ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدر س

mme.modares.ac.ir

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

اسماعيل اسدى'، محمود فرهادى نيا 🕷

۱– کارشناسی ارشد، مرکز کامپوزیت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
 ۲– استادیار، مرکز کامپوزیت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
 * تهران، صندوق پستی ۲۷۴–۱۵۸۷، mahmood_farhadinia@mut.ac.ir

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این مقاله، اثر نانو لولههای کربنی بر ویژگیهای ارتعاشی صفحات کامپوزیتی چند لایه به صورت تئوری و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است.	مقاله پژوهشی کامل
جنس صفحات از کامیوزیت شیشه/ ایوکسی است که نانو لولههای کربنی چند جداره و تک جداره با درصدهای جرمی مختلف به آنها افزوده شدهاند.	دریافت: ۲۱ تیر ۱۳۹۲
د انتدا نانه الملههاي کرني يا فارند فاصوت درون رزين ايوکسي توزيع شده م سيس صفحات کاموزيتر يا روش هاي لايه چيني دستي م کسيه خلاً	پذیرش: ۲۶ مهر ۱۳۹۲
	ارائه در سایت: ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۳
كر قابع له به همین مصور لهیه شده سخته شدند. ویز کیفنی مناییکی تعپیریت اینانی طویت شده با طو تولیفای کردی با استفاده از معاد د	کلیکه <i>واژگان:</i> زیارته کاریزید میزارد.
هالپین-سای اصلاح شده، محاسبه شده است. شپس صفحه کامپوزیتی در نرم افزار آبا نوس مدل و تخلیل بسامدی انجام شده است. همچنین س	صفحات کامپوزیتی چند لا یه
ویژگیهای ارتعاشی سازه مورد نظر با استفاده از انالیز مودال تجربی و در شرایط مرزی گیردار به دست امده است. نتایج تجربی نشان دهنده ۲۱۰٪	نانو لولههای دربنی ۱۱۰ - ۱۱۰ - ۱۱۰
افزایش در میرایی برای نمونه دارای ۰/۵٪ وزنی نانو لوله تک جداره (در مقایسه با صفحات کامپوزیتی شیشه/ اپوکسی خالص) است. همچنین مطابقت	تالیر مودال تجربی ۱
خوبی بین بسامدهای طبیعی به دست آمده از تحلیلهای المان محدود و آزمایشهای تجربی مشاهده میشود.	میرایی ایتادا م
	ارتعاشات

Vibrational study of laminated composite plates reinforced by carbon nanotubes

Esmail Asadi¹, Mahmood Farhadi Nia^{2*}

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 Halphin-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 می شود [1]. 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 می روند [۲]. تاکنون بیش تر از پوششهای ویسکوالاستیک¹ پلیمری، برای افزایش میرایی در این گونه سازهها استفاده می شده 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 این گونه 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:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

E. Asadi, M. Farhadi Nia, Vibrational study of laminated composite plates reinforced by carbon nanotubes, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 716, 2014 (In-UP Persian)





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^۱ توسط ایجیما در سال ۱۹۹۱ میلادی [۵] تحولی شگرف در زمینه نانو کامپوزیتها به وجود آمد. به طور کلی نانو لولههای کربنی به صورت تک جداره ۲ و چند جداره ۳ هستند. با اینکه بیشتر از دو دهه از کشف نانو لولههای کربنی نمی گذرد، 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 ۱۰۰۰ و ۵۰ 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 چغرمگی 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 به کارگیری این مواد می توان بارهای بحرانی کمانشی را افزایش داده و بر صحت عملکرد سازه افزود [۱۲،۱۱]. 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 مىتوان گفت قابليت افزايش و هدفمند كردن چندين خصوصيت 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 می شود [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 لغزيدن نانو لولههاى كربنى بر روى يكديگر يا لغزيدن جدارههاى آنها به صورت داخلی بر روی هم. البته بسیاری از نویسندگان این افزایش میرایی را بیشتر به دلیل وجود پدیدهی 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 کقته می شود که یکی از عوامل اصلی افزایش میرایی در کامپوزیت های 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 (۱۲۰۹ m²/g) است [۱۵] که موجب ایجاد اصطکاک زیادتر و در نتیجه میرایی بیشتر می شود؛ در حالی که برای دوده یا ویسکر کربن این نسبت در محدوده ۴/۴-۱۰ m²/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

