

## بهینه‌سازی الیاف پیزوالکتریک در پانل استوانه‌ای هدفمند با لایه‌های پی.اف.آر.سی با روش الگوریتم ژنتیک

محمود شاکری<sup>\*</sup>، سامان محمدنبی، سینا بهرامی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۰ اردیبهشت ۱۳۹۴  
بازنگری: ۱۸ مهر ۱۳۹۴  
پذیرش: ۹ اسفند ۱۳۹۴  
ارائه آنلاین: ۱۹ آبان ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

پانل هدفمند  
کامپوزیت الیاف پیزوالکتریک  
المان محدود  
بهینه‌سازی  
الگوریتم ژنتیک  
شبکه‌های عصبی

**چکیده:** در این تحقیق به بهینه‌سازی الیاف پیزوالکتریک در پانل استوانه‌ای هدفمند با لایه‌های کامپوزیتی از الیاف پیزوالکتریک به عنوان سنسور و محرک تحت تحریک الکتریکی و بار مکانیکی و شرایط تکیه‌گاهی ساده، گیردار، آزاد و ترکیب آن‌ها پرداخته شده است. هدف، به دست آوردن درصد حجمی الیاف پیزوالکتریک در یک لایه پی.اف.آر.سی است به طوری که جابجایی شعاعی این لایه در راستای محیطی، معادل با لایه پیزوالکتریک باشد. به منظور بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک به کار گرفته شده و مقدار پارامترهای مختلف الگوریتم با استفاده از روش میزان‌سازی پارامترها به دست آمده است. همچنین جهت صرفه‌جویی در وقت و اشغال کمتر حافظه، شبکه‌های عصبی مصنوعی، آموزش داده و به کار گرفته شده‌اند. در پایان، نتایج برای تنش و جابجایی دو پانل با لایه پی.اف.آر.سی و پیزوالکتریک ارائه و مقایسه شده و تأثیر شرایط تکیه‌گاهی روی بهینه‌سازی و درصد حجمی به دست آمده، بررسی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که با ورود تکیه‌گاه گیردار به مسئله، افزایش بیشینه تنش فون میسر در سازه مشاهده شده و درصد حجمی بیشتری برای لایه پی.اف.آر.سی معادل به دست می‌آید.

### ۱- مقدمه

در طول یک و نیم دهه اخیر، حس‌گرها و عمل‌گرهای پیزوالکتریک به طور گسترده در سازه‌های هوشمند با وزن کم و برای کنترل آن‌ها استفاده شده است. در میان مواد هوشمند گوناگون، پیزوسرامیک‌ها به دلیل مقاومت و سختی بالا، امکان به کارگیری در دامنه گسترده‌ای از فرکانس‌های تحریک، تولید نیروهای بزرگ، پاسخ سریع، عدم حساسیت به میدان مغناطیسی و دقت بسیار زیاد مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. هر چند این مزایا باعث شده تا این مواد بیشتر از سایر مواد هوشمند مورد استفاده قرار گیرند اما معایبی نیز دارند. از جمله این معایب، می‌توان به ترد و شکننده بودن پیزوسرامیک‌ها اشاره کرد؛ به این دلیل هنگام استفاده در حین فرآیند نصب و به کارگیری، امکان به وجود آمدن ترک وجود دارد. از طرف دیگر این مواد با سازه‌های منحنی شکل مانند پوسته‌های استوانه‌ای و پانل‌ها سازگار نیستند و همچنین نصب پیزوسرامیک‌ها بر روی سازه‌ها موجب تحمیل وزن اضافه‌ای بر سیستم می‌شود.

به منظور بهبود ضعف‌های بالا، از مواد مرکب تقویت‌شده با رشته‌های پیزوالکتریک<sup>۱</sup> استفاده می‌شود که در آن رشته‌های پیزوسرامیک در ماتریسی از مواد پلیمری قرار می‌گیرند. بدین ترتیب نقاط ضعف یاد شده بهبود می‌یابد.

### 1 Piezoelectric Fiber Reinforced Composites (PFRC)

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: shakeri@aut.ac.ir

علاوه بر آن، طبیعت انعطاف‌پذیر فاز پلیمری این مواد، امکان نصب راحت‌تر چنین عمل‌گرها و حس‌گرهایی را بر سازه‌های دارای انحناء فراهم می‌نماید. در بهینه‌سازی الیاف پیزوالکتریک در پانل استوانه‌ای هدفمند، مسئله بهینه‌سازی را می‌توان به صورت یافتن بهترین کسر حجمی الیاف در لایه پی.اف.آر.سی تعریف کرد. این مسئله، با مشکلات متعددی همراه است. یکی از این مشکلات عدم وجود رابطه تحلیلی دقیق بین توابع هدف (جابجایی شعاعی، تنش و غیره) و متغیرهای طراحی (کسر حجمی) می‌باشد که باعث می‌شود استفاده از روش‌های بهینه‌سازی گرادینانی که نیاز به تابع و مشتقات آن را دارند غیرممکن باشد. به همین دلیل الگوریتم ژنتیک به عنوان روش بهینه‌سازی انتخاب شده است.

در سال‌های گذشته در زمینه اثر پیزوالکتریسیت، مواد هدفمند همراه با استفاده از پیزوالکتریک‌ها و همچنین مواد مرکب تقویت شده با الیاف پیزوالکتریک تحقیقات چشم‌گیری انجام شده است؛ در ادامه بخشی از این کارها مرور شده است.

بهرامی و همکاران [۱] برای یک پانل استوانه‌ای هدفمند با لایه‌های پی.اف.آر.سی تحت بار دینامیکی و تحریک الکتریکی، تحلیل پیزوالاستیسیته سه بعدی ارائه کردند. بنا بر فرض، خواص ماده هدفمند از قانون توانی پیروی کرده و همچنین خواص موثر کامپوزیت پیزوالکتریک از خواص اجزای آن بر اساس فرضیات میدان یکنواخت به دست آمده است. معادلات دیفرانسیل

داده می‌شوند. در ابتدا، جمعیت اولیه‌ای به طور کاملاً تصادفی از اعداد تولید می‌شود. در الگوریتم ژنتیک دو عملگر اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرد: تقاطع و جهش. این عملگرها روی کروموزوم‌هایی اعمال می‌شوند که در ابتدا به وسیله روش‌های مختلف انتخاب، گزینش شده‌اند. پس از اعمال عملگرها، فرزندان، جایگزین کروموزوم‌های پدر و مادر که از آنها تولد یافته‌اند می‌شوند و جمعیت جدید ایجاد می‌شود. این چرخه تا زمانی ادامه می‌یابد که معیار توقف بهینه‌سازی ارضا شود.

### ۳- شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مصنوعی، سیستمی است شامل تعدادی بلوک‌های ساده، تابعی و غیر خطی به نام نورون که قادر به تعلیم دیدن برای بازتولید رفتار توابع پیچیده هستند. به دلیل غیر خطی بودن، شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند هر نوع مسئله‌ای را که با سیستم‌های خطی قابل حل نمی‌باشد حل کند و به دلیل توانایی یادگیری، می‌تواند همچون یک سیستم قابل انطباق و انعطاف عمل نماید [۶]. شبکه‌های عصبی مصنوعی از خصوصیات فیزیکی مسئله تأثیر نمی‌گیرند بلکه تنها با استفاده از نتیجه‌هایی که قبلاً از حل یک مسئله گرفته شده است عملگرهای ریاضی خود را به گونه‌ای تنظیم می‌کنند که قادر به بازتولید رابطه بین ورودی و خروجی تابع می‌باشند؛ به عبارت دیگر شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از نتایج محدودی از یک تابع با تغییر عملگرهای ریاضی خود آموزش می‌بیند و پس از این قادر به بازتولید رفتار تابع می‌باشد. شکل ۱ نشان‌دهنده یک عملگر ریاضی منفرد یا نورون است. در این عملگر ریاضی، ورودی  $p$  یک اسکالر است و در گذر از اولین اتصال عملگر در مقدار وزن  $W$  ضرب می‌شود. مقدار  $Wp$  پس از جمع با جمله بایاس  $b$ ، مقدار ورودی به تابع تبدیل  $f$  را ایجاد می‌کند. بایاس، وزنی است که خروجی و ورودی یک نورون را به هم جفت نمی‌کند اما با ضرب شدن در یک سیگنال واحد به نورون معرفی می‌شود. به این ترتیب خروجی نورون با رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$a = f(Wp + b) \quad (1)$$

