



Investigation of the dynamic response of the subsea transmission pipeline under explosion impact using experimental and numerical methods

Hamid Nasiri

PhD Student, Department of Marine Industries, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

Mohammad Asadian Ghahferokhi*

Assistant professor, Department of Marine industries, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Madjid Ghodsi Hassanabad

Assistant professor, Department of Marine industries, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Amin Bahmanpour

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

DOI: 10.30495/CIVIL.2022.694460

Keywords:

Explosion,
Dynamic
Response,
Marine structures,
experimental and
Numerical
Methods,
Abaqus software.

Abstract

Sea and high seas are very important, which can be considered in two aspects. On the one hand, the seas have economic, commercial, logistical, military, and geopolitical advantages, in addition, they pave the way for increased maritime diplomacy. In addition to these advantages, the harsh natural conditions at sea, such as the presence of high waves, tsunamis, sea ice, as well as ammunition and unused military equipment buried under water left over from the First and Second World Wars, also from the imposed war, which could impose a lot of potential human and financial risks due to explosions. In this paper, using the Abaqus finite element software, the dynamic response of a cylindrical tube buried in the sea subjected to the explosion is investigated applying numerical and experimental methods. Finite element models based on the experimental models were examined and the numerical results were compared with the experimental data. The results indicated that the maximum impact wave pressure, bubble propagation duration and displacement due to the cylinder deformation in the experimental and finite element analysis were well compatible.



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license:

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

بررسی پاسخ دینامیکی لوله انتقال زیر آب تحت اثر انفجار به روش آزمایشگاهی و عددی

حمید نصیری

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

محمد اسدیان قهفرخی*

استادیار، گروه مهندسی صنایع دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

مجید قدسی حسن آباد

استادیار، گروه مهندسی صنایع دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

امین بهمن پور

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

asadian@srbiau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۰۲ مرداد ۱۴۰۱

تاریخ دریافت: ۰۷ خرداد ۱۴۰۱

چکیده

دریا و آب‌های آزاد دارای اهمیت بسیاری می‌باشند که این مهم در دو محور کلی قابل طرح است. از یک‌سو دریاها دارای مزیت‌های اقتصادی و تجاری، لجستیکی، نظامی و ژئوپلیتیکی می‌باشند، علاوه بر آن، زمینه‌ساز افزایش دیپلماسی دریایی می‌باشند. در کنار این مزیت‌ها، شرایط سخت طبیعی موجود در دریا مانند وجود امواج بلند، پدیده سونامی، یخ‌های دریایی و در کنار آن مهمات و تجهیزات نظامی عمل نکرده مدفون در زیر آب بجا مانده از جنگ‌های جهانی اول و دوم و نیز جنگ تحمیلی می‌باشد که احتمال انفجار حاصل از آن خطرات احتمالی جانی و مالی زیادی را دربردارد. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار المان محدود Abaqus به بررسی پاسخ دینامیکی لوله انتقال استوانه‌ای مدفون در دریا در اثر انفجار به روش عددی و آزمایشگاهی پرداخته شده است. مدل‌های المان محدود براساس مدل‌های آزمایشگاهی بررسی و نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهند بیشینه فشار موج حاصل از ضربه، مدت انتشار حباب‌ها و جابجایی ناشی از تغییر شکل استوانه در آزمایش و آنالیز المان محدود با هم سازگاری مطلوبی دارند.

کلید واژگان: انفجار، پاسخ دینامیکی، سازه‌های دریایی، روش آزمایشگاهی و عددی، نرم‌افزار آباکوس

مقدمه

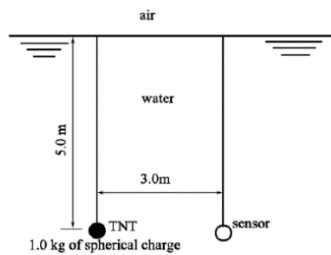
اثرات انفجار زیر آب را می‌توان به دو مرحله تقسیم نمود اول موجی که از ضربه ناشی از انفجار حاصل می‌شود و دوم انتشار حباب‌هایی که در اثر انفجار تولید می‌گردند. اگر چه هر دو آسیب جدی به سازه‌های مجاور وارد می‌کنند، اما مکانیزم خرابی آنها متفاوت می‌باشد. بطور کلی، فشار موج حاصل از ضربه بسیار زیاد است، اما مدت بسیار کوتاهی دارد. از طرف دیگر، فشار حباب‌های تولید شده کمتر می‌باشد (حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد موج حاصل از ضربه)، اما مدت بسیار بیشتری دارند که منجر به نیرویی با اثر تکان‌های نزدیک می‌شوند. بنابراین، زمان بررسی انفجار زیر آب فاصله نزدیک، هم موج حاصل از ضربه و هم حباب‌های حاصله را می‌بایست در نظر گرفت.

موج‌های حاصل از ضربه انفجار در سازه‌هایی که دوره تناوب طبیعی آنها با موج حاصله یکی باشد پدیده تشدید را به وجود آورده و به همین دلیل، می‌تواند باعث آسیب جدی و خرابی کلی در سازه شود. به همین ترتیب، حباب‌های تولید و منتشر شده پس از انفجار نیز در صورتی که فرکانس آنها به فرکانس ویژه سازه نزدیک شوند، می‌توانند سبب خرابی کلی در سازه شده و حرکت شلاقی ایجاد نماید.

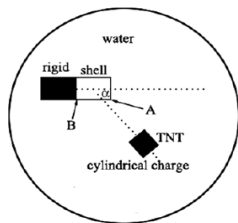
در سال‌های اخیر توجه بسیاری به بررسی اندرکنش سیال و سازه (FSI) در پاسخ سازه به انفجار شده است. تیلور یکی از اولین پژوهشگرانی بود که تکانه منتقل شده از موج حاصل از فشار به صفحه ایستا را با منحنی‌نمایی مطالعه کرد [۱]. کوآن و کانینگهام با ترکیب کد ساده آنالیز المان محدود (FEA)، DYN3D، و کد المان مرزی مبتنی بر DAA، روش آنالیز موج حاصل از ضربه زیر آب (USA) را ابداع نمودند. این روش پاسخ‌های دینامیکی استوانه با سخت‌کننده و المان تیر را تعیین کرد [۲]. کوآن بعدها کرنش دینامیکی استوانه بدون سخت‌کننده را تحت اثر موج حاصل از ضربه جانبی را مورد بررسی قرار داد [۳]. لاکوفلف پاسخ دینامیکی پوسته استوانه‌ای مغروق پر شده با سیال و حاوی مغزه استوانه‌ای صلب هم‌محور را تحت موج حاصل از ضربه کروی خارجی را بررسی کرد [۴]. راجش و همکاران اثر سخت‌کننده‌های سازه‌ای بر عملکرد اژدر سبک را با بکارگیری نرم‌افزار المان محدود آباکوس بررسی کردند. در این تحقیق، آرایشی برای اژدر بدست آمد که حداقل وزن را داشته و به تفاوت‌های سازه‌ای ناچیز ابعاد سخت‌کننده حساسیت کمتری نشان داد [۵]. اثر مغزه بر منحنی تنش-کرنش پوسته واکاوی شد و امکان استفاده از مغزه صلب به عنوان معیار بهبود ایمنی ساختاری به بحث گذاشته شد. یانگ و همکاران اثرات حفاظتی لایه فشرده پلاستیکی با مغزه مربعی لانه زنبوری روکش شده را بر بدنه کشتی بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد که لایه