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 می توان از آن ها به عنوان نوسان کننده های 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 لایه ای پلی استایرن/نانو لوله های 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 ۱۰/۴٪ و ۲۷/۸٪ و برای تیر با توزیع یکنواخت به ترتیب ۴/۴۹٪ و ۳۸/۹٪ 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 ویسکرهای کربن است.

در آزمایش ارتعاشی انجام گرفته توسط فریدون و همکاران [۱۹] بر روی تیرهای اپوکسی/نانولوله کربنی، نمونههای تهیه شده شامل درصدهای مختلف وزنی از نانولولههای تکجداره، چندجداره و چندجداره با عامل کربوکسیلیک⁴ هستند. بیشترین میرایی و بسامد طبیعی مربوط به نمونههای ساخته شده با ۲۰/۵ وزنی نانو لوله تکجداره است که به ترتیب افزایشی در حدود ۵۰۰ ز با نسبت به نمونه خالص دارد. همچنین در مود اول نمونههای دارای ۱ نانو لوله عاملدار، بسامد کمتری نسبت به اپوکسی خالص دارند که میتواند به دلیل کلوخه شدن² 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

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 موره بررسی قرار دادند. آنها ویژگیهای کامپوزیت را با استفاده از المان حجمی نماینده به دست آورده و سپس بسامدهای طبیعی را با نرم افزار انسیس⁴ محاسبه کردند. نتایج نشان میدهد کمپوزیت را با ستفاده از المان حجمی نماینده به دست آورده و سپس میشه، تنها کمی افزایش یافتهاند. همچنین ارتعاش صفحات مستطیلی که بسامدهای طبیعی، با افزودن نانو لولهها به کامپوزیت اپوکسی/لیاف کامپوزیتی تقویت شده با نانو لولههای کربنی بر اساس رویکرد اشلبی-موری-تاناکا^۸ 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 ایوکسی 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 ۹۰ درجه (همراستا با جهت اعمال بر)

¹⁻ Carbon nanotubes (CNTs)

²⁻ Single wall carbon nanotube (SWNTs)

³⁻ Multi wall carbon nanotube (MWNTs)

⁴⁻ Stick-slip mechanism

⁵⁻ COOH 6- Agglomeration

⁷⁻ ANSYS

⁸⁻ Eshelby-mori-tanaka approach

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 بايد توجه نمود كه افزايش مقدار نانو لولهها از درصد مشخصي، 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 می گیرد، بررسی تجربی ویژگیهای ارتعاشی کامپوزیتهای چند لایه تقویت شده با نانو لولههای كربنى است. صفحه ساخته شده از جنس شيشه∥يوكسى است كه 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 اصلاح شده به دست آمده و تحلیل ارتعاشی با نرم افزار المان محدود آباکوس انجام میشود. همچنین ویژگیهای ارتعاشی سازه مذکور شامل بسامدهای طبیعی، ضرایب میرایی و شکل مودها، با انجام آنالیز مودال تجربی نيز به دست مي آيند.

۲- فرآيند 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 ۳۲×۳۵ 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 ایوکسی ML-503 با هاردنر HA-12 خریداری شده از شرکت مواد مهندسی مکرر (ایران) است. این رزین بر پایه رزین اپوکسی بیسفنل A و هاردنر پلی آمینی است. ویژگیهای خوب مکانیکی، قابلیت ماشینکاری و غلظت مناسب، امکان به کارگیری این رزین با الیاف شیشه و یا تقویت کنندههای دیگر را فراهم میسازد. خصوصیات ایوکسی ML-503 که از سازنده (شرکت مکرر) 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 مىشوند.

