مجتمع فنی و مهندسی
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک - طراحی کاربردی

کنترل فعال ارتعاشات یک ورق مستطیلی FGM

استاد راهنما:
دکتر منصور رفیعیان

استاد مشاور:
دکتر پرویز ملک‌زاده

پژوهش و نگارش:
علی حسین‌نژاد شیرازی

تابستان ۸۹

بسم الله الرحمن الرحيم

چکیده

در این پژوهش، کنترل فعال ارتعاشات یک ورق مستطیلی از جنس FGM و با تکیه‌گاه‌های ساده بررسی می‌شود. از تئوری سنتی ورق برای به‌دست آوردن معادله دیفرانسیلی حرکت ورق با وصله‌های پیزوالکتریک استفاده می‌شود و در آن از یک تابع محلی برای اعمال اثرات جرم و سختی وصله‌های پیزوالکتریک استفاده می‌شود. سری فوریه دوگانه سینوسی برای به‌دست‌آوردن فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ورق استفاده می‌شود و قطب‌های مدار بسته در هنگام استفاده از کنترل‌کننده‌های PID به‌دست می‌آیند. ارتعاشات آزاد ورق و نیز تاثیر وصله‌های پیزوالکتریک در هنگام به‌کارگیری روش کنترل فعال برای کاهش ارتعاشات ورق، بررسی می‌شود. سپس با استفاده از تبدیل لاپلاس و به کمک شکل مودهای ورق، پاسخ سیستم به نیروی تحریک خارجی به‌دست می‌آید. در این روش حل، تاثیر کنترل-کننده‌های انتگرال‌گیر در کنترل فعال ورق از جنس FGM مورد تحقیق قرار می‌گیرد.

در ادامه، کنترل موضعی ارتعاشات ورق FGM با استفاده از وصله‌های پیزوالکتریک و با چیدمان وصله‌ها به‌صورت دایره‌ای در اطراف یک نقطه از ورق بررسی می‌شود. با ارائه مثال مزایای این روش چیدمان و استفاده از ۴ وصله به‌جای ۹ وصله در کاهش ارتعاش موضعی ورق مورد بحث قرار می‌گیرد.

سرانجام، روش کنترل فازی جهت دستیابی به کنترل بهتر ارتعاشات ورق استفاده می‌شود و نشان داده می‌شود که کنترل‌کننده‌های فازی در شرایط مساوی بکارگیری بیشینه ولتاژ برای عملگرهای پیزوالکتریک، عملکرد بهتری نسبت به کنترلرهای PID دارند.

فهرست

عنوان صفحه

فصل۱ مروری بر کارهای گذشتگان ۱
۱-۱- مقدمه ۱
۱-۲- ارتعاش ورق‌ها ۳
۱-۲-۱- حل‌های تحلیلی برای ارتعاش ورق‌های بدون پیزوالکتریک ۳
۱-۲-۲- حل‌های عددی برای ارتعاش ورق‌های بدون پیزوالکتریک ۶
۱-۳- کنترل ارتعاشات ورق‌ها به کمک مواد پیزوالکتریک ۷
۱-۳-۱- کنترل ارتعاشات ورق‌های با مواد پیزوالکتریک در سطح و یا در میان ورق ۷
۱-۳-۲- کنترل ارتعاشات ورق‌ها با وصله‌های پیزوالکتریک ۱۰
۱-۴- ورق‌های هدفمند ۱۳
۱-۴-۱- تنش‌ها و کرنش‌ها در ورق‌های هدفمند ۱۳
۱-۴-۲- ارتعاشات ورق‌های هدفمند ۱۴
۱-۴-۳- کنترل ارتعاشات ورق‌های از جنس مواد هدفمند به کمک مواد پیزوالکتریک ۱۶

فصل۲ بررسی ارتعاشات ورق هدفمند با استفاده از عملگرها و حسگرهای پیزوالکتریک ۲۱
۲-۱- مقدمه ۲۱
۲-۲- برخی مدل‌های موجود برای ورق‌های هدفمند ۲۳
۲-۲-۲- خواص مادی ورقP-FGM ۲۴
۲-۲-۳- خواص ورق S-FGM ۲۵
۲-۲-۴- خواص مادی یک ورق E-FGM ۲۶
۲-۳- مدل‌سازی و فرمول‌بندی وصله‌های پیزوالکتریک ۲۷
۲-۳-۲- مدل وصله‌ی عملگر ۳۰
۲-۳-۳- مدل وصله‌ی حسگر ۳۲
۲-۴- به دست آوردن روابط تنش-کرنش در ورق هدفمند ۳۳
۲-۵- به دست آوردن معادلات تعادل برای ورق هدفمند ۳۷
۲-۶- مدل ورق هوشمند ۴۰