پلاستیکی حفاظتی می‌تواند آسیب موج حاصل از ضربه به بدنه کشتی را تعدیل کند، اما در کاهش آسیب شلاقی حباب‌های ایجاد شده چندان مؤثر نیست [۶]. کولوورو و همکاران، اندرکنش موج فشار انفجار با سازه الاستیک را با روش آنالیز عددی بررسی کردند. آن‌ها FSI (Fluid Solid Interaction) را در چارچوب لاگرانژ اولر دلخواه (ALE) در نظر گرفتند. یافته‌ها نشان داد که انرژی بطور پیوسته بین سازه و هوا در طی حرکت سازه تبادل می‌شود که وقتی سرعت سازه در مقایسه با سرعت ذرات موج فشار انفجار فرودی قابل توجه باشد، محسوس است [۷]. لبلوند با روشی چندمنظوره تحقیقی درباره پاسخ انتقالی پوسته نازک مغروق تحت انفجار زیر آب انجام داد. او دریافت که این روش می‌تواند به شکلی کارآمد و گسترده برای مصارف طراحی استفاده شود [۸]. کیم و همکاران پاسخ انتقالی مخزن اکسیژن مایع زیردریایی را تحت انفجار زیر آب با استفاده از تکنیک ALE بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد که تکنیک مش سازگار ALE می‌تواند خرابی سازه را پس از تهاجم در آنالیز انفجار زیر آب بطور دقیق ارزیابی کرد [۹]. بارت و همکاران چند آزمایش با خرج‌های انفجاری کروی انجام دادند تا درباره اثر پارامترهای مختلف بر مقدار معادل تریتروتولون (TNT) مواد منفجره مطالعه کنند. آزمایش‌های خرج‌های استوانه‌ای برای مطالعه اثر محل آغاز موج انجام شدند. مشخص شد که آغاز موج در یک طرف سبب جابجایی اضافه فشار بیشینه می‌شود [۱۰]. محققین در حال حاضر به اندرکنش بین حباب‌های تولید شده و سازه (مانند [۱۱-۱۹]) یا تغییر شکل الاستیک-پلاستیکی سازه تحت موج حاصل از ضربه ناشی از انفجار می‌پردازند. در حال حاضر، در مطالعات محدودی انتشار موج حاصل از ضربه و حباب‌های حاصله بطور همزمان در یک مدل المان محدود در نظر گرفته شده است. همچنین، مطالعات محدودی درباره پاسخ دینامیکی سازه الاستیک-پلاستیکی تحت دو مرحله پس از انفجار زیر آب انجام شده است. اثربخشی خرابی با شکل خرج، مسافت و زاویه اولیه بین سازه و مواد منفجره رابطه معناداری دارد. این مقاله به ارائه شرایط اولیه سیال را براساس نرم‌افزار آباکوس ترکیب شده با فناوری FSI پرداخته می‌شود. هدف از این پژوهش، ساخت مدل منفرد المان محدود بوده که بطور همزمان انتشار موج حاصل از ضربه و تاثیر حباب‌های تولید شده را در نظر گیرد، پاسخ دینامیکی پوسته استوانه‌ای الاستیک-پلاستیکی را تحت انفجار زیر آب بررسی و اثر پارامترها از جمله مسافت، زاویه بین مواد منفجره استوانه‌ای و سازه را بر اثربخشی خرابی شرح دهد. گان و همکاران به بررسی تجربی و عددی (کوپل روش اویلری-لاگرانژی) پاسخ دینامیکی یک سازه شناور لاغر باز به حباب انفجار زیر آب پرداختند [۲۶].

مرکز مواد منفجره رو به جبهه شوک گذاشته شد. خطای سیستم حدود ۷,۴ درصد بود. در آزمایش دوم، که در شکل ۲ نشان داده شده، پاسخ دینامیکی سازه تحت چنین انفجاری در استخر آبی استوانه‌ای به قطر ۵ و عمق ۵ متر واکاوی شد. در ابتدا، سازه گشایی از جنس گشای پلاستیکی برای درگیری سر پوسته استوانه‌ای به منظور جلوگیری از ورود آب به داخل استوانه استفاده شد، به همین دلیل فقط با هوا پر شد. سر پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری انفجار قرار گرفت و کف آن با رزوه به تکیه‌گاهی صلب متصل شد. در نتیجه، موقعیت پوسته از طریق این تکیه‌گاه صلب قابل تنظیم بود.



شکل ۱- طرح شماتیک سیستم آزمایشگاهی ۱



شکل ۲- دیگرام شماتیک سیستم آزمایشگاهی ۲

جدول ۱- پارامترهای مواد منفجره استوانه‌ای

شماره	قطر (میلیمتر)	طول (میلیمتر)	چگالی (گرم با سانتیمتر مکعب)	جرم (گرم)
۱	۵۵	۴۳	۱,۶۳	۱۶۷
۲	۵۵	۴۶	۱,۶۱	۱۷۶
۳	۵۵	۴۶	۱,۶۱	۱۷۵
۴	۵۵	۴۶	۱,۶۰	۱۷۶
۵	۵۵	۴۷	۱,۶۱	۱۸۱
۶	۵۵	۴۷	۱,۶۱	۱۸۱
۷	۵۵	۴۷	۱,۶۱	۱۸۱
۸	۵۵	۴۶	۱,۶۱	۱۷۵
۹	۵۵	۴۶	۱,۶۱	۱۷۶

رابطه تجربی برای موج حاصل از ضربه و انتشار

حباب

فشار بیشینه P_m (مگاپاسکال) با تنزل نمایشی برای خرج‌های کروی در موج‌های حاصل از ضربه انفجار میدان آزاد زیر آب که در مسافت R (متر) بزرگ‌تر از ۱۰ برابر شعاع خرج وزن TNT معادل W (کیلوگرم) تولید می‌شود از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$p_m = 52.16 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1.13} \quad (۱)$$

ثابت تنزل θ (میلی ثانیه) زمان مورد نیاز برای کاهش فشار بیشینه تا $1/e$ مقدار اولیه‌اش است [۱۴]:

$$\theta = 96.5 W^{1/3} \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{-0.22} \quad (۲)$$

فشار اولیه گاز پس از انتشار بخش اصلی موج حاصل از ضربه بطور قابل توجهی نزولی است، اما همچنان از فشار هیدرواستاتیک معادل بیشتر است. حباب گاز انفجار در طی فازهای انبساط و انقباض اولیه تقریباً کروی است. شعاع بیشینه R_m ، که در طی پالس اولیه بدست آمده است، و مدت T انتشار (از انفجار تا اولین حد کمینه بعدی) پارامترهای مهمی هستند. هر دو پارامتر با اندازه خرج انفجاری و عمق انفجار تغییر می‌یابد. رابطه تجربی شعاع بیشینه و دوره تناوب حباب به صورت زیر است:

$$R_m = K \left(\frac{W}{P_0} \right)^{1/3} \quad (۳)$$

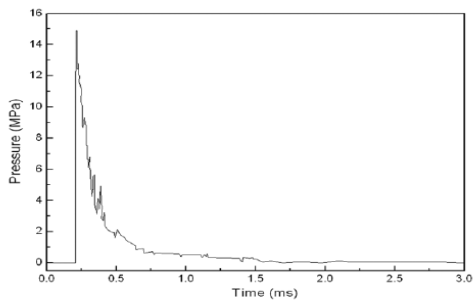
$$T = 2.11 \left(\frac{W^{1/3}}{Z_0^{5/6}} \right) \quad (۴)$$

در اینجا، $R_m(m)$ شعاع حباب، W (کیلوگرم) وزن خرج، P_0 (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع) فشار محیطی، K ثابت خرج برای ماده منفجره (برای ماده منفجره TNT، $K=1.6$)، $T(s)$ دوره تناوب انتشار حباب و $Z_0(m)$ هد فشار است.

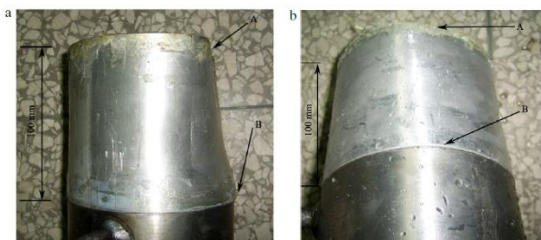
آزمایش‌های انفجار زیر آب

روند آزمایشات

برای بررسی پاسخ دینامیکی پوسته استوانه‌ای تحت موج حاصل از ضربه و انتشار حباب‌های تولید شده در انفجار زیر آب، دو آزمایش انجام گرفت. اولین آزمایش، که شماتیک آن در شکل ۱ نشان داده شده است، انتشار موج حاصل از ضربه و انتشار حباب را بررسی می‌نماید. این آزمایش در استخر آب استوانه‌ای به قطر ۸۵ و عمق ۱۴,۵ متر انجام پذیرفت. خرج انفجاری کروی ۱ کیلوگرمی TNT در داخل آب و در عمق ۵ متری منفجر شد و سنسور در فاصله ۳ متری از



شکل ۴- منحنی فشار-زمان موج حاصل از ضربه ۱ کیلوگرم TNT برای آزمایش دوم، جابجایی نقطه A و B در سه آزمایش برای هر مورد اندازه‌گیری شد. تغییرشکل پوسته‌ها تحت انفجار زیر آب با یک زاویه یکسان اما با مسافت‌های متفاوت در شکل ۵ نشان داده شده است. بطور مشخص، جابجایی با افزایش مسافت کاسته شد. مطابق اشکال ۵ (الف) و (ب)، چون کف استوانه از طریق رزوه به سطحی توپر متصل شد، در ضلع رو به موج حاصل از ضربه و انتشار حباب اعوجاج رخ داد، اما در سر سیلندر فرورفتگی ایجاد شد. جابجایی کف استوانه در مقایسه با سر استوانه بسیار کمتر بود. داده‌های کامل نتایج آزمایش برای تغییرشکل استوانه در جدول ۲ و نمودارهای خطا برای هر مورد نشان داده شده که میانگین مقادیر جابجایی برای یک زاویه (۹۰) و مسافت‌های مختلف در شکل ۶ نمایش داده شده است. هم مسافت و هم زاویه، اثر معناداری بر تغییرشکل سازه داشتند. براساس مورد مسافت ۳۵۰ میلیمتر و زاویه متغیر بین صفر تا ۹۰، می‌توان نتیجه گرفت زمانی که مسافت و خرج انفجاری یکسان است، جابجایی نقطه رأس (نقطه A) و نقطه کف (نقطه B) در زمانی که زاویه ۹۰ است کمترین مقدار را دارند. این نتیجه با نتایج آزمایش‌های دیگر مطابقت دارد. زیرا تکانه و فشار در نقاط جانبی حدود ۳۰ درصد از مقادیر نقاط انتهایی برای دو خرج خطی و استوانه‌ای بیشتر بودند [۲۰].

