ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2019;19(9):2263-2271

Investigating the Vibrational and Damping Properties of Graphite Nano - Platelet/Epoxy Composites

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Taherzadeh-Fard A.R.[1] *MA,*
Javanbakht M.*[1] *PhD,*
Karevan M.[1] *PhD*

How to cite this article
Taherzadeh-Fard A.R, Javanbakht M, Karevan M. Investigating the Vibrational and Damping Properties of Graphite Nano - Platelet/Epoxy Composites. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(9): 2263-2-271.

[1]Mechanical Engineering Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Correspondence
Address: Mechanical Engineering Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. Postal Code: 8415683111
Phone: +98 (31) 33915214
Fax: +98 (31) 33912862
javanbakht@cc.iut.ac.ir

Article History
Received: September 15, 2018
Accepted: February 07, 2019
ePublished: September 01, 2019

ABSTRACT

In the present study, the effect of graphite nano platelet (GNP) as a filler on the vibrational properties of the epoxy EP411 DSM matrix was studied. For this purpose, GNP-epoxy composites samples were fabricated with 0-5 wt.% of GNPs using the solution mixing method. Free and forced vibrations tests on the cantilever composite specimens were conducted. Based on the free vibration results, the structural damping loss factor (η) was obtained as a function of the GNP loading. It was found that η decreases as the GNP wt.% increases and reaches to the lowest value at 0-3 wt.% of GNP content, and η increases as the GNP loading increases and reaches to the value at 3-5 wt.% of GNP. Also, the frequency response function (FRF) around the second vibration mode was obtained for the neat epoxy. The Rayleigh damping coefficients were calculated employing the free and forced vibration results. The results revealed a nonlinear dependence of damping ratio (ζ) on the natural frequency of the neat epoxy. A representative volume element (RVE) incorporating 0-5 wt.% of GNPs was generated and the vibrational properties were numerically simulated. The modeling results were compared with those obtained from the experiment to verify whether the basic assumptions had been chosen properly.

Keywords Epoxy; Graphite Nano-Platelet; Vibration; Damping; Representative Volume Element (RVE)

CITATION LINKS

[1] Review on polymer/graphite ... [2] A review of exfoliated ... [3] Functionalized-graphene/ethylene vinyl acetate co-polymer composites for improved mechanical ... [4] Hybrid nanocomposites of thermoplastic elastomer and carbon nanoadditives for ... [5] Poly(meth) acrylate nanocomposite membranes containing in situ exfoliated graphene platelets: Synthesis, characterization and gas barrier ... [6] Ultra-large sized graphene nano-platelets (GnPs) incorporated polypropylene (PP)/GnPs composites engineered by melt compounding and its thermal, mechanical, and electrical ... [7] Evaluation of rheological and thermal properties of polyvinylidene fluoride (PVDF)/graphene nanoplatelets ... [8] Enhanced crystallization, thermal properties, and hydrolysis resistance of poly(L-lactic acid) and its stereocomplex by incorporation of graphene ... [9] Influence of filler size on the properties of poly(lactic acid) (PLA)/graphene nanoplatelet (GNP) ... [10] Mechanical properties of graphene platelets reinforced syntactic ... [11] Nanoindentation and nanoscratch investigations on graphene-based ... [12] Tensile properties of graphene nanoplatelets reinforced polypropylene ... [13] Multiscale modeling and analysis of graphene nanoplatelet/carbon fiber/epoxy ... [14] Nonlinear bending of polymer nanocomposite beams reinforced with non-uniformly distributed graphene ... [15] Transport properties of graphite/epoxy composites: Thermal, permeability and dielectric ... [16] Mechanical, thermal and electromagnetic properties of nanographite platelets modified cementitious composites [17] Vibration damping characteristics of carbon fiber-reinforced composites containing multi-walled ... [18] Morphological, viscoelastic and mechanical characterization of polypropylene ... [19] Modeling and testing of the viscoelastic properties of a graphite ... [20] Correlation between mechanical dissipation and improved X-band electromagnetic shielding capabilities of amine ... [21] Development of Al-and Cu-based nanocomposites reinforced by graphene nanoplatelets ... [22] Electrophoretic-deposited novel ternary silk fibroin/graphene oxide/hydroxyapatite nanocomposite coatings on ... [23] The mechanics of reinforcement of polymers by ... [24] Mechanical ... [25] Representative volume: Existence ... [26] Applied RVE Reconstruction and Homogenization ... [27] Mechanical characterization of graphite/epoxy nanocomposites ...

Copyright© 2019, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی خواص ارتعاشی و میرایی کامپوزیت‌های گرافیت نانوپلیتلت/اپوکسی

علیرضا طاهرزاده‌فرد MA
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
مهدی جوانبخت* PhD
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
مهدی کاروان PhD
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده
در پژوهش حاضر، تاثیر وجود درصدهای مختلف گرافیت نانوپلیتلت (GNP) به‌عنوان فیلر روی خواص ارتعاشی رزین اپوکسی مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور نمونه‌های کامپوزیتی با مقادیر فیلر صفر تا ۵ درصد وزنی به روش ترکیب انحلالی ساخته شده و آزمایشات ارتعاش آزاد و اجباری روی تیرهای کامپوزیتی حاصل صورت پذیرفت. بر اساس اطلاعات حاصل از ارتعاش آزاد، فاکتور اتلاف ساختاری (η) به‌صورت تابعی از درصد فیلر به‌دست آمده و مشاهده شد که با افزایش فیلر از صفر تا ۳ درصد وزنی، فاکتور اتلاف کاهش پیدا می‌کند. با افزایش این درصد از ۳ تا ۵ روند تغییرات صعودی در فاکتور اتلاف مشاهده شد. در مرحله بعد نمودار پاسخ فرکانسی (FRF) برای اپوکسی خالص در محدوده مود دوم ارتعاشی به‌دست آمده و به‌واسطه مجموع اطلاعات حاصل از ارتعاشات آزاد و اجباری، ضرایب میرایی ریلی برای اپوکسی خالص تعیین شد. ضرایب حاصل حاکی از یک وابستگی غیرخطی نسبت میرایی (ζ) به فرکانس طبیعی برای اپوکسی خالص هستند. در نهایت به‌منظور مدل‌سازی رفتار ارتعاشی کامپوزیت‌های مورد بررسی، یک حجمک نماینده (RVE) با درصدهای وزنی فیلر صفر تا ۵ تهیه شد. صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل‌سازی از طریق مقایسه نتایج با داده‌های تجربی انجام‌شده و اعتبار فرضیات صورت‌گرفته در مدل‌سازی بررسی شد.

