

مطالعه انتشار امواج ضربه ای انفجار زیر آب بروش المان محدود

سید شهاب امامزاده^۱، محمد تقی احمدی^۲

۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

انفجار زیر آب یکی از پدیده‌های مخرب سازه‌های دریایی و ساحلی می‌باشد. گرچه طراحی یک سازه بر مبنای بارهای انفجاری بصره نمی‌باشد ولی می‌توان با بررسی امواج حاصل از انفجار و اثر تخریبی آنها ملاحظاتی را در مکان‌یابی و هندسه این سازه‌ها در نظر گرفت بطوریکه کمترین آسیب بوجود آید. در این تحقیق پس از معرفی مکانیزم انفجار زیر آب و روش‌های مختلف تحلیل آن به مدلسازی عددی انتشار موج انفجاری در آب براساس یک روش برگزیده توسط نویسندگان پرداخته می‌شود و به کمک یکی از کدهای چندمنظوره تجاری جهت تطبیق نتایج روش‌های عددی با روابط تجربی دو نمونه موردی با موفقیت بررسی می‌شود.

کلمات کلیدی: انفجار زیر آب، امواج ضربه ای، اجزای محدود

Underwater Explosion Shock Wave Propagation by Finite Element Method

Abstract

Underwater explosion is a common phenomenon to be considered for marine and coastal structures. Although it is not wise to design such structures based on explosion loads, but having studied the explosion wave and its demotic effects, location and geometries of these structures can be improved. In this study after introducing underwater explosion mechanism a summary of the numerical methods used for propagation of explosion waves in water is introduced and finally a preferable method is proposed for modeling the phenomenon. Based on such considerations numerical results using multipurpose commercial codes are successfully compared with empirical relations.

Keywords: Shock wave, Underwater explosion, Finite element

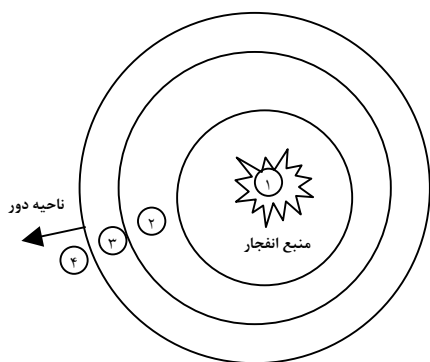
۱- مقدمه

زمانی بار ضربه‌ای ناشی از انفجار زیر آب بستگی به مقدار ماده منفجره و فاصله سازه از آن دارد. تعیین مقدار دقیق یا نزدیک به واقعیت این بار ضربه‌ای موضوع تحقیقات آزمایشگاهی و عددی متعددی در سراسر دنیا بوده است. در تحقیقات آزمایشگاهی که قبل از دهه ۵۰ و گسترش روشهای عددی مرسوم بود با تجهیزات آزمایشگاهی از جمله حسگرهای فشار بالا و

یکی از مهمترین ملاحظات طراحی سازه‌های دریایی مانند تونل‌های زیر آبی، خطوط لوله و تاسیسات نفتی مقاومت این سازه‌ها در برابر بارهای ضربه‌ای ناشی از انفجار زیر آب می‌باشد. یکی از مشخصات این بارگذاری ضربه‌ای بودن آن می‌باشد که مقدار بار در مدت زمان کوتاهی بشدت افزایش پیدا کرده و به یک ماکزیمم می‌رسد و پس از آن میرا می‌شود. تاریخچه

دور حباب تشکیل شده حول شعاع تعادلی نوسان می‌نماید که ساده‌ترین فرض برای حرکت حباب، نوسان در عمق ثابت و بدون حرکت انتقالی به سمت بالا است. همچنین در بررسی پدیده انفجار زیر آب می‌توان از نظر مکانی نواحی مختلفی تعریف نمود که معادلات حاکم هر ناحیه به شکل خاصی تبدیل می‌شوند. این نواحی مطابق تجارب مطالعاتی نگارندگان در شکل ۱ نشان داده شده است.

ناحیه ۱: ماده منفجره و حباب ناشی از انفجار
ناحیه ۲: جابجایی سیال بزرگ بوده و رفتار سیال کاملاً غیر خطی است.
ناحیه ۳: جابجایی سیال کوچک بوده ولی ابتدا سیال رفتار ضربه ای و سپس رفتار آکوستیکی دارد.
ناحیه ۴: رفتار سیال کلا آکوستیکی است.



شکل ۱- نواحی تعریف شده اطراف منبع انفجار

۳- معادلات انتشار امواج ضربه‌ای

در این تحقیق برای بررسی انتشار امواج ضربه‌ای در محدوده زمان نزدیک از معادلات اویلر و معادلات حالت آب و محصولات انفجار استفاده می‌شود. برای حل معادلات حاکم از روش‌های تقریب چند جمله‌ای استفاده شده است که می‌توان به روش‌های گودونوفی^۶ اشاره نمود. این روش‌ها که خود به سه دسته قطعه‌ای ثابت، قطعه‌ای خطی و قطعه‌ای سهمی تقسیم می‌شوند. پاسخ سیستم را در یک بازه زمانی با یک قطعه تقریب می‌زنند. در نواحی ۱ و ۲ معادلات ناپراستوکس با فرض ناچیز بودن لزجت تبدیل به معادلات اویلر

⁶ Gudunov

دوربین‌های خاص پرسرعت پدیده انفجار زیر آب بررسی می‌شد [1]. فرمول‌های آزمایشگاهی مطرح شده در این زمینه حاصل این تحقیقات می‌باشد. از طرفی با توجه به هزینه بالای تهیه چنین وسایلی و نیاز به دانستن فشار در محیط‌های با هندسه پیچیده بعد از دهه ۵۰ تلاش‌هایی جهت مدلسازی عددی انفجار زیر آب نیز صورت گرفت که با حل معادلات انتشار موج ضربه‌ای گام موثری جهت طراحی و مقاوم سازی سازه‌های دریایی در برابر بارهای ضربه‌ای زیر آبی برداشته شد. در این مقاله به بررسی روش‌های عددی مطرح شده در مدلسازی انفجار زیر آب و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی پرداخته می‌شود. بدین منظور از کدهای اجزای محدود ال‌س داین^۱ و آباکوس^۲ که قابلیت فرمولبندی اویلری، لاگرانژی^۳ و ALE^۳ را دارند جهت مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است.

