



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
تاسیس ۱۳۷۲

دانشکده مهندسی هوافضا

پایان نامه کارشناسی ارشد

گرایش سازه‌های هوایی

کنترل فعال ارتعاشات بال هواپیما با استفاده از سنسورها و عملگرهای

پیزوالکتریک

استاد راهنما :

آقای دکتر سعید ایرانی

آقای دکتر اردوان کریم زاده

دانشجو :

سهراب میرزا عابدینی

بهمن ۱۳۹۰

## چکیده

کنترل ارتعاشات در علم مکانیک و هوافضا امری بسیار مهم تلقی می‌شود زیرا ارتعاشات و نواسانات مزاحم باعث فرسایش زودرس تجهیزات و قطعات شده و همچنین در اثر بروز پدیده‌های مخربی مانند فلاتر خرابی شدیدی در سازه به وجود می‌آید. بدین منظور برای کاهش و میراسازی ارتعاشات ناخواسته، سامانه‌ای برای جذب یا خنثی کردن آن بایستی طراحی شود. این سامانه شامل مدل دینامیکی یا آیرودینامیکی بال، حسگرها و عملگرهایی جهت تعیین وضعیت و اعمال نیروی کنترل و سیستم کنترل است.

نظر به این که طول بال در مقایسه با ضخامت آن بسیار بزرگتر است می‌توان از تئوری تیر اوپلر-برنولی برای مدل‌سازی استفاده نمود. همچنین برای مدل‌سازی دینامیکی بال، تیری با مقطع متغییر در نظر گرفته می‌شود تا به بال شبیه‌تر باشد. در این پروژه از دو مدل بال با مقطع متغییر نمایی و خطی (بصورت گوه شکل) استفاده شده و سپس به هر مدل سنسور و عملگر پیزوالکتریک اضافه شده است تا اثر نیروی عملگر (کنترل فعال) بر روی تیر بررسی شود. لازم بذکر است که هر دو مدل بصورت تحلیلی حل شده‌اند و با استفاده از آنالیز مودال و جداسازی متغییرها و تئوری سری‌های فروبینوس مدل دینامیکی سیستم‌ها بصورت معادلات فضای حالت نوشته شده و سپس نتایج فرکانس طبیعی و مد آن‌ها تعیین شده و با هم مقایسه شده‌اند. سپس با اعمال سیستم کنترل پسخوراند و کنترل بهینه نتایج سیستم حلقه بسته ارائه شده است. و پاسخ زمانی سیستم به کنترل فعال ارتعاشات توسط عملگرهای پیزوالکتریک ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: ارتعاشات - بال هواپیما - کنترل فعال - پیزوالکتریک - سیستمی - مقطع متغییر



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاسیس ۱۳۰۷

دانشکده مهندسی هوا فضا

تأییدیه هیئت داوران

هیئت داوران پس از مطالعه ی پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان:  
(کنترل فعال ارتعاشات بال هواپیما با استفاده از سنسورها و عملگرهای پیزوالکتریک)) ، توسط سهراب  
میرزا عابدینی صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه ی کارشناسی ارشد در رشته ی  
مهندسی هوافضا گرایش مهندسی فضایی مورد تایید قرار می دهد.

۱. استاد راهنما: آقای دکتر سعید ایرانی

۲. استاد راهنما: آقای دکتر اردوان کریم زاده

۳. استاد ممتحن: آقای دکتر عبدالمجید خشنود

۴. استاد ممتحن: آقای دکتر علی محمودی



## اظهارنامه

موضوع پایان نامه : کنترل فعال ارتعاشات بال هواپیما با استفاده از سنسورها و عملگرهای پیزوالکتریک

اساتید راهنما : آقای دکتر سعید ایرانی، آقای دکتر اردوان کریم زاده

دانشجو : سهراب میرزا عابدینی

شماره‌ی دانشجویی : ۸۸۰۴۲۳۴

اینجانب سهراب میرزا عابدینی دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا گرایش سازه‌های هوایی دانشکده مهندسی هوافضا دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تایید می‌باشد و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ مدرکی یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب مطلوب دانشگاه به طور کامل رعایت شده است.

