دریافت: ۹ مهر ۹۵ پذیرش: ۲۳ آذر ۹۵

مکان یابی بهینه المان‌های پیزوالکتریک برای میرانمودن ارتعاشات سازه‌ها

مجتبی حسنلو[1*]، احمد باقری[2]، فرید نجفی[3]

۱-کارشناس ارشد مهندسی مکانیک،گرایش طراحی کاربردی، دانشکده مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۳- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
*رشت، ایران، صندق پستی ۳۷۵۶، **M.Hasanlou@Aol.Com**

چکیده

کاهش مصرف انرژی بعنوان هدف اساسی در طراحی محسوب می‌شود. بالطبع هدر رفت انرژی در هر سیستمی می‌تواند آینده یک سیستم را به مخاطره بیندازد. این موضوع چند دهه‌ای است که توجه فراوانی از سوی پژوهشگران سراسر دنیا قرارگرفته‌است. سیستم‌های پیوسته همانند یک سازه مهندسی از قبیل تیر – ورق- پوسته کاربرد وسیعی در صنایع مختلف دارد و بخش عمده سیستم‌های صنعتی دربرگیرنده این نوع سازه‌ها هستند اما مهمترین نکته در طراحی این نوع سیستم‌ها جلوگیری از خرابی، کاهش هزینه‌های تعمیرات و نگهداری و افزایش عمر و سلامت سیستم می‌باشد و این نکات مذکور بطور مستقیم و غیرمستقیم توصیف‌کننده مصرف انرژی می‌باشند و می‌توانند به نوعی اهداف طراحی را ارضا نسازند و به یک محصول و خروجی مطلوب دست نیابند. ارتعاش هر نوع سیستم پیوسته‌ای می‌تواند نتیجه نامطلوبی در عملکرد سیستم بجای گذارد و طراحی یک سیستم را تضعیف سازد بنابراین تلاش برای کاهش ارتعاش و کنترل این پدیده دینامیکی تاثیر بسزایی در کاهش اتلاف انرژی (انرژی جنبشی – انرژی پتانسیل) یک سازه پیوسته خواهد گذاشت. در این گزارش قرار است مجموعه فعالیت‌های علمی و پژوهشی که از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۳ در زمینه کاهش ارتعاشات سیستم‌های پیوسته با تمرکز بر رویکرد یافتن مکان بهینه بر روی سازه و نصب تکه‌های حسگر و عملگر پیزوالکتریک و ترکیب مدل هوشمند ساخته‌شده با انواع رویکردهای کنترلی جهت مهار و کنترل ارتعاشات ناخواسته سیستم در برابر تحریکات و اغتشاشات خارجی گزارش داده‌شود.

کلیدواژگان

مکان‌یابی بهینه، کنترل فعال ارتعاشی، حسگر و عملگر پیزوالکتریک، سازه پیوسته.

Optimal Placement of Piezoelectric Elements for Structural Vibration Suppression

M.Hasanlou*[1], A.Bagheri[2], F.Najafi[3]
[1] MSc., Mech. Eng., University of Guilan., Rasht, Iran
[2] Prof., Mech. Eng., University of Guilan., Rasht, Iran
[3] Assoc. Prof., Mech. Eng., University of Guilan., Rasht, Iran
P.O. Box 3756, Rasht, Iran, **M.Hasanlou@Aol.Com**

Abstract

Reducing energy consumption is the main purpose of design. Naturally, energy loss in each system can compromise the future of a system. This has drawn attention of researchers all around the world. Contentious structures the same as an engineering structure such as beam, plate, and shell are widely used in various industries. Much of industrial systems include these structures. However, the most important point in designing such structures is to avoid failure, reduce maintenance cost, and increase life of the structure. These points directly and indirectly can describe energy consumption and necessarily cannot meet the objectives of the design and not reach an optimal output and product. Vibration of any continuous system can have poor consequences on performance and can weaken the design of a system. Therefore, the effort to reduce vibration and control the mechanical phenomenon has a significant impact on reduced energy waste of a continuous structure (kinematic energy- potential energy). This paper sought to report scientific and research activities from 1980 to 2013 on vibration suppression of continuous systems focusing on optimal placement approach on the structure and installing piezoelectric S/A and smart model built by control approaches in order to attenuate and control unwanted vibrations of the system against external stimulations and disturbance.

Keywords

optimal placement, active vibration control, piezoelectric sensor and actuator, continuous structure

۱- مقدمه

از آنجایی که عنوان مکان‌یابی بهینه حسگرها و عملگرها منحصرا به پیزوالکتریک‌ها قائل نمی‌شود ولی در این گزارش، پیشنه تحقیق بیشتر به مکان‌یابی پیزوالکتریک بر روی انواع سازه‌های پیوسته تمرکز شده‌است که تاکنون محققین مورد بحث و بررسی خود قرار داده‌اند و در صورت لزوم برای هر پژوهش تصاویر مربوط به آن پژوهش نمایش داده‌شده‌است.

۲- سال ۱۹۸۰

آر.دابلیو.لانگمن[1] و همکارش، برای مکان‌یابی عملگر و حسگر بر روی سازه‌های هوایی از یک نوع روش جدید تحت عنوان درجه کنترل‌پذیری استفاده نموده‌اند. مفهوم درجه کنترل‌پذیری برای مانورپذیری استاندارد سازه‌های هوایی منظور است که براساس ذات و ساختار سیستم تکیه‌کرده‌است. آنها روش عددی برای تولید درجه کنترل‌پذیری یک سیستم پیشنهاد دادند. در حقیقت روش پیشنهادی آنها یک ارتباط ساده بین مختصات قرارگیری عملگر وحسگر سازه و میزان کنترل‌پذیری سیستم را می‌باشد.

[1] R.W.Longman

درجه کنترل‌پذیری یک سیستم کنترل‌نشده باید صفر باشد. درواقع سیستمی که صلاحیت اعمال کنترل و مانورپذیری داشته‌باشند. آنها توصیف‌کردند که درجه کنترل‌پذیری یک سیستم در اثر تبدیل متغیرها به متغیرهای جدید دیگر تغییر نخواهدکرد. همچنین درجه کنترل‌پذیری وابسته به زمان خواهد بود[۱].

۳- سال ۱۹۸۱

آمی. آربل[۱] در مقاله خود برای قراردادن عملگر و حسگر از روش اندازه‌گیری نوسانی سیستم استفاده کرد. روش اندازه‌گیری نوسانی سیستم[۲]، روشی است که به توصیف خطی یک سازه هوایی انعطاف‌پذیر پرداخته‌می-شود. مدل ریاضی یک سازه مرتبط با نوسان سیستم می‌تواند یک مدل کامل به حساب آید. منطق این روش براساس کمینه‌سازی انرژی اتلافی می‌باشد که این کمینه‌سازی انرژی اتلافی با کنترل‌پذیری سیستم ارتباط تنگاتنگی بوجود می‌آورد و باعث قرارگیری بهینه‌ی عملگر بر روی سازه و باعث افزایش میزان کنترل‌پذیری سیستم می‌شود[۲].

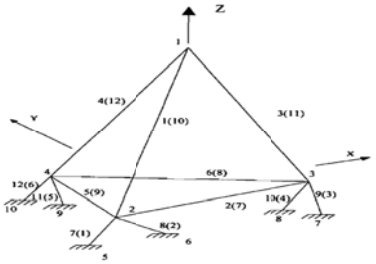
۴- سال ۱۹۹۲

ال.لین[۳] و همکارش، سعی در یافتن مکان مناسب و بهینه جهت قرارگیری حسگر و عملگر بر روی سازه انعطاف‌پذیر براساس معیار کنترل-پذیری و مشاهده‌پذیری پرداختند. سازه مورد بررسی آنها تیر و ورق با دوسر تکیه‌گاه ساده انجام پذیرفت. آنها طی تحقیقات خود پی‌بردند که مکان‌یابی بهینه برای حسگر و عملگر منجر به تعادل مودهای بالا و پایین سیستم می-شود[۳].

۵- سال ۱۹۹۴

آ.کی.دهینگرا[۴] و همکارش، به بررسی و تحلیل مکان‌یابی بهینه حسگر و عملگر بر روی سازه هوایی[۵] پرداختند. روش بهینه‌سازی آنها با ترکیب ۲ روش بهینه‌سازی[۶] تلاش به پی بردن تعداد و مکان مناسب حسگر و عملگرها پرداختند. آنها در این تحقیق خود ۲ هدف مهم را دنبال کردند[۴].

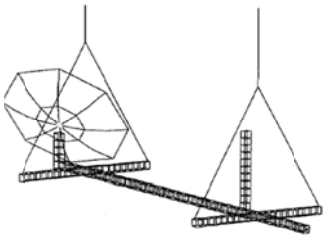
- کمینه‌کردن وزن سازه از طریق ۲ قید مقادیر ویژه و ضریب میرایی سازه.
- استفاده از یک قانون کنترلی[۷] جهت کنترل سازه و رسیدن به میرایی ارتعاشی.



