

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

رساله دکتری مهندسی ژئوتکنیک

مدلسازی عددی انفجار در خاک‌های دانه‌ای  
با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار

نگارنده

بهنام کریمی فرزقی

استاد راهنما

دکتر رضا نادری

شهریور ۱۳۹۶

شماره: ۹۶/۲۱۹  
 تاریخ: ۹۶/۸/۶  
 ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی  
 صورت جلسه دفاع از رساله دکتری (Ph.D)  
 رقم شماره ۱۲

بدینوسیله گواهی می شود آقای بهنام کریمی فرزقی دانشجوی دکتری رشته عمران/ ژئوتکنیک به شماره دانشجویی ۹۰۲۲۴۵۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۰... در تاریخ ۹۶/۶/۱۹ از رساله خود با عنوان: مدل سازی عددی انفجار در خاک های دانه ای با روش هیدرودینامیک ذرات هموار دفاع و با اخذ نمره ... به درجه ... نائل گردید.

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰   
 ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷   
 ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵   
 د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد   
 ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
	دکتر نادری	استاد/ اساتید راهنما	دانشیار	
	دکتر	مشاور/ مشاورین		
	دکتر حداد	استاد خارجی		
	دکتر توکلی	استاد مدعو داخلی / خارجی	استادیار	
	دکتر کلات جاری	استاد مدعو داخلی / خارجی	دانشیار	
	دکتر گلیان	سرپرست ( نماینده ) تحصیلات تکمیلی دانشکده	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:  
 ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم بعمل آید.

رئیس دانشکده و رئیس هیأت داوران:  
 تاریخ و امضاء

تقدیم به پدر و مادر فداکارم  
و به تمامی آزاد اندیشانی که عقل و منطق را سر لوحه خویش قرار داده و هدفی جز  
پیشرفت و سعادت جامعه ندارند.

دعوی دانش بود صائب به نادانی دلیل  
هر که نادان می شمارد خویش را داناتر است

# تعهد نامه

اینجانب **بهنام کریمی فرزقی** دانشجوی دوره دکتری عمران رشته **مهندسی ژئوتکنیک** دانشکده **عمران** دانشگاه **شاهرود** نویسنده پایان نامه **مدل سازی عددی انفجار در خاک های دانه ای با استفاده از روش**

**هیدرودینامیک ذرات هموار** تحت راهنمایی جناب آقای دکتر **رضا نادری** متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه شاهرود» و یا «Shahrood University» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

## مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

بررسی رفتار خاک ها در مقابل بارهای انفجاری، یکی از مسائل مهم در مهندسی عمران، معدن، تونل سازی و سازه های نظامی می باشد. پدیده انفجار، در فاصله زمانی بسیار کوتاهی اتفاق افتاده و موج شوک بزرگی بسته به نوع و مقدار مواد منفجره تولید می نماید. بسته به محیط انفجار، فشارهای تولیدی و خصوصیات انفجار می تواند متفاوت باشد. انفجار در آب باعث ایجاد حباب انفجار و انفجار در خاک سبب ایجاد چاله انفجاری می گردد. در این میان، بررسی انفجار در خاک با توجه به ناشناخته بودن خصوصیات خاک ها و گستردگی انواع خاک ها، مشکل تر از بررسی انفجار در سایر محیط های معمول می باشد. برای بررسی پدیده انفجار می توان از روش های آزمایشگاهی و یا مدلسازی عددی استفاده نمود. با توجه به اینکه مدل های آزمایشگاهی می توانند خطرناک باشند و ایجاد شرایط کنترل شده برای انجام آزمایش پرهزینه و مشکل است، برای بررسی این پدیده از مدلسازی های عددی استفاده می شود.

در میان روش های عددی، روش های بدون شبکه توانایی بهتری در مدلسازی مسائل ضربه و انفجار را دارا می باشند. یکی از روش ها برای مدلسازی ضربه و انفجار روش عددی بدون شبکه هیدرودینامیک ذرات هموار می باشد. در این رساله با استفاده از این روش و با استفاده از زبان برنامه نویسی فترن، پدیده انفجار در خاک کد نویسی و مورد تحلیل قرار گرفته و به بررسی چاله های انفجاری در خاک های یک لایه، خاک دو لایه، شیروانی خاکی و انفجار روی خاک اشباع زیر آب پرداخته شده است. نتایج بدست آمده با این روش، با نتایج آزمایشگاهی مطابقت داشته و مقدار تفاوت ناچیز آن به خاطر اتلاف انرژی می باشد. کد نوشته شده در این رساله می تواند با کمی تغییر برای مدلسازی انفجار در محیط های متفاوت مورد استفاده قرار گیرد.

**کلمات کلیدی: انفجار در خاک دانه ای، روش های عددی بدون**

**شبکه، روش هیدرودینامیک ذرات هموار**

مقالات مستخرج از پایان نامه

۱. مدل سازی عددی انفجار در آب با استفاده از روش بدون شبکه ذرات هموار ساز، مجله علوم و

فن آوری های پدافند نوین، تهران، تابستان ۹۶

۲. مدلسازی عددی چاله انفجار در خاک با استفاده از روش بدون شبکه ذرات هموار ساز، مجله

مکانیک سازه ها و شاره ها، شاهرود، تابستان ۹۶

۳. مقایسه روش عددی بدون شبکه SPH و دیدگاه های اولری و لاگرانژی در مدلسازی انفجار در

آب، مجله علوم و فن آوری های پدافند نوین، تهران، تابستان ۹۴

## فهرست مطالب

و	چکیده
۱	۱- مقدمه
۲	۱-۱- تعریف تحقیق
۳	۲-۱- اهداف و ضرورت
۴	۳-۱- روش تحقیق و فرضیات
۵	۴-۱- فصل بندی
۷	۲- روش های عددی بدون شبکه
۸	۱-۲- روش های عددی
۹	۱-۱-۲- دیدگاه لاگرانژی
۱۱	۲-۱-۲- دیدگاه اویلری
۱۳	۳-۱-۲- روش های عددی تحلیل کوپلی
۱۴	۴-۱-۲- روش المان محدود (FE)
۱۵	۵-۱-۲- روش ALE
۱۶	۶-۱-۲- روش های عددی بدون شبکه
۱۹	۲-۲- روش هیدرودینامیک ذرات هموار
۱۹	۱-۲-۲- مقدمه
۲۰	۲-۲-۲- تابع هموارساز
۲۴	۳-۲-۲- انواع توابع هموارساز
۳۰	۴-۲-۲- طول هموارسازی
۳۵	۵-۲-۲- جستجوی نقاط مجاور
۳۶	۶-۲-۲- انتگرال زمانی
۳۹	۳- مکانیزم انفجار
۴۰	۱-۳- تحلیل انفجار و موج شوک در هوای آزاد
۴۵	۲-۳- زائل شدن اضافه فشار ناگهانی ناشی از انفجار در هوای آزاد
۴۷	۳-۳- انفجار بر روی زمین
۵۱	۴-۳- انفجار بالای سطح زمین
۵۳	۵-۳- انفجار در زیر سطح زمین
۶۲	۶-۳- انفجار در زیر آب
۶۵	۴- مدل سازی انفجار در خاک با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار
۶۶	۱-۴- مدل سازی انفجار با روش های عددی



- ۶۴-۱-۱-۴ پیشینه تحقیق.....
- ۷۱-۲-۱-۴ مدل سازی انفجار با استفاده از روش SPH.....
- ۷۳-۲-۴ معادلات حاکم.....
- ۷۶-۱-۲-۴ بقاء جرم (معادله پیوستگی).....
- ۷۷-۲-۲-۴ بقاء مومنتوم (بقای اندازه حرکت).....
- ۷۹-۳-۲-۴ معادله انرژی.....
- ۷۹-۴-۲-۴ معادلات ناویر-استوکس.....
- ۸۰-۳-۴ ارائه معادلات حاکم بر اساس SPH.....
- ۸۰-۱-۳-۴ تقریب چگالی ذرات.....
- ۸۲-۲-۳-۴ تقریب مومنتوم ذرات.....
- ۸۲-۳-۳-۴ تقریب انرژی ذرات.....
- ۸۴-۴-۴ مدل رفتاری.....
- ۸۶-۵-۴ معادله حالت.....
- ۸۹-۶-۴ سایر نکات مدل سازی انفجار در خاک با روش SPH.....
- ۸۹-۱-۶-۴ شرایط مرزی.....
- ۹۰-۲-۶-۴ ویسکوزیته مصنوعی.....
- ۹۲-۷-۴ نیروی پנالتی.....
- ۹۵-۵- مدل سازی چاله انفجار در خاک با استفاده از روش SPH.....
- ۹۶-۱-۵- کد نویسی برنامه.....
- ۹۶-۱-۱-۵- الگوریتم برنامه.....
- ۹۸-۲-۱-۵- صحت سنجی.....
- ۱۰۱-۲-۵- مدل سازی انفجار در خاک با استفاده از روش SPH.....
- ۱۰۱-۱-۲-۵- مقدمه.....
- ۱۰۳-۲-۲-۵- حل مثال عددی انفجار در خاک ماسه ای.....
- ۱۳۱-۳-۵- بررسی چاله های انفجاری.....
- ۱۳۱-۱-۳-۵- بررسی چاله انفجار در خاک یک لایه.....
- ۱۳۲-۲-۳-۵- بررسی چاله انفجار در خاک دو لایه.....
- ۱۳۷-۳-۳-۵- بررسی چاله انفجار در شیروانی خاکی.....
- ۱۳۹-۴-۳-۵- بررسی چاله انفجار در روی سطح خاک زیر آب.....
- ۱۴۵-۶- نتیجه گیری و پیشنهادها.....
- ۱۴۶-۱-۶- نتیجه گیری.....
- ۱۴۸-۲-۶- پیشنهادها برای ادامه مطالعه.....

## فهرست جداول

- جدول ۲-۱- تفاوت دیدگاه لاگرانژی و اویلری [1]..... ۱۲
- جدول ۲-۲- برخی از روش‌های عددی بدون شبکه [1]..... ۱۸
- جدول ۲-۳- برخی از توابع هموارساز در روش SPH [1]..... ۳۰
- جدول ۳-۱- مقادیر تقریبی ضریب  $k$  برای خاک‌های متفاوت [17]..... ۵۴
- جدول ۳-۲- فاکتور انرژی در مواد منفجره مختلف [21]..... ۵۵
- جدول ۳-۳- مقادیر مختلف زمان اولین انبساط و شعاع چاله ایجادشده ناشی از انفجار..... ۵۷
- جدول ۳-۴- فاکتور  $F$  برای خاک‌های گوناگون [17]..... ۶۱
- جدول ۴-۱- بیان SPH از معادلات حاکم..... ۸۴
- جدول ۴-۲- پارامترهای معادله حالت برای ماده منفجره (JWL) [1]..... ۸۷
- جدول ۴-۳- پارامترهای مورد استفاده در معادله حالت آب [1]..... ۸۸
- جدول ۵-۱- پارامترهای معادله حالت برای ماده منفجره C4 (JWL) [38]..... ۱۰۰
- جدول ۵-۲- پارامترهای مورد استفاده برای خاک..... ۱۰۴
- جدول ۵-۳- قطر و عمق چاله انفجاری ایجادشده در خاک ۱ و ۲..... ۱۳۱
- جدول ۵-۴- قطر و عمق چاله انفجاری در خاک دولایه..... ۱۳۷
- جدول ۵-۵- پارامترهای مورد استفاده در معادله حالت آب [1]..... ۱۴۰
- جدول ۵-۶- پارامترهای مورد استفاده برای خاک اشباع..... ۱۴۰

## فهرست اشکال

- شکل ۲-۱- مراحل مدل‌سازی عددی [1]..... ۸
- شکل ۲-۲- نمونه‌ای از مش بندی در دیدگاه لاگرانژی..... ۱۱
- شکل ۲-۳- نمونه‌ای از مش بندی در دیدگاه اویلری..... ۱۲
- شکل ۲-۴- نمونه‌ای از مدل SPH..... ۱۹
- شکل ۲-۵- تابع هموار سازی در حالت یک‌بعدی [1]..... ۲۲
- شکل ۲-۶- ذرات موجود در دامنه هموارسازی ذره مرکزی و نمایش کیفی تخصیص مقدار وزن به آن‌ها در حالت دوبعدی [1]..... ۲۳
- شکل ۲-۷- ذرات در روش بدون شبکه، طول هموارسازی، تابع وزن و نحوه تأثیرگذاری ذرات بر یکدیگر [۷]..... ۲۳
- شکل ۲-۸- تابع هموارساز Lucy و مشتق اول آن [5]..... ۲۵

- شکل ۲-۹- تابع هموارساز Monaghan با هسته‌ی گاوسی و مشتق اول آن [6] ..... ۲۷
- شکل ۲-۱۰- تابع هموارساز Cubic Spline و مشتق اولش ..... ۲۸
- شکل ۲-۱۱- تابع مرتبه چهارم و مشتق اولش ..... ۲۹
- شکل ۲-۱۲- عملیات درون‌یابی در حالتی که طول دامنه هموارساز 0/3 است با استفاده از روش SPH [10] ..... ۳۱
- شکل ۲-۱۳- عملیات درون‌یابی در حالتی که طول دامنه هموارساز 0/75 است با استفاده از روش SPH [10] ..... ۳۲
- شکل ۲-۱۴- عملیات درون‌یابی در حالتی که طول دامنه هموارساز 1/55 است با استفاده از روش SPH [10] ..... ۳۲
- شکل ۲-۱۵- عملیات درون‌یابی در حالتی که طول دامنه هموارساز 2/6 است با استفاده از روش SPH [10] ..... ۳۲
- شکل ۲-۱۶- از بین رفتن شرط مساحت واحد زیر تابع وزن در نقاط مرزی و نزدیک مرز در روش SPH .. ۳۳
- شکل ۲-۱۷- متفاوت بودن شعاع تأثیر نقاط مختلف و نقض قانون سوم نیوتن [1] ..... ۳۵
- شکل ۲-۱۸- نحوه تعیین نقاط همسایه ..... ۳۶
- شکل ۳-۱- منحنی انفجار [17] ..... ۴۰
- شکل ۳-۲- حداکثر فشار پیش‌بینی شده برای هر انفجار [17] ..... ۴۲
- شکل ۳-۳- حداکثر اضافه فشار تولیدی برای مواد منفجره مستطیلی، استوانه‌ای و کروی [17] ..... ۴۳
- شکل ۳-۴- رابطه بین سرعت جلوی جبهه موج و فشار مبنا [17] ..... ۴۶
- شکل ۳-۵- موج منتشرشده نیم کروی در انفجار بر روی زمین [17] ..... ۴۸
- شکل ۳-۶- رابطه بین فشار حداکثر و فاصله مقیاس شده در جنگ جهانی دوم [17] ..... ۴۹
- شکل ۳-۷- رابطه بین ضربه مقیاس شده و فاصله مقیاس شده در خلال جنگ جهانی دوم [17] ..... ۴۹
- شکل ۳-۸- رابطه حداکثر اضافه فشار تولیدشده با فاصله از مرکز انفجار (منبع انفجار نیم کروی TNT) [17] ..... ۵۰
- شکل ۳-۹- رابطه بین ضربه و فاصله از مرکز انفجار (منبع انفجار نیم کروی TNT) [17] ..... ۵۱
- شکل ۳-۱۰- نحوه انعکاس موج ناشی از انفجار روی سطح زمین [17] ..... ۵۲
- شکل ۳-۱۱- رابطه بین حداکثر اضافه فشار بازتابی و فشار حداکثر [17] ..... ۵۲
- شکل ۳-۱۲- تغییرات نسبت حداکثر فشار بازتابی به فشار اولیه با زاویه انعکاس [17] ..... ۵۳
- شکل ۳-۱۳- رابطه بین اضافه فشار حداکثر و فاصله حداکثر در خاک‌ها [17] ..... ۵۴
- شکل ۳-۱۴- رابطه بین فاکتور f و عمق پوشش در خاک رس لای دار [21] ..... ۵۶
- شکل ۳-۱۵- انواع چاله انفجار ایجادشده در اثر انفجار و در خاک‌های رسی [17] ..... ۵۸
- شکل ۳-۱۶- ارتباط ابعاد چاله انفجار با عمق انفجار [17] ..... ۵۹
- شکل ۳-۱۷- تغییر مکان‌های افقی ماندگار چاله انفجارها در خاک‌های رسی با فاصله مقیاس شده [17] ..... ۶۰
- شکل ۳-۱۸- مقایسه فشارهای انفجار محاسبه شده برای TNT [17] ..... ۶۳
- شکل ۴-۱- حجم کنترل لاگرانژی v با سطح کنترل s [1] ..... ۷۴

- شکل ۴-۲- المان سیال در دیدگاه لاگرانژی [1] ..... ۷۵
- شکل ۴-۳- تغییر حجم در حجم کنترل لاگرانژی [1] ..... ۷۵
- شکل ۴-۴- نیروها در راستای x برای یک المان سیال لاگرانژی [1] ..... ۷۷
- شکل ۴-۵- مرز مشترک بین دو ماده ..... ۹۲
- شکل ۴-۶- ذرات بر روی مرز مشترک دو ماده مختلف و نفوذ ذرات در یکدیگر [1] ..... ۹۳
- شکل ۵-۱- الگوریتم حل برنامه ..... ۹۸
- شکل ۵-۲- نحوه تشکیل حباب انفجار در آب ..... ۹۹
- شکل ۵-۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی ..... ۱۰۰
- شکل ۵-۴- شکل چاله انفجار در زمان ۴۲۰ میکروثانیه پس از انفجار ..... ۱۰۱
- شکل ۵-۵- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی ..... ۱۰۳
- شکل ۵-۶- مدل مورد مطالعه و محل قرارگیری نقاط مرجع مورد مطالعه ..... ۱۰۴
- شکل ۵-۷- نمودار سرعت موج شوک-سرعت ذرات [۳۸] ..... ۱۰۵
- شکل ۵-۸- تغییرات زمان حل مساله با افزایش طول هموار سازی اولیه برای ۵۰ میکروثانیه ..... ۱۰۷
- شکل ۵-۹- تشکیل چاله انفجار در زمان ۲۰۰ میکروثانیه در خاک سست ..... ۱۰۸
- شکل ۵-۱۰- نحوه ایجاد چاله انفجاری و گسیختگی خاک ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۱۱- منحنی فشار-زمان برای نقاط A(۱۵ سانتی متری انفجار) تا E(۳۵ سانتی متری انفجار) برای ماده منفجره  $4 \times 4 \text{ cm}$  ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۱۲- نمودار فشار تولیدی بر حسب فاصله از مرکز انفجار برای خاک سست (ماده منفجره  $4 \times 4 \text{ cm}$ ) ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۳- شکل شماتیک انفجار در خاک سست در زمان ۳۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $4 \times 4 \text{ cm}$ ) ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۴- شکل شماتیک انفجار در خاک سست در زمان ۱۰۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $4 \times 4 \text{ cm}$ ) ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۱۵- شکل شماتیک انفجار در خاک سست در زمان ۲۰۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $4 \times 4 \text{ cm}$ ) ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۱۶- تشکیل چاله انفجار در زمان ۱۰۰ میکروثانیه در خاک سست برای ماده منفجره  $6 \times 6 \text{ cm}$  ..... ۱۱۳
- شکل ۵-۱۷- منحنی فشار-زمان برای نقاط A(۱۵ سانتی متری انفجار) تا E(۳۵ سانتی متری انفجار) برای ماده منفجره  $6 \times 6 \text{ cm}$  ..... ۱۱۴
- شکل ۵-۱۸- نمودار فشار تولیدی بر حسب فاصله از مرکز انفجار (ماده منفجره  $6 \times 6 \text{ cm}$ ) ..... ۱۱۴
- شکل ۵-۱۹- شکل شماتیک انفجار در خاک سست در زمان ۵۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $6 \times 6 \text{ cm}$ ) ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۲۰- شکل شماتیک انفجار در خاک سست در زمان ۱۰۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $6 \times 6 \text{ cm}$ ) ..... ۱۱۶
- شکل ۵-۲۱- شکل شماتیک انفجار در خاک سست در زمان ۲۰۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $6 \times 6 \text{ cm}$ ) ..... ۱۱۶
- شکل ۵-۲۲- تشکیل چاله انفجار در زمان ۱۰۰ میکروثانیه برای ماده منفجره  $10 \times 10 \text{ cm}$  ..... ۱۱۸
- شکل ۵-۲۳- منحنی فشار-زمان برای نقاط A(۱۵ سانتی متری انفجار) تا E(۳۵ سانتی متری انفجار) برای ماده منفجره  $10 \times 10 \text{ cm}$  ..... ۱۱۸
- شکل ۵-۲۴- نمودار فشار تولیدی بر حسب فاصله از مرکز انفجار (ماده منفجره  $10 \times 10 \text{ cm}$ ) ..... ۱۱۹

- شکل ۵- ۲۵- شکل شماتیک انفجار در خاک سست در زمان ۳۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $10 \times 10\text{cm}$  سانتی متر)..... ۱۱۹
- شکل ۵- ۲۶- شکل شماتیک انفجار در خاک سست در زمان ۵۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $10 \times 10\text{cm}$  سانتی متر)..... ۱۲۰
- شکل ۵- ۲۷- شکل شماتیک انفجار در خاک سست در زمان ۱۰۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $10 \times 10\text{cm}$  سانتی متر)..... ۱۲۰
- شکل ۵- ۲۸- منحنی فشار-زمان برای نقاط A(۱۵ سانتی متری انفجار) تا E(۳۵ سانتی متری انفجار) برای ماده منفجره  $4 \times 4\text{cm}$  سانتی متر خاک متراکم..... ۱۲۲
- شکل ۵- ۲۹- نمودار فشار تولیدی بر حسب فاصله از مرکز انفجار در خاک متراکم (ماده منفجره  $4 \times 4\text{cm}$  سانتی متر)..... ۱۲۲
- شکل ۵- ۳۰- شکل شماتیک انفجار در خاک ۲ در زمان ۳۰ میکروثانیه ..... ۱۲۳
- شکل ۵- ۳۱- شکل شماتیک انفجار در خاک ۲ در زمان ۱۰۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $4 \times 4\text{cm}$  سانتی متر)..... ۱۲۳
- شکل ۵- ۳۲- شکل شماتیک انفجار در خاک ۲ در زمان ۲۰۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $4 \times 4\text{cm}$  سانتی متر)..... ۱۲۴
- شکل ۵- ۳۳- منحنی فشار-زمان برای نقاط A(۱۵ سانتی متری انفجار) تا E(۳۵ سانتی متری انفجار) برای ماده منفجره  $6 \times 6\text{cm}$  سانتی متر ..... ۱۲۵
- شکل ۵- ۳۴- نمودار فشار تولیدی بر حسب فاصله از مرکز انفجار در خاک ۲ (ماده منفجره  $6 \times 6\text{cm}$  سانتی متر)..... ۱۲۵
- شکل ۵- ۳۵- شکل شماتیک انفجار در خاک ۲ در زمان ۵۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $6 \times 6\text{cm}$  سانتی متر)..... ۱۲۶
- شکل ۵- ۳۶- شکل شماتیک انفجار در خاک ۲ در زمان ۱۰۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $6 \times 6\text{cm}$  سانتی متر)..... ۱۲۷
- شکل ۵- ۳۷- شکل شماتیک انفجار در خاک ۲ در زمان ۲۰۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $6 \times 6\text{cm}$  سانتی متر)..... ۱۲۷
- شکل ۵- ۳۸- منحنی فشار-زمان برای نقاط A(۱۵ سانتی متری انفجار) تا E(۳۵ سانتی متری انفجار) برای ماده منفجره  $10 \times 10\text{cm}$  سانتی متر در خاک متراکم ..... ۱۲۸
- شکل ۵- ۳۹- نمودار فشار تولیدی بر حسب فاصله از مرکز انفجار در خاک متراکم ..... ۱۲۹
- شکل ۵- ۴۰- شکل شماتیک انفجار در خاک ۲ در زمان ۳۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $10 \times 10\text{cm}$  سانتی متر)..... ۱۲۹
- شکل ۵- ۴۱- شکل شماتیک انفجار در خاک ۲ در زمان ۵۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $10 \times 10\text{cm}$  سانتی متر)..... ۱۳۰
- شکل ۵- ۴۲- شکل شماتیک انفجار در خاک ۲ در زمان ۱۰۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $10 \times 10\text{cm}$  سانتی متر)..... ۱۳۰
- شکل ۵- ۴۳- شکل گیری چاله انفجار در خاک دو لایه در زمان ۵۰ میکروثانیه ..... ۱۳۳
- شکل ۵- ۴۴- شکل گیری چاله انفجار در خاک دو لایه در زمان ۱۰۰ میکروثانیه ..... ۱۳۳

- شکل ۵-۴۵- شکل گیری چاله انفجار در خاک دو لایه در زمان ۲۰۰ میکروثانیه ..... ۱۳۴
- شکل ۵-۴۶- شکل گیری چاله انفجار در خاک دو لایه در زمان ۳۰۰ میکروثانیه ..... ۱۳۴
- شکل ۵-۴۷- شکل گیری چاله انفجار در خاک دو لایه در زمان ۱۰۰ میکروثانیه (ضخامت لایه سست ۱۵ سانتی متر) ..... ۱۳۵
- شکل ۵-۴۸- شکل گیری چاله انفجار در خاک دو لایه در زمان ۴۰۰ میکروثانیه (ضخامت لایه سست ۱۵ سانتی متر) ..... ۱۳۵
- شکل ۵-۴۹- شکل گیری چاله انفجار در خاک دو لایه در زمان ۱۰۰ میکروثانیه (ضخامت لایه سست ۲۰ سانتی متر) ..... ۱۳۶
- شکل ۵-۵۰- شکل گیری چاله انفجار در خاک دو لایه در زمان ۴۰۰ میکروثانیه (ضخامت لایه سست ۲۰ سانتی متر) ..... ۱۳۶
- شکل ۵-۵۱- تشکیل چاله انفجاری روی شیروانی خاکی در زمان ۵۰ میکرو ثانیه ..... ۱۳۸
- شکل ۵-۵۲- تشکیل چاله انفجاری روی شیروانی خاکی در زمان ۱۰۰ میکرو ثانیه ..... ۱۳۸
- شکل ۵-۵۳- تشکیل چاله انفجاری روی شیروانی خاکی در زمان ۲۰۰ میکرو ثانیه ..... ۱۳۹
- شکل ۵-۵۴- تشکیل چاله انفجاری روی شیروانی خاکی در زمان ۴۰۰ میکرو ثانیه ..... ۱۳۹
- شکل ۵-۵۵- انفجار روی خاک اشباع در زیر آب در زمان ۱۰۰ میکرو ثانیه ..... ۱۴۲
- شکل ۵-۵۶- انفجار روی خاک اشباع در زیر آب در زمان ۱۵۰ میکرو ثانیه ..... ۱۴۲
- شکل ۵-۵۷- انفجار روی خاک اشباع در زیر آب در زمان ۲۰۰ میکرو ثانیه ..... ۱۴۳
- شکل ۵-۵۸- انفجار روی خاک اشباع در زیر آب در زمان ۳۰۰ میکرو ثانیه ..... ۱۴۴

