



## مدل سازی عددی چاله انفجار در خاک با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار

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

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی شاهرود

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی عمران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۲۴، تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۴/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۱۶

### چکیده

مسائل مربوط به انفجار می‌تواند در محیط‌های متفاوتی از جمله خاک، مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به کمتر شناخته بودن ماهیت انواع خاک‌ها و گستردگی معادلات حالت، این پدیده نیازمند بررسی دقیق است. به دلیل مشکلات مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی انفجار، از مدل‌سازی‌های عددی برای تحلیل این پدیده استفاده می‌شود. در بین روش‌های عددی، روش‌های عددی بدون شبکه برای مدل‌سازی این پدیده مناسب‌تر است؛ بیشتر مطالعات صورت گرفته در زمینه چاله‌های انفجاری خاک به صورت تجربی و آزمایشگاهی است. در این مقاله سعی شده است، به بررسی چاله‌های انفجاری از نظر قطر و ارتفاع چاله ایجاد شده در اثر مقادیر مختلف ماده منفجره پرداخته شود. مدل سازی با استفاده از روش بدون شبکه ذرات هموار ساز SPH و توسط زبان برنامه‌نویسی فرترن انجام شده و علاوه بر چاله‌های انفجاری، فشار ناشی از انفجار در خاک و تغییرات سطح خاک در اثر انفجار نیز، مورد مطالعه قرار گرفته است. برای اعتبار سنجی مدل، از نتایج یک بررسی آزمایشگاهی کمک گرفته شده است که نتایج قابل قبولی ارائه می‌نماید. در پایان نیز چاله‌های انفجاری در یک خاک دو لایه، مورد مطالعه قرار گرفته است. برنامه نوشته شده می‌تواند برای مدل‌سازی‌های انفجار در خاک و چاله‌های انفجاری، مورد استفاده قرار گیرد.

**کلمات کلیدی:** انفجار در خاک؛ چاله انفجار؛ مدل سازی عددی؛ SPH؛ برنامه‌نویسی فرترن.

## A Numerical Modeling For Craters Produced By Soil Explosion Using SPH Method

Behnam. Karimi Ferezhghi<sup>1,\*</sup>, Reza. Naderi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Civil. Eng., Shahrood Univ., Shahrood, Iran.

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Civil. Eng., Shahrood Univ., Shahrood, Iran.

### Abstract

Explosion problems can be examined in different environments. Due to the lesser-known nature of soil types and extent of the equations of state, explosion problems need careful analysis. Because of difficulties in laboratory explosion modeling, numerical models use to analyze this phenomenon. Using the SPH methodology avoids the disadvantages of traditional numerical methods in treating large deformations in the extremely transient explosion process. Since explosion crater in the soil is an important problem and most of the studies are experimental, in this article it is tried to investigate the craters diameter and height caused by the different amounts of explosives. The model is programmed with Fortran language and smooth particle hydrodynamics, SPH, the craters, pressure caused by the explosion in the soil and the soil surface changes are also studied. To validate the model, the results of a laboratory study were used and it is shown that they are consistent with the numerical results of this study. Finally, craters in a two layer soil is studied. This program can be used for modeling of soil explosion and craters.

**Keywords:** Soil Explosion; Craters; Numerical Modeling; SPH; Fortran Programming.

## ۱- مقدمه

مساله انفجار و موج های شوک، یکی از مهم ترین موضوعاتی است که از سال ها پیش مورد توجه محققان بوده است. مهم ترین عامل توجه به انفجار در خاک، مساله ساخت پناهگاه ها در خلال جنگ جهانی دوم بوده است. پس از آن با توجه به کاربردهای انفجار در سایر مسایل مهندسی از جمله، مساله خطوط انتقال نفت و گاز، مقاوم سازی سازه های مهم سطحی و زیر زمینی در مقابل حملات تروریستی و پدافند غیر عامل، راه سازی و مساله انفجار در تونل ها، معادن و... باعث توجه روز افزون انفجار روی خاک گشت. با توجه به مشکلات مدل سازی های آزمایشگاهی و خطرات ناشی از انفجار، پس از جنگ جهانی دوم، محققان به بررسی رفتار انفجار در حالات مختلف ماده از جمله، آب و مواد دارای مقاومت برشی مانند خاک با استفاده از روش های عددی پرداختند. تفاوت خاک با سایر مصالح، ناشناخته بودن رفتار خاک های متفاوت تحت بارهای دینامیکی بوده و پیش بینی رفتار خاک، فشارهای بوجود آمده در اثر انفجار، چاله های انفجار و ... به ویژگی های متفاوتی مانند، نوع خاک، درصد رطوبت و اشباع خاک و ... مرتبط است. حل معادلات ناشی از انفجار با توجه به سرعت بالای موج شوک و ایجاد تغییر شکل های شدید، دارای پیچیدگی های محاسباتی بسیاری است.

برای مدل سازی عددی انفجار می توان از روش های با شبکه بندی مانند، اجزای محدود و روش های بدون شبکه مانند روش ذرات هموار (SPH) استفاده کرد. با توجه به تغییر شکل های شدید و ناگهانی محیط پس از انفجار، استفاده از روش های با شبکه بندی می تواند منجر به خطاهای محاسباتی شود، بنابراین با توجه به کاربرد مناسب روش SPH در مدل سازی مسائل کهکشانی ها، تغییر شکل های شدید و هیدرودینامیک، استفاده از این روش بسیار مناسب به نظر می آید. روش عددی SPH با توجه به ماهیت بدون شبکه، توانایی تغییر شکل های شدید را دارا بوده. با توجه به ماهیت لاگرانژی خود مدل سازی فصل مشترک ها و سطح آزاد را بسیار ساده می نماید [۱]. در سال های اخیر افراد مختلفی به مدل سازی انفجار در خاک پرداخته اند. بررسی چاله های انفجاری با دیدگاه های

لاگرانژی و اوپلری [۲]، بررسی عددی بارگذاری انفجاری بر سازه زیرزمینی [۳]، بررسی رفتار خاک تحت بارهای انفجاری با روش آزمایشگاهی و استفاده از نرم افزار LS-Dyna [۴]، مدل سازی انفجار سطحی با استفاده از نرم افزار AutoDyne [۵]، ارزیابی قطر چاله های انفجاری توسط نرم افزار Abaqus [۶]، نمونه هایی از این مطالعات می باشند.

در این مقاله سعی شده است، انفجار سطحی خاک در یک مدل دلخواه با استفاده از روش بدون شبکه SPH با استفاده از زبان برنامه نویسی فورتن، مدل سازی شده، حداکثر فشار ناشی از انفجار در نقاط مختلف و مشخصات چاله انفجاری ایجاد شده در اثر انفجار مورد بررسی قرار گیرد. برنامه نویسی انجام شده توسعه برنامه ليو [۷] بوده و مدلسازی انفجار، معادلات حاکم، اندرکنش ها، معادلات مربوط به مقاومت برشی و گسیختگی خاک به آن اضافه گردیده است. برای اعتبار سنجی مدل انجام گرفته، نتایج این مدل سازی با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی، مورد مقایسه قرار گرفته است. در انتها نیز مثالی عددی برای انفجار در خاک دانه ای و دو لایه، مورد بررسی 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 می شود که در نتیجه دما و فشار بسیار بالایی ایجاد و موج انفجار بلافاصله تولید و با سرعت بسیار زیادی منتشر می شود [۸]. انفجار می تواند در محیط های مختلفی مانند، هوای آزاد، آب و یا محیط های جامد و دارای مقاومت برشی رخ دهد.