شکل ۱: سازه هوایی

۶- سال۱۹۹۵

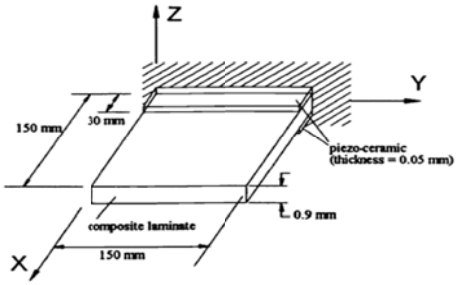
اچ.فوروگیا[۸] برای پیدانمودن بهترین مکان جهت قراردادن عملگر پیزوالکتریک، یک فرآیندی برای رسیدن به نقطه بهینه پیشنهاد نمود و در نهایت با استفاده از معیار بهترین کارایی عملگر پیزوالکتریک و با الگوریتم ژنتیک در جهت تعیین بهترین مکان بهینه برای عملگر ، ۸ مکان بهینه را پیشنهاد نمودند[۵].



شکل ۲: سازه مورد بررسی در ناسا

۷- سال ۱۹۹۶

آی.لی[۹] و همکارش با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک تلاش به جایابی بهینه عملگر پیزوالکتریک برای یک ورق یک سرگیردار کردند. آنها طی بررسی خود به این نتیجه رسیدند که قرارگیری در مکان نامناسب عملگر پیزو برای کنترل ارتعاش یک ورق،باعث کاهش کنترل‌پذیری سیستم و نمو پدیده سرریز[۱۰] می‌شود. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش تعداد مشخص از عملگرهای پیزو و یافتن بهترین مکان جهت کنترل سازه می‌توان چندین مود ارتعاشی را درآن واحد میرا نمود[۶].



شکل ۳: ورق یکسرگیردار با مشخصات هندسی بررسی شده در این پروژه

[۱] I.Lee
[۲] Spill Over
[۲] Ami.Arbel
[۳] Oscillatory System
[۴] L.Liu
[۵] A.K.Dhingra
[۶] ACOSS-Four
[۷] Synergistic Blend of Artificial Genetic Search, Gradient- Based Search
[۸] LQR
[۱۰] H.Furugya

۸- سال۱۹۹۹

آی. ام. صدری[۱] و همکاران مکان‌یابی بهینه تکه‌ی پیزوالکتریک را بر روی یک ورق ایزوتروپ با شرط مرزی تکیه‌گاه ساده[۲] بررسی‌کردند. روش بهینه‌سازی آنها برای دینامیک ورق براساس روش ریلی-ریتز بوده و ۲ معیار بطور همزمان جهت بهینه‌سازی از طریق الگوریتم ژنتیک برای یافتن مکان بهینه و قرارگیری پیزو بر روی آن درنظرگرفته‌اند. این ۲ معیار عبارتند از[۷]:

۱- کنترل‌پذیری مودال

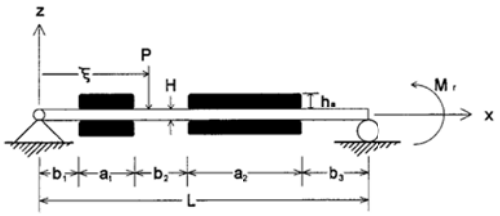
۲- گرامیان کنترل‌پذیری

ام.آی.میرزا[۳] و همکارش، در مقاله‌ای به بررسی مکان‌یابی بهینه بر روی تیر دوسر تکیه‌گاه ثابت[۴] و پوسته شکل پرداختند. آنها معیار جدیدی برای یافتن بهترین مکان ممکن جهت جلوگیری از ارتعاش در سیستم‌های خود معرفی نمودند. معیار آنها بصورت تابع هدف، تحت عنوان گرامیان حساس به اغتشاش ارائه نمودند.که با قرارگیری عملگر پیزوالکتریک و جایابی آن بر روی سازه به کمینه‌کردن این معیار پرداختند[۸].

جا-هونگ.هن[۵] و همکارش، بر روی یک ورق کامپوزیتی یک‌سرگیردار با استفاده از تئوری جابجایی لایه‌ایی[۶] و روش اجزاءمحدود در جستجوی مکان برای قرارگیری المان حسگر و عملگر پیزوالکتریک جهت میرایی ارتعاشی این نوع سازه پرداختند بطوریکه اهداف موردنظر آنها مشتمل بر کنترل‌پذیری، مشاهده‌پذیری، سرریزی سیستم بود. آنها با استفاده از کنترلر[۷] و روش بهینه‌سازی جهت یافتن مکان بهینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک، ۳مود اول ارتعاشی ورق کامپوزیتی را کنترل کردند[۹].

۹- سال۲۰۰۰

جی.سی.بروج[۸] و همکاران، تحقیقی بر روی ۳ هدف بهینه نمودند. این ۳ هدف شامل مکان قرارگیری پیزوالکتریک بعنوان حسگر و عملگر، مشخصات هندسی پیزوالکتریک و میزان ولتاژ بکارگرفته‌شده برای عملگر پیزو بود. آنها طی این تحقیق به این نتیجه رسیدند که با درک مشخصات هندسی وصله‌های پیزوالکتریک می‌توان به میزان نیروی خروجی ازآن و میزان پتانسیل پیزو در تولید بار اعمالی در جهت حذف ارتعاش دست پیدانمود. روش مدل‌سازی آنها برطبق روش اختلاف محدود[۹] بود و نتایج قابل قبولی در جهت بهینه‌سازی ۳ تابع هدف مکان، اندازه، ولتاژ دست‌پیداکردند[۱۰].

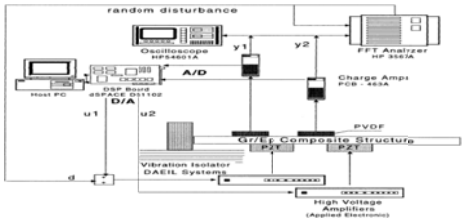


شکل ۴: تیر ۲ سر مفصل بهمراه المان حسگر و عملگر پیزوالکتریک

کیو.ونگ[۱۰] و همکارش، با استفاده از شاخص کنترل‌پذیری سیستم بر روی سازه تیر، پژوهشی را جهت بهینه‌کردن مکان و اندازه وصله‌های پیزوالکتریک جهت کنترل تیر و میرایی ارتعاشی آن داشتند. آنها با استفاده از میزان حساسیت، شاخص کنترل‌پذیری و طراحی شبکه‌بندی کل تیر، بهترین اندازه یا حجم (طول- عرض- ارتفاع) پیزوالکتریک و بهترین مکان (جهت میرایی سازه) دست یافتند. چرا که شاخص کنترل‌پذیری سیستم وابسته به اندازه عملگر پیزو و مکان قرارگیری آن از طریق آنالیز مودال بود[۱۱].

کیو.دی.هلیم[۱۱] و همکارش، مکان‌یابی بهینه پیزوالکتریک را با استفاده از شاخص کنترل‌پذیری و مشاهده‌پذیری سیستم بر روی یک ورق نازک دو سرگیردار بررسی نمودند بطوریکه، با استفاده از کنترل‌پذیری مکانی به راحتی می‌توان به مرتب‌سازی مکان عملگر و حسگر، تکه‌های پیزوالکتریک پرداخت. آنها شاخص کنترل‌پذیری سیستم را براساس مفهوم نرم مقاوم بی‌نهایت پیاده‌سازی نمودند و هرنقطه‌ایی از ورق کنترل‌پذیری بیشتری در مود ارتعاشی از خود نشان دهد، مکان مناسبی برای جایگذاری عملگر پیزوالکتریک جهت میرایی سازه می‌باشد[۱۲].

اوصام جی.الدراهیم[۱۲] و همکاران، مکان‌یابی یک یا دو قطعه عملگر پیزوالکتریک با درنظر گرفتن سایز قطعه و وزن آن تحقیق نمودند. آنها معتقدبودند برای اینکه مدل تیر اویلر- برنولی با ۶ نوع شرط مرزی مختلف به مدل واقعی نزدیک باشد، باید وزن وصله‌های عملگر پیزوالکتریک تاثیری در انرژی‌کرنشی تیر داشته باشد. چرا که تاثیر بسزایی در انرژی کرنشی تیر و سفتی دارد. آنها معتقدبودند که وصله‌های پیزوالکتریک باید در نقطه‌ای از تیر قرارگیرد که بیشترین انرژی کرنشی برخوردار است که با قرارگیری پیزو بر روی آن نقطه‌ی مشخص، میرایی تیر قابل حصول خواهدبود[۱۳].



