

مروری بر روش های عددی شبیه سازی موج بلس ت انفجار

سینا باقری^۱، سعید توانگر روستا^{۲*}، محمدرضا صابر^۳، سید هادی معتمد الشریعتی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ۲ و ۳ - استادیار ۴ - مربی

تهران - دانشگاه صنعتی مالک اشتر

*Email: tavanss@yahoo.com

(تاریخ وصول: ۹۵/۸/۲۳، تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۳)

چکیده

با گسترش فناوری و افزایش قدرت محاسباتی، امکان شبیه سازی موج بلس ت انفجار دقیق تر از قبل ایجاد شده است. برای انجام یک شبیه سازی عددی مناسب علاوه بر روش حل عددی، عوامل دیگری مثل: مدل آشفتگی، معادله ی حالت محصولات انفجار و روش اعمال انرژی انفجار موثر بوده و می توانند موجب نزدیک تر شدن نتایج شبیه سازی عددی به نتایج آزمایش های تجربی شوند. این مقاله علاوه بر بررسی روش های عددی، عوامل موثر بر نتایج شبیه سازی عددی موج بلس ت انفجار را مورد بررسی قرار داده و تلاش های محققین در این زمینه را مرور کرده است. به عنوان نتیجه ی مقاله ی حاضر، مشخص گردید که استفاده از روش های عددی برای شبیه سازی موج بلس ت می تواند تا حدود ۵٪ خطا با استفاده از روش حجم محدود و کمتر ۳٪ با استفاده از روش المان محدود داشته باشد. همچنین اضافه کردن ترم چشمه به معادله انرژی، دقیق ترین نتایج را با استفاده از این روش خصوصاً برای مواد منفجره حاوی پودر فلزی ارائه می دهد.

واژه های کلیدی: انفجار، روش های عددی، موج بلس ت، مدل آشفتگی، معادله حالت.

The Numerical Simulation Methods of the Explosion Blast Wave: A Review

S. Bagheri¹, S. Tavangar Roosta^{2*}, M. R. Saber³, S.H. Motamed Shariati⁴

Maleke Ashtar University of Technology, Tehran

(Received: 01/12/2016, Accepted: 02/21/2017)

Abstract

As the technology and computation power developing, the simulation of the explosion blast wave becomes more accurate. Besides the numerical methods, there are some other effectives like: turbulence model, equation of state and the explosion models which affect the accuracy of the blast wave simulation results. This paper reviewed the numerical methods and also other effectives in the simulation of the dense explosives explosions and gas explosions blast waves. As a result of this paper, have found that using numerical methods for simulation of blast wave, could have about 5% error by using finite volume method and less than 3% error by using finite element method. Also adding the source term to the energy equation could have the best results, especially for explosives which has the metallic powder.

Keywords: Numerical Methods, Blast Wave, Turbulence Model, Equation of State.

۱- مقدمه

ترتیب در مقاله‌ی حاضر در هر بخش کارهای انجام گرفته توسط محققین مرور شده و پس از آن نقاط قوت و ضعف هر روش بیان می‌گردد. همچنین خلاصه‌ای از کارهای انجام گرفته در حوزه شبیه‌سازی عددی موج بلست در جداولی در انتهای مقاله به منظور امکان مقایسه مرور می‌شود. علاوه بر این، خلاصه‌ای از روش‌های عددی مورد استفاده در نرم‌افزارهای رایج شبیه‌سازی عددی موج بلست، جهت جمع‌بندی نهایی به صورت خلاصه در یک جدول بررسی خواهد شد.

۲- کاربردهای شبیه‌سازی موج بلست

شبیه‌سازی موج بلست با روش‌های عددی به منظور کاربردهای متفاوتی صورت می‌گیرد. دسته‌ی اول تحقیقاتی است که در راستای بررسی اثر حضور موانع بر پارامترهای موج بلست انجام شده است. برخی محققین مثل اسکلاوانوس و ریگاس [۷] و سوگیاما و همکارانش [۶] شبیه‌سازی موج بلست را به منظور بررسی اثر حضور موانع بر انتشار موج بلست در محیط‌های باز و برخی دیگر مثل لوچیونی و آمبروسینی [۸]، کلینشمیت [۹] و برگر و همکارانش [۳] به منظور بررسی اثر موانع بر انتشار موج بلست در محیط‌های بسته انجام داده‌اند. در محیط باز مشابه آنچه در شکل (۱) مربوط به کار تحقیقاتی اسکلاوانوس و ریگاس [۷] مشاهده می‌شود، ماده‌ی منفجره در فاصله‌ی مشخصی از موانع منفجر شده و موج بلست مربوط به آن در نقاط مختلف هندسه‌ی مورد بررسی با استفاده از تعدادی گنج ثبت می‌شود.



شکل ۱- شبیه‌سازی اثر حضور موانع بر مشخصات موج بلست در محیط باز [۷].

اما در انفجار درون محیط بسته مانند آنچه در شکل (۲) مربوط به کار شا و همکارانش [۱۰] مشاهده می‌شود، موج بلست انفجار درون هندسه‌ی محدود انتشار یافته و معمولاً اثر حضور موانع با اشکال هندسی مختلف بر کاهش شدت موج بلست بررسی می‌گردد. کلاتر و همکارانش [۱۱]، رمنیکف و رز [۲]، شا و همکارانش [۱۰]، فلود و همکارانش [۱۲] و ژو و همکارانش [۱۳] نیز اثر هندسه‌ی موانع بر خصوصیات موج بلست را بررسی کرده‌اند. در تمامی تحقیقات انجام شده در محیط‌های باز و بسته، هدف اصلی اثبات دقت شبیه‌سازی

بررسی رفتار موج بلست و ساختار آن در محیط‌های مختلف از جمله مسائلی است که همواره مورد توجه محققان بوده است. این موضوع از آنجایی دارای اهمیت است که دانش مربوط به آن می‌تواند برای اندازه‌گیری و ارزیابی خطر انفجار در طراحی‌های مهندسی مورد توجه قرار بگیرد [۱]. گزارش‌های بسیاری در سرتاسر جهان از خسارات مربوط به انفجارات ناخواسته منتشر می‌شود، درحالی که می‌توان با تحقیقات گسترده در زمینه‌ی ارزیابی اثرات موج بلست، از ساختمان‌ها در مقابل این حملات محافظت کرد [۲]. از طرفی، انفجاراتی که در نزدیکی تونل‌ها به وقوع می‌پیوندد و می‌تواند موجب وارد شدن خسارت به انبارهای زیرزمینی شود، نمونه‌ای از انتشار موج بلست در یک محیط بسته است و باید مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد [۳]. سه روش "آزمایش‌های تجربی"، "مدل‌های تحلیلی" و "شبیه‌سازی عددی" برای بررسی موج بلست مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به هزینه‌ی زیاد و دشوار بودن آزمایش‌های تجربی، استفاده از آن برای تخمین اثرات موج بلست و طراحی آزمایش‌های کاربردی در این زمینه پرهزینه و در برخی موارد غیرممکن است [۴]. مدل‌های تحلیلی نیز تنها می‌توانند یک تخمین اولیه برای مسئله ارائه دهند، درحالی که روش‌های عددی بسیار دقیق‌تر بوده و در سال‌های اخیر با استقبال گسترده‌ای مواجه شده‌اند. در روش‌های عددی تلاش محققین بر روی ارائه‌ی روشی بهبود یافته به منظور حل مسئله با بیشترین دقت و در کمترین زمان محاسباتی متمرکز شده است.

برای بهبود نتایج یک شبیه‌سازی عددی، عوامل مختلفی موثرند که یکی از آن‌ها، بهبود روش اعمال انرژی انفجار است. برای اعمال انرژی پتانسیل انفجارهای گازی در شبیه‌سازی عددی، روش‌هایی مثل روش معادل TNT، روش انرژی چندگانه TNO، روش بیکر-استرلو^۱ و ... وجود دارد که از میان آن‌ها تنها روش معادل TNT قابل بسط به انفجار مواد منفجره‌ی جامد است [۱]. البته برای انفجار مواد منفجره‌ی جامد، روش‌های دیگری مثل روش بالن فشرده و روش اضافه کردن ترم چشمه به معادله‌ی انرژی نیز استفاده می‌شوند. همچنین مدل آشفنگی به عنوان عاملی تاثیرگذار بر نتایج شبیه‌سازی عددی شناخته شده و می‌توان با استفاده از مدل‌های آشفنگی مناسب به نتایج بهتری در شبیه‌سازی عددی موج بلست دست یافت. علاوه بر این، استفاده از معادلات حالت مناسب برای گازهای انفجار مثل معادله حالت JWL^۲ یا معادله حالت BKW^۳ [۵] می‌تواند به بهبود نتایج شبیه‌سازی عددی کمک کند. در تحقیق حاضر علاوه بر روش‌های عددی مختلف، سایر عوامل موثر بر دقت شبیه‌سازی عددی موج بلست انفجار مواد منفجره جامد و انفجارهای گازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این

1- Baker-Strehlow Method

2- Jones-Wilkins-Lee Equation of State

3- Becker-Kistiakowsky-Wilson Equation of State

همکارانش [۲۳] نیز برهمکنش موج بلست با سازه را با روش‌های مختلف عددی شبیه‌سازی کرده و تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی برقرار کرده‌اند. همچنین گسترش انفجارات تروریستی در محیط‌های بسته مثل واگن قطار، ایده‌ی استفاده از دریچه به منظور کاهش اثرات موج بلست را مطرح کرده است. افرادی مثل اسکلاوانوس و ریگاس [۲۴]، لارچر و همکارانش [۲۵] برای بررسی این موضوع و سنجش میزان تاثیر دریچه بر افزایش میرایی موج بلست، شبیه‌سازی عددی انفجار در محیط‌های یاد شده را همانطور که در شکل (۳) مربوط به شبیه‌سازی لارچر و همکارانش [۲۵] مشاهده می‌شود، انجام داده‌اند. به طور کلی در تمامی تحقیقات انجام گرفته در این حوزه به اثربخشی قطعی دریچه‌ها برای افزایش میرایی موج بلست انفجار اشاره شده است.

شبیه‌سازی انفجار و پخش موج بلست در محیط‌هایی غیر از هوا (از جمله زیر آب و خاک) نیز به منظور بررسی اثرات انفجار در این محیط‌ها توسط محققینی مثل جایاسینگ و همکارانش [۲۶] انجام گرفته است. شدت موج بلست در هر محیط وابسته به سرعت صوت در آن محیط و چگالی محیط بوده و می‌تواند تا چندین برابر انفجار در هوا باشد. شکل (۴) شبیه‌سازی انفجار در زیر خاک را نشان می‌دهد. نتایج تحقیقات مربوط به انفجار در زیر خاک نشان می‌دهد که تنش‌های فشاری در خاک در نزدیکی خرج انفجاری زیاد است. همچنین نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که قسمت‌های بالای توده‌های خاکی در مقابل انفجار به شدت آسیب‌پذیر است.

۳- روش‌های حل عددی برای شبیه‌سازی موج بلست انفجار

پس از بررسی مسائل شبیه‌سازی انفجار در تحقیقات گذشته مشخص گردید که به طور کلی مسائل تحلیل انفجار معمولاً با یکی از پنج روش عددی: تفاضل محدود^۱، المان محدود^۲، المان مرزی^۳، هیدرودینامیک ذرات صاف^۴ و حجم محدود^۵ حل می‌شوند. هر یک از این روش‌ها با توجه به فرضیات انجام شده در آن و ویژگی‌هایی که دارند، برای حل نوع خاصی از مسائل انفجار مورد استفاده قرار می‌گیرند که در ادامه به تفکیک هر یک از این روش‌ها بررسی خواهند شد.