۲- بررسی پدیده انفجار زیر آب

پدیده انفجار زیر آب را می‌توان در دو محدوده زمان نزدیک و زمان دور بررسی نمود. در زمان نزدیک اولین موج ضربه‌ای تشکیل شده و در آب منتشر می‌شود و در زمان دور نوسان حباب و اثر انعکاس امواج از مرزهای صلب و سطح آزاد ظاهر می‌شود. احتراق ماده منفجره از یک یا چند نقطه درون ماده منفجره بنام نقاط دتونیشن^۴ شروع شده و با سرعتی بنام سرعت دتونیشن^۵، ماده منفجره را تبدیل به گاز پرفشار می‌نماید. پس از احتراق کامل ماده منفجره محصولات گازی شروع به انبساط می‌کنند و بر محیط اطراف اثر می‌گذارند. اگر محیط زمین باشد یک چاله (قیف انفجار) تشکیل می‌شود، در آب حبابهای گاز تشکیل می‌شود و در هوا یک موج انفجار گسترش می‌یابد. در محیط آب حباب گاز تشکیل شده با انبساط خود یک موج ضربه‌ای ایجاد می‌نماید و متعاقباً در محدوده زمان

¹ Ls-Dyna

² Abaqus

³ Arbitrary Lagrangian Eulerian

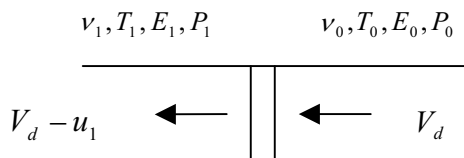
⁴ Detonation Point

⁵ Detonation Velocity

جدول ۱- پارامترهای معادله Gruneisen برای آب [3]

symbol	Properties of water	Values
ρ_0	Density	1000Kgm^{-3}
c	Speed of sound	1484ms^{-1}
s_1	Material constant	1.979
s_2	Material constant	0.0
s_3	Material constant	0.0
γ_0	Material constant	0.11
a	Material constant	3.0
E_0	Initial Internal Energy	0
v_0	Initial relative volume	1

در ماده منفجره چون موج دتونیشن بصورت یک ناپیوستگی فشاری تیز مطابق شکل شماره ۲ از درون ماده منفجره با سرعت V_d حرکت می کند لذا روابط دیفرانسیلی محیط آب برای ماده منفجره قابل قبول نبوده و از معادلات انتگرالی پیوستگی، مومنتم و انرژی بین ناحیه منفجر نشده و منفجر شده استفاده می شود. تمامی جوابهای این معادلات که به خواص ناحیه منفجر نشده بستگی دارد بر روی منحنی رانکین هوگونویت نمایش داده می شود. اگر خواص ماده منفجر نشده که با اندیس صفر نمایش داده می شود مشخص باشد از روی منحنی رانکین هوگونویت می توان خواص محصولات انفجار را که با اندیس ۱ نمایش داده می شود را بدست آورد. در اینصورت به فشار محصولات انفجار، فشار چاپمن ژوکت نیز گفته می شود. فشار چاپمن ژوکت برای تی ان تی در حدود ۲۵۵ مگا پاسکال می باشد [1].



شکل ۲- دتونیشن از دید ناظر روی جبهه موج

همچنین از معادله JWL⁷ برای فشار حاصل در محصولات انفجار استفاده می شود. این معادله بفرم زیر می باشد [3].

می شوند. معادله حاکم برای جریان سه بعدی غیر لزج و بدون انتقال حرارت محیط آب در فرم بقایی بصورت زیر می باشد [2].

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

که در این معادله :

$$\Phi = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u_1 \\ \rho u_2 \\ \rho u_3 \\ \rho E \end{Bmatrix}, F_i = \begin{Bmatrix} \rho u_i \\ \rho u_1 u_i + p \delta_{1i} \\ \rho u_2 u_i + p \delta_{2i} \\ \rho u_3 u_i + p \delta_{3i} \\ \rho H u_i \end{Bmatrix} \begin{cases} H = e + \frac{u_i u_i}{2} + \frac{p}{\rho} \\ E = e + \frac{u_i u_i}{2} \end{cases}$$

در روابط فوق، ρ چگالی جرمی، u_i مولفه سرعت p فشار و e انرژی داخلی آب می باشد. در اینجا ۵ معادله و ۶ مجهول داریم. لذا برای حل معادلات فوق علاوه بر معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی نیاز به معادلات حالت برای گاز و آب نیز وجود دارد. معادله حالت رابطه بین فشار، چگالی و انرژی داخلی سیال را نشان می دهد. از مهمترین معادلات حالت می توان به معادله Gruneisen برای آب اشاره نمود که تراکم پذیری آب را لحاظ می نماید و فشار در آن بصورت زیر می باشد [3].

$$P = \frac{\rho_0 c^2 \mu [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2})\mu - \frac{a}{2}\mu^2]}{[1 - (s_1 - 1)\mu - s_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - s_3 \frac{\mu^3}{\mu + 1}]^2} + (\gamma_0 + a\mu)E_1 \quad (2)$$

که در آن :

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 = \frac{1}{v} - 1, E_1 = \frac{E_0}{\rho}$$

ρ و v بترتیب چگالی جرمی و نسبت چگالی حجمی محصولات انفجار می باشند که مقادیر آنها در زمان اولیه با اندیس صفر نمایش داده می شود. در مورد آب پارامترهای معادله Gruneisen در جدول ۱ آورده شده است.

⁷ Jones Wilkins Lee

۵-۱- بررسی تحلیلی انفجار زیر آب

در سال ۱۹۴۱ Penny حل کروی و صفحه ای یک بعدی معادلات ریمان را ارائه داد که علاوه بر سادگی قابلیت مدل کردن امواج دامنه کوچک و امواج با دامنه محدود را داشت و فقط اثر یک ماده منفجره مدل می شد و نتایج فقط تا ۶ برابر شعاع کره حباب انفجار اعتبار داشت [1]. در سال ۱۹۴۴ Kirkwood و Bethe حل کروی یک بعدی بروش انرژی را بمنظور نمایش اتلاف انرژی در انفجار زیر آب نشان دادند [1]. این تحلیل قابلیت مدلسازی چند ماده منفجره را بصورت همزمان داشت و می توانست امواج با دامنه محدود را مدل نماید. از معایب این روش نیاز به تبدیلات پیچیده برای بدست آوردن متغیرهای پایه بود [1]. در سال ۱۹۷۷ رایلی^۸ حل کروی یک بعدی نوسان حباب در آب تراکم ناپذیر و در سال ۱۹۸۵ پریماکوف^۹ حل کروی یک بعدی انتشار امواج ضربه ای در آب را بعلت مرزهای متحرک و نوسان حباب ارائه نمود. [4]

۵-۲- بررسی آزمایشگاهی انفجار زیر آب

مایر در یک مقاله مروری، تاریخچه ای از روش های آزمایشگاهی برای حل مساله انتشار امواج ضربه ای را آورده است که در ادامه به اختصار به آن اشاره می شود. [4] در سال ۱۹۶۵ Ellis پارامترهای موثر در کاویتاسیون بر اثر انفجار زیر آب و در سال ۱۹۷۰ Kling عکسبرداری سریع و بررسی ترکیب حباب ناشی از کاویتاسیون را مطرح نمودند. همچنین در سال ۱۹۷۹ Price معادلات تشابه را برای انفجارات زیر آبی مطرح نمود و در سال ۱۹۸۷ Blake و Gibson به بررسی حباب های کاویتاسیون در نزدیکی مرزها پرداختند و بالاخره در سال ۱۹۹۵ مایر تولید حباب بروش جرقه الکتریکی را بعنوان مدلی از انفجارات زیر آبی مطرح ساخت. شاید بتوان مهمترین کار در این زمینه را به کار انجام شده توسط کول در سال ۱۹۶۵ مربوط دانست که به بررسی انفجار زیر آب به صورت تئوری و آزمایشگاهی برای ماده کروی و استوانه ای

$$P = A(1 - \frac{\omega}{R_1 v})e^{-R_1 v} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 v})e^{-R_2 v} + \omega \frac{E_1}{v} \quad (3)$$

