حل الاستیسیته سه بعدی پانل استوانه‌ای پیزوالکتریک تک لایه تحت بار دینامیکی

محمد رضا صدیقی صابر[۱]; محمود شاکری[۲];علیرضا دانش‌مهر[۳]

چکیده

در این تحقیق، حلی نیمه تحلیلی برای پانل استوانه‌ای پیزوالکتریک پلاریزه شده در جهت ضخامت، ارتوترپ، با تکیه‌گاههای ساده و طول محدود تحت بارگذاری الکترومکانیکی دینامیکی ارائه شده است. با بسط مثلثاتی مولفه‌های جابجایی و پتانسیل الکتریکی در جهت‌های محیطی و محوری، دستگاه معادلات دیفرانسیل پاره‌ای جفت شده به دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی با ضرایب متغییر کاهش می‌یابد. مولفه‌های جابجایی و پتانسیل الکتریکی بصورت سری فوریه در جهت‌های محیطی و محوری بگونه‌ای انتخاب می‌گردند که شرایط تکیه‌گاهی ساده لبه‌های محوری و محیطی را برآورده نمایند. معادلات دیفرانسیل حاصل با استفاده از روش اجزاء محدود گلرکین حل می‌شوند. در این روش از تابع شکل مرتبه دوم در هر المان استفاده شده است. پاسخ دینامیکی پانل استوانه‌ای پیزوالکتریک تک لایه تحت بارگذاری دینامیکی خارجی بعنوان مثال عددی ارائه شده است.

کلمات کلیدی

پیزوالکتریک، پانل استوانه ای با طول محدود، بار دینامیکی .

A Three Dimensional Elasticity Solution of Single Layer Cylindrical Piezoelectric Panel under Dynamic Loading

M.R. Sedighi, M. Shakeri, A.R. Daneshmehr

ABSTRACT

This research presents a semi-analytical solution of finitely long, simply supported, orthotropic and radially polarized piezoelectric shell panel under dynamic electro-mechanical loading. The highly coupled partial differential equations set are reduced to ordinary differential equation set with variable coefficients by the trigonometric function expansion of displacement and electric potential in circumferential and axial directions. The displacement components and electric potential are expanded in appropriate trigonometric Fourier series in circumferential and axial coordinate to satisfy the boundary conditions at the simply supported circumferential and axial edges. The resulting ordinary differential equations are solved by Galerkin finite element method. In this procedure, a quadratic shape function is used for each element. Numerical example is provided for dynamic response of a single layer piezoelectric cylindrical panel under dynamic external loading.

KEYWORDS

Piezoelectric, Cylindrical panel with finite length, Dynamic loading.

[۱] دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر. Email: sedighisaber@gmail.com

[۲] استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر. Email: shakeri@aut.ac.ir

[۳] استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران. Email: daneshmehr@ut.ac.ir

۱- مقدمه

بر هم کنش بین میدانهای الکتریکی و مکانیکی در مواد پیزوالکتریک سبب شده تا از این مواد بطور وسیعی استفاده شود. مواد پیزوالکتریک دارای دو اثر مستقیم[1] و معکوس[2] می‌باشند. از خاصیت اثر مستقیم آن در ساخت سنسورهای الکترومکانیکی[3] برای اندازه‌گیری تغییر شکل ، فشار و .... استفاده می‌شود. اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجادشده در سنسورها در اثر تغییر شکل حاصل از بار وارده، آنها را به ابزاری قوی برای اندازه گیری پدیده های فیزیکی مبدل ساخته است. از خاصیت اثر معکوس مواد پیزوالکتریک در عملگرهای[4] الکترومکانیکی استفاده می‌شود. این عملگرها می توان کمیتهای مهم عملکرد سیستمهای دینامیکی و یا استاتیکی را کنترل کرد.این مهم با اعمال اختلاف پتانسیل مناسب در سطوح پیزوالکتریک انجام می گیرد. از این خاصیت برای کاهش وزن سازه‌ها، مقاومتر کردن آنها و همچنین کنترل هوشمند سازه‌ها می توان بهره گرفت [۱]. در عمل این مواد به دو صورت یکپارچه[5] و تکه‌ای[6] می تواند مورد استفاده قرار گیرند.

حلهای دقیق معادلات الاستیسیته سه بعدی حاکم بر مواد پیزوالکتریک که در آنها خواص الکتریکی و مکانیکی با هم کوپل هستند بسیار کم و فقط برای بعضی هندسه‌های خاص موجود است. از طرفی برای ارزیابی تئوری‌های دوبعدی که برای فرمولبندی این مواد ارائه می‌شوند، دستیابی به این حل‌ها ضروری است(تئوریهای پوسته و ورق پیزو الکتریک)[۲].

دومیر(Dumir) و همکارانش حل دقیقی از پانل استوانه‌ای پیزوالکتریک با طول نامحدود برای حالت استاتیکی ارائه‌کرده‌اند [۲]. ایشان ضمن مقایسه روش حل ارائه شده با جوابهای دقیق موجود برای پانل همسانگرد نتایج را برای بارگذاری‌های مکانیکی و الکترواستاتیک بررسی کرده‌است. بررسی پوسته استوانه‌ای پیزوالکتریک با طول نامحدود تحت اثر بارهای حرارتی و مکانیکی توسط چِن(Chen) و همکارانش ارائه شده است[۳]. حل الاستیسیته سه محوری پانل استوانه‌ایبا طول محدود توسط شاکری ارائه شده است[٤].شاکری ضمن ارائه حل الاستیسیته سه محوری پانل استوانه‌ای ضخیم غیرایزوتوپ تحت بار ضربه‌ای [٥] به حل نیمه تحلیلی الاستیسیته سه محوری برای پانل استوانه‌ای ضخیم ارتوتروپ به همراه یک لایه پیزوالکتریک [٦]نیز پرداخته است.

در مقاله حاضر، حلی نیمه تحلیلی برای آنالیز دینامیکی پانل پیزوالکتریک استوانه‌ای با طول محدود ارائه شده است. این پانل روی تکیه‌گاههای ساده قرار داشته و تحت اعمال بار الکتریکی و مکانیکی بطور همزمان قرار می‌گیرد. ماده پیزوالکتریک استفاده شده در این تحقیق ارتوتروپیک بوده و در جهت شعاعی پلاریزه[7] شده است.

