

## مدل سازی عددی انفجار در آب با استفاده از روش بدون شبکه ذرات هموارساز

بهنام کریمی فرزقی<sup>۱</sup>، رضا نادری<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی شاهرود

(دریافت: ۹۵/۰۴/۰۳، پذیرش: ۹۵/۰۹/۰۲)

### چکیده

تحلیل دقیق تر و مطمئن تر سازه‌ها در صورتی امکان پذیر است که بتوان با دقت بیشتر عوامل مؤثر در تحلیل را شناسایی کرد. یکی از عوامل مهم در تحلیل، تعیین نوع و میزان بارگذاری سازه است. در بین انواع بارگذاری، بارهای دینامیکی به ویژه بارهای ناشی از انفجار و ضربه، بسیار پیچیده تر و تعیین دقیق آن‌ها مشکل تر می باشد. 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، در برخی مواقع باعث ایجاد خطاهای عددی می شوند. در این مقاله انفجار در زیر آب، با استفاده از روش بدون شبکه ذرات هموارساز SPH توسط زبان برنامه نویسی فرترن برنامه نویسی و مدل سازی شده و فشار ناشی از انفجار در زیر آب و تغییرات سطح آب در اثر انفجار مورد مطالعه قرار گرفته است. در پایان نیز نتایج مثال حل شده با رابطه تجربی مورد مقایسه گرفته که نتایج قابل قبولی ارائه می نماید. برنامه نوشته شده می تواند برای مدل سازی های انفجار در آب مورد استفاده قرار گرفته و نتایج حاصل از این مدل سازی در تعیین فشار و ضربه وارد بر سازه های دریایی مورد استفاده قرار گیرد.

**کلیدواژه ها:** انفجار، مدل سازی عددی، روش بدون شبکه SPH، برنامه نویسی فرترن، انفجار در آب

## A Numerical Modeling for Underwater Explosion Using Mesh-Less Smooth Particle Hydrodynamics Method

B. Karimi Ferezghi, R. Naderi\*

Shahrood University of Technology

(Received: 23/06/2016; Accepted: 22/11/2016)

### Abstract

An accurate and safer analysis for structure is possible if we can identify factors in the analysis more accurately. One of the important factors in the analysis is the identification the kind and intensity of structural loading. Among the types of loading, especially dynamic loads and impact loads resulting from the explosion, is far more complicated and difficult to determine. According to lab explosion modeling problems, using numerical modeling to analyze these phenomena can be reasonable. Uses grid methods like Finite element method caused a numerical error due to intense deformation and high velocity of blast. In this paper, underwater explosion was modeled and programmed with numerical mesh-less method, Smooth Particle Hydrodynamics (SPH), using Fortran programming language and explosion pressure and water level changes in the blast were studied. Finally the solving problem is compared with empirical relation. The results of this model are very similar to empirical relationship. This program can be used for underwater explosions modeling and the results can be used to determine pressures and impacts on marine structures.

**Keywords:** Explosion, Numerical Modeling, Mesh-Less Method, SPH, Fortran Programming, Under Water Explosion.

\*Corresponding Author E-mail: rz\_naderi@yahoo.com

## ۱. مقدمه

انفجار زیر آب یکی از مهم‌ترین موضوعاتی است که از سال‌ها پیش مورد توجه محققان بوده است. مهم‌ترین عامل توجه به انفجار زیر آب، جنگ‌های دریایی در خلال جنگ جهانی دوم بوده است. پس از آن با توجه به احتمال انفجار در کشتی‌های نفت‌کش، خطوط انتقال نفت و گاز در کف دریاها، تأثیرات موج انفجار بر آب پشت مخزن سدها و ... و تأثیر بارهای انفجاری بر روی سازه‌های دریایی، باعث توجه روزافزون بر انفجار در زیر آب شد. 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 است.

برای مدل‌سازی عددی انفجار می‌توان از روش‌های با شبکه‌بندی مانند اجزای محدود و روش‌های بدون شبکه مانند روش ذرات هموارساز (SPH) استفاده نمود. با توجه به تغییر شکل‌های شدید و ناگهانی محیط پس از انفجار، استفاده از روش‌های با شبکه‌بندی می‌تواند منجر به خطاهای محاسباتی شود، 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]. در سال‌های اخیر افراد مختلفی به مدل‌سازی انفجار در آب پرداخته‌اند. مدل‌سازی انفجار در زیر آب با استفاده از روش SPH [۲]، مدل‌سازی انفجار زیر آب با روش اجزای محدود و تأثیر آن بر سازه‌ای کشتی مانند [۳]، بررسی انفجار زیر آب و تأثیر آن بر ارتعاش یک میله [۴] و بررسی انفجار زیر آب با استفاده از نرم‌افزار Autodyne [۵] نمونه‌هایی از این مطالعات می‌باشند.

در این مقاله سعی شده است انفجار زیر آب در یک مدل دلخواه با استفاده از روش بدون شبکه SPH با استفاده از زبان برنامه‌نویسی فرترن، مدل‌سازی شده و حداکثر فشار ناشی از انفجار و تغییر سطح آب در اثر انفجار مورد بررسی قرار گیرد. برنامه‌نویسی انجام شده توسعه برنامه لیو [۲] بوده و مدل‌سازی انفجار، معادلات حاکم، اندرکنش‌ها به آن اضافه شده است. در انتها نیز برای اعتبارسنجی مدل انجام گرفته، نتایج این مدل‌سازی با برخی از روش‌های تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است.