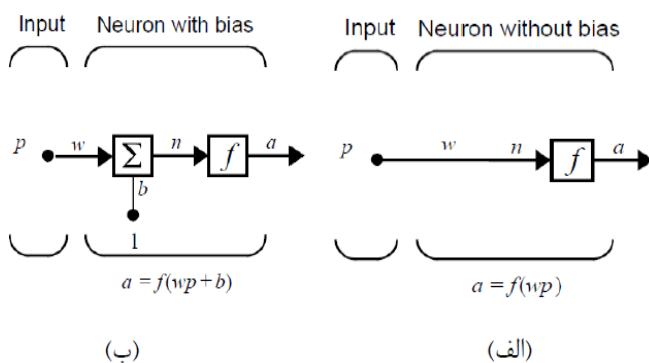


Fig. 1. Single input neuron a) with bias b) without bias

شکل ۱: نورون با یک ورودی (الف) بدون بایاس و (ب) با بایاس [۷]

جزئی شامل معادلات حرکت و معادله مکسول با روش المان محدود سه بعدی حل شده است. شاکری و همکاران [۲] در مقاله‌ای به تحلیل دینامیکی پانل چندلایه با لایه‌های پیزوالکتریک با روش الاستیسیته سه بعدی پرداخته‌اند. در این تحقیق با فرض شرایط تکیه‌گاهی ساده، لایه‌های ارتوتروپ و طول بی‌نهایت پانل، تحریک دینامیکی حل الاستیسیته ارائه شده است. معادلات جفت‌شده الکترومکانیکی به کمک توابع مثلثاتی از معادلات دیفرانسیل جزئی به معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل شده‌اند و با روش المان محدود حلی برای آن ارائه شده است. شن و هوی شن [۳] در مقاله‌ای رفتار کماتش و پس کماتش ورق هدفمند با کامپوزیت تقویت شده با الیاف پیزوالکتریک را که به عنوان محرک به کار رفته مقایسه کرده‌اند. در این تحقیق تحلیل کماتش یک ورق مستطیلی هدفمند با لایه‌های پیزوالکتریک به عنوان حسگر یا محرک به صورت دینامیکی تحت بارگذاری حرارتی-الکتریکی-مکانیکی انجام شده و از تئوری تغییر شکل برشی مرتبه بالا استفاده شده است. حل با روش المان محدود انجام گرفته و نقص‌های هندسی ورق و تأثیرات دما در خواص ماده در نظر گرفته شده است.

همچنین در خصوص تاریخچه مطالعات پیرامون روش الگوریتم ژنتیک می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. لیو و همکاران [۴] برای طراحی لایه‌چینی لمینیت‌ها از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. آنها در این مطالعه ضخامت لایه‌ها را ثابت در نظر گرفتند. بار کماتش بیشینه از طریق جایگشت تعدادی از مقادیر مجاز برای زوایای الیاف به دست آمد. شاکری و همکاران [۵] برای بیشینه کردن فرکانس طبیعی لمینیت از الگوریتم ژنتیک استفاده کرده و برای محاسبه تابع هدف نیز المان محدود را به کار بردند. در این مطالعه متغیر طراحی، لایه‌چینی در نظر گرفته شد.

### ۲- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت جاندار است که روشی عمومی از روش‌های فرا ابتکاری می‌باشد. این الگوریتم مبتنی بر تکرار است و اصول اولیه آن از علم ژنتیک اقتباس شده است. به همین دلیل واژگان استفاده شده در این الگوریتم‌ها از زیست‌شناسی گرفته شده‌اند. علم ژنتیک، علمی است که درباره چگونگی توارث و انتقال صفحات بیولوژیکی از نسلی به نسل بعد صحبت می‌کند. عامل اصلی این انتقال در موجودات زنده، کروموزوم‌ها و ژن‌ها می‌باشد و نحوه عملکرد آنها به گونه‌ای است که در نهایت ژن‌ها و کروموزوم‌های برتر و قوی‌تر باقی مانده و ژن‌های ضعیف‌تر از بین می‌روند. در واقع قانون انتخاب طبیعی برای بقا بیان می‌دارد که هرچه امکان تطبیق موجود بیشتر باشد بقای موجود امکان‌پذیرتر است و احتمال تولید مثل بیشتری برایش وجود دارد. الگوریتم ژنتیک با کروموزوم‌های والدین به طور تصادفی انتخاب شده از فضای جستجو برای ایجاد یک جمعیت شروع می‌شوند. این جمعیت به وسیله اعمال اپراتورهای ژنتیکی به سمت کروموزوم‌های بهتر تکامل می‌یابد. در این روش متغیرهای طراحی که تابع هدف را تعریف می‌نمایند، توسط یک سری از اعداد نشان

ارائه شده به وسیله کاپوریا و کوماری [۸] با اندکی تغییر استفاده شده است. در آن مدل از میدان الکتریکی در راستای عمود بر الیاف محوری و محیطی صرف نظر شده است و تنها میدان الکتریکی در راستای شعاعی اعمال شده است. اما در این مقاله، ساده سازی مذکور انجام نگرفته است. مدل ارائه شده یک مدل خطی می باشد؛ زیرا فرض بر این است که میدان الکتریکی و تنش ها کوچک اند. معادلات متشکله برای لایه پی.اف.آرسی را می توان به صورت یک ماتریس در رابطه (۲) نوشت.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 & e_{11} & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 & e_{12} & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 & e_{13} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 & 0 & 0 & e_{35} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} & 0 & e_{26} & 0 \\ e_{11} & e_{12} & e_{13} & 0 & 0 & 0 & \eta_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{26} & 0 & \eta_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{35} & 0 & 0 & 0 & \eta_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

در روش میدان یکنواخت، کرنش ها و میدان الکتریکی دو فاز مختلف در راستای موازی با صفحه تماس آن دو، یکسان فرض می شوند. همچنین تنش های صفحه تماس دو فاز و جابجایی الکتریکی در راستای عمود بر صفحه نیز در دو ماده برابر فرض می شوند.

#### ۴-۱- استخراج معادلات المان محدود لایه پی.اف.آرسی

در این بخش، با استفاده از روش المان محدود گلرکین و اعمال آن روی معادلات حرکت و معادله ماکسول، معادلات جبری المان محدود برای مواد هدفمند و هوشمند به دست می آیند.

#### ۴-۱-۱- معادلات دیفرانسیل حرکت

معادلات دیفرانسیل حرکت (معادلات تعادل) با فرض وجود نیروی اینرسی بر حسب تغییر مکان ها و مؤلفه های تانسور تنش، در مختصات استوانه ای، به صورت معادله (۳) است.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= \rho \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} + 2 \frac{\tau_{r\theta}}{r} &= \rho \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (3)$$

#### ۴-۱-۲- معادله ماکسول (تعادل بار الکتریکی)

در مواد پیزوالکتریک، می بایست معادله الکترواستاتیک ماکسول نیز به همراه معادلات تعادل برقرار باشد.

$$\frac{\partial D_r}{\partial r} + \frac{D_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial D_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial D_z}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

پارامترهای  $W$  و  $b$  قابل تنظیم هستند و تابع تبدیل  $f$  نیز توسط طراح انتخاب می شود. یادگیری، به معنای تغییر این پارامترها به گونه ای است که رابطه بین ورودی و خروجی با تابع خاصی مطابقت نماید. شکل ۲ روند کلی استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی را نشان می دهد.

