

مقایسه روش عددی بدون شبکه SPH با دیدگاه‌های اولری و لاگرانژی

در مدل‌سازی انفجار در آب

بهنام کریمی فرزقی^۱، رضا نادری^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری ۲- استادیار دانشگاه صنعتی شاهرود

(دریافت: ۹۳/۰۹/۰۵، پذیرش: ۹۴/۰۲/۲۹)

چکیده

با توجه به ماهیت بارهای انفجاری و زمان کوتاه تأثیر این نوع بارهای ضربه‌ای، تفاوت‌های عمده‌ای بین رفتار این نوع بارها با سایر بارهای متداول وجود دارد. بررسی اثرات انفجار زیر آب برای برآورد خرابی‌های ناشی از فعالیت‌های خرابه‌کارانه و تروریستی در سازه‌های دریایی و هیدرولیکی نظیر اسکله‌ها، سدها، خطوط انتقال کف دریا و ... مهم است. هزینه‌های بالای مدل‌سازی آزمایشگاهی انفجار و همچنین خطرهای ناشی از بارهای انفجاری، با توجه به تغییر شکل‌های شدید و ناگهانی ناشی از بارهای انفجاری در زمان کوتاه، استفاده از روش‌های عددی را توجیه می‌کند. در این مقاله سعی شده است نتایج تجربی با مدل‌سازی عددی با دو روش دارای شبکه‌بندی (از دو دیدگاه اولری و لاگرانژی) و بدون شبکه ذرات هموارساز (SPH) مورد مقایسه قرار گیرد. برای مدل‌سازی از نرم‌افزار عددی Ls-Dyna، استفاده شده و مقدار حداکثر فشار تولیدی با فاصله از مرکز انفجار، منحنی‌های تاریخچه زمانی فشار در نقاط مختلف و تغییرات سطح آب در روش‌های عددی مقایسه شده است. با بررسی نتایج مشخص می‌شود که نتایج حاصل از روش بدون شبکه و دیدگاه لاگرانژی در تعیین فشار ناشی از انفجار مقادیری بیش از دیدگاه اولری ارائه می‌نمایند. همچنین با استفاده از روش بدون شبکه، می‌توان فشار انفجار را تا فاصله کمتری از مرکز انفجار نسبت به روش‌های دارای شبکه‌بندی تعیین کرد.

کلید واژه‌ها: انفجار، مدل‌سازی عددی، روش بدون شبکه SPH، دیدگاه لاگرانژی و اولری، Ls-Dyna

Comparison of SPH Numerical Meshless Method with Eulerian and Lagrangian Approach in the Water Explosion Modeling

B. Karimi Ferezghi, R. Naderi

Shahrood University of Technology

(Received: 26/11/2014; Accepted: 19/05/2015)

Abstract

There are major differences between the behavior of explosive and another loads due to the nature of the explosive charges and the small duration of shock loads. Study on underwater explosion effects is important for evaluation of damages caused by the terrorist activities such as hydraulic structures and marine docks, dams, transmission lines in the seabed and etc. The high cost of laboratory modeling and explosion risks due to blast loads and sudden and severe deformations caused by an explosive charges in a short time, justify the use of numerical methods. In this paper the experimental results were compared with grid base numerical modeling (Eulerian and Lagrangian nature) and a meshless method (smooth particles hydrodynamics, called SPH). The numerical simulations are carried out based on the Ls-Dyna software and the maximum distance from the center of the explosion pressure, pressure time history curves at different points, and changes in water level are compared in different numerical methods. The results show that, Lagrangian approach and meshless method presents higher explosion pressure than Eulerian approach. Also, using the meshless methods, the explosion pressure can be determined in closer distance to a charge center, compared to another grid base methods.

Keywords: Explosion, Numerical Modeling, Meshless Method SPH, Eulerian and Lagrangian Approach, Ls-Dyna

*Corresponding Author E-mail: rz_naderi@yahoo.com

۱. مقدمه

سازه‌ای کشتی مانند [۴]، بررسی انفجار زیر آب و تأثیر آن بر ارتعاش یک میله [۵] و بررسی انفجار زیر آب با استفاده از نرم‌افزار Autodyne [۶]، نمونه‌هایی از این مطالعات می‌باشند.

در این مقاله سعی شده است انفجار زیر آب در یک مدل دلخواه با استفاده از روش عددی بدون شبکه ذرات هموارساز (SPH) و روش دارای شبکه‌بندی و دو دیدگاه لاگرانژی و اولری مدل‌سازی شده و تغییر شکل محیط اطراف در زمان‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرد. در نهایت نیز نتایج به‌دست‌آمده از این تحلیل‌ها با نتایج حاصل از روابط تجربی مورد مقایسه قرار گرفت تا علاوه بر صحت‌سنجی، دقت این دو دیدگاه در مدل‌سازی انفجار زیر آب نیز بررسی شود. 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 لاگرانژی و اولری و همچنین روش بدون شبکه ذرات هموارساز، SPH است.

۱-۱. ماهیت انفجار 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 [۷]. به‌طور کلی در صورت وجود گرادیان شدید بین دو کمیت، یک شوک یا پرش ناگهانی رخ می‌دهد. برای مثال در گذر از یک ناحیه بسیار پر فشار مثل توده گاز منفجره TNT به یک ناحیه بسیار کم فشار مانند هوای آزاد یا آب پیرامون ماده منفجره در مسائل انفجار زیر آب، یک شوک فشاری قوی شکل می‌گیرد [۶].

