مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 13، ص‌ص 315-322

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی انواع روش‌های شبیه‌سازی عددی ورق‌های مربعی ایزوتروپ کاملا گیردار و مقایسه آن با نتایج تجربی تحت بارگذاری انفجاری

وحید موسی‌بیکی ده‌آبادی[1]، جمال زمانی اشنی[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
*تهران- صندوق پستی 1999-19395، zamani@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 18 اسفند 1392
پذیرش: 18 فروردین 1393
ارائه در سایت: 19 مهر 1393

کلید واژگان:
بارگذاری دینامیکی
پاسخ سازه
کانوپ
لاگرانژی- اویلری انتخابی
شبیه‌سازی عددی

چکیده

بررسی حالت‌های واماندگی ورق‌ها و همچنین، رفتار سازه‌های مقاوم در برابر اثر تخریبی موج حاصل از انفجار، به‌دلیل اهمیت آن در طراحی سازه‌های پایدار در برابر بارگذاری انفجاری، مدت‌ها است که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این پژوهش، به بررسی و مقایسه انواع روش‌های موجود در زمینه شبیه‌سازی عددی موج انفجار پرداخته شده و پس از بررسی آن‌ها با نتایج تجربی ورق‌های مربعی شکل ایزوتروپ کاملا گیردار تحت بارگذاری انفجاری، روش ترکیبی (شامل ترکیب دو روش لاگرانژی- اویلری انتخابی و کانوپ) از نقطه‌نظر دقت در حل مسائل انفجار با درصد خطای 8/54، دارای دقت بیشتری نسبت به هر یک از روش‌های لاگرانژی- اویلری انتخابی و کانوپ می‌باشد. با توجه به این که در روش ترکیبی و همچنین روش کانوپ، جرم معادل TNT برای مواد منفجره مختلف مورد نیاز می‌باشد، ضریب 1/14 به‌عنوان جرم معادل TNT برای ماده منفجره C4 بررسی شده و با استفاده از نمودار تجربی فشار- زمان و رابطه تئوری فشار موج شوک در هوا، این ضریب با درصد خطای مورد قبول، تایید شد. نمودار فشار و ایمپالس بر حسب زمان برای دو نوع ماده منفجره TNT و C4 با جرم یکسان مورد بررسی قرار گرفت.

Study of Various Clamped Isotropic Square Plates Simulating Methods and Compare with Experimental Results under Explosion Loads

Vahid Moosabeiki Dehabadi[1], Jamal Zamani Ashani[2*]

1- Department of Mechanical Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
*P.O.B. 19395-1999 Tehran, Iran, zamani@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 09 March 2014
Accepted 07 April 2014
Available Online 11 October 2014

Keywords:
Dynamic Loading
Structural response
ConWep
ALE
Numerical Simulations

ABSTRACT

The investigation of failure modes of plates and behavior of various resistive structures to destructive effects of explosive waves, due to its importance in design of blast resistive structures, has been of interest to researchers for a long time. In this study, three different methods of numerical simulation of blast wave issues were carried out to evaluate and compare with the experimental results. As a consequence, by the means of study of clamped isotropic square plates under shockwave loading from various weight and distance of charges, the couple of ALE and ConWep methods were approved to have 8.54 per cent error in comparison with ALE and ConWep methods individually. Given that in the coupled approach and ConWep method, the equivalent weight of TNT for different types of explosives is needed, the equivalent weight of TNT for C4 was estimated by 1.14, and according to the empirical pressure-time chart and empirical equation for pressure in the air, this coefficient was proved to be right and the pressure and impulse charts for TNT and C4 explosives with the same weights was studied.

1- مقدمه

برای مدل‌سازی موج شوک و برخورد آن با سازه، استفاده از روش‌های لاگرانژی-اویلری انتخابی و کانوپ مرسوم می‌باشد[1-3]. راندرز-پرسون [1]، دقت شبیه‌سازی بارگذاری انفجاری با استفاده از روش کانوپ را مناسب ارزیابی کرده است. به‌همین صورت، وانگ [2]،خواص ماده را با استفاده از روش شبیه‌سازی لاگرانژی-اویلری انتخابی برای بارگذاری انفجاری مورد بررسی قرار داده است. ویلیامز [3]، روش کانوپ را بدون الگوریتم حل موج شوک ارزیابی کرده است و این روش را برای ضریب‌های مقیاس بندی شده برای خاک مناسب دانسته است.

کینگری و بولماش [4]، معادلات مورد نیاز برای پیش‌بینی پارامترهای انفجار ناشی از خرج‌های کروی و نیمه کروی را با استفاده از نتایج تحقیق‌های آزمایشی استخراج کردند. این معادلات به‌عنوان پیش‌بینی کننده‌های دقیق مهندسی برای محاسبات فشار و بارگذاری روی سازه‌ها مورد تائید قرار گرفته‌اند و توسط کد کامپیوتری کانوپ توسعه داده شدند[5]. با استفاده از

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
V. Moosabeiki Dehabadi, J. Zamani Ashani, Study of Various Clamped Isotropic Square Plates Simulating Methods and Compare with Experimental Results under Explosion Loads, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 13, pp. 315-322, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.30.3]

کانوپ [6] می‌توان مقادیر مختلفی از بارگذاری انفجاری در هوا را مورد محاسبه قرار داد. به‌عبارت دیگر، این کد کامپیوتری با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی موجود در [7TM 5-855-1] که برای خرج‌های با جرم کمتر از 1 کیلوگرم تا بیشتر از 400000 کیلوگرم می‌باشد، محاسبات خود را انجام می‌دهد. با توجه به تحقیقات صورت گرفته توسط اسپارزا [8]، کینگری و بولماش، با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از گودمن [9]، کینگری [10]، ریزلر [11] و دیویس و همکاران [12] منحنی چندجمله‌ای به‌دست آورده‌اند و با توجه به این منحنی‌ها، کانوپ اطلاعاتی از قبیل میزان و نوع ماده منفجره مورد نظر و همچنین فاصله خرج تا هدف را به‌عنوان ورودی دریافت می‌کند و با توجه به ورودی داده شده، پارامترهای مختلف بارگذاری به‌جز ثابت واپاشی[1] برای فشار بازگشتی را محاسبه می‌کند. از آن‌جایی‌که کانوپ به‌صورت دیجیتالی داده‌ها را به طور هم‌زمان با اطلاعات تجربی پردازش می‌کند، استفاده از پارامترهای محاسبه شده بارگذاری موج بلاست، بسیار راحت می‌باشد. به‌علاوه، از خطاهای احتمالی یا عدم صحت خواندن اطلاعات از نمودارهای لگاریتمی، جلوگیری می‌کند.

