

شبیه‌سازی و کاهش ارتعاش دک‌های ساندویچی با میراگرهای دانه‌ای در شناورها با استفاده از روش جریان دو فاز گاز-جامد

محمد گندم‌کار*

استادیار،
مجتمع دانشگاهی مکانیک،
دانشگاه صنعتی مالک اشتر

مهدی دادخواه

استادیار،
مجتمع دانشگاهی مکانیک،
دانشگاه صنعتی مالک اشتر

سید حسین دیباجیان

استادیار، دانشکده مهندسی
مکانیک و سیستم‌های انرژی،
دانشگاه شهید بهشتی، تهران

سارا جهانگیری

کارشناسی ارشد،
مجتمع دانشگاهی مکانیک،
دانشگاه صنعتی مالک اشتر

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۳۰

چکیده: در این تحقیق، کارایی میراگرهای دانه‌ای، در بهبود عملکرد ارتعاشی سازه کامپوزیتی نشیمن موتور در یک شناور، بررسی شده است. با توجه به زمان بر بودن فرآیند محاسباتی تحلیل دینامیکی این میراگرها با استفاده از روندهایی مانند المان‌های گسسته، یک فرآیند جایگزین بهینه مبتنی بر تئوری چند فازی جریان توسعه داده شده است. در گام اول، مشخصات یک واحد از این نوع میراگرها استخراج و معادلات آن به منظور تخمین ضریب میرایی معادل توسعه یافته است. به این منظور، تئوری چند فازی جریان استفاده می‌شود که در آن، تئوری جنبشی جریان متراکم سیالات و تئوری مور-کولمب جهت مدل‌سازی برخورد و اصطکاک بین ذرات درون سلول به کار می‌رود. با توجه به وابستگی غیرخطی ضرایب میرایی معادل، به دامنه سرعت، یک کد پایتون به صورت حلقه همگرا کننده در محیط نرم افزار آباکوس جهت پیاده سازی فرآیند تخمین میرایی معادل خطی آن واحد، نوشته شده است. در بخش نتایج پس از انجام صحت‌سنجی و اثبات دقت و سرعت محاسبات، نشان داده شد دامنه شتاب ارتعاشی در این مدل، کاهش قابل توجهی داشته است.

واژه‌های راهنما: میراگر دانه‌ای، ضریب میرایی، تئوری چند فازی جریان، اجزاء محدود، پایتون

Mohammad Gandomkar*
Assistant Professor,
Faculty of Mechanics,
Malek Ashtar University
of Technology

Mahdi Dadkhah
Assistant Professor,
Faculty of Mechanics,
Malek Ashtar University
of Technology

Seyed Hossein Dibajian
Department of
Mechanical and Energy
Systems Engineering,
Shahid Beheshti
University, Tehran

Sara Jahangiri
MSc., Faculty of
Mechanics, Malek Ashtar
University of Technology

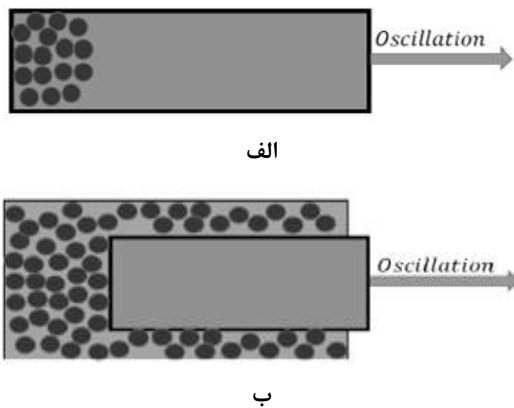
Simulation and vibration reduction of sandwich panels with granular dampers in vessels using multiphase flow theory of gas-particle

Abstract: In this research, the efficiency of granular dampers in improving the vibration performance of a composite engine seat structure in a vessel has been investigated. Due to the time-consuming computation process of dynamic analysis of these dampers using processes such as discrete elements, an optimal alternative process based on multiphase flow theory has been developed. First, the characteristics of a unit of this type of damper are extracted and its equations are developed to estimate the equivalent damping coefficient. For this purpose, multiphase flow theory is used, in which the kinetic theory of dense fluid flow and the Moore-Columb theory are used to model the collision and friction between particles within the cell. Due to nonlinear dependence, a Python code has been used as a convergent loop in the ABAQUS software environment to implement the damping estimation process. In the result section, after performing validation and proving the accuracy and speed of calculations, it was shown that the amplitude of vibrational acceleration in this model has significantly decreased.

Keywords: Granular damper, Damping coefficient, Multiphase flow theory, Finite element, Python

۱- مقدمه

ندارند و لذا برای تجهیزات قابل حمل و متحرک مفید هستند. مطابق شکل ۱ دو نوع از این میراگرها موجود است: جعبه‌ای و پیستونی [۲]. این میراگرها در محدوده دمایی گسترده‌ای کار می‌کنند و در مقایسه با دیگر میراگرها دیرتر خراب می‌شوند [۳]، [۴].



الف

ب

شکل ۱ انواع میراگر دانه‌ای الف- مدل پیستونی ب- مدل جعبه‌ای [۲]

بیش از ۳ دهه است که از این نوع میراگر استفاده می‌شود و در سال‌های اخیر با توجه به کارایی این میراگر در صنایع مختلف، تحقیقات بسیاری برای شبیه‌سازی و استخراج میزان میرایی و بهینه‌سازی پارامترهای آن صورت گرفته است [۵]، [۶]. قریب و همکاران در سلسله مقالاتی به بررسی جذب شوک حین برخورد بین دانه‌های میراگرها پرداختند و روابطی برای مدل-سازی نیروهای حین برخورد ارائه نمودند [۷]، [۸]، [۹]. در سال ۱۹۹۹ سالوئا و همکارانش [۱۰] با شبیه‌سازی عددی نشان دادند که چگونه جاذبه زمین بر اتلاف انرژی در رژیم‌های حرکتی این میراگر اثر می‌گذارد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد سه رژیم انرژی اتلافی مختلف با اعمال نیروی خارجی وجود دارد. این سه رژیم جامد (جمع‌شدگی و برخورد^۲)، انتقالی و گازی^۳ هستند.

در سال ۲۰۰۴ وو و همکارانش [۱۱] به بررسی روشی جدید به نام تئوری چند فازی جریان^۴ برای محاسبه ویژگی‌های این میراگر پرداختند. آن‌ها در مقاله خود، یک تیر یک سر گیردار مطابق شکل ۲ را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند و کارایی میراگر را در مقادیر مختلف درصد جرمی ذرات (۵۰، ۷۵ و ۹۵ درصد) بررسی کردند. نتیجه‌ی این تحقیق بیانگر این است که درصد حجمی بالاتر یعنی ۹۵٪ عملکرد بهتری نسبت به درصدهای کمتر جرمی از خود نشان می‌دهد. نمونه‌ای از این شبیه‌سازی‌ها

یکی از مهم‌ترین عوامل ارزیابی عملکرد شناورهای سطحی و زیرسطحی، سطح ارتعاش سازه آن‌هاست. معمولاً مالکین و سفارش‌دهندگان برطبق استانداردهای سختگیرانه‌ایی که در این حوزه وضع شده است، اقدام به تحویل‌گیری می‌کنند. این قید در مورد شناورهای مسافری، ترابری، تندرو، گشتی و نظامی وجود دارد و کاهش سطح ارتعاشات سازه یک شناور، یک عامل رقابتی در کیفیت طراحی، ساخت و مونتاژ و نیز تعمیر و نگهداری محسوب می‌شود.