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 میکرو ثانیه، اولین امواج شوک تولید می‌شود. 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 کاهش یافته، رو به بیرون منبسط شده و باعث ایجاد ضربه می‌شوند. فشار بالای اولیه در حباب گاز با گذشت زمان به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، اما باز هم بسیار بالاتر از فشار هیدروستاتیکی 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 به‌دلیل 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 بیرون حباب می‌شود و حباب با سرعت شروع به انقباض (حرکت رو به درون) می‌کند. حرکت رو به داخل تا موقعی ادامه می‌یابد که قابلیت

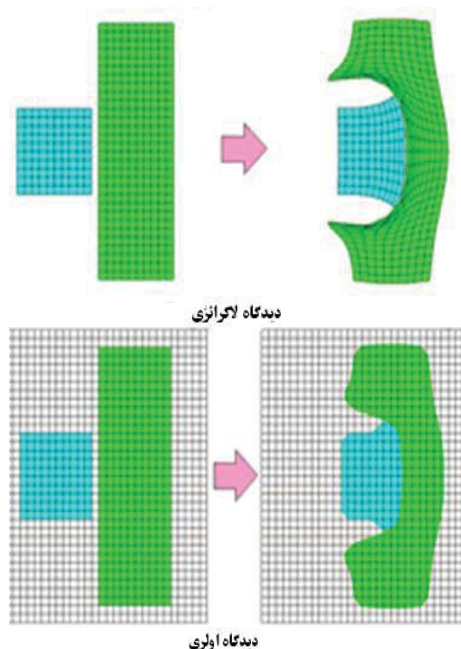
انفجار ناشی از خطوط انتقال کف دریاها و اثرات آن‌ها بر روی سایر سازه‌های دریایی و همچنین اثرات ناشی از انفجارهای خود آگاهانه بر روی این سازه‌ها، نمونه‌هایی از اهمیت بالای شناخت و تحلیل انفجار در زیر آب است. انفجار زیر آب یکی از مهم‌ترین موضوعاتی است که از سال‌ها پیش به‌ویژه پس از پایان جنگ جهانی اول و در خلال جنگ جهانی دوم که سلاح‌های جنگی مورد استفاده پیشرفت به‌سزایی داشته، مورد توجه محققان بوده است. در سال‌های اولیه و با توجه به وقوع جنگ و دسترسی آسان به مواد منفجره، بررسی‌های تجربی و مشاهده‌ای توجیه‌پذیر بوده و در نتیجه روابط تجربی بسیاری در رابطه با انواع انفجارها ارائه شد. بدیهی است که روابط تجربی از دقت بالایی برخوردار نبوده و با توجه به مشکلات مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و خطرات ناشی از انفجار، پس از جنگ جهانی دوم، محققین به بررسی رفتار انفجار در زیر آب 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 می‌باشد.

برای حل معادلات انفجار زیر آب می‌توان از روش‌های عددی دارای شبکه‌بندی و یا بدون شبکه استفاده کرد. روش‌های دارای شبکه‌بندی خود از دو دیدگاه اولری و لاگرانژی قابل بررسی می‌باشند. در دیدگاه لاگرانژی، شبکه‌بندی بر روی هندسه مسئله ثابت بوده و با تغییر شکل محیط مسئله، شبکه‌بندی نیز تغییر می‌کند. دیدگاه لاگرانژی، در مدل‌سازی شرایط مرزی بسیار مناسب عمل کرده و با توجه به ثابت بودن مش‌ها بر روی هندسه مسئله، نیازی به استفاده از مش‌های اضافه نبوده و از این نظر بسیار اقتصادی است.

ولی در صورتی که تغییر شکل‌های ایجاد شده در مسئله بزرگ باشد، باید مش‌بندی مجددی بر روی مسئله ایجاد شود که این عمل علاوه بر زمان‌بر بودن معایب دیگری مانند از بین رفتن تاریخچه تنش و ... را دارد و نمی‌تواند مدل دقیقی ارائه نماید.

چارلز [۱] و هانس [۲] به بررسی و مدل‌سازی تغییر شکل‌های شدید با توجه به دیدگاه لاگرانژی پرداخته و آن را مورد بررسی قرار داده‌اند. در دیدگاه اولری، شبکه‌بندی بر روی فضا ثابت بوده و تغییر شکل محیط مسئله، تأثیری بر شبکه‌بندی ندارد. در دیدگاه اولری شبکه‌بندی در اثر تغییر شکل‌های شدید، دچار ناپایداری و پیچیدگی نمی‌شود ولی در مرزهای اندرکنش بین دو ماده مناسب عمل نمی‌کند. همچنین دیدگاه اولری در نشان دادن تغییر شکل‌ها و تاریخچه تنش ضعیف و ناتوان عمل می‌نماید. روش دیگر مدل‌سازی انفجار، استفاده از روش بدون شبکه SPH است. در سال‌های اخیر افراد مختلفی به مدل‌سازی انفجار در آب پرداخته‌اند. مدل‌سازی انفجار در زیر آب با استفاده از روش SPH [۳]، مدل‌سازی انفجار زیر آب با روش اجزای محدود و تأثیر آن بر

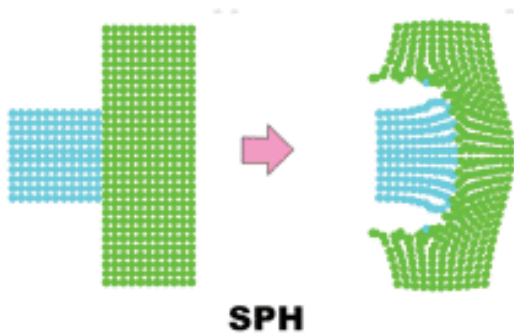
قبیل عدم تعیین تاریخچه تنش برای هر نقطه، عدم توانایی در مدل سازی هندسه های پیچیده و مدل نمودن مرزهای انعطاف پذیر و نواحی اندرکنش است. شکل (۱)، نمونه ای از شبکه بندی از دیدگاه اولری و لاگرانژی را نشان می دهد [۹].



شکل ۱. نحوه شبکه بندی در دو دیدگاه لاگرانژی و اولری [۹]

۳-۱. معرفی روش بدون شبکه ذرات هموار ساز (SPH)

روش ذرات هموار متحرک SPH یک روش کاملاً لاگرانژی است که در آن احتیاج به هیچ نوع شبکه بندی نیست (شکل (۲)). این روش برای اولین بار در سال ۱۹۷۷ [۳]، 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 مدل سازی تغییر شکل های شدید استفاده شد [۱۰]. این روش با پوشش دادن ضعف های روش های عددی اجزا محدود و تفاضل محدود، به ویژه در مدل سازی سیالات و تغییر شکل های شدید، کاربرد بسیاری یافته اند. در این روش ها به جای شبکه بندی های مرسوم برای برقراری ماتریس همساز، تنها از یک سری ذرات استفاده می شود.