رابطه (1) در روش کانوپ، میزان فشار اعمالی را به بخش‌های مورد نظر مدل با توجه به زاویه برخورد موج، θ، نشان می‌دهد.

$$p = p_i\,(1 + \cos^2\theta - 2\cos\theta) + p_r\cos^2\theta \qquad (1)$$

که p_i، فشار برخورد و p_r، فشار بازگشتی می‌باشد[1].

در این تحقیق، سعی شده است تا با استفاده از نتایج تجربی، انواع روش‌های لاگرانژی-اویلری انتخابی[2]، کانوپ[3] و ترکیبی از این دو روش مورد بررسی قرار گیرد و در نهایت با مقایسه آن‌ها، مناسب‌ترین روش برای تحلیل عددی مسئله مطرح شده در این تحقیق، از نقطه نظر دقت در حل مسئله، انتخاب شود.

2- طراحی آزمایش

با توجه به پر هزینه بودن تحقیق‌های آزمایشی و نظر به موجود بودن نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط آزمایشگاه مکانیک انفجار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، برای بررسی و صحت‌سنجی تحلیل‌های عددی انجام شده در این تحقیق، در این قسمت سعی شده است تا با استفاده از نتایج به‌دست آمده از تحقیق‌های آزمایشی، صحت مدل‌سازی ورق آلومینیوم تحت با انفجاری در محیط نرم‌افزار مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور، در این آزمایش‌ها، ورق‌هایی از جنس آلومینیوم سری 5000 تحت بار بلاست حاصل از انفجار خرج‌های کروی از جنس C4 قرار گرفته‌اند.

در این آزمایش، صفحه‌ها دارای ابعاد 260×260 میلی‌متر و با ضخامت 2 میلی‌متر بودند که پس از قرار گرفتن در قاب نگه‌دارنده، ابعاد 180×180 میلی‌متر از ورق آلومینیومی در معرض بارگذاری انفجاری قرار گرفتند. برای ایجاد شرایط تمام گیردار از دو قاب آهنی به ضخامت 10 میلی‌متر استفاده شد که پس از سوراخ‌کاری ورق‌ها و قاب، برای اتصال آن‌ها از 12 پیچ M14، همراه با دو واشر ساده فلزی و یک واشر فنری استفاده شد. نحوه انجام آزمایش و چند نمونه از قطعات آزمایش شده در شکل 1 نشان داده شده است. مشخصات هندسه و جنس ورق مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی که ضرایب آن با استفاده از استانداردهای موجود در این زمینه و آزمون کشش ساده که در آزمایشگاه مکانیک انفجار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی به‌دست آمده، در جدول 1 آورده شده است.

1- Decay Constant
2- Arbitrary lagrangian eulerian (ALE)
3- Conventional weapons effects program (ConWep)

ورق مربعی مورد نظر، در فاصله‌های 100، 150 و 200 میلی‌متری از مرکز ماده منفجره C4 با جرم 30، 45 و 60 گرم، قرار داده شده است.

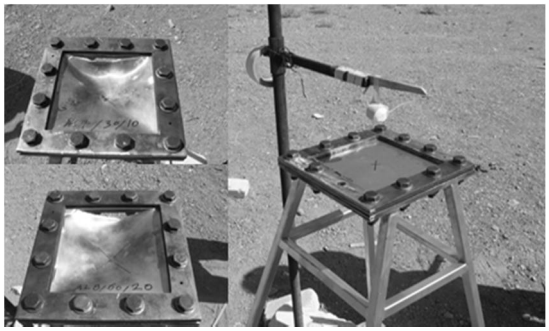
3- مشخصات مدل

مدل ورق مورد نظر، دارای ابعاد 180×180 میلی‌متر و ضخامت 2 میلی‌متر در راستای (z,y,x) و شامل 2700 المان می‌باشد و در فاصله‌های 100، 150 و 200 میلی‌متری مرکز ماده منفجره قرار دارد. در این آزمایش از ماده منفجره C4 با جرم30، 45 و 60 گرم، استفاده شده است. با توجه به این که برای شبیه‌سازی موج بلاست در روش ترکیبی، نیاز به جرم معادل TNT دارد، ماده منفجره C4 نسبت به TNT میزان انرژی بیشتری با ضریب 1/14 آزاد می‌کند[4].

بااستفاده ازاین ضریب، جرم معادل TNT به‌کار برده شده دراین تحقیق، به‌ترتیب 34/2، 51/3 و 68/4 گرم می‌باشد.

3-1- نحوه مش‌بندی

در این قسمت، به بررسی تاثیر تعداد المان به‌کار رفته در ورق و همچنین، تعیین تعداد مناسب المان در ورق پرداخته می‌شود. بدین منظور، با استفاده از دو روش شبیه‌سازی ترکیبی و روش لاگرانژی-اویلری انتخابی، سعی شد تا تعداد المان بهینه تعیین شود. بدین منظور تعداد المان‌های به‌کار رفته در راستای طول، عرض و ضخامت ورق برای روش ترکیبی در جدول 2 و برای روش لاگرانژی-اویلری انتخابی در جدول 3 آورده شده است. لازم به‌ذکر است که نتایج آورده شده درجدول‌های 2 و 3، برای خیز مرکز ورق در فاصله 200 میلی‌متری از خرج با جرم 30 گرم و ورق با ابعاد 2×180×180 میلی‌متر می‌باشد. همچنین، ورق به‌صورت یک چهارم در روش لاگرانژی-اویلری و به‌صورت کامل در روش ترکیبی مدل شده است.



