

بررسی تجربی و عددی میرایی موج انفجار در مواد دانه‌ای

مسعود رحمانی^۱، علیرضا نداف اسکوئی^۲، حسین خدارحمی^۳، روح اله حسینی^{۴*}

۱- کارشناسی ارشد، ۲- دانشیار، ۳- استادیار، ۴- استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(تاریخ وصول: ۹۸/۰۶/۳۰، تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۲/۲۰)

چکیده

یکی از خواص ذاتی فوم‌ها، مواد متخلخل و مواد دانه‌ای، توانایی آن‌ها در میراسازی موج انفجار است. پژوهش حاضر به بررسی قابلیت مواد دانه‌ای در استهلاک موج انفجار به صورت عددی و تجربی می‌پردازد. در بخش تجربی، برای انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌ها از سامانه شاک تیوب انفجاری استفاده شده است. خاکاره و پوکه معدنی به عنوان مواد دانه‌ای در هسته پانل ساندویچی استفاده شدند و خواص مکانیکی آن‌ها با انجام آزمون‌های فشار شبه استاتیکی به دست آمد. همچنین، از هیدروکد تجاری اتوداین برای شبیه‌سازی عددی فرآیند و روش هیدرودینامیک ذرات جهت مدل‌سازی مواد دانه‌ای استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که پوکه معدنی در مقایسه با خاکاره موجب استهلاک بیشتر موج انفجار می‌شود. همچنین، استفاده از هسته ساخته‌شده از مواد دانه‌ای با ضخامت کم چندان کارآمد نیست اما بکارگیری این هسته با ضخامت زیاد موجب کاهش بیشتر موج انفجار می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مواد دانه‌ای، استهلاک، موج انفجار، شاک تیوب، حل عددی.

Experimental and Numerical Investigation of Blast Wave Mitigation in Granular Materials

M. Rahmani, A. R. Naddaf Oskouei, H. Khodarahmi, R. Hosseini*

Imam Hossein University

(Received: 09/21/2019, Accepted: 06/09/2020)

Abstract

One of the intrinsic properties of foams, porous materials, and granular materials, are their ability to mitigate the blast wave. The current research study investigates the capability of granular materials in the mitigation of blast wave both experimentally and numerically. In the experimental section, the explosion shock tube facility was employed to conduct a series of experiments. Sawdust and mineral pumice were used as granular materials in the sandwich panel core and their mechanical properties were obtained by performing quasi-static compression tests. Moreover, the commercial hydrocode AUTODYN was used to numerically simulate the process while the smooth particle hydrodynamics method (SPH) was employed to model granular materials. The obtained results indicate that mineral pumice leads to more mitigation of the blast wave compared to sawdust. Besides, using a low thick core made of granular materials is not considerably effective and using a high thick core leads to more mitigation of the blast wave.

Keywords: Granular Materials, Mitigation, Explosion Wave, Shock Tube, Numerical Simulations.

۱- مقدمه

انفجار سامانه‌های دفاعی دارای دو اثر تخریبی موج انفجار و ترکش است که در این مقاله به بحث موج انفجار پرداخته می‌شود. با توجه به افزایش روزافزون تهدیدات تروریستی، نیاز به ساخت سازه‌ها و زره‌های میراکننده موج انفجار بیشتر شده است. استفاده از موادی نظیر فوم‌ها، مواد دانه‌ای متخلخل و مواد لایه‌ای و نظایر آن‌ها جهت کاهش ضربه و استهلاک موج انفجار رایج است. این قابلیت در این مواد به دلیل توانایی بالای آن‌ها در جذب انرژی است که در این میان مواد دانه‌ای به نسبت ارزان مانند براده آهن و چوب که از ضایعات کارگاه‌های صنعتی هستند می‌تواند مورد توجه باشند. مواد دانه‌ای مجموعه‌ای از اجزای میکروسکوپی مجزا از هم از قبیل شن موجود در ساعت شنی، گندم‌های یک سیلو، پودرها و ... هستند. برای همه این مواد اندازه ذرات نسبت به کل سامانه قابل صرف نظر نیست [۱]. در این مواد جابه‌جایی ذرات از قوانین نیوتن پیروی می‌کند. اگر چه این مواد به ظاهر ساده به نظر می‌رسند اما نمایش دینامیک آن‌ها پیچیدگی‌های بسیاری دارد و بسیاری از رفتارهای آن‌ها تاکنون به خوبی توصیف نشده است. با این وجود، این ویژگی آن‌ها معمولاً در مدل‌سازی‌ها مورد توجه قرار نمی‌گیرد و در نتیجه نتایجی به دور از واقعیت به دست می‌آید. در مواد دانه‌ای نیروهای بین ذرات شامل نیروهای ناشی از شرایط مرزی، نیروهای بین ذره‌ای (نیروهای تماسی) هستند که تعادل نسبی بین این نیروها سبب آشکار شدن جنبه‌های مختلف رفتار مواد دانه‌ای می‌شود. رفتار این مواد متفاوت از حالت‌های جامد، مایع و یا گاز است که باعث می‌شود بتوان آن‌ها را به‌عنوان فرم دیگری از ماده طبقه‌بندی نمود. هیپوپلاستیسیته نوعی از مدل‌های رفتاری غیر خطی است که برای پیش‌بینی رفتار مواد دانه‌ای ایجاد شده است. ساختار اولیه مدل هیپوپلاستیسیته در دهه ۱۹۹۰ در دانشگاه کارلسروه‌ر ایجاد شده است. قوانین رفتاری هیپوپلاستیسیته نرخ تغییرات تنش را به‌صورت تابعی از تنش و نرخ تغییرات کرنش و نسبت تخلخل شرح می‌دهند که برای مدل‌سازی مصالح دانه‌ای غیر چسبنده مناسب است [۲].

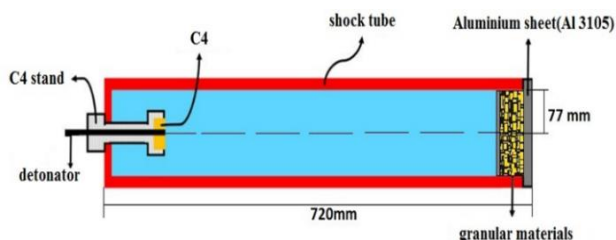
مواد دانه‌ای در تحقیقات دو دهه اخیر به دلیل کاربردهای نظامی و عمرانی آن‌ها بسیار مورد توجه بوده‌اند. از جمله تحقیقاتی که در زمینه استفاده از این مواد تاکنون صورت گرفته می‌توان به کار نسترنکو [۳] اشاره کرد که در یک کار آزمایشگاهی با عنوان استهلاک موج شوک با استفاده از مواد نرم فشرده شده تأثیر استفاده از خاکاره در یک مخزن فلزی آزمون انفجار را مورد بررسی قرار داد و مشاهده کرد که با استفاده از این ماده میزان تغییر شکل مخزن به شدت کاهش یافته و از تخریب آن جلوگیری شده است.

پرامود و همکارانش [۴] به بررسی کاهش موج انفجار با استفاده از مواد متخلخل پرداختند. آن‌ها از صفحات دارای حفره و دستگاه شاک‌تیوب به این منظور استفاده کردند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داده که

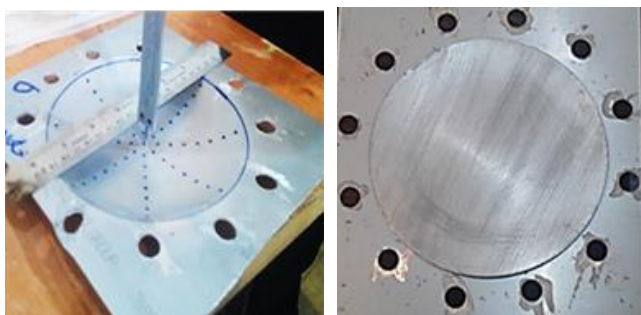
کاهش بیش فشار با افزایش تخلخل کاهش یافته است. همچنین مشخص شد علاوه بر درصد تخلخل شکل و اندازه حفره‌های صفحات نیز در کاهش بیش فشار مؤثر است. نگوک-سون نوگین و همکارش دینامیک موج شوک در زنجیره‌ای از مواد دانه‌ای را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. زنجیره مواد دانه‌ای نمونه ساده شده‌ای از مواد دانه‌ای است که برای بررسی دینامیک انتشار موج در این مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد. وانگ و چو [۵] به بررسی انتشار موج ضربه و شکل پیشانی موج در مواد دانه‌ای پرداختند. آن‌ها شکل پیشانی موج در محیط‌های با اندازه ذرات مختلف و تغییرات شتاب ذرات، انرژی جنبشی و سرعت موج در ضربه‌ی با زاویه‌های مختلف را بررسی کردند و فرآیند انتشار انرژی از طریق تماس بین ذرات را نشان دادند. لیوی [۶] نیز به بررسی تماس موج شوک با مواد دانه‌ای پرداخته است. او در پژوهش خود از مدل حالتی که برای مواد متخلخل توسعه داده شده برای مواد دانه‌ای استفاده کرد که در مقایسه با کار تجربی سایر پژوهشگران تطابق خوبی نشان داد.