تاریخ.....



## حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱. حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هر گونه کپی برداری به صورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی هوا فضا دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی مجاز می باشد. ضمناً متن این صفحه باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲. کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع، مجاز نمی باشد.



## کلام تشکر و قدردانی

پایان نامه‌ای که مشاهده می‌کنید نتیجه یک سال کار می‌باشد که بسیاری از اساتید و دوستان مرا در به انجام رساندن آن راهنمایی کردند.

اگرچه این رساله به نام بنده در این دانشگاه ثبت می‌شود ولی این کار بدون کمک استاد خوبم دکتر "اردوان کریمزاده" و دوستان خوبم مهندس "سعید برناسی" و مهندس "طه موسوی" انجام پذیر نبود. مراتب قدردانی و تشکر را هرچند در این چند خط نمی‌توانم بجا آورم اما باز هم از ایشان متشکرم. همچنین از پدر و مادر دلسوز و همسر مهربانم برای کمک‌های بی‌دریغشان در تمام مدت تحصیل کمال تشکر را دارم. که بدون حمایت‌های این دو، بنده به هیچ آینده‌ای دست پیدا نمی‌کردم. هرچند این پایان‌نامه در اینجا به اتمام می‌رسد اما این پایان، نامه نیست و کار پژوهش بر روی این عنوان توسط اینجانب همچنان ادامه خواهد داشت.

سهراب میرزا عابدینی  
دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی  
s\_abedini@sina.kntu.ac.ir



کنترل فعال ارتعاشات بال هواپیما با استفاده از سنسورها و عملگرهای پیزوالکتریک

---

به یاد  
ابراهیم معتمد

---



## فهرست مطالب

### فصل اول: مقدمه ..... ۱

- ۱-۱- مقدمه‌ای بر سازه‌های هوشمند ..... ۲
- ۲-۱- مفهوم کنترل ارتعاشات ..... ۴
- ۱-۲-۱- مقایسه ایزولاسیون ارتعاشات با جذب ارتعاشات ..... ۵
- ۲-۲-۱- جذب ارتعاشات در مقابل کنترل ارتعاشات ..... ۶
- ۳-۱- طبقه بندی سیستم‌های کنترل ..... ۸
- ۴-۱- تعمیم سازه‌ی هوشمند به بال هواپیما و مروری بر کارهای انجام شده ..... ۱۱

### فصل دوم: پیزوالکتریسیته ..... ۱۷

- ۱-۲- مفهوم پیزوالکتریسیته ..... ۱۸
- ۲-۲- رفتارهای پایه و مدل ساختاری مواد پیزوالکتریک ..... ۱۸
- ۳-۲- تاریخچه پیزوالکتریسیته ..... ۲۱
- ۴-۲- ساختار کریستالی مواد پیزوالکتریک ..... ۲۵
- ۲-۴-۱- مدل ساختاری ماده پیزوالکتریک ..... ۲۹
- ۲-۴-۲- روابط ساختاری: ..... ۳۰
- ۵-۲- ثابت‌های پیزوالکتریکی ..... ۳۷
- ۱-۵-۲- عملگرهای پیزوالکتریک ..... ۴۲
- ۶-۲- مدل‌سازی عملگر پیزوالکتریک در چیدمان عرضی (خمشی) ..... ۴۶
- ۷-۲- روابط دینامیکی تیر و پیزوالکتریک ..... ۵۷