شکل 1 نحوه انجام آزمایش و نمونه‌هایی از قطعه‌های آزمایش شده

جدول 1 مشخصات هندسه و جنس ورق

ضریب پواسون	0/33
مدول مماسی(MPa)	2500
کرنش شکست	0/16
استحکام تسلیم(MPa)	167
مدول یانگ(GPa)	71
چگالی(kg/m^3)	2700
ضخامت (mm)	2
عرض (mm)	180
طول (mm)	180

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.30.3]

جدول 2 تاثیر تعداد المان‌های ورق در میزان خیز مرکز ورق در روش ترکیبی

تعداد المان در راستای طول و عرض	تعداد المان در راستای ضخامت	خیز مرکز ورق (نرم‌افزار) (mm)	خیز مرکز ورق (تجربی) (mm)	درصد اختلاف نتایج تجربی و نرم‌افزار
30×30	2	21/735	17/5	-24/2
30×30	3	16/63	17/5	5
30×30	4	16/34	17/5	6/62
40×40	4	16/145	17/5	7/74

جدول 3 تاثیر تعداد المان‌های ورق در میزان خیز مرکز ورق در روش لاگرانژی-اویلری انتخابی

تعداد المان در راستای طول و عرض	تعداد المان در راستای ضخامت	خیز مرکز ورق (نرم‌افزار) (mm)	خیز مرکز ورق (تجربی) (mm)	درصد اختلاف نتایج تجربی و نرم‌افزار
15×15	2	13/265	17/5	24/2
15×15	3	16/329	17/5	6/69
15×15	4	16/516	17/5	5/62
20×20	4	16/521	17/5	5/59

همان‌طورکه در جدول 2 مشاهده می‌شود، خیز مرکز ورق در حالت 3×30×30 دارای کمترین میزان خطا با نتایج تجربی می‌باشد و همچنین، با بیشتر شدن تعداد المان‌ها، نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار تغییرات کمی داشته است.

در ادامه با توجه به جدول 3 مشاهده می‌شود که نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار در روش لاگرانژی-اویلری انتخابی در حالت 3×15×15 به نتایج به‌دست آمده از مدل‌های با تعداد المان بیشتر نزدیک می‌باشد و همچنین، نرم‌افزار در این روش به عدد 16/521 میلی‌متر برای خیز مرکز ورق در برابر بارگذاری 30 گرم ماده منفجره C4 در فاصله 200 میلی‌متری ورق همگرا می‌باشد.

بنابراین، با توجه به جدول‌های 2 و 3 مشاهده می‌شود که میزان المان در راستای طول و عرض با تعداد 30×30 و 3 المان در راستای ضخامت، دارای میزان خطای قابل قبولی از نظر میزان هزینه حل و همچنین، دقت در حل مسئله می‌باشد.

3-2- مدل مادی

از مدل مادی الاستیک-پلاستیک با سخت‌شوندگی کینماتیک[1] در روند تحلیل‌های این تحقیق استفاده شده است. این مدل مادی، برای بیان ارتباط بین تنش و کرنش در کامپوزیت‌ها، پلاستیک‌ها و فلزات در محیط نرم‌افزارال-اس-داینا[2] کاربرد دارد. ضرایب مورد نیاز برای ورق آلومینیوم در جدول 1 آورده شده است.

3-3- شبیه‌سازی به روش لاگرانژی - اویلری انتخابی

نرم‌افزار ال-اس-داینا، روش‌های گوناگونی را برای مدل‌سازی موج شوک در هوا ارائه می‌دهد. یکی از روش‌های معمول شامل مدل‌سازی صریح[3] هوا و ماده منفجره با استفاده از فرمول‌بندی چند ماده‌ای لاگرانژی-اویلری انتخابی می‌باشد که در آن معادلات حالت مناسب به مواد نسبت داده می‌شود و همچنین برای کنترل رفتار انفجاری ماده منفجره، از مدل سوزش[4] مناسب استفاده می‌شود.

با توجه به کاستی‌های دو روش لاگرانژی و اویلری، روش لاگرانژی-اویلری انتخابی به‌وجود آمد. این روش در واقع ترکیب هر دو روش لاگرانژی و اویلری است. در این روش، در ابتدای یک پله زمانی، ماده و مش به‌صورت لاگرانژی تغییر شکل می‌دهند و به دنبال آن در یک مرحله که به حرکت افقی[5] مشهور است، مش تغییرشکل داده به‌همراه تمامی اطلاعات مربوطه، به مش اولیه نگاشت می‌شود.

سازه‌های مورد نظر به‌صورت لاگرانژی و به‌صورت تداخل سازه با سیال[6] مدل می‌شود. در نرم‌افزار ال-اس-داینا، برای انتقال فشار موج شوک به سازه از کلید *CONSTRAINED_ LAGRANGE_ IN_ SOLID استفاده می‌شود. این روش شامل انتشار یک موج شوک قوی در هوا می‌باشد و المان‌های لاگرانژی-اویلری باید به اندازه کافی کوچک باشند تا جبهه موج شوک انتقال یابد. در مواردی که فاصله خرج تا هدف زیاد باشد، هوای اطراف باید به‌صورت گسترده مدل شود. پله زمانی برای حل مسائل با توجه به اندازه کوچکترین المان تعیین می‌شود.

هوا و ماده منفجره C4 با المان‌های هشت گرهی و به‌کمک مدل‌های مادی هیدرودینامیکی، مدل شده‌اند. برای هوا، تعیین معادله حالت، دانسیته، ضریب ویسکوزیته ضروریست. ضریب ویسکوزیته برابر صفر تعیین شده است، چون از ویسکوزیته صرف‌نظر شده است و هوا توانایی انتقال فشار منفی را ندارد. معادلات حالت مورد استفاده برای هوا و خرج به ترتیب چندجمله‌ای خطی[7] و جونز-ویکینز-لی[8] است. برای هوا و ماده منفجره به‌ترتیب از مدل‌های مواد بلااثر[9] و سوزش قوی ماده منفجره[10] استفاده شده است. ضرایب مواد مورد استفاده برای هوا و C4 در جدول 4 آمده است.

