نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری **کامپوزیت** http://jstc.iust.ac.ir



# تحلیل سهبعدی انتقال توان صوتی در پوستههای استوانهای جدار ضخیم از جنس کامپوزیت لایهای

روح الله طالبی توتی<sup>۱\*</sup>، امیرمحمد چوداری خامنه<sup>۲</sup>، رضا احمدی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه پیامنور، تهران

\* تهران، صندوق یستی ۱۳۱۱۴–۱۶۸۴۶، rtalebi@iust.ac.ir

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این مقاله یک مدل تحلیلی برای محاسبهی انتقال صوت از یک پوستهی استوانهای کامپوزیتی ارایه شده است. بدین منظور از یک	دریافت: ۹۵/۲/۲
مدل جدید و دقیق برای حل سهبعدی افت انتقال صوت در پوستههای استوانهای از جنس کامپوزیت لایهای و بر پایه تئوری الاستیسته	پذیرش: ۹۵/۳/۲۳
خطی استفاده شده است. مدل ارائه شده در مقاله حاضر، یک پوستهی استوانهای کامپوزیتی با ضخامت دلخواه و طول بینهایت و غوطهور	1541 . 17
در سیال است که یک موج صفحهای مایل به سطح خارجی آن برخورد میکند. بر این مبنا با استفاده از روش موسوم به فضای حالت و	کلیدوازگان:
بهکارگیری مدل لایهای تقریبی بههمراه رویکرد ماتریس انتقال، به تحلیل افت انتقال صوت از این پوستهها پرداخته شده است. نتایج	افت انتقال صوت
حاصله با نتایج سایر محققان مقایسه شده و تطابق مناسبی بین نتایج مشاهده میشود و بر دقت مدل ارایه شده در این مقاله صحه گذاری	كامپوزيت لايەاي
مینماید. همچنین در انتها پارامترهای موثر بر افت انتقال صوت نیز بررسی شده است. بررسیها نشان میدهند که پوستههای استوانهای	الاستيسيته خطى
از جنس کامپوزیت لایهای از مزیت بیشتری نسبت به دیگر مواد برخوردارند، زیرا با تغییر در نحوه آرایش و چیدمان لایهها و همچنین	روس قصای خالب اتا انتتال
جنس ماده بهکار رفته، مقدار افت انتقال صوت بهبود مییابد. بنابراین از این نکته میتوان به افزایش مقدار افت انتقال صوت در	ماتريس انتقال
پوستەھاي كامپوزيتى بھرەگيرى نمود.	

# Three-dimensional analysis of sound power transmission through thick laminated composite cylindrical shells

# Roohollah Talebitooti<sup>1\*</sup>, Amir Mohammad Choudari Khameneh<sup>1</sup>, Reza Ahmadi<sup>2</sup>

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran 2- School of Mechanical Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran \*P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, rtalebi@iust.ac.ir

Keywords	Abstract
Keywords Sound transmission loss Laminated composite Linear elasticity State space method Transfer matrix	In this paper, an analytical solution is presented to study acoustic transmission through a laminated composite cylindrical shell. Therefore, a new and exact model is employed to solve the three-dimensional sound transmission loss in a composite cylindrical shell based on three-dimensional linear theory of elasticity. The model presented in this paper is a composite cylindrical shell with arbitrary thickness and infinite length and immersed in a fluid. Also an oblique plane wave impinges on the external sidewall of the shell. The state space method is used to investigate laminate approximated model along with transfer matrix approach to analysis the sound transmission loss though the composite cylindrical shells. The results obtained from presents study have been compared with those of other researchers. This comparison shows an excellent agreement between the results. Finally, the parameters affecting on the sound transmission loss have been studied. The results indicate that the laminated composite cylindrical shells are more advantageous rather than other materials as a result of enhancing the sound transmission loss with change the stacking sequence of laminated composite. This characteristic can be used to increase the amount of sound transmission loss in composite shells.

#### Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Talebitooti, R. Choudari Khameneh, A. M. and Ahmadi, R., "Three-dimensional analysis of sound power transmission through thick laminated composite cylindrical shells", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 1, pp. 53-66, 2017

#### ۱– مقدمه

سازههای کامپوزیتی به دلیل داشتن خواص مکانیکی مناسب، به طور گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می گیرند. جایگاه این سازهها به نحوی است که امروزه در صنایع حساس، نظیر: خودرو و هوافضا نیز به کار برده می شوند. سازههای کامپوزیتی با هندسه های مختلف تولید و استفاده می شوند. یکی از سازههای پر کاربرد، پوسته ی استوانه ای کامپوزیتی است که بدنه ی هواپیما را می توان یکی از کاربردهای مهم آن اشاره نمود. محاسبه ی افت انتقال صوت<sup>1</sup> (TL) از این پوسته ها به دلیل کاربرد فراوان و همچنین حساسیت موضوع از اهمیت زیادی برخوردار می باشد. از این رو، این کار نیازمند ارائه یک مدل دقیق و قابل اعتماد برای مدل سازی افت انتقال صوت از این پوسته ها است.

اولین مطالعه در زمینه انتقال نویز از سازههای منحنی شکل توسط اسمیت [1]، انجام شد. او در مقاله خود انرژی جذب شده توسط سازه را به عنوان افت انتقال صوت و به صورت نسبت کسری توان جذب شده به توان برخوردی در طول پوسته معرفی نمود. فرض او در این کار این بود که تنها امواج صوتی داخل شونده بر رفتار پوسته موثر میباشند. وایت [۲]، افت انتقال صوت از پوستههای استوانهای با طول محدود را مورد ارزیابی قرار داد. او از این مطالعه نتیجه گرفت که افت انتقال صوت در دو نقطه از بازه فرکانسی، کمترین مقدار مى، باشد و آن دو نقطه را فركانس رينگ و فركانس انطباقي ناميد. فاكسول و فرانکلین [۳]، ارتعاشات یک استوانه جدار نازک تقویت شده که در معرض امواج صوتی قرار دارد را مطالعه نمودند. آنها در این مطالعه با در نظر گرفتن تغییرات کوچک در راستای محور استوانه از مدل ساده شده دوبعدی استفاده نمودند. كوال [۴]، انتقال صوت از دماغه هواپيما را تحت شرايط پرواز با استفاده از روش امپدانس مطالعه نمود. به دلیل در نظر گرفتن همزمان برخورد موج صفحهای، جریان خارجی و فشار داخلی، تحلیل انتقال صوت را با دقت مناسبتری فراهم میساخت. همچنین او از پوستهی استوانهای ایزوتروپیک<sup>6</sup> و اورتوتروپیک<sup>6</sup> برای مدلسازی خود استفاده نمود [۵]. در ادامه کار کوال، بلیس [۶]، انتقال صوت در پوستهی استوانهای اورتوتروپیک با طول بلند را بررسی نمود. او با معرفی دو زاویه مستقل در برخورد موج صفحهای به پوستهی استوانهای به محاسبهی میدان انتشار موج انتقالی پرداخت. او در کار دیگری، مطالعات قبلی خود را که در حالت دوبعدی بیان شده بود را برای یک پوستهی سهبعدی تعمیم داد [۸،۷]. کیم و لی [۹]، به توسعهی یک مدل تحلیلی برای محاسبهی افت انتقال صوت در پوستههای استوانهای با طول بینهایت پرداختند. برای این کار آنها از حل همزمان معادلات ارتعاشات پوسته و موج آکوستیک بهره گیری کردند. در نهایت افت انتقال صوت به دست آمده از مدل تحلیلی را با روش تجربی مقایسه نموده و مشاهده کردند که در فرکانسهای پایین اختلافاتی وجود دارد اما در فرکانسهای بالا تطابق بهتری حاصل شده است. در ادامه، آنها انتقال صوت در پوستههای استوانهای دو جداره را نیز مورد مطالعه قرار دادند و نتایج تحلیل را با نتایج تجربی مقایسه نمودند. تنگ [۱۰]، انتقال صوت در پوستههای ساندویچی استوانهای تحت برخورد موج صفحهای را بررسی نمود. او محیط داخل و خارج پوسته را نیز متفاوت در نظر گرفت. همچنین او در کار خود از تئوری تغییر شکل