از آنجاکه معادلات دیفرانسیل حاکم بر حرکت پانل پیزوالکتریک به هم کوپل شده است، با استفاده از بسط توابع متعامد متغیرها، دستگاه معادلات مشتقات جزئی به دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی با ضرایب متغیر تبدیل می‌شود. بدین منظور، مؤلفه‌های جابجایی و پتانسیل الکتریکی بصورت سریهای فوریه بگونه‌ای انتخاب می‌شوند که شرایط مرزی تکیه‌گاهی پانل در جهتهای طولی و محیطی را برآورده نمایند. با اعمال روش گالرگین[8] معادلات دیفرانسیل حاکم به فرم ضعیف[9] شده تبدیل شده و از روی آن معادله دیفرانسیل مجزا شده سیستم بصورت ماتریسی استخراج می‌گردد. گفتنی است که در روش گالرگین از توابع میانیابی مرتبه‌دوم جهت استخراج ماتریسهای جرم، سختی و نیرو استفاده شده است.

۲- معادلات حاکم

معادلات رفتاری یک ماده دارای خاصیت پیزوالکتریک بصورت رابطه (۱) است [۱]:

$$\{\sigma\}=[C]\{\varepsilon\}-[e]^T\{E\}\ ,\ \{D\}=[e]\{\varepsilon\}+[\eta]\{E\} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، $\{\sigma\}$ مؤلفه‌های تنش،$\{\varepsilon\}$ مؤلفه‌های کرنش، $\{E\}$بردار میدان الکتریکی و $\{D\}$ بردار جابجائی الکتریکی می‌باشند که در سیستم مختصات استوانه‌ای (r,θ,z) عبارتند از [۱]:

$$\{\sigma\}=[\sigma_r\quad \sigma_\theta\quad \sigma_z\quad \tau_{\theta z}\quad \tau_{rz}\quad \tau_{r\theta}]^T$$
$$\{\varepsilon\}=[\varepsilon_r\quad \varepsilon_\theta\quad \varepsilon_z\quad \gamma_{\theta z}\quad \gamma_{rz}\quad \gamma_{r\theta}]^T$$
$$\{E\}=[E_r\quad E_\theta\quad E_z]^T$$
$$\{D\}=[D_r\quad D_\theta\quad D_z]^T$$

همچنین $[C]$، $[e]$و $[\eta]$ بترتیب ماتریسهای ثابت‌های الاستیک، پیزو الکتریک و دی‌الکتریک هستند. معادله تعادل حاکم بر پانل با چشم پوشی از نیروی حجمی و معادله تعادل شارژ الکترواستاتیک درسیستم مختصات استوانه‌ای عبارتنداز[٤]:

$$\frac{\partial\sigma_r}{\partial r}+\frac{\sigma_r-\sigma_\theta}{r}+\frac{1}{r}\frac{\partial\tau_{r\theta}}{\partial\theta}+\frac{\partial\tau_{rz}}{\partial z}=\rho\ddot{u}_r \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial\tau_{r\theta}}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial\sigma_\theta}{\partial\theta}+\frac{\partial\tau_{\theta z}}{\partial z}+2\frac{\tau_{r\theta}}{r}=\rho\ddot{u}_\theta \qquad (۳)$$

$$\frac{\partial\tau_{rz}}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial\tau_{\theta z}}{\partial\theta}+\frac{\partial\sigma_z}{\partial z}+\frac{\tau_{rz}}{r}=\rho\ddot{u}_z \qquad (٤)$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial rD_r}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{D_\theta}{\partial\theta}+\frac{\partial D_z}{\partial z}=0 \qquad (٥)$$

برای ماده پیزوالکتریک ارتوتروپیک استوانه‌ای که در جهت

ضخامت پلاریزه شده، ماتریسهای $[C]$، $[e]$و $[\eta]$ در مرجع [۱] بصورت رابطه (٦) داده شده است:

$$[C]=\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \qquad (٦)$$

$$[e]=\begin{bmatrix} e_{33} & e_{32} & e_{31} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \end{bmatrix}, [\eta]=\begin{bmatrix} \eta_{33} & 0 & 0 \\ 0 & \eta_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \eta_{22} \end{bmatrix}$$

با استفاده از ماتریسهای ثابت داده شده توسط رابطه(٦)، معادله رفتاری (۱) را می‌توان بصورت روابط (۷) و (۸) نوشت:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= C_{11}\varepsilon_{rr} + C_{12}\varepsilon_{\theta\theta} + C_{13}\varepsilon_{zz} - e_{33}E_r \\ \sigma_\theta &= C_{12}\varepsilon_{rr} + C_{22}\varepsilon_{\theta\theta} + C_{23}\varepsilon_{zz} - e_{32}E_r \\ \sigma_z &= C_{13}\varepsilon_{rr} + C_{23}\varepsilon_{\theta\theta} + C_{33}\varepsilon_{zz} - e_{31}E_r \\ \tau_{\theta z} &= C_{44}\gamma_{\theta z} \\ \tau_{rz} &= C_{55}\gamma_{rz} - e_{15}E_z \\ \tau_{r\theta} &= C_{66}\gamma_{r\theta} - e_{24}E_\theta \end{aligned} \qquad (۷)$$

و

$$\begin{aligned} D_r &= e_{33}\varepsilon_{rr} + e_{32}\varepsilon_\theta + e_{31}\varepsilon_z + \eta_{33}E_r \\ D_\theta &= e_{24}\gamma_{r\theta} + \eta_{22}E_\theta \\ D_z &= e_{15}\gamma_{rz} + \eta_{11}E_z \end{aligned} \qquad (۸)$$

پانلی با شعاع متوسط R_m، ضخامت H، طول محدود L و زاویه دهنه α را مطابق شکل (۱) در نظر بگیرید. این پانل در دو انتهای طولی $(Z=0,L)$ و محیطی ($\theta=0,\alpha$) روی تکیه گاههای ساده قرار داشته که در این نقاط پتانسیل الکتریکی صفر است .سطوح خارجی و داخلی پانل تحت بار مکانیکی و الکتریکی بطور همزمان قرار دارند. بارهای مکانیکی و الکتریکی وارده نسبت به محورهای طولی و محیطی پانل متغیر هستند. روابط بین کرنش‌ها و مؤلفه‌های جابجایی (u_r,u_θ,u_z) در سیستم مختصات استوانه‌ای عبارتند از:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\partial u_r}{\partial r}\ , \ \gamma_{\theta z} = \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r}\frac{\partial u_z}{\partial \theta} \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{r}(u_r + \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta})\ ,\ \gamma_{rz} = \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial u_z}{\partial z}\ ,\ \gamma_{r\theta} = \frac{1}{r}(\frac{\partial u_r}{\partial \theta} - u_\theta + r\frac{\partial u_\theta}{\partial r}) \end{aligned} \qquad (۹)$$

از طرفی میدان الکتریکی را می‌توان بر حسب پتانسیل الکتریکی ψ، توسط روابط (۱۰) و (۱۱) بیان کرد [٦]:

$$E_r = -\frac{\partial \psi}{\partial r},\ E_\theta = -\frac{1}{r}\frac{\partial \psi}{\partial \theta},\ E_z = -\frac{\partial \psi}{\partial z} \qquad (۱۰)$$

