۴)$$

که در آن

$\{T\}$  بردار تنش

$\{S\}$  بردار تغییر شکل

$\{E\}$  بردار میدان الکتریکی

$\{D\}$  بردار جابجایی الکتریکی

$[c]$  و  $[s]$  ماتریسهای ضرایب الاستیسیته

$[e]$  ماتریس ضرایب دی الکتریک



$[d]$  و  $[e]$  ماتریس ضرایب پیزوالکتریک

می‌باشند و روابط زیر برقرار می‌باشد:

$$[c^E][s^E] = I_6 \quad (۱۴-۴)$$

$$[e] = [d][c^E] \quad (۱۵-۴)$$

المان  $d_{ij}$  در ماتریس  $[d]$  بیانگر کوپلینگ میان میدان الکتریکی در جهت  $i$  و کرنش در جهت  $j$  می‌باشد.

بدلیل تقارن‌های کریستال، ماتریسهای کوپلینگ پیزوالکتریک  $[e]$  و  $[d]$  ممکن است تنها تعداد کمی

المان غیر صفر داشته باشند. مثالهایی از ماتریسهای کوپلینگ پیزوالکتریک بصورت زیر می‌باشد:

$$\text{Quartz} \quad [d]_{\text{Quartz}} = \begin{bmatrix} -2.3 & -2.3 & 0 & -0.67 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.67 & 4.6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} 10^{-12} \text{ m/V}$$

$$\text{PZT} \quad [d]_{\text{PXE5}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 515 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 515 & 0 & 0 \\ -175 & -175 & 362 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} 10^{-12} \text{ m/V}$$

$$\text{PVF}_2 \quad [d]_{\text{Solef}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 23 & 3 & -33 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} 10^{-12} \text{ m/V}$$

#### ۴-۴- فرمولبندی المان محدود [48]

این بخش مروری است بر روند تبدیل معادلات ساختاری پیزوالکتریک خطی (۴-۱۲) به فرم المان محدود. فرمولبندی المان محدود پیزوالکتریکها با استفاده از قانون هامیلتون که به صورت زیر بیان می-شود انجام گرفته است:

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (K_i - \Pi) dt = 0 \quad (16-4)$$

که  $K_i$  انرژی جنبشی و  $\Pi$  فانکشنال انرژی می باشد و بصورت زیر تعریف می شود:

$$\Pi = \int_V G dV - \int_V u^T P_b dV - \int_{S_1} u^T P_s dS - u^T P_c + \int_{S_2} \phi \sigma dS \quad (17-4)$$

که در آن  $G$  پتانسیل و  $U, P_b, P_s, P_c$  بترتیب بردارهای جابجایی و نیروهای حجمی، سطحی و متمرکز می باشند.  $\phi$  و  $\sigma$  پتانسیل الکتریکی و بار سطح می باشند. انرژی جنبشی  $K_i$  در رابطه (۴-۱۶) بصورت زیر تعریف می شود:

$$K_i = \frac{1}{2} \int_V \rho \dot{u}^T \dot{u} dV \quad (18-4)$$

که در آن  $\rho$  چگالی جرم و  $\dot{u}$  بردار سرعت می باشد. تغییرات مجازی در اصل هامیلتون بصورت زیر می-باشد:

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} K_i dt = - \int_{t_1}^{t_2} \int_V \rho \delta u^T \dot{u} dV dt \quad (19-4)$$

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} \Pi dt = - \int_{t_1}^{t_2} \left[ \delta \int_V G dV - \delta \int_V u^T P_b dV - \delta \int_{S_1} u^T P_s dS - \delta u^T P_c + \delta \int_{S_2} \phi \sigma dS \right] dt \quad (20-4)$$

که تغییرات مجازی در پتانسیل  $G$  بصورت زیر می باشد:

$$\delta G = \delta S^T T - \delta E^T D \quad (21-4)$$

تقریب المان محدود برای جابجایی و پتانسیل الکتریکی بصورت زیر فرض شده است:

$$\begin{aligned} u_{el} &= N_u u_i \\ \phi_{el} &= N_\phi \phi_i \end{aligned} \quad (22-4)$$

در روابط فوق ماتریسهای  $N_u$  و  $N_\phi$  ماتریسهای تابع شکل برای میدانهای مکانیکی و الکتریکی، و  $u_i$  و

$\phi_i$  بردارهای گره‌ای<sup>1</sup> جابجایی و پتانسیل الکتریکی می باشند. اندیس  $el$  در معادلات فوق به معنای المان

بکار رفته است. با مربوط ساختن کرنش به جابجایی و میدان الکتریکی به پتانسیل الکتریکی داریم:

$$\begin{aligned} S_{el} &= L_u u_{el} = [L_u N_u] u_i = B_u u_i \\ E_{el} &= -\nabla \phi_{el} = -[\nabla N_\phi] \phi_i = -B_\phi \phi_i \end{aligned} \quad (23-4)$$

که  $L_u$  ماتریس اوبراتور دیفرانسیل می باشد.

با بکاربری روابط فوق در اصل هامیلتون معادلات المان محدود سیستم بصورت زیر بدست می آید:

---

<sup>1</sup> Nodal

$$\begin{cases} M_{uu} \ddot{u} + K_{uu} u + K_{u\phi} \phi = F \\ K_{\phi u} u + K_{\phi\phi} \phi = G \end{cases} \quad (24-4)$$

که در آن  $u, \phi, F$  و  $G$  بردارهای کلی گره‌ای جابجایی<sup>۱</sup>، پتانسیل الکتریکی، نیرو و بار اعمالی می‌باشند. ماتریسهای  $M_{uu}$ ،  $K_{uu}$ ،  $K_{u\phi}$  و  $K_{\phi\phi}$  بترتیب ماتریس جرم، سختی، کوپلینگ پیزوالکتریک و ظرفیت الکتریکی می‌باشند. ماتریسها و بردارهای المانی در رابطه فوق بدین صورت تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} [M_{uu}]_{el} &= \int_{V_{el}} \rho N_u^T N_u dV \quad , \quad [K_{uu}]_{el} = \int_{V_{el}} B_u^T c B_u dV \quad (25-4) \\ [K_{u\phi}]_{el} &= \int_{V_{el}} B_u^T e B_\phi dV \quad , \quad [K_{\phi\phi}]_{el} = \int_{V_{el}} B_\phi^T \epsilon B_\phi dV \\ G_{el} &= - \int_{S_{2el}} N_\phi^T \sigma dS \quad , \quad F_{el} = \int_{V_{el}} N_u^T P_b dV + \int_{S_{1el}} N_u^T P_s dS + N_u^T P_c \end{aligned}$$

#### ۴-۵ المانهای پیزوالکتریک در ANSYS

برای مواد پیزوالکتریک بطور کلی در هر گره چهار درجه آزادی تعریف می‌شود: سه درجه آزادی جابجایی (UX، UY و UZ) و یک درجه آزادی ولتاژ. برای هر درجه آزادی یک نیروی عکس‌العمل وجود دارد: FX، FY و FZ برای جابجایی و بار الکتریکی Q برای ولتاژ. در این مورد باید از آنالیز میدانهای کوپله<sup>۲</sup> استفاده

<sup>1</sup> Global nodal displacement vector

<sup>2</sup> Coupled field analysis

شود تا برهم کنش میان تنش اعمالی و میدان الکتریکی مدل شود. در ANSYS سه المان میدانهای

کوپله برای آنالیز پیزوالکتریک وجود دارد (شکل ۴-۶):

*SOLID5* - المان جامد سه بعدی میدانهای کوپله

*PLANE13* - المان جامد دو بعدی میدانهای کوپله

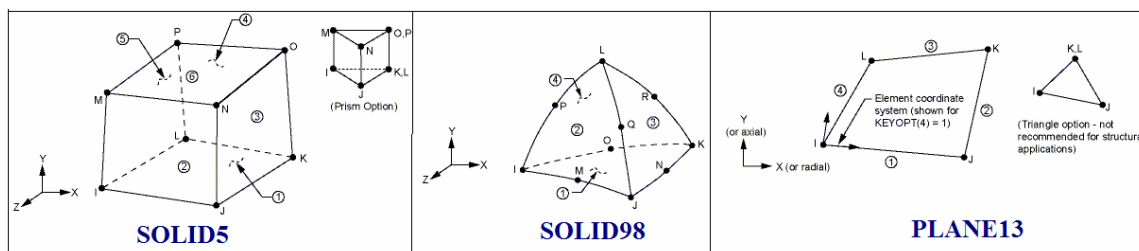
*SOLID98* - المان جامد چهار وجهی میدانهای کوپله

انتخاب المان مناسب از میان این سه المان بستگی به هندسه نمونه‌ای که مدل می‌شود دارد. به عنوان

مثال یک المان جامد چهار وجهی میدانهای کوپله، برای المان بندی یک جسم کروی مناسبتر است،

درحالیکه *SOLID5* که به شکل مکعب مستطیل است برای گسسته سازی یک مدل مکعب مستطیل

مناسب است.



شکل ۴-۶ المانهای پیزوالکتریک در ANSYS

## فصل ۵

### سرکوب ارتعاشات سازه‌ها توسط مدار شانت انفعالی پیزوالکتریک

#### ۵-۱ مقدمه

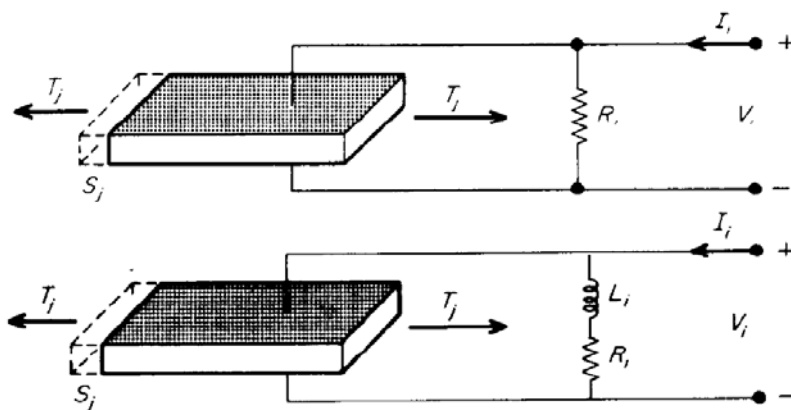
راه کار مدار شانت پیزوالکتریک اولین بار در سال ۱۹۹۱ توسط هاگود و ون فلاتو پیشنهاد شد و همچنان بعنوان استاندارد طراحی مدار شانت پیزوالکتریک شناخته می‌شود. هاگود نتایج آزمایشهای خود بر روی دو مدار شانت مختلف را بدین صورت بیان کرد [1]:

”مدل کلی شانت به دو مدار شانت اختصاص یافته است: مدار اول با تنها یک مقاومت و مدار دیگر با یک مقاومت و یک القاگر. در شانت مقاومتی، خواص ماده مانند مواد ویسکو الاستیک وابستگی به فرکانس از خود نشان می‌دهد، اما خیلی سخت‌تر و مستقل‌تر از دما عمل می‌کند. مدار شانت با یک مقاومت و یک القاگر ایجاد رزونانس الکتریکی می‌کند که می‌توان آنرا با توجه به پاسخهای سازه به روشی مشابه جاذب ارتعاشات بصورت بهینه میزان کرد.”

یک مدار شانت رزونانس از سه عضو تشکیل شده است: یک خازن، یک مقاومت و یک القاگر. مدار مقاومت-القاگر (R-L) که بصورت سری یا موازی بهم متصل می‌باشند، دینامیکی مشابه جاذب ارتعاشات

مکانیکی دارد. با پیروی از اصل جاذب ارتعاشات مکانیکی، مدار رزونانس باید به درستی میزان شود تا

انرژی ارتعاشات مکانیکی مد ارتعاشی مورد نظر سیستم را جذب کند.



شکل ۱-۵ a- مدار شانت مقاومتی b- مدار شانت رزونانس [1]

همانطور که در شکل (۲-۲) نشان داده شده، دو ترمینال خارجی PZT که بعنوان یک خازن مدلسازی

شده است (المان پیزوالکتریک از لحاظ الکتریکی مانند یک خازن و یک منبع ولتاژ عمل می نماید)، به دو

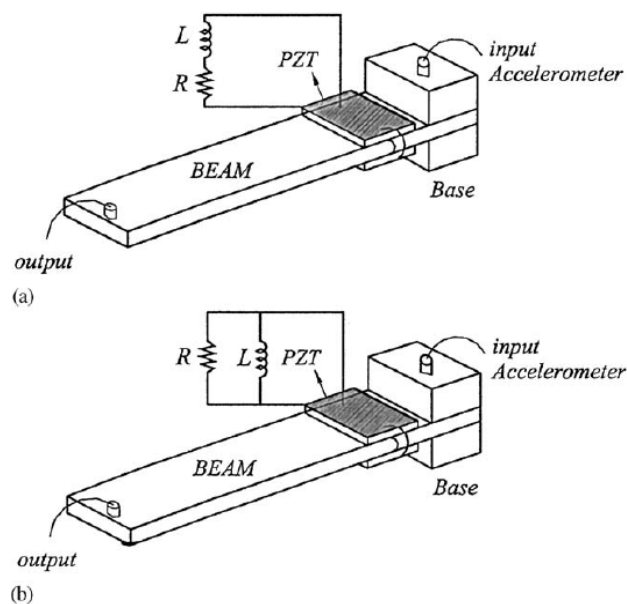
صورت بهم متصلند: (a) مدار شانت با انشعاب مقاومت و القاگر سری (b) مدار شانت با انشعاب مقاومت و

القاگر موازی. المان پیزوالکتریک برای تبدیل انرژی مکانیکی حاصل از سازه مرتعش به انرژی الکتریکی

توسط اثر مستقیم پیزوالکتریک استفاده می شود. این انرژی الکتریکی بصورت گرمای ژول در مقاومت

شانت تلف می شود و هنگامی تأثیر آن بیشتر است که فرکانس رزونانت الکتریکی با فرکانس مکانیکی

مطابقت داشته باشد. در رزونانس، جریانهای هرز میان LC یکدیگر را خنثی می‌کنند و فاز میان ولتاژ و جریان صفر می‌شود. در نتیجه هنگام رزونانس ضریب توان یک می‌شود.



شکل ۲-۵ مدارهای شانت (a) سری (b) موازی [49]

در این فصل پس از بدست آوردن معادلات حاکم بر سیستمهای شانت انفعالی سری که معادلات آن اولین بار توسط هاگود ارائه شد، این سیستمها را توسط روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار ANSYS مدلسازی نموده، با استفاده از روابط میزان سازی ارائه شده توسط هاگود مقدار مقاومت و اندوکتانس بهینه مدار شانت محاسبه شده و تأثیر مدارهای شانت انفعالی در کاهش ارتعاشات سازه‌های انعطاف پذیر توسط روش المان محرود بررسی می‌شود.