برشی مرتبهی اول ( (FSDT) بهره گیری نمود. او نشان داد که از اثرات برش و چرخش در فرکانس های بالا نمی توان در معادلات پوسته صرف نظر نمود اما در فرکانس های پایین می توان از این اثرات صرفنظر کرد. دانشجو و همکاران [۱۱]، افت انتقال صوت از پوستهی استوانهای کامپوزیتی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها در این کار از تئوری کلاسیک<sup><sup>۸</sup> (CST) برای مدلسازی پوسته</sup> استفاده نمودند. سپس، آنها افت انتقال صوت از پوستهی استوانهای کامپوزیتی را با استفاده از تئوری تغییر شکل برشی مرتبهی اول بررسی نمودند و نتایج حاصل شده را با نتایج مدلسازی با استفاده از تئوری كلاسيك مقايسه نمودند [١٢]. از اين مقايسه اين نتيجه حاصل شد كه از اثرات چرخش و برش در فرکانسهای بالاتر نمی توان صرف نظر نمود. پس از آن دانشجو و همکاران [۱۳]، به مطالعهی افت انتقال صوت از پوستهی با جنس مواد تابعی هدفمند<sup>۹</sup> (FGMs) با استفاده از تئوری تغییر شکل برشی مرتبهی سوم' (TSDT) پرداختند. آنها نتایج حاصل شده از این مطالعه را با روش کلاسیک و تئوری تغییر شکل برشی مرتبهی اول مقایسه نمودند. آنها نشان دادند که تئوری تغییر شکل برشی مرتبهی سوم از دقت بالایی در محاسبهی افت انتقال صوت از پوستههای با ضخامت زیاد یا به عبارتی پوستههای با R/h کمتر برخوردار می باشد. پس از آن طالبی و همکاران [۱۴]، افت انتقال صوت از پوستههای استوانهای اورتوتروپیک را با استفاده از تئورى تغيير شكل برشى مرتبهى سوم محاسبه نمودند. اخيرا طالبي و همکاران [1۵]، افت انتقال صوت در پوستههای استوانهای ارتوتروپیک با ضخامت دلخواه را با استفاده از تئوری سهبعدی محاسبه نمودند. آنها با استفاده از روش فضای حالت و به کارگیری ماتریس انتقال به مدلسازی افت انتقال صوت پرداختند. آنها نتایج به دست آمده از این مطالعه را با نتایج مطالعات گذشته مقایسه نمودند. همچنین آنها به این نتیجه رسیدند که مدل ارائه شده در این مطالعه دارای دقت بالایی در محاسبهی افت انتقال صوت در پوسته های با ضخامت زیاد دارد. رجبی و همکاران [۱۶]، پخش موج آکوستیکی از پوستهی استوانهای کامپوزیتی را مورد ارزیابی قرار دادند. دانشجو و همکاران [۱۷]، بر پایه تئوری سهبعدی الاستیسیته''، افت انتقال صوت از پوستهی استوانهای ایزوتروپیک جدار ضخیم را محاسبه نمودند. آنها در این مطالعه از روش تجزیه هلمهولتز<sup>۱۲</sup> بهرهگیری نمودند. آنها نتایج حاصله را با روش های کلاسیک، تئوری تغییر شکل برشی مرتبهی اول و سوم مقایسه نمودند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش ضخامت جداره پوسته، اثرات برش و چرخش اهمیت پیدا میکنند و تئوریهای ساده سازی کننده در این حالت دارای خطا میباشند.

با بررسی کارهای گذشته میتوان نتیجه گرفت که مطالعات گستردهای در رابطه با تحلیل افت انتقال صوت در پوستههای استوانهای صورت پذیرفته است که هر کدام سعی در اصلاح و تکمیل مطالعه قبلی دارند. اما با بررسی بیشتر این تحقیقات میتوان به این حقیقت رسید که اکثر این مطالعات با وجود اینکه نتایج قابل قبولی را ارائه میکنند، اما در برخی از موارد دارای خطاهایی نیز هستند که این خطاها ممکن است قابل صرف نظر نباشند. لذا وجود یک مدل دقیق و قابل اعتماد امری اجتناب ناپذیر میباشد به نحوی که این مدل در عین قابل اعتماد بودن باید اشکالات مطالعات گذشته را نیز بر طرف نماید. برای این منظور بهره گیری از تئوری سهبعدی جهت تحلیل افت

10. Third order shear deformation theory

۵٤

<sup>1.</sup> Sound transmission Loss

<sup>2.</sup> Ring frequency

Coincidence frequency
 Impedance method

<sup>5.</sup> Isotropic

<sup>6.</sup> Orthotropic

<sup>7.</sup> First order shear deformation theory

<sup>8.</sup> Classical shell theory

<sup>9.</sup> Functionally graded materials

<sup>11.</sup> Three-dimensional elasticity theory 12. Helmholtz decomposition

انتقال صوت سبب دستیابی به این اهداف میشود. با بررسی تحقیقات صورت گرفته در گذشته مشخص میشود که در کار ارائه شده توسط طالبی و همکاران [۱۵] و همچنین دانشجو و همکاران [۱۷] از تئوری سهبعدی برای تحلیل افت انتقال صوت استفاده شده است. اما نکته مهم در مورد تحقیق ایشان این است که در هیچکدام از این مطالعات، پوسته مورد نظر از جنس کامپوزیت لایهای نمیباشد. در مطالعه ی طالبی و همکاران [۱۵] پوسته مورد نظر از جنس ارتوتروپیک تک لایه، و در مطالعه ی دانشجو و همکاران [۱۷] پوسته مورد نظر از جنس ایزوتروپیک میباشد. بنابراین با توجه به کاربرد فراوان پوستههای کامپوزیتی، خلاء یک مدل دقیق برای تحلیل افت انتقال صوت از این پوستهها وجود دارد. در این مقاله یک مدل جدید برای تحلیل افت انتقال صوت از یک پوسته ی استوانه ای کامپوزیتی بر پایه تئوری سه مهراه مدل لایه ای تقریبی<sup>۲</sup> و رویکرد ماتریس انتقال<sup>۳</sup> به محاسبه ی افت انتقال انتقال صوت پرداخته شده است.

# ۲- تعریف مسئله

با توجه به شکل ۱، پوستهی استوانهای کامپوزیتی با طول بینهایت تحت اثر یک موج صفحهای که دارای زاویهی  $\gamma$  نسبت به محور Z میباشد، قرار می گیرد. در اثر این برخورد قسمتی از امواج منعکس و قسمتی نیز از سیلندر عبور می کنند. همچنین یک جریان هوای خارجی با سرعت V در سطح استوانه جریان می بابد. این سیلندر دارای دو ناحیه آکوستیکی میباشد که در شکل ۱ به صورت ۱ و ۳ نشان داده شده است. ناحیه ۱، محیط خارجی سیلندر میباشد که دارای سرعت صوت  $_1 2$  و چگالی  $_1 0$  است. ناحیه ۳، محیط داخلی سیلندر میباشد که دارای سرعت صوت  $_2 0$  چگالی  $_2 0$  است. پوستهی استوانهای از جنس کامپوزیت لایهای میباشند. همچنین تعداد لایهها، جنس لایهها و زوایای الیاف در این پوسته میتوانند متفاوت باشند.

## ۳- معادلات حاکم بر سیال و ارتعاشات آکوستیک

در فضای بیرونی پوسته، فشار برابر با  $P_1^I + P_1^I + P_1^R$  میباشد. یعنی فشار بیرونی برابر است با مجموع فشار برخوردی و فشار منعکس شده. همچنین محیط بیرون دارای چگالی  $\rho_1$  و سرعت امواج آکوستیکی  $c_1$  میباشد. بنابراین معادلهی (۱) نشان دهندهی معادلهی موج در محیط خارجی و در سیستم مختصات استوانهای میباشد [۱۸،۱۱]:

$$c_1^2 \nabla^2 (P_1^I + P_1^R) - \left(\frac{\partial}{\partial t} + V \cdot \nabla\right)^2 (P_1^I + P_1^R) = 0 \tag{1}$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial}{r\partial r} + \frac{\partial^2}{r^2 \partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$
(7)

فشار آکوستیکی موج منتقل شده میباشد. در این حالت معادلهی موج  $P_3^T$  فشار آکوستیکی مطابق رابطه (۳) است [۱۲]:

$${}_{3}^{2}\nabla^{2}P_{3}^{T} - \frac{\partial^{2}P_{3}^{T}}{\partial t^{2}} = 0$$
 (°)

1. State space method

2. Laminate approximated model



شکل ۱ شماتیکی از برخورد موج صفحهای به یک پوستهی استوانهای کامپوزیتی

موج صفحهای برخوردی 
$$P_1^1$$
 را به صورت هارمونیک و در سیستم  
مختصات استوانهای میتوان به صورت رابطه (۴) نشان داد [۱۳]:  
 $P_1^I(r, \varphi, z, t) = P_0 \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n (-j)^n J_n(k_{1r}r)$  (۴)

$$\expig(j(\omega t-k_{1z}z-narphi)ig)$$
که در آن  $arepsilon_{n}$  ضریب نیومن میباشد و برابر است با: $n=0$   $1$   $n=0$ 

$$n = n \quad (2 \quad n > 1$$

$$n = n \quad (a)$$

$$\omega = \omega \quad (a)$$

ی و مرتبه این 
$$f_n$$
 کابه بیس نوع اول و مرتبه ای  $m$  این  $f_n$  کابه بیس نوع اول و مرتبه  $m$  این ...  $i = \sqrt{-1}$  و  $0,1,2,...$   
عدد موج در سیال متحرک می باشد و به صورت زیر بیان می شود [۱۳]:

$$k_1 = \frac{\omega}{c_1} \left( \frac{1}{1 + M \sin\gamma} \right) \tag{9}$$

که در آن 
$$M = V/c_1$$
 عدد ماخ برای جریان خارجی میباشد. همچنین  
ا بیانگر سرعت سیال خارجی میباشد.  
همچنین عدد موج در راستای شعاعی و محوری مطابق رابطه (۲) است.  
 $k_{1r} = k_1 \sin \gamma$ 

$$k_{1z} = k_1 \cos \gamma$$
 (۷)  
شکل ۲، جزء کوچکی از پوسته را نشان میدهد.