هیگسو لو و همکارانش [۷] به بررسی شبیه‌سازی تماس موج شوک و پودر در لوله شوک پرداختند. در این بررسی آن‌ها برای مدل کردن پودر از تئوری سینماتیک ذرات استفاده کرده‌اند و نتایج را با نتایج تجربی مقایسه کردند. نتایج به خوبی افزایش ناگهانی سرعت موج شوک همچنین کاهش شدید فشار هنگام ورود از فاز گازی به فاز ذرات را نشان می‌دهد. هایدن ای-بروگویان و همکارانش [۸] با شبیه‌سازی عددی به بررسی استهلاک ضربه در حالت دوبعدی و سه‌بعدی در کریستال‌های دانه‌ای پرداختند. مطالعات آن‌ها نشان داد که رفتار کریستال‌های سه‌بعدی را می‌توان با شبیه‌سازی المان‌های گسسته و تنها استفاده از قوانین تماس نرمال بین اجزاء به خوبی توصیف کرد. همچنین معلوم شد که خصوصیات یک زنجیره‌ی دانه‌ای یک‌بعدی را می‌توان برای حالات دو و سه‌بعدی نیز تعمیم داد و استفاده کرد. هویانگ لو و همکارانش [۹] نیز تماس موج شوک با مواد دانه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی از یک لوله شوک مینیاتوری و از دوربین سرعت بالا برای ثبت انتشار موج در بستر دانه‌ای استفاده کردند. آن‌ها از گوی‌های فلزی به‌عنوان ماده دانه‌ای برای مطالعه استفاده کردند. ون شان دویان و همکارانش [۱۰] به مطالعه موج شوک در زنجیره دانه‌ای یک‌بعدی با تماس هرگز بین ذرات پرداختند. کار آن‌ها به صورت شبیه‌سازی عددی و ارائه روابط تحلیلی انجام شده و موج شوک توسط فشرده‌سازی یک پیستون ایجاد شده و روابطی برای سرعت موج شوک با توجه به سرعت پیستون و تنش اولیه بین ذرات ارائه داده‌اند. کاندان و همکارانش [۱۱] ناپایداری سطح بستر دانه‌ای در بارگذاری شوک را بررسی کردند. در کار آن‌ها آغاز و رشد ناپایداری در مواد گرانولی که توسط امواج شوک هوایی بارگذاری می‌شوند، از طریق آزمایش‌های لوله‌ی شوک و محاسبات عددی مورد بررسی قرار گرفته

در شکل (۲) نمایی شماتیک از محل قرارگیری نمونه‌ها در آزمون و ابعاد شاک تیوب مشاهده می‌شود. قسمت داخلی ورق متصل به شاک تیوب در تمامی نمونه‌ها جهت سهولت اندازه‌گیری به صورت دایره‌ای مش زده می‌شوند. در نمونه اول دو ورق بدون هسته بر روی هم چسبانده شده است که این نمونه و نحوه مش زدن ورق تکیه‌گاه و اندازه‌گیری تغییر مکان مرکز ورق پس از آزمایش توسط کولیس در شکل (۳) مشاهده می‌شود. در آزمایش‌های بعدی نمونه‌ها دارای هسته به ضخامت ۳، ۶ و ۸ سانتی‌متر هستند.



شکل ۲- تصویر شماتیک از آزمون تجربی.



نمونه اول بدون هسته

اندازه‌گیری تغییر شکل نمونه

شکل ۳- نمونه بدون هسته و نحوه اندازه‌گیری تغییر شکل نمونه‌ها.

شکل (۴) نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. نمونه‌های مواد دانه‌ای داخل کیسه‌های پارچه و سپس داخل استوانه مقوایی قرار می‌گیرند. ورق آلومینیوم استفاده شده در هر دو طرف از جنس AA3105 است که مشخصات مکانیکی آن در جدول (۱) آمده است. استوانه مقوایی توسط چسب به ورق‌های آلومینیوم چسبانده شده است. خرج انفجاری از نوع C4 است که حالت خمیری شکل دارد. این خرج داخل نگه‌دارنده‌هایی از جنس تفلون که تراشیده شده قرار داده می‌شود (شکل (۴)). سوراخ پشت نگهدارنده جهت خروج سیم چاشنی انفجاری است و در قسمت جلوی آن خرج انفجاری C4 قرار می‌گیرد. در این پژوهش از چاشنی‌های انفجاری نمره ۸ (به قطر ۸ mm) استفاده شده است. نمونه‌ها به وسیله ۱۲ عدد پیچ مانند شکل (۵) سمت راست، به دهانه لوله شاک بسته می‌شوند. تکیه‌گاه با توجه به تعداد بالای پیچ‌ها کاملاً گیردار فرض می‌شود. پس از انجام آزمون تغییر شکل نمونه‌ها توسط کولیس اندازه‌گیری می‌گردد.

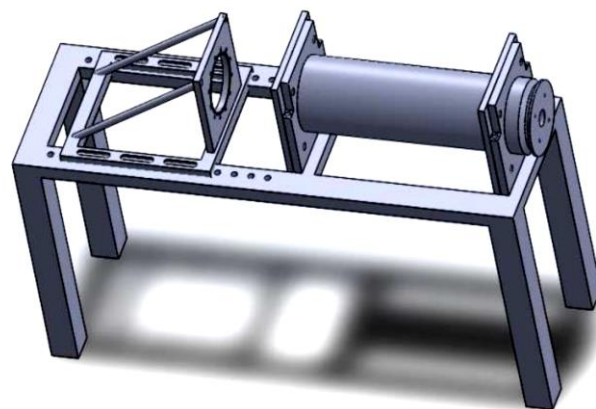
است. در این بررسی از حل‌گر اویلری لاگرانژی و مدل دراگر-پراگر برای مواد دانه‌ای استفاده شده است. هوفو فان و همکارش [۱۲] در یک کار مطالعاتی به بررسی و مدل‌سازی تغییر شکل و شکست در مواد غیر پیوسته پرداختند و از روش SPH^۱ برای شبیه‌سازی قطعات ناشی از انفجار زیر خاک استفاده کردند و پس از مدل‌سازی به این روش نتایج را با داده‌های آزمون آزمایشگاهی مقایسه نمودند. در این بررسی نشان داده شد که حتی مدل دراگر-پراگر که در حالت پایدار و بارگذاری‌های شبه استاتیکی رفتار ماده دانه‌ای خاک را به خوبی توصیف می‌کند برای توصیف رفتار خاک در نرخ کرنش‌های بالا نمی‌تواند مناسب باشد.

در این پژوهش میرایی موج شوک در مواد دانه‌ای در بخش تجربی با استفاده از شاک تیوب انفجاری و در بخش شبیه‌سازی عددی به کمک نرم افزار اتوداین بررسی شده است. در شبیه‌سازی عددی از روش هیدرودینامیک ذرات (SPH) جهت مدل‌سازی مواد دانه‌ای استفاده شده است.

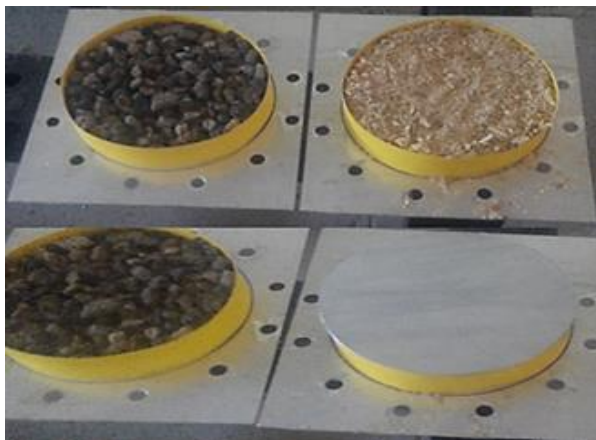
۲- روش تحقیق

۲-۱- آزمون انفجار

لوله شوک یا شاک تیوب انفجاری ابزاری است برای هدایت امواج انفجاری و شبیه‌سازی انفجارهای واقعی و اثرات آن که معمولاً در مقیاس کوچک استفاده می‌شود. اخیراً، لوله‌های شوک در تحقیقات زیست پزشکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند تا مطالعه کنند که چگونه نمونه‌های بیولوژیکی تحت تأثیر امواج انفجاری قرار می‌گیرند [۱۳]. موج شوک یا ضربه‌ای در داخل یک لوله شوک می‌تواند به وسیله یک انفجار کوچک (انفجار هدایت شده) تولید شود یا با تخریب دیافراگم و انتشار موج شوک بین دو ناحیه فشار بالا و فشار پایین ایجاد شود. در این پژوهش از شاک تیوب انفجاری (شکل (۱)) جهت آزمون تجربی و بررسی کاهش موج شوک در مواد دانه‌ای استفاده شده است.



شکل ۱- تصویر شماتیک شاک تیوب مورد استفاده در پژوهش.



شکل ۴- آماده‌سازی نمونه‌ها.

جدول ۱- خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم AA3105 [۱۴].

چگالی	ضریب پواسون	مدول الاستیک	مقاومت برشی	تنش تسلیم
۲/۲-۸/۶ g/cm ³	۰/۳۳	۷۰-۸۰ MPa	۹۷MPa	۱۳۰MPa

۲-۲- آزمایش مصالح

برای انجام شبیه‌سازی عددی لازم است که خواص ماده به نرم‌افزار معرفی شود. خواص مورد نیاز در بحث شبیه‌سازی مواد دانه‌ای در نرم‌افزار اتوداین تغییرات چگالی نسبت به فشار، تغییرات تنش تسلیم نسبت به فشار، تغییرات مدول برشی نسبت به فشار و تغییرات سرعت صوت در ماده دانه‌ای در چگالی‌های مختلف است. با استفاده از آزمایش‌های فشار محوری و غیر محوری به غیر از سرعت صوت در چگالی‌های مختلف مابقی موارد ذکر شده را می‌توان به‌دست آورد [۱۵]. در شکل (۶) آزمون فشار بر روی نمونه مشاهده می‌شود.

نگهدارنده خرج انفجاری و چاشنی انفجاری از جنس تفلون

نمای پشت شاک‌تیوب محل قرارگیری نگهدارنده خرج انفجاری و چاشنی الکتریکی

نمونه بسته شده به دهانه شاک‌تیوب



شکل ۵- نماهای مختلف شاک‌تیوب و نگهدارنده ماده منفجره.