جدول ۱ ویژگیهای فیزیکی و مکانیکی رزین ایوکسی ML-503

	0 , 0 , 0 .	
مقدار	واحد	ویژگیهای فیزیکی و مکانیکی
۱۱۸۰	Centipoise	لزوجت ترکیبی محصول (C۵۰C)
1/11	gr/cm ³	وزن مخصوص تركيبي محصول
74.	min	عمر مصرف در حجم کم (۲۵۰C)
۵٠/٣	MPa	استحكام كششى
1998	МРа	مدول کششی

1- Halphin-Tsai 2- ABAQUS

میندسی مکانیک مدرس، خرداد ۱۳۹۳، دوره ۱۶، شماره ۳

نانو لولههای کربنی توسط روش رسوب بخارهای شیمیایی ً 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 ۲۰nm و طول میانگین ۱۰µm و نانو لولههای کربنی تک جداره دارای قطر میانگین ۲-۳nm و طول میانگین ۱۰µm هستند. در ابتدا نانو لولهها به رزین اضافه شده و مخلوط رزین و نانو لولهها به مدت ۷ دقیقه با سرعت ۱۲۰۰rpm 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 می گیرد 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 می گیرد. 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 می شود، باعث بالا رفتن قابل توجه دما و تخريب اپوكسى مىشود؛ لذا لازم است بشر حاوى 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 ۱۰۰۰rpm هم زده می شود. 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 می گیرد؛ اما در هربار انجام عملیات فراصوت، قدرت دستگاه به تدریج افزایش می یابد تا بتوان کلوخههای بیشتری را از بین برد. در مجموع، مخلوط دو بار با قدرت ۶۰٪، دو بار با قدرت ۲۰٪، یک بار با قدرت ۸۰٪ و یک بار نیز با قدرت ۹۰٪ فراصوت مے شود.

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 می شود 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 می شود. در هر بار یک لایه پارچه درون قالب فلزی قرار گرفته و با قلممو مخلوط نانو کامپوزیت اپوکسی/نانو لوله کربنی بر روى آن توزيع مى شود. جهت اطمينان از توزيع كاملاً يكنواخت رزين بر روى 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 می شود تا جداسازی قطعه از قالب بعد از پخت، به راحتی انجام پذيرد.

بعد از پايان فرآيند لايه چيني، نمونهها تحت وكيوم قرار مي گيرند. قدرت مکش وکیوم ۸۰۰mbar 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 می پذیرد. بر روی مجموعه قالب یک

³⁻ Chemical vapour deposition

⁴⁻ Hielscher ultrasound technology

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 کوره¹ قرار می گیرد. 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 می شوند تا فرآیند پخت کامپوزیت کامل شود.

۳- ویژ ^عیهای مکانیکی کامپوزیتهای تقویت شده با نانولولههای کربنی

۲-۳- 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 نیمه تجربی هالپین تسای میتوان ویژگیهای تک لایه کامپوزیتی را با توجه به معادلات (۱) و (۲) بدست آورد [۲۲]:

$$\rho = \rho_f V_f + \rho_m V_m \tag{1}$$

$$V = V_f V_f + V_m V_m \tag{(1)}$$

که م و ۷ به ترتیب چگالی و ضریب پوآسون کامپوزیت و ۹*۴ ،۷۰ ،۷۰ ،۷۰ و ۷۶ به ۷۶ و ۷۶ ،۷۰ ،۷۰ و ۷۶ به ۷۰ یا ۷* و ۷۳ به ترتیب چگالی تقویت کننده و ماتریس، ضریب پوآسون تقویت کننده و ماتریس و درصد حجمی تقویت کننده و ماتریس به کار رفته هستند. همچنین مدولهای الاستیک طولی و عرضی با استفاده از روابط (۳) الی (۵) به دست میآیند [۲۲]:

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \tag{(7)}$$

$$\frac{E_2}{E_2} = \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 + \xi \eta V_f}$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{E_{f}}{E_{m}}\right) - 1}{\left(\frac{E_{f}}{E_{m}}\right) + \xi} \tag{(\Delta)}$$

که F_1 و F_2 به ترتیب مدولهای الاستیک کامپوزیت در جهات طولی و عرضی (راستای الیاف و عمود بر الیاف) و F_7 و F_7 به ترتیب مدول ماتریس و تقویت کننده هستند و پارامتر z برابر دو در نظر گرفته می شود. 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_0 و G_1) قرار داده شود و پارامتر z 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 می شود.

۲-۳- ویژگیهای مکانیکی پلیمر حاوی نانو لولههای کربنی

از آنجایی که روشهای مرسوم (مانند قانون مخلوطها^۲، 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

 $E_m = \frac{1 - \eta V_r}{1 - \eta V_r}$

$$E = \frac{1 + \left(\frac{2L}{d}\right) \eta V_f}{1 - \eta V_f} E_m \tag{(F)}$$
$$\eta = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) + \frac{2L}{d}} \tag{(Y)}$$

که E مدول کامپوزیت تقویت شده و L و h طول و قطر تقویت کننده هستند. معادله هالپین-تسای را میتوان با در نظر گرفتن فاکتور جهت گیری (α) برای حالت توزیع اتفاقی⁷ تقویت کننده ها نیز بکار برد که به صورت معادله (Λ) است [۲۵]:

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

زمانی که طول فیلر بزرگتر از ضخامت نمونه باشد، فیلر دارای توزیع اتفاقی در دو جهت است و فاکتور جهت گیری برابر یک سوم در نظر گرفته می شود. وقتی طول فیلر بسیار کوچکتر از ضخامت نمونه باشد، فیلر در هر سه جهت به صورت اتفاقی پخش شده و فاکتور جهت گیری 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. آیت اللهی و همکاران [۲۶] به جای در نظر گرفتن فاکتور جهت گیری، 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:

که $p \in d$ فاکتورهای ثابتی هستند که بیانکننده سطح مشترک غیر ایدهآل میان پلیمر و فیلر، کلوخه شدن و سایر نقایص موجود در نانو کامپوزیت هستند. با گذراندن بهترین منحنی از میان دادههای تجربی اندازه گیری شده از تست کشش نانو کامپوزیت، میتوان فاکتورهای $p \in d$ را بدست آورد.

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

$$(9)$$

$$R = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{1 - \eta V_f} = \frac{1}{2} \left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1 = \frac{1}{2} \left(\frac{E_f}{E_m}\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1 = \frac{1}{2} \left(\frac{E_f}{E_m}\right) - \frac{1}$$

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

¹⁻ oven 2- Rule of mixtures

تئوری و با روشهای مدلسازی گوناگون به محاسبه ویژگیهای مکانیکی نانو کامپوزیتهای تقویت شده با نانو لولههای کربنی پرداختهاند [۲۳،۳۴]. عوامل زیادی بر ویژگیهای مکانیکی این گونه نانو کامپوزیتها تأثیر گذار 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 تقویتکندههای غیر پیوسته با درصدهای کم حجمی، به شکل معادلات (۶) و (۷) است [۲۵]:

³⁻ Randomly

مهندسی مکانیک مدرس، خرداد ۱۳۹۳، دوره ۱٤، شماره ۳

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

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

$$\eta = \frac{\alpha \left(E_{m}\right)^{-1}}{\alpha \left(\frac{E_{f}}{E_{m}}\right) + 2\left(\frac{L}{d}\right) \left(e^{-av_{f}-b}\right)} \tag{11}$$