ماده منفجره و هوا به ترتیب به‌صورت کره[11] و مکعب[12] توپر مش‌بندی شده‌اند (شکل 2). به‌دلیل تقارن و کاهش هزینه حل، تنها یک هشتم کره، شبیه‌سازی شده و در صفحه‌های تقارن با استفاده از تعریف شرایط مرزی (محدود کردن گره‌ها برای جابجایی و چرخش) امکان حرکات اضافی از المان‌ها گرفته شده است. بنابراین هوا و ماده منفجره با المان‌های از نوع هشت گرهی توپر مدل می‌شوند. همچنین، در نرم‌افزار ال-اس-داینا، برای تعریف تماس بین المان‌های هوا و ماده منفجره که از نوع لاگرانژی-اویلری انتخابی می‌باشند، از فرمولاسیون مواد چندگانه لاگرانژی-اویلری انتخابی[13] استفاده می‌شود.

برای اعمال شرایط تقارن، درجات آزادی گره‌ها محدود شد، به‌طوری‌که گره‌های روی محور y تنها امکان حرکت در راستای y را داشتند و سایر درجات آزادی آن‌ها محدود شد و گره‌های روی صفحه yz در راستای x و دوران حول محور z و y و گره‌های روی صفحه تقارن xy در راستای z و دوران حول محورهای x و y محدود شد.

مدل ایجاد شده با استفاده از این روش در شکل 3 ارائه شده است.

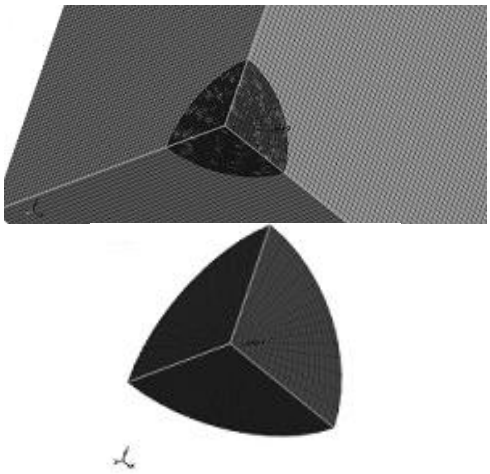
1- MAT_PLASTIC_KINEMATIC (MAT_003)
2- LS- DYNA
3- Explicit

4- Burn model
5- Advection
6- Fluid-structure interaction (FSI)
7- Linear Polynomial
8- JWL
9- Null
10- High Explosive Burn
11- Sphere Solid
12- Box Solid
13- Multi- material ALE

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.30.3]

جدول 4 ضرایب هوا و ماده منفجره C4 [۱۳]

هوا	
γ	1/4
چگالی (g/cm3)	1/23e-3
E_0 (Mbar)	2/5e-6
ماده منفجره C4	
A (Mbar)	5/974
B (Mbar)	1/39
R_1	4/5
R_2	1/5
E_0(Mbar)	0/07
ω	0/3
چگالی (g/cm³)	1/601
v_d(cm/μsec)	0/819
P_{CJ}(Mbar)	0/28



شکل 2 نحوه شبیه‌سازی ماده منفجره و هوا

3-4- شبیه‌سازی به روش کانوپ

یکی دیگر از روش‌های مرسوم در حل مسائل موج شوک، اعمال مستقیم فشار موج بلاست به سازه لاگرانژی و یا کانوپ می‌باشد. فشار اعمالی با توجه به معادلات تجربی تنظیم شده در قسمت بارگذاری بلاست[1] محاسبه می‌شود که این معادلات با استفاده از جمع‌آوری نتایج هزاران آزمایش انفجار ماده منفجره به‌دست آمده‌اند.

در این روش، از آن‌جایی‌که نیازی به مدل هوا و ماده منفجره نمی‌باشد، از المان‌های تماسی استفاده نمی‌شود و برای شبیه‌سازی موج بلاست، نیازمند ورودی‌های زیر می‌باشد:

- جرم معادل TNT
- نوع موج بلاست (صفحه‌ای یا کروی)
- مکان ماده منفجره در فضا
- مشخصات سطح برای انتخاب نوع فشار اعمالی

با اطلاعات کسب شده، کانوپ فشار مناسب را برای نوع سطح انتخاب شده، محاسبه می‌کند. این روش، از لحاظ هزینه محاسباتی نسبت به روش لاگرانژی-اویلری انتخابی دارای هزینه کمتری می‌باشد. لازم به‌ذکر است که بعد از بازتاب شدن موج بلاست از سازه، زمانی که موج‌ها برهم نهی می‌کنند، تمرکز انرژی صورت می‌گیرد که این روش توانایی محاسبه تغییرات بعد از عبور موج شوک را ندارد.

در این روش، دیگر نیاز به مدل‌سازی هوای اطراف سازه نمی‌باشد. بنابراین از قسمت‌های مدل‌سازی هوا و خرج در شبیه‌سازی به روش لاگرانژی-اویلری انتخابی صرف‌نظر می‌شود. مدل ساخته شده با استفاده از این روش در شکل 4 ارائه شده است.

3-5- شبیه‌سازی به روش ترکیبی

برای توسعه مدل‌سازی موج بلاست با توجه به داده‌های آزمایشگاهی، به نسخه 971 نرم‌افزار ال-اس-داینا، گزینه بارگذاری بلاست پیشرفته[2] اضافه شده است.