تفاوت عمده انفجار در هوا یا آب با خاک، وجود مقاومت برشی در خاک است. در حقیقت خاک محیطی سه فازی شامل، دانه های جامد، آب و هوا است. وجود آب یا هوا در حفره های خاک، می تواند باعث تفاوت در معادله حالت و رفتار خاک شود، به همین علت خاک ها با درصد اشباع های متفاوت تحت اثر انفجار، خصوصیات متفاوتی از خود ارائه می دهند؛ همچنین خاک ها می توانند چسبنده و یا دانه ای باشند و این پارامتر نیز روی فشارهای ایجاد شده

### ۲-۱- معرفی و اصول روش عددی SPH

روش هیدرودینامیک ذرات هموار متحرک SPH مبتنی بر روش لاگرانژی است که در آن احتیاج به هیچ نوع شبکه‌بندی نیست. این روش برای اولین بار در سال ۱۹۷۷ [۱۲] در زمینه مسائل اخترشناسی به کار گرفته شد. بعدها علاوه بر مسائل اخترشناسی از این روش برای تحلیل جریان با سطح آزاد استفاده و مدل‌سازی تغییر شکل‌های شدید استفاده شد [۱۳]. به طور کلی روش SPH، بر پایه خصوصیات تابع دلتای دیراک بنا شده است. در این روش هر یک از ذرات، مشخصاتی را با خود حمل نموده، تغییرات آن‌ها توسط تابع تقریب روی فضای گسسته، به صورت رابطه (۱) و (۲) تعیین می‌شود. انتگرال‌گیری در فضایی محدود به طول هموار سازی انجام گرفته، مشخصات هر نقطه مانند چگالی بر اساس فاصله هر ذره تا ذره مورد نظر با توجه به تابع هموارسازی تعیین می‌شود. نحوه انتگرال‌گیری و تقریب تابع روی سطح  $\Omega$  در روابط (۲-۱) ارائه شده‌اند:

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x) W_{ij} dx \approx \sum_{j=1}^N f(x_j) W_{ij} \cdot \Delta V_j$$

$$= \sum_{j=1}^N f(x_j) W_{ij} \cdot \frac{1}{\rho_j} \cdot (\rho_j \cdot \Delta V_j), \quad \rho_j \cdot \Delta V_j = m_j$$

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

$$W_{ij} = (|x_i - x_j|, h) \quad (2)$$

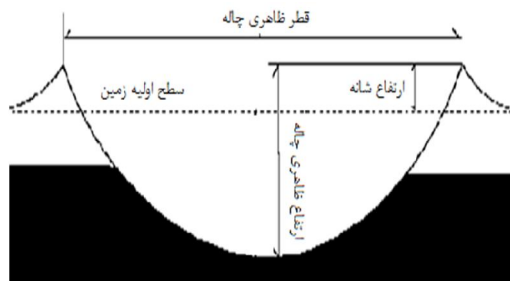
در رابطه فوق،  $W$  تابع هموارسازی و  $h$  شعاع هموارسازی،  $z$  شمارنده ذرات تحت تأثیر اندرکنش با ذره  $i$  و  $x$  موقعیت ذره،  $m$  و  $\rho$  به ترتیب، جرم و چگالی ذره مورد نظر و  $\Delta V_j$  حجم محدود ذره است.

### ۳-۱- تابع هموارسازی

با توجه به دخالت مستقیم تابع هموارسازی در تقریب ذرات، انتخاب تابع هموارسازی، از اهمیت بالایی برخوردار است. تابع هموارسازی باید مثبت، یکه، زوج، فشرده و دارای مشتقات پیوسته باشد. در این مقاله، از تابع هموارسازی اسپلاین مکعبی [۷] ارائه شده در رابطه (۳) استفاده شده است.

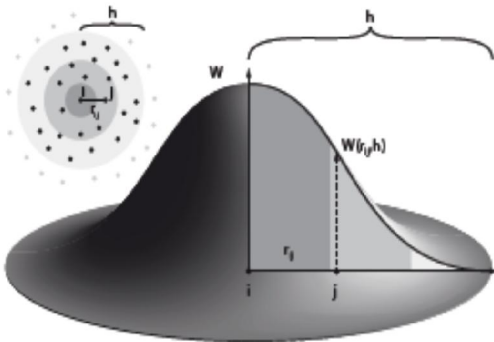
ناشی از انفجار موثر است. خاک‌های چسبنده، دارای مقاومت داخلی نیز می‌باشند و ذرات رسی چسبندگی لازم بین دانه‌های جامد را فراهم می‌نمایند، در حالی که خاک‌های دانه‌ای، فاقد مقاومت داخلی می‌باشند. تغییر شکل خاک در اثر انفجار را می‌توان به صورت دو مرحله الاستیک و پلاستیک در نظر گرفت. در فشارهای پایین رفتار خاک به صورت الاستیک و با افزایش فشار و از بین رفتن مقاومت دانه‌ها، وارد مرحله پلاستیک و گسیختگی می‌شود؛ همچنین تغییر شکل‌هایی نیز ناشی از تراکم خاک بوجود می‌آید [۹]. تغییر شکل‌های ناشی از فشار انفجار، سبب ایجاد چاله‌ای در خاک شده که به آن چاله انفجار گفته می‌شود. خصوصیات هندسی چاله ایجاد شده به عواملی چون مقدار ماده منفجره، عمق مدفون ماده منفجره و خصوصیات خاک وابسته است. انفجار در خاک‌های دانه‌ای را می‌توان در سه قسمت مورد بررسی قرار داد، مرحله آغازین انفجار و شکل‌گیری چاله انفجاری، انتشار امواج ناشی از انفجار در محیط اطراف و تأثیر فشارهای وارد بر سازه‌های مورد تحلیل [۱۰] شکل ۱، نمونه‌ای از چاله انفجاری ایجاد شده در اثر انفجار را نشان می‌دهد.

در گذشته روابط تجربی متفاوتی نیز با توجه به آزمایش‌های انجام شده روی خاک‌ها برای تعیین حداکثر فشار تولیدی ناشی از انفجار و عمق چاله انفجار ارائه شده است [۱۱]. باید توجه داشت که با توجه به خصوصیات متفاوت خاک‌ها، روابط تجربی معمولاً نتایج دقیقی ارائه نمی‌دهند و روابط موجود قابل بسط دادن به خاک‌های متفاوت نیست.



شکل ۱- نمونه ای از چاله انفجاری

احتساب خود ذره مورد نظر، حدود ۲۱ ذره مناسب است. طول هموار سازی اولیه  $h_i^0$  نیز، ۱/۲ برابر فاصله اولیه نقاط یعنی ۰/۱۲ در نظر گرفته می‌شود، و ذرات در دامنه هموارسازی به اندازه  $kh_i^0$ ، مورد بررسی قرار می‌گیرند که مقدار  $k$  برای مساله انفجار برابر با ۲ فرض می‌شود [۱۲]. 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 [۱۵]

$$W(q, h) = \alpha \begin{cases} \frac{2}{3} - q^2 + \frac{q^3}{2} & 0 \leq q < 1 \\ \frac{1}{6}(2-q)^3 & 1 \leq q < 2 \\ 0 & q \geq 2 \end{cases} \quad (۳)$$

در رابطه (۳)،  $q = \frac{x_i - x_j}{h}$  و  $\alpha = \frac{15}{7\pi h^2}$  است.