کلیدواژه‌ها: اپوکسی، گرافیت نانو پلیتلت (GNP)، ارتعاشات، میرایی، حجمک نماینده (RVE)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۸
*نویسنده مسئول: javanbakht@cc.iut.ac.ir

۱- مقدمه

خواص میرایی و ارتعاشی مواد از جمله موضوعات حائز اهمیت در محدوده وسیعی از کاربردها است. ایزولاسون ارتعاشات بخش‌های متحرک تجهیزات پزشکی، میرایی ارتعاشات موتور خودرو و کنترل لرزش ساختمان در هنگام زلزله مبین اهمیت چنین موضوعی هستند. بنابراین کاربرد مواد و روش‌های میرایی مناسب با قابلیت اتلاف انرژی بالا می‌تواند مفید باشد. در سال‌های اخیر کاربرد فیلرهای کربنی در ساخت کامپوزیت‌ها توجه ویژه‌ای را به خود معطوف کرده است. با اضافه‌شدن چنین فیلرهایی در زمینه‌های پلیمری، می‌توان از وزن پایین و سفتی بالای پلیمر در کنار خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوب فیلرهای پایه کربنی بهره برد. در کنار این مزایا، یکی از مشکلات موجود در توسعه این نوع محصول هزینه‌های بالای فرایند ساخت است؛ به‌عنوان مثال اگرچه فیلرهایی نظیر کربن نانوتیوب و یا کربن نانوفایبر تاثیر بالایی بر فاز زمینه می‌گذارند ولیکن مصرف انرژی بالا در فرایند ساخت و پیچیدگی تجهیزات مورد استفاده، عملا کاربرد این مواد را با مشکل مواجه کرده است. در مقابل گرافیت نانوپلیتلت (Graphite Nano-platelet; GNP) یا گرافیت لایه‌ای (Exfoliated graphite; EG) از منابع گسترده طبیعی قابل استخراج بوده و از این جهت مقرون به‌صرفه است[1].

وجود GNP در زمینه‌های مختلف پلیمری سبب بروز تغییرات چشم‌گیری در خواص می‌شود؛ به‌عنوان مثال اضافه شدن این فیلر به زمینه پلی‌پروپیلن سبب افزایش مدول خمشی و مدول یانگ می‌شود، در حالی که بر روی استحکام نفوذ تاثیری ندارد[2]. به‌علاوه مطالعات پیشین نشان داده‌اند که وجود GNP در فاز پلیمری سبب افزایش رسانایی الکتریکی خواهد شد[2-6]، در حالی که در بهبود رسانایی حرارتی نیز موثر است[7]. از منظر مدول یانگ کششی و فشاری، مطالعات نشان داده‌اند که وجود این فیلر سبب بهبود خواص ذکرشده خواهد شد[8-12]. علاوه‌بر مطالعات تجربی، بررسی‌های عددی متعددی نیز به‌منظور پیش‌بینی خواص رسانایی و رفتار مکانیکی اینگونه کامپوزیت‌ها در کشش، فشار و خمش صورت پذیرفته است[13-15].

کربن و مشتقات آن توانایی تغییر خواص میرایی مواد را نیز دارا هستند. بررسی‌ها نشان داده‌اند که کاربرد GNP داخل زمینه سیمانی سبب افزایش نسبت میرایی (Damping ratio) متناسب با درصد وزنی فیلر خواهد شد[16]. افزودن یک درصد وزنی کربن نانوتیوب داخل رزین‌اپوکسی سبب افزایش نسبت میرایی از ۰/۰۰۸ به ۰/۰۱۲ در دامنه ارتعاشی ۱۰میلی‌متر خواهد شد، در حالی که این مقدار در کامپوزیت هیبریدی شامل کربن نانوتیوب و فیبر کربن به مقدار ۰/۰۰۹ در نسبت وزنی و دامنه ارتعاشی یکسان، کاهش خواهد یافت[17]. وجود GNP در زمینه پلی‌پروپیلن سبب کاهش $tan\delta$ نسبت به پلیمر خالص در دمای محیط می‌شود[18]. کاربرد GNP با اندازه دانه یک میکرومتر و درصد حجمی ۰/۵ و ۳ داخل زمینه اپوکسی سبب کاهش مدول اتلافی (Loss modulus) خواهدشد[19]. استفاده از GNP با گروه‌های آمین داخل پلی‌یورتان سبب بهبود برهم‌کنش بین سطحی و میرایی مکانیکی کامپوزیت حاصل خواهد شد[20]. سایر رفتارهای مکانیکی نانوکامپوزیت‌های شامل GNP، در مراجع[21-23] مرور شده است.

هدف پژوهش حاضر بررسی تاثیر وجود مقادیر مختلف GNP بر خواص میرایی کامپوزیت‌های پایه اپوکسی است؛ بدین منظور کامپوزیت‌های GNP- اپوکسی با روش ترکیب انحلالی (Solution mixing method) ساخته می‌شوند. آزمایشات ارتعاش آزاد و اجباری بر روی تیرهای کامپوزیتی صورت گرفته و بر اساس آن فاکتور اتلاف ساختاری (Structural damping loss factor) یا η به صورت تابعی از درصد وزنی GNP گزارش می‌شود. از ارتعاشات اجباری برای یافتن نمودار پاسخ فرکانسی (Frequency response diagram) در محدوده مود دوم ارتعاشی برای اپوکسی خالص استفاده‌شده و بر اساس آن ضرایب میرایی ریلی (Rayleigh damping coefficients) محاسبه می‌شوند. در نهایت نیز یک حجمک نماینده (Representative volume element; RVE) که حاوی مقادیر مناسبی از GNP است مدل‌سازی شده و خواص میرایی از طریق آن پیش‌بینی می‌شوند. به‌منظور فهم بهتری از مکانیزم‌های جذب انرژی، نتایج مدل‌سازی عددی با مقادیر حاصل از آزمایشات تجربی مقایسه خواهند شد.

۲- ساخت و آزمایش نمونه‌ها

۲-۱- مواد به کار رفته

رزین‌اپوکسی EP411/UN6299 (DSM) به‌عنوان فاز زمینه به‌کار می‌رود. گرافیت نانوپلیتلت از شرکت EMD Millipore و با ماکزیمم اندازه دانه ۵۰میکرومتر تهیه شده است. به‌منظور ساخت قالب‌های سیلیکونی از سیلیکون رابر RTV2 استفاده می‌شود.

۲-۲- نمونه های کامپوزیتی

به‌منظور ساخت نمونه‌های کامپوزیتی ابتدا ۴۵گرم رزین‌اپوکسی (بر اساس حجم قالب) در ۲۰سی‌سی استون حل شد تا با کاهش ویسکوزیته رزین پراکندگی GNP داخل فاز زمینه بهبود یابد. در ادامه بر اساس درصد وزنی مد نظر مقادیر معین GNP به محلول اضافه شده و ترکیب حاصل داخل همزن مکانیکی قرار گرفت. به‌منظور تسریع در تبخیر استون، دمای محلول به ۴۵°C افزایش داده شد. محلول در بازه‌های زمانی معین توزین شد تا از تبخیر کامل استون اطمینان حاصل شود. در پایان نیز پس از اضافه‌شدن هاردنر، محلول داخل قالب ریخته شد. نمونه‌ها پس از ۲۴ساعت از قالب خارج شده و برای ۲ساعت در دمای ۶۰°C و فشار محیط قرار داده شدند.

در این بررسی به‌منظور انجام آزمایشات ارتعاشی از استاندارد ASTM E756 در ساخت نمونه‌ها استفاده شد. بدین منظور ابعاد نمونه‌ها ۲۳۰×۱۰×۳میلی‌متر طراحی شدند.

