

بررسی اثر نسبت سفتی و ضخامت بر محل بهینه عملگرهای پیزوالکتریک در کاهش تمرکز تنش صفحات سوراخ‌دار

جواد جعفری فشارکی^۱، سید قاسم مدنی^۲

^۱ایران، اصفهان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، دانشکده مهندسی مکانیک، ایمیل: Jafari@pmc.iaun.ac.ir
^۲ایران، اصفهان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، دانشکده مهندسی مکانیک، ایمیل: s.gh.madani70@gmail.com

چکیده

پیزوالکتریک افزایش می‌یابد. همچنین آنها اینطور بیان نمودند که با اعمال کرنش منفی توسط پیزوالکتریک‌ها در صفحه میزبان، جریان تنش در صفحه میزبان به هم ریخته و در نتیجه تنش در اطراف سوراخ به طور غیر مستقیم کاهش می‌یابد.

این ایده که تکه‌های پیزوالکتریک می‌توانند برای کاهش تمرکز تنش مورد استفاده قرار بگیرند در تحقیق‌های دیگری نیز [۲ و ۳] بررسی شده است. سریدهاران و کیم [۴] بر روی کنترل کمانش در پانل‌ها کار کرده‌اند. پلاتز و همکارانش [۵] با استفاده از عملگرهای پیزوالکتریک روشی برای کاهش رشد ترک در پنل‌های آلومینیوم ارائه کرده‌اند. آنها محل و ولتاژ مناسب به منظور کاهش انتشار ترک را بررسی کردند. لئو و تانگ [۶] بر روی کنترل خمش و پیچش در صفحات با استفاده از عملگرهای پیزوالکتریک کار کرده‌اند. آنها با استفاده از فرمول المان محدود برای یک صفحه با عملگرهای پیزوالکتریک ولتاژ مناسب برای رسیدن به شکل مورد نظر را بررسی کردند. تانگ و همکارانش [۷، ۸] با استفاده از روش تکرار برای بهینه سازی اندازه ولتاژ و محل عملگرهای پیزوالکتریک برای کنترل شکل صفحات استفاده کردند. همچنین برای عملگرهای خطی در جهت طولی نیز تحلیل‌هایی صورت گرفته است و در این تحقیق با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات^۱ بهترین محل برای قرارگیری عملگرهای پیزوالکتریک مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در این تحقیق اثر افزایش سطح عملگرهای پیزوالکتریک و ولتاژهای مختلف در درصد‌های مختلف پیزوالکتریک بر کاهش فاکتور تمرکز تنش بررسی شده است [۹]. اما تاکنون تحقیقی برای پیدا کردن ارتباط بین سفتی و ضخامت تکه‌های پیزوالکتریک و صفحه میزبان برای کنترل و تجزیه و تحلیل تنش انجام نشده است. در این مقاله با توجه به رابطه بین سفتی و ضخامت تکه‌های پیزوالکتریک و صفحه میزبان بهترین محل برای قرارگیری تکه‌های پیزوالکتریک برای دستیابی به حداکثر کاهش تمرکز تنش در اطراف یک سوراخ در یک صفحه تحت کشش ارائه شده است. نتایج بدست آمده از تحلیل نرم افزاری با آزمون تجربی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

در این تحقیق اثر سفتی و ضخامت تکه‌های پیزوالکتریک و صفحه میزبان در محل قرارگیری عملگرها برای دستیابی به حداکثر کاهش در ضریب تمرکز تنش در اطراف یک سوراخ در یک صفحه تحت کشش مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور حالت‌های مختلفی به صورت نسبت ضخامت صفحه به تکه‌های پیزوالکتریک بزرگتر یا مساوی یک، یا کوچکتر مساوی یک در نظر گرفته شده است. همچنین نسبت سفتی صفحه به تکه‌های پیزوالکتریک بزرگتر، مساوی یک یا کوچکتر از یک در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که نسبت سفتی و نسبت ضخامت تکه‌های پیزوالکتریک و صفحه می‌توانند بهترین محل تکه‌های پیزوالکتریک برای کاهش ضریب تمرکز تنش را تحت تاثیر قرار دهند. نتایج بدست آمده از حل نرم افزاری با آزمایش تجربی مورد تایید قرار می‌گیرند.

