



## بررسی ارتعاشی صفحات کامپوزیتی چند لایه تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی

اسماعیل اسدی<sup>۱</sup>، محمود فرهادی نیا<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، مرکز کامپوزیت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۲- استادیار، مرکز کامپوزیت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

\* تهران، صندوق پستی ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵، mahmood\_farhadinia@mut.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۱ تیر ۱۳۹۲

پذیرش: ۲۶ مهر ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۳

کلید واژگان:

صفحات کامپوزیتی چند لایه

نانو لوله‌های کربنی

نالیز مودال تجربی

میرایی

ارتعاشات

در این مقاله، اثر نانو لوله‌های کربنی بر ویژگی‌های ارتعاشی صفحات کامپوزیتی چند لایه به صورت تئوری و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. جنس صفحات از کامپوزیت شیشه/ اپوکسی است که نانو لوله‌های کربنی چند جداره و تک جداره با درصدهای جرمی مختلف به آن‌ها افزوده شده‌اند. در ابتدا نانو لوله‌های کربنی با فرآیند فراصوت درون رزین اپوکسی توزیع شده و سپس صفحات کامپوزیتی با روش‌های لایه چینی دستی و کیسه خلأ در قالبی که به همین منظور تهیه شده، ساخته شدند. ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت الیافی تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی با استفاده از معادلات هالپین-تسای اصلاح شده، محاسبه شده است. سپس صفحه کامپوزیتی در نرم افزار آباکوس مدل و تحلیل بسامدی انجام شده است. همچنین ویژگی‌های ارتعاشی سازه مورد نظر با استفاده از آنالیز مودال تجربی و در شرایط مرزی گیردار به دست آمده است. نتایج تجربی نشان دهنده ۲۱۰٪ افزایش در میرایی برای نمونه دارای ۰/۵٪ وزنی نانو لوله تک جداره (در مقایسه با صفحات کامپوزیتی شیشه/ اپوکسی خالص) است. همچنین مطابقت خوبی بین بسامدهای طبیعی به دست آمده از تحلیل‌های المان محدود و آزمایش‌های تجربی مشاهده می‌شود.

## Vibrational study of laminated composite plates reinforced by carbon nanotubes

Esmail Asadi<sup>1</sup>, Mahmood Farhadi Nia<sup>2\*</sup>

1- MSc. Student, Composite Center, Malek Ashtar Univ. of Tech., Tehran, Iran.

2- Assis. Prof., Composite Center, Malek Ashtar Univ. of Tech., Tehran, Iran.

\* P.O.B. 15875-1774 Tehran, Iran, mahmood\_farhadinia@mut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 12 July 2013  
Accepted 18 October 2013  
Available Online 11 May 2014

**Keywords:**  
Laminated Composite Plates  
Carbon Nanotubes  
Experimental Modal Analysis  
Damping  
Vibration

### ABSTRACT

this paper, the influence of carbon nanotubes on vibrational properties of laminated composite plates is studied theoretically and experimentally. The plates are made of glass/epoxy composite. Multi walled and single walled carbon nanotubes in different weight percentages were added to these composites. At first, carbon nanotubes were dispersed in the epoxy resin via ultrasonic procedure. Then the composite plates were made by hand layup and vacuum bagging methods in a mould manufactured for this research. Mechanical properties of the fiber composite reinforced by carbon nanotubes calculated using modified Halpin-Tsai equations. Next, composite plates were modeled in ABAQUS software and frequency analysis was performed. Also vibrational properties of structure were obtained by experimental modal analysis in fixed boundary condition. Experimental results showed 210% increase in damping for samples which have 0.5 weight percent of single walled carbon nanotubes (in comparison with plane glass/epoxy composite plates). Also a good agreement was observed between obtained natural frequencies from finite element analyses and experimental tests.

### ۱- مقدمه

میرایی، محدود می‌شود [۱]. مواد میراکننده قابلیت مستهلک کردن انرژی‌های ناشی از بارهای ارتعاشی را داشته و به صورت گسترده در سازه‌های پیشرفته‌ی صنایع فضایی، دریایی، هوایی، ساختمان‌ها، اتومبیل‌ها، پل‌ها، آسمان خراش‌ها، صنایع برقی و دیگر موارد به کار می‌روند [۲]. تاکنون بیش‌تر از پوشش‌های ویسکوالاستیک<sup>۱</sup> پلیمری، برای افزایش میرایی در این‌گونه سازه‌ها استفاده می‌شده است که دارای برخی مشکلات از جمله وزن و حجم زیاد، ضخامت بزرگ، از دست دادن ویژگی‌های در دماهای بالا و

سازه‌های مهندسی همواره در معرض خطرات ناشی از تشدید در بسامدهای طبیعی قرار داشته‌اند و در برخی موارد نیز متحمل زیان‌های سنگینی می‌شوند. به همین دلیل بهبود میرایی و کنترل ارتعاش در این‌گونه سازه‌ها اهمیت زیادی خواهد داشت. از سویی کامپوزیت‌های پلیمری چند لایه تقویت شده با الیاف با توجه به ویژگی‌های ایده‌آل خود، کاربرد روز افزونی در صنایع پیشرفته نظامی و غیرنظامی پیدا کرده‌اند. البته کاربردهای گسترده پلیمرهای تقویت شده با الیاف در زمینه‌های جدید، در برخی موارد به علت کم بودن

1- Viscoelastic

Please cite this article using:

E. Asadi, M. Farhadi Nia, Vibrational study of laminated composite plates reinforced by carbon nanotubes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 7-16, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

به صورت آزمایشگاهی این تأثیرها را مورد مطالعه قرار داده‌اند. البته ارتعاش نانو لوله‌های کربنی به صورت منفرد (بدون ماتریس) نیز بسیار دارای اهمیت است، زیرا می‌توان از آن‌ها به عنوان نوسان کننده‌های نانو مکانیکی در نوسان سازها، ساعت‌های ابعاد نانو، دستگاه‌های ساطع کننده میدان مغناطیسی، سنسورها و غیره استفاده نمود [۱۷]. در خصوص بررسی ویژگی‌های ارتعاشی به صورت تجربی، نتایج آزمایشگاهی تنها برای تیرهای کامپوزیتی تقویت شده موجود است. در پژوهشی، رکنی و همکاران [۱۸] بهبود ویژگی‌های دینامیکی تیرهای کامپوزیتی لایه‌ای پلی‌استایرن/نانو لوله‌های کربنی چندجداره را مورد مطالعه قرار دادند. تیرها به صورت یک‌سر گیردار بوده و انتهای آزاد آن‌ها با چکش تحریک شده است. مقدار افزایش بسامد طبیعی و ضریب میرایی برای تیر با توزیع بهینه نانو لوله‌ها به ترتیب  $1/4\%$  و  $27/8\%$  و برای تیر با توزیع یکنواخت به ترتیب  $4/49\%$  و  $38/9\%$  هستند. زو و همکاران [۱۶] تیرهای اپوکسی تقویت شده با درصد‌های مختلفی از نانو لوله‌های کربنی تک‌جداره را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش مقدار نانو لوله‌ها، موجب افزایش شدید میرایی (کاهش سریع‌تر دامنه ارتعاش) شده است. همچنین نویسندگان نشان دادند که ضریب میرایی بدست آمده از افزودن نانو لوله‌های کربنی تک‌جداره بسیار بیشتر از سایر فیلرها از جمله دوده و یسکرهای کربن است.

در آزمایش ارتعاشی انجام گرفته توسط فریدون و همکاران [۱۹] بر روی تیرهای اپوکسی/نانو لوله کربنی، نمونه‌های تهیه شده شامل درصد‌های مختلف وزنی از نانو لوله‌های تک‌جداره، چندجداره و چندجداره با عامل کربوکسیلیک<sup>۵</sup> هستند. بیشترین میرایی و بسامد طبیعی مربوط به نمونه‌های ساخته شده با  $0/5\%$  وزنی نانو لوله تک‌جداره است که به ترتیب افزایشی در حدود  $50\%$  و  $10\%$  نسبت به نمونه خالص دارد. همچنین در مود اول نمونه‌های دارای  $1\%$  نانو لوله عامل‌دار، بسامد کمتری نسبت به اپوکسی خالص دارند که می‌تواند به دلیل کلوخه شدن<sup>۶</sup> نانو لوله‌های کربنی در پلیمر باشد. از آنجایی که نانو لوله‌ها دارای نسبت منظر بالایی هستند (نسبت طول به قطر بزرگ) لذا در صورت افزایش مقدار آن‌ها در رزین، توزیع آن‌ها با مشکل مواجه شده و در نتیجه پدیده کلوخگی رخ می‌دهد که موجب افت ویژگی‌های کامپوزیت می‌شود.

همان طور که پیش از این ذکر شد، در خصوص صفحات و پوسته‌های کامپوزیتی تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی، تحقیقات صورت گرفته تنها به صورت تئوری، ارتعاش این سازه‌ها را بررسی نموده‌اند. ردی و همکاران [۲۰] ارتعاش آزاد صفحات کامپوزیتی اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه و حاوی نانو لوله‌های کربنی تک‌جداره را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها ویژگی‌های کامپوزیت را با استفاده از المان حجمی نماینده به دست آورده و سپس بسامدهای طبیعی را با نرم افزار آنسیس<sup>۷</sup> محاسبه کردند. نتایج نشان می‌دهد که بسامدهای طبیعی، با افزودن نانو لوله‌ها به کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه، تنها کمی افزایش یافته‌اند. همچنین ارتعاش صفحات مستطیلی کامپوزیتی تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی بر اساس رویکرد اشلیبی-موری-تاناکا<sup>۸</sup> توسط فورمیکا و همکاران مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۱]. صفحه مستطیلی به صورت یک سر گیردار بوده و ماتریس به کار رفته از جنس اپوکسی است که اثر درصد حجمی نانو لوله‌های کربنی و زاویه جهت گیری آن‌ها، بر ارتعاش سازه بررسی شده است. بیشترین افزایش بسامد، مربوط به زمانی است که نانو لوله‌ها دارای زاویه  $90^\circ$  درجه (هم‌راستا با جهت اعمال بار)

تضعیف سفتی و استحکام سازه هستند. همچنین ویژگی‌های الکتریکی و حرارتی این دمپرها ضعیف است که یکی دیگر از مشکلات آن‌ها به شمار می‌رود [۳،۴].