## ۱-۱. ماهیت انفجار و معادلات حاکم

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 [۶]. 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 هسته‌گازی حاصل از احتراق ماده منفجره (حباب) است. این هسته‌گازی پرفشار، به سرعت منبسط می‌شود، 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 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 کاهنده، رو به بیرون منبسط شده و باعث ایجاد ضربه می‌شوند. فشار بالای اولیه در حباب گاز با گذشت زمان به طور 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 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 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 تراکم‌پذیری 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 می‌کند و حباب در حقیقت سیکل‌های تکراری انبساط و انقباض را به خود می‌بیند. با در نظر گرفتن یک حجم کنترل مناسب از سیال مورد نظر، 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 سامانه همراه است و در نتیجه سامانه این اتلاف را با تغییرات جرم در واحد حجم (چگالی) جبران می‌کند. در نتیجه، لاجرم تغییرات چگالی با زمان در مسئله انفجار حضور

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

### ۲-۱. معرفی و اصول روش عددی SPH

روش ذرات هموار متحرک SPH یک روش کاملاً لاگرانژی است که در آن احتیاج به هیچ نوع شبکه‌بندی نیست. این روش برای اولین بار در سال ۱۹۷۷ [۹] در زمینه مسائل کیهکشان‌ی و ستارگان به کار گرفته شد. بعدها علاوه بر مسائل کیهکشان‌ی از این روش برای تحلیل جریان با سطح آزاد استفاده و مدل‌سازی تغییر شکل‌های شدید استفاده شد [۱۰]. به طور کلی و خلاصه روش SPH بر پایه خصوصیات تابع دلتای دیراک بنا شده است. در این روش هر یک از ذرات مشخصاتی را با خود حمل نموده و تغییرات آن‌ها توسط تابع تقریب روی فضای گسسته، به صورت رابطه (۵) تعیین می‌شود.

$$\langle f(x_i) \rangle = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W_{ij} \quad (5)$$

در رابطه فوق،  $W$  تابع هموارسازی،  $h$  شعاع هموارسازی،  $i$  و  $j$  شماره ذرات تحت تأثیر اندرکنش با ذره  $i$  و  $x$  موقعیت ذره مورد نظر است.

### ۳-۱. تابع هموارسازی

با توجه به دخالت مستقیم تابع هموارساز در تقریب ذرات، انتخاب تابع هموارساز از اهمیت بالایی برخوردار است. تابع هموارساز باید مثبت، یکه، زوج، فشرده و دارای مشتقات پیوسته باشد. در این مقاله از تابع هموارساز اسپیلاین مکعبی [۲] ارائه شده در رابطه (۶) استفاده شده است.

$$W(q, h) = \alpha \begin{cases} \frac{2}{3} - q^2 + \frac{q^3}{2} & 0 \leq q < 1 \\ \frac{1}{6} (2 - q)^3 & 1 \leq q < 2 \\ 0 & q \geq 2 \end{cases} \quad (6)$$

در رابطه فوق  $q = \frac{x_i - x_j}{h}$  و  $\alpha = \frac{15}{7\pi h^2}$  می‌باشد.

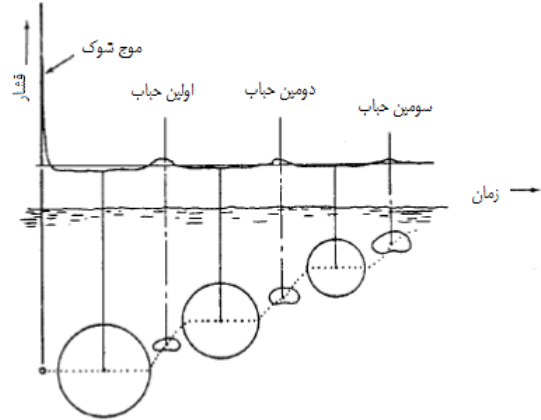
### ۴-۱. لزجت مصنوعی

در مدل‌سازی امواج شوک و انفجار برای جلوگیری از ایجاد خطاها و ناپایداری‌های عددی، نفوذ ذرات در یکدیگر و میرا نمودن امواج از لزجت مصنوعی استفاده می‌شود. در این مقاله از رابطه (۷) برای اعمال لزجت مصنوعی [۱۱] استفاده شده است.

$$\pi_{ij} = \begin{cases} \frac{-\alpha c_{ij} \mu_{ij} + \beta \mu_{ij}^2}{\rho_{ij}} & v_{ij} x_{ij} < 0 \\ 0 & v_{ij} x_{ij} > 0 \end{cases} \quad (7)$$

در رابطه فوق،  $\mu_{ij} = \frac{h_{ij} v_{ij} x_{ij}}{|x_{ij}|^2 + \phi^2}$  و  $c_{ij}$  و  $h_{ij}$  به ترتیب میانگین چگالی، سرعت صوت و طول هموارسازی دو ذره است.

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. شکل (۱) نحوه ایجاد حباب و سیکل‌های انبساطی و انقباضی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نحوه ایجاد حباب و سیکل‌های انبساط و انقباض در انفجار زیر آب [۷]

در انفجار زیر آب، گازهای ناشی از انفجار مسبب شکل‌گیری حباب‌هایی می‌شوند. به دلیل تفاوت چگالی بین آب و محصولات ناشی از انفجار و به وجود آمدن گرادیان حرارتی، میدان فشار خاصی در آب شکل می‌گیرد که عامل به وجود آمدن امواج شوک و به تبع 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.