شکل ۵: مدل کنترلی ورق کامپوزیتی یک‌سرگیردار

[۱] Q.Wang

[۲] Q. D.Halim

[۳] Osama J.Aldraihem

[۳] A.M.Sadri

[۴] Simply-Support

[۵] M.A.Mirza

[۶] Pined-Pined

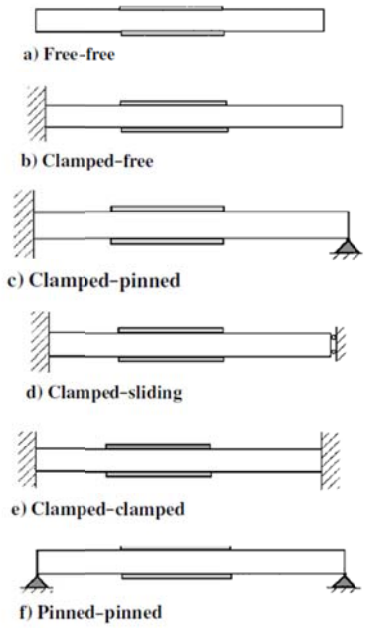
[۷] Jae-Hung.Han

[۸] Layer wise Displacement Theory

[۹] Positive Position Feedback

[۱۰] J.C.Bruch

[۱۱] Finite Difference Method



شکل ۶: تیر تحت بررسی در این پژوهش با شرایط مرزی مختلف بهمراه حسگر و عملگر پیزوالکتریک

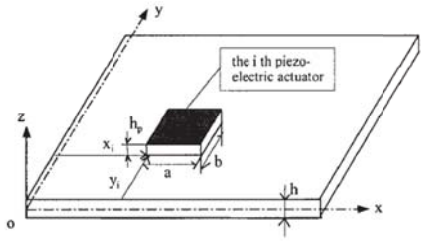
ال.بین[۱] و همکاران با استفاده از روش ماکزیمم نیروی مودالی، سعی در کنترل یک ورق با شرایط مرزی مشخص داشتند. بطوریکه توزیع گسسته تکه‌های پیزوالکتریک بر روی ورق، در مکان‌هایی باید صورت پذیرد که دارای نیروی مودالی ماکزیمم می‌باشد تا سازه میرا و کنترل شود. آنها اهداف زیر را در مکان‌یابی بهینه تکه‌های پیزوالکتریک بر روی ورق مدنظرداشتند.

۱- پایداری سیستم

۲- کنترل‌پذیری

۳- بهره وری از کنترل سیستم

آنها نقاطی را برای عملگر پیزو مدنظر داشتند که بیشترین کرنش یا جابجایی در آنها اتفاق می‌افتد. در واقع بیشترین کرنش، متناسب با بیشترین نیروی مودالی در آن مود مشخص می‌باشد[۱۴].



شکل ۷:مشخصات هندسی تکه پیزوالکتریک به منظور مکان‌یابی بهینه بر روی ورق

۱۰- سال۲۰۰۱

ماکولا ام.عبدالله[۲] و همکاران به مکان‌یابی بهینه حسگر و عملگر پیزوالکتریک بر روی سازه‌های مهندسی عمران، با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. روش پیشنهادی آنها برای قرارگیری بصورت همزمان[۳] حسگر و عملگر پیزوالکتریک بر روی سازه است بطوریکه پیشتر برای قرارگیری حسگر و عملگر بصورت متوالی و ترتیبی[۴] در مکان‌های بهینه ارائه شد[۱۵].

۱۱- سال۲۰۰۲

مارکو اچ.اچ. اودو نیجیوس[۵] و همکارش، به میرایی ارتعاشی یک ورق یک‌سرگیردار با استفاده از پیزوالکتریک بعنوان حسگر و عملگر پرداختند. هدف کاهش صوت انتشاریافته از ورق در اثر رفتار ارتعاشی بود که سازه از خود بروز می‌داد و با مکان‌یابی پیزو، از طریق الگوریتم ژنتیک سعی در کنترل ارتعاش سازه نمودند[۱۶].

وای.جی.یان[۶] و همکارش با استفاده از الگوریتم ژنتیک به یافتن مکان-بهینه برای جایگذاری حسگر وعملگر پیزوالکتریک پرداختند و علاوه برمکان بهینه، تعداد حسگر و عملگر مورد استفاده در این سیستم هوشمند را با استفاده از نیروی کنترلی و ماتریس مقادیر ویژه، انرژی پیزوالکتریک را به بهینه‌ترین حالت خود رساندند[۱۷].

[۱] Marco H.H.Oude Nijhuis

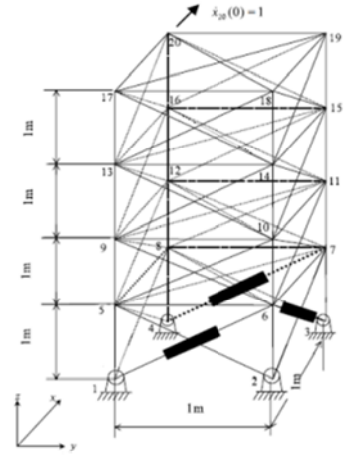
[۲] Y.J.Yan

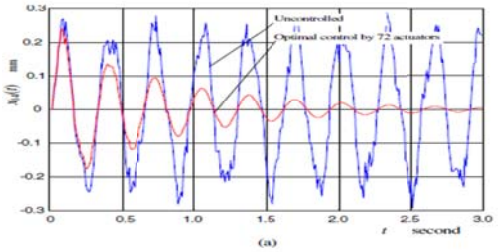
[۳] Simultaneously

[۴] Sequentially

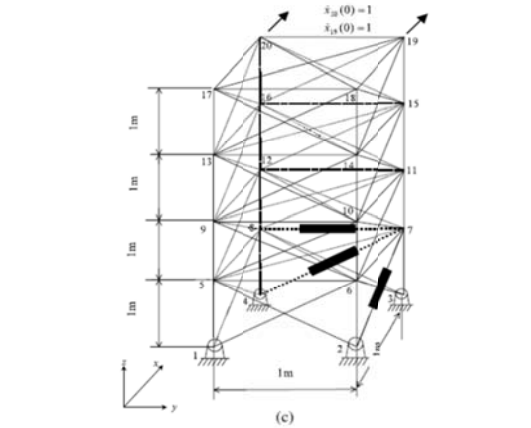
[۵] L.Bin

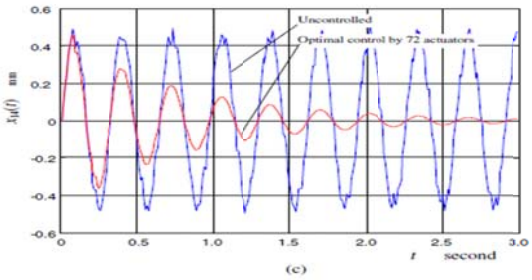
[۶] Makola M. Abdullah



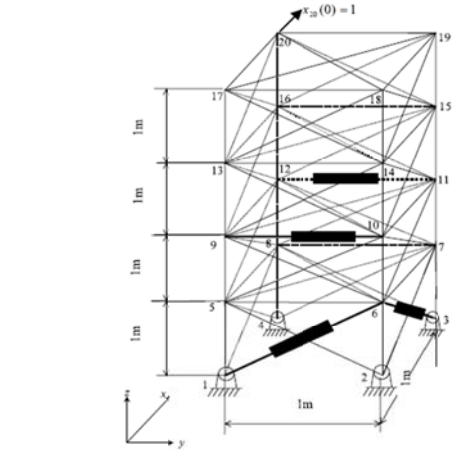


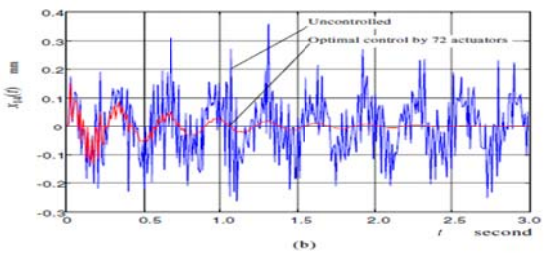
شکل ۸: میرایی ارتعاشی در مدل اول



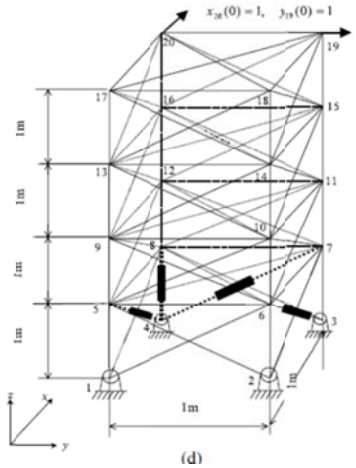


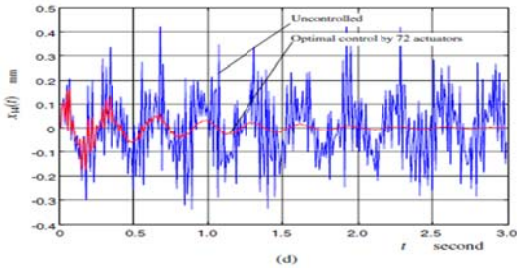
شکل ۱۰: میرایی ارتعاشی در مدل سوم





شکل ۹: میرایی ارتعاشی در مدل دوم





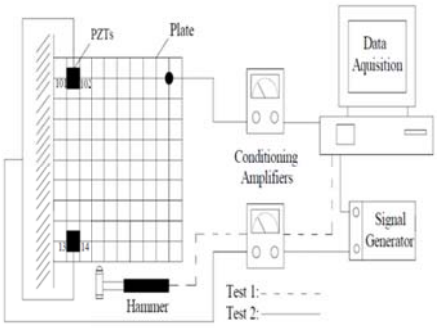
شکل ۱۱: میرایی ارتعاشی در مدل چهارم

۱۲- سال ۲۰۰۴

دابلیو. لیو[۱] و همکاران، با استفاده از کنترلر مقاوم[۲] و الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی مکان قرارگیری حسگر و عملگر پیزوالکتریک پرداختند. آنها در طی شبیه‌سازی مدل خود از شاخص عملکردی نرم H_2 بعنوان شاخص عملکردی بسیارخوب درجهت رسیدن به کنترل ارتعاش یک ورق با دو تکیه‌گاه ساده استفاده‌کردند[۱۹].