### فصل سوم: تخمین خصوصیات بال ..... ۶۷

- ۱-۳- اطلاعات کلی در مورد بال ایرباس ۳۱۰ ..... ۶۸





## فصل چهارم: ارتعاشات عرضی تیر ..... ۷۴

۱-۴-مدل سازی تیر یکنواخت ..... ۷۵

۱-۴-۱-بررسی ارتعاشات آزاد ..... ۷۹

## فصل پنجم: تیرهای مقطع متغییر ..... ۸۶

۱-۵- تعیین معادلات تیر یک سر گیردار با تغییر مقطع نمایی ..... ۸۷

۲-۵- تعیین معادلات تیر یک سر گیردار با مقطع متغییر خطی ..... ۹۶

۳-۵- پاسخ به نیروی خارجی ..... ۱۰۷

۱-۳-۵- رفتار تیر پیوسته ..... ۱۰۷

## فصل ششم: پاسخ تیرهای با مقطع متغییر به نیروی خارجی ..... ۱۱۰

۱-۶- تیر نمایی ..... ۱۱۲

۲-۶- مدل مرتبه کاهش یافته ..... ۱۱۳

۳-۶- شبیه سازی عددی ..... ۱۱۶

## فصل هفتم: کنترل ارتعاشات ..... ۱۲۵

7-1- کنترل پسخوراند منفی ..... ۱۳۲

۱-۱-۷- مشخصات پاسخ گذرا ..... ۱۳۶

7-2- طراحی کنترل کننده بهینه خطی LQR ..... ۱۴۴

## فصل هشتم: نتیجه گیری و پیشنهادات ..... ۱۵۴

۱-۸- بحث و نتیجه گیری ..... ۱۵۵

۲-۸- پیشنهادات ..... ۱۵۵

منابع و مراجع ..... ۱۵۶



## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ ..... ۲
- شکل ۲-۲-تعریف مفهومی و مشخصات سازه هوشمند ..... ۳
- شکل ۳-۲ مدل مستقیم در مقایسه با غیرمستقیم ..... ۵
- شکل ۴-۲-انواع سیستم‌های کنترل ارتعاشات ..... ۶
- شکل ۵-۲-نمونه‌ای از جذب ارتعاشات ..... ۷
- شکل ۶-۲-شماتیکی از کنترل فعال ..... ۹
- شکل ۷-۲ سازه‌ای عمومی و ابتدایی چیدمان مستهلک کننده غیر فعال ..... ۹
- شکل ۸-۲ شماتیکی نمونه وار از سازه مجهز به سیستم‌های تعلیق ..... ۱۱
- شکل ۱-۲-نمایش رفتار مستقیم و معکوس پیزوالکتریسیته ..... ۱۹
- شکل ۲-۲-شماتیک القاگر پیزوالکتریک خمشی ..... ۱۹
- شکل ۳-۲-برادران کوری ..... ۲۱
- شکل ۴-۲ ساختار بلورشناسی بلور پیزوسرامیک ..... ۲۶
- شکل ۵-۲ شماتیک دوقطبی الکتریکی در نواحی وایس ..... ۲۷
- شکل ۶-۲-نمای ماکروسکوپی قطبی شدن یک ماده پیزوالکتریک ..... ۲۷
- شکل ۷-۲ - چیدمان القاگر پیزوالکتریک برای اندازه‌گیری  $d_{31}$  ..... ۳۷
- شکل ۸-۲- معرفی شماتیک محورهای بلورشناسی و جهات تغییر شکل ..... ۳۸
- شکل ۹-۲- شماتیکی از چیدمان پیزوالکتریک لایه‌ای برای استفاده از  $d_{31}$  ..... ۳۹
- شکل ۱۰-۲- نمایش ثابت ولتاژ پیزوالکتریک  $g_{31}$  در چیدمان *laminar* ..... ۴۰