آنها با گذراندن منحنی از دادههای اندازه گیری شده تجربی، پارامترهای a و b را محاسبه نمودند. اگرچه روابط (۱۱) و (۱۲) تا اندازه خوبی قابلیت پیش بینی مدول الاستیک نانو کامپوزیت تقویت شده با نانو لولهها را دارا هستند، اما باید توجه نمود که فاکتورهای a و d 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 آزمایش های کشش، دوباره محاسبه شوند که این مسئله یکی از مشکلات مهم روابط مذکور است. سریواستاوا [۲۸] با ترکیب مدل میکرومکانیکی ویجت رئو س¹ برای کامپوزیتهای دارای توزیع اتفاقی و اصلاح روابط هالپین-تسای، به روابط (۱۳) الی (۱۵) دست یافت:

$$E = \begin{bmatrix} \frac{3}{8} \frac{1+2\left(\frac{L}{d_0 - d_i}\right) \eta'_L V_f}{1 - \eta'_L V_f} + \frac{5}{8} \frac{1+2\eta'_T V_f}{1 - \eta'_T V_f} \end{bmatrix} E_m$$
(17)

$$\dot{D}_{L} = \frac{\alpha \left(\frac{E_{i}}{E_{m}}\right)^{-1}}{\alpha \left(\frac{E_{i}}{E_{m}}\right) + 2 \left(\frac{L}{d_{o} - d_{i}}\right)}$$
(14)

$$\eta_T = \frac{\alpha \left(\frac{E_T}{E_m}\right) - 1}{\alpha \left(\frac{E_r}{E_m}\right) + 2} \tag{1}$$

که d_b 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:

$$E = \frac{1 + 2\left(\frac{L}{d}\right)\eta V_f}{1 - \eta V_f} E_m \tag{19}$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{E_{f}}{E_{m}}\right) - \left(\frac{d}{4t}\right)}{\left(\frac{E_{f}}{E_{m}}\right) - \left(\frac{L}{2t}\right)}$$

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

(1Y)

لولههای کربنی به دلیل نسبت منظر بالایی که دارند، به صورت انحنادار درون پلیمر قرار می گیرند (به شکل ۱ توجه کنید). آراسته و همکاران [۳۰] با تعریف پارامتر تصحیح انحنا ۲۰/۸، معادلات هالپین-تسای را اصلاح نمودند:

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

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

در معادلات (۱۸) و (۱۹) لازم است با توجه به تصاویر گرفته شده از نانو لولههای کربنی توسط میکروسکوپ انتقال الکترونی^۲، 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 می شود:

$$V_{f} = \frac{W_{f}}{W_{f} + \frac{\rho_{f}}{\rho_{m}} (1 - W_{f})}$$
(7.)

Description (7.)
Description (7.)

۴- مدلسازی

تحلیل ارتعاشی صفحه کامپوزیتی مورد نظر، به کمک نرمافزار آباکوس نسخه ۶.۱۰ انجام می شود. 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 ۳/۸×۲۳۰×۲۵۰ 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 می شود. 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 *Kw* [۳۰]

¹⁻ Voigt-Reuss micromechanical model

²⁻ Transmission electron microscopy (TEM)

همچنین شتاب جاذبه زمین (۹/۸۸g/m²) 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 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 كامپوزیتی، یک لایه چسب مابین تسمهها و سطح صفحه كامپوزیتی 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 می شود تا سیگنال اعمالی یکنواخت تر 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 (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 ۵kHz و مدت زمان داده برداری در هر ضربه ۰/۱۶ است. تحلیل دادههای اندازه گیری شده با نرم افزار N-Modal صورت مى گيرد. الگوريتم انتخابى جهت آناليز مودال دادهها، روش فضای بسامدی چند مرجعی^۳ برای سیستمهای چند ورودی/چند خروجی 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، می تواند بهترین نتایج را در تعیین مشخصات مودال سازه شامل بسامدهای طبيعي، ضرايب ميرايي و شكل مودها محاسبه نمايد.