یکی از ابزارهای کاهش ارتعاش که به طور گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد استفاده از میراگرهای ارتعاشی است که در آن، از طریق مکانیزم‌های مختلف اتلاف انرژی، حد ارتعاش آزاد و اجباری سامانه‌ها کاهش می‌یابد. امروزه استفاده از میراگرها جهت کاهش ارتعاشات، بسیار رایج و بلکه ضروری است و بدون وجود آنها شرایط زیستی و عملکردی سامانه‌ها، نامناسب و یا حتی غیر قابل قبول خواهد بود. میراگرها بر اساس مکانیزم‌های عملکردی، دو نوع میراگر وجود دارد: غیر فعال و فعال.

سامانه‌های میراگر غیرفعال، نیاز به منبع انرژی خارجی ندارند و از نیروهایی که در پاسخ به حرکت سازه و در اثر استهلاک داخلی ایجاد می‌شود، بهره می‌گیرند. در سامانه میراگر فعال، پاسخ سازه از طریق حس‌گرها، دریافت و به پردازنده منتقل شده و پردازش می‌شود و پاسخ سازه با اعمال تحریکات خارجی محاسبه شده توسط کنترلر، کاهش می‌یابد. سامانه‌های فعال در بازه فرکانس‌های پایین بسیار مؤثرتر از سامانه‌های غیرفعال هستند اما معایبی نیز دارند؛ از جمله اینکه هزینه اجرا و نگهداری بالایی دارند و چنانچه در تخمین نیروی کنترلی، خطا (در اندازه یا فاز) وجود داشته باشد سامانه ممکن است ناپایدار و ناکارآمد شود [۱]. در سامانه‌های میراگر نیمه‌فعال، امکان تغییر در مشخصات مکانیکی وجود دارد و در نتیجه این سامانه‌ها در محدوده وسیع‌تری از بارگذاری‌ها کارایی دارند.

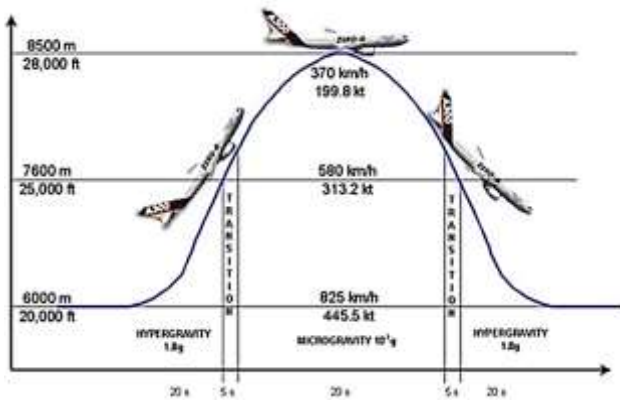
میراگرهای دانه‌ای^۱ بر اساس تکنیک غیر فعال کار می‌کنند و از این رو صرفه‌ی اقتصادی دارند. این میراگرها شامل یک محفظه و تعداد زیادی دانه (ساجمه) هستند که می‌توانند مطابق شکل ۱ آزادانه درون محفظه حرکت کنند دانه‌ها در اثر حرکت محفظه یا پیستون، ناشی از نوسانات سازه به حرکت در آمده و با برخورد با یکدیگر و دیواره، انرژی جنبشی را به انرژی درونی و سپس به گرما تبدیل می‌کنند. این میراگرها به تکیه‌گاه نیاز

³ Gas-like regime

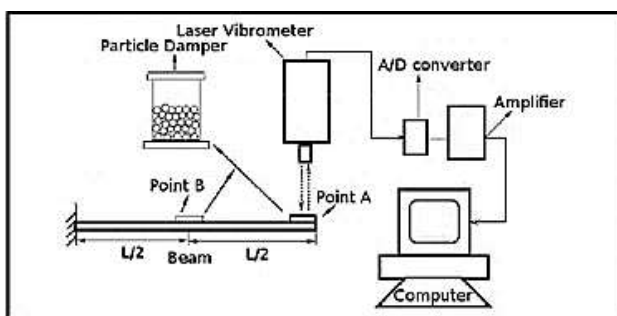
⁴ Multiphase Flow Theory (MFT) of Gas-Particle

¹ Granular dampers

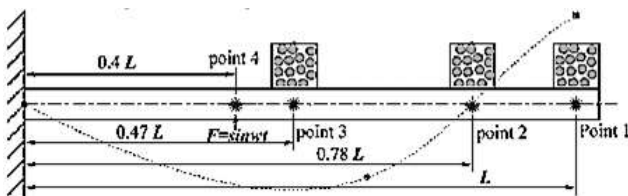
² Collect & Collide



شکل ۴ پرواز سهموی برای ایجاد شرایط بی‌وزنی [۱۳]



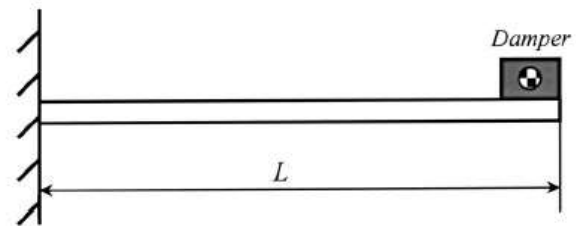
شکل ۵ آزمایش ارتعاشات آزاد تیر همراه میراگر دانه‌ای [۱۴]



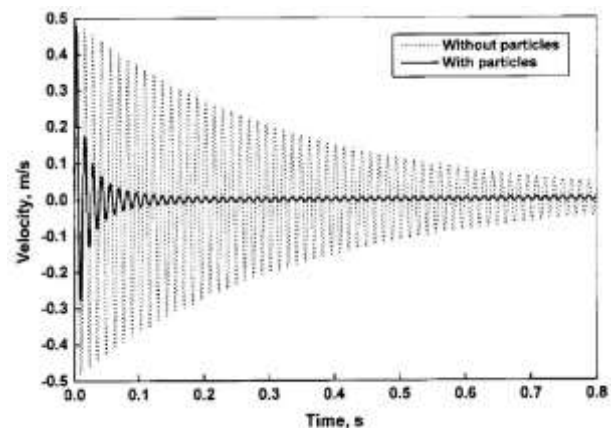
شکل ۶ محل میراگرها روی تیر یکسر گیردار [۱۵]

پور توکلی و پاشل در مقاله‌ی خود به بررسی بهترین شکل ذرات برای حصول بیشترین میرایی پرداخته‌اند و بر بهینه بودن شکل هندسی کره برای ذرات تاکید داشته‌اند [۱۶]. در سال ۲۰۱۵ فراهانی به بهینه‌سازی پارامترهای این میراگرها در شرایط جاذبه کم پرداخت [۲]. وی نشان داد در یک میراگر دانه‌ای، منحنی نسبت اتلاف به دامنه ارتعاشی، به صورت کلی مطابق شکل ۷ است. وی با استفاده از تقسیم محفظه و دانه‌ها به قسمت‌های کوچک‌تر مطابق شکل ۸ نشان داد اصل برهم‌نهی برای مقدار کلی اتلاف صدق می‌کند. شکل ۹ نشان دهنده این موضوع است.