شکل ۲. روش بدون شبکه ذرات هموار ساز (SPH)

تراکم پذیری گاز که در مرحله انبساط حباب کم اهمیت و ناچیز است، به صورت یک مانع قوی عمل کرده تا حرکت به طور ناگهانی برعکس شود. بنابراین اینرسی آب و خواص گاز و آب، شرایط لازم را برای یک سامانه نوسانی فراهم می کند و حباب در حقیقت سیکل های تکراری انبساط و انقباض را به خود می بیند. با در نظر گرفتن یک حجم کنترل مناسب از سیال مورد نظر، می توان 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 سامانه همراه است و در نتیجه سامانه این اتلاف را با تغییرات جرم در واحد حجم (چگالی) جبران می کند. در نتیجه، لاجرم تغییرات چگالی با زمان در مسئله انفجار حضور خواهد داشت.

در گذشته روابط تجربی متعددی برای تعیین حداکثر فشار ناشی از انفجار ارائه شده است. حداکثر فشار تولیدی چند صدم ثانیه پس از انفجار رخ داده و سپس مقدار فشار به صورت نمائی کاهش می یابد. رابطه تجربی زیر حداکثر فشار تولیدی برای یک ماده منفجره متقارن ارائه می دهد.

$$P_m = 52/16 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^{1.13} \quad (1)$$

در رابطه فوق، W وزن ماده منفجره بر حسب Kg و R فاصله بر اساس m و P حداکثر فشار بر اساس MPa است [۸].

۲-۱. مقایسه رویکرد اولری و لاگرانژی

همان طور که اشاره شد، علاوه بر روش های تجربی و آزمایشگاهی، یکی از پرکاربردترین و کم هزینه ترین روش های مدل سازی انفجار، استفاده از روش های عددی می باشد. در این بین می توان از روش هایی مانند المان محدود، المان مرزی، تفاضل محدود و بدون شبکه و ... بهره برد. در این مقاله به بررسی انفجار با روش المان محدود پرداخته می شود. به طور کلی روش های المان محدود را می توان از دو دیدگاه لاگرانژی و اولری مورد بررسی قرار داد. در دیدگاه لاگرانژی شبکه بندی بر روی هندسه مسئله ثابت بوده و با تغییر شکل مسئله، شبکه ها نیز دچار پیچیدگی و تغییر شکل شده و جرم، مومنتوم و انرژی داخل شبکه ها ثابت می ماند [۹]. روش های لاگرانژی در مدل سازی اندرکنش ها، تغییر شکل های مرزی، هندسه های پیچیده و تعیین تاریخچه تنش بسیار مناسب عمل می نمایند ولی با توجه به خاصیت ثابت بودن شبکه بر روی جسم، در تغییر شکل های شدید ممکن است دچار مشکل شده و نتایج دور از انتظاری ارائه نمایند.

یکی دیگر از دیدگاه های موجود در مدل سازی المان محدود روش اولری است. در دیدگاه اولری، شبکه بر روی فضا ثابت می باشد و در نتیجه مستقل از تغییر شکل های مسئله مورد بررسی عمل می کند. برتری این دیدگاه نسبت به دیدگاه لاگرانژی، ثابت بودن شبکه بندی است. بدین معنی که در اثر تغییر شکل های شدید و ناگهانی، شبکه بندی تغییر نمی کند. البته این دیدگاه نیز دارای ضعف هایی از

حل مسائل گوناگون در حوزه‌های مختلف فیزیکی از جمله مکانیک جامدات، انتقال حرارت، دینامیک سیال می‌باشد. نرم‌افزار LS-Dyna به صورت یکپارچه نبوده و قسمت‌های آن به صورت مجزا می‌باشند. به این صورت که عملیات پیش پردازنده شامل ساخت مدل و در نرم‌افزاری مجزا که معمولاً امکان نمایش نتایج آن را نیز دارد، انجام می‌پذیرد و سپس کد خروجی حاصل به قسمت حل مسئله داده شده و محاسبات را انجام می‌دهد. لازم به ذکر است که ورودی قسمت حل مسئله فایلی با پسوند K یا KEY است که از یک فایل متنی شامل دستورات یا همان KEYWORDها تشکیل شده است. خط به خط این فایل شامل اطلاعاتی از قبیل شرایط کنترل حل مسئله و دریافت خروجی، نوع بارگذاری‌ها و قیدها، مختصات المان‌ها و گره‌ها، نوع الگوریتم‌های برخورد و ... می‌باشد. می‌توان گفت این تفکیک بخش‌های مختلف حل یک مسئله در نرم‌افزارهای مختلف به نوعی مزیت برای این نرم‌افزار تبدیل شده است.

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 [۱۱].

۲-۲. صحت‌سنجی

با توجه به عدم دسترسی به داده‌های آزمایشگاهی برای صحت‌سنجی مدل‌سازی انجام شده، اطمینان از مدل‌سازی صورت گرفته، تنها با مقایسه با روابط تجربی امکان‌پذیر است. بدین منظور از مدل مورد استفاده در مقاله ژانگ و همکاران، استفاده شده است [۶]. در این مدل ماده منفجره مربع شکل به وزن ۶/۳ کیلوگرم در مرکز محیطی از آب به طول ۳ متر قرار گرفته و فشارهای ناشی از انفجار در فاصله ۰/۹۴ متر از ماده منفجره مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۴) نتایج مقایسه مدل‌سازی عددی با روش SPH و مقادیر محاسباتی ژانگ را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، مقادیر به‌دست آمده با روش SPH، سازگاری بسیار مناسبی با نمودار ژانگ داشته و مقدار اختلاف کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. این مقدار تفاوت نیز با توجه به خطاهای عددی و اتلاف انرژی قابل توجیه می‌نماید.

