مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۱، ص‌ص ۶۷-۷۳

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تاثیر افزایش نانوذرات مزوپروس سیلیکا و نانولوله کربن بر خواص ارتعاشی پلی‌پروپیلن

علیرضا آلبویه[۱]، عبدالحسین فریدون[۲*]

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

* سمنان، صندوق پستی ۳۵۱۹۵۳۶۳، afereidoon@semnan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۹ تیر ۱۳۹۲

پذیرش: ۲۴ شهریور ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۴ دی ۱۳۹۲

کلید واژگان:

خواص ارتعاشی

نانوکامپوزیت

مزوپروس سیلیکا

نانولوله کربن

فوم

چکیده

هدف اصلی این مقاله بررسی آزمایشگاهی خواص ارتعاشی نانوکامپوزیت‌های پلیمری پرشده با یک درصد وزنی از ذرات مزوپروس سیلیکا، هیدروکسی آپاتیت، کامپوزیت مزوپروس سیلیکا و هیدروکسی آپاتیت و نانولوله‌های کربن می‌باشد. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که ضریب میرایی و فرکانس طبیعی به‌ترتیب در نمونه‌های پلی‌پروپیلن خالص، نانوکامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن/ نانولوله کربن، پلی‌پروپیلن/ هیدروکسی آپاتیت، پلی‌پروپیلن/ مزوپروس سیلیکا و نانوهیبرید پلی‌پروپیلن/ مزوپروس سیلیکا - هیدروکسی آپاتیت افزایش می‌یابد. به‌منظور بررسی تاثیر عامل فوم‌زا بر خواص جذب ارتعاش، عامل فوم‌کننده به نانوکامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن/ نانولوله کربن و پلی‌پروپیلن/ مزوپروس سیلیکا- هیدروکسی آپاتیت افزوده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های فوم‌شده، ضریب میرایی بیشتر و فرکانس طبیعی کمتری نسبت به نمونه‌های فوم‌نشده خود دارند. حداکثر میزان افزایش ضریب میرایی و فرکانس طبیعی نانوهیبرید پلی‌پروپیلن/ مزوپروس سیلیکا- هیدروکسی آپاتیت نسبت به پلی‌پروپیلن خالص به‌ترتیب ۵۵/۰۲ و ۳۴/۰۵ درصد می‌باشد. بنابراین این ترکیب که برای اولین بار در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته است، می‌تواند مشکلات موجود در کاهش ارتعاشات ناخواسته سازه‌ها را برطرف نماید.

The effect of mesoporous silica and carbon nanotube addition on the vibration properties of polypropylene

Alireza Albooyeh[1], Abdolhosein Fereidoon[2*]

1- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
2- Professor, Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
*P.O.B. 35195363 Seman, afereidoon@semnan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received in Revised Form 30 June 2013
Accepted 15 September 2013
Available Online 14 January 2014

Keywords:
Vibration properties
Nanocomposite
Mesoporous silica
Carbon nanotube
Foam

ABSTRACT

This paper presents the experimental study on vibration characteristics of polymeric nanocomposites containing 1 weight percentage of mesoporous silica (MCM-41), Hydroxy Apatite(HA), the composite of MCM-41 and HA (MH) and carbon nanotube (CNT) as a fillers. Experimental results show that damping ratio and natural frequency increase in the neat PP, CNT/ PP, HA/ PP, MCM-41/ PP nanocomposites and MH/ PP hybrid nanocomposite specimens, respectively. In order to introduce the effect of foam agent in the vibration absorbing properties, foam agent is added to CNT/ PP and MH/ PP nanocomposits. The results show that foamed specimens have more damping capacity and lower natural frequency than unfoamed specimens. The maximum value of increasing the damping ratio and natural frequency of the MH/ PP hybrid nanocomposite than neat PP is 55.02 % and 34.05%, respectively. So, MH/ PP hybrid nanocomposite that is studied in this paper for the first time, can remove the reduction of unwanted vibrations of structures problems.

۱- مقدمه

مسئله اتلاف انرژی در سازه‌ها به منظور کاهش دامنه ارتعاشات، موضوع مهمی در طراحی مکانیکی بشمار می‌رود. مواد سازه‌ای که ضریب میرایی بالایی دارند، به منظور کاهش ارتعاشات مکانیکی و تضعیف نمودن اغتشاشات صوتی مطلوب می‌باشند. ضریب میرایی بالا در موادی مشاهده می‌شود که از خواص مکانیکی ضعیفی از جمله تنش تسلیم و سختی پایین برخوردارند؛ بنابراین در سال‌های اخیر تحقیق درباره مواد جدیدی که هم خواص مکانیکی مطلوب و هم میرایی بالایی داشته باشند، مورد توجه قرار گرفته‌است [۱].

کلیه مواد مهندسی درصدی از پخش انرژی در بارهای متناوب را دارند. بعضی از مواد مانند الاستومرها، پلاستیک‌ها و لاستیک‌ها نسبت‌به مواد فلزی دارای پخش انرژی بهتری می‌باشند. مواد نانوهیبرید پلیمری دسته جدیدی از محصولات هستند که از ترکیب دو یا بیشتر تقویت‌کننده با ماتریس زمینه پلیمری ایجاد می‌شوند. این مواد خواص مطلوبی مانند استحکام/ سختی بالا، خواص میرایی خوب، و نفوذپذیری بالا را در مقایسه با مواد معمولی از خود نشان می‌دهند. چنین خواصی توجه زیادی را در استفاده از نانوهیبریدهای پلیمری برای انواع کاربردهای سازه‌ای به خود جلب کرده‌اند [۲].

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A.R. Albooyeh, A.H. Fereidoon, The effect of mesoporous silica and carbon nanotube addition on the vibration properties of polypropylene, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 67-73, 2014 (In Persian)

متداول‌ترین نانوذرات به‌کار برده شده در نانوهیبریدهای پلیمری شامل نانولوله‌های کربنی چندجداره[1]، نانولوله‌های کربنی تک جداره[2]، نانوفیبرهای کربنی[3] و نانوسیلیکا[4] می باشند [۳و۴]. افزودن مقدار کمی از این مواد می‌تواند خواص ماتریس زمینه پلیمری از قبیل سفتی، چقرمگی شکست و استحکام برشی را تا میزان قابل توجهی بهبود بخشد [۵-۷]. سایز نانومتری این ذرات باعث سطح ویژه بسیار بالای آن‌ها تا بیش از ۱۰۰۰ m^2gr^{-1} شده و این موضوع، خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی آن‌ها را منحصر به فرد نموده‌است [۸-۱۰].

مطالعات بسیاری بر روی خواص ارتعاشی کامپوزیت‌های پلیمری انجام شده‌است. آدامز و همکاران به بررسی ضریب میرایی پلاستیک‌های تقویت شده با فیبر با معرفی یک معادله انرژی جدید پرداخته‌اند [۱۱]. کیم و همکاران فرکانس طبیعی و صلبیت خمشی تیرهای ساندویچی را به کمک تست عملی بررسی کرده‌اند [۱۲]. کراتکر و همکارانش جهت بهبود میرایی ماتریس پلیمری از تقویت کننده‌های نانولوله کربن[5] داخل یک لایه کامپوزیتی چندمنظوره استفاده کرده‌اند [۱۳و۱۴]. سفرانی و همکاران نیز به مطالعه آزمایشگاهی خواص میرایی کامپوزیت‌های فایبرگلاس پرداخته‌اند [۱۵]. رفیعی در مرجع [۱۶] ارتعاشات غیرخطی نانولوله کربن را مورد بررسی قرار داده‌است.