این گزینه بارگذاری تجربی موج بلاست را به‌طور مستقیم به المان‌های هوا و محیط لاگرانژی-اویلری انتخابی اعمال می‌کند. در اصل این روش، ترکیبی از دو روش کانوپ و لاگرانژی-اویلری انتخابی می‌باشد و برای شبیه‌سازی، تنها به مدل هوای اطراف سازه نیاز می‌باشد. فشار موج بلاست توسط قوانین تجربی به لایه‌ای از المان‌های لاگرانژی-اویلری به‌عنوان المان‌های محدودکننده[3] وارد می‌شود که این لایه به‌عنوان منبع انرژی برای المان‌های مجاور خود می‌باشد. این لایه با ضخامت یک المان در محیط نرم‌افزار، بین سازه و ماده منفجره و در کنار محیط هوا قرار می‌گیرد و با المان‌های هشت گره‌ای مدل می‌شود. سپس، موج بلاست در بین المان‌های هوا گسترش می‌یابد تا سرانجام با سازه برخورد کند. در این روش، تمام قابلیت‌های روش‌های دیگر حفظ و با هم ترکیب شده‌اند و مطالعه موج شوک

شکل 3 مدل ساخته شده با استفاده از روش لاگرانژی-اویلری انتخابی

شکل 4 مدل ساخته شده با استفاده از روش کانوپ

1- *LOAD_BLAST

2- *LOAD_BLAST_ENHANCED
3- Ambient Layer

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.30.3]

را برای مسافت‌های دور و همچنین بدون نیاز به مدل کردن حجم هوای زیاد میسر می‌کند.

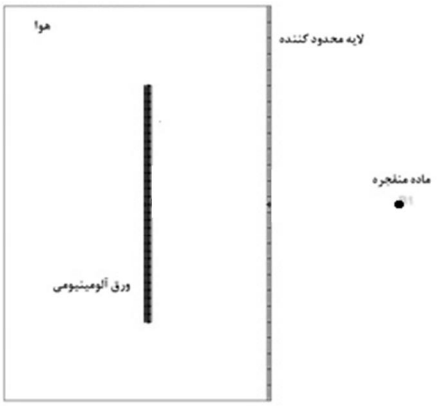
مدل ترکیبی در شکل ۵ به‌صورت شماتیک نشان داده شده است. سازه مورد نظر توسط المان‌های هوا احاطه شده است و بین سازه و سیال، با استفاده از کلید CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID*کنترل صورت می‌گیرد. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، المان‌های هوای اطراف ورق دارای ابعاد ۲۵۰×۲۵۰ میلی‌متر در راستای x و y و ۵۰ میلی‌متر در راستای z می‌باشد. ضرایب به‌کار رفته برای مدل هوای اطراف ورق در جدول ۴ آورده شده است. برای اعمال شرایط کاملا گیردار در لبه، کلیه درجات آزادی گره‌های لبه خارجی ورق محدود می‌شود.

برای تعریف لایه محدودکننده، ابتدا باید توجه کرد که برای هر یک از المان‌های لاگرانژی-اویلری که شامل المان‌های هوا و لایه محدود کننده می‌باشد، فرمولاسیون المان شماره ۱۱ مورد استفاده قرار می‌گیرد و همچنین برای مدل هوا که از قوانین گازهای ایده‌آل پیروی می‌کند، از معادله حالت چند جمله‌ای خطی استفاده می‌شود. برای کاهش هزینه در شبیه‌سازی در این روش، از زمان شروع منفی ۳۰[1] میکروثانیه استفاده شده است. استفاده از زمان شروع منفی سبب می‌شود تا در آغاز محاسبات، موج شوک به‌طور ناگهانی با محیط محدودکننده برخورد نماید و شبیه‌سازی ناحیه مدنظر از همان ابتدا صورت پذیرد. با این ویژگی، در زمان لازم برای رسیدن موج شوک به ناحیه مورد نظر صرفه‌جویی شده و در نتیجه، باعث کاهش هزینه در زمان حل می‌شود.

۳-۶- صحت‌سنجی جرم معادل TNT برای ماده منفجره C4

با توجه به این که برای شبیه‌سازی ماده منفجره در روش کانوپ و ترکیبی، به جرم معادل TNT ماده منفجره مورد نظر نیاز می‌باشد، در این قسمت سعی شده است تا با استفاده از نتایج تجربی به‌دست آمده توسط آلیا و سولی [۱۴]، ضریب ۱/۱۴ به‌عنوان جرم معادل TNT برای ماده منفجره C4بررسی شود و همچنین، با توجه به روابط تئوری برای جرم مشخص ماده منفجره C4 در فاصله‌های مختلف مورد صحت‌سنجی قرار گیرد.

در آزمایش تجربی انجام شده [۱۴]، از ماده منفجره کروی شکل C4 بـه میزان ۴۵۴ گرم و شعاع ۴۰/۰۷ میلی‌متر استفاده شده است و بیشینه فشـار در فاصله ۱۵۲۴ میلی‌متر به میزان ۲/۹۶ بار اندازه‌گیری شده است. با توجه به این که ماده منفجره C4 نسبت به TNT میزان انرژی بیشـتری آزاد مـی‌کنـد،



شکل ۵ مدل ورق آلومینیوم در محیط هوا با استفاده از روش ترکیبی

1- TBO= -30 µs

برای شبیه‌سازی موج انفجار با استفاده از روش ترکیبی و کانوپ و همچنین، اعمال ضریب ۱/۱۴ به‌عنوان جرم معادل TNT، جرم ماده منفجره به کار برده شده در این تحقیق، ۵۲۲/۱ گرم می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، برای صحت‌سنجی مدل به‌کار گرفته شده، نمودار فشار بر حسب زمان در مدت زمان ۲۰۰۰ میکروثانیه، مورد محاسبه قرار گرفت.

همچنین برای مقایسه، نتایج به‌دست آمده از آزمایش تجربی و مدل ساخته شده با روابط تئوری، بیشینه فشار به‌صورت تئوری از رابطه (۲)، [۱۵]، محاسبه شد.

$$P_m = 1.13S^{-2.1}, 1 \le S \le 10$$
$$P_m = 0.183S^{-1.16}, 10 \le S \le 200 \qquad (۲)$$

که در آن، P_m، بیشینه فشار بر حسب MPa می‌باشد و S (فاصله مقیاس‌شده) بر حسب $m/kg^{1/3}$ به‌صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود.