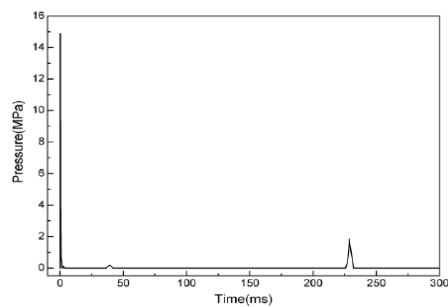


شکل ۵- تغییرشکل استوانه‌ها پس از بارگذاری انفجار زیر آب با مسافت‌های مختلف و زاویه یکسان. (الف) مسافت: ۳۰۰ میلیمتر؛ زاویه بین دو محور: ۶۰ درجه. (ب) مسافت: ۴۰۰ میلیمتر؛ زاویه بین دو محور: ۶۰ درجه.

موقعیت نقطه A، رأس استوانه رو به موج انفجاری بود، اما نقطه B در کف قرار داشت. جابجایی نقاط A و B در سه آزمایش برای هر مورد اندازه‌گیری و ثبت شد. مواد منفجره استوانه‌ای (TNT) در عمق ۲ متر با مسافت ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلیمتر از مرکز خرج‌های انفجاری و با زوایایی بین صفر تا ۹۰ درجه بین دو محور مواد منفجره و پوسته استوانه‌ای منفجر شد. پارامترهای دقیق در جدول ۱ آمده‌اند. سازه یک استوانه آلومینیومی بود. قطر داخلی ۱۰۸ میلیمتر، قطر خارجی ۱۱۴ میلیمتر، ضخامت ۳ میلیمتر، طول ۱۰۰ میلیمتر، چگالی جرمی ۲۷۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مکعب، مقاومت تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال، مدول ارتجاعی ۷۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰,۳ بود.

نتایج

موج حاصل از ضربه و انتشار حباب‌های تولید شده در طی انفجار زیر آب ثبت شده در تاریخچه فشار- زمان سنسور در شکل ۳ (تاریخچه فشار ۳۰۰ میلی ثانیه) و شکل ۴ (در محدوده ۳ میلی ثانیه) نشان داده شده است. موج حاصل از ضربه فرودی در مدت ۰,۲ میلی ثانیه با مقدار بیشینه ۱۴,۹ مگاپاسکال رسید و سپس به سرعت در مدت تقریبی ۰,۵ میلی ثانیه به صفر رسید. موج حاصل از ضربه با انتشار حباب اولیه به مدت تقریبی ۲۲۰ میلی ثانیه ادامه یافت که منحنی گسترده و فشار بیشینه کمتری داشت. مدت انتشار حباب ۲۲۰ میلی ثانیه بود.

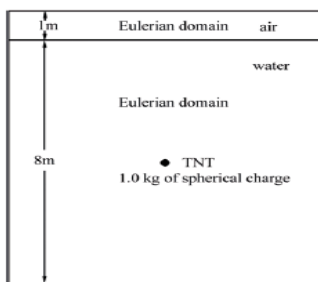


شکل ۳- منحنی فشار-زمان موج حاصل از ضربه ۱ کیلوگرم TNT

مدل واحد و شبیه‌سازی اندرکنش بین آنها موجودند. اندرکنش بین سیال و سازه از طریق سطح کوپلینگ حاصل می‌شود که روی سازه ایجاد می‌شود. بنابراین، مدل آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار مذکور به صورت عددی شبیه‌سازی می‌شود و نتایج محاسباتی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند. مدل‌های المان محدود بطور دقیق براساس مدل‌های آزمایشگاهی ساخته می‌شوند. ابعاد پهنا آبی برای مدل المان محدود ثانویه $1,2 \times 1,2 \times 1,2$ متر مکعب است. برای مدل ثانویه، از کوپلینگ عمومی جهت شبیه‌سازی اندرکنش بین سیال و سازه استفاده شد. اندازه مش محدوده اولری به ترتیب با ابعاد ۲۵ (مدل ۱) و ۱۵ میلی‌متر (مدل ۲) مدل شد. به عبارتی دیگر، اندازه مش هر مدل ۰,۵ برابر شعاع خرج بود.

سیال

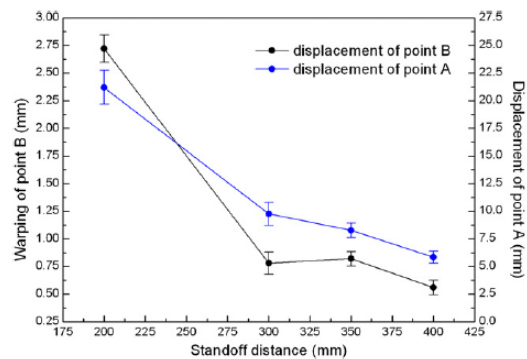
برای شبیه‌سازی به صورت سه‌بعدی، سیال با در نظر گرفتن المان‌های شش وجهی (المان‌های اولری با ۸ نقطه) مدل‌سازی شده است. براساس آزمایش اول، مقادیر شرایط مرزی پهنا آبی برای مدل المان محدود اول $8 \times 9 \times 8$ متر مکعب در نظر گرفته شده است، اما ابعاد مرزی ناحیه هوایی $8 \times 1 \times 8$ متر مکعب می‌باشد. محور Y در جهت عمودی در نظر گرفته شده و مواد منفجره TNT کروی در مرکز صفحه افقی با عمق ۵ متر در نظر گرفته شده است. مدل المان محدود سیال را می‌توان در شکل ۷ مشاهده کرد و «محدوده اولری» در شکل با استفاده از المان‌های شش‌وجهی سیال مدل شده است. خصوصیات آب و هوا بر المان‌های سیال اعمال شده است. ابعاد مرزی پهنا آبی برای مدل ثانویه $1,2 \times 1,2 \times 1,2$ متر مکعب می‌باشد. خصوصیات آب به همه المان‌های سیال تخصیص داده شد.



شکل ۷- دیاگرام شماتیک مدل FE برای آزمایش ۱

جدول ۲- نتایج آزمایش‌های جایجایی دائمی

شماره	خرج (گرم)	مسافت (میلی‌متر)	زاویه (درجه)	اعوجاج نقطه B (میلی‌متر)	جایجایی نقطه A (میلی‌متر)
۱	۱۶۷	۲۰۰	۹۰	۲,۷۲	۲۱,۲۰
۲	۱۷۶	۳۰۰	۳۰	۱,۶۰	۶,۵۰
۳	۱۷	۳۰۰	۶۰	۴,۳۶	۲۷,۲۲
۴	۱۷۶	۳۰۰	۹۰	۰,۷۸	۹,۷۶
۵	۱۸۱	۳۵۰	۳۰	۱,۶۰	۱۴,۷۸
۶	۱۸۱	۳۵۰	۶۰	۳,۳۰	۲۲,۲۲
۷	۱۸۱	۳۵۰	۹۰	۰,۸۲	۸,۲۷
۸	۱۷۲	۴۰۰	۶۰	۱,۲۱	۹,۳۲
۹	۱۷۶	۴۰۰	۹۰	۰,۵۶	۵,۸۳



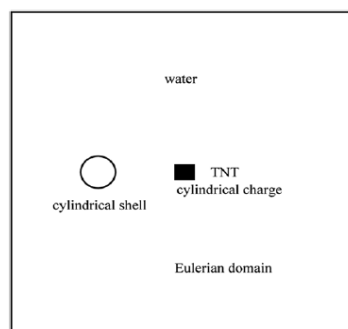
شکل ۶- نمودارهای خطا برپایه میانگین مقادیر جایجایی برای زاویه یکسان (۹۰ درجه) با مسافت متفاوت

شبیه‌سازی عددی

از آنجا که مسافت بین جداره استخر و مواد منفجره از شعاع خرج بسیار بیشتر است، موج حاصل از ضربه در طی شبیه‌سازی عددی هیچ انعکاسی ندارد.

