

Analytical and Numerical Studies of the Effect of Impact Forces on Polymer/Clay Nanocomposites

A.R. Ghasemi* and A.H. Karimi

Mechanical Engineering Group, Engineering Department, University of Kashan,

P.O. Box: 87317-51167, Kashan, Iran

Received 21 February 2010, accepted 4 September 2010

ABSTRACT

The high costs of experimental works on the nanocomposites can be reduced through implementation of analytical and numerical studies. To study the effect of impact energy on the nanocomposites, a nanocomposite composed of polyurethane and clay nanoparticles is selected as a case study. The finite element modeling is carried out using the ANSYS software, and the impact analysis is performed using LSDYNA. Three distinct regions: namely the polymer, the clay particles, and the interface are considered in the modeling. Subsequently, the effects of staggering factor, vertical distance between nanoparticles, aspect ratio, and volume fraction of clay nanoparticles on the reaction of the nanocomposite to the impact forces are investigated. The magnitude of the displacement of the specimen and the maximum force at the contact point are important parameters in impact analysis. In order to study the effect of structural parameters, two different impact velocities are considered, and for each 160 finite element modelings are performed. In each case, the effective parameters together with their limitations are considered. Different graphs are presented and analyzed for the effect of every structural parameter on the impact. The results of this study show that for a nanocomposite of aspect ratio equal 100, staggering factor of 0.5, and exfoliation factor of 0.51, the volume fraction of the clay nanoparticles is the range of 1.5 to 3 percent which can be considered optimum as far as the effect of impact forces are concerned.

Key Words:

impact,
nanocomposite,
Polymer, clay,
finite element method

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: ghasemi@kashanu.ac.ir

مطالعه تحلیلی و عددی آثار ضربه روی نانوکامپوزیت های پلیمر - خاک رس

احمد رضا قاسمی*، امیر حسین کریمی

کاشان، دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۵۱۱۶۷-۸۷۳۱۷

دریافت: ۸۸/۱۲/۲، پذیرش: ۸۹/۶/۱۳

چکیده

مطالعه تحلیلی و عددی برای نانوکامپوزیت ها سبب کاهش هزینه های بسیار زیاد آزمایش می شود. در این پژوهش، برای مطالعه آثار ضربه روی نانوکامپوزیت ها، نانوذرات خاک رس و پلیمر پلی یورتان به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده اند. مدل سازی اجزای محدود با استفاده از نرم افزار ANSYS انجام شده و برای تحلیل ضربه از محیط LS DYNA استفاده شده است. در مدل سازی، سه ناحیه متمایز پلیمر، ذرات خاک رس و ناحیه بین فازی در نظر گرفته شده اند. ابتدا، صحت مدل سازی عددی ارزیابی شده و آن گاه آثار روی هم رفتگی ذرات، فاصله قائم بین ذرات، نسبت منظر و تغییرات نسبی درصد حجمی خاک رس روی واکنش نانوکامپوزیت در برابر ضربه مطالعه شده است. در بحث ضربه مقدار جابه جایی نمونه و نیروی بیشینه در محل تماس از عوامل مهم است. در این پژوهش، آثار عوامل گفته شده روی خواص ضربه ای مانند مقدار جابه جایی نمونه و نیروی بیشینه در محل تماس مطالعه و تحلیل شده است. برای مطالعه اثر عوامل ساختاری، دو سرعت مختلف برای ضربه زننده انتخاب شد و برای این دو سرعت بیش از ۱۶۰ مدل اجزای محدود مطالعه و پارامترهای مؤثر به همراه عوامل محدودکننده ارزیابی شده است. برای اثر هر عامل ساختاری روی خواص ضربه ای نمودارهای جداگانه به دست آمده و تحلیل شده است. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان می دهد، هرگاه نسبت منظر ذرات نانوکامپوزیت برابر ۱۰۰ بوده و دارای ضریب روی هم رفتگی ۰/۵ و ضریب لایه لایه شدن ۰/۵۱ باشند، کسر حجمی نانوذرات خاک رس در محدوده ۱/۵ تا ۳ درصد را می توان به عنوان شرایط بهینه برای مقابله با آثار ضربه روی این مواد در نظر گرفت.

واژه های کلیدی

ضربه،

نانوکامپوزیت،

پلیمر، خاک رس،

روش اجزای محدود

* مسئول مکاتبات، پیام نگار:

مقدمه

بحث ضربه و مقاومت یک سازه در برابر بارهای ضربه ای یکی از مهم ترین بحث های علم مکانیک است. کامپوزیت های پایه پلیمری از جمله موادی هستند که در بیشتر سازه ها در معرض بارهای ضربه ای قرار دارند. بنابراین، مقاوم سازی و افزایش استحکام آنها در برابر ضربه بخش وسیعی از مطالعات پژوهشگران را تشکیل داده است. با توجه به ورود نانو کامپوزیت ها به صحنه رقابت با آلیاژها و کامپوزیت ها در دو دهه اخیر، پژوهش های موجود در این زمینه از لحاظ ساختار و مشخصه سازی مواد در آغاز راه هستند. بیشتر نظریه های موجود در زمینه ضربه به ویژه بحث ضربه در ورقه های کامپوزیتی مربوط به کامپوزیت های معمولی است و در ساختار آنها از موادی در ابعاد نانو استفاده نشده است. به طور کلی، در تحلیل واکنش مواد نسبت به ضربه های کم سرعت و تحلیل رفتار ضربه ای سازه ها، بررسی پدیده تماس اهمیت زیادی دارد.

در بررسی پدیده تماس محاسبه نیروی تماس و گاهی مواقع محاسبه تغییر شکل ضربه زننده و هدف مورد نظر است. ساده ترین رابطه بین نیروی تماس و مقدار فرورفتگی هدف، به نام قانون تماس، توسط تیموشنکو (۱۹۱۳) برای مطالعه برخورد کره ای فولادی به عنوان ضربه زننده با یک تیر مورد استفاده قرار گرفته شد. این روش از آن زمان به بعد به طور گسترده برای تحلیل مسائل ضربه استفاده شد و به طور متعارف در تحلیل این مسائل در مواد کامپوزیتی به کار گرفته شد [۱]. مقدار فرورفتگی در محل تماس مستقل از تغییر شکل کلی سازه است. هنگامی که سطح تماس بزرگ می شود، تغییر شکل کلی سازه بر توزیع فشار در زیر ضربه زننده اثر می گذارد که باید این اثر متقابل برای افزایش دقت به حساب آورده شود.

برای بارها و تغییر شکل های ایستا یا شبه ایستا (یا تغییرات آرام) با استفاده از نظریه تماس هرتر مسئله برخورد بین دو جسم با رفتار کشسان خطی قابل حل است [۱]. در دهه های اخیر، برای مسئله برخورد بین اجسام ناهمسان گرد راه حل هایی ارائه شده است که کامل ترین آنها تحلیل Sveklo است [۲].