در سال‌های اخیر مواد مزوپروس با خواص منحصر به فردی از قبیل منافذ بزرگ، توزیع باریک منافذ و سطح ویژه بالا، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. این مواد در زمینه‌های مختلفی مانند تجزیه، جذب سطحی و جداسازی کاربرد بالقوه‌ای دارند [۱۷و۱۸]. در این میان تحقیقات گسترده‌ای روی مزوپروس سیلیکا[6] با آرایشی شش ضلعی از کانال‌های یکنواخت با قطر منافذی در محدوده ۲-۱۰ نانومتر صورت گرفته است [۱۹و۲۰]. اخیرا مقالاتی درباره افزایش خواص مکانیکی و حرارتی ماتریس‌های پلیمری با افزودن نانوذرات مزوپروس به آن‌ها منتشر شده است [۲۱-۲۳].

از مشکلات اصلی مواد مزوپروس سیلیکا پایین بودن پایداری هیدروترمال آن‌ها به‌دلیل نازک بودن دیواره سلول‌ها می‌باشد که این موضوع باعث کاهش خواص مکانیکی این ماده نیز می‌شود. یکی از راه‌های افزایش ضخامت دیواره سلول‌ها، ترکیب مواد مناسب مانند هیدروکسی آپاتیت[7] با مزوپروس سیلیکا می‌باشد. ماده هیدروکسی آپاتیت جزء اصلی غیر آلی از مواد معدنی استخوان می‌باشد. استحکام مکانیکی پلیمرها را می‌توان تا حد زیادی با اضافه کردن مقدار کمی از این نانوذرات بهبود داد [۲۴].

در این مقاله، نانوکامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن تقویت شده با ذرات نانولوله کربن، مزوپروس سیلیکا، هیدروکسی آپاتیت و نانوهیبرید مزوپروس سیلیکاهیدروکسی آپاتیت[8] از روش اختلاط اختلاط مذاب با شرایط یکسان تهیه می‌شوند تا خواص ارتعاشی آن‌ها با یکدیگر مقایسه گردد. بررسی خواص ارتعاشی نانوهیبرید مزوپروس سیلیکا-هیدروکسی آپاتیت/ پلی‌پروپیلن برای اولین بار در این مقاله صورت گرفته است.

۲- تئوری

از مشکلات اصلی محاسبه خواص ارتعاشی نانوکامپوزیت‌ها اثر بارگذاری شتاب‌سنج‌ها و نیروسنج‌ها بر روی نمونه‌های آزمایش بدلیل جرم کم نمونه‌ها می‌باشد. بعلاوه در بسیاری از موارد در حین تحریک قطعه توسط لرزاننده[9]، بدلیل کوچک بودن قطعه، ارتعاشات غیرخطی ایجاد می‌شود که این موضوع باعث پیچیدگی محاسبات مربوطه می‌شود. بنابراین انتخاب روش مناسب جهت محاسبه خواص جذب ارتعاش در مورد نانوکامپوزیت‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از روش‌های محاسبه میرایی سازه‌ها، روش آنالیز مودال محیطی[10] می‌باشد. از مزایای روش مذکور نسبت‌به سایر روش‌های موجود تحریک سازه توسط بارهای محیطی بوده که باعث کاهش اثرات بارگذاری نیروسنج می‌شود. از طرف دیگر به منظور از بین بردن اثرات بارگذاری شتاب‌سنج‌ها از لیزر جهت محاسبه شتاب استفاده می‌شود.

1- Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs)
2- Single-Walled Carbon Nanotubes (SWNTs)
3- Carbon Nanofibers (CNFs)
4- Nanosilica
5- CNT
6- Mesoporous Silica (MCM-41)
7- Hydroxy Apatite(HA)
8- MCM-41/Hydroxy Apatite(MH)
9- Shaker
10- Operational Modal Analysis (OMA)

۲-۱- روش آنالیز مودال محیطی

روش‌های تحلیل ارتعاشات محیطی به دو دسته کلی پارامتریک و غیر پارامتریک تقسیم بندی می‌شوند. روش‌های غیر پارامتریک، با انجام یک مجموعه از عملیات ریاضی، بر روی داده‌های اندازه گیری شده، در حوزه فرکانسی، به استخراج مشخصات دینامیکی سازه می‌پردازند [۲۵]. از مهمترین این روش‌ها می‌توان به‌روش‌های تجزیه دامنه فرکانسی[11] [۲۶] و تجزیه دامنه فرکانسی پیشرفته[12] [۲۷] اشاره کرد. در حالیکه در روش‌های پارامتریک، یک مدل پارامتریک از سیستم، در حوزه زمان تقریب زده شده و مستقیما بر روی پاسخ‌های بدست آمده از داده‌های اندازه گیری منطبق می‌شود و مدل دینامیکی سیستم استخراج می‌گردد [۲۸و۲۹]. یکی از روش‌های پارامتریک، روش زیرفضاهای اتفاقی[13] است که خود به‌دو روش زیرفضاهای اتفاقی بر مبنای کوواریانس[14] و زیرفضاهای اتفاقی بر مبنای داده‌های خروجی تقسیم بندی می‌شود. در این مقاله روش زیرفضاهای اتفاقی بر مبنای کوواریانس مورد استفاده قرار گرفته‌است.

۲-۱-۱- روش زیرفضاهای اتفاقی بر مبنای کوواریانس

کوواریانس بین پاسخ‌های زمانی در ماتریسی به نام ماتریس بلوکی تئوپلیتز[15] طبق رابطه (۱) بدست می‌آید [۳۰].

$$T_{1|i} = \begin{bmatrix} R_i & R_{i-1} & \cdots & R_1 \\ R_{i+1} & R_i & \cdots & R_2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ R_{2i-1} & R_{2i-2} & \cdots & R_i \end{bmatrix} \quad (۱)$$

که R_i کوواریانس پاسخ‌ها بوده و توسط رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$R_i = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} y_{k+i} y_k^{\,t} \quad (۲)$$

که N تعداد نمونه برداری، y_k بردار خروجی سیستم در لحظه k، بالانویس "t" ترانهاده بردار و i تاخیر زمانی ایجاد شده را نشان می‌دهند.

تجزیه مقدار تکین[16] یک ابزار معتبر عددی برای تخمین مرتبه یک ماتریس است. این ابزار برای ماتریس بلوکی تئوپلیتز در رابطه (۳) به کار گرفته می‌شود [۳۰].

$$T_{1|i} = USV^t \quad (۳)$$

که ماتریس‌های U و V ماتریس‌های متعامد هستند و S یک ماتریس قطری است که شامل مقادیر ویژه مثبت می‌باشد.