مدل المان محدود

برنامه آباکوس برنامه FEA ساده‌ای برای آنالیز رفتار غیرخطی پیچیده شامل تغییر شکل دائمی سازه‌ها است. هر دو حل‌کننده‌های لاگرانژی و اولری در این برنامه برای مدل‌سازی سازه و سیال در یک



شکل ۸. دیاگرام شماتیک مدل FE برای آزمایش ۲

معادله حالت

رابطه EOS به صورت $p = p(\rho, e)$ است که در آن p فشار، ρ چگالی جرمی و e انرژی درونی در واحد جرم است. مدل EOS ویژه محصولات انفجاری مدل استاندارد جونز- ویلکینز-لی (JWL) [۲۲] است:

$$p = A \left(1 - \frac{w\eta}{R_1}\right) \exp\left(\frac{R_1}{\eta}\right) + B \left(1 - \frac{w\eta}{R_2}\right) \exp\left(-\frac{R_2}{\eta}\right)$$

(۶)

در این رابطه، ρ_0 چگالی مرجع است؛ ρ چگالی کلی ماده است؛ $\eta = \rho/\rho_0$ و R_1, R_2, B, A ثابت هستند. برای ماده منفجره TNT، $A=3.712 \times 10^{11}$ Pa، $B=3.231 \times 10^9$ ، $e=4.29 \times 10^6$ Jkg⁻¹ و $\omega = 0.3$ ، $R_2=0.95$ ، $R_1=4.15$

بطور کلی، رابطه EOS ویژه آب مدل اصلاح شده تایت است و معادله تایت را می توان در این مورد بکار گرفت که وابسته به فرض ایزوترمال بودن آب است:

$$p = \begin{cases} B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^y - 1 \right] & \text{if } \rho > \rho_c \\ \rho c & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

در این رابطه، ρc فشار کاپیتاسیون، $\gamma = 7.15$ ، $\rho_0 = 1000 \text{ kgm}^{-3}$ و $B = 2.984 \times 10^6 \text{ Pa}$ است.

در برنامه آباکوس، استفاده از EOS چند جمله ای به جای EOS اصلاح شده تایت ساده است:

$$(8) \quad p = a_1 \mu + a_2 \mu^2 + a_3 \mu^3 + (b_0 + b_1 \mu + b_2 \mu^2 + b_3 \mu^3)$$

در این رابطه، ρ_0 چگالی مرجع، ρ چگالی جرمی کلی، e انرژی درونی در واحد جرم، $\eta = \rho/\rho_0$ ، $\mu = \eta - 1$ ، $a_1 - a_3$ و $b_1 - b_3$ ثابت هستند. بسط تیلور برای معادله ۷ استفاده شد:

$$p = 2.984 \times 10^8 \times 7.15 \mu + \frac{1}{2} \times 2.984 \times 10^8 \times 7.15 \times 6.15 \mu^2 + \frac{1}{8} \times 2.984 \times 10^8 \times 7.15 \times 6.15 \times 5.15 \mu^3 + R_n(\mu)$$

(۹)

سازه

سازه استوانه ای، از جمله المان های پوسته ای و المان های ساختگی، سطح کوپلینگ را تعریف کرد که با سیال اندرکنش داشت. مدل سیال و سازه را می توان در شکل ۸ مشاهده کرد. طبق برنامه آباکوس، سطح کوپلینگ باید حجم بسته ای را تشکیل دهد. برای تشکیل سطح کوپلینگ بسته، المان های پوسته ای ساختگی وارد برنامه شدند تا سر استوانه «بسته» شود. کل مدل المان محدود در شکل ۹ نمایش داده شده است. طبق آزمایش، در ابتدا سازه غشایی برای درزگیری پوسته استوانه ای بکار رفته، بنابراین فقط هوا در داخل استوانه بود. باین حال، چون مقاومت سازه غشایی نسبت به فشار موج حاصل از ضربه ناچیز بود، می توان آن را در شبیه سازی عددی کاملاً ناچیز و قابل اغماض محسوب کرد. در نتیجه، خصوصیات حفره بزرگ به المان های پوسته ای ساختگی اختصاص داده شد. خصوصیات مدل الاستوپلاستیک با معیار تسلیم جانسون-کوک به المان های پوسته ای استوانه ای اختصاص داده شد که در آن تنش تسلیم تابعی از کرنش پلاستیک و نرخ کرنش است [۲۱]:

$$(5) \quad \sigma = [A + B \varepsilon^n][1 + C \ln \varepsilon^*][1 - T^* m]$$

در اینجا ε^* کرنش پلاستیک معادل، $\varepsilon^* = \varepsilon / \dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنش پلاستیک بی بعد برای $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$ و T^* دمای همسان است. پارامترهای A, B, C و n ثابت های ماده اند.

پارامترهای مدل جانسون-کوک برای شبیه سازی در جدول ۳ آمده است.

شکل ۹. سطح کوپلینگ از جمله المان پوسته ای استوانه ای و المان ساختگی برای شبیه سازی عددی

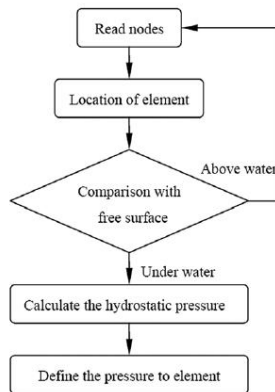
جدول ۳- پارامترهای مدل جانسون-کوک برای شبیه سازی عددی

M	C	N	B(MPa)	A (MPa)	ماده
۱,۰۰	۰,۰۱۵	۰,۳۴	۴۲۶	۲۶۵	آلومینیم - ۲۰۲۴

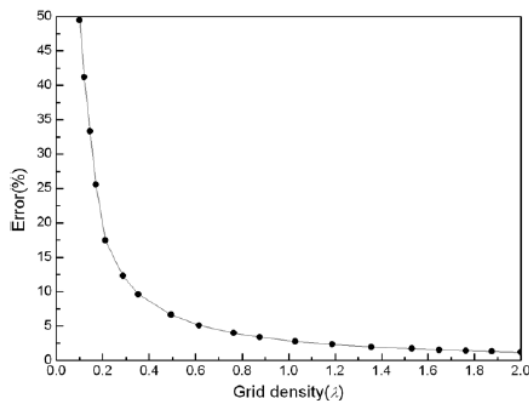
شد. به سایر المان‌های زیر آب، خصوصیات هوا تخصیص داده شد و مقدار اولیه به عنوان فشار اتمسفری فرض شد. شرایط مرزی میدان سیال را می‌توان با استفاده از همین روش طبق شرط اولیه المان‌های مرزی تعیین کرد (شکل ۱۱).

حساسیت اندازه مش اولری

برای بررسی حساسیت اندازه مش اولری و ساده‌سازی محاسبات، مسئله را برحسب متغیرهای بی بعد (λ) بیان کردیم. ابعاد خطی برحسب طول ضلع المان اولری بی‌بعد شدند. بدین ترتیب، تراکم شبکه از رابطه R_c/L_e محاسبه شد که در اینجا R_c شعاع خرج انفجاری و L_e طول ضلع المان است. در شکل ۱۲، نتایج آنالیز انفجار و مقادیر توربیک از طریق مدل کول برای مقادیر فشار بیشینه با اندازه مش مختلف بین ۰.۱ تا ۲ مقایسه شده‌اند.



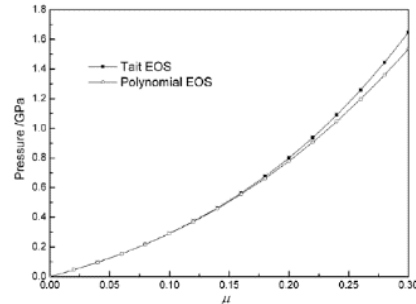
شکل ۱۱- فلوجارت تعریف فشار هیدرواستاتیک برای میدان سیال



شکل ۱۲. اثر اندازه مش اولری بر فشار بیشینه موج حاصل از ضربه مطابق شکل ۱۲، اندازه مش به نتایج آنالیز حساس است و هر چه اندازه مش برای محدوده اولری کوچک‌تر باشد، نتایج بهتری حاصل می‌شود. بطور ویژه، زمانی که طول مش کمتر از ۰.۵ برابر شعاع خرج انفجاری است، مقادیر فشار بیشینه مواد منفجره به مقدار توربیک نزدیک می‌شوند.

ثابت‌ها با مقایسه ثابت‌های مرتبط در معادلات ۸ و ۹ بدست آمدند. برای آب، $a_1 = 2.134 \times 10^9 Pa$ ، $a_2 = 6.561 \times 10^9 Pa$ ، $b_1 = 0$ ، $b_2 = 0$ ، $b_3 = 0$ ، $a_3 = 1.126 \times 10^{10} Pa$.

مقایسه فشار در دو مدل EOS تایت و EOS چندجمله‌ای در شکل ۱۰ آمده است. بطور کلی، براساس پدیده انفجار زیر آب، تفاوت‌های چگالی جرمی آب کمتر از ۱.۵٪ بود.



شکل ۱۰. مقایسه فشار در دو مدل EOS تایت و EOS چندجمله‌ای مطابق شکل ۱۰، زمانی که $\mu = 0.15$ است، خطای گرد کردن برای فشار بین دو مدل EOS تایت و EOS چندجمله‌ای ۲.۶۴ درصد بود. بنابراین، تعیین مدل EOS چندجمله‌ای برای آب مسئله دقت محاسبات را برطرف می‌کند.