امروزه، بحث ضربه در نانو کامپوزیت ها در آغاز راه است و تمام پژوهش های انجام شده در زمینه اثر ضربه روی نانو کامپوزیت ها و پاسخ آنها در برابر آن در سرعت های کم بیشتر به طور آزمایشی بوده و تحلیل عددی در این زمینه ارائه نشده است. تکیه معروف و باقاری در باره رفتار مکانیکی نانو کامپوزیت اپوکسی - خاک رس [۳] اثر وجود خاک رس اصلاح شده بر کارایی مکانیکی رزین اپوکسی را مورد ارزیابی قرار دادند. بررسی نتایج آزمون های مکانیکی نشان داد که وجود خاک رس

اصلاح شده در زمینه اپوکسی موجب افزایش استحکام تسلیم فشاری، مدول کششی و چقرمگی شکست نانو کامپوزیت نسبت به اپوکسی خالص می شود. کفاشی و همکاران پراکنش خاک رس اصلاح شده در پلی تترامتیلن اتر گلیکول را بررسی کردند [۴]. آنها نحوه پراکنش خاک رس اصلاح شده را در پلیمر پلی تترامتیلن اتر گلیکول (PTMEG) مطالعه کردند که یکی از پلی ال های رایج به عنوان ماده اولیه در صنعت پلی یورتان است. این بررسی در سه مقیاس نانو، میکرو و ماکرو به ترتیب با استفاده از آزمایش های پراش پرتو X، ریومتری و مشاهده ظاهری برای سه نوع خاک رس کلویزیت 10A، 93A و 30B انجام شد. نتایج آزمایش ها نشان داد که کلویزیت 30B نسبت به دو نوع دیگر ساختار محکم تری در پلی ال ایجاد می کند.

عباسی و همکاران اثر سامانه پرکننده هیبریدی دوده - خاک رس اصلاح شده را بر خواص آمیزه رویه تاپر بررسی کردند [۵]. نتایج مطالعه آنها نشان داد که بهبود در خواصی چون استحکام کششی، ازدیاد طول تا پارگی و مقاومت پارگی با جایگزینی ۵ قسمت وزنی دوده با خاک رس اصلاح شده به دست می آید. با وجود این، بهبود در خواصی چون مدول و مقاومت سایشی با جایگزینی ۳ قسمت وزنی دوده با خاک رس اصلاح شده حاصل می شود. هم چنین، با تغییر شرایط اختلاط و دادن زمان کافی پس از اختلاط آمیزه برای ایجاد پراکنش بهتر لایه های رس، بهبود در خواص مکانیکی و سایشی نمونه ها مشاهده شد.

در مبحث ضربه، Hu و همکاران بیان کردند که ضربه با سرعت های کم در کامپوزیت های چند لایه موجب ایجاد تورق های چندگانه انباشته در فضای بین لایه ای ضخامت چند لایه کامپوزیتی می شود [۶]. اثر این نوع تخریب منجر به کاهش قابل توجه استحکام و سفتی چند لایه ها می شود. بنابراین، با توجه به ساز و کار خسارت ناشی از ضربه ضروری است که کارایی مواد کامپوزیتی بهبود یابد.

Davies و Zhang نشان دادند که الیاف کربنی دارای رفتار کشسان هستند، اما بسیار شکننده اند [۷]. با توجه به این موضوع آنها پیشنهاد کردند که از الیاف شیشه به جای کربن استفاده شود. مقدار چقرمگی الیاف شیشه به طور گسترده ای به مقدار خسارت ناشی از سرعت کرنش و رفتار ماتریس بستگی دارد. برای حل این مشکل یکی از راه حل های موجود افزایش مقدار سفتی ماتریس است. برای دسترسی به این هدف سامانه نانو کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با نانوذرات خاک رس جایگزین سامانه اپوکسی شد.

Avila و همکاران رفتار ورقه های کامپوزیتی را به طور آزمایشی در اثر ضربه در سرعت های کم مورد بررسی قرار دادند [۸]. آنها اثر تغییر مقدار درصد حجمی ذرات را در مقدار نیروی تماس در سطوح مختلف

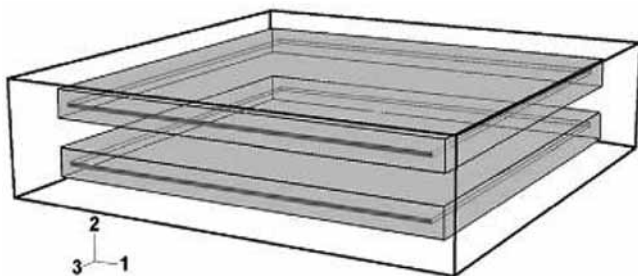
پیوسته پلیمر خالص می شود. وجود سه ناحیه متمایز پلیمر، ذرات خاک رس و ناحیه بین فازی پیچیدگی های مدل سازی را بسیار افزایش می دهد [۱۱]. از موارد مهم دیگر در مدل سازی نانوکامپوزیت، تعیین ضخامت ناحیه بین فازی است.

مطالعات زیادی برای تعیین ضخامت ناحیه بین فازی انجام شده است. در یک پژوهش مهم در این زمینه، با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو در سطح مولکولی، این نتیجه مهم به دست آمد که ضخامت ناحیه بین فازی به شعاع ژیراسیون مولکول های پلیمر بستگی دارد [۱۱]. در این پژوهش، نیز ضخامت ناحیه بین فازی مشابه پژوهش های پیشین به شعاع ژیراسیون مولکول های پلیمر بستگی دارد و بر اساس تجربیات Fossey ضخامت ناحیه بین فازی در حدود ۳ nm در نظر گرفته شده است [۱۲]. هم چنین، مدول یانگ ناحیه بین فازی نیز در حدود ۳ برابر مدول پلیمر در نظر گرفته شده است.

در این پژوهش، نرم افزار ANSYS/LS-DYNA 11.0 برای تحلیل عددی به کار گرفته شده است. تحلیل ها به شکل تحلیل دینامیکی صریح در نظر گرفته شده اند. در محیط ANSYS/LS-DYNA تنها ۸ نوع جزء برای تحلیل های دینامیکی ضربه قابل استفاده است که در این پژوهش از اجزای سه بعدی SOLID 168 استفاده شده است. این اجزا ۱۰ گره ای هستند، که هر کدام از گره ها دارای ۹ درجه آزادی است. مواد با سه خاصیت مدول کشسانی، نسبت پواسون و چگالی مشخص می شوند و ذرات خاک رس با فرضی قابل قبول همسان در نظر گرفته شده اند.