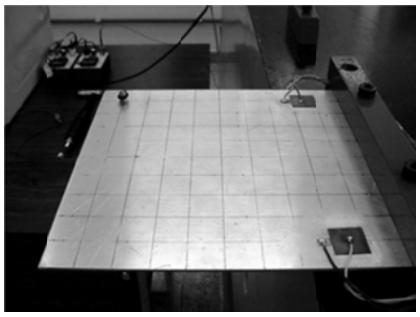
اچ.وای.جیو[۳] و همکاران، مکان‌یابی بهینه حسگر و عملگر پیزوالکتریک را بر روی یک سازه خرپا با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام‌دادند. هدف آنها سلامت نگه‌داشتن این سازه در برابر تحریکات خارجی بود. یعنی تابع عملکردی آنها منطبق بر تشخیص خرابی در سیستم درنظرگرفته‌شده‌بود. اما آنها چند اصلاح و پیشنهاد در الگوریتم ژنتیک اجرا نمودند، اولا از تابع پنالتی[۴] ثانیا از جهش اجباری[۵] به منظور افزایش سرعت همگرایی الگوریتم به بهینه‌ترین نقاط ممکن جهت قرارگیری پیزوالکتریک استفاده نمودند[۲۰].

تی.ال. دا روچا[۶] و همکاران، با استفاده از معیار نرم مقاوم بی‌نهایت[۷] به مکان‌یابی بهینه پیزوالکتریک بر روی ورق یک سرگیردار بعنوان حسگر و عملگر موفق‌شدند. مدل‌سازی سازه با استفاده از اجزاءمحدود با دو نرم‌افزار انسیس[۸] و متلب[۹] انجام شده‌است. با استفاده از نرم مقاوم بی‌نهایت و روش تساوی ماتریس خطی[۱۰]، به محاسبه مکان قرارگیری حسگر و عملگر بر روی سازه پرداختند که نهایتا منجر به میرایی ارتعاشی دراثر قرارگیری بهینه پیزوالکتریک شد[۲۱].



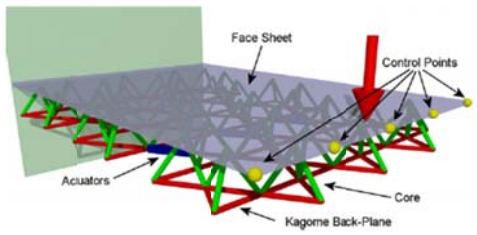
شکل ۱۲: مدل شماتیکی ورق هوشمند

[۱] W.Liu
[۲] H_2
[۳] H.Y.Guo
[۴] Penalty Function Method
[۵] Force Mutation Method
[۶] T.L.Da Rocha
[۷] H_∞
[۸] ANSYS
[۹] MATLAB
[۱۰] Linear Matrix Inequalities



شکل ۱۳: آزمایش تجربی ورق با تکه پیزوالکتریک

اس.ال داس.ساناتوس ا لوکاتو[۱۱] و همکارش، بطورکلی به مکان‌یابی یک حسگر و عملگر بر روی سازه خرپا[۱۲] پرداختند که الگوریتم بهینه‌سازی آنها مشتمل بر الگوریتم‌های تبریدسازی و ژنتیک صورت‌گرفت که نتایج خوبی از این تحقیق بدست‌آوردند[۲۲].

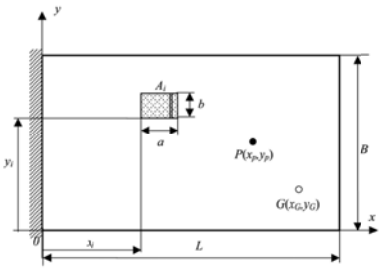


شکل ۱۴:سازه خرپا

ام.براسور[۱۳] و همکاران، با استفاده از معیار گرامیان کنترل‌پذیری به مکان‌یابی بهینه پیزوالکتریک بر روی سازه‌ی آکوستیکی[۱۴] پرداختند. روش مدل‌سازی این سازه‌ی بخصوص، با استفاده از اجزاءمحدود بود. هدف از این تحقیق عملی و نظری، رسیدن به نقاط مطلوب برای قرارگیری پیزوالکتریک برای جاذب صوت در فضای یک اتاق بوده‌است[۲۳].

اچ.اچ. نینگ[۱۵] طی مقاله‌ایی به بررسی و بهینه‌سازی مکان و تعداد پیزوالکتریک بر روی یک ورق یک‌سرگیردار بعنوان حسگر و عملگر برای کنترل ارتعاشات ناخواسته در سازه پرداخت. برای جستجو در فضای‌کاری ورق یک سرگیردار، از الگوریتم ژنتیک جهت یافتن بهترین موقعیت قرارگیری حسگر و عملگر پیزوالکتریک استفاده شد[۲۴].

[۱۱] S.L dos.Santos e Lucato
[۱۲] Kagome Truss
[۱] M.Brasseur
[۲] Wooden Shutter Box
[۳] H.H.Ning



شکل ۱۵: ورق یکسرگیردار بهمراه مکان‌یابی عملگر پیزوالکتریک

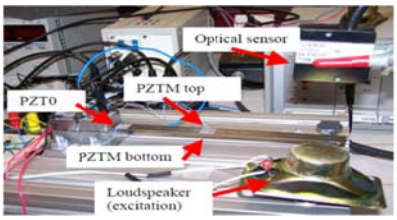
۱۳- سال۲۰۰۵

آ.اس.دی.الیویرا[۱] و همکارش، مکان‌یابی بهینه وصله‌های حسگر و عملگر پیزوالکتریک برای تشکیل یک سازه هوشمند بر روی یک تیر دوطرف تکیه‌گاه ساده را با استفاده از بهینه‌سازی کلاسیک انجام دادند. آنها با مشتق-گیری تابع شکل و مساوی صفر قراردادن آن، نقاط بحرانی را استخراج‌کرده و با قراردادن پیزوالکتریک در آن نقاط مشخص به کنترل ارتعاش آن پرداختند. برای کنترل سیستم از روش جداسازی مقادیر تکین[۲]، بعنوان تابع هدف استفاده نمودند[۲۵].

۱۴- سال۲۰۰۶

اس.وای.ونگ[۳] و همکاران، به بهینه‌سازی مکان قرارگیری حسگر و عملگر پیزوالکتریک بر روی ورق یک سرگیردار پرداختند. آنها در این تحقیق، از حسگر و عملگر پیزوالکتریک بصورت ایزوتروپ و انیزتروپ[۴] درنظرگرفتند تا بتواند ارتعاشات پیچشی یک ورق کامپوزیتی را میرا نمایند. مدل‌سازی ورق کامپوزیتی از طریق اجزاء محدود که منطبق بر روش برشی مرتبه اول بود، استفاده‌شد و الگوریتم ژنتیک جهت انجام فرآیند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت[۲۶].

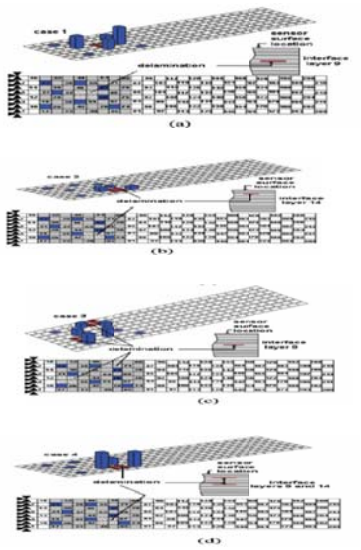
جی.ال.لوتین[۵] و همکاران، طی یک مقاله توصیفی به مساله مکان‌یابی بهینه حسگر و عملگر پیزوالکتریک بر روی یک سازه پرداختند. آنها طی ۴ بخش در این پژوهش، به توصیف روش‌های مکان‌یابی، نوع حسگر و عملگر از لحاظ کارایی و عملکرد، نوع سازه، روش‌های مونتاژکردن پیزو بر روی سازه، روش‌های کنترل سیستم و معیارهای بهینه‌سازی مکان پرداختند[۲۷].