فهرست علائم

$W_{ij}$	تابع هموار ساز
m	جرم ذره موردنظر
$\rho$	چگالی ذره موردنظر
$\Delta V$	حجم محدود ذره
r	فاصله دو ذره از یکدیگر
$h_i^0$	شعاع هموار سازی ذره i
$\alpha_d$	ضریب تابع هموار ساز
$N_i^0$	تعداد ذرات اولیه در دامنه هموار ساز
$v_i^n$	سرعت ذره i و در مرحله n ام
$\nabla_i^n W_{ij}$	گرادیان تابع وزن ذره i و در مرحله n ام
$\theta$	ضریب اصلاحی برای تعیین طول هموار سازی اولیه
t	زمان
$\Delta t$	تغییرات زمان
p	فشار
$P_o$	فشار مبنا
E	انرژی تخلیه شده
R	فاصله دستگاه اندازه گیری تا مرکز انفجار
W	وزن ماده منفجره
$P_a$	فشار اتمسفر
$R_o$	بعد مشخصه
$\bar{u}$	سرعت جلوی جبهه موج
u	سرعت ذرات گاز
I	ضربه ایجاد شده
b و a	ابعاد ماده منفجره که در تماس با زمین
h	ارتفاع ماده منفجره
$p_r$	فشار تولید شده توسط موج بازتابی
f	ضریب ثابت تابعی از عمق مدفون ماده منفجره
H	عمق مدفون ماده منفجره
k	ثابت خاک مربوطه و از جنس مدول الاستیسیته
$t_o^+$	میانگین زمان فشار مثبت ایجاد شده

$t_o^-$	میانگین زمان فشار منفی
D	قطر چاله
h	ارتفاع چاله
$U_p$	تغییر مکان ماندگار در جهت افقی
$V_p$	تغییر مکان در جهت قائم
$a_m$	حداکثر شعاع حباب تولیدشده
$T$	دوره نوسان حباب
$\delta V$	حجم کنترل
$\delta S$	سطح کنترل
n	بردار یکه عمود بر جزء سطح
$F_i$	نیروی حجمی در راستای $i$
$\tau_{ij}$	تنش در جهت $j$ که بر صفحه‌ی عمود بر راستای $i$ قرار دارد
e	انرژی داخلی
$\sigma$	تانسور تنش کل بوده
$\tau$	تنش انحرافی
$I_1$	نامتغیر اول تنش
$J_2$	نامتغیر تنش انحرافی
G	مدول برشی
$\tau^{\alpha\beta}$	نرخ تغییرات تنش برشی
$\varepsilon^{\alpha\beta}$	نرخ تغییرات کرنش
Ro	دوران
$U_s$	سرعت شوک
$U_p$	سرعت ذرات
$\pi_{ij}$	ویسکوزیته مصنوعی
$c_{ij}$	متوسط سرعت موج در ذرات
pe	نیروی پנالتی



فصل اول

مقدمه

## ۱-۱- تعریف تحقیق

تحلیل دقیق تر و مطمئن تر سازه‌ها در صورتی امکان‌پذیر است که بتوانیم با دقت بیشتر عوامل مؤثر در تحلیل را شناسایی کنیم. از عوامل مهم در تحلیل، تعیین نوع و میزان بارگذاری سازه می‌باشد. در بین انواع بارگذاری، بارهای دینامیکی بسیار پیچیده‌تر و تعیین دقیق آن‌ها مشکل‌تر می‌باشد. در بین بارهای دینامیکی ضربه و انفجار از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشند. بارگذاری انفجار یک موج شوک می‌باشد که در زمانی بسیار کوتاه اعمال می‌گردد و می‌تواند ناشی از یک انفجار بزرگ مانند انفجار یک راکتور هسته‌ای یا بمب اتمی و یا شلیک یک گلوله کوچک از یک سلاح سبک باشد. همچنین این پدیده هم می‌تواند در جنگ و حوادث تروریستی به وجود آمده باشد و هم ناشی از یک تصادف و به صورت بی‌اختیار (برای مثال در تصادف‌ها، نشت گاز و ...) باشد. در هر صورت انتشار یک موج شوک در بازه زمانی بسیار کوتاه، انرژی بسیار زیادی آزاد نموده و باعث آسیب‌رسانی به محیط اطراف می‌گردد. بدیهی است که هرچه انرژی آزاد شده بیشتر باشد، محیط بیشتری تحت تأثیر قرار گرفته و شدت آسیب افزایش می‌یابد.

از لحاظ تاریخی می‌توان باروت را به‌عنوان اولین ماده منفجره معرفی نمود. باگذشت زمان، به تدریج ماده جدیدتری به نام دینامیت مورد استفاده قرار گرفت و در اواخر قرن نوزدهم بود که ماده جدیدی به نام تری نیترو تولوئن معروف به TNT<sup>۱</sup>، وارد عرصه شد. TNT از ترکیب متیل بنزن و اسید نیتریک در حضور اسیدسولفوریک غلیظ تهیه می‌گردد. پس از کشف این ماده منفجره، تحولی عظیم در صنعت جنگ‌افزارها به وجود آمد و در بسیاری از جنگ‌ها و اقدامات تروریستی از این ماده استفاده گردید و تاکنون نیز استفاده می‌شود. در حال حاضر بسیاری از مدل‌سازی‌ها بر مبنای TNT ارائه می‌گردد.

در این تحقیق انفجار در خاک دانه‌ای با استفاده از روش عددی بدون شبکه دینامیک ذرات هموار مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین پس از صحت‌سنجی برنامه نوشته‌شده، مثال‌هایی مانند بررسی

---

<sup>۱</sup> Trinitrotoluene

چاله‌های انفجاری در خاک دولایه، بررسی چاله انفجار بر روی سطح شیب‌دار و همچنین بررسی انفجار بر روی خاک اشباع زیرآب نیز حل و ارائه شده است.

## ۱-۲- اهداف و ضرورت

در مهندسی عمران و ژئوتکنیک بررسی انفجار از چند جهت حائز اهمیت است که عبارت‌اند از:

- ۱- مواد منفجره در برخی از پروژه‌های عمرانی به صورت مستقیم مورداستفاده قرار می‌گیرند. برای مثال در بحث معادن، تونل‌ها و سایر سازه‌های زیرزمینی مانند متروها، از مواد منفجره جهت حفاری و عملیات تخریب به صورت مستقیم استفاده می‌شود. بررسی تنش‌های ایجادشده بر روی خاک و یا سازه‌های اطراف می‌تواند بسیار راهگشا بوده و از حوادث خطرناک جلوگیری نماید.
  - ۲- در برخی پروژه‌ها احتمال وقوع انفجار به صورت تصادفی وجود دارد، در نتیجه باید تأثیر انفجار نیز در طراحی‌ها لحاظ گردد. به عبارت دیگر بسته به درجه اهمیت سازه مورد طراحی، سازه‌ها باید علاوه بر زلزله، در مقابل انفجار نیز مقاوم‌سازی شوند. برای مثال تأسیسات و سازه‌های اطراف پمپ‌بنزین‌ها و یا انبارهایی که در آن از مواد مشتعل شونده و قابل احتراق و انفجار استفاده می‌شوند، باید در مقابل انفجار بیمه باشند. همچنین خطوط انتقال گاز، نفت و ... که ممکن است به صورت مدفون یا نیمه مدفون اجرا شده باشند، یکی دیگر از مواردی است که احتمال وقوع انفجار در آن وجود دارد.
  - ۳- عملیات تروریستی و خرابکارانه، یکی دیگر از موارد احتمال وقوع انفجار می‌باشد. برای مثال تخریب ریل‌های راه‌آهن، انفجار خطوط انتقال و یا سایر بمب‌گذاری‌ها و عملیات، یکی دیگر از عواملی است که بررسی تنش‌های ایجادشده ناشی از انفجار را توجیه و یا الزامی می‌نماید.
- با توجه به موارد یادشده، مشخص است که پایداری سازه‌های مهم در مقابل انفجار، بسیار مهم و در مواردی بسیار حیاتی می‌باشد. حال برای پایداری سازه‌ها باید ابتدا انفجار را شناخت و سپس تنش‌های ناشی از آن را تخمین زد. برای تخمین قدرت و انرژی ناشی از انفجار می‌توان از روش‌های زیر بهره جست:

۱- روش‌های آزمایشگاهی: لازم به ذکر است ایجاد شرایط کنترل شده آزمایشگاهی برای انفجار مشکل، پرهزینه و در مواردی خطرناک می‌باشد. همچنین تعیین تنش‌های تولیدشده تنها برای گستره خاصی از مواد و مصالح معتبر می‌باشد. در نتیجه معمولاً از این روش استفاده نمی‌شود. تمامی روابط تجربی مربوط به انفجار نیز، حاصل آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس در بازه جنگ جهانی بوده است.

۲- روش‌های عددی: با توجه به محدودیت‌هایی که در مسائل آزمایشگاهی برای مدل‌سازی انفجار وجود دارد، امروزه برای مدل‌سازی و بررسی آثار انفجار از روش‌های عددی استفاده می‌شود. مزیت روش‌های عددی، عدم نیاز به وسایل گران‌قیمت، ایمن بودن و فراگیر بودن آن برای گستره مواد و مصالح مختلف می‌باشد. بدیهی است که هر چه روش عددی دقیق‌تر بوده و شرایط محیط را بهتر مدل نماید، مدل‌سازی نیز دقیق‌تر خواهد بود.

### ۱-۳- روش تحقیق و فرضیات

همان‌طور که گفته شد استفاده از روش‌های آزمایشگاهی نیازمند تجهیزات خاص و پیشرفته می‌باشد، همچنین آزمایش‌های انفجار پرخطر بوده و به دلیل فشار بالای انفجار امکان اندازه‌گیری در فاصله‌های نزدیک به منبع انفجار نیز وجود ندارد. به همین دلیل در این تحقیق از روش‌های عددی برای مدل‌سازی استفاده شده است. در میان روش‌های عددی، روش‌های بدون شبکه در مدل‌سازی‌های مربوط به ضربه‌های شدید و انفجار بهتر از سایر روش‌های عددی عمل می‌نمایند. در این تحقیق از روش عددی بدون شبکه ذرات هموار استفاده شده است. برای برنامه‌نویسی نیز از زبان برنامه‌نویسی فرترن استفاده شده است. پس از انجام صحت‌سنجی‌های لازم، انفجار در دو نوع خاک دانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و نمودارهای فشار-زمان، فشار-مکان، تغییرات سطح خاک و نحوه شکل‌گیری انفجار و چاله‌های انفجار برای انفجار سطحی توسط مقادیر متفاوت ماده منفجره ارائه شده است. در نهایت نیز به بررسی چاله‌های انفجاری در خاک دولایه پرداخته شده است. برای حل معادلات انفجار

نیز از روابط ناویر- استوکس<sup>۱</sup> استفاده شده است و پدیده انفجار بی در رو فرض شده است. همچنین از اثر امواج ثانویه تولید شده در مرزها و یا بین دو لایه خاک صرف نظر شده است. همچنین برای مدل رفتاری خاک از معیار ون مایسز<sup>۲</sup> استفاده شده و از لزجت آب و هوای داخل حفره های خاک صرف نظر شده است.

## ۴-۱- فصل بندی

بنا به آنچه بیان شد، امروزه مسئله انفجار و پدافند غیرعامل (مجموعه اقدامات غیرمسلحانه در زمان صلح برای کاهش آسیب پذیری در زمان جنگ) بسیار مهم و کاربردی است. با توجه به همین اهمیت در این رساله به مسئله انفجار و نحوه مدل سازی عددی آن توسط روش عددی بدون شبکه SPH<sup>۳</sup> پرداخته می شود و در فصل اول به بیان مقدمه ای درباره تعریف رساله، هدف، ضرورت و روش تحقیق پرداخته شده است. در فصل دوم خلاصه ای از روش های عددی بدون شبکه با تمرکز بر روی یکی از روش های عددی بدون شبکه به نام SPH ارائه می گردد. روش SPH روشی نوین بوده که توانایی مدل سازی تغییر شکل های بسیار شدید را دارا می باشد.

در فصل سوم، به توضیح انفجار و مکانیزم آن پرداخته و روش ها و روابط تجربی موجود در این زمینه برای انواع انفجار (انفجار روی زمین، بالای زمین، داخل آب و داخل خاک) مورد بررسی قرار می گیرد. در فصل چهارم نیز به بررسی نحوه مدل سازی انفجار در خاک با استفاده از روش SPH پرداخته شده است. در این فصل معادلات حاکم، معادلات حالت، مدل مقاومتی و رفتاری خاک به تفصیل مورد بحث قرار گرفته و در انتهای فصل نیز نکات مربوط به مدل سازی انفجار در خاک با روش SPH ارائه شده است. تمام نکات مورد استفاده در برنامه نویسی با زبان فرترن در این فصل توضیح داده شده است.

---

<sup>۱</sup> Navier-Stokes

<sup>۲</sup> Von Mises

<sup>۳</sup> Smooth Particle Hydrodynamics

در فصل پنجم نیز ابتدا صحت سنجی برنامه نوشته شده ارزیابی شده و سپس انفجار در خاک با استفاده از روش SPH مورد بررسی قرار گرفته است. در این قسمت منحنی های فشار- زمان برای ماده های منفجره متفاوت در خاک ارائه شده و همچنین منحنی تغییرات سطح خاک، منحنی حداکثر فشار تولید شده بر اساس فاصله از مرکز انفجار و نحوه شکل گیری چاله انفجاری مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین ابعاد چاله انفجاری ایجاد شده برای ماده های منفجره با ابعاد متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. در قسمت انتهایی رساله نیز به حل چند مثال و بررسی چاله های انفجاری پرداخته شده است. در این قسمت چاله های انفجاری و روند تشکیل آنها در خاک دولایه، شیروانی خاکی و خاک اشباع قرار گرفته در زیر سطح آب مورد بررسی قرار گرفته اند و عمق و دهانه چاله انفجاری تعیین شده اند. در فصل ششم نیز به بررسی نتایج و ارائه موضوعات پیشنهادی در این زمینه پرداخته شده است.

فصل دوم

# روش‌های عددی بدون شبکه

## ۲-۱- روش‌های عددی

با توجه به پیچیدگی‌های مسائل در علوم مختلف و همچنین عدم وجود یک حل دقیق در برخی موارد، روش‌های عددی برای شبیه‌سازی و حل مسائل گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به افزایش قابلیت‌های کامپیوتری، استفاده از روش‌های عددی می‌تواند تا حد بسیار زیادی به جواب دقیق نزدیک شده و مسائل مختلف را شبیه‌سازی نماید. به همین جهت استفاده از روش‌های عددی می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی برای آزمایش‌های گران‌قیمت و در برخی موارد خطرناک باشد.

به‌طور کلی برای شبیه‌سازی‌های عددی ابتدا مسئله را با برخی ساده‌سازی‌ها به یک مدل ریاضی تبدیل نموده و سپس مسئله به بخش‌های کوچک‌تری تقسیم‌بندی می‌گردد. پس از حل قسمت‌های کوچک‌تر، با انتگرال‌گیری سعی می‌شود تمامی سطح را با اعمال شرایط مرزی مناسب پوشش داد و به حل دقیق نزدیک شد. نحوه تقسیم‌بندی‌های سطح موردنظر به نوع روش عددی وابسته است. در حالت کلی روش‌های عددی را می‌توان به دو بخش با شبکه و بدون شبکه (Meshless) طبقه‌بندی نمود. شکل (۲-۱)، مراحل یک مدل‌سازی عددی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱- مراحل مدل‌سازی عددی [1]



با توجه به اینکه اغلب مسائل مکانیکی با نرخ شدت بالا، با تغییر شکل‌های بسیار بزرگ همراه هستند، یکی از عوامل بسیار مهم در آماده‌سازی مسائل برای تحلیل، دقت به این عامل است. به‌منظور تحلیلی مسائل مهندسی، تاکنون روش‌های مختلفی ارائه شده‌اند. در این ردیف روش‌های عددی مبتنی بر اجزای محدود<sup>۱</sup>، تفاضل محدود<sup>۲</sup>، المان مرزی<sup>۳</sup>، روش‌های بدون شبکه‌بندی<sup>۴</sup> و ... قرار دارند. هرکدام از این روش‌ها دارای مزایا و معایب مربوط به خود می‌باشند که برخی از آن‌ها در ادامه آورده شده است. ذکر این نکته در اینجا خالی از لطف نیست که استفاده از هیدروکدها به اذعان بسیاری از مراجع معتبر، نیازمند دانش وسیعی از مباحث عددی است و صحت پاسخ گرفته شده از این دسته از نرم‌افزارها به‌شدت به کاربر وابسته است. به‌طوری‌که در یک مسئله یکسان، میان نتایج حاصل از تحلیل‌های دو کاربر باتجربه برابر، احتمال وقوع اختلاف، بسیار بالاست. طبق گفته همین مراجع برای به دست آوردن مهارت کافی در استفاده از هیدروکدها به زمانی مابین ۶ تا ۴۸ ماه نیاز است [۲]. در ادامه دو دیدگاه لاگرانژی و اوپلری به‌اختصار شرح داده می‌شود.

## ۲-۱-۱- دیدگاه لاگرانژی<sup>۵</sup>

در دیدگاه لاگرانژی، شبکه بر روی مسئله ثابت می‌باشد و با هرگونه تغییر مکان در مسئله، مش‌ها نیز تغییر می‌کنند. به‌عبارت‌دیگر جرم، مومنتوم و انرژی با تغییر مکان شبکه‌ها، منتقل می‌گردد. این دیدگاه در حل مسائل مکانیک جامدات و مسائلی که تغییر شکل‌های شدید و ناگهانی نمی‌دهند، بسیار مناسب عمل می‌کند. روش FEM بر پایه همین دیدگاه لاگرانژی بنا شده است. برخی از مزایای روش لاگرانژی عبارت است از:

۱- با توجه به اینکه هیچ‌گونه عبارتی جهت اتصال اجزا به یکدیگر در معادلات دیفرانسیل پایه وجود ندارد، محاسبات ساده‌تر شده و سرعت محاسبات افزایش می‌یابد.

<sup>۱</sup> Finite Element Method

<sup>۲</sup> Difference Element Method

<sup>۳</sup> Boundary Element Method

<sup>۴</sup> Smoothed Particle Hydrodynamics Method

<sup>۵</sup> Lagrangian Method

۲- با توجه به ثابت بودن شبکه بر روی مسئله، تعیین تاریخچه زمانی هر نقطه دلخواه به سادگی امکان پذیر می باشد.

۳- در روش لاگرانژی برخی گره‌ها در مرزها و فصل مشترک دو ماده قرار می گیرند. با جابه جایی این گره‌ها شرایط مرزی به راحتی ارضا می گردد.

۴- هندسه‌های پیچیده و نامنظم با استفاده از مش بندی‌های بی قاعده به راحتی قابل مدل سازی است.

۵- با توجه به اینکه شبکه بندی تنها بر روی محیط مسئله انجام می شود، این روش از لحاظ محاسباتی بسیار به صرفه می باشد.

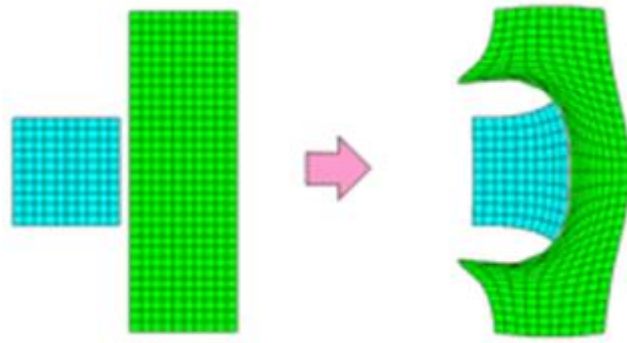
برخی از معایب روش لاگرانژی نیز عبارت‌اند از:

۱- وابستگی این روش به شبکه بندی باعث می شود تا در تغییر شکل‌های شدید و ناگهانی دچار مشکل گردد. به عبارت دیگر در اثر تغییر مکان‌های شدید، شبکه‌ها به شدت دچار تغییر شکل شده و عملاً کار آیی خود را از دست می دهند و در برخی موارد باید مش بندی مجددی بر روی مسئله ایجاد شود.

۲- با توجه به اینکه مرحله زمانی در محاسبات بر اساس اندازه کوچک ترین شبکه تعیین می گردد، در مسائلی که شبکه‌ها به شدت تغییر شکل می دهند، مقدار مرحله زمانی تحلیل نیز باید به تناسب آن، بسیار کوچک شود که این امر سبب ایجاد خطاهای محاسباتی و توقف محاسبات می گردد.

۳- شبکه بندی مجدد علاوه بر زمان بر بودن معایب دیگری مانند از بین رفتن تاریخچه تنش و ... را دارد.

نمونه‌ای از مش بندی با روش لاگرانژی در شکل (۲-۲) نشان داده شده است.



شکل ۲-۲- نمونه‌ای از مش بندی در دیدگاه لاگرانژی

## ۲-۱-۲- دیدگاه اویلری<sup>۱</sup>

برای غلبه بر مشکلات روش لاگرانژی، دیدگاه دیگری به نام دیدگاه اویلری ارائه گردید. در این دیدگاه مش‌ها در فضا ثابت می‌باشند و برخلاف دیدگاه لاگرانژی با تغییر شکل محیط، مش‌ها بدون تغییر باقی می‌مانند و در تمام روند محاسبات شکل و حجم مش‌ها ثابت است به همین دلیل نیز در مسائلی که تغییر شکل‌ها شدید بوده و یا در مسائل سیالاتی معمولاً از این روش استفاده می‌شود. روش FDM (تفاضل محدود) بر پایه این دیدگاه بنا شده است. نمونه‌ای از مش بندی با روش اویلری در شکل (۲-۳) نشان داده شده است.

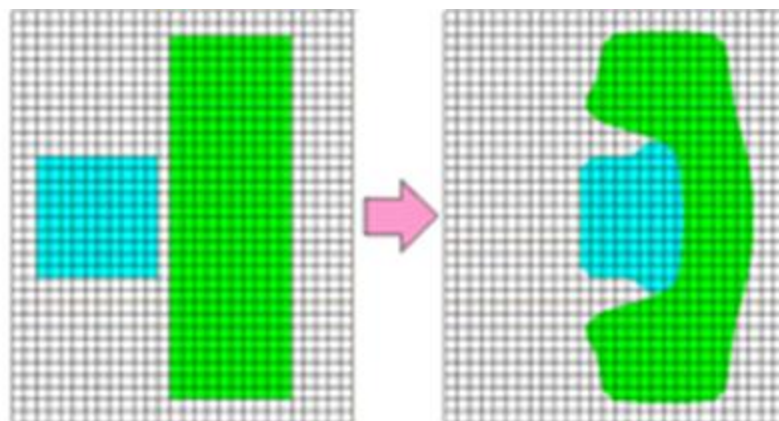
باید توجه داشت که این دیدگاه نیز دارای معایب زیر می‌باشد:

۱- با توجه به ثابت بودن مش‌ها و استقلال آن‌ها از تغییر شکل محیط، بررسی رفتار و تاریخچه زمانی یک نقطه از جسم مشکل است

۲- عدم مدل‌سازی مناسب شکل‌ها و هندسه‌های پیچیده

۳- عدم مدل‌سازی مناسب تغییر شکل مرزها و تغییر مکان ناحیه اندرکنش به علت تغییر انرژی، جرم و مومنتوم در شبکه

<sup>۱</sup> Eulerian Method



شکل ۲-۳- نمونه‌ای از مش بندی در دیدگاه اوپلری

جدول (۱-۲) تفاوت‌های روش لاگرانژی و اوپلری را به اختصار ارائه نموده است.

جدول ۲-۱- تفاوت دیدگاه لاگرانژی و اوپلری [1]

روش‌های لاگرانژی	روش‌های اوپلری	
بر روی ماده موردنظر ثابت است	در فضا ثابت است	شبكة
تعیین تاریخچه زمانی روی نقاط مسئله ساده است	تعیین تاریخچه زمانی مشکل است	تاریخچه زمانی
آسان جابه‌جا می‌شود	مشکل جابه‌جا می‌شود	تحرك مرزها و اندركنش
آسان مدل می‌شود		هندسه نامنظم و بی‌قاعده
مشکل مدل می‌شود		تغییر شکل‌های شدید

به‌طور کلی روش‌های عددی با شبکه مانند اجزای محدود (دیدگاه لاگرانژی) و تفاضل محدود (دیدگاه اویلری) دارای یک سری محدودیت می‌باشند، برای مثال پیش‌نیاز هر دو دیدگاه شبکه‌بندی برای توصیف هندسه و حل مسئله است.

معایب این روش‌ها در مسائلی مانند انفجار و یا ضربات شدید و ناگهانی که باعث تغییر شکل‌های بسیار شدید، ناهمگنی شدید محیط، تغییر سطح آزاد، تغییر شکل تکیه‌گاه‌ها و جابه‌جایی نواحی اندرکنش می‌شود، بیشتر به چشم می‌آید [3]. بنابراین برای حل مسائل این‌گونه می‌توان از روش‌های بدون شبکه استفاده نمود.

## ۲-۱-۳- روش‌های عددی تحلیل کوپلی

در خلال دهه‌های گذشته، الگوریتم‌های زیادی پیشنهاد و میزان اثربخشی و دقت آن‌ها مورد آزمایش قرار گرفته است. در حالت‌هایی، نتایج موفقیت‌آمیزی حاصل شده است؛ اما متأسفانه، روش حل کاملی برای حل تمام مسائل تعامل سیال - سازه ارائه نشده است. یکی از دشوارترین موانع در یکپارچه کردن سیال و جامد در مسائل تعامل سیال و سازه اولویت دادن چهارچوب مرجع برای هر حوزه است. برای سیال توصیف اویلری ارجحیت دارد و برای جامد توصیف لاگرانژی اولویت دارد. رابطه (۱-۲) این مسئله را به شکل ریاضی نشان می‌دهد.

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (v \cdot \nabla) \quad (1-2)$$

این اپراتور زمانی نماینده بین مشتقات زمانی و بین توصیفات لاگرانژی و اویلری است. جمله سمت چپ که تحت عنوان مشتق مادی شناخته می‌شود، در توصیف لاگرانژی بکار می‌رود و جمله سمت راست در توصیف اویلری به کار می‌رود. به خاطر حرکت ذرات، ترم مؤثر جابه‌جایی  $v \cdot \nabla$  در توصیف اویلری پدیدار می‌شود. رفتار این جمله جابه‌جایی عوامل کلیدی برای تحلیل کوپله در تحلیل اثر متقابل سیال سازه است [2].

این جمله جابه‌جایی را هم‌چنین می‌توان با استفاده از پیکره‌بندی شبکه شرح داد. در توصیف اویلری، پیکره‌بندی شبکه ثابت در نظر گرفته می‌شود، به همین دلیل به آن‌ها روش شبکه‌بندی ثابت گفته می‌شود. از طرف دیگر، در توصیف لاگرانژی، پیکره‌بندی متحرک است که به دنبال ذرات حقیقی حرکت می‌کند. به‌این ترتیب روش‌های لاگرانژی را روش‌های با شبکه‌بندی تغییر شکل‌پذیر می‌نامند. به‌جز پاره‌ای حالت‌های خاص، مانند حالت‌پایا یا تغییر شکل‌های بی‌اندازه کوچک، نیازمند ایجاد روشی دیگر برای همگام کردن دو سیستم شبکه مختلف هستیم.