خواص ماده تی ان تی و پارامترهای معادله JWL برای آن در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- خواص ماده TNT و ثابت های JWL برای آن

symbol	Properties of TNT	Values
ρ_0	Density	1610 kgm^{-3}
V_D	Detonation velocity	7437 ms^{-1}
P_{CJ}	Chapman-Joucouet	$0.255 \times 10^9 \text{ Pa}$
A	Material constant	$5.409 \times 10^{11} \text{ Pa}$
B	Material constant	$9.372 \times 10^9 \text{ Pa}$
R_1	Material constant	4.5
R_2	Material constant	1.1
ω	Material constant	0.35
E_0	Initial Internal Energy	$0.4 \times 10^{10} \text{ Jkg}^{-1}$
v_0	Initial relative volume	1

۴- شرایط مرزی

انفجار زیر آب در دو محدوده زمان نزدیک و زمان دور بررسی می شود. در زمان نزدیک که اولین موج ضربه ای به سازه برخورد می نماید هنوز موج برگشتی از دیواره ها و سطح آزاد به سازه نرسیده است. لذا در این فاصله زمانی می توان از اثرات شرایط مرزی دیواره و سطح آزاد صرف نظر نمود. در مقابل در زمان دور نوساناتی در تاریخچه فشار دیده می شود که ناشی از دیواره ها و سطح آزاد است. برای مرز بی نهایت از شرط مرزی لایسمر استفاده شده است. این مرز برای مدلسازی نواحی بینهایت یا نیمه بینهایت بکار می رود. بر این مرز تنش نرمال $-p u_n$ یعنی متناسب با سرعت نرمال u_n حرکت ذرات آب اعمال می شود.

۵- روش های بررسی انفجار زیر آب

بطور کلی برای بررسی انفجار زیر آب از سه روش تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی استفاده می شود. در ادامه خلاصه ای از روشهای مختلف مدلسازی انفجار زیر آب آورده شده است.

⁸ Rayleigh-plesset

⁹ Primakof

در این رابطه
 $q(t)$: فشار مرزی مجازی درون آب که در فاصله R از مرکز انفجار قرار دارد، بر حسب پاسکال
 t : زمان بر حسب میکروثانیه
 R : فاصله نقطه دلخواه تا مرکز انفجار^{۱۰} بر حسب متر
 θ : زمان میرایی موج در آب بر حسب میکروثانیه
 t_d : زمان رسیدن موج ضربه ای به نقطه مورد نظر روابط مطرح شده نوسان حباب و حرکت انبساطی و انقباضی آنرا در نظر نگرفته و از اینرو یک منحنی هموار برای تاریخچه فشار حاصل می‌نماید.

۵-۳- بررسی عددی انفجار زیر آب

در زمینه تحلیل عددی انتشار امواج ضربه‌ای روشهای المان محدود، المان مرزی، تفاضل محدود، حجم محدود و بی شبکه مطرح می‌باشند که در این مقاله عمدتاً روش عددی المان محدود بررسی می‌شود. در ادامه به شرح مختصر هر روش پرداخته می‌شود.

المان محدود: در این روش سازه و آب هر دو با المان‌های محدود مدل می‌شوند. روش‌های مطرح در این زمینه، روش اویلری، لاگرانژی و ALE می‌باشد که با توجه به نوع مساله مورد استفاده قرار می‌گیرند [8].

المان مرزی: محیط آب با مرزها مدل می‌شود برای میدان دور و نزدیک مناسب است ولی ناپیوستگی‌هایی که داخل مرز بوجود می‌آید لحاظ نمی‌شود. یکی از روشهای المان مرزی که در اندرکنش آب و سازه مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته روش تقریبی مجانب دو گانه^{۱۱} DAA می‌باشد [9].

حجم محدود: محیط آب با حجم‌های محدود مدل شده و هر المان فقط یک مجهول در مرکز دارد. لذا به آسانی قابل ترکیب با مدل سازه نمی‌باشد. این روش به دو صورت صریح و ضمنی مطرح می‌باشد.

تفاضل محدود: معادلات دیفرانسیل بر روی شبکه‌های منظم بصورت عددی در می‌آیند. فقط در شبکه منظم

پرداخت و شاید بتوان نتایج آزمایشگاهی او را مهمترین نتایج تجربی در این زمینه دانست که در بسیاری از کارهای بعدی به آن اشاره شده است. در ادامه یکی از روابط تجربی که در زمینه انفجار زیر آب بدست آمده است مطرح می‌شود. بعلت نوسان حباب در انفجار زیر آب در روابط تجربی معمولاً از ماکزیمم شعاع حباب بعنوان مرز آب و سیال استفاده می‌شود. اگر انفجار در عمق زیاد حادث شود بطوریکه حباب گاز شکسته نشود ماکزیمم شعاع حباب R_0 بر حسب متر طبق رابطه بیارنهولت از رابطه زیر بدست می‌آید [5,6].

$$R_0 = [1.3QW / (1 + 0.1d_w)]^{1/3} \quad (4)$$

Q : کمیت وابسته به حرارت ماده منفجره بر حسب مگاژول بر کیلو گرم که برای تی ان تی برابر 4.44 یا 4.27 در نظر گرفته می‌شود.

W : وزن ماده منفجره بر حسب کیلوگرم

d_w : عمق ماده منفجره از سطح آب بر حسب متر

یکی از روابط تجربی تاریخچه فشار ناشی از انفجار زیر آب در هر نقطه رابطه نمایی کول می‌باشد [1,7].

$$q(t) = 0 \quad 0 \leq t \leq t_d \quad (5)$$

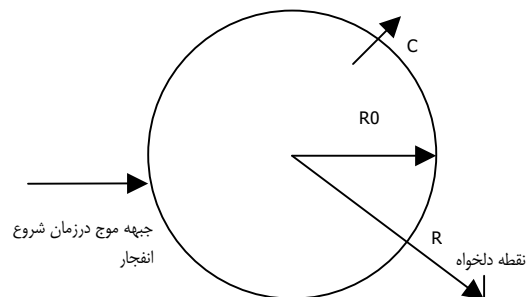
$$q(t) = q_0 e^{-(t-t_d)/\theta} \quad t_d < t \leq \theta$$

$$t_d = \frac{R - R_0}{c}$$

فشار ماکزیمم q_0 و ثابت میرایی موج θ عبارتند از:

$$q_0 = 52.16 \times 10^6 \left(\frac{W}{R}\right)^{1.13} \quad (6)$$

$$\theta = 92.5 \times W^{1/3} \left(\frac{W}{R}\right)^{-0.22} \quad (7)$$

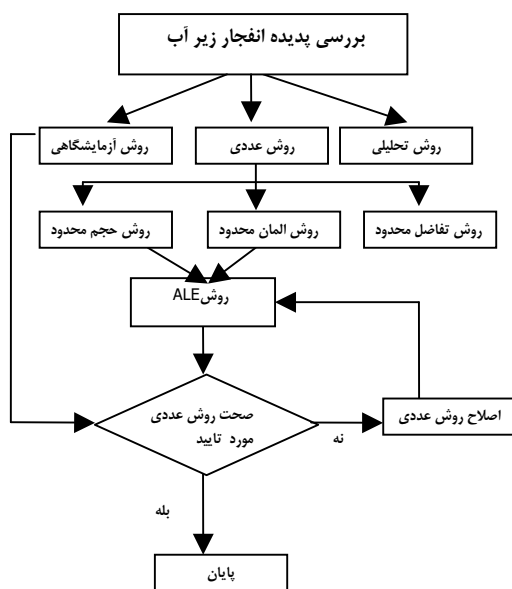


شکل ۳- پارامترهای موثر در روابط تجربی

¹⁰ Stand-off

¹¹ Doubly Asymptotic Approximation

مدلسازی سیال استفاده می‌شود. روش ALE بیشتر برای تحلیل مسائل اندرکنشی سیال - سازه یا سیال - سیال که مرز متحرک وجود دارد استفاده می‌شود. اگر در المانی چند نوع سیال موجود باشد مانند جریان‌های چند فازی یا بررسی نفوذ ذرات آب به المانهای داخل حباب انفجار، نوع خاصی از این روش بنام ¹⁵MMALE تعریف می‌شود. اکثر نرم افزارهای موجود مانند Abaqus, Ls-Dyna, Adina, Ansys مسایل اندرکنش آب و سازه را از روش ALE یا CEL تحلیل می‌نمایند. در این مقاله مطابق الگوریتم زیر به صحت سنجی نوع خاصی از روش‌های عددی ALE پرداخته می‌شود.



شکل ۴- الگوریتم صحت سنجی روش عددی

۷- معرفی روش برگزیده مدلسازی انفجار زیر آب

با توجه به قابلیت‌های ویژه نرم افزارالس داینا و آباکوس در زمینه انفجار زیر آب، در این مقاله از این دو کد استفاده شده است. کد اجزای محدودالس داینا که نام اولیه آن Dyna3D می‌باشد در سال ۱۹۷۶ در موسسه لیورمور لورنس کالیفرنیا توسط تیم هالکوئیست ارائه شد. این نرم افزار قابلیت مدلسازی انواع مختلفی از

جواب می‌دهد و به دو صورت صریح یا ضمنی مطرح می‌باشد.

بی شبکه: میدان حل توسط تعدادی نقطه مادی با جرم مشخص تقریب زده می‌شود که تحت تاثیر معادلات اساسی حرکت می‌کنند و مستقل از شبکه می‌باشند. در این روش ممکن است نوساناتی در جواب بوجود آید که باید کنترل شود [10].

۶- روش المان محدود در انفجار زیر آب

اگر چه روشهای تفاضل محدود و حجم محدود در بررسی دینامیک سیالات و انتشار موج کاربرد وسیع دارند اما وقتی که اندرکنش این امواج با سازه‌ها مطرح شود روش المان محدود کارایی بیشتری دارد زیرا سازه‌ها معمولاً با روش المان محدود مدل می‌شوند لذا تطابق بهتری حاصل می‌شود. اگر ماده منفجره نزدیک سازه باشد انتشار موج ضربه ای درون آب را می‌توان با روش‌های خاص المان محدود مانند روش مشخصه‌ها ^{۱۲} CBS و یا روش گالرکین گسسته ^{۱۳} DG مدل نمود. از این روشها جهت حل معادلات اوپلر با مجهول دانستن سرعت و فشار در هر گره استفاده می‌شود [2]. در میدان‌های دور با افزایش فاصله بین ماده منفجره و سازه تعداد المان‌ها زیاد شده لذا ارایه یک راه حل جدید برای این مشکل در تحلیل‌های اندرکنشی میدان دور مهم می‌باشد. بطور کلی روشهای المان محدود به دو گروه اوپلری و لاگرانژی تقسیم می‌شوند. روشهای لاگرانژی عمدتاً برای مدلسازی سازه‌ها استفاده شده و قابلیت مدلسازی تغییر شکلهای بزرگ را در سازه دارند. در این روش موقعیت شبکه متغیر می‌باشد لذا برای مسایل جریان مناسب نیست. از طرف دیگر روشهای اوپلری عمدتاً برای مدلسازی محیط سیال بکار می‌روند و موقعیت شبکه در این روش ثابت است. در مسایل اندرکنش آب و سازه معمولاً از یکی از روش ^{۱۴} CEL یا ALE استفاده می‌شود. در روش CEL سیال بصورت اوپلری و سازه بصورت لاگرانژی مدل می‌شود و در روش ALE از هر دو روش اوپلری و لاگرانژی برای

¹² Characteristic Base Split

¹³ Discontinuous Galerkin

¹⁴ Coupled Eulerian Lagrangian

¹⁵ MultimaterialALE

محدوده‌ای به فاصله ۳۴۵ سانتیمتر از مرکز انفجار می‌باشد. از معادله حالت JWL برای تی تی ان تی و Gruneisen برای آب استفاده می‌شود. سرعت دتونیشن برابر ۰/۷۴۳۷ سانتیمتر بر میکروثانیه و فشار نقطه چاپمن - ژوگت برابر ۰/۲۵ (گرم - میکروثانیه - سانتیمتر) معادل ۲۵۰۰۰ مگاپاسکال و جرم مخصوص آب را برابر ۱ گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد. سایر پارامترها مطابق جدول‌های ۱ و ۲ در نظر گرفته می‌شود.

۸-۱-۱- مشخصات مدل

از واحدهای میکروثانیه - سانتیمتر و مگا بار جهت تعریف داده‌ها و تحلیل نتایج استفاده شده است. برای مدل کردن انفجار در این مساله با توجه به تقارن کروی مساله فرض می‌شود ماده منفجره یک هشتم کره‌ای به شعاع ۲/۴۵ سانتیمتر می‌باشد و یک هشتم کره‌ای از سیال به شعاع ۳۴۵ سانتیمتر ماده منفجره را احاطه نموده و با آن هم مرکز می‌باشد. در اینصورت فقط ۱۲/۵ گرم تی تی ان تی مدل می‌شود. چون ماده منفجره در عمق ۱۰ متری قرار دارد. لذا ماکزیم شعاع حباب گاز محصولات انفجار طبق رابطه بیارنهولت برابر ۶۵ سانتیمتر می‌شود. مدت زمان مدل شده بعد از تکمیل دتونیشن ۱۰۰۰۰ میکروثانیه بوده و مقدار گام زمانی در هر قدم زمانی Δt^{n+1} توسط نرم افزار از رابطه زیر که وابسته به طول المان‌ها L_e و سرعت انتشار موج c می‌باشد، تعیین می‌شود.

$$\Delta t^{n+1} = b \cdot \min\{\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \dots, \Delta t_N\} \quad (8)$$

برای هر المان داریم:

$$\Delta t_e = \frac{L_e}{G + \sqrt{G^2 + c^2}} \quad (9)$$

$$G = \begin{cases} C_1 c + C_0 L_e |\dot{\epsilon}_{kk}| & \text{for } \dot{\epsilon}_{kk} < 0 \\ 0 & \text{for } \dot{\epsilon}_{kk} > 0 \end{cases}$$

در روابط فوق C_0 و C_1 و b ثابت‌های بی بعد بوده که مقدار پیش فرض آنها بترتیب برابر ۱/۵ و ۰/۶۰ و ۰/۹ می‌باشد. تعداد المان‌ها N و نرخ تغییرات زمانی کرنش

مواد منفجره و سیال اطراف آن را دارد و در آن معادلات انتشار موج با در نظر گرفتن سرعت ذرات بروش ALE حل شده است. در این روش از قابلیت‌های روش حجم محدود نیز استفاده شده است. همچنین این نرم افزار قابلیت مدلسازی دتونیشن را دارد. برای مدلسازی سیال از ماده ای بنام تهی^{۱۶} که در مدل مواد موجود در نرم افزار وجود دارد استفاده می‌شود. اگر این نوع ماده به المان سیال تخصیص داده شود معادله حالت آن فراخوانی می‌شود. همراه این نوع ماده باید معادله حالت نیز تعریف شود. در هر گره این المان هم فشار و هم سرعت مجهول می‌باشد لذا برای مدلسازی ناحیه ۲ مناسب می‌باشد. در این روش برای مدلسازی ناحیه ۱ از ماده انفجاری مرجع که همان تی تی ان تی باشد استفاده شده است. مشخصات ماده منفجره مطابق جدول ۲ می‌باشد. بعلا آنکه مرز ماده منفجره و آب متحرک است از روش ALE استفاده می‌شود. همچنین از مرزهای جاذب لایسمر برای مرز بینهایت استفاده شده است.