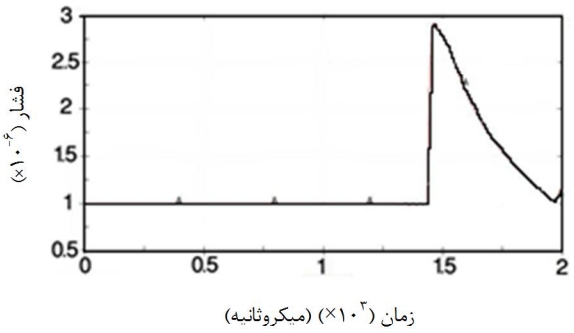
$$S = \frac{S'}{W^{1/3}} \qquad (۳)$$

که S' فاصله خرج از هدف بر حسب متر و W جرم ماده منفجره بر حسب کیلوگرم می‌باشد.

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، فشار موج شوک به‌دست آمده برای ۴۵۴ گرم خرج C4 در فاصله ۱۵۲۴ میلی‌متری به‌صورت تجربی و تئوری، ۲/۹۶ بار و همچنین فشار موج شوک به‌دست آمده با استفاده از شبیه‌سازی عددی، ۲/۹۲ بار می‌باشد. در نتیجه، صحت مدل ساخته شده با ۱/۳۵ درصد خطا، مورد تایید قرار می‌گیرد. همچنین، با توجه به این‌که فشار موج شوک به‌دست آمده با روش تجربی برای ۴۵۴ گرم ماده منفجره C4 با ۵۲۲/۱ گرم ماده منفجره TNT (جرم معادل TNT)، تقریبا مطابقت خوبی دارد، ضریب ۱/۱۴ برای تبدیل جرم خرج C4 به معادل TNT آن، از میزان دقت مناسبی برخوردار می‌باشد.

۳-۶-۱- فشار بیشینه و ایمپالس برای دو نوع ماده منفجره در فاصله‌های مختلف

در این قسمت سعی شده است تا نمودار فشار و ایمپالس برای ۳۰۰ گرم ماده منفجره TNTو C4 در فاصله‌های ۱۰۰۰، ۱۵۲۴ و ۲۰۰۰ میلی‌متری با محیط واسط هوا مورد بررسی قرار گیرد و نتایج به‌دست آمده با رابطه تجربی (۲)



شکل ۶ نمودار فشار (مگا بار) بر حسب زمان (میکروثانیه) برای ۴۵۴ گرم خرج C4 در فاصله ۱۵۲۴ میلی‌متری

جدول ۵ نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار و مقایسه آن با داده‌های تجربی و تئوری

اختلاف نتایج تجربی و عددی (%)	تجربی [۱۴] (بار)	تئوری (بار)	تحلیل عددی (بار)	
۱/۳۵	۲/۹۶	۲/۹۵	۲/۹۲	فشار موج شوک

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.30.3]

مقایسه شود. بدین منظور، نتایج به‌دست آمده از تحلیل عددی و رابطه تجربی، در جدول 6 آورده شده است.

با توجه به جدول 7، مشاهده می‌شود که بیشینه فشار حاصل از انفجار خرج C4 در تحلیل عددی، به‌طور میانگین 1/07 برابر بیشینه فشار حاصل از انفجار خرج TNT می‌باشد و همین نسبت برای بیشینه فشار به‌دست آمده از نتایج تئوری برابر با 1/096 می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحلیل عددی، می‌توان گفت که مدل به‌کار رفته در این تحقیق دارای دقت بسیار خوبی برای پیش‌بینی فشار حاصل از موج شوک را دارا می‌باشد و ضریب 1/14 برای جرم معادل TNT ماده منفجره C4، ضریب مناسبی می‌باشد.

4- بحث و نتایج

در این قسمت نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی به‌دست آمده در این تحقیق با یکدیگر مقایسه می‌شود. بدین منظور، تنظیمات آزمایش، بیشینه خیز ماندگار ورق و درصد اختلاف بیشینه خیز ورق میان نتایج تجربی و تحلیل عددی در جدول 7 آمده است.

همان‌طور که در جدول 7 مشاهده می‌شود، نتایج به‌دست آمده از روش ترکیبی به‌طور میانگین دارای 8/54 درصد خطا، روش کانوپ به طور میانگین دارای 9/88 درصد خطا و روش لاگرانژی-اویلری انتخابی دارای 9/27 درصد خطا با نتایج تجربی می‌باشند. همچنین، با توجه به نتایج به‌دست آمده از روش کانوپ و مقایسه آن با روش‌های دیگر، می‌توان نتیجه گرفت که این روش در حل مسائل انفجار در فواصل دور از دقت بهتری برخوردار است و می‌تواند جایگزین روش‌های ترکیبی و لاگرانژی-اویلری انتخابی باشد.

در ادامه به بررسی نتایج به‌دست آمده از روش ترکیبی پرداخته شده است و نحوه پیش‌بینی جابه‌جایی مرکز ورق تحت بارگذاری انفجاری و همچنین، نحوه تغییر شکل ورق تحت بارگذاری بلاست پرداخته شده است.

در شکل7، نمودار جابه‌جایی ورق نسبت به زمان بارگذاری و در شکل 8، نحوه تغییر شکل ورق در مقابل بارگذاری 30 گرم ماده منفجره C4 از فاصله 200 میلی‌متری، ارائه شده است.

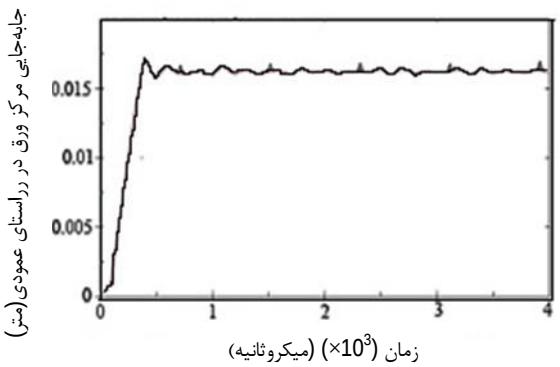
همان‌طور که در شکل 8 مشاهده می‌شود، حالت واماندگی ورق از نوع تغییر شکل بزرگ پلاستیک می‌باشد. در شکل 9، نمودار جابه‌جایی ورق نسبت به زمان بارگذاری و در شکل 10، نحوه تغییر شکل ورق در مقابل بارگذاری 60 گرم ماده منفجره C4 از فاصله 200 میلی‌متری، ارائه شده است.