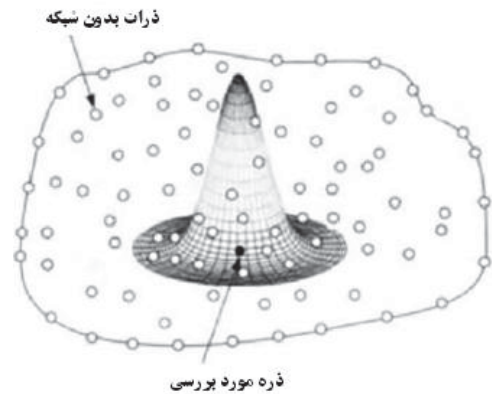
۲-۳. معرفی مدل

ابعاد مدل در نظر گرفته شده ۱۰۰×۱۰۰ متر می‌باشد که ماده منفجره در مرکز مدل به ابعاد ۴×۴ متر قرار داده شده است. در شکل (۵) شماتیکی از مدل مورد بررسی و مدل SPH تهیه شده، ارائه شده است. در مدل مدنظر محیط سیال از سه طرف راست، چپ و کف محدود شده است (مرز صلب) و از سمت بالا می‌تواند

به‌طور کلی و خلاصه روش SPH بر پایه خصوصیات تابع دلتای دیراک بنا شده است. همان‌طور که در رابطه (۱)، نشان داده شده است، برای تقریب خصوصیات هر ذره (تابع تقریب f)، تابع وزن تعریف می‌شود (W).

$$\langle f(x) \rangle = \sum_{j=1}^n \frac{m_j}{\rho_j} \cdot f_j \cdot W_{ij} \quad (2)$$

از جمله خصوصیات تابع وزن (هموارساز) مورد استفاده عبارتند از: یکتایی تابع مورد نظر، فشردگی تابع به معنای صفر بودن مقادیر در خارج از طول هموارسازی، مثبت بودن تابع، نزولی بودن تابع با افزایش فاصله، زوج بودن تابع و تبعیت از خواص تابع دیراک. تابع گوسی نمونه‌ای از تابع هموارساز است. همچنین هر ذره دارای یک دامنه تأثیر می‌باشد که با توجه به ذرات همسایه، خصوصیات ذره مورد نظر تخمین زده می‌شود (شکل (۳)). طول هموارسازی می‌تواند برای نقاط به‌صورت ثابت و یا متغیر در نظر گرفته شود. در مسائل مربوط به انفجار، طول هموارسازی متغیر پیشنهاد می‌شود. خصوصیات مصالح مورد بررسی نیز توسط معادلات حالت تعریف می‌شوند. معادلات حالت بر پایه معادلات بقای جرم، انرژی و مومنتوم تعیین شده و خصوصیات مورد نظر را ارائه می‌دهند. سپس از ترکیب معادلات حالت و تابع تقریب، معادلات حرکت به‌دست‌آمده که با حل این معادلات، می‌توان خصوصیات مختلف مانند سرعت، فشار و ... را تعیین کرد.



شکل ۳. ذرات در روش بدون شبکه و نحوه تأثیرگذاری آن بر سایر ذرات در حالت سه‌بعدی [۳]

در این مقاله به بررسی انفجار با روش‌های بدون شبکه ذرات هموارساز SPH و روش‌های با شبکه‌بندی (دیدگاه لاگرانژی و اولری) و مقایسه آن‌ها پرداخته می‌شود.

۲. روش تحقیق

۲-۱. معرفی نرم‌افزار LS-DYNA

یکی از نرم‌افزارهای بسیار قدرتمندی که در حال حاضر برای شبیه‌سازی پدیده‌های دینامیکی پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد، LS-Dyna است. این نرم‌افزار در سال ۱۹۷۶ و در مؤسسه لیور مور لورنس کالیفرنیا ارائه شد و علاوه بر تحلیل‌های دینامیکی قادر به

و مصالح مدل، تعداد اجزا و مقاطع، شرایط اولیه، معادلات حالت، شرایط تکیه‌گاهی و ... مورد بررسی قرار می‌گیرد که در ادامه پارامترهای به‌کار رفته در مدل‌سازی ارائه می‌شود. برای مدل‌سازی آب، از مدل null استفاده شده و چگالی آب در این قسمت برابر با ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب فرض شده است. همچنین برای مدل‌سازی ماده منفجره از مدل high explosive burn استفاده شده و خصوصیات ماده منفجره TNT مانند جدول (۱) وارد شده است. به‌عنوان شرایط اولیه مسئله سرعت اولیه و یا نقاط آغازین انفجار^۱ را تعیین نمود. در این مقاله مختصات نقاط اطراف TNT به‌عنوان شرایط اولیه آغاز انفجار داده شده است.

جدول ۱. خصوصیات ماده منفجره TNT

چگالی (Kg/m ³)	سرعت اولیه انفجار (m/s)	PCJ
۱۶۳۰	۶۹۳۰	۲/۱*۱۰ ^{۱۰}

همچنین برای دو جزء تعریف‌شده 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 JWL برای تعیین فشار در مواد منفجره مورد استفاده قرار گرفته و از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

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

در رابطه فوق، $\eta = \frac{\rho}{\rho_0}$ (نسبت چگالی گاز ماده منفجره به چگالی گاز اولیه) A، B، R₁، R₂ و ω ثابت‌های مواد منفجره گوناگون می‌باشند. مقادیر استفاده‌شده برای ماده منفجره TNT در مدل‌سازی در جدول (۲) ارائه شده است.

برای معادله حالت آب نیز از رابطه Grunssien استفاده می‌شود که این معادله حالت عبارتست از:

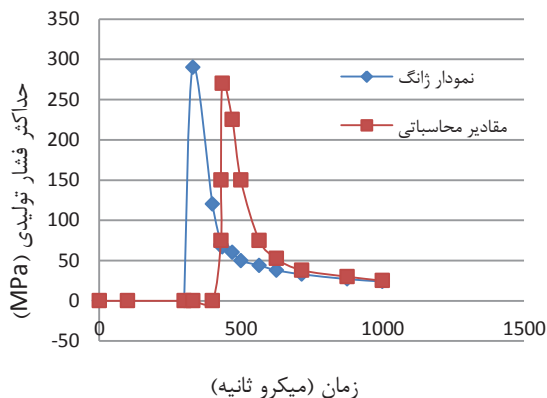
$$p = \frac{\rho_0 C_0^2 \mu [1 + (1 - \gamma_0/2)\mu - (a/2)\mu^2]}{[1 - (s_1 - 1)\mu - s_2(\mu^2/(\mu + 1)) - s_3(\mu^3/(\mu + 1)^2)]^2} + (\gamma_0 + a\mu)e \quad (2)$$

در رابطه فوق، μ نسبت تراکم بوده و برابر $\eta - 1$ است. معرف سرعت صوت و ضریب گرانش می‌باشد. سایر موارد نیز ثابت‌های تجربی می‌باشند. مقادیر استفاده‌شده در مدل‌سازی آب در جدول (۳) ارائه شده‌اند.