با توجه به شدت و سرعت بالای پدیده انفجار، این پدیده به صورت بی‌دررو در نظر گرفته شده و از معادلات ناویر-استوکس برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. معادلات بقای جرم، مومنوم و انرژی مورد استفاده در روابط (۱-۳) ارائه شده‌اند.

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla v \quad (1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P \quad (2)$$

$$\frac{De}{Dt} = -\frac{P}{\rho} \nabla \rho \quad (3)$$

در روابط فوق  $P$ ،  $t$ ،  $\rho$ ،  $e$  و  $v$  به ترتیب فشار، زمان، چگالی، انرژی داخلی و بردار سرعت می‌باشند.

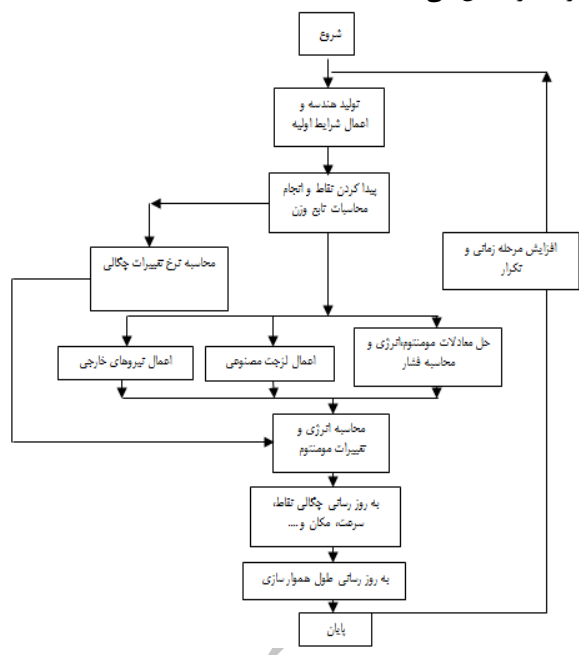
همچنین در گذشته روابط تجربی متعددی برای تعیین حداکثر فشار ناشی از انفجار ارائه شده است. رابطه (۴) نمونه‌ای از این روابط است که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است.

$$P_m = 52/16 \left( \frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^{1.13} \quad (4)$$

۲. روش تحقیق

۲-۱. الگوریتم برنامه

برنامه‌نویسی برای حل معادلات انفجار در آب توسط برنامه فرترن انجام گرفته است. ابتدا مکان قرارگیری نقاط، فاصله بین آنها و مشخصات اولیه آب و مواد منفجره مانند چگالی، سرعت اولیه و... به صورت ورودی گرفته می‌شود. سپس معادلات حرکت، با در نظر گرفتن لزجت مصنوعی و نیروی پناستی و معادلات حالت ارائه شده برای آب و ماده منفجره، حل می‌شود. برای حل معادلات حرکت، در مرحله اول با طول هموارسازی اولیه، چگالی نقاط توسط تابع وزن کرنل تقریب زده شده و توسط روش عددی رانگ کوتا حل می‌شوند. در مراحل زمانی بعدی، ابتدا طول هموارسازی بر اساس چگالی نقاط به‌روزرسانی شده و سپس معادلات حرکت به طریقی که گفته شد دوباره حل می‌شوند. شکل (۳) الگوریتم برنامه را نشان می‌دهد.



شکل ۳. الگوریتم حل برنامه

۲-۲. حل مثال عددی انفجار در آب با روش SPH

مدل مورد نظر انفجار را در عمق ۵۰ متری آب و در یک محیط نامتناهی مورد بررسی قرار می‌دهد. ماده منفجره در نظر گرفته شده تی‌ان‌تی بوده و سازوکار انفجار و تغییرات سطح آب در اثر انفجار مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابعاد ماده منفجره ۲\*۲ متر فرض شده است. در شکل (۴) شماتیکی از مدل مورد بررسی و مدل SPH تهیه شده، ارائه شده است. فاصله گره‌ها در روش SPH به صورت ۱\*۱ m در نظر گرفته شده است. نقاط A تا E به عنوان نقاط مرجع و به فاصله‌های ۱۰ متر از یکدیگر قرار داده شده و بررسی‌های فشار-زمان بر روی آنها انجام می‌گیرد.

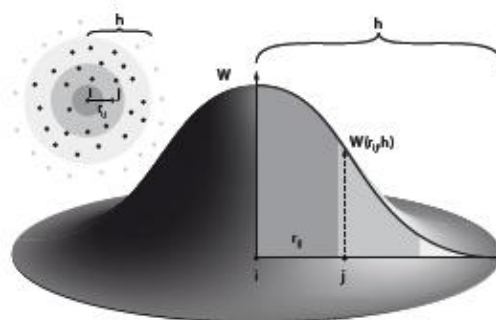
همچنین  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\theta$  به ترتیب ۱، ۱۰ و  $h_{ij}/0.1$  در نظر گرفته شده است.