## ۵-۲ مدل‌سازی ریاضی مدارهای شانت القایی رزونانس

مدار شانت پیزوالکتریک ایجاد یک ماتریس میرایی اضافه می‌کند که می‌توان آنرا به معادله حرکت سازه افزود. با در نظر گرفتن معادلات یک جفت سنسور/عملگر و افزودن ماتریس میرایی اضافه به آن داریم [49]:

معادله عملگر:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f_{ext} + \theta V_{SH} \quad (۱-۵)$$

معادله سنسور:

$$q = \theta^T x + C_p V_{SH} \quad (۲-۵)$$

که در آنها  $M$ ،  $C$  و  $K$  بترتیب ماتریسهای جرم، میرایی و سختی سیستم تیر/پیزو می‌باشند که در میدان الکتریکی ثابت (مثلاً مدار کوتاه) محاسبه شده‌اند. سختی سیستم شامل سختی سازه اصلی و سختی قطعه پیزوالکتریک مدار کوتاه می‌باشد، یعنی  $K = K_S + K_P^E$ . در معادله سنسور،  $q$  ماتریس بار پیزوالکتریک و  $\theta$  ماتریس کوپلینگ الکترومکانیکی می‌باشد. این معادله سنسور/عملگر پیزوالکتریک، اثرات کوپلینگ دینامیکی میان یک سازه و یک شبکه الکتریکی بواسطه اثر پیزوالکتریک را در نظر می‌گیرد. معادله جریان

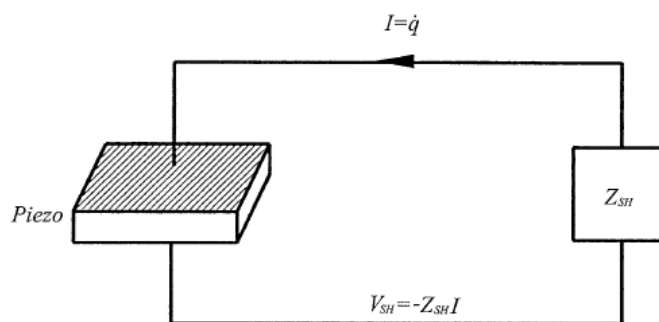
را می‌توان با مشتق‌گیری از معادله سنسور (۲-۵) بدست آورد. با جایگزینی آن در معادله ولتاژ شانت

(شکل ۳-۵)، معادله ولتاژ شانت بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} V_{SH} &= -Z_{SH} I \\ &= -Z_{SH} (\theta^T \dot{x} + C_P^T \dot{V}_{SH}) \\ &= -Z_{SH} \theta^T s x - Z_{SH} C_P s V_{SH} \end{aligned} \quad (۳-۵)$$

که در آن  $s$  پارامتر لاپلاس می‌باشد. بنابر این ولتاژ شانت جدید بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$V_{SH} = \frac{-Z_{SH} \theta^T s x}{1 + Z_{SH} C_P s} \quad (۴-۵)$$



شکل ۳-۵ جریان فیدبک PZT حاصل از امپدانس شانت

با جایگزین کردن رابطه (۴-۵) در معادله عملگر (۱-۵)، معادله حرکت سیستم شانت شده را می‌توان با

اضافه کردن ماتریس میرایی شانت در حوزه لاپلاس بدست آورد:

$$Ms^2 x + \left( C + \frac{Z_{SH} \theta \theta^T}{1 + Z_{SH} C_P s} \right) s x + K x = f_{ext}(s) \quad (۵-۵)$$

با تقسیم هر دو طرف رابطه (۵-۵) بر سختی سیستم،  $K$ ، می‌توان رابطه (۴-۵) را بشکل زیر بازنویسی کرد:

$$\left( \frac{M}{K} s^2 + \frac{C}{K} s + 1 + \frac{\theta\theta^T}{C_p K} \frac{Z_{SH} C_p s}{1 + Z_{SH} C_p s} \right) x(s) = \frac{f_{ext}(s)}{K} \quad (۶-۵)$$

برای بدست آوردن یک تابع تبدیل موقعیت<sup>۱</sup> از سیستم شانت شده، پارامترهای زیر استفاده شده است:

$$\begin{aligned} \omega_n^E &= \sqrt{\frac{K}{M}} \\ \gamma &= \frac{s}{\omega_n^E} \\ \frac{C}{K} s &= 2\xi\gamma \\ \hat{Z} &= Z_{SH} C_p s \\ K_{ij}^2 &= \frac{\theta\theta^T}{C_p K} \end{aligned} \quad (۷-۵)$$

که در آن  $\omega_n^E$  یک فرکانس طبیعی از سیستم مکانیکی با پیزوالکتریک مدار کوتاه<sup>۲</sup> می‌باشد،  $\gamma$  یک فرکانس بی بعد و  $K_{ij}$  یک ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی تعمیم یافته<sup>۳</sup> می‌باشد. با استفاده از پارامترهای تعریف شده فوق، رابطه (۴-۵) را می‌توان به فرم زیر بازنویسی نمود:

<sup>1</sup> Position transfer function

<sup>2</sup> Short circuited piezoelectric material

<sup>3</sup> Generalized electromechanical coupling coefficient

$$\left( \gamma^2 + 2\xi\gamma + 1 + K_{ij}^2 \frac{\hat{Z}}{1+\hat{Z}} \right) x = x_{st} \quad (8-5)$$

تابع تبدیل یک سیستم مکانیکی با ماده پیزوالکتریک شانت شده بصورت زیر بدست می آید:

$$\frac{x}{x_{st}} = \frac{1+\hat{Z}}{(1+\hat{Z})(\gamma^2 + 2\xi\gamma + 1) + K_{31}^2 Z} \quad (9-5)$$

### ۵-۲-۱ مدار شانت با مقاومت و القاگر سری

امپدانس یک مدار  $R-L$  سری با توجه به شکل (۴-۵) بصورت زیر بیان می شود:

$$Z_{SH}^{se} = Ls + R \quad (10-5)$$

امپدانس رزونانس تعمیم یافته برای یک شانت سری  $R-L$  بصورت زیر داده شده است:

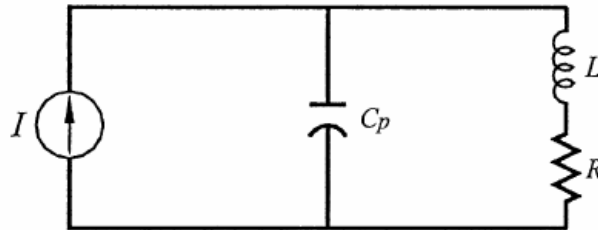
$$\begin{aligned} \hat{Z} &= Z_{SH}^{se} C_p s = \frac{S}{\omega_n^E} Z_{SH}^{se} C_p \omega_n^E \\ &= \gamma^2 LC_p (\omega_n^E)^2 + RC_p \omega_n^E \gamma = \frac{1}{\delta^2} (\gamma^2 + r\gamma\delta^2) \end{aligned} \quad (11-5)$$

که در آن  $\delta = 1/\sqrt{LC_p (\omega_n^E)^2}$  و  $r = RC_p \omega_n^E$ . پارامتر  $\delta$  نسبت میزان سازی بی بعد می باشد، بدین

معنی که فرکانس رزونانس الکتریکی در محدوده یک فرکانس رزونانس مکانیکی میزان می شود. پارامتر  $r$

نسبت میزان سازی اتلاف می‌باشد. با جایگزین نمودن  $\hat{Z}$  در معادله (۹-۵) فرم نهایی تابع تبدیل برای یک سیستم با مدار شانت  $R-L$  سری بصورت زیر بدست می‌آید [49]:

$$\frac{x}{x_{st}} = \frac{\delta^2 + r\gamma\delta^2 + \gamma^2}{(\delta^2 + r\gamma\delta^2 + \gamma^2)(\gamma^2 + 2\xi\gamma + 1) + K_{31}^2(\gamma^2 + r\gamma\delta^2)} \quad (12-5)$$



شکل ۴-۵ مدار شانت  $R-L$  سری

### ۲-۲-۵ بهینه سازی پارامترهای مدار شانت

پیش از اجتماع مدار  $R-L$  با سازه، پارامترهای طراحی مدار شانت باید توسط رابطه (۱۲-۵) بطور بهینه محاسبه شوند. اولین گام برای این عمل، ساختن نقاط ثابت<sup>۱</sup> در تابع تبدیل می‌باشد. درگام بعدی باید شیب تابع تبدیل را در این نقاط ثابت برابر صفر قرار داد. با این روش می‌توان پارامتر میزان سازی بهینه<sup>۲</sup>

( $\delta^*$ ) و میرایی مدار بهینه<sup>۳</sup> ( $r^*$ ) را بصورت زیر بدست آورد [11]:

$$\delta^* = \sqrt{1 + K_{ij}^2} \quad (13-5)$$

<sup>1</sup> Fixed points

<sup>2</sup> Optimum tuning parameter

<sup>3</sup> Optimal circuit damping

$$r^* = \sqrt{2}K_{ij} / (1 + K_{ij}^2)$$

و مقادیر بهینه القاگر و مقاومت بصورت زیر داده شده است:

$$L^* = 1 / \delta^{*2} C_p^S \omega_n^2, \quad (14-5)$$

$$R^* = r^* / C_p^S \omega_n$$

ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی تعمیم یافته  $K_{ij}$  در رابطه (5-13) بصورت زیر قابل محاسبه است [1]:

$$K_{ij}^2 = [(\omega_n^D)^2 - (\omega_n^E)^2] / (\omega_n^E)^2 \quad (15-5)$$

در رابطه بالا،  $\omega_n^D$  و  $\omega_n^E$  فرکانسهای طبیعی مد ارتعاشی مورد نظر بترتیب در وضعیتهای ماده

پیزوالکتریک مدار باز و ماده پیزوالکتریک مدار کوتاه می‌باشند. مقادیر  $\omega$  در روابط فوق بر حسب  $rad/s$

جایگذاری می‌شود.

### ۳-۵ مدل سازی المان محدود سازه‌های پیزوالکتریک با مدار شانت $R-L$

معادلات حرکت المان محدود برای یک سازه با وصله های پیزوالکتریک به عنوان سنسور و عملگر، که با

اعمال اصل هامیلتون بر این سیستمها بدست آمده است، به فرم زیر داده شده است [50]:

$$(M_S + M_P)\ddot{u} + (K_S + K_P)u - \theta\phi = B_f f \quad (۱۶-۵)$$

و

$$\theta^T u + C_p \phi = B_q q \quad (۱۷-۵)$$

که در آنها  $M_S$ ،  $M_P$ ،  $K_S$ ،  $K_P$  بترتیب ماتریسهای سختی و جرم سازه اصلی و قطعات پیزوالکتریک می‌باشند.  $u$  و  $\phi$  بردارهای جابجایی و پتانسیل الکتریکی گره‌ای،  $f$  و  $q$  بردارهای نیرو و بار اعمالی، و  $B_f$  و  $B_q$  ماتریسهای تبدیل برای نیروی  $f$  و بار الکتریکی  $q$  می‌باشند، و  $\theta$  ماتریس کوپلینگ الکترومکانیکی است.

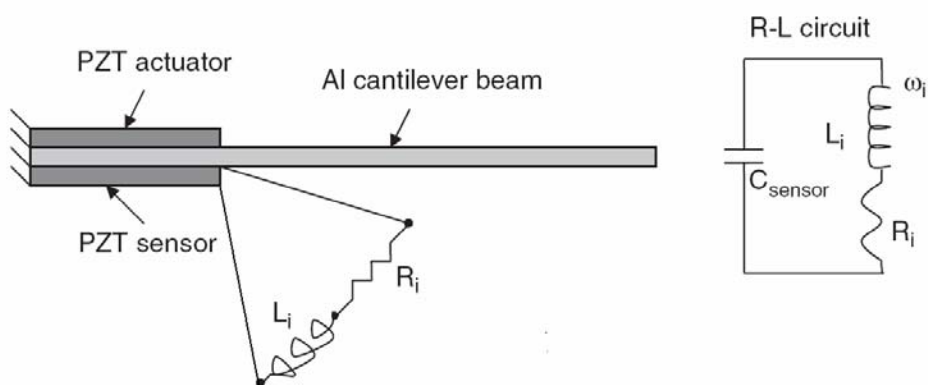
- معادله (۱۶-۵) بردار نیروهای تحریک کننده  $f$  را با بردار جابجایی مکانیکی  $u$  در بخش تیر/عملگر که بصورت الکترومکانیکی با بردار پتانسیل الکتریکی  $\phi$  عملگر پیزوالکتریک کوپل شده است، توازن می‌کند.

- معادله (۱۷-۵) بردار بارهای الکتریکی  $q$  (که توسط مدار شانت به سنسور القا می‌شود) را با بردار جابجایی  $u$  در بخش تیر/سنسور، که بصورت الکترومکانیکی با بردار پتانسیل الکتریکی  $\phi$  حاصل شده در سنسور کوپل شده است، توازن می‌کند.

بنابراین با ترکیب دو معادله فوق می‌توان به حل حقه بسته بردار جابجایی  $u$  کل سیستم عملگر/تیر/سنسور تحت میرایی حاصل از مدار شانت دست یافت.

#### ۴-۵ بررسی موردی

برای بررسی تأثیر مدار شانت پیزوالکتریک بر کاهش ارتعاشات سازه‌های انعطاف پذیر، یک تیر یکسرگیردار با یک جفت سنسور/عملگر متصل به آن و یک مدار شانت  $R-L$  سری متصل به سنسور همانند شکل (۵-۵) در نظر گرفته شده است. این سازه از یک تیر آلومینیمی به ابعاد  $200\text{mm} \times 25.4\text{mm}$  و یک جفت سنسور/عملگر  $PZT-5H$  به ابعاد  $(45\text{mm} \times 25.4\text{mm} \times 0.26\text{mm})$  تشکیل شده است.



شکل ۵-۵ سازه در نظر گرفته شده برای آنالیز و مدار الکتریکی معادل



از عملگر برای تحریک سازه در مجاورت فرکانسهای طبیعی آن استفاده می‌شود. بدین منظور از یک ولتاژ هارمونیک با دامنه ۲۰ ولت و فرکانسهای مجاور مدهای ارتعاشی برای تحریک عملگر استفاده شده است. سنسور پیزوالکتریک جابجایی‌های مکانیکی تیر را به خروجی ولتاژ تبدیل می‌کند. در این هنگام سیستم شانت که با مدار الکتریکی  $R-L$  سری جایگزین شده است، با القاء یک جریان الکتریکی به سنسور که منجر به تغییر ولتاژ سنسور خواهد شد، نسبت به ارتعاشات تیر واکنش نشان می‌دهد.

#### ۵-۴-۱ خواص ماده پیزوالکتریک

خواص مواد پیزوالکتریک که موادی اورتوتروپیک می‌باشند توسط سه ماتریس الاستیسیته ( $c$ )، دی-الکتریک ( $\epsilon$ ) و پیزوالکتریک ( $e$ ) تعیین می‌شود. این ماتریسها برای  $PZT - 5H$  بصورت زیر تعریف شده

است:

$$c = \begin{bmatrix} 126 & 79.5 & 84.1 & 0 & 0 & 0 \\ & 126 & 84.1 & 0 & 0 & 0 \\ & & 117 & 0 & 0 & 0 \\ \text{symmetric} & & & 23.3 & 0 & 0 \\ & & & & 19.23 & 0 \\ & & & & & 21.23 \end{bmatrix} \text{ GPa}$$

ماتریس الاستیسیته:

$$\epsilon = \begin{bmatrix} 1.503 & 0 & 0 \\ 0 & 1.503 & 0 \\ 0 & 0 & 1.3 \end{bmatrix} \times 10^{-8} \text{ CV/m}$$

ماتریس دی‌الکتریک:

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 17 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 17 & 0 & 0 \\ -6.55 & -6.55 & 23.3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} F/m^2 \quad \text{ماتریس پیزوالکتریک:}$$

پارامتر دیگری که در طراحی مدار شانت دخیل می‌باشد، ظرفیت الکتریکی سنسور پیزوالکتریک (در

کرش ثابت) است که مقدار آن توسط امپدانس سنج  $C_{p3}^S = 100 nF$  بدست آمده است [49].

#### ۵-۴-۲ مدل المان محدود سازه در ANSYS

با توجه به المان های پیزوالکتریک موجود در ANSYS می‌توان سازه مورد نظر را مدل سازی نمود. بدین

منظور از المان *SOLID5* که یک المان سه بعدی پیزوالکتریک است برای ساخت سنسور و عملگر

پیزوالکتریک، و از المان *SOLID45* که یک المان جامد سه بعدی است برای ساخت تیر آلومینیمی

استفاده شده است. برای ساخت مقاومت و القاگر مدار R-L سری از دو المان *CIRCU94* استفاده شده

است. برای گره‌های سر گیردار تیر، شرط مرزی جابجایی صفر در هر سه جهت اعمال شده است. مدل

المان محدود سازه در شکل (۵-۶) نشان داده شده است.

بمنظور کاهش دامنه ماکزیمم، یعنی پیکهای رزونانس در منحنی پاسخ فرکانسی، و نزدیک کردن آنالیز

المان محدود به شرایط واقعی، میرایی مکانیکی ریلی در نظر گرفته شده است که توسط ماتریس *C*

حاصل از جمع جملات وابسته به ماتریس جرم *M* و ماتریس سختی *K* بدست می‌آید:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (۱۸-۵)$$

برای سازه مورد نظر،  $\alpha = 10$  و  $\beta = 5 \times 10^{-7}$  در نظر گرفته شده است.

با استفاده از آنالیز مودال المان محدود، فرکانسهای طبیعی و شکل مد سازه برای شش مد اول ارتعاشی محاسبه شده است. همانطور که از شکل (شکل ۵-۷) پیداست، مدهای اول، دوم، چهارم و پنجم، خمشی می‌باشند.

برای یافتن پاسخ فرکانسی سازه در مجاورت مدهای ارتعاشی خمشی از آنالیز هارمونیک استفاده شده است. به منظور تحریک سازه، یک ولتاژ هارمونیک (سینوسی) با دامنه 20 ولت به گره‌های سطح بیرونی عملگر پیزوالکتریک اعمال شده و گره‌های سطح داخلی آن با ولتاژ صفر مقید شده است. بدین ترتیب یک گشتاور خمشی هارمونیک در نزدیکی سر گیردار توسط عملگر به تیر وارد شده است. برای اتصال مدار شانت R-L به سطوح PZT، گره‌های دو سر مدار شانت با گره‌های سطوح PZT برای درجه آزادی ولتاژ کوپل شده است (شکل ۵-۶).

شکل (۸-۵) پاسخ فرکانسی سازه بر حسب جابجایی نوک تیر را پیش از اتصال مدار شانت نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که سازه در چهار مد خمشی اول نیاز به کنترل دارد. با توجه به

رابطه (۵-۱۴) مقادیر بهینه مقاومت و القاگر در مدار شانت تابع فرکانسهای طبیعی سازه می‌باشند. بنابر

این در هر زمان لازم است که پارامترهای مدار شانت نسبت به مد ارتعاشی هدف میزان شوند.