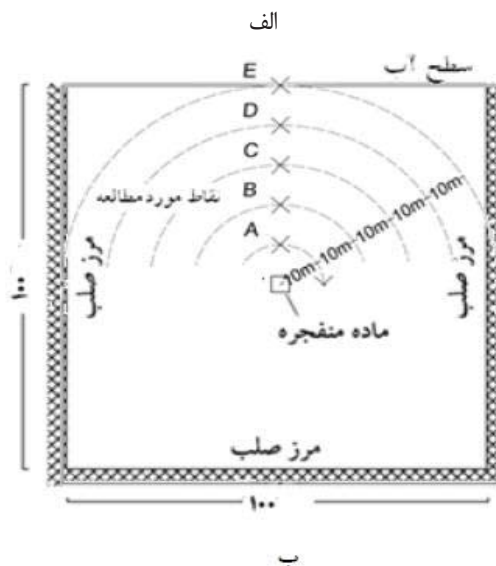
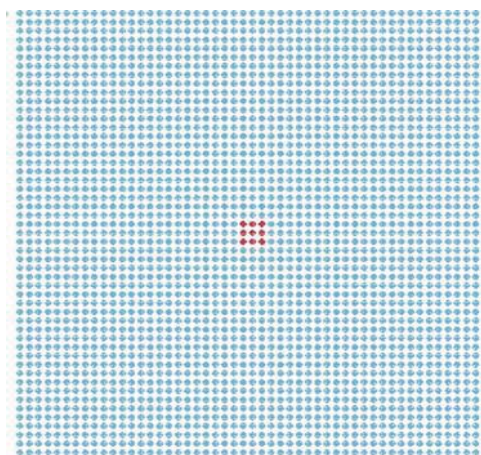
۳. نتایج و بحث

پس از انجام مدل‌سازی و تحلیل، می‌توان تغییر شکل‌های نقاط مختلف، نمودار تغییرمکان - زمان، نمودار فشار و ... را تعیین کرد. شکل (۶) نمونه‌ای از مدل‌سازی انفجار و تغییرات فشار را ۰/۰۴ و ۰/۰۸ ثانیه پس از انفجار را ارائه می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، در زمان ۰/۰۴ ثانیه، موج ناشی از انفجار هنوز به

آزادانه جابه‌جا شود (سطح آزاد آب). فاصله گره‌ها در روش SPH به‌صورت ۲×۲m در نظر گرفته شده است. نقاط A تا E به‌عنوان نقاط مرجع و به فاصله‌های ۱۰ متر از یکدیگر قرار داده شده و بررسی‌های فشار - زمان بر روی آن‌ها انجام می‌گیرد.



شکل ۴. مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی با روش بدون شبکه و نتایج ژانگ



شکل ۵. الف- هندسه مدل مورد مطالعه ب- نحوه قرارگیری ذرات در روش SPH

مدل‌سازی در نرم‌افزار شامل سه مرحله پیش پردازش، حل مسئله و پس پردازش می‌باشد. در مرحله پیش پردازش مواردی چون مواد

¹ Detonation

تغییرات سطح آب در دیدگاه لاگرانژی و روش بدون شبکه SPH قابل مشاهده است ولی در دیدگاه اولری قادر به بررسی تغییرات سطح آب نمی‌باشیم. ثابت بودن شبکه‌بندی در دیدگاه اولری توجیه کننده این مطلب می‌باشد.

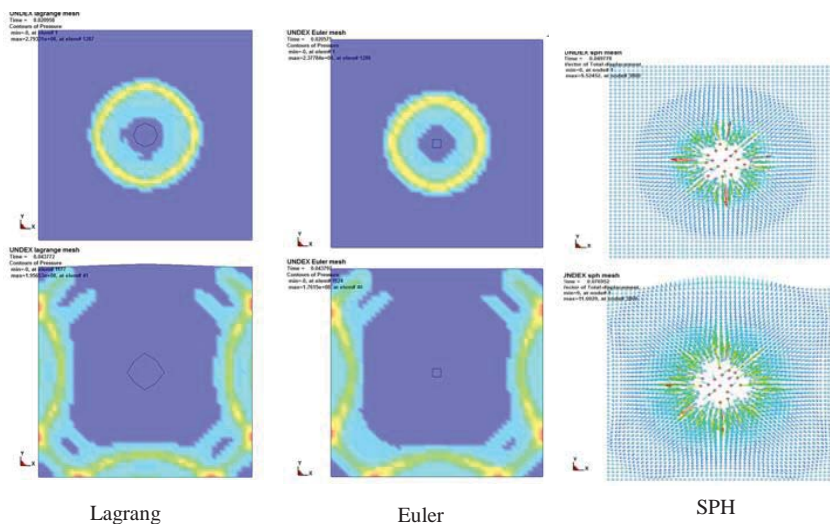
سطح آب و مرزهای اطراف برخورد نکرده و حباب انفجار در حال انبساط می‌باشد. سرعت انتشار موج انفجار و انبساط حباب در روش بدون شبکه، بیشتر از سایر روش‌ها مشاهده می‌شود. با گذشت زمان ۰/۰۸ ثانیه پس از انفجار، موج ناشی از انفجار به سطح آزاد آب رسیده و باعث ایجاد تغییراتی در سطح آب می‌شود. مطابق شکل،

جدول ۲. پارامترهای معادله حالت برای ماده منفجره (JWL)

ρ_0 (kg/m ³)	A(pa)	B(pa)	R_1	R_2	ω	e_0 (j/kg)
۱۶۳۰	$۳/۷۱۲ \times ۱۰^{۱۲}$	$۳/۲۱ \times ۱۰^۹$	۴/۱۵	۰/۹۵	۰/۳	$۴/۲۹ \times ۱۰^۶$

جدول ۳. پارامترهای مورد استفاده در معادله حالت آب (مای - گرانشین)

ρ_0 (kg/m ³)	C_0	γ_0	a	S_1	S_2	S_3	e_0 (j/kg)
۱۰۰۰	۱۴۸۰	۰/۵	۰	۲/۵۶	۱/۹۹	۱/۲۲۶	۳۵۷/۱



شکل ۶. کانتور فشار ۰/۰۴ ثانیه پس از انفجار - بردار تغییر مکان و تغییر سطح آب ۰/۰۸ ثانیه پس از انفجار