در شکل ۳ نشان داده شده که مربوط به درصد جرمی ۷۵٪ است. در ادامه، نتایج تئوری، با آزمایش نیز مقایسه شده است [۱۱]. در سال ۲۰۱۰ بنرمن و همکارانش [۱۲] به بررسی این میراگر در شتاب جاذبه کم پرداختند. آن‌ها متوجه شدند در این شرایط، عملکرد میراگر مستقل از فرکانس و خواص ذرات است. در سال ۲۰۱۳ سک و همکاران [۱۳] به بررسی آزمایش عملکرد اتلاف انرژی میراگر دانه‌ای در شرایط بی‌وزنی که این شرایط را از طریق پرواز سهموی یک هواپیما مطابق شکل ۴ به وجود آورده و روابط میرایی را در این شرایط ارائه کردند.

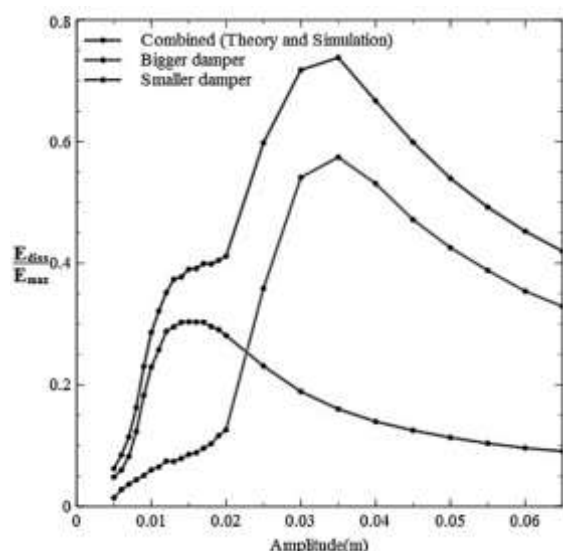


شکل ۲ طرح تیر یک سر گیر دار با میراگر دانه‌ای [۱۱]

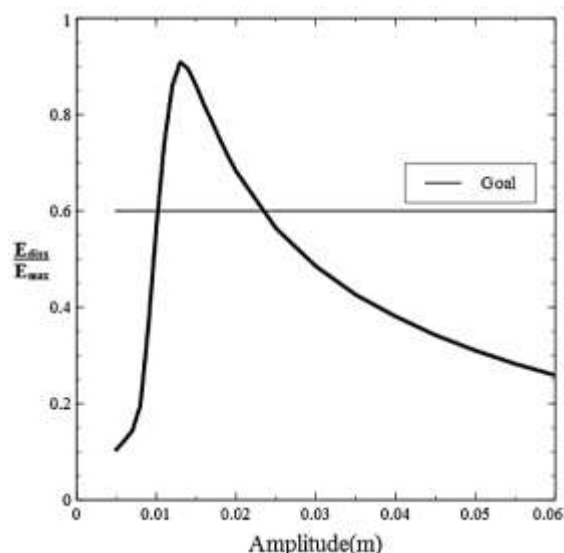


شکل ۳ پاسخ سرعت ارتعاشی تیر بدون و با میراگر دانه‌ای [۱۱]

در سال ۲۰۱۴، وانگ و همکاران [۱۴] به بررسی تئوری و تجربی ارتعاشات آزاد تیر یکسر گیردار به همراه میراگر دانه‌ای (شکل ۵) بر پایه تئوری چند فاز جریان پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش درصد جرمی ذرات و همچنین قرار دادن میراگر در مکان‌هایی با جابجایی ارتعاشی بالا سبب افزایش کارایی میراگر می‌شود. در همان سال، تحقیق مشابهی نیز در همین سال توسط وو و همکاران [۱۵] انجام شد با این تفاوت که مطابق شکل ۶ نقاط مختلفی از تیر برای استقرار میراگر انتخاب و آزمایش شد و در ادامه، همان نتایج کلی استنتاج شد.



شکل ۹ مقایسه نسبت میرایی محفظه با اجزا تشکیل دهنده آن [۲]

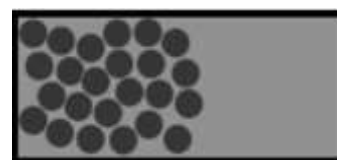


شکل ۷ نمودار انرژی اتلافی بر اساس دامنه‌ی جابه‌جایی [۲]

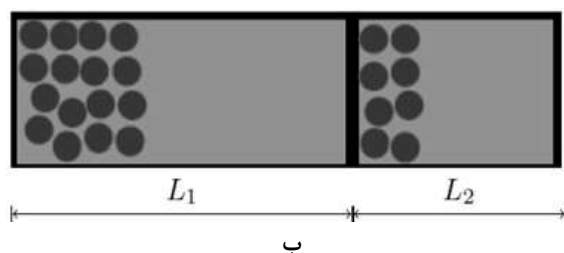
از آن‌جا که تخمین میزان اتلاف انرژی در سلول‌های میراگر دانه‌ای معمولاً در قالب روش‌هایی نظیر المان‌های گسسته^۱ انجام می‌شود که بسیار وقت گیر و پرهزینه هستند، استفاده از روش جریان چندفازی ذرات گاز مزیت‌های زیادی نسبت به روش‌های معمول برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی این میراگرها دارد. علاوه بر این، میراگرهای دانه‌ای می‌تواند در راستای بهبود خواص دینامیکی و میرایی ارتعاش در ساختار داخلی مواد مرکب نیز به صورت مستقیم استفاده شود. بخصوص در ساختارهای ساندویچی این نوع میراگر می‌تواند میرایی کل سازه را ارتقاء بخشد؛ چرا که امکان ایجاد فضای مناسب در این نوع مواد مرکب وجود دارد که می‌تواند به عنوان محفظه دربرگیرنده مواد دانه‌ای استفاده شود. لذا در مقاله حاضر، پس از تخمین ضریب میرایی برای یک سلول، بر اساس روابط وانگ و وو [۹]، تاثیر نصب این میراگر بر ارتعاش یک ورق ساندویچی بررسی شده است. این مدل، جهت بررسی اثرات نیروهای نوسانی یک موتور از سیستم رانش یک شناور سطحی تندرو بر ارتعاشات ورق کف این شناور انتخاب شده است. بنا بر ملزومات سختگیرانه تحویل دهی این شناور به بهره‌بردار، لازم است میزان ارتعاشات کف این شناور به حداقل برسد.