ماتریس مورد استفاده در این آزمایش ۷ میلی‌متر و عمق حفره ۱۰۰ میلی‌متر است. ماتریس و سنبه مورد استفاده در شکل (۶) مشاهده می‌شود. نمونه تا ارتفاع ۷۵ میلی‌متر داخل ماتریس ریخته می‌شود. با استفاده از پرس محوری می‌توان تغییرات چگالی نسبت به فشار را به‌دست آورد. جهت دستیابی نتایج صحیح‌تر سه نمونه از هر ماده مورد آزمایش قرار گرفتند و با میانگین‌گیری از داده‌های به‌دست آمده از سه آزمایش انجام شده داده‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی به‌دست آمده است. دو نمونه از نمودارهای به‌دست آمده از آزمون فشار برای خاکاره و پوکه معدنی در شکل‌های (۷ و ۸) به نمایش درآمده‌اند.

با استفاده از میانگین داده‌های نمودارهای نظیر شکل‌های (۷ و ۸) تغییرات چگالی نسبت به فشار را می‌توان در نرم‌افزار اکسل به‌دست آورد و به نرم‌افزار معرفی کرد. این اطلاعات جهت تعریف معادله حالت فشردگی مورد نیاز است.



شکل ۶- آزمون فشار بر روی نمونه‌های مواد دانه‌ای.

در این پژوهش با در نظر گرفتن استاندارد ASTM D1557 که برای آزمایش موادی نظیر شن و ماسه استفاده می‌شود آزمون فشار انجام می‌شود. از دستگاه پرس با قابلیت حداکثر ۳۰ تن بار (شکل (۶)) و با سرعت فشردگی ۲ میلی‌متر در دقیقه استفاده شده است. قطر داخلی

برای محاسبه تنش تسلیم مواد دانه‌ای از رابطه ساده شده کولمب [۱۶] استفاده می‌شود که برای مواد دانه‌ای غیر چسبنده به صورت رابطه (۴) است:

$$\sigma_{xx} = P(1 + \sin\phi) \quad (4)$$

$$\sigma_{yy} = P(1 - \sin\phi)$$

معیار تسلیم کولمب مور برای خاک (مواد دانه‌ای) را می‌توان به صورت رابطه‌ای (۵) از تنش‌های اصلی نوشت [۱۷]:

$$F = (\sigma_1 - \sigma_3) + (\sigma_1 + \sigma_3)\sin\phi - 2C\cos\phi \quad (5)$$

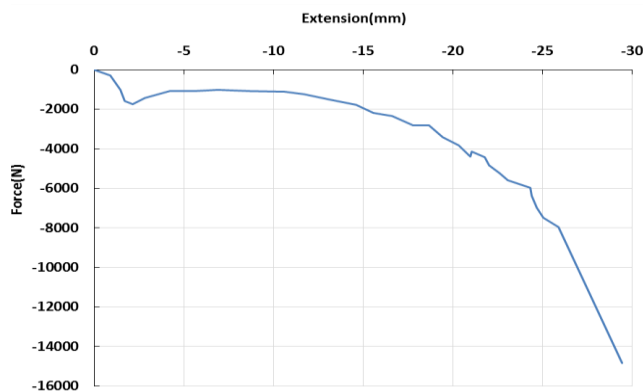
در این روابط، p فشار محوری و ϕ زاویه اصطکاک داخلی است که از خواص ذاتی مواد است. این زاویه برای خاکاره حدود ۴۳ درجه و برای پوکه معدنی تقریباً ۳۷ تا ۴۵ [۱۸] درجه است و C ضریب چسبندگی است که برای مواد دانه‌ای غیر چسبنده نظیر پوکه بسیار کوچک است. خاصیت چسبندگی و فشرده‌گی ماده باعث افزایش مقاومت به برش می‌شود و با رطوبت مواد دانه‌ای نیز در ارتباط است، که برای خاکاره با رطوبت کمتر از ۱۰ درصد حدود ۷ کیلو پاسکال [۱۹] و برای پوکه معدنی مقدار این پارامتر ۲۶ کیلو پاسکال [۲۰] در نظر گرفته شده است. رابطه‌ای که برای مقاومت برشی خاک ارائه شده و می‌توان از آن برای مواد دانه‌ای نیز استفاده کرد به صورت زیر است:

$$\tau = \sigma \tan\phi + C \quad (6)$$

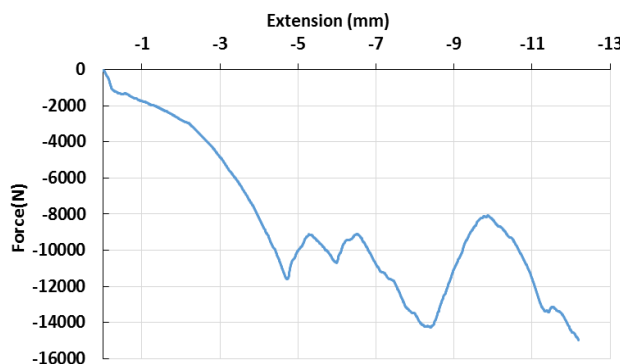
که در این رابطه، σ تنش قائم است [۱۶]. برای پوکه معدنی ضریب چسبندگی در این تحقیق صفر در نظر گرفته شده است. با استفاده از روابط بیان شده و نتایج آزمایشگاهی تنش تسلیم و مدول برشی در فشارها و چگالی‌های مختلف برای مواد دانه‌ای مورد بررسی (خاکاره و پوکه معدنی) محاسبه می‌شود. نتایج محاسبات در جدول‌های (۲ تا ۵) آمده است. هر دو ماده مورد استفاده در این پژوهش به دلیل تخلخل بالا حالت عایق در برابر صوت دارند و سرعت موج صوت در آن‌ها بسیار کمتر از سرعت صوت در هوا (۳۴۳ متر بر ثانیه) است.

جدول ۲- تغییرات چگالی و سرعت صوت در فشارهای مختلف برای خاکاره.

فشار (MPa)	چگالی (gr/cm ³)	سرعت صوت (m/s)
۰	۰/۱۷	۴۱/۰۵
۹/۹۳۷	۰/۱۷۱	۲۴۲/۲۵
۲۹	۰/۱۷۲	۴۱۱/۱۲
۴۰	۰/۱۷۴	۴۸۶/۴۵
۹۲	۰/۲۱۲	۷۳۸/۵۰۵
۱۴۰	۰/۲۲۹	۹۱۵/۳۲
۱۸۰	۰/۲۳۵	۱۰۳۲/۹۲
۲۰۰	۰/۲۴۰	۱۰۶۰/۲۰۲
۲۷۰	۰/۲۴۱	۱۲۶۴/۲۹
۳۹۰	۰/۲۴۲	۱۵۱۲/۰۸



شکل ۷- نمونه‌ای از نتایج آزمون فشار خاکاره.



شکل ۸- نمونه‌ای از نتایج آزمون فشار پوکه معدنی.

با در نظر گرفتن چند فرض ساده‌سازی دیگر خصوصیات مورد نیاز برای شبیه‌سازی عددی را می‌توان از آزمون‌های فشار به دست آورد. در نمونه‌های آزمون فشار تنها حجم با تغییر طول استوانه تغییر می‌کند. برای تعریف مدل مواد دانه‌ای یک مدل غیر خطی الاستیک پلاستیک می‌توان تعریف کرد که خواص به صورت ایزوتروپیک (همگن) فرض می‌شود. در قسمت الاستیک مدول بالک k تابعی از چگالی ماده است و نسبت پواسون را نیز می‌توان ثابت و تقریباً برابر ۰/۲۹ در نظر گرفت. در این صورت رابطه بین ثابت‌های الاستیک به صورت رابطه (۱) است.

$$G = \frac{3k(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)} \quad (1)$$

در این رابطه G مدول برشی است. سرعت صوت در حالت الاستیک در ماده دانه‌ای با رابطه (۲):

$$C = \sqrt{\frac{k}{\rho}} \quad (2)$$

و مدول بالک با رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$K = \frac{-P}{\epsilon_v} \quad (3)$$

که در این رابطه، P فشار و ϵ_v کرنش حجمی است [۱۵]. بنابراین با استفاده از روابط می‌توان سرعت صوت و مدول برشی در چگالی‌های مختلف را نیز محاسبه کرد.

۳- شبیه‌سازی عددی

جامدات در بارگذاری‌های معمولی رفتار الاستیک دارند اما بارگذاری‌های با موج شوک معمولاً به فاز پلاستیک نیز وارد می‌شوند. معادله حالت وظیفه توضیح رفتار هیدرودینامیکی مواد را بر عهده دارد. رفتار هیدرودینامیکی در بسیاری از مواد بر اثر بارگذاری دینامیکی با نرخ بالا بهترین توصیف کننده رفتار ماده است. به‌عنوان مثال پاسخ اولیه گازها و مایعات که برش را تحمل نمی‌کنند، هیدرودینامیکی است و فشار در آن‌ها به‌عنوان تابعی از چگالی و انرژی درونی است. همچنین رفتار جامدات تحت تأثیر نرخ‌های کرنش بالا هیدرودینامیکی است که در آن فشار اعمال شده به جامدات بسیار بیشتر از تنش تسلیم مواد است و می‌توان از استحکام مواد در برابر تنش اعمال شده صرف نظر نمود. یک مدل ماده در حالت کلی نیاز به معادلاتی برای ارتباط دهی بین تنش با تغییر شکل و انرژی درونی با دما دارد. معادله حالت به وسیله شناخت خواص ترمودینامیکی مواد قابل دستیابی است و در حالت تئوری نیازی به دانستن خواص دینامیکی نیست. در صورتی که در واقعیت تنها راه شناخت رفتار مواد در مقابل بارگذاری‌های با نرخ کرنش بالا انجام آزمایش‌های دینامیکی است.