شکل ۱۶: مدل الکترومکانیکی تیر یکسرگیردار در آزمایشگاه

[۴] A.S.D.Oliveira
[۵] Singular Value Decomposition
[۶] S.Y.Wang
[۷] Anisotropic
[۸] J.Lottin

سی.سوآن[۶] و همکارش، مکان‌یابی اختصاصی حسگر پیزوالکتریک بر روی یک ورق کامپوزیتی با شرایط مرزی ۴ طرف گیردار و یک‌سرگیردار سعی در یافتن پدیده تورق یا لایه لایه شدن۷ سازه در اثر ارتعاش شدند. مدل‌سازی سازه با استفاده از اجزاء محدود بر پایه یک تئوری ورق۸ صورت گرفت. برای انجام فرآیند بهینه‌سازی مکان و تعداد حسگرها از روش الگوریتم ژنتیک و از روش مونت کارلو۹ برای تولید جمعیت اولیه استفاده نمودند. هدف آنها در اثر جایابی بهینه حسگر پیزو برای تشخیص تورق کامپوزیت در اثر دریافت سیگنال ولتاژ و مقایسه آن با حالت غیرتورق شدن بعنوان یک روش عیب‌یابی بود[۲۸].



شکل ۱۷: ۴ مدل پیشنهادی در یافتن مکان بهینه برای ورق یک سردرگیر

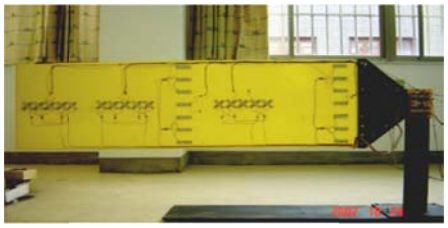
۱۵- سال۲۰۰۷

آی.بلولی[۱۰] و همکارش، مکان‌یابی قطعات سرامیکی پیزوالکتریک را برای خنثی‌سازی ارتعاشی بال پشتی یک ماشین مسابقه‌ایی را آنالیز نمودند. آنها فرآیند بهینه‌سازی را با استفاده از ۳ نرم‌افزار کتیا[۱۱] و انسیس و دین **اوپس**[۱۲] انجام دادند و بصورت کامل طراحی و آنالیز نمودند. هدف از بهینه-سازی در این تحقیق، رسیدن به بهترین اندازه، مکان و جهت و راستای قرارگیری پیزوالکتریک بود که نتایج جالبی از آن استخراج شد[۲۹].

[۹] C.Swann
[۱۰] Delamination
[۱۱] Refined Layer-wise Theory
[۱۲] Monte-Carlo-Method
[۱۲] A.Belloli
11 CATIA V5
[۱] DynOPS

شکل ۱۸: بال پشتی یک ماشین مسابقه‌ایی

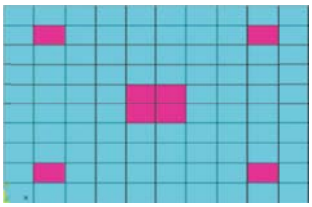
ژی-چنگ.کین[۱] و همکاران، در مقاله خود به بررسی تحلیلی مدل ورق یک‌سرگیردار پرداختند و با استفاده از شاخص درجه کنترل‌پذیری و رویت-پذیری سیستم، به بهینه‌سازی مکان قرارگیری پیزوالکتریک جهت میرایی ارتعاشی سازه پرداختند. آنها در این تحقیق سعی داشتند با استفاده از ترکیب ۲ روش کنترلی[۲]، سعی در کنترل ارتعاش ورق کنند. نوع ارتعاش مورد بررسی آنها ارتعاش پیچشی و خمشی بود. با مستقل‌کردن روابط کوپلینگ پیچشی وخمشی از طریق روش بی بی اف[۳] به آنالیز ارتعاشی سیستم و اعمال قوانین کنترلی بر روی آنها شدند[۳۰].



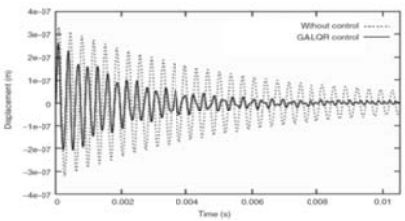
شکل ۱۹: مدل تجربی یک ورق یکسر درگیر در آزمایشگاه

۱۶- سال۲۰۰۸

تی.روی[۴] و همکارش، تحقیق مکان‌یابی بهینه‌ی وصله‌های پیزوالکتریک را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و روش کنترل بهینه درجه دوم[۵] انجام دادند. سازه‌های مورد بررسی آنها، پنل کامپوزیتی کروی شکل ، تیر کامپوزیتی یک‌سرگیردار ، ورق کامپوزیتی بود. یکی از نوآوری‌های این تحقیق، استفاده از تکه‌های کامپوزیتی چندلایه پیزوالکتریک بعنوان حسگر و عملگر بود. در ادغام روش کنترل بهینه درجه دوم و الگوریتم میتوان چنین شرح داد که در روش کنترل بهینه درجه دوم ، ۳ ضریب در ماتریس های ثابت[۶] تعریف و با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌ترین جواب برای این ۳ ضریب بدست‌آورده‌می‌شود. و درنهایت با قرارگیری این ضرایب در رابطه انرژی می‌توان، بهترین مکان‌های ممکن برای حسگر و عملگر پیشنهاد نمود[۳۱].

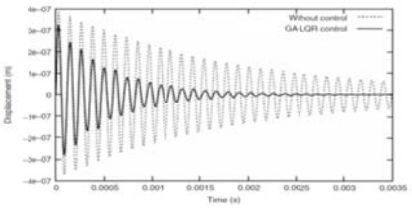


شکل ۲۰: مکان‌های بهینه یافته شده در اثر مش‌بندی و قرار یافتن حسگر و عملگر پیزوالکتریک بر روی ورق



شکل ۲۱: مدل کاهش یافته جابجایی ورق در اثر مکان‌یابی بهینه پیزوالکتریک با استفاده از رهیافت کنترل بهینه درجه دوم و الگوریتم ژنتیک

شکل ۲۲: مکان های بهینه یافته شده در اثر مش‌بندی و قرار یافتن حسگر و عملگر پیزوالکتریک بر روی پنل



شکل ۲۳: مدل کاهش یافته جابجایی پنل در اثر مکان یابی بهینه پیزوالکتریک با استفاده از رهیافت کنترل بهینه درجه دوم و الگوریتم ژنتیک

۱۷- سال۲۰۱۰

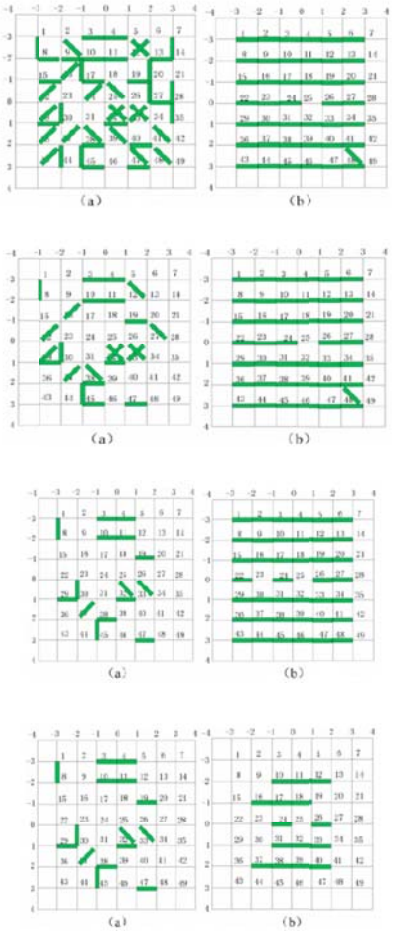
ام.آر.صفی‌زاده[۷] و همکاران، در پژوهشی با استفاده از شاخص عملکردی گرامیان کنترل‌پذیری و استفاده از الگوریتم ژنتیک، مکان بهینه را برای یک ورق که تمام لبه‌های آن گیردار بود، تحقیق کرده‌اند. معادلات ساختاری ورق بصورت تحلیلی استخراج و با معادلات تحلیلی عملگر پیزوالکتریک ادغام و معادله یک سازه هوشمند را بدست‌آورده‌اند. حال با استفاده از روش کنترلی فضای حالت، سعی در مکان‌یابی بهینه سیستم خود شده‌اند. در این روش وظیفه اصلی، کنترل‌پذیری سیستم و بیان یک ورودی

[۱] M.R.Safizade

[۲] Zhi-Cheng.Qiu
[۳] PPF-PDC
[۴] Bandwidth Butterworth Filter
[۵] T.Roy
[۶] LQR
[۷] Q -R

کنترل بهینه می‌باشد بطوریکه با اعمال نیرو در این مکان بهینه از سازه، بتوان سیستم را میرا ساخت[۳۲].