۲-۳- آزمایشات

۲-۳-۱- ارتعاش آزاد

به‌منظور یافتن خواص میرایی کامپوزیت‌های ساخته‌شده شامل صفر تا ۵ درصد وزنی GNP، تعدادی آزمایش ارتعاش آزاد بر روی نمونه‌ها صورت پذیرفت. ۵سانتی‌متر از یک انتهای نمونه داخل گیره قرار گرفته و در انتهای دیگر یک شتاب‌سنج نصب شد. از آنجا که خواص میرایی در اینگونه کامپوزیت‌ها به دامنه ارتعاشات وابسته است[17]، از دامنه ارتعاشاتی یکسان برای تمام نمونه‌ها استفاده و پاسخ سیستم ضبط شد. برای یافتن خواص میرایی از کمیت کاهش لگاریتمی (δ) به صورت زیر استفاده شد[24]:

$$\delta = \frac{1}{n} ln\left(\frac{x_1}{x_{n+1}}\right) \quad (۱)$$

که در آن x_1 و x_{n+1} ارتفاع نقاط پیک نمودار شتاب- زمان در سیکل اول و n+1ام است. در این بررسی سیکل‌های اول و یازدهم برای محاسبه δ استفاده شد. در ادامه نسبت میرایی (ζ) طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود[24]:

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (۲)$$

به‌منظور مقایسه ظرفیت میرایی نمونه‌های مختلف از کمیت فاکتور اتلاف ساختاری (η) استفاده خواهد شد. این کمیت به‌صورت نسبت انرژی اتلافی بر واحد رادیان به انرژی کرنشی کل تعریف شده و در میرایی کم به صورت زیر محاسبه می‌شود[24]:

$$\delta \approx \ln(1 + \pi\eta) \approx \pi\eta \quad (۳)$$

۲-۳-۲- ارتعاش اجباری

به‌منظور یافتن ضرایب میرایی ریلی برای اپوکسی خالص، نیاز به داشتن مقدار نسبت میرایی در حداقل دو مود مختلف است. این ضرایب در بخش مدل‌سازی و برای توصیف رفتار ارتعاشی فاز زمینه حجمک نماینده نیاز خواهد بود. بر اساس آنالیز مودال[1]:

$$\alpha + \omega_{ni}^2\beta = 2\zeta_i\omega_{ni} \quad (٤)$$

که در آن α و β به ترتیب ضرایب میرایی ریلی جرم و سفتی، ζ_i نسبت میرایی و ω_{ni} فرکانس طبیعی iام است.

به‌منظور بررسی پاسخ تیر در مودهای مختلف، نیاز به انجام آزمایش ارتعاش اجباری خواهد بود؛ با توجه به سهولت انجام آزمایشات، مود دوم ارتعاشی به‌عنوان یکی از مودهای مورد بررسی انتخاب می‌شود. برای این منظور، یک محرک هارمونیک به نمونه متصل شد و برای ثبت داده‌های ورودی و خروجی از دو شتاب‌سنج در دو انتهای تیر استفاده شد. شکل ۱ نشان‌دهنده سیستم تحریک و اندازه‌گیر است.

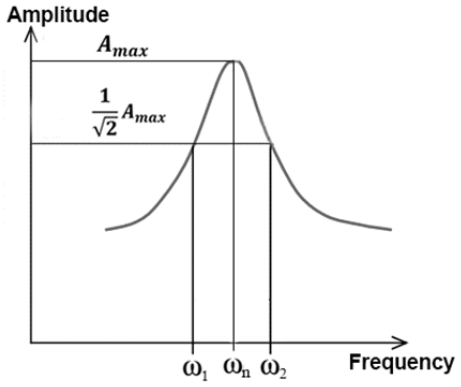
شکل ۱) اتصال شتاب‌سنج‌ها و نمونه به سیستم محرک دینامیکی

فرکانس ارتعاشات ورودی به تدریج از ۲۰هرتز تا ۱۸۰هرتز افزایش یافته و پاسخ سیستم در هر فرکانس ضبط شد. به‌منظور تهیه نمودار پاسخ فرکانسی، نسبت خروجی (پاسخ سیستم) به ورودی بر حسب فرکانس اعمالی ترسیم شد.

برای یافتن نسبت میرایی در فرکانس رزونانس از روش نقاط نیم‌توان (Half-bandwidth method) استفاده می‌شود. در این روش نسبت میرایی در مود iام (ζ_i) از رابطه زیر حاصل می‌شود[24]:

$$\zeta_i = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_{ni}} \quad (۵)$$

که در آن ω_{ni} فرکانس طبیعی iام است؛ ω_1 و ω_2 فرکانس‌هایی در اطراف مود iام هستند که در آنها انرژی سیستم نصف انرژی اولیه است. با توجه به شکل ۲ که نمودار دامنه (بی‌بعد) برحسب فرکانس است، نقاط نیم توان ω_1 و ω_2 به‌دست خواهند آمد.



شکل ۲) نقاط نیم‌توان

برای به‌دست‌آوردن ضرایب ریلی به بررسی یک مود دیگر هم نیاز خواهد بود. بدین منظور از نتایج حاصل از ارتعاش آزاد تیر برای تفسیر رفتار آن در مود اول استفاده می‌شود؛ دلیل استفاده از ارتعاش آزاد، پایین‌بودن دقت سیستم محرک دینامیکی در فرکانس‌های پایین است. شرط استفاده از نتایج آزمایش ارتعاش آزاد برای تعیین رفتار در مود اول، غالب‌بودن این مود در ارتعاش آزاد است. معمولا مود اول در ارتعاشات آزاد غالب است ولی برای اطمینان از این امر، یک مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس روی تیر

مورد بررسی انجام شده و مشاهده شد که فرکانس مود اول مقداری بسیار نزدیک به فرکانس طبیعی در ارتعاشات آزاد تیر را دارد. بنابراین می توان از نسبت استهلاک حاصل از ارتعاش آزاد به‌عنوان نسبت استهلاک مود اول استفاده نمود. پس از تعیین نسبت میرایی مود دوم و با داشتن نسبت میرایی مود اول، ضرایب ریلی از حل دستگاه معادلات حاصل از معادله ۴ به‌دست خواهد آمد.

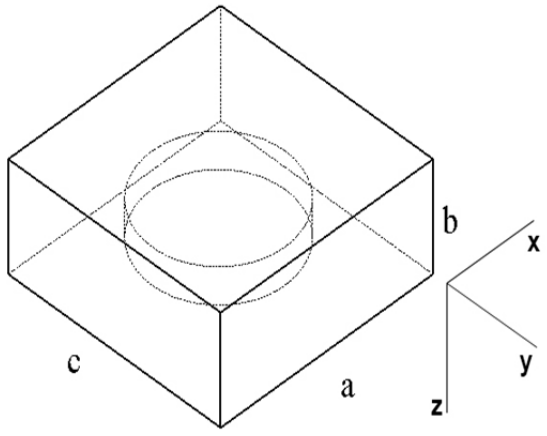
۳- مدل‌سازی

در کاربردهای معین که زمان و حافظه CPU از اهمیت بالایی برخوردار است، راه حل منطقی‌تر، مدل‌سازی یک نمونه در ابعاد بسیار کوچک‌تر از اندازه واقعی است. به‌طوری که به اندازه کافی بزرگ بوده تا بتواند معرف رفتار سازه در ابعاد واقعی باشد؛ به چنین نمونه‌ای حجمک نماینده (RVE) گفته می‌شود[25]. بنابراین حجمک نماینده بایستی به حد کافی کوچک باشد تا از پیچیدگی حل جلوگیری کند و نیز به حد مناسب بزرگ باشد تا بتواند رفتاری همانند ماده اصلی در مقیاس ماکروسکوپیک از خود نشان دهد. به‌عنوان نتیجه می‌توان گفت که موضوع اصلی در انجام محاسبات به کمک حجمک نماینده، ابعاد آن است. با توجه به جهت‌گیری رندم GNP داخل رزین می‌توان رفتاری ایزوتروپ را در این نوع کامپوزیت مشاهده نمود. راه حل منطقی این است که این رفتار ایزوتروپ به نوعی داخل حجمک نماینده انعکاس یابد. بنابراین به‌منظور یافتن ابعاد مناسب حجمک نماینده ابتدا مدول یانگ معادل در ۳ جهت برای آن محاسبه شده و با برابر قراردادن این مدول‌ها ابعادی برای حجمک نماینده حاصل خواهد شد. با توجه به مرجع [26] برای سادگی گرافیت نانوپلیتلت به‌صورت دیسک در نظر گرفته می‌شود. همچنین به دلیل کوچک‌بودن دامنه ارتعاشات، از اثرات غیرخطی همچون کشش غشایی در محاسبات صرف نظر می‌شود. نمونه‌ای از حجمک نماینده مربوط به کامپوزیت GNP- اپوکسی در شکل ۳ ارایه شده است.