فصل۳ ارتعاش آزاد ورق با وصله های پیزوالکتریک و تأثیر کنترل کننده‌های PID برآن ۴۵
۳-۱- مقدمه ۴۵
۳-۲- تشریح معادله دیفرانسیل ۴۵
۳-۳- حل معادله‌ی دیفرانسیل حرکت ۴۹
۳-۴- تأثیر وصله‌های پیزوالکتریک بر کاهش ارتعاشات آزاد ورق ۷۱

۳-۵- کنترل شکل مودهای ورق با استفاده از وصله‌های پیزوالکتریک ۸۸
۳-۶- توسعه‌ی روش حل برای کنترل کننده‌های PID ۹۱

فصل۴ ارتعاش اجباری ورق با وصله‌های پیزوالکتریک و تأثیر کنترل کننده PID بر آن ۹۵
۴-۱- مقدمه ۹۵
۴-۲- حل ناهمگن معادله‌ی دیفرانسیلی حرکت ۹۵

فصل۵ کنترل محلی ورق با استفاده از وصله‌های پیزوالکتریک ۱۱۵
۵-۱- مقدمه ۱۱۵
۵-۲- کنترل سیستم با وصله‌های کمتر ۱۱۵
۵-۳- نتایج کنترل با ۴ وصله ۱۱۸

فصل۶ کنترل فازی ۱۲۳
۶-۱- مقدمه ۱۲۳
۶-۲- سیستم‌های فازی چگونه سیستم‌هایی هستند ۱۲۵
۶-۲-۱- انواع سیستم‌های فازی ۱۲۵
۶-۲-۲- ریاضیات فازی ۱۲۶
۶-۲-۳- بخش‌های مختلف سیستم‌های فازی ۱۲۶
۶-۲-۴- کنترل فازی ۱۲۸
۶-۲-۵- کنترل فازی در مقایسه با کنترل کلاسیک ۱۲۸
۶-۲-۶- روشهای طراحی کنترل کننده‌های فازی ۱۳۰
۶-۳- مثال‌هایی از کنترل فازی ۱۳۱
۶-۴- استفاده از کنترل فازی در ورق هدفمند ۱۳۶
۶-۵- مدل‌سازی عددی و نتایج ۱۳۹

فصل۷ نتایج و پیشنهادات ۱۴۳

فهرست شکل ها

عنوان

صفحه

شکل۲-۱. هندسه یک ورق هدفمند ۲۳
شکل۲-۲. تغییرات مدول یانگ در ورق P-FGM ۲۵
شکل۲-۳. تغییرات مدول یانگ در ورق S-FGM ۲۶
شکل۲-۴. تغییرات مدول یانگ در ورق E-FGM ۲۷
شکل۲-۵. وصله پیزوالکتریک متصل به سطح ۲۷
شکل۲-۶. نحوه قرار گرفتن وصله‌ها روی ورق میزبان ۳۰
شکل۲-۷. منتجه‌های تنش در یک المان کوچک از یک ورق هدفمند ۳۷
شکل۳-۱. ورق با ۵ وصله پیزوالکتریک، بردارهای ویژه A و فرکانس‌های طبیعی ۵۴
شکل۳-۲. ورق با ۹ وصله پیزوالکتریک، بردارهای ویژه A و فرکانس‌های طبیعی ۵۵
شکل۳-۳. الف- شکل مود اول به ازای $m=1$ و $n=1$ ۵۶
شکل۳-۴. نمودار جابجایی نقاط ۱ و ۲ و ۵ ۶۹
شکل۳-۵. نمودار پتانسیل الکتریکی حسگرهای ۱ و ۲ و ۵ ۷۰
شکل۳-۶. مقادیر فرکانس‌های ω_i و بردارهای ویژه $\{A\}^i$ و مقادیر c_i و φ_i برای حالت الف مثال ۳-۲ ۷۵
شکل۳-۷. مقادیر فرکانس‌های ω_i و بردارهای ویژه $\{A\}^i$ و مقادیر c_i و φ_i برای حالت ب مثال ۳-۲ ۷۶
شکل۳-۸. مقادیر فرکانس‌های ω_i و بردارهای ویژه $\{A\}^i$ و مقادیر c_i و φ_i برای حالت پ مثال ۳-۲ ۷۷
شکل۳-۹. جابجایی نقاط ۱ و ۲ و ۳ و ۵ در حالت الف مثال ۳-۲ ۸۲
شکل۳-۱۰. جابجایی نقاط ۱ و ۲ و ۳ و ۵ در حالت ب مثال ۳-۲ ۸۳
شکل۳-۱۱. جابجایی نقاط ۱ و ۲ و ۳ و ۵ در حالت پ مثال ۳-۲ ۸۴
شکل۳-۱۲. پتانسیل الکتریکی حسگرها و عملگرها در حالت الف مثال ۳-۲ ۸۵
شکل۳-۱۳. پتانسیل الکتریکی حسگرها و عملگرها در حالت ب مثال ۳-۲ ۸۶
شکل۳-۱۴. پتانسیل الکتریکی حسگرها و عملگرها در حالت پ مثال ۳-۲ ۸۷
شکل۴-۱. جابجایی نقاط ۱ و ۵ و ۹ در اثر بار پله‌ای واحد ۱۰۰
شکل۴-۲. پتانسیل الکتریکی حسگرهای ۱و۵و۹ ۱۰۱
شکل۴-۳. پتانسیل الکتریکی عملگرهای ۱و ۵و ۹ ۱۰۲
شکل۴-۴. ضرایب $E_1(t)$ و $E_2(t)$ و$E_3(t)$ در اثر بار پله‌ای واحد ۱۰۳
شکل۴-۵. ضرایب $E_4(t)$ و $E_5(t)$ و$E_6(t)$ در اثر بار پله‌ای واحد ۱۰۴
شکل۴-۶. ضرایب $E_7(t)$ و $E_8(t)$ و$E_9(t)$ در اثر بار پله‌ای واحد ۱۰۵
شکل۴-۷. نمودار جابجایی نقطه وسط وصله ۵ در حالت تشدید ۱۰۷
شکل۴-۸. پتانسیل الکتریکی حسگر و عملگر شماره ۵ در حالت الف ۱۰۸
شکل۴-۹. پتانسیل الکتریکی حسگر و عملگر شماره ۵ در حالت ب ۱۰۹
شکل۴-۱۰. جابجایی نقاط ۱ تا ۹ مثال ۴-۳ ۱۱۱
شکل۴-۱۱. ولتاژ حسگرهای ۱ تا ۹ مثال ۴-۳ ۱۱۲
شکل۴-۱۲. ولتاژ عملگرهای ۱ تا ۹ مثال ۴-۳ ۱۱۳