۳-۱- روش تفاضل محدود

در این روش عددی، مشتقاتی که در معادلات دیفرانسیل پاره‌ای ظاهر می‌شوند بر حسب معادلات تفاضل محدود جایگزین می‌گردند. این روش معمولاً از بسط تیلور برای گسسته‌سازی معادلات حاکم استفاده

عددی مسئله با روش‌های مختلف عددی به وسیله‌ی مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایش‌های تجربی بوده، که با مقادیر مختلفی از خطا این هدف محقق شده است. نتایج بدست آمده از مجموع این تحقیقات، شبیه‌سازی عددی را به عنوان جایگزینی مطمئن برای آزمایش‌های تجربی پرخطر معرفی کرده است. همچنین از میان مقالات ذکر شده، اسکلاوانوس و ریگاس [۷] به کمک مقایسه دو مدل آشفتگی SST^۱ و k-ε، سوگیاما و همکارانش [۶] با بکارگیری معادله حالت JWL و فلود [۱۲] ضمن ارائه‌ی روشی سریع برای شبیه‌سازی عددی، سعی بر بهبود شبیه‌سازی عددی انفجار در محیط باز داشته‌اند. در محیط بسته و به دنبال یافتن موانعی با اشکال هندسی مناسب برای افزایش میرایی موج بلست، شا و همکارانش [۱۰] ضمن تطابق مناسب نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج مسئله‌ی شاردین^۲ به عنوان مرجع اعتبارسنجی، همانطور که در شکل (۲) نیز قابل مشاهده است، ردیف موانع با شکل هندسی مثلث قائم الزاویه را به عنوان شکل هندسی بهینه مانع برای افزایش میرایی موج بلست در محیط بسته شناسایی کرده‌اند. برگر و همکارانش [۳] نیز توانسته‌اند به فهم دقیق‌تری از مکانیسم میرایی موج بلست با استفاده از مانع در محیط بسته دست یابند. اسکلاوانوس و ریگاس [۱۴] به عنوان نتیجه‌ی شبیه‌سازی عددی خود بیان کرده‌اند که موج بلست در طول یک تونل سرعت مافوق صوت خود را حفظ کرده و محدودیت فضا و به تبع آن زوایای برخورد کم، تشکیل موج شوک را بر موج فشاری ارجحیت بخشیده است. از طرفی بنزلاما و همکارانش [۱۵] با استفاده از شبیه‌سازی عددی، رابطه‌ای منطقی بین هندسه یک تونل بسته و مشخصات انفجار ایجاد کرده‌اند. علاوه بر این، وو و همکارانش [۱۶] تاثیر استفاده از خرج‌های استوانه‌ای بر دیواره‌های یک محفظه بسته و رودریگوئز و همکارانش [۱۷] نیز شبیه‌سازی عددی انفجار را در محیط‌های محدود شده بررسی کرده‌اند.

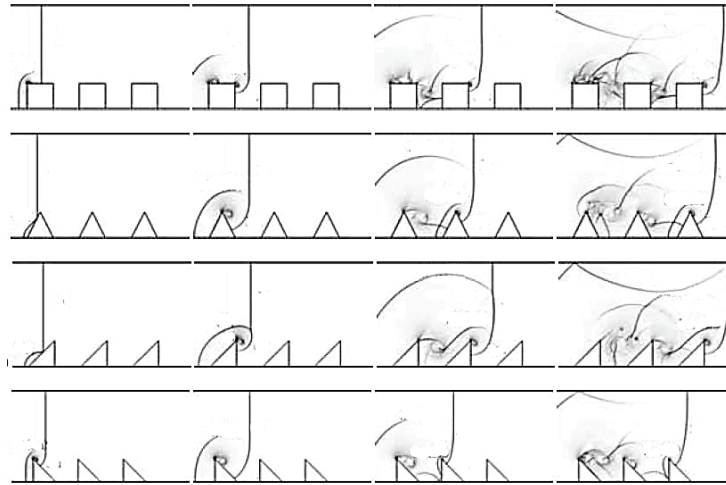
میزان تاثیر انفجار بر روی سازه‌های جامد نیز از جمله مواردی است که با انجام شبیه‌سازی‌های عددی موج بلست و با اندازه‌گیری پارامترهای مربوط به تنش بر روی سازه‌ها توسط محققین بررسی شده است. تام [۱۸] به منظور فهم اثر انفجارات فاصله‌ی نزدیک، اثر موج بلست بر روی ردیف استوانه‌های آلومینیومی را شبیه‌سازی کرده که تطابق خوبی با نتایج تجربی داشته است. همچنین یوسف و همکارانش [۱۹] میزان مقاومت بلوک بتنی تقویت شده را در مواجهه با موج بلست انفجار مواد منفجره با وزن‌های مختلف، با شبیه‌سازی عددی مشخص کرده‌اند. علاوه بر این، دنگ و ژین [۲۰] میزان تخریب یک پل با اسکلت فلزی، ژانگ و همکارانش [۲۱] میزان مقاومت بتن مسلح شده با میلگردهای فلزی، پنگ [۲۲] و گروژسیک و

3- Finite Difference Method
4- Finite Element Method
5- Boundary Element Method
6- Smooth Particles Hydrodynamics
7- Finite Volume Method

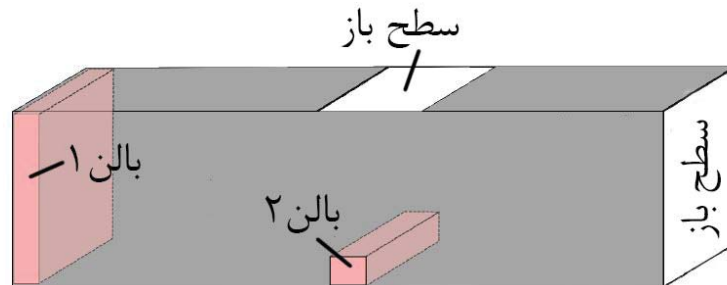
1- Shear Stress Transport
2- Schardin's Problem

در کتاب موج شوک [۲۷] برای توصیف ساختار موج شوک با معادلات پایدار مرتبه دوم، لیو و همکارانش [۲۸] و پریچارد و همکارانش [۲۹] نیز از روش تفاضل محدود برای شبیه‌سازی موج بلست استفاده کرده‌اند. علاوه بر مقالات ذکر شده، ژو و هالو [۱۳] و لوچیونی و آمبروسینی [۸] برای بررسی اثر انفجار بر روی سازه‌های پشت مانع، نرم افزار AUTODYN3D و روش المان محدود را بکار گرفته‌اند. پنگ [۲۲] نیز برای بررسی برهمکنش بین سازه‌ها و موج بلست، روش تفاضل محدود را بکار گرفته است که معادلات بقای اوپلر دو بعدی را حل می‌کند.

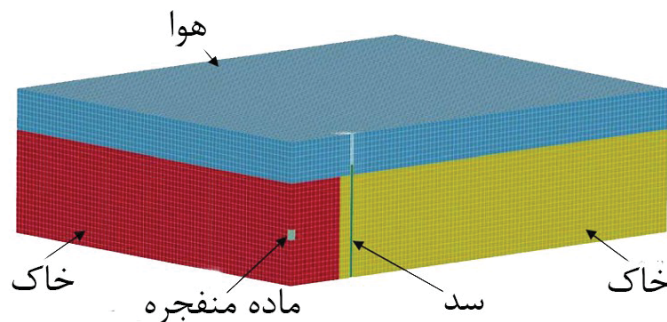
می‌کند. بنابراین، برای یک دامنه حل دو بعدی شبکه‌ای از سلول‌ها داخل دامنه محاسباتی قرار می‌گیرد و تقریب تفاضلی برای نقاط داخلی اعمال می‌شود. پس از مقداری ساده‌سازی ریاضی، حاصل یک دستگاه معادلات جبری خطی خواهد بود که بدون اعمال شرایط مرزی تکین می‌باشد. این دستگاه بعد از اعمال شرایط مرزی دارای جوابی یکتا است که تمام شرایط مرزی مسئله واقعی را ارضاء می‌کند. می‌توان گفت که روش تفاضل محدود در بین روش‌های عددی موجود ساده‌ترین روش به حساب می‌آید. جزئیات روش تفاضل محدود و نحوه‌ی حل عددی مسئله‌ی موج بلست با این روش به طور کامل در مقاله‌ی پنگ [۲۲] آمده است. یامادا و همکارانش و کلین و همکارانش، در مقالات خود



شکل ۲- شبیه‌سازی اثر حضور مانع بر مشخصات موج بلست در محیط بسته [۱۰].



شکل ۳- شبیه‌سازی اثر حضور دریچه بر مشخصات موج بلست در هندسه‌ی مشابه واگن [۲۵].



شکل ۴- شبیه‌سازی موج بلست در زیر خاک [۲۶].

۳-۲- روش المان محدود

در روش المان محدود تمام دامنه‌ی حل به قسمت‌های کوچک محدودی تقسیم شده (به همین دلیل به آن المان محدود می‌گویند) و رفتار موج بلست بر روی هر المان با استفاده از معادلات حاکم توصیف می‌شود. تمامی این المان‌های کوچک در نهایت تلفیق می‌شوند و ملزومات پیوستگی و تعادل بین المان‌های همسایه ارضا می‌گردد. شرایط مرزی مسئله اصلی به دستگاه معادلات اعمال می‌شود و جوابی یکتا برای دستگاه معادلات کلی به دست می‌آید. لیو و همکارانش [۲۸] از روش المان محدود برای مدل کردن رفتار سازه‌ها در انفجار زیر آب در کنار سایر روش‌ها استفاده کرده‌اند. اکثر محققین نیز همانند لیو و همکارانش [۲۸] از این روش به دلیل خصوصیتی که دارد در شرایطی استفاده کرده‌اند که بخشی از مسئله، بررسی موج بلست بر روی سازه‌های جامد باشد. همچنین جایاسینگ و همکارانش [۲۶] به دلیل توانایی این روش در توصیف برهمکنش پیچیده دو توده خاکی، گروژپچ و همکارانش [۲۳] به منظور بکارگیری روش‌های پیشرفته دینامیک غیرخطی برای توصیف برهمکنش سازه - سیال، لارچر و همکارانش [۲۵ و ۳۰] در استفاده از نرم‌افزار EUROPLEXUS با قابلیت محاسبات سریع برهمکنش سازه - سیال و آلیا و سولی [۴] نیز از روش المان محدود برای شبیه‌سازی موج بلست بهره گرفته‌اند.