<sup>3.</sup> Transfer matrix



شکل ۲ مشخصات لایهها و زیر لایهها در پوستهی استوانهای کامپوزیتی

به دلیل اینکه امواج پیشرو در محیط آکوستیک و در پوسته، ناشی از امواج پیشرو برخوردی میباشند، اعداد موج در راستای z (یا سرعت تریس<sup>7</sup>) بایستی در تمام سیستم برابر گردند. برای اعداد موج در راستای z روابط زیر برقرار مىباشد [١٣].

$$k_{1z} = k_{3z}$$
$$k_3 = \frac{\omega}{c_3}$$

$$k_{3r} = \sqrt{k_3^2 - k_{3z}^2} \tag{(A)}$$

همچنین اموج انعکاسی و عبوری نیز به صورت زیر میباشند [۱۵].

$$P_1^R(r,\varphi,z,t) = \sum_{n=0}^{\infty} P_{1n}^R H_n^2(k_{1r}r) \\ \exp(j(\omega t - k_{1z}z - n\varphi))$$
<sup>(4)</sup>

$$P_3^T(r,\varphi,z,t) = \sum_{n=0}^{\infty} P_{3n}^T H_n^1(k_{3r}r)$$
  

$$\exp(j(\omega t - k_{1z}z - n\varphi))$$
(1.)

n كه در آن  $H_n^1$ و  $H_n^2$  توابع هنكل  $H_n^3$  از نوع اول و دوم و مرتبه میباشند که به ترتیب بیانگر امواج داخل شونده و خارج شونده میباشند.

# ۴- معادلات حاکم بر یوسته

با توجه به شکل ۲، ابتدا با استفاده از روش فضای حالت، معادلهی حالت را برای هر لایه (مانند: لایه  $s \to q$  که (s = 1, 2, 3, ..., q) از پوستهی ( استوانه ای کامپوزیتی استخراج کرده، سپس با استفاده از مدل لایه ای تقریبی به همراه روش ماتریس انتقال محلی این معادله برای تمامی لایهها حل می شود. در نهایت با استفاده از روش ماتریس انتقال عمومی<sup>۵</sup> این معادله برای پوستهی استوانهای حل میشود.

6. Hooke's law

Δ

0

 $-2m1^{s}n1^{s}$   $2m1^{s}n1^{s}$  0

0

با توجه به قانون هوک<sup><sup>5</sup> در سیستم مختصات استوانهای، (r, arphi, z) رابطهی زیر</sup> برقرار میباشد [۱۵]:

$$\begin{cases} \sigma_{zz}^{s} \\ \sigma_{\varphi\varphi}^{s} \\ \sigma_{rr}^{s} \\ \sigma_{r\varphi}^{s} \\ \sigma_{r\varphi}^{s} \\ \sigma_{r\varphi}^{s} \\ \sigma_{rz}^{s} \\ \sigma_{\varphi\varphi}^{s} \end{cases} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11}^{s} & \bar{Q}_{12}^{s} & \bar{Q}_{13}^{s} & 0 & 0 & \bar{Q}_{16}^{s} \\ \bar{Q}_{12}^{s} & \bar{Q}_{22}^{s} & \bar{Q}_{23}^{s} & 0 & 0 & \bar{Q}_{26}^{s} \\ \bar{Q}_{13}^{s} & \bar{Q}_{23}^{s} & \bar{Q}_{33}^{s} & 0 & 0 & \bar{Q}_{36}^{s} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{Q}_{44}^{s} & \bar{Q}_{45}^{s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{Q}_{45}^{s} & \bar{Q}_{55}^{s} & 0 \\ \bar{Q}_{16}^{s} & \bar{Q}_{26}^{s} & \bar{Q}_{36}^{s} & 0 & 0 & \bar{Q}_{66}^{s} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{zz}^{s} \\ \varepsilon_{\varphi\varphi}^{s} \\ \varepsilon_{rr}^{s} \\ \gamma_{r\varphi}^{s} \\ \gamma_{\varphiz}^{s} \end{pmatrix}$$
 (11)

که در آن  $[ar{Q}^s_{kl}]$  نشان دهندهی ماتریس سفتی برای هر لایه در سیستم مختصات استوانه ای می باشد. مطابق شکل ۳، این ماتریس با توجه به زاویه ی الیاف مربوط به هر لایه نسبت به سیستم مختصات ستوانهای، به صورت زیر محاسبه می شود [۱۶]:

$$[\bar{Q}_{kl}^s] = [T_\sigma^s][Q_{kl}^s][T_\varepsilon^s]^{-1} \tag{11}$$

و در ماتریس فوق:

$$Q_{11}^{s} = E_{11}^{s} \frac{1 - v_{23}^{s} v_{32}^{s}}{\Delta}$$

$$Q_{12}^{s} = E_{22}^{s} \frac{v_{12}^{s} + v_{32}^{s} v_{13}^{s}}{\Delta}$$

$$Q_{13}^{s} = E_{22}^{s} \frac{v_{13}^{s} + v_{12}^{s} v_{23}^{s}}{\Delta}$$

$$Q_{22}^{s} = E_{22}^{s} \frac{1 - v_{31}^{s} v_{13}^{s}}{\Delta}$$

$$Q_{23}^{s} = E_{33}^{s} \frac{v_{23}^{s} + v_{21}^{s} v_{13}^{s}}{\Delta}$$

$$Q_{33}^{s} = E_{33}^{s} \frac{1 - v_{12}^{s} v_{21}^{s}}{\Delta}$$

$$Q_{44}^{s} = G_{23}^{s}$$

$$Q_{55}^s = G_{13}^s$$

$$Q_{66}^s = G_{12}^s$$

$$\Delta = 1 - v_{12}^{s} v_{21}^{s} - v_{23}^{s} v_{32}^{s} - v_{31}^{s} v_{13}^{s} - 2v_{21}^{s} v_{32}^{s} v_{13}^{s} \qquad (14)$$

$$a = 1 - v_{12}^{s} v_{21}^{s} - v_{23}^{s} v_{32}^{s} - v_{31}^{s} v_{13}^{s} - 2v_{21}^{s} v_{32}^{s} v_{13}^{s} \qquad (14)$$

$$a = 1 - v_{12}^{s} v_{21}^{s} - v_{23}^{s} v_{32}^{s} - v_{31}^{s} v_{13}^{s} - 2v_{21}^{s} v_{32}^{s} v_{13}^{s} \qquad (14)$$

$$a = 1 - v_{12}^{s} v_{21}^{s} - v_{23}^{s} v_{32}^{s} - v_{31}^{s} v_{13}^{s} - 2v_{21}^{s} v_{32}^{s} v_{13}^{s} \qquad (14)$$

$$a = 1 - v_{12}^{s} v_{13}^{s} - v_{23}^{s} v_{13}^{s} - v_{23}^{$$

 $-(n1^{s})^{2}$ 

0

 $(m1^{s})^{2}$ 

0

0

 $((n1^s)^2 - (m1^s)^2)$ 

نشریه علوم و فناوری **کا میو زیت** 

<sup>1.</sup> Incident traveling wave

<sup>2.</sup> Trace velocity

<sup>3.</sup> Hankel function 4 Local transfer matrix

<sup>5</sup> Global transfer matrix

$$\varepsilon_{rr}^{s} = \frac{\partial u_{r}^{s}}{\partial r}$$

$$\varepsilon_{\varphi\varphi\varphi}^{s} = \frac{1}{r} \frac{\partial u_{\varphi}^{s}}{\partial \varphi} + \frac{u_{r}^{s}}{r}$$

$$\varepsilon_{zz}^{s} = \frac{\partial u_{z}^{s}}{\partial z}$$

$$\gamma_{\varphi z}^{s} = \frac{\partial u_{\varphi}^{\varphi}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_{z}^{s}}{\partial \varphi}$$

$$\gamma_{r\varphi}^{s} = \frac{\partial u_{\varphi}^{\varphi}}{\partial r} - \frac{u_{\varphi}^{s}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_{r}^{s}}{\partial \varphi}$$

$$\gamma_{rz}^{s} = \frac{\partial u_{z}^{s}}{\partial z} + \frac{\partial u_{z}^{s}}{\partial r}$$
(1A)

z که در آن  $u_{arphi}$  و  $u_{z}$  به ترتیب جابجایی در راستای  $\mu_{arphi}$  و  $u_{arphi}$  میباشند.

حال با استفاده از روش موسوم به فضای حالت [۱۵] با جایگذاری (۱۸) در (۱۱) و سپس در (۱۷) و جدا کردن ترم  $\frac{\theta}{\partial r}$ معادلات حالت برای لایهی S-ام به دست میآید. سپس با انجام عملیات جبری و سادهسازی رابطهی زیر استخراج خواهد شد:  $\theta$ 

$$\frac{\partial}{\partial r}\boldsymbol{U}^{s} = \boldsymbol{M}^{s}\boldsymbol{U}^{s} \tag{19}$$