#### 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 (۴) برای اعمال لزجت مصنوعی [۱۴] استفاده شده است.

$$\pi_{ij} = \begin{cases} \frac{-\alpha c_{ij} \mu_{ij} + \beta \mu_{ij}^2}{\rho_{ij}} & v_{ij} x_{ij} < 0 \\ 0 & v_{ij} x_{ij} > 0 \end{cases} \quad (۴)$$

در رابطه (۴)،  $\mu_{ij} = \frac{h_{ij} v_{ij} x_{ij}}{|x_{ij}|^2 + \theta^2}$ ،  $\rho_{ij}$  و  $c_{ij}$  به  $h_{ij}$ ، ترتیب، میانگین چگالی، سرعت صوت و طول هموارسازی دو ذره و  $v_{ij} = v_i - v_j$  بردار سرعت ذره است؛ همچنین  $\alpha$  و  $\beta$  به ترتیب، ۱، ۱۰ و  $0.1h_{ij}$  در نظر گرفته شده است.

#### ۶-۱- معادلات حرکت

با توجه به شدت و سرعت بالای پدیده انفجار، این پدیده به‌صورت بی‌دررو در نظر گرفته شده، از معادلات ناویر-استوکس برای مدل‌سازی استفاده می‌شود، با این تفاوت که در خاک با توجه به وجود مقاومت برشی، در معادلات از تانسور تنش به جای فشار استفاده می‌شود [۷] معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی مورد استفاده در روابط (۶) تا (۸) ارائه شده‌اند.

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \cdot \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta} \quad (۶)$$

$$\frac{Dv^\alpha}{Dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma^{\alpha\beta}}{\partial x^\beta} \quad (۷)$$

$$\frac{De}{Dt} = -\frac{\sigma^{\alpha\beta}}{\rho} \cdot \frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\beta} \quad (۸)$$

در روابط فوق  $\sigma$ ،  $t$ ،  $\rho$ ،  $e$  و  $v$  به ترتیب، تنش، زمان، چگالی، انرژی داخلی و بردار سرعت می‌باشند. تانسور تنش از دو قسمت فشار همسانگرد و تنش برشی تشکیل شده است.

#### ۵-۱- طول هموارسازی

تعداد نقاط در نظر گرفته شده برای تقریب‌های انتگرالی در روش SPH، به‌صورت 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، نیرو به‌خوبی منتقل نمی‌شود؛ در صورتی که این مقدار بزرگ فرض شود، حجم عملیات نیز بالا رفته و ممکن است، باعث ناپایداری عددی گردد. در مسائل انفجار با توجه به غیرهمگنی و نامنظمی شدید ذرات، این مقدار همان‌طور که در رابطه (۵) نشان داده شده است، در فضا و زمان متغیر فرض می‌شود. به عبارت دیگر، طول هموارسازی با تغییرات چگالی ذرات با زمان، تغییر می‌نماید [۷].

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{h}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} \quad (۵)$$

با توجه به تاثیر تعداد نقاط مورد بررسی در تابع وزن روی سرعت و دقت محاسبات، برای حالت دو بعدی با

### ۷-۱- مدل مقاومتی خاک

برای مدل مقاومتی خاک از معیار ون مایسز استفاده می‌شود. در این مدل از ویسکوزیته آب و هوای داخل حفره‌های خاک صرف نظر شده است، در نتیجه تمام برش ایجاد شده توسط دانه‌های جامد خاک تحمل می‌شود.

$$f = \sqrt{J_2} - \alpha I_1 - k = 0 \quad (18)$$

در رابطه فوق  $\alpha$  و  $k$  پارامترهای وابسته به خصوصیات خاک،  $I_1$  نامتغیر اول تنش و  $J_2$  نامتغیر تنش برشی می‌باشد.

برای استفاده از معیار تسلیم ون مایسز، از روش بازگشت شعاعی استفاده شده است. در این روش ابتدا تنش‌های کاهش یافته با شرط تسلیم مورد مقایسه قرار گرفته، در صورتی که مقدار آن بیشتر از شرط تسلیم باشد، ماده تسلیم وارد مرحله پلاستیک شده است، در این حالت هر یک از تنش‌ها در پارامتر تصحیح ضرب شده، به سطح تسلیم باز می‌گردد.

### ۲- روش تحقیق

#### ۲-۱- الگوریتم برنامه

برنامه‌نویسی برای حل معادلات انفجار در خاک توسط برنامه فترن انجام گرفته است. ابتدا مکان قرارگیری نقاط، فاصله بین آن‌ها و مشخصات اولیه خاک و مواد منفجره مانند، چگالی، سرعت اولیه مدول برشی و... به صورت ورودی گرفته می‌شود. سپس معادلات حرکت، با در نظر گرفتن لزجت مصنوعی و نیروی پنالتی و معادلات حالت ارائه شده برای خاک 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، توسط روش عددی رانگ کوتا حل می‌گردند. در مراحل زمانی بعدی، ابتدا طول هموارسازی بر اساس چگالی نقاط به‌روزرسانی شده، سپس معادلات حرکت به طریقی که گفته شد، مجدداً حل می‌شوند. همچنین برای اعمال شرایط مرزی از دو نوع ذرات مجازی استفاده می‌شود. در این روش، یک نوع از ذرات مجازی دقیقاً روی مرز قرار گرفته و برای جلوگیری از نفوذ ذرات به یکدیگر نیروی دافع وارد می‌نمایند و ذرات مجازی نوع دوم که درست قرینه ذرات داخلی حقیقی که فاصله آن‌ها تا مرز کمتر از

$$\sigma^{\alpha\beta} = -p\delta^{\alpha\beta} + \tau^{\alpha\beta} \quad (9)$$

قسمت اول معادله (۹)، از طریق معادله حالت مربوط و قسمت دوم با توجه به نرخ تغییرات تنش برشی محاسبه می‌شود.

$$\tau^{\alpha\beta} = G. \left( \varepsilon^{\alpha\beta} - \frac{1}{3} \delta^{\alpha\beta} \varepsilon^{\gamma\gamma} \right) + \tau^{\alpha\gamma} R^{\beta\gamma} + \tau^{\gamma\beta} R^{\alpha\gamma} \quad (10)$$

$$\varepsilon^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\beta} + \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\alpha} \right) \quad (11)$$

در روابط فوق  $G$  مدول برشی،  $\tau^{\alpha\beta}$  نرخ تغییرات تنش برشی و  $\varepsilon^{\alpha\beta}$  نرخ تغییرات کرنش و  $R$  نرخ چرخش است.

با استفاده از معادلات بقای ارائه شده، معادلات حرکت برای خاک به صورت روابط (۱۲) تا (۱۵) بازنویسی می‌گردند.