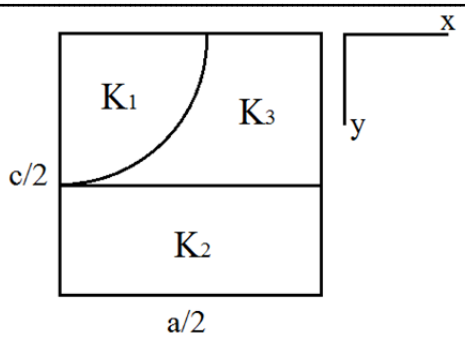
فرض شود حجمک نماینده دارای ابعاد a و b و c بوده و نیز GNP به‌ترتیب دارای قطر و ضخامت d و t باشد. نسبت ابعادی (Aspect ratio) یا (λ) به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\lambda = \frac{d}{t} \qquad (٦)$$

به‌منظور ساده‌سازی و کاهش حجم محاسبات با توجه به تقارن موجود در مدل، برای مدل‌سازی تنها یک‌هشتم نمونه لحاظ می‌شود. برای یافتن سفتی معادل در جهت x، حجمک نماینده مطابق شکل ۴ به بخش‌های مختلف تقسیم می‌شود.



شکل ۳) حجمک نماینده برای کامپوزیت GNP- اپوکسی



شکل ۴) نمونه یک‌هشتم از حجمک نماینده برای یافتن سفتی معادل در جهت x

برای ناحیه K_1:

$$dF = \frac{dA\, E_{1p}}{l}\,\gamma \qquad (۷)$$

که در آن E_{1p} و γ به‌ترتیب مدول یانگ و تغییر طول GNP در جهت x، dF نیروی دیفرانسیلی محوری در جهت x و dA مساحت دیفرانسیلی اعمال بارdF است. از آنجا که:

$$x^2 + y^2 = \frac{d^2}{4} \qquad (۸)$$

$$dF = \frac{(dy)\left(\frac{d}{2\lambda}\right)E_{1p}}{\sqrt{\frac{d^2}{4} - y^2}}\,\gamma \qquad (۹)$$

با انتگرال‌گیری از dF نسبت به y کل نیروی محوری در جهت x و در ناحیه K_1 به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$F = \frac{(d)(\gamma)E_{1p}}{2\lambda}\int_0^{\frac{d}{2}} \frac{dy}{\sqrt{\frac{d^2}{4} - y^2}} = \frac{(d)(\gamma)E_{1p}}{2\lambda}\,\frac{\pi}{2} \qquad (۱۰)$$

با مقایسه رابطه ۱۰ با رابطه مشهور $F = \frac{AE}{l}\gamma$، K_1 به‌صورت زیر حاصل می‌شود:

$$K_1 = \frac{(E_{1p})(\pi)(d)}{4\lambda} \qquad (۱۱)$$

به‌منظور یافتن K_3 در ابتدا فرض می‌شود که تمام نواحی K_1 و K_3 از اپوکسی تشکیل شده باشند. بنابراین سفتی هر دو ناحیه در جهت x عبارت است از:

$$K^{tot} = \frac{AE_m}{l} = \frac{\left(\frac{d}{2}\right)\left(\frac{d}{2\lambda}\right)E_m}{\frac{a}{2}} = \frac{d^2 E_m}{2a\lambda} \qquad (۱۲)$$

که در آن E_m مدول یانگ اپوکسی است. از طرف دیگر با فرض اینکه ناحیه K_1 از اپوکسی تشکیل شده باشد می‌توان گفت:

$$K_{1m} = \frac{(E_m)(\pi)(d)}{4\lambda} \qquad (۱۳)$$

از آنجا که نواحی K_1 و K_3 به صورت سری متصل شده‌اند می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{K^{tot}} = \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_{1m}}$$

$$K_3 = \frac{d^2 E_m \pi}{2a\pi\lambda - 4d\lambda} \qquad (۱٤)$$

$$K_2 = \frac{AE_m}{l} = \frac{\left(\frac{c}{2} - \frac{d}{2}\right)\left(\frac{d}{2\lambda}\right)E_m}{\frac{a}{2}} = \frac{(c-d)(d)E_m}{2a\lambda}$$

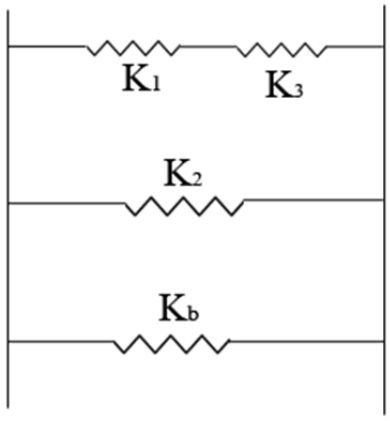
برای ناحیه قرارگرفته در بالای نواحی K_1، K_2 و K_3 (عمود بر صفحه) سفتی معادل برابر است با:

$$K_b = \frac{\left(\frac{c}{2}\right)\left(\frac{b}{2}-\frac{d}{2\lambda}\right)E_m}{\frac{a}{2}} = \frac{c\left(\frac{b}{2}-\frac{d}{2\lambda}\right)E_m}{a} \quad (۱۵)$$

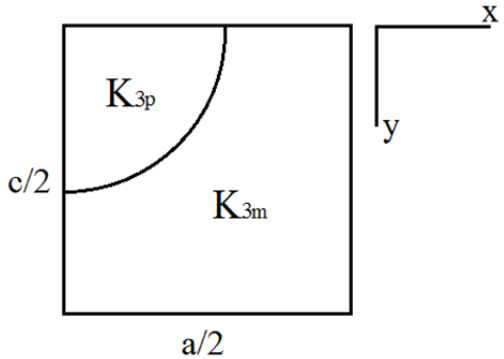
در نهایت با توجه به شکل ۵ سفتی معادل در راستای x از رابطه ۱۶ حاصل خواهد شد.

$$K^{(1)} = \frac{K_1 K_3}{K_1 + K_3} + K_2 + K_b \quad (۱۶)$$

به طریق مشابه، سفتی معادل در جهت z با توجه به شکل ۶ به‌صورت زیر حاصل خواهد شد:



شکل ۵) محل قرارگیری نواحی مختلف حجمک نماینده نسبت به یکدیگر در راستای x



شکل ۶) نمونه یک‌هشتم از حجمک نماینده برای یافتن سفتی معادل در جهت z

$$K_{3p} = \frac{AE_{3p}}{l} = \frac{\pi d^2 E_{3p}}{4 \times 4 \times \frac{d}{2\lambda}} = \frac{\lambda \pi d E_{3p}}{8} \quad (۱۷)$$