برای تعریف کامل یک ماده در هایدروکد اتوداین نیاز به تعریف معادله حالت (EOS)، مدل استحکام و مدل شکست است که هر یک از آن‌ها با توجه به نوع ماده و رفتار آن تعریف می‌شوند. پس از تعریف مناسب ماده باید به حل مسئله پرداخت. حل گر مناسب برای مسئله با توجه به نوع ماده و فیزیک مسئله تعریف می‌شوند، به‌عنوان نمونه برای سیالات از حل گر اویلری و برای جامدات می‌توان از حل گر لاگرانژی استفاده کرد.

برخی پژوهشگران برای مواد دانه‌ای از کدهای المان‌های گسسته (DEM) استفاده کرده‌اند. اشکال روش DEM که سبب شده کاربرد آن در مکانیک ذرات توسعه کمتری پیدا کند این است که برای استفاده از این روش نیاز به داشتن تعداد زیادی از ضرایب است تا بتوان سختی فنرها و گرانیوی بین ذرات و اصطکاک را تخمین زد. برخی از این ضرایب حتی مفهوم فیزیکی ندارند و برخی از آن‌ها را تنها می‌توان از آزمون‌های دو محوری با دقت بالا به‌دست آورد. علاوه بر این محاسبات عددی روش DEM به رایانه با ظرفیت محاسباتی بالایی و صرف زمان زیادی نیاز دارد. در نرم‌افزار اتوداین برای مواد دانه‌ای می‌توان از حل گرهای اویلری-لاگرانژی (ALE) استفاده کرد. در این پژوهش سعی بر استفاده از روش هیدرودینامیک اجزای گسسته (SPH) است. این روش نیز یک روش مستقل از مش مانند روش DEM است، اما با حوزه کاربرد وسیع‌تر و همچنین الگوریتم و برنامه رایانه‌ای آن نیز توسعه یافته‌تر است.

جدول ۳- تغییرات چگالی و سرعت صوت در فشارهای مختلف پوکه معدنی.

فشار (MPa)	چگالی (gr/cm ³)	سرعت صوت (m/s)
۰	۲/۴۷۲	۵۱/۳۰۲
۹/۲۶۷	۲/۴۷۷	۱۴۰/۱۶۰
۷۵	۲/۴۸۲	۳۹۷/۴۸۱
۱۳۰	۲/۴۸۷	۵۳۱/۱۸۶
۲۴۰	۲/۴۹۳	۷۱۰/۸۹۷
۲۵۰	۲/۵۲۰	۷۲۸/۲۱۰
۲۸۰	۲/۵۳۱	۷۶۷/۲۱۶
۳۳۰	۲/۵۹۴	۸۳۶/۵۵۷
۳۵۰	۲/۶۳۶	۸۶۷/۱۱۰
۳۹۰	۲/۷۲۶	۹۰۷/۱۸۳

جدول ۴- تنش تسلیم پوکه معدنی و خاکاره در چگالی‌های مختلف.

چگالی پوکه معدنی (gr/cm ³)	تنش تسلیم پوکه معدنی (MPa)	چگالی خاکاره (gr/cm ³)	تنش تسلیم خاکاره (MPa)
۲/۴۷۲	۰	۰/۱۷	۰
۲/۴۷۷	۱۲۰	۰/۱۷۱	۱۶
۲/۴۸۲	۲۰۰	۰/۱۷۲	۷۲
۲/۴۸۷	۳۴۰	۰/۱۷۴	۱۰۰
۲/۴۹۳	۶۳۰	۰/۲۱۲	۲۴۰
۲/۵۲۰	۶۵۰	۰/۲۲۹	۴۴۰
۲/۵۳۱	۷۱۰	۰/۲۳۵	۶۰۰
۲/۵۹۴	۸۴۰	۰/۲۴۰	۹۹۰
۲/۶۳۶	۹۲۰	۰/۲۴۱	۱۰۰۰
۲/۷۲۶	۱۰۰۰	۰/۲۴۲	۱۱۰۰

جدول ۵- مدول برشی خاکاره و پوکه معدنی در چگالی‌های مختلف.

چگالی پوکه معدنی (gr/cm ³)	مدول برشی پوکه معدنی (MPa)	چگالی خاکاره (gr/cm ³)	مدول برشی خاکاره (MPa)
۲/۴۷۲	۲/۵۱۸	۰/۱۷	۰/۸۸
۲/۴۷۷	۲۴,۹۵	۰/۱۷۱	۲/۷۷۸
۲/۴۸۲	۴۰,۳۹	۰/۱۷۲	۱۳
۲/۴۸۷	۷۱,۰۶	۰/۱۷۴	۱۸
۲/۴۹۳	۱۳۰	۰/۲۱۲	۴۹
۲/۵۲۰	۱۳۹	۰/۲۲۹	۹۹
۲/۵۳۱	۱۶۱	۰/۲۳۵	۱۴۰
۲/۵۹۴	۱۹۰	۰/۲۴۰	۱۸۰
۲/۶۳۶	۲۱۰	۰/۲۴۱	۲۱۰
۲/۷۲۶	۲۳۴	۰/۲۴۲	۲۵۰

- 1-Equation of State
- 2-Sterngh Model
- 3- Failure Model
- 4- Discrete Element Method

می‌تواند رابطه‌ای بین هر جفت از متغیرهای ρ (چگالی)، P (فشار)، e (انرژی)، u_p (سرعت ذرات) و U (سرعت شوک) تعریف کند. اندازه‌گیری u_p و U در بسیاری از آزمایش‌های دینامیکی نشان داده که برای اکثر جامدات و بسیاری از مایعات در طیف گسترده‌ای از فشار، رابطه خطی تجربی زیر بین این دو متغیر وجود دارد:

$$U = C_0 + s u_p \quad (8)$$

یکی از ساده‌ترین فرم‌های معادله حالت، معادله حالت گاز ایده‌آل است که می‌توان از آن در بسیاری از کاربردهای مربوط به حرکت گازها استفاده کرد. این معادله از قوانین بویل و گای لوساک حاصل می‌شود و به‌صورت رابطه (۹) بیان می‌شود.

$$P = (\gamma - 1) \rho e \quad (9)$$

این فرم معادله حالت به‌عنوان معادله گاز ایده‌آل شناخته می‌شود و تنها مقدار ضریب آدیاباتیک γ باید تعیین شود. به‌منظور اجتناب از عوارض و مشکلات در مسائل با مواد چندگانه که در آن فشار اولیه کوچک در گاز سرعت کم ناخواسته‌ای تولید می‌کند، در این موارد معادله (۹) به‌صورت معادله (۱۰) اصلاح می‌شود.

$$P = (\gamma - 1) \rho e - P_{shift} \quad (10)$$

که در این رابطه، P_{shift} یک فشار اولیه کوچک است که برای ایجاد فشار صفر اولیه تعریف می‌شود.

در شبیه‌سازی مسئله این پژوهش از معادله حالت گاز ایده‌آل برای مدل‌سازی هوا استفاده شده است [۲۳].

بعلاوه برای ماده منفجره معادله حالت جونز-ویلکنز-لی آستفاده شده است. در این معادله فرض می‌شود که ماده منفجره کاملاً منفجر خواهد شد. از این معادله برای مدل کردن فشار تولید شده با افزایش انرژی شیمیایی در انفجار استفاده می‌شود و فشار تولید شده به‌صورت رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_1 \rho_0} \right) \exp \left(-R_1 \frac{\rho_0}{\rho} \right) + B \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_2 \rho_0} \right) \exp \left(-R_2 \frac{\rho_0}{\rho} \right) + \omega \rho E_m \quad (9)$$

که در این رابطه، A ، B ، R_1 ، R_2 ، ω ثابت‌های ماده و ρ_0 و ρ چگالی اولیه و لحظه‌ای ماده منفجره است [۲۳]. پارامترهای این معادله حالت برای ماده منفجره C4 در جدول (۶) آمده است.

مدل استحکام بیانگر مقاومت مواد در برابر تغییر شکل و تسلیم است که با توجه به نوع ماده از مدل‌های استحکام متفاوتی استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال برای فلزات می‌توان از مدل استحکام جانسون کوک استفاده کرد و برای مواد ترد نظیر سرامیک‌ها معمولاً از مدل جانسون هالمکوئیست استفاده می‌شود. در واقع مدل استحکام رابطه بین تنش و کرنش در حالت الاستیک و پلاستیک در ماده را مشخص می‌کند [۲۴].

معادله حالت هر ماده مکان هندسی نقاطی است که ماده در بارگذاری‌های انفجاری و دینامیکی می‌تواند تحت شرایط آن نقاط قرار گیرد. برای توصیف حالت موج از پنج متغیر فشار، حجم مخصوص، سرعت ذره‌ای، سرعت موج شوک و انرژی داخلی مخصوص استفاده می‌شود و برای ایجاد رابطه بین هر دو متغیر باید از سه معادله بقای جرم، بقای اندازه حرکت و بقای انرژی که به معادلات رانکین-هاگونیوت معروفاند و یک معادله تجربی استفاده کرد [۲۱].

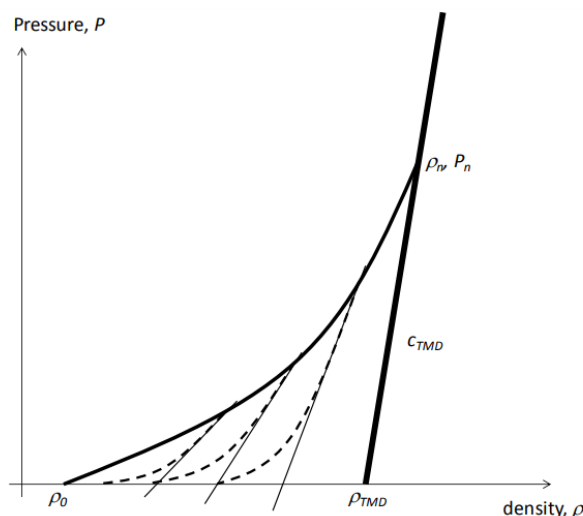
همان‌طور که در جدول (۶) اشاره شد برای مواد دانه‌ای در این پژوهش از معادله حالت فشردگی استفاده می‌شود. با استفاده از این مدل کنترل بیشتری بر روی مواد متخلخل در فاز بارگذاری و باربرداری وجود دارد. در این حالت سرعت صوت به‌صورت تابعی از چگالی در نظر گرفته می‌شود. از این مدل به‌صورت گسترده‌ای در شبیه‌سازی شوک از جمله مدل‌سازی خاک و ماسه در اتوداین استفاده می‌شود.