با استفاده از روابط (۷) تا (۱۰)، معادله تعادل حاکم بر پانل (روابط (۲) تا (۵)) را می‌توان به صورت ناویر[10] نوشت. با بازنویسی معادلات حاصل بصورت اپراتوری بدست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} L_{1r} & L_{1\theta} & L_{1z} & L_{1\psi} \\ L_{2r} & L_{2\theta} & L_{2z} & L_{2\psi} \\ L_{3r} & L_{3\theta} & L_{3z} & L_{3\psi} \\ L_{4r} & L_{4\theta} & L_{4z} & L_{4\psi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_r \\ u_\theta \\ u_z \\ \psi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \rho\ddot{u}_r \\ \rho\ddot{u}_\theta \\ \rho\ddot{u}_z \\ 0 \end{Bmatrix} \qquad (۱۱)$$

که درایه‌های معادله ماتریسی یاد شده، L_{ij}ها، در مرجع [٤] داده شده است. باید توجه داشت که در اینجا ($j=۱،۲،۳،٤$) و($j=r,\theta,z,\psi$) است.

با فرض اینکه فشار و پتانسیل الکتریکی یا جابجایی الکتریکی وارده روی سطوح داخلی و خارجی پانل بترتیب $p_a(\theta,z,t)$، $\psi_a(\theta,z,t)$ یا $D_a(\theta,z,t)$ و $p_b(\theta,z,t)$، $\psi_b(\theta,z,t)$ یا $D_b(\theta,z,t)$ باشند، شرایط مرزی پانل بصورت روابط (۱۲) تا (۱۵) خواهد بود:

شرایط مرزی در دو انتهای طولی ($z=0,L$)،عبارتند از:

$$\begin{aligned} & u_r(r,\theta,0,t) = u_r(r,\theta,L,t) = 0 \\ & u_\theta(r,\theta,0,t) = u_\theta(r,\theta,L,t) = 0 \\ & \sigma_z(r,\theta,0,t) = \sigma_z(r,\theta,L,t) = 0 \\ & \psi(r,\theta,0,t) = \psi(r,\theta,L,t) = 0 \end{aligned} \qquad (۱۲)$$

شرایط مرزی در دو انتهای محیطی ($\theta=0,\alpha$)، را چنین می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} & u_r(r,0,z,t) = u_r(r,\alpha,z,t) = 0 \\ & u_z(r,0,0,t) = u_z(r,\alpha,L,t) = 0 \\ & \sigma_\theta(r,0,z,t) = \sigma_\theta(r,\alpha,z,t) = 0 \\ & \psi(r,0,z,t) = \psi(r,\alpha,z,t) = 0 \end{aligned} \qquad (۱۳)$$

وشرایط مرزی روی سطوح داخلی و خارجی ($r=R_a,R_b$)، بصورت روابط (۱٤) و (۱۵) است:

$$\begin{aligned} & \sigma_r(R_a,\theta,z,t) = -p_a(\theta,z,t) \\ & \tau_{rz}(R_a,\theta,z,t) = 0 \\ & \tau_{r\theta}(R_a,\theta,z,t) = 0 \\ & \psi(R_a,\theta,z,t) = \psi_a(\theta,z,t) \text{ یا } D_r(R_a,\theta,z,t) = D_a(\theta,z,t) \end{aligned} \qquad (۱٤)$$

و

$$\sigma_r(R_b,\theta,z,t) = -p_b(\theta,z,t)$$
$$\tau_{rz}(R_b,\theta,z,t) = 0 \qquad (۱۵)$$
$$\tau_{r\theta}(R_b,\theta,z,t) = 0$$

$\psi(R_b,\theta,z,t) = \psi_b(\theta,z,t)$ یا $D_r(R_b,\theta,z,t) = D_b(\theta,z,t)$

در این روابط شرایط D_r و ψ، بترتیب برای حالتهایی است کـه اثـرات مسـتقیم (سنسـوری) و غیـر مسـتقیم (عملگـری) پیزوالکتریک مدنظر باشد.

۳- حل معادلات حرکت

با درنظرگرفتن مؤلفه‌های جابجایی و پتانسیل الکتریکی بصورت روابط (۱٦) تا (۱۹) شرایط مرزی تکیه گاهی برآورده می‌شوند.

$$u_r = \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\phi_r(r,t)\sin(b_m\theta)\sin(b_n z) \qquad (۱٦)$$

$$u_\theta = \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\phi_\theta(r,t)\cos(b_m\theta)\sin(b_n z) \qquad (۱۷)$$

$$u_z = \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\phi_z(r,t)\sin(b_m\theta)\cos(b_n z) \qquad (۱۸)$$

$$\psi = \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\phi_\psi(r,t)\sin(b_m\theta)\sin(b_n z) \qquad (۱۹)$$

با جاگذاری روابط (۱٦) تا (۱۹) در رابطـه ماتریسـی (۱۱)، ایـن دستگاه معادلات از حالت پاره‌ای جفت شده بفرم پـاره‌ای مجـزا در خواهد آمد. با بازنویسی دستگاه معادلات بشـکل ماتریسـی، می‌توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} L^*_{1r} & L^*_{1\theta} & L^*_{1z} & L^*_{1\psi} \\ L^*_{2r} & L^*_{2\theta} & L^*_{2z} & L^*_{2\psi} \\ L^*_{3r} & L^*_{3\theta} & L^*_{3z} & L^*_{3\psi} \\ L^*_{4r} & L^*_{4\theta} & L^*_{4z} & L^*_{4\psi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varphi_r \\ \varphi_\theta \\ \varphi_z \\ \varphi_\psi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \rho\ddot{\varphi}_r \\ \rho\ddot{\varphi}_\theta \\ \rho\ddot{\varphi}_z \\ 0 \end{Bmatrix} \qquad (۲۰)$$

عملگرهای L^*_{ij} استفاده شده در ایـن رابطـه در مرجـع [٤] داده شده است. برای حل دستگاه معـادلات دیفرانسـیل یـاد شـده از روش اجزاء محدود مبتنی بر روش گالرکین استفاده مـی‌شـود. توابع میانیاب مرتبه دوم ϕ_r، ϕ_θ، ϕ_z، ϕ_ψ، $\ddot{\phi}_r$، $\ddot{\phi}_\theta$، $\ddot{\phi}_z$ و $\ddot{\phi}_\psi$ بصورت روابط (۲۱) و (۲۲) است:

$$\phi_s = \begin{bmatrix} N_i & N_j & N_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_{si} \\ \phi_{sj} \\ \phi_{sk} \end{Bmatrix}, s = r,\theta,z,\psi \qquad (۲۱)$$

$$\ddot{\phi}_s = \begin{bmatrix} N_i & N_j & N_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\phi}_{si} \\ \ddot{\phi}_{sj} \\ \ddot{\phi}_{sk} \end{Bmatrix}, s = r,\theta,z,\psi \qquad (۲۲)$$