با در نظر گرفتن مد دوم به عنوان مد هدف، یعنی با فرض  $\omega_n = 127.3 \text{ Hz}$ ، با استفاده از روابط ارائه شده

در بخش ۵-۲-۲ می‌توان مدار شانت را برای مد خمشی دوم میزان نمود. در ابتدا مقدار ضریب کوپلینگ

الکترومکانیکی تعمیم یافته  $K_{31}$  محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه مقادیر فرکانس طبیعی در مد دوم

برای سنسور پیزوالکتریک مدار باز و مدار کوتاه توسط آنالیز مودال المان محدود برابر  $\omega_n^D = 129.42 \text{ Hz}$

و  $\omega_n^E = 127.28 \text{ Hz}$  محاسبه شده است، با استفاده از رابطه (۵-۱۵) مقدار ضریب کوپلینگ

الکترومکانیکی تعمیم یافته در مد معکوس برابر  $K_{31} = 0.184$  بدست می‌آید.

در گام بعدی مقادیر بهینه نسبت میزان سازی  $\delta^*$  و میزان سازی اتلاف  $r^*$  توسط رابطه (۵-۱۳) برابر

$\delta^* = 1.018$  و  $r^* = 0.252$  بدست می‌آید. در نهایت رابطه (۵-۱۴) مقادیر بهینه مقاومت و القاگر برای مد

خمشی دوم را برابر  $R^* = 3147.3 \Omega$  و  $L^* = 15.1 \text{ H}$  بدست می‌دهد. بدین ترتیب امپدانس بهینه مدار

شانت در مد خمشی دوم بصورت:

$$Z_{shunt} = j\omega L + R = j1.2 \times 10^4 + 3.1473 \times 10^3$$

و امپدانس سنسور پیزوالکتریک بصورت زیر می‌باشد:

$$Z_{sensor} = 1/(j\omega C_P) = \frac{1}{j8 \times 10^{-5}}$$

شکل (۵-۹) پاسخ فرکانسی سازه را در مجاورت مد ارتعاشی دوم سازه نشان می‌دهد. در این نمودار از

مقدار بهینه اندوکتانس یعنی از  $L^* = 15.1H$  استفاده شده است و پاسخ فرکانسی سازه برای مقادیر

مختلف مقاومت ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بطور کلی با افزایش مقاومت مدار شانت،

دامنه ارتعاشات در نزدیکی فرکانس طبیعی افزایش می‌یابد و هنگامی که به بی نهایت میل می‌کند (یعنی

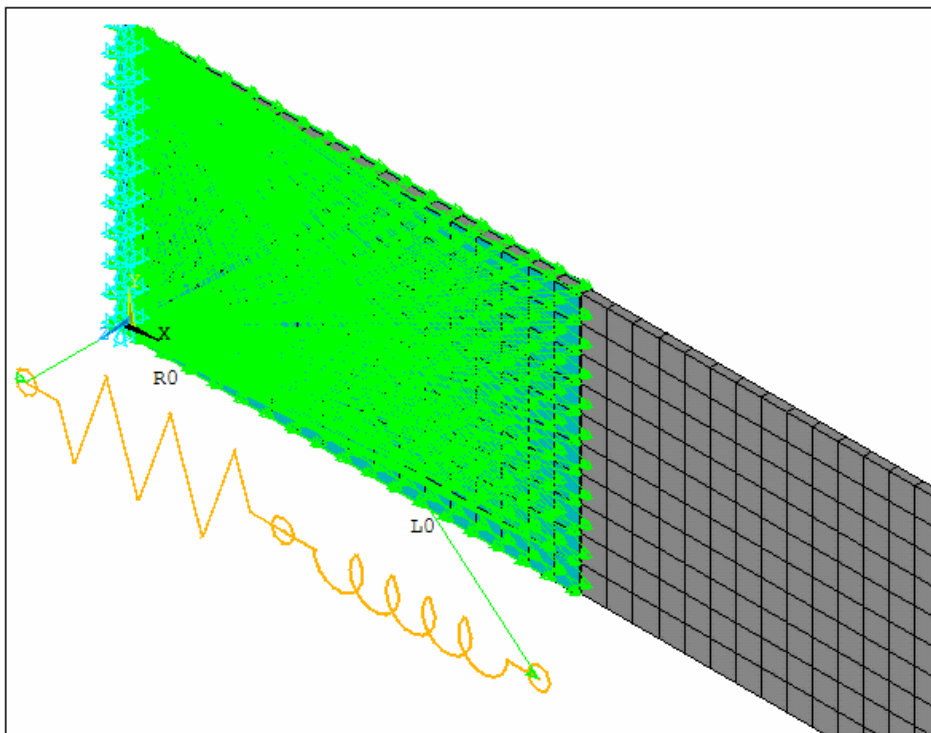
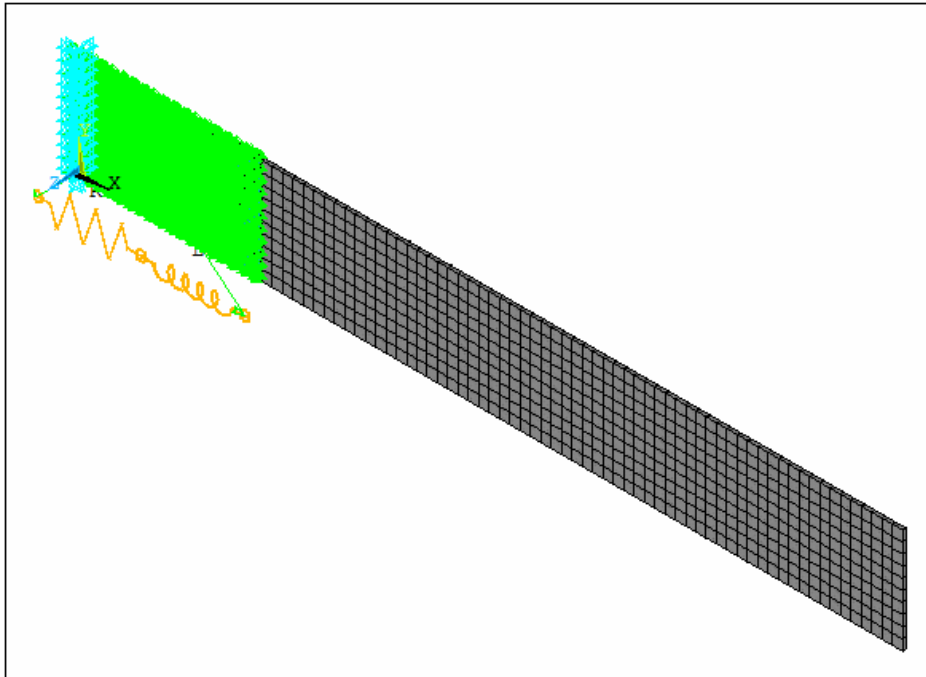
مدار شانت باز) دامنه ارتعاشات بیشترین مقدار را داراست. هنگامی که منحنی پاسخ فرکانسی در مجاورت

فرکانس طبیعی بشکل مسطح و افقی باشد (منحنی شماره (۳) از شکل (۵-۹))، مقدار مقاومت بهینه می-

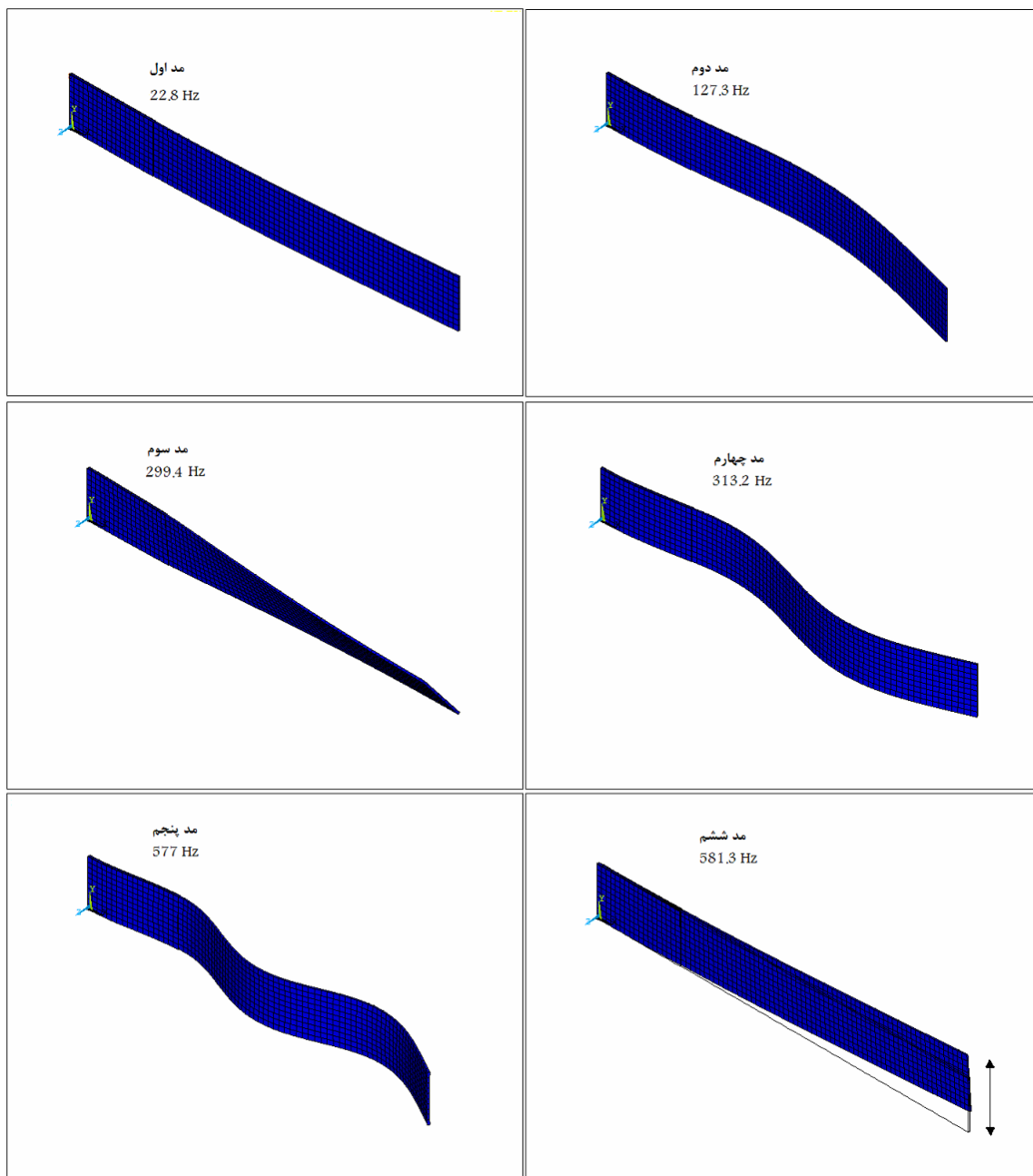
باشد. این مقدار بهینه همان پاسخ بدست آمده از رابطه (۵-۱۴) است.

به همین ترتیب می‌توان مدار شانت R-L سری را برای دیگر مدهای ارتعاشی خمشی سازه میزان نمود.

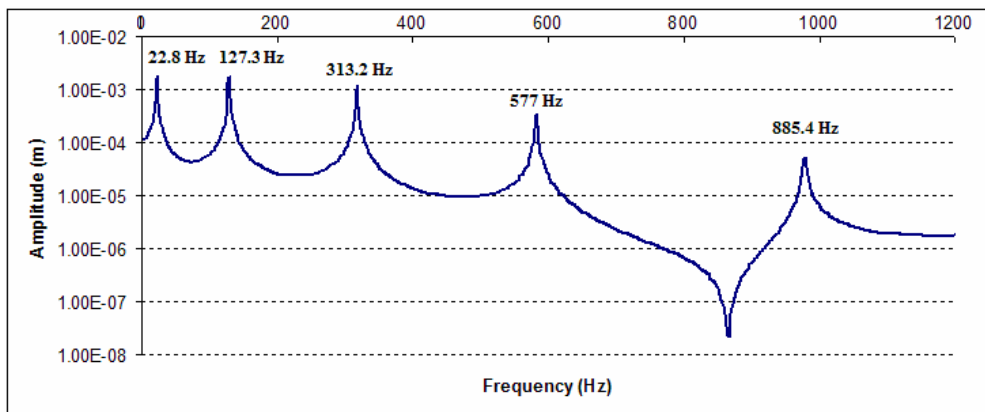
مقادیر بهینه پارامترهای مدار شانت برای سیستم مورد بررسی در جدول (۵-۱) آورده شده است.



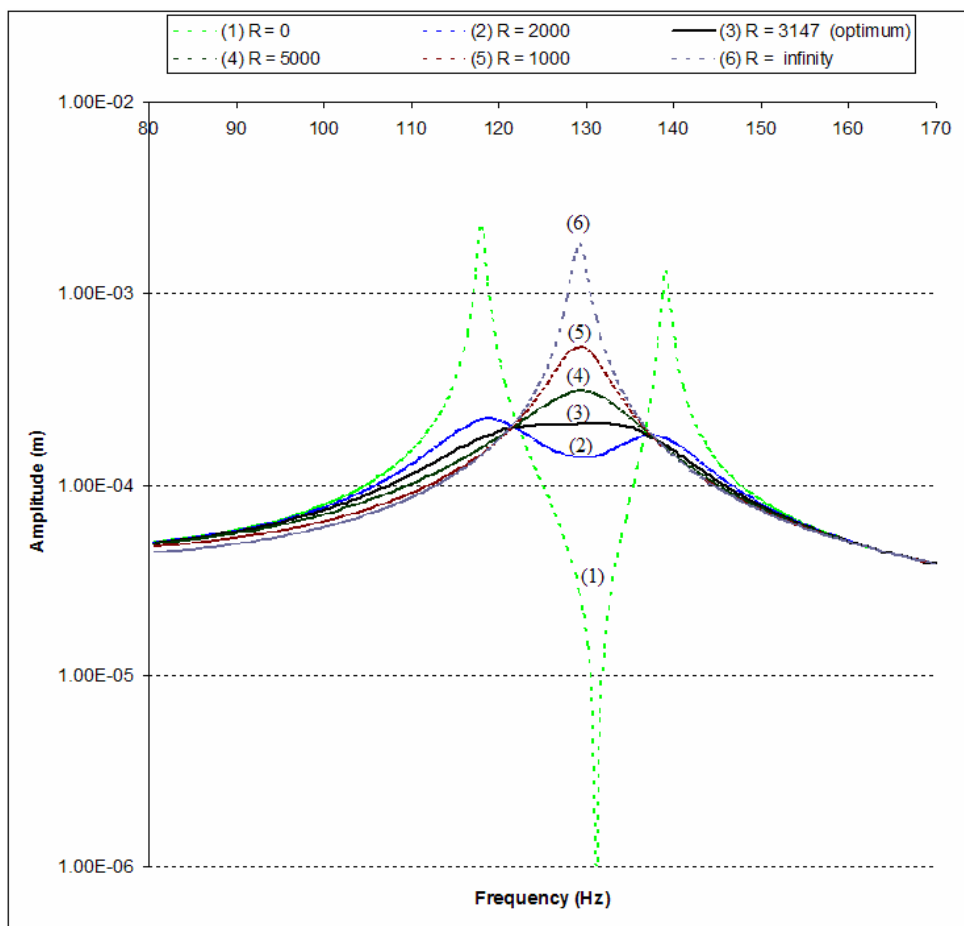
شکل ۵-۶ مدل المان محدود سازه با مدار شانت R-L سری



شکل ۵-۷ شش مد اول ارتعاشی سازه



شکل ۸-۵ پاسخ فرکانسی سازه پیش از اتصال مدار شانت



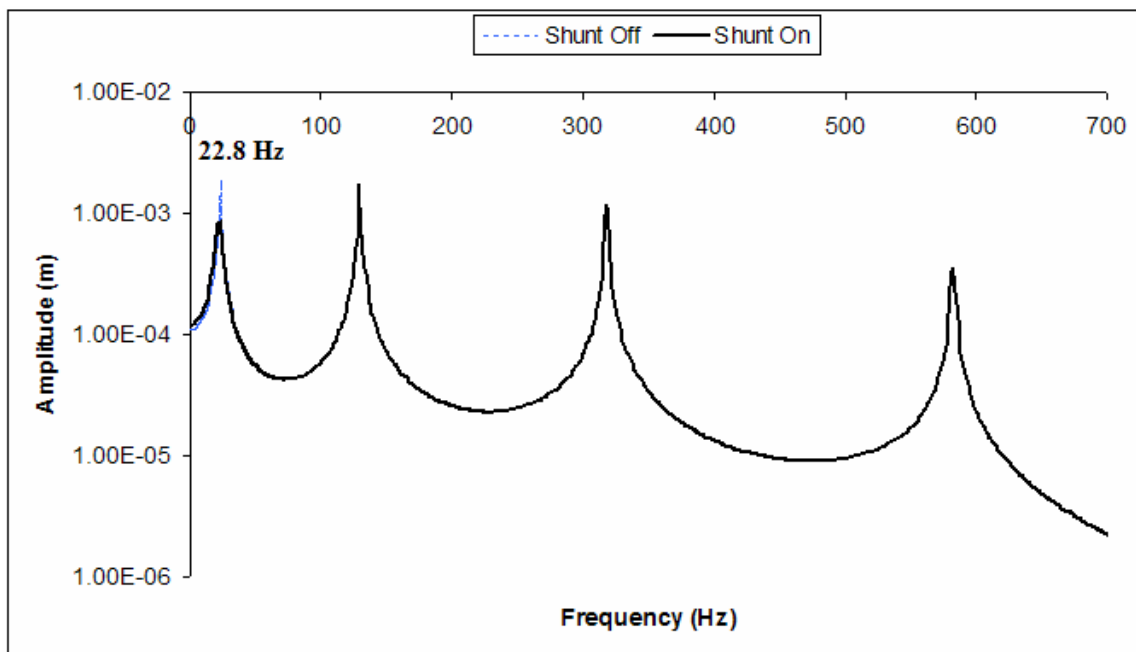
شکل ۹-۵ پاسخ فرکانسی سازه در مجاورت مد ارتعاشی دوم در اندوکتانس بهینه ( $L_{opt} = 15.12 H$ )