مدل اجزای محدود

در مدل اجزای محدود ذرات خاک رس به شکل مکعب مستطیل فرض شده است. شکل های ۱ و ۲ نمایشی از مدل شبیه سازی شده در محیط نرم افزار را نشان می دهد. این مدل به شکل یک سلول واحد است که تمام تغییرات پارامترهای هندسی مورد بحث که در ادامه بیان می شوند، روی این مدل اعمال خواهند شد. در این پژوهش، آزمایش ضربه سقوط آزاد وزنه شبیه سازی شده و شرایط تکیه گاهی مدل به شکل درگیر در



شکل ۱ - نمای سه بعدی از مدل شبیه سازی شده.

انرژی ضربه بررسی کردند. در این پژوهش نشان داده شد، نمونه های دارای ۵٪ کسر حجمی نانوذرات خاک رس بهترین کارایی را نسبت به میرایی نیروی تماس نشان می دهند.

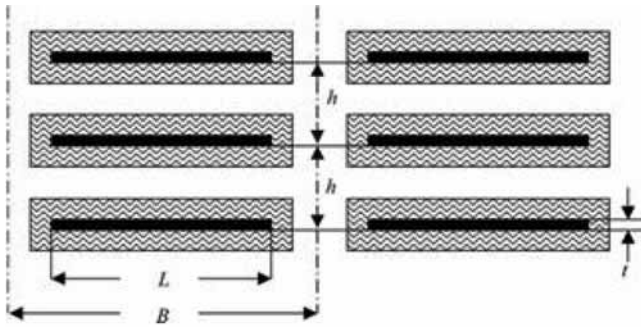
Lin در باره رفتار ضربه ای نانوکامپوزیت های پلیمری تقویت شده سیلیکاتی مطالعاتی انجام داد [۹]. وی در پژوهش خود افزون بر مشخص کردن خواص مکانیکی، اثر ساختار و نحوه آرایش نانوذرات در ماتریس و مشخصات ماتریس را بر بارگذاری ضربه ای نانوکامپوزیت بررسی کرده و نشان داد که سطح ترک بین لایه ای در تمام نانوکامپوزیت های تقویت شده با نانوذرات سیلیکاتی در اثر بارهای ضربه ای با انرژی کم، کاهش می یابد. پارامترهای کشسان نانوکامپوزیت پلیمر - خاک رس توسط شکریه و همکاران به روش اجزای محدود بررسی شده است [۱۰]. اما، هیچ پژوهشی در زمینه رفتارهای مکانیکی سازه در برابر بارگذاری های مختلف مانند بارهای ضربه ای تاکنون انجام نشده است.

در این پژوهش، پس از مطالعه دقیق روش مدل سازی نانوکامپوزیت ها، عوامل ریزساختاری مؤثر و نحوه اثر آنها در مدل تعریف شده است. آن گاه واکنش نانوکامپوزیت پلیمر - خاک رس در برابر ضربه در سرعت های کم با فرض همسان بودن اجزا، به کمک مدل ریزمکانیک اجزای محدود مطالعه شده است. در نهایت، صحت مدل سازی انجام شده ارزیابی و چگونگی تغییر عوامل مؤثر مانند نسبت حجمی ماده پرکننده، نسبت منظر خاک رس اصلاح شده، فاصله قائم بین ذرات و ضریب روی هم رفتگی در هنگام ضربه مطالعه شده است.

شرح کلی مدل

در این پژوهش، برای مطالعه آثار ضربه روی نانوکامپوزیت ها، نانوکامپوزیت پلیمر - خاک رس به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. ذرات خاک رس با ضخامت در حدود ۱ nm به شکل لایه لایه شده در محیط پیوسته زمینه پلیمری پراکنده شدند. لایه لایه بودن کامل ذرات در محیط پلیمر سبب می شود که ذرات خاک رس دارای جنس و خواص همگن باشند. از دیگر خواص مهم نانوذرات خاک رس نسبت منظر زیاد آنهاست، که به ما امکان می دهد، نسبت منظر ذرات در محدوده وسیعی تغییر کند. این خاصیت باعث می شود، هندسه اغلب نانوذرات به شکل صفحه ای، مستطیلی یا دمبلی باشد.

از دیگر مواردی که سبب پیچیدگی مدل سازی نانوکامپوزیت های پلیمر - خاک رس در محیط اجزای محدود می شود، ناحیه بین فازی است. این ناحیه ناشی از برهم کنش شیمیایی پلیمر با سطح ذرات است که باعث تغییر فاز و تغییر خواص ناحیه اطراف ذرات پراکنده در محیط



شکل ۴ - ابعاد در نظر گرفته شده برای محاسبه ضریب روی هم رفتگی.

دومین پارامتر ساختاری اثرگذار در ساختار مدل مورد بررسی مقدار پراکندگی ذرات در پلیمر یا مقدار لایه لایه شدگی ذرات است. این پارامتر در اصل مقدار ارتفاع قائم بین دو ذره در یک سلول واحد است که با ضریبی بنام ضریب لایه لایه شدگی (f_x) کنترل می‌شود. ضریب لایه لایه شدگی ذرات به عنوان ارتفاع نسبی ذرات تعریف می‌شود. به عبارت دیگر، فاصله قائم بین دو ذره مجاور نسبت به حداکثر ارتفاعی است که دو ذره می‌توانند در غیاب ناحیه بین فازی نسبت به هم اختیار کنند. به بیان دیگر، ضریب لایه لایه شدگی حداکثر فاصله قائم بین دو ذره در یک سلول واحد در کسر حجمی ثابت است. با توجه به شکل ۴ برای مقدار کسر حجمی ذرات می‌توان نوشت [۱۳]:

$$V_f = \frac{L^2 t}{B^2 h} \quad (2)$$

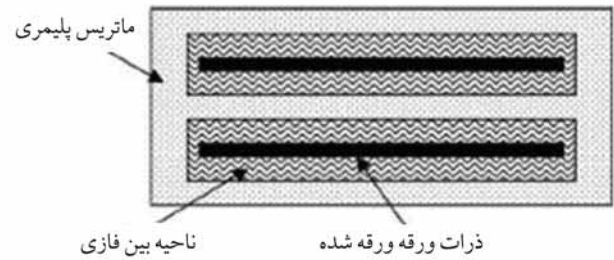
بیشترین مقدار فاصله h بین ذرات (در کسر حجمی ثابت) زمانی اتفاق می‌افتد که $L = B$ باشد. بنابراین:

$$h_{\max} = \frac{t}{V_f} \quad (3)$$

ضریب لایه لایه شدگی به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$f_x = \frac{h}{h_{\max}} = \frac{L^2}{B^2} \quad (4)$$