۲- محاسبه ضریب میرایی

در روش‌های اولیه، جهت محاسبه‌ی کارایی میراگر، انرژی اتلافی آن محاسبه می‌شد و بر پایه‌ی روش المان گسسته شبیه‌سازی



الف



ب

شکل ۸ میراگر تک جزئی (الف) و دو جزئی (ب) [۲]

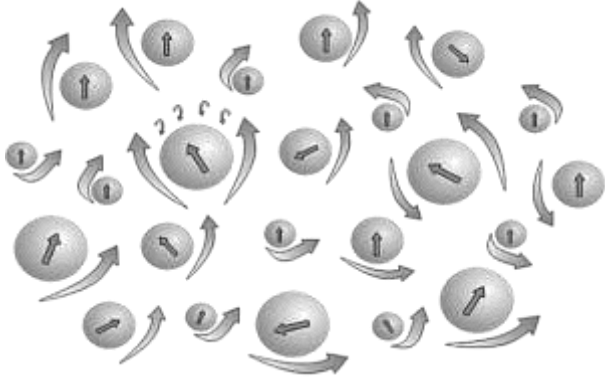
فراهانی همچنین نشان داد که با افزایش تعداد تقسیم محفظه، اگرچه میزان حداکثر میرایی کاسته می‌شود لیکن در محدوده بزرگ‌تری از دامنه ارتعاشی، حداقل نسبت میرایی حاصل می‌شود.

در سال ۲۰۱۵ وانگ و وو در مقاله خود به پیش‌بینی رفتار ارتعاشی ورق الاستیک و محاسبه کاهش میزان شتاب تحت تاثیر میراگرهای دانه‌ای بر اساس تئوری جریان چند فازی ذرات گاز پرداختند [۹]. آن‌ها رابطه‌ای جهت محاسبه‌ی ضریب میرایی معادل به دست آوردند که حاصل دو بخش برخورد و اصطکاک است. در ادامه، با بررسی شتاب ارتعاشی ورق در نقاط مختلف آن با وجود میراگر دانه‌ای، در نرم‌افزار کامسول نشان دادند که انطباق بسیار خوبی بین روابط تخمینی و نتایج آزمایش‌ها دارد.

^۱ Discrete Element Method (DEM)

$$\theta = \frac{\langle \dot{X}^2 \rangle}{3} \quad (۳)$$

در رابطه (۳)، $\langle \dot{X}^2 \rangle$ مجذور سرعت متوسط ذرات است و مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌شود.



شکل ۱۰. تئوری انرژی جنبشی برای جریان ذرات دانه‌ای [۱۷]

$$\langle \dot{X}^2 \rangle = \frac{|\dot{X}|^2}{2} \quad (۴)$$

$|\dot{X}|$ دامنه سرعت ارتعاشی ذرات است. همچنین α_p درصد حجمی، g_p تابع شعاع توزیعی، ρ_p چگالی ذرات، d_p قطر ذرات و μ_f نیز ویسکوزیته برشی اصطکاکی است. در رابطه (۱) نوسانات انرژی جنبشی به صورت رابطه (۵) و در نهایت به صورت رابطه (۶) بازنویسی می‌شود:

$$\mu_c = \frac{6}{5}(1 + e_p) \sqrt{\frac{|\dot{X}|^2}{6\pi}} \alpha_p^2 g_p \rho_p d_p \quad (۵)$$

$$\mu_c = \frac{1}{5}(1 + e_p) \sqrt{\frac{6}{\pi}} \alpha_p^2 g_p \rho_p d_p |\dot{X}| \quad (۶)$$

با تعریف K_1 مطابق رابطه (۷) می‌توان رابطه (۶) را به صورت رابطه (۸) بازنویسی کرد:

$$K_1 = \frac{1}{5}(1 + e_p) \sqrt{\frac{6}{\pi}} \alpha_p^2 g_p \rho_p d_p \quad (۷)$$

$$\mu_c = K_1 |\dot{X}| \quad (۸)$$

در رابطه (۲)، ϕ زاویه اصطکاک داخلی و I_{2D} دومین تانسور تنش انحرافی است که این دو پارامتر از آزمایشات مکانیک ذرات متخلخل نظیر خاک، برای ذرات در میراگر دانه‌ای حاصل می‌شوند. همچنین p_p فشار دانه‌ای است که از دو ترم جنبشی و برخورد تشکیل شده است و به شکل رابطه (۹) نوشته می‌شود:

$$p_p = \alpha_p \rho_p \theta + 2\rho_p (1 + e_p) g_p \alpha_p^2 \quad (۹)$$

انجام می‌شد که بسیار زمان‌بر بوده و از این جهت مقرون به صرفه نبود. اخیراً برخی از محققین، ویژگی‌های اتلافی از مواد دانه‌ای را بر اساس تخمین عددی و بر پایه فرضیه چند فازی جریان ذرات گازی به دست آورده‌اند. وو و همکاران [۱۵] یک مدل تحلیلی برای تخمین ویژگی‌های میرایی ذره‌ای توسعه دادند که در آن اثر عکس‌عملی ذرات، بر اساس معادلات ویسکوزیته با استفاده از تئوری جریان چند فازی از ذرات گازی، محاسبه شده است. ترکیب معادلات، اثر میرایی ویسکوز با میرایی اصطکاکی کولمب (که همه اثرات اصطکاکی را بیان می‌کند) و معادلات نیروی مقاوم^۱ برای آنالیز دینامیکی سازه را بیان می‌کند. اثر اصطکاک بین ذرات به صورت ساده شبیه میرایی اصطکاکی کولمب بر پایه تئوری تماس هرگز بیان می‌شود لذا با استفاده از تئوری جریان چند فازی می‌توان هزینه‌ی محاسباتی را کمتر کرد. در واقع، میراگر دانه‌ای در یک سازه ارتعاشی را می‌توان شبیه جریان چند فازی از ذرات گازی با عدد رینولدز کم در قسمتی که تجمع ذرات خیلی بالاست در نظر گرفت.

این نظریه بر این اساس است که هنگامی که حرکت ذرات در میدان سیال در نظر گرفته شود، ذرات با انتقال جنبشی بین خود و در با تعامل بین ذره و سیال حرکت می‌کنند؛ پس دو حالت در بررسی انتقال ذرات مدنظر قرار می‌گیرد: برخورد ذره به ذره و حرکت ذره در سیال لزج مطابق شکل ۱۰. چالش مدل کردن حرکت ذرات این است که چگونه جنبش و انتقال برخورد از ذرات را مدل کرد. در این تئوری، نوسانات سرعت ذرات، بسیار کوچک-تر از سرعت متوسط ذرات در نظر گرفته می‌شود [۱۷].