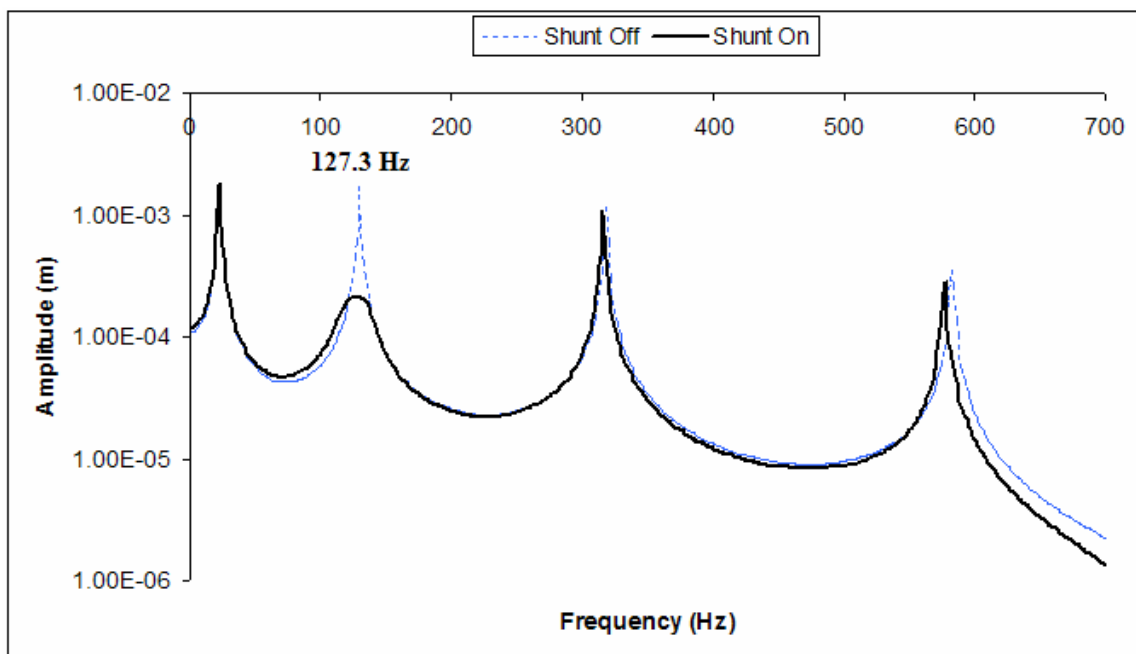
جدول ۱-۵ پارامترهای بهینه مدار شانت در مدهای مختلف خمشی

	$\delta^*$	$r^*$	$L^* (H)$	$R^* (\Omega)$
مد اول (22.8 Hz)	1.017	0.252	471.3	17569.4
مد دوم (127.3 Hz)	1.018	0.252	15.1	3147.3
مد چهارم (313.2 Hz)	1.017	0.252	2.5	1279
مد پنجم (577 Hz)	1.017	0.252	0.736	694.3

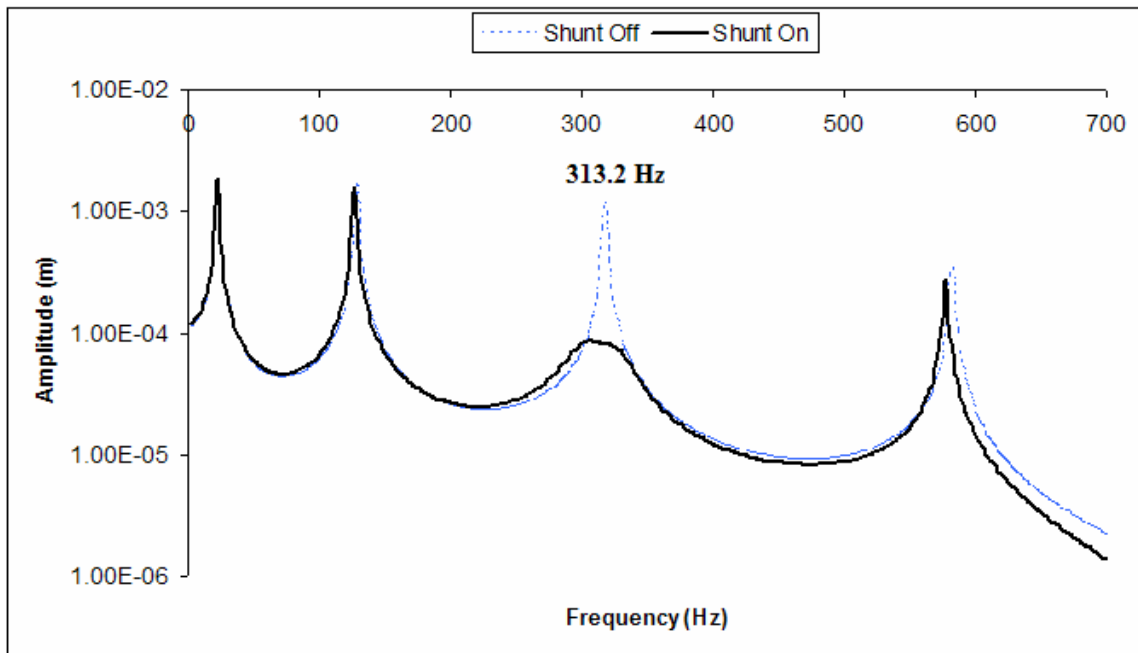
شکل‌های (۱۰-۵) تا (۱۳-۵) پاسخ فرکانسی سازه را قبل و بعد از اعمال مدار شانت با میزان سازی بهینه برای سرکوب چهار مد اول ارتعاشی خمشی نشان می‌دهد. همانطور که از این اشکال مشاهده می‌شود، مدار شانت تأثیر اندکی در کاهش ارتعاشات خمشی مد اول دارد (شکل ۱۰-۵). دلیل این امر این است که میرایی مکانیکی (رابطه ۱۸-۵)، بیشترین تأثیر را بر روی مد اول می‌گذارد و شاید اضافه نمودن یک میرایی الکتریکی حاصل از مدار شانت برای سرکوب مد اول مورد نیاز نباشد. اما در مدهای خمشی بعدی تأثیر مدار شانت بخوبی قابل ملاحظه است. بنابر این می‌توان نتیجه گرفت که برای کاهش ارتعاشات در محدوده هر یک از فرکانسهای طبیعی سازه باید مدار شانت نسبت به مد ارتعاشی مورد نظر به درستی میزان شود تا بیشترین اتلاف ارتعاشات را در بر داشته باشد. مدل المان محدود ارائه شده در این فصل با حل تحلیلی و روابط بهینه سازی ارائه شده توسط هاگود سازگاری داشته و می‌توان از آن برای شبیه سازی رفتار دینامیکی سازه‌های پیزوالکتریک با میرایی شانت R-L استفاده نمود.



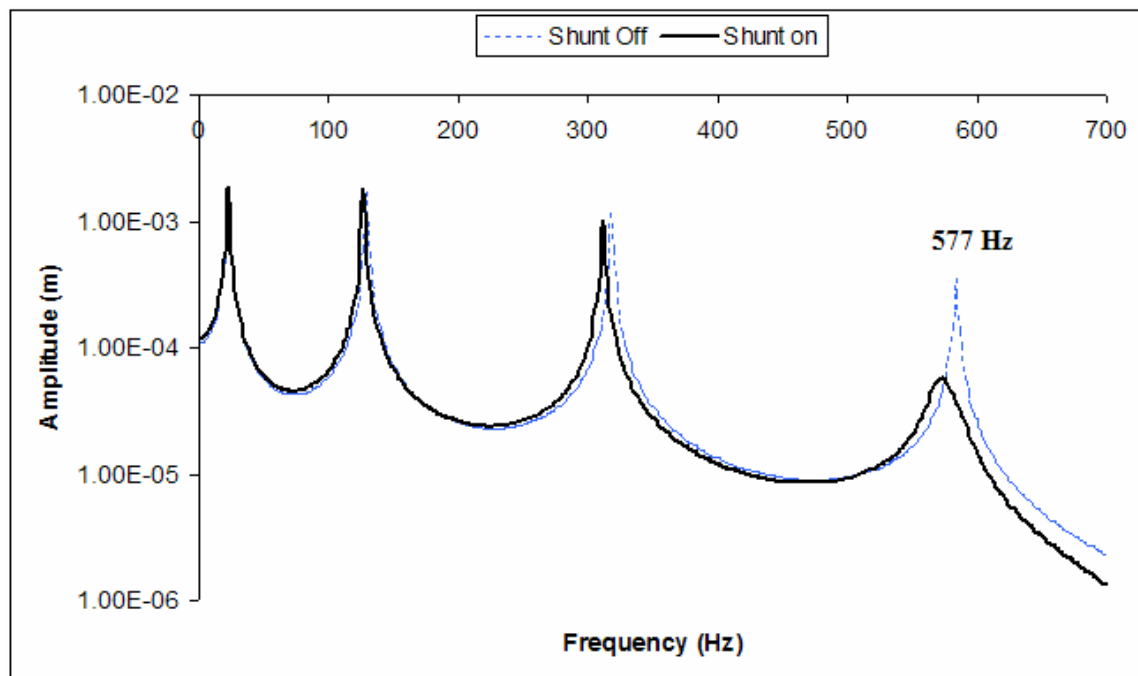
شکل ۵-۱۰ پاسخ فرکانسی سازه با مدار شانت میزان شده برای سرکوب مد اول



شکل ۵-۱۱ پاسخ فرکانسی سازه با مدار شانت میزان شده برای سرکوب مد دوم



شکل ۵-۱۲ پاسخ فرکانسی سازه با مدار شانت میزان شده برای سرکوب مد چهارم (سومین مد خمشی)



شکل ۵-۱۳ پاسخ فرکانسی سازه با مدار شانت میزان شده برای سرکوب مد پنجم (چهارمین مد خمشی)

## فصل ۶

### کنترل فعال ارتعاشات سازه‌ها توسط سنسور و عملگر

#### پیزوالکتریک

##### ۶-۱ مقدمه

هدف از کنترل فعال ارتعاشات، کاهش ارتعاشات یک سیستم مکانیکی با استفاده از اصلاحات اتوماتیک در پاسخ سازه‌ای سیستم می‌باشد. یک سازه فعال عموماً از یک سازه مجهز به تعدادی سنسور (برای تشخیص ارتعاشات) و تعدادی عملگر (که بر پاسخ سازه‌ای سیستم تأثیر می‌گذارند) که با یک کنترلر کوپل شده (تا سیگنال گرفته شده از سنسور را به درستی تغییر داده تا پاسخ سیستم در جهت دلخواه تغییر یابد) تشکیل شده است.

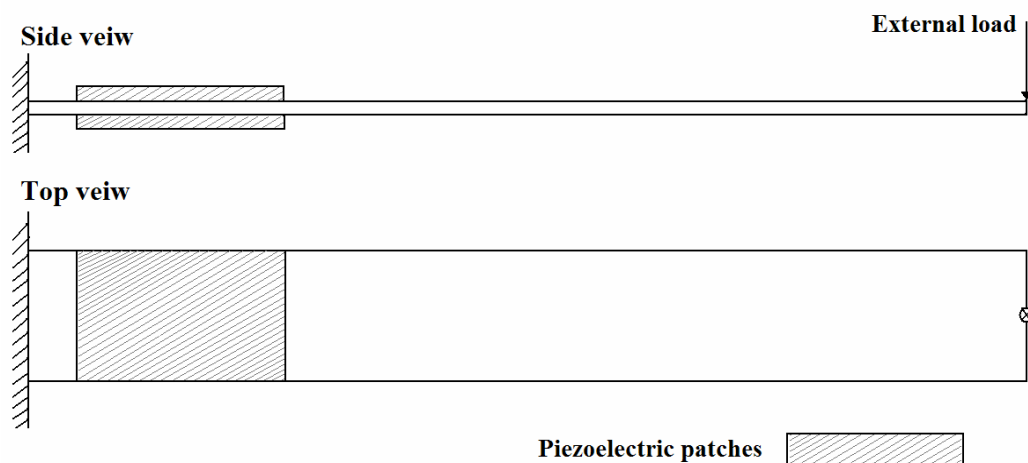
برخی از پرکاربردترین سنسورها و عملگرهای گسترده از مواد پیزوالکتریک ساخته شده‌اند. با استفاده از اثر مستقیم پیزوالکتریک، ارتعاشات مکانیکی سیستم که ایجاد کرنش در سنسور پیزوالکتریک می‌کند بصورت سیگنال الکتریکی متناسب با کرنش، به کنترلر وارد شده و این سیگنال پس از تقویت و اصلاح در کنترلر به عملگر پیزوالکتریک اعمال می‌شود. عملگر پیزوالکتریک با استفاده از اثر معکوس پیزوالکتریک،

سیگنال الکتریکی وارده را به کرنش مکانیکی تبدیل می‌کند. این کرنش ایجاد گشتاوری در جهت عکس حرکت ارتعاشی تیر می‌کند و بدین ترتیب باعث ایجاد نوعی میرایی فعال در سازه می‌شود.

عموماً از دو گروه کلی پیزوالکتریکها در کنترل ارتعاشات استفاده می‌شود: پیزوپلیمرها و پیزوسرامیکها. پیزوپلیمرها اغلب بعنوان سنسور استفاده می‌شوند، چون برای تحریک به ولتاژ خیلی بالایی احتیاج دارند. پیزوسرامیکها بطور گسترده‌ای هم بعنوان سنسور و هم بعنوان عملگر استفاده می‌شوند، بدلیل اینکه به ولتاژ تحریک کمتری احتیاج دارند و در محدوده فرکانسی گسترده‌ای قابل کار هستند.

مدلسازی سازه‌های هوشمند اغلب به یک مدل کوپل شده از سازه اصلی و سنسورها و عملگرها احتیاج دارد. این سازه‌ها را می‌توان بصورت سیستمهای متمرکز یا پیوسته مدل کرد. این سیستمها اغلب شکلها و الگوهای سازه ای پیچیده‌ای دارند که توسعه و حل معادلات دیفرانسیل جزئی توصیف کننده سیستم را بسیار مشکل می‌کنند (اگر قابل حل باشد). به همین سبب، تکنیکهای گسسته‌سازی مختلفی از قبیل مدلسازی المان محدود (FE)، آنالیز مودال، و پارامترهای متمرکز، کاربر را قادر به تخمین معادلات دیفرانسیل جزئی به یک مجموعه معادلات دیفرانسیل معمولی می‌نماید. از سال ۱۹۷۰، مدل‌های المان محدود بسیاری برای آنالیز سازه‌های هوشمند پیزوالکتریک پیشنهاد شده است. در توسعه مدل‌های المان محدود، فرضیات مختلفی را هنگام بررسی مدل تئوری کوپلینگ الکترومکانیکی می‌توان به حساب آورد.

این فرضیات اغلب مربوط به استفاده یا عدم استفاده از درجات آزادی الکتریکی و تخمین تغییرات پتانسیل الکتریکی در راستای ضخامت می‌باشد [51].



شکل ۱-۶ تیر یکسرگیردار هوشمند

در این فصل ابتدا معادلات المان محدود یک سازه هوشمند مجهز به سنسور و عملگر پیزوالکتریک در وضعیت کنترل فعال محاسبه می‌شود. سپس استراتژی پیشنهاد شده بر روی یک تیر یکسرگیردار با یک جفت سنسور و عملگر پیزوالکتریک که بصورت متقارن نزدیک سر گیردار نصب شده، پیاده می‌شود (شکل ۱-۶). سازه مذکور توسط نرم افزار ANSYS مدل شده و دستورات کنترلی توسط APDL (زبان برنامه نویسی پارامتری ANSYS) با مدل المان محدود ANSYS جمع‌بندی می‌شود. در بخشهای بعدی، رفتار ارتعاشی آزاد و اجباری این سازه هوشمند بررسی می‌شود.