که در آن، L طول ذره و B پهناي سلول واحد است. h و t به ترتیب فاصله عمودی بین ذرات و ضخامت آنهاست. با توجه به مدل ارائه شده برای مقدار f_x محدودیت‌هایی وجود دارد. به عنوان مثال، $f_x = 1$ امکان پذیر نیست، زیرا این مقدار f_x به معنای حذف فاصله بین دو ذره و درهم فرو رفتن ناحیه بین فازی یا به عبارت دیگر حذف شدن این ناحیه است. در این مدل ناحیه بین فازی با ضخامت t مشخص می‌شود. با توجه به

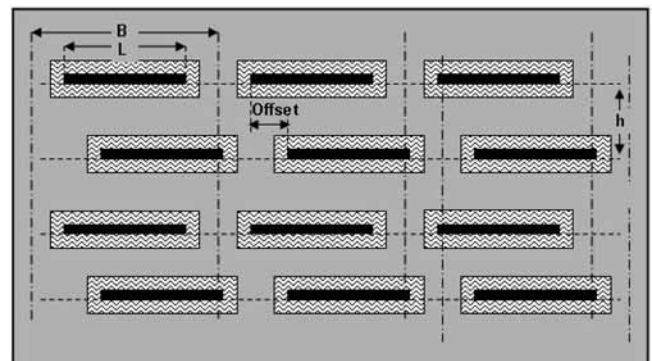


شکل ۲ - نمایی از مقطع عرضی سلول واحد.

محیط نرم افزار مدل شده است. سرعت اولیه ضربه (V_0) زننده با دو مقدار مختلف ۵/۲ و ۸/۲ تغییر می‌کند. فرض پیوند کامل بین ذرات و ناحیه بین فازی (ناحیه سطحی) صادق است. این موضوع بدان معناست که در اطراف هر ذره ناحیه‌ای بنام ناحیه بین فازی در نظر گرفته شده است. هر دو ذره و ناحیه بین فازی در پلیمر معلق شده‌اند. از آن جا که ذرات به شکل مستطیل مدل شده‌اند، ماده نانوکامپوزیت نمی‌تواند از نوع همسان گرد باشد. دو صفحه تقارن در مدل وجود دارد که موجب می‌شود، مدل ناهمسان گرد باشد [۱۳].

تمام عوامل ساختاری به طریقی به عوامل هندسی مربوط شده‌اند. عامل نسبت منظر (L/t) ، کسر حجمی ذرات (V_f)، ضریب روی هم رفتگی ذرات (f_s) و ضریب لایه لایه شدگی (f_x) با توجه به تعریف هر یک برحسب عوامل هندسی در نظر گرفته شده‌اند (شکل ۳). اولین پارامتر ساختاری که مورد بررسی قرار گرفته است، مقدار روی هم رفتگی ذرات است. این پارامتر که با f_s مشخص شده به عنوان فاصله افقی بین دو ذره به پهناي یک سلول واحدی است که در آن سلول، تنها این دو ذره جا شده باشند [۱۳]:

$$f_s = \frac{2(\text{offset})}{B} \quad (1)$$



شکل ۳ - نمای کلی پارامترهای ساختاری ارائه شده در مدل.

ارزیابی مدل اجزای محدود

خواص پلیمر، خاک رس اصلاح شده و ناحیه بین فازی برای مدل سازی عددی ثابت در نظر گرفته شده اند. مقادیر تمام پارامترها مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است [۱۳].

با توجه به جدول ۱ برای نتیجه گیری کامل تعداد زیادی مدل باید تهیه و تحلیل شود. بدین منظور تعداد ۱۶۲ حالت برای انجام تحلیل های مورد نظر ایجاد شد.

در حالاتی که عوامل ساختاری دارای بازه متغیر هستند، مقادیر ۵٪ برای درصد نسبی حجم خاک رس، ۰/۵ برای ضریب روی هم رفتگی، ۰/۵۱۰ برای ضریب لایه لایه شدگی و نسبت منظر ۱۰۰ برای ذرات به عنوان بیشترین مقدار در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است، اگرچه اختلاف مدول یانگ نانوذرات خاک رس و مدول یانگ پلیمر زیاد بوده و اثر چشم گیری نیز در نتایج دارد، اما ضریب پواسون آنها در اغلب موارد یکسان یا نزدیک به یک دیگر است و اثری بر خواص کلی نانوکامپوزیت ندارد [۱۳].

با توجه به این نکته که پژوهش پیش رو برای اولین بار مورد مطالعه عددی قرار می گیرد، بنابراین برای اطمینان از صحت مدل سازی انجام شده در محیط نرم افزار، شبیه سازی سه بعدی با استفاده از اجزای PLANE85 برای محاسبه و مقایسه خواص مکانیکی E_{11}/E_m و E_{22}/E_m انجام گرفته و نتایج آن با مرجع [۱۰] مقایسه شده است. نتایج شکل ۵ نشان می دهد، مدل سازی انجام شده در محیط نرم افزار صحیح است. در این شبیه سازی نسبت منظر ذرات ۱۰۰، ضریب روی هم رفتگی ۰/۵، ضریب لایه لایه شدگی ۰/۵۱۰ و درصد های نسبی حجم خاک رس برابر با ۱، ۲/۵ و ۵ درصد در نظر گرفته شده است. برای ارزیابی صحت شبیه سازی مدل در نرم افزار اجزای محدود، آزمایش کشش روی مدل سه بعدی در جهت های غیر اصلی ۱ و ۲ شبیه سازی شده است. آن گاه نسبت های E_{11}/E_m و E_{22}/E_m به دست آمده و با نتایج مرجع [۱۰] مقایسه شده است.

نتایج این پژوهش با مرجع مورد اشاره تطابق بسیار مطلوبی را نشان می دهد. بیشترین اختلاف این دو پژوهش برای تغییرات نسبی مدول های کشسانی E_{22}/E_m بر حسب درصد حجمی خاک رس در نانوکامپوزیت رخ داده، که کمتر از ۳ درصد است. این امر صحت مدل سازی انجام شده را نشان می دهد.

