

بررسی اثر انفجار زیر آب، بر یک لوله فلزی با استفاده از ترکیب روش های هیدرودینامیک ذرات هموار و اجزای محدود

بهنام کریمی فرزقی^{۱*}، ناصر صفائیان حمزه کلانی^۲

۱ و ۲- استادیار دانشگاه بزرگمهر قائنات، قائن، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲، بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۹، انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۰۳)

چکیده

با توجه به مشکلات مدل سازی های آزمایشگاهی انفجار، استفاده از مدل سازی های عددی برای تحلیل این پدیده قابل توجه است. در این بین روش های با شبکه بندی مانند اجزای محدود با توجه به خصوصیات انفجار مانند سرعت بسیار بالا و تغییر شکل های شدید، به علت پیچیدگی شدید شبکه ها، نامناسب عمل نموده و سبب ایجاد خطاهای عددی می شوند. به همین جهت استفاده از روش های بدون شبکه برای مدل سازی این پدیده ها مؤثرتر عمل می نمایند. در این مقاله انفجار در زیر آب و اثر آن بر روی یک لوله استوانه ای فلزی، با استفاده از کوپل دو روش بدون شبکه بندی هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) و روش دارای شبکه بندی اجزای محدود مدل سازی شده و نتایج فشار ناشی از انفجار در آب با روابط تجربی و یک نمونه مدل سازی عددی، صحت سنجی شده اند. پدیده انفجار با روش بدون شبکه و لوله فلزی با روش اجزای محدود و با نرم افزار LS-Dyna مدل سازی شده اند. در نهایت به بررسی تأثیر انفجار زیر آب بر روی لوله فلزی از نظر فشار و تغییر مکان پرداخته شده است. نتایج نشان می دهد که لوله فلزی تحت اثر انفجار در نقاط نزدیک به ماده منفجره متحمل تنش بالا و فشردگی زیاد می گردد و با افزایش فاصله زمان رسیدن به فشار حداکثر افزایش و مقدار فشار و فشردگی کاهش می یابد. در نزدیک ترین نقطه مورد مطالعه، فشار در حدود ۲۹۵ MPa و فشردگی در حدود ۲۵/۸ cm و در دورترین نقطه مورد مطالعه فشار به ۵۷ MPa رسیده و تحت اثر امواج بازتابی، مکشی به اندازه ۱ cm ایجاد می نماید.

کلیدواژه ها: انفجار در آب، روش بدون شبکه، هیدرودینامیک ذرات هموار SPH، روش اجزای محدود.

Investigating the Effect of Underwater Explosion on a Metal Pipe using a Coupling of Smooth Particle Hydrodynamic and Finite Element Method

B. Karimi Ferezhgi^{1*}, N. Safaeian Hamzehkolaei²

University of Bozorgmehr Ghaenat, ghaen, iran

(Received: ۲۰۲۵/۰۱/۰۲, Revised: ۲۰۲۵/۰۱/۲۱, Accepted: ۲۰۲۵/۰۲/۰۸, Published: ۲۰۲۵/۰۲/۲۲)

Abstract

Due to the difficulties and limitations associated with experimental blast modeling, the use of numerical simulations is justified for analyzing such phenomena. Mesh-based techniques like the Finite Element Method (FEM), due to the characteristics of explosions such as very high velocity and severe deformations, are inappropriate due to the extreme complexity of the meshes and cause numerical errors. Therefore, meshless methods prove to be more effective for modeling such phenomena. In this paper, an underwater explosion and its effect on a cylindrical metal tube are modeled using a coupling of two methods: smooth particle hydrodynamics (SPH), Meshless Method, and finite element, one of the mesh-based methodes. The explosion pressure results in water were validated against empirical relations and another numerical study. The explosion phenomenon was modeled by using meshless method and the metal pipe was modeled using the finite element method and used a LS-Dyna software to modeled them. Ultimately, the analysis of the underwater explosion's impact on the metal pipe in terms of pressure and displacement yielded acceptable results. results shown that Results shown that regions near the explosive charge experience high stress and significant compression, with peak pressure of approximately ۲۹۵ MPa and compression of ۲۵.۸ cm. At locations farther from the charge, peak pressure and compression decrease, reaching ۵۷ MPa at the farthest point, where tensile displacement (۱ cm) occurs due to reflected waves.

Keywords: Underwater Explosion, Mesh Less Methods, Smooth Particle Hydrodynamics, SPH, Finite Element.

*Corresponding Author E-mail: b_karimi@buqaen.ac.ir

۱. مقدمه

انفجار زیرآب یکی از مهم‌ترین موضوعاتی است که از سال‌ها پیش مورد توجه محققان بوده است. مهم‌ترین عامل توجه به انفجار زیرآب، جنگ‌های دریایی در خلال جنگ جهانی دوم بوده است. پس از آن با توجه به احتمال انفجار در کشتی‌های نفت کش، خطوط انتقال نفت و گاز در کف دریاها و... و تأثیر بارهای انفجاری بر روی سازه‌های دریایی، باعث توجه روزافزون بر انفجار در زیر آب گشت. با توجه به مشکلات مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و خطرات ناشی از انفجار، پس از جنگ جهانی دوم، محققین به بررسی رفتار انفجار در زیرآب با استفاده از روش‌های عددی پرداختند. حل معادلات ناشی از انفجار با توجه به سرعت بالای موج شوک و ایجاد تغییر شکل‌های شدید دارای پیچیدگی‌های محاسباتی بسیاری است.

برای مدل‌سازی عددی انفجار می‌توان از روش‌های با شبکه‌بندی مانند اجزای محدود و روش‌های بدون شبکه مانند روش ذرات هموار (SPH^۱) استفاده نمود. با توجه به تغییر شکل‌های شدید و ناگهانی محیط پس از انفجار، استفاده از روش‌های با شبکه‌بندی می‌تواند منجر به خطاهای محاسباتی گردد، بنابراین با توجه به کاربرد مناسب روش SPH در مدل‌سازی مسائل کهکشانی‌ها، تغییر شکل‌های شدید و هیدرودینامیک، استفاده از این روش بسیار مناسب به نظر می‌آید. روش عددی SPH با توجه به ماهیت بدون شبکه، توانایی تغییر شکل‌های شدید را دارا بوده و با توجه به ماهیت لاگرانژی خود مدل‌سازی فصل مشترک‌ها و سطح آزاد را بسیار ساده می‌نماید [۱]. لئو [۲] به مدل‌سازی انفجار در زیرآب با استفاده از روش SPH پرداخت و به نتایج مناسبی دست یافت. همچنین ژانگ [۳] در مقاله خود به بررسی انفجار زیرآب با استفاده از نرم‌افزار Autodyne پرداخت. هانگ و همکاران نیز [۴]، به بررسی انفجار در زیرآب و اثر آن بر یک سازه فلزی پرداختند.