## ۲-۶ مدل المان محدود سازه هوشمند

رفتار کوپل شده الکترومکانیکی در سنسورها و عملگرهای پیزوالکتریک با دقت مناسبی توسط معادلات

ساختاری خطی شده (۱۲-۴) بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} D &= e^T S + \varepsilon E \\ T &= cS - eE \end{aligned} \quad (1-6)$$

در معادله فوق متغیرهای  $T$  و  $S$  تنش و کرنش مکانیکی، و متغیرهای  $D$  و  $E$  جابجایی الکتریکی و میدان

الکتریکی می‌باشند. متغیرهای  $e$ ،  $\varepsilon$  و  $c$  بترتیب ماتریسهای پیزوالکتریک، دی‌الکتریک و الاستیسیته

می‌باشند و توسط آنها خواص ماده پیزوالکتریک تعریف می‌شود.

قسمت اول معادله (۱-۶) مربوط به اثر مستقیم پیزوالکتریک می‌باشد که ماده را قادر می‌سازد که بعنوان

سنسور عمل نماید. قسمت دوم معادله (۱-۶) مربوط به اثر معکوس پیزوالکتریک است و بیانگر رفتار ماده

به عنوان عملگر می‌باشد. با اعمال اصل تغییر<sup>۱</sup>، معادلات المان محدود بیانگر رفتار دینامیکی سازه بصورت

رابطه (۲۴-۴) حاصل می‌شود که فرم ماتریسی آن به شکل زیر است:

$$\begin{bmatrix} M_{uu} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{uu} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{uu} & K_{u\phi} \\ K_{u\phi}^T & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ \phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ Q \end{Bmatrix} \quad (2-6)$$

<sup>1</sup> Variational principal

که  $u$  و  $\phi$  بردارهای جابجایی مکانیکی و پتانسیل الکتریکی، و  $F$  و  $Q$  بردارهای اعمالی نیروی مکانیکی و بار الکتریکی می‌باشند.  $M_{uu}$  ماتریس جرم،  $C_{uu}$  ماتریس میرایی،  $K_{uu}$  ماتریس سختی،  $K_{u\phi}$  ماتریس کوپلینگ پیزوالکتریک، و  $K_{\phi\phi}$  ماتریس دی الکتریک می‌باشد و بالانویس  $T$  بیانگر ترانزپوز ماتریس است. با بکار بردن مدل میرایی نسبی<sup>۱</sup>، ماتریس میرایی سراسری بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_{uu} = \alpha M_{uu} + \beta K_{uu} \quad (۳-۶)$$

که در آن  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب ریلی می‌باشند.

بردار بار الکتریکی اعمالی را می‌توان بصورت  $Q = [Q_s, Q_a]^T$  تعریف نمود که زیرنویسهای  $a$  و  $s$  برای اشاره به متغیرهای مربوط به درجات آزادی سنسوری و عملگری لایه‌های پیزوالکتریک بکار گرفته شده است. بدلیل اینکه به گره‌های سنسور، باری اعمال نمی‌شود، بردار بار الکتریکی بصورت  $Q = [0, Q_a]^T$  در نظر گرفته شده است و با استفاده از رابطه (۲-۶) خروجی سنسور بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\phi_s = K_{\phi\phi}^{-1} K_{\phi u} u_s \quad (۴-۶)$$

بار الکتریکی اعمالی به گره‌های عملگر را می‌توان بصورت  $Q_a = C_p V_a$  تعریف کرد که در آن  $C_p$  ظرفیت الکتریکی ماده پیزوالکتریک و  $V_a$  ولتاژ اعمالی به گره‌های عملگر می‌باشد.

---

<sup>۱</sup> Proportional damping



از ولتاژ تولید شده در سنسور پیزوالکتریک می‌توان بعنوان ولتاژ فیدبک به عملگر پیزوالکتریک استفاده نمود. با فرض یک قانون فیدبک منفی برای کنترلر، ولتاژ فیدبک به لایه عملگر که بر گره‌های سطح بیرونی آن اعمال می‌شود بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$V_a = -K_p V_s \quad (5-6)$$

با استفاده از روابط (4-6) و (5-6) بار الکتریکی اعمال شده به لایه عملگر بصورت زیر بدست می‌آید:

$$q_a = -K_p c_p K_{\phi qs}^{-1} K_{\phi us} u_s \quad (6-6)$$

با استفاده همزمان از روابط (2-6) و (6-6) می‌توان تحلیل گذرای<sup>1</sup> سیستم حلقه بسته را انجام داد. می‌توان از استراتژی مشابه استفاده نمود و کنترلر فعال یک سازه هوشمند را توسط ANSYS مدل کرد. بدین ترتیب که با تعریف یک گام زمانی<sup>2</sup> مناسب برای تحلیل گذرا، ولتاژ گره‌های سنسور در هر بازه زمانی محاسبه شده (4-6) و پس از اصلاح و تقویت (5-6) به گره‌های عملگر اعمال می‌شود (6-6). جزئیات بیشتر در بخش‌های بعدی آورده شده است.

---

<sup>1</sup> Transient analysis

<sup>2</sup> Time step

### ۳-۶ مدل‌سازی المان محدود تیر هوشمند توسط ANSYS

در این بخش به بررسی مدل‌سازی تیر یکسرگیردار هوشمند شکل (۱-۶) توسط ANSYS پرداخته شده

است. این تیر هوشمند شامل سازه اصلی از جنس آلومینیم با ابعاد (504mm×25.4mm×0.8mm) و دو

وصله پیزوالکتریک از جنس PZT-5H با ابعاد (72mm×25.4mm×0.61mm) که بطور متقارن و در

فاصله 12mm از سر گیردار تیر نصب شده اند می‌باشد. خواص آلومینیم و PZT-5H بصورت زیر می‌باشد:

*Aluminum:*

$$E = 68 \text{ GPa}, \nu = 0.32, \rho = 2800 \text{ kg/m}^3.$$

*PZT-5H:*

$$c_{11} = 126 \text{ GPa}, c_{12} = 79.5 \text{ GPa}, c_{13} = 84.1 \text{ GPa},$$

$$c_{33} = 117 \text{ GPa}, c_{44} = 23.3 \text{ GPa}, c_{55} = 19.23 \text{ GPa}, c_{66} = 21.23 \text{ GPa},$$

$$e_{31} = -6.5 \text{ C/m}^2, e_{33} = 23.3 \text{ C/m}^2, e_{15} = 17 \text{ C/m}^2,$$

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = 1.503 \times 10^{-8} \text{ C V/m}, \varepsilon_{33} = 1.3 \times 10^{-8} \text{ C V/m},$$

$$\rho = 7500 \text{ kg/m}^3.$$

همانند فصل گذشته، در این فصل برای ساخت مدل المان محدود تیر هوشمند، برای بخش غیرفعال تیر

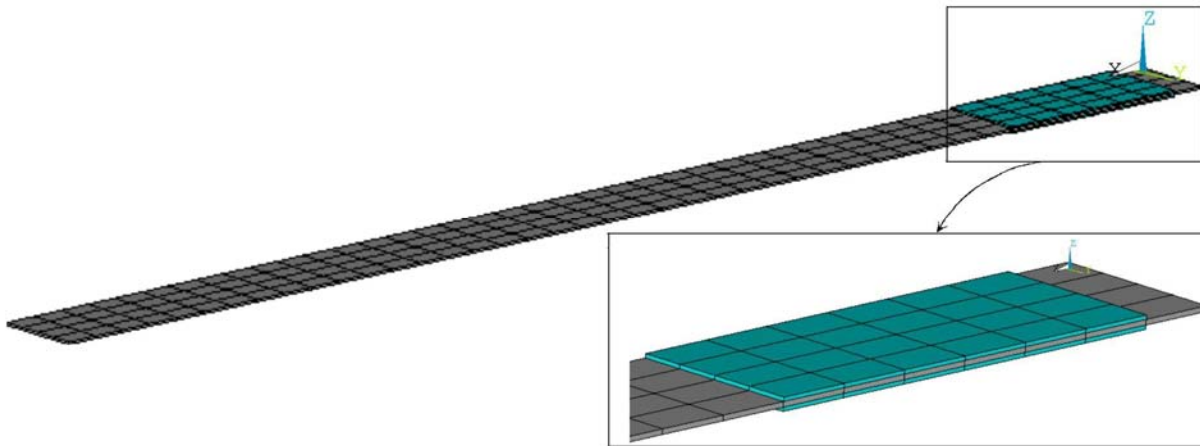
(آلومینیم) از المانهای SOLID45 که یک المان جامد سه بعدی می‌باشد و برای بخش فعال تیر (PZT)

از المانهای SOLID5 استفاده شده است.

شرایط مرزی ثابت برای گره‌های مختصات  $x=0$  تعریف شده تا سر گیردار تیر شبیه‌سازی شود. گره‌های

سطوح PZTها برای درجه آزادی ولتاژ کوپل شده‌اند. سطوح PZT ها در مرز با تیر با زمین سیم شده،

بدین معنی که به گره‌های همجوار PZT و تیر ولتاژ صفر اعمال شده است.





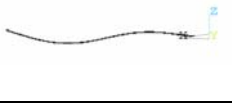
شکل ۶-۲ مدل المان محدود تیر هوشمند

به منظور یافتن فرکانسهای طبیعی تیر و با استفاده از آن یافتن گام زمانی مناسب ( $\Delta t$ ) آنالیز گذرا، آنالیز مودال انجام شده است. گام زمانی مناسب را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\Delta t = 1/(20f_h) \quad (7-6)$$

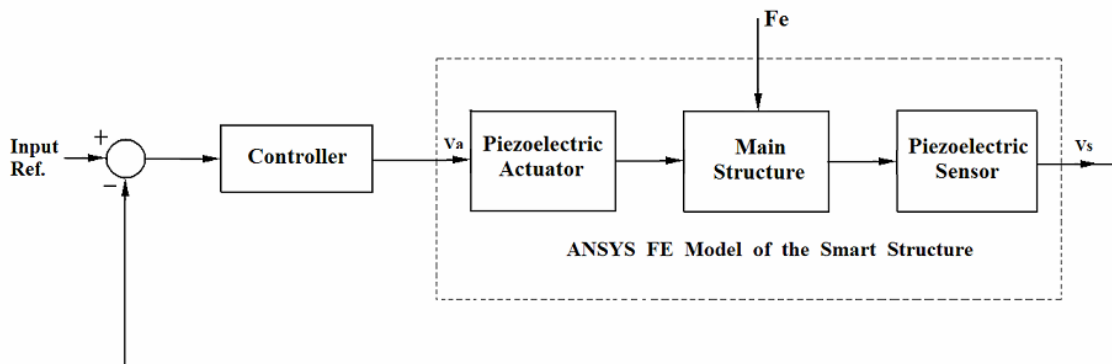
که در آن  $f_h$  بزرگترین فرکانس طبیعی است که در نظر گرفته می‌شود [52]. سه فرکانس طبیعی اول تیر در جدول (۶-۱) نشان داده شده است. با در نظر گرفتن مد اول،  $\Delta t$  برابر 0.0152 S بدست می‌آید. اما در تحلیل‌های بعدی  $\Delta t$  برابر زمان مورد نیاز برای تعریف مقدار آنی نیرو و در عین حال کوچکتر از 0.0152 S در نظر گرفته شده است. از روش Full که در آن از ماتریسهای کامل سیستم برای محاسبه پاسخ گذرا استفاده می‌کند (بدون کاهش ماتریس)، برای آنالیز دینامیکی گذرا استفاده شده است. مقادیر ضرایب میرایی ریلی بصورت  $\alpha = \beta = 0.001$  در نظر گرفته شده است.

جدول ۱-۶ سه فرکانس طبیعی اول تیر

شکل مد	فرکانس (Hz)	مد اول
	3.29	مد اول
	18.78	مد دوم
	45.15	مد سوم

#### ۴-۶ طراحی کنترل

از ولتاژ تولید شده در گره‌های سطح سنسور بدلیل ارتعاشات تیر، می‌توان به عنوان ولتاژ فیدبک به لایه عملگر استفاده نمود. بدین منظور یک فیدبک تناسبی طراحی شده و با استفاده از APDL به مدل المان محدود ANSYS مجتمع شده تا سیستم حلقه بسته شبیه سازی شود (شکل ۳-۶).



شکل ۳-۶ دیاگرام بلوکی سیستم حلقه بسته

فلٹوچارت مربوط به اعمال کنترلی در شکل (۴-۶) نشان داده شده است. در این فلٹوچارت، متغیر  $t_s$  زمان پایانی آنالیز می‌باشد که تقریباً زمانی است که برای رسیدن به پاسخ پایایی<sup>۱</sup> سیستم مورد نیاز است.  $Ns$  و  $Na$  بترتیب اشاره به شماره گره سنسوری که برای محاسبه ولتاژ استفاده می‌شود و شماره گره عملگری که برای اعمال فیدبک ولتاژ استفاده می‌شود دارد. منظور از  $V_{max}$  بیشترین ولتاژی است که قطعات PZT می‌توانند بدون آسیب دیدن تحمل کنند (برای مدل حاضر  $V_{max} = 143.4 V$ ).  $K_P$  ثابت تناسبی<sup>۲</sup> می‌باشد که همان بهره کنترلر<sup>۳</sup> سیستم حلقه بسته است. Error سیگنال اختلاف میان مرجع ورودی<sup>۴</sup> و سیگنال سنسور می‌باشد. سیگنال مرجع برابر میانگین ولتاژ سنسور هنگامیکه سیستم حلقه باز به پاسخ پایایی خود رسیده است، در نظر گرفته شده است. بنابر این هنگامیکه تغییر شکل استاتیکی در پاسخ پایا وجود نداشته باشد مقدار سیگنال مرجع صفر در نظر گرفته شده است. برای محاسبه ولتاژ عملگر ( $V_a$ ) مقدار  $K_P$  در error ضرب می‌شود، اما طبق شکل (۴-۶) مقدار حاصل شده نمی‌تواند از  $V_{max}$  تجاوز کند (به دلیل محدودیت‌های ابزاری).