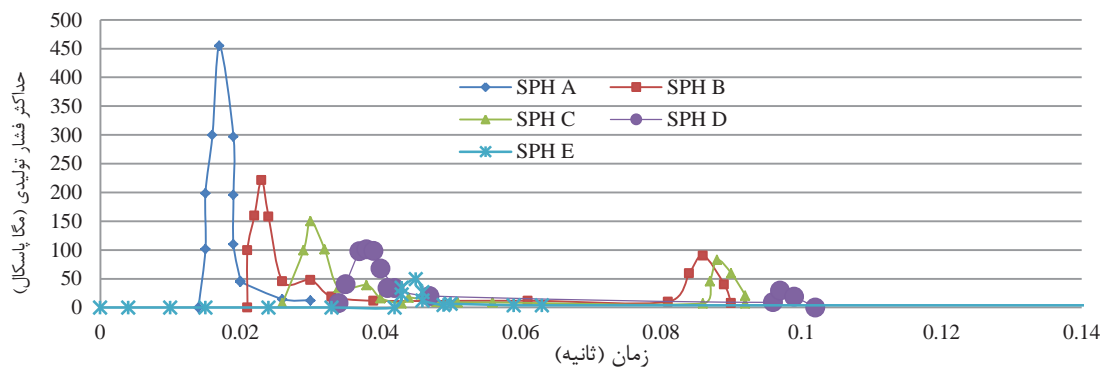
روش‌ها کمتر است. این موضوع را می‌توان با توجه به انبساط بیشتر حباب انفجار ایجاد شده در مقایسه با سایر روش‌ها و در زمان ۰/۰۴ ثانیه توجیه کرد. همچنین با بررسی نمودارهای فشار- زمان، مشاهده می‌شود که زمان رسیدن به نقطه حداکثر برای نقطه A در روش SPH، حدود ۰/۰۱۸ ثانیه و برای سایر روش‌ها حدود ۰/۰۱۹ ثانیه است. مقادیر حداکثر فشار تولید شده در نقاط A تا E در شکل (۱۰) ارائه شده و با نتایج حاصل از روش تقریبی کول [۸]، مقایسه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، دیدگاه اولری مقادیری کمتر از روابط تجربی و دیدگاه لاگرانژی و روش بدون شبکه SPH نتایج بسیار نزدیکی را ارائه می‌نمایند. با افزایش فاصله از مرکز انفجار نتایج تمامی روش‌ها تقریباً همگرا می‌شوند. نکته مهم اینکه روش بدون شبکه SPH قادر به ارائه فشار در فاصله کمتری از مرکز انفجار است. برای مثال با استفاده از روش SPH می‌توان فشار را تا فاصله ۸ متری انفجار تعیین کرد، در حالی که در سایر روش‌ها قادر به اندازه‌گیری نمی‌باشیم.

اختلاف مقادیر به دست آمده از روش‌های مختلف در فواصل

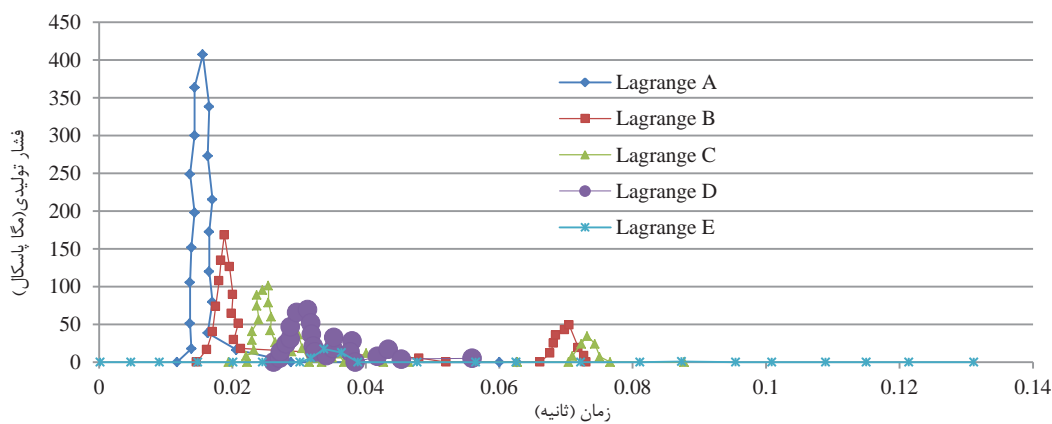
برای مطالعه دقیق‌تر، منحنی‌های فشار- زمان برای برخی نقاط مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور ۵ نقطه به فواصل ۱۰ متر از یکدیگر تعیین شده (نقاط A تا E) و تاریخچه فشار ناشی از انفجار در این نقاط بررسی می‌شود (شکل‌های (۹-۷)). مطابق نتایج به دست آمده، با افزایش فاصله از مرکز انفجار، موج ناشی از انفجار دیرتر به نقطه مربوط رسیده و زمان رسیدن به نقطه پیک فشار افزایش می‌یابد. همچنین مقدار فشار پیک تولید شده نیز با افزایش فاصله کاهش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، منحنی فشار، پس از رسیدن به نقطه پیک، به سرعت کاهش یافته و با گذشت زمان دوباره کمی فشار افزایش می‌یابد که در حقیقت بیانگر امواج ثانویه ایجاد شده است. با مقایسه شکل‌های (۹-۷) که نتایج حاصل از مدل‌سازی با روش دارای شبکه‌بندی (دیدگاه‌های لاگرانژی و اولری) و روش بدون شبکه SPH می‌باشد، می‌توان دریافت که روش بدون شبکه SPH بیشترین مقادیر فشار انفجار و دیدگاه اولری کم‌ترین مقادیر را نشان می‌دهد. زمان رسیدن به حداکثر فشار، در روش SPH، نسبت به سایر

بررسی فاصله کمتر از ۱۰ متر به مرکز انفجار را به علت اعوجاج شدید شبکه‌ها در نزدیک انفجار دارا نمی‌باشد. هرچه فاصله از مرکز انفجار افزایش می‌یابد، ضربه ناگهانی از انفجار کاهش یافته و در نتیجه شبکه‌بندی‌ها کمتر دچار اعوجاج شده و خطاهای عددی کاهش می‌یابند، به همین دلیل با افزایش فاصله، نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف بسیار همگرا می‌شوند.