## ۲-۱-۴- روش المان محدود (FE)

در حالتی که هر دو حوزه سیال و جامد به‌وسیله اجزا محدود حل می‌شوند، دو دیدگاه برای کوپل کردن سیال و سازه جامد وجود دارد.

۱- ساده‌سازی معادلات حاکم تحت فرضیات معقول

۲- به‌زمان کردن پیشرفت شبکه با توجه به پیشرفت زمان

رویکرد نخست معمولاً مربوط به ترم‌های جابه‌جایی می‌شود. یک مثال معادله اویلر یا معادله استوکس است. در این معادلات، مقادیر سرعت در حوزه سیال به‌اندازه کافی کوچک فرض می‌شوند که قابل صرف‌نظر کردن باشند و یا به‌طور نسبی در مقایسه با دیگر جملات نیرو کوچک شمرده شوند. در این حالت می‌توانیم دو سیستم متفاوت را بدون هیچ عمل خاصی با یکدیگر ترکیب کنیم. با استفاده از روش کوپل کردن مستقیم، دو سیستم ترکیب‌شده را می‌توان به یک معادله ماتریس کاهش داد. با این‌وجود این روش تنها برای تقریب‌های کوچک قابل‌استفاده است و برای بیشتر حالات جریان‌های دینامیکی و تغییر شکل‌های بزرگ مناسب نیست.

رویکرد دیگر شبکه‌بندی مجدد، منطقه بندی مجدد یا شبکه تطبیق‌پذیر نامیده می‌شود. ایده به‌طور

ساده عبارت است از به هنگام کردن یکی از تعریف‌های فوق باگذشت زمان. اصولاً، این مسائل برای حل مسائل اعوجاج شدید المان‌ها در تعریف لاگرانژی بکار برده می‌شود. شکل‌دهی آهنگری که یکی از معروف‌ترین فرآیندهای شکل‌دهی مواد محسوب می‌شود، نمونه خوبی برای چنین فرآیندهایی است. در این فرآیند، جریان فلز تغییر شکل‌های به‌اندازه کافی بزرگی را تجربه می‌کند، به‌گونه‌ای که اتصال اولیه المان‌ها خراب می‌شود. زمانی که تغییر شکل‌های بزرگ در روش المان محدود مرسوم واقع می‌شود، امکان منفی شدن مقادیر ژاکوبیان در المان تغییر شکل یافته به وجود می‌آید که حل را متوقف می‌کند. الگوریتم شبکه زدن مجدد می‌تواند در کوپل کردن سیال و سازه مورد استفاده قرار گیرد؛ اما این روش به‌خودی‌خود حوزه دیگری را شامل می‌شود. علاوه بر این، در فرآیند شبکه زدن مجدد معمولاً مقداری از اطلاعات شبکه از دست می‌رود [2].

## ۲-۱-۵- روش ALE

در بخش‌های گذشته پیرامون ویژگی‌های هر کدام از روش‌های لاگرانژی و اویلری توضیحاتی داده شد. برای غلبه بر محدودیت‌های روش‌های فوق، روشی مبتنی بر تلفیق این روش‌ها بنا نهاده شده است. در این روش که خود مبتنی بر یک فرمولاسیون مکانیک محیط ALE پیوسته منحصربه‌فرد است، هر وقت تغییر فرم المان‌های لاگرانژی از حدی بیشتر شد، با استفاده از روش اویلری ماده درون سلول‌ها جابجا شده و مش بندی جدید لاگرانژی مطابق با محل جدید ماده مورد بررسی ایجاد می‌گردد. بدین ترتیب هم می‌توان از قابلیت منحصربه‌فرد روش اویلری در تغییر شکل‌های بسیار بزرگ بهره برد و هم مرزهای مواد را با دقت مناسبی پیش-بینی کرد.

روش ALE به فراوانی در مدل‌سازی محیط‌های واسط در مسائل اندرکنش سیال و سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌عنوان مثال در مدل‌سازی آب در اطراف ماده منفجره در یک مسئله انفجار زیرآب روش ALE در مسائل برخورد نیز کاربرد داشته و در آن امکان بررسی دقیق تغییر شکل نهایی

<sup>1</sup> Arbitrary Lagrangian Eulerian Method

دو قطعه درگیر در برخورد وجود دارد. روش ALE اصولاً بر اساس تطبیق دادن شبکه بدون اصلاح کردن توپولوژی شبکه است. از این رو تا زمانی که چرخش‌ها، حرکت انتقالی و یا تغییر شکل‌های جامد در محدوده مشخصی باقی می‌مانند بسیار خوب عمل می‌کند و استفاده از آن پیشنهاد می‌شود. هنگامی که شرایط فوق برآورده نشود (مانند شبیه‌سازی دریچه‌های قلب که تغییر شکل‌های بسیار بزرگ هستند)، تطبیق دادن شبکه به‌گونه‌ای که کیفیت شبکه حفظ می‌شود ولی توپولوژی شبکه از بین نرود بسیار دشوار است. برای فرار از این مشکل، شبکه‌بندی مجدد پیشنهاد می‌شود و این شبکه‌بندی مجدد تنها در نقاطی انجام می‌گردد که کیفیت شبکه به شدت کاهش یافته است. تغییر در توپولوژی شبکه در خلال شبکه‌بندی مجدد نیازمند استفاده از فن‌های درون‌یابی برای پوشش دادن پیشینه متغیرها بر روی شبکه که تازه تولید شده است، این کار نه تنها پخش مصنوعی را در حل وارد می‌کند، بلکه اعمال آن با دقت کافی برای مسائل سه‌بعدی وقت‌گیر است.

با این وجود مشخص شده است که دقت روش ALE بهتر از دقت روش منطقه‌بندی مجدد است زیرا اگر الگوریتم نگاشته کردن که برای انتقال حل از شبکه تغییر شکل یافته به شبکه نرمال مجدد تولید شده استفاده می‌شود و الگوریتم جابه‌جایی از مرتبه مشابه انتخاب شوند دارای دقت از مرتبه دوم در فرمول‌بندی ALE است. در مقابل، الگوریتم نگاشت در منطقه‌بندی مجدد تنها دارای دقت در مرتبه‌بندی مجدد تنها دارای دقت از مرتبه یک است. مشکل دیگر روش ALE این است که به کار بردن کد ساده واحد برای تحلیل سیال - سازه بسیار دشوار است [۲].

## ۲-۱-۶- روش‌های عددی بدون شبکه

یک گروه روش‌های عددی که امروزه بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش‌های بدون شبکه می‌باشند. این روش‌ها با پوشش دادن ضعف‌های روش‌های عددی اجزای محدود و تفاضل محدود، به‌خصوص در مدل‌سازی سیالات و تغییر شکل‌های شدید، کاربرد بسیاری یافته‌اند. در این روش‌ها



به جای شبکه‌بندی‌های مرسوم جهت برقراری ماتریس همساز، تنها از یک سری ذرات استفاده می‌شود [4]. روش‌های بدون شبکه از سابقه کمتری نسبت به روش‌های سنتی که بر اساس شبکه‌بندی محیط حل هستند برخوردارند. باین وجود، به خوبی جای خود را در تحلیل‌های عددی باز کرده‌اند. مشخصه مستقل از شبکه بودن در روش‌های بدون شبکه راه حل جدیدی را برای روش‌های شامل تغییر شکل‌های بزرگ فراهم کرده است. در این روش‌ها، شبکه موجود روش‌های مرسوم با گروهی از ذرات همسایه که خواص ذرات (جرم، سرعت، فشار) را حمل می‌کنند، جایگزین شده و این ذرات به یکدیگر اثر متقابل می‌گذارند. در این جداسازی، هیچ اتصال ثابت یا از پیش تعیین شده‌ای وجود ندارد؛ بنابراین از این روش‌ها، می‌توان به عنوان روش‌های کارا و مؤثر امروزی نام برد. این روش‌ها قادر به مدل‌سازی هرچه بهتر تغییر شکل‌های تکیه‌گاهی، جابه‌جایی نواحی اندرکنش و تغییر شکل‌های شدید و پیچیده می‌باشند.

روش‌های بدون شبکه انواع مختلفی دارند که خلاصه آن‌ها در جدول (۲-۲) ارائه شده‌اند. روش‌های بدون شبکه را می‌توان بر اساس تابع تقریب آن‌ها طبقه بندی نمود. روش‌های حداقل مربعات، توابع مجموع و توابع درون یابی نمونه ای از این روش‌ها می‌باشد. در سال‌های اخیر با توجه به کاربرد روش‌های بدون شبکه در حل مسایل پیچیده مکانیک جامدات و سیالات، مطالعات گسترده ای بر روی این روش‌ها صورت گرفته است. از روش‌های بدون شبکه برای مدل‌سازی پدیده‌هایی چون تحلیل تغییر شکل‌های بزرگ در جامدات، تحلیل‌های ارتعاش بر روی صفحات و پوسته‌ها، مسایل مربوط به کمناش سازه‌ها، تحلیل‌های غیر خطی تحکیم در پی‌ها، جریان‌های تراکم ناپذیر و مسایل مربوط به ضربه و انفجار استفاده می‌شود.

به طور کلی روش‌های بدون شبکه را می‌توان به سه دسته فرم ضعیف شده، فرم قوی و روش ذرات تقسیم بندی نمود. روش‌های بر پایه فرم قوی مانند روش تجمعی، دارای روند محاسباتی مناسب و کاملاً بدون شبکه می‌باشد و نیاز به انتگرال گیری بر روی محیط گسسته ندارد، اما دارای معایبی مانند دقت

پایین محاسبات و ناپایداری های عددی می باشند. ناپایداری های عددی زمانی که از نقاط نامنظم استفاده شود، بیشتر نیز خواهد بود. در مقابل روش های بر پایه فرم ضعیف مانند روش های EFG و PIM دارای دقت مناسبی در محاسبات و پایداری مناسب می باشند و شرایط مرزی را به خوبی ارضا می نمایند. نمونه ای از روش های بنا شده بر پایه ذرات نیز روش هیدرودینامیک ذرات هموار می باشد که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

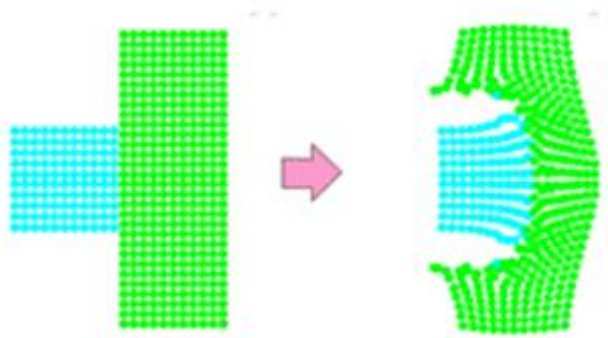
جدول ۲-۲- برخی از روش های عددی بدون شبکه [1]

نام روش	مرجع	روش تقریب
SPH(Smooth particle hydrodinamic)	Lucy,gingold, monaghan(1977)	توابع مجموع
Finite point	Onate(1996)	نقطه محدود
Diffuse element method	Neyroles(1992)	حداقل مربعات
Element free galerkin	Belytschko(1994-98)	حداقل مربعات
Reproduced kernel particle method	Liu(1995-96)	توابع مجموع- گالرکین
Free mesh method	Yagawa,yamada(1996-98)	روش گالرکین
Point interpolation method	Liu,Gu,Wang(1999-2002)	روش گالرکین، پتروف گالرکین، توابع درون یابی

## ۲-۲- روش هیدرودینامیک ذرات هموار

### ۲-۲-۱- مقدمه

روش SPH به جای شبکه بندی از یک سری ذرات استفاده می کند که این ذرات خواص ماده مورد تحلیل را دارا بوده و بر اساس قانون انرژی حرکت می کنند. از این روش ابتدا تنها برای بررسی و مدل سازی کیهکشانها، حرکت ستارگان و اجرام آسمانی استفاده می شد (لوسی<sup>۱</sup> و موناگان<sup>۲</sup>) [۵ و ۶] ولی امروزه در مدل سازی های پیچیده ای مانند جریان های دینامیکی سیال، جریان در مواد متخلخل و انفجار مورد استفاده قرار می گیرد. در بررسی ضربات شدید و ناگهانی و همچنین انفجارهای مختلف در مواد مختلف، به علت درهم پیچیده شدن مش ها و ایجاد خطا، توصیه می شود که از روش های بدون شبکه استفاده شود (شکل ۲-۴). در میان روش های عددی بدون شبکه، روش SPH نسبت به سایر روش های بدون شبکه تطبیق پذیری (Adaptivity) بسیار بالایی داشته و به راحتی مسائل را مورد بررسی قرار می دهد. در این روش به جای فرم ضعیف شده از تابع تقریب هموارسازی استفاده شده و پایداری روش را تضمین می نماید [۱].



شکل ۲-۴- نمونه ای از مدل SPH

<sup>۱</sup> Lucy

<sup>۲</sup> Monaghan

روش هیدرودینامیک ذرات هموار SPH از جهاتی مشابه روش تفاضل محدود است که برای حل معادلات دیفرانسیل در فرم قوی مورد استفاده قرار می‌گیرد. وجه تشابه روش هیدرودینامیک ذرات هموار SPH با روش تفاضل محدود در ارائه روابطی جهت برآورد عددی مشتقات یکسری داده در نقاط مورد نظر می‌باشد. در مقابل، برتری آن در قابلیت مدل‌سازی هندسه‌های پیچیده با توزیع نسبتاً نامنظم ذرات است. بعلاوه ذرات امکان حرکت آزادانه در فضا را دارند که مدل‌سازی مسائل دینامیک سیالات و مسائل مکانیک جامدات درگیر با تغییر شکل‌های بزرگ را در دیدگاه لاگرانژی ممکن می‌نماید. این در حالی است که روش تفاضل محدود، تنها قابلیت حل مسائل را در دیدگاه اویلری دارد. روش SPH مبتنی بر تخمین مقدار تابع و یا مقادیر مشتقات آن در یک‌ذره برحسب مقادیر موجود در ذرات هم‌جوار می‌باشد که با استفاده از آن می‌توان فرم عددی مشتقات را در معادلات دیفرانسیل جایگزین فرم دقیق نموده و معادله را به صورت عددی حل نمود.

## ۲-۲-۲- تابع هموارساز

ایده اساسی هیدرودینامیک ذرات هموار SPH بر پایه خصوصیات تابع دلتای دیراک می‌باشد. به عبارت دیگر اگر تابع  $f$  تابع موقعیت بردار مکان و  $\Omega$  دامنه باشد، بر اساس خواص تابع دیراک، مقدار تابع در نقطه مورد نظر به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\xi) \delta(x - \xi) d\xi \quad (۲-۲)$$

تابع دلتای دیراک تابعی است که در تمام نقاط دامنه دارای مقدار صفر می‌باشد و تنها در نقطه  $\xi$  برابر واحد می‌باشد.

$$\delta(x - \xi) = \begin{cases} 1 & x = \xi \\ 0 & x \neq \xi \end{cases} \quad (۳-۲)$$

برای کاربردی نمودن خاصیت تابع دلتای دیراک، در روش SPH، تابع دیراک با تابع هموارسازی  $W$  جایگزین می‌گردد.

تابع وزن مورد استفاده باید مثبت باشد و مقادیر غیر صفر تابع در همسایگی نقطه مرکزی قرار داشته باشند. این همسایگی، دامنه هموارسازی نام دارد و در خارج از این همسایگی تابع وزن دارای مقدار صفر می باشد. به عبارت دیگر دامنه هموارسازی<sup>۱</sup> با شعاع  $h$ ، شعاع تأثیر نقطه مورد بررسی را تعیین می نماید. شکل تابع هموارسازی (وزن) به صورت زنگوله ای می باشد و سطح زیر نمودار آن مشابه خاصیت دلتای دیراک باید برابر یک باشد. خصوصیات و شروط اساسی تابع وزن  $W$  به طور خلاصه به صورت زیر می باشند:

۱- تابع وزن باید نرمال باشد<sup>۲</sup>

$$\int_{-\infty}^{+\infty} W(x - \xi, h) d\xi = 1 \quad (۴-۲)$$

۲- تابع وزن فشرده باشد<sup>۳</sup>

$$\text{if } |x - \xi| > kh \rightarrow W(x - \xi, h) = 0 \quad (۵-۲)$$

در شرط فشرده گی،  $k$  ثابتی است که به تابع هموار در نقطه  $X$  وابسته بوده و مساحت مؤثر تابع هموار را تعیین می کند. به این ناحیه تحت تأثیر، دامنه هموارسازی می گویند.

شرط فشرده گی باعث تبدیل شرایط کلی به شرایط موضعی شده و به جای ماتریس کلی، ماتریس های مجزا ایجاد نموده و محاسبات را ساده تر می نماید.

۳- تابع وزن همواره مثبت باشد.

از نظر ریاضی این شرط الزامی نمی باشد، ولی از نظر فیزیکی، عدم رعایت این شرط، باعث ناپایداری مدل شده و جواب های غلط از لحاظ فیزیکی مانند چگالی و یا انرژی منفی ارائه می نماید.

---

<sup>۱</sup> Support domain

<sup>۲</sup> Normalization Condition

<sup>۳</sup> Compactness Condition

۴- با افزایش فاصله از نقطه مورد نظر به صورت نمایی کاهش می یابد.

این شرط از لحاظ فیزیکی بدیهی به نظر می رسد. به طور کلی با افزایش فاصله از مرکز، تأثیرگذاری نقاط کاهش یافته و از نیروهای اندرکنشی کاسته می شود.

۵- دارای شرایط تابع دلتای دیراک باشد

$$\lim_{h \rightarrow 0} \int W(x - \xi, h) d\xi = \delta(x - \xi) \quad (6-2)$$

در صورتی که شرایط قبلی به طور کامل رعایت شوند، این شرط نیز محقق است. در حقیقت با کاهش منطقه تحت تأثیر و نقطه ای شدن آن، مقدار تقریبی به مقدار واقعی نزدیک می شود.

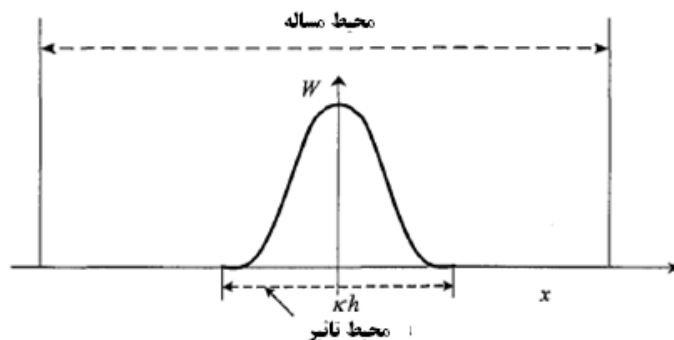
۶- تابع فرد باشد (شرط تقارن)

بیانگر این نکته است که نقاطی که در فواصل مساوی از مرکز دارند، تأثیر یکسانی خواهند داشت. این شرط الزامی نمی باشد و در برخی شرایط حذف می گردد.

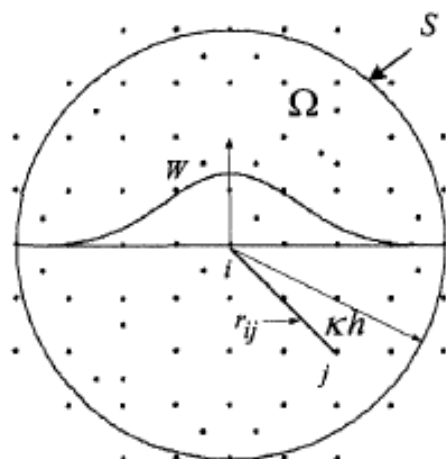
۷- تابع هموار باشد (شرط همواری)

هرچه تابع هموارتر و با شیب ملایم تر باشد، تأثیر خطاهای احتمالی در مسئله را کاهش می دهد. به عبارت دیگر هرچه شیب تابع ملایم تر باشد، جواب دقیق تر خواهد بود.

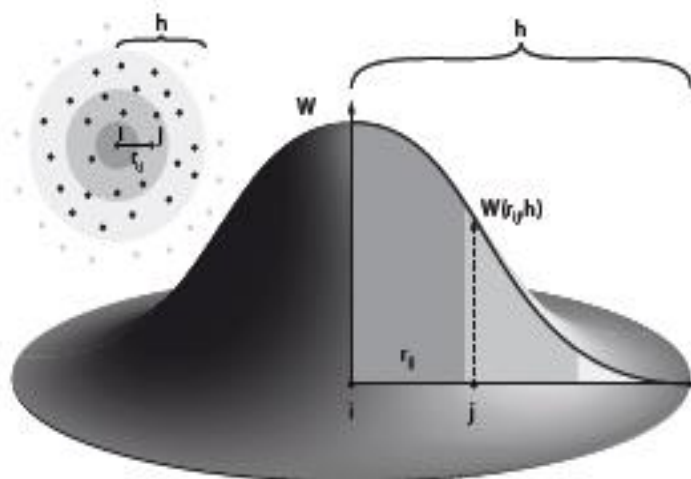
اشکال (۵-۲) تا (۷-۲) تابع هموارساز را در حالات یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی نمایش می دهند.



شکل ۲-۵- تابع هموار سازی در حالت یک بعدی [1]



شکل ۲-۶- ذرات موجود در دامنه هموارسازی ذره مرکزی و نمایش کیفی تخصیص مقدار وزن به آن‌ها در حالت دوبعدی [1]



شکل ۲-۷- ذرات در روش بدون شبکه ، طول هموارسازی ، تابع وزن و نحوه تأثیرگذاری ذرات بر یکدیگر [۷]

به‌طور کلی و خلاصه روش SPH بر پایه خصوصیات تابع دلتای دیراک بنا شده است. در این روش هریک از ذرات مشخصاتی را با خود حمل نموده و تغییرات آن‌ها توسط تابع تقریب روی فضای گسسته، به‌صورت رابطه (۲-۷) و (۲-۸) تعیین می‌گردد. انتگرال‌گیری در فضایی محدود به طول هموارسازی انجام گرفته و مشخصات هر نقطه مانند چگالی بر اساس فاصله هر ذره تا ذره موردنظر با توجه به تابع هموارسازی تعیین می‌گردد. نحوه انتگرال‌گیری و تقریب تابع بر روی سطح  $\Omega$  ، در روابط زیر ارائه شده‌اند:

$$\begin{aligned}
 f(x) &= \int_{\Omega} f(\hat{x}) W_{ij} \cdot d\hat{x} \cong \sum_{j=1}^N f(x_j) W_{ij} \cdot \Delta V_j \\
 &= \sum_{j=1}^N f(x_j) W_{ij} \cdot \frac{1}{\rho_j} \cdot (\rho_j \cdot \Delta V_j) \quad , \quad \rho_j \cdot \Delta V_j = m_j \\
 \langle f(x_i) \rangle &= \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W_{ij}
 \end{aligned}
 \tag{۷-۲}$$

$$W_{ij} = (|x_i - x_j|, h) \tag{۸-۲}$$

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

### ۲-۲-۳- انواع توابع هموارساز

همان‌طور که گفته شد توابع وزنی نقشی بسیار اساسی در روش SPH ایفا می‌نمایند. در حقیقت توابع هموار سازی جانشین تابع دیراک شده و مشخصات نقاط مختلف را تقریب می‌زنند. حال هر چه تابع هموارساز همخوانی بیشتری با مسئله موردنظر داشته باشد، جواب تعیین‌شده دقیق‌تر خواهد بود. در مورد انتخاب و ساختن توابع وزن تحقیقات زیادی انجام‌شده است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات لیو<sup>۱</sup> و همکارانش [8] اشاره کرد. لازم به ذکر است که در تمامی مطالعات انجام‌شده شرایط لازم برای توابع هموارسازی (مانند نرمالیزه، فشردگی، همواری) رعایت شده است، به عبارت دیگر از هر تابعی که دارای شرایط بیان‌شده باشد، می‌توان به‌عنوان تابع وزن استفاده نمود. در ادامه به بررسی چند نمونه از توابع هموار ساز پرداخته می‌شود. در این قسمت از ذکر روابط ریاضی و ضابطه‌های تابع صرف‌نظر شده و تنها برخی توابع، معرفی‌شده‌اند، روابط ریاضی آن‌ها در جدول (۲-۳) ارائه شده است.

<sup>۱</sup> Liu

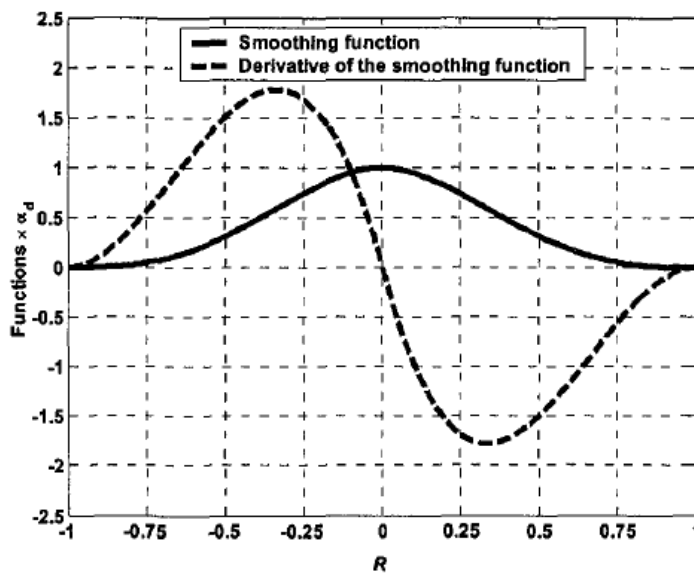


لوسی<sup>۱</sup> [5] تابع زنگوله‌ای شکل را به‌عنوان اولین تابع هموار ساز SPH معرفی نمود. معادله تابع هموار ساز وی در رابطه (۹-۲) و شکل تابع و مشتق اول آن در شکل (۸-۲) ارائه شده است.

$$W(R, h) = \alpha_d \begin{cases} (1 + 3R)(1 - R)^3, & R \leq 1 \\ 0, & R > 1 \end{cases} \quad (9-2)$$

در رابطه فوق  $\alpha_d$  برای حالات یک بعدی تا سه بعدی به ترتیب برابر  $\frac{5}{4h}$ ،  $\frac{5}{\pi h^2}$ ،  $\frac{105}{16\pi h^3}$  و همچنین

$$R = \frac{r}{h} = \left| \frac{x-x'}{h} \right| \text{ می باشد.}$$



شکل ۸-۲- تابع هموار ساز Lucy و مشتق اول آن [5]

چندی بعد موناگان [6] در مقالات خود به این نتیجه رسید که هسته‌ی تابع هموار ساز SPH می‌بایست دارای تعبیر فیزیکی باشد و بدین منظور استفاده از تابع گاوسی را پیشنهاد نمود. حتی مشتقات مرتبه بالاتر تابع گاوسی به‌اندازه کافی هموار می‌باشد. این تابع دارای دقت و پایداری بالایی بوده و حتی در مدل‌سازی فضاها باری‌نظمی شدید نیز نتایج مطلوبی ارائه می‌کند.