۵-۱. طول هموارسازی

تعداد نقاط در نظر گرفته شده برای تقریب‌های انتگرالی در روش SPH به صورت مستقیم با طول هموارسازی در نظر گرفته شده ارتباط دارد. در صورتی که طول هموارسازی کوچک در نظر گرفته شود، تعداد نقاط کمتری در محدوده محاسباتی قرار گرفته و نیرو به خوبی منتقل نمی‌شود و در صورتی که این مقدار بزرگ فرض شود نیز حجم عملیات بالا رفته و ممکن است باعث ناپایداری عددی گردد. در مسائل انفجار با توجه به غیر همگنی و نامنظمی شدید ذرات، این مقدار همان‌طور که در رابطه (۸) نشان داده شده است، در فضا و زمان متغیر فرض می‌شود. به عبارت دیگر طول هموارسازی با تغییرات چگالی ذرات با زمان، تغییر می‌نماید [۲].

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{h}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} \quad (8)$$

شکل (۲) نمونه‌ای از طول هموارسازی و تابع وزن را در حالت سه‌بعدی نمایش می‌دهد



شکل ۲. ذرات در روش بدون شبکه، طول هموارسازی، تابع وزن و نحوه تأثیرگذاری ذرات بر یکدیگر [۱۲]

۶-۱. معادلات حرکت

با استفاده از معادلات نایپر-استوکس و در نظر گرفتن لزجت مصنوعی، معادلات حرکت به صورت روابط (۹-۱۱) بازنویسی می‌شوند.

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j (v_i - v_j) \nabla_i W_{ij} \quad (9)$$

$$\frac{Dv_i}{Dt} = -\sum_{j=1}^N m_j \left( \frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} + \pi_{ij} \right) \nabla_i W_{ij} \quad (10)$$

$$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left( \frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} + \pi_{ij} \right) (v_i - v_j) \nabla_i W_{ij} \quad (11)$$

برای حل معادلات فوق در هر مرحله از روش رانگ کوتا (RF) استفاده شده و مقادیر سرعت، فشار، چگالی و... در هر مرحله به‌روزرسانی می‌شوند.

هنگام فشار و کشش، از معادلات حالت ارائه شده در روابط (۱۳) و (۱۴) در حالات مربوط به فشار و کشش استفاده می‌شود. پارامترهای مربوط به معادلات حالت آب در جدول (۲) ارائه شده است.

$$P = a_1\mu + a_2\mu + a_3\mu^3 + (b_0 + b_1\mu + b_1\mu^2)\rho_0 e \quad (13)$$

$$P = a_1\mu + (b_0 + b_1\mu)\rho_0 e \quad (14)$$

در رابطه فوق،  $\mu = \eta - 1$  و  $\eta$  نسبت بین چگالی بعد و قبل از انفجار است.

به عنوان شرایط اولیه مسئله سرعت اولیه و یا نقاط آغازین انفجار را تعیین نمود. در این مقاله مختصات نقاط اطراف TNT به عنوان شرایط اولیه آغاز انفجار داده شده است.

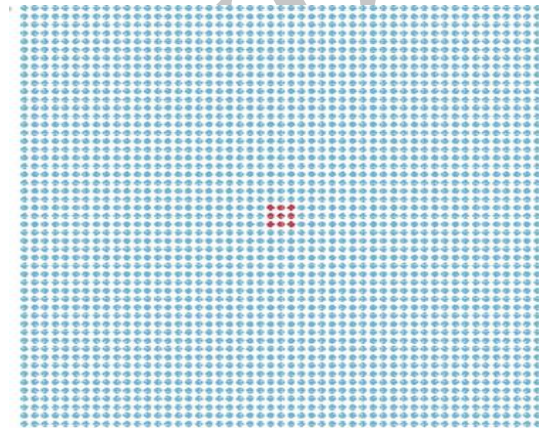


۳-۲. معادلات حالت در روش SPH برای تعیین فشار، از معادلات حالت استفاده می‌شود. برای تعیین فشار انفجار از معادله حالت JWL استفاده می‌شود (رابطه (۱۲)).

$$p = A \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1}\right) e^{-\left(\frac{R_1}{\eta}\right)} + B \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_2}\right) e^{-\left(\frac{R_2}{\eta}\right)} + \omega\eta\rho_0 e \quad (12)$$

در رابطه فوق،  $\eta = \frac{\rho}{\rho_0}$  (نسبت چگالی گاز ماده منفجره به چگالی گاز اولیه) A، B،  $R_1$ ،  $R_2$  و  $\omega$  ثابت‌های مواد منفجره گوناگون می‌باشند. مقادیر استفاده شده برای ماده منفجره TNT در مدل‌سازی در جدول (۱) ارائه شده است.