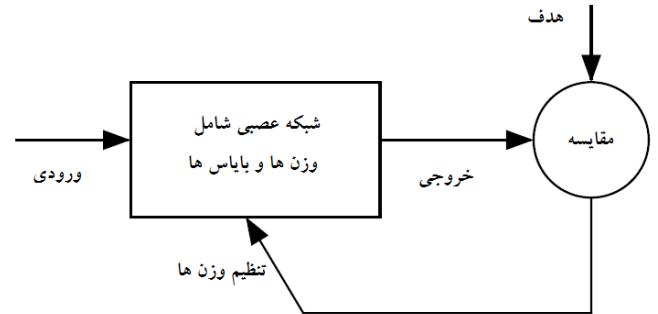


Fig. 2. An artificial neural networks chart

#### شکل ۲: چارت یک شبکه عصبی مصنوعی

با اتمام مرحله آموزش، شبکه عصبی می تواند برای مدل سازی مورد استفاده قرار گیرد. نکته مهم تعداد لایه ها می باشد؛ به طوری که در حل مسائل مهندسی شبکه نشان داده شده در شکل ۱ کفایت نمی کند. با اضافه کردن چند لایه میانی، شبکه توانایی تجزیه و تحلیل های با درجه پیچیدگی بالاتر را خواهد داشت. فرآیندهای آموزش شبکه را می توان به دو دسته کلی تقسیم کرد: ۱- آموزش با نظارت ۲- آموزش بدون نظارت. در این مقاله از آموزش با نظارت استفاده شده است.

#### ۴-۲ تحلیل پانل هدفمند با لایه های پی.اف.آرسی

شماتیک مسئله به همراه پارامترهای هندسی، محل اعمال ولتاژ الکتریکی و لایه های تشکیل دهنده پانل در شکل ۳ نشان داده شده اند. به منظور محاسبه خواص مؤثر لایه کامپوزیتی با الیاف پیزوالکتریک از خواص الیاف و ماتریس، مدل های مختلفی وجود دارد. در این مقاله از مدل

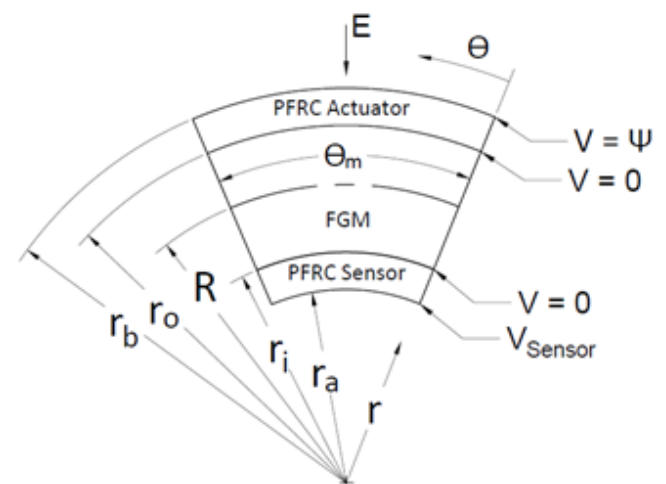


Fig. 3. Geometrical parameters and the applied electrical voltage location

#### شکل ۳: پارامترهای هندسی مسئله و محل اعمال ولتاژ الکتریکی

$$N_6 = \frac{1}{8}(1+\xi)(1+\zeta)(1-\mu)$$

$$N_7 = \frac{1}{8}(1+\xi)(1+\zeta)(1+\mu)$$

$$N_8 = \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\zeta)(1+\mu)$$

$$N = \{N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6, N_7, N_8\} \quad (8)$$

که در آن،  $N$  بردار تابع شکلی است.

توابعی که متغیرهای مکان کلی را بر حسب متغیرهای مکان موضعی تعریف می‌کنند در روابط (۹) آمده‌اند.

$$X = \Delta X^e x + X_m^e$$

$$\Delta X^e = \frac{X_j^e - X_i^e}{2} \quad (9)$$

$$X_m^e = \frac{X_j^e + X_i^e}{2}$$

که در آن  $X$  مربوط به مختصات کلی ( $r, \theta, z$ ) و  $x$  بیانگر مختصات موضعی ( $\xi, \zeta, \mu$ ) می‌باشد.

#### ۴-۴-۴ روابط برای ماده هدفمند

خواص فیزیکی مواد هدفمند در راستای مشخصی مانند راستای شعاعی در استوانه‌ها و پانل‌های استوانه‌ای به طور پیوسته تغییر می‌کنند. نحوه این تغییر را می‌توان به کمک توابع تحلیلی بیان کرد. مهم‌ترین توابعی که برای بیان نحوه تغییر خواص پیشنهاد شده است عبارتند از توابع نمایی، توابع یک یا چند جمله‌ای، رابطه توانی و تابع توانی متاثر از دما. در این مقاله طبق مرجع [۱۰]، از تابع توانی که با رابطه (۱۰) مشخص شده برای تغییرات خواص ماده هدفمند استفاده شده است.

$$P(r) = (P_o - P_i) \left( \frac{r - r_i}{h} \right)^n + P_i \quad (10)$$

که در آن  $P_i, P_o$  و  $P(r)$  به ترتیب خواص در شعاع خارجی، خواص در شعاع داخلی و خواص در شعاع  $r$  است. همچنین  $h$  ضخامت پانل و  $r_i$  شعاع داخلی آن می‌باشد. شکل کلی معادلات متشکله ماده هدفمند همانند لایه پی.اف.آر.سی است با این تفاوت که ثابت پیزوالکتریک صفر هستند. علاوه بر این، به دلیل ایزوتروپ بودن ماده هدفمند، ضرایب دی‌الکتریک در هر سه جهت با هم برابرند.

#### ۴-۵ همگذاری المان‌ها

شکل کلی معادلات، به شکل رابطه (۱۱) است. این معادلات از نوع معادلات جبری خطی هستند. همان طور که گفته شد برای هر المان هشت گره با چهار درجه آزادی و جمعاً ۳۲ مجهول وجود دارد. در هنگام همگذاری، ضرایبی که دارای گره مشترک هستند با هم جمع می‌شوند.

#### ۴-۱-۳ روابط کرنش-تغییر مکان و میدان الکتریکی-پتانسیل الکتریکی

در دستگاه مختصات استوانه‌ای، روابط کرنش-تغییر مکان با فرض کوچک بودن تغییر شکل‌ها به شکل معادله (۵) است.

$$\varepsilon_r = u_{r,r}$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u_r + u_{\theta,\theta}}{r}$$

$$\varepsilon_z = u_{z,z}$$

$$\gamma_{z\theta} = u_{\theta,z} + \frac{u_{z,\theta}}{r} \quad (5)$$

$$\gamma_{rz} = u_{z,r} + u_{r,z}$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{1}{r}(u_{r,\theta} - u_\theta + ru_{\theta,r})$$

در این روابط، علامت کاما (,) به معنای مشتق جزئی نسبت به نماد بعد از آن است. همچنین روابط میدان الکتریکی-پتانسیل الکتریکی در رابطه (۶) آمده است.

$$E_r = -\psi_{,r}$$

$$E_\theta = -\frac{\psi_{,\theta}}{r} \quad (6)$$

$$E_z = -\psi_{,z}$$

که در آن  $\psi$  پتانسیل الکتریکی و  $E_i$  مؤلفه میدان الکتریکی در راستای  $i$  می‌باشد.

#### ۴-۲ دستگاه معادلات دیفرانسیل حاکم

با جایگذاری روابط (۵) و (۶) در رابطه (۲)، تنش‌ها و جابجایی‌های الکتریکی بر حسب مؤلفه‌های جابجایی و پتانسیل الکتریکی به دست می‌آیند. سپس نتیجه در معادلات (۳) و (۴) جایگذاری شده و برای هر المان ۴ معادله بر حسب چهار مجهول  $u_r, u_\theta, u_z$  و  $\psi$  به دست خواهد آمد که به علت حجم بالای این معادلات از آوردن آن‌ها صرف نظر می‌شود.