مدل EOS ویژه هوا مدل گاز تابع قانون گاما است:

$$p = (\gamma - 1)\rho e \quad (10)$$

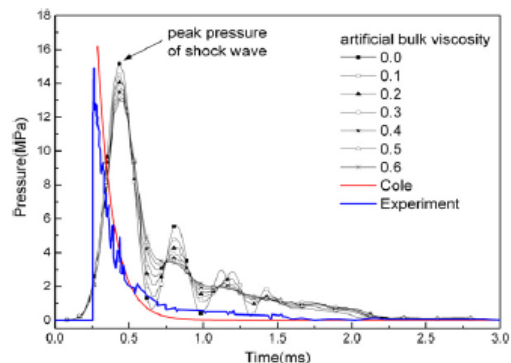
در اینجا ρ چگالی کلی ماده، e انرژی درونی در واحد جرم و γ ثابت است. برای هوا، $\gamma = 1.4$ ، $P_0 = 0.1 \text{ MPa}$ و $e_0 = 2.11 \times 10^6 \text{ J/kg}$ بود.

شرایط اولیه و مرزی

براساس پدیده انفجار زیر آب، فشار هیدرواستاتیک اثر بسزایی بر انتشار حباب دارد، گرچه می‌توان آن را نسبت به فشار قابل ملاحظه موج حاصل از ضربه نادیده گرفت. در نتیجه، فشار هیدرواستاتیک را باید در شبیه‌سازی عددی در نظر گرفت. متأسفانه، درک مستقیم تعریف فشار هیدرواستاتیک در برنامه آباکوس ناممکن است. رابطه‌ها برای تعریف شرایط اولیه و مرزی در برنامه موجود هستند. در این بخش، فشار هیدرواستاتیک برای شرایط اولیه میدان سیال تعریف و تشریح می‌شود. ابتدا، دستگاهی برای کلیه گره‌های المان‌های سیال (فقط المان‌های اولری، نه المان‌های سازه‌ای) تشکیل و به شرایط اولیه اختصاص داده شد. ثانیاً، اطلاعات از جمله موقعیت محور قائم هر گره قرائت شد. ثالثاً، موقعیت‌های عمودی سطح آزاد و هر گره المان سیال مقایسه شد. در انتها، فشار هیدرواستاتیک برای هر المان سیال زیر آب طبق موقعیت مکانی (عمق) گره‌های هر المان محاسبه

نتایج و تشریح مطالب

امواج ضربه‌ای، انتشار ناپیوستگی متغیرهای ترمودینامیکی مانند سرعت، فشار، انرژی، چگالی و سرعت صوت‌اند. بطور فرضی، اثر ایده‌آل بین دو سطح تخت سبب افزایش آنی سیگنال زمانی این متغیرها می‌شود. موادی که با تغییر شکل سخت می‌شوند می‌توانند موج حاصل از ضربه را از پروفیل موج صاف تولید کنند، اما مدل المان محدود جسم پیوسته نمی‌تواند این انتشار ناپیوستگی را بصورت عددی نشان دهد. برای کنترل نوسانات همراه با جبهه موج حاصل از ضربه، لزجت توده غیرواقعی در نرم‌افزار المان محدود لحاظ شد. مدل برای افزایش فشار در جبهه موج حاصل از ضربه به صورت تابعی از نرخ کرنش طراحی شد. تاریخچه فشار-زمان نقطه‌ای ثابت برای ضرایب لزجت توده غیرواقعی (مقدار بی بعد) متغیر بین صفر تا ۰٫۶ در شکل ۱۳ براساس نظریه کول [۲۰] و آزمایش ۱ نشان داده شده است. موقعیت نقطه ثابت ۳ متر دور از ماده منفجره TNT کروی ۱ کیلوگرمی واقع در عمق ۵ متری بود.



شکل ۱۳. تاریخچه فشار-زمان نقطه‌ای ثابت در فاصله ۳ متری از ماده کیلوگرمی برای لزجت های مختلف TNT

جدول ۴- مقایسه بین شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی فشار بیشینه موج حاصل از ضربه با ضرایب لزجت متغیر بین صفر تا ۰٫۶.

ضریب لزجت (بی بعد)	مقدار بیشینه برای موج حاصل از ضربه (مگاپاسکال)	خطا (%)
۰٫۰	۱۵٫۱۷	۱٫۸۱
۰٫۱	۱۴٫۵۰	۲٫۶۸
۰٫۲	۱۴٫۰۷	۵٫۵۷
۰٫۳	۱۳٫۷۵	۷٫۷۲
۰٫۴	۱۳٫۴۷	۹٫۶۰
۰٫۵	۱۳٫۲۴	۱۱٫۱۴
۰٫۶	۱۳٫۰۲	۱۲٫۶۳

منحنی موج حاصل از ضربه محاسبه شده با برنامه المان محدود نسبت به منحنی حاصل از آزمایش و مدل کول بسیار عریض‌تر است. زیرا گرادیان فشار در فاز موج حاصل از ضربه به دلیل لزجت توده غیرواقعی افزایش و به‌کندی کاهش می‌یابد. هم فشار بیشینه و هم فشار نوسانی با افزایش ضریب لزجت توده غیرواقعی کوچک‌تر می‌شوند. نتایج محاسباتی زمانی دقیق‌ترند که این ضریب مقادیر کوچکتری مانند ۰٫۱ یا ۰٫۲ داشته باشد. می‌توان مشاهده کرد که هم فشار بیشینه و هم فشار نوسانی ممکن است با ازدیاد لزجت توده غیرواقعی کاهش یابند. مقادیر فشار بیشینه حاصل از شبیه‌سازی عددی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی و تئوریک نسبتاً کوچک‌تر بودند. با این حال، نتایج شبیه‌سازی عددی همگرا شدند و مشابه نتایج آزمایشگاهی و تئوریک بودند.

طبق برنامه آباکوس، مقدار پیش فرض لزجت توده غیرواقعی صفر است. از دید بسیاری از محققین، انی مقدار می‌تواند دقت موردنیاز آنالیز FEA را در فشار بیشینه موج حاصل از ضربه تأمین کند. با این حال، مطابق شکل ۱۳ و جدول ۴، فشار بیشینه نوسانی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی (شکل ۴) کمی بیشتر بود، اما مقدار لزجت توده غیرواقعی صفر بود. با مقایسه دو ردیف اول جدول، مشاهده می‌شود که خطای بین داده‌های محاسباتی و آزمایشگاهی ۰٫۸۷ درصد افزایش یافته است. بنابراین، نتایج محاسباتی بسیار مستدل بودند، اما مقدار لزجت توده غیرواقعی ۰٫۱ بود در حالیکه مقدار پیش فرض صفر بود.

برای اثبات دقت مدل و مقادیر پارامترها، مدل المان محدود (شکل ۷) براساس آزمایش ۱ ساخته و نتایج محاسباتی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. تاریخچه فشار-زمان نقطه ثابت در فاصله ۳ متری از خرج کروی TNT ۱ کیلوگرمی در بازه ۵۰۰ میلی ثانیه اولیه، یعنی زمانی که لزجت توده غیرواقعی ۰٫۱ بود، در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مطابق این شکل، نتایج شبیه‌سازی عددی با مقادیر آزمایش مطابقت زیادی داشت. موج حاصل از ضربه نظیر اولین انتشار حباب منحنی عریض‌تر و فشار بیشینه کمتری با مقدار حدود ۲٫۸ مگاپاسکال داشت.

عددی در ازای خرج TNT کروی ۱ کیلوگرمی در جدول ۵ آمده است. تکانه انفجار را نمی‌توان مستقیماً از طریق برنامه FEA تولید کرد، اما می‌توان با جمع‌بندی هر گام زمانی ضرب شده در فشار نظیر طبق رابطه زیر محاسبه کرد:

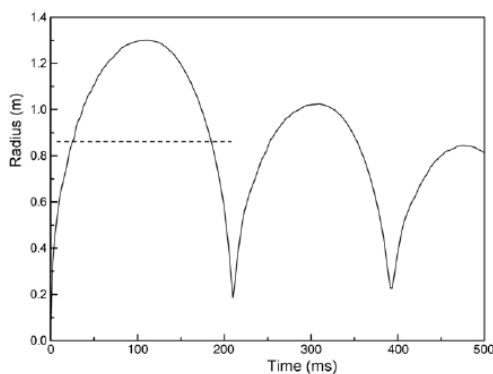
$$I = \int_0^T (p - p_0) dt \quad (11)$$

در اینجا T زمان آنالیز، dt گام زمانی برای آنالیز FEA، p فشار نظیر هر گام زمانی و p_0 فشار محیط است. همبستگی خوبی در جدول ۴ مشاهده می‌شود.