واژه‌های کلیدی

عملگرهای پیزوالکتریک، صفحه سوراخ‌دار، تمرکز تنش، سفتی.

مقدمه

در سال‌های اخیر پیشرفت‌های زیادی در سازه‌های هوشمند ایجاد شده است. از جمله موادی که در این سازه‌ها کاربرد فراوانی دارند، مواد پیزوالکتریک هستند. محققان برای استفاده از مواد پیزوالکتریک در زمینه‌هایی مانند کنترل کمانش، شکل‌دهی، ارتعاشات و کنترل تنش در سازه‌ها مطالعات فراوانی انجام داده‌اند. سنشمارا و همکارانش [۱، ۲] روی کاهش ضریب تمرکز تنش در اطراف یک سوراخ با استفاده از اعمال کرنش بوسیله پیزوالکتریک‌ها کار کردند. آنها پیشنهاد کردند که تکه‌های پیزوالکتریک و آلیاژهای حافظه‌دار ممکن است بتوانند برای کنترل تمرکز تنش و کرنش مورد استفاده قرار گیرند.

شاه و همکارانش [۳] نیز از عملگرهای پیزوالکتریک به منظور کاهش دادن ضریب تمرکز تنش در اطراف یک سوراخ در یک صفحه تحت کشش استفاده کردند. آنها پیشنهاد کردند که اگر محرک پیزوالکتریک در نقاط با تنش بالا، کرنش مثبت در صفحه میزبان ایجاد کنند، تنش در صفحه کاهش می‌یابد. اما تنش در تکه‌های

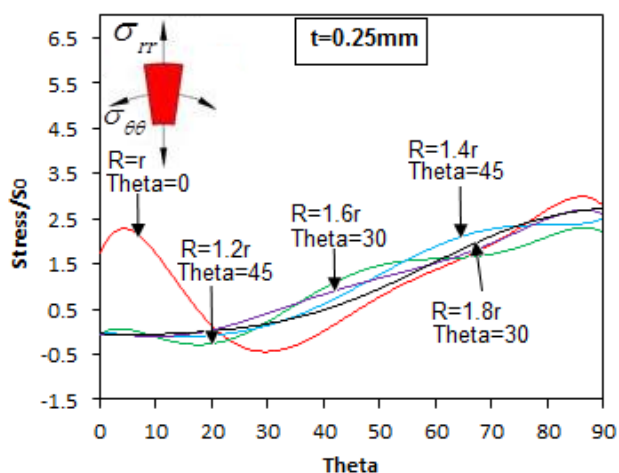
تعریف مسئله

عملگرهای پیزوالکتریک در جهت ضخامت به صورت استوانه‌ای پولا ریزه شده و برای شبیه سازی مسئله یک کد پایتون برای نرم افزار آباکوس نوشته شده است. سپس حالت‌های در نظر گرفته شده بالا تحلیل شده و نتایج استخراج می‌گردد.

نتایج محل بهینه عملگرهای پیزوالکتریک

به عنوان اولین مورد، حالتی بررسی می‌شود که تکه‌های پیزوالکتریک در حالت کششی قرار دارند و با ایجاد کرنش منفی در صفحه میزبان به وسیله تاثیر بر خطوط جریان تنش، ضریب تمرکز تنش را کاهش می‌دهند.