جی.یانگ[۱] و همکارش، طی ۲ مقاله به بررسی مکان‌یابی بهینه عملگر و حسگر پیزوالکتریک بر روی یک ورق پرداختند. نظریه آنها در این مقاله‌ها این بود که برای اینکه عملکرد کنترل سیستم بالاتر رود یا به عبارتی در اثر کنترل سیستم توسط پیزوالکتریک، به میرایی ارتعاش آن ختم‌شود، این‌است که عملگر پیزوالکتریک تاثیر خودش را در جهت مشخص بر ورق اعمال کند. حال نقطه یا نقاطی در یک ورق وجود دارند که با قرارگیری عملگر پیزوالکتریک، تاثیر بالقوه خود را نشان دهد و کنترل سیستم با کارایی بیشتر و موثرتری اتفاق بیفتد. آنها در مقاله[۳۳] از ۲ نوع الگوریتم[۲] جهت بهینه-سازی مکان ورق استفاده‌نموده‌اند و در مقاله [۳۴] با استفاده از دو الگوریتم[۳] که با بهینه‌سازی مجدد بر روی این نوع الگوریتم، نتایج بهتر و قابل ملاحظه-ایی از حالت قبل دست پیدا کردند.



شکل ۲۴: انواع مدل‌های مکان‌یابی شده بصورت بهینه با استفاده از پیزوالکتریک بر روی ورق

[۲] J.Yang
[۳] Simulated Annealing for the TSP, Hopfield-Tank for the TSP
[۴] Simulated Annealing for the TSP, Genetic Algorithm for TSP

وی.گوپتا[۴] و همکاران در پژوهش بسیارکاربردی و مفید از ۶ نوع تابع هدف جهت بهینه‌یابی مکان قرارگیری پیزوالکتریک در نقش حسگر و عملگر بر روی سازه تیر و ورق بکاربردند، که این توابع هدف عبارتند از[۳۵]:

- بیشنه‌کردن نیرو یا گشتاور صادرشده از عملگر پیزوالکتریک
- بیشنه خیز[۵] اتفاق افتاده در سازه
- کمینه‌کردن تاثیر کنترلی یا بیشنه کردن انرژی اتلافی
- بیشنه‌نمودن درجه کنترل‌پذیری
- بیشنه‌کردن درجه مشاهده‌پذیری
- کمینه‌نمودن پدیده سرریز

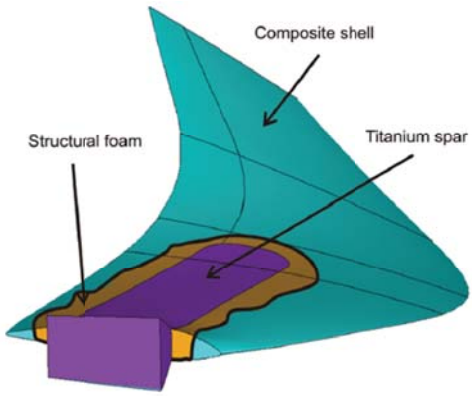
۱۸- سال ۲۰۱۲

ام.تراجکوو[۶] و همکارش به تحلیل مکان‌یابی براساس معیار کنترل-پذیری و مشاهده‌پذیری پرداختند که بهینه‌سازی براساس نرم مقاوم برپایه دوم و بی‌نهایت۷ و تابع گرامیان کنترل‌پذیری و مشاهده‌پذیری که وابسته به مودهای ارتعاشی بود صورت‌پذیرفت. مدل سازه با استفاده از اجزاءمحدود طراحی شد و بعد از انجام فرآیند کاهش مرتبه، عملیات بهینه‌سازی روی مدل‌کاهش یافته انجام گرفت و مکان بهینه را برای ورق و تیر یک‌سرگیردار پیشنهاد داده‌شد[۳۶].

اف.بچمن[۸] و همکاران، تحقیقات مکان‌یابی بهینه ۲ تکه پیزوالکتریک روی یک پره توربوماشین که این پره از نوع کامپوزیت کربن/ اپوکسی ساخته شده‌بود، انجام‌دادند و با استفاده از معیار افزایش انرژی پتانسیل پیزوالکتریک و سازه و افزایش ضریب میرایی کوپلینگ الکترومکانیکی، سعی در بهینه‌سازی در افزایش انرژی ذخیره شده در پیزوالکتریک در بهترین مکان ممکن از یک پره کامپوزیتی کردند[۳۷].

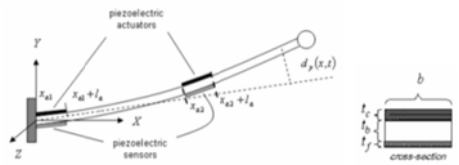
جی.ژوآنگ[۹] و همکاران به تحلیل میرایی ارتعاشی یک تیر یک-سرگیردار از طریق یافتن بهترین مکان در تیر جهت قرارگرفتن عملگر وحسگر پیزوالکتریک برای تشکیل یک سیستم هوشمند برای کنترل خودکار ارتعاشی و دست‌یابی به یک پایداری معقول پرداختند. آنها برای فرمان‌پذیری سیستم از کنترلر[۱۰] بعنوان یک روش کنترل بهینه استفاده نمودند و ۴ مود ارتعاشی تیر را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند[۳۸].

[۵] V.Gupta
[۶] Deflection
[۷] M.Trajkov
[۸] H_2- H_∞
[۹] F.Bachman
[۱] J.Zhang
[۲] Linear Quadratic Gauss



شکل ۲۵: پره توربوماشین

آ.مولتر[۱] و همکاران، مکان‌یابی بهینه پیزوالکتریک را بر روی یک دسته-ماشینی[۲] انعطاف‌پذیر که بصورت یک تیر یک‌سرگیردار با جرم متمرکز در نوک تیر، تحقیق نمودند. تیر را براساس تئوری اولر- برنولی هم بصورت تحلیلی و هم بصورت عددی بررسی و کنترل نمودند. آنها علاوه بر مکان‌یابی بهینه توانستند در این مدل اندازه‌ی حسگر و عملگر پیزوالکتریک را نیز بهینه‌سازی کنند و روش کنترلی آنها با بکارگیری تابع لیاپانوف، صورت پذیرفت[۳۹].



شکل ۲۶: مدل دسته‌ی ماشینی انعطاف‌پذیر بصورت یک تیر

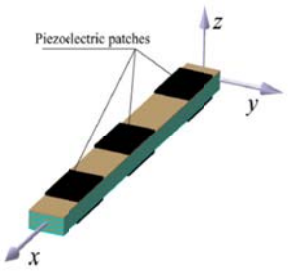
ال.نوآک[۳] و همکارش، روشی برای محاسبه مکان بهینه حسگر و عملگر پیزوالکتریک پیشنهاد دادند. تیر نازک، ورق نازک و پنل نازک ، باشرایط مرزی مختلف، تحت ارتعاش آکوستیکی بعنوان سازه مورد آزمایش بود. روش آنالیز دینامیکی سازه بصورت تحلیلی صورت پذیرفت[۴۰].

جی.روسی[۴] و همکاران، به کنترل غیرفعال صدا پخش‌شده برروی یک ورق آلومینومی با شرایط مرزی غیراستاندارد پرداختند و با مکان‌یابی بهینه بر روی آن، مختصاتی را برای قراردادن تکه‌های پیزوالکتریک درنظرگرفتند. بطور کل هدف، دست یافتن به بهترین کارایی این ورق در کاهش صدای پخش‌شده از آن بود[۴۱].

آ.اچ.دراجی[۵] و همکارش، یک ورق ایزوتروپ یک سرگیردار را از طریق روش اجزاءمحدود در نرم‌افزار انسیس با استفاده از المان سالید۴۵[۶] برای مش‌بندی ۳ بعدی و دیگری از المان سالید۶۳[۷] برای مش‌بندی ۲ بعدی ورق و از المان سالید۴۵ برای مش‌بندی تکه‌های حسگر و عملگر پیزوالکتریک استفاده و مدل را آماده کنترل نمودند و با استفاده از شاخص عملکردی خطی درجه ۲(کمینه‌سازی) و الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب، موفق به ارتباط همزمان این دو نرم‌افزار جهت تسریع در میرایی ارتعاشی از طریق مکان‌یابی بهینه تکه‌های پیزوالکتریک نمودند و نتایج خود را به نمایش درآوردند[۴۲].

جی.ام.هاله[۸] و همکارش، با ۱۰ تکه پیزوالکتریک بصورت حسگر و عملگر بر روی یک ورق یک سرگیردار مکان‌یابی خود را بررسی‌کردند. آنها از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی تابع هدف را انجام دادند. روش مدل‌سازی منطبق بر تئوری برشی مرتبه اول بنا نهاده‌شد و بصورت عددی از طریق اجزاء محدود و رابطه هامیلتون صورت پذیرفت. هدف آنها در مکان‌یابی بهینه، رسیدن به میرایی ۶ مود اول ارتعاشی ورق بود که آنها بصورت تحلیلی با نرم‌افزار انسیس با بکارگیری المان سالید۴۵ برای مش‌بندی ۳ بعدی و از المان شل۶۳[۹] برای مش‌بندی ۲ بعدی ورق خود استفاده و نتایج خودرا با روش اجزاءمحدود مقایسه نمودند. تابع هدف مورد بهینه‌سازی براساس نرم H_2 اصلاح‌شده در الگوریتم ژنتیک برای یافتن مکان بهینه درنظرگرفته‌شد[۴۳].