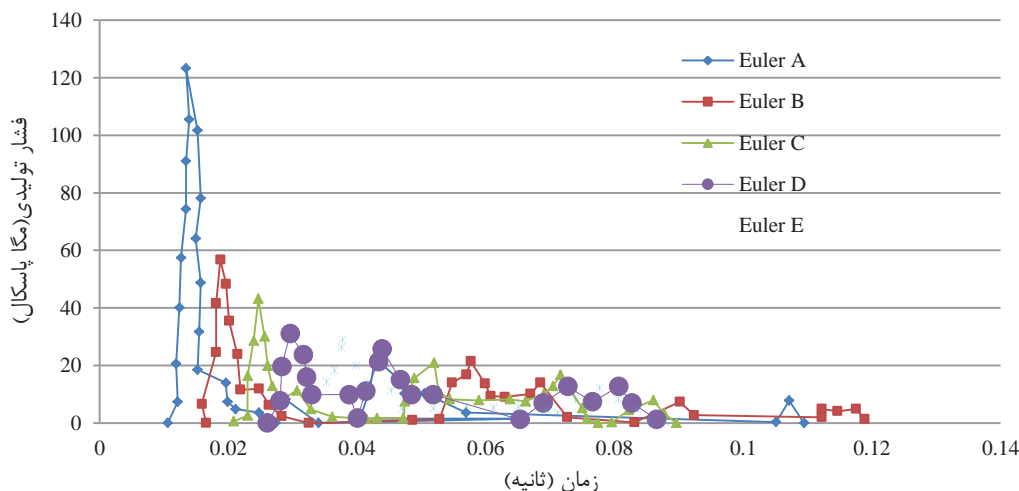
نزدیک به ماده منفجره، بیانگر ماهیت روش‌های عددی مورد استفاده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در روش اولری که شبکه‌بندی ثابت بوده و در اثر انفجار تغییر شکل نمی‌دهد، مقادیر به مراتب پایین‌تری را در فواصل نزدیک نشان می‌دهد (۱۲۰ مگا پاسکال در فاصله ۱۰ متری از مرکز انفجار). روش لاگرانژی نتایجی به‌مراتب نزدیک‌تر به روش تجربی به‌دست می‌دهد ولی توانایی



شکل ۷. منحنی فشار-زمان برای نقاط A (۱۰ متری انفجار) تا E (۵۰ متری انفجار) در روش SPH



شکل ۸. منحنی فشار- زمان برای نقاط A (۱۰ متری انفجار) تا E (۵۰ متری انفجار) در دیدگاه لاگرانژی



شکل ۹. منحنی فشار- زمان برای نقاط A (۱۰ متری انفجار) تا E (۵۰ متری انفجار) در دیدگاه اولری

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به مدل‌سازی صورت‌گرفته و مقایسه‌های انجام‌شده بین روش‌های دارای شبکه‌بندی از دو دیدگاه لاگرانژی و اولری با روش بدون شبکه SPH و روابط تجربی نتایج به شرح زیر به‌دست آمده است:

- روش‌های SPH و دیدگاه لاگرانژی، نتایج تقریباً یکسان و نزدیکی از مقادیر حداکثر فشار ناشی از انفجار ارائه می‌نمایند، حال آن‌که روش اولری نتایج را بسیار محتاطانه ارائه می‌دهد.

- با توجه به این‌که روش‌های بدون شبکه، عملکرد مناسبی در مقابل ضربات شدید و فشارهای بالا دارند، نتایج را در فواصل نزدیک‌تر می‌توانند ارائه نمایند، حال آن‌که در دیدگاه لاگرانژی، با توجه به اعوجاج شبکه‌ها، مقادیر فشار در فواصل نزدیک به مرکز انفجار، قابل بررسی نمی‌باشد. بنابراین در فواصل نزدیک به محل انفجار، که روش لاگرانژی و بیشتر روش‌های تجربی قادر به تعیین فشار انفجار نمی‌باشند، استفاده از روش بدون شبکه SPH توصیه می‌شود.

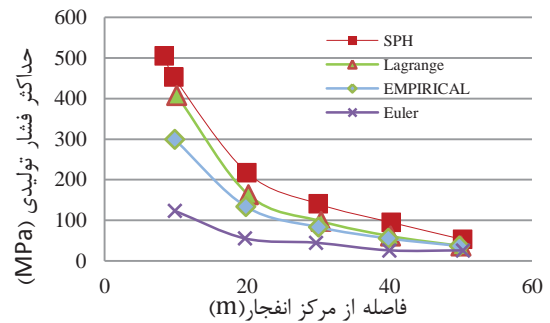
- در دیدگاه اولری، با توجه به ثابت بودن شبکه‌بندی بر روی مسئله، قادر به بررسی تغییرات سطح آب و سایر تغییر مکان‌ها نمی‌باشیم، در حالی که در روش دیگر تغییرات سطح آب قابل اندازه‌گیری است.

- نرم‌افزار LS-DYNA قابلیت مدل‌سازی انفجار با استفاده از دیدگاه‌های لاگرانژی و اولری را دارا بوده و با توجه به مدل‌سازی انجام‌شده در این مقاله، عملکرد بسیار مناسبی را دارا است و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج حاصل از روش‌های تجربی نزدیکی دارد.

- بررسی مقادیر حداکثر فشار تولیدشده با افزایش فاصله از مرکز انفجار، کاهش می‌یابد. در فواصل نزدیک به مرکز انفجار، روش SPH بیشترین مقادیر فشار و روش اولری کمترین مقادیر را ارائه می‌کند، ولی با افزایش فاصله مقادیر ارائه شده بسیار همگرا شده و تقریباً نتایج یکسانی به‌دست می‌آید. در فاصله نزدیک به نقطه انفجار دیدگاه لاگرانژی بیشترین نزدیکی را به نتایج روش‌های تجربی نشان می‌دهد. به عبارت دیگر دیدگاه لاگرانژی بهترین مقادیر فشار را در فواصلی که قادر به محاسبه نتایج است، ارائه می‌کند.

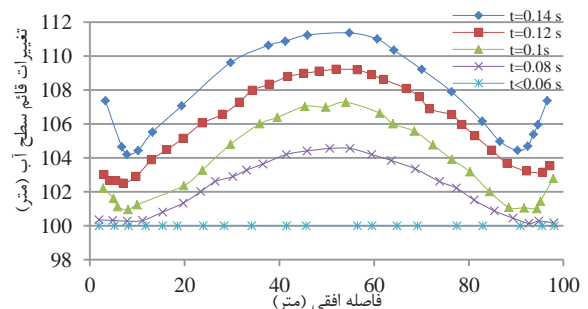
- بررسی منحنی‌های فشار- زمان نشان می‌دهد که زمان انتشار موج در روش SPH کمی بیشتر از سایر دیدگاه‌ها می‌باشد. با توجه به ناچیز بودن این زمان، می‌توان زمان رسیدن موج را برای هر سه دیدگاه یکسان فرض کرد.