شکل ۲ به عنوان نمونه، نمودارهای مربوط به بهترین مکان قرارگیری عملگرهای پیزوالکتریک در زاویه‌ها و فواصل مختلف برای نسبت ضخامت $1/4$ در اطراف سوراخ را نشان می‌دهد. محور افقی در شکل تنش طولی (S_{11}) را برای زاویه صفر تا 90 درجه داخل سوراخ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نمودارها یک حالت سینوسی را از ابتدا تا انتها حفظ می‌کنند. نمودار ($R=r, \text{Theta}=0$) قرارگیری عملگرهای پیزوالکتریک در زاویه صفر درجه و چسبیده به سوراخ را نشان می‌دهد. نمودار ($R=1.2r, \text{Theta}=45$) تنش طولی در داخل سوراخ برای زمانی که عملگرهای پیزوالکتریک در زاویه 45 و فاصله 1.2 میلی متری از لبه سوراخ قرار گرفته اند، را نشان می‌دهد. نمودارها در زاویه 20 درجه با هم برخورد نموده و در نقطه انتهایی، نمودار مربوط به زاویه 45 درجه و فاصله 1.2 شعاع سوراخ از همه نمودارها پایین تر بوده و در طول مسیر نیز نقطه‌ای که دارای تنش بالایی نسبت به نقطه انتهایی باشد وجود ندارد. در نتیجه این نقطه مناسب ترین نقطه برای قرارگیری تکه‌های پیزوالکتریک است.



شکل ۲. مقایسه نمودارهای تنش مربوط به بهترین مکان‌های قرارگیری

در شکل‌های ۳ و ۴ محل قرارگیری تکه‌های پیزوالکتریک برای نسبت سفتی‌های کوچکتر و بزرگتر از یک ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود عملگرها در اطراف سوراخ قرار گرفته اند. اما بهترین محل نه در بالا و پایین و نه در سمت چپ و راست می‌باشند. بلکه

برای کنترل ضریب تمرکز تنش در اطراف یک سوراخ در یک صفحه دو روش در تحقیق‌های قبلی ارائه شده است [۳]. در روش اول محل تکه‌های پیزوالکتریک در بالا و پایین سوراخ در منطقه تمرکز تنش بالا می‌باشد که عملگرها با ایجاد کرنش مثبت به طور مستقیم تنش را کاهش می‌دهند. در روش دوم با تغییر جریان تنش در صفحه میزبان و اعمال کرنش منفی توسط پیزوالکتریک‌ها، ضریب تمرکز تنش به طور غیر مستقیم کاهش پیدا می‌کند.

اما در این دو روش تاثیر نسبت ضخامت و سفتی تکه‌های پیزوالکتریک و صفحه میزبان در محل قرارگیری و توانایی پیزوالکتریک‌ها برای کاهش تنش در نظر گرفته شده است. بدین منظور نسبت سفتی و نسبت ضخامت از تکه‌های پیزوالکتریک به شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$\frac{(E)_{Plate}}{(E_0)_{Piezo}} = (Rs) \text{ نسبت سفتی} \quad (7)$$

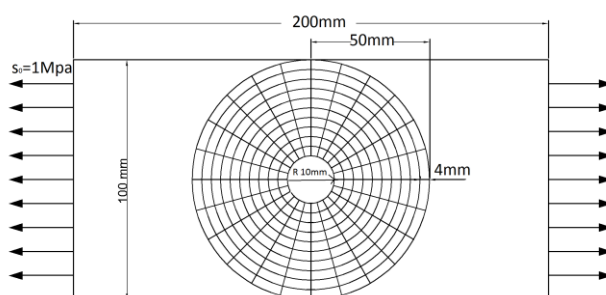
$$\frac{(t)_{Plate}}{(t_0)_{Piezo}} = (Rt) \text{ نسبت ضخامت} \quad (8)$$

به منظور بررسی دو حالت بالا برای نشان دادن تاثیر نسبت ضخامت و نسبت سفتی در محل قرارگیری تکه‌های پیزوالکتریک در اطراف سوراخ، ۷ حالت ارائه شده در جدول ۱ در نظر گرفته شده است:

جدول (۱) حالت‌های نسبت سفتی و نسبت ضخامت

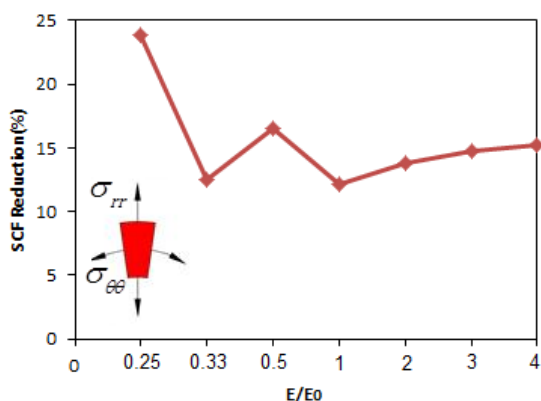
شماره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
نسبت سفتی (Rs)	۱/۴	۱/۳	۱/۲	۱	۲	۳	۴
نسبت ضخامت (Rt)	۱/۴	۱/۳	۱/۲	۱	۲	۳	۴