نمانجا دی.زوریک[۱۰] و همکاران با استفاده از ترکیب منطق فازی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات[۱۱] سعی در بهینه‌سازی اندازه و مکان قرارگیری پیزوالکتریک بر روی تیر نازک کامپوزیتی با مدل‌سازی اجزاءمحدود براساس تئوری تغییرشکل برشی مرتبه۳ کردند[۴۴].

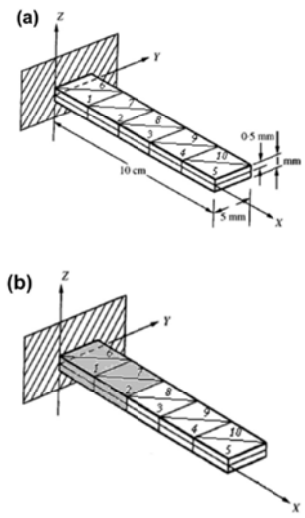


شکل ۲۷: تیر نازک کامپوزیتی به همراه وصله‌های پیزوالکتریک

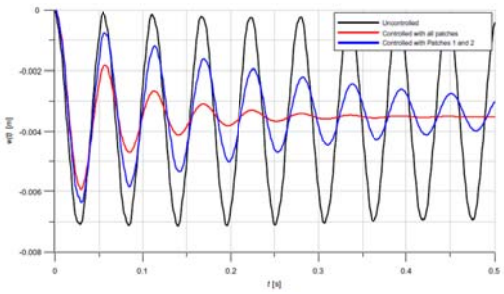
[۳] A.Molter
[۴] Manipulator
[۵] L.Nowak
[۶] G.Rosi
[۷] A.H.Daraji
[۸] Solid45
[۹] Shell63
[۱۰] J.M.Hale
[۱۱] Shell63
[۱۲] Nemanja D.Zoric
[۱۳] PSO

۱۹- سال ۲۰۱۳

سرگیو ال. شولز[۱] و همکاران، از تکه‌های پیزوالکتریک برای جایابی بهینه بر روی تیر یک‌سرگیردار و ورق با تکیه‌گاه ساده انجام‌دادند. روش بهینه‌سازی آنها از الگوریتم باینری ژنتیک و روش کنترل بهینه درجه دوم بود. در این تحقیق تابع هدف بهینه‌سازی آنها براساس تابع لیاپانوف طرح‌ریزی شده‌بود. طی این تحقیق آنها به این هدف رسیدند که جایابی بهینه در چندین مود اول، که بعنوان مودهای پرانرژی محسوب می‌شوند، می‌تواند سیستم را کنترل و سایرمودهای ارتعاشی را پوشش دهد. متغیرهای حالت، انرژی جنبشی، انرژی کرنشی و ولتاژ ورودی عملگر درنظر گرفته‌شد و به نتایج قابل توجه‌ای دست‌یافتند[۴۵].



شکل ۲۸: تیر یکسر گیردار با مشخصات هندسی با استفاده از مش‌بندی المان مثلثی



شکل ۲۹: کنترل ارتعاشات برای تیر یکسرگیردار با استفاده از مکان‌یابی بهینه در این پژوهش

دی.چابرا[۲] و همکاران، در مقاله خود با استفاده از روش[۳] و الگوریتم ژنتیک به جایابی بهینه ۱۰ عملگر پیزوالکتریک بر روی ورق مربعی شکل با تکیه‌گاه ساده نمودند و در پایان برای کنترل ارتعاشی سیستم از قانون کنترل بهینه درجه دوم برای بررسی عملکرد و کارایی سیستم استفاده کردند و از این طریق، ۶ مود اول ارتعاشی ورق مربعی شکل را بهینه و کنترل نمودند[۴۶].

اف. بوتا[۴] و همکاران، تابع هدف جدیدی را برای جایابی بهینه پیزوالکتریک پیشنهاد نمودندکه بهینه‌کردن تابع هدف، باعث میرایی چند مود ارتعاشی بطور همزمان می‌شود. و سازه مورد بررسی آنها یک تیر یک-سرگیردار با استفاده از تئوری اولر- برنولی بود. آنها مدل‌سازی تیر را به دو صورت تحلیلی و عددی اجزاءمحدود انجام دادند و مطابقت این۲ روش را ارائه نمودند. همچنین در مقاله‌ای دیگر، نتایج تجربی از مکان‌یابی بهینه پیزوالکتریک بعنوان حسگر و عملگر بر روی پره‌های توربوماشین کسب نمودند. آنها یک پره توربوماشین را بصورت یک تیر یک سرگیردار فرض‌نموده و سپس بصورت تحلیلی نیز به حل معادله کوپل‌شده تیر با حسگر و عملگر پیزوالکتریک پرداختند و نتایج تئوری خود را به همراه نتایج تجربی به نمایش گذاشتند. هدف آنها کاهش ارتعاش و خستگی[۵] تیر بود[۴۷].

آ.ال.آراجو[۶] و همکاران، با استفاده از روش بهینه‌سازی[۷]، مکان‌یابی بهینه پیزوالکتریک را بر روی یک ورق ساندویچی با هسته ویسکوالاستیک و رویه چند لایه‌ای انجام دادند. در اثر این تحقیق آنها توانستند با یافتن بهترین مکان، میرایی ارتعاشی ورق ساندویچی را تحلیل کنند و با آنالیز ۶ مود ارتعاشی به نتایج قابل ملاحظه‌ای دست‌یابند[48].

اس.ورونا[۸] و همکارش، درطی ۲ مقاله‌ی جداگانه، برای یافتن مکان بهینه عملگر و حسگر پیزوالکتریک از نگرش کنترل‌پذیری جهت‌دار مکانی استفاده‌کنند. سازه مورد بررسی آنها ورق مستطیلی ایزوتروپ با ۴طرف گیردار بود. آنها برای بهینه‌سازی شاخص کنترل‌پذیری از الگوریتم ممتیک استفاده نمودند. الگوریتم ممتیک بدلیل همگرایی سریع و حل آماری بهتر، عملکرد مناسبی را از خود بجای گذاشت[۴۹-۵۰].

۲۰- نتیجه‌گیری

۱) آنچه که در تحقیقات انجام‌شده توسط محققین درنظر گرفته‌شده‌است را می‌توان چنین بیان‌نمود.
۲) یافتن مکان بهینه توسط یک المان پیزوالکتریک و یا چند المان بدون کاهش اندازه آن.
۳) بهینه‌سازی تک هدفه یا کلاسیک برای یافتن مکان بهینه المان پیزوالکتریک
۴) شناسایی و بررسی معیارهایی که در یافتن مکان بهینه موثراند.
۵) صرفنظر از اثر برشی تیر (اولر- برنولی)
۶) تقسیم تیر به المان‌های محدود

[۱] Sergio L.Schulz

[۲] D.Chhabra
[۳] Modified Control Matrix and Singular Value Decomposition
[۴] F.Botta
[۵] Fatigue
[۶] A.L.Araujo
[۷] DMM
[۸] S.Wrona

۷) کم رنگ‌بودن نقش کنترلر و یا انتخاب کنترلر به همراه جایابی بهینه المان‌های پیزوالکتریک بعنوان حسگر و عملگر.
۸) تحلیل‌های انجام‌شده در میرایی ارتعاشی سازه بیشتر بر روی ورودی ایمپالس[۱] متمرکز شده‌بود.

۲۱- مراجع:

[1] R.W.Longman, K.T.Alfriend , Actuator Placement from Degree of Controllability Criteria for Regular Slewing of Flexible Spacecraft, Acta Astronautica, Vol.8, No.7, pp.703-718, 1981.

[2] A.Arbel, Controllability Measures and Actuator Placement in Oscillatory Systems, Int .J .Control, Vol.33, No.3, 565-574, 1981.

[3] A.Has, L.Liu, Sensor and Actuator Location in Motion Control of Flexible Structures, Journal of Sound and Vibration, 167(2), 239-261, 1993.

[4] A.K.Dhingra, B.H.Lee, Optimal Placement of Actuators in Actively Controlled Structures Eng. Opt. Vol.23, pp.99-118, 1993.

[5] H.Furuya, Placing Actuators on Space Structures by Genetic Algorithms and Effectiveness Indices, Structural Optimization, Springer-rerlag, 9, 69-75, 1995.

[6] I.Lee, J.H.Han, Optimal Placement of Piezoelectric Actuators in Intelligent Structures Using Genetic Algorithms, 3d ICIM / ECSSM 96, Lyon96.

[7] A.M.Sadri, J.R.Wright, R.J.Wynne, Modeling and Optimal Placement of Piezoelectric Actuators in Isotropic Plate Using Genetic Algorithms, Smart Material and Structures, 8(1999)490-498.

[8] M.A.Mirza, J.L.V.Niekerk, Optimal Actuator Placement for Active Vibration Control with Know Disturbances, Journal of Vibration and Control, 5:709, 1999.

[9] Jae.Hung Han, In.Lee, Optimal Placement of Piezoelectric Sensors and Actuators for Vibration Control of a Composite Plate Using Genetic Algorithms, Smart Material and Structures, 8(1999)257-267.

[10] J.C.Bruch Jr, J.M.Sloss, S.Adli, I.S.Sadak, Optimal PiezoActuator Locations/Length and Applied Voltage for Shape Control of Beams, Smart Materials and Structures, 9(2000)205-211.