که در آن K_{3p} و E_{3p} به ترتیب سفتی و مدول یانگ GNP در راستای z است. سفتی معادل ناحیه پرشده با اپوکسی (K_{3m}) برابر است با:

$$K_{3m} = \frac{\left[\left(\frac{a}{2}\times\frac{c}{2}\right) - \left(\frac{\pi d^2}{16}\right)\right]E_m}{\frac{d}{2\lambda}} \quad (۱۸)$$

برای ناحیه قرارگرفته در بالای نواحی K_{3p} و K_{3m} (در جهت عمود بر صفحه)، سفتی معادل از رابطه ۱۹ به‌دست می‌آید.

$$K_{ba} = \frac{\left(\frac{c}{2}\times\frac{a}{2}\right)E_m}{\frac{b}{2}-\frac{d}{2\lambda}} \quad (۱۹)$$

در نهایت با توجه به شکل ۷ سفتی معادل حجمک نماینده در جهت z $(K^{(3)})$ از رابطه ۲۰ حاصل خواهد شد.

$$K^{(3)} = \frac{K_{ba}\left(K_{3p}+K_{3m}\right)}{K_{ba}+K_{3p}+K_{3m}} \quad (۲۰)$$

از آنجا که سفتی وابسته به ابعاد هندسی بوده و ممکن است برای یک جسم ایزوتروپ در جهات مختلف متفاوت باشد لذا بایستی به مدول یانگ تبدیل شود. این تبدیل در روابط ۲۱ و ۲۲ ارایه شده‌اند.

$$K^{(1)} = \frac{AE_1}{l} = \frac{\left(\frac{c}{2}\right)\left(\frac{b}{2}\right)E_1}{\frac{a}{2}} = \frac{bc}{2a}E_1 \quad (۲۱)$$

$$\text{or } E_1 = \frac{2a}{bc}K^{(1)}$$

$$K^{(3)} = \frac{AE_3}{l} = \frac{\left(\frac{a}{2}\right)\left(\frac{c}{2}\right)E_3}{\frac{b}{2}} = \frac{ac}{2b}E_3 \quad (۲۲)$$

$$\text{or } E_3 = \frac{2b}{ac}K^{(3)}$$

در روابط ۲۱ و ۲۲، E_1 و E_3 به ترتیب مدول یانگ در جهات x و z هستند. با برابر قرار دادن E_1 و E_3 می‌توان رابطه‌ای بین مجهولات یافت. از طرف دیگر با توجه به تقارن می‌توان گفت:

$$a = c \quad (۲۳)$$

به‌علاوه، مجهولات موجود در معادلات بایستی در رابطه نسبت حجمی نیز صدق کنند:

$$f = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_p}{abc} \quad (۲٤)$$

که در آن V_p و V_t به ترتیب حجم GNP و حجم کلی حجمک نماینده و f نسبت حجمی GNP است.

با استفاده از معادلات ارایه‌شده می‌توان ابعاد حجمک نماینده را در هر نسبت حجمی دلخواه یافت.

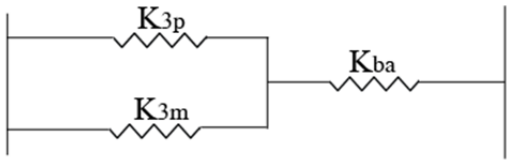
گام مهم دیگر به‌دست آوردن کمیات مورد نیاز از حجمک نماینده حاصل است. با توجه به مرجع [24] در میرایی هیسترزیس، انرژی تلف‌شده مستقل از فرکانس بوده و با مربع دامنه متناسب است. به عبارت دیگر:

$$\Delta w = \pi h A^2 \quad (۲۵)$$

که در آن Δw و A به ترتیب انرژی اتلافی و دامنه نوسانات هستند. ثابت میرایی هیسترزیس (Hysteresis damping constant) یا (h)، یک معیار از ظرفیت میرایی است و می‌تواند طبق رابطه ۲۶ به فاکتور میرایی سازه‌ای (η) تبدیل شود:

$$\eta = \frac{h}{k} \quad (۲٦)$$

که در آن k سفتی ساختار در جهت مورد نظر است.



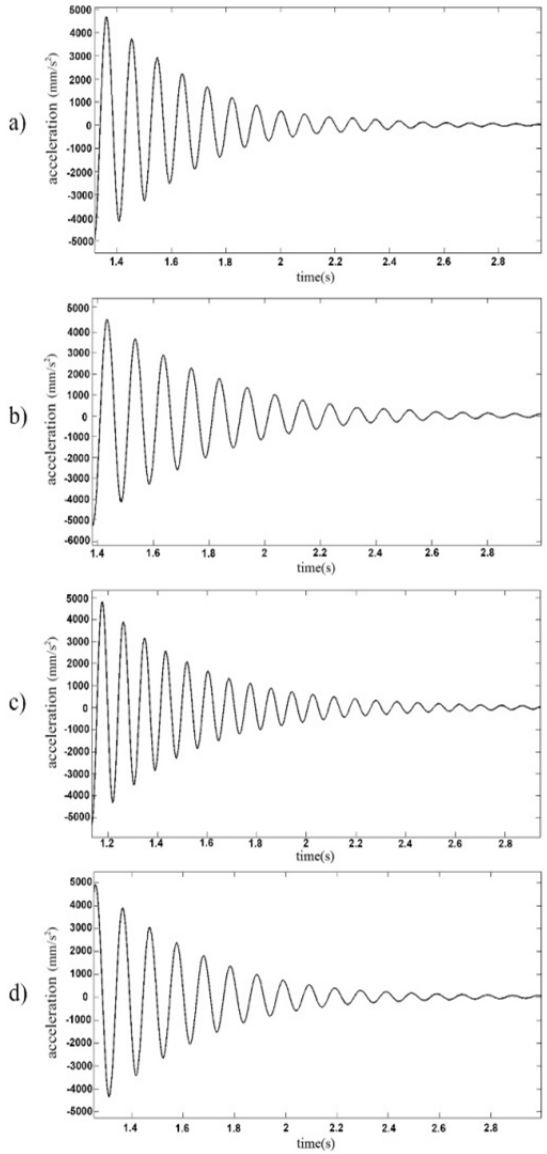
شکل ۷) محل قرارگیری نواحی مختلف حجمک نماینده نسبت به یکدیگر در راستای z

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تغییرات خواص میرایی

نتایج آزمایشات ارتعاش آزاد به ازای وجود مقادیر مختلف GNP در

نمودار ۱ ارایه شده است. خواص میرایی کامپوزیت‌های مربوطه محاسبه شده و در جدول ۱ آورده شده است.



نمودار ۱) پاسخ ارتعاش آزاد نمونه‌های کامپوزیت GNP- اپوکسی در درصد وزنی: a) صفر، b) ۱، c) ۳، d) ۵ از GNP

جدول ۱) خواص میرایی به ازای وجود مقادیر مختلف GNP

درصد وزنی GNP	کاهش لگاریتمی (δ)	نسبت استهلاک (ζ)	فاکتور میرایی (η)
۰	۰/۲٦٥٧	۰/۰٤۲۲٥	۰/۰۸٤٥٧
۱	۰/۲٤٦٦	۰/۰۳۹۲۱	۰/۰۷۸٤۹
۳	۰/۲۱۳۷	۰/۰۳۳۹۹	۰/۰٦۸۰۲
٥	۰/۲٥٦۸	۰/۰٤۰۸	۰/۰۸۱۷٤

همان گونه که از اعداد بر می‌آید، تا درصد وزنی ۳ مقدار نسبت استهلاک با افزایش میزان GNP کاهش یافته و در درصدهای وزنی بالاتر از ۳ این روند، افزایشی است. بنابراین طبق مشاهدات انجام‌شده برای این نوع کامپوزیت، درصد وزنی معینی وجود دارد که در آن خواص میرایی به پایین‌ترین سطح خود می‌رسد.