<sup>۱</sup> Lucy

از لحاظ تئوری تنها زمانی شرط فشردگی برای این تابع رعایت می‌شود که نسبت فاصله بین دونقطه به شعاع هموارسازی به سمت بی‌نهایت میل نماید. ولی از نظر عملی با توجه به اینکه این تابع بسیار سریع به سمت صفر میل می‌نماید، فشرده محسوب می‌شود.

یکی از معایب این تابع، هزینه بالای استفاده از آن می‌باشد. با توجه به اینکه تابع وزنی تنها در فواصل بسیار دور از مرکز به صفر می‌رسد، باید از نقاط بیشتری در داخل دامنه هموارسازی استفاده شود که باعث افزایش دامنه و افزایش ماتریس‌های محاسباتی می‌گردد.

معادله تابع هموار سازی در رابطه (۲-۱۰) و شکل تابع و مشتق اول آن در شکل (۲-۹) ارائه شده است.

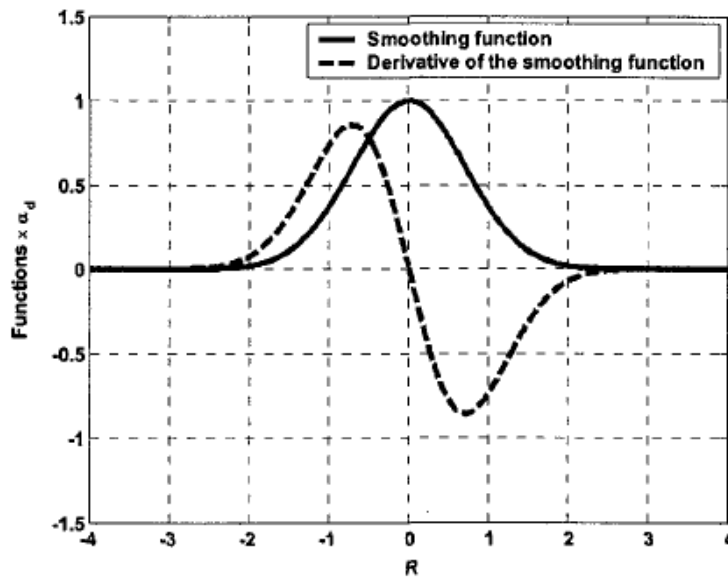
$$W(R, h) = \alpha_d \cdot e^{-R^2} \quad (۲-۱۰)$$

در رابطه فوق  $\alpha_d$  برای حالات یک بعدی تا سه بعدی به ترتیب برابر  $\frac{1}{\pi^2 h}$ ،  $\frac{1}{\pi h^2}$ ،  $\frac{1}{\frac{3}{\pi^2} h^3}$  و همچنین  $R = \frac{r}{h} = \left| \frac{x-x'}{h} \right|$  می‌باشد.

پس از تحقیقات متعدد، موناگان و لاتانزیو<sup>۱</sup> (۱۹۸۵) تابع هموارسازی بر پایه کثیرال جمله‌های درجه سه ارائه کرد.

---

<sup>۱</sup> Lattanzio

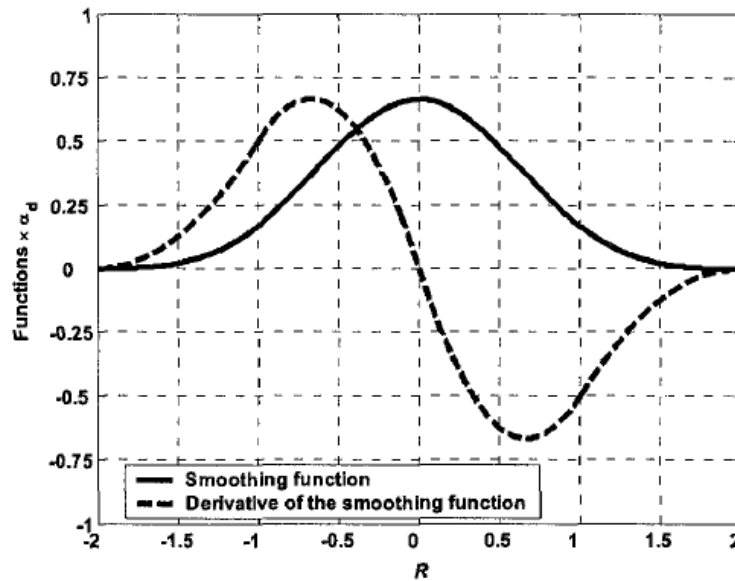


شکل ۲-۹- تابع هموارساز Monaghan با هسته‌ی گاوسی و مشتق اول آن [6]

به دلایل پرشماری از جمله شباهت به هسته‌ی گاوسی، اثرات کمتر فشردگی در مرزها و هموار باقی ماندن تابع هموارساز در برخی مشتقات مراتب بالاتر (برخلاف تابع گاوسی)، تابع اخیر را به‌عنوان متداول‌ترین هسته SPH می‌شناسند که اغلب در مقالات و پژوهش‌های اخیر از آن استفاده می‌شود. معادله تابع هموار ساز وی در رابطه (۲-۱۱) و شکل تابع و مشتق اول آن در شکل (۲-۱۰) ارائه شده است.

$$W(R, h) = \alpha_d \begin{cases} \frac{2}{3} - R^2 + \frac{1}{2}R^3, & 0 \leq R < 1 \\ \frac{1}{6}(2 - R)^3, & 1 \leq R \leq 2 \\ 0, & R > 2 \end{cases} \quad (۲-۱۱)$$

در رابطه فوق  $\alpha_d$  برای حالات یک بعدی تا سه بعدی به ترتیب برابر  $\frac{1}{h}$ ،  $\frac{15}{7\pi h^2}$ ،  $\frac{3}{2\pi h^3}$  و همچنین  $R = \frac{r}{h} = \left| \frac{x - x'}{h} \right|$  می‌باشد.



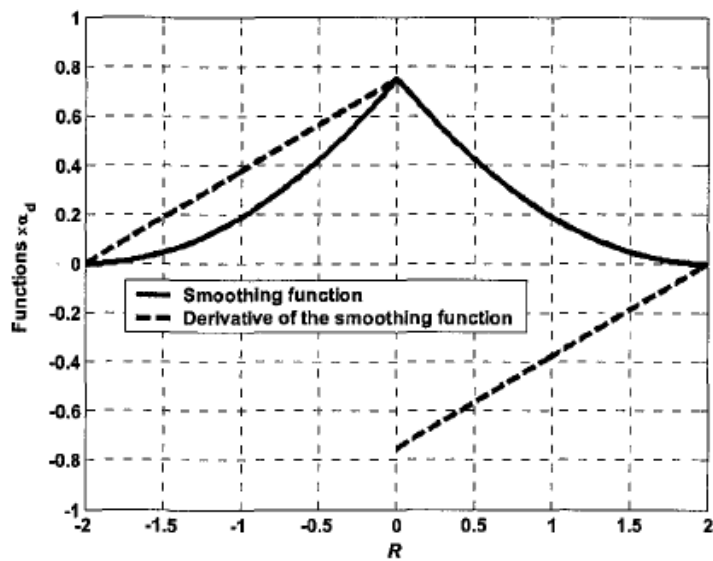
شکل ۲-۱۰- تابع هموارساز Cubic Spline و مشتق اولش.

در سال ۱۹۹۶، جانسون<sup>۱</sup> [9] تابع مرتبه چهارمی برای مدل‌سازی ضربات شدید ارائه نمود. تابع پیشنهادی وی از جهاتی خلاف سایر توابع می‌باشد. مطابق شکل (۲-۱۱)، مشتق این تابع با نزدیک شدن ذرات به مرکز، همواره صعودی و با دور شدن از مرکز همواره نزولی است. این خاصیت به پایداری مسائل ضربه‌ای کمک می‌نماید. معادله تابع هموار ساز وی در رابطه (۲-۱۲) و شکل تابع و مشتق اول آن در شکل (۲-۱۱) ارائه شده است.

$$W(R, h) = \alpha_d \begin{cases} \frac{3}{16}R^2 - \frac{3}{4}R + \frac{3}{4} & , 0 \leq R < 2 \\ 0 & , R > 2 \end{cases} \quad (2-12)$$

در رابطه فوق  $\alpha_d$  برای حالات یک بعدی تا سه بعدی به ترتیب برابر  $\frac{1}{h}$ ،  $\frac{2}{\pi h^2}$ ،  $\frac{5}{4\pi h^3}$  و همچنین  $R = \frac{r}{h} = \left| \frac{x-x'}{h} \right|$  می‌باشد.

<sup>۱</sup> Johnson



شکل ۲-۱۱- تابع مرتبه چهارم و مشتق اولش

طی سالیان اخیر، محققان به فراخور موضوع کاری درصدد استخراج توابعی برآمدند که حداکثر کار آیی و حداقل خطا را در آن زمینه فراهم آورد. لذا، دامنه‌ی گسترده‌ای از انواع گوناگون توابع هموارساز SPH در دسترس است که در جدول (۲-۳) به برخی اشاره شده است.

جدول ۲-۳- برخی از توابع هموارساز درروش SPH [1]

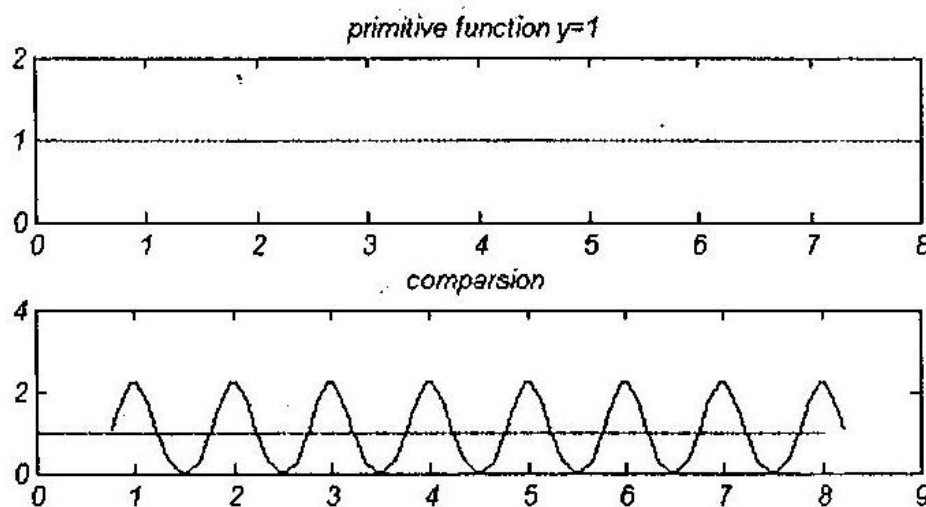
نام روش	تابع هموارساز $W(r,h)$
مرتبه چهارم لوسی (۱۹۷۷)	$\alpha_d(1 + 3R)(1 - R)^3, R < 1$
تابع گوسی (Gingold, Monaghan 1977)	$\alpha_d \cdot e^{-R^2}$
اسپیلاین مکعبی (Monaghan, Lattanzio 1985)	$\alpha_d \begin{cases} \frac{2}{3} - R^2 + \frac{1}{2}R^3, & 0 \leq R < 1 \\ \frac{1}{6}(2 - R)^3, & 1 \leq R \leq 2 \end{cases}$
پله‌ای مرتبه چهارم (morris 1996)	$\alpha_d \begin{cases} (R + 2/5)^4 - 5(R + 1/5)^4 + 10(R + 0/5)^4, & 0 \leq R < 0/5 \\ (2/5 - R)^4 - 5(1/5 - R)^4, & 0/5 \leq R < 1/5 \\ (2/5 - R)^4, & 1/5 \leq R \leq 2/5 \end{cases}$
پله‌ای مرتبه پنجم (Morris 1996)	$\alpha_d \begin{cases} (3 - R)^5 - 6(2 - R)^5 + 15(1 - R)^5, & 0 \leq R < 1 \\ (3 - R)^5 - 6(2 - R)^5, & 1 \leq R < 2 \\ (3 - R)^5, & 2 \leq R \leq 3 \end{cases}$
مرتبه ۲ (Johnson 1996)	$\alpha_d \left( \frac{3}{16}R^2 - \frac{3}{4}R + \frac{3}{4} \right), 0 < R < 2$
گوسی ویژه (Monaghan, Lattanzio 1985)	$\alpha_d \cdot \left( \frac{3}{2} - R^2 \right) e^{-R^2}, 0 < R < 2$
مرتبه ۲ گنبدی شکل (Hicks, Liebrok 2000)	$\alpha_d \cdot (1 - R^2), 0 < R < 1$
مرتبه چهارم جدید (Liu, Lam 2002)	$\alpha_d \left( \frac{2}{3} - \frac{9}{8}R^2 + \frac{19}{24}R^3 - \frac{5}{32}R^4 \right), 0 \leq R \leq 2$

### ۲-۲-۴- طول هموارسازی

پس از تابع هموار سازی  $W$ ، تعیین طول هموار سازی نیز یکی از پارامترهای بسیار مهم می باشد. یکی از مهم ترین پارامترهای تأثیرگذار در دقت روش SPH مقدار طول هموارسازی  $h$  می باشد که به صورت مستقیم بر روی کار آبی مسئله تأثیرگذار است. در صورتی که  $h$  کوچک باشد تعداد نقاط قرار گرفته در دامنه تأثیر تابع وزن کم شده و حتی ممکن است در برخی مواقع به صفر برسد. کاهش طول هموارسازی باعث عدم انتقال مناسب خواص بین ذرات شده و دقت را کاهش می دهد.

در صورتی که  $h$  بزرگ باشد نقاط دور از نقطه مورد نظر نیز در برآورد مقدار مؤثر خواهد بود و جزئیات بسیار زیادی در نظر گرفته می شود، در نتیجه علاوه بر صرف هزینه و وقت بالا، نتایج حل مسئله نیز به سوی همواری شدید می گرایند، به این ترتیب، جواب مناسب و با دقت قابل قبول به دست نمی آید.

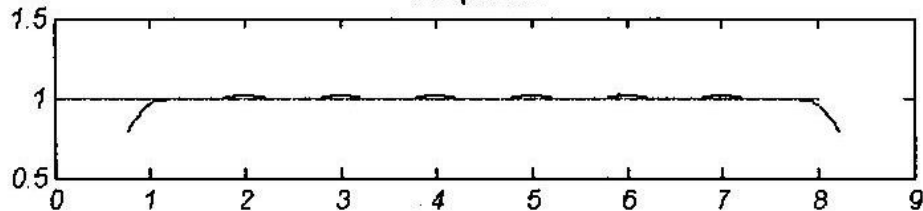
به عنوان مثال اگر تابع دلتای دیراک را، که در آن  $h$  به سمت صفر میل می کند، برای برازش نقاط گسسته استفاده کنیم شکل تابع برازش هموار نیست و به صورت ضربانی (نوسانات خیلی شدید) می باشد. در این صورت جواب، تنها در نقاط داده کاملاً دقیق بوده و در بقیه نقاط صفر است. برای روشن تر شدن مطلب فوق تابع  $y=1$  را که بر روی مجموعه دامنه رشته داده ورودی به صورت مجموعه اعداد طبیعی بین یک تا هشت  $X=\{1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8\}$  تعریف شده است در نظر می گیریم. نتایج حاصل از درون یابی در بیست نقطه با توزیع یکنواخت در بازه یکتا هشت با به کارگیری تابع هموارساز ذکر شده در روش اسپیلاین مکعبی مذکور در جدول ۲-۳ در شکل (۲-۱۲) نمایش داده شده است.



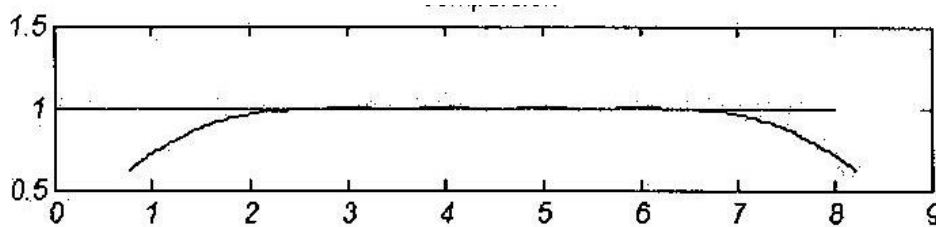
شکل ۲- ۱۲- عملیات درون یابی در حالتی که طول دامنه هموارساز  $0/3$  است با استفاده از روش SPH [10]

اولین نکته ای که از شکل (۲-۱۲) برداشت می شود تأثیر انتخاب طول دامنه هموارسازی  $h$  در دقت عملیات درون یابی با استفاده از روش ذرات متحرک استاندارد SPH است. همان گونه که از اشکال (۲-۱۲) و (۲-۱۳) استنباط می شود، با روند افزایش طول دامنه هموارسازی رفتار تابع تقریبی حاصل از

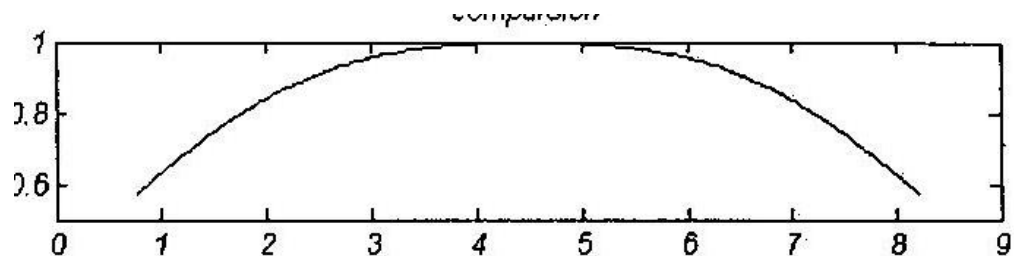
آنالیز SPH به رفتار تابع دقیق اولیه می‌گراید. چنانچه این افزایش طول دامنه هموارسازی بی‌وقفه ادامه یابد، به همواری بیش‌از حد می‌انجامد و نتایج تحلیل غیرقابل‌اعتماد خواهد بود، همان‌گونه که از شکل (۲-۱۳) برمی‌آید.



شکل ۲-۱۳- عملیات درون‌یابی در حالتی که طول دامنه هموارسازی 0/75 است با استفاده از روش SPH [10]



شکل ۲-۱۴- عملیات درون‌یابی در حالتی که طول دامنه هموارسازی 1/55 است با استفاده از روش SPH [10]

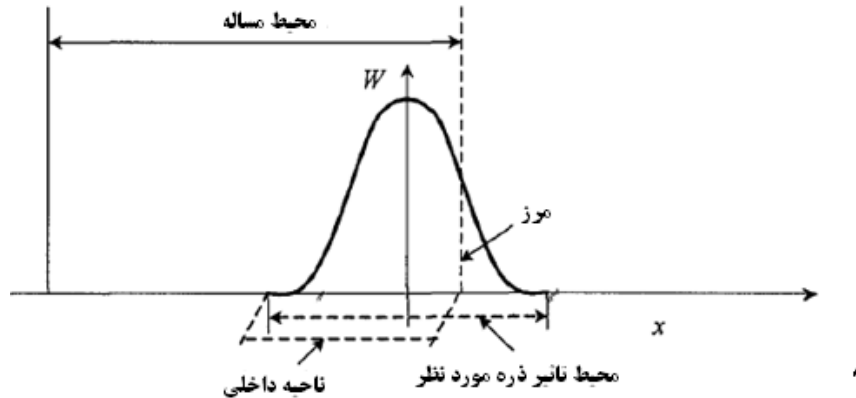


شکل ۲-۱۵- عملیات درون‌یابی در حالتی که طول دامنه هموارسازی 2/6 است با استفاده از روش SPH [10]

به‌طور کلی پیشنهاد می‌شود تعداد ذراتی که داخل دامنه هموارسازی قرار می‌گیرند با احتساب خود ذره موردبررسی برای حالت یک‌بعدی حدود ۵، در حالت دوبعدی حدود ۲۱ و در حالت سه‌بعدی حدود ۵۷ ذره باشد.



نتیجه دیگری که از اشکال (۲-۱۱) تا (۲-۱۵) دریافت می‌گردد عدم دقت روش SPH در نقاط نزدیک به مرز و روی مرز مسئله (نقاط ۱ و ۸) می‌باشد که علت آن از بین رفتن شرط واحد بودن سطح زیر تابع وزن می‌باشد. این نقیصه در شکل (۲-۱۶) به خوبی نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۶- از بین رفتن شرط مساحت واحد زیر تابع وزن در نقاط مرزی و نزدیک مرز در روش SPH

با فرض اینکه طول هموارسازی اولیه ذره  $i$  برابر  $h_i^0$  و تعداد ذرات داخل دامنه ذره مورد نظر  $N_i^0$  و جرم ذرات داخل دامنه برابر  $m_i$  خواهد بود. تعداد ذرات اولیه بسته به ابعاد مسئله بین ۵ ذره برای حالت یک‌بعدی، ۲۱ ذره برای حالت دوبعدی و ۲۷ ذره برای حالت سه‌بعدی پیشنهاد می‌شود [11].

طول هموارسازی اولیه  $h_i^0$  بر اساس چگالی اولیه  $\rho_i^0$  و برای حالت دوبعدی از رابطه زیر تعیین می‌گردد. در رابطه زیر  $c = \sqrt{\frac{1}{4\pi}}$  در نظر گرفته می‌شود.

$$h_i^0 = c \left[ \frac{\sum_{j=1}^{N_0} m_j}{\rho_i^0} \right]^{0/5} \quad (2-13)$$

در مسائل ضربه و انفجار، با توجه به وجود تغییر شکل‌های شدید، طول و دامنه هموارسازی باید به‌روز شود. در نتیجه طول هموارسازی به صورت متغیر در نظر گرفته می‌شود. معمولاً به‌روزرسانی طول هموارسازی و دامنه با توجه به چگالی متوسط ذرات، سرعت و گرادیان ذره صورت می‌گیرد. روش‌های

متعددی برای به‌روزرسانی دامنه ارائه‌شده است که به‌عنوان نمونه می‌توان به بنز<sup>۱</sup> [12] و نلسون<sup>۲</sup> [13] اشاره نمود. روش‌های مذکور برای تغییر شکل‌های ملایم جواب‌های مناسبی ارائه می‌نمایند ولی در مسائل انفجاری دقت پایینی دارند. در سال ۲۰۰۲، لیو [14] روشی مناسب برای مسائل انفجار ارائه نمود. طول هموارسازی در هر مرحله با توجه به رابطه زیر به‌روزرسانی می‌گردد:

$$\frac{Dh_i^n}{Dt} = -\frac{h_i^n}{\varphi_i^N \cdot d} \cdot \frac{D\varphi_i^n}{Dt} \quad (۱۴-۲)$$

با استفاده از معادلات حاکم و همچنین تابع وزن، رابطه فوق را می‌توان به شکل زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{Dh_i^n}{Dt} = -\frac{h_i^n}{\varphi_i^N \cdot d} \cdot \sum_{j=1}^{N_0} m_j (v_i^n - v_j^n) \cdot \nabla_i^n W_{ij} \quad (۱۵-۲)$$

در رابطه فوق،  $h_i^n$ ،  $\varphi_i^n$  و  $v_i^n$  به ترتیب طول هموارسازی، چگالی، سرعت و گرادیان تابع وزن ذره  $i$  و در مرحله  $n$  ام می‌باشد.

با توجه به اینکه رابطه فوق برای مدل‌سازی‌های شدید همواره جوابگو نمی‌باشد، لیو رابطه اصلاح‌شده زیر را پیشنهاد نمود [1]:

$$h_i^{n+1} = h_i^n + \theta \cdot \frac{Dh_i^n}{Dt} \cdot \Delta t \quad (۱۶-۲)$$

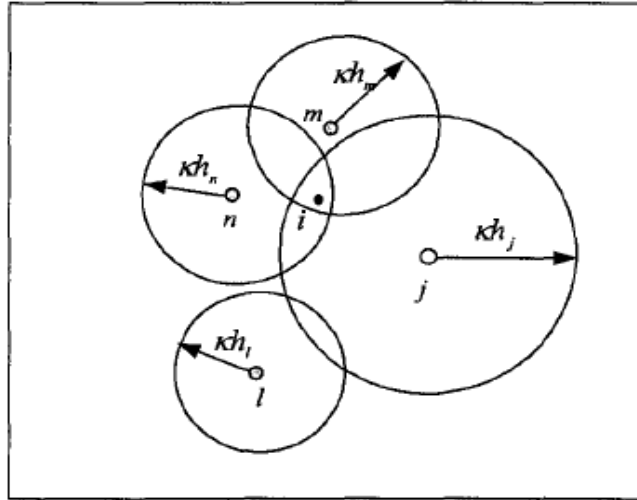
در رابطه فوق  $\theta$  در حدود یک فرض می‌شود.

در صورت به‌روزرسانی دامنه با توجه به مکان ذره و در طول زمان، طول هموارسازی نقاط مختلف نیز با توجه به چگالی محدوده موردنظر متفاوت خواهد بود و هر ذره دامنه منحصربه‌فرد خواهد داشت. مشکل اساسی که در این حالت ایجاد می‌شود، نقض قانون سوم نیوتن است. در حالتی که دامنه ذرات با یکدیگر برابر نباشد، ممکن ذره  $j$  بر روی ذره  $i$  تأثیر بگذارد ولی عکس آن صادق نباشد (شکل ۲-۲).

<sup>۱</sup> Benz

<sup>۲</sup> Nelson

۱۷). برای رفع این عیب، از روش‌های مختلف متقارن سازی مانند میانگین‌گیری حسابی و یا هندسی از طول‌ها و یا استفاده از حداقل و حداکثر طول هموارسازی استفاده می‌شود.

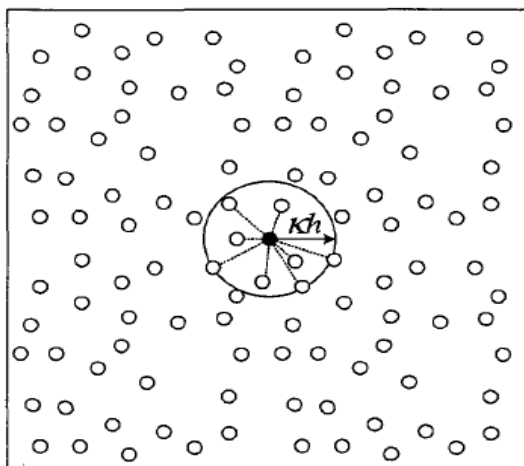


شکل ۲-۱۷- متفاوت بودن شعاع تأثیر نقاط مختلف و نقض قانون سوم نیوتن [1]

## ۲-۲-۵- جستجوی نقاط مجاور

برای تعیین نقاط داخل هر دامنه و تأثیر دهی آن نقاط در تابع وزن و تقریب مشخصات ذره موردنظر باید ابتدا نقاط مجاور و مؤثر را تعیین نمود. روش‌های متعددی برای تعیین نقاط مجاور (NNPS)<sup>۱</sup> وجود دارد. برخی از این روش‌ها عبارتند از: روش جستجوی تمام نقاط، الگوریتم لیست متصل و جستجوی درختی از جمله این روش‌ها می‌باشند. در این رساله از روش جستجوی تمام نقاط استفاده شده است. در این روش فاصله نقطه موردنظر تا تمام نقاط بررسی شده و با شعاع ناحیه هموارسازی مقایسه می‌شود. بدین ترتیب نقاط داخل ناحیه تعیین می‌گردند.