توابع شکل مرتبه دوم N_i، N_j و N_k بترتیـب بصـورت روابـط (۲۳)-(۲۵) تعریف می‌شوند:

$$N_i(r) = \frac{(r-r_k)(2r-r_k-r_i)}{(r_k-r_i)^2} \qquad (۲۳)$$

$$N_j(r) = 4\frac{(r_k-r)(r-r_i)}{(r_k-r_i)^2} \qquad (۲٤)$$

$$N_k(r) = \frac{(r-r_i)(2r-r_k-r_i)}{(r_k-r_i)^2} \qquad (۲۵)$$

همانگونه که دیده می‌شود، هر المان سه گره دارد و به ازای هر گره نیـز ٤ درجـه آزادی وجـود دارد ، لـذا بـرای هـر المـان ۱۲ درجه آزادی وجود خواهد داشت. با ضـرب اولـین تـابع شـکل، یعنی N_i، در اولـین معادلـه دیفرانسـیل دسـتگاه (۲۰)، و یکبـار انتگرالگیری جزء به جزء روی المان، شکل ضعیف شده معادلـه بدست می‌آید، که عبارت است از:

$$\begin{aligned} & m_1\ddot{\phi}_{ir} + m_2\ddot{\phi}_{i\theta} + m_3\ddot{\phi}_{iz} + m_4\ddot{\phi}_{i\psi} + m_5\ddot{\phi}_{jr} + \\ & m_6\ddot{\phi}_{j\theta} + m_7\ddot{\phi}_{jz} + m_8\ddot{\phi}_{j\psi} + m_9\ddot{\phi}_{kr} + m_{10}\ddot{\phi}_{k\theta} + \\ & m_{11}\ddot{\phi}_{kz} + m_{12}\ddot{\phi}_{k\psi} + k_1\phi_{ir} + k_2\phi_{i\theta} + k_3\phi_{iz} + \\ & k_4\phi_{i\psi} + k_5\phi_{jr} + k_6\phi_{j\theta} + k_7\phi_{jz} + k_8\phi_{j\psi} + \\ & k_9\phi_{kr} + k_{10}\phi_{k\theta} + k_{11}\phi_{kz} + k_{12}\phi_{k\psi} = F_1 \end{aligned} \qquad (۲٦)$$

توجه شود که این معادله جبری فقط مربوط به گـره i ام المـان است. برای گرههای j ام وk ام کافی اسـت در فراینـد یـاد شـده بجای تابع وزن N_i بترتیـب از N_j و N_k اسـتفاده شـود. بـرای تشکیل معادله ماتریسی تعادل المان نیاز است عملیات گفته شده روی بقیه معادلات دستگاه تکرار گـردد. پـس از اتمـام عملیـات، معادله ماتریسی (۲۷) حاصل خواهد شد.

$$[M]_e\{\ddot{X}\}_e + [K]_e\{X\}_e = \{F\}_e \qquad (۲۷)$$

که $[M]_{12\times12}$، $[K]_{12\times12}$، $\{F\}_{12}$، بترتیـب مـاتریس‌هـای جـرم و سختی و بردار نیروی یک المان غیر مرزی می‌باشند .همچنین:

$$\{X\}_e^T = \{\varphi_{ri},\varphi_{\theta i},\varphi_{zi},\varphi_{\psi i},\varphi_{rj},\varphi_{\theta j},\varphi_{zj},\varphi_{\psi j},\varphi_{rk},\varphi_{\theta k},\varphi_{zk},\varphi_{\psi k}\}$$

$$\{\ddot{X}\}_e^T = \{\ddot{\varphi}_{ri},\ddot{\varphi}_{\theta i},\ddot{\varphi}_{zi},\ddot{\varphi}_{\psi i},\ddot{\varphi}_{rj},\ddot{\varphi}_{\theta j},\ddot{\varphi}_{zj},\ddot{\varphi}_{\psi j},\ddot{\varphi}_{rk},\ddot{\varphi}_{\theta k},\ddot{\varphi}_{zk},\ddot{\varphi}_{\psi k}\}$$

با اعمال شرایط مرزی (۱٤) و (۱۵) روی اولـین و آخـرین گـره (سطوح داخلی و خارجی پانل) و حل معادلات بدست آمده برای متغیرهای گره‌های مرزی، متغییرهای مرزی می‌توانند بر حسب توابعی جبری از متغییرهای گره‌های همسایه‌شـان بیـان شـوند. از اینرو اگر متغییرهای گره واقـع روی سـطح داخلـی ϕ_{r1}، $\phi_{\theta1}$، ϕ_{z1}، $\phi_{\psi1}$ و $\ddot{\phi}_{r1}$، $\ddot{\phi}_{\theta1}$، $\ddot{\phi}_{z1}$، $\ddot{\phi}_{\psi1}$ باشند، می‌توانند بترتیب‌برحسب ϕ_{r2}، $\phi_{\theta2}$، ϕ_{z2}، $\phi_{\psi2}$، ϕ_{r3}، $\phi_{\theta3}$، ϕ_{z3}، $\phi_{\psi3}$، P_a، ψ_a و $\ddot{\phi}_{r2}$، $\ddot{\phi}_{\theta2}$، $\ddot{\phi}_{z2}$، $\ddot{\phi}_{\psi2}$، $\ddot{\phi}_{r3}$، $\ddot{\phi}_{\theta3}$، $\ddot{\phi}_{z3}$، $\ddot{\phi}_{\psi3}$، $\ddot{P}_a$، $\ddot{\psi}_a$ بیان شـوند. همچنـین

اگر متغییرهای گره واقع روی سطح خارجی ϕ_{rML}، $\phi_{\theta ML}$، ϕ_{zML}، $\phi_{\psi ML}$ و $\ddot{\phi}_{rML}, \ddot{\phi}_{\theta ML}, \ddot{\phi}_{zML}, \ddot{\phi}_{\psi ML}$ باشد، می‌توان آنها را بترتیب برحسب $\phi_{r(ML-2)}$، $\phi_{\theta(ML-2)}$، $\phi_{z(ML-2)}$، $\phi_{\psi(ML-2)}$، $\phi_{r(ML-1)}$، $\phi_{\theta(ML-1)}$، $\phi_{z(ML-1)}$، $\phi_{\psi(ML-1)}$، P_b، ψ_b و $\ddot{\phi}_{r(ML-2)}$، $\ddot{\phi}_{\theta(ML-2)}$، $\ddot{\phi}_{z(ML-2)}$، $\ddot{\phi}_{\psi(ML-2)}$، $\ddot{\phi}_{r(ML-1)}$، $\ddot{\phi}_{\theta(ML-1)}$، $\ddot{\phi}_{z(ML-1)}$، $\ddot{\phi}_{\psi(ML-1)}$، $\ddot{P}_b$، $\ddot{\psi}_b$ بیان کرد.