شکل۵-۱. آرایش ۴ تایی وصله‌ها در اطراف نقطه $(\frac{l_x}{4}, \frac{l_y}{2})$ ۱۱۷
شکل۵-۲. جابجایی نقاط ۱ و ۲ و ۴ و ۶ در حالت با ۴ وصله ۱۱۹
شکل۵-۳. پتانسیل الکتریکی حسگرهای ۱ و ۲ و ۴ و ۶ در حالت با ۴ وصله ۱۲۰
شکل۵-۴. پتانسیل الکتریکی عملگرهای ۱ و ۲ و ۴ و ۶ در حالت با ۴ وصله ۱۲۱
شکل۶-۱. روش استنتاجی ماکزیمم- مینیمم و روش مرکز سطح برای استخراج نتیجه نهایی ۱۳۲
شکل۶-۲. توابع شکل ورودی‌ها و خروجی برای یک توربین بخار ۱۳۴
شکل۶-۳. مثالی از نتیجه گیری از قوانین ۱۳۵
شکل۶-۴. نتیجه نهایی با توجه به مقدار تاثیر هرکدام از قوانین و با روش مرکز سطح ۱۳۶
شکل۶-۵. خطا و تغییرات خطا در ورودی و توابع عضویت در فرمان کنترل ۱۳۷
شکل۶-۶. سطح فازی ۱۳۸
شکل۶-۷. نُه شکل مود اول ورق هدفمند هوشمند ۱۳۹
شکل۶-۸. جابجایی نقطه ۱ ..... ۱۴۰
شکل۶-۹. جابجایی نقطه ۲ ..... ۱۴۰
شکل۶-۱۰. جابجایی نقطه ۵ ..... ۱۴۰

فهرست جدول ها

عنوان

صفحه

جدول۵-۱. یک حالت از ضرایب که باعث پایداری آرایش شکل ۵-۱ میشود ۱۱۷
جدول۶-۱. جدول قوانین فازی ۱۳۸
جدول۶-۲. جدول خواص ورق با وصله‌های پیزوالکتریک ۱۳۹

فهرست اصلاحات

مساحت	A

فصل۱
مروری بر کارهای گذشتگان

۱-۱- مقدمه

ورق‌ها به عنوان سازه‌هایی برای تحمل بار در بسیاری از رشته‌های مهندسی مانند مکانیک، عمران و هوافضا دارای اهمیت هستند، لذا تحقیقات بسیاری در مورد آنها انجام شده است. فرمول-بندی ورق‌ها به دلیل ابعاد و ضخامت آنها که اکثراً نازک در نظر گرفته می‌شوند، پیچیده‌تراز فرمول‌بندی تیرها و دیگر سازه‌های معمول در مهندسی است. تعیین میدان‌های تنش و جابه‌جایی در ورق‌ها برای طراحان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به دلیل کاربردهای متنوع ورق‌ها در صنایع، هندسه‌های گوناگون برای ورق‌ها مطرح است و برای هر کدام از این هندسه‌ها شرایط مرزی و بارگذاری های مختلفی ممکن است وجود داشته‌باشد. از این رو حل‌های بسیار زیادی برای ورق‌ها ارئه شده است و اکثراً در مواردی حل تحلیلی ارائه شده که شرایط مرزی و هندسه ورق ساده باشد. حل‌های عددی نیز به طور گسترده‌ای برای ورق‌های با هندسه و شرایط مرزی دلخواه ارائه شده است.