بعد از کشف نانو لوله‌های کربنی<sup>۱</sup> توسط ایچیمّا در سال ۱۹۹۱ میلادی [۵] تحولی شگرف در زمینه نانو کامپوزیت‌ها به وجود آمد. به طور کلی نانو لوله‌های کربنی به صورت تک جداره<sup>۲</sup> و چند جداره<sup>۳</sup> هستند. با اینکه بیشتر از دو دهه از کشف نانو لوله‌های کربنی نمی‌گذرد، اما تاکنون پژوهش‌های بسیار متعددی پیرامون ویژگی‌ها و کاربردهای آن‌ها به چاپ رسیده است. مدول یانگ و استحکام نانو لوله‌های کربنی نسبت به مواد و فلزات متداول، بسیار بزرگ‌تر بوده و به ترتیب در حدود  $1000$  و  $50$  گیگا پاسکال است. علاوه بر این نانو لوله‌های کربنی دارای ویژگی‌های الکتریکی و حرارتی فوق‌العاده بوده [۶،۷] و می‌توانند در ویژگی‌های سایشی کامپوزیت‌ها بهبود قابل ملاحظه‌ای ایجاد نمایند [۸]. افزایش چگرمگی سازه‌ها و سفتی و استحکام آن‌ها بدون کاهش بیشینه کرنش شکست و همچنین افزایش عمر خستگی، از ویژگی‌های منحصر به فرد استفاده از نانو لوله‌های کربنی به عنوان تقویت کننده در پلیمرها است [۹،۱۰]. همچنین با به‌کارگیری این مواد می‌توان بارهای بحرانی کمانشی را افزایش داده و بر صحت عملکرد سازه افزود [۱۱،۱۲]. از سوی دیگر، با افزودن نانو لوله‌های کربنی به سازه‌های کامپوزیتی مخصوصاً با ماتریس پلیمری، می‌توان علاوه بر ویژگی‌های دیگر، میرایی را بدون ایجاد محدودیتی برای سازه، افزایش داده و ارتعاش سیستم را کنترل نمود [۴]. در مجموع می‌توان گفت قابلیت افزایش و هدفمند کردن چندین خصوصیت فیزیکی و مکانیکی به صورت همزمان، در کنار بهبود رفتارهای ارتعاشی سازه، از ویژگی‌های منحصر به فرد نانو لوله‌های کربنی به عنوان تقویت کننده در ماتریس‌های پلیمری است.

از منظر فیزیکی، میرایی به معنای میانگین نرخ استهلاک انرژی در یک سیستم است. در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی، سه عامل اساسی موجب استهلاک انرژی می‌شود [۱۴،۱۳]: ۱- میرایی ذاتی پلیمر استفاده شده به عنوان ماتریس ۲- اصطکاک ناشی از لغزیدن نانو لوله‌های کربنی بر روی پلیمر اطراف در فصل مشترک ۳- اصطکاک ناشی از لغزیدن نانو لوله‌های کربنی بر روی یکدیگر یا لغزیدن جداره‌های آن‌ها به صورت داخلی بر روی هم. البته بسیاری از نویسندگان این افزایش میرایی را بیشتر به دلیل وجود پدیده لغزش همراه با اصطکاک در فصل مشترک نانو لوله-پلیمر می‌دانند. در صورتی که پیوند محکمی مابین نانو لوله و ماتریس ایجاد شود، استحکام و مدول کامپوزیت افزایش خواهد یافت و در صورتی که این پیوند به اندازه کافی مستحکم نباشد، پیوند نانو لوله‌های کربنی و ماتریس در طی بارگذاری شکسته شده، نانو لوله‌ها بر روی ماتریس لغزیده و اصطکاک باعث اتلاف انرژی خواهد شد. به این پدیده مکانیزم چسبیدن-لغزیدن<sup>۴</sup> گفته می‌شود که یکی از عوامل اصلی افزایش میرایی در کامپوزیت‌های حاوی نانو لوله‌های کربنی است [۱۵،۱۶]. یکی دیگر از دلایلی که نانو لوله‌های کربنی موجب افزایش چشمگیر میرایی در سازه‌ها می‌شوند، نسبت سطح به وزن بالای آن‌ها ( $1709-714 \text{ m}^2/\text{g}$ ) است [۱۵] که موجب ایجاد اصطکاک زیادتر و در نتیجه میرایی بیشتر می‌شود؛ در حالی که برای دوده یا ویسکر کربن این نسبت در محدوده  $10-0/4 \text{ m}^2/\text{g}$  است [۴].

بسیاری از تحقیقات صورت گرفته با روش‌های تئوری به بررسی اثر نانو لوله‌های کربنی بر ویژگی‌های ارتعاشی سازه‌ها پرداخته‌اند و تنها تعداد اندکی

5- COOH  
6- Agglomeration  
7- ANSYS  
8- Eshelby-mori-tanaka approach

1- Carbon nanotubes (CNTs)  
2- Single wall carbon nanotube (SWNTs)  
3- Multi wall carbon nanotube (MWNTs)  
4- Stick-slip mechanism

نانو لوله‌های کربنی توسط روش رسوب بخارهای شیمیایی<sup>۳</sup> با منبع کربنی متان و کاتالیست‌های فلزی مولیبدن و کبالت با کمینه خلوص ۹۵٪ تولید و از پژوهشگاه صنعت نفت ایران خریداری شده است. نانو لوله‌های کربنی چند جداره دارای قطر میانگین ۲۰-۱۰ nm و طول میانگین ۱۰ μm و نانو لوله‌های کربنی تک جداره دارای قطر میانگین ۲-۳ nm و طول میانگین ۱۰ μm هستند. در ابتدا نانو لوله‌ها به رزین اضافه شده و مخلوط رزین و نانو لوله‌ها به مدت ۷ دقیقه با سرعت ۱۲۰۰-۸۰۰ rpm با هم‌زن مکانیکی دیجیتال به خوبی هم‌زده می‌شوند. در طی هم‌زدن و به منظور کم کردن لزوجت رزین و دستیابی به آمیزش بهتر، بشر بر روی گرم کن قرار می‌گیرد تا دمای مخلوط مقداری افزایش یافته و لزوجت کاهش یابد. بعد از هم‌زدن، مخلوط حاصل به مدت یک دقیقه در دستگاه فراصوت و با ۶۰٪ بیشینه قدرت قرار می‌گیرد. دستگاه فراصوت مورد استفاده (مدل UIP1000hd، ساخت شرکت هیلسچر اولتراسوند، آلمان) از نوع پروبی (۱۰۰۰W و ۲۰kHz) است. در طی فرآیند فراصوت، از آنجایی که انرژی زیادی به مخلوط منتقل می‌شود، باعث بالا رفتن قابل توجه دما و تخریب اپوکسی می‌شود؛ لذا لازم است بشر حاوی مخلوط در طی فرآیند فراصوت، درون ظرف مخلوط آب و یخ قرار داده شود. بعد از هر بار انجام عملیات فراصوت، مخلوط به مدت ۵ دقیقه در حالی که بر روی گرم کن قرار داده شده، با سرعت ۱۰۰۰-۸۰۰ rpm هم‌زده می‌شود. بعد از هر بار هم‌زدن نیز، مخلوط، در حالی که درون ظرف آب و یخ است، یک بار و به مدت یک دقیقه در دستگاه فراصوت قرار می‌گیرد؛ اما در هر بار انجام عملیات فراصوت، قدرت دستگاه به تدریج افزایش می‌یابد تا بتوان کلوخه‌های بیشتری را از بین برد. در مجموع، مخلوط دو بار با قدرت ۶۰٪، دو بار با قدرت ۷۰٪، یک بار با قدرت ۸۰٪ و یک بار نیز با قدرت ۹۰٪ فراصوت می‌شود.

## ۲-۳- ساخت نمونه‌ها

برای تهیه نمونه‌ها چندین مرحله وجود دارد. ابتدا لازم است پارچه‌ها را در ابعاد مناسب برش داده و آماده نمود. پارچه‌ها از جنس الیاف شیشه با تراکم تار و پود یکسان هستند. در مجموع از ۸ لایه پارچه استفاده می‌شود که درصد حجمی الیاف در نمونه‌ها ۳۰٪ است. بعد از به دست آوردن مخلوطی کاملاً یکنواخت از رزین اپوکسی، نانو لوله‌های کربنی و هاردنر، عملیات لایه‌چینی به صورت دستی آغاز می‌شود. در هر بار یک لایه پارچه درون قالب فلزی قرار گرفته و با قلم‌مو مخلوط نانو کامپوزیت اپوکسی/نانو لوله کربنی بر روی آن توزیع می‌شود. جهت اطمینان از توزیع کاملاً یکنواخت رزین بر روی پارچه‌ها، ظرف حاوی مخلوط پس از رزین زنی هر لایه، وزن می‌شود. قبل از شروع فرآیند رزین زنی، لازم است در زیر اولین لایه پارچه، یک عدد پارچه تفلون نفوذ ناپذیر قرار داده شود تا از چسبیدن رزین بعد از فرآیند پخت به سطح قالب جلوگیری به عمل آید. همچنین به همین منظور، دیواره‌های قالب گریس زده می‌شود تا جداسازی قطعه از قالب بعد از پخت، به راحتی انجام پذیرد.