با جاگذاری معادلات متغییرهای مربوط به گره‌های مرزی در رابطه (۲۷)، معادله تعادل اجزاء محدود المانهای مرزی بدست خواهند آمد:

$$\begin{aligned} &[M]_1\{\ddot{X}\} + [K]_1\{X\}_1 = \{F\}_1, \\ &[M]_{ML}\{\ddot{X}\} + [K]_{ML}\{X\}_{ML} = \{F\}_{ML} \end{aligned} \qquad (۲۸)$$

با مونتاژ معادلات (۲۷)و(۲۸)، معادله تعادل اجزاء محدود کلی سیستم بدست می‌آید:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [K]\{X\} = \{F\} \qquad (۲۹)$$

پس از تشکیل معادله ماتریسی شماره (۲۸) نیاز است با یکی از روشهای انتگرالگیری زمانی موجود به حل آن پرداخته شود. در اینجا ، برای حل این دستگاه از روش ضمنی نیومارک[11] استفاده شده است (این روش در کتابهای پایه محاسبات عددی بصورت جزئی‌تر آمده است).

٤- نتایج عددی و بحث پیرامون آن

برای بررسی نتایج روش استفاده شده، یک پانل استوانه‌ای با زاویه دهنه $\alpha = \pi/۳$ طول $L = R_m = ۱$ و نسبت شعاع متوسط به ضخامت ٤ که در جهت شعاع پلاریزه شده و روی تکیه گاههای ساده قرار دارد انتخاب شده است. در این مثال فقط خاصیت عملگری پیزوالکتریک مد نظر است. بطوریکه پانل تحت بار مکانیکی متغیر با زمان قرار داشته و پتانسیل الکتریکی سطوح داخلی و خارجی برابر صفر است. در این حالت شرایط مرزی (١٤) و (١٥) را می‌توان بصورت رابطه (۳۰) نوشت:

$$\begin{aligned} &\psi_a(\theta,z,t) = \psi_b(\theta,z,t) = p_a(\theta,z,t) = 0 \\ &p_b(\theta,z,t) = p_0(t)\sin(\pi\theta/\alpha)\sin(\pi z/L) \end{aligned} \qquad (۳۰)$$

تابع بار فشاری روی سطح خارجی بصورت زیر انتخاب می‌شود. علت انتخاب این تابع بخاطر آن است که با تغییر ثابت زمانی c بار وارده روی پانل از شبه استاتیکی تا پله می تواند تغییر کند.

$$p_0(t) = q_0(1 - e^{-ct}) \qquad (۳۱)$$

در شکل (۲) این تابع بازای مقادیر $q_0 = ۱٦/\pi^۲$ و c برابر ۵۰۰۰ (برثانیه) ترسیم شده است.

ماده پیزوالکتریک انتخاب شده الاستیک و ارتوترپ است. ثابت‌های مربوط به این نوع پیزوالکتریک، مانند ثابت‌های الاستیک، پیزوالکتریک و دی الکتریک در جدول (۱) آمده است. نتایج عددی ارائه شده در شکل‌های(۳) الی (۱۲) همگی توسط روابط (۳۳) بی‌بعد شده است.

$$(u_r^*, u_\theta^*, u_z^*) = \frac{100Y}{HS^4 q_0}(u_r, u_\theta, u_z), \ \psi^* = \frac{|d|Y}{HS^2 q_0}\psi$$

$$(\sigma_r^*, \sigma_\theta^*, \sigma_z^*, \tau_{\theta z}^*, \tau_{rz}^*, \tau_{r\theta}^*) = \frac{(S^2\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, S\tau_{\theta z}, S\tau_{rz}, S\tau_{r\theta})}{S^2 q_0}$$

$$Dimensionless \quad time = \frac{t}{H}\sqrt{\frac{Y}{\rho}} \qquad (۳۲)$$

که در این روابط Y =۵۰ (گیگا پاسکال) و d =−۳۰۰×۱۰^−۱۲ (کولمب بر نیوتن) بترتیب مدول الاستیسیته و ثابت پیزوالکتریک در جهت شعاع هستند. زمان بی بعد نیز طبق تعریف (۳۲) عبارت است از نسبت زمان به مدت زمانی که موج الاستیک نیاز دارد تا یکبار ضخامت پانل را طی نماید. پارامترهای هندسی و بی‌بعد پانل بقرار(۳۳) زیر است:

$$S = R_m / H, \ H = R_b - R_a, \ R_m = (R_a + R_b)/2 \qquad (۳۳)$$

جدول (۱): ثابت‌های الاستیک، پیزوالکتریک و دی‌الکتریک PZT4 [۷]

Modulii	PZT4	Unit	Modulii	PZT4	Unit
C_{11}	۱۳۸/۵	GPa	e_{15}	۱۲/۷	C/m^2
C_{22}	۱۳۸/۵	GPa	e_{24}	۱۲/۷	C/m^2
C_{33}	۱۱٤/۷	GPa	e_{31}	−۵/۲	C/m^2
C_{44}	۲۵/٦	GPa	e_{32}	−۵/۲	C/m^2
C_{55}	۲۵/٦	GPa	e_{33}	۱۵/۱	C/m^2
C_{66}	۳۰/٦	GPa	η_{11}	۱۳/۱	nF/m
C_{12}	۷۷/٤	GPa	η_{22}	۱۳/۱	nF/m
C_{13}	۷۳/٦	GPa	η_{33}	۱۱/۵	nF/m
C_{23}	۷۳/٦	GPa	ρ	۷۵۰۰	kg/m^3

برای ادامه حل لازم است که بار خارجی وارده بصورت بسط نیم سینوسی سری فوریه دوگانه بیان شود، اما از آنجاکه توزیع بار درنظر گرفته شده روی سطح خارجی پانل نیم سینوسی است (۳۰)، کلیه جملات سری مگر جمله اول آن در بسط و در نتیجه در حل پدیدار نمی‌شود.