برای رسیدن به حداکثر کاهش در تمرکز تنش در اطراف یک سوراخ در یک صفحه تحت کشش، یک صفحه مستطیلی نازک که تحت کشش با نیروی یک مگاپاسکال می‌باشد، در نظر گرفته شده است. از آنجا که تمرکز تنش در نزدیکی سوراخ رخ می‌دهد، روشن است که محل عملگرهای پیزوالکتریک در نزدیکی سوراخ تاثیر بیشتری در کاهش ضریب تمرکز تنش خواهند داشت. بنابراین مش بندی در اطراف سوراخ برای قرارگیری عملگرهای پیزوالکتریک به صورت بخشی از دایره به شعاع 1.5 درجه و عرض 4 میلی متر در نظر گرفته شد. صفحه و شبکه مجازی در نظر گرفته شده در شکل ۱ ارائه شده است.

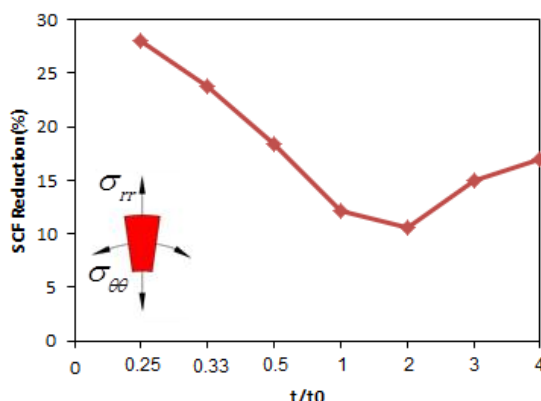


شکل ۱. هندسه صفحه و شبکه مش بندی مجازی برای عملگرها

عملگرها در نقطه ای است که بتواند جریان تنش را به طور غیر مستقیم تحت تاثیر قرار دهد.



شکل ۷. نمودار کاهش ضریب تمرکز تنش برای نسبت سفتی های مختلف

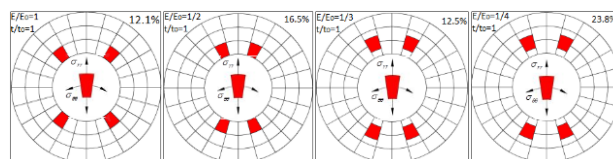


شکل ۸. نمودار کاهش ضریب تمرکز تنش برای نسبت ضخامت های مختلف

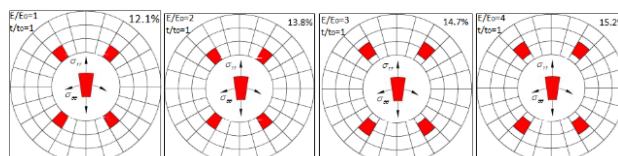
مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

برای بررسی صحت نتایج بدست آمده از تحلیل نرم افزاری، سه آزمایش برای نسبت ضخامت های ۱/۴، ۱/۳ و ۱/۲ انجام شد که نتایج آن در جدول شماره ۲ آورده شده است. در این آزمایش ها، عملگرها در نقاط خاص مشخص شده قرار گرفته و کرنش سنجها در نقاط بالا و پایین سوراخ جایابی شدند. با اعمال کشش به ورق مینا، کرنش خروجی از کرنش سنجها توسط دستگاه دیتالاگر استخراج می گردد. سپس با اعمال ولتاژ به عملگرها، مجدد خروجی کرنش سنجها که تحت تاثیر اعمال ولتاژ اعداد متفاوتی را نشان می دهند ثبت می گردد. همین موارد به کمک نرم افزار نیز انجام شده و نتایج لازم از آن استخراج شده تا با نتایج تجربی مقایسه گردد. شکل ۹ شماتیک انجام آزمون آزمایشگاهی نشان داده شده است.