بعد از پایان فرآیند لایه چینی، نمونه‌ها تحت وکیوم قرار می‌گیرند. قدرت مکش وکیوم ۷۰۰-۸۰۰ mbar است. قبل از شروع وکیوم بر روی صفحات رزین خورده، دو عدد پارچه تفلون نفوذپذیر جهت جلوگیری از چسبیدن رزین به تجهیزات ایجاد وکیوم و یک عدد نمد قرار داده می‌شود. سپس لاستیک‌های آب‌بند (خمیر آب‌بند) در دور تا دور قالب چسبانده می‌شوند. فرآیند مکش از دو گوشه قالب انجام می‌پذیرد. بر روی مجموعه قالب یک

هستند. با افزودن تنها ۱٪ نانو لوله تک جداره، بسامد اول ارتعاشی در حدود ۱۰۰٪ و با افزودن ۱۰٪ نانو لوله، حدود ۴۰۰٪ افزایش پیدا کرده است. البته باید توجه نمود که افزایش مقدار نانو لوله‌ها از درصد مشخصی، در عمل موجب بهبود ویژگی‌های سازه نمی‌شود؛ زیرا پدیده کلوخگی شکل می‌گیرد که موجب افت ویژگی‌های کامپوزیت خواهد شد.

آنچه در این تحقیق مورد مطالعه قرار می‌گیرد، بررسی تجربی ویژگی‌های ارتعاشی کامپوزیت‌های چند لایه تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی است. صفحه ساخته شده از جنس شیشه/اپوکسی است که نانو لوله‌های کربنی چند جداره و تک جداره در درصدهای جرمی مختلف به آن افزوده شده‌اند. ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت با استفاده از روابط هالپین-تسای<sup>۱</sup> اصلاح شده به دست آمده و تحلیل ارتعاشی با نرم افزار المان محدود آباکوس<sup>۲</sup> انجام می‌شود. همچنین ویژگی‌های ارتعاشی سازه مذکور شامل بسامدهای طبیعی، ضرایب میرایی و شکل مودها، با انجام آنالیز مودال تجربی نیز به دست می‌آیند.

## ۲- فرآیند ساخت نمونه‌ها

### ۲-۱- تهیه قالب

به منظور انجام لایه‌چینی و انجام فرآیند وکیوم و پخت اولیه، لازم است قالبی برای این منظور تهیه شود. قالب ساخته شده دو تکه است. صفحه پایینی از یک ورق مربع شکل فولادی با ابعاد ۵۰×۵۰ سانتی‌متر و با ضخامت ۱۶ میلی‌متر است و قسمت بالایی قالب، از به هم جوش دادن تسمه‌های آهنی با عرض ۷/۵ سانتی‌متر و ضخامت شش میلی‌متر تشکیل شده است. این قسمت‌ها با ۲۴ عدد پیچ M6 به هم متصل می‌شوند. در نهایت قالبی با ابعاد ۳۵×۳۲ سانتی‌متر و به عمق شش میلی‌متر جهت ساخت نمونه‌ها خواهیم داشت. همچنین برای جلوگیری از نفوذ رزین در طی تهیه نمونه، مابین مناطق تماس قالب، از چسب سیلیکون آب‌بندی دما بالا و گریس استفاده می‌شود.

### ۲-۲- فرآیند توزیع نانو لوله‌های کربنی در اپوکسی

رزین به کار رفته اپوکسی ML-503 با هاردنر HA-12 خریداری شده از شرکت مواد مهندسی مکر (ایران) است. این رزین بر پایه رزین اپوکسی بیسفنل A و هاردنر پلی آمینی است. ویژگی‌های خوب مکانیکی، قابلیت ماشین‌کاری و غلظت مناسب، امکان به‌کارگیری این رزین با الیاف شیشه و یا تقویت کننده‌های دیگر را فراهم می‌سازد. خصوصیات اپوکسی ML-503 که از سازنده (شرکت مکر) اخذ شده، در جدول ۱ ذکر شده است.

قبل از آمیزش رزین و هاردنر، می‌بایست نانو لوله‌های کربنی به خوبی درون اپوکسی توزیع شده و کلوخه‌های موجود در آن‌ها شکسته شود. مقدار مورد نیاز از نانو لوله‌ها با توجه به درصد وزنی مورد نظر با ترازوی بسیار دقیق وزن می‌شوند.

| جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی رزین اپوکسی ML-503 |                    |       |
|------------------------------------------------------|--------------------|-------|
| ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی                           | واحد               | مقدار |
| لزوجت ترکیبی محصول (۲۵°C)                            | Centipoise         | ۱۱۸۰  |
| وزن مخصوص ترکیبی محصول                               | gr/cm <sup>3</sup> | ۱/۱۱  |
| عمر مصرف در حجم کم (۲۵°C)                            | min                | ۲۴۰   |
| استحکام کششی                                         | MPa                | ۵۰/۳  |
| مدول کششی                                            | MPa                | ۱۹۹۶  |

1- Halphin-Tsai  
2- ABAQUS

3- Chemical vapour deposition  
4- Hielscher ultrasound technology

تئوری و با روش‌های مدل‌سازی گوناگون به محاسبه ویژگی‌های مکانیکی نانو کامپوزیت‌های تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی پرداخته‌اند [۲۳، ۲۴]. عوامل زیادی بر ویژگی‌های مکانیکی این گونه نانو کامپوزیت‌ها تأثیرگذار است که از آن جمله می‌توان به ساختار نانو لوله، جهت قرارگیری نانو لوله، مقدار انحنای نانو لوله، پیوند در ناحیه فاز واسط و نحوه پخش در محیط ماتریس اشاره کرد. بنابراین با توجه به گستردگی عوامل موثر بر ویژگی‌های مکانیکی، به نظر می‌رسد ارائه یک مدل دقیق تئوری که توانایی در نظر گرفتن تمامی این عوامل را دارا باشد، امری دشوار خواهد بود. معادله هالپین-تسای که به خوبی شناخته شده است، قابلیت پیش‌بینی مدول‌های کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف را دارا است. این معادله برای تقویت‌کننده‌های غیر پیوسته با درصد‌های کم حجمی، به شکل معادلات (۶) و (۷) است [۲۵]:

$$E = \frac{1 + \left(\frac{2L}{d}\right) \eta V_f}{1 - \eta V_f} E_m \quad (6)$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) + \frac{2L}{d}} \quad (7)$$

که  $E$  مدول کامپوزیت تقویت شده و  $L$  و  $d$  طول و قطر تقویت‌کننده هستند. معادله هالپین-تسای را می‌توان با در نظر گرفتن فاکتور جهت‌گیری ( $\alpha$ ) برای حالت توزیع اتفاقی<sup>۳</sup> تقویت‌کننده‌ها نیز بکار برد که به صورت معادله (۸) است [۲۵]:

$$\eta = \frac{\alpha \left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\alpha \left(\frac{E_f}{E_m}\right) + \frac{2L}{d}} \quad (8)$$

زمانی که طول فیبر بزرگ‌تر از ضخامت نمونه باشد، فیلر دارای توزیع اتفاقی در دو جهت است و فاکتور جهت‌گیری برابر یک سوم در نظر گرفته می‌شود. وقتی طول فیبر بسیار کوچک‌تر از ضخامت نمونه باشد، فیلر در هر سه جهت به صورت اتفاقی پخش شده و فاکتور جهت‌گیری برابر یک ششم خواهد بود. از آنجایی که طول نانو لوله‌های کربنی بسیار کوچک است (در مقیاس میکرومتر) لذا این پارامتر برابر یک ششم خواهد بود. آیت‌اللهی و همکاران [۲۶] به جای در نظر گرفتن فاکتور جهت‌گیری، معادله هالپین-تسای را به گونه دیگری اصلاح نمودند. آن‌ها با تغییر پارامتر مربوط به طول و قطر نانو لوله‌ها به معادلات (۹) و (۱۰) دست یافتند:

$$E = \frac{1 + 2a \left(\frac{L}{d}\right)^b \eta V_f}{1 - \eta V_f} E_m \quad (9)$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) + 2a \left(\frac{L}{d}\right)^b} \quad (10)$$

عدد پلاستیک مخصوص انجام وکیوم، قرار داده می‌شود تا به همراه لاستیک‌های آب‌بند، سیستم را کاملاً آب‌بندی نماید. مدت زمان انجام وکیوم دو ساعت و سی دقیقه است. بعد از پخت اولیه، پیچ‌های قالب باز شده و قطعه درون کوره<sup>۱</sup> قرار می‌گیرد. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد، ۱۲ ساعت در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد و ۴ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد قرار داده می‌شوند تا فرآیند پخت کامپوزیت کامل شود.