- شکل ۲-۱۱- جفت عملگر پیزوالکتریک..... ۴۶
- شکل ۲-۱۲- سیستم مختصات و توضیحات در مورد الحاقات تیر و عملگر..... ۴۷
- شکل ۲-۱۳- توزیع نیرو بروی تیر..... ۴۷
- شکل ۲-۱۴- تغییر شکل داخلی تیر..... ۴۸
- شکل ۲-۱۵- تغییر شکل سینماتیکی تیر اویلر-برنولی..... ۴۸
- شکل ۲-۱۶- توزیع تنش- و گشتاور داخلی..... ۴۹
- شکل ۲-۱۷- تیر با جفت پیزوالکتریک..... ۵۲
- شکل ۲-۱۸- یک تیر با یک عملگر پیزوالکتریک..... ۵۵
- شکل ۲-۱۹- تجزیه توزیع تنش نامتقارن..... ۵۶
- شکل ۲-۲۰- تیر با پیزوالقاگرهای با هم گذاری شده متعدد..... ۵۸
- شکل ۳-۱- نمای سه بعدی هواپیما..... ۶۸
- شکل ۳-۲- نمای بال..... ۶۹
- شکل ۳-۳- مشخصات بال هواپیمای A310..... ۷۰
- شکل ۴-۱- قسمتی از تیر تحت نیرو..... ۷۶
- شکل ۴-۲- دیاگرام آزاد..... ۷۶
- شکل ۴-۳- تیر در حال خمش..... ۷۷
- شکل ۵-۱- تیر با مقطع نمائی..... ۸۷
- شکل ۵-۲- شکل مودهای تیر نمائی..... ۹۲
- شکل ۵-۳- مد پنجم ارتعاشی تیر یکسر درگیر با  $\beta = 0$ ..... ۹۳
- شکل ۵-۴- مقایسه ضرایب خمش متفاوت برای مود اول..... ۹۵
- شکل ۵-۵- نمای عرضی تیر گوه‌شکل..... ۹۶



- شکل ۵-۶-مختصات تیر گوه شکل در انتهای آزاد تیر ..... ۹۶
- شکل ۵-۷- مختصات تیر گوه شکل در انتهای مقید تیر..... ۹۶
- شکل ۵-۸- شکل مودهای اول تا چهارم تیر گوه شکل ..... ۱۰۴
- شکل ۵-۹-محور مختصات در انتهای تیر گوه شکل ..... ۱۰۶
- شکل ۵-۱۰- محور مختصات در انتهای آزاد تیر گوه شکل..... ۱۰۶
- شکل ۶-۱- شماتیک تیر گوه شکل ..... ۱۱۱
- شکل ۶-۲- شماتیک تیر نمایی ..... ۱۱۲
- شکل ۶-۳- شماتیک ایرفویل ..... ۱۱۶
- شکل ۶-۴- ارتعاشات تیر نمونه با طول دلخواه..... ۱۱۸
- شکل ۶-۵- پاسخ به ورودی پله ..... ۱۱۹
- شکل ۶-۶- پاسخ به ورودی شیب ..... ۱۱۹
- شکل ۶-۷- پاسخ حلقه باز تیر نمایی به عنوان بال..... ۱۲۰
- شکل ۶-۸- پاسخ به ورودی ramp برای تیر نمایی با ضریب شیب ۱.۲۱ ..... ۱۲۱
- شکل ۶-۹- پاسخ به ورودی ramp برای تیر نمایی با ضریب شیب ۱.۲۱ ..... ۱۲۲
- شکل ۶-۱۰- پاسخ به ورودی سینوسی برای تیر نمایی با ضریب شیب ۱.۲۱ ..... ۱۲۲
- شکل ۶-۱۱- پاسخ حلقه باز تیر گوه شکل به عنوان بال ..... ۱۲۳
- شکل ۶-۱۲- پاسخ حلقه باز تیر نمایی به عنوان بال به ورودی شیب با جفت پیزوالکتریکها..... ۱۲۳
- شکل ۷-۱- شماتیک سیستم حلقه باز..... ۱۲۶
- شکل ۷-۲- شماتیک سیستم کنترل فعال ..... ۱۲۷
- شکل ۷-۳- شماتیک ساده سیستم حلقه بسته ..... ۱۲۷
- شکل ۷-۴- نمایش ساده *piezopatch* ها بروی تیر یکنواخت ..... ۱۲۹