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (12)$$

$$\frac{Dv_i}{Dt} = - \sum_{j=1}^N m_j \left( \frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (13)$$

$$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left( \frac{\rho_j}{\rho_i^2} + \frac{\rho_i}{\rho_j^2} \right) (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} W_{ij} + \frac{1}{\rho_i} \tau_i^{\alpha\beta} \varepsilon_i^{\alpha\beta} \quad (14)$$

$$\frac{Dx_i^\alpha}{Dt} = v_i^\alpha \quad (15)$$

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

معادلات حرکت برای تانسور نرخ کرنش و دوران نیز به صورت روابط (۱۶-۱۷) بازنویسی می‌شوند.

$$\varepsilon_i^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} (v_j^\alpha - v_i^\alpha) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\alpha} \quad (16)$$

$$R_i^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} (v_j^\alpha - v_i^\alpha) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} - (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\alpha} \quad (17)$$

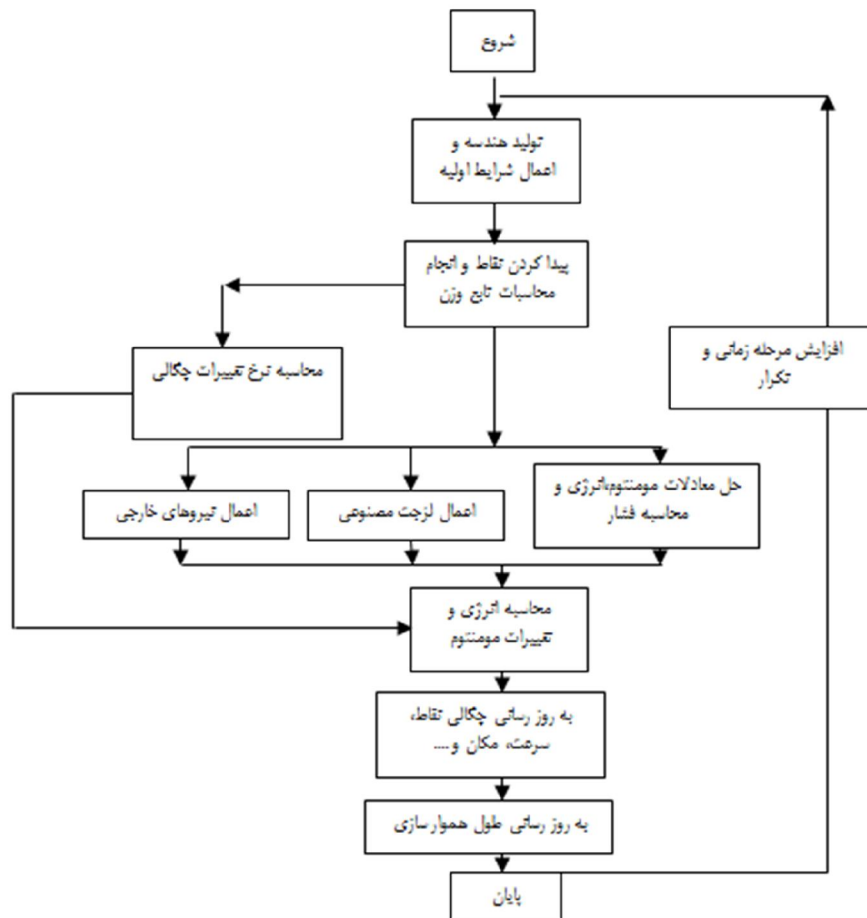
طول هموارسازی است، تعریف می‌شوند. فشار و چگالی آن‌ها درست به اندازه ذره حقیقی متناظرشان است و سرعت آن‌ها قرینه آینه‌ای سرعت ذرات حقیقی متناظر آن‌ها نسبت به مرز است. در مساله انفجار، استفاده از هر دو نوع ذره مجازی الزامی است [۷]. شکل ۳ الگوریتم برنامه را نشان می‌دهد.

### ۲-۲- حل مثال عددی انفجار در خاک با روش SPH

مدل مورد نظر انفجار سطحی روی خاک ماسه‌ای و خشک، فشار تولیدی، چاله انفجار و ... را بررسی می‌نماید. ماده منفجره تی ان تی با ابعاد ۴\*۴\*۶، ۶\*۶\*۱۰ و ۱۰\*۱۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۴، شماتیکی از مدل مورد بررسی و مدل SPH تهیه شده، ارائه شده است. تعداد

### ۲-۳- معادلات حالت

در روش‌های عددی برای تعیین فشار، از معادلات حالت استفاده می‌شود. برای تعیین فشار انفجار، از معادله حالت JWL استفاده می‌شود (رابطه ۱۹) [۷].



شکل ۳- الگوریتم حل برنامه

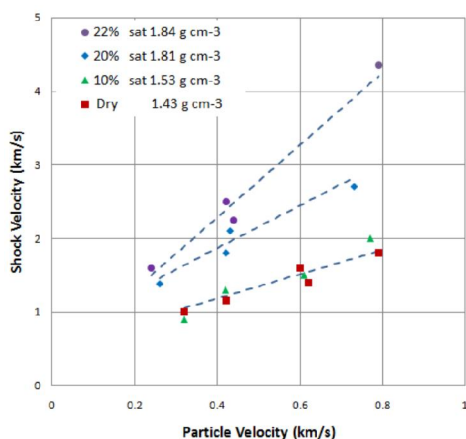
$$a_0 = \rho_0 \cdot C^2 \quad (22)$$

$$b_0 = a_0 [1 + 2(S - 1)] \quad (23)$$

$$c_0 = a_0 [2(S - 1) + 3(S - 1)^2] \quad (24)$$

مقادیر  $C$  و  $S$  با توجه به منحنی Hugoniot و با توجه به رابطه  $U_S = C + S \cdot U_P$  تعیین می‌شوند.  $U_S$  سرعت شوک و  $U_P$  سرعت ذرات است. نمونه‌ای از این منحنی در شکل ۵ ارائه شده است.

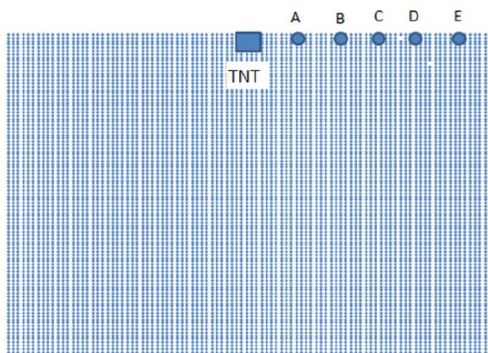
سرعت اولیه انفجار به عنوان شرایط اولیه مسئله به ذرات ماده منفجره TNT داده شده است.



شکل ۵- نمودار سرعت موج شوک-سرعت ذرات [۴]

#### ۴-۲- اندرکنش بین خاک و ماده منفجره

برای انتقال اطلاعات بین محیط‌های متفاوت نیاز به در نظرگیری اندرکنش بین آن‌ها است. در سایر روش‌های عددی از جمله روش اجزای محدود، تصحیح اندرکنش با توجه به مش‌بندی به سادگی صورت می‌گیرد، ولی در روش SPH و در مدل‌سازی ضربات شدید مانند انفجار، ممکن است، ذرات از یکدیگر فاصله گرفته و دیگر اندرکنش نداشته باشند و یا امکان تداخل ذرات در یکدیگر وجود داشته باشد. در این مقاله برای در نظر گرفتن اندرکنش از روش دافع [۱۴] استفاده شده است. در این روش بین ذرات از محیط‌های متفاوت، نیروی دافع وارد گردیده، از نفوذ ذرات به یکدیگر جلوگیری می‌کند. برای این منظور، پارامتر  $pe$  مطابق رابطه (۲۵) تعریف می‌شود و اگر فاصله ذرات کم شود، نیروی دافع مطابق رابطه (۲۶) به ذرات اعمال می‌شود.