### ۳- ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی

#### ۳-۱- ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت تقویت شده با الیاف

به منظور انجام تحلیل‌های ارتعاشی لازم است ویژگی‌های مکانیکی صفحات کامپوزیتی به دست آید. پارچه را می‌توان با دو لایه الیاف تک جهته با زوایای صفر و ۹۰ درجه مدل نمود. در مجموع، کامپوزیت مربوطه ۱۶ لایه در نظر گرفته می‌شود که لایه‌های صفر و ۹۰ درجه به صورت متناوب بر روی هم قرار گرفته‌اند. با استفاده از روابط نیمه‌تجربی هالپین-تسای می‌توان ویژگی‌های تک لایه کامپوزیتی را با توجه به معادلات (۱) و (۲) بدست آورد [۲۲]:

$$\rho = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (1)$$

$$v = v_f V_f + v_m V_m \quad (2)$$

که  $\rho$  و  $v$  به ترتیب چگالی و ضریب پواسون کامپوزیت و  $\rho_f$ ،  $v_f$ ،  $\rho_m$ ،  $v_m$  و  $V_f$  و  $V_m$  به ترتیب چگالی تقویت‌کننده و ماتریس، ضریب پواسون تقویت‌کننده و ماتریس و درصد حجمی تقویت‌کننده و ماتریس به کار رفته هستند. همچنین مدول‌های الاستیک طولی و عرضی با استفاده از روابط (۳) الی (۵) به دست می‌آیند [۲۲]:

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (3)$$

$$\frac{E_2}{E_m} = \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) + \xi} \quad (5)$$

که  $E_1$  و  $E_2$  به ترتیب مدول‌های الاستیک کامپوزیت در جهت طولی و عرضی (راستای الیاف و عمود بر الیاف) و  $E_f$  و  $E_m$  به ترتیب مدول ماتریس و تقویت‌کننده هستند و پارامتر  $\xi$  برابر دو در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای محاسبه مدول برشی کامپوزیت  $G_{12}$ ، کافی است در روابط (۴) و (۵) به جای مدول‌های الاستیک، مدول‌های برشی ماتریس و الیاف ( $G_f$  و  $G_m$ ) قرار داده شود و پارامتر  $\xi$  برابر یک در نظر گرفته شود [۲۲]. برای به دست آوردن ویژگی‌های نمونه‌های کامپوزیتی‌ای که در آن‌ها نانو لوله‌های کربنی وجود دارد، لازم است مشخصات ماتریس مورد استفاده اصلاح شود که در بخش بعدی توضیح داده می‌شود.

#### ۳-۲- ویژگی‌های مکانیکی پلیمر حاوی نانو لوله‌های کربنی

از آنجایی که روش‌های مرسوم (مانند قانون مخلوط‌ها<sup>۲</sup>، معادلات هالپین-تسای و غیره)، برای پیش‌بینی و محاسبه ویژگی‌های کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی چندان کارآمد نیستند، لذا محققین به دنبال روش‌های جدیدی برای این منظور هستند. محققین بسیاری به صورت

1- oven  
2- Rule of mixtures

لوله‌های کربنی به دلیل نسبت منظر بالایی که دارند، به صورت اتحدادار درون پلیمر قرار می‌گیرند (به شکل ۱ توجه کنید). آراسته و همکاران [۳۰] با تعریف پارامتر تصحیح انحنا  $K_w$ ، معادلات هالپین-تسای را اصلاح نمودند:

$$E = \frac{1 + 2\left(\frac{L}{d}\right)\eta V_f}{1 - \eta V_f} E_m \quad (18)$$

$$\eta = \frac{K_w \left(\alpha \frac{E_f}{E_m} - 1\right)}{K_w \left(\alpha \frac{E_f}{E_m}\right) + 2\left(\frac{L}{d}\right)} \quad (19)$$

در معادلات (۱۸) و (۱۹) لازم است با توجه به تصاویر گرفته شده از نانو لوله‌های کربنی توسط میکروسکوپ انتقال الکترونی<sup>۲</sup>، میانگین مقدار انحنای آن‌ها را محاسبه نموده و در معادلات قرار داد. با توجه به اینکه در معادله (۱۸) درصد حجمی نانو لوله‌ها مورد نیاز است، لذا با استفاده از معادله (۲۰)، درصد جرمی نانو لوله‌ها به درصد حجمی تبدیل می‌شود:

$$V_f = \frac{W_f}{W_f + \frac{\rho_f}{\rho_m}(1 - W_f)} \quad (20)$$

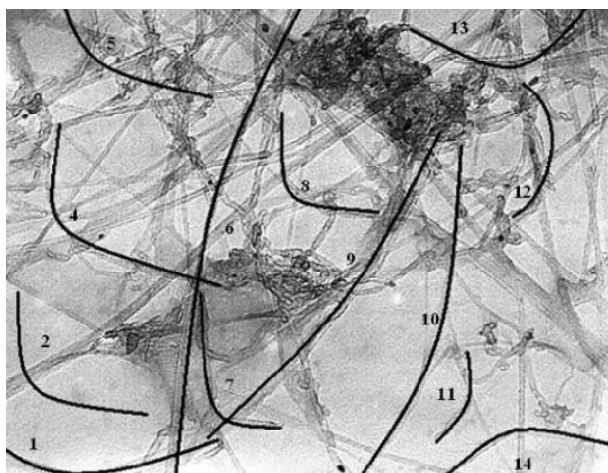
که  $W_f$  درصد جرمی نانو لوله‌های کربنی است.

#### ۴- مدل سازی

تحلیل ارتعاشی صفحه کامپوزیتی مورد نظر، به کمک نرم‌افزار آباکوس نسخه ۶.۱۰ انجام می‌شود. مدل هندسی جسم به صورت سه بعدی ایجاد شده است. ویژگی مدل به صورت تغییر شکل پذیر و پوسته‌ای (چون ضخامت نمونه در مقایسه با سایر ابعاد آن بسیار کوچک است) است.

ابعاد هندسی صفحه مورد نظر برابر  $25 \times 23 \times 3/8$  میلی‌متر است. ضمناً وزن سازه مذکور در حدود ۳۳۵g است.

در مورد پوسته‌های کامپوزیتی علاوه بر مشخصات مواد، باید مشخصات لایه‌چینی شامل تعداد لایه‌ها، ضخامت هر لایه و زاویه الیاف در هر لایه تعریف شود. در اینجا هر لایه پارچه با دو لایه لمینا با الیاف صفر و ۹۰ درجه مدل می‌شود. با توجه به اینکه چهار طرف صفحه گیردار است، به منظور ایجاد شرایط مرزی، در چهار لبه‌ی صفحه کامپوزیتی مدل شده، قید کاملاً گیردار با محدود کردن تمام درجات آزادی جابجایی و دوران نقاط قرار داده شده است.



شکل ۱ تصویری از نانو لوله‌های کربنی چندجداره برای محاسبه ضریب میانگین  $K_w$  [۳۰]

منتظری و همکاران [۲۷] نیز با وارد کردن این فاکتورها به صورت ضرایب نمایی و همچنین با در نظر گرفتن پارامتر جهت‌گیری به روابط (۱۱) و (۱۲) رسیدند:

$$E = \frac{1 + 2\left(\frac{L}{d}\right)\left(e^{-av_f - b}\right)\eta V_f}{1 - \eta V_f} E_m \quad (11)$$

$$\eta = \frac{\alpha \left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\alpha \left(\frac{E_f}{E_m}\right) + 2\left(\frac{L}{d}\right)\left(e^{-av_f - b}\right)} \quad (12)$$

آن‌ها با گذراندن منحنی از داده‌های اندازه‌گیری شده تجربی، پارامترهای  $a$  و  $b$  را محاسبه نمودند. اگرچه روابط (۱۱) و (۱۲) تا اندازه خوبی قابلیت پیش‌بینی مدول الاستیک نانو کامپوزیت تقویت شده با نانو لوله‌ها را دارا هستند، اما باید توجه نمود که فاکتورهای  $a$  و  $b$  به شدت وابسته به نوع ماتریس (مدول و استحکام آن) و نوع نانو لوله‌های کربنی به کار رفته بوده و با تغییر آن‌ها لازم است این پارامترها نیز با توجه به آزمایش‌های کشش، دوباره محاسبه شوند که این مسئله یکی از مشکلات مهم روابط مذکور است. سریواستوا [۲۸] با ترکیب مدل میکرومکانیکی ویجت-رئوس<sup>۱</sup> برای کامپوزیت‌های دارای توزیع اتفاقی و اصلاح روابط هالپین-تسای، به روابط (۱۳) الی (۱۵) دست یافت:

$$E = \left[ \frac{3}{8} \frac{1 + 2\left(\frac{L}{d_o - d_i}\right)\eta'_L V_f}{1 - \eta'_L V_f} + \frac{5}{8} \frac{1 + 2\eta'_T V_f}{1 - \eta'_T V_f} \right] E_m \quad (13)$$

$$\eta'_L = \frac{\alpha \left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\alpha \left(\frac{E_f}{E_m}\right) + 2\left(\frac{L}{d_o - d_i}\right)} \quad (14)$$

$$\eta'_T = \frac{\alpha \left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\alpha \left(\frac{E_f}{E_m}\right) + 2} \quad (15)$$

که  $d_o$  و  $d_i$  به ترتیب قطر خارجی و داخلی نانو لوله‌های کربنی هستند. تاستنسون و چو [۲۹] نیز به رابطه مشابهی برای محاسبه مدول الاستیک رسیدند که عبارت است از:

$$E = \frac{1 + 2\left(\frac{L}{d}\right)\eta V_f}{1 - \eta V_f} E_m \quad (16)$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - \left(\frac{d}{4t}\right)}{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - \left(\frac{L}{2t}\right)} \quad (17)$$

که  $t$  ضخامت پوسته نانو لوله کربنی است؛ اما باید توجه نمود که در استفاده از معادلات (۱۳) و (۱۶) برای به دست آوردن ویژگی‌های مکانیکی نانو کامپوزیت، لازم است قطر داخلی و خارجی نانو لوله‌ها مشخص باشد که اندازه‌گیری آن‌ها نیازمند دستگاه‌های پیشرفته‌ای بوده و مشکل است. نانو

برابر  $1/68 \text{ g/cm}^3$  [۲۷] و مدول الاستیک آن‌ها  $900 \text{ GPa}$  [۳۱] در نظر گرفته می‌شود. ویژگی‌های مکانیکی اپوکسی و الیاف شیشه به کار رفته و همچنین کامپوزیت ساخته شده در جدول ۲ آورده شده است. اکنون با توجه به ویژگی‌های نانو لوله‌های کربنی، می‌توان ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی که با درصد‌های متفاوتی از نانو لوله‌ها تقویت شده‌اند را به دست آورد. نتایج به دست آمده در جدول ۳ آورده شده است.