شرکت و همکاران [۵] با استفاده از نرم‌افزارهای اتوداین و LS DYNA به بررسی تأثیر شکل و جهت خرج ماده منفجره بر روی تنش‌های ناشی از انفجار زیرآب پرداخت. در سال ۲۰۱۷، ژانگ [۶] به بررسی انفجار زیرآب و تغییر شکل‌های یک فلز در اثر انفجار زیرآب پرداخت. آن و همکاران [۷] به بررسی انفجار زیرآب در حوزه نزدیک و به صورت تجربی و عددی پرداختند. وی با استفاده از اشکال استوانه‌ای و کروی ماده منفجره در تانکی از آب این پژوهش را انجام داده و برای بررسی مراحل انفجار از دوربین‌های عکس‌برداری با سرعت بالا استفاده نمود. در همین زمینه مقالات دیگری نیز ارائه شده است که به صورت مختصر بیان می‌گردد. بررسی هیدرو کدها در زمینه تأثیر انفجار بر روی

سازه‌های دریایی [۱]، بررسی انفجار در آب با استفاده از روش SPH [۸]، مدل‌سازی انفجار زیرآب با روش اجزای محدود و تأثیر آن بر سازه کشتی [۹]، مدل‌سازی عددی انفجار در آب با روش بدون شبکه ذرات هموار در آب [۱۰]، بررسی حجم کنترل تطبیقی با روش SPH و بررسی رفتار انفجار در آب با این رویکرد بدون شبکه [۱۱]، مقایسه روش عددی SPH و دیدگاه‌های لاگرانژ و اولری در انفجار زیرآب [۱۲]، بررسی روش SPH در مدل‌سازی موج دریا بر روی سازه‌ها [۱۳]، نمونه‌هایی از این مطالعات می‌باشند. همچنین در سال‌های اخیر مطالعاتی بر روی کوپل روش‌های عددی بدون شبکه مانند SPH و روش‌های عددی دارای شبکه‌بندی مانند FEM^۲ نیز انجام شده است. جنگ به بررسی روش ترکیبی SPH-FEM بر روی اندرکنش سازه و سیال پرداخت [۱۴]. ژانگ به مطالعه این روش ترکیبی بر روی مدل‌سازی ضربات شدید پرداخت و با روش‌های تجربی مقایسه نموده و به نتایج خوبی دست یافت [۱۵]. پولویچ به بررسی روش ترکیبی فوق بر روی مواد کامپوزیت با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA پرداخت و نتایج را با روش‌های تجربی مقایسه نمود [۱۶]. در سال ۲۰۲۵ نیز کوپل روش‌های فوق، در غشاهای نفوذپذیر تحت فشار مورد مطالعه قرار داد [۱۷] همچنین در مدل‌سازی تغییر شکل‌های بزرگ در خاک نیز از ترکیب روش‌های SPH-FEM استفاده شده است [۱۸]. مقالات ارائه شده از نظر شکل هندسی و در نظر گرفتن پارامترهای مختلف تحلیل، روش‌های عددی استفاده شده و در بعضی موارد موج وارد شده با پژوهش حاضر تفاوت دارند. برای مثال پیلیان [۱۹] به بررسی رفتار تانک فلزی در اثر موج لرزه‌ای با روش ترکیبی SPH-FEM پرداخت. ناستاسکو [۲۰] نیز به بررسی و مدل‌سازی انفجار زیرآب و اثر آن بر یک لوله مغروق پرداخت. این مقاله نزدیک‌ترین پژوهش به مطالعه حال حاضر است و عمده تفاوت آن در فرضیات مورد استفاده در مدل‌سازی است. با توجه به اینکه در مقالات ضرایب مربوط به مدل‌سازی SPH و همچنین خواص لوله ارائه نشده است، روندها با این مدل عددی نیز مورد مقایسه قرار گرفت، که اعتبار پژوهش حاضر را ارائه می‌دهد.

برخلاف بسیاری از مطالعات که روش‌های SPH یا FEM را به صورت جداگانه استفاده کرده‌اند، در این پژوهش از مدل کوپل SPH-FEM برای شبیه‌سازی هم‌زمان میدان فشار سیال و پاسخ سازه استفاده شده است. روش ترکیبی به کاررفته امکان تحلیل انتقال انرژی از موج شوک به لوله فلزی را به صورت پیوسته و دینامیکی فراهم کرده است. انفجار زیرآب در یک مدل دلخواه با استفاده از روش بدون شبکه SPH و لوله فلزی با روش اجزای محدود مدل‌سازی شده و حداکثر فشار ناشی از انفجار، تغییر مکان و سرعت ذرات آب در فواصل مختلف و تأثیر فشار ناشی از انفجار بر

^۲ Finite Element Method (FEM)^۱ Smooth Particle Hydrodynamics (SPH)

بیرون حباب می‌گردد و حباب با سرعت شروع به انقباض (حرکت رو به درون) می‌کند. حرکت روبه‌داخل تا موقعی ادامه می‌یابد که قابلیت تراکم‌پذیری گاز که در مرحله انبساط حباب کم‌اهمیت و ناچیز است به‌صورت یک مانع قوی عمل کرده تا حرکت به‌طور ناگهانی برعکس شود؛ لذا اینرسی آب و خواص گاز و آب، شرایط لازم را برای یک سیستم نوسانی فراهم می‌کند و حباب در حقیقت سیکل‌های تکراری انبساط و انقباض را به خود می‌بیند. با در نظر گرفتن یک حجم کنترل مناسب از سیال موردنظر، می‌توان دریافت که در اثر پدیده انفجار، تغییرات جرم در زمان و برای یک حجم کنترل مشخص رخ خواهد داد؛ چون این پدیده با اتلاف انرژی سیستم همراه است و در نتیجه سیستم این اتلاف را با تغییرات جرم در واحد حجم (چگالی) جبران می‌کند. در نتیجه، لاجرم تغییرات چگالی بازمان در مسئله انفجار حضور خواهد داشت. در انفجار زیر آب، حباب دارای حرکت انبساطی - انقباضی است و تبادل انرژی بین حباب و آب اطراف آن صورت می‌گیرد که این امر بارزترین تفاوت انفجار زیر آب با انفجارهای معمولی است.

در انفجار زیر آب، گازهای ناشی از انفجار مسبب شکل‌گیری حباب‌هایی می‌شوند. به دلیل تفاوت چگالی بین آب و محصولات ناشی از انفجار و به‌وجود آمدن گرادیان حرارتی، میدان فشار خاصی در آب شکل می‌گیرد که عامل به‌وجود آمدن امواج شوک و به‌تبع آن امواج ثانویه می‌شود. در اثر سیکل‌های متعدد انبساط و انقباض حباب و وجود میدان فشار و گرادیان حرارت در سیال پیرامونش، حباب، حرکات انبساطی، انقباضی و انتقالی خواهد کرد.

در گذشته روابط تجربی متعددی برای تعیین حداکثر فشار و تغییرات سطح آب ناشی از انفجار ارائه شده است. یکی از پرکاربردترین روابط تجربی برای تعیین فشار ناشی از انفجار در آب رابطه (۱) است:

$$P_m = 52 / \left(\frac{\sqrt{W}}{R} \right)^{1/3} \quad (1)$$

در رابطه فوق W وزن ماده منفجره بر حسب Kg و R فاصله بر اساس m و P حداکثر فشار بر اساس MPa است [۲۲].

۳-۱. معرفی و اصول روش‌های عددی SPH

شکل‌ها و جدول‌ها باید دارای عنوان باشند. عنوان شکل‌ها در زیر روش ذرات هموار متحرک SPH یک روش کاملاً لاگرانژ است که در آن احتیاج به هیچ نوع شبکه‌بندی نیست. این روش برای اولین بار در سال ۱۹۷۷ [۷] در زمینه مسائل کهکشانی و ستارگان به کار گرفته شد. بعدها علاوه بر مسائل کهکشانی از این روش برای تحلیل جریان با سطح آزاد استفاده و مدل‌سازی تغییر شکل‌های شدید استفاده شد [۲۳].