- شکل ۵-۷-۱۲۹.....*piezopatch* بروی تیر نمائی
- شکل ۶-۷-۱۳۱..... بلوک دیاگرام حلقه بسته با پسخوراند
- شکل ۷-۷-۱۳۱.....کنترل پسخوراند سازه انعطاف پذیر شامل تعداد کثیری از مدهای الاستیکی
- شکل ۸-۷-۱۳۳.....مود اول
- شکل ۹-۷-۱۳۳.....مود دوم
- شکل ۱۰-۷-۱۳۳.....مود سوم
- شکل ۱۱-۷-۱۳۳.....مود چهارم
- شکل ۱۲-۷-۱۳۴.....نمودار *pole-zero* برای سیستم حلقه باز
- شکل ۱۳-۷-۱۳۵.....نحوه ترکیب *gain* در پخورد منفی
- شکل ۱۴-۷-۱۳۷.....منحنی پاسخ پله واحد با نمایش زمان تأخیر و صعود و فراجاهش و نشست
- شکل ۱۵-۷-۱۳۹.....تعریف زاویه  $\beta$
- شکل ۱۶-۷-۱۴۱.....پاسخ گذرای سیستم حلقه بسته با کنترل پسخوراند منفی
- شکل ۱۷-۷-۱۴۱.....پاسخ گذرای مود یک سیستم حلقه بسته
- شکل ۱۸-۷-۱۴۲.....پاسخ گذرای مود دوم- سیستم حلقه بسته
- شکل ۱۹-۷-۱۴۲.....پاسخ گذرای مود سوم- سیستم حلقه بسته
- شکل ۲۰-۷-۱۴۲.....پاسخ گذرای مود چهارم- سیستم حلقه بسته
- شکل ۲۱-۷-۱۴۳.....بلوک دیاگرام شبیه‌سازی شده در *Matlab Simulink toolbox*
- شکل ۲۲-۷-۱۴۳.....شبیه‌سازی در *Simulink*
- شکل ۲۳-۷-۱۴۶.....بلوک دیاگرام برای نمایش *LQR*
- شکل ۲۴-۷-۱۵۱.....پاسخ گذرای مود اول تیر نمائی با کنترلر بهینه حالت پسخوراند
- شکل ۲۵-۷-۱۵۱.....پاسخ گذرای چهار مود اول تیر نمائی با کنترلر بهینه حالت پسخوراند



- شکل ۷-۲۶- کنترل ارتعاش مود اول تیر نمائی با کنترلر بهینه حالت پسخوراند..... ۱۵۱
- شکل ۷-۲۷- کنترل ارتعاش مود دوم تیر نمائی با کنترلر بهینه حالت پسخوراند..... ۱۵۲
- شکل ۷-۲۸- کنترل ارتعاش مود سوم تیر نمائی با کنترلر بهینه حالت پسخوراند..... ۱۵۲
- شکل ۷-۲۹- کنترل ارتعاش مود چهارم تیر نمائی با کنترلر بهینه حالت پسخوراند..... ۱۵۳
- شکل ۷-۳۰- خمش عرضی تیر..... ۱۵۳