جدول ۵- مقایسه خطاها بین آزمایش و محاسبات در ازای TNT یک کیلوگرمی در عمق ۵ متری

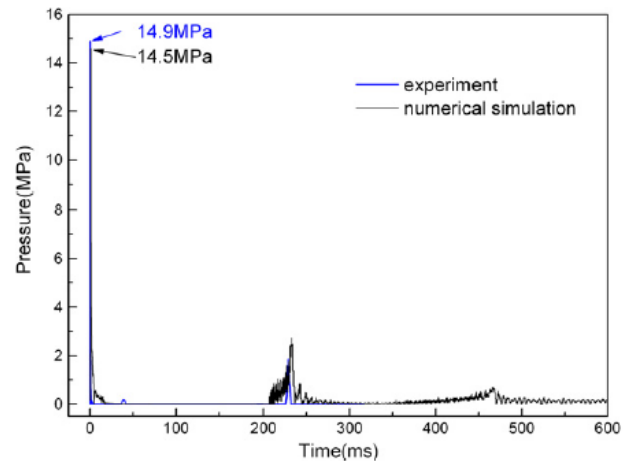
مقدار فشار پیک			مدت پالس		
آزمایش (مگاپاسکال)	FEA (مگاپاسکال)	خطا (%)	آزمایش (مگاپاسکال)	خطا (%)	FEA (مگاپاسکال)
۱۴,۹	۱۴,۵	۲,۷	۲۱۳,۲	۲۲۶,۲	۶,۰

شعاع بیشینه حباب			تکانه انفجار		
آزمایش (مگاپاسکال)	FEA (مگاپاسکال)	خطا (%)	آزمایش (مگاپاسکال)	خطا (%)	FEA (مگاپاسکال)
۱,۳۶	۱,۳۱	۳,۷	۲,۰۴	۱,۹۲	۵,۹

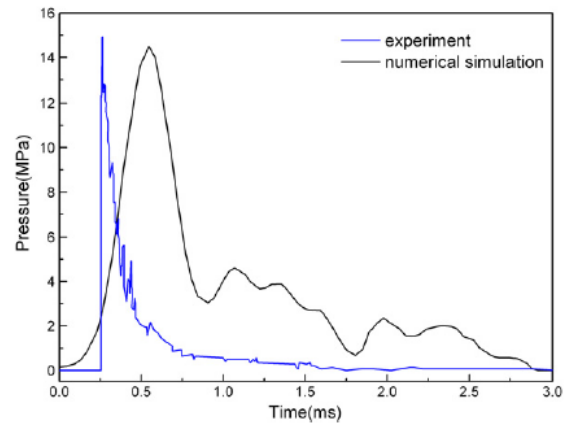


شکل ۱۶. منحنی تاریخچه شعاع-زمان برای TNT یک کیلوگرمی در عمق ۵ متری

در شکل ۱۶، تاریخچه شعاع ۵۰۰ میلی ثانیه‌ای انتشار حباب نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که شعاع بیشینه و بازه انتشار حباب به ترتیب ۱,۳۱ و ۲۱۰ میلی ثانیه‌اند. مقایسه نتایج محاسباتی شعاع بیشینه با معادله ۳ و بازه با معادله ۴ به ترتیب نشان از مطابقت



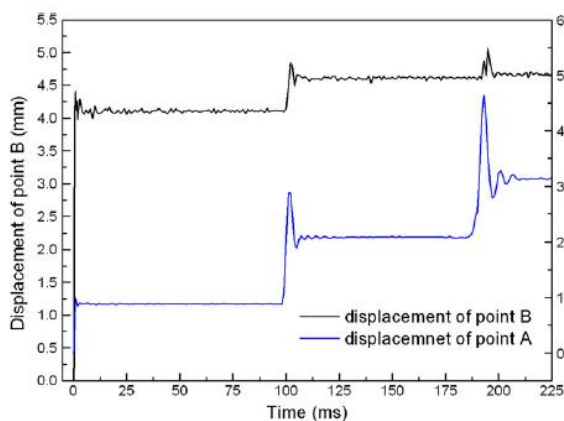
شکل ۱۴. مقایسه منحنی فشار-زمان نقطه ثابتی در فاصله ۳ متری TNT کروی ۱ کیلوگرمی بین آزمایش و شبیه‌سازی عددی



شکل ۱۵. مقایسه منحنی فشار-زمان موج حاصل از ضربه برای نقطه‌ای ثابت در فاصله ۳ متری از TNT کروی ۱ کیلوگرمی بین آزمایش و شبیه‌سازی عددی

در زمان تقریبی ۴۵۰ میلی ثانیه، یعنی زمان متناظر با انتشار حباب ثانویه، فشار بیشینه حدود ۰,۵ مگاپاسکال بود. با توجه به تاریخچه فشار-زمان، بدیهی است که مدت انتشار حباب حدود ۲۲۵ میلی ثانیه است. مقایسه موج حاصل از ضربه در اولین بازه ۳ میلی ثانیه بین شبیه‌سازی عددی و آزمایش در شکل ۱۵ آمده است. همانند شبیه‌سازی عددی، موج حاصل از ضربه فرودی در زمان تقریبی ۰,۵ میلی ثانیه با فشار بیشینه ۱۴,۵ مگاپاسکال رسید و سپس به سرعت در مدت تقریبی ۱ میلی ثانیه کاهش یافت. کاهش فشاری که با شبیه‌سازی عددی پیش‌بینی شد با نتایج آزمایش در محدوده زمان بسیار کوتاه (۲,۵ ثانیه پس از رسیدن فشار به مقدار بیشینه) متفاوت بود. با این حال، پس از آن، نتایج شبیه‌سازی عددی همگرا و مشابه مقادیر آزمایش شد.

مقایسه خطاهای مقدار بیشینه موج حاصل از ضربه، مدت انتشار حباب، شعاع بیشینه حباب و تکانه انفجار در آزمایش و شبیه‌سازی



شکل ۱۷ - منحنی تاریخچه جابجایی-زمان نقاط رأس و کف (نقطه A و B) در مسافت ۳۰۰ میلی متری و زاویه ۶۰ درجه بین دو محور

از طرفی دیگر، زمانی که حجم حباب کمترین مقدار را داشت، تغییر شکل استوانه، به خصوص نقطه رأس، مشهود بود. دلیل این اتفاق ممکن است ارتباط جابجایی حباب با انتشار انرژی به صورت امواج فشار رو به بیرون باشد. مشخص است که فشار در آب باید به مجذور نرخ انبساط یا انقباض حباب وابسته است. بدیهی است که این نرخ زمانی بیشترین مقدار را داراست که حباب به نقطه کمترین حجم نزدیک است. بنابراین، زمانی که پالس‌های فشار منتشر شدند، این نرخ در زمان‌های نظیر حجم کمینه به مقدار بیشینه رسید و مجدد با انبساط حباب کاهش یافت. در نتیجه، زمانی که حجم حباب در طی هر بازه کمترین مقدار را داشت (اشکال ۱۸. ب و د) جابجایی استوانه با اندرکنش انتشار حباب بیشتر شد. زمانی که حجم حباب کمترین مقدار را داشت، جابجایی نقاط A و B افزایش یافت. زمان‌های نظیر ۱۰۱ و ۱۹۶ میلی ثانیه بود. طبق محاسبات، جابجایی نهایی استوانه از کنش ترکیبی موج حاصل از ضربه و انتشار حباب حاصل شد.

مقایسه تغییر شکل استوانه در شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۱۹ به تصویر در آمده است. نتایج مطابقت خوب بین نتایج آزمایش و نتایج محاسباتی را نشان می‌دهد. طبق شبیه‌سازی عددی، پاسخ دینامیکی سازه در معرض انفجار زیر آب از کنش ترکیبی موج حاصل از ضربه و انتشار حباب مواد منفجره ناشی می‌شود.

نتایج آزمایشگاهی و محاسباتی برای جابجایی دائم در ازای زوایای مختلف بین استوانه و خرج TNT در جدول ۶ آمده است. نتایج محاسباتی مطابقت خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشتند. طبق انتظار، جابجایی نقاط رأس و کف استوانه با افزایش مسافت کاهش می‌یابد. هر دو جابجایی نقاط رأس (نقطه A) و کف (نقطه B) زمانی کمترین مقدار را داشتند که زاویه ۹۰ درجه، مسافت و خرج انفجاری ثابت بود. این نتیجه با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد. همچنین،

خوب با خطاهای ۳ و ۵ درصدی دارد. شعاع بیشینه حباب در هر بازه به مرور زمان افزایش یافت. علت این اتفاق اتلاف تدریجی انرژی با تبدیل آن به انرژی حرارتی بود که دمای سیالی که موج فشار در آن منتشر می‌شود بالا می‌برد [۲۳]. فشار در آب باید به مجذور نرخ انبساط یا انقباض حباب وابسته است [۲۴]. شعاع بیشینه ۱،۳۱ با فشار درونی گاز بسیار کمتر از فشار هیدرواستاتیک متناظر بود، زیرا شعاع تعادل برای این اندازه از خرج به‌سادگی براساس EOS انفجار ۰،۸۵ برآورد شد. این شعاع، که در آن فشار گاز با فشار هیدرواستاتیک آب برابر است، با خط تیره در شکل ۱۶ نشان داده شده است. بدیهی است که این فشار از فشار موجود در ۷۰ درصد از بازه اولیه کمتر است.