<sup>۱</sup> Nearest neighboring particle searching



شکل ۲-۱۸- نحوه تعیین نقاط همسایه

## ۲-۲-۶- انتگرال زمانی

پس از یافتن نقاط مؤثر در دامنه، برای حل معادلات حاکم از روش‌های انتگرال‌گیری زمانی مانند لیپ فراگ<sup>۱</sup> و رانگ کوتا<sup>۲</sup> می‌توان استفاده نمود. با توجه به اینکه روش لیپ فراگ، حافظه کمتری استفاده نموده و سرعت محاسبات آن بیشتر است در این رساله از این روش استفاده شده است. در این روش سرعت و مکان نقطه برای نصف بازه زمانی موردنظر محاسبه شده و در پایان وقفه زمانی اول، از روی تغییرات سرعت، چگالی و انرژی که برای نصف بازه زمانی اول محاسبه شده است، سرعت و مکان نقاط برای پایان مرحله اول زمانی محاسبه می‌شوند. روابط مربوط به این روش برای وقفه‌های زمانی مختلف در زیر ارائه شده است. برای زمان  $t = t_0 + \Delta t$  از روابط زیر استفاده می‌شود

$$\varphi_i \left( t_0 + \frac{\Delta t}{2} \right) = \varphi_i(t_0) + \frac{\Delta t}{2} \cdot D\varphi_i(t_0) \quad (17-2)$$

$$e_i \left( t_0 + \frac{\Delta t}{2} \right) = e_i(t_0) + \frac{\Delta t}{2} \cdot De_i(t_0) \quad (18-2)$$

$$v_i \left( t_0 + \frac{\Delta t}{2} \right) = v_i(t_0) + \frac{\Delta t}{2} \cdot Dv_i(t_0) \quad (19-2)$$

$$x_i(t_0 + \Delta t) = x_i(t_0) + \Delta t \cdot v_i \left( t_0 + \frac{\Delta t}{2} \right) \quad (20-2)$$

<sup>۱</sup> Leap frog

<sup>۲</sup> Rung-Kutta

برای برقراری همسازی بین نصف بازه اول و بازه اول ، چگالی، سرعت، انرژی و موقعیت نقاط از روابط زیر

تعیین می گردند:

$$\varphi_i(t) = \varphi_i\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) + \frac{\Delta t}{2} \cdot D\varphi_i(t - \Delta t) \quad (21-2)$$

$$e_i(t) = e_i\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) + \frac{\Delta t}{2} \cdot De_i(t - \Delta t) \quad (22-2)$$

$$v_i(t) = v_i\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) + \frac{\Delta t}{2} \cdot Dv_i(t - \Delta t) \quad (23-2)$$

انتگرال گیری زمانی برای مرحله بعدی  $t = t_0 + \Delta t$  نیز از روابط زیر محاسبه می گردد:

$$\varphi_i\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) = \varphi_i\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) + \Delta t \cdot D\varphi_i(t) \quad (24-2)$$

$$e_i\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) = e_i\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) + \Delta t \cdot De_i(t) \quad (25-2)$$

$$v_i\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) = v_i\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) + \Delta t \cdot Dv_i(t) \quad (26-2)$$

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + \Delta t \cdot v_i\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) \quad (27-2)$$



فصل سوم

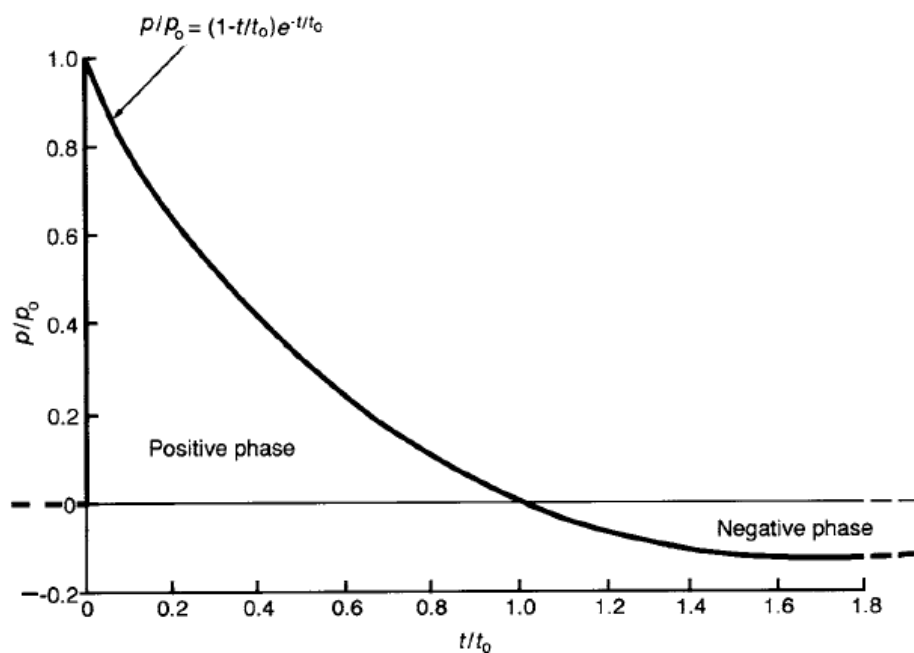
# مکانیزم انفجار

### ۳-۱- تحلیل انفجار و موج شوک در هوای آزاد

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 بالائی ایجاد و موج انفجار بلافاصله تولید و با سرعت بسیار زیادی منتشر می‌شود [15].

هر بارگذاری ناشی از موج انفجار توسط سه مشخصه شکل موج، فشار مبنا و زمان دوام تعیین می‌شود [16].

شکل کلی منحنی انفجار بر اساس اضافه فشار تولیدی - زمان را می‌توان با شکل (۳-۱) نمایش داد. در این منحنی  $p$  اضافه فشار (فشار انفجار در هوا) و  $t$  زمان می‌باشد. در ابتدا و به محض انفجار، فشار تولیدشده به حداکثر مقدار خود می‌رسد ( $p_0$ ). به این فشار حداکثر، فشار مبنا می‌گویند.



شکل ۳-۱- منحنی انفجار [17]

مقدار تخمین زده شده حداکثر فشار تولیدی در لحظه انفجار به فاصله دستگاه اندازه‌گیری تا نقطه انفجار وابسته است. مقدار حداکثر فشار تولیدشده برای TNT حدود  $200 \text{ PSI}$  تا  $300 \text{ PSI}$  و برای بمب هسته‌ای (معادل با هزار تن TNT) حدود  $2000 \text{ PSI}$  در فاصله ۳۰ متری از مرکز انفجار می‌باشد [17].



اضافه فشار تولیدی سپس به صورت نمایی کاهش می‌یابد. این کاهش فشار تا جایی ادامه می‌یابد که فشار موجود از فشار اتمسفر کمتر می‌گردد. به عبارت دیگر با گسترش موج، گازهای حاصل از انفجار سرد شده و فشار منفی می‌گردد. از این لحظه به بعد اصطلاحاً وارد فاز منفی شده‌ایم. در این مرحله با توجه به اختلاف فشار به وجود آمده، جهت جریان معکوس شده و به سمت مرکز انفجار بازمی‌گردد و اصطلاحاً مکش رخ می‌دهد. فشار ایجاد شده در فاز منفی بسیار کوچک است و معمولاً در طراحی‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. البته باید توجه نمود که زمان دوام فاز منفی بیشتر از فاز مثبت بوده و در مواردی مانند ورود جبهه موج به داخل سازه و یا در اجزای الحاقی سازه مهم و غیر قابل چشم‌پوشی است. مدت زمانی که فشار موجود بیشتر از فشار اولیه باشد (فاز مثبت) را با  $t_0$  نمایش می‌دهیم و به آن زمان دوام می‌گویند. لازم به ذکر است که شکل (۲-۳) منحنی انفجار برای مواد منفجره جامد را نشان می‌دهد. در صورتی که اگر ماده منفجره مایع و یا گاز باشد، شکل منحنی تفاوت خواهد داشت. در این حالت فشار به صورت تدریجی تا فشار مبنا افزایش یافته و سپس به فشار اولیه می‌رسد. همچنین فاز منفی در این حالت ایجاد نمی‌شود. انفجارهای تصادفی و غیرنظامی از این دسته می‌باشند.

از لحاظ تئوری و با فرض کروی بودن کامل موج منتشر شده، می‌توان رابطه زیر را ارائه نمود:

$$p_0 = \frac{kE}{R^3} \quad (۱-۳)$$

در رابطه فوق  $E$  انرژی تخلیه شده،  $R$  فاصله دستگاه اندازه‌گیری تا مرکز انفجار و  $p_0$  حداکثر فشار تولید شده می‌باشد. در رابطه فوق  $K$  یک پارامتر بدون بعد مهم می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد که انرژی آزاد شده توسط TNT حدود  $4600 \frac{J}{gr}$  می‌باشد. البته طبق تعریف استاندارد هر گرم TNT باید حدود ۴۶۱۰ ژول انرژی آزاد گردد.

رابطه) حداکثر فشار تولیدی را با شرایط واقعی‌تر ارائه می‌نماید و داریم:

$$p_0 = \frac{4120}{Z^3} - \frac{105}{Z^2} + \frac{39.5}{Z} \quad (۲-۳)$$

در رابطه فوق  $Z = \frac{R}{W^{1/3}}$  و  $R$  فاصله برحسب ft و  $W$  وزن ماده منفجره برحسب lb می‌باشد. لازم به

ذکر است که رابطه فوق تنها زمانی معتبر است که  $2 < p_0 < 160 \text{ psi}$  و  $3 < z < 20 \frac{\text{ft}}{\text{lb}^{1/3}}$

بوده و منبع انفجار کروی باشد [18].

روابطی که تاکنون ارائه شده برای منبع انفجار کروی بود، درحالی که ممکن است منبع انفجار به صورت استوانه‌ای، صفحه‌ای و یا خطی باشد. در منابع خطی جبهه موج به صورت استوانه‌ای منتشر می‌گردد.

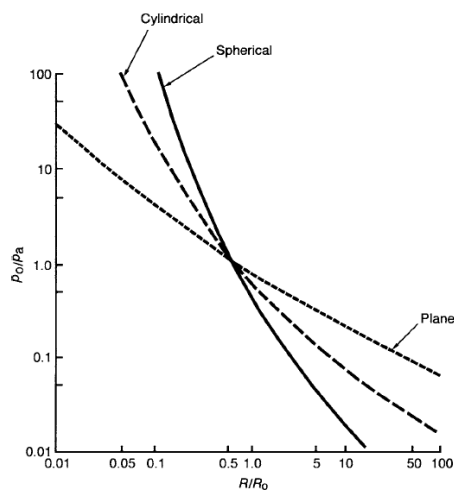
در نتیجه  $p_0$  تابعی از  $R\left(\sqrt{\frac{L}{W}}\right)$  می‌باشد (  $L$  طول منبع انفجار و بسیار بزرگ‌تر از شعاع منبع می‌باشد).

شکل (۳-۲) حداکثر مقادیر پیش‌بینی شده برای انواع منابع انفجار را ارائه می‌نماید. در این منحنی  $R_0$

بعد مشخصه نام داشته و از رابطه (۳-۳) تعیین می‌گردد:

$$R_0 = \left(\frac{E}{P_a \cdot L^{3-\theta}}\right)^{1/\theta} \quad (3-3)$$

در رابطه فوق  $\theta$  برای منابع صفحه‌ای، استوانه‌ای و کروی به ترتیب برابر با ۱، ۲ و ۳ بوده و  $P_a$  فشار اتمسفر می‌باشد.



شکل ۳-۲ - حداکثر فشار پیش‌بینی شده برای هر انفجار [17]

استونر و برینکلی [18] با انجام یک سری آزمایش‌ها در سال ۱۹۴۹ روابط تجربی زیر را ارائه نمودند:<sup>۱</sup>

برای TNT های مستطیلی شکل به وزن ۱ lb

$$P_o = \frac{36280}{Z^3} - \frac{770}{Z^2} + \frac{13.5}{Z} \quad (۴-۳)$$

برای pentolite استوانه‌ای شکل به وزن 8 lb

$$P_o = \frac{21070}{Z^3} - \frac{135}{Z^2} + \frac{10.5}{Z} \quad (۵-۳)$$

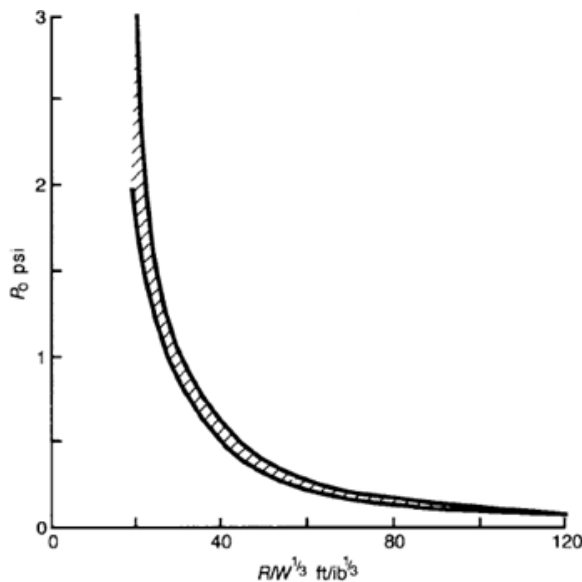
برای TNT استوانه‌ای به وزن 4lb

$$P_o = \frac{19210}{Z^3} - \frac{186}{Z^2} + \frac{11.34}{Z} \quad (۶-۳)$$

برای pentolite کروی به وزن 3.75 lb

$$P_o = \frac{7823}{Z^3} - \frac{295}{Z^2} + \frac{8.63}{Z} \quad (۷-۳)$$

با رسم نتایج حاصله از روابط فوق، مشخص است که نتایج در یک باند باریک قرار می‌گیرد (شکل ۳-۳)



شکل ۳-۳- حداکثر اضافه فشار تولیدی برای مواد منفجره مستطیلی، استوانه‌ای و کروی [17]

<sup>۱</sup> Stoner and blankey

به‌طور کلی انفجارها را می‌توان به دودسته انفجار خارجی (خارج از سازه) و انفجار داخلی (داخل سازه) تقسیم‌بندی نمود. انفجار داخلی خود بسته به شرایط معماری به دودسته محبوس و نیمه محبوس تقسیم می‌شود. ضربه ناشی از این انفجارها به‌صورت داخلی می‌باشد. انفجارهای خارجی که بیشتر موضوع بحث این طرح می‌باشد را نیز می‌توان به دسته‌های زیر طبقه‌بندی نمود:

۱- انفجار در هوا: زمانی که ماده منفجره در هوا به نحوی منفجر شود که امواج آن به سطح زمین نرسد. در این حالت امواج به‌صورت مستقیم منتشر شده و تنها بر روی سازه‌های بلند تأثیر می‌گذارند.

۲- انفجار بر روی زمین: زمانی که ماده منفجره دقیقاً بر روی سطح زمین قرار دارد. در این حالت موج به‌صورت نیم کروی منتشر می‌گردد.

۳- انفجار بالای سطح زمین: تفاوت این انفجار با حالت قبل، در مکان قرارگیری ماده منفجره است. به‌عبارت‌دیگر این نوع انفجار حالتی بین انفجار در هوا و انفجار روی زمین است. ماده منفجره بافاصله از سطح زمین قرار دارد ولی امواج منتشر شده به سطح زمین می‌رسند.

۴- انفجار زیر آب: در مورد این انفجار و نحوه پخش امواج آن روابط تجربی و مقالات بسیاری ارائه شده است. نکته مهم انفجار در زیر آب تولید حباب انفجار می‌باشد که با زمان گسترش یافته و در نهایت با کاهش فشار داخل حباب، حباب انفجار منقبض می‌گردد و سیکل‌های انبساط و انقباضی تکرار می‌گردند.

۵- انفجار در داخل زمین: این نوع انفجار باعث ایجاد موج شوک به زمین و حرکت شدید ذرات می‌شود. در بسیاری از موارد، ذرات خاک مقاومت برشی خود را از دست داده و جاری می‌شوند. این نوع انفجار در مباحث تونل، مترو، لوله‌های مدفون بسیار کاربرد دارد.

در ادامه به شرح موارد فوق پرداخته می‌شود.

### ۳-۲- زائل شدن اضافه فشار ناگهانی ناشی از انفجار در هوای آزاد

رانکین<sup>۱</sup> و پس از او هوگونویت<sup>۲</sup> با استفاده از قوانین بقای جرم، انرژی و مومنتوم به بررسی تغییرات فشار، سرعت و چگالی گاز پس از لحظه انفجار پرداختند [1]. با فرض اینکه سرعت جلوی جبهه موج  $\bar{u}$  و فشار، چگالی و سرعت ذرات گاز در حالت اولیه به ترتیب برابر با  $p_1$ ،  $\rho_1$  و  $u_1$  و پس از وقوع انفجار  $p_2$ ،  $\rho_2$  و  $u_2$  باشند، با استفاده از قانون بقای جرم داریم:

$$\rho_2(\bar{u} - u_2) = \rho_1(\bar{u} - u_1) \quad (۸-۳)$$

و با توجه به قانون بقای مومنتوم داریم:

$$p_1 - p_2 = \rho_2(\bar{u} - u_2)(u_1 - u_2) \quad (۹-۳)$$

سپس با حذف  $u_2$  از طرفین داریم:

$$\bar{u} - u_1 = \left[ \frac{p_2 - p_1}{\rho_2 - \rho_1} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} \right]^{0/5} \quad (۱۰-۳)$$

با توجه به رابطه فوق سرعت انتشار موج را می‌توان با استفاده از فشار و چگالی در وقفه زمانی قبل و بعد انفجار تعیین نمود. با توجه به اینکه فرآیند فشرده‌سازی ذرات در جلوی جبهه موج با سرعت انجام می‌گیرد، می‌توان این فرآیند را بی‌دررو فرض نمود. بنابراین تمامی انرژی وارد شده به گاز می‌رسد و با استفاده از قانون بقای انرژی داریم:

$$\frac{1}{2}(p_1 + p_2)(\vartheta_1 - \vartheta_2) = \frac{1}{\gamma - 1}(p_2\vartheta_2 - p_1\vartheta_1) \quad (۱۱-۳)$$

رابطه فوق رانکین-هوگونویت نام دارد و در آن  $\vartheta = \frac{1}{\rho}$  می‌باشد. با استفاده از رابطه فوق می‌توان رابطه بین سرعت جبهه موج و سرعت صوت را نیز به صورت زیر تعیین نمود.

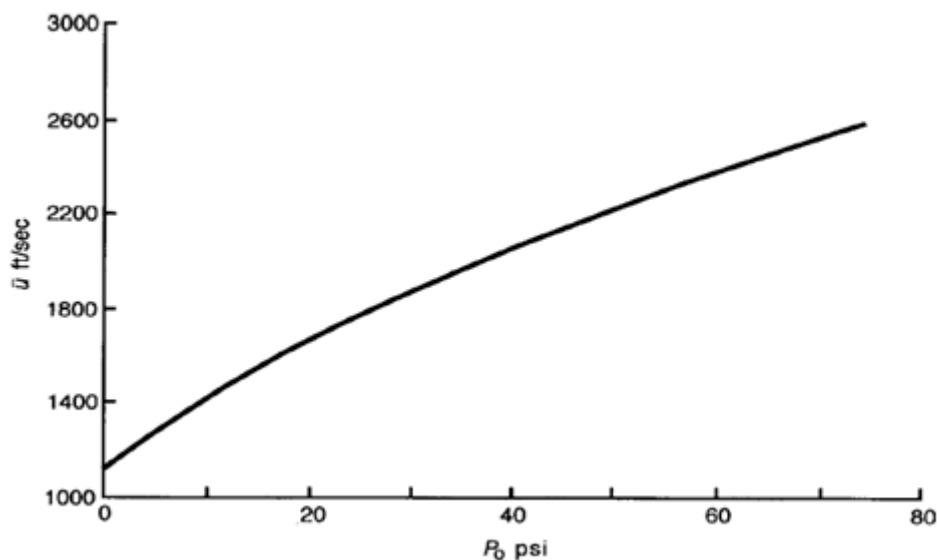
$$\frac{\bar{u}}{u_a} = \frac{5P}{7P_a} \left[ 1 + \frac{6p}{7p_a} \right]^{-0/5} \quad (۱۲-۳)$$

<sup>۱</sup>.Rankine

<sup>۲</sup> Hugonoite

در رابطه فوق  $u_a = \frac{8p_a}{\rho_a}$ ، سرعت صوت و  $p_a$  فشار هوای محیط اطراف می‌باشد. در صورتی که سرعت

صوت  $1117 \frac{ft}{s}$  و  $p_a = 14.7 \text{ psi}$  فرض شود، رابطه فوق را می‌توان رسم نمود (شکل ۳-۴)



شکل ۳-۴- رابطه بین سرعت جلوی جبهه موج و فشار مبنا [17]

همان‌طور که گفته شد حداقل زمانی که فشار به‌صورت ناگهانی افزایش می‌یابد تا زمانی که به فشار اولیه می‌رسد را فاز مثبت می‌نامند. منحنی فشار - زمان را می‌توان با استفاده از یکی از روابط زیر رسم نمود:

$$p = p_o(1 - t/t_o) \quad (13-3)$$

رابطه دوم دقت بیشتری داشته و داریم:

$$p = p_o \left(1 - t/t_o\right) e^{\frac{kt}{t_o}} \quad (14-3)$$

خصوصیات تابع فوق به ضریب  $k$  وابسته است. برای مثال منحنی انفجارهای اتمی به‌سرعت زائل شده و انفجارهای مواد منفجره با حجم زیادی از محصولات گازی شیب کمی دارند. در صورتی که  $k=1$  فرض شود، فاز مثبت و منفی یکسان خواهد بود.

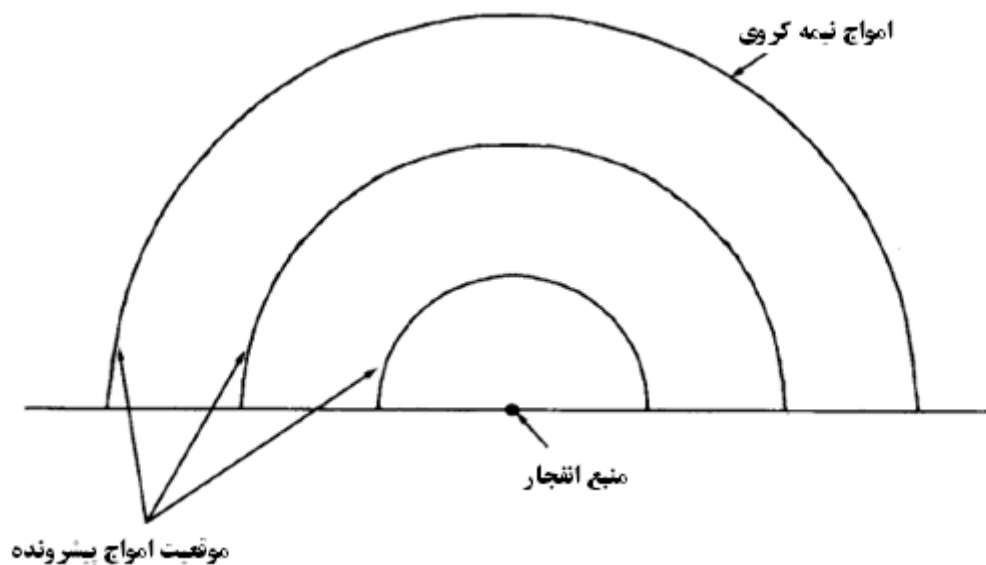
زمان فاز مثبت  $t_0$ ، به حداکثر فشار تولیدی  $p_0$  و انرژی کل وابسته است. در پایان زمان فاز مثبت اضافه فشار تولیدی صفر می‌باشد که مشابه به امواج صوتی می‌باشد. امواج صوتی نیز باعث ایجاد اضافه فشار نمی‌گردند و تنها تغییرات بسیار ناچیزی در دامنه فشار ایجاد می‌نمایند. بنابراین شرایط اضافه فشار صفر باید با سرعت صوت از مرکز انفجار منتقل شود. سرعت صوت از سرعت جبهه موج کمتر می‌باشد، به عبارت دیگر با افزایش فاصله، دوره فاز مثبت افزایش می‌یابد. مقدار فاز مثبت را می‌توان با استفاده از رابطه زیر تخمین زد:

$$\frac{t_0}{w^{\frac{1}{3}}} = \frac{980(1 + (z/0/54)^{10})}{\left[1 + (z/0/02)^3\right] \left[1 + (z/0/74)^6\right] \left[1 + (z/6/9)^2\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (15-3)$$

$t_0$  برحسب میلی ثانیه،  $W$  کیلوگرم و  $Z = \frac{R}{w^{\frac{1}{3}}}$  و  $R$  برحسب متر می‌باشد.

### ۳-۳- انفجار بر روی زمین

در صورتی که انفجار بر روی سطح زمین رخ دهد، در حالت تئوری جبهه موج ایجادشده در این حالت برخلاف حالت هوای آزاد به صورت نیمه کروی (شکل ۳-۵) می‌باشد. در نتیجه تمامی روابط ارائه شده برای انفجار در هوای آزاد معتبر است با این تفاوت که سطحی که انرژی در آن آزاد می‌گردد به حدود نصف کاهش یافته است. بنابراین در تمامی روابط قبلی  $2W$  جایگزین  $W$  می‌گردد. این قضیه در صورتی صادق است که سطح زمین هیچ‌گونه انرژی جذب ننماید که در واقعیت این فرض صحیح نمی‌باشد. در نتیجه با توجه به اینکه در عمل مقداری از انرژی توسط زمین جذب می‌گردد، ضریب ۲ در روابط باید کاهش یابد. نتایج مطالعات ضریب  $1/7$  را پیشنهاد می‌نماید.