اتلاف، ناشی از دو بخش تغییر شکل غیر الاستیک و اتلاف به علت اصطکاک ذرات با مایع است. برای ذرات غیر الاستیک و جریان برشی ساده مثل جریان لایه‌ای، ویسکوزیته مؤثر برخورد را می‌توان از تئوری انرژی جنبشی از جریان چند فازی متراکم به صورت رابطه (۱) نوشت و همچنین ویسکوزیته برشی مطابق با اصطکاک به صورت رابطه (۲) نوشته می‌شود [۹]:

$$\mu_c = \frac{6}{5}(1 + e_p) \sqrt{\frac{\theta}{\pi}} \alpha_p^2 g_p \rho_p d_p \quad (۱)$$

$$\mu_f = \frac{p_p \sin \phi}{2\sqrt{I_{2D}}} \quad (۲)$$

در رابطه (۱) چگالی ذرات، μ_c ویسکوزیته حاصل از برخورد، e_p ضریب استرداد ذرات و θ نوسانات خاص انرژی جنبشی است که به صورت رابطه (۳) نوشته می‌شود:

^۱ Drag force

که در آن β طبق رابطه (۱۹) خواهد بود:

$$\beta = \frac{\pi d^2 f \rho_m}{\mu_p} \quad (19)$$

با استفاده از رابطه‌ی (۱۹)، رابطه (۱۸) بازنویسی شده و ضریب C_d طبق رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود:

$$C_d = \frac{fd\pi^3}{|\dot{X}|} \left[\frac{3}{2} \left(\frac{\pi d^2 f \rho_m}{K_1 |\dot{X}| + k_2 |\dot{X}|^2} \right)^{-\frac{1}{2}} + \frac{3}{2} \left(\frac{\pi d^2 f \rho_m}{K_1 |\dot{X}| + k_2 |\dot{X}|^2} \right)^{-1} + \frac{3}{8} \left(\frac{\pi d^2 f \rho_m}{K_1 |\dot{X}| + k_2 |\dot{X}|^2} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (20)$$

و در نهایت ضریب C_d معادل به صورت رابطه (۲۱) نوشته خواهد شد:

$$C_d = \frac{fd\pi^3}{|\dot{X}|} \left[\frac{3}{2} \left(\frac{K_1 |\dot{X}| + k_2 |\dot{X}|^2}{\pi d^2 f \rho_m} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{3}{2} \left(\frac{K_1 |\dot{X}| + k_2 |\dot{X}|^2}{\pi d^2 f \rho_m} \right)^1 + \frac{3}{8} \left(\frac{K_1 |\dot{X}| + k_2 |\dot{X}|^2}{\pi d^2 f \rho_m} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (21)$$

با استفاده از روابط (۱۷) و (۲۱)، در نهایت ضریب غیرخطی میرایی لزج معادل، از رابطه (۲۲) بدست می‌آید:

$$C_{eq} = f \pi^3 d^2 h \rho_m \left[\frac{3}{4} \left(\frac{K_1 |\dot{X}| + k_2 |\dot{X}|^2}{\pi d^2 f \rho_m} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{3}{4} \left(\frac{K_1 |\dot{X}| + k_2 |\dot{X}|^2}{\pi d^2 f \rho_m} \right)^1 - \frac{3}{16} \left(\frac{K_1 |\dot{X}| + k_2 |\dot{X}|^2}{\pi d^2 f \rho_m} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (22)$$

در روابط بالا، f فرکانس ارتعاشات، و $|\dot{X}|$ سرعت دامنه‌ی ارتعاشی در محل میراگر است. این معادله براساس اصطکاک و برخورد ذرات داخلی برای جریان مخلوط ذرات گازی در محفظه-ی سازه‌ی ارتعاشی یک نوع میراگر غیرخطی نسبت به دامنه‌ی سرعت سازه‌ی ارتعاشی است. اعمال این میراگر به مساله در نرم افزار از طریق اعمال میراگر لزج و جرم اضافه خواهد بود که در آن جرم معادل M_{eq} برابر با جرم محفظه و ذرات دانه‌ای آن است.

با استفاده از رابطه (۴)، رابطه (۹) نیز به صورت رابطه (۱۰) بازنویسی خواهد شد:

$$\mu_f = \frac{\alpha_p \rho_p \theta + 2\rho_p (1 + e_p) g_p \alpha_p^2 \sin \phi}{12\sqrt{I_{2D}}} |\dot{X}|^2 \quad (10)$$

با تعریف k_2 مطابق رابطه (۱۱):

$$k_2 = \frac{\alpha_p \rho_p \theta + 2\rho_p (1 + e_p) g_p \alpha_p^2 \sin \phi}{12\sqrt{I_{2D}}} \quad (11)$$

رابطه (۱۰) نیز دوباره مطابق رابطه (۱۲) بازنویسی خواهد شد:

$$\mu_f = k_2 |\dot{X}|^2 \quad (12)$$

با در نظر گرفتن هر دو مدل اصطکاک‌ی و برخوردی، اثر کامل میرایی بین ذرات به صورت یکنواخت با معادله (۱۳) محاسبه می‌شود:

$$\mu_p = \mu_c + \mu_f = K_1 |\dot{X}| + k_2 |\dot{X}|^2 \quad (13)$$

اگرچه ویسکوزیته‌ی مخلوط جریان ذرات گازی به شکل رابطه (۱۴) نوشته می‌شود اما در حالت کلی $\mu_p \gg \mu_g$ بنابراین $\mu_m \approx \mu_p$

$$\mu_m = \mu_p + \mu_g \quad (14)$$

برای معادل کردن میرایی یک میراگر دانه‌ای با میراگرهای لزج رایج، ابتدا نیروی درگ $F_{d,viscous}$ از معادله‌ی میرایی لزج با رابطه (۱۵) بیان می‌شود:

$$F_{d,viscous} = -\frac{1}{2} \rho_m S C_d |\dot{X}| \dot{X} \quad (15)$$

که \dot{X} سرعت ارتعاشات ورق در مکان نصب میراگرهای دانه‌ای یا همان سرعت محفظه میراگر است. ρ_m معادل است با چگالی حجمی از جریان ترکیبی نسبت به چگالی گاز و ذرات و با رابطه‌ی (۱۶) محاسبه می‌شود:

$$\rho_m = (1 - \alpha_p) \rho_g + \alpha_p \rho_p \quad (16)$$

پس ضریب میرایی معادل میرایی لزج غیرخطی، با رابطه (۱۷) به‌دست خواهد آمد:

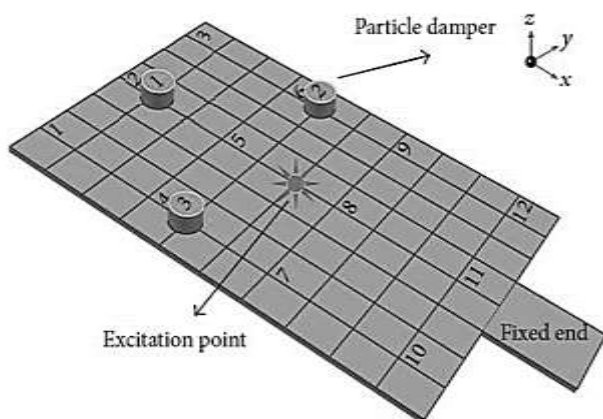
$$C_{eq} = \frac{1}{2} \rho_m S C_d |\dot{X}| \quad (17)$$

که S مساحت مقطع عرضی محفظه است. ضریب C_d از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود:

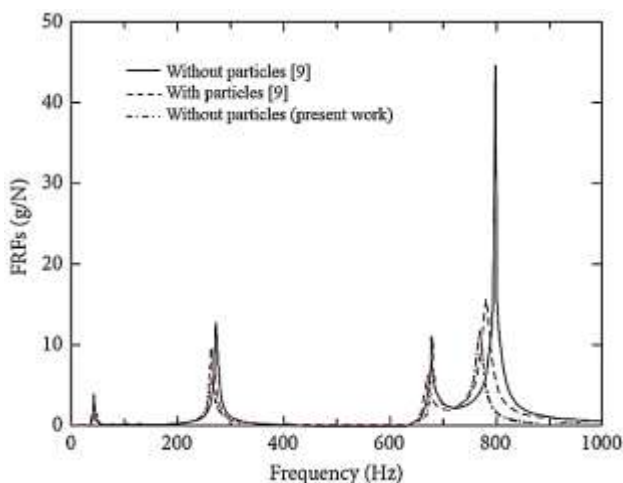
$$C_d = \frac{fd\pi^3}{|\dot{X}|} \left(\frac{3}{2} \beta^{-\frac{1}{2}} + \frac{3}{2} \beta^{-1} + \frac{3}{8} \beta^{-\frac{3}{2}} \right) \quad (18)$$

آلومینیومی گیردار با ابعاد 30×20 سانتیمتر و ضخامت ۶ میلیمتر مطابق شکل ۱۲، در سه نقطه، میراگر دانه‌ای نصب شده و تحت ارتعاشات اجباری با فرکانس از ۱ تا ۱۰۰۰ هرتز قرار می‌گیرد و نتایج شتاب در نقطه ۲ آن پس از همگرایی ضریب میرایی استخراج می‌گردد. نتایج میزان شتاب برای نقطه ۲ در شکل ۱۴ بدست آمده و در شکل ۱۳ دیده می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود روند کلی شتاب و مقادیر دامنه حداکثر، در چهار فرکانس تشدید اول این مدل، در حالتی که میراگر دانه‌ای به مدل اضافه شده، مشابه یکدیگر بوده و نشان از دقت مناسب روابط استفاده شده و صحت اعمال آن دارد.

مقادیر میرایی معادل برای میراگرهای دانه‌ای در این مثال، پس از همگرایی، در نقاط ۱، ۲ و ۳ به ترتیب $3/7$ ، $3/6$ و $3/6$ نیوتن ثانیه بر متر محاسبه شده است. همچنین خواص الاستیک فوم در جدول ۳ دیده می‌شود.



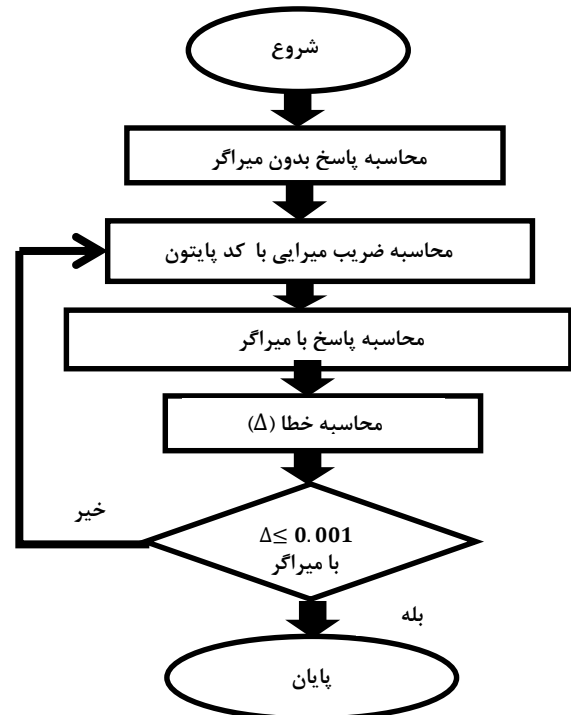
شکل ۱۲ مدل تهیه شده جهت مقایسه نتایج میزان شتاب [۹]



شکل ۱۳ مقایسه شتاب در نقطه ۲ نسبت به حالت بدون میراگر و با میراگر در مرجع [۹] و روش حاضر

از آنجا که ضریب میرایی این میراگر تابعی وابسته به دامنه جابجایی ورق است و جابجایی ورق نیز تابعی از ضریب میرایی این میراگر است، بنابراین این ضریب متغیر بوده و جهت شبیه‌سازی عملکرد این میراگر، با استفاده از رابطه ضریب میرایی ویسکوز معادل، یک کد با زبان برنامه‌نویسی پایتون^۱ در تعامل با نرم افزار اجزاء محدود آباکوس تهیه شده و این ضریب را با ایجاد همگرایی در نتایج محاسبه می‌نماید.

فلوچارت روش انجام کار در شکل ۱۱ دیده می‌شود.



شکل ۱۱ فلوچارت روند انجام شبیه‌سازی

در اینجا Δ خطای بی‌بعد در مرحله i ام است که مطابق رابطه (۲۳) محاسبه شده و باید تقریباً صفر شود تا ضریب میرایی به دست آمده همگرا شود.

$$\Delta = \left(\left(\frac{u_1^i - u_1^{i-1}}{u_1^0} \right)^2 + \left(\frac{u_2^i - u_2^{i-1}}{u_2^0} \right)^2 + \left(\frac{u_3^i - u_3^{i-1}}{u_3^0} \right)^2 \right)^{0.5} \quad (23)$$

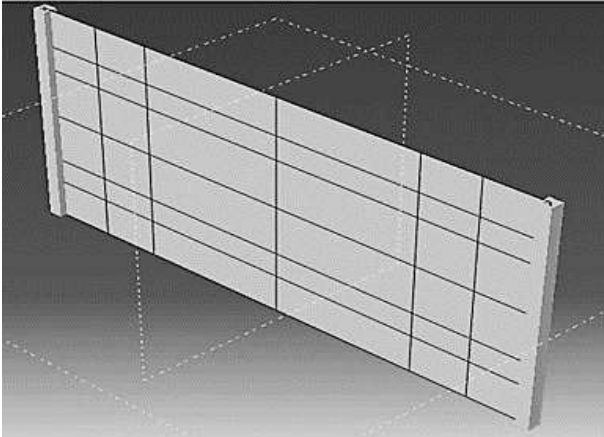
۳- بررسی صحت روابط و شبیه‌سازی

در این بخش ابتدا برای بررسی صحت روابط ذکر شده، نتایج مرجع [۹] مجدداً تکرار شده و میزان کاهش شتاب ارتعاشات محاسبه می‌شود. در این تحلیل، بر روی یک ورق مسطح