روی لوله فلزی و تغییر شکل لوله مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین ضرایب مورد استفاده برای روش عددی بدون شبکه مانند طول هموارسازی، ویسکوزیته مصنوعی و همچنین مدل رفتاری برای لوله مورد مطالعه و خواص لوله فرضی، به نحوی انتخاب شده که از هرگونه خطای عددی و نفوذ ذرات در مدل جلوگیری نموده و مدل‌سازی پایداری را ارائه می‌دهد. در این مقاله سعی شده است از روش ترکیبی SPH-FEM برای مدل‌سازی موج شوک انفجار و اثر آن بر استوانه‌ای فلزی استفاده گردد. برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار قدرتمند LS-Dyna استفاده شده است. این نرم‌افزار قادر به مدل‌سازی تغییر شکل‌های شدید و مواد منفجره با استفاده از روش‌های عددی با شبکه‌بندی از دیدگاه لاگرانژ و اولری و همچنین روش بدون شبکه ذرات هموار SPH است. برای اعتبار سنجی مدل‌سازی انجام گرفته نیز، نتایج این مدل‌سازی با روش تجربی و همچنین یک مدل‌سازی عددی مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج مطلوب و قابل قبولی ارائه می‌دهد.

۲-۱. ماهیت انفجار در زیر آب

انفجار واکنشی است که در آن نرخ سوختن مواد با سرعتی به مراتب بیشتر از سرعت صوت انجام می‌شود که در نتیجه دما و فشار بسیار بالایی ایجاد و موج انفجار بلافاصله تولید و با سرعت بسیار زیادی منتشر می‌شود [۲۱]. انفجار می‌تواند در محیط‌های مختلفی مانند هوای آزاد، آب و یا محیط‌های جامد و دارای مقاومت برشی رخ دهد.

تفاوت عمده انفجار در هوا با انفجار در زیر آب دینامیک هسته گازی حاصل از احتراق ماده منفجره (حباب) است. این هسته گازی پرفشار، به سرعت منبسط می‌گردد. چون فشار آن بسیار بیشتر از فشار آب یا هوای پیرامونش است. در انفجارهای معمولی (انفجار در هوا) با در انفجار زیر آب، به محض احتراق کامل ماده منفجره، طی یک واکنش بسیار سریع مواد جامد به گاز تبدیل شده و پس از گذشت چند میکروثانیه، اولین امواج شوک تولید می‌گردد. سرعت در نزدیکی ماده منفجره به مراتب بیشتر از سرعت انتشار صوت در محیط سیال خواهد بود. پس از انتشار موج شوک، محصولات گازی انفجار با یک نرخ تدریجی کاهنده، رو به بیرون منبسط شده و باعث ایجاد ضربه می‌گردند. فشار بالای اولیه در حباب گاز با گذشت زمان به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، اما باز هم بسیار بالاتر از فشار هیدرو استاتیکی حالت تعادل است. با توجه به مومنتوم قابل توجهی که موج شوک انفجار از طریق لایه مرزی (حباب) به سیال مجاورش وارد می‌کند، آب اطراف حباب سرعت زیادی به سمت بیرون پیدا کرده و قطر حباب به سرعت افزایش می‌یابد. انبساط برای یک زمان نسبتاً طولانی ادامه می‌یابد و فشار داخلی حباب گاز به تدریج کاهش می‌یابد. اما به دلیل اینرسی ذاتی آب، حرکت کماکان ادامه می‌یابد. فشار گاز در زمان‌های بعدی به کمتر از مقدار تعادل افت می‌کند و این کمبود فشار موجب توقف حرکت رو به

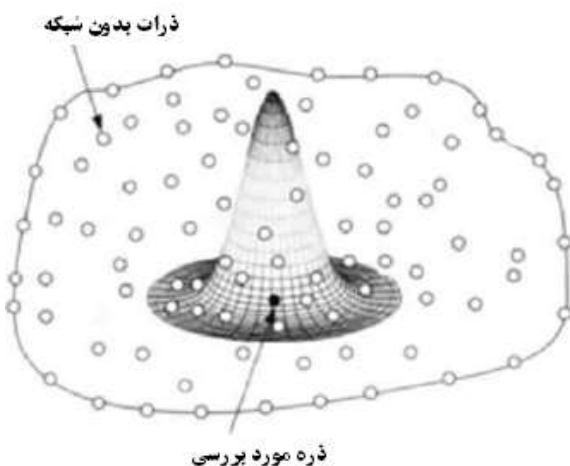
$$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{\tau} \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i} + \frac{P_j}{\rho_j} \right) (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} W_{ij} \quad (10)$$

$$+ \frac{1}{\rho_i} \tau_i^{\alpha\beta} \varepsilon_i^{\alpha\beta} \quad (11)$$

$$\frac{Dx_i^\alpha}{Dt} = v_i^\alpha$$

برای حل معادلات فوق در هر مرحله، از روش رانگ کوتا (RF^۱) استفاده شده است و مقادیر سرعت، فشار، چگالی و... در هر مرحله به روزرسانی می شوند.

همچنین هر ذره دارای یک دامنه تأثیر است که با توجه به ذرات همسایه، خصوصیات ذره موردنظر تخمین زده می شود (شکل ۱). خصوصیات مصالح موردبررسی نیز توسط معادلات حالت تعریف می شوند. معادلات حالت بر پایه معادلات بقای جرم، انرژی و مومنتوم تعیین شده و خصوصیات موردنظر را ارائه می دهند. سپس از ترکیب معادلات حالت و تابع تقریب، معادلات حرکت به دست آمده که با حل این معادلات، می توان خصوصیات مختلف مانند سرعت، فشار و... را تعیین نمود.



شکل ۱. ذرات در روش بدون شبکه و نحوه تأثیرگذاری آن بر سایر ذرات در حالت سه بعدی [۸].

۲. روش تحقیق

۲-۱. معرفی نرم افزار LS-DYNA

یکی از نرم افزارهای بسیار قدرتمندی که در حال حاضر برای شبیه سازی پدیده های دینامیکی پیچیده مورد استفاده قرار می گیرد، LS-Dyna است. این نرم افزار علاوه بر تحلیل های دینامیکی قادر به حل مسائل گوناگون در حوزه های مختلف فیزیکی از جمله مکانیک جامدات، انتقال حرارت، دینامیک سیال است. ساختار این نرم افزار برخلاف نرم افزارهایی همچون ABAQUS و ANSYS یک تکه و منسجم نیست و قسمت های مختلف آن در قالب نرم افزارهای جدا از هم قابل اجرا هستند. به این صورت که عملیات پیش پردازنده شامل ساخت مدل و در

به طور کلی روش SPH، بر پایه خصوصیات تابع دلتا دیراک بنا شده است. در این روش هر یک از ذرات، مشخصاتی را با خود حمل نموده، تغییرات آن ها توسط تابع تقریب روی فضای گسسته، به صورت رابطه (۲) و (۳) تعیین می شود. انتگرال گیری در فضایی محدود به طول هموارسازی انجام گرفته، مشخصات هر نقطه مانند چگالی بر اساس فاصله هر ذره تا ذره موردنظر با توجه به تابع هموارسازی تعیین می شود. نحوه انتگرال گیری و تقریب تابع روی سطح Ω در روابط زیر ارائه شده اند:

$$f(x) = \int f(x) W_{ij} dx \cong \sum_{i=1}^n f(x_j) W_{ij} \cdot \Delta V_j$$

$$= \sum_{i=1}^n f(x_j) W_{ij} \cdot \frac{1}{\rho_j} \cdot (\rho_j \cdot \Delta V_j) \quad (2)$$

$$\rho_j \cdot \Delta V_j = m_j$$

$$\langle f(x_i) \rangle = \sum_{j=1}^n \frac{m_j}{\rho_j} \cdot f(x_j) \cdot W_{ij}, \quad (3)$$

$W_{ij} = (|x_i - x_j|, h)$
در رابطه فوق، W تابع هموارسازی و h شعاع هموارسازی، j شمارنده ذرات تحت تأثیر اندرکنش با ذره i و x موقعیت ذره، m و ρ به ترتیب، جرم و چگالی ذره موردنظر و ΔV_j حجم محدود ذره است.