آثار تغییر عوامل ساختاری روی خواص ضربه ای

اثر نسبی حجم خاک رس

اولین پارامتر مورد مطالعه برای بررسی رفتار نانوکامپوزیت در برابر

توضیحات ارائه شده، مقدار f_x به وسیله τ محدود می شود. کمترین مقدار f_x هنگامی اتفاق می افتد که h به h_{min} کاهش یابد:

$$h_{min} = 2\tau + t \quad (5)$$

بنابراین، کمترین مقدار ضریب لایه لایه شدگی مجاز با استفاده از معادله (۶) محاسبه می شود:

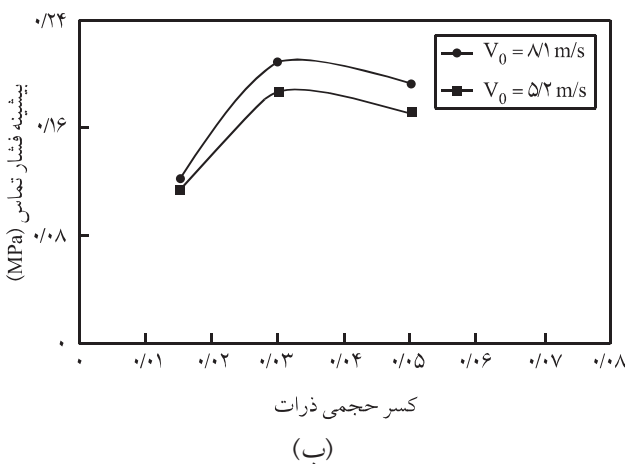
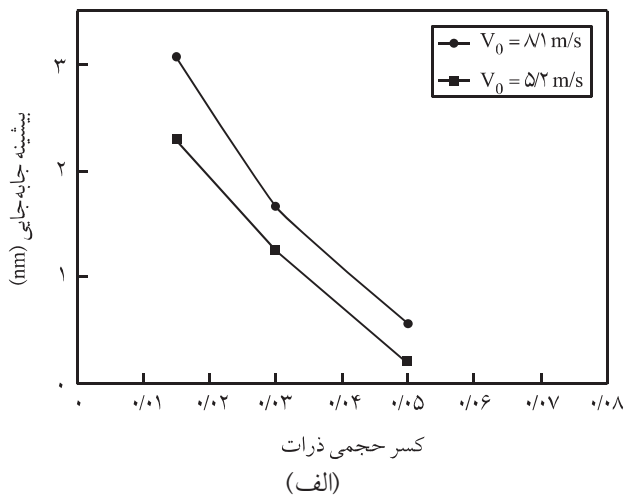
$$f_{x,min} = \frac{2\tau + t}{t/V_f} = V_f \left(2\frac{\tau}{t} + 1\right) \quad (6)$$

بیشترین مقدار ضریب لایه لایه شدگی نیز به وسیله ضخامت ناحیه بین فازی معین می شود. از آن جا که مدل ارائه شده اجازه نمی دهد که نواحی بین فازی در حداکثر مقدار h روی یک دیگر قرار گیرند، بیشترین مقدار ضریب لایه لایه شدگی هنگامی است که دو انتهای نواحی بین فازی از دو واحد سلولی مجاور روی هم، به هم برسند، یعنی لبه این دو ناحیه در مجاورت هم قرار گیرند. بنابراین، بیشترین مقدار مجاز f_x برابر است با:

$$f_{x,max} = \frac{L^2}{(L + 2\tau)^2} \quad (7)$$

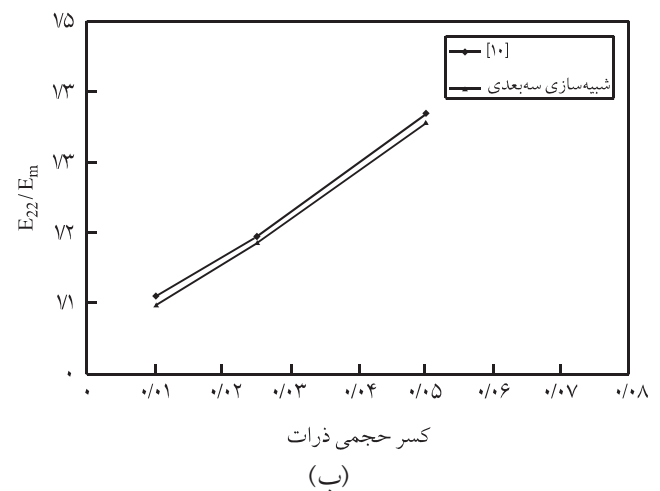
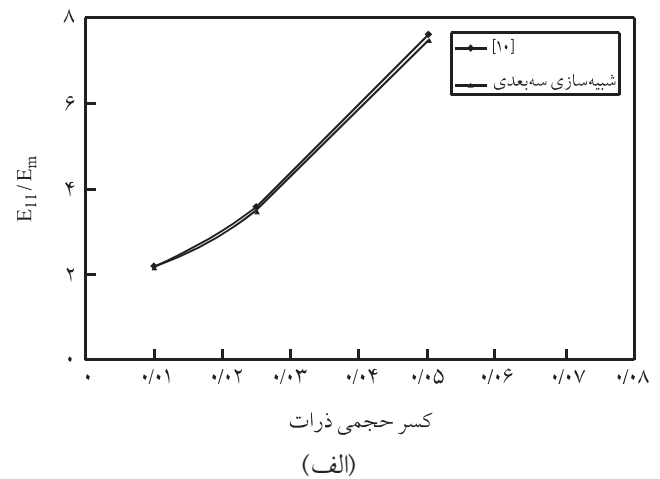
جدول ۱ - خواص مربوط به نمونه بررسی شده در مدل عددی [۱۳].

مقدار	مشخصه
۵۰/۳۷	مدول یانگ نانوذرات خاک رس (GPa)
۰/۳	نسبت پواسون ذرات
۱	ضخامت ذرات (nm)
۷۱	مدول یانگ پلیمر (GPa)
۰/۳	نسبت پواسون پلیمر
۵-۳-۱۵	درصد نسبی حجم نانوخاک رس (%)
۷۰-۰/۵-۰	ضریب روی هم رفتگی ذرات
۰/۶۹۴-۰/۵۱۰-۰/۴۵۱	ضریب لایه لایه شدگی
۱۵۰-۱۰۰-۵۰	نسبت منظر
۱	تعداد لایه ها در یک ذره
۱۹۰۰	چگالی ذره (kg/m^3)
۱۰۷۰	چگالی پلیمر (kg/m^3)
۱۱۴۰	چگالی ناحیه بین فازی (kg/m^3)
۸/۱-۵/۲	سرعت اولیه ضربه زننده، V_0 (m/s)



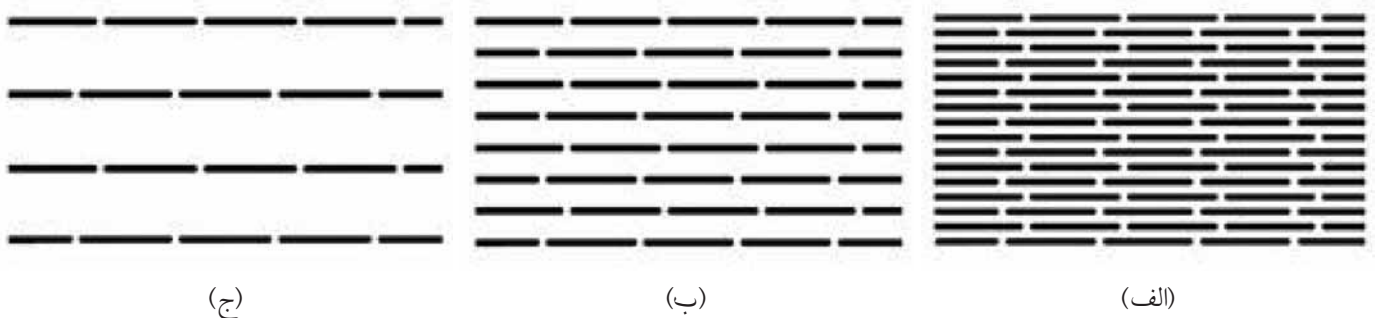
شکل ۷ - تغییرات نسبی: (الف) بیشینه جابه جایی و (ب) بیشینه فشار تماس برحسب درصد حجمی خاک رس در نانوکامپوزیت.