 $M^s$  و الم $u^s = [u^s_z u^s_{\varphi} u^s_r \sigma^s_{rr} \sigma^s_{r\varphi} \sigma^s_{rz}]$  که  $U^s = [u^s_z u^s_{\varphi} u^s_r \sigma^s_{r\varphi} \sigma^s_{rz}]$  ماتریس 6 × 6 ماتریس 6

$$\boldsymbol{M}^{S} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{M}_{11}^{S} & \boldsymbol{M}_{12}^{S} \\ \boldsymbol{M}_{21}^{S} & \boldsymbol{M}_{22}^{S} \end{bmatrix}$$
(Y · )

$$\mathbf{M}_{11}^{s} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{1}{r} & -\frac{\partial}{r\partial \varphi} \\ -\frac{\bar{Q}_{13}^{s}}{\bar{Q}_{33}^{s}} \frac{\partial}{\partial z} - \frac{\bar{Q}_{36}^{s}}{\bar{Q}_{33}^{s}} \frac{\partial}{r\partial \varphi} & -\frac{\bar{Q}_{23}^{s}}{\bar{Q}_{33}^{s}} \frac{\partial}{r\partial \varphi} - \frac{\bar{Q}_{36}^{s}}{\bar{Q}_{33}^{s}} \frac{\partial}{\partial z} & -\frac{\bar{Q}_{23}^{s}}{\bar{Q}_{33}^{s}} \frac{1}{r} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{M}_{12}^{s} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\bar{Q}_{45}^{s}}{\bar{\zeta}_{45}^{s}} & -\frac{\bar{Q}_{44}^{s}}{\bar{\zeta}_{45}^{s}} \\ 0 & -\frac{\bar{Q}_{55}^{s}}{\bar{\zeta}_{45}^{s}} & \frac{\bar{Q}_{45}^{s}}{\bar{\zeta}_{45}^{s}} \\ \frac{1}{\bar{Q}_{33i}^{s}} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(17)

$$\boldsymbol{M}_{21}^{s} = \begin{bmatrix} a11 & a12 & a13 \\ a21 & a22 & a23 \\ a31 & a32 & a33 \end{bmatrix}$$
(YY)

$$\begin{split} [T_{\sigma}^{s}] = & \\ \begin{bmatrix} (m1^{s})^{2} & (n1^{s})^{2} & 0 & 0 & 0 & -2m1^{s}n1^{s} \\ (n1^{s})^{2} & (m1^{s})^{2} & 0 & 0 & 0 & 2m1^{s}n1^{s} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(m1^{s})^{2} & -(n1^{s})^{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(n1^{s})^{2} & (m1^{s})^{2} & 0 \\ -m1^{s}n1^{s} & m1^{s}n1^{s} & 0 & 0 & 0 & ((n1^{s})^{2} - (m1^{s})^{2}) \end{bmatrix} \end{split}$$

که در معادلات بالا:

$$m1^{s} = \cos\theta^{s}$$
  
$$n1^{s} = \sin\theta^{s}$$
(19)

استوانه می الیاف نسبت به سیستم مختصات استوانه ای می باشد.  $heta^{\mathrm{s}}$ 





همچنین  $E_{21}^{s}$  و  $E_{23}^{s}$  و  $E_{23}^{s}$  مدول های الاستیسیته در جهات ۱، ۲ و ۳ میباشند.  $G_{12}^{s}$  و  $G_{13}^{s}$  مدولهای برشی و  $v_{12}^{s}$  ،  $v_{12}^{s}$  و  $v_{23}^{s}$  ضریبهای پواسون میباشند.

معادلات حرکت لایهی ۲-ام در محدودهی الاستیسیته خطی و در غیاب نیروهای حجمی<sup>۱</sup>، در سیستم مختصات استوانهای براساس مولفههای تنش و بر پایهی تئوری الاستیسیته سهبعدی به صورت زیر بیان میشوند [۱۶،۱۵].

$$\frac{\partial \sigma_{rr}^{s}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{r\varphi}^{s}}{r\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_{rz}^{s}}{\partial z} + \frac{1}{r} \left( \sigma_{rr}^{s} - \sigma_{\varphi\varphi}^{s} \right) = \rho_{c}^{s} \frac{\partial^{2} u_{r}^{s}}{\partial t^{2}}$$
$$\frac{\partial \sigma_{r\varphi}^{s}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{\varphi\varphi}^{s}}{r\partial \varphi} + \frac{2}{r} \sigma_{r\varphi} + \frac{\partial \sigma_{z\varphi}^{s}}{\partial z} = \rho_{c}^{s} \frac{\partial^{2} u_{\varphi}^{s}}{\partial t^{2}}$$

$$\frac{\partial \sigma_{rz}^{s}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{\varphi z}^{s}}{r \partial \varphi} + \frac{\sigma_{rz}^{s}}{r} + \frac{\partial \sigma_{zz}^{s}}{\partial z} = \rho_{c}^{s} \frac{\partial^{2} u_{z}^{s}}{\partial t^{2}} \tag{14}$$

که در آن  $ho_c$  چگالی جرمی ماده میباشد.

بر اساس تئوری سه بعدی الاستیسیته و با استفاده از سیستم مختصات استوانهای مولفههای کرنش بر اساس تغییر فرم کوچک برابر است با [۱۶،۱۵].

1. Body forces

$$\begin{split} u_{z}^{s} &= \sum_{n=0}^{\infty} R_{p} \bar{v}_{z,n}^{s} \left( \lambda \right) \exp(j(\omega t - k_{1z}z - n\varphi)) \\ u_{\varphi}^{s} &= \sum_{n=0}^{\infty} R_{p} \bar{v}_{\varphi,n}^{s} \left( \lambda \right) \exp(j(\omega t - k_{1z}z - n\varphi)) \\ u_{r}^{s} &= \sum_{n=0}^{\infty} R_{p} \bar{v}_{r,n}^{s} \left( \lambda \right) \exp(j(\omega t - k_{1z}z - n\varphi)) \\ \sigma_{rr}^{s} &= \sum_{n=0}^{\infty} \bar{Q}_{44}^{1} \bar{\sigma}_{rr,n}^{s} \left( \lambda \right) \exp(j(\omega t - k_{1z}z - n\varphi)) \\ \sigma_{r\varphi}^{s} &= \sum_{n=0}^{\infty} \bar{Q}_{44}^{1} \bar{\sigma}_{r\varphi,n}^{s} \left( \lambda \right) \exp(j(\omega t - k_{1z}z - n\varphi)) \\ \sigma_{rz}^{s} &= \sum_{n=0}^{\infty} \bar{Q}_{44}^{1} \bar{\sigma}_{rz,n}^{s} \left( \lambda \right) \exp(j(\omega t - k_{1z}z - n\varphi)) \end{split}$$
(YY)

(۲۷) در (۱۹) و به کارگیری تعامد توابع سه گانه<sup>۲</sup> معادلهی زیر استخراج می گردد: а

$$\frac{\partial}{\partial\lambda} \{ \boldsymbol{Y}_n^s \} = [\boldsymbol{F}_n^s] \{ \boldsymbol{Y}_n^s \}$$

$$(\boldsymbol{\gamma} \boldsymbol{\lambda})$$

$$\| \boldsymbol{Y}_n^s - \| \boldsymbol{Y}_n^s - [\boldsymbol{y}_n^s \ \boldsymbol{y}_n^s \ \boldsymbol{x}_n^s \ \boldsymbol{x}_$$

که 
$$Y_n^s = [v_{z,n}^s v_{\phi,n}^s v_{\sigma,n}^s \sigma_{\sigma,n}^s \sigma_{\sigma,n}^s \sigma_{\sigma,n}^s \sigma_{\sigma,n}^s r_{s,n}^s \sigma_{\sigma,n}^s \sigma_{\sigma,n}^s r_{s,n}^s r_n^s \sigma_{\sigma,n}^s r_n^s r_n$$

$$\boldsymbol{F}_{n,11}^{s} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & b13\\ 0 & b22 & b23\\ b31 & b32 & b33 \end{bmatrix}$$
(\vec{r}\)

. ~

$$b13 = jk_{1z}R_p$$

$$b22 = \frac{1}{\lambda}$$

$$b23 = \frac{n}{\lambda}j$$

$$b31 = \left(\frac{jR_p}{\bar{Q}_{33}^s}\right) \left(\bar{Q}_{33}^s k_{1z} + \frac{\bar{Q}_{36}^s n}{r}\right)$$
  

$$b32 = \left(-\frac{jR_p}{\bar{Q}_{33}^s}\right) \left(\bar{Q}_{36}^s k_{1z} + \frac{\bar{Q}_{23}^s n}{r}\right)$$
  

$$b33 = -\frac{\bar{Q}_{23}^s R_p}{\bar{Q}_{33}^s r}$$
((\*))

$$b33 = -\frac{\sqrt{23}}{\bar{Q}_{33}^s} \frac{r_p}{r} \tag{(71)}$$

$$F_{n,12}^{s} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\bar{Q}_{45}^{s} \bar{Q}_{44}^{1}}{\zeta_{45}^{s}} & -\frac{\bar{Q}_{44}^{s} \bar{Q}_{44}^{1}}{\zeta_{45}^{s}} \\ 0 & \frac{\bar{Q}_{55}^{s} \bar{Q}_{44}^{1}}{\zeta_{45}^{s}} & \frac{\bar{Q}_{45}^{s} \bar{Q}_{44}^{1}}{\zeta_{45}^{s}} \\ \frac{\bar{Q}_{44}^{1}}{\bar{Q}_{33}^{s}} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(\*Y)

2. Orthogonality of trigonometric functions

$$a11 = \frac{\zeta_{26}^{s}}{r^{2}} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \frac{\zeta_{12}^{s}}{r} \frac{\partial}{\partial z}$$

$$a12 = \frac{\zeta_{22}^{s}}{r^{2}} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \frac{\zeta_{26}^{s}}{r} \frac{\partial}{\partial z}$$

$$a13 = \rho_{c} \frac{\partial^{2}}{\partial t^{2}} + \frac{\zeta_{22}^{s}}{r^{2}}$$

$$a21 = -\frac{\zeta_{26}^{s}}{r^{2}} \frac{\partial^{2}}{\partial \varphi^{2}} - \zeta_{16}^{s} \frac{\partial^{2}}{\partial z^{2}} - \frac{(\zeta_{66}^{s} + \zeta_{12}^{s})}{r} \frac{\partial^{2}}{\partial \varphi \partial z}$$

$$a22 = \rho_{c} \frac{\partial^{2}}{\partial t^{2}} - \frac{\zeta_{22}^{s}}{r^{2}} \frac{\partial^{2}}{\partial \varphi^{2}} - \zeta_{66}^{s} \frac{\partial^{2}}{\partial z^{2}} - \frac{2\zeta_{26}^{s}}{r} \frac{\partial^{2}}{\partial \varphi \partial z}$$

$$a23 = -\frac{\zeta_{22}^{s}}{r^{2}} \frac{\partial}{\partial \varphi} - \frac{\zeta_{26}^{s}}{r} \frac{\partial^{2}}{\partial z^{2}}$$

$$a31 = \rho_{c} \frac{\partial^{2}}{\partial t^{2}} - \frac{\zeta_{66}^{s}}{r^{2}} \frac{\partial^{2}}{\partial \varphi^{2}} - \zeta_{11}^{s} \frac{\partial^{2}}{\partial z^{2}} - \frac{2\zeta_{16}^{s}}{r} \frac{\partial^{2}}{\partial \varphi \partial z}$$

$$a32 = -\frac{\zeta_{26}^{s}}{r^{2}} \frac{\partial^{2}}{\partial \varphi^{2}} - \zeta_{16}^{s} \frac{\partial^{2}}{\partial z^{2}} - \frac{(\zeta_{66}^{s} + \zeta_{12}^{s})}{r} \frac{\partial^{2}}{\partial \varphi \partial z}$$

$$a33 = -\frac{\zeta_{26}^{s}}{r^{2}} \frac{\partial}{\partial \varphi} - \frac{\zeta_{12}^{s}}{r} \frac{\partial}{\partial z}$$
(YF)