## فهرست جداول

- جدول ۲-۱- تشریح اثر پیزوالکتروسیستی بصورت ساده..... ۲۵
- جدول ۲-۲- تعریف ثابت‌های مواد پیزوالکتریک با استفاده از روابط ساختاری..... ۳۴
- جدول ۲-۳- روابط بین پیزوالکتریک و ثابت‌های مواد..... ۳۶
- جدول ۲-۴- گزیده‌ای از ثابت‌های مواد برای چند پیزوالکتریک معروف..... ۳۸
- جدول ۲-۵- تقسیم‌بندی پیزو عملگرها با توجه به کاربرد کلی..... ۴۳
- جدول ۲-۶- طرح‌ها و مشخصات مختلف پیزو عملگر..... ۴۵
- جدول ۳-۱- اطلاعات بال هواپیمای ایرباس ۳۱۰..... ۷۰
- جدول ۳-۲- مشخصات نهائی بال..... ۷۳
- جدول ۵-۱- مقادیر ویژه مدهای ارتعاش تیر با خمش  $\beta = 0$ ..... ۹۱
- جدول ۵-۲- مقادیر ویژه مدهای ارتعاش تیر با خمش  $\beta = -1, +1$ ..... ۹۳
- جدول ۵-۳- مقادیر ویژه مدهای ارتعاش تیر با خمش  $\beta = -1.21$ ..... ۹۴
- جدول ۵-۴- مقادیر ویژه تیر گوه شکل برای مدهای ۱ تا ۴..... ۱۰۳
- جدول ۵-۵- مقایسه مقادیر ویژه تیر گوه‌شکل و نمائی..... ۱۰۷



- جدول ۱-۶ - مقادیر مورد نیاز در محاسبات ارتعاشات برای نمونه بال ..... ۱۱۶
- جدول ۲-۶ - مقادیر و ثابت‌های پیزوالکتریک نمونه ..... ۱۱۷
- جدول ۳-۶ - مشخصات ۳ پیزوالکتریک نمونه ..... ۱۱۷
- جدول ۴-۶ - فرکانس طبیعی تیر بال با مدل تیر نمایی ..... ۱۲۰

## فهرست علائم

علائم	نام پارامتر	واحد
ولتاژ	$vlt$	$V$
طول	$m$	$l$
زمان	$s$	$t$
نیرو	$N$	$F$
جرم	$kg$	$m$
جابجایی دیالکتریک	$C / m^2$	$D$
میدان الکتریکی	$V / m$	$\varepsilon$
ضریب گذردهی مطلق دیالکتریک	$[F/m]$	$\xi$
ضریب برآورد مکانیکی	$[m^2 / N] = C^{-1}$	$s$
ماتریس ضرایب کرنش پیزوالکتریک	$m/V$ و $C/N$	$d_{ip}$
بار الکتریکی	$C / m^3$	$Q$
شدت جریان	$N/C$	$I$
انرژی پتانسیل الکتریکی	$KWh$	$Ue$
چگالی انرژی کل	$KWh / m^3$	$\delta u_v$
تنش	$Pa$ یا $N/m^2$	$\sigma$
ماتریس ضرایب گذردهی در میدان تنش ثابت	$m / F$	$\beta_{ij}^\sigma$
ماتریس ضرایب ولتاژ پیزوالکتریک- رابط بین تنش و میدان الکتریک	$Vm / N$ or $m^2 / C$	$g_{ip}$