برای تعیین فشار آب نیز، با توجه به تفاوت رفتاری آب در



شکل ۴. مدل مورد مطالعه و محل قرارگیری نقاط مرجع مورد مطالعه

جدول ۱. پارامترهای معادله حالت برای ماده منفجره (JWL)

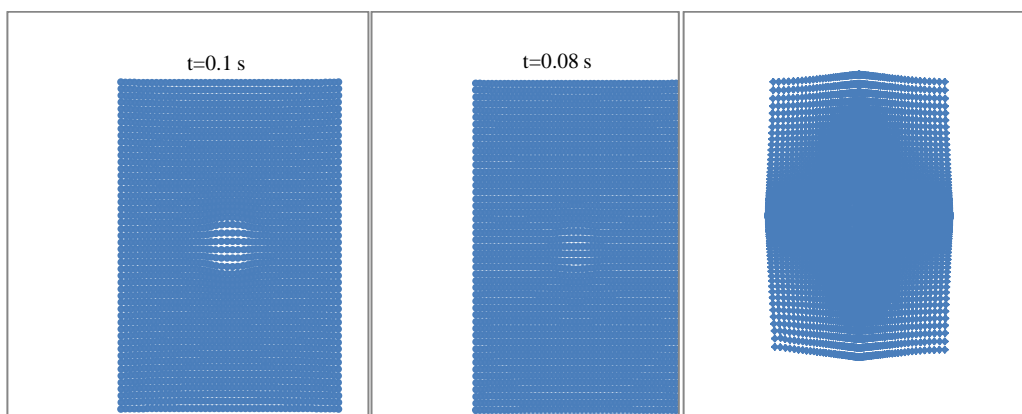
$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	A (pa)	B (pa)	$R_1$	$R_2$	$\omega$	سرعت اولیه انفجار (m/s)	$e_0$ (j/kg)
۱۶۳۰	$3/712 * 10^{12}$	$3/21 * 10^9$	۴/۱۵	۰/۹۵	۰/۳	۶۹۳۰	$4/29 * 10^6$

جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده در معادله حالت آب

$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_0$	$a_1$ (pa)	$a_2$ (pa)	$a_3$ (pa)	$b_0$	$b_1$	$e_0$ (j/kg)
۱۰۰۰	۱۴۸۰	$2/1 * 10^9$	$9/224 * 10^9$	$8/76 * 10^9$	۰/۴۹۳۴	۱/۳۹۳	۳۵۷/۱

۳. نتایج و بحث پس از انجام مدل‌سازی و تحلیل، می‌توان تغییر شکل‌های نقاط مختلف، نمودار تغییر مکان- زمان، نمودار فشار و ... را تعیین نمود. شکل (۵) نمونه‌ای از مدل‌سازی انفجار و تغییر مکان نقاط را در زمان‌های ۰/۸ و ۰/۱ ثانیه را ارائه می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است در این زمان، موج ناشی از انفجار هنوز به سطح آب نرسیده و حباب انفجار در حال انبساط است. تغییرات سطح آب در روش بدون شبکه SPH قابل مشاهده است. تعیین موقعیت نقاط در هر لحظه از مزایای این روش نسبت به برخی دیدگاه‌های دیگر عددی مانند دیدگاه اولری است. دیدگاه اولری با توجه به ثابت بودن شبکه قادر به بررسی تغییرات سطح آب نمی‌باشد

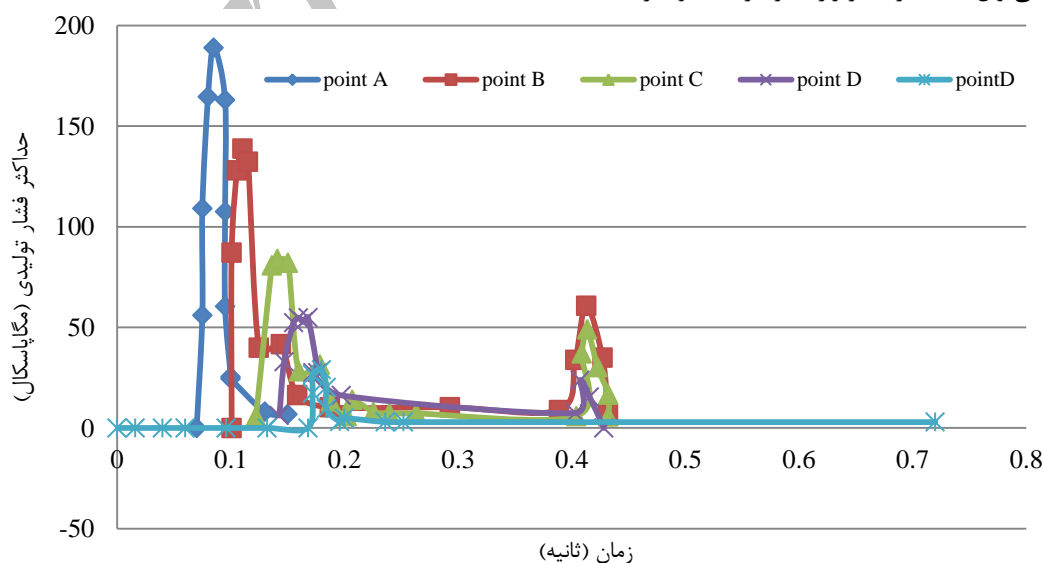
شکل ۵. تغییرات مکان نقاط در زمان‌های ۰/۸ و ۰/۱ ثانیه



شکل ۵. تشکیل حباب انفجار در زمان های متفاوت

شده توسط موج را نیز تعیین نمود. مقادیر حداکثر فشار تولید شده در نقاط A تا E در شکل (۸) ارائه شده و با نتایج حاصل از روش تقریبی کول، مقایسه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، روش بدون شبکه SPH نتایج معقولی را نسبت به رابطه تجربی ارائه می نماید. در فواصل نزدیک به مرکز انفجار مقادیر به دست آمده از برنامه نویسی روش SPH مقادیر بالاتری را نسبت به روش تجربی ارائه می کند ولی با افزایش فاصله از مرکز انفجار نتایج روش بدون شبکه و رابطه تجربی تقریباً همگرا می شوند. نکته مهم این است که روش بدون شبکه SPH قادر به ارائه فشار در فاصله کمتری از مرکز انفجار می باشد. برای مثال با استفاده از روش SPH می توان فشار را تا فاصله ۸ متری انفجار تعیین نمود، در حالی که در سایر روش های عددی و همچنین روابط تجربی با توجه به ضربه شدید و اعوجاج بالای شبکه ها این امکان وجود ندارد.