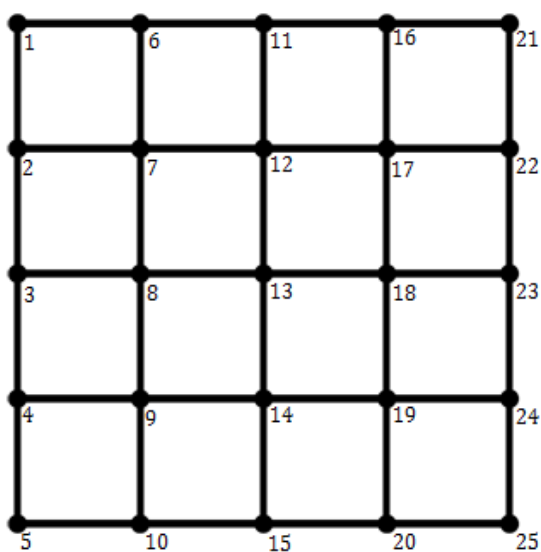
اگر چه نانو لوله‌های کربنی تأثیر بسزایی در افزایش مدول اپوکسی داشته‌اند (حدود  $28\%$  افزایش برای نمونه  $1/5\%$  وزنی نانو لوله‌های چندجداره) اما از آنجایی که ماتریس، تأثیر کمی در مدول کامپوزیت حاصله دارد (مخصوصاً اگر تقویت کننده آن الیافی با مدول بالا باشد)، لذا مدول طولی کامپوزیت شیشه/اپوکسی، بهبود ناچیز (حدود  $2\%$ ) و مدول‌های عرضی و برشی به ترتیب افزایشی در حدود  $26\%$  و  $27\%$  را با افزودن  $1/5\%$  وزنی نانو لوله‌های کربنی چندجداره از خود نشان می‌دهند. این موضوع در نتایج سایر تحقیقات تجربی انجام گرفته نیز مشاهده می‌شود [۳۰، ۳۳].

## ۶-۲- نتایج تحلیل المان محدود

در ابتدا اثر المان‌بندی بر همگرایی مقادیر بسامدهای ارتعاشی در مودهای اول تا چهارم مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور تحلیل‌های متعددی با افزایش تعداد المان‌ها از ۲۵ تا ۱۷۲۰ و افزایش مرتبه آن‌ها از یک به دو انجام شد. شکل ۳ درصد خطای بدست آمده در هر تحلیل را نسبت به مقدار همگرا شده‌ی آن نشان می‌دهد. همان گونه که ملاحظه می‌شود، در تحلیل با المان‌های مرتبه اول در صورتی که از تعداد المان‌های کم (۲۵ المان) استفاده شود، جواب‌ها خطای بسیار زیادی خواهند داشت (حدود  $35\%$  خطا)؛ اما المان‌های مرتبه دوم در مقایسه با المان‌های مرتبه اول، از دقت مناسب‌تری برخوردار هستند (حدود  $5\%$  خطا برای ۲۵ المان).

جدول ۲ ویژگی‌های اپوکسی، الیاف شیشه و کامپوزیت حاصله [۳۲]

| ویژگی‌های                 | اپوکسی | الیاف شیشه | کامپوزیت شیشه/اپوکسی   |
|---------------------------|--------|------------|------------------------|
| چگالی ( $\text{kg/m}^3$ ) | ۱۱۱۰   | ۲۵۴۰       | ۱۵۳۲                   |
| ضریب پواسون               | ۰/۳    | ۰/۲        | ۰/۲۷                   |
| مدول الاستیک (GPa)        | ۲      | ۷۲         | $E_1=22/8 \text{ GPa}$ |
|                           |        |            | $E_2=4/29 \text{ GPa}$ |
| مدول برشی (GPa)           | ۰/۷۷   | ۳۰/۱       | $G_{12}=1/36$          |



شکل ۲ نقشه دو بعدی شبکه بندی صفحه کامپوزیتی مورد آزمایش

همچنین شتاب جاذبه زمین ( $9/88 \text{ g/m}^2$ ) در جهت عمود بر سطح، به عنوان بار وارده بر صفحه در نظر گرفته شده است. برای مش‌بندی صفحه از المان‌های S4R (المان‌های پوسته‌ای چهارگوش مرتبه یک) و المان‌های S8R (المان‌های پوسته‌ای چهارگوش مرتبه دو) استفاده می‌شود.

## ۵- آنالیز مودال تجربی

برای انجام آنالیز مودال تجربی، روش‌های آزمایش مختلفی بررسی شد و در نهایت استفاده از چکش و سیگنال ضربه‌ای اعمالی توسط آن، به عنوان روش آزمایش انتخاب شد. اصول اجرایی آنالیز مودال تجربی، بر پایه روش آزمایش با حرکت چکش<sup>۱</sup> صورت پذیرفته است. لازم به ذکر است با توجه به کم بودن جرم سازه، آزمایش مودال با چکش بهتر از آزمایش با لرزاننده است. از تعدادی تسمه فولادی به عرض چهار سانتی‌متر و ضخامت شش میلی‌متر که در لبه‌های صفحه کامپوزیتی قرار گرفته و با ۲۲ عدد پیچ به یکدیگر کاملاً سفت شده‌اند، جهت ایجاد شرایط مرزی گیردار استفاده شده است. همچنین به منظور اطمینان از انطباق و اتصال کامل تسمه‌های مورد استفاده بر سطح صفحه کامپوزیتی، یک لایه چسب مابین تسمه‌ها و سطح صفحه کامپوزیتی زده شده است. از چهار عدد فک فولادی نیز به منظور محکم کردن سازه مورد آزمایش به فنداسیون استفاده شده است.

جهت انجام آزمایش مودال، طول و عرض صفحه به چهار قسمت مساوی تقسیم شده و در مجموع ۲۵ نقطه جهت ایجاد تحریک مشخص شد. در شکل ۲ نقشه دو بعدی شبکه بندی انجام شده به همراه شماره نقاط آورده شده است. در هر نقطه سه ضربه با چکش زده می‌شود تا سیگنال اعمالی یکنواخت‌تر بوده و خطای کمتری داشته باشد و نرم افزار بتواند از ضربات اعمالی یک مقدار میانگین را در نظر بگیرد. از دو سنسور جهت داده‌برداری استفاده شده که سنسور اول در نقطه شماره یک و سنسور دوم در نقطه ۲۵ با موم، به سطح صفحه کامپوزیتی متصل شده‌اند. همچنین برای انجام آزمایش آنالیز مودال تجربی از تجهیزات شرکت سینوسرا<sup>۲</sup> (چین) استفاده شده است. جهت دریافت پاسخ سنسورها و چکش از نرم افزار داده‌برداری سیگنال مدل YE7600 و از دستگاه پردازشگر ۳۶ کاناله مدل YE6268 جهت دریافت سیگنال استفاده شد. بسامد داده‌برداری برابر  $5 \text{ kHz}$  و مدت زمان داده برداری در هر ضربه  $0/1 \text{ s}$  است. تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده با نرم افزار N-Modal صورت می‌گیرد. الگوریتم انتخابی جهت آنالیز مودال داده‌ها، روش فضای بسامدی چند مرجعی<sup>۳</sup> برای سیستم‌های چند ورودی/چند خروجی<sup>۴</sup> است. مزیت این روش نسبت به روش‌های دیگر این است که این روش، برای سازه‌هایی که دارای مودهای نزدیک به هم و یا مودهای تکراری هستند، می‌تواند بهترین نتایج را در تعیین مشخصات مودال سازه شامل بسامدهای طبیعی، ضرایب میرایی و شکل مودها محاسبه نماید.

## ۶- نتایج و بحث

### ۶-۱- ویژگی‌های مکانیکی صفحات کامپوزیتی

برای به دست آوردن ویژگی‌های نمونه‌های کامپوزیتی‌ای که در آن‌ها نانو لوله‌های کربنی وجود دارد، از روش آراسته و همکاران [۳۰] استفاده می‌شود که در آن پارامتر جهت‌گیری،  $\alpha$  برابر  $1/6$  و پارامتر تصحیح انحنا،  $K_w$  برابر  $0/4$  است (لازم به ذکر است که نانو لوله‌های تهیه شده توسط این محققین نیز از پژوهشگاه صنعت نفت ایران بوده است). چگالی نانو لوله‌های کربنی

1- Roving hammer test

2- Sinocera Piezotronics Inc

3- Frequency domain poly reference method (FDRP)

4- Multi input/ Multi output (MIMO)

جدول ۳ ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تقویت شده با انواع مختلف نانو لوله‌ها

| نوع نانو لوله      | مدول اپوکسی/نانو لوله (MPa) | مدول طولی $E_1$ (MPa) | مدول عرضی $E_2$ (MPa) | مدول برشی $G_{12}$ (MPa) | چگالی کامپوزیت ( $\text{kg/m}^3$ ) |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------------------|
| بدون نانو لوله     | ۲                           | ۲۲/۸                  | ۴/۲۹                  | ۱/۳۶                     | ۱۵۳۲                               |
| ۰/۵٪ وزنی چندجداره | ۲/۱۹                        | ۲۲/۹۱                 | ۴/۶۷                  | ۱/۴۸                     | ۱۵۴۰                               |
| ۱٪ وزنی چندجداره   | ۲/۳۷                        | ۲۳/۰۲                 | ۵/۰۴                  | ۱/۶                      | ۱۵۴۱/۵                             |
| ۱/۵٪ وزنی چندجداره | ۲/۵۶                        | ۲۳/۱۳                 | ۵/۴۱                  | ۱/۷۲                     | ۱۵۴۳                               |
| ۰/۵٪ وزنی تک‌جداره | ۲/۱۹                        | ۲۲/۹۱                 | ۴/۶۷                  | ۱/۴۸                     | ۱۵۴۰                               |
| ۱٪ وزنی تک‌جداره   | ۲/۳۸                        | ۲۳/۰۳                 | ۵/۰۵                  | ۱/۶۱                     | ۱۵۴۱/۵                             |