#### ۴-۳ حل دستگاه معادلات دیفرانسیل حاکم

برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی به دست آمده در بخش قبل، تمام معادلات در تابع شکلی ضرب شده و روی دامنه مکان، انتگرال آن‌ها محاسبه شده است. المان‌ها از نوع مکعبی مرتبه اول با ۸ گره در گوشه‌ها انتخاب شده‌اند. تابع شکلی به صورت تابعی خطی از مختصات موضعی  $\xi, \zeta$  و  $\mu$  به ترتیب در سه راستای  $r, \theta, z$  مطابق مرجع [۹] تعریف می‌شود. دامنه تغییرات مختصات موضعی بین ۱- تا ۱ است.

$$N_1 = \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\zeta)(1-\mu)$$

$$N_2 = \frac{1}{8}(1-\xi)(1+\zeta)(1-\mu)$$

$$N_3 = \frac{1}{8}(1-\xi)(1+\zeta)(1+\mu)$$

$$N_4 = \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\zeta)(1+\mu)$$

$$N_5 = \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\zeta)(1-\mu) \quad (7)$$

۵-۱- پانل هدفمند استوانه‌ای با لایه‌های پیزوالکتریک، چهار طرف تکیه‌گاه ساده

هندسه پانل استوانه‌ای مطابق شکل ۴ است. پارامترهای مربوط به مشخصات فیزیکی مسئله در رابطه (۱۲) آورده شده است.

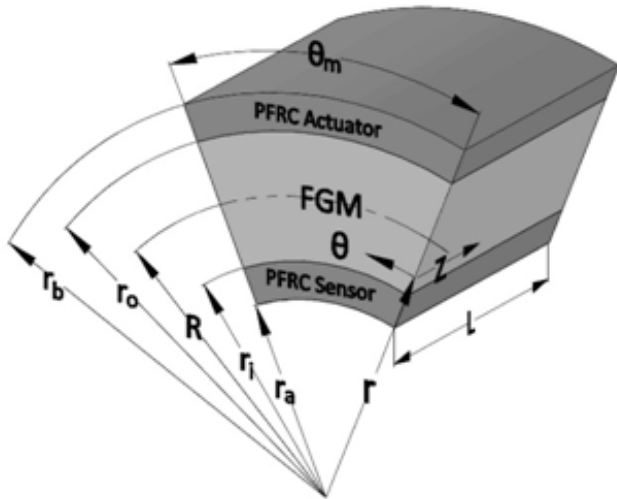


Fig. 4. Geometry of FG cylindrical panel with PFRC layers

شکل ۴: هندسه پانل استوانه‌ای هدفمند با لایه‌های پی.اف.آر.سی

$$S = 10, \quad \theta_m = 60^\circ, \quad L = 1\text{m}, \quad R = 1\text{m} \quad (12)$$

که در آن  $S$  نسبت شعاع میانگین به ضخامت کل پانل است. پتانسیل الکتریکی اعمال شده روی سطح بیرونی محرک،  $0.1$  ولت و بار مکانیکی که بر سطح بیرونی محرک اعمال می‌شود نیز از نوع بار فشاری و یکنواخت است. رابطه (۱۳) بار مکانیکی اعمال شده را بیان می‌کند که در آن  $Q_0 = -1$  و  $\alpha = 13100$  فرض شده است. همچنین روابط (۱۴) شرایط مرزی چهار طرف پانل را نشان می‌دهد. رابطه (۱۵) شرط مرزی سطح بیرونی پانل و رابطه (۱۶) شرط مرزی سطح داخلی پانل را نشان می‌دهد. برای حل زمانی نیز از پله‌های  $S = 10^{-6}$  استفاده شده است.

$$Q_0(\theta, z, t) = Q_0(1 - e^{-\alpha t}) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} u_r = \sigma_\theta = \tau_{\theta z} = \psi = 0 & \quad \theta = 0, \theta_m \\ u_r = \sigma_z = \tau_{z\theta} = \psi = 0 & \quad z = 0, L \end{aligned} \quad (14)$$

$$r = r_b \begin{cases} \tau_{r\theta} = \tau_{rz} = 0 \\ \psi = 0.01 \\ \sigma_r = Q(\theta, z, t) \end{cases} \quad (15)$$

$$r = r_a, \quad \sigma_r = \tau_{r\theta} = \tau_{rz} = \psi = 0 \quad (16)$$

مشخصات فیزیکی پانل هدفمند در جدول ۱ و لایه پیزوالکتریک (PZT-4) در جدول ۲ آورده شده است. همچنین در تمام نمودارها، بی‌بعدسازی تنش‌ها از تقسیم آنها بر  $Q_0$  به دست آمده است. برای بی‌بعدسازی مختصات شعاعی و محیطی نیز از روابط (۱۷) استفاده شده است که در آن  $\Theta$  مختصات

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} - \\ u_{r1} \\ - \\ u_{r2} \\ \vdots \\ - \\ u_{r8} \\ - \\ u_{\theta1} \\ \vdots \\ - \\ u_{\theta8} \\ - \\ u_{z1} \\ \vdots \\ - \\ u_{z8} \\ - \\ \psi_1 \\ \vdots \\ - \\ \psi_8 \end{bmatrix}^e \\ & \begin{bmatrix} M_{1,1} & \cdots & M_{1,32} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{32,1} & \cdots & M_{32,32} \end{bmatrix}^e \begin{Bmatrix} u_{r1} \\ u_{r2} \\ \vdots \\ u_{r8} \\ u_{\theta1} \\ \vdots \\ u_{\theta8} \\ u_{z1} \\ \vdots \\ u_{z8} \\ \psi_1 \\ \vdots \\ \psi_8 \end{Bmatrix}^e = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_{32} \end{Bmatrix}^e \end{aligned} \quad (11)$$

#### ۴-۶- حل زمانی

پس از همگذاری ماتریس‌های  $[K]$  و بردار  $\{f\}$ ، معادله در دامنه زمانی حل می‌شود. روشی که در این‌جا استفاده شده است، روش هوبولت غیر صریح تک مرحله‌ای است که در مرجع [۱۱] آورده شده است. مزیت این الگوریتم نسبت به سایر الگوریتم‌های مشابه همانند نیومارک، حذف کردن پاسخ‌های فرکانس بالای نامطلوب در یک مرحله زمانی است. این خاصیت در روش‌های عددی حل زمانی به استهلاک عددی معروف است. روش هوبولت با وجود حذف پاسخ‌های نامطلوب در پله زمانی اول، دقت خوبی در محاسبه پاسخ‌های فرکانس پایین دارد. روش‌های هوبولت به خاطر همین مزیت در بسیاری از کدهای تجاری به کار گرفته شده‌اند.

#### ۵- اعتبارسنجی حل المان محدود

برای اعتبارسنجی حل ارائه شده، پانل استوانه‌ای هدفمند با لایه‌های پیزوالکتریک به طور کامل در نرم‌افزار انسیس مدل شده است و تنش‌ها در لحظه  $0.1$  ثانیه مقایسه شده‌اند.

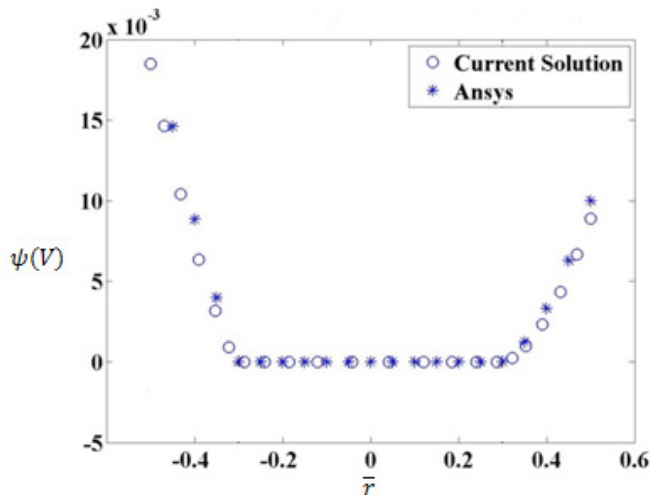


Fig. 6. Electrical potential distribution along the radial direction

شکل ۶: توزیع پتانسیل الکتریکی در راستای شعاعی

در تمام مسائلی که حل آن‌ها با استفاده از روش‌های عددی همچون المان محدود به دست می‌آید، از مهم‌ترین کارهای بعد از یافتن پاسخ مسئله، بررسی همگرایی پاسخ با تغییر دادن تراکم شبکه‌بندی است. به این منظور تعداد تقسیم‌ها را در عدد ثابت بزرگ‌تر از یک ضرب (در هر راستا) و پاسخ‌های به دست آمده را با هم مقایسه می‌کنند. در این مقاله نیز از آنجایی که حل با روش المان محدود سه بعدی به دست آمده، این مطالعه انجام شده است. در این حالت بار مکانیکی، ولتاژ تحریک، شرایط مرزی چهار طرف، سطح خارجی و داخلی پانل همانند قسمت قبل می‌باشد شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب نشان دهنده توزیع تنش‌های شعاعی و محیطی در راستای شعاعی برای سه حالت مش‌بندی است. شکل‌ها بیانگر همگرایی پاسخ است. همچنین در همه شکل‌ها مش‌بندی به صورت سه عدد کنار هم نوشته شده؛ به طور مثال شبکه‌بندی "۲۰، ۲۰، ۴۰" بیانگر مشی است که تقسیمات شعاعی آن ۴۰ و تقسیمات محیطی و طولی آن ۲۰ است.