شکل ۳-۵- موج منتشرشده نیم کروی در انفجار بر روی زمین [17]

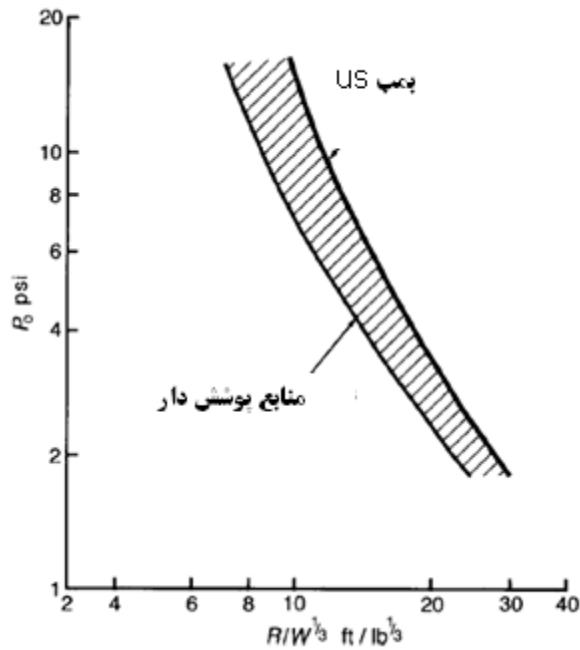
مطالعات انجام گرفته بر روی این نوع انفجار نسبت به انفجار در هوای آزاد بسیار بیشتر می باشد. انجام آزمایش در هوای آزاد دارای یک سری محدودیت های اجرائی می باشد. کندی [19]. در خلال جنگ جهانی، مطالعات آزمایشگاهی گسترده ای بر روی انفجارها انجام داد. نتایج مطالعات وی با وجود اینکه با دستگاه های غیر پیشرفته انجام گرفته بود ولی دارای اهمیت بسیار می باشد. وی خلاصه نتایج و مطالعات خود را بر روی رابطه فشار- فاصله و همچنین ضربه - فاصله توسط نمودارهای شکل (۳-۶) و (۳-۷) ارائه نمود. وی همچنین پیشنهاد نمود در رابطه (۳-۱۴) از ضریب ۰/۰۵۴ و برای منابع انفجار پوشش دار و سنگین از ضریب ۰/۰۳۶ و برای منابع غیر پوشش دار از ضریب ۰/۰۸۱ استفاده گردد.

$$I = \frac{KW^{\frac{2}{3}}}{R} \quad (۳-۱۶)$$

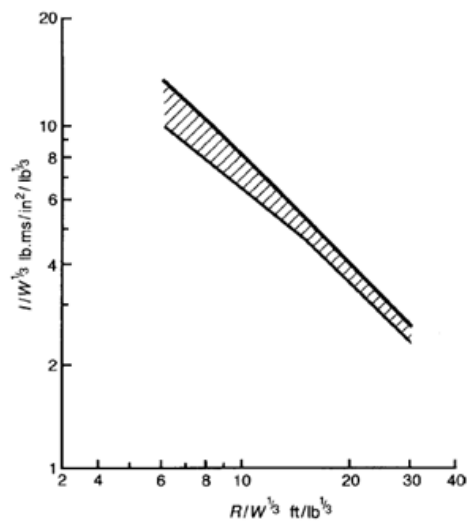
در رابطه فوق I، ضربه ایجاد شده بر حسب  $(lb \cdot \frac{sec}{in^2})$  و W وزن ماده منفجره بر حسب lb و R فاصله بر حسب ft می باشد.

^ kennedy





شکل ۳-۶- رابطه بین فشار حداکثر و فاصله مقیاس شده در جنگ جهانی دوم [17]



شکل ۳-۷- رابطه بین ضربه مقیاس شده و فاصله مقیاس شده در خلال جنگ جهانی دوم [17]

مطالعات بر روی انفجار روی زمین و انرژی آزاد شده توسط TNT و انفجارات اتمی بعدها توسط کینگری<sup>۱</sup> [20] انجام گرفت. خلاصه مطالعات صورت گرفته در شکل‌های (۳-۸) و (۳-۹) ارائه گردیده است.

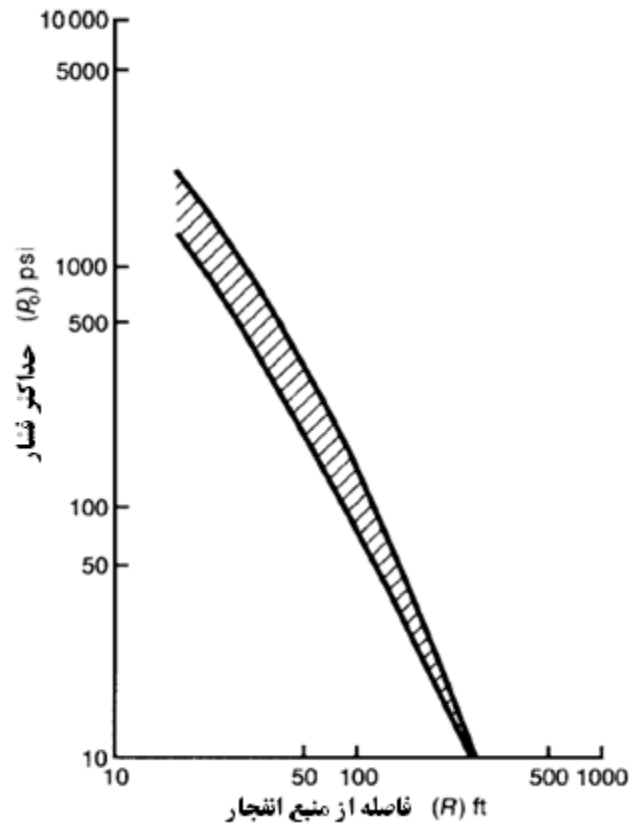
<sup>۱</sup> Kingery

در صورتی که انفجاری سنگین بر روی زمین و یا در فاصله‌ای بسیار نزدیک به زمین رخ دهد، علاوه بر ایجاد موج در هوا، باعث ایجاد ضربه بر روی زمین نیز می‌گردد. ضربه تولیدشده به ابعاد منفجره وابسته بوده و باعث ایجاد ضربه انفجاری می‌گردد. ضربه انفجاری را می‌توان از رابطه زیر تعیین نمود:

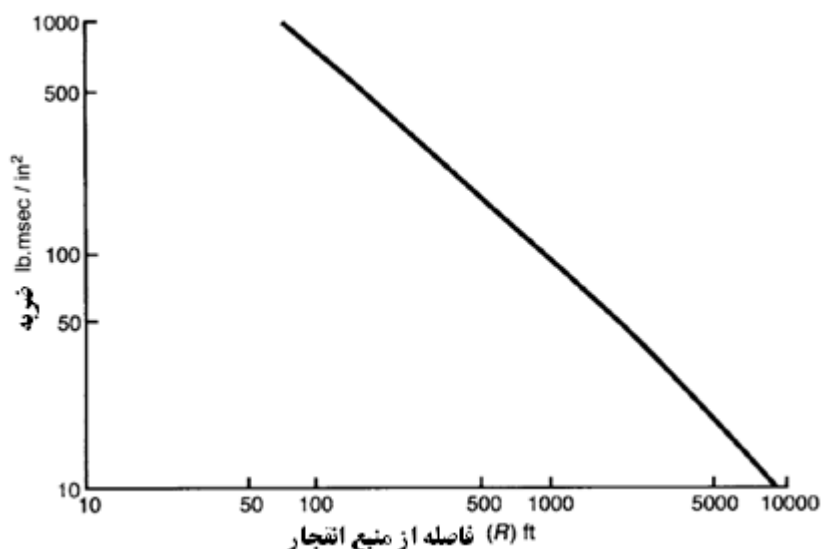
$$I = W \left[ 183 - \frac{191}{1.1 + \left(\frac{ab}{d^2}\right)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (17-3)$$

در رابطه فوق  $I$ ، بر حسب  $lb \cdot sec/in^2$  می‌باشد.

در رابطه فوق  $a$  و  $b$  ابعاد ماده منفجره که در تماس با زمین می‌باشند و  $d$  ارتفاع ماده می‌باشد. همچنین به نسبت  $ab/d^2$  فاکتور شکل می‌گویند.



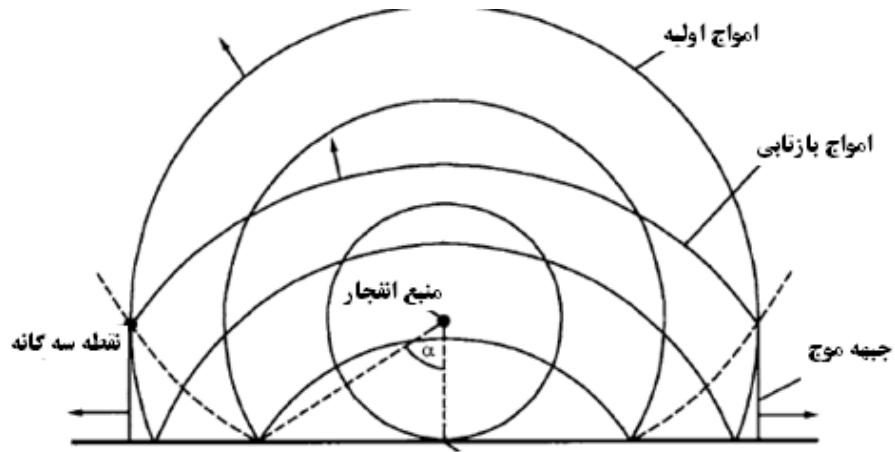
شکل ۳-۸- رابطه حداکثر اضافه فشار تولیدشده بافاصله از مرکز انفجار (منبع انفجار نیم کروی TNT) [17]



شکل ۳-۹- رابطه بین ضربه و فاصله از مرکز انفجار (منبع انفجار نیم کروی TNT) [17]

### ۳-۴- انفجار بالای سطح زمین

در صورتی که انفجار با فاصله نسبت به سطح زمین انجام گیرد، پروسه بازتاب مانند شکل (۳-۱۰) می‌باشد. در صورتی که موج اولیه به سطح زمین برسد، موج دیگری بازتاب می‌شود که سرعت موج بازتابی بسیار بیشتر از موج اولیه است. به نقطه برخورد موج منتشر شده و منعکس شده، نقطه سه‌گانه (triple) می‌گویند. همچنین جبهه موج ایجاد شده (mach stem) نام دارد. این جبهه معمولاً به صورت خط راست می‌باشد. زمانی که زاویه انعکاس از 45 درجه تجاوز نماید، این جبهه موج شروع به حرکت می‌کند. شکل (۳-۱۰) امواج بازتابی را به صورت دایره نشان داده است در حالی که در واقعیت امواج منعکس شده به صورت نیم بیضی می‌باشند.

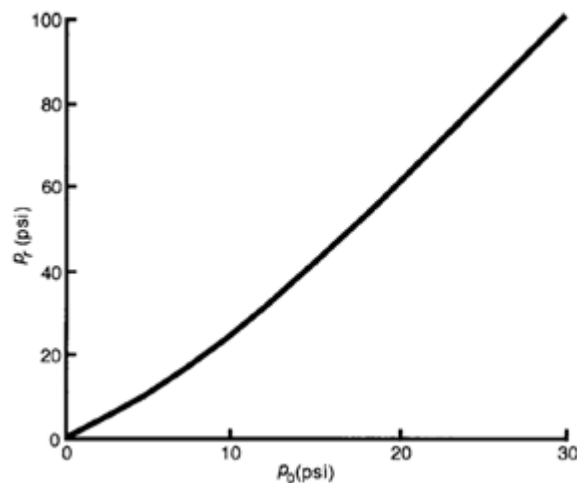


شکل ۳-۱۰- نحوه انعکاس موج ناشی از انفجار روی سطح زمین [17]

با توجه به اینکه اضافه فشار تولیدشده توسط امواج بازتابی بسیار بیشتر از امواج اولیه است، در نتیجه سرعت انتشار امواج آن نیز بیشتر بوده و تأثیر آن بر روی سازه‌ها نیز بیشتر می‌باشد. نسبت بین بیشترین فشار تولیدشده توسط موج بازتابی  $p_r$  به حداکثر فشار موج اولیه  $p_o$  از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

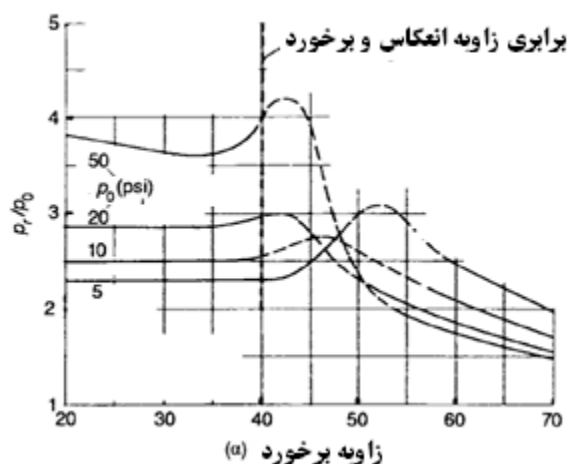
$$\frac{p_r}{p_o} = \frac{2(7p_a + 4p_o)}{(7p_a + p_o)} \quad (۱۸-۳)$$

شکل (۱۱-۳) رابطه بین  $p_o$  و  $p_r$  را برای زاویه انعکاس صفر درجه ارائه می‌دهد.



شکل ۳-۱۱- رابطه بین حداکثر اضافه فشار بازتابی و فشار حداکثر [17]

شکل (۳-۱۲) نیز رابطه بین  $p_r$  و زاویه انعکاس  $\alpha$  را نمایش می‌دهد. مطابق این شکل با تغییر زاویه انعکاس بین صفر تا ۳۰ درجه نسبت بین  $\frac{p_r}{p_o}$  تغییر آن‌چنانی نمی‌نماید ولی برای زوایای بیشتر از آن به صورت ناگهانی تغییر می‌نماید. با توجه به این شکل، در فشارهای پائین ۵ psi در حدود زاویه انعکاس ۴۰ تا ۵۵ درجه، فشار موج بازتابی به شدت افزایش می‌یابد. این بدان علت است که امواج ناشی از انفجار دارای دامنه محدودی بوده و امواج صوتی بازتابی دیگر وارد نمی‌گردند.



شکل ۳-۱۲- تغییرات نسبت حداکثر فشار بازتابی به فشار اولیه با زاویه انعکاس [17]

### ۳-۵- انفجار در زیر سطح زمین

انفجار در زیر سطح زمین به عوامل متعددی مانند فاصله از نقطه انفجار  $R$ ، وزن ماده منفجره  $W$ ، مشخصات خاک  $K$  و عمق مدفون ماده منفجره  $H$  مرتبط است. حداکثر فشار تولیدشده توسط TNT در زیر سطح زمین را می‌توان به صورت تجربی از رابطه زیر تعیین نمود:

$$p_o = fK(R/W)^{-n} \quad , \quad 2 < (R/W)^{\frac{1}{3}} < 15 \quad (۳-۱۹)$$

در رابطه فوق  $n=3$  و  $f$  تابعی از عمق مدفون ماده منفجره و  $k$  ثابت خاک مربوطه و از جنس مدول الاستیسیته می‌باشد. مقدار  $K$  برای خاک‌های مختلف به شدت متفاوت است. برای مثال برای خاک لوم، حدود ۲۰۰۰ psi و برای رس‌های اشباع حدود ۱۰۰۰۰۰ و برای سنگ‌های آهکی حدود ۵۹۰۰۰۰ psi می‌باشد.

شکل (۳-۱۳) رابطه بین حداکثر فشار تولیدشده در خاک‌های متفاوت را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۳- رابطه بین اضافه فشار حداکثر و فاصله حداکثر در خاک‌ها [17]

همچنین مقادیر تقریبی  $k$  برای خاک‌های متفاوت در جدول (۳-۱) ارائه شده است.

جدول ۳-۱- مقادیر تقریبی ضریب  $k$  برای خاک‌های متفاوت [17]

نوع خاک	حدود $k$ (PSI)
خاک خشک	۷۵۰
خاک مرطوب	۱۵۰۰
لای	۲۰۰۰
رس لای دار	۵۰۰۰
رس شن دار	۷۵۰۰
رس ماسه دار	۱۵۰۰
ماسه متراکم	۵۰۰۰۰
رس اشباع	۱۰۰۰۰۰

تمامی روابط فوق برای TNT ارائه شده است. در صورتی که ماده منفجره TNT نباشد باید از ضریب اصلاحی E استفاده نمود. E فاکتور انرژی نام داشته و بسته به نوع ماده منفجره متفاوت است. جدول (۲-۳) مقادیر E را برای مواد منفجره معمول ارائه داده است.

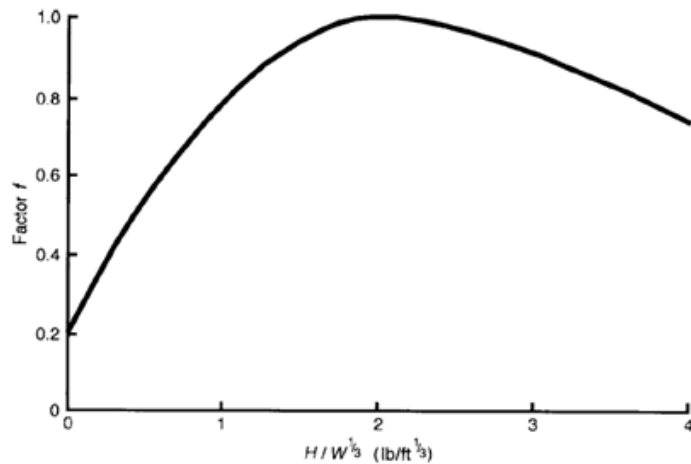
جدول ۳-۲- فاکتور انرژی در مواد منفجره مختلف [21]

نوع ماده منفجره	E
TNT	1
Amatol	1/04
ترکیبی نوع B	1/04
Tritsonal	1/17
Minol2	1/34
HBX2	1/3

شکل (۳-۱۴) نیز رابطه بین  $f$  و عمق مدفون ماده منفجره H را نمایش می دهد. در صورتی که عمق انفجار کم باشد، در اثر انفجار محفظه فشار ایجاد شده توسط گازهای انفجاری باعث شکسته شدن و پرتاب شدن توده سربار خاک شده و موج انفجار به هوا منعکس می گردد (چاله ای روباز ایجاد می شود)، به همین علت حداکثر فشار ایجاد شده در این حالت کاهش می یابد. حال در صورتی که فشار همه جانبه به قدری باشد که محفظه ایجاد شده آسیب نبیند، حفره زیرزمینی و یا قیف انفجار تشکیل می شود. نتایج آزمایشگاهی محدودی در زمینه قیف انفجار موجود است.

شکل (۳-۱۴) رابطه بین  $f$  و عمق مدفون ماده منفجره را برای رس لای دار نشان می دهد. مطابق این شکل به ازای  $\frac{H}{W^{\frac{1}{3}}} = 2 \left( \frac{ft}{lb^{\frac{1}{3}}} \right)$ ، مقدار بهینه به دست می آید. بنابراین برای  $1b1000$  ماده منفجره TNT، حداقل عمق لازم جهت اطمینان از ایجاد قیف انفجار ۲۰ ft می باشد. در حالی که حداقل عمق مورد نیاز برای  $50 \cdot lb$  ماده TNT حدود 16 ft می باشد. برای اعماق بزرگ تر از عمق بهینه، مقدار  $p_0$

به علت از بین رفتن امواج بازتابی کمی کاهش می‌یابد که از این کاهش در مسائل طراحی صرف‌نظر می‌گردد.



شکل ۳-۱۴- رابطه بین فاکتور  $f$  و عمق پوشش در خاک رس لای دار [21]

اندازه‌گیری‌های انجام‌شده بر روی خاک‌های رسی نشان می‌دهد که قیف انفجار تولیدشده کروی شکل بوده و به ازای هر پوند TNT، ۱۰ فوت مکعب حجم دارد. نکته جالب‌توجه اینکه فشار ذرات انفجاری تولیدشده ناشی از انفجار که در سطح قیف پخش می‌شوند، مقداری در حدود فشار اتمسفر را دارا می‌باشند.

چادویک<sup>۱</sup>، کاکس<sup>۲</sup> و هاپکینز<sup>۳</sup> [22] با استفاده از تئوری جریان الاستو پلاستیک در خاک‌های ایده آل به بررسی قیف انفجار ایجادشده توسط انفجارهای عمیق به صورت عددی پرداختند. بر این اساس ماده منفجره کروی شکل و با قطر ۰/۱۳۷ فوت در عمق ۱۰۰ فوتی از زمین قرار داده شده، و بررسی‌ها بر روی ۳ نوع خاک ایده آل از نوع خاک رسی اشباع (زاویه اصطکاک صفر درجه و دارای چسبندگی)، خاک رسی نیمه اشباع (دارای چسبندگی و زاویه اصطکاک) و خاک ماسه‌ای خشک (دارای زاویه اصطکاک

<sup>۱</sup> chadwic

<sup>۲</sup> cox

<sup>۳</sup> Hopkins



و بدون چسبندگی) انجام گرفت. نتایج این مدل سازی ها در جدول (3-3) ارائه شده است. بر اساس این نتایج، تغییرات چسبندگی تأثیری بر روی دهانه قیف ایجاد شده ندارد (رس اشباع و رس نیمه اشباع)، ولی تغییرات زاویه اصطکاک بر روی قیف انفجار بسیار مؤثر است، به طوری که کاهش زاویه اصطکاک باعث افزایش شعاع قیف انفجار می گردد.

جدول ۳-۳- مقادیر مختلف زمان اولین انبساط و شعاع چاله ایجاد شده ناشی از انفجار

نوع خاک	شعاع چاله انفجار (فوت)	زمان اتمام اولین انبساط (میلی ثانیه)
رس کاملاً اشباع	۱/۳۶	۱۱/۴۳
رس نیمه اشباع	۱/۰۲	۷/۴۷
ماسه خشک	۱/۰۲	۷/۴۷

ضربه مثبت ایجاد شده توسط انفجار ناشی از TNT از رابطه زیر تعیین می گردد:

$$\frac{I}{W^{1/3}} = 0.076 K^{1/2} f \left( \frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-2/5} \quad (20-3)$$

حداکثر ضربه وارد به یک هدف ثابت بر روی زمین، سه برابر مقدار فوق و برابر با رابطه زیر می باشد:

$$I = 0.228 K^{0/5} f \left( \frac{W^{0/5}}{R^{2/5}} \right) lb. sec / in^2 \quad (21-3)$$

همچنین میانگین زمان فشار مثبت ایجاد شده در خاک با فرض  $f=1$  برابر است با:

$$t_o = 0.174 K^{-0/5} R^{2/5} W^{1/5} \quad sec \quad (22-3)$$

همچنین میانگین زمان فشار منفی وارد بر یک هدف ثابت از رابطه زیر به دست می آید:

$$t_o^- = 0.368 K^{-0.5} R^{2/5} W^{1/5} \quad sec \quad (23-3)$$

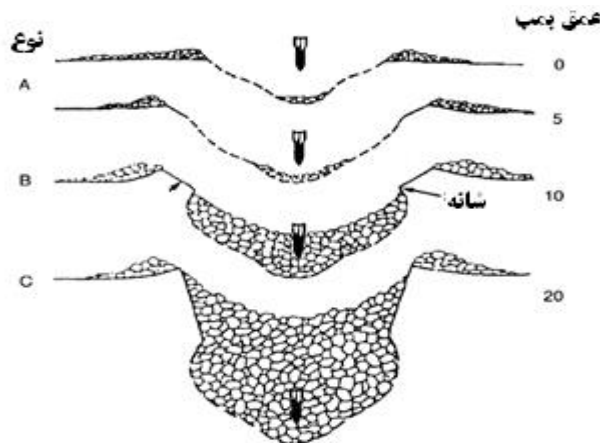
مشخصه اصلی انفجار داخل زمین، طولانی تر بودن زمان اعمال فشار ناشی از انفجار بر اهداف ثابت و صلب نسبت به هوای آزاد می باشد.

همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد، در صورتی که انفجار در نزدیکی سطح زمین انجام گیرد به‌جای ایجاد قیف انفجار، حفره‌ای روباز ایجاد می‌نماید. عوامل متعددی بر شکل چاله‌ایجادشده و مشخصات آن (مانند قطر چاله  $D$  و ارتفاع چاله  $h$ ) تأثیرگذار می‌باشند. کریستوفرسن [23] سعی نمود که چاله‌های انفجار را طبقه‌بندی نماید. بر این اساس وی چاله‌های انفجار را به ۳ دسته قسمت نمود (شکل ۳-۱۵).

نوع A: زمانی رخ می‌دهد که انفجار در نزدیکی سطح زمین رخ دهد. سطح چاله‌ایجادشده تقریباً عاری از هرگونه نخاله و سنگ‌های ناشی از انفجار می‌باشد

نوع B: برای انفجارهای نیمه عمیق رخ می‌دهد (مثلاً برای ۲۵۰ کیلوگرم TNT، حدود ۱۰ فوت عمق لازم است). سطح چاله‌ایجادشده، دارای کمی نخاله و سنگ‌هایی است که پس از پرتاب شدن ناشی از انفجار به چاله بازمی‌گردد. همچنین تا حدودی باعث برآمدگی شانه‌ها می‌گردد.

نوع C: در انفجارهای عمیق رخ می‌دهد. (بین ۲۰ تا ۳۰ فوت). سطح چاله‌ایجادشده پر از نخاله می‌گردد. در انفجارهای عمیق‌تر، همان‌طور که گفته شد به‌جای چاله روباز، قیف انفجار ایجاد می‌گردد.



شکل ۳-۱۵- انواع چاله انفجار ایجادشده در اثر انفجار و در خاک‌های رسی [17]

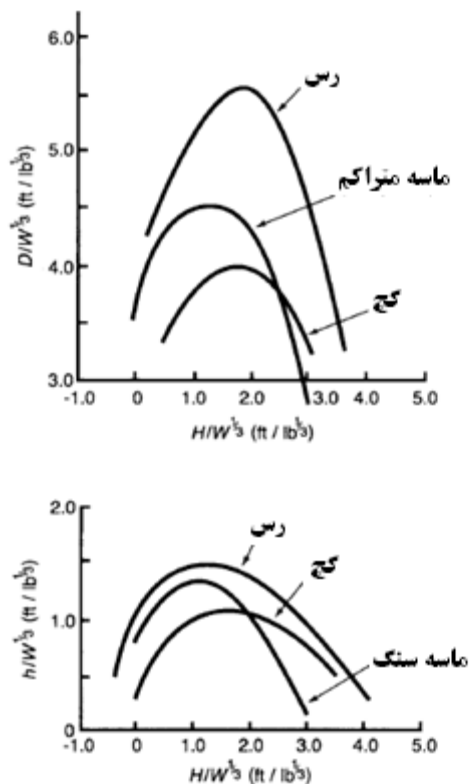
وی پس‌ازاین به بررسی نوع خاک بر روی چاله‌ایجادشده پرداخت. شکل (۳-۱۶) به بررسی تأثیر نوع

خاک بر پارامتر عمق  $(\frac{h}{W^3})$ ، عمق ماده منفجره  $(\frac{H}{W^3})$  و قطر چاله  $(\frac{D}{W^3})$  می‌پردازد. همان‌طور که در

<sup>۱</sup> Christopherson

این نمودارها مشخص است، حداکثر قطر چاله ایجاد شده در خاک‌های رسی به ازای  $\frac{H}{W^{1/3}} = 2$ ، و برای

گچ و ماسه به ازای  $1/5$  و  $1$  رخ می‌دهد.