با استفاده از تجزیه مقدار تکین ماتریس تئوپلیتز، ماتریس مشاهده پذیری تعمیم یافته[17]، ماتریس کنترل پذیری اتفاقی تعمیم یافته برگردان[18] و ماتریس سیستم از روابط (۴)، (۵) و (۶) بدست می‌آیند.

$$O_i = US^{1/2}T \quad (۴)$$

$$C_i = O_i(1:p,:) \quad (۵)$$

در رابطه (۵) ماتریس C_i معادل با p سطر ابتدایی ماتریس O_i است و p تعداد کانال‌های اندازه گیری است.

$$D = O_i(1:p(i-1),:)^{+} O_i(p+1:pi,:) \quad (۶)$$

ماتریس D بیانگر ماتریس سیستم و بالانویس " + " نشان دهنده شبه معکوس ماتریس می‌باشند. در رابطه (۶) عبارت $O_i(1:p(i-1),:)$، p سطر انتهایی و عبارت $O_i(p+1:pi,:)$، p سطر ابتدایی ماتریس مشاهده پذیری را حذف می‌کند.

فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی با استفاده از تجزیه مقادیر ویژه[19] ماتریس سیستم به صورت رابطه (۷) بدست می‌آیند.

11- Frequency Domain Decomposition (FDD)
12- Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD)
13- Stochastic Subspace Identification (SSI)
14- Covariance–driven Stochastic Subspace Identification (SSI-COV)
15- Teoplitz
16- Singular Value Decomposition (SVD)
17- Extended observability matrix
18- Reversed extended stochastic controllability matrix
19- Eigen Value Decomposition (EVD)

$$D = \Psi[\mu]\Psi^{-1} \quad (۷)$$

که $[\mu]$ ماتریس مقدار ویژه و Ψ ماتریس بردار ویژه می‌باشند.

فرکانس مختلط به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود [۳۱].

$$\lambda = \frac{\ln(\mu)}{\Delta T} \quad (۸)$$

که ΔT دوره نمونه برداری است.

فرکانس طبیعی و ضریب میرایی با استفاده از فرکانس مختلط و از روابط (۹) و (۱۰) بدست می‌آیند. [۳۱].

$$\omega = |\lambda| \quad (۹)$$

$$\zeta = \frac{\mathrm{Re}(\lambda)}{|\lambda|} \quad (۱۰)$$

با محاسبه فرکانس طبیعی نمونه‌ها می‌توان میزان سختی آن‌ها را نیز بدست آورد. رابطه (۱۱) فرمول اویلر- برنولی برای فرکانس طبیعی تیرها را ارائه می‌کند.

$$f_i = \frac{\beta_i^2}{2\pi L^2}\sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (۱۱)$$

که L طول تیر، E مدول الاستیک، I ممان اینرسی تیر، A سطح مقطع عرضی، ρ چگالی و β_i یک ثابت وابسته به‌شرایط تکیه گاهی می‌باشند. بعلاوه $i = 1,2,...,n$ مودهای فرکانس طبیعی هستند.

طبق رابطه (۱۱) هر چقدر فرکانس طبیعی بیشتر باشد، پخش ذرات نانو درون ماتریس پلیمری بهتر بوده و در نتیجه ماده دارای مدول الاستیک و سختی بالاتری خواهد بود.

۲-۱-۲- نمودار پایداری

نمودار پایداری ابزاری است که قطب‌های سیستم را در مرتبه‌های مختلف نشان می‌دهد و به کمک آن، قطب‌های پایدار، ناپایدار و نویزی قابل تشخیص خواهند بود. بدین منظور در هر مرتبه، قطب‌های سیستم بدست می‌آیند و با توجه به معیار پایداری فرکانس و ضریب میرایی، نوع قطب تعیین می‌شود [۳۰].

معمولا معیار پایداری فرکانس ۱٪ و ضریب میرایی ۵٪ در نظر گرفته می‌شود [۳۰]. جهت تشخیص قطب‌های نویزی، از ضریب میرایی استفاده می‌شود، که قطب با ضریب میرایی بالای ۱۰٪، به‌عنوان قطب نویزی تعیین و در نمودار پایداری با علامت × نشان داده می‌شود. سپس قطب‌های هر مرتبه با قطب مرتبه پیش از خود مقایسه می‌شوند. قطب‌هایی که اختلاف آن‌ها کمتر از ۱٪ می‌باشد، به‌عنوان قطب پایدار سیستم تعیین و در نمودار پایداری با علامت + مشخص می‌شوند. دیگر قطب‌ها نیز به‌عنوان قطب‌های ناپایدار شناسایی و با علامت × نشان داده می‌شوند [۳۰].

۳- مواد مورد استفاده

گرانول پلی‌پروپیلن هوموپلیمر (P ۵۷۰) با مشخصات ضریب جریان مذاب[1] gr ۱۰ $\min^{-1}$ ۸ و چگالی kgm^{-3} ۹۰۵ از شرکت سابیک[2] (عربستان صعودی) تهیه شده¬است. سازگارکننده پلی‌پروپیلن[3] با ضریب جریان مذاب gr ۱۰ $\min^{-1}$ ۶۴ از شرکت پیرکس[4] (هلند) مورد استفاده قرار گرفته‌است. عامل فوم کننده نیز ازودی کربوکسامید ($C_2H_4N_4O_2$)، (≥۹۸٪ ، مرک آلمان) با چگالی $grcm^{-3}$ ۱/۸۷ و نقطه ذوب $°C$ ۲۲۰- $°C$ ۲۲۵ می‌باشد.

نانولوله‌های کربنی چندجداره از شرکت تایمز (چین) خریداری شده‌اند. درصد خلوص نانولوله‌های کربنی چندجداره بیشتر از ۹۵ درصد و قطر آن‌ها در محدوده ۵- ۲۰ نانومتر می‌باشد. ذرات نانو هیدروکسی آپاتیت، مزوپروس سیلیکا و مزوپروس سیلیکا- هیدروکسی آپاتیت از شرکت نانو نافذ (ایران) تهیه شده‌اند.

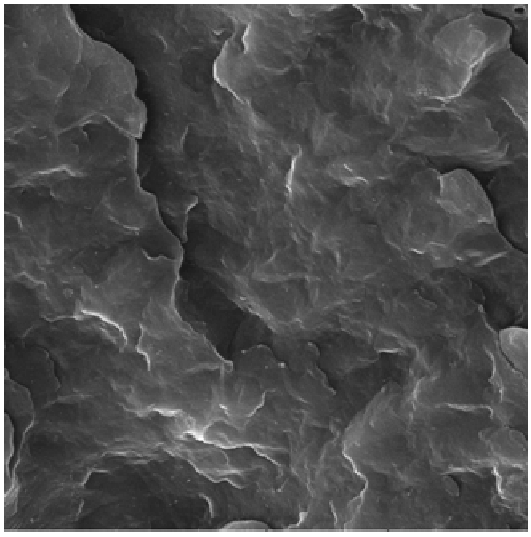
1- Melt Flow Index (MFI)
2- Sabic
3- PP-g-MA
4- Priex