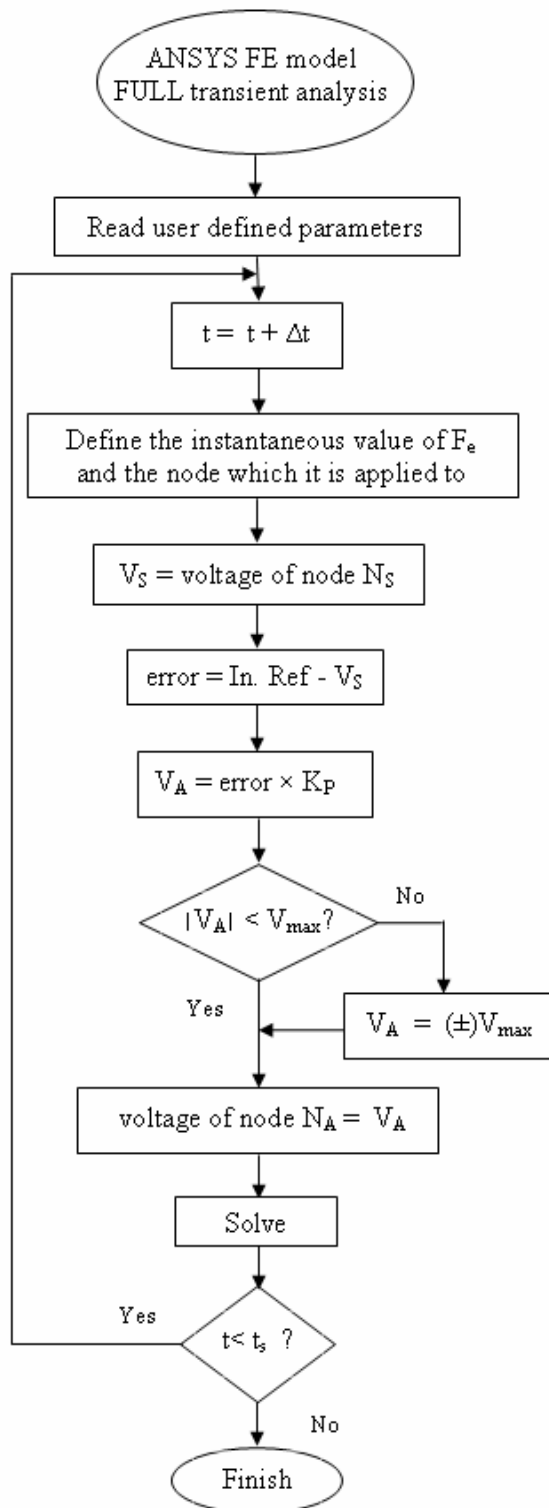
---

<sup>1</sup> Steady state response

<sup>2</sup> Proportional constant

<sup>3</sup> Controller gain

<sup>4</sup> Input reference



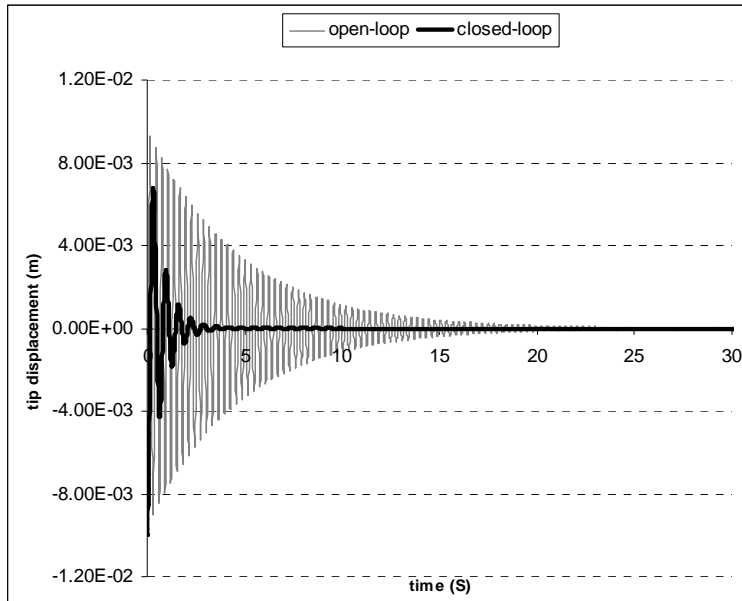
شکل ۶-۴ فلٹوچارت اعمال کنترلی

## ۵-۶ ارتعاشات آزاد تیر هوشمند

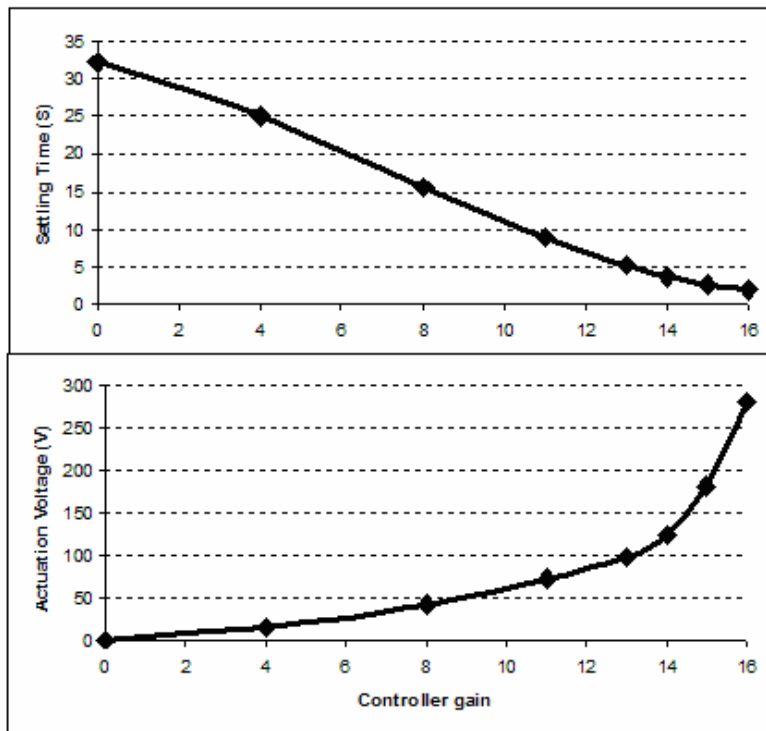
در این بخش به بررسی و مقایسه ارتعاشات آزاد تیر هوشمند در وضعیت‌های حلقه باز (بدون اعمال کنترلر) و حلقه بسته (با اعمال کنترلر) پرداخته شده است. بدین منظور تغییر مکان اولیه 10 mm به سر آزاد تیر اعمال شده و روند کاهش ارتعاشات آن بر حسب جابجایی سر آزاد مطالعه شده است.

شکل (۵-۶) جابجایی نوک تیر را در دو وضعیت حلقه باز و حلقه بسته برای  $K_P=15$  نشان می‌دهد. در این شکل تأثیر میرایی فعال در کاهش ارتعاشات سازه‌ای تیر انعطاف‌پذیر به وضوح مشاهده می‌شود. از جمله اینکه زمان نشست ارتعاشات در سیستم حلقه بسته به  $5-10\%$  زمان آن در سیستم حلقه باز کاهش می‌یابد.

برای محاسبه  $K_P$  مناسب، مقدار  $K_P$  افزایش داده شده تا ماکزیمم مقدار ممکن بدست آید. شکل (۶-۶) نشان می‌دهد که افزایش بهره کنترلر منجر به کاهش زمان نشست ارتعاشات ( $t_s$ ) می‌شود، اما از طرف دیگر باعث افزایش ولتاژ تحریک می‌شود که این یک عامل بازدارنده برای افزایش  $K_P$  می‌باشد. در نمودار (۶-۶)،  $t_s$  زمانی است که دامنه ارتعاشات به 0.001 تغییر مکان اولیه می‌رسد. با توجه به این نمودار و نمودارهای مشابه می‌توان مقدار  $K_P$  را تعیین کرد.



شکل ۵-۶ پاسخ ارتعاشات آزاد سیستمهای حلقه باز و حلقه بسته

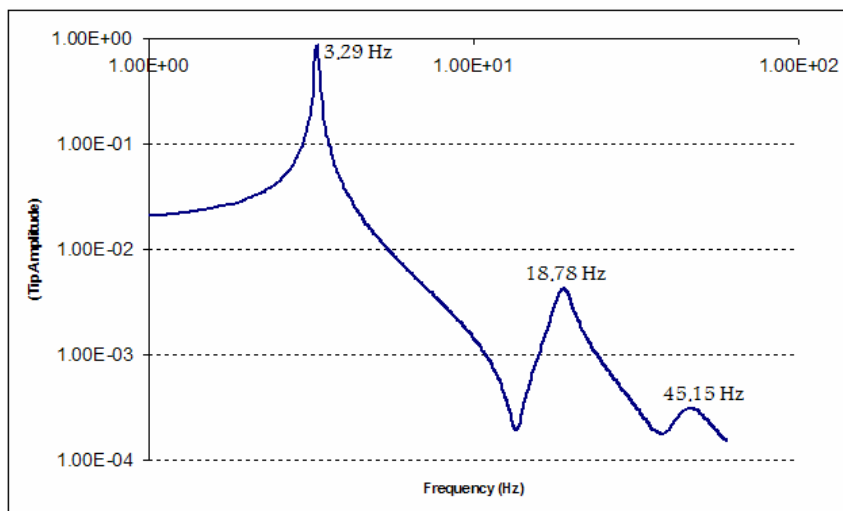


شکل ۶-۶ تغییرات زمان نشست ارتعاشات ( $t_s$ ) و ولتاژ تحریک ( $V_a$ ) نسبت به بهره کنترلر ( $K_p$ )

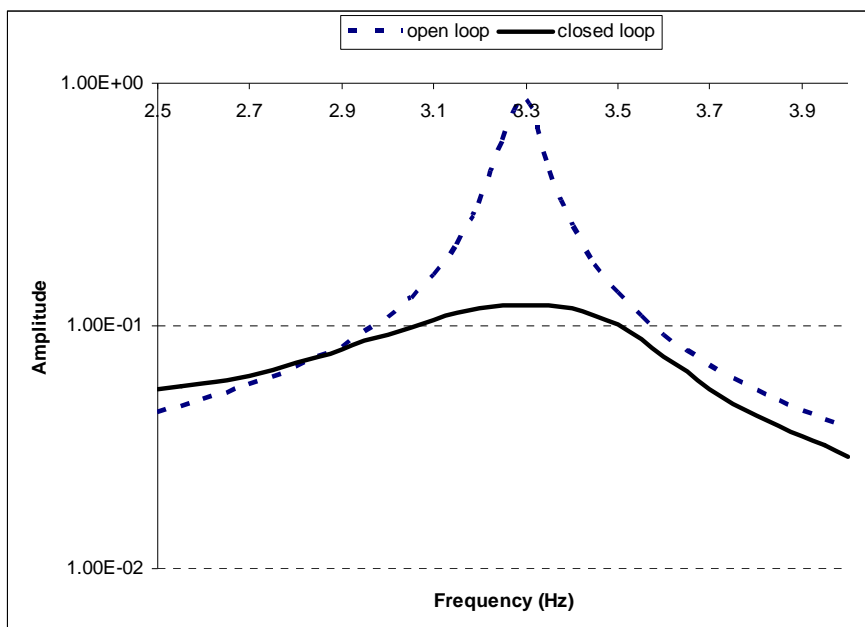


پاسخ فرکانسی سیستمهای حلقه باز و حلقه بسته که با استفاده از آنالیز المان محدود هارمونیک بدست

آمده است در شکلهای (۶-۷) و (۶-۸) نشان داده شده است.

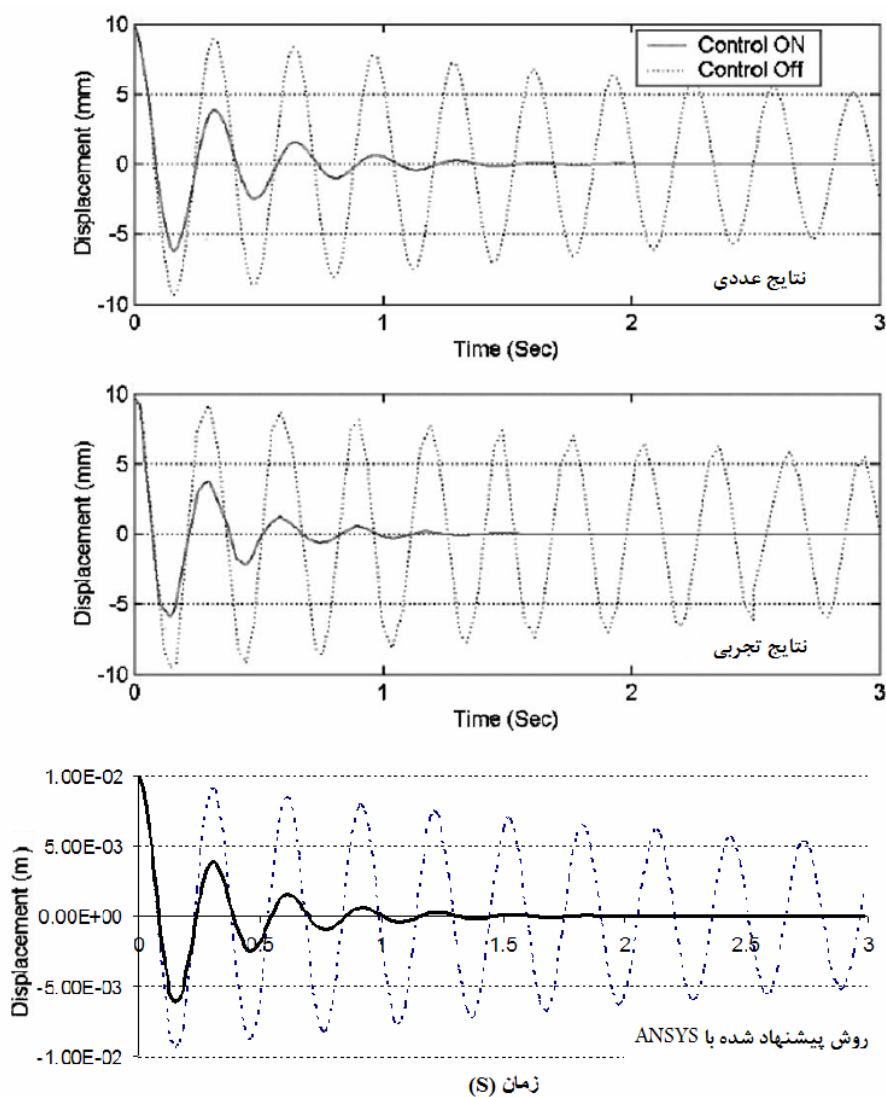


شکل ۶-۷ پاسخ فرکانسی تیر در سیستم حلقه باز



شکل ۶-۸ پاسخ فرکانسی سیستمهای حلقه باز و حلقه بسته در محدوده مد اول ارتعاشی

برای ارزیابی طرح ارائه شده در این فصل، نتایج تحلیل تیر هوشمند با روش پیشنهاد شده، با نتایج عددی و تجربی که محققین پیشین در مراجع [36] و [53] برای تیر مشابه با روشهای کنترلی دیگر ارائه داده اند مقایسه شده است که نتایج آن در شکل (۹-۶) مشاهده می‌شود.



شکل ۹-۶ مقایسه پاسخ ارتعاشات آزاد تیر در روش ارائه شده با ANSYS و روشهای عددی و تجربی مراجع [36] و [53]

## ۶-۶ ارتعاشات اجباری تیر هوشمند

در این بخش برای بررسی عملکرد کنترلر پیشنهاد شده، در تقلیل ارتعاشات اجباری تیر هوشمند، سازه تحت بارگذاریهای مختلف قرار گرفته و پاسخ تیر در هر مورد، بحث و بررسی شده است. ثابت تناسبی  $K_P$  برابر ۱۵ در نظر گرفته شده که تقریباً بیشترین مقدار ممکن برای موارد پیش رو می باشد.

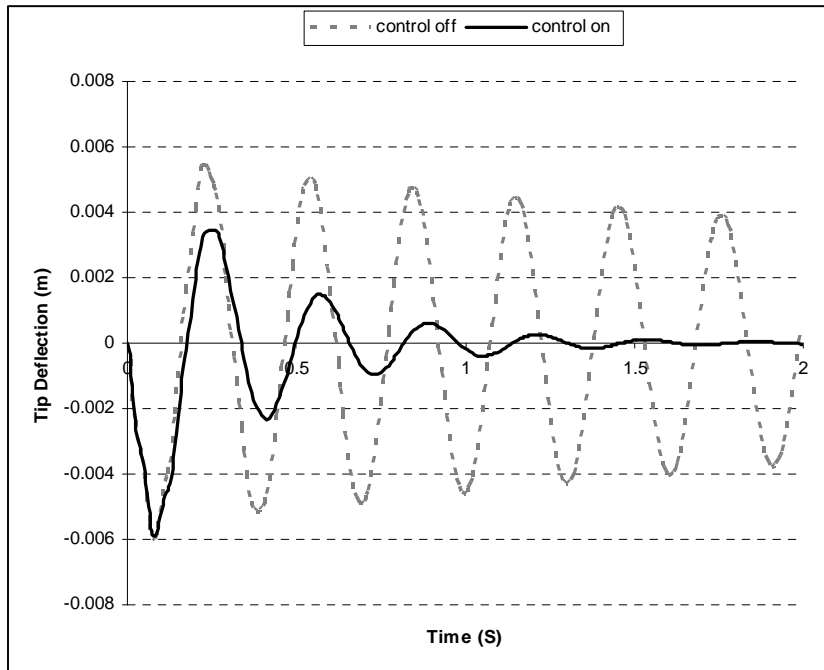
## ۶-۶-۱ پاسخ تیر به بارهای ضربه ای

برای بررسی پاسخ تیر به بارهای ضربه ای، نیروی  $F_0 = -0.1 N$  در طول اولین گام زمانی ( $t < \Delta t$ ) به نوک تیر اعمال شده و پس از آن حذف شده است. تغییر مکان نوک تیر و همچنین ولتاژهای سنسور و عملگر در شکل‌های (۶-۱۰) و (۶-۱۱) مشاهده می شود که حاکی از نقش مؤثر میرایی فعال در کاهش ارتعاشات حاصل از نیروی ضربه ای است.