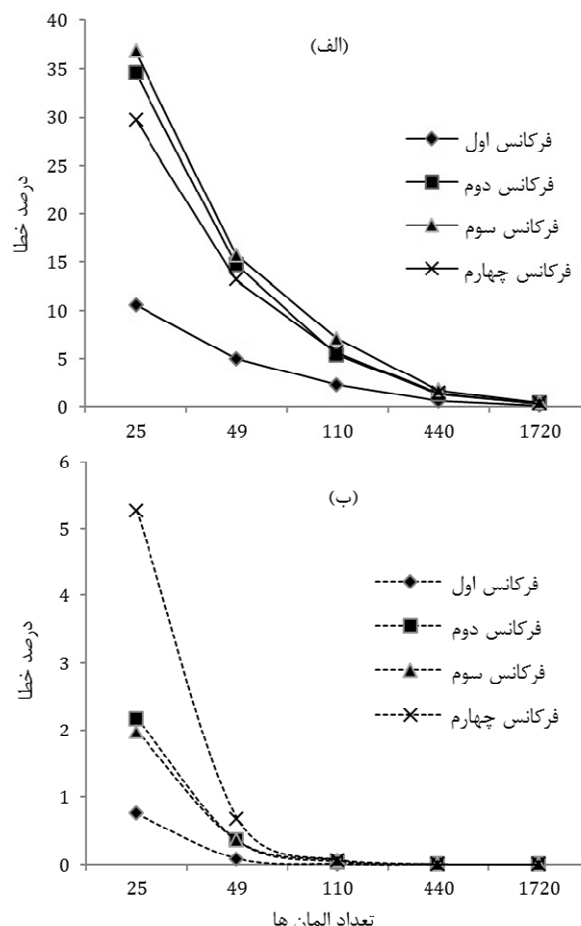
همچنین با افزایش تعداد المان‌ها، نتایج به دست آمده از تحلیل با المان‌های مرتبه دوم نسبت به المان‌های مرتبه اول بسیار سریع‌تر همگرا می‌شوند. به طور کلی مقادیر بسامدها برای تعداد المان‌های بیشتر از ۱۱۰ عدد، تقریباً همگرا شده و برای حالتی که از ۴۴۰ المان مرتبه دوم استفاده می‌شود، بسامدها تا دقت دو رقم اعشار با یکدیگر منطبق هستند؛ اما باید توجه نمود که با افزایش تعداد المان‌های مرتبه دوم، مدت زمان حل نیز به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد؛ لذا در اینجا از تعداد ۴۴۰ المان مرتبه دوم به عنوان اقتصادی‌ترین تعداد المان (کمترین مدت زمان حل با دقت مناسب) استفاده می‌شود.

بعد از انجام تحلیل ارتعاشی در نرم افزار المان محدود، مقادیر بسامدهای طبیعی و شکل مودهای متناظر محاسبه می‌شوند. در شکل ۴ شکل مودهای به دست آمده برای کامپوزیت فاقد نانو لوله‌های کربنی، نشان داده شده است. همچنین لازم به ذکر است که شکل مودهای متناظر به دست آمده برای نمونه‌های حاوی نانو لوله‌های کربنی نیز مشابه شکل مودهای نشان داده شده (فاقد نانو لوله) است.

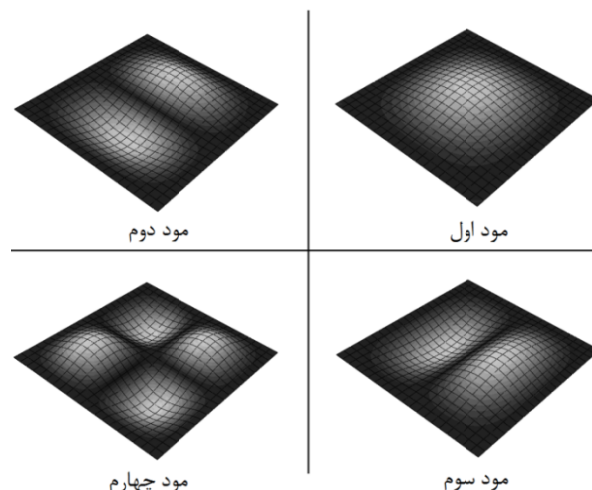
مقادیر بسامدهای طبیعی به دست آمده برای کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی که با نانو لوله‌های کربنی متفاوت و در درصد‌های جرمی مختلف تقویت شده‌اند، در مودهای اول تا چهارم در جدول ۴ آورده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، بسامدهای طبیعی نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با نانو لوله‌ها نسبت به نمونه‌ای که فاقد نانو لوله است تغییرات کمی دارد. بیشترین مقدار افزایش بسامد برای نمونه دارای ۱/۵٪ وزنی نانو لوله کربنی چندجداره است که در مود اول ۳/۲٪، در مود دوم ۳/۱٪، در مود سوم ۲/۹٪ و در مود چهارم ۳/۵٪ است. از آنجایی که مقادیر مدول‌های الاستیک و برشی کامپوزیت شیشه/اپوکسی با افزودن نانو لوله‌های کربنی افزایش چندانی نمی‌یابد، لذا مقادیر افزایش بسامدهای طبیعی نسبت به نمونه مرجع چندان قابل ملاحظه نخواهد بود.

### ۳-۶- نتایج آنالیز مودال تجربی

بعد از آماده سازی نمونه‌ها، آزمایش آنالیز مودال تجربی انجام می‌شود. ابعاد هندسی صفحات مورد آزمایش  $۲۵۰ \times ۲۳۰ \times ۸$  میلی‌متر است. همان طور که گفته شد برای تحریک سازه، از چکش مودال استفاده می‌شود. نمونه‌ای از تحریک‌های صورت گرفته در شکل ۵ آمده است که تغییرات دامنه تحریک را نسبت به زمان نشان می‌دهد. نرم افزار آنالیز مودال مورد استفاده بعد از ایجاد توابع پاسخ بسامدی، تابع نشان دهنده مودال<sup>۱</sup> کل سازه را که ماحصل توابع پاسخ بسامدی تمامی نقاط است، ایجاد می‌نماید که این نمودار در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل، محور عمودی دامنه و محور افقی بسامد است. پس از تحلیل نمودارهای حاصله به وسیله الگوریتم‌های برازش منحنی و با استفاده از روش فضای بسامدی چند مرجعی، ویژگی‌های مودال سازه کامپوزیتی به دست می‌آید.



شکل ۳ بررسی اثر مرتبه و تعداد المان‌ها بر همگرایی نتایج. الف) المان‌های مرتبه اول (ب) المان‌های مرتبه دوم.



شکل ۴ شکل مودهای ارتعاشی در بسامدهای اول تا چهارم

1- Modal identification function (MIF)

**جدول ۵** درصد تغییرات بسامدهای طبیعی و ضرایب میرایی (نسبت به نمونه فاقد نانو لوله کربنی) بدست آمده از تست مودال تجربی در مدهای اول تا چهارم

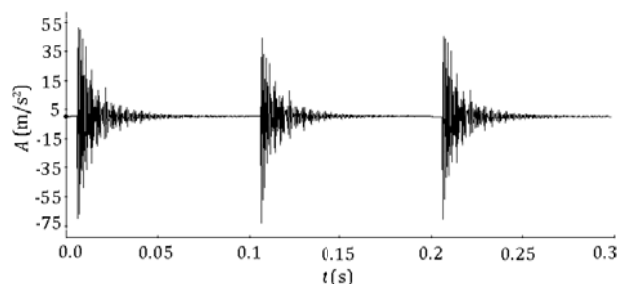
| نوع نمونه          | مود اول | مود دوم  | مود سوم | مود چهارم |         |          |         |          |
|--------------------|---------|----------|---------|-----------|---------|----------|---------|----------|
|                    | بسامد % | میرایی % | بسامد % | میرایی %  | بسامد % | میرایی % | بسامد % | میرایی % |
| ۰/۵٪ وزنی چندجداره | ۷/۹۸    | ۱۳۲/۱۹   | ۳/۹۷    | ۱۱۴/۴۴    | ۰/۶۷    | ۵۷/۹۷    | -۲/۵۱   | ۳۱/۵۸    |
| ۱٪ وزنی چندجداره   | ۲۳/۱۷   | ۱۷۹/۴۵   | ۱۰/۷۷   | ۲۵        | ۴/۴۴    | ۳۲/۶۱    | ۲/۲۲    | ۵۴/۱۳    |
| ۱/۵٪ وزنی چندجداره | ۸/۳۱    | ۱۱۷/۸۱   | ۷/۰۵    | ۴۲/۷۸     | ۲/۸۴    | ۱۰۸/۶۹   | ۰/۴۲    | ۸/۶۵     |
| ۰/۵٪ وزنی تک‌جداره | ۹/۳۳    | ۲۰۹/۵۹   | ۲/۲۲    | -۱/۶۷     | ۰/۵۴    | ۶۳/۷۷    | -۰/۹۶   | ۷۶/۳۲    |
| ۱٪ وزنی تک‌جداره   | ۸/۴۸    | ۱۳۴/۲۵   | ۸/۰۴    | -۳۴/۴۴    | ۲/۱۴    | ۴۷/۱     | -۱/۱۷   | -۳۰/۰۸   |