برای حصول شکل تغییر شکل اولیه، تاریخچه‌های جابجایی-زمان در چند موقعیت در امتداد راستای طولی بدست آمد. پوسته استوانه‌ای در کف، تحت بارگذاری انفجاری که با انفجار ماده منفجره استوانه‌ای در آب تولید شد، با برنامه آباکوس شبیه‌سازی شد. ماده منفجره در عمق ۲ متری قرار گرفت. خرج انفجاری ۱۷۶ گرم بود، پوسته استوانه‌ای در فاصله ۳۰۰ متری از ماده منفجره قرار گرفت و زاویه بین دو محور ۶۰ درجه بود. مدل المان محدود را می‌توان در شکل ۸ مشاهده کرد. تاریخچه‌های جابجایی-زمان سر و کف پوسته استوانه‌ای در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رفت، نقطه رأس (A) استوانه بیشترین تغییر شکل را تجربه کرد. جابجایی تمام موقعیت‌های مکانی در زمان رسیدن موج حاصل از ضربه افزایش یافت. در زمان تقریبی ۱۰۵ میلی ثانیه، یعنی در زمان نظیر ورود اولین انتشار حباب، همه موقعیت‌های مکانی مجدد جابجا شدند. جابجایی در کف استوانه در مقایسه با سر آن بسیار کمتر بود.

کل فرایند پاسخ دینامیکی استوانه در معرض موج حاصل از ضربه و انتشار حباب که با ماده منفجره استوانه‌ای ۱۷۶ کیلوگرمی در عمق ۲ متری آب تولید شد در شکل ۱۸ نمایش داده شده است. اندرکنش بین سازه و حباب طی این دو بازه نشان داده شده است. حباب در طی فازهای انبساط چندین برابر بزرگتر بود. هر چند حباب و استوانه از قبل با هم تماس داشتند، استوانه هیچ تغییر شکل قابل توجهی نداشت.

مقایسه ماده منفجره استوانه‌ای با ماده منفجره کروی

مدل‌های المان محدود همانند مدل ۱ در بخش ۴،۱ برای مقایسه با خصوصیات مواد منفجره استوانه‌ای و کروی ساخته شدند؛ مسافت از مرکز خرج انفجاری ۳ متر بود. اثرات نسبت طول به قطر (L/D) و زاویه ماده منفجره بر فشار بیشینه ناشی از ماده منفجره استوانه‌ای شرح داده می‌شود. پارامتر بی‌بعد Ψ نشانگر فشار نسبی است، یعنی نسبت فشار بیشینه ماده منفجره استوانه‌ای به فشار بیشینه ماده منفجره کروی. رابطه بین فشار نسبی و نسبت L/D در شکل ۲۰ نشان داده شده است. فشار بیشینه برای ماده منفجره استوانه‌ای زمانی ایجاد شد که نسبت L/D حدود ۱،۵ بود. شکل ۲۱ رابطه بین فشار نسبی و زاویه را نشان می‌دهد. فشار بیشینه برای ماده منفجره استوانه‌ای زمانی مشاهده شد که زاویه بین دو محور حدود صفر درجه (۱۸۰ درجه) بود. یعنی زمانی که هدف و محور ماده منفجره استوانه‌ای در یک راستا بود. فشار بیشینه زمانی ایجاد شد که زاویه حدود ۹۰ درجه بود.

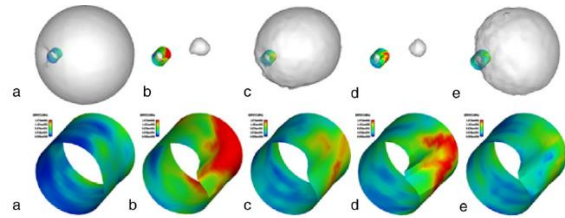
تغییر شکل پوسته استوانه‌ای تحت تأثیر مسافت و خرج انفجاری

رابطه بین جابجایی نقطه رأس استوانه و مسافت بین ۹ تا ۱۳ برابر شعاع خرج انفجاری است. جای تعجب نیست که با افزایش مسافت جابجایی کوچکتر شد. استوانه در مسافت‌های کمتر از ۱۰ برابر شعاع خرج انفجاری تغییر شکل واضحی داشت.

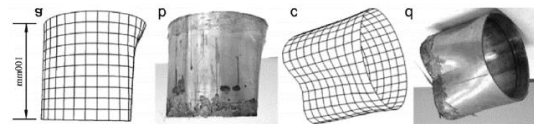
نتیجه‌گیری

خصوصیات انتشار موج حاصل از ضربه و انتشار حباب در این تحقیق بررسی شد. برای مطالعه پاسخ دینامیکی سازه‌ای عادی در معرض انفجار زیر آب، پوسته‌ای استوانه‌ای در معرض انفجار زیر آب قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییر شکل استوانه نتیجه کنش ترکیبی موج حاصل از ضربه و انتشار حباب است. برای پرهیز از آزمایش‌های فیزیکی پیچیده و پرهزینه، تکنیک عددی با نتایج آزمایش مقایسه شد.

ماده منفجره استوانه‌ای زمانی کمترین اثربخشی خرابی را داشت که زاویه اولیه بین ماده منفجره و سازه ۹۰ درجه بود، در حالیکه مسافت و خرج انفجاری ثابت بود. این مشاهده با اصل موج پل در انفجار هوایی همخوانی دارد [۲۵].



شکل ۱۸- پاسخ دینامیکی پوسته استوانه‌ای در معرض انتشار حباب
(d) $t=158ms$ (c) $t=101ms$ (b) $t=24ms$ (a) /
(e) $t=196ms$ (t=225ms)



شکل ۱۹- مقایسه استوانه‌های تغییر شکل یافته با جابجایی‌های دائمی بین محاسبات و آزمایش در ازای زاویه ۶۰ درجه. (a) نمای جلو برای FEA. (b) نمای جلو برای آزمایش. (c) نمای دور برای FEA. (d) نمای دور برای آزمایش.

جدول ۶- نتایج جابجایی‌های دائمی حاصل از محاسبات (FEA) و آزمایش (تست)

شماره	جابجایی نقطه B (کف)	FEA (میلیمتر)	آزمایش (میلیمتر)	خطا (%)	جابجایی نقطه A (سر)	FEA (میلیمتر)	آزمایش (میلیمتر)	خطا (%)
۱	۲،۹۱	۲،۷۳	۶،۶۸	۳۳،۱۴	۲۱،۲۰	۹،۱۵	۲۱،۲۰	۲۳،۲۰
۲	۱،۷	۱،۶۰	۸،۷۵	۷،۲۳	۶،۵۰	۱۱،۲۳	۶،۵۰	۱۱،۲۳
۳	۴،۹۴	۴،۳۶	۳،۳۰	۳۱،۴۴	۲۷،۲۲	۱۵،۵۰	۲۷،۲۲	۱۵،۵۰
۴	-۰،۸۲	-۰،۷۸	۵،۱۳	۱۰،۴۲	۹،۷۶	۶،۷۵	۹،۷۶	۶،۷۵
۵	۱،۷۴	۱،۶۰	۸،۷۵	۱۵،۶۱	۱۴،۷۸	۵،۶۲	۱۴،۷۸	۵،۶۲
۶	۳،۵۲	۳،۳۰	۶،۶۷	۲۴،۲۷	۲۲،۲۲	۹،۲۳	۲۲،۲۲	۹،۲۳
۷	-۰،۹۰	-۰،۸۲	۹،۷۶	۸،۷۶	۸،۲۷	۵،۹۲	۸،۲۷	۵،۹۲
۸	۱،۲۷	۱،۲۱	۳،۳۳	۹،۹۷	۹،۳۲	۶،۹۷	۹،۳۲	۶،۹۷
۹	-۰،۶۶	-۰،۵۶	۷،۸۶	۷،۰۲	۵،۸۳	۲۰،۰۷	۵،۸۳	۲۰،۰۷

با مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایش در این مطالعه، استنتاج‌های مهمی بدست آمد و پیشنهادهای ذیل ارائه می شود:

۱) لزجت توده غیرواقعی اثر محسوسی بر فشار بیشینه موج حاصل از ضربه و فشار نوسانی داشت و زمانی که ضریب مقادیر ناچیزی مانند ۰,۱ داشت، شبیه‌سازی عددی منطقی‌ترین روش بود.