۶- نتايج 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 می شود که در آن پارامتر جهتگیری، ۵، برابر ۱/۶ و پارامتر تصحیح انحنا، ۲۳، برابر ۰/۴ است (لازم به ذکر است که نانو لوله های تهیه شده توسط این محققین نیز از پژوهشگاه صنعت نفت ایران بوده است). چگالی نانو لولههای کربنی

برابر 1/۶۸g/cm³ و مدول الاستیک آنها ۹۰۰GPa [۳۱] در نظر گرفته می شود. ویژگی های 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 نانولولههای کربنی تأثیر بسزایی در افزایش مدول اپوکسی داشتهاند (حدود ۲۸٪ افزایش برای نمونه ۱/۵٪ 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 ۲٪) و مدولهای عرضی و برشی به ترتیب افزایشی در حدود ۲۶٪ و ۲۷٪ را با افزودن ۱/۵٪ وزنی نانو لولههای کربنی چندجداره از خود نشان میدهند. این موضوع در نتایج سایر تحقیقات تجربی انجام گرفته نیز مشاهده می شود [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 می شود، در تحلیل با المانهای مرتبه اول در صورتی که از تعداد المانهای کم (۲۵ المان) استفاده شود، جوابها خطای بسیار زیادی خواهند داشت (حدود ۳۵٪ خطا)؛ اما المانهای مرتبه دوم در مقایسه با المانهای مرتبه اول، از دقت مناسبتری برخوردار هستند (حدود ۵٪ خطا برای ۲۵ المان).



شکل ۲ نقشه دو بعدی شبکه بندی صفحه کامپوزیتی مورد آزمایش

¹⁻ Roving hammer test

²⁻ Sinocera Piezotronics Inc

³⁻ Frequency domain poly reference method (FDPR)
4- Multi input/ Multi output (MIMO)

جدول ۳ ویژگیهای مکانیکی نمونههای کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تقویت شده با انواع مختلف نانو لولهها							
چگالی کامپوزیت (kg/m³)	مدول برشی (MPa)	مدول عرضی E ₂ (MPa)	مدول طولی (MPa)	مدول اپوکسی/نانو لوله(MPa)	نوع نانو لوله		
۱۵۳۲	۱/۳۶	۴/۲۹	۲۲/۸	٢	بدون نانو لوله		
154.	١/۴٨	۴/۶۷	22/91	۲/۱۹	۰/۵٪ وزنی چندجداره		
1241/2	1/8	۵/۰۴	۲۳/۰۲	۲/۳۷	۱٪ وزنی چندجداره		
1547	1/77	۵/۴۱	22/12	۲/۵۶	۱/۵٪ وزنی چندجداره		
124.	ነ/ዮአ	۴/۶۷	22/91	۲/۱۹	۰/۵٪ وزنی تکجداره		
1241/2	١/٦١	۵/۰۵	۲۳/۰۳	۲/۳۸	۱٪ وزنی تکجداره		



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



موت پهرم **شکل ۴** شکل مودهای ارتعاشی در بسامدهای اول تا چهارم

میندسی مکانیک مدرس، خرداد ۱۳۹۳، دوره ۱٤، شماره ۳

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 می شوند. در شکل ۴ شکل مودهای به دست آمده برای کامپوزیت فاقد نانو لوله های کربنی، نشان داده شده است. همچنین لازم به ذکر است که شکل مودهای متناظر به دست آمده برای نمونه های حاوی نانو لوله های کربنی نیز مشابه شکل مودهای نشان داده شده (فاقد نانو لوله) است.

مقادیر بسامدهای طبیعی به دست آمده برای کامپوزیتهای شیشه/ اپوکسی که با نانولوهای کربنی متفاوت و در درصدهای جرمی مختلف تقویت شدهاند، در مودهای اول تا چهارم در جدول ۴ آورده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، 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 ۲/۳٪، در مود دوم ۱/۳٪، در مود سوم ۲۹٪ و در مود چهارم ۵/۵٪ است. از آنجایی که مقادیر مدولهای الاستیک و برشی کامپوزیت شیشه/پوکسی با افزودن نانو لولههای کربنی افزایش چندانی نمییابد، لذا مقادیر افزایش بسامدهای طبیعی نسبت به نمونه مرجع چندان قابل ملاحظه نخواهد بود.