^۱ Python

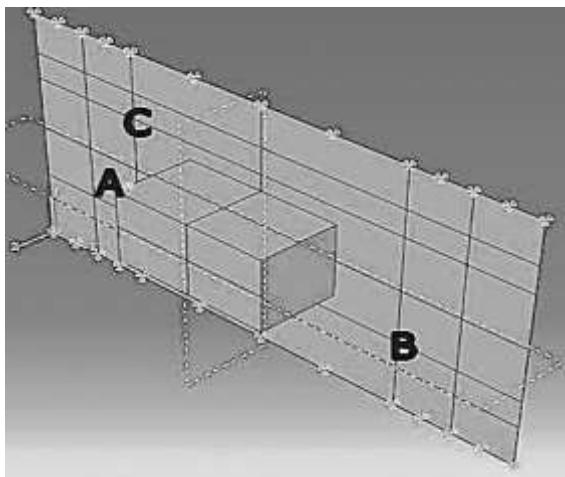
۴- شبیه سازی ورق کامپوزیتی همراه با میراگر

همچنین این ورق مطابق شکل ۱۴، دو تیر تقویت کننده با مقطع قوطی مربعی با ابعاد مقطع ۳ سانتیمتر و ضخامت ۳ میلیمتر در راستای عرضی در دو انتها دارد. چگالی جنس این تقویت کننده ها، $\frac{kg}{m^3}$ ۲۶۴۶ است. مدول یانگ و نسبت پواسون نیز به ترتیب ۵۶ گیگا پاسکال و ۰/۲۷ در نظر گرفته شده است. ورق در لبه های طولی خود به صورت لولایی ساده مهار شده است.



شکل ۱۴ ورق ساندویچی با دو تقویت کننده در دو انتها

مقدار جرم هر ذره قرارداده شده در میراگر، ۰/۲ گرم و جنس ذرات تنگستن در نظر گرفته شده است. قطر ذرات ۰/۳ میلیمتر، ضریب چقرمگی ۰/۶، چگالی ۱۷۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، نسبت جرمی ذرات، ۵۰٪ و جرم کل محفظه، ۵۰ گرم است. سازه به همراه جرم بلوکی قرار گرفته بر روی آن و نیز محل میراگر، دانه ای (نقطه C) در شکل ۱۵ دیده می شود. محل نصب میراگر، نقطه ای از ورق است که دارای حداکثر جابجایی نسبی در موده های اولیه است.



شکل ۱۵ ورق، میراگر دانه ای روی آن و جرم بلوکی

پس از تحلیل مساله ارتعاشات یک ورق همراه با میراگر در مرجع [۹] و اطمینان از صحت روابط، در تحقیق حاضر، یک ورق کامپوزیتی همراه با میراگر بررسی شده و میزان کاهش شتاب در ارتعاشات اجباری آن استخراج شده است. مساله ذکر شده در این تحقیق، عبارت است از یک سازه (ورق) ساندویچی ۵ لایه به همراه جرم بلوکی قرار گرفته بر روی آن با ابعاد $۰/۶ \times ۰/۳ \times ۰/۳$ متر و جرم ۱۰۸ کیلوگرم. این مدل، جهت بررسی اثرات نیروهای نوسانی یک موتور از محرک های سیستم رانش یک شناور سطحی تندرو بر ارتعاشات ورق کف این شناور انتخاب شده است. بنا بر ملزومات سختگیرانه تحویل دهی این شناور به بهره بردار، لازم است میزان ارتعاشات کف این شناور به حداقل برسد. کف شناور به صورت یک ورق ساندویچی است که از ۴ لایه الیاف شیشه و یک لایه هسته ی مرکزی (فوم) وسط الیاف ها تشکیل شده است. ابعاد ورق، ۱ متر در ۲ متر و کل ضخامت ورق ۰/۰۵۴۸ متر است. مشخصات لایه ها مطابق جدول ۱ است. خواص الاستیک هر لایه در جدول ۲ دیده می شود. چگالی و ضریب میرایی لایه ها به ترتیب $\frac{kg}{m^3}$ ۶۶/۳۱۶ و ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است. این مقادیر، برای فوم به ترتیب $\frac{kg}{m^3}$ ۵۲ و ۰/۰۰۰۱ است.

جدول ۱ مشخصات لایه چینی ورق کف شناور

شماره لایه	زاویه چینش	ضخامت (میلی متر)	جنس ماده
۱	۰	۱/۲	الیاف شیشه
۲	۹۰	۱/۲	الیاف شیشه
۳	۰	۵۰	هسته مرکزی
۴	۹۰	۱/۲	الیاف شیشه
۵	۰	۱/۲	الیاف شیشه

جدول ۲ مشخصات الاستیک هر لایه

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	ν_{12}	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)
۱۹/۳	۳/۴۸	۰/۰۵	۱/۶۵	۷/۷	۱/۶۵

جدول ۳ مشخصات الاستیک فوم

E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	ν_{12}	G_{12} (MPa)	G_{13} (MPa)	G_{23} (MPa)
۸۵	۸۵	۰/۴۲	۳۰	۳۰	۳۰

۴-۱- تحلیل ارتعاش آزاد و اجباری

در تحلیل ارتعاش آزاد، سه فرکانس طبیعی اول محاسبه شده و در تحلیل ارتعاش اجباری، به منظور محاسبه پاسخ فرکانسی شتاب نقطه B در شکل ۱۷، نیروی تحریک هارمونیک در راستای محور z در محل نقطه A به موتور محرک (جرم بلوکی) وارد می‌شود. در نهایت، پاسخ فرکانسی ورق محاسبه و با حالت بدون میراگر مقایسه می‌شود.

خلاصه نتایج شبیه سازی ارتعاش آزاد و اجباری در جدول ۴ نمایش داده شده است. در این جدول، شتاب نقطه‌ی B از ورق در فرکانس‌های رزونانس اول تا سوم در حالت اول (بدون میراگر) و حالت دوم (با میراگر) و نیز درصد کاهش شتاب، نشان داده شده است. کد پایتون نوشته شده به صورت خودکار، جابه‌جایی را از نقاط مورد نظر دریافت و ضریب میرایی معادل آن را محاسبه کرده و مجدداً ضریب میرایی معادل را در نقطه‌ی مورد نظر قرار می‌دهد تا در نهایت به همگرایی مورد نظر برسد.