روش المان محدود به منظور حل مسائل دینامیک پیوسته و با توصیف حرکت اویلری (حرکت سیال از طریق گره‌های ثابت در فضا)، لاگرانژی (حرکت شبکه با سرعت محلی سیال)، جفت اویلری - لاگرانژی (CEL^۱) و اویلری - لاگرانژی دلخواه (ALE^۱) در دینامیک محیط‌های پیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۱]. در روش لاگرانژی هر گره منفرد شبکه محاسباتی، جزء ماده مربوط به خود را در حرکت دنبال می‌کند. در این روش شبکه محاسباتی بر روی ماده ثابت می‌ماند و به دلیل ثابت ماندن جرم در هر المان، نیازی به محاسبه‌ی شار جرمی در مرزهای داخلی نیست. این روش معمولاً در مکانیک سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. توصیف لاگرانژی اجازه‌ی جستجوی ساده‌ی سطوح آزاد و سطوح مشترک بین مواد مختلف را می‌دهد اما نقطه‌ی ضعف آن ناتوانی‌اش در دنبال کردن گسستگی‌های شبکه‌ی محاسباتی است و لذا در آنالیز برهمکنش موج شوک - سازه دارای محدودیت است. نقطه‌ی مقابل الگوریتم لاگرانژی، الگوریتم اویلری است که برای دینامیک سیالات مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این الگوریتم شبکه محاسباتی ثابت است و حرکت کاتوره‌ای با توجه به گره صورت می‌گیرد. در روش اویلری گسستگی‌های بزرگ در دامنه‌ی محاسباتی قابل مدیریت است [۳۲]. چن و لیو [۳۳] از روش المان محدود اویلری برای شبیه‌سازی انفجار خرج‌های خاص بهره گرفته‌اند.

از طرف دیگر روش "جفت اویلری - لاگرانژی" هر دو روش اویلری و لاگرانژی را در نواحی مجزای دامنه استفاده می‌کند. یکی از استفاده‌های روش CEL برای برهمکنش‌های سازه - سیال است که در آن جسم جامد (موادی که طول ماده نقش برجسته دارد) در قالب لاگرانژی و رفتار سیال در قالب اویلری بررسی می‌شود. در این روش نواحی اویلری و لاگرانژی پیوسته با هم برهمکنش دارند [۳۱]. مامراک [۳۴] برای شبیه‌سازی انفجار در هوا و بررسی اثر آن بر روی موانع سخت از روش المان محدود CEL استفاده کرده و موفق به تطبیق نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی با سرعت محاسبات مناسبی شده است. لیو و همکارانش [۲۸] و همچنین گروژپچ و همکارانش [۲۳] نیز از روش المان محدود CEL به دلیل توانایی این روش در شبیه‌سازی توام دو محیط لاگرانژی و اویلری به طور همزمان در یک مسئله استفاده کرده‌اند. در نتایج این تحقیقات عنوان شده است که در روش CEL و در حین حل عددی، نیازی به تطبیق شبکه - بندی برای محیط اویلری نبوده و تنها شبکه‌بندی محیط لاگرانژی با تغییرات ایجاد شده تطبیق می‌یابد. همین امر موجب افزایش سرعت و دقت حل مسئله با این روش شده است.

اما روش چهارم توصیف حرکت، روش المان محدود لاگرانژی - اویلری دلخواه (ALE) است. فلسفه‌ی روش ALE انتخاب آزادانه‌ی حرکت گره به منظور افزایش دقت و کارایی شبیه‌سازی است. المان‌های اصلی الگوریتم ALE در یک فاز لاگرانژی صریح، یک فاز ناحیه‌ی اصلاحی که در آن یک گره جدید تعریف می‌شود و یک فاز نگاشت که در آن حل لاگرانژی به گره جدید انتقال می‌یابد قرار دارند. حرکت لاگرانژی در هر گام زمانی محاسبه می‌شود که با یک فاز نگاشت که در آن شبکه فضایی اصلاح می‌شود همراه است. اصلاح می‌تواند به شکل اصلی یا بعضی شکل‌های مفید (بین لاگرانژی و اویلری) باشد. حرکات شبکه ALE عمدتاً بر مبنای حفاظت از یک شبکه یکفرم، و نه گرفتن پدیده‌ی فیزیکی است. روش ALE دینامیک سیالات به همراه دینامیک سازه‌ها را مستقیماً باهم و بدون هم‌جواری دو سیستم مختصات اویلری و لاگرانژی مشابه آنچه در روش CEL اتفاق می‌افتد بکار گرفته است. المان‌های سازه در قاب ALE نمی‌توانند مستقیماً به کار گرفته شوند. روش ALE روش ترجیح داده شده برای بررسی پاسخ سازه‌ها در انفجار زیر آب و برای تغییر شکل‌های بزرگ است. این روش توانمندی مدل کردن بسیار موثرتر دینامیک سیالات و دینامیک سازه‌ها را دارد [۳۱]. اکثر کدهای ALE از گره‌های اتصال ثابت، در دو بعد جزئی و اشکال مربعی و ترکیب مربعی - مثلثی استفاده می‌کنند [۳۵]. وبستر [۳۱] برای شبیه‌سازی اثر انفجار بر روی سازه‌های مشابه قایق، موفق شده است تا با استفاده از روش ALE به خوبی تغییر شکل قایق را در کنار محیط اویلری آب و هوا مدل کند. پنگ [۲۲] برای شبیه‌سازی موج بلست و سازه و اسلاویک [۳۶] با

1- Coupled Eulerian Lagrangian
2- Arbitrary Lagrangian-Eulerian

می‌شود. ارزیابی خواص هیدرودینامیکی ذرات منفرد با استفاده از برهمکنش آن‌ها با ذرات همسایه‌شان بدست می‌آید. با توجه به اینکه ذرات با جریان حرکت می‌کنند، فواصل ذرات مستمراً تغییر می‌کند و در نتیجه نوعی انطباق‌پذیری طبیعی در این روش وجود دارد [۴۱]. روش SPH روشی گران قیمت بوده و در مقایسه با روش FVM از دقت کمتری برخوردار است [۴۲]. امانگ و همکارانش [۴۱] در مقاله‌ی خود برای مطالعه‌ی پخش و انعکاس موج بلست TNT و C-4 از حالتی خاص از مدل SPH با عنوان مدل RSPH یا همان هیدرودینامیک ذرات صاف منظم استفاده کرده‌اند. لیو و همکارانش [۲۸] و وانگ و همکارانش [۴۳] نیز از جمله کسانی هستند که از این روش عددی برای شبیه‌سازی انفجار بهره گرفته‌اند. در سه تحقیق ذکر شده، سرعت بالای روش SPH به دلیل عدم استفاده از شبکه‌بندی به عنوان مزیت اصلی آن در مقایسه با سایر روش‌های عددی عنوان شده است.

۳-۵- روش حجم محدود

یکی از دقیق‌ترین روش‌های عددی مورد استفاده در حل عددی موج بلست، خصوصاً زمانی که بررسی اثرات موج بلست بر روی سازه‌های جامد مدنظر نباشد، روش حجم محدود است. محققان زیادی مثل اسکلاوانوس و ریگاس [۷۱]، بنزما و همکارانش [۴۴ و ۴۵]، پنگ [۲۲]، آلپمن [۴۶ و ۴۷]، کلاتر و همکارانش [۱۱]، رمنیکف و رز [۲]، شا و همکارانش [۱۰]، تانگ [۴۲]، سوال و همکارانش [۴۸] و اویستروویست و مونویر [۴۹] از این روش برای شبیه‌سازی عددی موج بلست و انتشار آن در محیط آزاد یا با مانع استفاده کرده‌اند. روش عددی حجم محدود به عنوان بهترین روش برای شبیه‌سازی عددی مسائل دینامیک سیالات شناخته شده و دلیل ماهیت سیالاتی موج بلست، تعداد زیادی از محققین از این روش استفاده کرده‌اند. در این روش محدودده حل با استفاده از گره‌هایی به حجم‌های کنترل تقسیم می‌شود. معادلات حاکم بر روی هر حجم کنترل انتگرال‌گیری شده و مقادیر مربوط به هریک از معادلات (جرم، ممنتوم و انرژی) برای هر سلول به صورت مجزا نگه داشته می‌شود. برای بدست آوردن جواب برای جریان‌های واقعی باید یک روش عددی به کار گرفته شود تا معادلات انتگرالی با تقریب‌های جبری آن‌ها جایگزین شده که در نتیجه بتوان آن‌ها را با استفاده از یک روش عددی حل کرد. برای این منظور معادلات حاکم که به صورت معادله دیفرانسیل جزئی هستند بر روی تمامی حجم کنترل‌ها انتگرال‌گیری می‌شوند. سپس هریک از ترم‌های معادلات انتگرالی حاصله که نمایانگر فرآیندهای جریان همچون جابه‌جایی، نفوذ و چشمه، به سیستمی از معادلات جبری با استفاده از تقریب تفاضل محدود تبدیل شده و به صورت تکرار بر روی تمامی گره‌های مجاور سلول حل می‌شوند تا زمانی که باقیمانده حلقه تکرار به مقدار در نظر گرفته شده نزدیک شود [۱].

بهره‌گیری از نرم‌افزار LS-DYNA انتقال موج فشاری به سازه درون سیال را با استفاده از روش ALE بررسی کرده‌اند. همچنین لینینگر و همکارانش [۳۷] برای شبیه‌سازی سه‌بعدی انفجار مواد منفجره پلاستیکی با استفاده از نرم‌افزار ALE3D، کلازبور و همکارانش [۳۸] به منظور مقایسه با نتایج روش المان مرزی و وسلین و همکارانش [۳۹] نیز از این روش استفاده کرده‌اند. در تمامی تحقیقات بیان شده به توانایی روش ALE در شبیه‌سازی عددی برهمکنش موج بلست و سازه اذعان شده و نتایج این روش در مقایسه با سایر روش‌های عددی از دقت خوبی برخوردار بوده است. دلیل این امر توانایی روش ALE در مدل کردن تغییر شکل مواد جامد به صورت مستقل از محیط‌های اوپلری بیان شده است.

۳-۳- روش المان مرزی

با توجه به تئوری‌ای که روش المان مرزی براساس آن توسعه یافته، این روش تنها برای جریان‌های تراکم ناپذیر معتبر بوده و برای جریان‌های تراکم‌پذیر عملکرد ضعیفی دارد [۳۸]. لذا این روش تنها برای شبیه‌سازی انفجار و موج بلست در انفجار زیر آب برای مدل کردن آب اطراف انفجار که سیالی تراکم‌ناپذیر است مورد استفاده قرار گرفته که نمونه‌ی آن در مقاله‌ی لیو و همکارانش [۲۸] آمده است. در روش المان مرزی معادلات دیفرانسیل حاکم به اتحادهای انتگرالی تبدیل می‌شوند که بر روی سطح یا مرز اعمال شده و این انتگرال‌ها به صورت عددی بر روی مرز انتگرال‌گیری می‌شوند. در این رویکرد، مرز به بخش‌های کوچک (المان‌های مرزی) تقسیم شده و همانند سایر روش‌های عددی در نهایت یک دستگاه معادلات جبری خطی حاصل می‌گردد که یک جواب یکتا خواهد داشت. روش المان مرزی به صورت هندسی و به سادگی برای هر شکل پیچیده مرزی قابل اعمال است و به راحتی بر آن منطبق خواهد بود. به علاوه چون همه‌ی تقریب‌ها منحصر به سطح می‌باشد، روش المان مرزی می‌تواند نواحی شامل تغییرات شدید متغیرها را با دقتی بهتر از روش المان محدود مدل نماید. مزیت اصلی استفاده از روش المان مرزی این است که در این روش تنها مرزهای دامنه نیاز به شبکه‌بندی داشته و لذا سرعت این روش در مقایسه با سایر روش‌ها بیشتر خواهد بود [۳۸].