در این میان قبل از ارائه نتایج، روش استفاده شده در اینجا بکمک حل انجام شده توسط رِن (Ren) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. از آنجاکه حل رِن [۸] برای پانل استوانه‌ای ارتوتروپ با طول نامحدود تحت بار استاتیکی است به منظور نزدیک شدن حل دینامیکی ارائه شده به حل یاد شده بایستی شرایط خاصی

لحاظ گردد. بدین منظور از اعدادی خیلی کوچک برای ثابت‌های پیزوالکتریک و دی‌الکتریک (برای حذف خاصیت پیزوالکتریکی و برقرار نمودن کوپلینگ ضعیف) و ثابت زمانی واحد (جهت میل بارگذاری دینامیکی به بارگذاری شبه استاتیکی) و انتخاب یک طول بزرگ برای پانل (برای نزدیک شدن به طول بینهایت و خمش استوانه‌ای) استفاده شده است:

$$Y_r : Y_\theta : Y_z : G_{r\theta} : G_{\theta z} : G_{zr} = ۱ :۲۵ :۱ :۰/۵ :۰/۵ :۰/۲$$

$$\eta_{11} = \eta_{22} = \eta_{33} = -۱۰\times ۱۰^{-۱۰} C^2N^{-1}m^{-1}$$

$$\nu_{\theta r} = \nu_{\theta z} = \nu_{rz} = ۰/۲۵$$

$$e_{24} = e_{15} = 0,\ e_{31} = e_{32} = e_{33} = ۱۰^{-۱۰} Cm^{-2}$$

L=۱۰۰۰ R_m ، R_m=۱ ، $\alpha = \pi/ ۳$ ، c=۱

نتایج بدست آمده ضمن مقایسه بـا حـل رِن در جـدول (۲) داده شده است. همخوانی نتایج حاصل از این روش بـرای پانـل‌هـای نازک (S=۵۰۰) و ضخیم (S =۲) بیانگر درستی روش ارائه شده در این مقاله است. البته میزان خطـایی کـه در ایـن جـدول دیـده می‌شود بخاطر کم بودن تعداد المان در راستای ضـخامت است. (در اینجا از ۱۰ المان استفاده شده است)

جدول (۲): مقایسه حل ارائه شده با حل Ren [۸] **در حالت استاتیکی**

$S = R_m / H$	2	2	500	500
	Present	Ren(1987)	Present	Ren(1987)
$\tilde{u}(\alpha/2,0)$	8.634	9.986	0.4914	0.749
$\tilde{\sigma}_\theta(\alpha/2,-H/2)$	-2.123	-2.455	-0.461	-0.752
$\tilde{\sigma}_\theta(\alpha/2,+H/2)$	1.627	1.907	0.459	0.750
$\tilde{\sigma}_z(\alpha/2,-H/2)$	-0.0212	-0.0245	-0.0044	-0.0075
$\tilde{\sigma}_z(\alpha/2,+H/2)$	0.07881	0.0816	0.0048	0.0075
$\tilde{\tau}_{r\theta}(0,0)$	0.443	0.555	0.343	0.563

در شکل‌های (۳) الی (۱۱) تاریخچه زمانی مؤلفه‌های جابجایی مکانیکی، پتانسیل الکتریکی و مؤلفه‌های تنش مربوط به سه نقطه خارجی (۰/۵= ξ)، میانی (۰= ξ) و داخلی (۰/۵-= ξ) پانل داده شده است ($\xi = (r - R_m)/H$ ضخامت بدون بعد است). در هر یک از این نمودارها نقاطی از پانل انتخاب شده است که مقادیر غیر صفر دارند. شکل (۳) جابجایی شعاعی پانل را در نقطهٔ (L/۲ ،α/۲) واقع روی سطوح خارجی میانی و داخلی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که این منحنی رفتاری سینوسی داشته و حدوداً پس از ده بار رفت و برگشت موج در ضخامت پانل به حداکثر جابجایی شعاعی می‌رسد. با اندازه‌گیری فاصله دو قله نوسانات پانل که حدوداً پانزده (زمان بی‌بعد) است فرکانس پایه ارتعاشات طبیعی پانل برابر ۶۹۰ بر ثانیه خواهد بود.

در شکل (٤) و (٥) بترتیب تاریخچـه زمـانی جابجـایی محیطـی نقطـه (۰ ،L/۲) و جابجـایی محـوری نقطـه (α/۲ ،L) داده شـده است.این دو کمیت نیز مانند جابجایی شعاعی، رفتاری سینوسی از خود نشان می‌دهند. همانگونه کـه ملاحظـه مـی‌شـود میـزان جابجایی محیطی سطح داخلی از سـطوح میـانی و خـارج بطـور قابل ملاحظـه‌ای بزرگتـر اسـت. امـا جابجـایی محیطـی سـطوح مختلف پانل نسبت به جابجایی محیطی رفتاری متفاوت از خـود نشان می‌دهند. بطوریکه در این حالت حرکت سـطوح خـارجی و داخلی مخالف جهت هم حرکت می‌کنند.

تغییرات پتانسیل الکتریکی با زمان در نقطه (L/۲ ،α/۲) در شکل (٦) نشان داده شده است. تغییرات این کمیت نیز مانند جابجـایی شعاعی و محیطی سینوسی اسـت. همانگونـه کـه در ایـن شـکل نشان داده شده است پتانسیل الکتریکی مربوط به سطوح داخلی و خارجی پانل صفر است و این امر بیانگر برآورده شدن کامـل و دقیق شرایط مرزی اعمال شده است.

تاریخچـه زمـانی تـنش شـعاعی نقطـه (L/۲ ،α/۲) در شـکل (۷) نشان داده شده است. همانگونه کـه مشـاهده مـی‌شـود ، مقـدار تنش شعاعی ابتدا بطور ناگهانی افـزایش وسـپس بـه آرامـی بـا گذشت زمان افزایش می‌یابد. افزایش تدریجی یاد شده همراه بـا نوساناتی است که فرکانس آن از فرکانس نوسانات مربـوط بـه مؤلفه‌های جابجایی و پتانسیل الکتریکی به اندازهٔ قابـل توجـه‌ای بزرگتر است. دیده می‌شود که پوش یـا میـانگین ایـن نوسـانات منحنی‌ای ایجاد می‌کند که از هر جهت مشابه بار خـارجی وارده است. همچنین مقدار این مؤلفه تنش در سطح میـانی نزدیـک بـه نصف بار خارجی وارده اسـت. همانگونـه کـه انتظـار مـی‌رفـت سطح داخلی بدون تـنش و مقـدار تـنش شـعاعی در نقطـه (L/۲ ،α/۲) روی سطح خارجی، همان تابع بارگـذاری اعمـال شـده در شرایط مرزی است.

تغییرات مؤلفه های تـنش محیطـی و محـوری نسـبت بـه زمـان بترتیـب در شـکل‌هـای (۸) و(۹) نشـان داده شـده اسـت. ایـن نمودارهـا بـرای نقطـه (L/۲ ،α/۲) واقـع روی سـطح میـانی و همچنـین سـطوح داخلـی و خـارجی نشـان داده شـده اسـت. همانگونه که ملاحظه می‌شود ایـن مؤلفـه‌هـای تـنش در سـطوح داخلی و خارجی بـا نوسـانات سینوسـی همـراه بـوده و حالـت تنشی عکس نسبت به هم دارند(سطح خـارجی کشـش و سـطح داخلی فشار و یا بلعکس) و درضمن مقدار ایـن دو مؤلفـه تـنش روی سطح میانی نسبت به سطوح داخلی و خارجی ناچیز است.