همچنين:

$$\boldsymbol{M}_{22}^{s} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} \left( \frac{\bar{Q}_{23}^{s}}{\bar{Q}_{33}^{s}} - 1 \right) & -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} & -\frac{\partial}{\partial z} \\ -\frac{\bar{Q}_{23}^{s}}{\bar{Q}_{33}^{s} r} \frac{\partial}{\partial \varphi} - \frac{\bar{Q}_{36}^{s}}{\bar{Q}_{33}^{s}} \frac{\partial}{\partial z} & -\frac{2}{r} & 0 \\ -\frac{\bar{Q}_{36}^{s}}{\bar{Q}_{33}^{s} r} \frac{\partial}{\partial \varphi} - \frac{\bar{Q}_{13}^{s}}{\bar{Q}_{33}^{s}} \frac{\partial}{\partial z} & 0 & -\frac{1}{r} \end{bmatrix}$$
(Ya)

که در روابط بالا:

(79)

<sup>1.</sup> Normal mode expansions

 $Y_{n}^{s}(\lambda) = Y_{n}^{s}(\lambda_{s,m-1}) \exp[(\lambda - \lambda_{s,m-1})F_{n}^{s}(\lambda_{s,m-1})]$ (79)  $\lambda_{s,m-1} \leq \lambda \leq \lambda_{s,m} \quad \text{in the set of } \lambda \leq \lambda_{s,m-1} \leq \lambda \leq \lambda_{s,m-1}$ 

با استفاده  $(R_{s,0} + (m-1)h_{s,m})/R_p \le \lambda \le (R_{s,0} + mh_{s,m})/R_p$ ، با استفاده از رابطه ی (۳۶) برای هر لایه از پوستهی استوانهای کامپوزیتی میتوان متغییرهای حالت در سطح خارجی لایه -8م را به مقادیر متناظر آن در سطح داخلی، توسط یک ماتریس مودال محلی  $T_n^s$  مرتبط نمود.

$$Y_n^s(\lambda_{s,p}) = T_n^s Y_n^s(\lambda_{s,0}) \tag{(47)}$$

که در آن  $T_n^s = \prod_{m=1}^p \exp[h_{s,m} F_n^s (\lambda_{s,m-1})/R_p]$ ماتریس مودال محلی می باشد و طبق فرآیند زیر به دست می آید:

$$Y_n^s(\lambda_{s,p}) = Y_n^s(\lambda_{s,p-1})T_n^s(\lambda_{s,p})$$
  

$$Y_n^s(\lambda_{s,p-1}) = Y_n^s(\lambda_{s,p-2})T_n^s(\lambda_{s,p-1})$$
  

$$Y_n^s(\lambda_{s,p-2}) = Y_n^s(\lambda_{s,p-3})T_n^s(\lambda_{s,p-2})$$

$$\boldsymbol{Y}_{n}^{s}(\lambda_{s,1}) = \boldsymbol{Y}_{n}^{s}(\lambda_{s,0})\boldsymbol{T}_{n}^{s}(\lambda_{s,1}) \tag{(\%)}$$

در نتیجه خواهیم داشت.  

$$\boldsymbol{T}_{n}^{s} = \boldsymbol{T}_{n}^{s}(\lambda_{s,p})\boldsymbol{T}_{n}^{s}(\lambda_{s,p-1})\boldsymbol{T}_{n}^{s}(\lambda_{s,p-2}) \dots \boldsymbol{T}_{n}^{s}(\lambda_{s,1}) = \prod_{m=1}^{p} \boldsymbol{T}_{n}^{s}(\lambda_{s,m})$$
(٣٩)

#### ۴-۳- ماتریس انتقال عمومی

با توجه به اینکه تمامی لایههای پوستهی کامپوزیتی در سطوح مشترکشان کاملا به یکدیگر متصل شدهاند، میتوان در مرز هر دو لایه مجاور هم رابطهی (۴۰) را بیان نمود.

$$Y_n^s(\lambda_{s,p}) = Y_n^{s+1}(\lambda_{s+1,0}) \tag{(f.)}$$

در نتیجه با اعمال شرایط پیوستگی بین سطوح مشترک تمامی لایهها مطابق رابطهی (۳۶)، متغییرهای حالت در سطح خارجی پوسته را می توان به مقادیر متناظر در سطح داخلی آن توسط یک ماتریس مودال عمومی  $D_n$  به صورت زیر مرتبط ساخت:

$$\boldsymbol{Y}_{n}^{q}(\lambda_{q,p}) = \boldsymbol{D}_{n}\boldsymbol{Y}_{n}^{1}(\lambda_{1,0}) \tag{(f1)}$$

$$\boldsymbol{D}_{n} = \prod_{s=1}^{q} \boldsymbol{T}_{n}^{s} = \prod_{s=1}^{q} (\prod_{m=1}^{p} \exp[h_{s,m} \boldsymbol{F}_{n}^{s} (\lambda_{s,m-1}) / R_{p}])$$
(f7)

$$Y_n^q(\lambda_{q,p}) = [v_{z,n}^q(\lambda_{q,p}) v_{\varphi,n}^q(\lambda_{q,p}) v_{r,n}^q(\lambda_{q,p}) \sigma_{rr,n}^q(\lambda_{q,p}) \sigma_{r\varphi,n}^q(\lambda_{q,p}) \sigma_{rz,n}^1(\lambda_{q,p})]^{\frac{1}{2}}$$

(47)

#### ۵- شرایط مرزی

با استفاده از شرایط مرزی در محیط بیرون و داخل پوستهی استوانهای کامپوزیتی، می توان ضرایب مجهول  $P_{1n}^R$  و  $P_{3n}^T$  و همچنین ضرایب مجهول بردار حالت مودال رابطه (۴۴) را محاسبه نمود.

$$\mathbf{F}_{\hat{n}}(\lambda_{1,0}) = [\bar{v}_{z,n}^{1}(\lambda_{1,0}) \, \bar{v}_{\varphi,n}^{1}(\lambda_{1,0}) \, \bar{v}_{r,n}^{1}(\lambda_{1,0}) \, \bar{\sigma}_{rr,n}^{1}(\lambda_{1,0}) \, \bar{\sigma}_{r\varphi,n}^{1}(\lambda_{1,0}) \, \bar{\sigma}_{rz,n}^{1}(\lambda_{1,0})]^{T}$$

$$(\mathbf{f}^{\mathbf{f}})$$

تحلیل سه بعدی انتقال توان صوتی در پوستههای استوانهای جدار ضخیم از ...

$$\boldsymbol{F}_{n,21}^{s} = \begin{bmatrix} c11 & c12 & c13\\ c21 & c22 & c23\\ c31 & c32 & b33 \end{bmatrix}$$
(°°°)

که در ماتریس (۳۳):

$$\begin{split} c11 &= \left( -\frac{jR_p^{-2}}{\bar{Q}_{44}^1 r^2} \right) (\zeta_{26}^s n + \zeta_{12}^s k_{1z} r) \\ c12 &= \left( -\frac{jR_p^{-2}}{\bar{Q}_{44}^1 r^2} \right) (\zeta_{22}^s n + \zeta_{26}^s k_{1z} r) \\ c13 &= \left( \frac{R_p^{-2}}{\bar{Q}_{44}^1 r^2} \right) \left( -\rho_c \omega^2 + \frac{\zeta_{22}^s}{r^2} \right) \\ c21 &= \frac{R_p^{-2}}{\bar{Q}_{44}^1 r^2} \left( \zeta_{26}^s n^2 + nk_{1z} r (\zeta_{66}^s + \zeta_{12}^s) + \zeta_{16}^s k_{1z}^{-2} r^2 \right) \\ c22 &= \left( \frac{R_p^{-2}}{\bar{Q}_{44}^1 r^2} \right) \left( -\rho_c \omega^2 r^2 + \zeta_{22}^s n^2 + \zeta_{66}^s k_{1z}^{-2} r^2 + 2\zeta_{26}^s nk_{1z} r \right) \\ c23 &= \frac{R_p^{-2} j}{\bar{Q}_{44}^1 r^2} (\zeta_{22}^s n + \zeta_{26}^s k_{1z} r) \\ c31 &= \frac{R_p^{-2} j}{\bar{Q}_{44}^1 r^2} \left( -\rho_c \omega^2 r^2 + \zeta_{66}^s n^2 + \zeta_{11}^s k_{1z}^{-2} r^2 + 2\zeta_{26}^s nk_{1z} r \right) \\ c32 &= \frac{R_p^{-2} j}{\bar{Q}_{44}^1 r^2} (\zeta_{26}^s n^2 + nk_{1z} r (\zeta_{66}^s + \zeta_{12}^s) + \zeta_{16}^s k_{1z}^{-2} r^2) \\ c33 &= \frac{R_p^{-2} j}{\bar{Q}_{44}^1 r^2} (\zeta_{26}^s n + \zeta_{12}^s k_{1z} r) \end{split}$$