۳-۴- روش هیدرودینامیک ذرات صاف (SPH)

"هیدرودینامیک ذرات صاف"^۱ یک روش محاسباتی مستقل از شبکه‌بندی برای شبیه‌سازی جریان سیالات است. این روش برای شبیه‌سازی تغییر شکل‌های الاستیک و پلاستیک نیز گسترش داده شده است [۴۰]. در این روش ذرات به جای گره‌ها برای توصیف یک جریان سیال مداوم به کار می‌رود. این ذرات دارای فاصله‌ای فضایی نسبت به هم هستند که از این فاصله با نام «طول هموارسازی» یاد

۴- راه های بهبود نتایج در شبیه سازی عددی موج بلست ۴-۱- انتخاب معادله ی حالت

بسیاری از محققین مثل زامورا و همکارانش [۵۰]، به منظور سادگی حل مسئله ی انفجار خود به روش CFD را با فرض ایده آل بودن گازهای انفجار حل کرده اند. در شبیه سازی عددی برای گازهای حاصل از انفجار و با توجه به شرایط انفجار باید معادله ی حالت مناسبی انتخاب شود. لوچیونی و همکارانش [۸]، آریگونی و همکارانش [۵۱]، یوسف و همکارانش [۱۹]، ژو و همکارانش [۱۳]، تانگ [۴۲]، بنزلا و همکارانش [۴۴ و ۴۵] لیو و همکارانش [۲۸]، لارچر و همکارانش [۲۵]، سوگیاما و همکارانش [۶]، کسلان و همکارانش [۵۲]، دنگ و ژین [۲۰] و بسیاری دیگر از محققان در مقالات خود معادله حالت JWL را به عنوان معادله ی حالت محصولات تراک استفاده کرده اند. این معادله حالت که برای گازهای حاصل از انفجار طراحی شده، دارای رابطه ای به صورت زیر است:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_1 \rho_0} \right) e^{-R_1 \frac{\Delta t}{\rho}} + B \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_2 \rho_0} \right) e^{-R_2 \frac{\Delta t}{\rho}} + \omega \rho e \quad (1)$$

در این معادله e انرژی داخلی ویژه و ρ_0 چگالی اولیه و ضرایب A و B و R_1 و R_2 و ω ضرایبی ثابت و برای مواد مختلف متفاوت است. در بسیاری از مقالات مثل تحقیق بنزلا و همکارانش [۴۵] آنچه به عنوان معادله حالت برای محصولات تراک پیشنهاد شده معادله حالت JWL بوده و برای هوای اطراف هم معادله حالت گاز ایده آل به صورتی که در معادله ی (۲) آمده استفاده گردیده است [۴۵]:

$$p = (\gamma - 1) \rho e \quad (2)$$

البته برخی دیگر از محققین مثل کلاتر و همکارانش [۱۱] و امار و همکارانش [۵]، معادله ی حالت BKW را به عنوان معادله حالت مورد استفاده قرار داده اند. این معادله ی حالت نیز همانند معادله حالت JWL برای گازهای حاصل از انفجار طراحی شده است. کلاتر و همکارانش [۱۱] ضمن استفاده از روش CEBAM، معادله ی حالت BKW را به صورتی که در معادله ی (۳) آمده معرفی می کنند. در این معادله M_w جرم مولکولی سیال و β و x ثوابت معادله ی حالت BKW هستند [۱۱].

$$P = \frac{\rho R_u T}{M_w} [\phi(T)] = \frac{\rho R_u T}{M_w} [1 + x e^{\beta x}] \quad (3)$$

۴-۲- انتخاب مدل آشفتگی

شبیه سازی انفجار (موج بلست) در برخی مقالات همچون مقالات ژولد و همکارانش [۵۳] و پریچارد و همکارانش [۲۹]، به منظور ساده سازی محاسبات با فرض جریان آرام حل شده است. اما با توجه به ماهیت موج بلست و سرعت بسیار زیاد آن به نظر می رسد که فرض جریان آرام خطای زیادی در مسئله ایجاد می کند و استفاده از مدل های جریان آشفته می تواند به افزایش دقت نتایج کمک کند. نوع

مدل آشفتگی به دلیل روش میانگین گیری و سایر فرضیات مورد استفاده در آن نیز می تواند بر روی نتایج تاثیر مهمی داشته باشد. مدل های مختلف آشفتگی با حل کردن دستگاهی از معادلات انتقال اصلاح شده که از وارد کردن اجزای متغیر با زمان و میانگین گیری در معادلات انتقال اصلی ساخته می شود، توسعه یافته اند [۵۴]. در ادامه دو گروه اصلی از این مدل ها مورد بررسی قرار می گیرد.

۴-۲-۱- گروه مدل های RANS

این گروه از مدل های آشفتگی با استفاده از میانگین گیری زمانی معادلات حاکم، جزء آشفته مربوط به هریک از متغیرهای جریان را در شبیه سازی عددی وارد می کند. همچنین هر یک از ترم های سرعت و طول مقیاس شده با استفاده از معادلات انتقال جداگانه ای حل شده و از این رو مدل دو معادله ای می باشد. برای مثال در مدل $k - \epsilon$ که یکی از مدل های دسته ی RANS است، دو متغیر جدید: انرژی جنبشی آشفتگی (k) و ترم اتلاف ناشی از آشفتگی (ϵ) به معادلات انتقال اضافه می شود، که این دو متغیر از حل دو معادله انتقال دیفرانسیلی بدست می آیند [۱]. این دو معادله دیفرانسیل در واقع پس از میانگین گیری زمانی از معادلات بقای جرم، ممنتوم و انرژی بدست آمده اند. گروه مدل های RANS توسط بسیاری از محققین همچون اسکلاوانوس و همکارانش [۱ و ۱۴] و سوچت و همکارانش [۵۵] مورد استفاده قرار گرفته است.

۴-۲-۲- گروه مدل های LES

در جریان هایی با رینولدز بالا همچون مسائل شوک، چگالی، سرعت و دما به شدت تغییر می کنند. چون گردابه های کوچکتر از اندازه ی شبکه قابل محاسبه نیستند، باید اثر نوسانات این گردابه ها در جریان مدل شود. این امر با استفاده از تکنیک های LES میسر می شود که با استفاده از فیلترهایی که روی معادلات مدل اعمال می کنند، گردابه های کوچک حل را فیلتر می کنند. در جریان های تراکم پذیر این تئوری کاملاً توسعه یافته اما برای جریان های تراکم پذیر همچون مسائل موج شوک، این زمینه ی تحقیقی همچنان باز است [۵۶]. شا و همکارانش [۱۰] به منظور افزایش دقت شبیه سازی عددی برخورد موج بلست با موانع و از مدل LES در شبیه سازی عددی موج بلست استفاده کرده اند. استفاده از مدل LES در این تحقیق امکان شبیه سازی گردابه های اطراف موانع را فراهم کرده و به انتخاب مانع با بیشترین میزان کارایی کمک موثری نموده است.

۴-۳- انتخاب روش اعمال انرژی انفجار

برای شبیه سازی انفجار با استفاده از روش های عددی، باید انرژی انفجار به نحوی در مسئله اعمال گردد. روش اعمال انرژی انفجار می تواند تاثیر زیادی بر نتایج شبیه سازی عددی صورت گرفته داشته باشد. پارک و لی [۵۷] در مقاله ی مروری خود فهرستی از مدل های

روش معادل TNT زیاد بوده و نتایجی که از این روش بدست می‌آید به سائز المان‌ها خیلی وابسته است، روش بالن فشرده مورد توجه قرار گرفته است. ایده روش بالن به دلیل استفاده از ناحیه (بالون) با هوای فشرده با سائز اولیه بزرگتر از سائز منفجره جامد است. در واقع در این روش فرض می‌شود که فشار گاز منتشر شده از بالن متناسب با فشار انتشار امواج بلست یک انفجار حقیقی است. این روش اولین بار توسط برود [۵۸] استفاده شد. او پیشنهاد داد که از بالونی پر شده با گاز در فشار اولیه مورد اشاره در معادله ی (۵) استفاده گردد:

$$P_{Brode} = \frac{E_{TNT}(\gamma - 1)}{V_{bat}} + P_0 \quad (5)$$

در این معادله E_{TNT} کل انرژی اولیه خرج، V_{bat} حجم بالن، P_0 فشار اتمسفری هوا و γ ظرفیت گرمایی گاز درون بالن است. روش بالن فشرده از جمله روش‌های پرکاربرد در CFD انفجار به حساب می‌آید و لازم به ذکر است که روش بالن در تعدادی از کدهای CFD همچون کد OctVCE نیز استفاده شده است [۵۹]. نف و فیوم [۶۰] برای شبیه‌سازی موج بلست و شکستن شیشه در انفجار، دنگ و ژین [۲۰] برای شبیه‌سازی انفجار و اثر آن بر روی پل با اسکلت فلزی، چاپویس و همکارانش [۶۱]، آلپین [۴۶]، سوچت و همکارانش [۵۵] و برگر و همکارانش [۵۳] از این روش استفاده کرده‌اند. در این تحقیقات به سرعت حل مناسب روش بالن فشرده اشاره شده است. اما روش بالن فشرده از دقت زیادی برخوردار نبوده و نمی‌تواند مشخصات زیادی از ماده منفجره را در حل عددی وارد کند.

۳-۳-۴- اضافه کردن ترم چشمه به معادله ی انرژی

با توجه به اینکه منفجره‌های جامد خصوصیات انفجاری مشخصی (مثل سرعت و زمان تراک) دارند، در فرآیند شبیه‌سازی عددی می‌توان این مشخصات را به یک تابع مناسب تطبیق داد و ترم تولید انرژی (چشمه انرژی) را تعریف کرد. به این ترتیب انرژی ماده منفجره در شبیه‌سازی عددی با استفاده از ترم چشمه انرژی وارد می‌شود. برای مثال ریگاس و اسکلاوانوس [۷] ترم چشمه انرژی را با استفاده از یک تابع پله‌ای به صورتی که در معادله ی (۶) آمده بیان کرده‌اند:

$$S = E_r \times step \left(\frac{-(t - t_0)(t - t_1)}{t_c^2} \right) \quad (6)$$

در معادله ی (۶)، t زمان را برحسب ثانیه نشان می‌دهد. $t_c = 1s$ ، $t_0 = 0s$ و t_1 مدت زمان تراک برحسب ثانیه و E_r نرخ انرژی آزاد شده یا توان انفجار ($kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$) است [۱۴]. کولیس و همکارانش [۶۲] و کاتو و همکارانش [۶۳] نیز از این روش برای اعمال انرژی پتانسیل انفجار در شبیه‌سازی عددی استفاده کرده‌اند. با توجه به اینکه این روش مشخصات ماده ی منفجره از جمله زمان تراک و انرژی پتانسیل انفجار را با دقت در حل عددی اعمال می‌کند، از این روش می‌توان برای شبیه‌سازی طیف گسترده ای از مواد منفجره استفاده کرد و از این

اعمال انرژی انفجارهای گازی را آورده‌اند، که به دو دسته‌ی "مدل‌های تجربی" و "مدل‌های پدیدارشناختی" تقسیم بندی شده است. مدل‌های پدیدارشناختی براساس ساده‌سازی هندسه‌ی مسئله طراحی شده و از این رو برای مسائل با هندسه‌های پیچیده مناسب نیستند. اما مدل‌های تجربی براساس روابط بدست آمده از آزمایش‌های تجربی طراحی شده و می‌توانند در شرایط مشابه نتایج دقیق تری نسبت به مدل‌های پدیدارشناختی ارائه کنند. با توجه به گستردگی این مدل‌ها در اینجا تنها مدل "معادل TNT" از گروه مدل‌های تجربی برای انفجارهای گازی که با کمی تصحیح، قابلیت استفاده برای انفجار مواد منفجره جامد را نیز دارد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین دو مدل "بالون فشرده" و "اضافه کردن ترم چشمه به معادله ی انرژی" نیز برای انفجار مواد منفجره جامد بررسی می‌شوند.