**جدول ۶** بسامدهای طبیعی بدست آمده از تحلیل المان محدود و آنالیز مودال تجربی

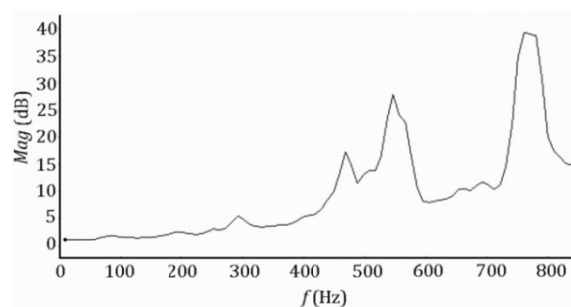
| شماره مود | بدون نانو لوله   | ۰/۵٪ وزنی چندجداره | ۱٪ وزنی چندجداره | ۱/۵٪ وزنی چندجداره | ۰/۵٪ وزنی تک‌جداره | ۱٪ وزنی تک‌جداره |
|-----------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| مود اول   | المان محدود (Hz) | ۲۹۶/۵۵             | ۲۹۹/۳۳           | ۳۰۲/۶۳             | ۳۰۵/۸۹             | ۳۰۲/۷۹           |
|           | تجربی (Hz)       | ۲۶۵/۹۶             | ۲۸۷/۱۸           | ۳۲۷/۵۹             | ۲۸۸/۰۶             | ۲۸۸/۵۱           |
|           | اختلاف %         | ۱۰/۳۱              | ۴/۰۶             | ۸/۲۵               | ۵/۶۵               | ۴/۷۱             |
| مود دوم   | المان محدود (Hz) | ۵۶۸/۳۲             | ۵۷۳/۵۱           | ۵۷۹/۷              | ۵۸۵/۸              | ۵۸۰              |
|           | تجربی (Hz)       | ۵۰۴/۹۲             | ۵۲۴/۹۵           | ۵۵۹/۳۱             | ۵۴۰/۵۳             | ۵۴۵/۵            |
|           | اختلاف %         | ۱۱/۱۵              | ۸/۴۷             | ۳/۵۲               | ۷/۷۳               | ۵/۹۵             |
| مود سوم   | المان محدود (Hz) | ۶۳۷/۳۴             | ۶۴۲/۷۸           | ۶۴۹/۳۵             | ۶۵۵/۸۳             | ۶۴۹/۶۷           |
|           | تجربی (Hz)       | ۵۶۱/۹۴             | ۵۶۵/۷            | ۵۸۶/۸۸             | ۵۷۷/۹۲             | ۵۷۳/۹۸           |
|           | اختلاف %         | ۱۱/۸۳              | ۱۱/۹۹            | ۹/۶۲               | ۱۱/۸۸              | ۱۱/۶۵            |
| مود چهارم | المان محدود (Hz) | ۸۲۸/۷۵             | ۸۳۷/۶۶           | ۸۴۷/۹۸             | ۸۵۸/۱۲             | ۸۴۸/۵۲           |
|           | تجربی (Hz)       | ۸۱۲/۳۹             | ۷۹۱/۶۹           | ۸۳۰/۴۳             | ۸۱۵/۸۳             | ۸۰۲/۸۷           |
|           | اختلاف %         | ۱/۹۷               | ۵/۴۹             | ۲/۰۷               | ۴/۹۳               | ۳/۹۵             |

طبیعی در سایر مودها نیز است که مقدار افزایش آن در مدهای دوم تا چهارم به ترتیب ۱۰/۷۷٪، ۴/۴۴٪ و ۲/۲۲٪ است. بنابراین می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که این نمونه دارای بیشترین مدول الاستیک خواهد بود و با افزودن مقدار بیشتری نانو لوله پدیده کلوخه شدن صورت می‌گیرد. در خصوص سایر نمونه‌ها، تغییرات در بسامدهای ارتعاشی با افزودن نانو لوله‌های کربنی، چندان قابل توجه نیست (و یا حتی نسبت به نمونه بدون نانو لوله کاهش یافته است) که این مسئله در مراجع [۱۹، ۱۸، ۴، ۱] نیز مشاهده می‌شود. همان‌طور که ذکر شد نانو لوله‌های کربنی تأثیر کمی بر ویژگی‌های الاستیک کامپوزیت شیشه/پوکسی گذاشته و در نتیجه بسامدهای طبیعی افزایش چندانی نخواهند داشت. مقادیر افزایش برای ضرایب میرایی بسیار بیشتر از بسامدهای طبیعی است. به طور کلی افزایش میرایی در بسامد طبیعی اول (که معمولاً مهم‌ترین بسامد نیز است)، بیشتر از سایر مودها است که از نظر عملی و به دلیل کاهش ارتعاش سازه در حالت تشدید بسیار مطلوب است. بیشترین مقدار افزایش میرایی، برای نمونه ۰/۵٪ وزنی نانو لوله کربنی تک‌جداره در مود اول و حدود ۲/۱۰٪ است. دلیل این امر می‌تواند مربوط به نسبت منظر بزرگ‌تر نانو لوله‌های تک‌جداره نسبت به نانو لوله‌های چندجداره باشد؛ اما با افزودن مقدار بیشتری از نانو لوله‌های کربنی تک‌جداره به نمونه‌های کامپوزیتی ضرایب میرایی کاهش می‌یابند.

همان‌طور که اشاره شد نانو لوله‌های تک‌جداره نسبت‌های منظر بسیار بزرگی دارند و لذا با افزایش درصد وزنی، کلوخه شدن آن‌ها نیز در کامپوزیت شدت می‌یابد که موجب تأثیر منفی بر ضرایب میرایی می‌شود. البته تغییرات در ضرایب میرایی روند چندان قانون‌مندی را از خود نشان نمی‌دهد که این مسئله در مراجع [۱۹، ۴، ۱] نیز گزارش شده است. مقدار میرایی برای نمونه دارای ۰/۵٪ وزنی نانو لوله تک‌جداره و سپس برای ۱٪ وزنی نانو لوله چندجداره در مدهای اول و چهارم از بقیه نمونه‌ها بیشتر است؛ به طوری که



شکل ۵ نمونه‌ای از سیگنال تحریک اعمالی



شکل ۶ تابع نشان دهنده مودال برای نمونه دارای ۱٪ وزنی نانو لوله کربنی تک‌جداره

همچنین شکل مدهای حاصل شده، به خوبی با نتایج تحلیل المان محدود منطبق هستند که تأییدی بر صحت انجام آزمایش‌های مودال تجربی است. با آنالیز داده‌های اندازه‌گیری شده، مقادیر بسامدهای طبیعی و ضرایب میرایی در هر مود ارتعاشی به دست می‌آید. درصد تغییرات بسامدها و ضرایب میرایی (نسبت به نمونه فاقد نانو لوله) در مدهای اول تا چهارم در جدول ۵ آورده شده است. مطابق این جدول، بیشترین مقدار بسامد طبیعی برای نمونه دارای ۱٪ وزنی نانو لوله‌های کربنی چندجداره مشاهده می‌شود که افزایشی در حدود ۲/۳٪ در مود اول دارد. همچنین این نمونه دارای بیشترین بسامدهای

بیشترین مقدار میرایی برای نمونه دارای ۰/۵٪ نانو لوله چندجداره و در مود سوم برای نمونه ۱/۵٪ نانو لوله چندجداره است.

۷- مقادیر بسامدهای طبیعی به دست آمده از نرم افزار المان محدود و آنالیز مودال تجربی در مودهای اول و چهارم به خوبی به یکدیگر نزدیک هستند. اما اختلاف بسامدها در مود سوم بیشتر بوده و بیشینه مقدار آن ۱۲/۱٪ است.

## ۸- مراجع

- [1] S.U. Khan, C-Y. Li, N.A. Siddiqui, and J-K. Kim, Vibration damping characteristics of carbon fiber-reinforced composites containing multi-walled carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*, No. 71, pp. 1486-1494, 2011.
- [2] C. Zhang, J.F. Sheng, C.A. Ma, M. Sumita, Electrical and damping behaviors of CPE/BaTiO<sub>3</sub>/VGCF composites, *Materials Letters*, No. 59, pp. 3648-3651, 2005.
- [3] S.A. Nayfeh, Damping of flexural vibration in the plane of lamination of elastic-viscoelastic sandwich beams, *Journal of Sound and Vibration*, No. 276, pp. 689-711, 2004.
- [4] R.J. Johnson, J. Tang, R. Pitchumani, Characterization of damping in carbon-nanotube filled fiberglass reinforced thermosetting-matrix composites, *Journal of Materials Science*, No. 46, pp. 4545-4554, 2011.
- [5] S. Iijima, Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature*, No. 354, pp. 56-58, 1991.
- [6] J. Sandler, M.S.P. Shaffer, T. Prasse, W. Bauhofer, K. Schulte, A.H. Windle, Development of a dispersion process for carbon nanotubes in an epoxy matrix and the resulting electrical properties, *Polymer*, No. 40, pp. 5967-5971, 1999.
- [7] J. Hone, M. Whitney, C. Piskoti, A. Zettl, Thermal conductivity of single-walled carbon nanotubes, *Physical review B*, No. 59, No. 4, R2514-R2516, 1999.
- [8] B.B. Johnson, M.H. Santare, J.E. Novotny, S.G. Advani, Wear behavior of Carbon Nanotube/High Density Polyethylene composites, *Mechanics of Materials*, No. 41, pp. 1108-1115, 2009.
- [9] Y.L. Chen, B. Liu, X.Q. He, Y. Huang, K.C. Hwang, Failure analysis and the optimal toughness design of carbon nanotube-reinforced composites, *Composites Science and Technology*, No. 70, pp. 1360-1367, 2010.
- [10] D.C. Davis, J.W. Wilkerson, J. Zhu, V.G. Hadjiev, A strategy for improving mechanical properties of a fiber reinforced epoxy composite using functionalized carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*, No. 71, pp. 1089-1097, 2011.
- [11] S. Maghamikia, J.E. Jam, Buckling analysis of circular and annular composite plates reinforced with carbon nanotubes using FEM, *Journal of Mechanical Science and Technology*, No. 25, No. 11, pp. 2805-2810, 2011.
- [12] J.E. Jam, S.M. Kia, A.G. Pour, M. Emdadi, Elastic Buckling of Circular Annular Plate Reinforced With Carbon Nanotubes, *Polymer Composites*, No. 32, pp. 896-903, 2011.
- [13] R.M. Lin, C. Lu, Modeling of interfacial friction damping of carbon nanotube-based nanocomposites, *Mechanical Systems and Signal Processing*, No. 24, pp. 2996-3012, 2010.
- [14] H. Rajoria, N. Jalili, Passive vibration damping enhancement using carbon nanotube-epoxy reinforced composites, *Composites Science and Technology*, No. 65, pp. 2079-2093, 2005.
- [15] N.A. Koratkar, B.Q. Wei, P.M. Ajayan, Multifunctional structural reinforcement featuring carbon nanotube films, *Composites Science and Technology*, No. 63, No. 11, pp. 1525-1531, 2003.
- [16] X. Zhou, E. Shin, K.W. Wang, C.E. Bakis, Interfacial damping characteristics of carbon nanotube-based composites, *Composites Science and Technology*, No. 64, pp. 2425-2437, 2004.
- [17] R. Rafiee, Analysis of nonlinear vibrations of a carbon nanotube using perturbation technique, *Modares Mechanical Engineering*, No. 12, No. 3, pp. 60-67, 2012. (In Persian)
- [18] H. Rokni, A.S. Milani, R.J. Seethaler, K. Stoeffer, Improvement in dynamic properties of laminated MWCNT-polystyrene composite beams via an integrated numerical-experimental approach, *Composite Structures*, No. 94, pp. 2538-2547, 2012.
- [19] A. Fereidoon, M. Ashoori, N. Kordani, 17th annual international conference on mechanical engineering, university of Tehran, Iran, 2009. (In Persian)
- [20] B.R. Reddy, K. Ramji, B. Satyanarayana, Free Vibration Analysis of Carbon Nanotube Reinforced Laminated Composite Panels, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, No. 80, pp. 768-772, 2011.
- [21] G. Formica, W. Lacarbonara, R. Alessi, Vibrations of carbon nanotube reinforced composites, *Journal of Sound and Vibration*, No. 329, pp. 1875-1889, 2010.