۶–۳- نتایج آنالیز مودال تجربی

بعد از آماده سازی نمونه ها، آزمایش آنالیز مودال تجربی انجام میشود. ابعاد هندسی صفحات مورد آزمایش ۸/۸×۲۳۰×۲۵۰ 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^۱ 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.

۱۳

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 مودهای اول تا چهارم

چهارم	مود -	سوم	مود	دوم	مود	اول	مود	نوع نمونه
میرایی ٪	بسامد ٪	میرایی ٪	بسامد ٪	میرایی ٪	بسامد ٪	میرایی ٪	بسامد ٪	
۳١/۵٨	-۲/۵۱	۵۷/۹۷	۰ <i>\</i> ۶۷	114/44	٣/٩٧	187/19	٧/٩٨	۵/۰٪ وزنی چندجداره
54/13	7/77	37/81	4/44	۲۵	۱ • /YY	189/40	23/12	۱٪ وزنی چندجداره
٨/۶۵	•/47	۱ • ۸/۶۹	۲/۸۴	47/VX	۷/۰۵	117/41	٨/٣١	۱/۵٪ وزنی چندجداره
۲۶/۳۲	-•/9۶	83/VV	٠/۵۴	- <i>\/</i> ۶Y	7/77	۲ • ٩/۵٩	۹/۳۳	۰/۵٪ وزنی تکجداره
- ~ · / • A	-) /) Y	۴۷/۱	۲/۱۴	-86/66	٨/•۴	184/20	۸/۴۸	۱٪ وزنی تکجداره

جدول ۲ بسامدهای طبیعی بدست امده از تحلیل المان محدود و انالیز مودال تجربی								
۱٪ وزنی تکجداره	۰/۵٪ وزنی تکجداره	۱/۵٪ وزنی چندجداره	۱٪ وزنی چندجداره	۰/۵٪ وزنی چندجداره	بدون نانو لوله		شماره مود	
۳•۲/۷۹	Ldd/ld	۳۰۵/۸۹	3.4.4.4	K49/WW	298/00	المان محدود (Hz)		
TAA/01	Xd·/ XY	۲۸۸/۰۶	۳۲۷/۵۹	241/14	269/16	تجربی (Hz)	مود اول	
۴/۷۱	۲/۸۳	۵/۶۵	۸/۲۵	4/•8	۱۰/۳۱	اختلاف٪		
۵۸۰	$\Delta V T / \Delta I$	$\Delta A \Delta / A$	۵۷۹/۷	۵۷۳/۵۱	561/22	المان محدود (Hz)		
540/5	۵۱۶/۱۵	54.104	۵۵۹/۳۱	524/95	6.4/95	تجربی (Hz)	مود دوم	
۵/۹۵	۱.	٧/٧٣	٣/۵٢	٨/۴٧	11/10	اختلاف٪		
849/8V	۶۴۲/۷۸	۶۵۵/۸۳	849/30	842/11	۶۳۷/۳۴	المان محدود (Hz)		
572/98	۵۶۴/۹۹	DVV/97	۵۸۶/۸۸	686/V	681/94	تجربی (Hz)	مود سوم	
11/80	17/1	۱۱/۸۸	٩/۶٢	11/99	۱.//٨٣	اختلاف/		
۸۴۸/۵۲	۸۳۷/۶۶	٨۵٨/١٢	٨۴٧/٩٨	٨٣٧/۶۶	۸۲۸/۷۵	المان محدود (Hz)		
$\lambda \cdot \tau / \lambda v$	٨٠۴/۵٨	$\Lambda \Lambda \Lambda / \Lambda T$	84.142	791/89	۸۱۲/۳۹	تجربی (Hz)	مود چهارم	
۵/۳۸	٣/٩۵	4/94	۲/۰۷	۵/۴۹	١/٩٧	اختلاف/		