در بحث ضربه مقدار جابه جایی نمونه و نیروی بیشینه در محل تماس از عوامل مهم اند. همان طور که در شکل ۷ - الف مشاهده می شود، با افزایش درصد نسبی حجم خاک رس مقدار جابه جایی بیشینه که در مرکز مدل نانوکامپوزیت اتفاق می افتد، کاهش می یابد. مقدار جابه جایی



شکل ۸ - تغییرات نسبی مدول های کشسانی برحسب درصد حجمی خاک رس در نانوکامپوزیت: (الف) E_{11}/E_m و (ب) E_{22}/E_m .

ضربه، درصد نسبی حجم خاک رس است. شکل ۶ مقایسه ای کلی بین مدل ها با نسبت منظر ۱۰۰، ضریب لایه لایه شدگی ۰/۵۱۰، ضریب روی هم رفتگی ۰/۵ و درصد های نسبی حجم خاک رس ۰/۷۵، ۳ و ۵ درصد را نشان می دهد.

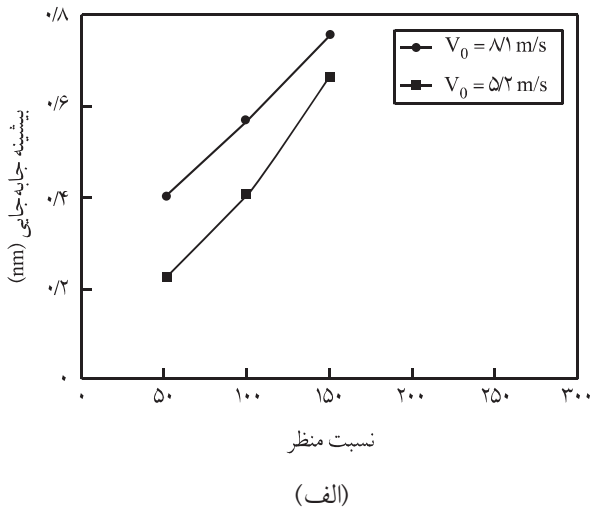


شکل ۹ - طرح کلی مدل ها برای درصد های نسبی مختلف حجم خاک رس: (الف) ۵ درصد، (ب) ۲/۵ درصد و (ج) ۱ درصد.

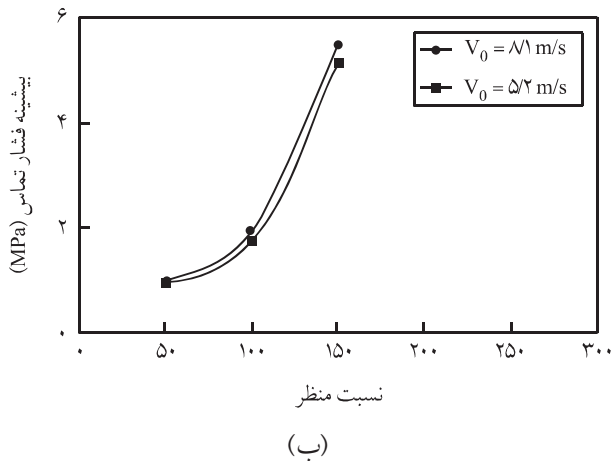


شکل ۸ - طرح کلی مدل‌ها برای نسبت‌های منظر مختلف: (الف) ۵۰، (ب) ۱۰۰ و (ج) ۱۵۰.

از جمله موادی هستند که با داشتن نسبت منظر زیاد کاربرد فراوانی در تقویت نانوکامپوزیت‌ها دارند. با افزایش نسبت منظر در یک حجم ثابت تعداد ذرات کاهش می‌یابد.



(الف)



(ب)

شکل ۹ - تغییرات نسبی: (الف) بیشینه جابه‌جایی و (ب) بیشینه فشار تماس بر حسب تغییر نسبت منظر.

بیشینه با توجه به در نظر گرفتن اجزای موجود در محل تماس و مقدار تغییر مکان آنها نسبت به سطح اولیه مدل در نظر گرفته شده است. پس از بررسی اجزای محل تماس و به دست آوردن میانگین مقادیر جابه‌جایی، مقادیر موجود در نمودارها ارائه شده است. علت این کاهش را می‌توان این طور بیان کرد که در یک حجم مشخص با افزایش حجم نانوذرات خاک رس، مقدار این ذرات افزایش یافته و بر مقدار صلبیت نانوکامپوزیت افزوده می‌شود. با توجه به شکل ۷ - ب مقدار بیشینه فشار تماس تا کسر حجمی در حدود ۳/۳٪ افزایش یافته و با افزایش این مقدار، بیشینه فشار تماسی شروع به کاهش می‌نماید. روند این تغییرات با مطالعه‌ای که در زمینه کسر حجمی ذرات و اثر آن بر نیروی تماس ناشی از ضربه توسط Lin انجام شده یکسان است [۹].

کاهش مقدار جابه‌جایی بیشینه با افزایش مقدار کسر حجمی می‌تواند تا حد زیادی مفید باشد و مقاومت سازه را در برابر بارهای ضربه‌ای افزایش دهد، ولی بیشینه مقدار فشار در این بازه کسر حجمی به عنوان عامل محدودکننده عمل می‌کند. بنابراین رفتار نانوکامپوزیت در بازه کسر حجمی بین ۰/۱۵ تا ۰/۳۳ بهترین پاسخ را نشان می‌دهد.

اثر نسبت منظر

اثر نسبت منظر از تقسیم طول ذره به عرض آن حاصل می‌شود. به طور کلی ذرات خاک رس اصلاح شده به علت داشتن ضخامت در حد نانو، نسبت منظر زیاد دارند. شکل ۸ مقایسه‌ای کلی بین مدل‌ها با درصد حجمی ۵ درصد، ضریب لایه لایه شدگی ۰/۵۱۰، ضریب روی هم‌رفتگی ۰/۵ و نسبت‌های منظر ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت منظر نانوذرات مقدار بیشینه جابه‌جایی و فشار تماس افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت منظر طول ذرات افزایش و به نسبت، سطح تماس نانوذرات افزایش می‌یابد که این امر منجر به افزایش مقدار تحمل نانوکامپوزیت در برابر ضربه می‌شود. به طور کلی، نانوذرات خاک رس



شکل ۱۰ - طرح کلی مدل ها برای ضرایب روی هم رفتگی مختلف: (الف) ۱، (ب) ۵/۰ و (ج) ۰.