مقدار افزایش میرایی برای نمونه ۰/۵٪ وزنی نانو لوله تک‌جداره در مودهای اول و چهارم به ترتیب ۲۱۰٪ و ۷۶٪ و برای نمونه ۱٪ وزنی نانو لوله چندجداره به ترتیب ۱۷۹٪ و ۵۴٪ است. همچنین بیشترین مقدار میرایی در مود دوم، برای نمونه دارای ۰/۵٪ وزنی نانو لوله چندجداره و در مود سوم، برای نمونه دارای ۱/۵٪ وزنی نانو لوله تک‌جداره است. بیشترین درصد افزایش میرایی در مود دوم ۱۱۴٪ و در مود سوم ۱۰۹٪ به دست آمده است. تفاوت رفتار ماده در مودهای اول و چهارم نسبت به مودهای دوم و سوم می‌تواند ناشی از مکانیزم‌های میرایی مختلف و رفتار متفاوت سازه‌ای صفحات کامپوزیتی در هر کدام از مودها باشد [۱].

اختلاف میان بسامدهای طبیعی به دست آمده از نرم افزار المان محدود و آنالیز مودال تجربی در مودهای اول تا چهارم در جدول ۶ آمده است. بیشترین اختلاف میان بسامدهای به دست آمده از آزمایش مودال و نتایج المان محدود در مود سوم است که شاید بتوان آن را به دلیل نزدیک بودن بسامدهای طبیعی در مودهای دوم و سوم و خطاهای موجود در نرم‌افزار آنالیز مودال (الگوریتم‌های ریاضی به کار رفته جهت انجام برازش منحنی و استخراج پارامترهای مودال) جهت تفکیک مناسب این مودها و محاسبه بسامدهای طبیعی متناظر دانست. کمترین اختلاف‌ها نیز به ترتیب برای بسامدهای چهارم و اول مشاهده می‌شود. بیشترین اختلاف در مود چهارم برابر ۵/۴۹٪ است و کمترین اختلاف برابر ۱/۹۷٪ است که انطباق مناسب نتایج آزمایش مودال تجربی و نتایج حل المان محدود را نشان می‌دهد.

## ۷- نتیجه گیری

در این تحقیق، اثر افزودن نانو لوله‌های کربنی مختلف به صفحات کامپوزیتی چند لایه از جنس شیشه/اپوکسی، بر ویژگی‌های ارتعاشی سازه با تحلیل المان محدود و آنالیز مودال تجربی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده به صورت خلاصه شامل موارد ذیل است:

- ۱- از آنجایی که افزودن نانو لوله‌های کربنی تأثیر کمی بر افزایش مدول کامپوزیت شیشه/اپوکسی دارد، لذا مقادیر افزایش در بسامدهای طبیعی نیز چندان بزرگ نخواهد بود. بیشترین مقدار افزایش بسامد برای نمونه ۱٪ وزنی نانو لوله کربنی چندجداره، در مود اول و حدود ۲۳٪ است.
- ۲- بیشترین مقدار بسامد در تمامی مودهای ارتعاشی به ترتیب برای نمونه‌های ۱٪ وزنی نانو لوله چندجداره و ۱/۵٪ وزنی نانو لوله چندجداره مشاهده می‌شود. بنابراین می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که بهترین ویژگی‌های مکانیکی به ترتیب با افزودن ۱٪ و ۱/۵٪ وزنی نانو لوله چندجداره برای کامپوزیت حاصل می‌شود.
- ۳- مقدار افزایش میرایی در مود اول، بیشتر از سایر مودها است و از آنجایی که بسامد ارتعاشی اول اغلب مهم‌ترین بسامد نیز است، این مسئله از نظر عملی مطلوب بوده و در کاهش دامنه ارتعاش در حالت تشدید و جلوگیری از تخریب سازه، بسیار حائز اهمیت است.
- ۴- بیشترین مقدار افزایش میرایی برای نمونه ۰/۵٪ وزنی نانو لوله کربنی تک‌جداره در مود اول بوده و حدود ۲۱۰٪ است که بسیار قابل توجه است.
- ۵- از آنجایی که نانو لوله‌های کربنی تک جداره مورد استفاده، نسبت منظر بسیار بزرگی دارند؛ لذا با افزودن مقدار آن‌ها از ۰/۵٪ به ۱٪ جرمی در ماتریس، موجب کلوخه شدن آن‌ها شده و باعث کاهش ضرایب میرایی می‌شود.
- ۶- بیشترین مقدار میرایی در مودهای اول و چهارم به ترتیب برای نمونه‌های ۰/۵٪ وزنی نانو لوله تک‌جداره و ۱٪ نانو لوله چندجداره است. همچنین

- [29] E.T. Thostenson, T-W. Chou, On the elastic properties of carbon nanotube-based composites: modelling and characterization, *Journal of physics D: Applied physics*, No. 36, pp. 573-582, 2003.
- [30] R. Arasteh, M. Omid, A.H.A. Rousta, H. Kazerooni, A Study on Effect of Waviness on Mechanical Properties of Multi-Walled Carbon Nanotube/Epoxy Composites Using Modified Halpin-Tsai Theory, *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, No. 50, No. 12, pp. 2464-2480, 2011.
- [31] M. Omid, H. Rokni, A.S. Milani, R.J. Seethaler, R. Arasteh, Prediction of the mechanical characteristics of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites using a new form of the rule of mixtures, *Carbon*, No. 48, pp. 3218-3228, 2010.
- [32] H. Salimi, *Study of the effect of vibration on composite structure of pressure vessel's casing*, MSc Thesis, Faculty of Materials & Manufacturing Processes, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, 2012. (In Persian)
- [33] A. Montazeri, N. Montazeri, Viscoelastic and mechanical properties of multi walled carbon nanotube/epoxy composites with different nanotube content, *Materials and Design*, No. 32, pp. 2301-2307, 2011.
- [22] A.K. Kaw, *Mechanics of Composite Materials*, Second Ed., CRC Press, 2006.
- [23] M. Zakeri, M. Shayanmehr, M.M. Shokrieh, Interface modeling of nanotube reinforced nanocomposites by using multi-scale modeling method, *Modares Mechanical Engineering*, No. 12, No. 5, pp. 1-11, 2012. (In Persian)
- [24] M.M. Shokrieh, S.M. Mahdavi, Micromechanical model to evaluate the effects of dimensions and interphase region on the elastic modulus of CNT/polymer composites, *Modares Mechanical Engineering*, No. 11, No. 3, pp. 13-25, 2011. (In Persian)
- [25] A. Montazeri, A. Khavandi, J. Javadpour, A. Tcharkhtchi, An investigation on the effect of sonication time and dispersing medium on the Mechanical properties of MWCNT/epoxy nanocomposites, *Advanced Materials Research*, No. 264-265, pp. 1954-1959, 2011.
- [26] M.R. Ayatollahi, S. Shadlou, M.M. Shokrieh, M. Chitsazadeh, Effect of multi-walled carbon nanotube aspect ratio on mechanical and electrical properties of epoxy-based nanocomposites, *Polymer Testing*, No. 30, pp. 548-556, 2011.
- [27] A. Montazeri, J. Javadpour, A. Khavandi, A. Tcharkhtchi, A. Mohajeri, Mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites, *Materials and Design*, No. 31, pp. 4202-4208, 2010.
- [28] V.K. Srivastava, Modeling and mechanical performance of carbon nanotube/epoxy resin composites, *Materials and Design*, No. 39, pp. 432-436, 2012.