شکل ۳-۱۶- ارتباط ابعاد چاله انفجار با عمق انفجار [17]

لامسون<sup>۱</sup> [24] نیز به بررسی تأثیر نوع خاک بر روی شکل چاله انفجار پرداخت. وی در مطالعات خود نتیجه گرفت که تأثیر عمق قرارگیری ماده منفجره بر روی قطر چاله ایجاد شده به مراتب بیشتر از نوع خاک می‌باشد. وی همچنین رابطه زیر را برای تخمین قطر چاله ایجاد شده توسط TNT پیشنهاد نمود:

$$D = 2/6 f \cdot k^{0/5} \cdot W^{1/3} \quad (۲۴-۳)$$

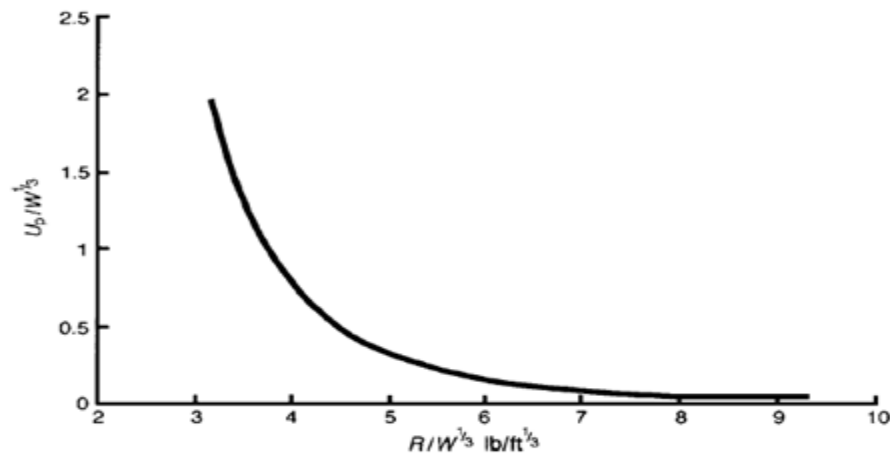
در رابطه فوق قطر چاله برحسب فوت،  $k$  برحسب psi و  $W$  برحسب پوند می‌باشد.

<sup>۱</sup> lampson

در هنگام انفجار و ایجاد چاله انفجار، ذرات خاک در نزدیکی محل انفجار در جهات افقی و قائم جابه‌جا می‌گردند. با انبساط ماده منفجره، تغییر مکان ذرات به حداکثر خود می‌رسد. لازم به ذکر است که تغییر مکان نهایی و دائمی ذرات کمی از تغییر مکان حداکثر آن‌ها کمتر می‌باشد که به علت انقباض امواج در مرحله پایانی است. با اندازه‌گیری مکان ذرات قبل و بعد انفجار، می‌توان تغییر مکان آن‌ها را تعیین نمود. کریستوفرسن [23] نتایج مطالعات خود را توسط رابطه زیر ارائه نمود:

$$\frac{U_p}{W^{1/3}} = C_1 \left( \frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-4} \quad (25-3)$$

در رابطه فوق  $U_p$  تغییر مکان ماندگار در جهت افقی و  $C$  ضریب ثابتی است که برای خاک‌های رسی، گچ و ماسه به ترتیب برابر با ۲۰۰، ۲۵ و ۱۲۶ در نظر گرفته می‌شود. شکل (۳-۱۷) تغییر مکان‌های ماندگار افقی در خاک رسی را ارائه می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود برای مقادیر بیشتر از  $\frac{R}{W^{1/3}} = 10 \frac{\text{ft}}{\text{lb}^{1/3}}$ ، هیچ‌گونه تغییر مکان افقی در خاک دیده نمی‌شود.



شکل ۳-۱۷- تغییر مکان‌های افقی ماندگار چاله انفجارها در خاک‌های رسی بافاصله مقیاس شده [17] همچنین تغییر مکان در جهت قائم  $V_p$  را می‌توان با رابطه زیر تخمین زد:

$$\frac{V_p}{W^{1/3}} = C_2 \left( \frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-4} \quad (26-3)$$

در رابطه فوق C ضریب ثابتی است که برای خاک‌های رسی، گچ و ماسه نرم به ترتیب برابر ۱۹، ۱۴۵ و ۳۶ فرض می‌شود. بر اساس روابط فوق نسبت بین تغییر مکان افقی به قائم برای خاک‌های رسی و گچ، حدود 1:1/4 و برای ماسه نرم ۱:۴ می‌باشد.

لامسون با بررسی انفجار بر روی خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط، تغییر مکان‌های حداکثر افقی و قائم را نیز با روابط زیر تخمین زد:

$$\frac{U_m}{W^{1/3}} = 47/3 \left(\frac{R}{W^{1/3}}\right)^{-3} + 0/216 \left(\frac{R}{W^{1/3}}\right)^{-1} \quad (27-3)$$

$$\frac{V_m}{W^{1/3}} = 12/6 \left(\frac{R}{W^{1/3}}\right) + 0/032 \left(\frac{R}{W^{1/3}}\right)^{-1} \quad (28-3)$$

فاصله‌ای که پس از آن انفجار رخ داده تأثیری بر روی ذرات خاک نداشته باشد را، شعاع گسیختگی می‌نامند. بر اساس آنچه در کتاب‌های نظامی ارائه شده است این فاصله را می‌توان از رابطه زیر تعیین نمود:

$$R_r = F \cdot W^{1/3} \quad (29-3)$$

در رابطه فوق فاصله بر اساس فوت می‌باشد همچنین F فاکتور خاک بوده و برای خاک‌های گوناگون از جدول (۴-۳) تعیین می‌گردد.

جدول ۳-۴- فاکتور F برای خاک‌های گوناگون [17]

نوع خاک	F
سنگ سخت	۳/۳
سنگ نرم	4/3
گچ سخت	4/7
گچ نرم	5/4
رس	6/2
لای	6/7
شن	6/8
ماسه	7/5 - 7/8
خاک دستی	7/7 - 9/7

### ۳-۶- انفجار در زیر آب

بررسی انفجار در زیر آب از لحاظ نظامی (پدافند عامل) و همچنین پدافند غیرعامل (اثر انفجار بر سازه‌های دریایی، لوله‌های انتقال در دریاها) اهمیت بسیار بالایی دارد. مطالعات اساسی بر روی انفجار زیر آب از سال ۱۹۳۹ در بریتانیا آغاز گردید. در همین راستا پنی<sup>۱</sup> و داسگوپتا<sup>۲</sup> [25] به حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر انفجار TNT پرداختند. در انفجار زیر آب نیز مانند انفجار در هوای آزاد فشار ناشی از موج شوک به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد. در پشت جبهه موج فشار به صورت نمایی کاهش می‌یابد و هیچ‌گاه کمتر از فشار محلی نمی‌شود، بنابراین در انفجار زیر آب فشار منفی ایجاد نمی‌گردد. گازهای منفجره باعث شکل‌گیری حباب‌هایی در آب می‌گردد که به سرعت منبسط می‌شوند. انبساط حباب‌های آب تا جایی ادامه می‌یابد که فشار داخل حباب با فشار هیدرو استاتیکی در نقطه انفجار برابر گردد. در این مرحله حباب‌های تولید شده به شدت با یکدیگر تداخل نموده و باعث ایجاد مرحله جدید انبساط می‌گردند و این عمل تکرار می‌شود. با توجه به تراکم ناپذیر بودن آب، حداکثر فشار ایجاد شده ناشی از انفجار در آب، نسبت به هوا و یا خاک بیشتر می‌باشد ولی استهلاک فشار سریع‌تر رخ می‌دهد. پنی با فرض بی‌دررو بودن شرایط انفجار، رابطه تجربی زیر را برای تعیین فشار ناشی از انفجار زیر آب ارائه داد:

$$P_1 = 14100 \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \cdot e^{0/27 \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R}} \quad (3-30)$$

در رابطه فوق  $P$  بر حسب  $\frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$ ،  $w$  بر حسب  $\text{lb}$  و  $R$  بر حسب  $\text{ft}$  می‌باشد.

همچنین کرکوود<sup>۳</sup> و برنکلی<sup>۴</sup> [25] رابطه زیر را برای تعیین فشار ارائه نمودند:

---

<sup>۱</sup> Penny

<sup>۲</sup> Dasgupta

<sup>۳</sup> Kirkwood

<sup>۴</sup> Brinkley

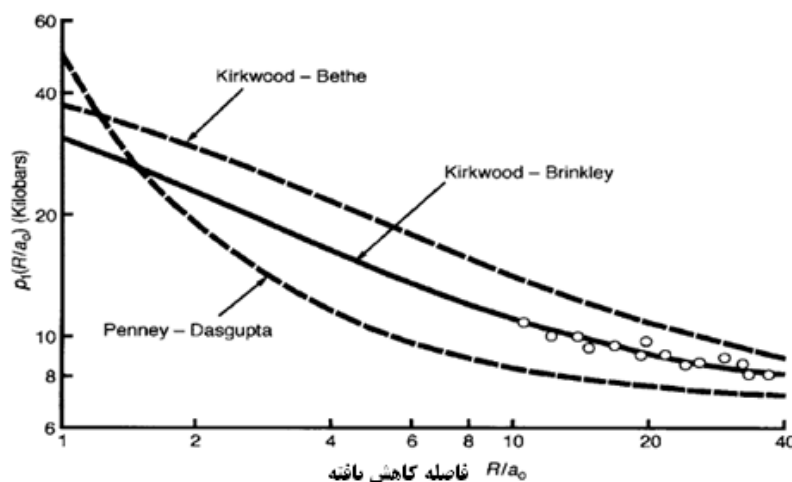
$$P_1 = 22150 \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} (\log_{10} \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} + 0.873)^{-0.5} \quad (3-31)$$

این رابطه برای  $\frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} > 13 \frac{\text{ft}}{\text{lb}^{\frac{1}{3}}}$  معتبر است و هرچه این مقدار بیشتر شود بر اعتبار آن افزوده می‌گردد. کول<sup>۱</sup> [17] در شکل (۳-۱۸) به مقایسه روش‌های متفاوت محاسبه فشار انفجار ناشی از TNT پرداخت. رابطه ارائه‌شده توسط پنی معمولاً نتایج بهتری نسبت به سایر روابط ارائه می‌نماید. همچنین با استفاده از رابطه کرکوود، می‌توان ضربه ناشی از انفجار را تعیین نمود:

$$I = 2/11 \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \quad (3-32)$$

در رابطه فوق  $W$  برحسب پوند و  $R$  بر حسب فوت می‌باشد.

رابطه فوق مشابه رابطه ارائه‌شده برای تعیین ضربه در هوای آزاد می‌باشد با این تفاوت که ضربه ناشی از انفجار زیر آب حدود ۳۰ برابر بیشتر است.



شکل ۳-۱۸ - مقایسه فشارهای انفجار محاسبه‌شده برای TNT [17]

در منحنی فوق  $R$ ، فاصله طی شده توسط موج شوک و  $a_0$  شعاع اولیه خرج ماده منفجره می‌باشد. بر اساس مطالعات کرکوود، با حرکت رو به بیرون موج ناشی از انفجار، انرژی آن مستهلک می‌شود به طوری که در فاصله حدود ۵ برابر شعاع ماده منفجره تقریباً ۳۰٪ انرژی و در فاصله‌ای برابر با ۲۵ برابر

<sup>۱</sup>Cole

شعاع ماده منفجره، حدود ۰.۴۸ انرژی مستهلک می‌گردد. لازم به ذکر است که نتایج آزمایشگاهی، انرژی را حدود ۰.۲۵ کمتر از روش‌های محاسباتی تخمین می‌زنند.

بررسی رفتار حباب‌های تولیدشده در اثر انفجار زیرآب در خلال جنگ جهانی دوم صورت گرفت. عکاسی‌های متعدد از انفجار آب باعث تسهیل بررسی‌ها گردید. هرینگ<sup>۱</sup> [27] در سال ۱۹۴۱ رابطه زیر را برای تخمین دوره اولین نوسان حباب ارائه داد:

$$T = 1/83 a_m \left(\frac{\rho_0}{P_0}\right)^{0/5} \quad (3-33)$$

در رابطه فوق  $\rho_0$  چگالی در حالت تعادل،  $P_0$  فشار هیدرو استاتیک در مکان انفجار و  $a_m$  حداکثر شعاع حباب تولیدشده است.

همچنین می‌توان دوره نوسان را با استفاده از انرژی کل ارائه نمود. بر این اساس انرژی کل از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$Y = \frac{4\pi}{3} P_0 a_m^3 \quad (3-34)$$

سپس با داشتن انرژی کل، می‌توان دوره نوسان را تخمین زد:

$$T = 1/14 (\rho_0)^{0/5} \left(\frac{Y^{1/3}}{P_0^{5/6}}\right) \quad (3-35)$$

یکی دیگر از موارد مهم در انفجار زیرآب توجه به نوع بستر دریا یا رودخانه می‌باشد. در صورتی که بستر زیرآب سنگی باشد، ضربان اصلی ناشی از انفجار باعث بازتاب امواج شده و فشار حداکثر را افزایش می‌دهد ولی در بسترهای نرم، فشار بازتابی قابل چشم‌پوشی است.

---

<sup>۱</sup> Herring



فصل چهارم

مدل سازی انفجار در خاک با استفاده

از روش هیدرودینامیک ذرات هموار

## ۴-۱- مدل سازی انفجار با روش های عددی

### ۴-۱-۱- پیشینه تحقیق

همان گونه که گفته شد، انفجار را می توان به چند دسته انفجار در هوا، روی زمین، بالای زمین، زیر آب و زیر سطح زمین تقسیم بندی نمود. در این بین انفجار در سیالات مانند انفجار در هوا و انفجار در زیر آب در مقالات مختلف مورد بررسی فراوان قرار گرفت است. اما انفجار روی سطح و یا زیر زمین، نسبت به سایر انفجارها مانند انفجار زیر سطح آب مورد توجه کمتری قرار گرفته است. تفاوت عمده انفجار روی زمین با سایر انفجارها، وجود مقاومت برشی در لایه های خاک می باشد. در انفجار زیر آب، با توجه به عدم وجود مقاومت برشی، پارامتر تنش برشی از تانسور تنش اصلی حذف می شود. در نتیجه مدل سازی این نوع انفجار با سهولت بیشتری صورت می گیرد.

انفجارهای سطحی که می تواند در اثر عملیات های تروریستی و یا به صورت اتفاقی رخ دهد، باعث ایجاد فشار و تخریب سازه های زیرزمینی از قبیل تونل ها، لوله های مدفون، پایه های پل شده و اثرات مخرب و پیامدهای منفی بسیاری به جای بگذارد. همچنین انفجارهایی که خود آگاهانه و برای ناپایداری سازی برخی زون های کششی در تونل ها صورت می گیرد و یا سایر انفجارهای کارگاهی نمونه ای از انفجارهای زمینی محسوب می شود. به همین دلیل بررسی و مدل سازی این نوع انفجار بسیار مهم بوده و در سال های اخیر توجه محققان را به خود جلب نموده است. بررسی عددی انفجار در خاک زمانی اهمیت بیشتری می یابد که به مسئله آزمایشگاهی آن پرداخته شود. در حقیقت ایجاد یک شرایط کنترل شده برای بررسی آزمایشگاهی انفجار بسیار سخت و خطرناک است. به همین علت استفاده از روش های عددی از جمله نرم افزارها و یا کدهای مرتبط با انفجار اهمیت بسیار می یابد.

برای مدل سازی انفجار نرم افزارهای اجزای محدود بسیاری ارائه شده اند. برای مثال نرم افزارهایی مانند Ansys، Abaqus، Ls Dyna قابلیت مدل سازی انفجار را در مواد گوناگون دارا می باشند.

در سال‌های اخیر افراد مختلفی به مدل‌سازی انفجار پرداخته‌اند. برای مثال در زمینه بررسی انفجار در آب و به صورت خلاصه به برخی پژوهش‌ها اشاره می‌گردد. بررسی هیدروکد ها در زمینه تأثیر انفجار بر روی سازه‌های دریایی [28]، بررسی انفجار در آب با استفاده از روش SPH [1]، مدل‌سازی انفجار زیرآب با روش اجزای محدود و تأثیر آن بر سازه کشتی [۲۹]، بررسی انفجار زیرآب و تأثیر آن بر ارتعاش یک میله [۳۰] و بررسی انفجار زیرآب با استفاده از نرم‌افزار Autodyn [۳۱] نمونه‌هایی از این مطالعات می‌باشند.

همچنین مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی (با نرم‌افزار LS DYNA) که به بررسی بارگذاری انفجار بر روی یک صفحه فلزی (جسم با مقاومت برشی) پرداخته و برای مدل‌سازی عددی از روش اجزای محدود استفاده شده و به مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی پرداختند [32].

نمونه دیگری از این پژوهش‌ها، مدل‌سازی انفجار زیرزمینی و تأثیر آن بر روی سنگ‌ها می‌باشد [33]. در این پژوهش برای مدل‌سازی از نرم‌افزار LS-DYNA و برای مدل تغییر شکل‌های بزرگ از روش ترکیبی اویلری-لاگرانژی بهره برد. برای مدل مصالح ماده منفجره از High-explosive-burn و از معادله حالت JWL<sup>۱</sup> استفاده نمود. همچنین از مدل Brittle-damage برای سنگ‌ها استفاده شد. نویسندگان با در اختیار داشتن نتایج آزمایشگاهی بر روی مدل واقعی، که از قبل در اختیار داشت به مقایسه مدل عددی و واقعی پرداخته و  $ppv^۲$  (حداکثر سرعت ذره) و  $ppa^۳$  (حداکثر شتاب ذره) را بررسی نمودند. استفاده از  $ppv$  با توجه به اندازه ساده آن در محل اجرا متداول‌تر است.

در این مقاله، پس از مدل‌سازی عددی، به بررسی مواردی چون تأثیر چگالی ماده منفجره و تأثیر خصوصیات کیفی سنگ (RMR) بر عمق تخریب ناشی از انفجار پرداخت. وی با بررسی سنگ گرانیت

---

<sup>۱</sup> Jones-Wilkins -Lee

<sup>۲</sup> Peak Particle Velocity

<sup>۳</sup> Peak Particle Acceleration

نتیجه گرفت که فاصله امن قرارگیری ماده منفجره یکسان برای سنگ با  $RMR = 40$  حدود ۱,۷ برابر فاصله امن برای سنگ با  $RMR = 95$  می باشد.

در سال ۲۰۰۹، لیو [34] به بررسی اثر انفجار بر روی زیرگذرها پرداخت. وی با استفاده از نرم افزار Abaqus و با استفاده از روش اجزای محدود به بررسی اثر انفجار بر روی پوشش تونل های زیرزمینی پرداخت و عمق مناسب مدفون با توجه به نوع انفجار را تخمین زد.

همان طور که گفته شد مدل سازی پدیده هائی نظیر ضربات شدید و ناگهانی مانند انفجار، باعث تغییر شکل و اعوجاج شدید مش ها می گردد و در مواردی می تواند به طور کلی باعث خطا شده و یا نتایج با خطا ارائه شوند. بهترین روش برای مدل سازی انفجار، روش های بدون شبکه می باشند. در این زمینه، روش SPH بسیار مناسب عمل می نماید.

در سال ۲۰۰۳ نیز لیو و همکاران [8] به بررسی نحوه مدل سازی انفجار با روش SPH پرداختند. وی باین تمامی نکات مرتبط به این روش شامل معادلات حالت برای مواد منفجره و سایر موارد، روش شناسی SPH را نیز ارائه نمود. بر این اساس وی تقریب عددی، ویسکوزیته مصنوعی (که برای پایداری محاسبات عددی و جلوگیری از تداخل ذرات در یکدیگر هنگام موج شوک استفاده می شود)، معادلات حرکت برای انفجار و شیوه حل عددی آنها و همچنین نحوه انتخاب طول هموارسازی و جستجو و یافتن نقاط داخل دامنه هموارساز را به صورت کامل تشریح نمود. وی در ادامه این مقاله به ارائه چند مثال عددی شامل موارد زیر پرداخت:

۱. انفجار روی یک دال بتنی در حالت یک بعدی
۲. انفجار و پخش گاز در حالت یک بعدی
۳. انفجار و پخش گاز ناشی از آن روی دال بتنی در حالت دوبعدی
۴. انفجار یک ماده منفجره با شکل دلخواه

همچنین وی برای معتبر سازی روش خود از نرم افزار Dytran کمک گرفت و نتایج به دست آمده تطابق بسیار مناسب را ارائه نمود. همچنین مدل وی نشان داد هر دو معادلات حالت استفاده شده برای مواد منفجره (گاز ایده آل و JWL) نتایج تقریباً یکسانی ارائه می دهند.

ونگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۴) [35] به تحلیل عددی سازه های مدفون تحت تأثیر بارهای انفجاری پرداختند. وی در این مقاله از روش های SPH و لاگرانژی استفاده نمود. وی برای تعریف مشخصات خاک، از معادله حالت، رابطه تنش و کرنش، معادله حالت برای خاک و آب، مدل آسیب اجزای خاک (که به مشخصات اجزای خاک و کرنش مؤثر وابسته است) و مدل رویه مقاومتی (از مدل ون مایسز استفاده می شود).

وی برای مدل سازی از نرم افزار Autodyne استفاده نمود و مطابقت بسیار مناسبی با روش های تجربی یافت. در سال ۲۰۱۱، ونگ و همکاران [36] به بررسی و شبیه سازی عددی روانگرایی ناشی از انفجار و تأثیر آن بر روی سازه های سطحی پرداخت. وی برای مدل سازی از روش ترکیبی لاگرانژی (برای مدل سازی سازه های سطحی) و SPH برای مدل سازی ماده منفجره استفاده نمود. وی با بررسی مفاهیم اولیه روانگرایی و از آنجا که انفجار باعث ایجاد تنش های بسیار زیاد و ناگهانی شده و افزایش ناگهانی تنش در خاک های اشباع، سبب افزایش فشار آب حفره ای و کاهش تنش مؤثر می گردد، به تحلیل انفجار و تأثیر آن بر روانگرایی می پردازد. وی مدل خود را با توجه به مواردی چون معادلات حالت، قانون کلی و تعمیم یافته تنش-کرنش، رویه های مقاومتی و مدل آسیب اجزای خاک ارائه نمود. همچنین رفتار خاک طی دو مرحله الاستیک و پلاستیک (با رویه تسلیم دراکر-پراگر) شبیه سازی شده است. وی برای مدل سازی عددی از نرم افزار Autodyn استفاده نموده است. مدل سازی در چند مرحله صورت پذیرفت. در مرحله اول خاک اشباع فرض شده و بارگذاری سازه روی آن انجام می شود. پس از گذشت زمان و ثابت شدن تقریبی تنش ها، مرحله دوم که انفجار است رخ می دهد. این مدل سازی برای مواد منفجره با

---

<sup>۱</sup> Wang

وزن‌های متفاوت صورت گرفته و نتایج بررسی می‌شوند. مشخص است که هرچه ماده منفجره، وزن بیشتری داشته باشد، ناحیه بیشتری را تحت اضافه تنش قرار می‌دهد. حال اگر این پخش تنش ناشی از انفجار به کف سازه برخورد نماید، باعث ناپایداری سازه می‌گردد و در غیر این صورت تنها باعث ایجاد نشست‌های ماندگار خواهد شد.

در سال ۲۰۱۲ انیربان دی<sup>۱</sup> [37] به مدل‌سازی عددی انفجار سطحی بر روی خاک‌های دانه‌ای پرداخت. وی برای مدل‌سازی عددی خود از نرم‌افزار Autodyn و همچنین از روش گریز از مرکز برای مدل آزمایشگاهی استفاده نمود. وی در مدل‌سازی عددی خود از روش‌های عددی متفاوت (بسته به نوع ماده مورد بررسی) مانند روش اویلری (برای مدل‌سازی TNT)، روش لاگرانژی (برای مدل‌سازی خاک و تونل) و روش ترکیبی اویلر-لاگرانژی (برای مدل‌سازی ناحیه اندرکنشی خاک و آب) استفاده نمود. همچنین وی برای مدل‌سازی هوا از مدل گاز ایده آل و برای ماده منفجره TNT از معادله حالت JWL بهره برد. ابعاد ماده منفجره با توجه به جرم و چگالی آن تخمین زده می‌شود. انیربان مدل‌سازی خود را در دو مرحله و به صورت دوبعدی و سه‌بعدی انجام داد. همچنین وی برای تخمین پارامترهای لازم مانند ضریب پواسن، سرعت امواج در داخل خاک، کرنش محوری، از نتایج آزمایش‌های گوناگون مانند سه محوری و گریز از مرکز استفاده کرد. برای شرایط تکیه‌گاهی اطراف نیز طبق معمول خاک اطراف تنها اجازه حرکت در راستای قائم و خاک کف اجازه حرکت در هیچ جهت ندارد. کرنش‌های ایجاد شده تحت بارگذاری بر روی سازه مدفون و در مناطق مختلف آن در آزمایش گریز از مرکز، تطابق خوبی با روش عددی به‌کاررفته را داراست.

در سال ۲۰۱۰ جی چانگ آن<sup>۲</sup> [38] نیز در رساله دکتری خود به بررسی رفتار خاک تحت بارگذاری انفجار پرداخت. وی به بررسی تأثیر دو مدل رفتاری خاک بر روی مسئله انفجار پرداخت و برای این کار

---

<sup>۱</sup> Anirban De

<sup>۲</sup> Ji chong An

از مدل آزمایشگاهی و مدل عددی اجزای محدود استفاده نمود. در این رساله علاوه بر مدل سازی انفجار در خاک با استفاده از ماده منفجره C4، از نرم افزار LS-DYNA نیز برای مدل سازی عددی استفاده شده و نتایج با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته اند.

در سال های اخیر نیز برخی پژوهشگران به بررسی چاله های انفجاری در اثر انفجار بر روی خاک پرداخته اند.

در سال ۲۰۰۲، آمبروسینی<sup>۱</sup> و همکاران [39] به بررسی نحوه شکل گیری چاله های انفجاری با استفاده از نتایج تجربی و همچنین استفاده از هیدروکدها پرداخت. در سال های بعد محققان به بررسی اثر انفجار روی خاک را بر شکل گیری چاله های انفجاری مورد بررسی قرار دادند. عمده تحقیقات در این زمینه با استفاده از آزمایش های صحرایی و همچنین بر پایه روابط تجربی و مدل سازی با هیدروکدها استوار است [40]. همچنین در این سال ها مدل سازی چاله های انفجاری و بررسی ابعاد آنها نیز توسط نرم افزار Dytran نیز صورت گرفته است [41].

محققان ایرانی نیز در این سال ها به بررسی اثر انفجار در محیط های مختلف پرداخته اند. مروری بر روش های مدل سازی عددی در انفجار زیر آب [42]، شبیه سازی انفجار بر روی دال های بتنی با استفاده از نرم افزار Ls-Dyna [43]، مقایسه روش عددی بدون شبکه SPH و دیدگاه های اوپلری و لاگرانژی در مدل سازی انفجار در آب با استفاده از نرم افزار Ls-Dyna [44]، مدل سازی رفتار دینامیکی مخازن هوایی ذخیره سیال تحت بار انفجاری [45]، مدل سازی عددی انفجار در آب با استفاده از روش بدون شبکه هیدرو دینامیک ذرات هموار [46] نمونه ای از این تحقیقات می باشد.