نقطه دیگری به عنوان بهترین محل استخراج شده است. نکته دیگر اینکه برای نسبت سفتی و ضخامت های مختلف، بهترین محل نیز تغییر کرده و جایابی می شود.

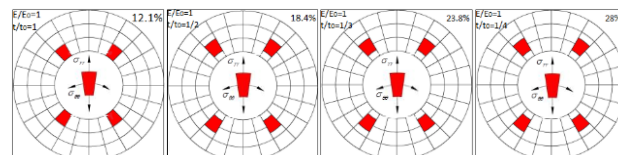


شکل ۳. محل بهینه عملگرهای پیزوالکتریک برای نسبت سفتی کوچکتر از یک

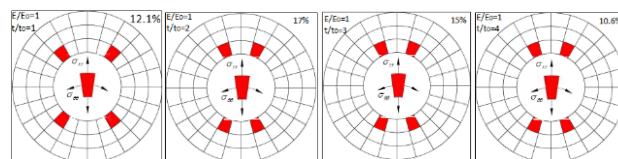


شکل ۴. محل بهینه عملگرهای پیزوالکتریک برای نسبت سفتی بزرگتر از یک

در شکل های ۵ و ۶ نیز محل بهینه قرارگیری عملگرهای پیزوالکتریک برای نسبت ضخامت های کوچکتر و بزرگتر از یک نشان می دهد. مشاهده می شود که برای نسبت ضخامت های کوچکتر از یک مجدداً عملگرها در نقاط خاصی جایابی شده و حتی از لبه سوراخ فاصله می گیرند. اما برای نسبت ضخامت های بزرگتر از یک، محل عملگرها در اطراف سوراخ جایابی نشده و ثابت باقی می ماند.



شکل ۵. محل بهینه قرارگیری عملگرهای پیزوالکتریک برای نسبت ضخامت های کوچکتر از یک

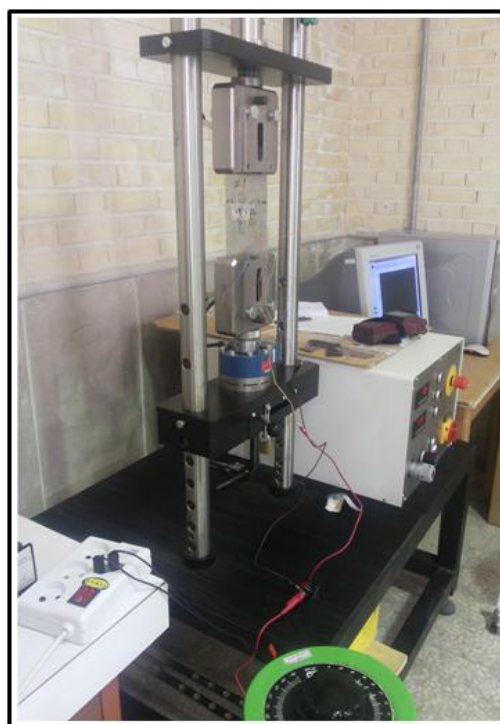


شکل ۶. محل بهینه قرارگیری عملگرهای پیزوالکتریک برای نسبت ضخامت های بزرگتر از یک

شکل های ۷ و ۸ مقدار کاهش تمرکز تنش را برای نسبت سفتی و نسبت ضخامت های مختلف نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود نسبت سفتی و نسبت ضخامت ۱/۴ دارای بیشترین اثر در کاهش تمرکز تنش در اطراف سوراخ می باشد. بنابراین می توان اینگونه نتیجه گرفت که برای دستیابی به کاهش هرچه بیشتر در مقدار تمرکز تنش در ورق های سوراخ دار لازم است جنس و ضخامت عملگر نسبت به جنس و ضخامت ورق مینا انتخاب گردد تا بتواند بیشترین تاثیر را بر مقدار کاهش داشته باشد. همچنین بهترین محل برای قرارگیری