همچنين:

$$\mathbf{F}_{n,22}^{s} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda} \left( \frac{\bar{Q}_{23}^{s}}{\bar{Q}_{33}^{s}} - 1 \right) & -\frac{n}{\lambda} j & j k_{1z} R_{p} \\ \frac{j}{\lambda} \left( \frac{\bar{Q}_{23}^{s} n}{\bar{Q}_{33}^{s}} + \frac{\bar{Q}_{36}^{s} k_{1z} r}{\bar{Q}_{33}^{s}} \right) & -\frac{2}{\lambda} & 0 \\ \frac{j}{\lambda} \left( \frac{\bar{Q}_{36}^{s} n}{\bar{Q}_{33}^{s}} - \frac{\bar{Q}_{13}^{s} k_{1z} r}{\bar{Q}_{33}^{s}} \right) & 0 & -\frac{1}{\lambda} \end{bmatrix}$$
(7a)

۴-۲- ماتریس انتقال محلی

همانگونه که ملاحظه میشود ضرایب ماتریس  $F_n^s$  ثابت نبوده و تابعی از مختصه شعاعی میباشند  $\lambda = r/R_p$ ، لذا حل مستقیم آن بسیار دشوار است. برای این منظور از روش مدل لایهای تقریبی به همراه رویکرد ماتریس انتقال بهره گیری میشود.

تحلیل سه بعدی انتقال توان صوتی در پوستههای استوانهای جدار ضخیم از ...

$$F = -\left(\frac{1}{\bar{Q}_{44}^1}\right)\left(P_0\varepsilon_n(-j)^n J_n(k_{1r}R_p)\right) \tag{$\%$}$$

(d = 3,4, که  $(D_n^{d,e})$  المانهای ماتریس انتقال  $D_n$  میباشد که  $(D_n^{d,e})$  المانهای  $(D_n^{d,e})$  و  $(D_n^{d,e}) = e = 1,2,\dots,6)$ 

## ۶- ضريب افت انتقال صوت

ضریب افت انتقال صوت (TL) نسبت توان موج برخوردی به توان موج منتقل شده در طول واحد استوانه می باشد و به صورت زیر تعریف می شود [۱۷].

$$TL = 10\log_{10}\left(\frac{W^{I}}{\sum_{n=0}^{\infty} W_{n}^{T}}\right)$$
(F9)

که در آن <sup>WI</sup> توان موج منتقل شده در طول واحد استوانه به صورت زیر

$$w^{I} = R_{p} \frac{\cos(\gamma) P_{0}^{2}}{\rho_{1} C_{1}} (1 + M \sin(\gamma))$$
 (۵۰)

توان موج منعکس شده در طول واحد استوانه به صورت زیر میباشد:  $W_n^T$ 

$$W_{n}^{T} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ P_{3n}^{T} H_{n}^{1}(k_{3r}r) \cdot (j\omega(\bar{v}_{r,n}^{1}(\lambda_{1,0}))^{*} \right\}$$
$$\int_{0}^{2\pi} \cos^{2}(n\varphi) r d\varphi =$$
$$\frac{\pi R_{o}}{\varepsilon_{n}} \times \operatorname{Re} \left\{ P_{3n}^{T} H_{n}^{1}(k_{3r}r) \cdot (j\omega(\bar{v}_{r,n}^{1}(\lambda_{1,0}))^{*} \right\}$$
(A1)

که در آن Re و علامت \* قسمت حقیقی و مزدوج عبارت فوق می باشند. در نتیجه افت انتقال صوت به صورت زیر محاسبه میشود [۱۲].

$$TL = -10\log_{10} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{Re\left\{P_{3n}^{T} \cdot H_{n}^{1}(k_{3r}R_{o}) \cdot \left(j\omega\left(\bar{v}_{r,n}^{1}(\lambda_{1,0})\right)\right)\right)\right\}}{\varepsilon_{n}\cos(\gamma) \cdot P_{0}^{2}(1+M\sin(\gamma))} \times \rho_{1}C_{1}\pi$$

$$(\Delta \Upsilon)$$

۷- فلوچارت روند حل مسئله و الگوريتم همگرايي

سریهای بیان شده در معادلات، سریهای بینهایت میباشند و بررسی بی-نهایت مود غیر قابل انجام میباشد. و از طرفی اگر تعداد مود کم در محاسبات استفاده گردد، افت انتقال صوت بیش از حد میگردد که در کار تنگ و همکاران [۱۰]، افت انتقال صوت بسیار بالا برای یک پوستهی استوانهای نسبتا نازک گزارش شد که ناشی از حل واگرا میباشد. بنابراین با استفاده از یک الگوریتم مناسب، سری در یک مود مناسب مختوم میگردد. در واقع اگر در یک فرکانس مشخصی این الگوریتم همگرا گردد، در تمامی فرکانسهای پایین تر از آن همگرا میشود، زیرا تعداد مودهای بالاتری جهت محاسبهی ترم ضریب افت انتقال صوت در فرکانسهای بالاتر نیاز است. بنابراین با لحاظ نمودن ماکزیم تعداد تکرار، یک پروسه تکراری در هر فرکانس استفاده شده مودن ماکزیم تعداد تکرار، یک پروسه تکراری در هر فرکانس استفاده شده نمودن ماکزیم تعداد تکرار، یک پروسه تکراری در هر فرکانس استفاده شده میابد. میابد افت انتقال صوت محاسبه شده در دو محاسبهی متوالی هنگامیکه ضریب افت انتقال صوت محاسبه شده در دو محاسبهی متوالی دارای درصد خطایی کمتر از خطای مجاز باشد، تحلیل همگرایی خاتمه میابد. شکل ۴، فلوچارت روند حل مسئله و همچنین الگوریتم همگرایی را نشان میدهد:

$$\begin{split} \hat{\sigma}_{rr}^{I}(R_{o},\varphi,z,t) &= -\rho_{1}(\frac{\partial}{\partial t} + V.\nabla)^{2}u_{r}^{q} \\ \frac{\partial(P_{1}^{I} + P_{1}^{R})}{\partial r} &= -\rho_{1}(\frac{\partial}{\partial t} + V.\nabla)^{2}u_{r}^{q} \\ \sigma_{rr}^{q}(R_{p},\varphi,z,t) &= -(P_{1}^{I} + P_{1}^{R}) \\ \sigma_{r\varphi}^{q}(R_{p},\varphi,z,t) &= 0 \\ (f\Delta) \\ \vdots \\ \hat{\sigma}_{rz}^{q}(R_{p},\varphi,z,t) &= 0 \\ \hat{\sigma}_{rz}^{q}(R_{p},\varphi,z,t) &= 0 \\ \hat{\sigma}_{rz}^{q}(R_{p},\varphi,z,t) &= 0 \\ \sigma_{rr}^{1}(R_{o},\varphi,z,t) &= -P_{3}^{T} \\ \sigma_{r\varphi}^{1}(R_{o},\varphi,z,t) &= 0 \\ \sigma_{rz}^{1}(R_{o},\varphi,z,t) &= 0 \\ (f\beta) \\ \end{split}$$

با جایگذاری معادلات (۱) تا (۱۰) و همچنین معادلهی (۴۱) در شرایط مرزی داریم:

$$A=-(\frac{1}{\rho_{1}R_{p}\omega^{2}})(P_{1n}^{R}k_{1r}H_{n}^{2\prime}(k_{1r}R_{p}))$$

$$B = -(\frac{1}{\rho_3 R_p \omega^2}) (P_{3n}^T k_{3r} H_n^{1'}(k_{3r} R_o))$$

$$C = (\frac{1}{\bar{Q}_{44}^1})(P_{1n}^R H_n^2(k_{1r}R_p))$$
$$D = (\frac{1}{\bar{Q}_{44}^1})(P_{3n}^T H_n^1(k_{3r}R_o))$$

$$E = (\frac{1}{\rho_1 R_p \omega^2}) (P_0 \varepsilon_n (-j)^n J'_n k_{1r} (k_{1r} R_p))$$

(۴۷)

که:



شکل ۴ فلوچارت روند حل مسئله و الگوریتم همگرایی

# ۸– نتایج عددی ۸–۱– اعتبار سنجی نتایج

به منظور اعتبارسنجی نتایج، لازم است تا نتایج به دست آمده، با نتایج سایر محققان مقایسه شود. شکل ۵، مقایسه نتایج حاصل از کار ارائه شده توسط لی وکیم [۹] و مطالعهی حاضر، برای پوسته نازک ایزوتروپیک از جنس فولاد با مشخصات مرجع [۹] را نشان میدهد. با مقایسه بین مطالعهی حاضر و روش ارائه شده توسط لی و کیم مشاهده میشود که نقاط نزول افت انتقال صوت و رفتار نمودار در هر دو روش برابر می باشد اما اختلافاتی بین نتایج دو مطالعه وجود دارد که دلیل آن خطاهای عددی وارد شده در محاسبهی توان برخوردی و انتقالی در روش لی و کیم میباشد.