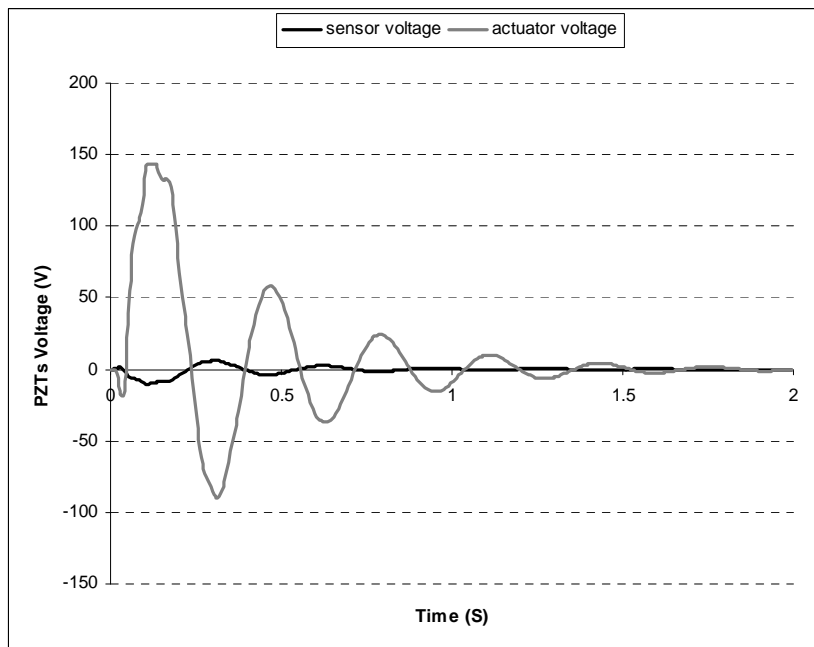
## ۶-۶-۲ پاسخ تیر به بارهای پله ای

برای بررسی پاسخ تیر هوشمند به بارهای پله ای، بار  $F_e = -0.01 N$  در مدت زمان ارتعاش تیر ( $t < t_s$ ) به نوک آن اعمال و آنالیز گذرا انجام شده است. اگرچه مقدار مرجع ورودی ممکن است بطور مستقیم در

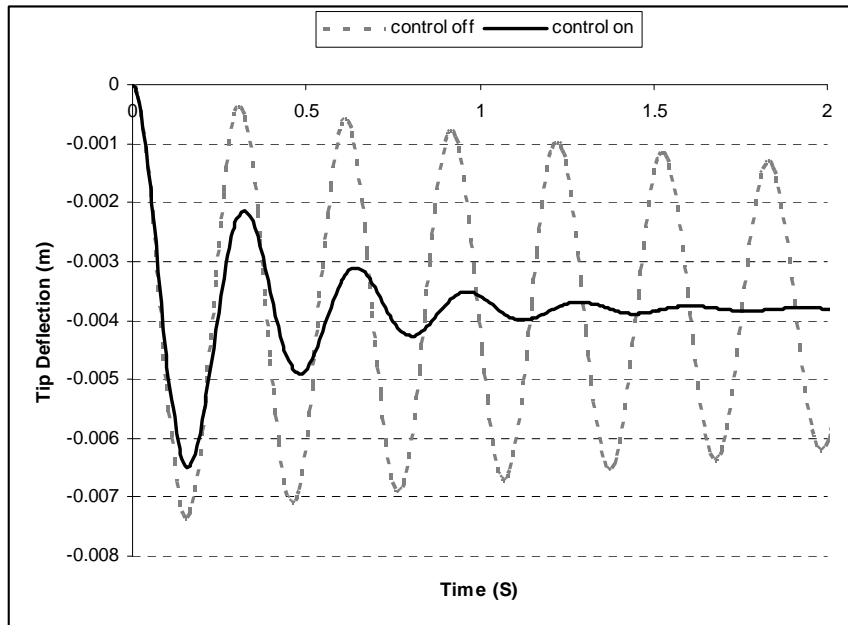
زمان نشست ارتعاشات تأثیر نداشته باشد، اما در ولتاژ PZT ها و پاسخ پایای سیستم تأثیر خواهد داشت. مقدار مرجع ورودی را می‌توان به راحتی با استفاده از یک پیش آنالیز استاتیکی بدست آورد. شرایط مرزی حاکم بر این پیش آنالیز مانند قبل است، با این تفاوت که ولتاژ عملگر برابر صفر قرار داده شده است، بدین معنی که هنگامی که ارتعاشات سرکوب می‌شود، error به سمت صفر میل می‌کند. در آنالیز حاضر، مقدار مرجع ورودی (ولتاژ پایای سنسور) برابر 1.041 بدست آمد. شکل‌های (۶-۱۲) و (۶-۱۳) پاسخ پله و ولتاژ سنسور و عملگر را نشان می‌دهند.



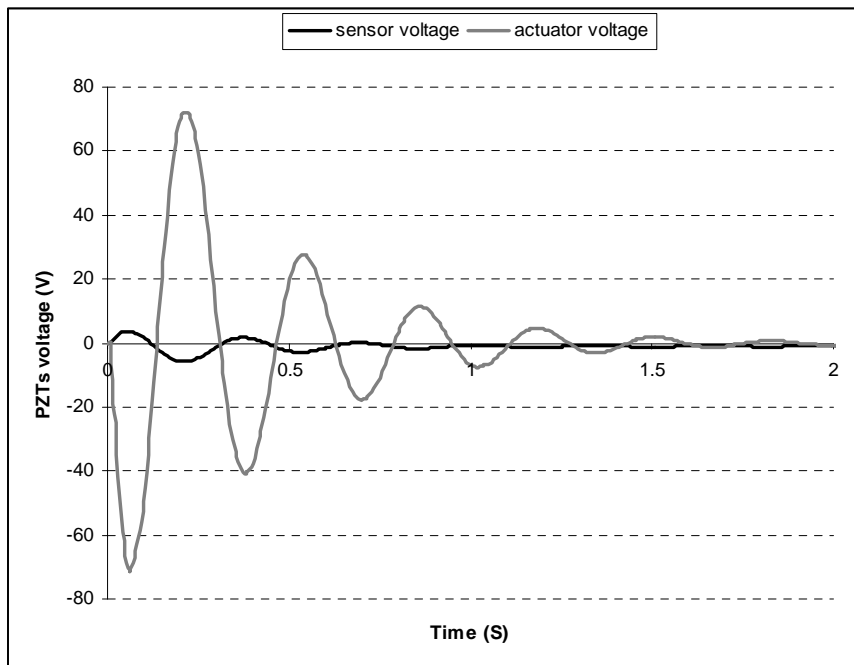
شکل ۶-۱۰ جابجایی نوک تیر در بارگذاری ضربه‌ای



شکل ۶-۱۱ ولتاژهای سنسور و عملگر در سیستم حلقه بسته در بارگذاری ضربه‌ای



شکل ۶-۱۲ جابجایی نوک تیر در بارگذاری پله‌ای



شکل ۶-۱۳ ولتاژهای سنسور و عملگر در سیستم حلقه بسته در بارگذاری پله‌ای

### ۳-۶-۶ پاسخ تیر به بارهای سینوسی

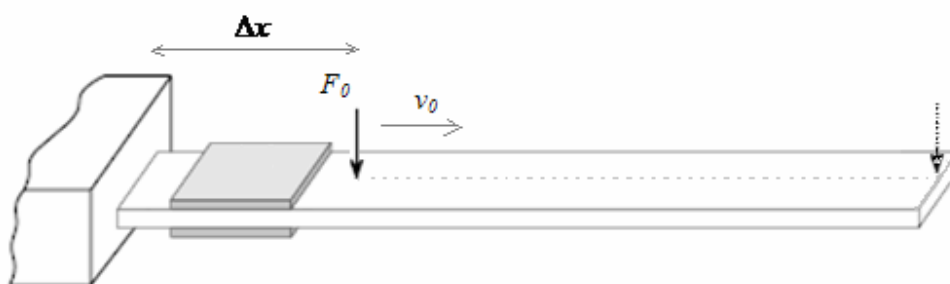
در عمل، بسیاری مواقع ممکن است که بار بصورت سینوسی (هارمونیک) و به فرم  $F_e = F_0 \sin(\omega t)$  به جسم وارد شود که  $\omega$  فرکانس تحریک می‌باشد. برای شبیه سازی بار سینوسی توسط ANSYS می‌توان مقدار لحظه ای بار را برای هر گام زمانی محاسبه و به گره مربوطه اعمال کرد (طبق شکل ۴-۶). بنابر این تعریف گام زمانی کوچکتر باعث دقت بیشتر در مدل سازی بار سینوسی می‌شود. شکل‌های (۶-۱۵) و (۶-۱۶) جابجایی نوک تیر و ولتاژ PZT‌ها را برای  $F_0 = -0.05$  و  $\omega = 62.8$  نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که طرح پیشنهاد شده قادر به تقلیل دامنه ارتعاشات و کاهش زمان رسیدن به پاسخ پایای سیستم در حالت بارگذاری سینوسی می‌باشد.

### ۴-۶-۶ پاسخ تیر به بارهای متحرک

در این بخش یک بار متحرک توسط ANSYS شبیه سازی شده و پاسخ تیر به آن بررسی شده است. بار بصورت یک نیروی متمرکز  $F_e = F_0$  در نظر گرفته شده که بر روی خط میانی سطح فوقانی تیر حرکت می‌کند، حرکت خود را از فاصله  $\Delta x$  از سر گیردار آغاز و با سرعت  $v_0$  به سمت سر آزاد تیر ادامه می‌دهد و پس از رسیدن به آن حذف می‌شود (شکل ۴-۱۴).

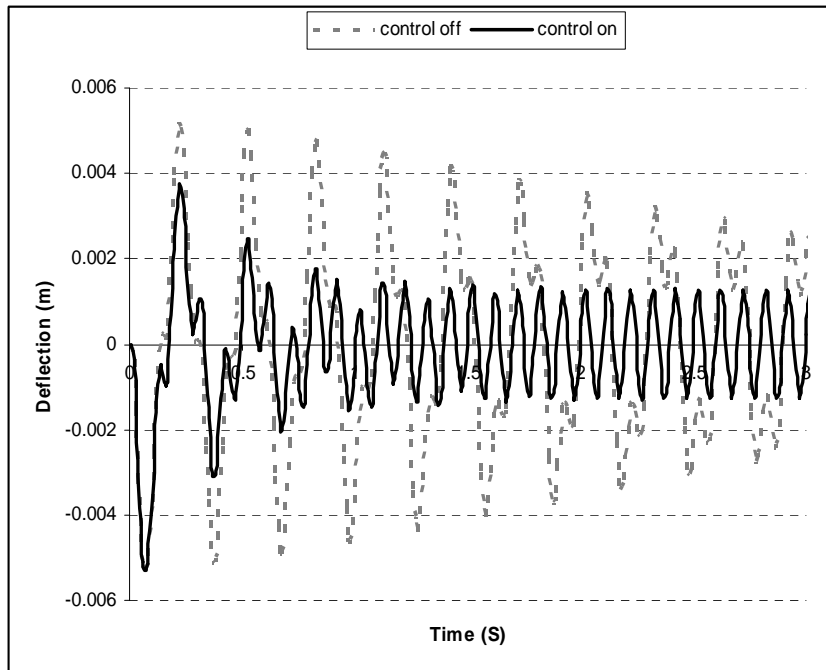
با استفاده از APDL مسیر حرکت با تعریف گره‌های متصل به مسیر در یک آرایه، شبیه‌سازی شده است و بار متحرک با تغییر گرهی که بار به آن وارد شده در هر گام زمانی مدل شده است. بنابراین این گام زمانی برابر زمانی در نظر گرفته شده که بار روی هر گره سپری می‌کند.

شکل‌های (۶-۱۷) و (۶-۱۸) جابجایی نوک تیر و ولتاژهای سنسور و عملگر را برای  $F_0 = 0.1 \text{ N}$ ،  $v_0 = 0.3 \text{ m/s}$  و  $\Delta x = 96 \text{ mm}$  نشان می‌دهد. از این نمودارها مشاهده می‌شود که کنترلر طراحی شده تأثیر زیادی در تقلیل ارتعاشات تیر داشته است، بخصوص ارتعاشات ارتعاشات باقیمانده پس از حذف بار (حرکت بار بر روی تیر 1.36 s طول می‌کشد). بدلیل اینکه ولتاژ تحریک از  $143.4 \text{ V}$  که حد تحمل قطعات PZT می‌باشد بیشتر نمی‌شود، پیک‌های منحنی ولتاژ در شکل (۶-۱۸) از این مقدار تجاوز نکرده است.

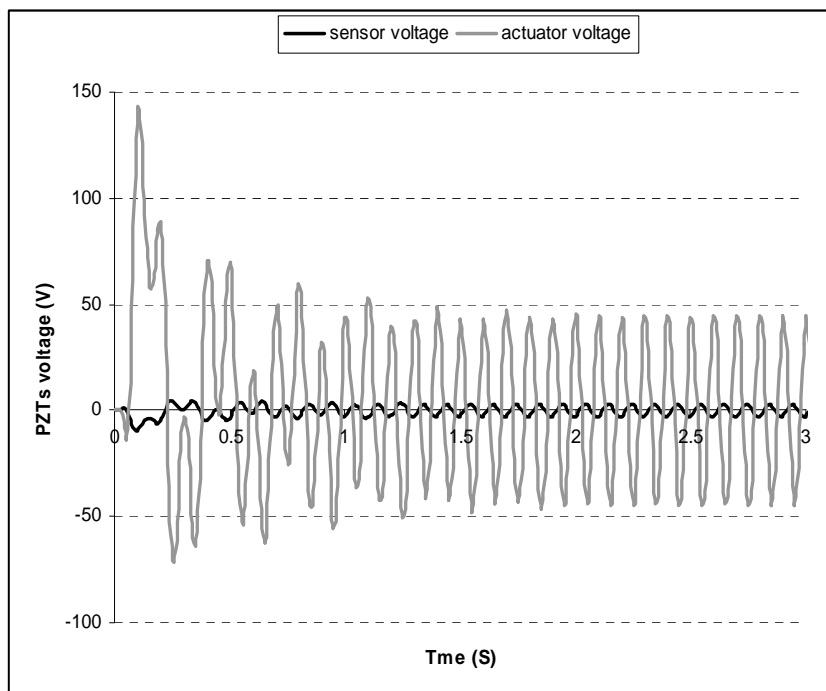


شکل ۶-۱۴ بارگذاری متحرک بر تیر هوشمند

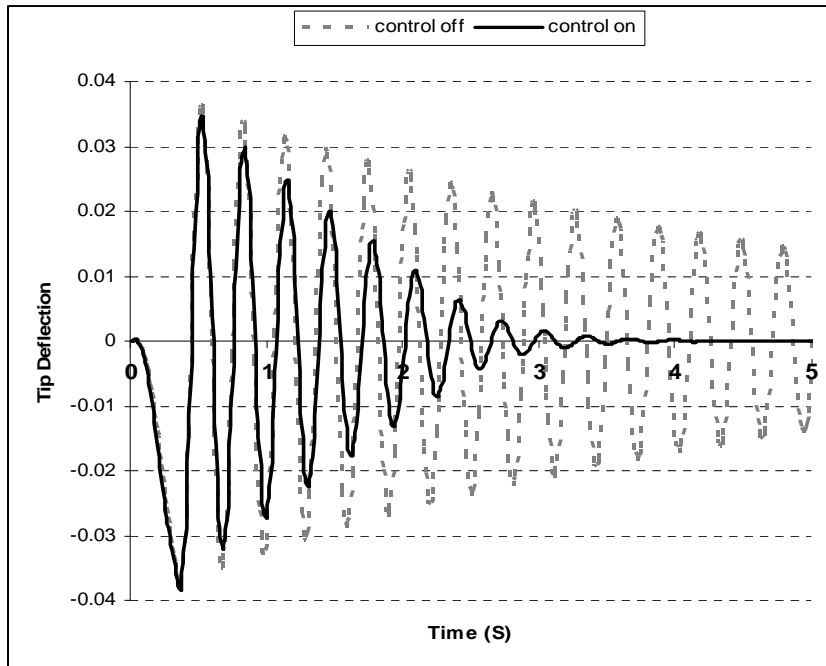




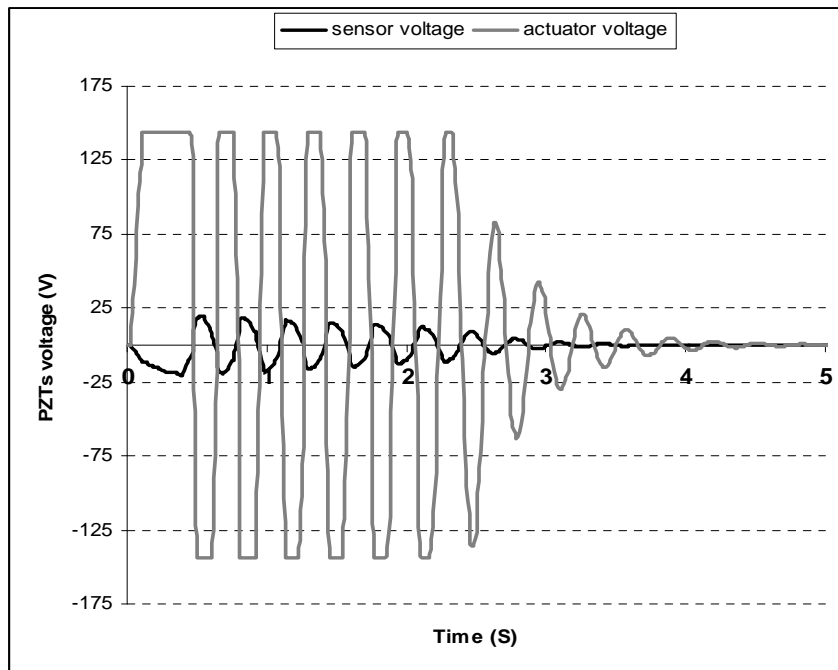
شکل ۶-۱۵ جابجایی نوک تیر در بارگذاری سینوسی



شکل ۶-۱۶ ولتاژهای سنسور و عملگر در سیستم حلقه بسته در بارگذاری سینوسی



شکل ۶-۱۷ جابجایی نوک تیر در یک بارگذاری متحرک



شکل ۶-۱۸ ولتاژهای سنسور و عملگر در سیستم حلقه بسته در یک بارگذاری متحرک

استراتژی ارائه شده در این فصل را می‌توان برای مدلسازی و کنترل فعال ارتعاشات در سازه‌های پیچیده‌تر با شرایط مرزی مختلف به کار برد، مثلاً بر روی یک ورق سوراخدار با شرایط آزاد یا گیردار برای هر کدام از اضلاع.