جدول 6 مقایسه فشار و ایمپالس به‌دست آمده از شبیه‌سازی و رابطه تئوری برای 300 گرم خرج TNT و C4

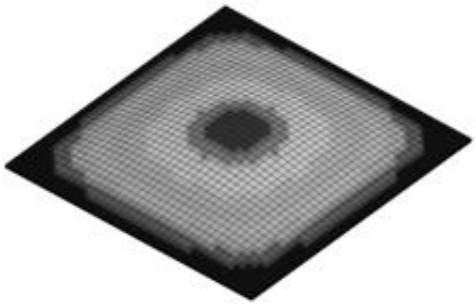
ماده منفجره	جرم (گرم)	فاصله (میلیمتر)	فشار- تحلیل عددی (بار)	فشار- تئوری (بار)	ایمپالس (بار × میکروثانیه)	P_{C4}/P_{TNT} مدل	I_{C4}/I_{TNT} مدل	P_{C4}/P_{TNT} تئوری
C4	300	1000	4/73	5/33	0/000660	1/07	1/07	1/097
TNT	300	1000	4/42	4/86	0/000615			
C4	300	1524	2/50	2/2	0/000280	1/09	1/15	1/096
TNT	300	1524	2/29	2/01	0/000242			
C4	300	2000	1/89	1/24	0/000166	1/05	1/22	1/096
TNT	300	2000	1/80	1/13	0/00136			

جدول 7 تنظیمات آزمایش، بیشینه خیز ورق، نوع تغییر شکل ورق و درصد اختلاف بیشینه خیز ورق نتایج تجربی و تحلیل عددی

شماره	C4 (گرم)	فاصله خرج از ورق (میلیمتر)	خیز مرکز ورق- تجربی (میلیمتر)	نوع تغییر شکل ورق- تجربی	خیز مرکز ورق ALE		خیز مرکز ورق کانوپ		خیز مرکز ورق ترکیبی	
					(میلیمتر)	% خطا	(میلیمتر)	% خطا	(میلیمتر)	% خطا
1	30	100	32	پارگی از ناحیه تکیه‌گاه	37/26	-16/43	38/14	-19/2	37/95	-18/6
2	30	150	22/5	تغییر شکل بزرگ پلاستیک	22/84	-1/52	24/08	-7/01	22/81	-1/38
3	30	200	17/5	تغییر شکل بزرگ پلاستیک	16/33	6/69	16/41	6/23	16/63	5
4	45	200	24/5	تغییر شکل بزرگ پلاستیک	22/36	8/74	22/76	7/09	22/94	6/37
5	60	200	33	پارگی از ناحیه تکیه‌گاه	28/72	16/97	29/74	9/87	29/25	11/36



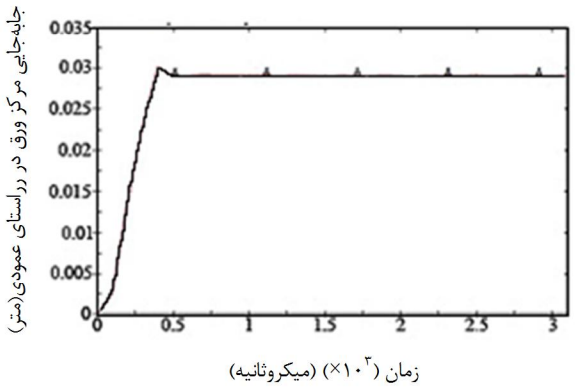
شکل 7 جابجایی مرکز ورق (متر) نسبت به زمان برای 30 گرم خرج C4 از فاصله 200 میلی‌متری



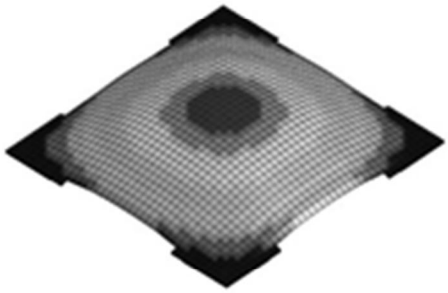
شکل 8 نحوه تغییر شکل ورق در مقابل بارگذاری 30 گرم خرج C4 در فاصله 200 میلی‌متری

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.30.3]



شکل ۹ جابه‌جایی مرکز ورق (متر) نسبت به زمان برای ۶۰ گرم خرج C4 از فاصله ۲۰۰ میلی‌متری



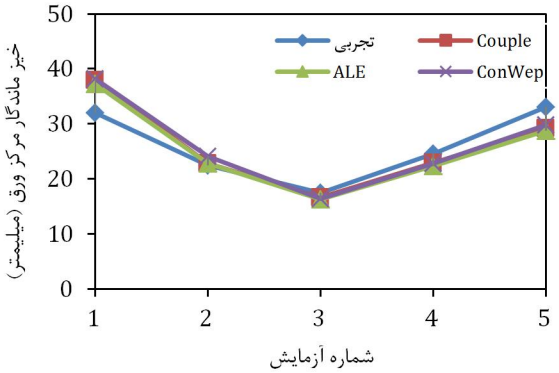
شکل ۱۰ نحوه تغییر شکل ورق در مقابل بارگذاری ۶۰ گرم خرج C4 در فاصله ۲۰۰ میلی‌متر

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، المان‌های موجود در لبه ورق حذف شده‌اند و ورق از ناحیه تکیه‌گاه دچار پارگی شده است که این نتیجه با نتایج تجربی موافقت کامل دارد. در شکل ۱۱، نمونه آزمایش شده در مقابل بارگذاری انفجاری خرج ۶۰ گرمی از فاصله ۲۰۰ میلی‌متری آورده شده است.