با توجه به شدت و سرعت بالای پدیده انفجار، این پدیده به صورت بی دررو در نظر گرفته شده، از معادلات ناویر-استوکس برای مدل سازی استفاده می شود، با این تفاوت که در خاک با توجه به وجود مقاومت برشی، در معادلات از تانسور تنش به جای فشار استفاده می شود [۸]. معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی مورد استفاده در روابط (۴) تا (۶) ارائه شده اند.

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \cdot \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta} \quad (4)$$

$$\frac{Dv^\alpha}{Dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma^{\alpha\beta}}{\partial x^\beta} \quad (5)$$

$$\frac{De}{Dt} = -\frac{\sigma^{\alpha\beta}}{\rho} \cdot \frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\beta} \quad (6)$$

در روابط فوق σ ، ρ ، e و v به ترتیب، تنش، زمان، چگالی، انرژی داخلی و بردار سرعت می باشند.

تانسور تنش از دو قسمت فشار همسان گرد و تنش برشی تشکیل شده است. با توجه به عدم تحمل تنش برشی توسط ذرات آب، قسمت دوم معادله زیر حذف می گردد.

$$\sigma^{\alpha\beta} = -p\delta^{\alpha\beta} + \tau^{\alpha\beta} \quad (7)$$

با استفاده از معادلات بقای ارائه شده، معادلات ناویر-استوکس به صورت روابط (۸) تا (۱۱) بازنویسی می گردند.

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (8)$$

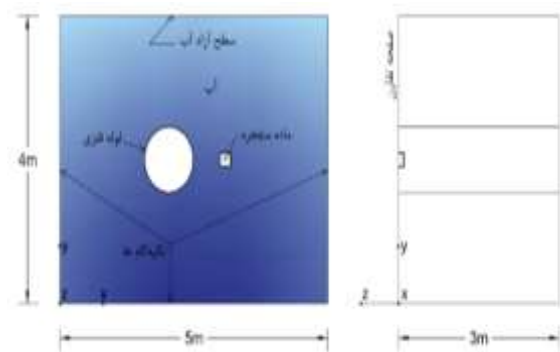
$$\frac{Dv_i^\alpha}{Dt} = - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (9)$$

^۱ Runge-kutta

۳-۲. خصوصیات مدل

برای مدل‌سازی آب، از مدل null استفاده شده و چگالی آب در این قسمت برابر با 1000 Kg/m^3 فرض شده است. همچنین برای مدل‌سازی ماده منفجره از مدل high explosive burn استفاده شده و ماده منفجره TNT در مدل‌سازی با چگالی 1630 Kg/m^3 و سرعت اولیه انفجار $6930 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ و PCJ برابر $10^1 \times 2/1$ در نظر گرفته شده است.

برای مدل‌سازی لوله فلزی نیز از حالت کینماتیکی پلاستیک^۱ استفاده شده است. تأکید می‌شود که برای مدل‌سازی لوله از المان پوسته‌ای استفاده شده است و درواقع با المان بندی اجزای محدود انجام می‌گیرد و ضخامت لوله فولادی ۱ cm در نظر گرفته شده است. مشخصات فلز مورد استفاده برای مدل‌سازی لوله در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۲. هندسه مدل مورد مطالعه و نحوه قرارگیری ذرات در روش SPH

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده برای لوله.

beta	ETAN (GPa)	σ_y (MPa)	E (GPa)	$\rho \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)$
۰.۱	۲	۴۵۰	$2.1e11$	۷۸۰۰

در جدول فوق، σ_y تنش تسلیم اولیه، ETAN، مدول سخت‌شوندگی پلاستیک و beta پارامتر سخت‌شوندگی است.

به‌عنوان شرایط اولیه مسئله سرعت اولیه و یا نقاط آغازین انفجار^۲ را تعیین نمود. در این مقاله مختصات نقاط اطراف TNT به‌عنوان شرایط اولیه آغاز انفجار داده شده است. همچنین برای دو جزء تعریف شده در این مدل (ماده منفجره و سیال پیرامون آن)، نیاز به دو معادله حالت داریم. این معادلات پارامتر فشار را بر اساس سایر متغیرها ارائه می‌دهند. معادله b برای تعیین فشار در مواد منفجره مورد استفاده قرار گرفته و از رابطه (۱۲) تعیین می‌گردد.

نرم‌افزاری مجزا که معمولاً امکان نمایش نتایج آن را نیز دارد، انجام می‌پذیرد و سپس کد خروجی حاصل به حل‌گر اصلی داده شده و محاسبات را انجام می‌دهد.

نرم‌افزار LS-Dyna، قابلیت‌های بسیار بالایی در حل مسائل دینامیکی غیرخطی دارد. توان بالای این کد در تحلیل مسائل انفجار، انتشار امواج شوک، شکل‌دهی فلزات با تغییر شکل‌های زیاد، برخورد اجسام، نفوذ پرتابه در هدف و... و با داشتن تقریباً ۲۰۰ نوع مدل ماده و ۱۳ نوع معادله حالت و انواع روش‌های تماس سطوح این کد را به یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای مهندسی تبدیل کرده است که می‌تواند در بسیاری از مسائل انفجار و ضربه مورد استفاده قرار گیرد.

مدل‌سازی در نرم‌افزار شامل سه مرحله پیش‌پردازش، حل مسئله و پس‌پردازش است. در مرحله پیش‌پردازش مواردی چون مواد و مصالح مدل، تعداد اجزا و مقاطع، شرایط اولیه، معادلات حالت، شرایط تکیه‌گاهی و... مورد بررسی قرار می‌گیرد که در ادامه پارامترهای به‌کاررفته در مدل‌سازی ارائه می‌گردد. پیش‌پردازش و پس‌پردازش در نرم‌افزار LS-Dyna v ۴.۵.۲۵ انجام شده و حل مسئله توسط LS-Dyna v ۱۰ انجام گرفته است. البته با توجه به اینکه در حال حاضر مجوزهای این نسخه از نرم‌افزار ارائه نشده است از نرم‌افزار ANSYS نیز کمک گرفته شده است و از حل‌گر LS-Dyna در این نرم‌افزار استفاده شده است.

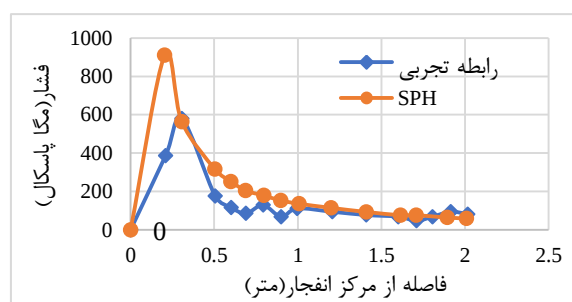
۲-۲. معرفی مدل

ابعاد مدل در نظر گرفته شده به صورت ۵ متر طول ۴ متر ارتفاع و ۳ متر عمق دارد، لوله فلزی مورد نظر نیز در فاصله ۲ متری از کف و تکیه‌گاه مخزن قرار دارد. ضخامت لوله ۱ سانتی‌متر بوده و ماده منفجره به فاصله ۰/۵ متری از ابتدای لوله فلزی و به صورت مکعب با ابعاد $0.2 \times 0.2 \times 0.2$ متر ($13/04$ کیلوگرم) قرار داده شده است. در شکل (۲) شما تیکی از مدل مورد بررسی ارائه شده است. در مدل مدنظر محیط سیال از تمام جهات به جز قسمت بالایی مخزن محدود شده است (مرز صلب) و از سمت بالا می‌تواند آزادانه جابه‌جا شود. (سطح آزاد آب). همچنین در مدل‌سازی نهایی با توجه به تقارن مسئله ابعاد به صورت $4 \times 1/5 \times 5$ متر در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی آب و ماده منفجره همان‌طور که گفته شد از روش بدون شبکه استفاده شده است و فاصله بین ذرات ۰/۱ متر در نظر گرفته شده و برای مدل‌سازی استوانه از روش اجزای محدود با فاصله بین المان‌های ۰/۰۵ متر فرض شده است. شعاع هموارسازی نیز برای مدل‌سازی روش بدون شبکه ۱/۳ برابر فاصله بین ذرات یعنی ۰/۱۳ در نظر گرفته شده است [۲۴].