۴- آماده سازی نانوکامپوزیت¬ها

قبل از آماده سازی نمونه‌ها، ذرات نانو، گرانول‌های پلی‌پروپیلن و سازگار کننده پلی- پروپیلن به مدت ۴۸ ساعت در دمای $°C$ ۸۰ در یک کوره خلأ، خشک می‌شوند. گرانول‌های پلی‌پروپیلن، سازگار کننده پلی‌پروپیلن ($PP\text{-}g\text{-}MA$) که به‌منظور پخش بهتر ذرات نانو درون ماتریس پلی‌پروپیلن و پیوند بهتر بین سطح مشترک ماتریس و تقویت کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد- عامل فوم کننده - در مورد نمونه‌های فوم شده و ذرات نانو در یک دستگاه مخلوط کن داخلی (هک با مدل اچ بی آی ۹۰) با یکدیگر مخلوط می‌شوند. این مخلوط کن دارای یک جفت روتور غلطکی با نیروی برشی بالا می‌باشد. سرعت چرخش و دمای محفظه مخلوط کن به‌ترتیب در rpm ۱۲۰ و $°C$ ۱۸۰ تنظیم می‌شوند و فرآیند اختلاط به مدت ۱۰ دقیقه ادامه پیدا می‌کند. ترکیبات بدست آمده با استفاده از دستگاه آسیاب (ویزر؛ آلمان) به شکل گرانول درآمده و سپس پنج نمونه مستطیلی با ابعاد ۸۰×۱۰×۴ میلیمتر برای انجام تست‌های ارتعاشی تزریق می‌شوند (با استفاده از ماشین قالب گیری تزریقی اصلانیان؛ ای ام۸۰؛ ایران). فشار نگهدارنده و سرعت تزریق به‌ترتیب برابر bar ۱۱۵ و rpm ۴۵ در نظر گرفته می‌شوند. همچنین دمای قالب تزریق بین $°C$ ۲۰۰ تا $°C$ ۲۲۰ و دمای سر نازل قالب $°C$ ۲۵ می‌باشد. پلی‌پروپیلن خالص نیز با شرایط مشابه برای مقایسه خواص، به عنوان نمونه شاهد تولید می‌شود. عنوان اختصاری، مواد مورد استفاده و درصد وزنی نمونه‌های مختلف در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

۵- خواص مورفولوژیکی[5]

مورفولوژی نانوکامپوزیت‌ها با استفاده از تحلیل میکروسکوپ الکترونی روبشی[6] (دستگاه وی جی ای چک) و میکروسکوپ الکترونی عبوری[7] (مدل ای ام ۲۸۰ اس؛ فرانسه با ولتاژ kv ۱۰۰) بررسی شده‌است. شکل ۱ و ۲ به ترتیب تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و عبوری نانولوله‌های کربنی چندجداره در ماتریس پلی‌پروپیلن را نشان می‌دهند. در شکل ۲ خطوط مشکی نشان دهنده نانولوله‌های کربنی هستند که پخش خوب ذرات را نشان می‌دهند. شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مزوپروس سیلیکا-هیدروکسی آپاتیت در ماتریس پلی‌پروپیلن است که مقاطع دایره‌ای توخالی ذرات مزوپروس سیلیکا-هیدروکسی آپاتیت را نشان می‌دهند. همان طور که در شکل مشخص است این ذرات دارای پخش مناسب و همگنی می‌باشند. شکل ۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری ذرات مزوپروس سیلیکا- هیدروکسی آپاتیت می‌باشد که استوانه‌های داخل شکل نشان دهنده ذرات هیدروکسی آپاتیت و ذرات متخلخل نشان داده شده مربوط‌به مزوپروس سیلیکا می‌باشند.

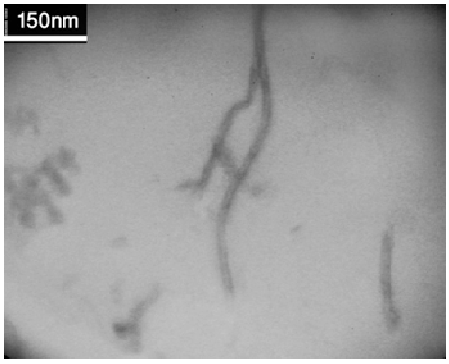


شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی یک درصد وزنی نانولوله‌های کربنی چندجداره در ماتریس پلی‌پروپیلن

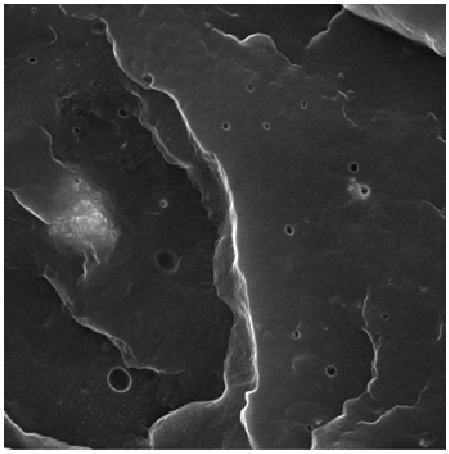
5- Morphological Characterization
6- Scanning Electron Microscopy (SEM)
7- Transmition Electron Microscopy (TEM)

جدول ۱ عنوان اختصاری، مواد مورد استفاده و درصد وزنی نمونه‌های مختلف

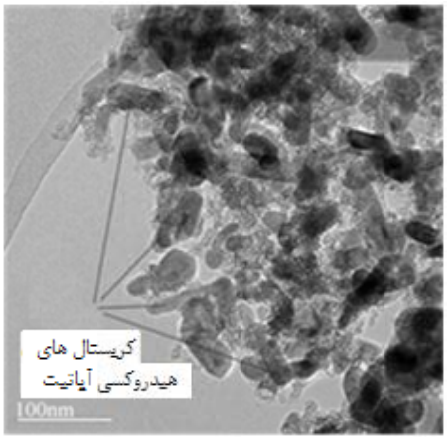
عنوان اختصاری	مواد مورد استفاده	پلی‌پروپیلن درصد وزنی (٪)	ذرات نانو درصد وزنی (٪)	سازگارکننده درصد وزنی (٪)	فوم کننده درصد وزنی (٪)
نمونه الف	پلی‌پروپیلن خالص	۱۰۰	۰	۰	۰
نمونه ب	پلی‌پروپیلن/ نانولوله کربن/ سازگار کننده	۹۷	۱	۲	۰
نمونه ج	پلی‌پروپیلن/ نانولوله کربن/ سازگار کننده / عامل فوم کننده	۹۶	۱	۲	۱
نمونه د	پلی‌پروپیلن/ هیدروکسی آپاتیت/ سازگار کننده	۹۷	۱	۲	۰
نمونه ه	پلی‌پروپیلن/ مزوپروس سیلیکا/ سازگار کننده	۹۷	۱	۲	۰
نمونه و	پلی‌پروپیلن/ مزوپروس سیلیکا- هیدروکسی آپاتیت/ سازگار کننده	۹۷	۱	۲	۰
نمونه ز	پلی‌پروپیلن/ مزوپروس سیلیکا- هیدروکسی آپاتیت/ سازگار کننده / عامل فوم کننده	۹۶	۱	۲	۱



شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری یک درصد وزنی نانولوله‌های کربنی چندجداره در ماتریس پلی‌پروپیلن



شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی یک درصد وزنی مزوپروس سیلیکا- هیدروکسی آپاتیت در ماتریس پلی‌پروپیلن



شکل ۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری ذرات مزوپروس سیلیکا- هیدروکسی آپاتیت

۶- آزمایش و تحلیل مودال محیطی

فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی نمونه‌ها با استفاده از آزمایش مودال محیطی و با روش زیرفضاهای اتفاقی بر مبنای کوواریانس تعیین می‌شوند. به‌این صورت که ابتدا نمونه‌ها تحت شرایط گیردار- آزاد بسته شده و با استفاده از تحریک‌های محیطی به ارتعاش در می‌آیند. سپس یک لیزر B&K دامنه پاسخ نمونه را اندازه گیری می‌کند. داده‌های حاصل از تست پس از تقویت به یک کامپیوتر متصل به دستگاه تست فرستاده می‌شود و در آن با استفاده از یک نرم افزار تحلیل گر پالس B&K نمودار پایداری ترسیم و پارامترهای مودال با استفاده از روابط (۹) و (۱۰) در بخش ارتعاشات محیطی نرم افزار بدست می‌آیند.

با توجه به‌اینکه میرایی در سازه‌های مختلف به هندسه سازه (شرایط تکیه گاهی) و جنس مواد مورد استفاده وابسته است و هدف اصلی در این تحقیق، بررسی میرایی مربوط‌به جنس مواد مختلف می‌باشد، لذا هندسه سازه و شرایط تکیه گاهی مربوط‌به کلیه نمونه‌ها به‌صورت کاملا یکسان در نظر گرفته شده است. به این صورت که کلیه نمونه‌ها با ابعاد و وزن یکسان تولید شده و با گشتاور یکسانی درون گیره بسته می‌شوند. شکل ۵ نمونه‌ها و شرایط بارگذاری و تست آن‌ها را نشان می‌دهد.

نمونه‌های (الف) تا (ز) مورد آزمایش قرار می‌گیرند. سپس با استفاده از روش زیرفضاهای اتفاقی بر مبنای کوواریانس، ماتریس سیستم محاسبه شده و از نتایج حاصل از تجزیه مقادیر ویژه ماتریس سیستم، قطب‌های سیستم به دست می‌آیند.

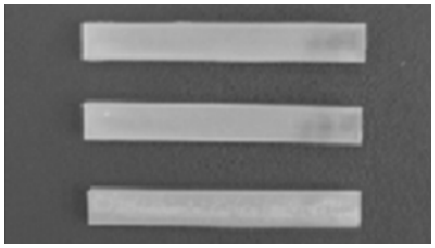
شکل‌های (۶-۸) نمودار پایداری مدل فضای حالت به‌دست آمده از آزمایش را به ترتیب برای نمونه‌های (الف)، (ز) و (و) نشان می‌دهند.

قله‌های مربوط‌به این نمودارها در محل قطب‌های پایدار که با علامت + نشان داده شده‌اند، بیان کننده فرکانس‌های طبیعی سازه بوده و با توجه به رابطه (۹) قطب‌های مختلط از روی فرکانس‌های طبیعی محاسبه می‌شوند، سپس از رابطه (۱۰) ضرایب میرایی به دست می‌آیند.

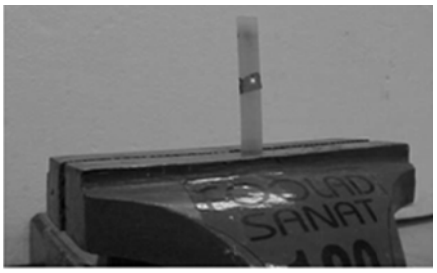
۷- نتایج و بحث

جدول ۲ فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی محاسبه شده نمونه‌ها را به‌روش آنالیز مودال محیطی از روابط (۹) و (۱۰) نشان می‌دهد.

در شکل ۹ فرکانس‌های طبیعی برای مودهای اول و دوم ارتعاشاتی کلیه نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه‌به شکل شماره ۹ بالاترین فرکانس طبیعی، مربوط‌به نمونه‌های (د) و (و) یعنی نانوکامپوزیت‌هایی که در ساختار آن‌ها نانوذرات هیدروکسی آپاتیت استفاده شده است، می‌باشد. دلیل این موضوع استحکام بالای ذرات هیدروکسی آپاتیت نسبت‌به سایر نانوذرات بکار گرفته شده است که باعث افزایش سختی و در نتیجه افزایش فرکانس طبیعی می‌شود. طبق نتایج بدست آمده فرکانس‌های طبیعی این دو نمونه یعنی نمونه (د) و نمونه (و) در مود اول و دوم تفاوت چندانی ندارند ولی ضرایب میرایی مودهای اول و دوم نمونه (و) به ترتیب به میزان ۱۹/۵۴ و ۳۴/۷۲ درصد از نمونه (د) بیشتر است، که این تفاوت نسبتا زیاد بخاطر ماهیت متخلخل نانوذرات مزوپروس سیلیکا می‌باشد که باعث افزایش نسبتا زیاد ضریب میرایی و کاهش ناچیز فرکانس طبیعی نمونه (و) نسبت‌به نمونه (د) می‌شوند.



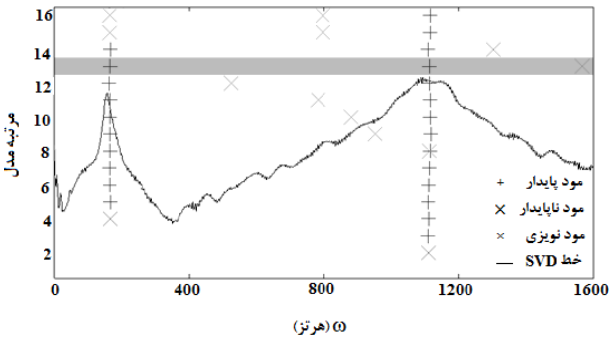
الف



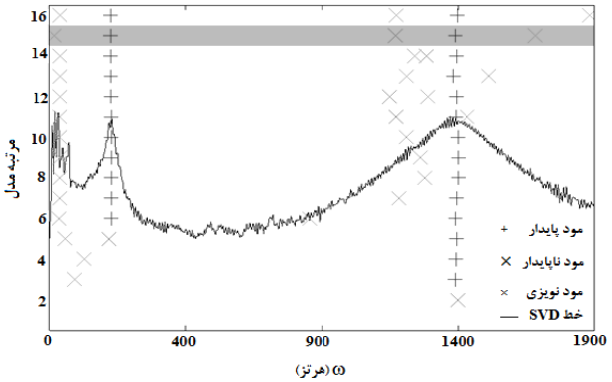
ب

ج

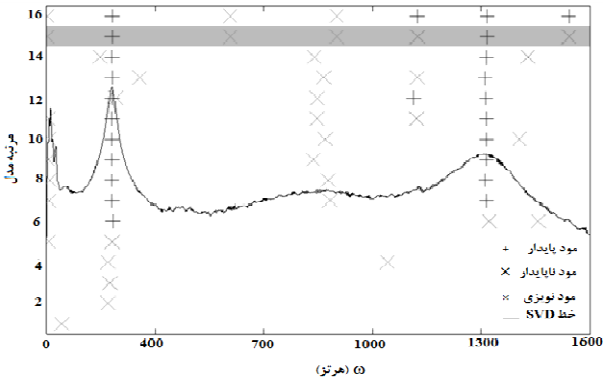
شکل ۵ الف- نمونه‌های آزمایش ب- شرایط گیردار- آزاد نمونه ج- تصویری از یک نمونه در هنگام آزمایش