مدل فشردگی در حالت باربرداری نتایج دقیق‌تری را برای رفتارهای غیر خطی می‌دهد. در این مدل فشار را می‌توان با استفاده از مدول بالک و چگالی لحظه‌ای محاسبه نمود:

$$K(\rho) = \rho \frac{dP}{d\rho} \quad (7)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \rho} = C(P, \rho)^2$$

در نقطه (P_n, ρ_n) ماده به حالت فشردگی کامل می‌رسد. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود باربرداری به‌صورت غیر خطی انجام می‌گیرد که به‌صورت نقطه چین آمده است و تقریب آن‌ها به‌صورت توپر در شکل آمده است. C_{TMD} سرعت صوت در حالت کاملاً فشرده است [۲۲].



شکل ۹- الگوی غیر خطی باربرداری در معادله حالت فشردگی [۲۲].

در این پژوهش برای مواد جامد نظیر ورق آلومینیوم معادله حالت شوک استفاده شده است. این معادله حالت برای شرایط ضربه شوک

جدول ۷- معادلات حالت، مدل استحکام و شکست استفاده شده برای مواد.

ماده	معادله‌ی حالت (EOS)	مدل استحکام	مدل شکست
ماده دانه‌ای	فشرده‌گی	Mo- granular	فشار حداقل ^۱ (Hydro)
صفحات آلومینیوم	شوکی ^۲	Johnson-Cook	
هوا	گاز ایده‌آل ^۳	-	-
خرج انفجاری C4	JWL	-	-

به دلیل متقارن بودن هندسه و بارگذاری مسئله نیازی به شبیه‌سازی مسئله به صورت سه‌بعدی نیست و جهت کاهش هزینه زمان مسئله به صورت دوبعدی با تقارن محوری حل می‌شود. شکل (۱۰) مدل‌سازی مسئله در نرم‌افزار اتوداین را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- مدل‌سازی مسئله در نرم‌افزار اتوداین.

در جدول‌های (۸ و ۹) می‌توان شرایط اولیه و مرزی را مشاهده نمود. نقطه شروع انفجار را باید به نرم‌افزار معرفی کرد، برای این منظور از قسمت دتونیشن نرم‌افزار نقطه و زمان شروع انفجار به صورت جدول (۱۰) تنظیم می‌شود.

با توجه به اینکه چاشنی الکتریکی مورد استفاده در آزمون تجربی دارای قدرت و انرژی قابل توجهی است لازم است که در شبیه‌سازی در نظر گرفته شود و به مقدار مناسب وزنی معادل توان چاشنی به خرج انفجاری شبیه‌سازی افزوده شود. مقدار وزنی معادل ۰/۵ گرم C4 در شبیه‌سازی جهت جایگزینی توان انفجاری چاشنی به خرج انفجاری اضافه شده است [۲۷].

جدول ۸- شرایط اولیه هوا به عنوان پرکننده اوپلری.

Name:	initial
Material:	AIR
Density	۰/۰۰۱۲۳
Internal Energy	۲۰۸۰۰۰
X Velocity	۰
Y Velocity	۰

1- Pmin (Hydro)
 2- Shock
 3- Ideal Gas

جدول ۶- پارامترهای ماده منفجره معادله حالت JWL [۲۳].

ماده منفجره	A(GPa)	B(GPa)	R ₁	R ₂	ω
Comp C-4	۶۰۹/۷۷	۱۲/۹۵	۴/۵	۱/۴	۰/۲۵

برای مدل استحکام مواد دانه‌ای از مدل Mo-granular استفاده شده است. این مدل، بسط مدل Drucker-Prager است،

$$\sigma_Y = \sigma_p + \sigma_p \cdot F \quad (10)$$

که در این رابطه، σ_Y تنش تسلیم کل، σ_p و σ_p نیز به ترتیب تنش تسلیم-فشار و تنش تسلیم-چگالی هستند. نحوه بارگذاری و باربرداری توسط مدل برشی تعریف می‌شود که خود تابعی از چگالی ماده در فشار صفر است.

تنش تسلیم توسط منحنی‌های تنش تسلیم-فشار و تنش تسلیم-چگالی تعریف می‌شود و مدل برشی نیز توسط منحنی مدل برشی-چگالی تعریف می‌شود. برای استفاده از این مدل استحکام باید هر سه منحنی مذکور را تعریف کرد [۲۳].

معمولاً برای مدل‌سازی رفتار دینامیکی مواد نرم نظیر فلزات از مدل رفتاری جانسون کوک استفاده می‌شود. این مدل دارای سه ترم مستقل است که شامل کارسختی، نرخ کرنش و دما است. این مدل به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود [۲۳].

$$Y = [A + B \times \epsilon_p^n] \times [1 + C \times \ln \epsilon_p^*] \times [1 - T_H^m] \quad (11)$$

$$\begin{cases} T_H = 0 \dots \text{for } T < T_{transition} \\ T_H = \frac{(T - T_{transition})}{(T_{melt} - T_{transition})} \dots \text{for } T_{transition} < T < T_{melt} \\ T_H = 1 \dots \text{for } T > T_{melt} \end{cases}$$

که در این رابطه، A تنش تسلیم، B ثابت سختی، C ثابت نرخ کرنش، m ضریب نرم شدن دمایی، n نمای سختی، T دمای جاری، $T_{transition}$ دمایی که در زیر آن تنش تسلیم وابستگی به دما ندارد، T_{melt} دمای حرارت ذوب فلز و Y نیز تنش مؤثر است [۲۵].

مدل‌های شکست شروع و گسترش ترک در مواد را پیش‌بینی می‌کنند. مشابه مدل استحکام برای مواد مختلف مدل‌های شکست متفاوتی نیز ارائه شده است که در ادامه به معرفی مدل‌های شکست مورد استفاده در شبیه‌سازی پرداخته می‌شود.

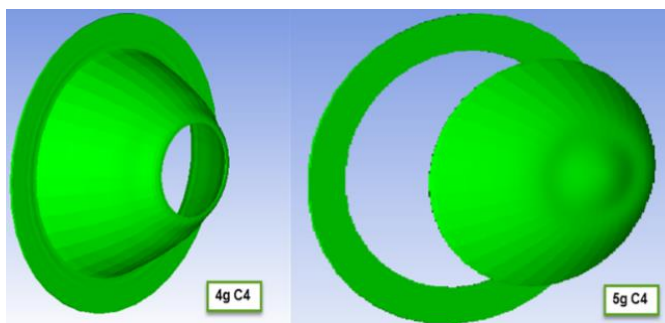
برای ماده دانه‌ای از مدل فشار حداقل استفاده می‌شود. از این مدل بیشتر برای مدل‌سازی مواد باحالت مایع و گاز استفاده می‌کنند. در این مدل تنش تسلیم صفر در نظر گرفته می‌شود، بنابراین تنش در استوانه فون میسر در تمام جهات یکسان فرض می‌شود.

در این مدل یک حد کشش هیدرودینامیکی ثابت برای مواد تعیین شده است. وقتی مقدار فشار هیدرودینامیکی در یک سلول به زیر این حد برسد، شکست بالک صورت می‌گیرد و فشار در صفر تنظیم می‌شود [۲۶].

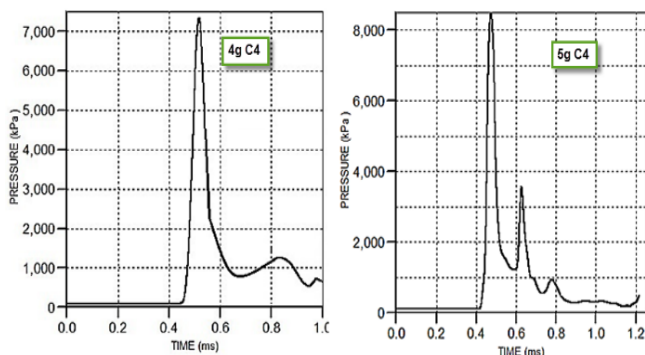
در جدول (۷) معادلات حالت، مدل استحکام و شکست استفاده شده برای مواد مورد استفاده در شبیه‌سازی مشاهده می‌شود.

نتیجه آزمون انفجار به وسیله شاک تیوب برای نمونه با دولایه ورق بدون هسته و با ۵ گرم خرج در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود. آزمایش دوم با استفاده از ۳۰ میلی‌متر خاکاره در بین دو ورق و ۵ گرم خرج انفجاری انجام شده است. در این حالت نیز ورق پشتی کاملاً پاره و جدا شده است.

در شکل (۱۴) نتیجه شبیه‌سازی نرم‌افزار اتوداین برای آزمایش دوم با استفاده از ۳۰ میلی‌متر خاکاره در بین دو ورق و ۵ گرم خرج انفجاری انجام شده است (همان‌طور که گفته شد در شبیه‌سازی به جای چاشنی ۰/۵ گرم خرج انفجاری اضافه در نظر گرفته می‌شود). مشخص است که در شبیه‌سازی، نمونه تخریب گردیده و ورق آلومینیوم هم از تکیه‌گاه و هم از مرکز نمونه تخریب شده است.



شکل ۱۱- شبیه‌سازی انفجار برای ۴ و ۵ گرم ماده منفجره و دولایه ورق آلومینیوم.