۴-۳-۱- روش معادل TNT

این مدل در واقع یک مدل سنتی استفاده شده برای اعمال اثرات انفجار است. در این مدل فرض می‌شود که انرژی احتراق موجود در ماده ی منفجره به یک شارژ هم وزن TNT معادل آن با استفاده از معادله (۴) تبدیل شود. اگر وزن شارژ معادل معلوم باشد، مشخصات انفجار از حجم زیاد اطلاعات موجود در مورد انفجار TNT قابل دستیابی است.

$$W_{TNT} = \alpha_e \frac{W_f H_f}{H_{TNT}} = \alpha_m W_f \quad (4)$$

در این معادله α_m و α_e به عنوان فاکتورهای بازدهی شناخته می‌شوند. W_{TNT} جرم معادل TNT، W_f جرم کلی ماده‌ی منفجره، H_f گرمای احتراق سوخت و H_{TNT} گرمای انفجار TNT می‌باشد [۵۷]. سوچت و همکارانش [۵۵] برای مقایسه‌ی قدرت انفجاری چند پیروتکنیک، ژانگ و همکارانش [۲۱] برای بررسی اثر انفجار بر روی ستون فلزی، رمنیکف و رز [۲] با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN، لوجیونی و آمبروسینی [۸]، تانگ [۴۲]، دنگ و ژین [۲۰]، کسلان و همکارانش [۵۲] و بسیاری دیگر از محققان برای مدل کردن انفجار از این روش استفاده کرده‌اند. ژو و هاو [۱۳] دقت استفاده از این روش را حدود ۳۸٪ برای ایمپالس موج بلست در مقایسه با نتایج تجربی گزارش کرده‌اند.

۴-۳-۲- روش بالن فشرده

در این روش ماده منفجره جامد با بالن هلیوم فشرده معادلش جایگذاری می‌شود. تابع زمان-فشاری که از بالن فشرده بدست می‌آید می‌تواند به راحتی با منحنی یک موج ایربلست تطبیق داده شود. همچنین سطح فشرده سازی اولیه می‌تواند کالیبره شود تا با ایمپالس منطبق شود. زمان محاسبه در این روش از مدل معادل TNT کوتاه‌تر است [۲۵]. با توجه به اینکه زمان محاسباتی مورد نیاز

جهت نسبت به روش های دیگر همچون بالن فشرده و معادل TNT برجسته است.

۵- شبیه سازی عددی انفجارهای گازی

بخش مهمی از واکنش های انفجاری، انفجارهای گازی هستند که معمولاً در صنایع به وقوع می پیوندند. اکثر انفجارهای گازی صنایع با انتشار ناخواسته ی گاز به محیط اطراف یا همان پدیده ی VCE^۱ اتفاق می افتند [۶۴]. پیش بینی این انفجارات در صنایع از آن جهت حائز اهمیت است که می تواند محل نصب ایمن تجهیزات را پیش بینی و تعیین کند. برای شبیه سازی عددی این دسته از انفجارات نیز روش های عددی مختلفی وجود دارد. برای این منظور کدهای عددی مختلف جهت بهره مندی از روش های عددی برای شبیه سازی موج بلست انفجارهای گازی طراحی شده اند. مشهورترین کدهای عددی مورد استفاده برای شبیه سازی انفجارات گازی، کدهای EXSIM، REAGAS، FLACS و COBRA هستند [۶۴]. از میان این نرم افزارها EXSIM با ۱۵٪ خطا به عنوان یک کد عددی مناسب شناخته می شود. اما کد عددی FLACS نیز ضمن استفاده از روش عددی FVM و مدل سازی آشفتنگی با مدل آشفتنگی k-ε، نتایج قابل قبولی را در مقایسه با نتایج تجربی ارائه کرده است. کد عددی REAGAS نیز ضمن مدل سازی آشفتنگی و احتراق، نتایج قابل قبولی ارائه می کند. اما کد COBRA ضمن دارا بودن تمام ویژگی های کدهای قبل، به دلیل توانمندی اش در شبیه سازی موج بلست در محیط دارای موانع زیاد مطرح می باشد. در انفجارهای گازی، آشفتنگی جریان و واکنش های احتراقی گازها از اهمیت بالایی برخوردار هستند و باید شبیه سازی شوند. آشفتنگی موجود در فرآیند سوختن و مقدار فشار انفجار تا حد بسیار زیادی به میزان موانع موجود در هندسه ی انفجار بستگی دارد. همچنین با توجه به اینکه انفجارهای گازی معمولاً در هندسه های پیچیده ی صنایع اتفاق می افتند و کدهای عددی نیز به منظور شبیه سازی انفجار در این محیط های پیچیده طراحی شده اند، باید فرآیندی برای انطباق شبیه سازی ها در مقیاس های بزرگ فراهم شود. برای این منظور از روش هایی برای ایده آل کردن هندسه ی مورد بررسی استفاده می شود [۶۵]. آشفتنگی موجود در فرآیند سوختن و مقدار فشار انفجار نیز تا حد بسیار زیادی به میزان موانع موجود در هندسه ی انفجار بستگی دارد. همچنین در صورت افزایش تراکم موانع موجود، احتمال تغییر نوع واکنش از احتراق سریع^۲ به احتراق مافوق صوت (تراک^۳) افزایش می یابد. از طرفی لزوم تسلط بر طیفی از شرایط اولیه ی سناریوهای مختلف، مقیاس و پیچیدگی موجود در هندسه ی یک واحد فرآیندی به منظور انجام طراحی بهینه ی نحوه ی چینش

تجهیزات ضروری است. برای رسیدن به این اهداف، روش های مختلفی از جمله روش PDR^۴ طراحی شده است [۶۶].

در جدول (۱) کدهای عددی مختلف مورد استفاده برای شبیه سازی انفجارهای گازی به همراه وضعیت شبکه، دقت، مدل واکنش و نوع کد عددی آورده شده است. در میان کدهای عددی موجود در جدول، کدهای جدیدی مثل کد NEWT که از شبکه های ساختار نیافته استفاده می کنند، توانسته اند بیش از ۱۰۰ نوع مانع هم سایز را در یک شبیه سازی عددی مورد بررسی قرار دهند. در حالی که کدهای عددی رایج و قدیمی تر که از شبکه بندی ساختار یافته بهره می گیرند، حداکثر می توانند ۱۰ مانع هم سایز را مورد بررسی قرار دهند. از میان کدهای آورده شده، کد NEWT برای فضای بسته ی کوچک ولی با موانع با شکل ها و سایزهای متنوع و همچنین طیف وسیعی از زیرمدل های PDR مناسب است [۶۶]. همچنین برخی کدهای جدول (۱) مثل کد COBRA از تکنیک های جدید مدل سازی عددی و احتراق انفجار بهره می گیرند [۶۵].

۶- دسته بندی روش های شبیه سازی موج بلست

با توجه به نیاز محققین حوزه ی شبیه سازی موج بلست به الگویی از فعالیت های انجام شده، در جداول (۲)، (۳) و (۴) جمع بندی ای از شبیه سازی های گذشته، با در نظر گرفتن سه پارامتر "معادله حالت"، "روش اعمال انرژی انفجار" و "سرعت حل" آورده شده است. در این جداول مهم ترین نکته ی قابل توجه استفاده ی کمتر محققین از مدل های آشفتنگی، خصوصاً مدل آشفتنگی LES با وجود ماهیت آشفته جریان موج بلست است. استفاده بهینه از این مدل ها خصوصاً مدل آشفتنگی LES، نیازمند شبکه بندی ریزتر و در نتیجه افزایش حجم محاسبات بوده و همین عاملی برای استفاده ی کمتر محققین از مدل LES است. نکته ی قابل توجه دیگر اهتمام محققین به استفاده از معادلات حالت JWL و BKW به جای فرض گاز ایده آل برای محصولات انفجار است. به هنگام وقوع انفجار و تراک مواد منفجره، در یک بازه ی زمانی بسیار کوتاه ماده ی منفجره ی جامد تبدیل به گازهای فشرده ولی با همان چگالی قبلی می شود. لذا ماهیت این گازها با گازهای رقیق تری مثل هوا کاملاً متفاوت بوده و نیازمند بکارگیری معادلات حالت دقیق تر است [۶۳].

در جداول (۲)، (۳) و (۴) طرح های عددی مورد استفاده در شبیه سازی های مختلف نیز ذکر شده است. جدول (۲) تحقیقات گذشته در حوزه شبیه سازی موج بلست را با توجه به معادلات حالت مورد استفاده دسته بندی کرده است. در این جدول به خوبی تمایل محققان به استفاده از معادلات حالت JWL برای بیان شرایط گازهای انفجاری مشخص است. جدول (۳) بر روی مدل های انفجاری متمرکز شده است.

4- Porosities and Distributed Resistances

1- Vapor Cloud Explosion
2- Deflagration
3- Detonation

شده است. دو کد عددی اول یعنی ALE3D و ALEGRA با استفاده از روش عددی ALE که زیرمجموعه روش FEM است، معادلات را برای حالت‌های تک‌فازی و چندفازی حل می‌کنند. البته این دو نرم‌افزار توانایی حل مسائل با روش FVM را نیز دارند. نرم‌افزار برجسته‌ی تجاری دیگری که در جدول قابل مشاهده است، نرم‌افزار AUTODYN-3D می‌باشد که مسائل عددی متنوعی همچون برهمکنش‌های مایعات، جامدات و گازها را حل می‌کند. روش‌های عددی مورد استفاده در این نرم‌افزار FEM و FDM است. نکته‌ی مهم قابل توجه در این نرم‌افزار کتابخانه‌ی کامل آن و وجود معادلات حالت مهمی همچون BKW و JWL در این کتابخانه است. نرم‌افزار مهم دیگر این جدول، نرم‌افزار LS-DYNA است. این نرم‌افزار توسط شرکت LS-TC توسعه یافته و از روش عددی FEM برای حل مسائل عددی با انتگرال‌گیری صریح استفاده می‌کند. نرم‌افزار تجاری LS-DYNA در مسائل برخورد و انفجار کاربرد داشته و البته در حوزه‌های طراحی اتومبیل، هوافضا و مهندسی ساخت نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در جدول (۵) تعدادی نرم‌افزار وجود دارد که به طور ویژه برای مسائل دینامیک سیالات مورد استفاده قرار می‌گیرند. نرم‌افزارهای CFX و OpenFOAM در این دسته قرار دارند و با استفاده از روش عددی FVM مسائل متنوعی همچون مسائل موج بلست را حل می‌کنند. این نرم‌افزارها قابلیت بکارگیری مدل‌های مختلف آشفته‌گی، واکنش‌های شیمیایی از جمله احتراق و معادلات حالت مختلف را برای حل مسائل موج بلست دارند. البته از آنجایی که این نرم‌افزارها عمومی هستند، معادلات حالت مخصوص انفجار در آن‌ها وجود نداشته و باید به آن‌ها اضافه گردد.