- مطابق منحنی‌های فشار- زمان، در برخی نقاط، پس از حداکثر فشار ایجاد شده و با گذشت زمان، دوباره فشار کمی افزایش می‌یابد. این افزایش فشار ناشی از امواج ثانویه ناشی از برخورد موج به جداره‌های اطراف است. مقادیر امواج ثانویه در برخی نقاط قابل چشم‌پوشی نمی‌باشد.

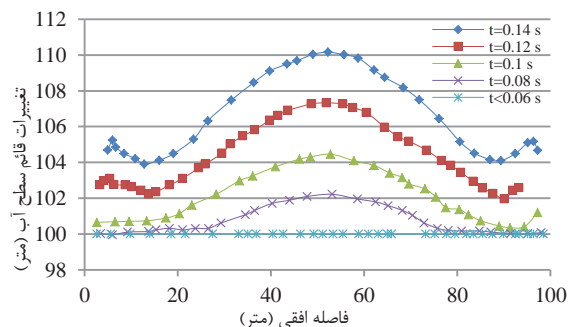


شکل ۱۰. مقایسه حداکثر فشار تولیدی روش SPH با روش تجربی و دیدگاه‌های لاگرانژی و اولری

به‌منظور تحلیل اندرکنش حباب ناشی از انفجار زیر آب با سطح آزاد ساکن (تغییرات سطح آزاد)، نیز می‌توان از داده‌های نتایج روش بدون شبکه SPH و دیدگاه لاگرانژی استفاده کرد. دیدگاه اولری همان‌طور که گفته شد، به علت ثابت بودن شبکه بر روی مسئله، قادر به تحلیل تغییرات سطح آب نمی‌باشد. شکل (۱۱) تغییر سطح آب را در زمان‌های مختلف با روش بدون شبکه SPH و شکل (۱۲)، تغییر مکان سطح آب را با دیدگاه لاگرانژی نمایش می‌دهد. مطابق این شکل‌ها، در زمان‌های کمتر از ۰/۰۶ ثانیه، موج انفجار هنوز به سطح آب نرسیده و تغییر مکان سطح آب صفر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین تغییرات در سطح آب، در بالای مرکز انفجار رخ داده و با افزایش فاصله از مرکز انفجار، تغییرات سطح آب نیز کاهش می‌یابد. برای مثال در ۰/۱۴ ثانیه پس از انفجار، بیشترین تغییر مکان سطح آب در روش بدون شبکه به حدود ۱۱ متر و در دیدگاه لاگرانژی به حدود ۱۰ متر می‌رسد که بیانگر اهمیت تأثیر محاسبات انفجار در سازه‌های آبی می‌باشد.



شکل ۱۱. منحنی تغییرات سطح آب با زمان (روش SPH)



شکل ۱۲. منحنی تغییرات سطح آب با زمان (دیدگاه لاگرانژی)

- [3] Liu, G. R.; Liu, M. B. "Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method"; World Scientific Publishing, 2003.
- [4] Sprague, M. A.; Geers, T. "A Spectral Element/Finite Element Analysis of Ship-like Structure Subjected to Underwater Explosion"; *Comput. Method Appl. M.* 2006, 195, 2149-2167
- [5] Kobashi, W.; Matsou, A. "Explosion Simulation by Smoothed Particle Hydrodynamics"; *J. Comput. Mech.* 2006, 1397-1403
- [6] Zhang, A. M.; Yang, W. S.; Yao, X. L. "Numerical Simulation of Underwater Contact Explosion"; *Appl. Ocean. Res.* 2012, 34, 10-20.
- [7] Bulson, P. S. "Explosive Loading of Engineering Structures"; An Imprint of Chapman and Hall, London, 1997.
- [8] Cole, R. H. "Under Water Explosions"; Princeton Univ. Press and Dover Publication, New York, 1965.
- [9] Li, H.; Yan, Z.; Jingan, C. "An Eulerian Numerical Method and Its Application to Explosion Problems"; *World Academy of Sci. Conf., Eng. & Tech.* 2012, 68, 8-28
- [10] Frang, J.; Parriaux, A.; Rentschler, M.; Ancey, C. "Improved SPH Methods for Simulating Free Surface Flow of Viscose Fluids"; *Appl. Numer. Math.* 2009, 59, 251-271
- [11] Hallquist, J. O. "LS DYNA960 User's Manual"; Livermore Software Technology Corporation, www.lsdynportal.de. 1998.

- بررسی منحنی‌های تغییرات سطح آب نشان می‌دهد که زمان رسیدن امواج انفجاری به سطح آب در روش‌های SPH و لاگرانژی تقریباً یکسان می‌باشد ولی مقادیر تغییر مکان نشان داده شده در روش SPH کمی بیشتر از دیدگاه لاگرانژی است.

- با توجه به این که تعیین فشار انفجار به صورت آزمایشگاهی و مدل سازی واقعی بسیار پر هزینه و پر خطر بوده، به طوری که عملاً در شرایط عادی امکان پذیر نیست، همچنین روابط تجربی ارائه شده برای تعیین فشار انفجار، نتایج بسیار متفاوتی از یکدیگر ارائه می‌نمایند، روش‌های عددی بهترین ابزار محاسبه این فرایند مهم می‌باشند. در فواصل بسیار نزدیک به نقطه انفجار روش بدون شبکه SPH و در سایر فواصل، دیدگاه لاگرانژی و در فواصل دور از نقطه انفجار، هر سه روش بدون شبکه و روش‌های لاگرانژی و اولری در تخمین فشار ناشی از انفجار توصیه می‌شوند.

۵. مراجع

- [1] Charles, E.; Anderson, J. R. "An Overview of the Theory of Hydrocodes"; *Int. J. Impact Eng.* 1987, 5, 33-59.
- [2] Hans, U. M. "Review: Hydrocodes for Structure Response to Underwater Explosion"; *J. Shock Vib.* 1999, 6, 81-96.