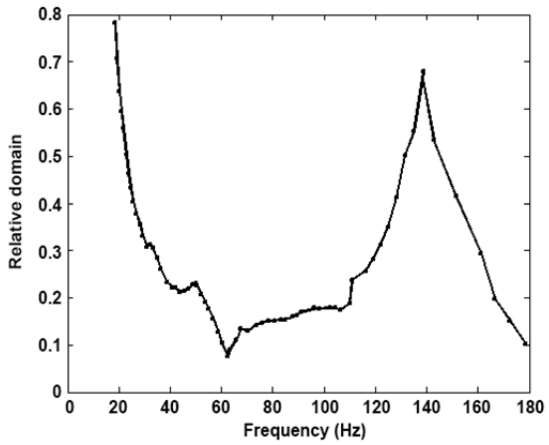
به‌طور کلی از جمله مکانیزم‌هایی که در اتلاف انرژی این نوع کامپوزیت‌ها موثر هستند عبارت‌اند از[16]:

- عیوب موجود در فاز زمینه مانند حباب هوایی و یا مرز دانه
- ساختار لایه‌ای GNP و وجود نیروهای ضعیف واندروالسی بین لایه‌ها که سبب لغزش لایه‌ها نسبت به یکدیگر شده و اتلاف بالاتر انرژی را نتیجه می‌دهد.
- نیروی اصطکاک موجود بین GNP و فاز پلیمری

تاکنون تاثیر وجود عیوب بر افزایش اتلاف انرژی به اثبات رسیده است. وجود ذرات GNP داخل فاز پلیمری سبب افزایش عیوب خواهد شد[16]. در درصد وزنی پایین GNP، عیوب موجود از حرکت و لغزش زنجیره‌های پلیمری نسبت به یکدیگر جلوگیری کرده و درنتیجه خواص میرایی کاهش می‌یابد. در نسبت‌های وزنی بالاتر (بیشتر از ۳%) با توجه به افزایش تمرکز عیوب و گستردگی نواحی تماسی، انرژی اتلافی افزایش پیدا می‌کند. به‌علاوه اینکه تمرکز بالای عیوب سبب بروز صفحات برشی نیز خواهند شد که در اتلاف انرژی موثراند. در واقع در نسبت‌های حجمی بالای GNP، عیوب موجود در ماده به محلی برای اتلاف انرژی تبدیل خواهد شد.

۲-۴- تعیین ضرایب میرایی ریلی

با استفاده از دامنه ارتعاشات به‌دست آمده در فرکانس‌های تحریک مختلف، نمودار پاسخ فرکانسی برای اپوکسی خالص به‌دست آمده و در نمودار ۲ ارایه شده است.



نمودار ۲) نمودار پاسخ فرکانسی اپوکسی خالص

همان گونه که از نمودار بر می‌آید، ۲ ناحیه رزونانس در حوالی فرکانس‌های ۲۰ و ۱۴۰هرتز به چشم می‌خورد. به دلیل دقت پایین دستگاه محرک دینامیکی استفاده‌شده در فرکانس‌های پایین، مود اول در ارتعاشات آزاد بررسی شده و نسبت استهلاک برابر ۰/۰۴۲۲۵ به‌دست آمد. برای مود دوم مقادیر ω_1، ω_n و ω_2 با توجه به شکل ۲ و نمودار ۲ به ترتیب برابر ۱۳۰/۸، ۱۳۸/۹و ۱۴۶/۷ بوده و به این ترتیب نسبت استهلاک برای مود دوم با توجه به رابطه ۵، مقدار ۰/۰۵۷۲ به‌دست می‌آید. از رابطه ۴ و حل دستگاه معادلات مربوطه، ضرایب ریلی برای اپوکسی خالص طبق معادلات ۲۷ حاصل می‌شوند.

$$\alpha = 5.0964 \text{ rad/sec} \qquad \beta = 0.0001 \text{ sec/rad} \tag{۲۷}$$

مقادیر به‌دست آمده در مدل‌سازی عددی رفتار میرایی این نوع اپوکسی بسیار سودمند خواهند بود.

۳-۴- مدل‌سازی اجزا محدود

خواص مکانیکی GNP از طریق آنالیز میدان نیرویی بین مولکولی

(Molecular force field) به‌دست آمده و در جدول ۲ ارایه شده است[27]. در این جدول E_i، G_{ij}، ν_{ij} و ρ به ترتیب مدول یانگ، مدول برشی، ضریب پواسون و دانسیته GNP هستند. جهات ۱، ۲ و۳ متناظر x، y و z در شکل ۳ هستند. GNP به ترتیب دارای قطر و ضخامت ۵۰میکرومتر و ۲۰نانومتر است؛ بنابراین نسبت ابعادی آن برابر ۲۵۰۰ خواهد بود. ماتریس اپوکسی استفاده‌شده دارای مدول یانگ ۴/۵گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳۳ است. با استفاده از خواص بیان‌شده در روابط ۱۶ تا ۲۴ ابعاد حجمک نماینده مطابق جدول ۳ حاصل می‌شود.

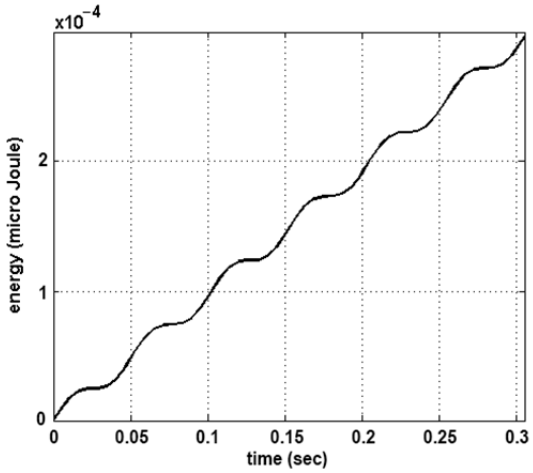
جدول ۲) خواص مکانیکی GNP [27]

E_1 (TPa)	E_2 (TPa)	E_3 (GPa)	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)
۱/۱۵۳	۱/۱۵۳	۳۹/۵۱۱	۰/۴۸۲	۰/۲۶۸	۰/۲۶۸
ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	ν_{31}	ν_{32}	ρ (g/cm³)
۰/۱۹۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۲/۲۵

جدول ۳) ابعاد حجمک نماینده

درصد وزنی GNP	a=c (μm)	b (μm)
۱	۶۲/۹۲۳۴	۰/۹۹۱۸
۳	۶۲/۵۳۷۱	۰/۵۰۲۰
۵	۶۲/۱۵۷۰	۰/۳۳۸۸

در گام بعد، حجمک نماینده در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده و خواص میرایی با اعمال یک جابجایی هارمونیک به آن به‌دست می‌آید. این جابجایی به گونه‌ای است که حداکثر کرنش ایجادشده برابر ۱% و تعداد سیکل‌های بارگذاری ۳ عدد باشد. انرژی تلف‌شده نسبت به زمان از خروجی‌های مدل‌سازی خواهد بود. برای نمونه نمودار انرژی اتلافی در حضور ۱ درصد وزنی GNP درنمودار ۳ ارایه شده است.