در این جدول مشخص است که اکثر شبیه‌سازی‌های عددی انفجار در تحقیقات گذشته با یکی از سه روش "معادل TNT"، "بالن فشرده" و "نرم چشمه انرژی" انجام شده است. اما جدول (۴) تحقیقات گذشته را براساس سرعت حل مسئله عددی طبقه‌بندی کرده است. طرح عددی مورد استفاده برای شبیه‌سازی موج بلست، با توجه به سناریوی طراحی شده و هدفی است که از این شبیه‌سازی مدنظر بوده است. برای شبیه‌سازی عددی موج بلست در حالت ایربلست، پراستفاده ترین روش عددی FVM است. اما در مواردی که هدف بررسی اثر امواج بلست بر روی سازه‌های جامد باشد، استفاده از توصیف‌های مختلف روش عددی FEM ترجیح داده شده است. سایر روش‌های عددی نیز با توجه به شرایط مسئله مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین کدهای عددی متنوعی نیز در شبیه‌سازی‌های موج بلست مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برخی از این کدها غیرتجاری و تولید شده توسط محققین برای یک منظور خاص بوده ولی اکثراً تجاری هستند. مجموعه‌ی این تحقیقات حجم عظیمی از اطلاعات شبیه‌سازی‌های عددی موج بلست را ایجاد کرده است که دسته‌بندی و مطالعه‌ی آن‌ها می‌تواند برای توسعه شبیه‌سازی‌های آیند مفید باشد.

۶-۱- مقایسه‌ی نرم‌افزارهای شبیه‌سازی عددی موج بلست

در جدول (۵) مجموعه‌ای از نرم‌افزارهای مورد استفاده در شبیه‌سازی انفجار و موج بلست به همراه روش عددی آن‌ها آورده شده است. هر یک از ستون‌های این جدول، یک روش عددی شبیه‌سازی موج بلست را بیان کرده است. در هر ردیف نیز یک کد عددی مورد استفاده برای شبیه‌سازی عددی آورده

جدول ۱- مقایسه‌ی کدهای CFD مورد استفاده برای شبیه‌سازی انفجارهای گازی [۶۵].

مدل واکنش	دقت	شبکه‌بندی	روش حل	کد عددی
روابط تجربی	-	-	پدیدار شناختی	SCOPE
روابط تجربی	-	-	پدیدار شناختی	CLICHÉ
تفکیک گردابه‌ها	مرتب اول زمانی و مرتبه دوم مکانی	کارترین ساختار یافته، اصلاح PDR اجزاء مقیاس زیرشبکه	حجم محدود	EXSIM
روابط تجربی	مرتب اول، متغیر واکنش از مرتبه دوم	کارترین ساختار یافته، اصلاح PDR اجزاء مقیاس زیرشبکه	حجم محدود	FLACS
روابط تجربی	مرتب اول زمانی و مکانی	کارترین ساختار یافته، اصلاح PDR اجزاء مقیاس زیرشبکه	حجم محدود	AutoReaGas
تفکیک گردابه‌ها و شعله نازک	مراتب بالای زمانی و مکانی	ساختار یافته، متناسب با بدنه	حجم محدود	CFX-4
روابط تجربی ضمنی	مرتب دوم زمانی و مکانی	کارترین، استوانه‌ای، قطبی یا هشت وجهی ساختار نیافته، انطباق پذیر، اصلاح PDR اجزاء مقیاس زیرشبکه	حجم محدود	COBRA
مدل‌های Flamemet آرام و انتقال PDF	زمانی ضمنی، مرتبه دوم مکانی (TVD)	ساختار نیافته، انطباق پذیر	حجم محدود	ICRC
تفکیک گردابه‌ها	مراتب بالای زمانی و مرتبه دوم مکانی	ساختار نیافته، انطباق پذیر	حجم محدود	NEWT
تفکیک گردابه‌ها	مرتب اول یا دوم زمانی و مکانی	ساختار نیافته، انطباق پذیر	حجم محدود	REACFLOW

جدول ۲- مقایسه ی مقالات شبیه سازی موج بلست بر اساس معادله ی حالت مورد استفاده برای گازهای انفجار.

مقاله	معادلات حاکم	روش عددی	کد یا نرم افزار	مدل آشفتنگی	معادله ی حالت گاز انفجار	اعتبار سنجی	بعد مسئله
[14]	ناویر - استوکس	FVM	CFX-5.7	SST	گاز ایده آل	اطلاعات آزمایش تجربی	3D
[24]	ناویر - استوکس	FVM	CFX-5.7	SST	گاز ایده آل	اطلاعات آزمایش تجربی	
[13]	اویلر	FVM-FEM-FDM	AUTODYN	-	JWL	اطلاعات آزمایش تجربی: (Henrych, 1979), (Mills, 1987)	1D-3D
[50]	ناویر - استوکس	FVM	OpenFOAM	-	گاز ایده آل	-	2D
[5]	ناویر - استوکس	FVM	OpenFOAM	-	JWL-BKW	-	2D
[11]	اویلر	FDM - FVM - FEM	LS-DYNA , AUTODYN-3D	-	BKW	اطلاعات آزمایش تجربی: US Army Engineer Research and Development Center (ERDC)	2D
[6]	اویلر	FVM	-	-	JWL و گاز ایده آل	اطلاعات آزمایش تجربی: Homae et al. "Attenuation of blast wave using water gel"	2D
[45]	اویلر	FEM	کد خانگی	-	JWL	-	1D
[31]	اویلر	FEM	EUROPLEXUS	-	JWL	مقایسه با روش عددی دیگر	1D-2D-3D
[49]	اویلر	FEM - FVM - FDM	AUTODYN3D	-	JWL	اطلاعات روش های تجربی مثل: TM-1300	2D-3D
[63]	اویلر	FEM	کد خانگی	-	JWL و گاز ایده آل	مقایسه با اطلاعات تجربی و حل تحلیلی	2D-3D
[41]	اویلر	SPH	chinook	-	گاز ایده آل	اطلاعات آزمایش تجربی: Norwegian Defence Estates Agency tests	2D-3D

جدول ۳- مقایسه ی مقالات شبیه سازی موج بلست بر اساس مدل انفجار مورد استفاده برای اعمال اثر انفجار.

مقاله	معادلات حاکم	روش عددی	کد یا نرم افزار	مدل آشفتنگی	مدل انفجار	اعتبار سنجی	بعد مسئله
[1]	ناویر - استوکس	FVM	CFX-5.6	k-ε	ترم چشمه انرژی	اطلاعات آزمایش تجربی: Explosion hazard assessment	2D-3D
[14]	ناویر - استوکس	FVM	CFX-5.7	SST	ترم چشمه انرژی	اطلاعات تجربی	3D
[24]	ناویر - استوکس	FVM	CFX 5.7.1	SST	ترم چشمه انرژی	روش های عددی اعتبارسنجی شده	3D
[44]	اویلر	FVM	-	-	بالن فشرده	مقایسه حل یک بعدی - سه بعدی	1D-3D
[45]	اویلر	FVM	کد خانگی	-	بالن فشرده	اطلاعات آزمایش تجربی: (Henrych, 1979), (Mills, 1987)	1D-3D
[2]	اویلر	FVM	Air3D code	-	معادل TNT	روش های عددی اعتبارسنجی شده	2D
[50]	ناویر - استوکس	FVM	OpenFOAM	-	معادل TNT و روش بیکر	-	2D
[5]	ناویر - استوکس	FVM	OpenFOAM	-	بالن فشرده	-	2D
[11]	اویلر	FVM	CEBAM - SHAMRC - Air 3D	-	معادل TNT	اطلاعات آزمایش تجربی: US Army Engineer Research and Development Center (ERDC)	2D
[6]	اویلر	FVM	-	-	بالن فشرده	اطلاعات آزمایش تجربی: Homae et al. "Attenuation of blast wave using water gel "	2D
[46]	اویلر	FEM	کد خانگی	-	بالن فشرده	-	1D
[30]	اویلر	FEM	EUROPLEXUS Code	-	بالن فشرده - حجم کنترل، TNT جامد	مقایسه با روش عددی دیگر	1D-2D-3D
[67]	اویلر	FEM	LS-DYNA	-	معادل TNT	روش های تجربی، نتایج نرم افزار Galerkin و روش NASTARAN	2D-3D
[63]	اویلر	FEM	کد خانگی	-	ترم چشمه انرژی	مقایسه اطلاعات تجربی و حل تحلیلی	2D-3D

جدول ۴- مقایسه ی مقالات شبیه سازی موج بلست بر اساس سرعت حل مسئله.

مقاله	معادلات حاکم	روش عددی	کد یا نرم افزار	مدل آشفتگی	معادله حالت	مدل انفجار	سرعت حل مسئله	شبکه	بعد مسئله
[1]	ناویر- استوکس	FVM	CFX-5.6	k-ε	-	ترم چشمه انرژی	۱۱ روز و ۱۹ ساعت با سیستم: 800 MHz Intel1 Celeron processor with 512 MB RAM"	۵۷۱۴۶ گره	2D-3D
[14]	ناویر- استوکس	FVM	CFX-5.7	SST	گاز ایده‌آل	ترم چشمه انرژی	۵۰ ساعت با سیستم: 800MHz Intel Celeron processor with 512 MB RAM	۳۳۴۵۰ المان حجمی	3D
[24]	ناویر- استوکس	FVM	CFX 5.7.1	SST	-	ترم چشمه انرژی	بین ۲۴ تا ۳۲ ساعت با سیستم: 2400MHz AMDs Athlon 64-bit processor and 1500MB RAM	-	3D
[44]	اویلر	FVM	-	-	JWL	بالون فشرده	یک ساعت	-	1D-3D
[45]	اویلر	FVM	کد خانگی	-	JWL	بالن فشرده	۱۵۰ ساعت برای ۵ میلی ثانیه شبیه-سازی	۲.۴ میلیون سلول محاسباتی	1D-3D
[2]	اویلر	FVM	Air3D code	-	-	معادل TNT	۱۶۰ ساعت برای ۲۵ میلی ثانیه شبیه-سازی با سیستم: 23 processors of the Compaq SC45 supercomputer	۳۸ میلیون سلول محاسباتی	2D
[11]	اویلر	FVM	CEBAM - SHAMRC - Air3D	-	BKW	معادل TNT	۱۲۰ ساعت با سیستم: 32 processor supercomputer	۴۱ میلیون سلول محاسباتی	2D
[46]	اویلر	FEM	کد خانگی	-	JWL	بالن فشرده	۲۵۳ ثانیه با گره انطباق پذیر، بین ۲۳۸ تا ۴۸۱ ثانیه با گره استاتیک	روش گره انطباق پذیر	1D
[30]	اویلر	FEM	EUROPLEXUS	-	JWL	بالن فشرده - حجم کنترل - جامد TNT	۱۳۶۷۷ ثانیه	۲۱۶۰۰۰ المان	2D-3D
[62]	ناویر- استوکس	FVM	EAGLE-Blast	-	-	ترم چشمه انرژی	۱۵۰۷/۷ ثانیه با ۱۲ هسته محاسباتی	۴ میلیون گره محاسباتی	2D-3D

جدول ۵- جدول نرم افزارهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی موج بلست باروش‌های عددی مختلف.