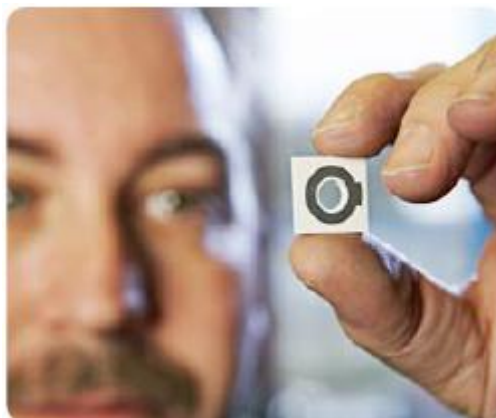
$c_{pq}^D$	$N / m^2$	ضرایب سختی الاستیسیته تحت جابجایی الکتریکی ثابت
$e_{ip}$	$V / m.V$ or $C/m^2$	ماتریس ضرایب پیزوالکتریک
$\xi_{ij}^\sigma$	$Farad, F / m$	ماتریس ضرایب گذردهی یادیالکتریک تحت تنش ثابت
$s_{pq}^\varepsilon$	$m^2 / N$	ماتریس ضرایب برآورد مکانیکی تحت میدان الکتریک ثابت
$h_{ip}$	$V / m$	ماتریس ضرایب پیزوالکتریک
$C$	$F$	ظرفیت هم ارز ماده پیزوالکتریک
$V$	$N$	نیروی برشی
$M$	$N.m$	گشتاور خمشی
$I$	$m^4$	ممان اینرسی
$E$	$N / m^2$	مدول یانگ
$\omega$	$rad / s$	فرکانس
$t_p$	$m$	ضخامت المان پیزوالکتریک
$t_b$	$m$	ضخامت تیر در نقطه اتصال
$\alpha$	$m^{-1}$	شیب توزیع تنش
$S$	$m$	کرش
$\kappa$	بی بعد	ضریب پیزوالکتریک خمشی
$\rho$	$kg / m^3$	چگالی
$\Omega$	—	فرکانس بی بعد
$\zeta$ و $\eta$	—	مکان بی بعد
$Q_i(t)$	—	نیروی تعمیم یافته
$q(x,t)$	$N$	بار گسترده
$\alpha_m$	—	ضریب چگالی در معادله پیزوالکتریک
$\alpha$	—	ضریب شیب توزیع تنش
$F_n$		ضریب مکان پیزوالکتریک



# فصل اول: مقدمه

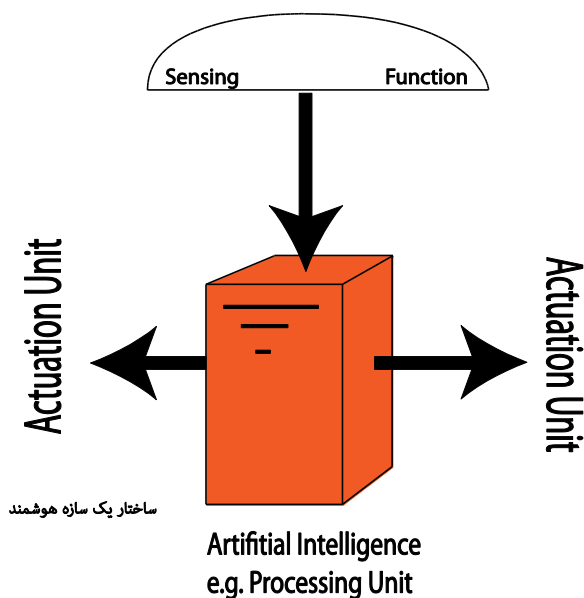


## ۱-۱- مقدمه‌ای بر سازه‌های هوشمند



شکل ۱-۱

در ادبیات ارتعاشی تعاریف متعددی برای سازه‌ی هوشمند در نظر گرفته میشود که طبق هر زمینه‌ی مهندسی یا علمی این تعریف تغییر می‌کند. برخلاف چنین تنوعی، بصورت عام پذیرفته شده که سازه‌ی هوشمند سازه‌ای است که شامل خصوصیات حیات و هوش مصنوعی است. (شکل ۱-۲). خصوصیات حیات بیانگر این موضوع است که سازه قابلیت حسگری و عملگری داشته باشد، این خصوصیات تقریباً در هر موجود زنده‌ای وجود دارد. این قابلیت‌ها می‌توانند بصورت ذاتی مربوط به سیستم باشد یا اینکه بصورت مصنوعی به آن اضافه شود. هوش مصنوعی تضمین کننده‌ی این موضوع است که سازه‌ی هوشمند بتواند قابلیت‌های منحصر بفردی داشته باشد که از طریق کامپیوتر، میکروپروسسور، منطق کنترلی و الگوریتم‌هایی که برای شرایط محیطی مختلف عمل میکنند این کار انجام شود. این خصوصیت تابع کنترلی را طبق شکل (۱-۲) انجام میدهد.