نرم افزار آباکوس همانند الس داینا قابلیت ویژه‌ای برای مدلسازی انفجار زیر آب دارد. مدلسازی کاویتاسیون یکی از آنها است. برای در نظر گرفتن کاویتاسیون فرض می‌شود. این پدیده وقتی حادث می‌شود که مجموع فشار استاتیک و دینامیکی کمتر از فشار بخار آب شود. وقتی فشار مطلق آب کمتر از فشار بخار آب می‌شود، سیال بدون کاهش فشار دینامیکی منبسط می‌شود. در آباکوس مرز اندرکنشی یا بصورت یک سطح تعریف می‌شود یا بصورت المانهای واسط ASI^{۱۷} بین سیال و سازه تعریف می‌شود [12].

۸- حل دو مساله

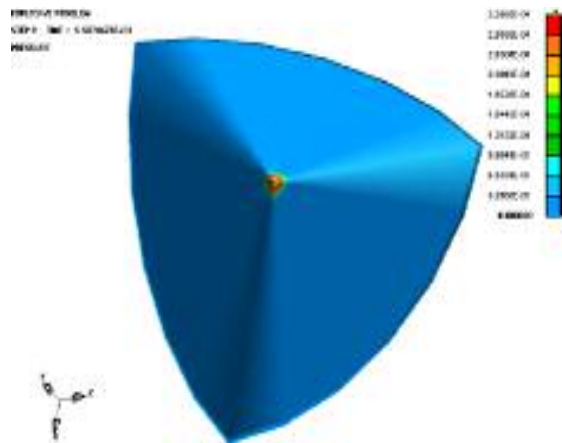
۸-۱- مساله اول

۱۰۰ گرم ماده منفجره کروی به قطر ۲/۴۵ سانتیمتر از جنس تی تی ان تی به جرم مخصوص ۱/۶۱ گرم بر سانتیمتر مکعب در عمق ۱۰ متری از سطح آزاد منفجر می‌شود. هدف تعیین توزیع فشار و سرعت در

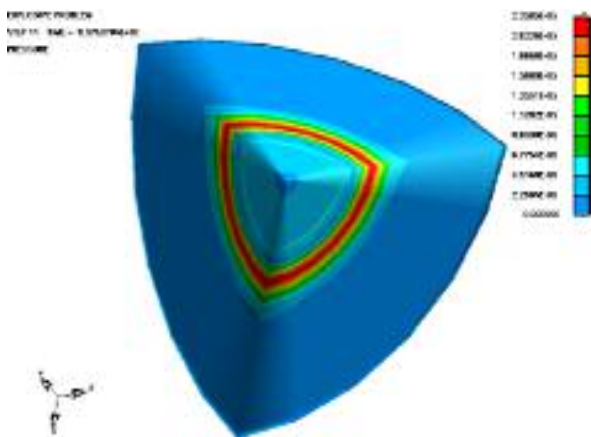
¹⁶ Null Material

¹⁷ Acoustic Structure Intraction

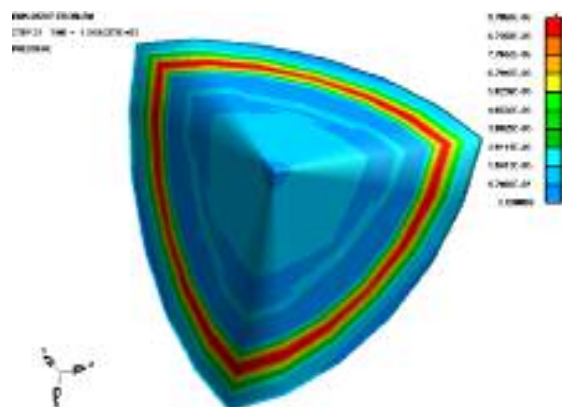
می‌آید که نزدیک به فرض جدول ۱ می‌باشد. در نتیجه می‌توان گفت امواج ضربه‌ای ناشی از انفجار با سرعت صوت در آب انتشار می‌یابند.



شکل ۶- کانتور فشار در زمان ۱۰۰ میکروثانیه پس از انفجار (فشار ماکزیمم 32MPa)

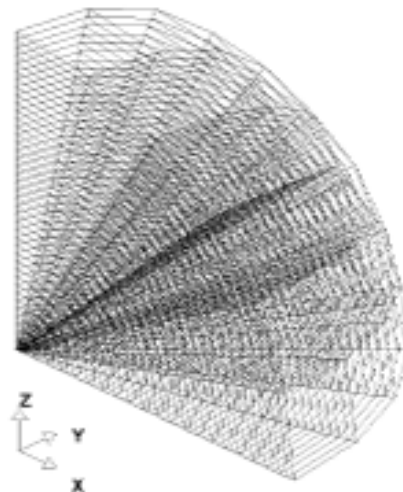


شکل ۷- کانتور فشار در زمان ۱۰۰۰ میکروثانیه پس از انفجار (فشار ماکزیمم 2.2MPa)



شکل ۸- کانتور فشار در زمان ۲۰۰۰ میکروثانیه پس از انفجار (فشار ماکزیمم 0.97MPa)

حجمی \dot{g}_{kk} در قدم زمانی n ام می‌باشد. در این مدل تعداد بخش‌های مدل ۲ شامل ماده منفجره و آب، تعداد گره‌ها ۱۸۶۹ و تعداد المان‌ها ۱۱۳۴ در نظر گرفته شده است. اولین نقطه که در مرکز کره می‌باشد. به علت تقارن در سه جهت کاملاً مقید می‌باشد.