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

$$p = A \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_1}\right) e^{-\left(\frac{R_1}{\eta}\right)} + B \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_2}\right) e^{-\left(\frac{R_2}{\eta}\right)} + \omega \eta \rho_0 e_0 \quad (19)$$

در رابطه فوق  $\eta = \frac{\rho}{\rho_g}$  (نسبت چگالی گاز ماده منفجره به چگالی گاز اولیه)  $A, B, R_1, R_2$  و  $\omega$  ثابت‌های مواد منفجره و  $e_0$  انرژی داخلی است. مقادیر استفاده شده برای ماده منفجره TNT در مدل‌سازی در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار  $\eta$  در ابتدا برابر با یک در نظر گرفته شده که در طول حل مقدار آن به  $0.06$  کاهش می‌یابد.

برای تعیین فشار خاک و تعیین بخش اول معادله تنش در این مقاله، از معادله حالت Mie-Grunesien استفاده شده است. معادله حالت مورد نظر در رابطه (۲۰) ارائه شده است:

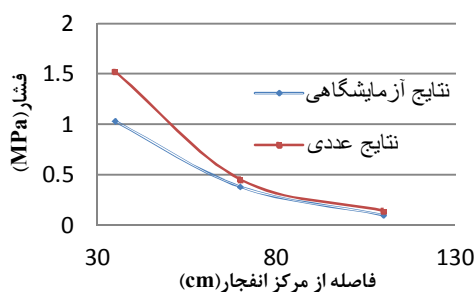
$$P(\rho, e) = (1 - 0.5\Gamma\mu)P_H(\rho) + \Gamma\rho e \quad (20)$$

در رابطه فوق  $\Gamma$  پارامتر مرتبط با خصوصیات خاک،  $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$  همچنین  $e$  انرژی داخلی خاک و برابر  $4/17 * 10^{-4}$  Mpa در نظر گرفته شده است. و  $P_H$  از رابطه (۲۱) بدست می‌آید:

$$P_H = \begin{cases} a_0\mu + b_0\mu^2 + c_0\mu^3 & \mu > 0 \\ a_0\mu & \mu < 0 \end{cases} \quad (21)$$

ثابت‌های ارائه شده در رابطه فوق با استفاده از منحنی Hugoniot تعیین می‌شوند. این منحنی مکان هندسی نقاطی است که بوسیله تراکم در اثر موج انفجار ناشی می‌شود و می‌تواند خواص ماده را در مقایسه با منحنی تنش - کرنش برآورده سازد.

مثال‌های دیگر این پژوهش فرض شده است. خلاصه این نتایج در شکل ۶، با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی مقایسه شده است و دقت مناسبی را از خود ارائه می‌نماید. مطابق شکل ۶، نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با روش بدون شبکه مقادیر دست بالاتری نسبت به نتایج آزمایشگاهی ارائه می‌کند و با افزایش فاصله از مرکز انفجار نتایج همگرا می‌گردند؛ همچنین روند تشکیل چاله انفجاری مناسب است که هدف اصلی این پژوهش است.



شکل ۶- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی عددی

$$pe = \frac{h_i + h_j}{2r_{ij}} \quad (25)$$

اگر مقدار  $pe$  بیشتر از یک باشد، بدان معناست که دو ذره به یکدیگر بسیار نزدیک شده‌اند و نیروی دافع جهت جلوگیری از نفوذ ذرات به یکدیگر وارد می‌شود.

$$PB_{ij} = \bar{P}(pe^{n1} - pe^{n2}) \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2} \quad (26)$$

در رابطه فوق  $PB$  نیروی دافع و  $\bar{P}$ ،  $n1$  و  $n2$  ضرایبی هستند که با توجه به ماهیت مساله تعیین می‌گردند و برای مدل سازی انفجار به ترتیب،  $10^5$ ،  $12$  و  $4$  فرض شده‌اند.

### ۳- نتایج و بحث

برای اطمینان از روند تشکیل چاله انفجاری، از نتایج آزمایشگاهی کمک گرفته شده است [۴]. مطابق آزمایش انجام گرفته، ماده منفجره C4 به ابعاد  $2 \times 6/4$  سانتی متر در عمق ۳ سانتی‌متری خاک خشکی با چگالی  $1802 \text{ kg/m}^3$  با ابعاد  $70 \times 62/4$  سانتی متر قرار داده شده و فشارها در فواصل ۳۰، ۷۰ و ۱۱۰ سانتی متری از مرکز انفجار، مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات ماده منفجره C4 در جدول ۳ ارائه شده، بقیه پارامترها مانند

جدول ۱- پارامترهای معادله حالت برای ماده منفجره TNT (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                          | $3712 \times 10^{12}$ | $3311 \times 10^9$ | ۴/۱۵  | ۰/۹۵  | ۰/۳      | ۶۹۳۰                    | $429 \times 10^6$ |

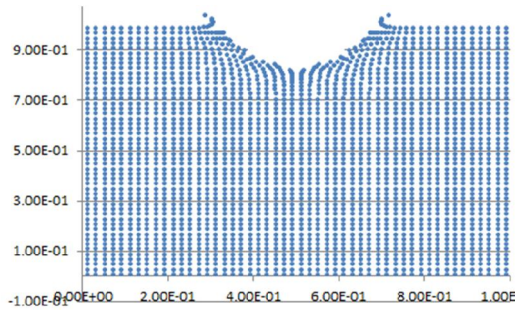
جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده برای خاک

| $\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $C_0$ ( $\frac{m}{s}$ ) | $\Gamma$ | $G$ (MPa) | S   | $\alpha$ | k   | خاک   |
|-------------------------------|-------------------------|----------|-----------|-----|----------|-----|-------|
| ۱۴۵۰                          | ۱۴۴۰                    | ۰/۱۱     | ۶۳/۵۸     | ۱/۶ | ۰/۲۵     | ۰/۲ | ۱ خاک |
| ۲۲۰۰                          | ۱۶۱۴                    | ۰/۱۱     | ۲۴۰       | ۱/۵ | ۰/۲۵     | ۰/۲ | ۲ خاک |

جدول ۳- پارامترهای معادله حالت برای ماده منفجره C4 (JWL)

| A (Mpa) | B (Mpa) | $R_1$ | $R_2$ | $\omega$ | $\rho_0 e_0$ (Mpa) |
|---------|---------|-------|-------|----------|--------------------|
| ۶۰۹۹۷۰  | ۱۲۹۵۰   | ۴/۵   | ۱/۴   | ۰/۲۵     | ۹۰۰۰               |