شکل ۲-۰- تعریف مفهومی و مشخصات سازه هوشمند

بصورت کلی یک سازه هوشمند شامل یک یا چند ماده‌ی فعال می‌باشد. این مواد فعال بصورت منحصر بفردی عمل می‌کنند که حداقل دو مورد از قابلیت‌های: مکانیکی، الکتریکی، مغناطیسی، گرمایی، شیمیایی و نوری را به کار می‌برند. توسط کوپل کردن دو مورد از این قابلیت‌ها، این مواد می‌توانند شکل خود را تغییر دهند یا به تحریک محیطی پاسخ دهند و خواص فیزیکی، هندسی و رئولوژیکی خود را تغییر دهند. برخی از مواد هوشمند به ترتیب اکتشاف در لیست زیر آورده شده است

- پیزوالکتریک<sup>۱</sup> (۳۱۵ ق.م. کوپل گرمایی و مکانیکی)
- سیال الکترورئولوژیکی<sup>۲</sup> (۱۷۸۴، کوپل میدان الکتریکی و مکانیکی)
- مواد الاستیسیته مغناطیسی<sup>۳</sup> (۱۸۴۰، کوپل مغناطیسی و مکانیکی)
- پیزوالکتریک‌ها<sup>۱</sup> (۱۸۸۰، کوپل میدان الکتریکی و مکانیکی)

<sup>۱</sup> pyroelectrics

<sup>۲</sup> electrorheological fluids

<sup>۳</sup> magnetostrictive materials



کنترل فعال ارتعاشات بال هواپیما با استفاده از سنسورها و عملگرهای پیزوالکتریک

- آلیاژهای حافظه دار<sup>۲</sup> (۱۹۳۲)، کوپل میدان گرمایی و مکانیکی
- سیالهای مگنتورئولوژیکال<sup>۳</sup> (۱۹۴۷)، کوپل میدان مغناطیسی و مکانیکی
- پلیمرهای الکترواکتیو و ژل‌های پلی-الکتروولیت<sup>۴</sup> (۱۹۴۹)، کوپل الکتریکی و مکانیکی
- مواد الاستیسیته الکتریکی<sup>۵</sup> (۱۹۵۴)، کوپل میدان الکتریکی و مکانیکی
- مواد فوتواستریکتیو<sup>۶</sup> (۱۹۷۴)، کوپل میدان نوری و مکانیکی

در این پروژه بیشتر تمرکز بروی پیزوالکتریک‌ها بوده که در آینده مفصلاً روابط حاکم بر آنها تشریح خواهد شد. در حقیقت پیزوالکتریک‌ها یکی از عمومی‌ترین مواد هوشمند هستند که در بسیاری سیستم‌های مکترونیکی و کنترل ارتعاشات بکار می‌روند. [۱]

## ۱-۲- مفهوم کنترل ارتعاشات

هنگام کنترل ارتعاشات دو موضوع مهم باید در نظر گرفته شوند؛ نامعینی‌ها و کنترل. در مدل‌سازی یک سیستم دینامیکی دو سناریو ممکن است اتفاق بیافتد. اگر بتوان پارامترهای سیستم را تحت شرایط معینی معلوم نمود به این مدل "مستقیم" گویند (شکل ۱-۳). برای حالتی که رفتارهای پیچیده وجود دارد و دینامیک سیستم نامعینی دارد از طریق مدل "غیرمستقیم" رفتار سیستم بررسی می‌شود. لازم بذکر است که هر دوی این مدل‌ها می‌توانند "جبری" یا "احتمالاتی" باشد.

---

<sup>1</sup> piezoelectrics

<sup>2</sup> shape memory alloys

<sup>3</sup> magnetorheological fluids

<sup>4</sup> electroactive polymers and polyelectrolyte gels

<sup>5</sup> electrostrictive materials

<sup>6</sup> photostrictive materials