شکل ۱۲- موج فشار قبل از برخورد به پانل در گنجی با فاصله ۱ میلی‌متر قبل از پانل برای ۴ و ۵ گرم خرج C4.

نتیجه آزمایش تجربی نمونه دوم در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود که ورق آلومینیوم از تکیه‌گاه جدا شده است. در شبیه‌سازی سوم از نمونه با هسته به ضخامت ۳۰ میلی‌متر پوک معدنی و ۵ گرم ماده منفجره C4 (در شبیه‌سازی ۰/۵ گرم بیشتر) استفاده شده است. نتیجه شبیه‌سازی در شکل (۱۶) قابل رؤیت است. مشاهده می‌شود که در این حالت ورق دچار پارگی نشده و فقط تغییر شکل داده است. نتیجه آزمایش تجربی سوم نیز در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود که در این آزمایش نیز نمونه دچار پارگی نشده و فقط تغییر شکل پیدا کرده است.

جدول ۹- شرایط مرزی مدل.

TYPE	Flow out (Euler)
Coordinate System	0
Preferred Material	ALL EQUAL
TYPE	General 2D Velocity
Coordinate System	0
Constant X-Velocity	0.00000E+00
Constant Y-Velocity	0.00000E+00

جدول ۱۰- مشخصات نقطه انفجار.

X Coordinate	7.50E+01
Y Coordinate	0.00E+00
Initiation time	0.00E+00
Range of Influence	Unrestricted

برخی از اجزاء ممکن است به یکدیگر متصل باشند مانند اجزای پیچ با جوش شده که برای این مدل‌سازی وضعیت اتصال اجزاء در جدول (۱۱) آمده است.

یکی از قسمت‌های اساسی حل مسائل با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزارهای اجزای محدود بررسی مستقل از مش‌بندی بودن مسئله و تعیین مش‌بندی بهینه است. در این پژوهش لازم است مستقل از مش بودن ورق‌های آلومینیوم و هوا بررسی شود، ولی در مورد مواد دانه‌ای به دلیل استفاده از روش مستقل از مش SPH نیازی به انجام این مرحله نیست. برای بررسی استقلال از مش، اندازه مش به تدریج ریز می‌شود تا جایی که جواب با جواب قبلی تفاوت زیادی نداشته باشد. جدول‌های (۱۲) و (۱۳) بررسی عدم وابستگی به مش را برای هوا و ورق آلومینیوم نشان می‌دهد. برای این مرحله ۴ شبیه‌سازی با اندازه مش‌های درج شده در جدول (۱۲) با تنها یک ورق آلومینیوم نصب شده بر روی دهانه لوله شوک و بدون مواد دانه‌ای و با ۳ گرم خرج انفجاری انجام شده است. تغییر شکل‌های مرکز ورق بعد از ۲/۵ میلی‌ثانیه با یکدیگر مقایسه شده است.

با توجه به نتایج جدول‌های (۱۲) و (۱۳) مشاهده می‌شود که با ریز کردن شبکه‌بندی بعد از یک مقدار تغییرات بسیار کم شده است (با توجه به مقیاس). بنابراین اندازه مش ۱ میلی‌متر برای هوا و ۰/۵ میلی‌متر برای ورق آلومینیوم به‌عنوان مش بهینه انتخاب می‌شود. نرم‌افزار در حالت دوبعدی دارای دو مش مربعی و مثلثی است، برای هر دو این مواد از مش سازه‌ای مربعی استفاده شده است.

۴- نتایج و بحث

تصویر شبیه‌سازی انجام شده برای نمونه‌های بدون هسته با ۴ و ۵ گرم خرج انفجاری در شکل (۱۱) نشان داده شده است. موج شوک در یک میلی‌متر قبل از برخورد با ورق برای ۴ و ۵ گرم ماده منفجره C4 در شکل (۱۲) قابل مشاهده است.

جدول ۱۱- اتصالات اجزای شبیه‌سازی.

	Air	Headtube	Shocktube	Target1	Target2	Granular filter
Air	Yes	No	No	No	No	No
Headtube	No	Yes	Yes (Pinned)	No	No	No
Shocktube	No	Yes (Pinned)	Yes	Yes (Pinned)	No	No
Target 1	No	No	Yes (Pinned)	Yes	No	Yes
Target 2	No	No	No	No	Yes	Yes
Granular filter	No	No	No	Yes	Yes	Yes

جدول ۱۲- بررسی عدم وابستگی به مش هوا.

سایز مش (mm)	۳	۲	۱	۰/۵
بیش فشار (kPa) در دهانه	۲۷۰۰	۲۹۰۰	۳۰۰۰	۳۰۵۰
لوله بعد از ورق				

جدول ۱۳- بررسی عدم وابستگی به مش ورق آلومینیوم.

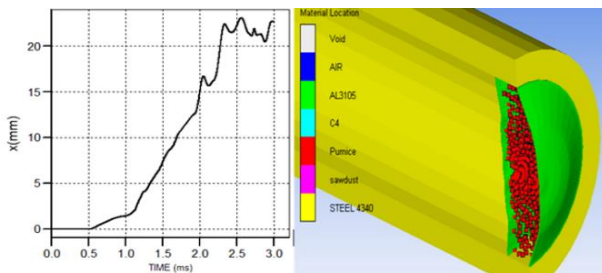
سایز مش (mm)	۳	۲	۱	۰/۵	۰/۲۵
جابه‌جایی مرکز ورق (mm)	۳۵/۴	۳۱/۲	۲۹/۱	۲۸/۳	۲۸/۱



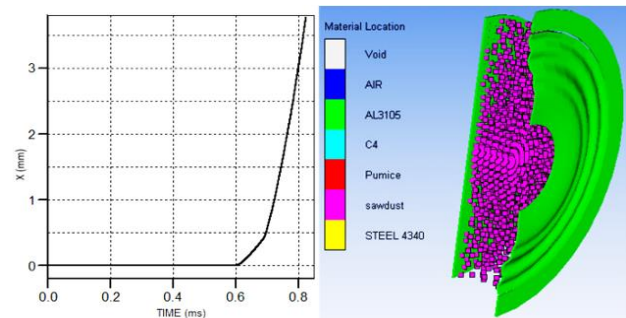
شکل ۱۵- نتایج تجربی نمونه با هسته خاکاره به ضخامت ۳۰ میلی‌متر و خرج ۵ گرم ماده منفجره C4.



شکل ۱۳- نتایج تجربی آزمون انفجار نمونه‌های بدون هسته برای ۵ گرم خرج انفجاری C4.



شکل ۱۶- نتایج شبیه‌سازی نمونه با هسته به ضخامت ۳۰ میلی‌متر پوکه معدنی.



شکل ۱۴- نتایج شبیه‌سازی برای نمونه با هسته به ضخامت ۳۰ میلی‌متر خاکاره و ۵ گرم خرج انفجاری.



شکل ۱۷- نتایج تجربی نمونه با هسته پوکه معدنی به ضخامت ۳۰ میلی‌متر و خرج ۵ گرم C4.

در آزمون چهارم از ۸۰ میلی‌متر پوکه معدنی به‌عنوان هسته پانل ساندویچی و ۵ گرم خرج انفجاری استفاده شده است و نتیجه شبیه‌سازی و مقدار تغییر شکل مرکز ورق در شکل (۱۸) مشاهده می‌شود. مرکز ورق حدود ۱۵/۵ میلی‌متر تغییر شکل یافته است. نتیجه آزمون تجربی نیز در شکل (۱۹) سمت راست آمده است.

شبهه‌سازی‌های عددی با دقت خوبی با یکدیگر تطابق دارند و در واقع نتایج آزمون تجربی مؤید صحت شبهه‌سازی اجزاء محدود است.

جدول ۷- مقایسه تغییر مکان مرکز ورق در آزمون تجربی و شبهه‌سازی خاکاره بر حسب mm.

ضخامت لایه مواد دانه‌ای (mm)	.	۳۰	۶۰	۸۰
شبهه‌سازی عددی	faliure	faliure	۲۰/۵	۱۹
آزمون تجربی	faliure	faliure	۱۸/۳	۱۷/۲
درصد خطا	-	-	۱۰/۷	۹/۴۷

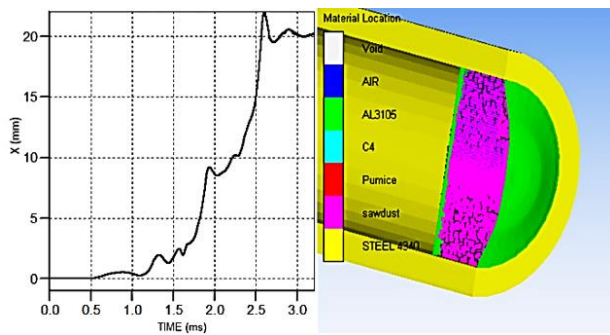
جدول ۸- مقایسه تغییر مکان مرکز ورق در آزمون تجربی و شبهه‌سازی پوکه معدنی بر حسب mm.

ضخامت لایه مواد دانه‌ای (mm)	۳۰	۶۰	۸۰
شبهه‌سازی عددی	۲۱	۱۷/۵	۱۵/۵
آزمون تجربی	۱۹/۳	۱۶	۱۴/۸
درصد خطا	۸/۰۹	۸/۵۷	۸/۷۸

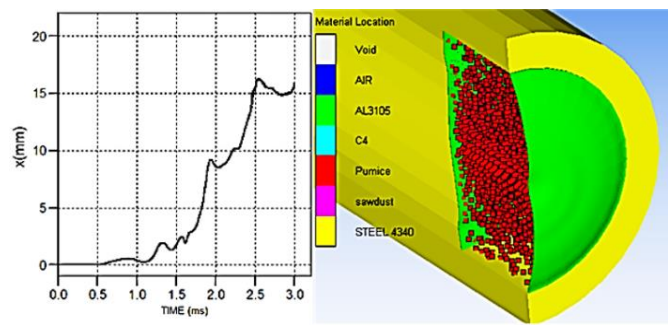
در شبهه‌سازی مربوط به آزمون پنجم از هسته با ضخامت ۶۰ میلی‌متر خاکاره و ۳/۵ گرم خرج انفجاری (با در نظر گرفتن ۰/۵ گرم برای چاشنی در مجموع ۴ گرم) استفاده شده است. نتیجه شبهه‌سازی در شکل (۲۰) قابل مشاهده است. با توجه به شکل مرکز ورق حدود ۲۰ میلی‌متر تغییر شکل داده است. نتیجه آزمون تجربی این نمونه نیز در شکل (۲۱) وسط مشاهده می‌شود.