### ۶- معادل‌سازی-پانل با چهار طرف تکیه‌گاه ساده

در این جا هدف معادل‌سازی، جابجایی شعاعی می‌باشد. رابطه (۱۸)، تابع هدف بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

$$Residual = \sum_{i=1}^N (u_{r(i)}^{PFRC} - u_{r(i)}^{piezo})^2 \quad (18)$$

جدول ۲: خواص لایه پیزوالکتریک

Table 2. Properties of piezoelectric layer

$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{22}$	$C_{23}$	$C_{33}$	$C_{44}$	$C_{55}$	$C_{66}$	Tensile Strength (MPa)
۱۱۵	۷۴/۳	۷۴/۳	۱۳۹	۷۷/۸	۱۳۹	۳۰/۶	۲۵/۵	۲۵/۶	
$e_{11}$	$e_{12}$	$e_{13}$	$e_{26}$	$e_{35}$	$\eta_{11}$	$\eta_{22}$	$\eta_{33}$	$\rho$	
۱۵/۱	-۵/۲	-۵/۲	۱۲/۷	۱۲/۷	۵/۶۲	۶/۴۶	۶/۴۶	۷۶۰۰	

محیطی وسط پانل،  $R$  مختصات شعاعی صفحه میانی پانل،  $H$  ضخامت کل پانل و  $\theta_m$  اندازه کمان پانل است.

$$Residual = \sum_{i=1}^N (u_{r(i)}^{PFRC} - u_{r(i)}^{piezo})^2 \quad (17)$$

نتایج برای توزیع تنش شعاعی و پتانسیل الکتریکی در راستای شعاعی، به عنوان نمونه در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده است که مطابقت خوبی با هم دارند.

جدول ۱: خواص لایه هدفمند

Table 1. Properties of FG layer

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$	E (GPa)	لایه هدفمند
۲۷۰۲	۰/۳۳۴	۷۰	داخل Al
۳۸۰۰	۰/۲۲	۳۸۰	خارج Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

Al و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به ترتیب دارای مقاومت کششی ۴۰۰۰ psi و ۳۷۰۰۰-۳۷۸۰۰ psi هستند.

در حالت استاتیکی، اعتبارسنجی برای لایه‌چینی ۰/۹۰ با مشخصات  $\theta_s = 20^\circ$  و  $S=20$  با مرجع [۱۲] انجام شده و نمودارهای مربوطه در شکل‌های ۷ و ۸ آمده است.

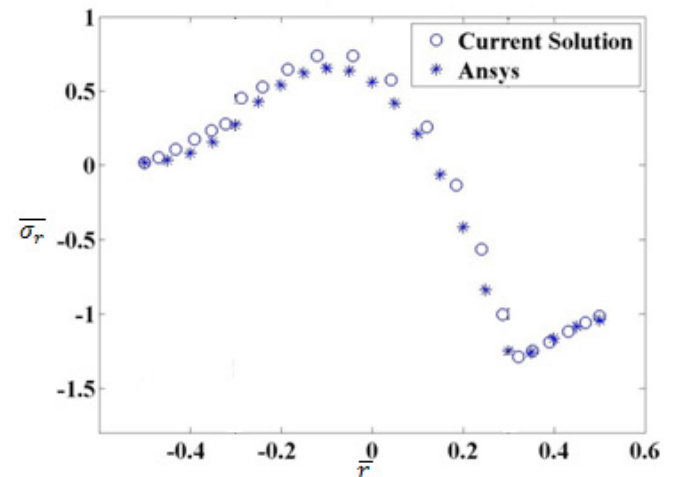


Fig. 5. Radial stress distribution along the radial direction

شکل ۵: توزیع تنش شعاعی در راستای شعاعی

جدول ۳: خواص ماتریس لایه پی.اف.آر.سی

Table 3. Properties of matrix of PFRC layer

$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{22}$	$C_{23}$	$C_{33}$	$C_{44}$	$C_{55}$	$C_{66}$	Tensile Strength
(GPa)									
۳/۷۴	۱/۱۲	۱/۱۲	۳/۷۴	۱/۱۲	۳/۷۴	۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۳۱	(MPa)
$e_{11}$	$e_{12}$	$e_{13}$	$e_{26}$	$e_{35}$	$\eta_{11}$	$\eta_{22}$	$\eta_{33}$	$\rho$	
(f/m)						(10 <sup>-9</sup> C/m <sup>2</sup> )			(Kg/m <sup>3</sup> )
.	.	.	.	.	۰/۲۴۲	۰/۲۴۲	۰/۲۴۲	۱۰۰۰	۷۲

همچنین لایه‌های پیزوالکتریک به کار رفته در پانل استوانه‌ای که فرآیند معادل‌سازی برای آن‌ها انجام گرفته، دارای مشخصات هندسی به شرح زیر:  $H_{piezo}/R_m = 0/01$ ،  $\theta_m = 60^\circ$ ،  $L = 1$  m و  $H_{fgm}/R_m = 0/12$  و خواص آورده شده در جدول ۲ هستند.

که در آن  $N$  تعداد نقاط مد نظر می‌باشد. همچنین معادل‌سازی برای پانل با نسبت شعاع میانگین به ضخامت  $S=5$  انجام شده است. خواص لایه هدفمند، الیاف و ماتریس (اپوکسی) لایه پی.اف.آر.سی از جداول ۱ تا ۳ پیروی می‌کنند.