^۱ PLASTIC-KINEMATIC

^۲ Detonation

که داخل حباب انفجار قرار می گیرند با نتایج رابطه تجربی متفاوت می باشند ولی با افزایش فاصله نتایج بسیار نزدیک و قابل اعتماد است. رابطه تجربی ارائه شده برای فواصل ۱۰r تا ۱۰۰r معتبر است که r شعاع ماده منفجره است. علت محدودیت در ارائه نتایج دقیق رابطه تجربی به موارد بسیاری بستگی دارد. برای مثال در فواصل نزدیک، با توجه به اینکه موج انفجار هنوز به صورت کامل شکل نگرفته، همچنین شکل هندسی چاشنی انفجاری در هر مسئله ای می تواند متفاوت باشد و همچنین فرضیات ساده سازی شده در ارائه رابطه تجربی در نظر گرفته شده است، نتایج نامعتبر است. در فواصل بیشتر از ۱۰۰r نیز با توجه به اینکه موج انفجاری بسیار کاسته شده و امواج آکوستیک غالب شده، همچنین شکل موج از حالت کروی خارج شده و مسئله اتلاف انرژی و نقض فرض یکنواختی محیط، نتایج رابطه تجربی معتبر نخواهد بود [۲۶]. تغییرات شعاع حباب انفجار بامطالعه عددی صورت گرفته توسط ناستاسسکو [۲۰] نیز در این شکل نشان داده شده است، همان طور که مشاهده می شود روند تغییرات بسیار مشابه است و تفاوت موجود ناشی از تفاوت پارامترهای در نظر گرفته در مدل هاست.



شکل ۴. مقایسه فشار ناشی از انفجار در رابطه تجربی و مدل سازی انجام شده.

پس از انجام مدل سازی و تحلیل، می توان تغییر شکل های نقاط مختلف، نمودار تغییر مکان - زمان، نمودار فشار و... را تعیین نمود. در شکل های زیر این نمودارها ارائه شده اند. شکل (۶) مقادیر جابه جایی در راستای محور افقی را برای نقاط در فواصل ۱ m و ۱/۳ m و ۱/۷ m و ۱/۹ متری (به ترتیب منحنی A، B، C و D) از مرکز انفجار را تعیین می نماید. با افزایش فاصله از مرکز انفجار از مقدار جابه جایی ها کاسته شده و زمان رسیدن موج شوک افزایش می یابد. برای مثال نقطه A که در فاصله ۱ m از مرکز انفجار قرار دارد در زمان حدود ۳/۲ ms تغییر مکانی در حدود ۳۰ cm در راستای افقی خواهد داشت، درحالی که نقطه D تغییر مکانی بسیار کمتر و در حدود ۲ mm از خود نشان می دهد.

$$p = \sum_{i=1}^5 A_i \left(1 - \frac{\lambda}{R_i V}\right) e^{-R_i V} + \frac{\lambda E}{V} + C \left(1 - \frac{\lambda}{\omega}\right) V^{-(\omega+1)} \quad (12)$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^5 (A_{\lambda i} V + B_{\lambda i}) e^{-R_{\lambda i} V} + \omega$$

مقادیر استفاده شده برای ماده منفجره TNT در مدل سازی در جدول (۲) ارائه شده است:

جدول ۲. پارامترهای معادله حالت برای ماده منفجره [۲۵].

A_1 (M bar)	A_2 (M bar)	A_3 (M bar)	A_4 (M bar)
۴۹۰/۰۷	۵۶/۸۶۸	۰/۸۲۴۲۶	۰/۰۰۰۹۳
C (M bar)	ω	$A_{\lambda 1}$	$B_{\lambda 1}$
۰/۰۰۷۱۰	۰/۳۰۲۷۰	.	۱۰۹۸
R_1 (M bar)	R_2 (M bar)	R_3 (M bar)	R_4 (M bar)
۴۰/۷۱۳	۹/۶۷۵۴	۲/۴۳۵۰	۰/۱۵۵۶۴
$R_{\lambda 1}$	$A_{\lambda 2}$	$B_{\lambda 2}$	$R_{\lambda 2}$
۱۵/۶۱۴	۱۱/۴۶۸	-۶/۵۰۱۱	۲/۱۵۹۳

برای معادله حالت آب نیز از رابطه Linear polynomial استفاده می شود که این معادله حالت در رابطه (۱۳) ارائه شده است.

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) e \quad (13)$$

در رابطه فوق، $\mu = \frac{p}{p_0} - 1$ و $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 0$ و e برابر $357.1 \frac{J}{kg}$ است.

۳. نتایج و بحث

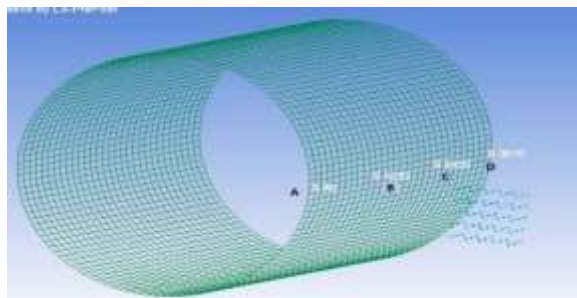
مدل مورد بررسی تا زمان ۴ms حل شده و بدیهی است که نتایج مورد بررسی هم تا این زمان موجود است. تعداد ذرات آب ۳۲۰۱۴ و تعداد ذرات ماده منفجره ۷۵ ذره است. همچنین تعداد ۳۶۰۰ المان شل برای لوله فلزی در نظر گرفته شده است.



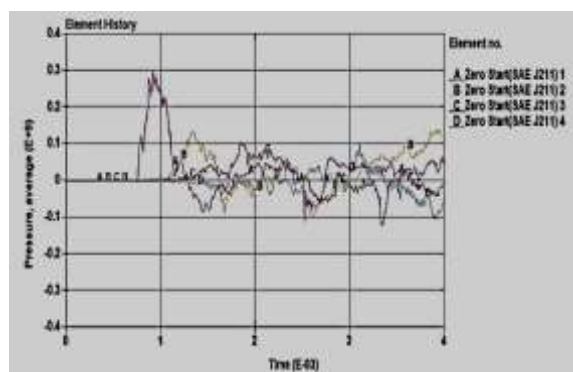
شکل ۳. نمونه ای از هندسه مدل سازی شده.

برای بررسی صحت مدل سازی انجام شده، فشار در فواصل ۰/۲ تا ۲ متر با روابط تجربی (۱) مورد مقایسه قرار گرفته اند. همان طور که در شکل (۴) مشاهده می شود، فشار در فواصل کمتر از ۱ متر

نقطه C حدود ۱۰۰ MPa و برای نقطه D، ۵۷ MPa است. مقادیر دقیق در جدول (۳) ارائه شده است.