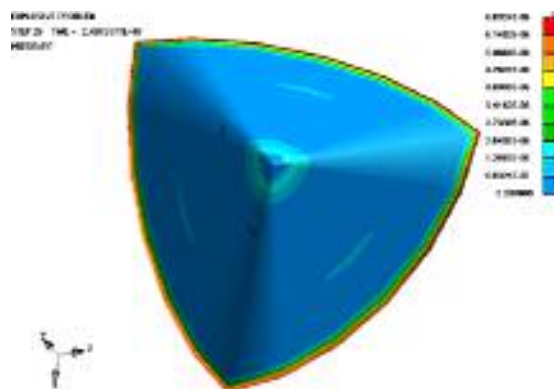


شکل ۵- مش‌بندی ماده منفجره و آب اطراف

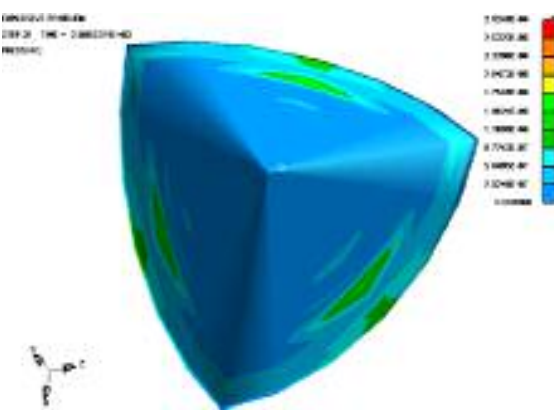
۸-۱-۲- نتایج

همانطور که در اشکال ۶ الی ۱۰ دیده می‌شود مقادیر کانتور فشار در گام‌های زمانی مختلف نمایش داده شده است. شکل ۶ زمان کوتاهی پس از انفجار و تشکیل حباب را نشان می‌دهد. در این شکل ایجاد موج ضربه و شروع انتشار آن دیده می‌شود. مطابق شکل ماکزیمم فشار در زمان ۱۰۰ میکروثانیه پس از انفجار برای ۱۰۰ گرم تی ان تی برابر ۳۲ مگاپاسکال است که جهت مقایسه از مقاومت فشاری بتن معمولی یعنی ۲۸ مگاپاسکال بیشتر می‌باشد. در شکل ۷ مشاهده می‌شود وقتی زمان به ده برابر زمان قبلی می‌رسد فشار یک پانزدهم می‌شود. که نشان دهنده افت سریع فشار می‌باشد. در شکل ۸ موج ضربه‌ای به مرز بینهایت نزدیک شده و شدت آن همچنان کاهش می‌یابد. نهایتاً شکل ۹ رسیدن موج ضربه‌ای را پس از حدود ۲۵۰۰ میکروثانیه به مرزهای بینهایت که در فاصله ۳۴۵ سانتیمتری مرکز انفجار می‌باشد نشان می‌دهد. بدین ترتیب سرعت انتشار موج ۱۳۸۰ متر بر ثانیه بدست

ماکزیمم فشار و زمان رسیدن موج به یک نقطه ثابت در هر دو روش عددی و فورمول تجربی یکسان می‌باشد. در نتایج روش عددی نوساناتی در منحنی فشار دیده می‌شود. این مساله بعلت عملکرد این روش و نیز وجود مرزهای بینهایت لایسمر است که مقداری از امواج را برگشت داده و همانطور که دیده می‌شود در زمان دور مقدار فشار صفر نمی‌شود. همچنین بعلت در نظر نگرفتن میرایی آب در مدل عددی انتشار موج و انعکاس موج از مرزهای بینهایت لایسمر منحنی بدست آمده از روش عددی نرمتر از منحنی روش تجربی بوده و موج ضربه‌ای در مدت زمان بیشتری میرا می‌شود که این مساله طبیعت ضربه‌ای بودن موج را کاهش می‌دهد و مطابق شکل مقدار آن ناچیز می‌باشد. نکته دیگر لحاظ شدن دتونیشن در مدل عددی می‌باشد که در نتیجه پس از کامل شدن دتونیشن موج ضربه‌ای به محیط آب وارد می‌شود در صورتیکه در فورمول آزمایشگاهی از این مرحله صرفنظر شده و پس از رسیدن حباب گاز به ماکزیمم شعاع آن موج ضربه‌ای وارد محیط آب می‌شود لذا نقطه شروع نمودار مدل عددی زودتر از فرمول آزمایشگاهی می‌باشد. در مجموع می‌توان گفت با توجه به دقت قابل قبول روش عددی مطرح شده که میزان خطای آن برای فشار ماکزیمم حدود ۱۰٪ درصدمی‌باشد، این روش می‌تواند در زمان نزدیک، جایگزین مناسبی برای روشهای آزمایشگاهی و تجربی باشد.



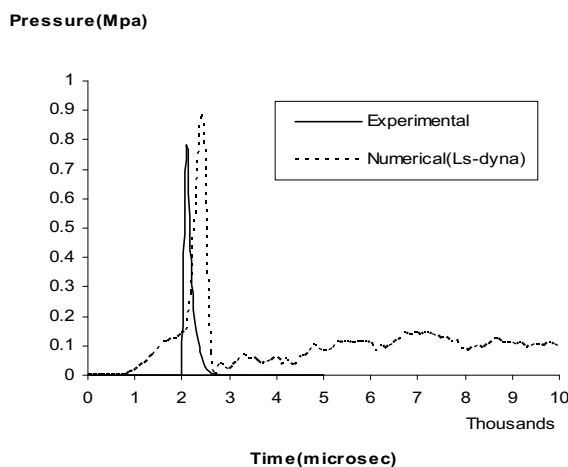
شکل ۹- کانتور فشار در زمان ۲۵۰۰ میکروثانیه پس از انفجار (فشار ماکزیمم 0.68MPa)



شکل ۱۰- کانتور فشار در زمان ۳۰۰۰ میکروثانیه پس از انفجار (فشار ماکزیمم 0.29MPa)

۸-۱-۳- مقایسه نتایج عددی با روابط تجربی

در شکل ۱۱ تاریخچه فشار در فاصله ۳۴۵ سانتیمتری از مرکز انفجار نشان داده شده است. همانطور که در این نمودارها دیده می‌شود مقدار



شکل ۱۱- تاریخچه فشار در R=345cm از مرکز ماده منفجره حاصل از نرم افزار Ls-dyna و رابطه تجربی

۸-۲- مساله دوم

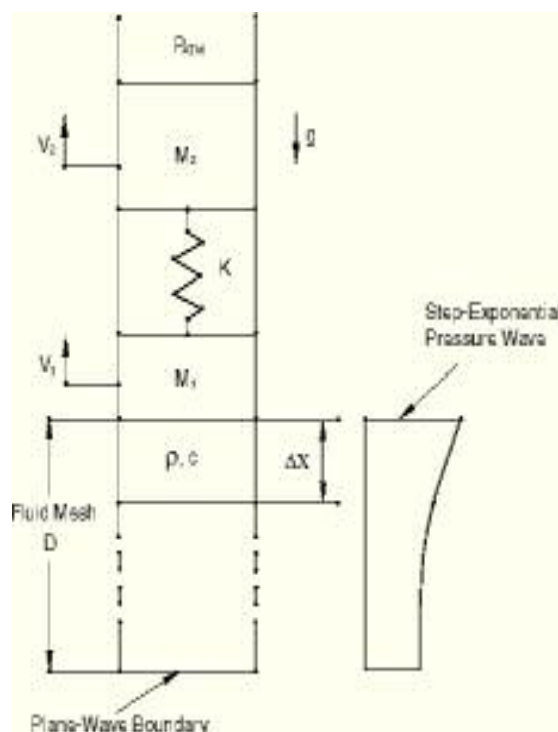
یکی از مسایل نمونه انفجار زیر آب ورق بلیچ و اسلندر¹ می باشد که تحلیل تئوری این مساله توسط افراد فوق در سال ۱۹۷۰ و همچنین اسپراگو در سال ۲۰۰۲ ارایه شده است [9]. مطابق شکل ۱۲ یک بار ضربه ای ناشی از انفجار زیر آب بصورت یک بعدی بفاصله یک المان سیال به سازه ای که مدل بدنه کشتی می باشد برخورد می نماید. M_1 جرم بدنه کشتی و M_2 وزن ملحقات آنرا نشان می دهد فرض می شود عمق شناوری کشتی ۵ متر باشد. لذا مجموع دو جرم برابر ۵۶ کیلوگرم می شود. ضریب سختی فنر نیز طوری تعیین می شود که فرکانس جرم دوم با فرض گیردار بودن طرف دیگر فنر برابر ۵ هرتز باشد. لذا $K = (5 \times 2\pi)^2 M_2$ خواهد بود. این مساله با نرم افزار آباکوس برای نسبت جرم $\frac{M_2}{M_1}$ برابر صفر حل شده است. نیز اثر کاویتاسیون و عدم در نظر گرفتن آن بررسی می شود.