همان‌گونه که اشاره شد از ورق‌ها در سازه‌های هوافضایی و عمرانی و صنعتی به صورت گسترده استفاده می‌شود. در چنین کاربردهایی بسیاری از بارگذاری‌ها از نوع دینامیکی است و لذا ارتعاشات ورق‌ها یکی از مسائلی است که ممکن است پیش بیاید. پس لازم است تدابیری برای کنترل ارتعاشات ورق‌ها برای جلوگیری از بروز خرابی‌ها و عوارض نامطلوب ناشی از آن اندیشیده شود. شیوه‌های گوناگونی برای کنترل ارتعاشات ورق وجود دارد و یکی از پرکاربردترین آنها کنترل فعال به کمک مواد پیزوالکتریک به عنوان عناصری الکترومکانیکی است. پیزوالکتریک‌ها هم به عنوان حسگر و هم به عنوان عملگر برای کنترل ارتعاشات ورق‌ها بکار می‌روند. چنین سازه‌هایی که از یک الگوریتم کنترلی و مواد هدفمند برای کنترل ارتعاشات استفاده می‌کنند به سازه‌های

هوشمند معروفند و در آنها سعی می‌شود با تغییرات شرایط بارگذاری شکل سازه در حالت اولیه نگه داشته شود.

با رشد روز افزون فناوری، نیاز به موادی که بتوان از آن در دماهای بالا و محیط‌های خورنده استفاده کرد و انواع خواص مطلوب کاربران را داشته باشد، باعث معرفی مواد هدفمند[1] گردید. در این‌گونه مواد، خواص ماده در یک جهت خاص یک تابع مکانی است و به‌دلیل چنین تفاوتی، بسیاری از تحقیقات برای به‌دست آوردن روابط بنیادین برای اینگونه مواد متمرکز شده است. کنترل فعال ارتعاشات ورق های هدفمند نیز در مواردی که بار گذاری‌های دینامیکی وجود دارد، حائز اهمیت است.

در این فصل به تاریخچه بحث مورد نظر و کارهایی که تاکنون انجام شده، پرداخته می‌شود. کارهای گذشتگان از چند منظر مورد بررسی قرار خواهد گرفت. ابتدا کارهایی مرور می‌شوند که به بررسی تنش‌ها و کرنش‌ها و تا حدودی کمانش ورق‌ها پرداخته اند. پس از آن ارتعاشات ورق‌های معمولی و بدون مواد پیزوالکتریک بررسی می‌شود که خود این ورق‌ها از لحاظ روش‌های حل به دو دسته‌ی دارای حل‌های تحلیلی و حل‌های عددی تقسیم بندی شده‌اند. پس از آن به ارتعاشات ورق‌های همراه با مواد پیزوالکتریک پرداخته می‌شود. این‌گونه ورق‌ها از لحاظ نحوه استفاده از مواد پیزوالکتریک به دو دسته تقسیم شده اند: ورق‌هایی که مواد پیزوالکتریک در آنها حک شده[2] و یا روی سطح ورق را پوشانده‌اند[3] و ورق‌هایی که دارای وصله‌های پیزوالکتریک[4] هستند. در این بین مقالاتی نیز وجود دارند که هر دوحالت را بررسی کرده‌اند که در ادامه کارهای مربوط به این ورق‌ها نیز آمده است.

در ادامه قبل از پرداختن به کارهای مربوط به کنترل فعال ارتعاش ورق‌ها به کارهایی اشاره

---

[1] - Functionally Graded Material (FGM)
[2] - embedded piezoelectric
[3] - bonded piezoelectric
[4] - piezoelectric patches

می‌شود که از مواد پیزوالکتریک برای کنترل شکل[1] سازه‌ها استفاده کرده است. بحث کنترل فعال ارتعاشات ورق‌ها در ادامه بررسی می‌گردد. پس از آن به بررسی پژوهش‌ها در مورد ورق‌هایی از جنس مواد با خواص متغیر پرداخته خواهد شد. به دلیل اینکه فرمول‌بندی این‌گونه ورق‌ها متفاوت از ورق‌های معمولی است ، در دسته‌ای کاملاً جداگانه به آن پرداخته شده است و روندی که برای بررسی ورق‌های معمولی طی می‌شود برای این‌گونه ورق‌ها نیز پیگیری خواهد شد.