اثر ضریب روی هم رفتگی

از دیگر عوامل مطالعه شده در این پژوهش روی هم رفتگی ذرات است. این اثر با ضریب روی هم رفتگی (f_g) کنترل می شود. با زیاد شدن f_g درگیری ذرات بیشتر می شود. شکل ۱۰، مقایسه کلی بین مدل ها با نسبت منظر ۱۰۰، درصد حجمی ۵، ضریب لایه لایه شدگی ۵/۱۰ و ضریب روی هم رفتگی ۰، ۵/۰ و ۱ را نشان می دهد.

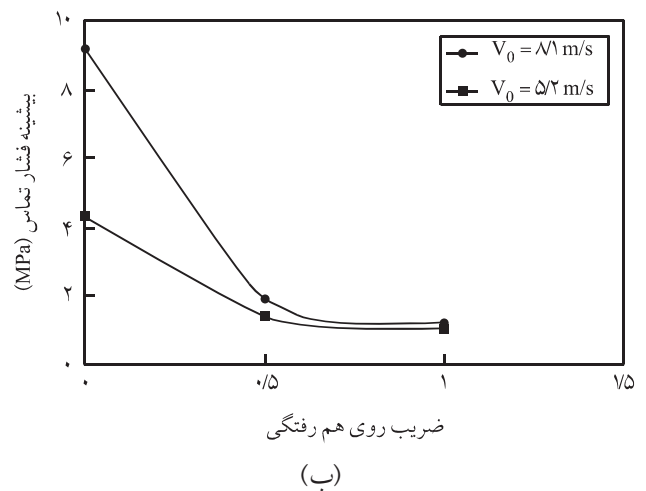
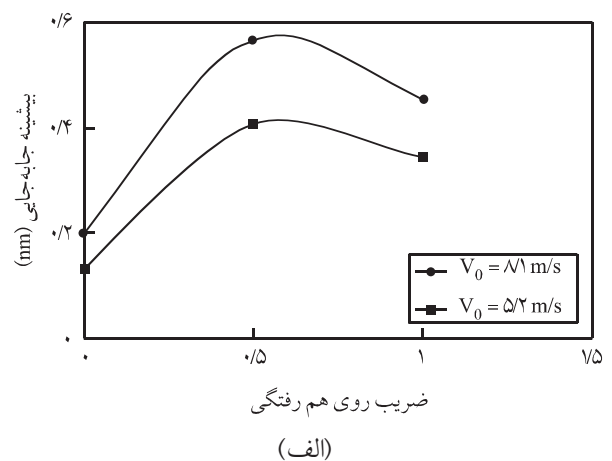
شکل ۱۱ - الف و ب تغییرات بیشینه جابه جایی و فشار تماس را بر حسب ضریب روی هم رفتگی نشان می دهد. با توجه به شکل ۱۱ - الف مقدار بیشینه جابه جایی تا ضریب روی هم رفتگی در حدود ۰/۶ افزایش و سپس کاهش می یابد. علت این امر آن است که با افزایش مقدار ضریب روی هم رفتگی نحوه قرارگیری نانوذرات به ترتیب شکل ۱۰ - الف و ب درآمده که این امر منجر به افزایش درگیری نانوذرات با هم و به دنبال آن افزایش مقدار صلبیت نانوکامپوزیت می شود. به همین ترتیب، با افزایش مقدار این ضریب مقدار بیشینه فشار تماس کاهش می یابد. نکته جالب توجه آن است که از مقدار ضریب ۰/۶۵ به بعد مقدار بیشینه فشار تماس تقریباً یکسان است و تغییر چندانی ندارد.

اثر ضریب لایه لایه شدگی

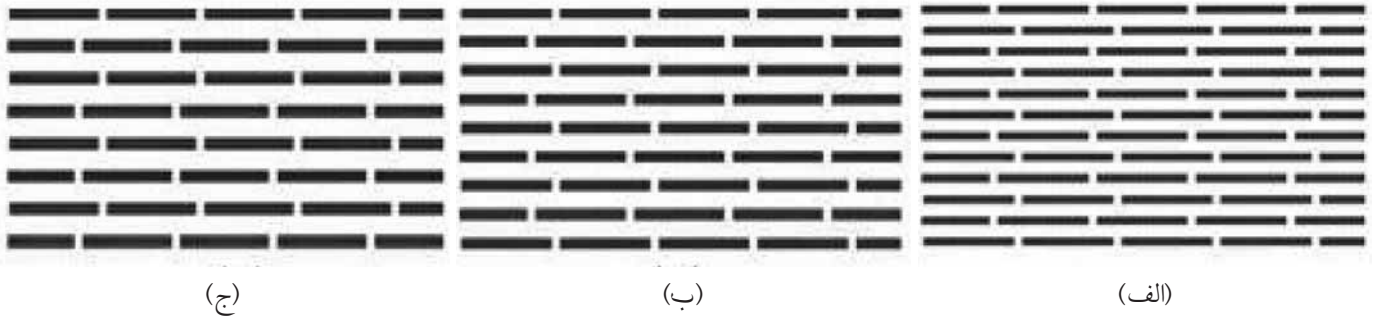
در مدل های اجزای محدود این پژوهش فاصله قائم بین ذرات خاک رس یکسان در نظر گرفته شده است. یکی از عوامل مؤثر بر خواص مکانیکی و واکنش نانوکامپوزیت در برابر ضربه تغییر فاصله قائم بین ذرات توزیع شده در آن است که با ضریب لایه لایه شدگی مشخص می شود. در شکل ۱۲ مقایسه کلی مدل ها با نسبت های منظر ۱۰۰، درصد حجمی ۵٪، ضریب روی هم رفتگی ۵/۰ و ضریب های لایه لایه شدگی ۰/۴۵۱، ۵/۱۰ و ۰/۶۹۴ انجام شده است.