مراجع

- [1] P. K. Sensharma, R. T. Haftka, Limits of stress reduction in a plate with a hole using piezoelectric actuators, *Journal of intelligent material systems and structures*, Vol. 7, No. 4, pp. 363-371, 1996.
- [2] P. K. Sensharma, M. J. Palantera, R. T. Haftka, Stress reduction in an isotropic plate with a hole by applied induced strains, *Journal of intelligent material systems and structures*, Vol. 4, No. 4, pp. 509-518, 1993.
- [3] D. Shah, S. Joshi, W. Chan, Stress concentration reduction in a plate with a hole using piezoceramic layers, *Smart Materials and Structures*, Vol. 3, No. 3, pp. 302, 1994.
- [4] S. Sridharan, S. Kim, Piezo-electric control of stiffened panels subject to interactive buckling, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 46, No. 6, pp. 1527-1538, 2009.
- [5] R. Platz, C. Stapp, H. Hanselka, Statistical approach to evaluating active reduction of crack propagation in aluminum panels with piezoelectric actuator patches, *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, No. 8, pp. 085009, 2011.
- [6] Q. Luo, L. Tong, High precision shape control of plates using orthotropic piezoelectric actuators, *Finite elements in analysis and design*, Vol. 42, No. 11, pp. 1009-1020, 2006.
- [7] Q. Nguyen, L. Tong, Y. Gu, Evolutionary piezoelectric actuators design optimisation for static shape control of smart plates, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 197, No. 1, pp. 47-60, 2007.
- [8] Q. Nguyen, L. Tong, Voltage and evolutionary piezoelectric actuator design optimisation for static shape control of smart plate structures, *Materials & design*, Vol. 28, No. 2, pp. 387-399, 2007.
- [9] J. J. Fesharaki, Optimum pattern of piezoelectric actuator placement for stress concentration reduction in a plate with a hole using particle swarm optimization algorithm, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, pp. 0954406214538617, 2014.



شکل ۹. نمای شماتیک آزمایش

جدول ۲. مقایسه نتایج تحلیلی و عملی

حالت	کرنش تحلیل ($\times 10^{-6}$)	کرنش آزمایش ($\times 10^{-6}$)	خطا
Rt=1/4	۴۵,۱۱۶	۴۳,۱۱۶	۴,۵۲٪
Rt=1/3	۴۴,۱۸۴	۴۱,۱۸۴	۵٪
Rt=1/2	۴۲,۰۴۲	۳۹,۸۱۳	۶,۳۲٪

همانگونه که از نتایج جدول ۲ مشخص است بین نتایج تجربی و تحلیل‌های نرم‌افزاری مطابقت قابل قبولی وجود دارد. اما خطای موجود بین نتایج می‌تواند ناشی از تاثیر لایه چسب موجود بین عملگرها و ورق مینا در آزمون تجربی باشد. همچنین امکان چسباندن دقیق کرنش‌سنج‌ها در بالا و پایین سوراخ نمی‌باشد که هردوی این موارد می‌تواند در اختلاف نتایج بین آزمون‌های تجربی و تحلیل‌های نرم‌افزاری تاثیرگذار باشد.

نتیجه گیری

در این مقاله رابطه بین سفتی و ضخامت صفحه مینا و عملگرهای پیزوالکتریک برای دستیابی به کاهش هرچه بیشتر ضریب تمرکز تنش در اطراف یک سوراخ در یک صفحه تحت کشش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که نسبت سفتی و ضخامت تکه‌های پیزوالکتریک و صفحه می‌تواند، بر موقعیت عملگرهای پیزوالکتریک برای کاهش ضریب تمرکز تنش موثر باشد. همچنین نشان داده شد که برای رسیدن به حداکثر کاهش ضریب تمرکز تنش باید از نسبت سفتی و نسبت ضخامت پایین بین عملگرها و ورق مینا استفاده گردد. نتایج بدست آمده از حل تحلیلی توسط آزمون عملی نیز مورد ارزیابی و تایید قرار گرفت.