۱-۲- ارتعاش ورق‌ها

همان‌گونه که قبلاً گفته شد، بررسی ارتعاش ورق‌های همراه با مواد پیزوالکتریک را از لحاظ نحوه استفاده از مواد پیزوالکتریک در آنها می‌توان به دو دسته طبقه‌بندی می‌توان کرد. اما قبل از آن به کارهای مربوط به ارتعاش ورق‌های بدون مواد پیزوالکتریک پرداخته می‌شود که در دو دسته‌ی ارتعاشات خطی و غیرخطی بررسی می‌شوند. ارتعاشات خطی ورق‌های بدون مواد پیزوالکتریک از لحاظ نحوه‌ی حل در دو دستهٔ حل‌های عددی و تحلیلی بررسی می‌شوند.

۱-۲-۱- حل‌های تحلیلی برای ارتعاش ورق‌های بدون پیزوالکتریک

همان‌گونه که گفته شد در ارتعاشات ورق‌های بدون پیزوالکتریک دو دسته حل وجود دارد که در اینجا به کارهایی که حل تحلیلی برای مسائل ارائه داده‌اند پرداخته می‌شود. مرجع [۱] کتابی است که ارتعاش ورق‌ها را بررسی کرده است. در این کتاب هم روش های تحلیلی و هم روش‌های عددی برای هندسه‌ها و شرایط مرزی و بارگذاری های گوناگون ورق آمده است. این کتاب از این لحاظ که به طور اختصاصی ارتعاش ورق ها را بررسی کرده و در فصولی جداگانه تئوری ارتعاشات ورق ها را آورده، در بررسی ارتعاشات ورق‌ها مرجع مناسبی است.

[1] - shape control

در مرجع [۲] ارتعاشات آزاد و کمانش ورق‌های نازک مستطیلی تحت بارهای ثابت در صفحه،بررسی شده‌اند و از روش برهم‌نهی برای به‌دست آوردن یک حل تحلیلی استفاده شده است. شرایط مرزی در این مرجع، شرایط متداول مرزی است و از حل لوی برای چندین شرط مرزی استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده بسیار نزدیک به نتایج روش‌های دیگر موجود برای ورق‌ها است. از مزایای مرجع [۲] این است که با تغییراتی اندک حل ارائه شده می‌تواند برای یک ورق اورتوتروپیک نیز به کار رود.

در مرجع [۳] حلی تحلیلی برای بررسی ارتعاش یک ورق مستطیلی با یک لولای خطی داخلی[1] ارائه شده است. دو تکیه گاه این ورق، ساده بوده و لولا عمود بر این تکیه‌گاه‌هاست و دو تکیه گاه باقیمانده دلخواه است. در چنین شرایطی از حل لوی برای بررسی ارتعاش چنین ورقی استفاده شده و با ترکیب آن با تئوری تغییر شکل مرتبه اول برشی[2] ، ارتعاشات ورق مورد مذکور بررسی شده است.تأثیر وجود لولا و نیز محل قرارگیری آن در ورق بر رفتار ارتعاشی ورق با شرایط مرزی گوناگون و ورق‌های متفاوت بحث شده و نشان داده شده که افزایش ضخامت ورق، پارامترهای فرکانسی در ورق را کاهش می‌دهد.

مرجع [۴] ارتعاشات ورق میندلین بر تکیه گاه های الاستیک غیرهمگن را بررسی کرده است. ورق میندلین ورقی است که با تکیه گاه‌هایی عمود بر سطح ورق علاوه بر تکیه گاه‌های کناری ورق است. بنابراین، ورق میندلین دارای چندین دهانه است که سازه هایی مانند پل‌ها از بهترین مثال‌ها در این زمینه است. حل تحلیلی در این مرجع براساس حل لوی است و حل دقیق مسأله ارتعاشات ورق میندلین بر تکیه گاه الاستیک غیرهمگن اولین بار در این مرجع ارائه شده است.

---

[1] - internal line hinge
[2] - First order shear deformation theory

روش پیوندی که ترکیبی از روش اجزاء محدود وتئوری پوسته‌ی ساندرز[1] است، برای بررسی ارتعاشات یک ورق مستطیلی در مرجع [۵] به کار رفته است. تئوری پوسته‌ی ساندرز بر اساس تقریب اول لاو[2] بوده ولیکن مزیت آن این است که در شرایط حرکت جسم صلب، کرنش‌ها را صفر می‌دهد. روش ارائه شده در این مقاله یک روش شبه‌تحلیلی است زیرا مبانی روش اجزاء محدود را که یک روش عددی است با روش‌های تحلیلی ترکیب کرده است.

در مراجع [۶] و [۸] ارتعاشات آزاد، کمانش و پایداری یک ورق اورتوتروپیک را به روش سری‌های نامحدود انجام شده است. در مرجع [۷] روش جداسازی متغیرها برای به‌دست آوردن فرکانس‌های طبیعی یک ورق اورتوتروپیک مستطیلی مورد استفاده قرار گرفته است و نشان داده شده این روش حل، که یک روش ریاضی است، برای برخی شرایط مرزی جواب‌های دقیقی می‌دهد و نیز دقت آن در مقایسه با دیگر روش‌های حل به اثبات رسیده است.