کد عددی	Lagrangian	SPH	Eulerian	CEL	Single-Material ALE	Multi-Material ALE	FVM	FDM	FEM
ALE3D	*		*		*	*	*		*
ALEGRA	*		*		*	*	*		*
AUTODYN-3D	*				*			*	*
CTH			*						
CTH-EPIC	*		*	*					
DYNA3D	*								*
DYSMAS/ELC	*		*	*					
EPIC	*	*							
HULL	*		*	*					
LS-DYNA	*		*		*	*		*	*
MESA			*						
MSC/DYTRAN	*		*	*	*	*			
PRONTO3D	*	*							
CFX			*				*		
OPENFOAM			*				*		
CHINOOK		*							
EAGLE	*	*	*			*			*
AIR3D							*		
SHAMRC	*							*	
EAGLE-Blast			*				*		
CEBAM			*				*		

۶-۲- رتبه بندی روش های حل عددی از نظر سرعت و دقت

با توجه به ماهیت متفاوت روش های عددی مختلفی که برای شبیه سازی موج بلست استفاده می شود، ارائه ی یک رتبه بندی دقیق از سرعت حل شبیه سازی موج بلست توسط این نرم افزارها کار دشواری است. در مقاله ی حاضر روش های مختلف عددی شبیه سازی موج بلست بیان شد و نمونه های مختلف کارهای محققین این حوزه در جداول (۲)، (۳) و (۴) مرور گردید. در میان شبیه سازی های صورت گرفته با استفاده از روش حجم محدود، شبیه سازی انجام شده توسط کولیس و همکارانش [۶۲] با توانایی انجام محاسبات جریان برای حدود ۴ میلیون گره محاسباتی در زمانی برابر ۱۵۰۷/۷ ثانیه توسط نرم افزار Eagle-blast به عنوان سریع ترین شبیه سازی انجام شده با استفاده از این روش مطرح است. همچنین در میان شبیه سازی های صورت گرفته با استفاده از روش المان محدود، شبیه سازی انجام شده توسط لارچر [۳۰] با توانایی انجام محاسبات برای حدود ۲۱۶۰۰۰ گره محاسباتی در زمانی برابر ۱۳۶۷/۷ ثانیه به عنوان سریع ترین شبیه سازی انجام شده با استفاده از این روش شناخته شده است. در نهایت در میان شبیه سازی های اندکی که با استفاده از روش تفاضل محدود صورت گرفته، شبیه سازی انجام شده توسط فلود و همکارانش [۱۲] با قابلیت انجام محاسبات برای ۱۲۲۵۰۰ گره محاسباتی در ۱۴۴۰ ثانیه، سریع ترین شبیه سازی صورت گرفته با استفاده از این روش است. رتبه بندی روش های مختلف عددی بکار گرفته شده براساس دقت شبیه سازی نیز با توجه به خطاهای متعددی که می تواند در این داده ها وجود داشته باشد، کاری بسیار دشوار است. تعداد زیادی از محققین نیز گزارش دقت نتایج شبیه سازی عددی خود را با مقایسه ی نمودار نتایج عددی با نتایج آزمایش تجربی مشابه ارائه کرده اند که عمل مقایسه ی مقالات مختلف را دشوار می کند. به این ترتیب با استناد به نتایج موجود ارائه شده، روش عددی FVM به همراه تکنیک نگاشت یک بعدی به سه بعدی به کار گرفته شده توسط بنزلاما و همکارانش [۴۴ و ۴۵] با خطای کمتر از پنج درصد مقدار بیشینه فشار، به عنوان دقیق ترین شبیه سازی انجام گرفته توسط این روش عددی شناخته شده است. همچنین در شبیه سازی انجام گرفته توسط لارچر [۳۰] با استفاده از روش FEM و نرم افزار AUTODYN، حداکثر خطای کمتر از سه درصد مقدار بیشینه فشار در مقایسه با نتایج آزمایش تجربی مشابه گزارش گردیده که دقیق ترین نتیجه بدست آمده با استفاده از این روش می باشد.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله روش های شبیه سازی موج بلست، کاربردها و روش های بهبود نتایج با توجه به تحقیقات گذشته مرور گردید. از میان روش های عددی شبیه سازی موج بلست، روش حجم محدود بیشترین

استفاده را در میان مقالات مرور شده دارد. این روش معمولاً برای شبیه سازی موج بلست در محیط های باز یا بسته مورد استفاده قرار می گیرد. اما در صورتی که در مسئله مورد بررسی، اثر موج بلست بر روی سازه ای جامد مدنظر باشد، باید از کدهای عددی ای استفاده شود که روش المان محدود را بکار گرفته اند. روش دیگر شبیه سازی، روش المان مرزی می باشد که در برخی مسائل انفجار در زیر آب برای بررسی وضعیت موج بلست در فاز آب مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین در میان روش های عددی بیان شده، روش تفاضل محدود به دلیل خطای زیاد و عدم توانایی در انجام محاسبات در هندسه های پیچیده کمترین کاربرد را دارد.

برای افزایش کارایی و دقت شبیه سازی عددی موج بلست، روش هایی جهت بهبود وضعیت "معادله ی حالت"، "مدل های آشفتگی" و "مدل های انفجار" توسط محققین مورد استفاده قرار گرفته است. ساده ترین حالت بررسی گازهای حاصل از انفجار، فرض ایده آل بودن این گازها است و در مواردی که از معادلات حالت JWL یا BKW استفاده شده، خطای محاسباتی کاهش یافته است. از طرفی با توجه به سرعت مافوق صوت موج بلست و وجود آشفتگی در این جریان، استفاده از مدل های آشفتگی مثل مدل های گروه RANS و LES به جای فرض آرام بودن جریان کمک زیادی به بهبود نتایج خواهد کرد. اما با این وجود، در میان مقالات بررسی شده تعداد کمی از مقالات مبحث مهم آشفتگی جریان را مورد توجه قرار داده و از مدل های آشفتگی استفاده کرده اند. مدل آشفتگی LES نیز با وجود توانایی در شبیه سازی گردابه های جریان آشفتگی، به دلیل حجم بیشتر محاسبات در مقالات کمی مورد استفاده قرار گرفته است.

به عنوان نتیجه ی نهایی تحقیق حاضر مشخص گردید که در میان شبیه سازی های صورت گرفته با استفاده از روش حجم محدود، شبیه سازی انجام شده با توانایی انجام محاسبات جریان برای حدود ۴ میلیون گره محاسباتی در زمانی برابر ۱۵۰۷/۷ ثانیه توسط نرم افزار Eagle-blast به عنوان سریع ترین شبیه سازی انجام شده با استفاده از این روش مطرح است. همچنین در میان شبیه سازی های صورت گرفته با استفاده از روش المان محدود، شبیه سازی انجام شده با توانایی انجام محاسبات برای حدود ۲۱۶۰۰۰ گره محاسباتی در زمانی برابر ۱۳۶۷/۷ ثانیه به عنوان سریع ترین شبیه سازی انجام شده با استفاده از این روش شناخته شده است. در نهایت در میان شبیه سازی های اندکی که با استفاده از روش تفاضل محدود صورت گرفته، شبیه سازی انجام شده با قابلیت انجام محاسبات برای ۱۲۲۵۰۰ گره محاسباتی در ۱۴۴۰ ثانیه به عنوان سریع ترین شبیه سازی صورت گرفته با استفاده از این روش شناخته شده است.

از نظر میزان دقت در روش عددی حجم محدود، تکنیک نگاشت یک بعدی به سه بعدی با خطای کمتر از پنج درصد مقدار بیشینه فشار، به عنوان دقیق ترین شبیه سازی انجام گرفته توسط این روش عددی

در مقایسه با نتایج آزمایش تجربی مشابه، دقیق‌ترین نتیجه بدست آمده با استفاده از این روش عددی می‌باشد.

شناخته شده است. همچنین در روش المان محدود، نرم‌افزار AUTODYN با حداکثر خطای کمتر از سه درصد مقدار بیشینه فشار