برای مطالعه دقیق تر، منحنی های فشار - زمان برای برخی نقاط مورد بررسی قرار می گیرد. 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 می شود (شکل (۶)). نقطه E در سطح آزاد آب قرار دارد. مطابق نتایج به دست آمده، هر چقدر فاصله نقاط از مرکز انفجار بیشتر باشد، موج ناشی از انفجار دیرتر به آن نقطه می رسد. همچنین مقدار فشار پیک تولید شده نیز با افزایش فاصله کاهش می یابد. همان طور که مشاهده می شود، منحنی فشار، پس از رسیدن به نقطه پیک، به سرعت کاهش یافته و با گذشت زمان دوباره کمی فشار افزایش می یابد که در حقیقت بیانگر امواج ثانویه ایجاد شده است. با بررسی نمودارهای فشار - زمان، مشاهده می شود که زمان رسیدن به نقطه حداکثر برای نقطه A، حدود ۰/۰۸۵ ثانیه است که این زمان برای نقطه E به حدود ۰/۱۸ ثانیه افزایش می یابد. همچنین از روی منحنی فشار - زمان می توان مدت اثر فشار وارده بر هر نقطه و ضربه ایجاد

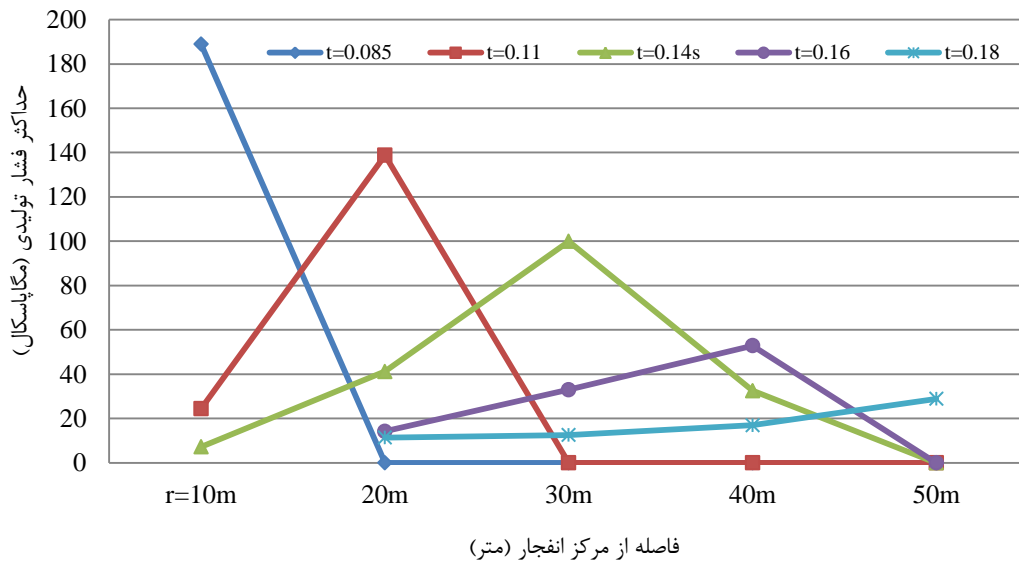


شکل ۶. منحنی فشار - زمان برای نقاط A (۱۰ متری انفجار) تا E (۵۰ متری انفجار)