همچنین می‌توان بارهای ترکیبی از بارگذاریه‌های استاتیکی، گذرا، هارمونیک، متحرک و انواع بارها را شبیه سازی نمود و کنترل فعال آنها را با روش پیشنهاد شده مطالعه نمود. بطور کلی برای انجام اینگونه آنالیزها نیاز به یافتن  $K_P$  مناسب مشابه آنچه در شکل (۶-۶) بررسی شد می‌باشد. علاوه بر آن مقادیر مرجع ورودی و گام زمانی مناسب باید تعریف شود که روش بدست آوردنشان در آنالیزهای قبلی توضیح داده شد.

## فصل ۷

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

#### ۷-۱ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی رفتار ارتعاشی و روشهای کنترل ارتعاشات در سازه‌های هوشمند پیزوالکتریک پرداخته شد. بدین منظور روش المان محدود به عنوان ابزار قدرتمندی در مدلسازی و تحلیل این سازه‌ها به کار گرفته شد.

ابتدا در یک تقسیم بندی کلی، دو تکنیک معروف کنترل و سرکوب ارتعاشات با استفاده از پیزوالکتریکها معرفی شد. در روش اول که استفاده از میرایی انفعالی مدارهای شانت R-L می‌باشد، از مواد پیزوالکتریک به عنوان سنسور برای تبدیل انرژی مکانیکی حاصل از ارتعاشات سازه به انرژی الکتریکی استفاده شده است. مدل المان محدود پیشنهاد شده برای مدلسازی این سازه‌ها با روابط بهینه‌سازی مدار شانت R-L سری که توسط هاگود ارائه شده به خوبی سازگاری داشته و از آن می‌توان برای بررسی رفتار دینامیکی این سازه‌ها استفاده نمود. نتایج مدلسازی المان محدود یک تیر یکسرگیردار تحت میرایی مکانیکی ریلی و

الکتریکی مدار شانت نشان داد که مدار شانت میزان شده نسبت به مدهای ارتعاشی، تأثیر بسزایی در استهلاک ارتعاشات مدهای خمشی دوم و بالاتر دارد.

برای بررسی اثر تغییرات پارامترهای مدار شانت در پاسخ سازه، با در نظر گرفتن اندوکتانس بهینه برای مدار در محدوده فرکانسی مد دوم، پاسخ فرکانسی سازه برای مقادیر مختلف مقاومت مدار محاسبه شد. بررسیهای انجام شده نشان داد افزایش مقاومت مدار شانت R-L سری که افزایش امپدانس شانت و در نتیجه کاهش جریان شانت را در پی دارد، باعث افزایش دامنه ارتعاشات در نزدیکی فرکانس طبیعی سازه می شود.

تکنیک دیگر کنترل ارتعاشات با استفاده از سنسور و عملگر پیزوالکتریک و یک حلقه کنترلی انجام می - گیرد. بنابراین در اینگونه مسائل نیاز به طراحی کنترل داریم. بدین منظور پس از بدست آوردن معادلات المان محدود حاکم بر سیستم، از یک فیدبک تناسبی که ولتاژ سنسور را تقویت نموده و به عملگر اعمال می کند استفاده شد. این طرح کنترل با معادلات المان محدود سیستم ادغام شد تا معادلات حاکم بر سیستم حلقه بسته حاصل شود. سپس استراتژی مذکور برای شبیه سازی رفتار ارتعاشی یک تیر یکسرگیردار هوشمند توسط ANSYS بکار گرفته شد بدین ترتیب که حلقه کنترلی با حل المان محدود سیستم توسط دستورات APDL ادغام شد.

با افزایش تدریجی بهره کنترلر (ثابت تناسبی) و در نظر گرفتن محدودیت‌های ابزاری وصله‌های پیزوالکتریک، مقدار مناسب بهره کنترلر بدست آمد. پاسخ ارتعاشات آزاد تیر محاسبه شد و برای ارزیابی مدل، با نتایج تجربی و عددی محققین پیشین مقایسه شد.

در بخش بعد تکنیک پیشنهاد شده برای بررسی ارتعاشات اجباری تیر شامل پاسخ تیر به بارهای ضربه‌ای، پله‌ای، سینوسی و همچنین بارهای متحرک با موفقیت بکار گرفته شد و نتایج قابل توجهی بدست آمد. نتایج بدست آمده از پایان‌نامه حاکی از این است که از روش المان محدود و نرم افزارهای تجاری وابسته به آن از جمله ANSYS می‌توان به عنوان ابزاری قدرتمند و در عین حال کم هزینه برای مدلسازی و تحلیل سازه‌های پیزوالکتریک هوشمند استفاده نمود.

## ۲-۷ پیشنهاداتی برای ادامه تحقیقات در این زمینه

- می‌توان برای میزان‌سازی مدارهای شانت از روشهای بهینه‌سازی موجود در ANSYS (بهینه‌سازی شکل<sup>۱</sup> و بهینه‌سازی طراحی<sup>۲</sup>) استفاده نمود.
- می‌توان از روش مشابه برای تحلیل سازه‌های متصل به شانت R-L موازی استفاده نمود.

---

<sup>۱</sup> Topological optimization

<sup>۲</sup> Design optimization

- می‌توان سازه‌های پیچیده‌تر مثلاً صفحات را با وصله‌های پیزوالکتریک و شانت‌های متعدد مورد بررسی قرار داد.
- در بخش کنترل فعال سازه‌ها توسط سنسور و عملگر پیزوالکتریک، می‌توان از روشهای کنترلی دیگر برای کنترل ارتعاشات سازه استفاده کرد.
- طرح ارائه شده برای کنترل فعال سازه‌ها را می‌توان برای سازه‌های پیچیده‌تر با شرایط مرزی مختلف بکار برد.

## مراجع

- [1] N. Hagood, A. von Flotow, 1991, "Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks", *Journal of Sound and Vibration*, 146: 243–268.
- [2] J. P. Den Hartog. Mechanical Vibrations. Dover Publications, 1984.S
- [3] H. Law, P. Rossiter, G. Simon, L. Koss, 1996, "Characterization of mechanical vibration damping by piezoelectric materials", *Journal of Sound and Vibration*, 197: 489–513.
- [4] Shu yau Wu, 1996, "Piezoelectric shunts with a parallel R-L circuit for structural damping and vibration control", *SPIE*, 2750:259-269.
- [5] Shu yau Wu. and Andrew S. Bicos, 1997, "Structural vibration damping experiments using improved piezoelectric shunts", *SPIE*, 3045:40-50.
- [6] Joseph J. Holkamp, 1994 "Multimodal passive vibration suppression with piezoelectric materials and resonant shunts". *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, 5:49-57.
- [7] M.S. Tsai, K.W. Wang, 1999, "On the structural damping characteristics of active piezoelectric actuators with passive shunt", *Journal of Sound and Vibration*, 221:1–22.
- [8] D.A. Saravanos, 1999 "Damped vibration of composite plates with passive piezoelectric-resistor elements", *Journal of Sound and Vibration*, 221:867–885.
- [9] S.J. Kim, S.H. Moon, S.K. Lee, 2000, "Comparison of active and passive suppressions of nonlinear panel flutter using finite element method", *41st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Atlanta*, 1–9.
- [10] A. Agneni, F. Mastroddi, G.M. Polli, 2003, "Shunted piezoelectric patches in elastic and aeroelastic vibrations", *Computers and Structures*, 81:91–105.



- [11] J.S. Park, S.C. Lim, S.B. Choi, J.H. Kim, Y.P. Park, 2004, "Vibration reduction of a CD-ROM drive base using a piezoelectric shunt circuit", *Journal of Sound and Vibration*, 269:1111–1118.
- [12] S.B. Choi, H. S. Kim, J.S. Park, 2007, "Multi-mode vibration reduction of a CD-ROM drive base using a piezoelectric shunt circuit", *Journal of Sound and Vibration*, 300:160-175.
- [13] J. Becker, O. Fein, M. Maess, L. Gaul, 2006, "Finite element-based analysis of shunted piezoelectric structures for vibration damping", *Computers and Structures*, 84 :2340–2350.
- [14] B. Seba, J. Ni, B. Lohmann, 2006, "Vibration attenuation using a piezoelectric shunt circuit based on finite element method analysis", *Smart Mater. Struct.*, 15:509–517.
- [15] Bailey, T. and Hubbard, J. E., 1985, "Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam", *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 8(5): 605-611.
- [16] E. F. Crawley and J. de Luis, 1987, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures", *AIAA J.*, 25(10): 1373-1385.
- [17] C. K. Lee and F. C. Moon, 1990, "Modal Sensors/Actuators", *J.Appl. Mech.*, 57(2): 434-441.
- [18] A. F. Vaz, 1998, "Composite Modeling of Flexible Structures with Bonded Piezoelectric Film Actuators and Sensors", *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 47(2): 513-520.
- [19] S. Leleu, H. Abou-Kandil, Y. Bonnassieux, 2001, "Piezoelectric Actuators and Sensors Location for Active Control of Flexible Structures", *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 50(6):1577-1582.
- [20] D. Sun, J. K. Mills, J. Shan, S. K. Tso, 2004, "A PZT Actuator Control of a Single-Link Flexible Manipulator Based on Linear Velocity Feedback and Actuator Placement", *Mechatronics*, 14:381-401.
- [21] J. Y. Lew and S. M. Moon, 2001, "A Simple Active Damping Control For Compliant Base Manipulators", *IEEE/ASME Trans on Mechatronics*, 6:305-310.

- [22] P. T. Knotik, S. Yurkovicivh, U. Ozguner, 1988, "Acceleration Feedback for Control of a Flexible Manipulator Arm", *J. Robot. Syst.*, 5(3): 181-196.
- [23] C. Chevallereau and Y. Aoustin, 1992, "Nonlinear control laws for a 2-link flexible robot: Comparison of applicability domains", *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., Nice, France*, 784-753.
- [24] H. T. Banks, R. C. H. Del Rosario, H. T. Tran, 2002, "Proper Orthogonal Decomposition based Control of Transverse Beam Vibrations: Experimental Implementation", *IEEE Trans Contr. Syst. Technol.*, 10(5): 717-726.
- [25] W. Chen, M. Buehler, G. Parker, B. Bettig, 2004, "Optimal Sensor Design and Control of Piezoelectric Laminate Beams", *IEEE Trans Contr. Syst. Technol.*, 12(1):148-155.
- [26] B. K. Kim, S. Park, W. K. Chung, 2003, "Robust Controller Design for PTP Motion of Vertical XY Positioning Systems with a Flexible Beam", *IEEE/ASME Trans on Mechatronics*, 8:99-110.
- [27] R. Bravo, 2000 "Vibration Control of Flexible Structures Using Smart Materials", PhD Dissertation, McMaster University, Canada.
- [28] I. N. Kar, K. Seto, F. Doi, 2000, "Multimode Vibration Control of a Flexible Structure Using  $H_\infty$  Based Robust Control", *IEEE/ASME Trans on Mechatronics*, 5:23-31.
- [29] H. W. Park, H. S. Yang, Y. P. Park, S. H. Kim, 1999, "Position and Vibration Control of a Flexible Robot Manipulator Using Hybrid Controller", *Robot Auton. Syst.*, 28(1): 31-34.
- [30] D. Halim and S. O. Moheimani, 2002, "Experimental Implementation of Spatial Control on a Piezoelectric-Laminate Beam", *IEEE/ASME Trans on Mechatronics*, 7:346-356.
- [31] Z. Wang, H. Zeng, D. W. C. Ho, H. Unbehauen, 2002, "Multiobjective Control of a Four-Link Flexible Manipulator: A Robust  $H_\infty$  Approach", *IEEE Trans Contr. Syst. Technol.*, 10:866-975.
- [32] A. Benjeddou, 2000, "Advances in piezoelectric finite element modeling of adaptive structural elements: a survey", *Comput. Struct.* 76:347-363.

- [33] Wang and C. K. Jen, 1996 “Design and Fabrication of Composites for Static Shape Control”, *Final Report NRC-CNRC*.
- [34] Y. Yaman, T. Çalışkan, V. Nalbantoğlu, D. Waechter, E. Prasad, 2001, “Active Vibration Control of a Smart Beam”, Canada-US *CanSmart Workshop Smart Materials and Structures* proceedings, Montreal Quebec, Canada.
- [35] Y. Yaman, T. CaliKcan, V. Nalbantoglu, E. Prasad and D. Waechter, 2002, “Active vibration control of a smart plate”, *ICAS2002 CONGRESS*.
- [36] Xu, S. X. and Koko, T. S., 2004, “Finite element analysis and design of actively controlled piezoelectric smart structures”, *Finite Elem. Anal. Des.*, 40: 241–62.
- [37] H. Karagülle, L. Malgaca and H. F. Oktem, 2004, “Analysis of Active Vibration Control in Smart Structures by ANSYS”, *Smart Mater. Struct*, 13:661-667.
- [38] X. J. Dong, G. Meng, and J. C. Peng, 2006, “Vibration control of piezoelectric smart structures based on system identification technique: Numerical simulation and experimental study”, *Journal of Sound and Vibration*, 297:680–693.
- [39] C. A. Rogers, 1993, “Intelligent Material Systems-The Dawn of a New Materials Age”, *Journal of Intelligent Material System and Structures*, 4:4-12.
- [40] T. Takagi, 1990, “A Concept of Intelligent Materials”, *Journal of Intelligent Material System and Structures*, 1:149-156.
- [41] M. Shahinpoor, 1996, “Intelligent Materials and Structures Revisited”, *SPIE Proceedings on Smart Structures and Materials: Smart Materials Technology and Biomimics*, 2716:238-250.
- [42] E. F. Crawley, 1994, “Intelligent Structures for Aerospace: A Technology Overview and Assessment”, *AIAA Journal*, 32(8):1689-1699.
- [43] B. Culshaw, W. C. Michie, P. T. Gardiner, 1994, “Smart Structures- The Role of Fiber Optics”, *SPIE Proceedings on Interferometric Fiber Sensing*, 2341:134-151.
- [44] Jr. Spillman, W. B. Sirkis, P. T. Gardiner, 1996, “Smart Materials and Structures: What are they?”, *Smart Mater. Struct*, 5:247-254.
- [45] G. Akhras, 2000 “Smart Materials and Smart Systems for the Future”, *Canadian Military Journal*, Autumn.

- [46] G. Song, V. Sethi, H. N. Li, 2006, “Vibration control of civil structures using piezoceramic smart materials: A review”, *Engineering Structures* 28:1513–1524.
- [47] V. Piefort, 2001, “Finite Element Modelling of Piezoelectric Active Structures”, Ph.D. Thesis, Universit’e Libre de Bruxelles.
- [48] M. Sunar, S. J. Hyder, B. S. Yilbas, 2001, “Robust Design of Piezoelectric Actuators for Structural Control”, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 190:6257-6270.
- [49] C. H. Park., 2003, “Dynamics modeling of beams with shunted piezoelectric elements”, *Journal of Sound and Vibration*, 268:115–129.
- [50] C.H. Nguyen, S.J. Pietrzko, 2006, “FE analysis of a PZT-actuated adaptive beam with vibration damping using a parallel  $R-L$  shunt circuit”, *Finite Elements in Analysis and Design*, 42:1231–1239.
- [51] C.M.A. Vasques, J. Dias Rodrigue, 2006, “Active vibration control of smart piezoelectric beams: Comparison of classical and optimal feedback control strategies”, *Computers and Structures*, 84:1402–141.
- [52] ANSYS software ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA, (2006). ([www.ansys.com](http://www.ansys.com)).
- [53] A. Yousefi-Koma, 1997, “Active vibration control of smart structures using piezoelements”, Ph.D. Thesis, Carleton University.
- [54] Z. KIRAL, L. MALGACA, M. AKDAG, 2008, “Active Control of Residual Vibrations of a Cantilever Smart Beam”, *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, 32:51 – 57.

## **Abstract**

In this thesis, smart piezoelectric structures and two main techniques for vibration control of these structures is studied: 1) Vibration suppression of structures using piezoelectric passive shunt circuit, 2) Active vibration control of structures using piezoelectric sensors and actuators.

Being new field of research, there is still some confusion in the definitions and applications of these structures which is tried to get cleared in this thesis. But the main objective of this study is to find applicable and simple ways for modeling and control of these structures with two mentioned techniques.

For this reason, after defining the finite element equations of the closed loop systems, ANSYS is used to model the structures while the control actions are integrated with the ANSYS finite element model by APDL. A cantilever beam having symmetrically bonded piezoelectric patches is considered as a simple model of a smart structure. To study the passive response of the piezoelectric structures under shunt damping, harmonic analysis within the range of the natural frequencies of the structure is used. To investigate the active response of the structures having piezoelectric sensors and actuators, transient analysis is used and the response of the structure to the free and forced vibrations is studied. The response of the structure to a moving load is also studied.

**Keywords:** piezoelectric, flexible structure, smart structure, finite element, active vibration control



**Faculty of Mechanical Engineering**

# **Active Vibration Control of Smart Piezoelectric Structures**

**Meisam Abdi**

**Advisor:  
Dr. Ardeshir Karami Mohammadi**

**June 2009**