در شبهه‌سازی ششم از ۸۰ میلی‌متر خاکاره در هسته و ۳/۵ گرم خرج انفجاری استفاده شده است که با توجه به نتیجه شبهه‌سازی در شکل (۲۲) تغییر شکل مرکز ورق حدود ۱۹ میلی‌متر است. نمونه آزمون تجربی در شکل (۲۳) قابل رؤیت است.

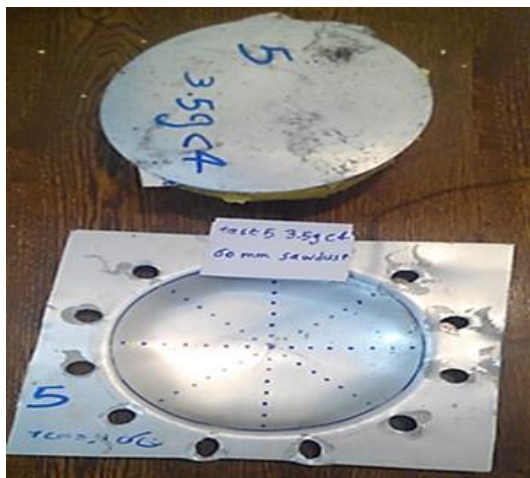
نتایج شبهه‌سازی هفتم برای پانل ساندویچی با هسته به ضخامت ۶۰ میلی‌متر پوکه معدنی و ۵ گرم خرج انفجاری در شکل (۲۴) مشاهده می‌گردد. با توجه به این تصویر، مرکز ورق در این حالت حدود ۱۸ میلی‌متر تغییر شکل داشته است. نمونه آزمون تجربی نیز در شکل (۲۵) قابل مشاهده است. نتایج مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمون تجربی و شبهه‌سازی عددی در جدول‌های (۷ و ۸) آمده و مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد نتایج آزمون‌های تجربی و



شکل ۲۰- نتیجه شبهه‌سازی نمونه با هسته به ضخامت ۶۰ میلی‌متر خاکاره.



شکل ۱۸- نتایج شبهه‌سازی نمونه با هسته به ضخامت ۸۰ میلی‌متر پوکه معدنی.



شکل ۲۱- نتایج تجربی نمونه با هسته خاکاره به ضخامت ۶۰ میلی‌متر و خرج ۳/۵ گرم C4.

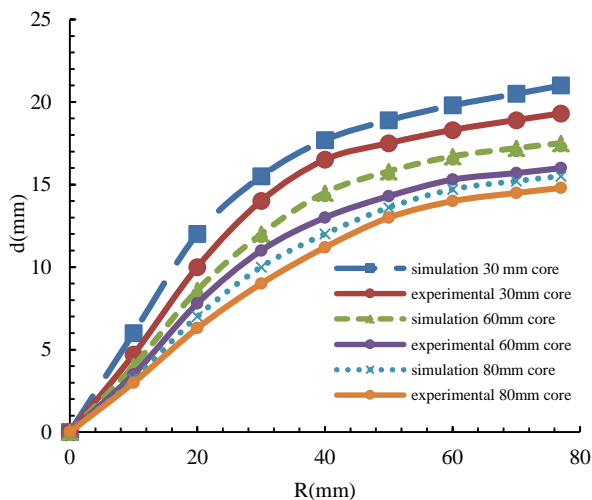


شکل ۱۹- نتایج تجربی نمونه با هسته پوکه معدنی به ضخامت ۸۰ میلی‌متر و خرج ۵ گرم ماده منفجره C4.

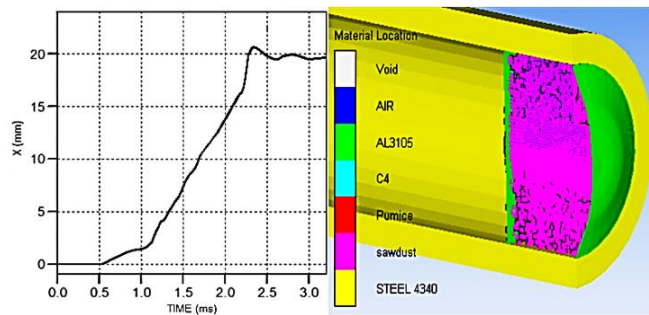
غیر از تغییر مکان مرکز ورق می‌توان شکل پروفیل ایجاد شده از آزمون تجربی و شبیه‌سازی عددی را نیز مورد مقایسه قرار داد. برای این منظور لازم است تغییر مکان همه نودهای یک خط از مش را در نمونه‌ها اندازه‌گیری کرد. در شبیه‌سازی عددی نیز به جای هر یک از این نودها یک سنجه در همان مختصات قرار داده شد که تغییر مکان آن نقطه از ورق را گزارش می‌کند. شکل‌های (۲۶ و ۲۷) مقایسه پروفیل تغییر شکل ورق در شبیه‌سازی و آزمون تجربی را برای نمونه‌های مختلف به ترتیب با هسته پوکه معدنی و خاکاره نشان می‌دهد.

موضوع اساسی که در مسائل انفجار مطرح است بیش فشار موج انفجار است که به ورق برخورد می‌کند، که برای ۵ و ۴ گرم خرج C4 در شکل (۱۲) نشان داده شده است. هر یک از این پانل‌ها در صدی از موج را کاهش می‌دهند و بیش فشار و ایمپالس جزء پارامترهای اساسی است که در موضوع استهلاک موج مطرح است. با توجه به نمودارها مشخص است که افزایش ضخامت نمونه‌ها تأثیر زیادی در افزایش میرایی بیش فشار موج انفجار نداشته است؛ اما در جدول‌های (۷ و ۸) مشاهده شد که میزان تغییر شکل مرکز ورق با افزایش ضخامت به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است.

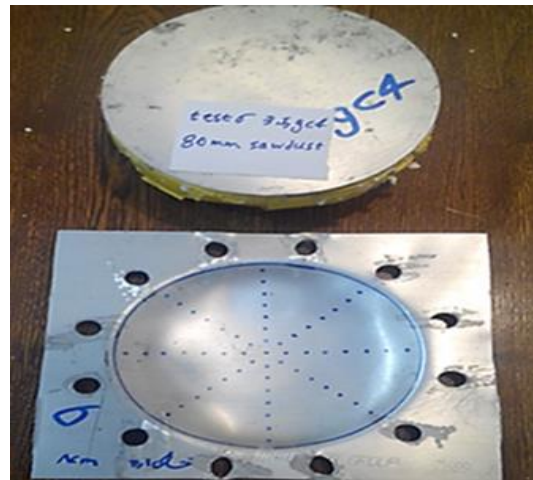
سازوکارهای استهلاک موج در دو ماده دانه‌ای استفاده شده در این پژوهش متفاوت است. در پوکه معدنی سازوکاری که بیشترین تأثیر را دارد خرد شدن ذرات است، در صورتی که در خاکاره این سازوکار چندان مؤثر نیست و فشرده شدن ذرات در یکدیگر می‌تواند سازوکار اصلی استهلاک در خاکاره باشد. در نمونه‌های با هسته پوکه معدنی موج پس از گذر از نمونه و برخورد به صفحه تکیه‌گاهی منعکس می‌شود و به موج کششی تبدیل می‌شود و این امر باعث می‌شود خرد شدن ذرات در نزدیکی تکیه‌گاه بیشتر اتفاق بیفتد و در مورد خاکاره نیز فشردگی ذرات در نزدیکی تکیه‌گاه بیشتر باشد.



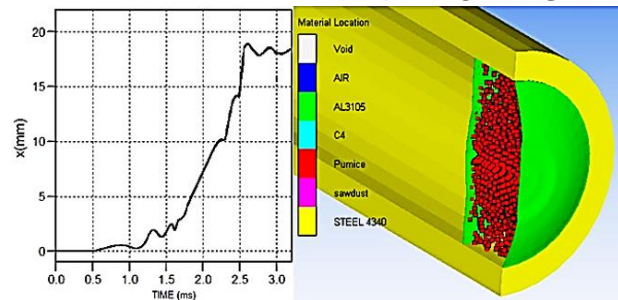
شکل ۲۶- مقایسه پروفیل تغییر شکل شبیه‌سازی عددی و آزمون تجربی پانل با هسته پوکه معدنی.



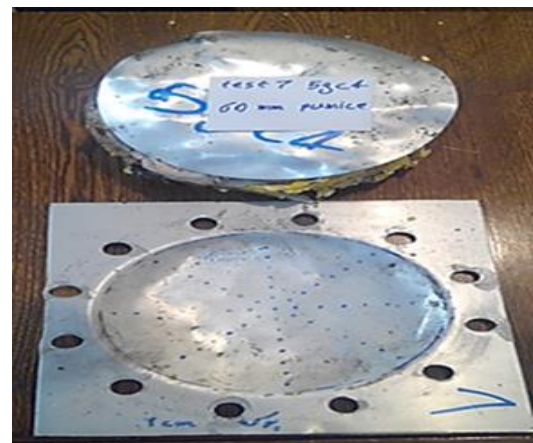
شکل ۲۲- نتایج شبیه‌سازی نمونه با هسته به ضخامت ۸۰ میلی‌متر خاکاره.