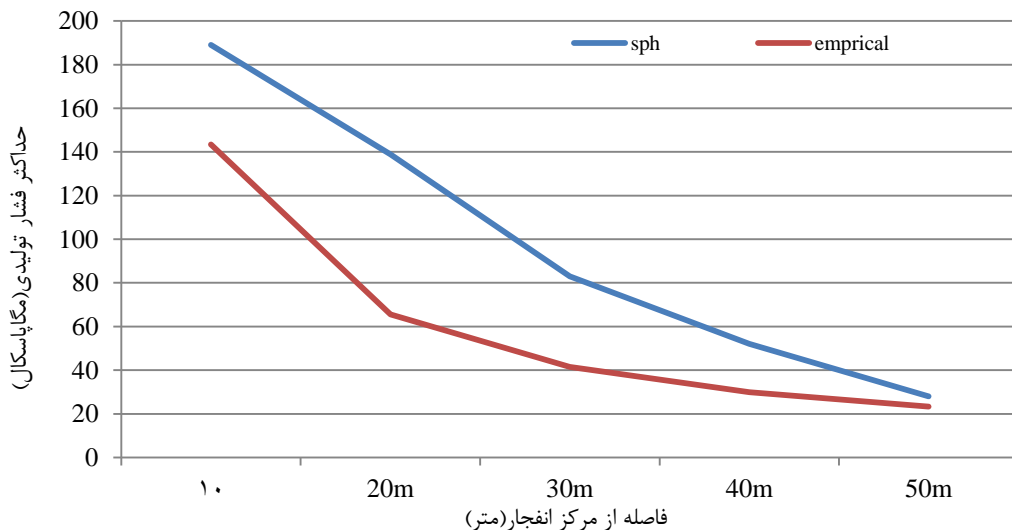


زمان، فشار نقطه C به مقدار پیک خود رسیده (حدود ۸۴ مگاپاسکال) و فشار نقاط A و B با توجه به اینکه جبهه موج انفجار از آن‌ها عبور نموده، نسبت به زمان‌های قبل به سرعت کاهش یافته است. همچنین نقطه D نیز در این زمان کمی تحت اثر موج قرار گرفته است ولی مقدار حداکثر آن در زمان ۰/۱۶ ثانیه اتفاق می‌افتد.

شکل (۷) نمودار حداکثر فشار بر اساس فاصله از مرکز انفجار را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، هنگامی که حداکثر موج انفجار به نقطه A می‌رسد، نقطه B تحت فشار بسیار کمتری قرار گرفته و سایر نقاط هنوز تحت فشار ناشی از انفجار قرار نگرفته‌اند. در زمان ۰/۱۴ ثانیه، موج ناشی از انفجار از نقاط A و B عبور نموده و به نقطه C رسیده است. در این



شکل ۷. نمودار حداکثر فشار تولیدی بر حسب فاصله از مرکز انفجار



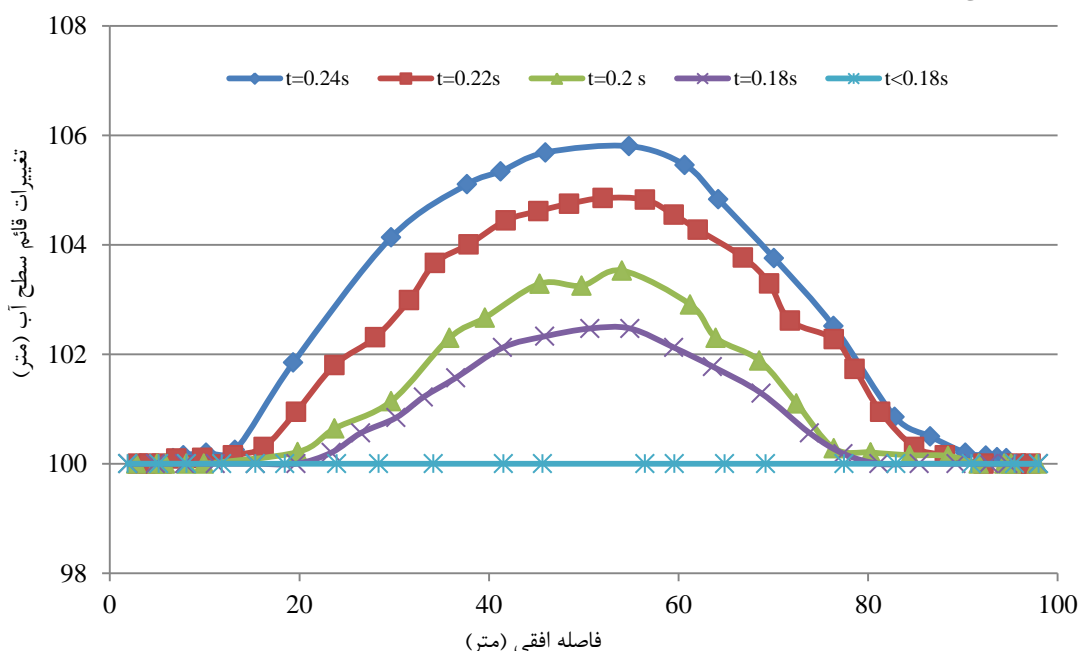
شکل ۸. مقایسه حداکثر فشار تولیدی روش SPH با روش تجربی

می‌توان با در نظر گرفتن تعدادی نقطه در سطح آب، جابه‌جایی نقاط در زمان‌های متفاوت را به دست آورد. بدین ترتیب با تعیین موقعیت نقاط روی سطح آب در هر زمان می‌توان پروفیل سطح آب را نیز رسم نمود. شکل (۹) تغییر سطح آب را در زمان‌های مختلف با روش بدون شبکه SPH نمایش می‌دهد. مطابق این

به منظور تحلیل اندرکنش حباب ناشی از انفجار زیر آب با سطح آزاد ساکن (تغییرات سطح آزاد)، نیز می‌توان از داده‌های نتایج روش بدون شبکه SPH استفاده نمود. مزیت روش بدون شبکه نسبت به سایر دیدگاه‌های عددی مانند روش اولری در تعیین جابه‌جایی‌های نقاط در هر لحظه است، به همین دلیل

انفجار، بیشترین تغییر مکان سطح آب در روش بدون شبکه به حدود ۶ متر می‌رسد که بیانگر اهمیت تأثیر محاسبات انفجار در سازه‌های آبی است. بررسی تغییرات سطح آب در محاسبه بارگذاری برخی سازه‌های آبی تأثیرگذار است.