شکل ۶، مقایسه نتایج حاصل از مطالعه ی حاضر و کار ارائه شده توسط کوال [۴] برای پوسته ایزوتروپیک با ضخامت کم و از جنس آلومینیوم با مشخصات مرجع [۴] را نشان می دهد. با مقایسه ی نتایج مطالعه ی حاضر و کار ارائه شده توسط کوال، اختلافاتی بین نتایج در فرکانسهای پایین مشاهده می شود که علت آن استفاده از معادلات فلاگ در کار ارائه شده توسط کوال می باشد. نتایج حاصل از معادلات فلاگ در فرکانسهای پایین تفاوت قابل توجهی با تئوریهای دیگر دارند. همچنین معادلات حرکت فقط در یک راستا در نظر گرفته شده است و از راستاهای دیگر صرف نظر شده است.

شکل ۷، مقایسه نتایج حاصل از مطالعه ی حاضر و کار ارائه شده توسط بلیس [۸] برای پوسته ایزوتروپیک از جنس آلومینیوم با مشخصات مرجع [۸] را نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می شود تطبیق بسیار خوبی بین مدل حاضر و کار ارائه شده توسط بلیس وجود دارد که دلیل آن این است که بلیس در کار خود اثرات اینرسی چرخشی و طولی را در نظر گرفته است و در مدل سازی خود از میدان جابجایی سه بعدی ولی از مرتبه ی اول بهره برده است. بنابراین همانطور که نتایج نشان می دهد کار ارائه شده توسط بلیس از و بررسی دقیق تر بین کار ارائه شده در این پژوهش و مطالعات صورت گرفته در گذشته، مقادیر افت انتقال صوت در مطالعه ی حاضر و کارهای گذشته در فرکانسهای خاص به صورت جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۵ مقایسه نتایج مطالعهی حاضر با روش کیم [۹]



شکل ۷ مقایسه نتایج مطالعهی حاضر با روش بلیس [۸]

در این جدول مقادیر افت انتقال صوت در فرکانسهای ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ بین کار ارائه شده در این مقاله و مطالعات صورت گرفته توسط لی و کیم [۹]، کوال [۴] و بلیس [۸] آمده است. همچنین برای درک بهتر موضوع، درصد خطای هریک از این کارها نسبت با کار ارائه شده در این مقاله، محاسبه شده و در جدول ۲ آمده است.

جدول ۱ مقایسه میزان افت انتقال صوت بین کار ارئه شده و مطالعات گذشته

۱۵۰۰۰	1	۵۰۰۰	۱۰۰۰	فرکانس (Hz)		
-	4./21	۲۶/۸۵	۵۸/۴۲	مطالعهي حاضر	,	
-	۵٩/۱V	74/44	۶۳/۸	لي و کيم	1	time of the St
۵۵	۲۳/۶۳	41/24	29/14	مطالعهي حاضر	~	اقت انتقال
۵۵/۸۲	۲۳/۷۸	41/20	۲۹/۸۳	كوال	١	صوت dD،
-	-	۵۰/۷۶	۳۲/۷۵	مطالعهي حاضر	•	(ub)
-	-	۵۱/۵۱	377/18	بليس	١	

۸-۲- بررسی پارامترهای موثر بر افت انتقال صوت

در این بخش به منظور بررسی کامل و دقیق افت انتقال صوت از یک پوستهی استوانهای کامپوزیتی، اثرات هریک از پارامترهای سازهای و آکوستیکی مورد

مطالعه قرار گرفته است. مشخصات سازه و شرایط محیطی داخل پوستهی. استوانهای مطابق با جدول ۳ میباشد.

**جدول ۲** درصد خطای هریک از مطالعات گذشته در فرکانس.های خاص نسبت بهکار ۱٫ ائه شده

			).		
10	۱۰۰۰۰	۵۰۰۰	1	فر کانس (Hz)	
-	46/08	- <b>\</b> / <b>\</b>	٩/٢	لي و کيم	درصد
١/۴٩	•/8٣	٠/٧۵	۲/۳۶	كوال	خطا
-	-	۱/۴	1/18	بليس	(/.)

رهای موثر بر افت انتقال	جهت بررسی پارامت	و خواص پوسته	۳ شرایط محیطی	جدول
-------------------------	------------------	--------------	---------------	------

		صوت		
محيط داخل	محيط خارج	پوسته		
هوا	هوا	گلس اپوکسی	گرافیت اپوکسی	مادہ
٠/٩۴	٠/٣٧٩۵	۱۹۰۰	18	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
-	-	۳۸/۶۱	۱۳۷/۹۰	E <sub>11</sub> (Gpa)
-	-	٨/٢٧	٨/٩۶	E <sub>22</sub> (Gpa)
-	-	٨/٩۶	٨/٩۶	E <sub>33</sub> (Gpa)
-	-	۴/۱۴	٧/١٠	G <sub>12</sub> (Gpa)
-	-	4/14	٧/١٠	<i>G</i> <sub>13</sub> (Gpa)
-	-	٣/۴۵	۶/۲۱	<i>G</i> <sub>23</sub> (Gpa)
-	-	•/٢۶	• /٣•	$v_{12}$
-	-	•/7۶	• /٣•	$v_{13}$
-	-	•/٣۴	۰/۴۹	$v_{23}$
۳۲۸/۵	K98/8	-	-	سرعت صوت (m/s)
-	-	۱۵	۱۵	ضخامت (mm)
-	-	١/۵	$1/\Delta$	شعاع (m)
	$\gamma = f \Delta$			زاويه برخورد

شکل ۸، تاثیر لایه چینی پوسته ی استوانه ای کامپوزیتی بر افت انتقال صوت را نشان می دهد. در این شکل پوسته از جنس گلس اپوکسی می باشد. همانطور که شکل ۸ نشان می دهد، تغییر زوایای چیدمان الیاف اثر مستقیمی بر افت انتقال صوت دارد. با توجه به اینکه تغییر زوایای الیاف لایه ها باعث ایجاد تغییرات در خواص مکانیکی پوسته می شود. لذا بیشترین تاثیر آن در ناحیه سفتی کنترل می باشد و باعث ایجاد تغییرات بیشتر افت انتقال صوت در ناحیه سفتی کنترل می باشد و باعث ایجاد تغییرات بیشتر افت انتقال صوت کامپوزیت ها نسبت به دیگر مواد می باشد. زیرا می توان با تغییر در چیدمان لایه ها، مقدار افت انتقال صوت را تغییر داد، در صورتی که در دیگر مواد مانند: آلومینیوم اینطور نیست. نشریه علوم و فناوری **کا میو** *ز***یت** 



شکل ۸ تاثیر زوایای الیاف و چیدمان لایهها بر افت انتقال صوت





شکل ۹، اثر جنس ماده بر افت انتقال صوت پوستهی استوانهای کامپوزیتی با چیدمان <sub>s</sub>[0,90,45, -45,0] را نشان میدهد. در شکل ۹ نمودار افت انتقال صوت برای سه نوع ماده مختلف: گلساپوکسی، گرافیتاپوکسی و بورون اپوکسی ارسم شده است. با توجه به شکل ۹، می توان نتیجه گرفت که گرافیت ایوکسی بیشترین مقدار افت انتقال صوت را در ناحیه سفتی کنترل نسبت به مواد دیگر دارا میباشد که علت این امر مدول الاستیسیتهی بالاتر آن نسبت به مواد دیگر است. همچنین به دلیل اینکه گلساپوکسی چگالی بیشتری نسبت به دو ماده دیگر دارد، لذا در ناحیه جرم کنترل گلساپوکسی دارای بیشترین مقدار افت انتقال صوت میباشد. در ناحیه بعد از فرکانس انطباق، نمودار افت انتقال صوت در موادی که دارای مدول بالاتری میباشند با شیب بالاتری افزایش می یابد که نمودار گرافیت اپوکسی مبین این موضوع مىباشد.

شکل ۱۰، اثر زاویه برخورد موج بر افت انتقال صوت پوستهی استوانهای کامپوزیتی باچیدمان <sub>s</sub>[0,90,45,-45,0] و از جنس گلساپوکسی را نشان

میدهد. با توجه به اینکه هرچه زاویه برخورد موج نسبت به محور طولی پوسته افزایش یابد، عدد موج طولی کاهش و عدد موج شعاعی افزایش مى يابد، لذا اين باعث افزايش موج عبورى شده و افت انتقال صوت كاهش مییابد. همانطور که شکل ۱۰ نشان میدهد نمودار افت انتقال صوت با در نظر گرفتن زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه رسم شده است. با توجه به شکل ۱۰ مى توان نتيجه گرفت كه، افزايش زاويه برخورد باعث كاهش افت انتقال صوت در ناحیه سفتی کنترل می شود در صورتی که این امر در ناحیه جرم کنترل عکس میباشد. یعنی با افزایش زاویه برخورد، افت انتقال صوت در این ناحیه، افزایش می یابد. شکل ۱۱، اثر ضخامتهای متفاوت در افت انتقال صوت پوستهی استوانهای کامپوزیتی باچیدمان s\_[0,90,45,-45,0] و از جنس گلساپوکسی را نشان میدهد.