۸-۲-۱- مشخصات مدل

ستون آبی به ارتفاع ۳/۸ متر در یک لوله صلب با المان های مربعی ۳۸ میلیمتری در مش درشت و ۱۰ میلیمتری در مش ریز با ضخامت ۱ متر مش بسته شده است. عمق غوطه وری جرمها ۱۴/۵ سانتیمتر بوده و فشار هوا برابر ۰/۱ مگاپاسکال می باشد. ماکزیمم فشار برخوردی ۰/۷۱ مگاپاسکال و ثابت میرایی آن θ در رابطه ۵ برابر ۰/۹۹۵۸ ثانیه در نظر گرفته می شود.

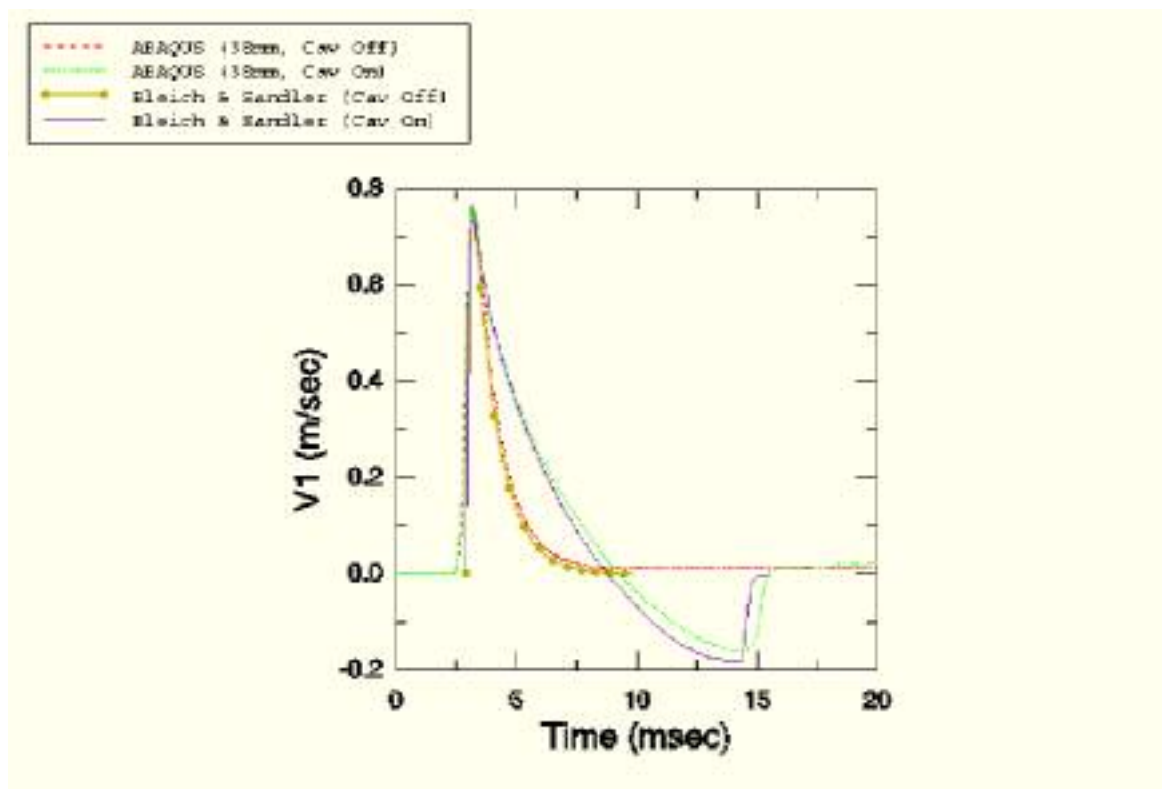
۸-۲-۲- نتایج

با توجه به اینکه حل تئوری این مساله موجود می باشد [9]. لذا مقایسه ای با حل عددی در شکل ۱۳ و ۱۴ دیده می شود. اگر کاویتاسیون در نظر گرفته شود مکش ایجاد شده باعث تغییر جهت حرکت ورق می شود که در شکل ۱۵ منطقه کاویتاسیون نمایش داده شده است. مشاهده می شود که کاویتاسیون در زمان صفر از تراز ورق شروع شده و در مدت ۵/۵ میلی ثانیه تا عمق ۳/۵ متری نفوذ می نماید. لذا وسعت منطقه نشان داده شده اهمیت در نظر گرفتن کاویتاسیون را اطراف سازه نشان می دهد. همچنین مطابق این اشکال مش ریزتر مقدار سرعت را کمی بیشتر نشان می دهد. باند بالایی و پایینی منطقه کاویتاسیون در مش ریز و درشت مطابق شکل ۱۵ کمی متفاوت می باشد. با توجه به نمودارهای بدست آمده در این مثال ریز کردن شبکه چندان اثری بر روی نتایج ندارد.