شکل ۷. نقاط مورد مطالعه بر روی لوله فلزی.

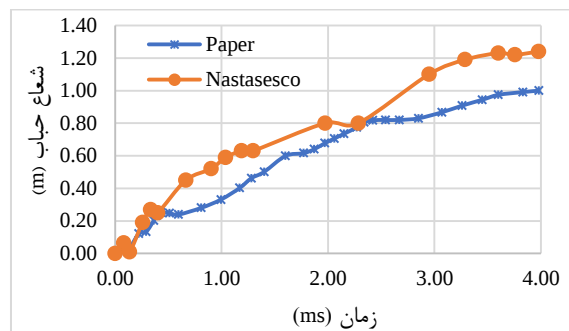


شکل ۸. نمودار فشار زمان برای نقاط مرجع روی لوله فلزی.

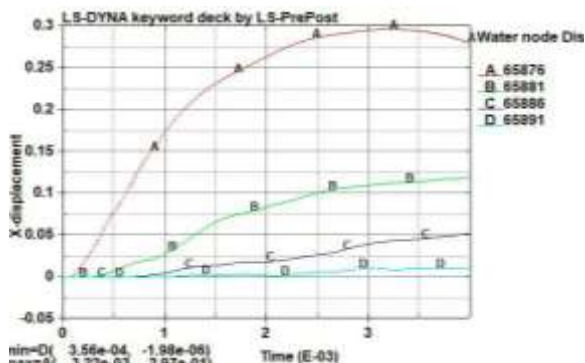
جدول ۳. تنش و تغییر مکان در نقاط مورد مطالعه.

نقطه مورد مطالعه	حداکثر تنش وارد (GPa)	حداقل تنش وارد (GPa)	تغییر مکان حداکثر (cm)	زمان رسیدن به حداکثر فشار (ms)
A	۰/۲۹۵	-۰/۱۱	۲۵/۸	۰/۹۳
B	۰/۱۳	-۰/۰۹	۱۴	۱/۳۵
C	۰/۱	-۰/۰۶	۲/۵	۱/۸۵
D	۰/۰۵۷	-۰/۱	-۱	۲/۳۴

شکل (۹) نیز تغییر مکان در برابر زمان برای نقاط انتخابی روی لوله را ارائه می‌دهند. همان‌طور که مشخص است تغییر مکان نقطه انتهایی به علت فاصله از مرکز انفجار نسبت به تغییر مکان نقطه میانی کمتر است. تغییر مکان این نقطه حدود ۱ cm است که در مقایسه با نقطه میانی (که حدود ۲۶ cm فشرده شده است) بسیار ناچیز است. منفی بودن تغییر مکان‌ها به دلیل فشرده شدن استوانه فلزی در اثر انفجار است و نشان‌دهنده کرنش ناشی از فشار است. نقطه D ابتدا تحت مکش حدود ۱ cm منبسط شده و با گذشت زمان مقداری فشرده می‌گردد. این مسئله به علت امواج ثانویه و بازتابی در نقاط دورتر از مرکز انفجار قابل توجیه است. سایر نقاط مورد مطالعه به علت فاصله کم از نقطه انفجار تنها فشرده می‌گردند. همچنین شکل (۱۰) بیانگر کانتور تنش‌های مؤثر وارد بر لوله فلزی است، که تغییر شکل لوله در فاصله

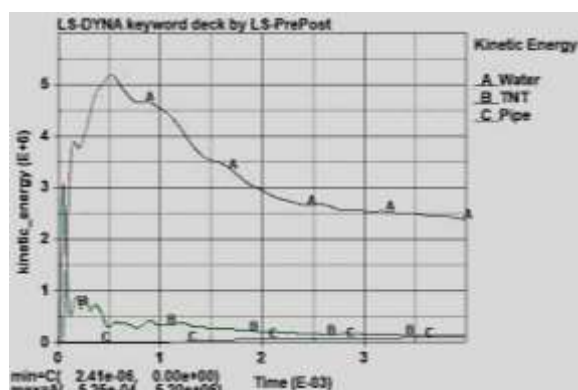


شکل ۵. تغییرات شعاع حباب انفجار با زمان و مقایسه با مدل عددی ناستاسکو.



شکل ۶. نمودار تغییر مکان افقی در مقابل زمان برای نقاط مرجع.

برای بررسی دقیق‌تر فشارها و تغییر مکان‌های لوله فلزی در اثر انفجار، چهار المان روی لوله انتخاب شده‌اند (شکل ۷). این نقاط با فواصل مساوی و روی المان‌های صفحه‌ای لوله تعریف شده‌اند. برای بررسی و مقایسه بهتر طول و عرض مختصات نقاط با یکدیگر برابر فرض شده ($x=2.5m$ و $y=2m$) و تنها مختصات آن‌ها در بعد z متغیر و بین صفر تا ۱/۵ در نظر گرفته شده است. به این معنی که نقطه A در ابتدای لوله دارای $z=0$ و نقطه D در انتها دارای بعد $z=1.5m$ است. نقاط B و C نیز به ترتیب دارای بعد $z=0.5m$ و $z=1m$ فرض شده‌اند. شکل (۸) مقادیر میانگین فشار وارده بر این نقاط را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است فشارهای ایجاد شده دارای نوسانات بسیاری است. علت این نوسانات علاوه بر اینکه ناشی از آثار دینامیکی بارگذاری انفجاری است، بیانگر وجود احتمال کاویتاسیون موضعی در اطراف لوله فلزی است [۲۷]. با توجه به اینکه معادله حالت تعریف شده برای آب، توانایی مدل‌سازی دقیق کاویتاسیون را ندارد این مسئله طبیعی به نظر می‌رسد. همچنین با گذشت زمان و گسترش حباب انفجار و برخورد به تکیه‌گاه‌های اطراف، باعث ایجاد نوسانات شدید فشار در آن نقاط می‌گردد. نقطه نزدیک به منبع انفجار (نقطه A) سریع‌تر از سایر نقاط تحت تنش قرار گرفته و در حدود ۱ ms به مقدار حداکثر خود می‌رسد، سپس سایر نقاط به ترتیب تحت تأثیر قرار گرفته و به ترتیب در زمان‌های حدود ۱/۴ ms و ۱/۹ ms و ۲/۳ میلی‌ثانیه به مقادیر حداکثر خود می‌رسند. همان‌طور که در شکل مشخص است مقدار بیشینه فشار برای نقطه A حدود ۳۰۰ MPa برای نقطه B حدود ۱۳۰ MPa برای



شکل ۱۱- نمودار انرژی جذب شده در مقابل زمان برای اجزای مختلف مدل.

۴. نتیجه گیری

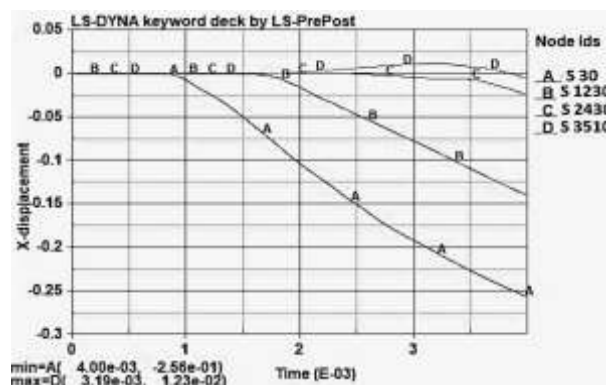
با توجه به مدل سازی صورت گرفته و مقایسه های انجام شده بین روش عددی بدون شبکه SPH و روابط تجربی نتایج زیر قابل استخراج است:

(۱) روش عددی بدون شبکه ذرات هموارساز SPH نتایج بسیار قابل اعتماد و مناسبی را در مدل سازی انفجار زیر آب ارائه می دهد. بنابراین یکی از راه های مهم مدل سازی انفجارها، با توجه به محدودیت های مدل سازی های آزمایشگاهی و نتایج تجربی، استفاده از این روش است.