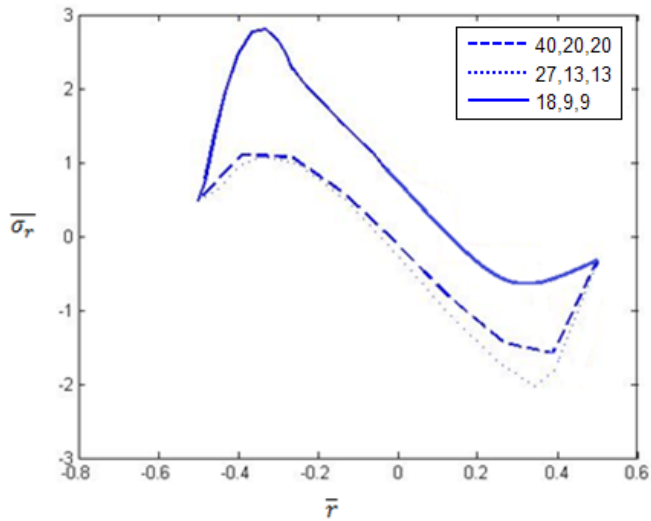


Fig. 9. Radial stress distribution along the radial direction

شکل ۹: نمودار توزیع تنش شعاعی در راستای شعاعی

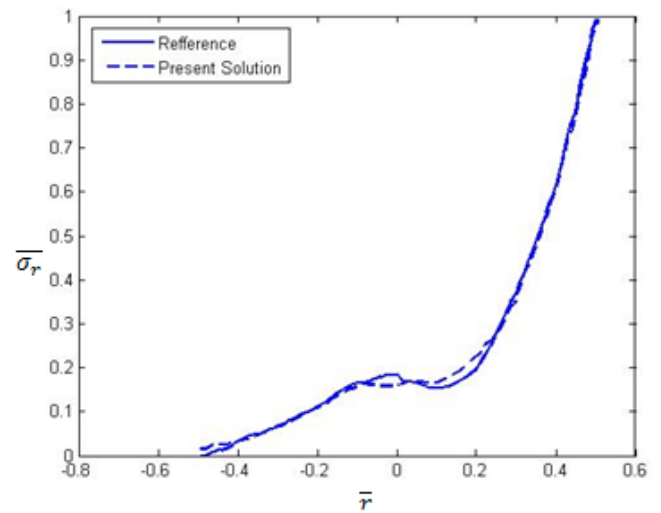


Fig. 7. Radial stress distribution along the radial direction

شکل ۷: توزیع تنش شعاعی در راستای شعاعی

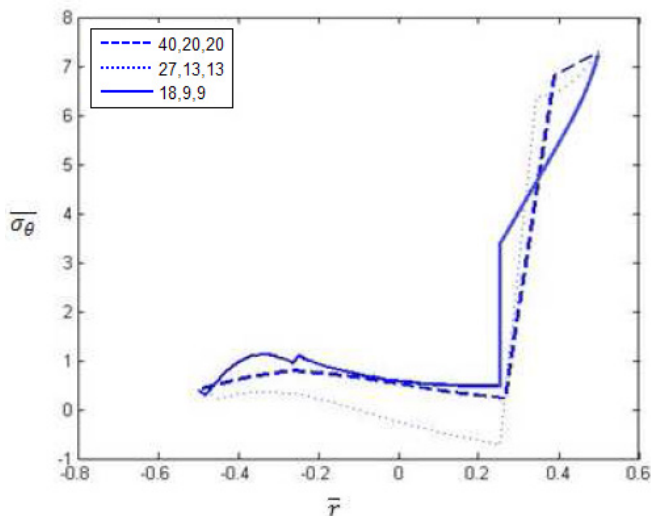


Fig. 10. Circumferential stress distribution along the radial direction

شکل ۱۰: نمودار توزیع تنش محیطی در راستای شعاعی

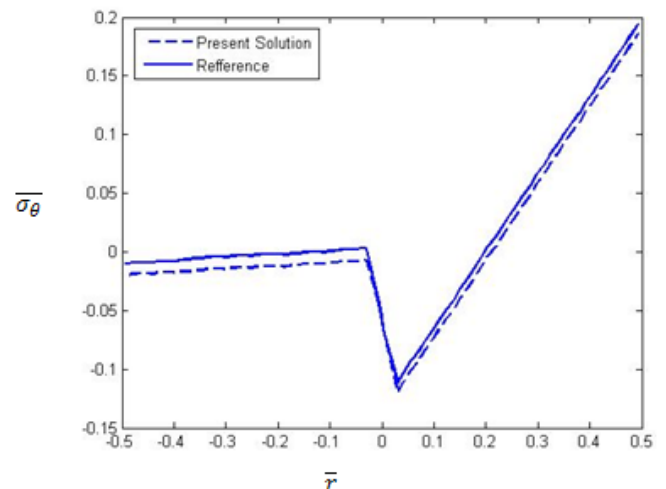


Fig. 8. Circumferential stress distribution along the radial direction

شکل ۸: توزیع تنش محیطی در راستای شعاعی

**جدول ۶: ساختار شبکه آموزش داده شده برای بیشینه تنش فون میسز پانل چهار طرف تکیه‌گاه ساده ( $S=5$ )**

**Table 6. Structure of trained neural network of maximum Von Mises stress for simply supported panel ( $S=5$ )**

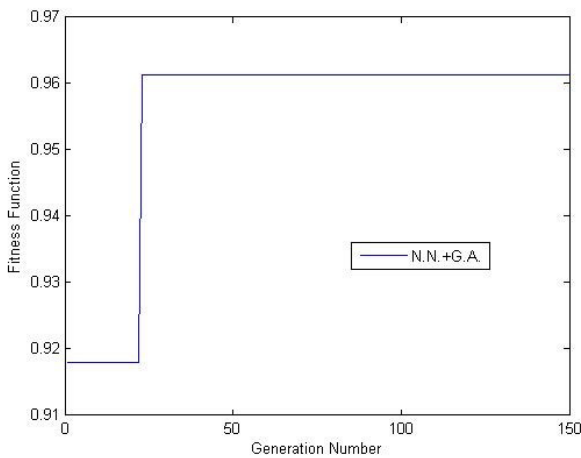
لایه اول	لایه دوم	لایه سوم	لایه چهارم	لایه پنجم	لایه ششم
نورون TF	نورون TF	نورون TF	نورون TF	نورون TF	نورون TF
Tansig ۱	Tansig ۲۰	Tansig ۱۰	Tansig ۱۵	Tansig ۲۰	Tansig ۱۰

**جدول ۷: بیشترین مقدار خطای شبکه آموزش داده شده برای بیشینه تنش فون میسز پانل چهار طرف تکیه‌گاه ساده ( $S=5$ )**

**Table 7. Maximum error of trained neural network of Von Mises stress for simply supported panel ( $S=5$ )**

نام شبکه	بیشترین مقدار خطا (%)
Net_sigma_SSSS	۰/۹

در این حالت احتمال جهش و احتمال تقاطع از روش میزان‌سازی پارامترها به ترتیب ۰/۰۲ و ۰/۶ به دست آمده‌اند. همچنین تعداد افراد جمعیت نیز ۲۰ فرد می‌باشد. در شکل ۱۱ روند رشد تابع ارزیابی بر حسب نسل‌ها قابل مشاهده می‌باشد.



**Fig. 11. Trend of increasing the target function for the optimization of simply supported panel ( $S=5$ )**

**شکل ۱۱: روند افزایش تابع هدف در بهینه‌سازی پانل چهار طرف تکیه‌گاه ساده با ( $S=5$ ) (شبکه عصبی)**

در نهایت درصد حجمی الیاف پیزوالکتریک، % ۲۰/۴۸ به دست می‌آید. اکنون، نتایج به دست آمده برای هر دو پانل استوانه‌ای- یکی با لایه‌های پیزوالکتریک و دیگری با لایه‌های پی.اف.آر.سی معادل بررسی می‌گردد. در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴، به عنوان نمونه، توزیع تغییر مکان محیطی و تنش شعاعی در راستای شعاعی و تغییر مکان شعاعی برای نقاط طرح در راستای محیطی رسم شده است.

بار مکانیکی وارده، شرایط مرزی چهار لبه، سطح خارجی و سطح داخلی پانل به ترتیب از روابط (۱۴) تا (۱۶) پیروی می‌کنند؛ با این تفاوت که در بار مکانیکی  $Q_0 = -1e8$  و در خصوص شرط مرزی سطح خارجی،  $\psi = 0.01(1 - e^{-\alpha t})$  می‌باشد. به منظور اعمال قید، لازم است تنش واحد به عنوان تنش تسلیم کل سازه به دست آورد. برای پیدا کردن این تنش از رابطه موجود در مرجع [۱۳] استفاده شده است. به منظور داشتن یک تقریب بسیار نزدیک به واقعیت، تنش تسلیم مؤثر سازه در واقع میانگین حد بالا و حد پایین در هر درصد حجمی در نظر گرفته شده است. با پیدا شدن تنش تسلیم مؤثر سازه، این تنش با تنش فون میسز مقایسه می‌شود.

برای آموزش شبکه‌های عصبی از نمونه‌های آموزش استفاده می‌شود. در اینجا ۵۰ مثال آموزش برای به دست آوردن لایه پی.اف.آر.سی معادل با هدف جابجایی شعاعی انتخاب گردید. ویژگی‌های شبکه استفاده شده برای این مسئله شامل تعداد لایه‌های پنهان، توابع انتقال و تعداد نورون‌ها در جدول ۴ آمده است.