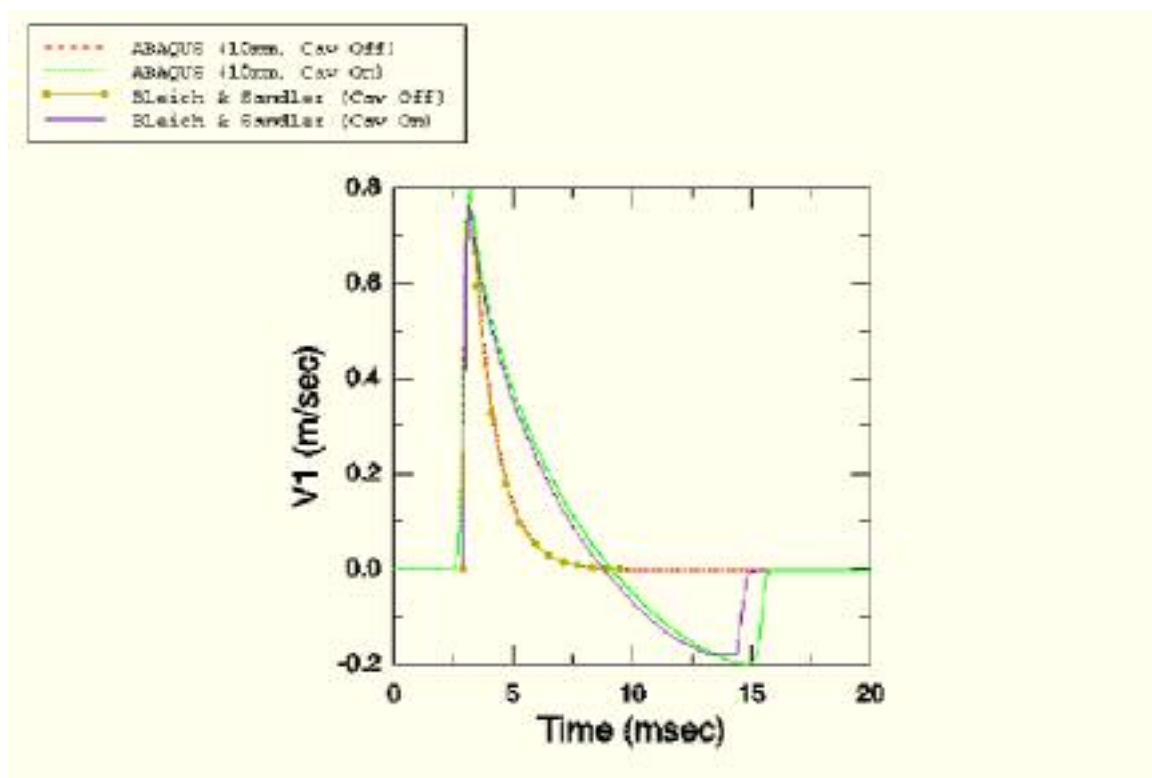


شکل ۱۲- شکل مساله بلیچ و اسلندر

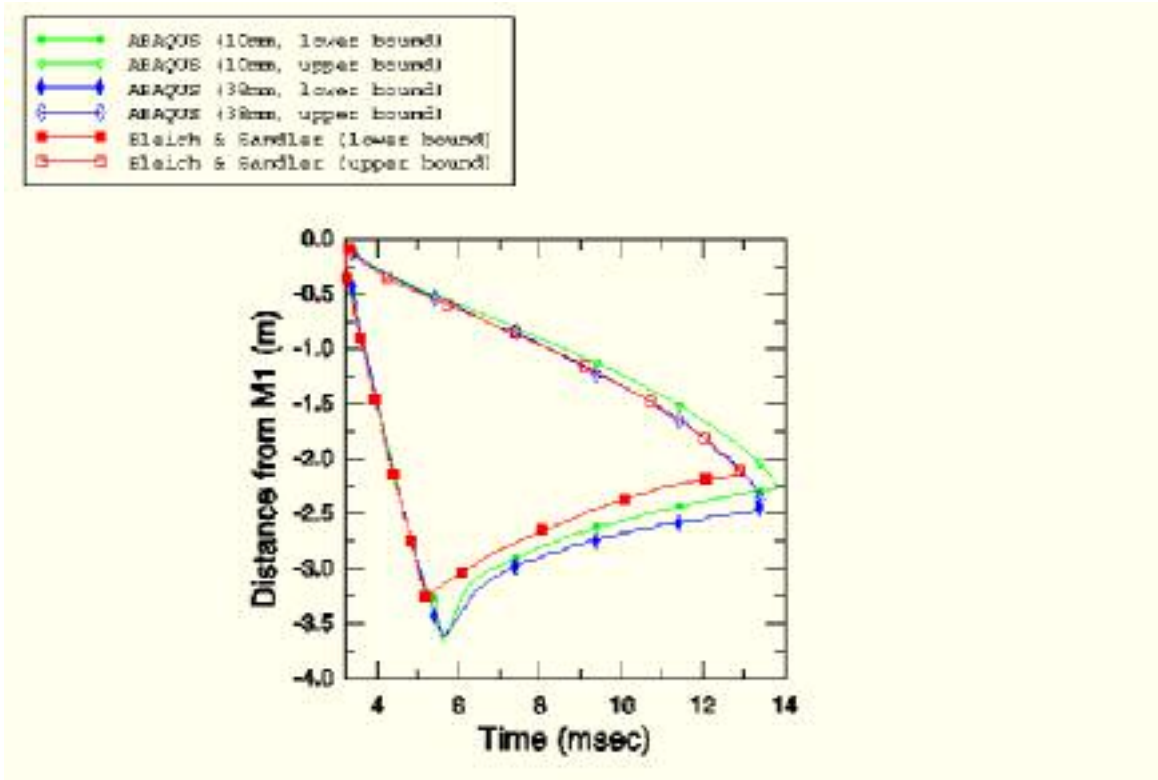
¹⁸ Belich ,Slander



شکل ۱۳- مقایسه تغییرات زمانی سرعت قائم جرم M_1 بین حل بلیچ و اسلندر و حل عددی شبکه درشت



شکل ۱۴- مقایسه تغییرات زمانی سرعت قائم جرم M_1 بین حل بلیچ و اسلندر و حل عددی مش ریز



شکل ۱۵- مقایسه منطقه کاویتاسیون مدل سندلروبلج با نتایج کد

۹- نتیجه گیری

در این مقاله جهت مدل‌سازی انفجار زیر آب بروش عددی ALE، مقایسه‌ای بین نتایج مدل عددی و روابط تجربی و تحلیلی صورت گرفت و مشاهده شد که با دقت قابل قبولی می‌توان از مدل عددی پیشنهادی بعنوان جایگزین روش‌های آزمایشگاهی که علاوه بر هزینه بر بودن، محدودیتهایی نیز دارند بهره گرفت. به عنوان راهکاری جهت تحقیقات بعدی می‌توان به بررسی سایر روش‌های عددی و نیز بررسی پاسخ سازه‌های معمول زیر سطحی و دریایی تحت اثر امواج حاصله از انفجار اشاره نمود.

۱۰- مراجع

3-Boyd, R., Simulation and Validation of UNDEX Phenomena Relating to Axisymmetric Structures, Technical Report of Altair Engineering Ltd, 2000.

4-Mair, H.U, Benchmarks for Submerged Structure Response to Underwater Explosions, Shock and Vibration,6(4), pp.81-96, 1999.

5-Keevin, T. and Hemen, G., The Environmental Effects of Underwater Explosions with Methods to Mitigate Impact, U.S.Army Corps of Engineers Report, 1997.

6-Bjarnholt, G., Suggestions on standards for Measurement and Data Evaluation in Underwater Explosion Test, Propellants and Explosives, 1980.

1-Cole, R.H., Underwater Explosions, New York, USA, Dover Publications Inc, 1948.

2-Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L., The Finite Element Method, Vol3: Fluid Dynamics, pp. 8-9, 2000.

9-Sprague, M.A., Advanced Computational Techniques for the Analysis of 3-D Fluid-Structure Interaction with Cavitation, PhD Thesis, University of Colorado, 2002.

10-Balsara D.S., Von Neuman Stability Analysis of SPH-Suggestions for Optimal Algorithms, Journal of Computational Physics, Vol.121,1995,pp357-372.

11-Hallquist, J.O., LS-DYNA960 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, www.lsdyna-portal.de, 1998.

12-Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc. ABAQUS 6.5 Documentation, 2003.

7-Ramajeyathilagam, K., Vendhan C.P., Deformation and Rupture of Thin Rectangular Plates Subjected to Underwater Shock, International Journal of Impact Engineering,2005.

7-Ramajeyathilagam, K., Vendhan C.P., Deformation and Rupture of Thin Rectangular Plates Subjected to Underwater Shock, International Journal of Impact Engineering,2005.

8-Felippa, C. A., Partitioned Analysis of Coupled Mechanical Systems, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 190(2001)-pp. 3247-3270.