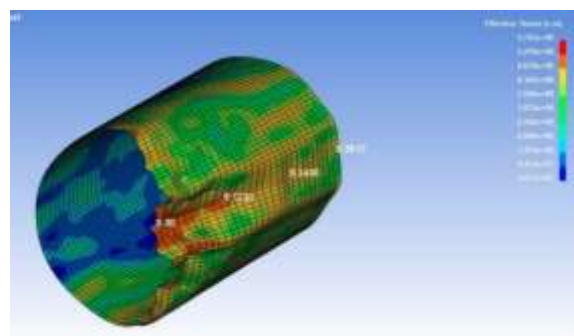
(۲) نرم افزار LS-DYNA قابلیت مدل سازی انفجار با استفاده از روش های بدون شبکه را دارا بوده و با توجه به مدل سازی انجام شده در این مقاله، عملکرد بسیار مناسبی را دارا است. لازم به ذکر است که روش کوپل SPH و اجزای محدود در این نرم افزار در حال مطالعه و به روز رسانی است و تعیین ضرایب اندرکنش بین این ذرات SPH و اجزای محدود بسیار در دقت مسئله اهمیت دارد.

(۳) با توجه به اینکه رابطه تجربی در داخل حباب انفجار، نتایج قابل اعتمادی ارائه نمی نماید، نقاط مورد بررسی خارج از این محدوده انتخاب شده است. با توجه به مشکلات و عدم امکان مدل سازی های آزمایشگاهی انفجار، صحت سنجی با روش تجربی انجام گرفته است. بدیهی ست که روش های تجربی نیز داده ها و اطلاعاتی نسبت به نقاط نزدیک به انفجار را نمی توانند ثبت و بررسی نمایند، همچنین مواردی چون برخی فرض های ساده سازی شده در روابط تجربی مانند ساده سازی هندسه ماده منفجره و جزئیات بار فیزیکی آن مانند چاشنی و پوسته سبب عدم اعتبار نتایج در فواصل نزدیک می گردند. همچنین در فواصل بسیار زیاد نیز روابط تجربی به علل متفاوتی چون عدم در نظر گیری اتلاف انرژی و یکنواختی محیط، مقادیر نامعتبری ارائه می نمایند. در این پژوهش به این مسئله توجه شده و بازه مورد نظر در فواصل معتبر در نظر گرفته شده است. علاوه بر این مدل مورد مطالعه با یک مدل عددی مشابه نیز اعتبار سنجی شده است.

نزدیک به مرکز انفجار قابل مشاهده بوده و تنش ها نیز در آنجا بیشتر است. همچنین همان طور که در کانتور تنش مشخص است، محیطی از لوله که رو به مرکز انفجار نیست، کمترین میزان تنش را دریافت نموده است. در واقع بیشترین تنش ها مربوط به محدوده سر لوله و رو به انفجار است (رنگ روشن تر). این تنش ها در نقاط انتهایی لوله کاسته شده و در انتهای لوله و پشت به انفجار به حداقل مقدار خود می رسد (رنگ تیره تر). جدول (۳) حداکثر و حداقل فشار وارد شده بر نقاط مورد بررسی و همچنین تغییر مکان نقاط را نشان می دهد



شکل ۹- نمودار تغییر مکان زمان برای نقاط انتخابی بر روی لوله فلزی.



شکل ۱۰- تنش های مؤثر وارد بر لوله فلزی.

شکل (۱۱) مقدار انرژی جذب شده توسط قسمت های مختلف مدل را نمایش می دهد. همان طور که مشخص است بیشترین جذب انرژی توسط ذرات آب صورت می گیرد (در حدود MJ ۵/۲۵). ماده منفجره از این حیث در رده دوم قرار گرفته و کمترین انرژی توسط لوله فلزی جذب می گردد. یکی از مهم ترین علل این اتفاق، تراکم ناپذیر بودن آب است. بخش زیادی از انرژی آزاد شده صرف ایجاد موج در آب می گردد و به همین علت انرژی جذب شده بسیار بالایی دارد. همچنین حجم و وزن بسیار بالای آب نسبت به ماده منفجره و لوله فلزی علت دیگری برای جذب انرژی بسیار بالای آب به حساب می آید.