در مرجع [۱۰] اثرات حرارتی بر ارتعاشات غیرخطی یک ورق مستطیلی با لبه‌های گیردار را بررسی شده و در [۱۱] مقایسه‌ای بین تئوری‌های کلاسیک ورق، تئوری تغییر شکل مرتبه اول و تئوری‌های مرتبه بالاتر، برای بررسی ارتعاشات غیرخطی ورق‌های ایزوتروپیک مستطیلی انجام شده است. در [۱۳] اولین فرکانس و شکل مود غیرخطی برای یک ورق لایه ای کامپوزیتی بررسی شده است. کلیه تکیه‌گاه‌های ورق در این تحقیق ساده بوده و از اصل همیلتون برای به‌دست آوردن فرکانس طبیعی و شکل مود پایه استفاده شده است.

---

[1] - Sander's shell theory
[2] - Love's first approximation

۱-۲-۲- حل‌های عددی برای ارتعاش ورق‌های بدون پیزوالکتریک

در مرجع [۹]، روش پیچش منفرد گسسته[1] ، که یک روش عددی است برای بررسی ارتعاشات ورق کامپوزیتی لایه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است.این روش، یک روش عددی مناسب برای تخمین مشتقات است و همراه با تئوری تغییرشکل برشی مرتبه اول برای تحلیل، به‌کار رفته‌است. در این مقاله نشان داده شده که روش مذکور دارای همگرایی مناسبی نسبت به دیگر روش‌های حل عددی است.

در مرجع [۱۲] از یک اَبَر المان[2] در تحلیل اجزاء محدود یک ورق اورتوتروپیک مستطیلی استفاده شده است.در این مقاله نشان داده شده که استفاده از المان مزبور باعث کاهش زمان محاسبات در تحلیل ارتعاش ورق می‌شود که برای یک تحلیل عددی بسیار مهم است. تحلیل تنش و آنالیز ارتعاشات آزاد ورق همگن و ایزوتوپ ضخیم بر مبنای تئوری‌های مرتبه بالای برشی و روش اجزاء محدود در [۱۵] مورد بررسی قرار گرفته است.

ارتعاشات غیرخطی ورق لایه‌ای بر تکیه گاه الاستیک در [۱۶] بررسی شده است. از تقریب گالرکین برای به‌دست آوردن معادلات دیفرانسیل استفاده شده و معادلات دیفرانسیل با روش عددی رانگ کوتا حل شده‌اند. مرجع [۱۷] تئوری‌های معمولی و مرتبه بالای تغییر شکل برشی را با روش اجزاء محدود برای تحلیل ارتعاش یک ورق همگن مستطیلی و از جنس ماده الاستیک خطی غیرقابل تراکم، ترکیب کرده است. نتایج حاصله تطابق خوبی با روش‌های تحلیلی نشان می-دهند.

یکی از کاربردهای مهم ورق‌ها استفاده از آنها در محیط‌هایی است که در تعامل با سیالات قرار دارند. تحلیل ارتعاش ورق مستطیلی در چنین محیط‌هایی به کمک روش اجزاء محدود در

---

[1] - Discrete singular convolution (DSC)
[2] - super element

[۱۸] بررسی شده است و دقت نتایج با روش‌های تحلیلی موجود مقایسه شده که حاکی از رضایت بخش بودن روش مورد استفاده است.

از یک المان چهار گره‌ای برای آنالیز ارتعاش ورق - پوسته لایه‌ای به کمک روش اجزاء محدود در [۱۹] استفاده شده است و تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول مبنای تئوری این تحقیق است. [۲۰] مطالعه‌ای بر تغییر شکل‌های استاتیک و تحلیل ارتعاشات ورق کامپوزیتی و لایه‌ای ایزوتروپ را بر مبنای تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اوّل انجام داده است. نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج دیگر روش‌های عددی مانند اجزاء محدود در شرایط مشابه مطابقت دارد.

۱-۳- کنترل ارتعاشات ورق‌ها به کمک مواد پیزوالکتریک

از مواد پیزوالکتریک به عنوان موادی هوشمند در کنترل ارتعاشات سازه ها از جمله ورق‌ها استفاده می‌شود. تحقیقات وسیعی در زمینه کنترل ارتعاشات ورق‌ها به کمک مواد پیزوالکتریک صورت پذیرفته که می‌توان آنها را در نحوه‌ی استفاده از مواد پیزوالکتریک در ورق به دو دسته تقسیم کرد. دسته‌ی اول ورق‌هایی که مواد پیزوالکتریک در آنها حک می‌شود و یا اینکه روی سطح ورق لایه‌ای از مواد پیزوالکتریک پوشانده می‌شود. دستهٔ دیگر مربوط به ورق‌هایی است که از وصله‌های پیزوالکتریک روی سطح ورق برای کنترل ارتعاش ورق استفاده می‌شود. روش‌های متفاوتی نیز برای کنترل ارتعاش ورق‌ها استفاده می‌شود که کنترل فعال ارتعاشات یکی از پرکاربردترین آنها می‌باشد.