جدول ۴ نتایج ارتعاش اجباری

رزونانس	شتاب در نقطه‌ی B (m/s^2)	
	بدون میراگر	با میراگر
رزونانس اول (۲۲/۹۷ هرتز)	۶/۴۳	۴/۶۰
رزونانس دوم (۳۲/۳۶ هرتز)	۱۰/۹۴	۶/۴۷
رزونانس سوم (۳۴/۴۶ هرتز)	۲/۷۷	۲/۶۸

۵- نتیجه‌گیری

در این فعالیت دو هدف اصلی دنبال شده است که در فعالیت های قبل کمتر به آن پرداخته شده است:

اولاً استفاده از فرمول‌بندی و الگوریتمی بسیار کارآمد و کم-هزینه مبتنی بر روش جریان چند فازی ذرات گاز که در مقایسه با روندهای رایج از جمله DEM بسیار موثرتر عمل می‌کند. با توجه به وابستگی ضرایب میرایی معادل به دامنه سرعت و طبیعت غیرخطی مسئله، یک کد پایتون به صورت حلقه همگرا کننده در محیط نرم افزار آباکوس جهت پیاده‌سازی فرآیند تخمین میرایی معادل خطی آن واحد، نوشته شد.

ثانیاً امکان پذیری استفاده از سلول میراگر دانه‌ای در مواد مرکب از نوع ساندویچی برای دک موتور یک شناور بررسی شده است که مطابق با آخرین اطلاعات نویسندگان، سابقه‌ای در این خصوص گزارش نشده است.

در این مقاله کاهش شتاب ورق کامپوزیتی با این میراگر تحلیل شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد علیرغم هزینه کم و سادگی ساخت، این میراگر توانسته است تا ۴۱ درصد کاهش قله رزونانس را برای مود دوم ایجاد نماید؛ لذا جهت استفاده در کلیه‌ی سازه‌های تحت ارتعاش و خصوصاً محیط دریا که به‌کارگیری الاستومرها تحت اثر عوامل تخریبی و محیط خورنده، با محدودیت مواجه است مناسب به نظر می‌رسد. در مجموع می‌توان گفت این میراگر می‌تواند جایگزین مناسبی برای میراگرهای الاستومری غیر فعال باشد.

۶- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

C_0	ضریب دمپینگ
C_{eq}	ضریب دمپینگ معادل
C_d	ضریب درگ
d_p	قطر ذرات
e_p	ضریب مقاومت ذرات
f	فرکانس ارتعاشات
$F_{d,visc}$	نیروی درگ
g_p	تابع شعاع توزیعی
h	ارتفاع محفظه
I_{2D}	دومین تانسور تنش انحرافی
K	سختی
M_{eq}	جرم معادل
p_p	فشار جامدات
S	مساحت مقطع عرضی
$ \dot{X} $	سرعت دامنه‌ی ارتعاشی

نمادهای یونانی

α_p	درصد حجمی
θ	نوسانات انرژی جنبشی
ϕ	زاویه‌ی اصطکاک داخلی
φ_m	چگالی ترکیبی
φ_p	چگالی ذرات
μ_c	ویسکوزیته‌ی حاصل از برخورد
μ_f	ویسکوزیته‌ی برشی اصطکاکی
α_p	درصد حجمی
μ_p	ویسکوزیته‌ی کامل ناشی از برخورد و اصطکاک

۶- مراجع

- [1] Yao, G., Yap, F., Chen, G., Li, W., and Yeo, S., "MR damper and its application for semi-active control

- [10] Salueña, C., Pöschel, T., and Esipov, S. E., "Dissipative properties of vibrated granular materials", *Physical Review E*, Vol. 59, No. 4, pp. 4422, (1999).
- [11] Wu, C., Liao, W., and Wang, M. Y., "Modeling of granular particle damping using multiphase flow theory of gas-particle", *Journal of vibration and acoustics*, Vol. 126, No. 2, pp. 196-201, (2004).
- [12] Bannerman, M. N., Kollmer, J. E., Sack, A., Heckel, M., Mueller, P., and Pöschel, Movers, T., and shakers: Granular damping in microgravity", *Physical Review E*, Vol. 84, No. 1, pp. 011301, (2011).
- [13] Sack, A., Heckel, M., Kollmer, J. E., Zimmer, F., and Pöschel, T., "Energy dissipation in driven granular matter in the absence of gravity", *Physical review letters*, Vol. 111, No. 1, pp. 018001, (2013).
- [14] Wang, D., Wu, C., Yang, R., and Lei, X., "Forced Vibration of the Particle-Damping Beam based on Multiphase Flow Theory of Gas- Particle", in *21 Th International Congress on Sound & Vibration, Beijing, China*, (2014).
- [15] Wu, C., Wang, D., Yang, R., and Lei, X., "Acoustic radiation response prediction of thin-walled box with particle dampers using multiphase flow theory of gas-particle", in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, (2014), Vol. 249, No. 8: Institute of Noise Control Engineering, pp. 617-624.
- [16] Pourtavakoli, H., Parteli, E. J., and Pöschel, T., "Granular dampers: does particle shape matter?", *New Journal of Physics*, Vol. 18, No. 7, pp. 073049, (2016).
- [17] Kia, S. A. and Aminian, J., "Hydrodynamic modeling strategy for dense to dilute gas-solid fluidized beds", *Particuology*, Vol. 31, pp. 105-116, (2017).
- [1] of vehicle suspension system", *Mechatronics*, Vol. 12, No. 7, pp. 963-973, (2002).
- [2] M., Farahani, "Simulation based optimization of granular damping devices", *Master of science thesis, Friedrich Alexander Universität Erlangen-Nürnberg*, (2015).
- [3] Gharib, M., and Hurmuzlu, Y., "A new contact force model for low coefficient of restitution impact", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 79, No. 6, pp. 064506, (2012).
- [4] Gharib, M., Karkoub, M., BinYousaf, M., and AlGammal, M., "Shock vibration control using a novel impact damper", in *22nd Int. Congress on Sound and Vibration*, (2015).
- [5] Gharib, M. and Karkoub, M., "An Experimental Study of Bi-Directional Structure Vibration Suppression Using LPC Impact Dampers, in *ASME 2016 Dynamic Systems and Control Conference*, (2016): *American Society of Mechanical Engineers*", pp. V002T22A003-V002T22A003.
- [6] Gharib, M. and Karkoub, M., "Experimental investigation of linear particle chain impact dampers in free-vibration suppression", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 143, No. 2, pp. 04016160, (2016).
- [7] Gharib, M., Karkoub, M., and Ghamary, M., "Numerical investigation of Linear Particle Chain impact dampers with friction", *Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 3, pp. 34-40, (2016).
- [8] Gharib, M., Karkoub, M., Yousaf, M. T. B., and AlGammal, M., "An experimental study of a novel impact damper in free vibration of structures, in *ASME 2014 Dynamic Systems and Control Conference*, (2014): *American Society of Mechanical Engineers*", pp. V001T01A002-V001T01A002.
- [9] Wang, D. and Wu, C., "Vibration response prediction of plate with particle dampers using cosimulation method", *Shock and Vibration*, Vol. 2015, (2015).