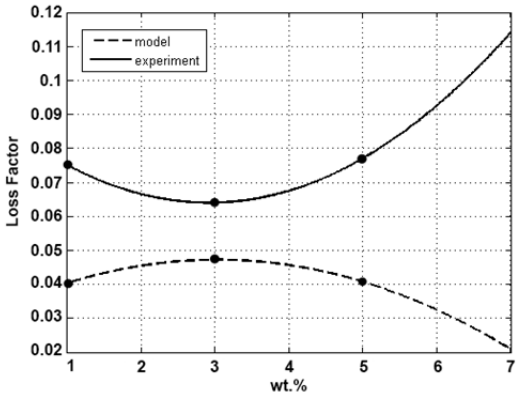
نمودار ۳) انرژی اتلافی طی ۳ سیکل نوسانی در کامپوزیت با ۱ درصد وزنی GNP

برای اطمینان از پایداری سیستم، سیکل دوم بارگذاری درنظر گرفته شده و با محاسبه انرژی اتلافی و استفاده از رابطه ۲۵، ثابت میرایی حاصل شده و سپس فاکتور اتلاف ساختاری به‌دست آمد. نتایج مدل‌سازی در جدول ۴ خلاصه شده است.

فاکتور میرایی حاصل از مدل‌سازی و آزمایشات تجربی نسبت به درصد وزنی GNP در نمودار ۴ ارایه شده است.

جدول ۴) خواص میرایی کامپوزیت GNP- اپوکسی حاصل از مدل‌سازی

درصد وزنی GNP	سختی (N/m)	ثابت استهلاک (N/m)	فاکتور اتلاف ساختاری (η)
۱	۲۲۶۷/۹	۹۰/۹۳۸۵	۰/۰۴
۳	۱۱۶۶/۵	۵۴/۲۴۶	۰/۰۴۶۵
۵	۸۰۰	۲۸/۷۷۹۶	۰/۰۳۹۵



نمودار ۴) مقایسه نتایج حاصل از مطالعات تجربی و مدل‌سازی عددی

همان گونه که از نمودار بر می‌آید در تمام درصدهای وزنی GNP نتایج تجربی فاکتور اتلاف بزرگ‌تر از مقادیر حاصل از مدل‌سازی هستند. علت عمده این پدیده می‌تواند به فرضیات ساده‌کننده در مدل‌سازی بازگردد. اولا فاز زمینه بدون عیوب درنظر گرفته شده است در حالی که تاثیر وجود عیوب و برهم‌کنش آنها در افزایش ظرفیت میرایی مواد اثبات شده است، ثانیا تماس بین GNP و اپوکسی در اینترفیس به‌صورت کامل و بدون لغزش مدل شده در حالی که این حرکت نسبی تاثیر بسزایی در افزایش توانایی اتلاف ماده دارد، ثالثا GNP دارای ساختاری لایه‌ای است و لغزش این لایه‌ها نسبت به یکدیگر در حضور نیروهای ضعیف واندروالسی می‌تواند توانایی اتلاف انرژی را بالاتر ببرد، از این ساختار لایه‌ای در مدل‌سازی صرف نظر شده‌است. علاوه بر موارد فوق، بروز اختلاف بین مقادیر تجربی و عددی را می‌توان به عدم درنظرگیری مقاومت هوا در مدل‌سازی نیز مرتبط دانست. از جمله موارد دیگری که در این اختلاف نقش دارند شکل هندسی GNP است. در مدل‌سازی برای سادگی GNP به‌صورت دیسک درنظر گرفته شده است، در حالی که در واقعیت این ذرات ساختاری بیضوی دارند.

علاوه‌بر مقادیر عددی، شیوه تغییرات منحنی فاکتور اتلاف نسبت به درصد وزنی GNP در مدل‌سازی با حالت تجربی متفاوت است. با توجه به رابطه ۲۶، فاکتور اتلاف تابعی از انرژی تلف‌شده و سختی است. در مدل‌سازی با افزایش درصد وزنی GNP، ابعاد حجمک نماینده کاهش پیدا می‌کند در حالی که ابعاد GNP ثابت است. درنتیجه مقدار اپوکسی به‌عنوان یک محیط میراکننده کاهش خواهد داشت. بنابراین با افزایش درصد وزنی GNP می‌توان انتظار کاهش ثابت استهلاک (h) را داشت که این موضوع در جدول ۴ مشهود است. در مقابل، سفتی حجمک نماینده تابعی از سطح مقطع و طول است. در مدل‌سازی با افزایش درصد وزنی GNP، ابعاد کاهش پیدا می‌کنند. به‌طوری که کاهش سطح مقطع بیشتر از میزان کاهش طول است (جدول ۳)، درنتیجه سفتی نمونه کاهش خواهد داشت (جدول ۴). در نهایت می‌توان گفت که به نوعی یک مصالحه و تاثیر متقابل بین ثابت استهلاک و سختی برای تعیین فاکتور میرایی وجود دارد. در این میان تاثیر عیوب در افزایش

خواص میرایی در درصدهای وزنی بالاتر GNP بسیار واضح‌تر خواهد بود. بنابراین طبق نتایج تجربی در درصدهای وزنی بالاتر از ۳ فاکتور میرایی افزایش می‌یابد در حالی که این روند به دلیل صرف نظر از عیوب در مدل‌سازی، کاهشی است.

توجه شود که مدل ارایه شده توانایی پیش‌بینی درصد وزنی بحرانی را نیز خواهد داشت. همان‌گونه که در نمودار ۴ قابل مشاهده است، طبق آزمایش در درصد وزنی ۳ فاکتور میرایی به کمترین حد خود می‌رسد در حالی که در همین نقطه منحنی مربوط به نتایج مدل‌سازی ماکزیمم می‌شود؛ به‌علاوه اینکه مرتبه پاسخ‌های حاصل از مدل‌سازی با نتایج تجربی یکسان است.

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، کامپوزیت GNP- اپوکسی شامل مقادیر صفر تا ۵ درصد وزنی GNP با روش ترکیب انحلالی ساخته شد. به‌منظور یافتن خواص میرایی، آزمایشات ارتعاش آزاد و اجباری بر روی نمونه‌ها صورت پذیرفت. در نهایت یک مدل ریاضی به‌منظور توصیف رفتار میرایی کامپوزیت در هر درصد وزنی از GNP ارایه شد. نتایج آزمایش ارتعاشات آزاد نشان دادند که تا درصد وزنی ۳، فاکتور اتلاف ساختاری (η) با افزایش میزان GNP کاهش می‌یابد در حالی که این روند به ازای مقادیر وزنی GNP بیشتر از ۳، صعودی است. این پدیده با توجه به رشد عیوب موجود در فاز ماتریسی قابل توجیه خواهد بود. طبق نتایج حاصل‌شده از آزمایشات این بررسی، به‌منظور داشتن خواص میرایی بهتر نسبت به اپوکسی خالص، استفاده از GNP در درصدهای بالاتر از ۵ توصیه می‌شود.