۱-۳-۱- کنترل ارتعاشات ورق‌های با مواد پیزوالکتریک در سطح و یا در میان ورق

در این بخش براساس روش‌های حل (تحلیلی و عددی) به بررسی کارهای محققین پرداخته می‌شود. در زمینه‌ی کارهای عددی، مرجع [۱۴] کنترل ارتعاشات تیر – ورقی را که مواد

پیزوالکتریک روی سطح آنها را پوشانده است، بررسی کرده‌است. معادلات حرکت تیر – ورق که مواد پیزوالکتریک به آنها متصل شده، به کمک اصل همیلتون استخراج شده و برای تحلیل از روش اجزاء محدود استفاده شده است. برای کنترل، از تابع انرژی لیاپانوف استفاده شده است. نتایج حاصل از کاهش میزان ارتعاشات ورق پس از استفاده از مواد پیزوالکتریک بر مبنای استفاده از قضایای لیاپانوف را نشان می‌دهد.

[۲۶] پاسخ گذاری یک ورق کامپوزیتی لایه‌ای را که مواد پیزوالکتریک در بین ورق حک شده است را بررسی کرده است. برای فرمول‌بندی مسأله از تئوری یکپارچه ورق[1] که شامل تئوری‌های کلاسیک و تئوری های تغییر شکل برشی مرتبه اول و مرتبه سوم است ونیز روش اجزاء محدود برای مسأله استفاده شده است. در این تحقیق مشاهده شده که هرچه محل قرارگیری لایه پیزوالکتریک از صفحه میانی ورق دورتر باشد تأثیر آن در میرایی ارتعاشات بیشتر است زیرا در چنین حالتی گشتاور ایجاد شده توسط لایه های پیزوالکتریک برای کاهش ارتعاشات، بیشتر می-شود.

[۲۹] مطالعاتی بر میدان‌های الکتریکی در یک ورق کامپوزیتی لایه ای که شامل لایه‌های پیزوالکتریک است انجام داده است. نشان داده شده که مدل اجزاء محدود ارائه شده در این تحقیق پیوستگی تنش‌های عرضی و جابجایی‌های الکتریکی عرضی را تضمین می‌کند. بنابراین می‌تواند به عنوان یک جایگزین مناسب برای مدل‌های اجزاء محدود متداول قبل از آن شود.

از جمله کارهای عددی دیگر می‌توان به تحقیقی که در [۳۰] بر ورق‌هایی که دارای مواد پیزوالکتریک روی سطح خود هستند اشاره کرد. در مرجع [۳۱] از روش کنترل فعال برای میرایی ارتعاشات ورق استفاده شده و المان مورد استفاده در روش اجزاء محدود، یک المان مثلثی یک لایه با هجده درجه‌ی آزادی برای جابه‌جایی‌های تعمیم یافته و یک درجه‌ی آزادی برای پتانسیل

[1] - unified plate theory

الکتریکی برای هر المان پیزوالکتریک در یک لایه است.

اکنون به بررسی کارهایی پرداخته می‌شود که حل‌های تحلیلی ارائه کرده‌اند. در این بخش براساس تئوری‌های مورد استفاده برای تحلیل ورق، نوع ورق و میدان الکتریکی که برای کنترل ارتعاشات به‌کار می‌رود، می‌توان به بررسی تحقیقات انجام شده پرداخت. مراجع [۲۱] و [۲۵] به بررسی کنترل ارتعاشات یک ورق ساندویچی (ورقی که مواد پیزوالکتریک از بالا و پایین روی سطح ورق را پوشانده اند) را مورد بررسی قرار داده و هر دو از تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اوّل (FSDT) استفاده کرده‌اند.

بررسی ارتعاشات و کنترل یک ورق کامپوزیتی لایه‌ای با میان لایه‌های پیزوالکتریک، که به عنوان عملگرهای برشی عمل می‌کنند، موضوع تحقیق [۲۲] است که در آن کنترل پسخوراند جابه‌جایی و سرعت برای میرایی ارتعاش ورق استفاده شده است.

مرجع [۲۳] حلی دقیق براساس در نظر گرفتن همهٔ مؤلفه‌های میدان الکتریکی ارائه کرده است و تفاوت آن با مراجع [۲۱] و [۲۹] در نحوه مدل کردن و وارد کردن میدان‌های الکتریکی در معادلات می‌باشد.

در [۲۴] حل تحلیلی برای بررسی ارتعاشات آزاد یک ورق ضخیم دایره ای که سطوح آن را مواد پیزوالکتریک پوشانده است بر مبنای تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اوّل ارائه شده است. به دلیل محدودیت جهت ارائه حل تحلیلی ، این مسأله تنها با دو شرط مرزی گیردار و ساده حل شده است. در این تحقیق نشان داده شده که در صورتی که از تئوری کلاسیک ورق استفاده شود جوابها واگرا شده و در واقع تئوری کلاسیک ورق برای این شرایط برای ورق ضخیم جوابگو نخواهد بود.