5 0 0 100 200 300 400 500 600 700 800 f(Hz)

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

همچنین شکل مودهای حاصل شده، به خوبی با نتایج تحلیل المان محدود منطبق هستند که تأییدی بر صحت انجام آزمایشهای مودال تجربی است. با آنالیز دادههای اندازه گیری 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 مودهای 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 ۲۳٪ در مود اول دارد. همچنین این نمونه دارای بیشترین بسامدهای

طبیعی در سایر مودها نیز است که مقدار افزایش آن در مودهای دوم تا چهارم به ترتیب ۱۰/۷۷٪، ۴/۴۴٪ و ۲/۲۲٪ است. بنابراین می توان چنین نتیجه گیری نمود که این نمونه دارای بیشترین مدول الاستیک خواهد بود و با افزودن مقدار بیشتری نانو لوله پدیده کلوخه شدن صورت می گیرد. در خصوص سایر نمونهها، تغییرات در بسامدهای ارتعاشی با افزودن نانو لولههای كربنى، چندان قابل توجه نيست (و يا حتى نسبت به نمونه بدون نانو لوله کاهش یافته است) که این مسئله در مراجع [۱۹،۱۸،۴،۱] نیز مشاهده می شود. همان طور که ذکر شد نانو لوله های کربنی تأثیر کمی بر ویژگی های الاستیک کامپوزیت شیشه/اپوکسی 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 طبيعي اول (كه معمولاً مهم ترين بسامد نيز است)، بيشتر از ساير 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 ۲۱۰٪ 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.

همان طور 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 می شود. البته تغیرات در ضرایب میرایی روند چندان قانونمندی را از خود نشان نمی دهد که این مسئله در مراجع [۱۹،۴۰۱] نیز گزارش شده است. مقدار میرایی برای نمونه دارای ۰/۵٪ وزنی نانو لوله تکجداره و سپس برای ۱٪ وزنی نانو لوله چندجداره در مودهای اول و چهارم از بقیه نمونهها بیشتر است؛ به طوری که

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 می تواند 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 می شود. بیشترین اختلاف در مود چهارم برابر ۵/۴۹٪ است و کمترین اختلاف برابر ۱/۹۷٪ است که انطباق مناسب نتايج آزمايش مودال تجربي و نتايج حل المان محدود را نشان ميدهد.

۷-نتیجه گیری

در این تحقیق، اثر افزودن نانو لولههای کربنی مختلف به صفحات کامیوزیتی 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 کامیوزیت شیشه/ایوکسی 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 نمونه های ۱٪ وزنی نانو لوله چندجداره و ۱/۵٪ وزنی نانو لوله چندجداره مشاهده می شود. بنابراین می توان چنین نتیجه گیری 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 مهم ترین بسامد نیز است، این مسئله از نظر عملی مطلوب بوده و در کاهش دامنه ارتعاش در حالت تشدید و جلوگیری از تخريب سازه، بسيار حائز اهميت 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.

۶- بیشترین مقدار میرایی در مودهای اول و چهارم به ترتیب برای نمونههای

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.

۰/۵٪ وزنی نانو لوله تکجداره و ۱٪ نانو لوله چندجداره است. همچنین

بیشترین مقدار میرایی در مود دوم 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 multiwalled 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/BaTiO3/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, Phsical 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. Stoeffler, 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.

- [29] E.T. Thostenson, T-W. Chou, On the elastic properties of carbon nanotube-based composites: modelling and characterization, Journal of phsics D: Applied physics, No. 36, pp. 573–582, 2003.
- [30] R. Arasteh, M. Omidi, 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. Omidi, 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. Chitsazzadeh, 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.