شکل ۶ نمودار پایداری مدل فضای حالت برای نمونه (الف)



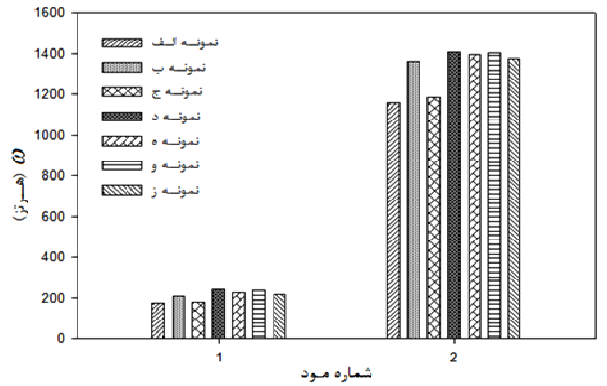
شکل ۷ نمودار پایداری مدل فضای حالت برای نمونه (و)



شکل ۸ نمودار پایداری مدل فضای حالت برای نمونه(ز)

جدول ۲ ضرایب میرایی و فرکانس‌های طبیعی مود اول و دوم

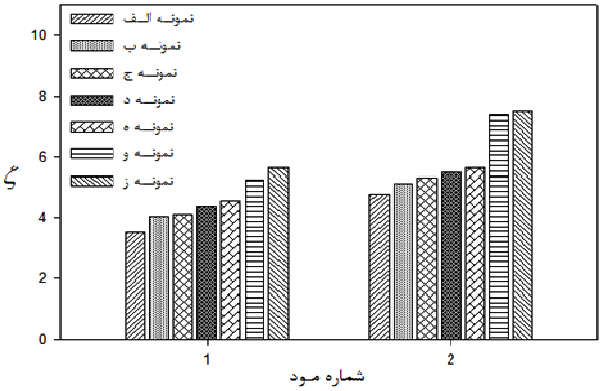
نمونه	فرکانس طبیعی (هرتز)		ضریب میرایی (٪)	
	مود اول	مود دوم	مود اول	مود دوم
نمونه الف	۱۷۷/۰۲	۱۱۵۷/۵۰	۳/۵۵	۴/۷۸
نمونه ب	۲۰۷/۰۸	۱۳۵۸/۶۷	۴/۰۴	۵/۱۱
نمونه ج	۱۸۰/۸۰	۱۱۸۷/۷۵	۴/۱۳	۵/۳۲
نمونه د	۲۴۰/۲۰	۱۴۱۰/۳۰	۴/۴۰	۵/۵۰
نمونه ه	۲۲۸/۰۹	۱۳۹۳/۴۰	۴/۵۶	۵/۶۴
نمونه و	۲۳۷/۳۰	۱۴۰۳/۷۰	۵/۲۶	۷/۴۱
نمونه ز	۲۱۵/۰۴	۱۳۷۳/۲۰	۵/۶۴	۷/۵۳



شکل ۹ فرکانس‌های طبیعی مود اول و دوم ارتعاشی کلیه نمونه‌ها

در شکل ۱۰ ضرایب میرایی مودهای اول و دوم ارتعاشاتی نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که می‌توان میرایی پلی پروپیلن خالص را با افزودن ذرات نانو هیدروکسی آپاتیت، نانولوله کربن، مزوپروس سیلیکا و مزوپروس سیلیکا- هیدروکسی آپاتیت به ماتریس پلیمری افزایش داد. همچنین بالاترین ضریب میرایی مربوطبه نمونه‌های (ز) و (و) می‌باشد، یعنی نانوهیبریدهایی که در ترکیب آن-ها ذرات نانوکامپوزیت مزوپروس سیلیکا- هیدروکسی آپاتیت مورد استفاده قرار گرفته است. دلیل این موضوع را می‌توان، ابعاد نانومتری تخلخل‌های مزوپروس سیلیکا (۲ تا ۱۰ نانومتر)، سطح ویژه بالای ذرات مزوپروس (بیش از $1000\ m^2gr^{-1}$) عنوان کرد که باعث بهبود برهمکنش سطحی ذرات نانو با ماتریس پلیمری شده و خواص مکانیکی از جمله ضریب میرایی و فرکانس طبیعی را بهبود می‌بخشد.

علاوه بر این، نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزودن عامل فوم کننده به نانوهیبرید پلی‌پروپیلن/ مزوپروس سیلیکا- هیدروکسی آپاتیت، میرایی در مود اول و دوم به‌ترتیب به¬میزان ۷/۲۳ و ۱/۶۲ درصد افزایش و فرکانس طبیعی به¬مقدار ۳۶/۹۴ و ۱۲/۳۷ درصد کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، عامل فوم کننده با ایجاد حفره‌های سلول بسته در ساختار نانوکامپوزیت، باعث افزایش قدرت جذب ارتعاش و انرژی در محل حفره‌ها شده و از طرفی به دلیل تمرکز تنش در محل حفره ها باعث کاهش سختی و مدول نمونه‌ها می‌شود.



شکل ۱۰ ضرایب میرایی مود اول و دوم ارتعاشی نمونه‌ها

جدول ۳ درصد افزایش فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی نمونه‌ها را نسبت‌به پلی پروپیلن خالص نشان می‌دهد.

جدول ۳ درصد افزایش ضریب میرایی نمونه‌ها نسبت‌به پلی‌پروپیلن خالص

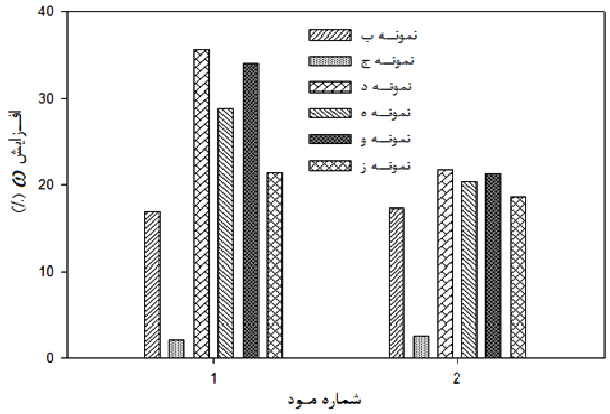
نمونه	درصد افزایش فرکانس طبیعی(٪)		درصد افزایش ضریب میرایی (٪)	
	مود اول	مود دوم	مود اول	مود دوم
نمونه ب	۱۶/۹۸	۱۷/۳۰	۱۳/۸	۶/۹
نمونه ج	۲/۱۳	۲/۶۱	۱۶/۴	۱۱/۳
نمونه د	۳۵/۶۹	۲۱/۸۴	۲۳/۹۴	۱۶/۰۶
نمونه ه	۲۸/۸۴	۲۰/۳۸	۲۸/۴۵	۱۷/۹۹
نمونه و	۳۴/۰۵	۲۱/۲۶	۴۸/۱۷	۵۵/۰۲
نمونه ز	۲۱/۴۷	۱۸/۶۳	۵۸/۸۷	۵۷/۵۳