**جدول ۴: ساختار شبکه آموزش داده شده برای پانل چهار طرف تکیه‌گاه ساده ( $S=5$ )**

**Table 4. Structure of trained neural network for simply supported panel ( $S=5$ )**

لایه اول	لایه دوم	لایه سوم	لایه چهارم	لایه پنجم	لایه ششم
نورون TF	نورون TF	نورون TF	نورون TF	نورون TF	نورون TF
Tansig ۱	Tansig ۲۰	Tansig ۱۰	Tansig ۱۵	Tansig ۲۰	Tansig ۱۰

کارایی شبکه آموزش داده شده با شبیه‌سازی آن با ورودی‌های مجموعه آموزش سنجیده شده است. بیشترین مقدار قدر مطلق خطای مشاهده شده در این مجموعه به دست آمده و در جدول ۵ آورده شده است. چنانچه دیده می‌شود، آموزش مناسب شبکه‌ها توانایی تقریب بسیار نزدیک دقیق رفتار سازه را مهیا می‌سازد.

**جدول ۵: بیشترین مقدار خطای شبکه آموزش داده شده برای پانل چهار طرف تکیه‌گاه ساده ( $S=5$ )**

**Table 5. Maximum error of trained neural network for simply supported panel ( $S=5$ )**

نام شبکه	بیشترین مقدار خطا (%)
Net_SSSS	۱/۴۷

در جدول ۶ ویژگی‌های شبکه عصبی به کار گرفته شده برای بیشینه تنش فون میسز آورده شده است.

در این حالت نیز بیشترین مقدار قدر مطلق خطای مشاهده شده در این مجموعه به دست آمده و در جدول ۷ آورده شده است.



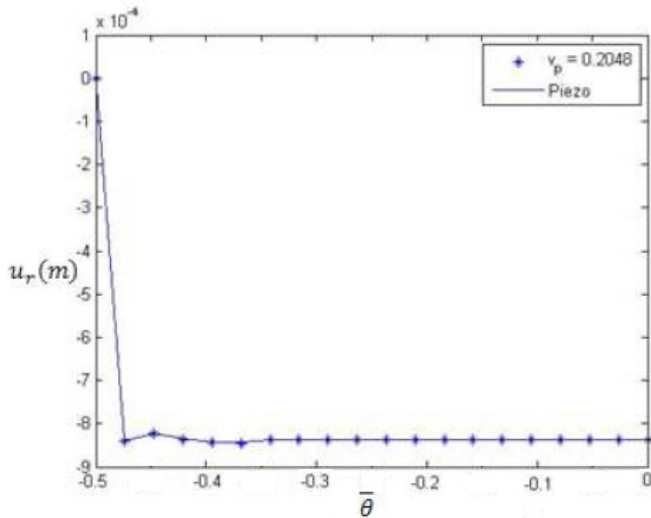


Fig. 14. Comparison of panel with piezoelectric layer and panel with equivalent PFRC layer: Radial displacement distribution along circumferential direction

شکل ۱۴: مقایسه پانل با لایه‌های پیزوالکتریک و پانل با لایه‌های پی.اف.آر.سی معادل: توزیع جابجایی شعاعی در راستای محیطی

جدول ۸: مقایسه تکیه‌گاه‌های مختلف

Table 8. Comparison of different supports

نوع تکیه‌گاه	$\nu_p$ (%)	مجموع مربعات اختلاف جابجایی‌ها
SSSS	۲۰/۴۸	$7/78 \times 10^{-12}$
CCFF	۵۵/۴۳	$2/61 \times 10^{-12}$
CCCC	۷۱/۲۰	$1/84 \times 10^{-10}$

فن‌آوری پیشرفته، نظیر صنایع هوافضا، صنایع هسته‌ای، سیستم‌های تبدیل انرژی و غیره به کار گرفته شده‌اند. کنترل این پانل‌ها به کمک مواد هوشمند نظیر پیزوالکتریک‌ها غالب توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. در این میان محدودیت‌های استفاده از مواد پیزوالکتریک، از قبیل ناسازگاری در نصب در سازه‌های دارای انحنا همچون پانل‌های استوانه‌ای، امکان جدایش پیزوسرامیک‌ها از سازه‌ها و وقوع و رشد ترک در آن‌ها، موجب استفاده از مواد مرکب تقویت شده با الیاف پیزوالکتریک (پی.اف.آر.سی) به جای حس‌گرها و عمل‌گرهای پیزوالکتریک شده است.

در ایران علاوه بر موارد ذکر شده تحت عنوان محدودیت‌های استفاده از مواد پیزوالکتریک، به علت وجود شرایط اقتصادی و سیاسی خاص، مسئله در دسترس بودن یا تهیه این مواد در مقیاس مقادیر بالا نیز مطرح است. به همین دلیل استفاده از مواد مرکب تقویت شده با رشته‌های پیزوالکتریک اهمیت دو چندان پیدا می‌کند. به عبارت دیگر اگر بتوان برای کنترل سازه‌ها از قبیل پانل‌های استوانه‌ای به جای مواد پیزوالکتریک پرکاربرد و به تبع آن دشوار در تهیه، از مواد پی.اف.آر.سی به گونه‌ای استفاده کرد که در هدف مورد نظر که در این تحقیق جابجایی شعاعی (خیز) در نظر گرفته شده و هر

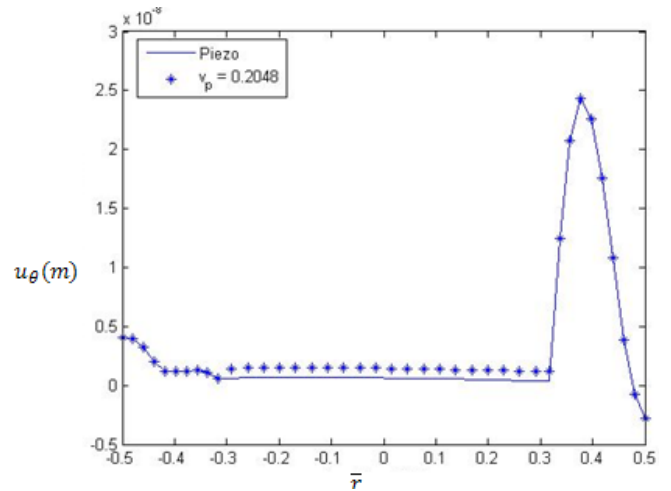


Fig. 12. Comparison of panel with piezoelectric layer and panel with equivalent PFRC layer: Circumferential displacement distribution along thickness direction

شکل ۱۲: مقایسه پانل با لایه‌های پیزوالکتریک و پانل با لایه‌های پی.اف.آر.سی معادل: توزیع جابجایی محیطی در راستای ضخامت

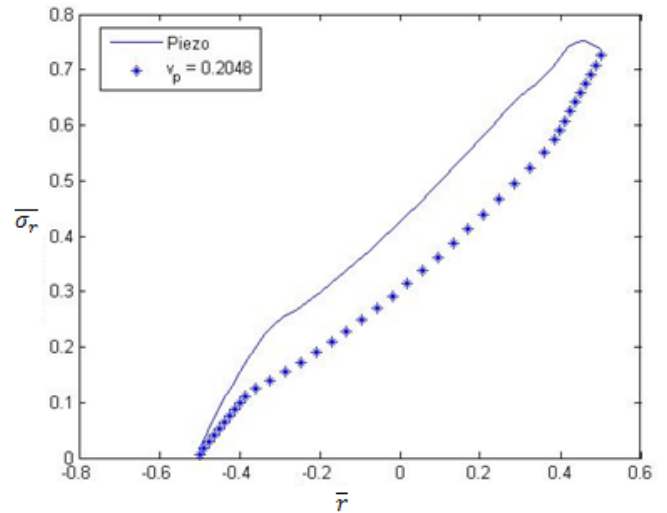


Fig. 13. Comparison of panel with piezoelectric layer and panel with equivalent PFRC layer: Radial stress distribution along thickness direction

شکل ۱۳: مقایسه پانل با لایه‌های پیزوالکتریک و پانل با لایه‌های پی.اف.آر.سی معادل: توزیع تنش شعاعی در راستای ضخامت

## ۷- بررسی اثر تکیه‌گاهی

به منظور بررسی اثر تکیه‌گاه روی بهینه‌سازی، یک بار چهار طرف پانل تحت تکیه‌گاه گیردار قرار گرفته و بار دیگر تنها دو لبه آن که در امتداد طولی قرار دارند گیردار شده و دو طرف دیگر آزاد در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۸ درصد‌های حجمی به دست آمده برای سه نوع تکیه‌گاه آورده شده است. در این جدول  $C$ ،  $S$  و  $F$  به ترتیب به تکیه‌گاه ساده، گیردار و آزاد اشاره دارند.