تغییرات تنش برشی در صفحه و تنش برشی عرضی، بـا زمـان برای نقاط (L ،α) و (۰، α/۲) واقع روی سطوح داخلـی، میـانی و خارجی در شکلهای (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. تغییرات این نمودارها نسبت به زمان مشابه هم اسـت و هـردو رفتـاری سینوسی دارند. همانگونه که دیده می‌شـود، روی سـطح میـانی

مقدار تنش برشی عرضی از تنش برشی در صفحه بزرگتر است. همچنین همانگونه که انتظار می‌رفت روی سطوح خارجی و داخلی مقدار تنش برشی عرضی صفر است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله بررسی پاسخ دینامیکی پانل پیزوالکتریک تحت بارفشاری خارجی از روش نیمه تحلیلی ارائه شده است. پانل مزبور دارای طول محدود ، ارتوتروپیک و در جهت شعاعی پلاریزه شده است. همانگونه که در مراجع [٥و٦] نشان داده شده است، توزیع جابجایی‌های مکانیکی وپتانسیل الکتریکی مواد پیزوالکتریک بسیار پیچیده است و نمی‌توان مانند مواد الاستیک و فرض تغییرات خطی جابجایی و پتانسیل الکتریکی در جهت ضخامت به بررسی آنها پرداخت.از اینرو، آنالیز سه بعدی رفتار سازه‌های ساخته شده از مواد پیزوالکتریک حتی در حالتی که ضخامت آنها بسیار کم است سفارش می‌گردد.

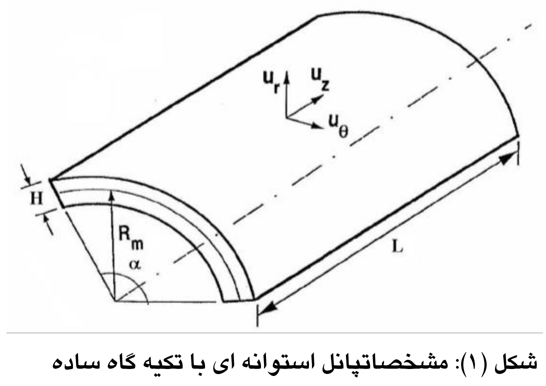
از آنجاکه هنوز مطالعهٔ دقیق و همه جانبه‌ای از پاسخ دینامیکی سازه‌های پیزوالکتریک در دسترس نیست، مطالعهٔ حاضر به شناسایی رفتارهای دینامیکی ، مکانیکی و الکتریکی این مواد هوشمند کمک می‌کند.نتایج این مقاله همچنین برای ارزیابی آنالیزهای دینامیکی تقریبی نیز مفید است.نتایج حاصل از این تحقیق، با توجه به بار وارده ، به طور خلاصه عبارتند از:

– روش ارائه شده در این مقاله مناسب تحلیل دینامیکی پانل استوانه‌ای پیزوالکتریک است و شرایط مرزی در این روش برآورده می‌شود.

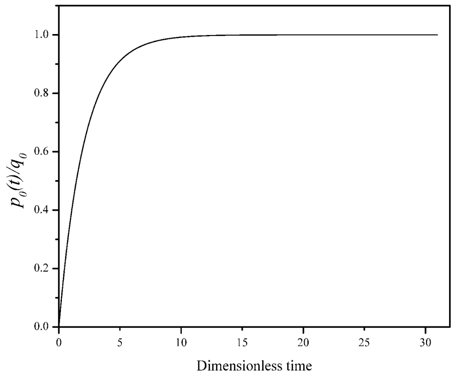
– کلیه مؤلفه‌های جابجایی ، اعم از شعاعی ،محیطی، محوری و پتانسیل الکتریکی رفتاری سینوسی دارند.

– از میان مؤلفه‌های تنش ، تنها تنش شعاعی روی سطح میانی رفتار سینوسی نداشته و با نوسانات محلی همراه است.

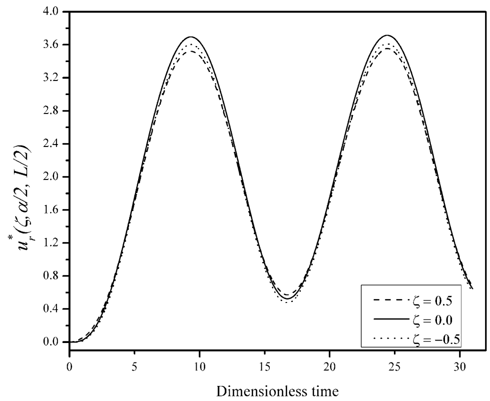
پوش منحنی مؤلفه تنش شعاعی مشابه بار وارده روی پانل و از آن کمتر است.



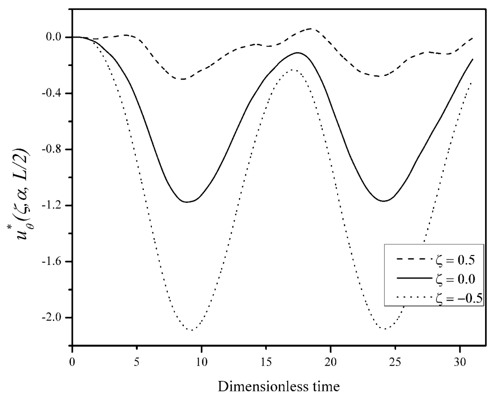
شکل (۱): مشخصاتپانل استوانه ای با تکیه گاه ساده



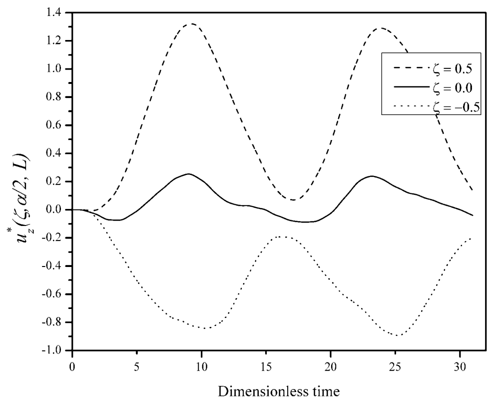
شکل (۲): فشاری اعمال شده روی سطح خارجی پانل با زمان.