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ میزان افزایش فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی نمونه‌ها نسبت‌به پلی‌پروپیلن خالص نشان داده شده است. همانطور که در این اشکال مشخص است، با افزایش کلیه ذرات نانو فرکانس طبیعی و قدرت جذب ارتعاش پلی‌پروپیلن خالص بهبود داده می‌شود. اما در بین این ذرات، بیشترین افزایش فرکانس طبیعی مربوطبه ذرات هیدروکسی آپاتیت است که در مود اول و دوم به¬میزان ۳۵/۶۹ و ۲۱/۸۴ می‌باشد که به‌دلیل سختی بسیار بالای ذرات هیدروکسی آپاتیت می‌باشد. همچنین بیشترین افزایش ضریب میرایی مربوطبه ذرات نانو مزوپروس سیلیکا - هیدروکسی آپاتیت می‌باشد، به این صورت که ضریب میرایی مود اول و دوم نانوهیبرید پلی‌پروپیلن/ مزوپروس سیلیکا - هیدروکسی آپاتیت، به‌ترتیب به میزان ۵۸/۸۷ درصد و ۵۷/۵۳ درصد نسبت‌به پلی پروپیلن خالص بیشتر است.

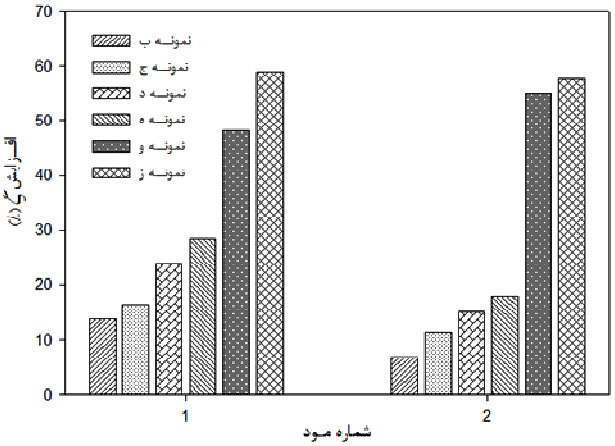
نتیجه مهم دیگر این است که ذرات نانو مزوپروس سیلیکا - هیدروکسی آپاتیت نسبت‌به ذرات مزوپروس سیلیکا و هیدروکسی آپاتیت عملکرد بهتری در جذب ارتعاشات از خود نشان می‌دهند. این مسئله به دلیل آن است که ترکیب هیدروکسی آپاتیت با مزوپروس سیلیکا باعث افزایش ضخامت دیواره‌های تخلخل‌ها شده و آرایش محلی دیواره‌ها را بهبود می‌بخشد. به این‌ترتیب مشکلات مربوطبه کوچک بودن ضخامت دیواره حفره‌ها در ذرات مزوپروس سیلیکا – که باعث نرمی بیش از حد و کاهش خواص مکانیکی آن می‌شود- را مرتفع می‌سازد. لذا خواص میرایی و سختی نانوکامپوزیت مزوپروس سیلیکا- هیدروکسی آپاتیت نسبت‌به ذرات سازنده خود بیشتر است.

میزان افزایش ضریب میرایی نانوهیبرید پلی‌پروپیلن/ مزوپروس سیلیکا- هیدروکسی آپاتیت نسبت‌به نانوکامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن/ هیدروکسی آپاتیت و پلی- پروپیلن/ مزوپروس سیلیکا در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

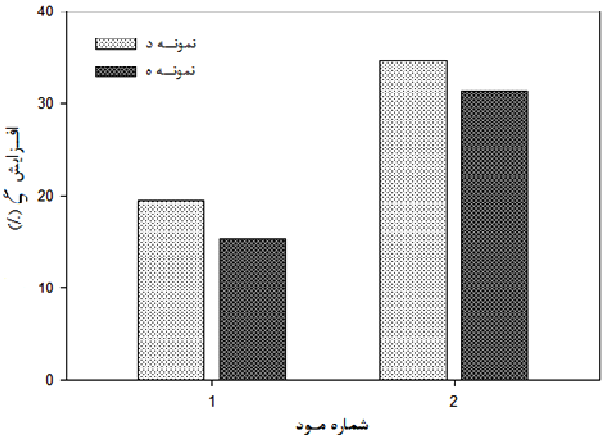
مقایسه فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی نمونه‌های (ب) و (و) نشان می‌دهد که ذرات نانو مزوپروس سیلیکا- هیدروکسی آپاتیت نسبت‌به ذرات نانولوله کربن دارای سختی و جذب ارتعاش بهتری هستند. به این دلیل که سطح ویژه ذرات مزوپروس سیلیکا – هیدروکسی آپاتیت بسیار بزرگتر از نانولوله کربن بوده و نیز ذرات مزوپروس سیلیکا – هیدروکسی آپاتیت دارای ابعاد حفره بزرگتر و توزیع باریکتر منافذ نسبت‌به ذرات نانولوله کربن می‌باشند. بعلاوه ماهیت متخلخل ذرات مزوپروس سیلیکا – هیدروکسی آپاتیت نسبت‌به نانولوله کربن باعث شکل گیری زنجیره پلی‌پروپیلن درون کانال‌های مزوپروس شده و در نتیجه از کلوخه شدن ذرات مزوپروس جلوگیری می‌شود، در حالیکه مشکل اصلی نانو لوله‌های کربنی، طبق گزارش‌های ارائه شده، کلوخه شدن آن‌ها می‌باشد، که باعث تضعیف خواص مکانیکی این ذرات می‌شود. همچنین نفوذ ذرات پلی‌پروپیلن درون حفره‌های مزوپروس در طول کانال‌ها باعث برهم کنش سطحی و پخش بهتر بین ماتریس و ذرات نانو شده و خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد.



شکل ۱۱ میزان افزایش فرکانس طبیعی نمونه‌های مختلف نسبت‌به پلی‌پروپیلن خالص



شکل ۱۲ میزان افزایش ضریب میرایی نمونه‌های مختلف نسبت‌به پلی‌پروپیلن خالص



شکل ۱۳ میزان افزایش ضریب میرایی نمونه (و) نسبت‌به نمونه‌های (د) و (ه)

۸- نتیجه‌گیری

این مقاله به مطالعه آزمایشگاهی خصوصیات ارتعاشی نانوکامپوزیت‌های پلیمری حاوی نانوذرات مزوپروس سیلیکا و نانولوله کربن می‌پردازد. نتایج آزمایشگاهی در مجموع نشان می‌دهد که ذرات مزوپروس سیلیکا – هیدروکسی آپاتیت بهترین عملکرد را از نظر افزایش میزان سختی و بهبود خواص جذب ارتعاش از خود نشان می‌دهند. بعلاوه فوم کردن نمونه‌ها باعث افزایش ضریب میرایی و کاهش فرکانس طبیعی نمونه‌ها می‌شود. خواص ارتعاشی نانوهیبریدهای پلی‌پروپیلن/ مزوپروس سیلیکا- هیدروکسی آپاتیت و فوم پلی‌پروپیلن/ مزوپروس سیلیکا- هیدروکسی آپاتیت برای اولین بار در این مقاله محاسبه شده است. باتوجه‌به نتایج بدست آمده می‌توان از این نانوهیبریدها به‌دلیل خواص میرایی بسیار خوب و سختی بالا نسبت به سایر مواد در دسترس، در کاربردهای جذب ارتعاشات استفاده نمود.