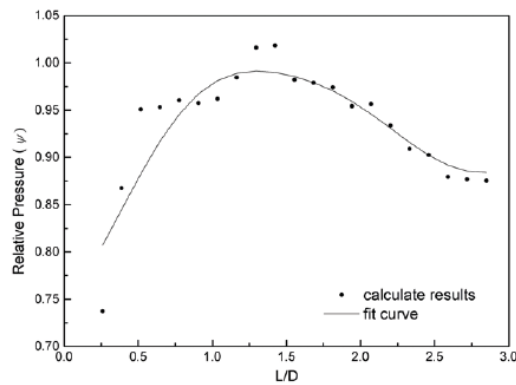
۲) طی فازهای انتشار حباب، فشار درون آب باید به مجذور نرخ انبساط یا انقباض حباب وابسته باشد. بدیهی است که این نرخ زمانی بیشترین مقدار را دارد که حباب نزدیک نقطه کمترین حجم باشد. در نتیجه، پالس‌های فشار منتشر شدند که در زمان‌های متناظر با حجم کمینه به مقدار بیشینه رسیدند.

۳) نسبت L/D ماده منفجره استوانه‌ای اثر محسوسی بر فشار بیشینه موج حاصل از ضربه داشت. برای مسافت، خرج انفجاری و زاویه ثابت، فشار بیشینه موج حاصل از ضربه زمانی مشاهده شد که نسبت L/D حدود ۱,۵ بود.

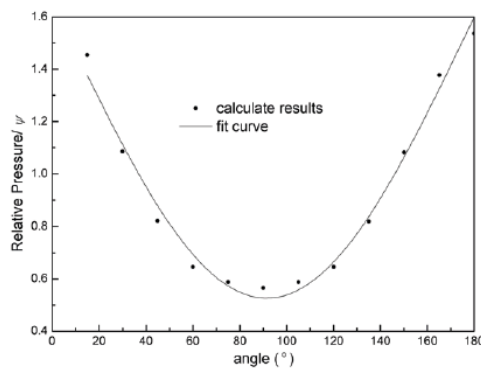
۴) برای خرج انفجاری و مسافت یکسان، فشار بیشینه موج حاصل از ضربه زمانی مشاهده شد که زاویه بین محورهای هدف و ماده منفجره استوانه‌ای صفر درجه بود، یعنی زمانی که سازه و ماده منفجره در خط مستقیم قرار داشتند.

۵) تکانه و فشار در نقاط جانبی از مقادیر نظیر در نقاط انتهایی ماده منفجره استوانه‌ای بیشتر بودند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت زمانی که این زاویه ۹۰ درجه است، در حالتی که مسافت و خرج انفجاری ثابت است، سازه کمترین تغییر شکل را دارد.

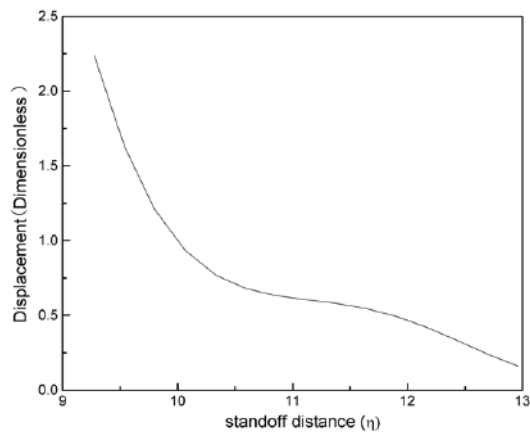
۶) برای خرج انفجاری و مسافت یکسان، زمانی که مسافت از ۱۰ برابر شعاع خرج انفجاری کمتر است، سازه آسیب جدی می‌بیند.



شکل ۲۰- رابطه بین فشار نسبی و نسبت L/D برای ماده منفجره استوانه‌ای



شکل ۲۱- رابطه بین فشار نسبی و زاویه برای ماده منفجره استوانه‌ای



شکل ۲۲- رابطه بین جابجایی و مسافت برای نقطه رأس استوانه

این تکنیک رفتار سیال و سازه را تلفیق کرد و با استفاده از روش ابداعی مسئله FSI انتقالی را، که شرایط اولیه میدان سیال را تعریف می‌کرد، حل نمود. همبستگی خوبی بین شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌ها مشاهده شد. آثار نسبت L/D و زاویه بر فشار بیشینه موج حاصل از ضربه برای ماده منفجره استوانه‌ای شبیه‌سازی شد. همانطور که برای پاسخ یک سازه عادی مشاهده شد، اثر مسافت بر جابجایی استوانه بررسی گردید.

[10] Bart S, Michel L. Influence of different parameters on the TNT equivalent of an explosion, *Cent. Eur. J. Energetic Mater.* 2011; 8 (1): 53–67.

[11] Plesset M, Chapman R. Collapse of an initially spherical vapor cavity in the neighborhood of a solid boundary, *J. Fluid Mech.* 1971; 47 (3): 283–290.

[12] Blake J, Taib B. Transient cavities near boundaries part I, rigid boundary, *J. Fluid Mech.* 1986; 17 (3): 479–497.

[13] Chan P, Kan K, Stuhmiller J. Computational study of bubble-structure interaction, *J. Fluid Eng.* 2000; (1)122: 783–790.

[14] Klaseboer E, Khoo B, Hung K. Dynamics of an oscillating bubble near a floating structure, *J. Fluid Struct.* 2005; 5 (21): 395–412.

[15] Elaseboer E, Hung K, Wang C, Khoo Boyce B.C, Debono, P, Charlier S. H., Experimental and numerical investigation of the dynamics of an underwater explosion bubble near a resilient/rigid structure, *J. Fluid Mech.* 2005 55 (537): 387–413.

[16] Ying C, Osman A, Elias I. Hydrodynamic effect on the oscillations of supported bubble: implications for accurate measurements of surface properties, *Colloids Surf.* 2004; 250: 367–384.

[17] Zhang A, Yao X, Yu X. The dynamics of three-dimensional underwater explosion bubble, *J. Sound Vib.* 2008; 17 (311): 1196–1212.

[18] Zhang A, Yao X, Li J. The interaction of an underwater explosion bubble and an elastic-plastic structure, *Appl. Ocean Res.* 2008; 14 (30): 159–171.

[19] Bjorno L, Levin P. Underwater explosion research using small amount of explosives, *Ultrasonics* 1976; 6 (12): 263–267.

[20] Cole R. *Underwater Explosions*, Princeton University Press, US, New Jersey, 1948; 58 (99): 253–254.

References

[1] Taylor G. The pressure and impulse of submarine explosion waves on plates, in: G. Bathchelor (Ed.), *The Scientific Papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor*, in: *Aerodynamics and the Mechanics of Projectiles and Explosions*, vol., Cambridge University Press, Cambridge, UK. 1963; 4 (14): 287–303.

[2] Kwon Y, Cunningham R. Comparison of USA-Dyna finite element models for a stiffened shell subjected to underwater shock, *Comput. Struct.* 1998; 66 (1): 127–144.

[3] Kwon Y. Underwater shock responses of a cylinder subjected to a side-on explosion, *Comput. Struct.* 1993; 48 (4): 646–737.

[4] Iakovlev S. Influence of a rigid coaxial core on the stress-strain of a submerged fluid-filled circular cylindrical shell subjected to a shock wave, *J. Fluid Struct.* 2004; 19 (22): 957–984.

[5] Rajesh K, Ravi P, Ramana G, Configuration design of a lightweight torpedo subjected to an underwater explosion, *Int. J. Impact Eng.* 2009; 36 (2): 343–351.

[6] Yong C, Tong Z, Hua H. Experimental investigation on the dynamic response of scaled ship model with rubber sandwich coatings subjected to underwater explosion, *Int. J. Impact Eng.* 2009; 36 (24): 318–328.

[7] Kolluru V, Weimin N, Yiannis A. Blast response simulation of an elastic structure: evaluation of the fluid-structure interaction effect, *Int. J. Impact Eng.* 2009; 36 (12): 965–974.

[8] Leblond C, Sigrist F. versatile approach to the study of the transient response of a submerged thin shell, *J. Sound Vib.* 2010; 329(68): 56–71.

[9] Kim J.H, Shin H.C. Application of the ALE technique for underwater explosion analysis of a submarine liquefied oxygen tank, *Ocean Eng.* 2008; 35(5): 812–822.

[21] Johnson G, Cook W. constitutive model and data for metals subjected

to large strain, high strain rates and high temperatures. in: Proc. 7th int. Symp on Ballistics, The Hague, The Netherlands. 1983; 2 (5): 541-547.

[22] Dobratz B, Crawford P. LLNL explosives handbook, Properties of chemical explosives and explosives stimulants, UCRL-52997, Lawrence Livermore Laboratory 1985, Livermore CA.

[23] Arons A. Energy partition in underwater explosion phenomena, Rev. Modern. Phys. 1948; (20): 519-536.

[24] Frost P, Harper E. Acoustic radiation from surface oscillating at large amplitude and small mach number, J. Acoust. Soc. Am. 1975; 14 (58) 318-325.

[25] Ismail M, Murray S. Study of the blast waves from the explosion of nonspherical charges, Propellants Explos. Pyrotech. 18 1993; 3 (18): 132-138.

[26] Gan N, Liu L, Yao X, Wang J. "Experimental and numerical investigation on the dynamic response of a simplified open floating slender structure subjected to underwater explosion bubble," Ocean Engineering. 2021; 5 (219): 108-308.