شکل ۲۳- نتایج تجربی نمونه با هسته خاکاره به ضخامت ۸۰ میلی‌متر و خرج ۳/۵ گرم C4.



شکل ۲۴- نتایج شبیه‌سازی نمونه با هسته به ضخامت ۶۰ میلی‌متر پوکه معدنی.



شکل ۲۵- نتایج تجربی نمونه با هسته پوکه معدنی به ضخامت ۶۰ میلی‌متر و خرج ۵ گرم C4.

مراجع

[1] Hostler, Stephen Richard. "Wave Propagation in Granular Materials"; Diss. California Institute of Technology, 2005.

[۲] ناطقی الهی، فریبرز؛ یخچالیان، منصور "بررسی عددی رفتار لرزه‌ای سیلوه‌های بتنی با در نظر گرفتن اندرکنش مصالح دانه‌ای و سازه"; نشریه علمی پژوهشی روش‌های عددی در مهندسی، دوره ۳۱، شماره ۲، صفحه ۱۸-۱، ۱۳۹۱.

[3] Nesterenko, V. F. "Shock (Blast) Mitigation by "Soft" Condensed Matter"; Pittsburgh Granular Material-Based Technologies Symposium, 2003, 759, 4310-4312.

[4] Pramod, B. V. N.; Raj, J. P.; Parashar, C. H.; Kartha, A.; Nagaraja, S. R. "Attenuation of Shock Waves by Using Porous Media"; Coimbatore, Int. Conf. Trends in Material Science and Inventive Materials, 2019, 301-307.

[5] Wang, J.; Chu, X. "Impact Energy Distribution and Wavefront Shape in Granular Material Assemblies"; Granular Matter 2019, 23, 1-11.

[6] Levy, A. "Shock Waves Interaction with Granular Materials"; Powder. Tech. 1999, 103, 212-219

[7] Liu, H.; Guo, Y.; Lin, W. "Simulation of Shock-Powder Interaction Using Kinetic Theory of Granular Flow"; Powder. Tech. 2015, 273, 133-144.

[8] Burgoyne, H. A.; Newman, J. A.; Jackson, W. C.; Daraio, C. "Guided Impact Mitigation in 2D and 3D Granular Crystals"; Procedia. Eng. 2015, 103, 52-59.

[9] Luo, H.; Xu, T.; Wang, X.; Lu, H. "Interaction of Shock Wave with Granular Materials"; Orlando. Annual Conf. Experimental and Applied Mechanics 2016, 35-43.

[10] Duan, W. S.; Zhang, Z. B.; Yang, L. "Shock Wave in a One-Dimensional Granular Chain Under Hertz Contact"; Phys. Rev. E. 2016, 94, 1-5.

[11] Kandan, K.; Khaderi, S. N.; Wadley, H. N. G.; Deshpande, V. S. "Surface Instabilities in Shock Loaded Granular Media"; J. Mech. Phys. Solids. 2017, 109, 217-240.

[12] Fan, H.; Li, S. "A Peridynamics-SPH Modeling and Simulation of Blast Fragmentation of Soil Under Buried Explosive Loads"; Comput. Method. Appl. M. 2017, 318, 349-381.

[13] Cernak, I. "The Importance of Systemic Response in the Pathobiology of Blast-Induced Neurotrauma"; Front Neurol. 2010, 1, Article No. 151.

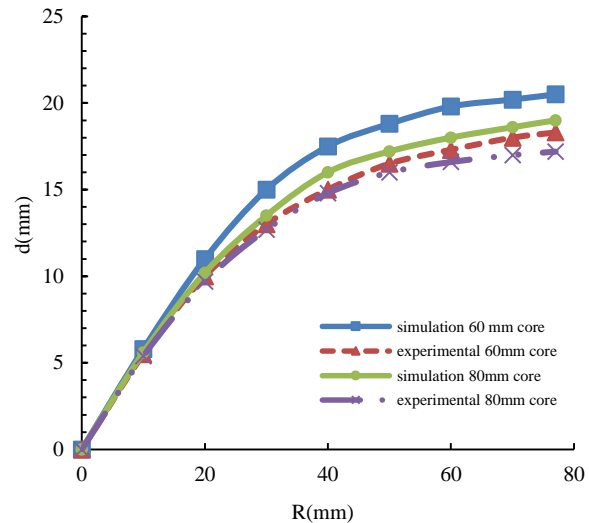
[14] Izadpanah Najmabad, S.; Gerdooei, M.; Ghaderi, S. H. "Determinatin of BBC2003 Yield Criterion Constant for Anisotropic Aluminum Alloy Sheets Based on Plane Strain Tensile Test"; Modares Mechanical Eng. 2015, 15, 127-135 (In Persian).

[15] Zakrisson, B.; Häggblad, H. Á.; Jonsén, P. "Modelling and Simulation of Explosions in Soil Interacting with Deformable Structures"; Open Eng. 2012, 2, 4, 532-550.

[16] Nedderman, R. M. "Statics and Kinematics of Granular Materials"; Cambridge University Press, 2005.

[17] Abbo, A. J.; Lyamin, A. V.; Sloan, S. W.; Hambleton, J. P. "A C2 Continuous Approximation to the Mohr-Coulomb Yield Surface"; Int. J. Solids. Struct. 2011, 48, 3001-3010.

[18] Lazcano, S. "Experiences in Pumice Soil Characterization by Surface Wave Analysis"; Int. Conf. Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Missouri, 2010.



شکل ۲۷- مقایسه پروفیل تغییر شکل شبیه‌سازی عددی و آزمون تجربی پانل با هسته خاکاره.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله توانایی مواد دانه‌ای پوکه معدنی و خاکاره در جذب انرژی انفجار مورد بررسی قرار گرفت. ورق جلویی نمونه که داخل شاک تیوب قرار گرفته تغییر شکل ملموسی در هیچ‌کدام از آزمایش‌ها نداشته و می‌توان نتیجه گرفت که تنها نقش انتقال انرژی موج به مواد دانه‌ای را دارد و خود تأثیر چندانی در میرایی موج ندارد. از میان مواد دانه‌ای استفاده شده پوکه معدنی تأثیر بهتری در مقایسه با خاکاره برای موج‌های قوی‌تر در جذب انرژی انفجار از خود نشان داد و حتی در ضخامت‌های پایین نیز تأثیر آن قابل توجه است و مانع از پارگی ورق پشتی شده است. اما اگر عامل وزن را هم در نظر بگیریم با توجه به چگالی بسیار کمتر خاکاره عملکرد بهتری داشته است و درصد بیشتری از انرژی موج را تلف می‌کند و گر چه استفاده از آن در ضخامت کم مؤثر نیست استفاده از آن با ضخامت زیاد می‌تواند بسیار مؤثر باشد. در موارد استفاده از هسته با ضخامت مناسب (۸۰ میلی‌متر خاکاره) تا ۸۸ درصد بیش فشار کاهش یافته است که نشان دهنده توانایی این مواد در استهلاک موج انفجار است. تغییر شکل مرکز ورق با تغییر ضخامت هسته تغییر قابل توجهی می‌کند (در پوکه معدنی با افزایش ضخامت از ۳۰ به ۶۰ میلی‌متر حدود ۲۰ درصد و از ۶۰ به ۸۰ میلی‌متر حدود ۱۲ درصد جابه‌جایی مرکز نمونه کاهش داشته)، اما با استفاده از شبیه‌سازی عددی مشاهده می‌شود که درصد کاهش بیش فشار موج بین دو ورق جلویی و تکیه‌گاهی به صورت قابل ملاحظه‌ای تغییر نکرده است. این امر نشان می‌دهد بیشترین میزان میرایی موج در نزدیکی ورق تکیه‌گاهی و پس از انعکاس موج رخ می‌دهد که سبب می‌شود در پانل با پوکه معدنی میزان خردشدگی ذرات و در نمونه‌های خاکاره میزان فشرده‌گی ذرات در نزدیکی ورق تکیه‌گاهی بیشتر باشد.

- between Experiment and Modeling"; J. Fail. Anal. Prev. 2005, 5, 7-17.
- [۲۵] خالقی میبدی، "فرآیند شکل‌دهی فلزات به کمک انفجار مخلوط گاز"; مجله علمی ترویجی تحقیق و توسعه مواد پراثرژی، سال چهارم، شماره ۲، صفحه ۸۵-۷۷، ۱۳۸۷.
- [26] Satioğlu, A. C. "Analysis of Mechanical Behavior of High Performance Cement Based Composite Slabs under Impact Loading"; Doctoral Dissertation, Middle East Technical University, 2009.
- [۲۷] گنجی، مجید "مطالعه عددی و تجربی اثر موج انفجاری روی ورق‌های تخت و V شکل فلزی"، پایان‌نامه دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، ۱۳۹۵.
- [19] Stasiak, M.; Molenda, M.; Bańda, M.; Gondek, E. "Mechanical Properties of Sawdust and Woodchips"; Fuel 2015, 159, 900-908.
- [20] Bommer, J. J.; Rolo, R.; Mitroulia, A.; Berdousis, P. "Geotechnical Properties and Seismic Slope Stability of Volcanic Soils"; Proc. of the 12th European Conf. on Earthquake Engineering, London, 2002.
- [21] Cooper, P. W. "Explosives Engineering"; VCH Pub., 1996.
- [22] Laine, L.; Larsen, O. P. "Proposal on How to Model the Unloading in a Compaction Equation of State Based Upon Tri-Axial Tests on Dry Sand"; San Digeo, 80th Shock & Vibration Symposium, 2009.
- [23] Autodyn, "Theory Manual"; Century Dynamics INS: Revision, 2005.
- [24] Gray, G. T. R.; Maudlin, P. J.; Hull, L. M.; Zuo, Q. K.; Chen, S. R. "Predicting Material Strength, Damage, and Fracture the Synergy