۹- فهرست علائم

A	سطح مقطع (m^2)
D	ماتریس سیستم
E	مدول الاستیک (Pa)
I	ممان اینرسی (L^4)
L	طول تیر (m)
N	تعداد نمونه برداری
P	تعداد کانال های اندازه گیری سیگنال
i	تاخیر زمانی (s)
f	فرکانس (Hz)

علایم یونانی

λ	فرکانس مختلط ($rads^{-1}$)
ΔT	دوره نمونه برداری
ω	فرکانس طبیعی ($rads^{-1}$)
ζ	ضریب میرایی
ρ	چگالی (kgm^{-3})
μ	مقادیر ویژه
β	ثابت وابسته به¬شرایط تکیه گاهی

۱۰- مراجع

[1] T. Asare, In fabrication and damping behavior of particulate BaTiO3 ceramic reinforced copper matrix composites, MS Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2004.

[2] C.K. Chozhan, R. Rajasekaran, Thermomechanical behavior of vinyl ester oligomer-toughened epoxy-clay hybrid nanocomposites, Int J Polym Mater, Vol. 57, pp. 319-337, 2008.

[3] A. Anand, S. Jose, PET-SWNT nanocomposite fibers through melt spinning, Int J Polym Mater., Vol. 59, pp. 438-449, 2010.

[4] F.H. Gojny, M.H.G. Wichmann, Carbon nanotube-reinforced epoxy-composites: enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content, Compos Sci Technol., Vol. 64, pp. 2363-2371, 2004.

[5] H. Ma, J. Zeng, Processing, structure, and properties of fibers from polyester/carbon nanofiber composites, Compos Sci Technol., Vol. 63, pp. 1617-1628, 2003.

[6] L.S. Schadler, S.C. Giannaris, Load transfer in carbon nanotube epoxy composites, Appl Phys Lett., Vol. 73, pp. 3842-3844, 1998.

[7] D. Qian, E.C. Dickey, Load transfer and deformation mechanisms in carbon nanotube-polystyrene composites, Appl Phys Lett., Vol. 6, pp. 2868-2870, 2000.

[8] C.C. Ibeh, B. Monika, Current Trends in Nanocomposite Foams, J Cell Plast., Vol. 44, pp. 493-515, 2008.

[9] F. Jin, E.H. Naguib, Effect of Nanoclay on the Mechanical Properties of PMMA/Clay Nanocomposite Foams, J Cell Plast., Vol. 42, pp. 325-342, 2006.

[10] C. Jo, EH. Naguib, Effect of Nanoclay and Foaming Conditions on the Mechanical Properties of HDPE–Clay Nanocomposite Foams, J Cell Plast., Vol. 43, pp. 111-121, 2007.

[11] R.D. Adams, M.R. Maheri, Damping in Advanced Polymer–Matrix Composites, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 355, pp. 126-130, 2003.

[12] H.Y. Kim, W. Hwang, Effect of Debonding on Natural Frequencies and Frequency Response of Honeycomb Sandwich Beams, Composite Structures, Vol. 55, pp. 51-62, 2002.

[13] N. Koratkar, B.Q. Wei, Carbon nanotube films for damping applications, Adv Mater., Vol. 14, pp. 997-1000, 2002.

[14] N.A. Koratkar, B. Wei, Multifunctional structural reinforcement featuring carbon nanotube films Compos Sci Technol., Vol. 63, pp. 1525–1531, 2003.

[15] Y. Sefrani, J.M. Berthelot, Temperature Effect on the Damping Properties of Unidirectional Glass Fibre Composites, Composites: Part B, Vol. 37, pp. 346-355,, 2006.

[16] R. Rafiee, Analysis of Nonlinear Vibrations of Using Perturbation Technique, Modares Mechanical Engineering, Vol. 12, No. 3, pp. 60-67, 2012. (In Persian)

[17] J.S. Beck, J.C. Vartuli, A new family of mesoporous molecular sieves prepared with liquid crystal templates, J Am Chem Soc., Vol. 114, pp. 10834–10843, 1992.

[18] Q. Huo, D.I. Margolese, Generalized Syntheses of Periodic Surfactant/Inorganic Composite Materials, Nature, Vol. 367, pp. 317 - 321, 1994.

[19] C.T. Kresge, M.E. Leonowicz, Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by a liquid-crystal template mechanism, Nature, Vol. 359, pp. 710-712, 1992.

[20] A. Monnier, F. Schu¨th, Cooperative Formation of Inorganic-Organic Interfaces in the Synthesis of Silicate Mesostructures, Science, Vol. 261, pp. 1299-1303, 1993.

[21] N. Chemin, M. Klotz, Mechanical properties of mesoporous silica thin films: Effect of the surfactant removal processes, Thin Solid Films, Vol. 495, pp. 210 – 213, 2006.

[22] N. Wang, Z. Shi, Influence of MCM-41 particle on mechanical and morphological behavior of polypropylene, Mat Sci Eng A-Struct, Vol. 497, pp. 363-368, 2008.

[23] N. Wang, C. Zhao, Co-incorporation of MMT and MCM-41 nanomaterials used as fillers in PP composite, Mat Sci Eng A-Struct, Vol. 157, pp. 44-47, 2009.

[24] K. Li, S. Tjong, Preparation and Characterization of Isotactic Polypropylene Reinforced with Hydroxyapatite Nanorods, Journal of Macromolecular Science, Vol. 50, pp. 1983-1995, 2011.

[25] D. Hanson, Operational Modal Analysis and Model Updating with a Cyclostationary Input., PhD Thesis, University of New South Wales, 2006.

[26] R. Brincker, L. Zhang, Modal Identification from Ambient Responses Using Frequency Domain Decomposition, In: proceedings of the 18th IMAC, San Antonio (TX), USA, 2000.

[27] R. Brincker, C. Ventura, Damping Estimation by Frequency Domain Decomposition, In: Proceedings of the 18th IMAC, San Antonio (TX), USA, 2000.

[28] L. Zhang, R. Brincker, An Overview of Operational Modal Analysis: Major Development and Issues, In: Proc. 1st Int. Operational Modal Analysis Conference (IOMAC-I), 2005.

[29] H. Wenzel, D. Pichler, Ambient Vibration Monitoring, (John Wiley & Sons), Ltd, 2005.

[30] B. Peeters, System identification and damage detection in civil engineering, PhD thesis, Department of Civil Engineering, K.U.Leuven., 2000.

[31] R. Brincker, P. Andersen, Understanding Stochastic Subspace Identification, In: Proc. Of International Modal Analysis Conference (IMAC), 2006.