شکل‌ها، در زمان‌های کمتر از ۰/۱۸ 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 ۰/۲۴ ثانیه پس از



شکل ۹. منحنی تغییرات سطح آب با زمان

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از زبان برنامه‌نویسی فرترن که یکی از زبان‌های برنامه‌نویسی پر کاربرد در محاسبات عددی است، انفجار در آب با استفاده از روش عددی بدون شبکه SPH مدل‌سازی شده است. بدین منظور بر اساس الگوریتم ارائه شده، معادلات حرکت در محیط تراکم ناپذیر آب با در نظر گرفتن اندرکنش بین ماده منفجره و آب، با استفاده از روش رانگ کوتاه حل می‌شوند. تابع وزن مورد استفاده در این برنامه متفاوت از سایر توابع وزن مورد استفاده برای مدل‌سازی انفجار در نظر گرفته شده و در نهایت جواب‌های قابل قبولی ارائه نموده است. پس از برنامه‌نویسی، یک مثال عددی در مورد انفجار در آب با استفاده از روش بدون شبکه حل در محیطی نامحدود حل شده و نتایج به دست آمده با رابطه تجربی مقایسه شده است. در معادلات حرکت باید لزجت مصنوعی برای جلوگیری از ناپایداری‌های عددی مورد نظر قرار گیرد. در صورتی که لزجت مصنوعی در معادلات حرکت در نظر گرفته نشود، ناپایداری عددی ایجاد شده و جواب‌های نادرست ارائه می‌شوند. طول هموارسازی یکی از پارامترهای مهم در روش بدون شبکه SPH است. طول هموارسازی باید به صورت متغیر با زمان و چگالی نقاط فرض گردد، در صورتی که طول هموارسازی در مسئله انفجار به صورت ثابت

فرض شود، در فواصل نزدیک به مرکز انفجار نمی‌توان به نتایج قابل قبولی دست یافت. برای در نظرگیری اندرکنش بین ماده منفجره و آب، از روش پنالتی استفاده می‌شود. در این روش برای ذراتی که از دو جنس متفاوت در کنار یکدیگر قرار دارند، نیرویی در جهت عکس به ذرات وارد شده و از نفوذ و تداخل ذرات به یکدیگر جلوگیری می‌نماید. ضرایب مورد استفاده برای در نظر گرفتن اندرکنش با توجه به نوع مسئله متفاوت می‌باشد. 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 روش‌های دارای شبکه‌بندی، با توجه به اعوجاج شبکه‌ها، مقادیر فشار در فواصل نزدیک به مرکز انفجار، قابل بررسی نیست. بررسی مقادیر حداکثر فشار تولید شده با افزایش فاصله از مرکز انفجار، کاهش می‌یابد. در فواصل نزدیک به مرکز انفجار، روش SPH مقادیر دست بالاتری از فشار را نسبت به رابطه تجربی ارائه می‌کند، ولی با افزایش فاصله مقادیر ارائه شده بسیار همگرا شده و تقریباً نتایج یکسانی به دست می‌آید. با استفاده از منحنی‌های فشار- زمان می‌توان فشار را در هر لحظه‌ای تعیین نمود و سپس با استفاده از سطح زیر منحنی ضربه ناشی از انفجار را تعیین نمود.



## ۵. مراجع

- [7] Hsu, C. Y.; Liang, C. C.; Nguyen, A. T.; Teng, T. L. "A Numerical Study on the Underwater Explosion Bubble Pulsation and Collapse Process"; *Ocean Eng.* 2014, 81, 29-38.
- [8] Cole, R. H. "Under Water Explosions"; Princeton University Press and Dover Publication: New York, 1965.
- [9] Liu, M. B.; Liu, G. R.; Zong, Z.; Lam, K. "Computer Simulation of High Explosive Explosion Using Smoothed Particle Hydrodynamics Methodology"; *Comput. Fluids* 2003, 32, 305-322.
- [10] Frang, J.; Parriaux, A.; Rentschler, M.; Ancey, C. "Improved SPH Methods for Simulating Free Surface Flow of Viscose Fluids"; *Appl. Number Math.* 2009, 59, 251-71.
- [11] Crespo, A. J. "Application of the Smoothed Particle Hydrodynamics Model Physics to Free-Surface Hydrodynamics"; Ph.D. Thesis, Universidade de Vigo Departamento de física Aplicada, 2008.
- [12] Kordilla, J. "Flow and Transport in Saturated and Unsaturated Fractured Porous Media: Development of Particle Based Modeling Approach"; Ph.D. Thesis, Universitat Gottingen, 2014.
- [1] Hans, U. M. "Review: Hydrocodes for Structure Response to Underwater Explosion"; *J. Shock Vib.* 1999, 6, 81-96.
- [2] Liu, G. R.; Liu, M. B. "Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method"; World Scientific Publishing, 2003.
- [3] Sprague, M. A.; Geers, T. "A Spectral Element/Finite Element Analysis of Ship-Like Structure Subjected to Underwater Explosion"; *J. Comput. Method Appl.* 2006, 195, 2149-2167.
- [4] Kobashi, W.; Matsou, A. "Explosion Simulation by Smoothed Particle Hydrodynamics"; *J. Comput. Mech.* 2006, 1397-1403.
- [5] Zhang, A. M.; Yang, W. S.; Yao, X. L. "Numerical Simulation of Underwater Contact Explosion"; *Appl. Ocean Res.* 2012, 34, 10-20.
- [6] Bulson, P. S. "Explosive Loading of Engineering Structures"; An Imprint of Chapman and Hall, London, 1997.

Archive of SID