نتایج آزمایشات ارتعاش اجباری بر روی اپوکسی خالص حاکی از این حقیقت است که ضریب میرایی ریلی جرم (α) بسیار بزرگ‌تر از ضریب میرایی ریلی سفتی (β) برای این ماده است.

نتایج مدل‌سازی اجزای محدود نشان داد که با صرف نظر از عیوب موجود در ماده، مقادیر فاکتور میرایی کمتر از نتایج حاصل‌شده طی مطالعات تجربی خواهد بود. مدل ارایه‌شده در این بررسی توانایی پیش‌بینی درصد وزنی بحرانی –که در آن فاکتور میرایی اکسترمم می‌شود– را خواهد داشت.

تشکر و قدردانی: بدین وسیله از جناب آقای دکتر *رضا تیکنی* و سرکار خانم *مرضیه احدی* که در انجام آزمایشات ارتعاشی و ساخت نمونه‌ها همکاری نمودند تشکر و قدردانی می‌شود.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمنا محتویات علمی مقاله، حاصل فعالیت نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: علیرضا طاهرزاده فرد (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (٤٠%)؛ مهدی جوانبخت (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۳۰%)؛ مهدی کاروان (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۳۰%)

منابع مالی: منابع مالی این پژوهش به‌طور مساوی از پژوهانه دکتر *مهدی جوانبخت* و دکتر *مهدی کاروان* تامین شده است.

منابع

1- Li B, Zhong WH. Review on polymer/graphite nanoplatelet nanocomposites. Journal of Materials Science. 2011;46(17):5595-5614.

2- Chung DDL. A review of exfoliated graphite. Journal of Materials Science. 2016;51(1):554-568.

3- Kuila T, Khanra P, Kumar Mishra A, Kim NH, Lee JH. Functionalized-graphene/ethylene vinyl acetate co-polymer composites for improved mechanical and thermal properties. Polymer Testing. 2012;31(2):282-289.

4- Kuester S, Demarquette NR, Ferreira Jr JC, Soares BG, Barra GMO. Hybrid nanocomposites of thermoplastic elastomer and carbon nanoadditives for electromagnetic shielding. European Polymer Journal. 2017;88:328-339.

5- Poláková L, Sedláková Z, Ecorchard P, Pavlova E, Peter J, Paruzel B, et al. Poly(meth)acrylate nanocomposite membranes containing in situ exfoliated graphene platelets: Synthesis, characterization and gas barrier properties. European Polymer Journal. 2017;94:431-445.

6- Jun YS, Um JG, Jiang G, Lui G, Yu A. Ultra-large sized graphene nano-platelets (GnPs) incorporated polypropylene (PP)/GnPs composites engineered by melt compounding and its thermal, mechanical, and electrical properties. Composites Part B: Engineering. 2018;133:218-225.

7- Yang B, Shi Y, Miao JB, Xia R, Su LF, Qian JS, et al. Evaluation of rheological and thermal properties of polyvinylidene fluoride (PVDF)/graphene nanoplatelets (GNP) composites. Polymer Testing. 2018;67:122-135.

8- Girdthep S, Sankong W, Pongmalee A, Saelee T, Punyodom W, Meepowpan P, et al. Enhanced crystallization, thermal properties, and hydrolysis resistance of poly(L-lactic acid) and its stereocomplex by incorporation of graphene nanoplatelets. Polymer Testing. 2017;61:229-239.

9- Gao Y, Picot OT, Bilotti E, Peijs T. Influence of filler size on the properties of poly(lactic acid) (PLA)/graphene nanoplatelet (GNP) nanocomposites. European Polymer Journal. 2017;86:117-131.

10- Zegeye E, Ghamsari AK, Woldesenbet E. Mechanical properties of graphene platelets reinforced syntactic foams. Composites Part B: Engineering. 2014;60:268-273.

11- Shokrieh MM, Hosseinkhani MR, Naimi-Jamal MR, Tourani H. Nanoindentation and nanoscratch investigations on graphene-based nanocomposites. Polymer Testing. 2013;32(1):45-51.

12- Liang JZ, Du Q, Chi-Pong Tsui G, Tang CY. Tensile properties of graphene nano-platelets reinforced polypropylene composites. Composites Part B: Engineering. 2016;95:166-171.

13- Aluko O, Gowtham S, Odegard GM. Multiscale modeling and analysis of graphene nanoplatelet/carbon fiber/epoxy hybrid composite. Composites Part B: Engineering. 2017;131:82-90.

14- Feng C, Kitipornchai S, Yang J. Nonlinear bending of polymer nanocomposite beams reinforced with non-uniformly distributed graphene platelets (GPLs). Composites Part B: Engineering. 2017;110:132-140.

15- Esposito Corcione C, Maffezzoli A. Transport properties of graphite/epoxy composites: Thermal, permeability and dielectric characterization. Polymer Testing. 2013;32(5):880-888.

16- Cui X, Sun S, Han B, Yu X, Ouyang J, Zeng S, et al. Mechanical, thermal and electromagnetic properties of nanographite platelets modified cementitious composites. Composites Part A: Applied Science and

characterization. Frontiers of Materials Science. 2017;11(2):171-181.
22- Li M, Xiong P, Mo M, Cheng Y, Zheng Y. Electrophoretic-deposited novel ternary silk fibroin/graphene oxide/hydroxyapatite nanocomposite coatings on titanium substrate for orthopedic applications. Frontiers of Materials Science. 2016;10(3):270-280.
23- Young RJ, Liu M, Kinloch IA, Li S, Zhao X, Vallés C, et al. The mechanics of reinforcement of polymers by graphene nanoplatelets. Composites Science and Technology. 2018;154:110-116.
24- Rao SS. Mechanical Vibrations. 5th Edition. Upper Saddle River: Prentice Hall; 2011.
25- Gitman IM, Askes H, Sluys LJ. Representative volume: Existence and size determination. Engineering Fracture Mechanics. 2007;74(16):2518-2534.
26- Rémond Y, Ahzi S, Baniassadi M, Garmestani H. Applied RVE Reconstruction and Homogenization of Heterogeneous Materials. Hoboken: Wiley; 2016.
27- Cho J, Luo JJ, Daniel IM. Mechanical characterization of graphite/epoxy nanocomposites by multi-scale analysis. Composites Science and Technology. 2007;67(11-12):2399-2407.
Manufacturing. 2017;93:49-58.
17- Khan SU, Li CY, Siddiqui NA, Kim JK. Vibration damping characteristics of carbon fiber-reinforced composites containing multi-walled carbon nanotubes. Composites Science and Technology. 2011;71(12):1486-1494.
18- Ferreira CI, Bianchi O, Alfredo Soto Oviedo M, Vinicius Bof de Oliveira R, Santos Mauler R. Morphological, viscoelastic and mechanical characterization of polypropylene/exfoliated graphite nanocomposites. Polímeros. 2013;23(4):456-461.
19- Odegard GM, Gates TS. Modeling and testing of the viscoelastic properties of a graphite nanoplatelet/epoxy composite. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2006;17(3):239-246.
20- Nasr Esfahani A, Katbab A, Taeb A, Simon L, Pope MA. Correlation between mechanical dissipation and improved X-band electromagnetic shielding capabilities of amine functionalized graphene/thermoplastic polyurethane composites. European Polymer Journal. 2017;95:520-538.
21- Saboori A, Pavese M, Badini C, Fino P. Development of Al-and Cu-based nanocomposites reinforced by graphene nanoplatelets: Fabrication and