## ۸- نتیجه‌گیری

در دهه‌های اخیر، پانل‌های استوانه‌ای هدفمند در بسیاری از صنایع با

هدف دیگری نیز می‌تواند باشد، پاسخ یکسانی داشته باشند، نه تنها برای نصب و به کارگیری در سازه‌های منحنی شکل مشکلی به وجود نخواهد آمد و احتمال جدایش و شکست نیز کاهش پیدا می‌کند بلکه موفقیت بزرگی در زمینه فائق آمدن بر شرایط موجود حاصل شده است. از جمله نتایج مهم حاصل از این تحقیق، در ادامه آورده شده است.

- با آن که لایه‌های پی.اف.آر.سی به منظور نزدیک‌تر شدن توزیع جابجایی شعاعی در سطح خارجی محرک در هر دو پانل طراحی شده‌است، ولی توزیع جابجایی شعاعی در تمامی ضخامت پانل تقریباً یکسان است و اختلاف‌های بسیار اندکی هم که مشاهده می‌شود، در طول پانل هدفمند است.
- توزیع جابجایی شعاعی در راستای محیطی، در دو حالت پانل با لایه‌های پیزوالکتریک و پانل با لایه‌های پی.اف.آر.سی با دقت بسیار خوبی روی هم منطبق‌اند.
- با توجه به اینکه ضخامت لایه پیزوالکتریک چهار برابر کوچک‌تر از ضخامت لایه پی.اف.آر.سی می‌باشد در نتیجه تنش‌های شعاعی در طول ضخامت پانل استوانه‌ای در حالتی که از لایه پیزوالکتریک استفاده شده، بیشتر از پانل با لایه پی.اف.آر.سی است.
- با آنکه ضخامت کل پانل با لایه‌های پی.اف.آر.سی بیشتر از پانل با لایه‌های پیزوالکتریک است و باعث استفاده بیشتر از مواد خواهد بود؛ اما عمده ماده استفاده شده در پانل با لایه‌های پی.اف.آر.سی، ماتریس اپوکسی است که به نسبت ماده پیزوالکتریک، ماده‌ای در دسترس‌تر می‌باشد.
- در حالت CCF، چون در دو طرف پانل تکیه‌گاه گیردار وجود دارد، ماکزیمم تنش فون میسر بیشتر از حالت چهار طرف تکیه‌گاه ساده می‌باشد و از آنجایی که با افزایش درصد حجمی، بیشینه تنش فون میسر کاهش می‌یابد، لایه پی.اف.آر.سی در درصدهای حجمی بالاتر معادل لایه پیزوالکتریک می‌شود. در حالت CCCC، نیز تنش فون میسر بیشتر از دو حالت قبل می‌باشد.
- وقتی تکیه‌گاه گیردار وارد مسئله می‌شود سهم لایه پیزوالکتریک در تحمل تنش شعاعی  $\sigma_r$  نسبت به حالت چهار سر ساده، بیشتر خواهد شد.
- استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی علاوه بر تقریب تابع برای خطای کم، از لحاظ زمانی بسیار باصرفه است. به گونه‌ای که برای یک فرآیند بهینه‌سازی با ۱۵۰ نسل و تعداد ۲۰ فرد، در صورت استفاده مستقیم از روش المان محدود و در نظر داشتن این واقعیت که محاسبه تابع هدف هر فرد زمانی حدود ۳۰ دقیقه می‌باشد، کل فرآیند بهینه‌سازی حدوداً دو ماه به طول می‌انجامد؛ این در حالی است که با آموزش یک شبکه عصبی مصنوعی با ۵۰ داده با زمان آموزش یک روز، زمان کل فرآیند بهینه‌سازی به کمتر از ۵ دقیقه کاهش می‌یابد. این نتیجه، اهمیت و لزوم استفاده از شبکه‌های

- عصبی را در این تحقیق روشن می‌کند.
- در شرایط بارگذاری و ولتاژ تحریک یکسان، استفاده از تکیه‌گاه ساده در چهار طرف پانل می‌تواند در درصدهای حجمی پایین پاسخی بسیار نزدیک به پیزوالکتریک دهد.
- با ورود تکیه‌گاه گیردار به مسئله در دو یا چهار طرف پانل بیشینه تنش فون میسر افزایش می‌یابد؛ این خود باعث رسیدن به درصدهای حجمی زیاد می‌شود که مطلوب نیست.
- با طراحی مناسب لایه پی.اف.آر.سی می‌توان در درصدهای حجمی بسیار پایین (زیر ۵۰ درصد) به پاسخ پیزوالکتریک رسید.

### منابع

- [1] S. Bahrami, H.R. Ovesy, M. Shakeri, Dynamic analysis of functionally graded circular cylindrical panel with piezoelectric fiber composite actuator and sensor, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, (2014) 1-17.
- [2] M. Shakeri, M.R. Eslami, A. Daneshmehr, Dynamic analysis of thick laminated shell panel with piezoelectric layer based on three dimensional elasticity solution, *Computers & Structures*, 84(22-23) (2006) 1519-1526.
- [3] H.S. Shen, A comparison of buckling and postbuckling behavior of FGM plates with piezoelectric fiber reinforced composite actuators, *Composite Structures*, 91(3) (2009) 375-384.
- [4] B. Liu, T. Haftka Raphael, A. Akgün Mehmet, A. Todoroki, Permutation genetic algorithm for stacking sequence design of composite laminates, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 186(2-4) (2000) 357-372.
- [5] Shakeri, M.H. Yas, M.G. Gol, Optimal stacking sequence of laminated cylindrical shells using genetic algorithm, in: *In Proceedings of the 9th EASEC*, Bali, Indonesia, 2003.
- [6] Z. Raida, *Modeling EM Structures in the Neural Network Toolbox of MATLAB*. Department of Radio Electronics, Brno University of Technology, Czech Republic, 2000.
- [7] H. Demuth, M. Beale, M. Hagan, *Neural Network Toolbox*, MathWorks Inc, 2009.
- [8] S. Kapuria, P. Kumari, Three-dimensional piezoelectricity solution for dynamics of cross-ply cylindrical shells integrated with piezoelectric fiber reinforced composite actuators and sensors, *Composite Structures*, 92(10) (2010) 2431-2444.
- [9] S. Bahrami, *Analysis of FG panel with piezoelectric layer under dynamic loading*, AmirKabir University of Technology, Iran (Islamic Republic of), 1391.
- [10] C.T. Loy, J.N. Reddy, Vibration of functionally graded

piezoelectric (FGP) shell panel based on threedimensional elasticity theory, *Applied Mathematical Modelling*, 36(11) (2012) 5320-5333.

- [13] J.G. Andrew, S.V. Senthil, Multi-objective optimization of functionally graded materials with temperature-dependent material properties, *Materials & Design*, 28(6) (2007) 1861-1879.

cylindrical shells, *International Journal of Mechanics and Science*, 414 (1999) 309-324.

- [11] J. Chung, G.M. Hulbert, family of single-step Houbolt time integration algorithms for structural dynamics, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 118(1-2) (1994) 1-11.
- [12] M. Javanbakht, A.R. Daneshmehr, M. Shakeri, A. Nateghi, The dynamic analysis of the functionally graded

Please cite this article using:

M. Shakeri, S. Mohammad Nabi, S. Bahrami, "Optimization of Piezoelectric Fibers in FG Panel with PFRC Layers by Using Genetic Algorithms" *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(2) (2017) 279-290.  
DOI: 10.22060/mej.2016.800

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