[11] Q.Wang, C.Wang, Optimal Placement and Size of Piezoelectric Patches on Beams from the Controllability Perspective, Smart Material and Structures, 9 (2000)558-567.

[12] D.Halim, S.O.R.Moheimani, An Optimization Approach to Optimal Placement of Collocated Piezoelectric Actuators and Sensors on A Thin Plate, Mechatronics, 13(2003)24-47.

[13] O.J.Aldraihem, Optimal Size and Location of Piezoelectric Actuator/Sensor: Practical Considerations. Control and Dynamics, Journal of Guidance, Vol.23, No.3, 2000.

[14] L.Bin, Li.Yugang, Y.Xuegang, H.Shanglian, Maximal Model Force Rule for Optimal Placement of Point Piezoelectric Actuators for Plates, Journal of Intelligent Material Systems and Structures,Vol.11. July 2000.

[15] M.M. Abdullah, A.R.J.Hanif, Placement of Sensors/Actuators on Civil Structures Using Genetic Algorithms, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2001, 30, 1167-1184.

[16] M.H.H.oude Nijhuis, A.deBoer, Optimization Strategy for Actuator and Sensor Placement in Active Structural Acoustic Control.

[17] Y.J.Yan, L.H.Yam, Optimal Design of Number and Locations of Actuators in Active Vibration Control of A Space Truss, Smart Materials and Structures,11(2002)496-503.

[18] S.T.Quek, S.Y.Wang, K.K.Ang, Vibration Control of Composite Plates via Optimal Placement of Piezoelectric Patches, Journal of Intelligent Material Systems and Structures.Vol.14, 2003.

[19] W.Liu, Z.Hou, M.A.Demtriou,A Computational Scheme for the Optimal Sensor/Actuator Placement of Flexible Structures Using Spatial H_2 Measures, Mechanical System and Signal Processing, 20(2006)881-895.

[20] H.Y.Gua, L.Zhang, L.L.Zhang, J.X.Zhou, Optimal Placement of Sensors for Structural Health Monitoring Using Improved Genetic Algorithms, Smart Material and Structures.

[21] T.L.da Rocha, S.da Silva, V.Lopes Jr, Optimal Location of Piezoelectric Sensor and Actuator for Flexible Structures, 11th International Congress on Sound and Vibration, 5-8, 2004, St. Petersburg, Russia.

[22] S.L.D.santoes e Lucato, R.M.mc Meeking, A.G.Evans, Actuator Placement Optimization in A Kagome Based High Authority Shape Morphing Structure, Smart Materials and Structures, 14(2005)86-875.

[23] M.Brasseur, P.D.Boe, J.C.Gdinval, P.Tamaz, P.Caule, J.J.Embrechts, J.Nemerlin, Placement of Piezoelectric Laminate Actuator for Active Structural Acoustic Control, University of Twente.

[24] H.H.Ning, Optimal Number and Placements of Piezoelectric Patch Actuators in Structural Active Vibration Control, Engineering Computations,Vol.21, No.6, pp.601-665, 2004.

[25]A.S.de Oliveira, J.J.L.Junior, Placement Optimization of Piezoelectric Actuators in a Simply Supported Beam Through SVD Analysis and Shape Function Critic Point, 6th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization, Rio de Juneiro, Brazil, 2005.

[26] S.Y.Wang, K.Tai, S.T.Quek, Topology Optimization of Piezoelectric Sensors/Actuators for Torsional Vibration Control of Composite Plates, Smart Materials and Structures, 15(2006)253-269.

[27] J.Lottin, F.Formosa, M.Virtosu, L.Brunetti, About Optimal Location of Sensors and Actuators for The Control of Flexible Structures, Research and Education in Mechatronics, KTH, Stockholm, Sweden, 2006.

[28] J.Lottin, F.Formosa, M.Virtosu, L.Brunetti, Optimization of Piezoelectric Sensor Location for Delamination Detection in Composite Laminates, Engineering Optimization ,Vol.38, No.5, 511-528, 2006.

[29] A.Belloli, P.Ermanni, Optimum Placement of Piezoelectric Ceramic Modules for Vibration Suppression of Highly Constrained Structures, Smart Materials and Structures, 16(2007)1662-1671.

[30] Z.C.Qiu, X.M.Zhang, H.X.Wu, H.H.Zhang, Optimal Placement and Active Vibration Control for Piezoelectric Smart Flexible Cantilever Plate, Journal of Sound and Vibration, 301(2007)521-543.

[31] T.Roy, D.Chakraborty, GA-LQR Based Optimal Vibration Control of Smart FRP Composite Structures with Bonded PZT Patches, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 28:1383, 2009.

[32] M.R.Safizadeh, I.Z.mat Darus, M.Mailah, Optimal Placement of Piezoelectric Actuator for Active Vibration Control of Flexible Plate, Faculty of Mechanical Engineering Universiti Technologi Malaysia (UTM) 81310 Skudai, Johor, Malaysia.

[33] J.Y.Yang, G.P.Chen, Actuator Placement and Configuration Direct Optimization in Plate Structure Vibration Control System, International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2010.

[34] J.Yang, G.Chen, Optimal Placement and Configuration Direction of Actuators in Plate Structure Vibration Control System, 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 2010.

[۱] Impulse

[35] V.Gupta, M. Sharma, N.Thakur, Optimization Criteria for Optimal Placement of Piezoelectric Sensors and Actuators on a Smart Structure: A Technical Review, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.21, 2010.

[36] M.Trajkov, T.Nestorvic, Optimal Placement of Piezoelectric Actuators and Sensors for Smart Structures, 15th International Conference on Experimental Mechanics, Porto/Portugal, 2012.

[37] F.Bachmann, A.E.Bergamini, P.Ermanni, Optimum Piezoelectric Patch Positioning: A Strain Energy-Based Finite Element Approach, Journal of Intelligent Material Systems and Structures 2012 23:1576.

[38] J.Zhang, L.He, E.Wang, Active Vibration Control of Piezoelectric Intelligent Structures, Journal of Computers,Vol.5, No.3, 2010.

[39] A.Molter, J. S.O.Fonseca, V.Bottega, Simultaneous Piezoelectric Actuator and Sensors Placement Optimization and Optimal Control Design for Flexible Non-Prismatic Beams, 20th International Congress of Mechanical Engineering, November 15-20, 2009, Gramado, RS.Brazil.

[40] L.Nowak, T.G.Zielinski, Determining the Optimal Locations of Piezoelectric Transducers for Vibroacoustic Control of Structures with General Boundary Conditions, Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences ul.Pawinskiego 5B, 02-106 Warsaw, Poland.

[41] G.Rosi, R.Paccapeli, F.Ollivier, J.Pouget, Optimization of Piezoelectric Patches Positioning for Passive Sound Vibration Control of Plates.

[42] A.H.Daraji, J.M.Hale, The Effect of Symmetry on Optimal Transducer Location For Active Vibration Control, Proceedings of The ASME 2012 International Design Engineering Technical Conference & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2012,Agust 2012, Chicago.IL, USA.

[43] J.M.Hale, A.H.Daraji, Optimal Placement of Sensors and Actuators for Active Vibration Reduction of A Flexible Structure Using A Genetic Algorithm Based on Modified H_{∞} , Modern Practice in Stress and Vibration Analysis, Journal of Physics, Conference Series 382(2012)012036.

[44] N.D.Zoric, A.M.Simonovic, Z.S.Mitrovic, S.N.Stuper, Multi-Objective Fuzzy Optimization of Sizing and Location of Piezoelectric Actuators and Sensors, FME Transactions (2012)40, 1-9.

[45] S.L.Schulz, H.M.Gomes, A.M.Awruch, Optimal Discrete Piezoelectric Patch Allocation on Composite Structures for Vibration Control based on GA and Modal LQR, Computers and Structures,128(2013)101-115.

[46] D.Chhabra, G.Bhushan, P.Chandra, Optimal Placement of Piezoelectric Actuators on Plate Structures for Active Vibration Control Using Modified Control Matrix and Singular Value Decomposition Approach, International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering,Vol.7, No.3, 2013.

[47] F.Botta, D.Dini, C.Schwingshackl, L.D.Mare, G.Cerri, Optimal Placement of Piezoelectric Plates to Control Multimode Vibrations of a Beam, Advances in Acoustics and Vibration, Vol.2013.

[48] A.L.Araujo, J.F.A.Madeira, C.M.M.Soares, C.A.M.Soares, Optimal Design for Active Damping in Sandwich Structures Using the Direct MultiSearch Method, Composite Structures 105/(2013)2-34.

[49] S.Wrona, M.Pawelczyk, Controllability Oriented Placement of Actuators for Active Noise Vibration Control of Rectangular Plate Using A Memetic Algorithm, Vol.38, No.4, pp.529-526(2013).

[50] S.Worna, M.Pawelczyk, Application of a Memetic Algorithm to Placement to Placement of Sensors for Active Noise Vibration Control, Mechanic and Control, Vol.32, No.3, 2013.