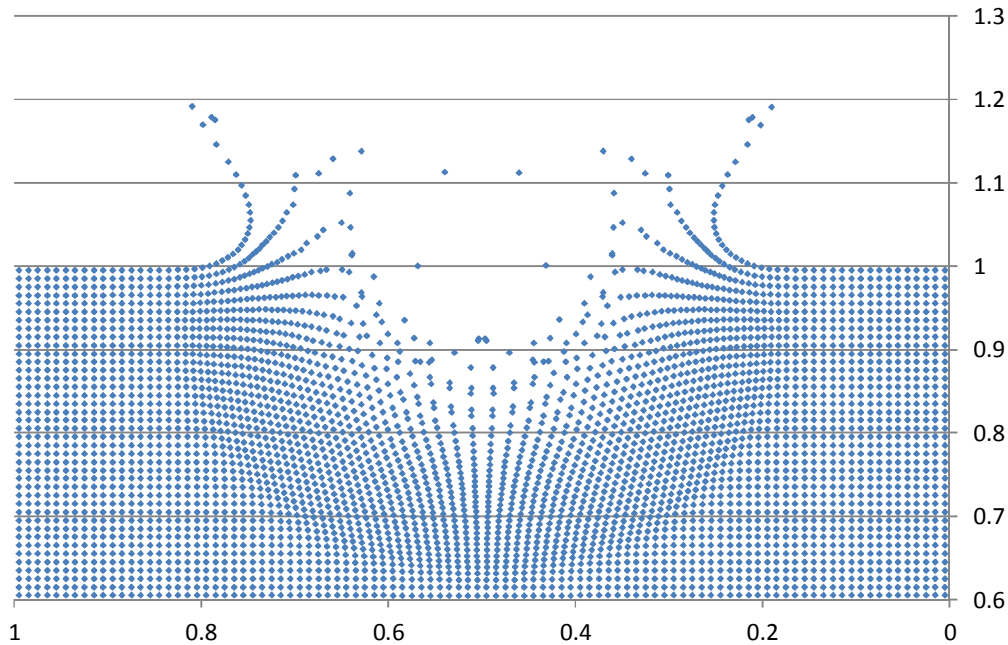


شکل ۷- تشکیل چاله انفجار در زمان ۲۰۰ میکروثانیه

جدول ۴- قطر و عمق چاله انفجاری ایجاد شده در خاک ۱

| ابعاد ماده منفجره (cm) | قطر چاله (cm) | عمق چاله (cm) |
|------------------------|---------------|---------------|
| ۴*۴                    | ۳۸            | ۱۵            |
| ۶*۶                    | ۵۲            | ۲۴            |
| ۱۰*۱۰                  | ۵۸            | ۳۲            |

پس از انجام مدل‌سازی و تحلیل، می‌توان تغییر شکل‌های نقاط مختلف، نمودار تغییر مکان- زمان، نمودار فشار- زمان و... را تعیین نمود. شکل ۷ نمونه‌ای از مدل‌سازی انفجار، تغییر مکان نقاط و ایجاد چاله انفجاری را برای ماده منفجره‌ای به ابعاد ۴\*۴ و در زمان ۲۰۰ میکرو ثانیه پس از انفجار را ارائه می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، در این زمان، چاله انفجاری شکل گرفته و اطراف چاله انفجار، خاک وارد مرحله پلاستیک شده و با گذشت زمان، گسیختگی‌های خاک بیشتر می‌شوند. شکل ۸، چاله انفجار ایجاد شده و نحوه گسیختگی خاک را از نمایی نزدیک تر ارائه داده است. تعیین موقعیت نقاط در هر لحظه از مزایای این روش نسبت به برخی دیدگاه‌های دیگر عددی مانند روش‌های معمول در دیدگاه اولری است. جدول ۴، قطر و ارتفاع چاله انفجاری را برای وزن‌های مختلف ماده منفجره ارائه داده است.



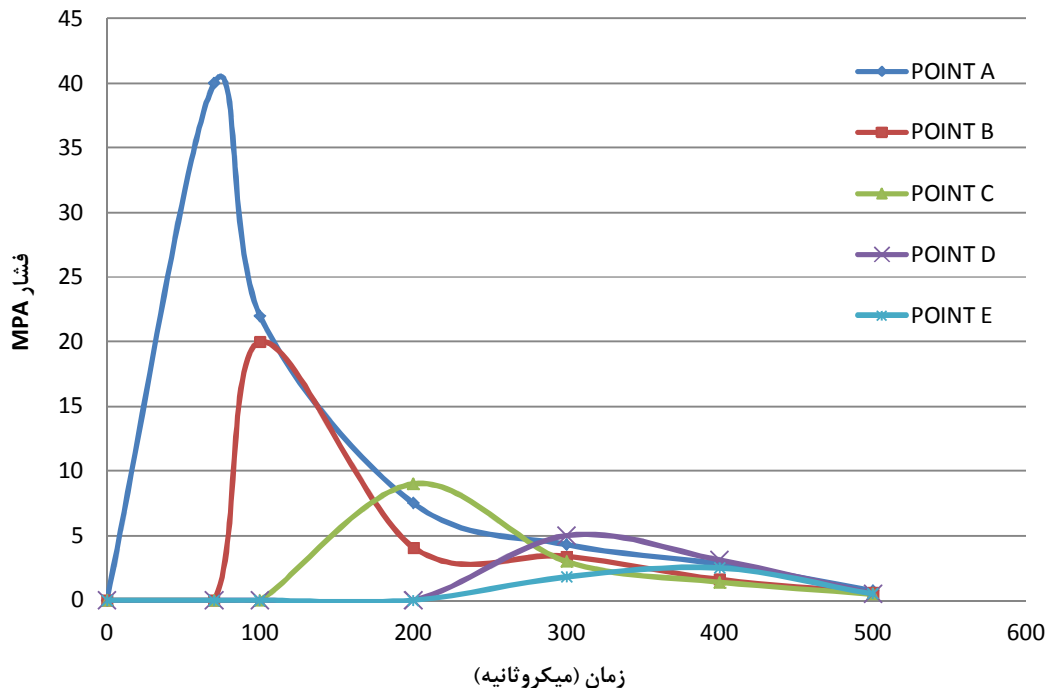
شکل ۸- نحوه ایجاد چاله انفجاری و گسیختگی خاک

نقطه به فواصل ۵ سانتی متری از یکدیگر تعیین شده (نقاط A تا E) و تاریخچه فشار ناشی از انفجار در این نقاط