مراجع

- [1] Sklavounos, S.; Rigas, F. "Computer Simulation of Shock Waves Transmission in Obstructed Terrains"; *J. Loss Prev. Process Ind.* 2004, 17, 407–417.
- [2] Remennikov, A. M.; Rose, T. A. "Modelling Blast Loads on Buildings in Complex City Geometries,"; *Comput. Struct* 2005, 83, 2197–2205.
- [3] Berger, S.; Ben-Dor, G.; Sadot, O. "Experimental and Numerical Investigations of Shock-Wave Attenuation by Geometrical Means: A single barrier configuration"; *Eur. J. Mech. - B/Fluids* 2015, 50, 60–70.
- [4] Alia, A.; Souli, M. "High Explosive Simulation Using Multi-material Formulations"; *Appl. Therm. Eng.* 2006, 26, 1032–1042.
- [5] Amar, S.; Kochavi, E.; Lefler, Y.; Vaintraub, S.; Sidilkover, D. "Comparison of BKW and JWL Equations of State for Explosion Simulations", In *Proc. of The 30th International Symposium on Shock Wave 2015*, pp. 1–7.
- [6] Sugiyama, Y.; Homae, T.; Wakabayashi, K.; Matsumura, T.; Nakayama, Y. "Numerical Simulations on The Attenuation Effect of a Barrier Material on a Blast Wave"; *J. Loss Prev. Process Ind.* 2014, 32, 135–143.
- [7] Sklavounos, S.; Rigas, F. "Validation of Turbulence Models in Heavy Gas Dispersion Over Obstacles,"; *J. Hazard. Mater.* 2004, 108, 9–20.
- [8] Luccioni, B.; Ambrosini, D.; Danesi, R. "Blast Load Assessment Using Hydrocodes,"; *Eng. Struct.* 2006, 28, 1736–1744.
- [9] Kleinschmit, N. N. "A Shock Tube Technique for Blast Wave Simulation and Studies of Flow Structure Interactions in Shock Tube Blast Experiments"; M.S. Thesis, University of Nebraska, Nebraska, 2011.
- [10] Sha, S.; Chen, Z.; Jiang, X.; Han, J. "Numerical Investigations on Blast Wave Attenuation by Obstacles"; *Procedia Eng.* 2012, 45, 453–457.
- [11] Clutter, J. K.; Mathis, J. T.; Stahl, M. W. "Modeling Environmental Effects in the Simulation of Explosion Events"; *Int. J. Impact Eng.* 2007, 34, 973–989.
- [12] Flood, I.; Bewick, B. T.; Dinan, R. J. "A New Method for Very Fast Simulation of Blast Wave Propagation in Complex Built Environments"; *Proc. Int. Conf. Comput. Civ. Build. Eng.* 2010, 22, 53–55.
- [13] Zhou, X. Q.; Hao, H. "Prediction of Airblast Loads on Structures Behind a Protective Barrier" *Int. J. Impact Eng.* 2008, 35, 363–375.
- [14] Rigas F.; Sklavounos, S. "Experimentally Validated 3-D Simulation of Shock Waves Generated by Dense Explosives in Confined Complex Geometries"; *J. Hazard. Mater.* 2005, 121, 23–30.
- [15] Benseelama, A. M.; William-Louis, M. J. P.; Monnoyer, F.; Proust, C. "A Numerical Study of the Evolution of the Blast Wave Shape in Tunnels"; *J. Hazard. Mater.* 2010, 181, 609–616.
- [16] Wu, C.; Lukaszewicz, M.; Schebella, K.; Antanovskii, L. "Experimental and Numerical Investigation of Confined Explosion in a Blast Chamber"; *J. Loss Prev. Process Ind.* 2013, 26, 737–750.
- [17] Rodriguez, E. A. "Design Considerations for Blast Loads in Pressure Vessels" In *Proc. of the 19th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology 2007*, pp. 1–8.
- [18] Tham, C. Y. "Numerical Simulation on the Interaction of Blast Waves with a Series of Aluminum Cylinders at Near-field"; *Int. J. Impact Eng.* 2009, 36, 122–131.
- [19] Yusof, M. A.; Rosdi, R. N.; Nor, N. M.; Ismail, A.; Yahya, M. A.; Peng, N. C. "Simulation of Reinforced Concrete Blast Wall Subjected to Air Blast Loading"; *J. Asian Sci. Research* 2014, 4, 522–533.
- [20] Deng, R. B.; Jin, X. L. "Numerical Simulation of Bridge Damage under Blast Loads"; *WSEAS Trans. Comput.* 2009, 8, 1564–1574.
- [21] Zhang, F.; Wu, C.; Wang, H.; Zhou, Y. "Thin-walled Structures Numerical Simulation of Concrete Filled Steel Tube Columns against Blast Loads"; *Thin Walled Struct.* 2015, 92, 82–92.
- [22] Peng, W. "Modeling and Simulation of Interactions between Blast Waves and Structures for Blast Wave Mitigation"; Ph.D. Thesis, University of Nebraska, Nebraska, 2009.
- [23] Grujicic, M.; Snipes, J.; Chandrasekharan, N. "Computational Analysis of Fluid-Structure Interaction Based Blast-Mitigation Effects"; *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.* 2013, 227, 124–142.
- [24] Sklavounos, S.; Rigas, F. "Computer-Aided Modeling of the Protective Effect of Explosion Relief Vents in Tunnel Structures"; *J. Loss Prev. Process Ind.* 2006, 19, 621–629.
- [25] Larcher, M.; Casadei, F.; Gebbeken, N.; Solomos, G. "Influence of Venting Areas in Tubular Structures like Train Carriages Subjected to Internal Explosions"; *J. Hazard. Mater.* 2010, 183, 1–8.
- [26] Jayasinghe, L. B.; Thambiratnam, D. P.; Perera, N.; Jayasooriya, J. H. "Computer Simulation of Underground Blast Response of Pile in Saturated Soil"; *Comput. Struct.* 2013, 120, 86–95.
- [27] Henderson, L.; Takayama, K.; Hillier, R.; Haas, J. "Shock Structure and Kinematics, Blast Waves and Detonations", *Proc. of the 19th International Symposium on Shock Waves 1993*, pp. 500–507.
- [28] Liu, M. B.; Liu, G. R.; Lam, K. Y.; Zong, Z. "Smoothed Particle Hydrodynamics for Numerical Simulation of Underwater Explosion"; *Comput. Mech.* 2003, 30, 106–118.
- [29] Pritchard, D. K.; Freeman, D. J.; Guilbert, P. W. "Prediction of Explosion Pressures in Confined Spaces"; *J. Loss Prev. Process Ind.* 1996, 9, 205–215.
- [30] Larcher, M. "Simulation of the Effects of an Air Blast Wave"; *JRC Technical Notes, Luxembourg*, 2007, pp. 1–86.
- [31] Webster, K. G. "Investigation of Close Proximity Underwater Explosion Effects on a Ship-Like Structure Using the Multi-Material Arbitrary Lagrangian Eulerian Finite Element Method"; M.S. Thesis, Webster Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2007.
- [32] Nithiarasu, P. "An Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) Formulation for Free Surface Flows Using the Characteristic-Based Split (CBS) Scheme"; *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 2005, 48, 1415–1428.
- [33] Chen, Q.; Liu, K. "A High-Resolution Eulerian Method for Numerical Simulation of Shaped Charge Jet Including Solid-Fluid Coexistence and Interaction"; *Comput. Fluids* 2012, 56, 92–101.
- [34] Mamrak, W. "Blast Wave Propagation in the Air and Action on Rigid Obstacles"; M.S. Thesis, Poznań University of Technology Faculty of Civil and Environmental Engineering, Poznań, 2009.
- [35] Loubre, R.; Shashkov, M. J. "A Subcell Remapping Method on Staggered Polygonal Grids for Arbitrary-Lagrangian-Eulerian Methods" *J. Comput. Phys.* 2005, 209, 105–138.
- [36] Slavik, T. P. "A Coupling of Empirical Explosive Blast Loads to ALE Air Domains in LS-DYNA", In *Proc. of The IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2010*, pp. 121–146.
- [37] Leininger, L.; Springer, H. K.; Mace, J.; Mas, E. "Modeling The Shock Initiation of PBX-9501 in ALE3D", In *Proc. of the International*

- Symposium on Military Aspects of Blast and Shock 2008, pp. 20–27.
- [38] Klaseboer, E.; Turangan, C.; Fong, S. W.; Liu, T. G.; Hung, K. C.; Khoo, B. C. "Simulations of Pressure Pulse-Bubble Interaction Using Boundary Element Method"; *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 2006, 195, 4287–4302.
- [39] Veselin, A.; Dobrev, V. A.; Kolev, T. V.; Rieben, R. N. "High-Order Curvilinear Finite Element Methods for Lagrangian Hydrodynamics"; *J. Sci. Comput.* 2012, 34, 606–641.
- [40] Liu, M. B.; Liu, G. R. "Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH): An Overview and Recent Developments"; *Arch. Comput. Methods Eng.* 2010, 17, 25–76.
- [41] Christensen, M. O.; Trulsen, S. B. "Height of Burst Explosions: A Comparative Study of Numerical and Experimental Results"; *ShockWaves* 2009, 19, 135–143.
- [42] J. Tang, "Development of a Parallel Adaptive Cartesian Cell Code to Simulate Blast in Complex Geometries"; Ph.D. Thesis, The University of Queensland, Australia, 2008.
- [43] Wang, Q.; Ding, J.; Ying, M.; Zhang, B. "A Study on Damage Properties of Explosive Internal-Blast of Concrete"; *Adv. Mater. Research* 2012, 598, 420–424.
- [44] Benselama, A. M.; William, M. J. P.; Monnoyer, F. "An Efficient Numerical Method for the Onset of Blast Waves Generated by Spherical Detonation"; In Proc. of the 10th WSEAS international conference on Mathematical and computational methods in science and engineering 2008, pp. 122–127.
- [45] Benselama, A. M.; William, M. J. P.; Monnoyer, F. "A 1D-3D Mixed Method for the Numerical Simulation of Blast Waves in Confined Geometries"; *J. Comput. Phys.* 2009, 228, 6796–6810.
- [46] Alpman, E. "Advances in Modeling of Fluid Dynamics"; INTECH press, 2012, pp. 230-250.
- [47] Alpman, E. "Blast Wave Simulations Using Euler Equations and Adaptive Grids"; *J. Therm. Sci. Technol.* 2012, 32, 1–9.
- [48] Sewall, J.; Galoppo, N.; Tsankov, G.; Lin, M. "Visual Simulation of Shockwaves"; *Graph. Models* 2009, 71, 126–138.
- [49] Uystepruyst D.; Monnoyer, F. "A Numerical Study of the Evolution of the Blast Wave Shape in Rectangular Tunnels" *J. Loss Prev. Process Ind.* 2015, 34, 225–231.
- [50] Zamora, I.; Fradera, J.; Jaskiewicz, F.; López, D. "Analytical and Computational Methodology to Assess the Overpressures Generated by a Potential Catastrophic Failure of a Cryogenic Pressure Vessel"; In Proc. of 40th Reunión Anual de la SNE Valencia, 2014, pp.1-3.
- [51] Arrigoni, M.; Kerampran, S.; Bretagne, E. "Numerical Simulation of Air Blast Waves" In Proc. of European Hyperworks Tehmology Conferece, 2011, pp. 7–9.
- [52] Koslan, M.; Zaidi, A. "The Effect of Mesh Sizing Toward Deformation Result in Computational Dynamic Simulation for Blast Loading Application"; *Mod. Appl. Sci.* 2013, 7, 23–28.
- [53] Skjold, T.; Arntzen, B. J. "Simulation of Dust Explosions in Complex Geometries with Experimental Input from Standardized Tests" *J. Loss Prev. Process Ind.* 2006, 19, 210–217.
- [54] Dharma, V.; Kumar, A. S.; Rao, K. V.; Prasad, V. S. R. "Theoretical and Experimental Studies on Blast Wave Propagation in Air" *Propellants, Explos. Pyrotech.* 2015, 40, 138–143.
- [55] Sochet, I.; Gardebas, D. "Blast Wave Parameters for Spherical Explosives Detonation in Free Air" *Open J. Saf. Sci. Technol.* 2011, 1, 31–42.
- [56] Cerminara, M.; Ongaro, T. E. "ASHEE-1.0: A Compressible, Equilibrium-Eulerian Model for Volcanic Ash Plumes"; *Geosci. Model Dev.* 2016, 9, 697–730.
- [57] Park, D. J.; Lee, Y. S. "Short Communication: A Comparison on Predictive Models of Gas Explosions"; *Korean J. Chem. Eng.* 2009, 26, 313–323.
- [58] Brode, H. L. "Numerical Solutions of Spherical Blast Waves" *J. Appl. Phys.* 1955, 26, 766–775.
- [59] Larcher, M.; Casadei, F. "Explosions in Complex Geometries - A Comparison of Several Approaches"; *J. Protec. Struct.* 2010, 1, 169-195.
- [60] Neff, M.; Fiume, E. "A Visual Model for Blast Waves and Fracture" *Proc. Graph. Interface* 1999, 22, 193–202.
- [61] Chapuis, M.; Fureby, C. "Les Modeling of Combustion Applications Using OpenFOAM" In Proc. of 5th European Conference on Computational Fluid Dynamics", 2010, pp. 14–17.
- [62] Cullis, I. G.; Nikiforakis, N. "Simulating Geometrically Complex Blast Scenarios" *Def. Technol.* 2016, 12, 134–146.
- [63] Kato, K.; Aoki, T.; Kubota, S.; Yoshida, M. "A Numerical Scheme for Strong Blast Wave Driven by Explosion"; *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 2006, 51, 1335–1353.
- [64] Dharmavaram, S.; Hanna, S. R.; Hansen, O. R. "Consequence Analysis Using a CFD Model for Industrial Sites"; *Proc. Safety Prog.* 2005, 24,317-327.
- [65] Hoorelbeke, P.; Izatt, C.; Bakke, J. R.; Renoult, J.; Brewerton, R. W. "Vapor Cloud Explosion Analysis of Onshore Petrochemical Facilities" In Proc. of 7th Professional Development Conference & Exhibition, 2006, pp. 220-235.
- [66] Cant, R. S.; Dawes, W. N.; Savill, A. M. "Advanced Cfd and Modeling of Accidental Explosions" *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2004, 36, 97–119.
- [67] Zhou, X. Q.; Yu, D. Y.; Shao, X. Y.; Zhang, S. Q.; Wang, S. "Research and Applications of Viscoelastic Vibration Damping Materials: A Review" *Compos. Struct.* 2016, 136, 460–480.