با توجه به شکل ۱۳ - الف و ب می توان دریافت، با افزایش ضریب لایه لایه شدگی و به دنبال آن افزایش فاصله عمودی بین ذرات در یک ستون مقدار جابه جایی بیشینه افزایش می یابد. علت این امر آن است که

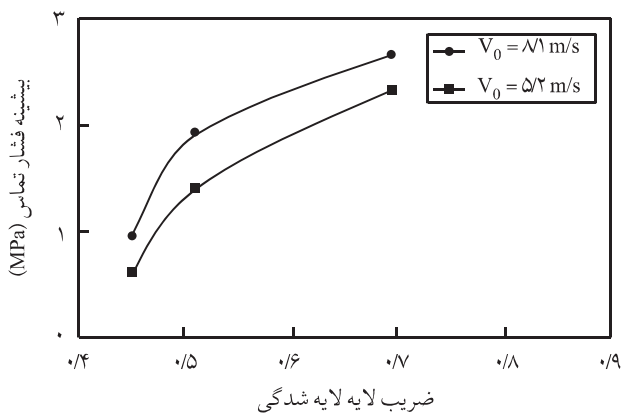
با کاهش تعداد ذرات، برهم کنش بین ذرات و مقدار صلبیت کل نمونه کاهش یافته و سطح تماس ذرات افزایش می یابد. این امر سبب کاهش صلبیت نانوکامپوزیت شده و انعطاف پذیری آن افزایش می یابد.



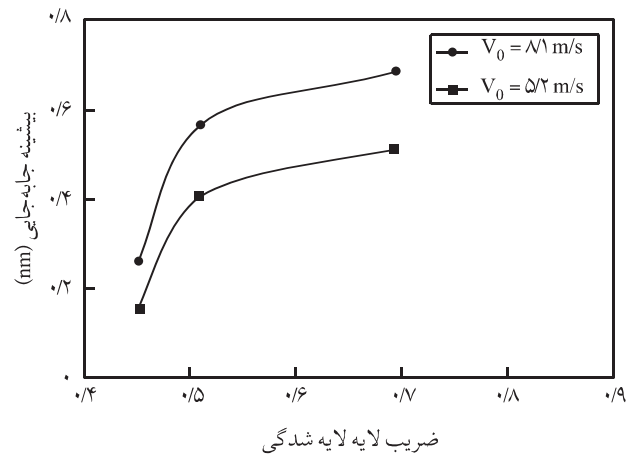
شکل ۱۱ - تغییرات نسبی: (الف) بیشینه جابه جایی و (ب) بیشینه فشار تماس بر حسب تغییرات ضریب روی هم رفتگی.



شکل ۱۲ - طرح کلی مدل ها برای ضرایب لایه لایه شدگی: (الف) ۰/۴۵۱، (ب) ۰/۵۱۰ و (ج) ۰/۶۹۴.



(ب)



(الف)

شکل ۱۳ - تغییرات نسبی: (الف) بیشینه جابه جایی و (ب) بیشینه فشار تماس بر حسب ضریب لایه لایه شدگی.

می شود. بدین ترتیب مقدار فشار تماس افزایش می یابد. در یک حجم مشخص با افزایش حجم نانوذرات خاک رس، مقدار این ذرات افزایش یافته و بر مقدار صلیبیت نانوکامپوزیت افزوده می شود. بنابراین، با افزایش درصد نسبی حجم خاک رس مقدار جابه جایی بیشینه کاهش می یابد.

مقدار بیشینه فشار تماس تا کسر حجمی در حدود ۳/۳ درصد افزایش یافته و با افزایش این مقدار، بیشینه فشار تماس شروع به کاهش می نماید. کاهش مقدار جابه جایی بیشینه با افزایش مقدار کسر حجمی مفید است و مقاومت سازه را در برابر بارهای ضربه ای افزایش دهد، ولی بیشینه مقدار فشار در این بازه کسر حجمی به عنوان عامل محدود کننده عمل می کند. بنابراین رفتار نانوکامپوزیت در بازه کسر حجمی بین ۰/۱۵ تا ۰/۳۰ پاسخ مناسبی را نشان می دهد.

افزایش ضریب لایه لایه شدگی باعث کاهش تداخل اثر و میدان تنش ذرات در یک دیگر هنگام برخورد ضربه زنده می شود و بدین ترتیب مقدار جابه جایی بیشینه و به دنبال آن فشار تماس افزایش می یابد.

نتیجه گیری

با افزایش نسبت منظر، طول ذرات افزایش و نسبت سطح به حجم نانوذرات افزایش می یابد که این امر منجر به افزایش مقدار تحمل نانوکامپوزیت در برابر ضربه می شود. هم چنین، با افزایش ضریب لایه لایه شدگی فاصله عمودی بین ذرات افزایش یافته و سبب کاهش تداخل اثر و میدان تنش ذرات در یک دیگر هنگام برخورد ضربه زنده

مراجع

1. Abrate S., *Impact on Composite Structures*, Cambridge University, 1998.
2. Sveklo V.A., Hertz Problem on Compression of Anisotropic Bodies, *J. Appl. Math. Mech.*, **38**, 1079-1083, 1974.
3. Bagheri R. and Takieh Marouf B., Studies on the Mechanical Behavior of Epoxy-clay Nanocomposite, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **20**, 59-64, 1386.
4. Kafashi B., Poursang F., and Sonbolestan S.E., Preparation of Polyurethane/Clay Nanocomposites: Investigating the Dispersion of Organoclays in PTMEG, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **20**, 247-255, 1386.
5. Ahmadi M., Abbasi F., and Gharebaghi Tazehkand H., Effect of Carbon Black/Organoclay Hybrid Filler System on Tire Tread Compound Properties, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **21**, 339-346, 1387.
6. Hu N., Sekine H., Fukunaga H., and Yao Z., Impact Analysis of Composite Laminates with Multiple Delaminations, *Int. J. Impact Eng.*, **22**, 633-648, 1999.
7. Davies G.A.O., and Zhang X., Impact Damage Prediction in Carbon Composite Structures, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **16**, 149-170, 1995.
8. Avila Antonio F., Soares Marcelo I., and Silva Neto A., A Study on Nanostructured Laminated Plates Behavior under Low-Velocity Impact Loadings, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **34**, 28-41, 2007.
9. Lin J.C., Investigation of Impact Behavior of Various Silica-Reinforced Polymeric Matrix Nanocomposites, *Compos. Struct.*, **84**, 125-131, 2008.
10. Shokrieh M.M. and Sonbolestan S.E., Effects of Structural Parameters on Mechanical Properties Polymer/Clay Nanocomposites, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **20**, 187-195, 1386.
11. Baschnagel, J. and Binder K., On the Influence of Hard Walls on Structural Properties in Polymer Glass Simulation, *Macromolecules*, **28**, 6808-6818, 1995.
12. Fossey S., Atomistic Modeling of Polymer Matrices in Nanocomposites, *Nanocomposites 2002: Delivering New Value to Polymers Conference Proceedings*, San Diego, CA: Executive Conference Management, 2002.
13. Ray S. and Garnich M.R., Influence of Constituent Properties and Micro Structural Parameters on the Tensile Modulus of a Polymer/Clay Nanocomposite, *Compos. Sci. Technol.*, **64**, 25-77, 2004.