ارتعاشات آزاد و اجباری غیرخطی ورق لایه ای با میان لایه های پیزوالکتریک و با شرط

مرزی تکیه گاه ساده که تحت بارگذاری‌های مکانیکی، الکتریکی و حرارتی قرار گرفته در [۲۷] مورد بررسی قرار گرفته است. از معادلات عمومی ون کارمن[1] برای لحاظ کردن اثرات ترموپیزوالکتریسیته استفاده شده است. در این تحقیق نشان داده شده که با افزایش دما، خیز و ممان خمشی افزایش یافته در حالی که فرکانس‌ها کاهش می‌یابند و نیز با افزایش ولتاژ مثبت خیز زیاد شده و ممان خمشی کاهش می‌یابد و در شرایط دمای یکسان تأثیر ولتاژ منفی، برعکس تأثیر ولتاژ مثبت است.

۱-۳-۲- کنترل ارتعاشات ورق‌ها با وصله‌های پیزوالکتریک

در این بخش نیز کارهای گذشتگان براساس حل‌هائی که ارائه کرده اند به دو دستهٔ حل‌های عددی و تحلیلی می‌توان آنها را تقسیم کرد. ابتدا مواردی بررسی می‌شوند که حل‌های تحلیلی ارائه کرده اند.

در [۳۰] حل تحلیلی برای کنترل پسخوراند ارتعاشات یک ورق به کمک وصله‌های پیزوالکتریک ارائه شده است.

کنترل ارتعاشات ورق‌های با تکیه گاه گیردار که در بسیاری از سازه‌های هوا فضائی به کار می‌روند از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در مرجع [۳۲] برای پیدا کردن محل بهینه قرار گرفتن وصله های پیزوالکتریک بر روی این‌گونه ورق‌ها تحقیقی انجام شده و برای کنترل ورق از پسخوراند جابه‌جائی و سرعت استفاده شده‌است. روش کنترلی مورد استفاده در این تحقیق نشان داده که حل ارائه شده در کارهای عملی نیز قابل استفاده است.

برای بدست آوردن فرکانس‌های یک ورق، می‌توان از تحریک یک وصله پیزوالکتریک در

[1] - Von Karman's equations

نقطه‌ای از ورق استفاده نمود. در [۳۴] تحقیقی در این مورد انجام شده و درباره‌ی تأثیر چنین وصله‌ای بر رفتار ارتعاشی قسمتی از ورق و یا کل ورق مطالعه شده‌است. در این مقاله نشان داده شده که توزیع ارتعاشات ناشی از تحریک وصله پیزوالکتریک روی ورق به ضخامت وصله بستگی دارد و از همه مهم‌تر اینکه روش ارائه شده می‌تواند به عنوان یک آزمون غیرمخرب سازه‌ای در کاربردهای عملی به کار رود.

در [۳۵] تحقیقی درباره کنترل فعال ارتعاشات ورق مستطیلی با تکیه گاه‌های ساده انجام شده‌است. از تئوری کلاسیک ورق برای بدست آوردن معادلات ورق وصله دار که اثرات جرم و سختی در آن لحاظ شده استفاده شده‌است و فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها به کمک سری-های فوریه بدست آمده‌اند. تأثیر کنترل‌کننده های انتگرال‌گیر بر کنترل فعال ارتعاشات ورق برای اولین بار در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته‌است. از مزایای روش ارائه شده، تغییر سرعت پاسخ هر یک از مودهای ورق از طریق تغییر ضرایب کنترل کننده مورد استفاده می‌باشد.

در [۳۶] کنترل فعال ارتعاش موضعی یک ورق مستطیلی مورد مطالعه قرار گرفته‌است. از یک آرایش ۴ وصله ای پیزوالکتریک برای کاهش موضعی ارتعاشات ورق استفاده شده‌است.

اکنون فرصت آن است تا به بررسی پژوهش‌هایی پرداخته شود که برای کنترل ارتعاش ورق-هایی که دارای وصله‌های پیزوالکتریک هستند حل‌های عددی ارائه کرده‌اند. [۳۷] پژوهشی در مورد نحوه توزیع ولتاژ و نقش آن در کنترل شکل سازه‌های هوشمند ارائه کرده‌است. الگوریتم - توزیع ولتاژ تدریجی[1] که ترکیبی از روش‌های تکرار است برای مسأله استفاده شده‌است . مزیت این تحقیق در این است که هیچ رابطه خطی بین جابه‌جائی و ولتاژ اعمالی فرض نشده و بنابراین نتایج آن در مورد مدل‌های غیرخطی نیز قابل اعمال است.

[1] - Buildup Voltage Distribution