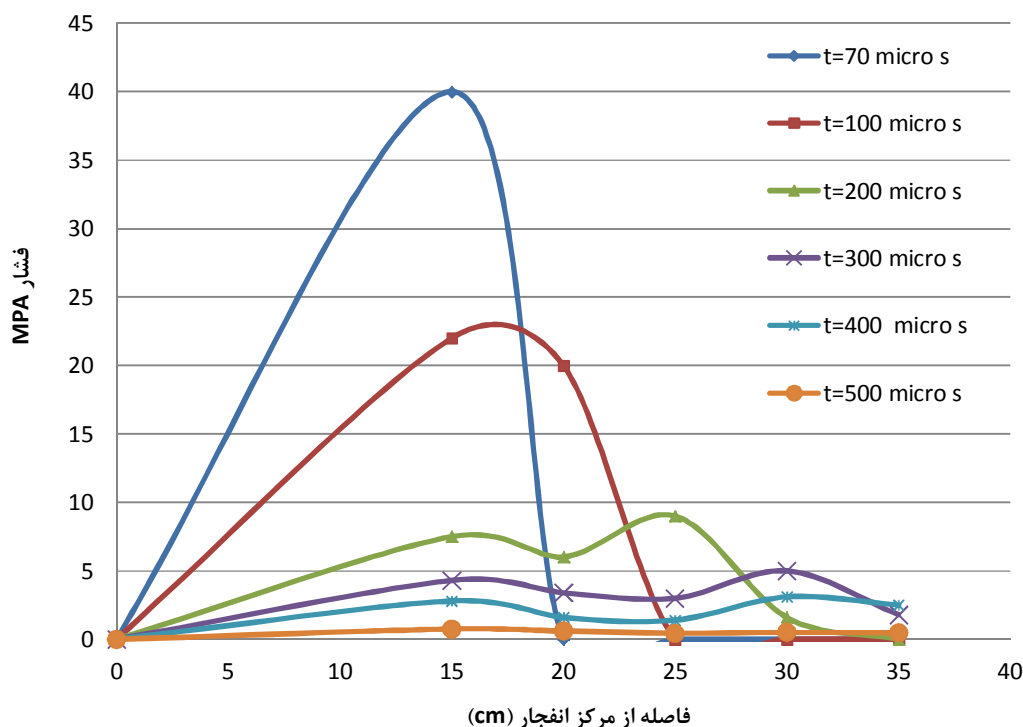
برای مطالعه دقیق‌تر، منحنی‌های فشار- زمان برای برخی نقاط مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور، ۵

شکل ۱۰ 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 ۲۰۰ میکروثانیه، موج ناشی از انفجار از نقاط A و B عبور نموده، به نقطه C رسیده است. در این زمان، فشار نقطه C به مقدار پیک خود رسیده (حدود ۹ مگا پاسکال) 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 حدود زمان ۳۰۰ میکروثانیه اتفاق می‌افتد و حداکثر فشار ۵ مگا پاسکال را ارائه می‌نماید. با توجه به اینکه نوع ماده منفجره و مشخصات خاک در مثال‌های حل شده و مساله صحت سنجی متفاوت است، تفاوت ۵۰ درصدی بین حداکثر فشار بدست آمده در فاصله ۳۰ سانتی متری انفجار در مثال حل شده، مساله صحت سنجی منطقی به نظر می‌رسد.

بررسی می‌شود (شکل ۹). مطابق نتایج به‌دست آمده، هرچقدر فاصله نقاط از مرکز انفجار بیشتر باشد، موج ناشی از انفجار دیرتر به آن نقطه می‌رسد؛ همچنین مقدار فشار پیک تولید شده نیز، با افزایش فاصله کاهش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، منحنی فشار پس از رسیدن به نقطه پیک، به‌سرعت کاهش یافته و زایل می‌شود. با بررسی نمودارهای فشار-زمان، مشاهده می‌شود که زمان رسیدن به فشار حداکثر برای نقطه A، حدود ۷۰ میکروثانیه است که این زمان برای نقطه E به حدود ۴۰۰ میکروثانیه افزایش می‌یابد؛ همچنین از روی منحنی فشار زمان می‌توان مدت اثر فشار وارده بر هر نقطه و ضربه ایجاد شده توسط موج را نیز تعیین نمود. 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 در فاصله ۱۵ سانتی‌متری انفجار تعیین کرد، درحالی‌که در سایر روش‌های عددی و همچنین در آزمایشگاه با توجه به ضربه شدید و اعوجاج بالای شبکه‌ها، این امکان وجود ندارد.



شکل ۹- منحنی فشار-زمان برای نقاط A (۱۵ سانتی متری انفجار) تا E (۳۵ سانتی متری انفجار)



شکل ۱۰- نمودار فشار تولیدی برحسب فاصله از مرکز انفجار

ذرات خاک می‌تواند در پیش بینی مسایل انفجار، با اهمیت باشد.

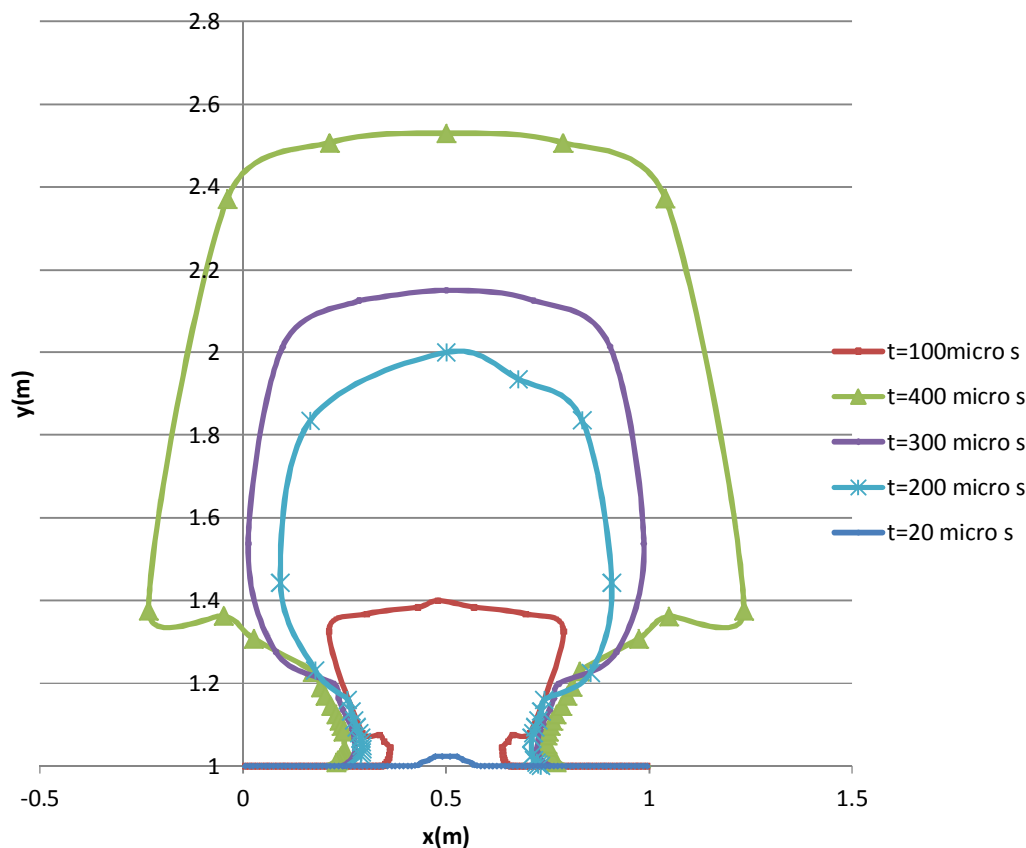
#### ۴- بررسی چاله انفجار در خاک دو لایه

در این قسمت انفجار در خاکی دو لایه مورد بررسی قرار گرفته است. ضخامت لایه فوقانی متغیر فرض شده، جنس آن از نوع خاک ۱ و جنس لایه پائینی از خاک ۲ است. ضخامت لایه بالایی از ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر متغیر فرض شده، ابعاد ماده منفجره ۶\*۶ سانتی‌متر است. قطر و ارتفاع چاله انفجاری ایجاد شده در هر مورد تحلیل و مورد بررسی قرار گرفته، نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است.