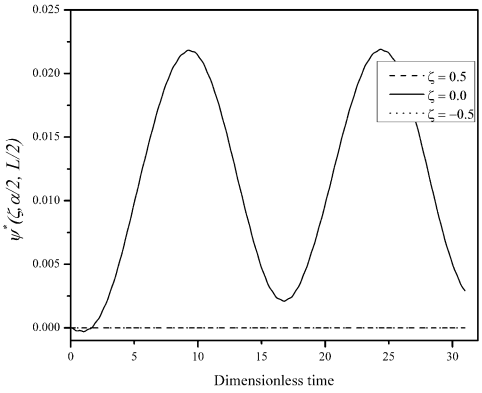
شکل (۳): تاریخچه زمانی جابجایی شعاعی (u_r^*)



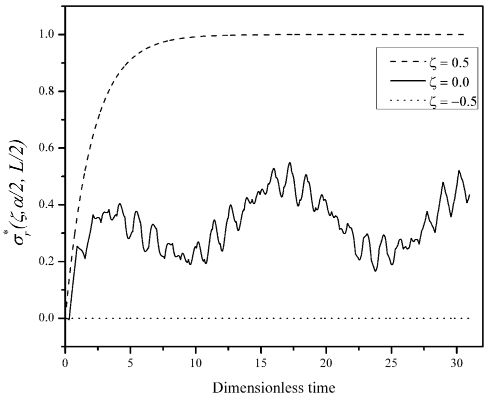
شکل (۴): تاریخچه زمانی جابجایی محیطی (u_θ^*)



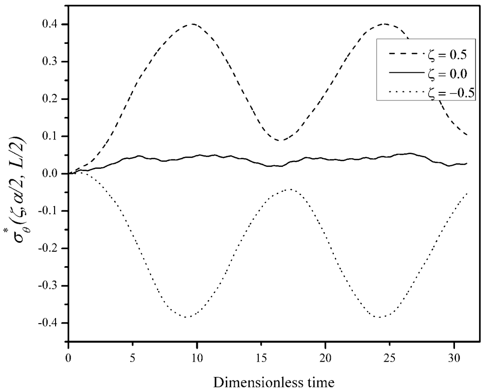
شکل (۵): تاریخچه زمانی جابجایی محوری (u_z^*)



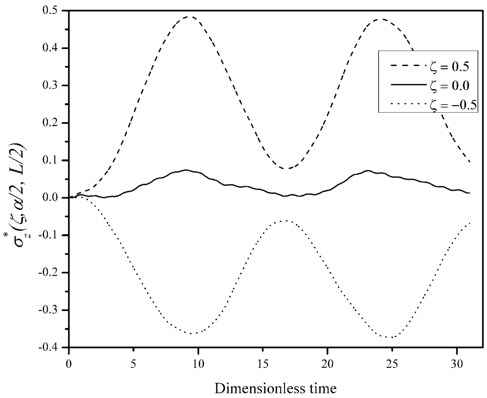
شکل (۶): تاریخچه زمانی پتانسیل الکتریکی (ψ^*)



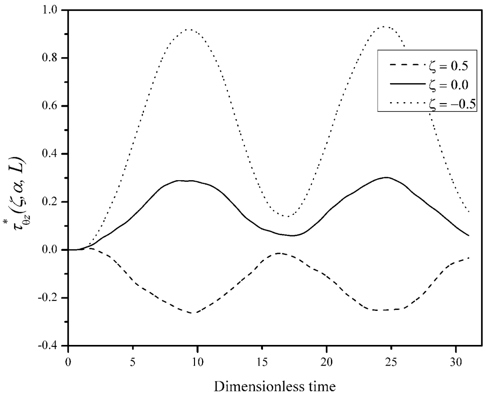
شکل (۷): تاریخچه زمانی تنش شعاعی (σ_r^*)



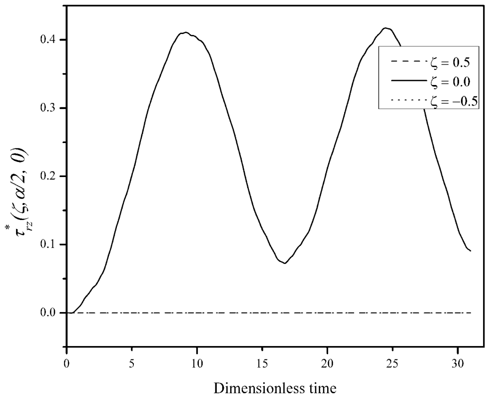
شکل (۸): تاریخچه زمانی تنش محیطی (σ_θ^*)



شکل (۹):تاریخچه زمانی تنش محوری (σ_z^*)



شکل (۱۰):تاریخچه زمانی تنش برشی در صفحه ($\tau_{\theta z}^*$)



شکل (۱۱):تاریخچه زمانی تنش برشی عرضی (τ_{rz}^*)

۶- مراجع

[۱] Crawley, F. E.; "*Intelligent structures for aerospace: a technology overview and assessment*", AIAA J. vol.32: 1689-1700, 1994.

[۲] Dumir, P. C.; Dube, G. P.; Kapuria, S.; "*Exact piezoelastic solution of simply supported orthotropic circular cylindrical panel in cylindrical bending*", Int. J. Solids Structure. vol.34 (6): 685-702, 1997.

[۳] Chen, C. Q.; Shen, Y. P.; "*Piezothermoelasticity analysis for a cylindrical shell under the state of axisymmetric deformation*", Int. J. Engng Sci.Vol.34 (14):1585-600, 1996.

[٤] Shakeri, M.; Sedighi, M. R.; Daneshmehr, A. R.; "*Three dimensional elasticity solution of single layer piezoelectric panel*", vol. 8(2): 26-41, 2008.

[٥] Shakeri, M.; Alibiglu, A.; Eslami, M. R.; "*Elasticity solution for thick laminated anisotropic cylindrical panels under dynamic load*", J. Mech. Eng. Sci. (ImechE), vol.216 Part C, PP.315-324, 2002.

[٦] Shakeri, M., Daneshmehr, A. R. and Alibiglu, A.; "*Elasticity solution for thick laminated shell panel with piezoelectric layer*", EASEC-9 Conf., Bali, Indonesia, 2003.

[۷] Wu X. H.; Shen, Y. P. and Chen, C. Q.; "*An exact solution for functionally graded piezothermoelastic cylindrical shell as sensors or actuators*", Materials Letters vol.57 :3532-3542, 2003.

[۸] Ren, J. G.; "*Exact solution for laminated cylindrical shells in cylindrical bending*", Comp. Sci. Tech. vol.29 :196-187, 1987.

۷- زیرنویس ها

[1] Direct effect
[2] Inverse effect
[3] Electromechanical sensor
[4] Electromechanical actuator
[5] Distributed
[6] Patch
[7] Polarized
[8] Galerkin
[9] Weak form
[10] Navier
[11] Newmark Implicit Method