در شکل ۱۱، نحوه تغییر شکل نمونه آزمایش‌شده ورق آلومینیومی در مقابل بارگذاری انفجاری خرج ۶۰ گرمی در فاصله ۲۰۰ میلی‌متری آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ورق از ناحیه تکیه‌گاه دچار پارگی شده است که با توجه به شکل ۱۰، نحوه تغییر شکل ورق با استفاده از شبیه‌سازی عددی پیش‌بینی شده است. عدم تقارن در تغییر شکل ورق آزمایش شده می‌تواند متاثر از شرایط تکیه‌گاه، کروی نبودن خرج انفجاری و همچنین، در مرکز نبودن خرج انفجاری باشد.

در شکل ۱۲ نتایج حاصل از تحقیق‌های آزمایشی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده

شکل ۱۱ نمونه آزمایش‌شده ورق آلومینیوم در مقابل بارگذاری انفجاری ۶۰ گرم خرج C4 از فاصله ۲۰۰ میلی‌متر



شکل ۱۲ مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی خیز ماندگار ورق

می‌شود، نتایج تجربی و تحلیل عددی در روش ترکیبی به‌طور میانگین دارای ۸/۵۴ درصد اختلاف، در روش ALE به‌طور میانگین ۹/۲۷ درصد و در روش کانوپ به‌طور میانگین ۹/۸۸ درصد اختلاف می‌باشند. با توجه به مطابقت خوب میان نتایج تجربی و نتایج به‌دست آمده از تحلیل عددی، می‌توان استنتاج کرد که روش ترکیبی برای محاسبه تغییر شکل ورق‌های مربعی ایزوتروپ کاملاً گیردار از دقت خوبی برخوردار بوده و می‌توان از آن برای تحلیل برهم‌کنش موج بلاست و ورق‌های موردنظر استفاده کرد. همچنین، از آن جا که در روش ترکیبی و لاگرانژی-اویلری انتخابی، هوای اطراف سازه مدل می‌شود، می‌توان رفتار موج شوک بعد از برخورد را مورد مطالعه قرار داد.

۵- نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعات و پژوهش‌های صورت گرفته و با جمع‌بندی نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، نتایج کلی زیر را می‌توان استنتاج کرد:

۱- به لحاظ سادگی در مدل‌سازی، روش کانوپ دارای مدل‌سازی ساده‌تری می‌باشد.

۲- روش ترکیبی از نظر دقت در حل مسئله ورق‌های ایزوتروپ مربعی شکل، از دقت بالاتری نسبت به روش‌های دیگر برخوردار می‌باشد.

۳- سه روش به‌کاربرده شده در این تحقیق، قابلیت پیش‌بینی نحوه پارگی در ورق را دارا می‌باشند.

۴- روش کانوپ توانایی پیش‌بینی رفتار موج شوک بعد از برخورد با سازه را دارا نمی‌باشد و برای تعیین رفتار موج شوک بعد از برخورد، می‌توان از روش‌های ترکیبی و ALE استفاده کرد.

۵- مقدار ۱/۱۴ به‌عنوان جرم معادل TNT ماده منفجره C4 در شبیه‌سازی عددی موج انفجار در هوا، از دقت مناسبی برخوردار می‌باشد.

۶- مراجع

[1] B. Randers-Pehrson, *Airblast Loading Model for DYNA2D and DYNA3D*, ARL-TR-1310, 1997.

[2] J. Wang, *Simulation of Landmine Explosion Using LS-DYNA3D Software: Benchmark Work of Simulation of Explosion in Soil and Air*, DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Fishermans Bend, Victoria, Australia, 2001.

[3] K. Williams, Validaton of a Loading Model for Simulating Blast Mine Effects on Armoured Vehicles,in *The 7th International LS-DYNA Users Conference*, Dearbon, 2002.

[4] C. N. Kingery, G. Bulmash, *Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst, Aberdeen Proving Ground*, MD: ARBRL-TR-02555, 1984.

[5] D. Hyde, *User's Guide for Microcomputer Programs ConWep and FUNPRO-Applications of TM 5-855-1*, Vicksburg: U.S. Army Engineering Waterways Experimental Station, 1988.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.30.3]

[6] D. W. Hyde, *ConWep: Conventional Weapons Effects Program,* Vicksburg, MS: U. S. Army, 2005.

[7] TM5-855-1, *Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons,* Washington, DC: U. S. Department of the Army, 1986.

[8] E. D. Esparza, Blast Measurements and Equivalency for Spherical Charges at Small Scaled Distances, *International Journal of Impact Engineering,* Vol. 4, pp. 23-40, 1986.

[9] H. J. Goodman, *Compiled Free Air Blast Data on Bare Spherical Pentolite,* BRL report 1092, Aberdeen Proving Ground, MD, 1960.

[10] C. N. Kingery, *Air Blast Parameters Versus Distance for Hemispherical TNT Surface Bursts,* BRL report 1344, Aberdeen Proving Ground, MD, 1966.

[11] R. Reisler, B. Pellet, L. Kennedy, *Air burst data from height-of-burst studies in Canada, Vol. II: HOB 45.4 to 144.5 feet*. BRL report 1990, Aberdeen Proving Ground, MD, 1977.

[12] V. W. Davis, T. Goodale, K. N. Kapla, A. R Kriebel, H. B. Mason, J. F. Melichar, P. J. Morris, J. N. Zaccor, *Nucclear Weapons Blast Phenomena, Vol. IV- Simulation of Nuclear Airblast Phenomena with High Explosives(U),* DASA report 1200-IV, Washington, DC, 1973.

[13] C. M. Kaurin, M. O. Varslot, *Blast loading on square steel plates; a Comparative Study of Numerical Methods,* M. Sc. Thesis, Department of Structural Engineering, NTNU- Norwegian University of Scienc, 2010.

[14] A. Alia, M. Souli, High Explosive Simulation Using Multi-Material Formulations, *Applied Thermal Engineering,*Vol. 26, pp. 1032-1042, 2006.

[15] F.D. Alonso, E.G. Ferradás, J.F. Sánchez Pérez, A.M. Aznar., J.R. Gimeno, J.M. Alonso, Characteristic overpressure–impulse–distance curves for the detonation of explosives, pyrotechnics or unstable substances. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* Vol. 6, No.19, pp. 724-728, 2006.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.30.3]