شکل ۱۱ تاثیر ضخامت پوسته بر افت انتقال صوت

فركانس (Hz)

در شکل ۱۱، نمودار افت انتقال صوت با در نظر گرفتن ضخامتهای ۵/۰، ۱ و ۱/۵ میلیمتر برای پوستهی استوانهای رسم شده است. با توجه به شکل ۱۱ مى توان نتيجه گرفت كه افت انتقال صوت با افزايش ضخامت، افزايش مى يابد. یعنی در یک سازه با در نظر گرفتن محدودیت وزن، می توان ضخامت را افزایش داد. اما این محدودیت در موادی مانند: فولاد بیشتر میباشد در صورتی که سازههای کامپوزیتی به دلیل وزن کم از محدودیت کمتری

<sup>1.</sup> Graphite/Epoxy

<sup>2.</sup> Boron/Epoxy

برخوردار میباشند و این، یکی دیگر از مزیتهای کامپوزیتها نسبت به دیگر مواد میباشد. شکل ۱۲، مقایسه ی بین افت انتقال صوت در پوسته ی استوانهای ارتوتروپیک و پوسته ی استوانهای کامپوزیتی با چیدمانهای متفاوت ار جنس گرافیت اپوکسی و با اندازه و شرایط محیطی یکسان را نشان می دهد. همانگونه که مشخص است در پوسته ی کامپوزیتی، با تغییر چیدمان لایهها، میزان افت انتقال صوت تغییر می کند. در صورتی که در پوسته ی ارتوتروپیک نهایتاً تغییر جنس پوسته باعث تغییر در افت انتقال صوت آن می شود. بنابراین از مزیتها و برتریهای پوسته ی کامپوزیتی نسبت به پوسته ی ارتوتروپیک در تغییر افت انتقال صوت با تغییر در نحوه ی چیدمان پوسته ی ارتوتروپیک در تغییر افت انتقال صوت با تغییر در نحوه ی چیدمان پوسته ی ارتوتروپیک در تغییر افت انتقال صوت با تغییر در نحوه ی چیدمان پوسته ی ارتوتروپیک در تغییر افت انتقال صوت با تغییر در نحوه ی چیدمان پوسته ی ارتوتروپیک در تغییر افت انتقال صوت با تغییر در نحوه ی چیدمان پوسته ی ارتوتروپیک در تعییر افت انتقال صوت با تغییر در نحوه ی چیدمان پوسته استوانه ای کامپوزیتی بهره گیری نمود. در واقع در اینگونه پوسته ها، میتوان په اندازه ی مورد نیاز باشد. شکل ۱۳، مقایسه ی افت انتقال صوت در پوسته ی استوانهای ارتوتروپیک و پوسته ی استوانه ای کامپوزیتی با اندازه و شرایط محیطی یکسان را نشان می دهد.



شکل ۱۲ مقایسهی افت انتقال صوت در پوستهی استوانهای کامپوزیتی با چیدمان متفاوت و پوستهی استوانهای ارتوتروپیک



شکل ۱۳ مقایسهی افت انتقال صوت در پوستهی استوانهای ارتوتروپیک و پوستهی استوانهای کامپوزیتی با چیدمان و جنسهای مختلف

با توجه به شکل ۱۳، در پوسته استوانه ای کامپوزیتی می توان هر دوی جنس و زاویه لایه ها را متفاوت در نظر گرفت. بنابراین یکی دیگر از مزیت ها و امتیازات مهم و ارزشمند پوسته های کامپوزیتی نسبت به پوسته های ارتو تروپیک، توانایی در استفاده از لایه ها با زوایا و جنس های متفاوت می باشد. بنابراین طراح با تغییر هر کدام از این موارد می تواند افت انتقال صوت پوسته را به میزان مورد نیاز ایجاد نماید.

#### ۹- نتیجهگیری

در این مقاله به تحلیل سه بعدی افت انتقال صوت در یک پوسته ی استوانه ای از جنس کامپوزیت لایه ای بر مبنای تئوری الاستیسیته سه بعدی پرداخته شده است. در این مدل، پس از استخراج معادلات حاکم بر پوسته ی استوانه ای و به کارگیری روش فضای حالت به حل دقیق معادلات با استفاده از روش مدل لایه تقریبی به همراه رویکرد ماتریس انتقال پرداخته شده است. سپس با در صوت مورد محاسبه قرار گرفته است. نتایج، بر دقت و صحت روش ارائه شده موت مورد محاسبه قرار گرفته است. نتایج، بر دقت و صحت روش ارائه شده بالا در محاسبه ی انتقال صوت در پوستههای استوانه ای با ضخامت زیاد، باعت تسریع در محاسبه ی افت انتقال صوت نیز می شود. همچنین یکی از باعت تسریع در محاسبه ی افت انتقال صوت نیز می شود. همچنین یکی از رایای پوستههای کامپوزیتی نسبت به دیگر مواد، وابستگی افت انتقال صوت در این پوستههای کامپوزیتی نسبت به دیگر مواد، وابستگی افت انتقال صوت زیرا با تغییر هریک از این موارد می توان افت انتقال صوت را بسته به شرایط مورد نیاز، کنترل نمود.

#### ۱۰- مراجع

- Smith, JPW., "Sound Transmission Through Thin Cylindrical Shells," Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 29, No. 6, pp. 721-729, 1957.
- [2] White, PH., "Sound Transmission Through a Finite, Closed, Cylindrical Shell," Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 40, No. 5, pp. 1124-1130, 1966.
- [3] Foxwell, JH. and Franklin, RE., "The Vibrations of a Thin-Walled Stiffened Cylinder in an Acoustic Field," Aeronaut Q; Vol. 10, pp. 47–64, 1959.
- [4] Koval, LR., "on Sound Transmission Into a Thin Cylindrical Shell Under "Flight Conditions"," Journal of Sound and Vibration, Vol. 48, No. 2, pp. 265-275, 1976.
- [5] Koval, LR., "on Sound Transmission Into an Orthotropic Shell," Journal of Sound and Vibration, Vol. 63, No. 1, 51-59, 1979.
- [6] Blaise, A. and Lesueur, C., "Acoustic Transmission Through a 2-D Orthotropic Multilayered Infinite Cylindrical Shell," Journal of Sound and Vibration, Vol. 155, No. 1, pp. 95-109, 1992.
- [7] Blaise, A. and Lesueur, C., "Acoustic Transmission Through a 3-D Orthotropic Multilayered Infinite Cylindrical Shell. Part I: Formulation of The Problem," Journal of Sound and Vibration, Vol. 171, No. 5, pp. 651-664, 1994.
- [8] Blaise, A. and Lesueur, C., "Acoustic Transmission Through a 3-D Orthotropic Multilayered Infinite Cylindrical Shell. Part II: Validation and Numerical Exploitation For Large Structures," Journal of Sound and Vibration, Vol. 171, No. 5, pp. 665-680, 1994.
- [9] Lee, JH. and Kim, J., "Study on Sound Transmission Characteristics of a Cylindrical Shell Using Analytical and Experimental Models," Applied Acoustics, Vol. 65, No. 6, pp. 611-632, 2003.
- [10] Tang, YY. Silcox, RJ. and Robinson, JH., "Sound Transmission Through Two Concentric Cylindrical Sandwich Shells," In: Proceedings of the 14th International Modal Analysis Conference. Japan 1996.
- [11] Daneshjou, K. Nouri, A. and Talebitooti, R., "Sound Transmission Through Laminate Composite Cylindrical Shells Using Analytical Model," Arch Appl Mech, Vol. 77, pp. 363-379, 2007.
- [12] Daneshjou, K. Nouri, A. R. and Talebitooti, R., "Analytical Model of Sound Transmission Through Laminated Composite Cylindrical Shells Considering Transverse Shear Deformation," Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), Vol. 29, No. 9, pp. 1165-1177, 2008.
- [13] Daneshjou, K. Shokrieh, M. M. Moghaddam, MG. and Talebitooti, R., "Analytical Model of Sound Transmission Through Relatively Thick FGM Cylindrical Shells Considering Third Order Shear Deformation Theory," Composite Structures, Vol. 93, pp. 67-78, 2010.

نشریه علوم و فناوری **کا** *م***پو** *ز***یت** 

#### تحلیل سه بعدی انتقال توان صوتی در پوستههای استوانهای جدار ضخیم از ...

- [14] Shojaeefard, MH. Talebitooti, R. Ahmadi, R. and Gheibi, MR., "Sound Transmission Across Orthotropic Cylindrical Shells Using Third-order Shear Deformation Theory," Latin American Journal of Solids and Structures, Vol. 11, pp. 2039-2072, 2014.
- [15] Talebitooti, R. Ahmadi, R. and Shojaeefard, MH., "Three-Dimensional Wave Propagation on Orthotropic Cylindrical Shells With Arbitrary Thickness Considering State Space Method," Composite Structures, Vol. 132, pp. 237-254, 2015.
- [16] Rjabi, M. Ahmadian, M. and Jamali, J., "Acoustic Scattering From Submerged Laminated Composite Cylindrical Shells," Composite Structures, Vol. 128, pp. 395-405, 2015.
- [17] Daneshjou, K. Talebitooti, R. and Tarkashvand, A., "Analysis of Sound Transmission Loss Through Thick-Walled Cylindrical Shell Using Three-Dimensional Elasticity Theory," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 106, pp. 286-296, 2016.
- [18] Talebitooti, R. Daneshjou, K. and Kornokar, M., "Three dimensional sound transmission through poroelastic cylindrical shells in the presence of subsonic flow," Journal of Sound and Vibration, Vol. 363, pp. 380-406, 2016
- [19] Qatu, MS., "Vibration of Laminated Shells and Plates," Elsevier Academic Press, 2004.
  [20] Reddy, JN., "Mechanics of Laminated Plates and Shells Theory and
- [20] Reddy, JN., "Mechanics of Laminated Plates and Shells Theory and Analysis," 2<sup>nd</sup> ed., CRC Press, 2003.