با توجه به نتایج بدست آمده و با توجه به اینکه لایه زیرین خاک دارای مقاومت بیشتری است، مشاهده می‌شود که تغییر ضخامت لایه فوقانی تاثیر چندانی بر قطر چاله ایجاد شده ندارد و قطر چاله انفجاری تا حدودی مستقل از ضخامت لایه است؛ در حالی که هر چه ضخامت لایه فوقانی

مزیت روش بدون شبکه نسبت به سایر دیدگاه‌های عددی مانند روش اولری در تعیین جابه‌جایی‌های نقاط در هر لحظه است، به همین دلیل می‌توان با در نظر گرفتن تعدادی نقطه در سطح خاک، جابه‌جایی نقاط در زمان‌های متفاوت را به دست آورد. بدین ترتیب با تعیین موقعیت نقاط روی سطح خاک در هر زمان می‌توان پروفیل سطح خاک را نیز رسم نمود. شکل ۱۱ تغییر سطح خاک را در زمان‌های مختلف با روش بدون شبکه SPH نمایش می‌دهد.

مطابق این شکل‌ها، در زمان‌های کمتر از ۲۰ میکرو ثانیه، موج انفجار هنوز به سطح خاک نرسیده و تغییر مکان سطح خاک صفر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین تغییرات در سطح خاک، در بالای مرکز انفجار رخ داده، با افزایش فاصله از مرکز انفجار، تغییرات سطح خاک نیز کاهش می‌یابد. برای مثال در ۲۰۰ میکروثانیه پس از انفجار، بیشترین تغییر مکان سطح خاک در روش بدون شبکه به حدود ۲ متر می‌رسد. تغییر مکان عمودی



شکل ۱۱- منحنی تغییرات سطح خاک ناشی از انفجار با زمان

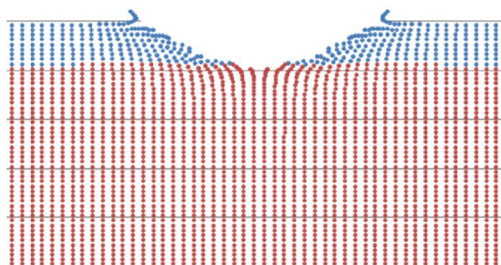
اندرکنش بین ماده منفجره و خاک، با استفاده از روش رانگ کوتاه حل می‌گردند. برای معتبرسازی مدل‌سازی انجام شده، مقادیر فشار بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. پس از برنامه‌نویسی، یک مثال عددی در مورد انفجار در خاک با مقادیر مختلف ماده منفجره، مورد بررسی قرار گرفته و چاله‌های انفجاری از لحاظ عمق و قطر دهانه چاله بررسی شده‌اند؛ همچنین منحنی‌های فشار-زمان نیز استخراج و ارائه گردیده 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، جواب‌های نادرست ارائه می‌گردند. طول هموارسازی یکی از پارامترهای مهم در روش بدون شبکه SPH است.

کمتر باشد، عمق چاله نیز کمتر خواهد بود. در حقیقت سختی بالاتر خاک در لایه پایینی، باعث کاهش عمق چاله انفجاری شده است. با افزایش ضخامت لایه فوقانی که در این مثال ضعیف تر از لایه پایینی است، عمق چاله انفجاری نیز افزایش می‌یابد. شکل ۱۲، نمونه‌ای از چاله انفجاری ایجاد شده برای خاک دو لایه را نمایش می‌دهد.

### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از زبان برنامه‌نویسی فترن، انفجار در خاک با استفاده از روش عددی بدون شبکه SPH مدل‌سازی شده است. بدین منظور بر اساس الگوریتم ارائه شده، معادلات حرکت در محیط خاک با در نظر گرفتن

انفجاری در خاک دو لایه، بیانگر این نکته است که قطر چاله انفجاری ایجاد شده به مشخصات لایه فوقانی وابسته بوده، مستقل از مشخصات لایه پایینی خاک عمل می‌کند، حال آن که ارتفاع چاله انفجاری ایجاد شده به مشخصات خاک لایه پایینی وابسته بوده، با تغییر ضخامت لایه، عمق چاله نیز تغییر می‌نماید.



شکل ۱۲- چاله انفجاری ایجاد شده در خاک دو لایه

## ۶- مراجع

- [1] Hans U M.(1999) Review: Hydrocodes for structure response to underwater explosion. J Shock VIB 6: 81-96.
- [2] Luccioni MB, Ambrosini RD (2006) Craters produced by underground explosion. Mecanica Com putional XXV:1603-1614.
- [3] Wei XY, Zhao ZY, Gu j (2009) Numerical simulation of rock mass damage induced by rock mass explosion. World Scientific Publishing 46: 1206-1213.
- [4] Jichong An (2010) Soil behavior under blast loading. Ph.D. thesis, University of Nebraska.
- [5] De A (2012) Numerical simulation of surface explosion over dry, cohesionless soil. Comput Geotech 43:72-79.
- [6] Nagy NM (2015) Numerical evaluation of cratores produced by explosion on the soil surface. ACTA Phys Pol A 128.
- [7] Liu GR, Liu MB (2003) Smoothed particle hydrodynamics: A meshfree particle method. World Scientific Publishing.
- [8] Cole RH (1965) Under water explosions. Princtone university press and dover publication, New York.
- [9] Wang Z, Lu Y, Bai C (2008) Numerical analysis of blast-induced liquefaction of soils. Comput Geotech 35:196-209.
- [10] Wang Z, Lu,Y, Hao H ,Chong K (2005) A full coupled numerical analysis approach for buried structures subjected to subsurface blast. Comput Struct 83:339-356.
- [11] Baker WE, Westine PS, Dodge FT (1991) Similarity methodes in engineering dynamics. Comput Fluids.
- [12] Liu MB, Liu GR, Zong Z, Lam K (2003) Computer imulation of high explosive explosion using smoothed particle hydrodynamics. Methodology Comput Fluids 32: 305-322.
- [13] Frang J, Parriaux A, Rentschler M Ancy C (2009) Improved SPH Methods for simulating free surface flow of viscose fluids. Appl Numer Math 59(2): 251-71.

جدول ۵- قطر و عمق چاله انفجاری در خاک دو لایه

| ضخامت لایه فوقانی (cm) | عمق چاله انفجاری (cm) | قطر چاله انفجاری (cm) | ابعاد ماده منفجره (cm) |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| ۱۰                     | ۱۸                    | ۵۲                    | ۶×۶                    |
| ۱۵                     | ۲۰                    | ۵۲                    | ۶×۶                    |
| ۲۰                     | ۲۲                    | ۵۴                    | ۶×۶                    |

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 خاک، از روش دافع 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، از نفوذ و تداخل ذرات به یکدیگر جلوگیری می‌نماید. ضرایب مورد استفاده برای در نظر گرفتن اندرکنش با توجه به نوع مساله متفاوت است. 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. 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 کرد. بررسی و مدل‌سازی چاله‌های

[15] Kordilla J (2014) Flow and transport in saturated and unsaturated fractured porous media: Development of particle based modelling approach. Ph.D. thesis, Universitat.

[14] Crespo AJ (2008) Application of the smoothed particle hydrodynamics model physics to free-surface hydrodynamics. Ph.D. thesis, Universidade de vigo Departamento de fisica Aplicada.