- [۷] An, F. J.; Li, X.; Wu, C. "Study of Explosion Load of Near Field Underwater Explosion"; Int. J. Multiphysics ۲۰۱۸, ۱۲, ۲. doi:۱۰.۲۱۱۵۲/۱۷۵۰۰۹۵۴۸.۱۲.۲.۱۱۷
- [۸] Liu G. R.; Liu M. B. "Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method"; World Scientific Publishing, ۲۰۰۳, ۴۷۳.
- [۹] Sprague, M. A.; Geers, T. "A Spectral Element/Finite Element Analysis of Ship-Like Structure Subjected to Underwater Explosion"; J. Comput. Method Appl. ۲۰۰۶, ۱۹۵, ۲۱۴۹-۲۱۶۷. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.cma.۲۰۰۵.۰۳.۰۰۷
- [۱۰] Karimi Ferzghi, B.; Naderi, R. "A Numerical Modelling For Underwater Explosion with Meshless Smooth Particle Hydrodynamics Method"; Adv. Defence Sci. Technol. ۲۰۱۷, ۸, ۱۱۱-۱۱۹ (InPersian). Dor:۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۶۷۶۲۹۳۵.۱۳۹۶.۸.۲.۷.۷
- [۱۱] Dong, X.; Fu, C.; Zhou, F.; Feng, L.; Zhang, Q. "A Volume-Adaptive Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) Model for Underwater Contact Explosion"; Theoretical and Computational Fluid Dynamics ۲۰۲۵, ۳۹. doi:۱۰.۱۰۰۷/۵۰۱۶۶۲-۲۵۰۰۰۷۴۴-۲
- [۱۲] Karimi Ferzghi, B.; Naderi, R. "Comparison of Numerical Meshless Method, SPH, and Eulerian and Lagrangian Approach in the Water Explosion Modeling"; Adv. Defence Sci. Technol. ۲۰۱۵, ۶, ۱۸۳-۱۹۱ (InPersian). Dor:۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۶۷۶۲۹۳۵.۱۳۹۴.۶.۳.۴.۲
- [۱۳] Chen, Y-K.; Meringolo, D. D.; Liu, Y. "SPH Study of Wave Force on Simplified Superstructure of Open-Type Sea Access Road"; Ocean Engineering ۲۰۲۲, ۲۴۹. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.oceaneng.۲۰۲۲.۱۱۰۸۶۹.
- [۱۴] Chen, C.; Shi, W-K.; Shen, Y-M.; Chen, J-Q.; Zhang, A.-M. "A Multi-Resolution SPH-FEM Method for Fluid-Structure Interactions"; Comput. Methods Appl. Mech. Eng. ۲۰۲۲, ۴۰۱. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.cma.۲۰۲۲.۱۱۵۶۵۹
- [۱۵] Zhang, Z-C.; Qiang, H.; Gao, W-R. "A New Coupled SPH-FEM Algorithm and its Application to Impact Dynamics"; ۲۰۱۱, ۳۱, ۲۴۳-۲۴۹.
- [۱۶] Pavlović, A.; Minak, G. "FEM-SPH Numerical Simulation of Impact Loading on Floating Laminates"; J. Mar. Sci. Eng. ۲۰۲۳, ۱۱, ۱۵۹۰. doi:۱۰.۳۳۹۰/jmse۱۱۰۸۱۵۹۰
- [۱۷] Brugger, M.; Traxl, R.; Lackner, R. "SPH-FE Coupling for the Simulation of Confined Flow through Permeable Deformable Membranes"; Comp. Part. Mech. ۲۰۰۵, ۱۲, ۱۱۶۵-۱۱۸۲. doi:۱۰.۱۰۰۷/s۴۰۵۷۱-۰۲۴-۰۰۸۹۲-y
- [۱۸] Botao, Z.; Jun, Z.; Le, F. "Study of Soil-Spade Interaction based on FEM-SPH"; Proc. ۴th Int. Conf. Machine Learning and Computer Application ۲۰۲۴. doi:۱۰.۱۱۴۵/۳۶۵۰۲۱۵.۳۶۵۰۳۵۹
- [۱۹] Yan, P.; Guo, E.; Wu, H.; Zhang, L. "Numerical Simulation of the Seismic Response of a Horizontal Storage Tank Based on a SPH-FEM Coupling Method"; CMES ۲۰۲۴, ۱۳۹, ۱۶۵۵-۱۶۷۸. doi: ۱۰.۳۲۶۰۴/cmcs.۲۰۲۳.۰۴۴۷۶۰.
- [۲۰] Năstăsescu, V.; Marzavan, S. "Numerical Simulation of an Underwater Explosion by SPH Method"; Rom. J. Tech. Sci. - Appl. Mech. ۲۰۱۶, ۱۱, ۸۹-۱۰۷. [Online] Available: https://academiaromana.ro/sectii۲۰۰۲/RomanianJournalTS/rev۲۰۱۶-۱/RJTS-M-۲۰۱۶-۱۱-۱_a۱_Nastasescu.pdf
- [۲۱] Bulson, P. S. "Explosive Loading of Engineering Structures"; An Imprint of Chapman and Hall, ۱۹۹۷, ISBN ۰-۲۰۳-۷۸۲۱۰-۰
- (۴) در این پژوهش ذرات آب و ماده منفجره با روش SPH و لوله فلزی با روش اجزای محدود مدل شده‌اند و تنش‌ها و تغییر مکان‌ها بر روی لوله فلزی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده بیشترین تنش به نقاطی که رو به مرکز انفجار و بافاصله نزدیک‌تر به منبع انفجار می‌باشند وارد می‌گردند و تغییر مکان‌های بیشتری در آن‌ها ایجاد می‌شود. همچنین نقاط انتهایی لوله به علت افزایش فاصله از مرکز انفجار کمترین تغییر مکان را ارائه می‌دهند. بافاصله گرفتن از نقطه انفجار و کاهش فشار وارده، نقاط انتهایی، تحت بازتاب امواج ثانویه ناشی از برخورد با تکیه‌گاه‌ها نیز قرار می‌گیرند که باعث ایجاد نوسانات فشار و مکش در آن نقاط شده و تغییر مکان‌های مثبت ناچیزی ایجاد می‌نمایند.
- (۵) در بین اجزای مدل، بیشترین جذب انرژی به ترتیب توسط ذرات آب، ماده منفجره و لوله فلزی انجام می‌گیرد که این موضوع به علت تراکم ناپذیری آب و حجم و وزن بسیار بالای آن نسبت به ماده منفجره و لوله فلزی است.
- (۶) در پژوهش‌های آتی می‌توان از سایر معادلات حالات موجود برای آب و لوله استفاده نمود و مدل را توسعه داد. بررسی انفجار بر روی سازه‌های پیچیده‌تر مانند زیردریایی‌ها و یا لوله‌های نفتی با مشخصات متفاوت از مدل مورد بررسی در این مقاله و همچنین حساسیت مدل نسبت به مواردی چون ویسکوزیته مصنوعی می‌تواند مورد بحث و بررسی قرار گیرد.

۵. مراجع‌ها

- [۱] Hans, U. M.; "Review: Hydrocodes For Structure Response to Underwater Explosion"; J. Shock Vib. ۱۹۹۹, ۶, ۸۱-۹۶. doi:۱۰.۱۱۵۵/۱۹۹۹/۵۸۷۱۰۵
- [۲] Liu, M. B.; Liu, G. R.; Zong, Z.; Lam, K. Y. "Computer Simulation of High Explosive Explosion using Smoothed Particle Hydrodynamics Methodology"; Comput. Fluids ۱۹۹۹, ۲۲, ۳۰۵-۳۲۲. doi:۱۰.۱۰۱۶/S۰۰۴۵-۷۹۳۰(۰۱)۰۰۱۰۵-۰
- [۳] Zhang A. M.; Yang W-S.; Yao, X-L. "Numerical Simulation of Underwater Contact Explosion" Appl. Ocean Res. ۲۰۱۲, ۳۴, ۱۰-۲۰. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.apor.۲۰۱۱.۰۷.۰۰۹
- [۴] Hung, C. F.; Lin, B. J.; Hwang-FUU, J. J.; Hsu, P. U. "Dynamic Response of Cylindrical Shell Structures Subjected to Underwater Explosion"; Ocean Eng. ۲۰۰۹, ۳۶, ۵۶۴-۵۷۷. doi:org/۱۰.۱۰۱۶/j.oceaneng.۲۰۰۹.۰۲.۰۰۱
- [۵] Sherkar, P.; Andrew, S.; Amjad J. "Modelling the Effect of Detonation of High Explosive to Inform Blast Resistant Design"; Technical report MCCEER, Innovative Technologies, ۲۰۱۰.
- [۶] Zhang, Z. "Application of Smoothed Particle Hydrodynamics in Analysis of Shaped Charge Jet Penetration Caused by Underwater Explosion"; Ocean Eng. ۲۰۱۷, ۱۴۵, ۱۷۷-۱۸۷. doi:org/۱۰.۱۰۱۶/j.oceaneng.۲۰۱۷.۰۸.۰۵۷

- [۲۲] Cole, R. H. "Under Water Explosions"; Princtone University Press and Dover Publication, New York, ۱۹۶۵.
- [۲۳] Frang, J.; Parriaux A.; Rentschler M.; Ancey C. "Improved SPH Methods for Simulating Free Surface Flow of Viscose Fluids"; Appl. Numer. Math. ۲۰۰۹, ۵۹, ۲۵۱-۷۱. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.apnum.۲۰۰۸.۰۲.۰۰۳.
- [۲۴] Du, Y.; Ma, L.; Zheng, J.; Zhang, F.; Zhang, A. "Coupled Simulation of Explosion-Driven Fracture of Cylindrical Shell using SPH-FEM Method"; Int. J. Press. Vessels Piping ۲۰۱۶, ۱۳۹-۱۴۰, ۲۸-۳۵. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.ijpvp.۲۰۱۶.۰۳.۰۰۱
- [۲۵] LS-DYNA, keyword user manual, R۱۰, livemore software technology corporation, ۲۰۱۷.
- [۲۶] U.S. Department of Defense, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, UFC ۳-۳۴۰-۰۲, ۲۰۰۸.
- [۲۷] Mair, C. "Modelling of Underwater Explosions with Cavitation Effects using LS-DYNA"; MSc Thesis, University of Glasgow, ۲۰۱۴.