#### ۴-۱-۲- مدل سازی انفجار با استفاده از روش SPH

---

<sup>۱</sup> Ambrosini

روش SPH با توجه به خصوصیات مانند عدم وجود شبکه، سازگاری بالا و طبیعت لاگرانژی، برای مدل‌سازی تغییرات شدید و ناگهانی مانند انفجارها بسیار مناسب می‌باشد. روش‌های لاگرانژی مانند اجزای محدود در تغییر شکل‌های زیاد، مناسب عمل نکرده و جواب مناسبی ارائه نمی‌نمایند. روش‌های اویلری مانند تفاضل محدود نیز با وجود اینکه در مدل‌سازی تغییر مکان‌های بزرگ مناسب عمل می‌نمایند، ولی در تعیین و دنبال نمودن سطح آزاد و اندرکنش‌های متحرک ضعیف عمل می‌نمایند. عوامل مذکور باعث استفاده بیشتر از روش SPH شده که به‌طور هم‌زمان خصوصیات لاگرانژی و اویلری را در خود جای داده است.

همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد، انفجار دارای دو مرحله اصلی می‌باشد. در مرحله اول که انفجار صورت می‌گیرد، سرعت ثابت فرض می‌شود. این مرحله بسیار کوتاه‌مدت است. پس‌از این مرحله، موج منتشر می‌شود که این مرحله باعث آسیب‌رسانی و صدمه به سازه‌ها و محیط اطراف شده و سطح مشترک مصالح تغییر می‌نماید. با توجه به سرعت بسیار بالای مراحل انفجار، انفجار به‌عنوان پدیده‌ای بی‌دررو در نظر گرفته می‌شود. با توجه به همین اصل برای مدل‌سازی انفجار از معادلات اویلری و برای مدل‌سازی مواد منفجره از معادله حالت مرتبط استفاده می‌شود. معادلات اویلری در حقیقت همان بقای انرژی، جرم و مومنتوم می‌باشند.

برای مدل‌سازی انفجار در محیط‌های مختلف، ابتدا باید برنامه نوشته‌شده معتبر سازی گردد. با توجه به اینکه معتبر سازی‌های آزمایشگاهی بسیار مشکل، پرهزینه و گاهی خطرناک می‌باشد، نتایج برای معتبر سازی مدل بسیار محدود و دور از دسترس است. به همین علت ابتدا برنامه نوشته‌شده با سایر برنامه‌های مشابه مورد مقایسه و معتبر سازی قرار می‌گیرد. لیو [1] در سال ۲۰۰۳ به مدل‌سازی عددی انفجار در آب با استفاده از روش SPH پرداخته است. از همین رو ابتدا مدل‌سازی برای انفجار در آب صورت گرفته و برنامه نوشته‌شده با نتایج وی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. پس از معتبر سازی نتایج، انفجار در خاک مدل‌سازی شده و چاله‌های انفجاری بررسی می‌گردند.



## ۴-۲- معادلات حاکم

برای بررسی تمامی پدیده‌های فیزیکی، ابتدا باید قوانین و معادلات حاکم و محیط پیرامونی آن محیط را شناخت. برای شناخت معادلات حاکم، از دینامیک سیالات استفاده می‌شود. به‌عنوان اولین گام در بحث مربوط به انتشار امواج در سیالات، لازم است که قوانین مکانیک را به شکل مناسبی با روابط ریاضی بیان کنیم.

معادلات اساسی حاکم بر دینامیک سیالات بر پایه‌ی سه قانون اساسی بقای فیزیکی به شکل زیر

بیان می‌شوند:

۱- بقای جرم

۲- بقای مومنتوم (اندازه حرکت)

۳- بقای انرژی

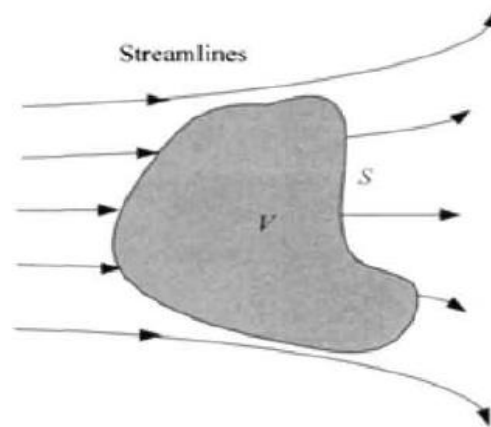
برای حل این معادلات می‌توان از دو دیدگاه زیر استفاده نمود. بسته به شرایط و ویژگی‌های محیط، انتخاب دیدگاه مناسب برای بیان ریاضی (در قالب معادلات دیفرانسیل) از روابط فیزیکی فوق صورت می‌گیرد. جهت تحلیل حرکت و دینامیک حاکم بر سیال، عمدتاً از دو دیدگاه زیر استفاده می‌شود.

الف - دیدگاه اوپلری

ب - دیدگاه لاگرانژی

همان‌طور که در فصل اول گفته شد، دیدگاه اوپلری، یک توصیف فضایی از حرکت سیال است حال آن‌که دیدگاه لاگرانژی یک دیدگاه مادی و کلی می‌باشد. یکی از نتایج مهم بررسی این دو دیدگاه، استفاده از مشتقات کلی زمانی به صورت ترکیبی از مشتقات مکانی و مشتقات انتقالی است. با توجه به طبیعت لاگرانژی روش SPH و سازگاری و تطابق بیشتر، در این پژوهش از دیدگاه لاگرانژی استفاده شده است.

بنا بر دیدگاه لاگرانژی، اگر مطابق شکل (۴-۱) حجم کنترلی در نظر گرفته شود، این حجم به همراه جریان حرکت نموده و همواره پیرامون حجم کنترل اولیه باقی می ماند. در نتیجه با این که حرکت سیال ممکن است به انقباض، انقباض یا تغییر شکل حجم کنترل اولیه بیانجامد اما همچنان جرم سیال درون حجم کنترل لاگرانژی، ثابت و بدون تغییر باقی می ماند. حجم کنترل لاگرانژی با ابعاد محدود در سیستم سیال به طور معقولانه ای بزرگ در نظر گرفته می شود و قوانین بقای حاکم بر آن مستقیماً برای سیال درونش اعمال می شود. معادلات حاکم در حقیقت همان معادلات بقا به فرم انتگرالی برای حجم کنترل محدود لاگرانژی می باشند.

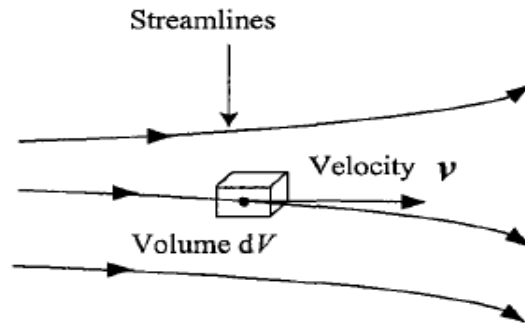


شکل ۴-۱- حجم کنترل لاگرانژی  $V$  با سطح کنترل  $S$  [1]

همچنین برای بیان قوانین و معادلات حاکم می توان از دیدگاه جزئی و بسیار کوچک نیز استفاده نمود. مطابق شکل (۴-۲) سلول کوچکی با حجم کنترل کوچک  $\delta V$  و سطح کنترل بسیار کوچک  $\delta S$  که حجم مورد نظر را احاطه کرده است در نظر گرفته می شود. حجم کنترل  $\delta V$  و سطح کنترل  $\delta S$  به ترتیب فرم دیفرانسیلی  $dV$  و  $ds$  می باشند.

سلول کوچک سیال انتخابی باید آن قدر بزرگ فرض شود که فرضیات مکانیک محیط های پیوسته، همچنان معتبر باشند و از طرفی آن قدر کوچک در نظر گرفته شود که مشخصات درون آن با مشخصات کل یکسان باشد. سلول مورد نظر بنا بر دیدگاه لاگرانژی در راستای خطوط جریان نشان داده شده در شکل (۴-۲) با بردار سرعت  $v = (v_x, v_y, v_z)$  که همان سرعت سیال در نقطه

موردنظر است حرکت می کند. با اعمال معادلات بقا بر روی این سلول می توان به معادلات حاکم دست یافت.

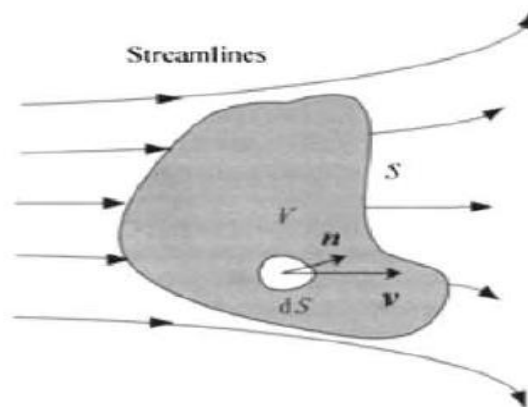


شکل ۴-۲- المان سیال در دیدگاه لاگرانژی [1]

حرکت سیال درون حجم کنترل لاگرانژی فوق، منجر به تغییر سطح کنترل  $S$  می شود. تغییر سطح کنترل نیز باعث تغییر حجم در حجم کنترل می گردد. مطابق شکل (۳-۴) مقدار تغییر حجم در حجم کنترل  $\Delta V$  بر اثر جابه جایی به مقدار  $ds$  و در زمان  $\Delta t$ ، از رابطه (۱-۴) تعیین می گردد

$$\Delta V = v \Delta t \cdot n \cdot ds \quad (1-4)$$

در رابطه فوق  $n$  بردار یکه عمود بر جزء سطح  $ds$  است.



شکل ۴-۳- تغییر حجم در حجم کنترل لاگرانژی [1]

با انتگرال گیری از تغییر حجم جزء مذکور در رابطه (۱-۴) بر روی سطح  $S$ ، کل تغییرات در حجم کنترل با استفاده از رابطه (۲-۴) بیان می گردد.

$$\Delta V = \int v \Delta t . n . ds \quad (2-4)$$

با اعمال قضیه‌ی دیورژانس و تقسیم کردن دو طرف رابطه بر  $\Delta t$ ، رابطه زیر ارائه می‌گردد

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \int V . dV \quad (3-4)$$

اگر حجم کنترل لاگرانژی بسیار کوچک  $\delta V$  به صورتی که تمام مشخصات میدانی برای سلول انتخابی و حجم کنترل یکسان باشد، در نظر گرفته شود، رابطه فوق را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{\Delta(\delta V)}{\Delta t} = V . v \int d(\delta V) = V . v(\delta V) \quad (4-4)$$

رابطه فوق در واقع تغییرات زمانی جزء حجم بوده و دیورژانس سرعت را می‌توان به صورت زیر ارائه داد

$$\frac{\Delta(\delta V)}{\Delta t} . \frac{1}{(\delta V)} = V . v \quad (5-4)$$

رابطه‌ی فوق، تفسیر فیزیکی دیورژانس سرعت را به صورت نرخ تغییرات زمانی جزء حجم بیان می‌کند.

#### ۴-۲-۱- بقاء جرم (معادله پیوستگی)

معادله پیوستگی بر پایه‌ی قانون بقای جرم است. در دیدگاه لاگرانژی سلول کوچکی به حجم

$\delta V$  دارای جرمی به مقدار  $\delta m$  می‌باشد که از رابطه (۴-۶) تعیین می‌گردد

$$\delta m = \varphi \delta V \quad (6-4)$$

با توجه به پایستگی قانون بقا جرم، نتیجه گرفته می‌شود که تغییرات زمانی جرم، صفر می‌باشد

بنابراین می‌توان رابطه فوق را به شکل زیر بازنویسی نمود

$$\frac{D(\delta m)}{Dt} = \frac{D(\varphi \delta V)}{Dt} = \delta V . \frac{D\varphi}{Dt} + \varphi . \frac{D(\delta V)}{Dt} = 0 \quad (7-4)$$

با در نظر گرفتن آنچه در مورد تغییرات حجم کنترل ارائه شد، رابطه فوق به شکل زیر بازنویسی

می‌گردد

$$\frac{D\varphi}{Dt} + \varphi \frac{D(\delta V)}{Dt} \cdot \frac{1}{(\delta V)} = 0 \quad (8-4)$$

با استفاده از رابطه دیورژانس سرعت، رابطه فوق به شکل نهایی رابطه (۹-۴) ارائه می‌گردد. این رابطه بیانگر رابطه بقای جرم در دیدگاه لاگرانژی است که در این پژوهش و در روش SPH به صورت گسسته سازی شده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

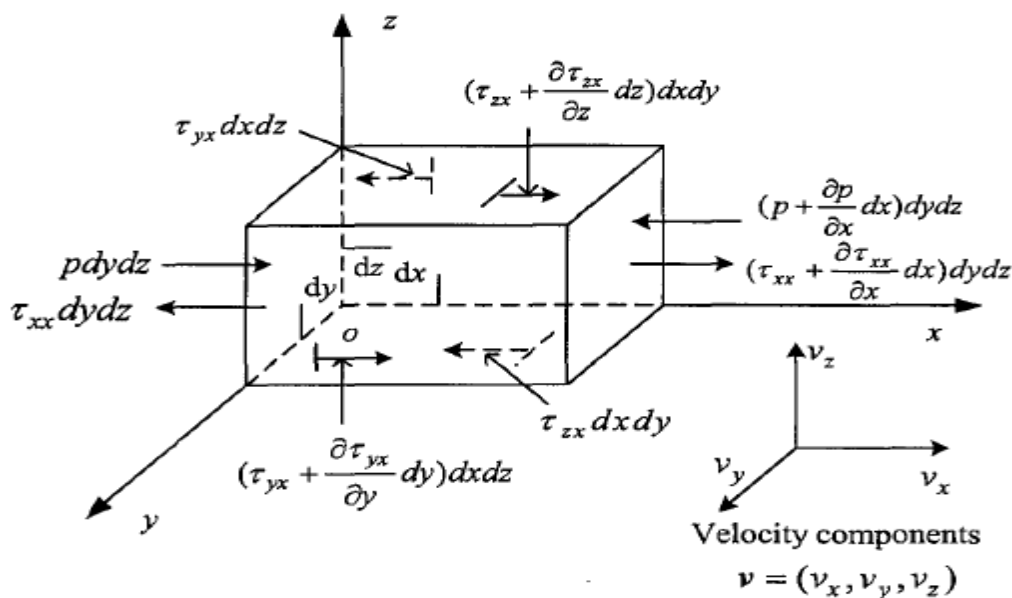
$$\frac{D\varphi}{Dt} = -\varphi V \cdot v \quad (9-4)$$

#### ۴-۲-۲- بقاء مومنتوم (بقای اندازه حرکت)

معادله مومنتوم بر اساس قانون بقای اندازه حرکت است و در مکانیک محیط‌های پیوسته با قانون دوم نیوتن بیان می‌شود. بر اساس قانون دوم نیوتن، نیروی خالص وارد بر المان سیال لاگرانژی، از ضرب جرم در شتاب المان سیال محاسبه می‌شود.

مطابق شکل (۴-۴) المان در نظر گرفته شده دارای بردار موقعیت  $x=(x,y,z)$  و شتاب

در فضای سه بعدی می‌باشد.  $\frac{Dv_x}{Dt}, \frac{Dv_y}{Dt}, \frac{Dv_z}{Dt}$



شکل ۴-۴- نیروها در راستای X برای یک المان سیال لاگرانژی [1]

زیرنویس‌های X, Y, Z معرف راستای قرارگیری بردار سرعت المان سیال و عملیات مشتق‌گیری است.

نیروهای خالص وارد بر المان موردنظر را نیز می‌توان به دو صورت نیروهای وزنی (حجمی) و نیروهای سطحی در نظر گرفت. نیروهای حجمی ممکن است نیروی گرانش یا سایر نیروهایی که بر حجم المان وارد می‌شوند مانند نیروهای مغناطیسی باشد. نیروی سطحی به دودسته زیر تقسیم می‌شوند

- فشارهای خارجی که توسط سیال خارجی پیرامون به المان موردنظر وارد می‌گردند

- تنش‌های نرمال و برشی، که به ترتیب موجب تغییر حجم و تغییر شکل برشی می‌شوند.

به‌عنوان نمونه با در نظر گرفتن تمامی نیروها در راستای X و در نظر گرفتن قانون دوم نیوتن

رابطه (۱۰-۴) تعیین می‌گردد:

$$m \cdot \frac{dv_x}{dt} = \varphi dx \cdot dy \cdot dz = - \frac{\partial p}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dx \cdot dy \cdot dz + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dx \cdot dy \cdot dz + F_x (\varphi dx \cdot dy \cdot dz) \quad (10-4)$$

در رابطه فوق فشار،  $\tau_{ij}$  تنش در جهت  $j$  که بر صفحه‌ی عمود بر راستای  $i$  قرار دارد و  $F_x$

نیروی حجمی در راستای X می‌باشد. در نتیجه معادله مومنتوم بر اساس قانون دوم نیوتن به‌صورت زیر

نتیجه می‌گردد:

$$\varphi \frac{Dv_x}{Dt} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \varphi F_x \quad (11-4)$$

به همین ترتیب برای سایر جهت‌ها نیز معادله مومنتوم بازنویسی می‌گردد

$$\varphi \frac{Dv_y}{Dt} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \varphi F_y \quad (12-4)$$

$$\varphi \frac{Dv_z}{Dt} = - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \varphi F_z \quad (13-4)$$

#### ۴-۲-۳- معادله انرژی

معادله انرژی بر پایه قانون بقای انرژی و بقای انرژی در سیالات نیز بیانگر قانون اول هیدرودینامیک می‌باشد. بر اساس معادله انرژی تغییرات زمانی انرژی داخل المان سیال باید با مجموع شار حرارتی خالص همان المان و نرخ تغییرات کار انجام‌شده توسط نیروهای حجمی و سطحی اثرکننده بر همان المان سیال، برابر باشد. چنانچه از شار حرارتی و نیروهای حجمی صرف‌نظر کنیم، نرخ تغییرات زمانی انرژی داخلی  $e$  برای المان سیال انتخابی، به دو قسمت زیر تقسیم می‌گردد

۱- کار انجام‌شده که حاصل ضرب فشار همه‌جانبه در کرنش حجمی است

۲- اتلاف انرژی در اثر نیروهای برشی لزج

بنابراین معادله را می‌توان به صورت زیر ارائه نمود

$$\rho \frac{De}{Dt} = -p \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \tau_{xx} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \tau_{yx} \frac{\partial v_x}{\partial y} + \tau_{zx} \frac{\partial v_x}{\partial z} + \tau_{yy} \frac{\partial v_y}{\partial y} + \tau_{xy} \frac{\partial v_y}{\partial x} + \tau_{yz} \frac{\partial v_y}{\partial z} + \tau_{zz} \frac{\partial v_z}{\partial z} + \tau_{yz} \frac{\partial v_z}{\partial y} + \tau_{xz} \frac{\partial v_z}{\partial x} \quad (4-14)$$

#### ۴-۲-۴- معادلات ناویر-استوکس

تمامی معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی ارائه‌شده در مکانیک سیالات محاسباتی بر اساس مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی در دیدگاه لاگرانژی نوشته شده و به معادلات ناویر-استوکس معروف‌اند.

با در نظر گرفتن راستاهای مختصاتی  $\alpha$  و  $\beta$  مجموع این معادلات با عملیات تکراری بر روی اندیس‌ها انجام شده و مشتقات کلی زمان بر روی یک قاب متحرک لاگرانژی در نظر گرفته می‌شوند. به این ترتیب معادلات ناویر-استوکس به صورت زیر بازنویسی می‌شوند

۱- معادله پیوستگی

$$\frac{D\varphi}{Dt} = -\varphi \cdot \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\beta} \quad (4-15)$$

۲- معادله مومنتوم (با فرض عدم وجود نیروی خارجی):

$$\frac{Dv^\alpha}{Dt} = -\frac{1}{\varphi} \cdot \frac{\partial \sigma^{\alpha\beta}}{\partial x^\beta} \quad (۱۶-۴)$$

در این معادله  $\sigma$  تانسور تنش کل بوده و از دو بخش فشار همه‌جانبه  $p$  و تنش برشی  $\tau$  تشکیل شده است. لازم به ذکر است که در مایعات، تنها بخش فشار همه‌جانبه وارد محاسبات شده و در مواد دارای مقاومت برشی باید تنش کلی مطابق رابطه زیر تعیین گردد

$$\sigma^{\alpha\beta} = -p\delta^{\alpha\beta} + \tau^{\alpha\beta} \quad (۱۷-۴)$$

۳- معادله انرژی

$$\frac{De}{Dt} = \frac{\sigma^{\alpha\beta}}{\varphi} \cdot \frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\beta} \quad (۱۸-۴)$$

### ۳-۴- ارائه معادلات حاکم بر اساس SPH

#### ۳-۴-۱- تقریب چگالی ذرات

با توجه به اینکه در روش SPH، تقریب ذرات بر اساس محدوده در نظر گرفته‌شده توسط طول هموارسازی انجام‌شده و طول هموارسازی خود وابسته به چگالی ذرات است، تقریب چگالی بسیار مهم می‌باشد. در مسائل مربوط به انفجار برای تقریب چگالی می‌توان از روش‌ها و رویکردهای متفاوتی از جمله چگالی مجموع و چگالی پیوستگی استفاده نمود.

در رویکرد چگالی مجموع مستقیماً در تقریبات SPH به‌جای خود چگالی اعمال می‌شود. برای

ذره  $i$ ، چگالی یا رویکرد مجموع چگالی‌ها به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\varphi_i = \sum_{j=1}^N m_j \cdot W_{ij} \quad (۱۹-۴)$$

در رابطه فوق،  $N$  تعداد ذرات موجود در دامنه ذره  $i$  ام،  $m$  جرم ذره  $j$  ام،  $W_{ij}$  تابع وزن

موردا استفاده ذره  $i$  در ذره  $j$  ام که با طول هموار ساز  $h$  مرتبط است. رابطه زیر ارتباط بین تابع وزن و

طول هموارسازی را نشان می‌دهد:



$$W_{ij} = W(|x_i - x_j|, h) = W(R_{ij}, h) \quad (۲۰-۴)$$

$$R_{ij} = \frac{r_{ij}}{h} = \frac{x_i - x_j}{h} \quad (۲۱-۴)$$

در روابط فوق  $R_{ij}$  فاصله نسبی بین ذرات  $i$  و  $j$  و  $r_{ij}$  فاصله حقیقی بین ذرات  $i$  و  $j$  می‌باشد.

رویگرد دیگر برای تقریب چگالی، رویگرد چگالی پیوستگی می‌باشد. در این روش تقریب SPH تنها بر روی قسمت دیورژانس میدان سرعت اعمال شود. در این صورت با استفاده از معادله پیوستگی رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{D\varphi_i}{Dt} = -\varphi_i \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\varphi_j} v_j^\beta \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (۲۲-۴)$$

در معادله فوق اگر از سرعت نسبی بین دو ذره استفاده گردد، تقریب چگالی به صورت زیر تغییر می‌یابد:

$$\frac{D\varphi_i}{Dt} = \varphi_i \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\varphi_j} v_{ij}^\beta \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (۲۳-۴)$$

در رابطه فوق  $v_{ij}^\beta$  سرعت نسبی بین دو ذره و برابر  $v_i^\beta - v_j^\beta$  می‌باشد. این معادله اختلاف سرعت را برای تقریب دو ذره مجزا معرفی می‌کند و در بیشتر مسائل مربوط به انفجار در SPH از آن استفاده می‌گردد. در این رابطه سرعت نسبی هر جفت از ذرات موجود در دامنه تعیین شده و می‌تواند معیار نسبی نزدیکی و نفوذ ذرات در یکدیگر باشد. علت دیگر استفاده از این سرعت نسبی بین ذرات در فرمولاسیون SPH این است که در فرم‌های نامتقارن، خطای ناشی از مسائل پراکندگی ذرات نااهم رفتار را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد.

معادله (۲۳-۴) به وضوح نشان می‌دهد که نرخ تغییرات چگالی یک ذره، در ارتباط مستقیم با سرعت‌های نسبی بین همان ذره و سایر ذرات موجود در دامنه مورد بررسی است. گرادیان تابع هموارساز SPH. میزان مشارکت (سهم) این سرعت‌های نسبی را تعیین می‌کند [47].

#### ۴-۳-۲- تقریب مومنتوم ذرات

تقریب تغییرات مومنتوم نیز مانند تقریب چگالی ذرات شامل تبدیلاتی می‌باشد و اعمال مستقیم مفاهیم تقریب ذرات SPH به روی گرادینان از معادله مومنتوم که در قبل ارائه شد رابطه زیر نتیجه می‌گردد:

$$\frac{Dv_i^\alpha}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j \cdot \frac{\sigma_i^{\alpha\beta} + \sigma_j^{\alpha\beta}}{\varphi_i \varphi_j} \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (۴-۲۴)$$

معادله فوق یکی از روابط بسیار رایج در تقریب مومنتوم به شمار می‌آید و یکی از مزایای این معادله‌ی همگن و متقارن، کاهش قابل ملاحظه‌ی خطایی است که در اثر پراکندگی ذرات ناهم رفتار رخ می‌دهد.

همچنین می‌توان با بسط معادله (۴-۲۴) و بر اساس روابط مشتقات زنجیره‌ای رابطه (۴-۲۵) و در نظر گرفتن تقریب SPH و ساده‌سازی‌های ریاضی رابطه (۴-۲۶) را برای تقریب مومنتوم مورد استفاده قرارداد:

$$\frac{1}{\varphi} \cdot \frac{\partial \sigma^{\alpha\beta}}{\partial x^\beta} = \frac{\partial}{\partial x^\beta} \left( \frac{\sigma^{\alpha\beta}}{\varphi} \right) + \frac{\sigma^{\alpha\beta}}{\varphi^2} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x^\beta} \quad (۴-۲۵)$$

$$\frac{Dv_i^\alpha}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j \cdot \left( \frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\varphi_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\varphi_j^2} \right) \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (۴-۲۶)$$

رابطه‌ی فوق، رایج‌ترین بیان برای استخراج و ارزیابی مومنتوم به شمار می‌آید و در مقالات علمی بسیار مورد استفاده قرار گرفته است [1].

#### ۴-۳-۳- تقریب انرژی ذرات

به‌منظور آنالیز تغییرات انرژی درونی  $e$  در مواد با مقاومت برشی، با در نظر گرفتن نرخ کرنش و انجام ساده‌سازی‌های ریاضی و روابط مشتقات جزئی می‌توان انرژی ذرات را با روابط زیر تقریب زد:

$$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \frac{p_i + p_j}{\varphi_i \varphi_j} (v_i^\beta - v_j^\beta) \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + \quad (27-4)$$

$$\frac{1}{\varphi_i} \cdot \tau_i^{\alpha\beta} \varepsilon_i^{\alpha\beta}$$

همچنین می‌توان از رابطه زیر نیز برای تقریب انرژی استفاده نمود:

$$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \frac{p_i}{\varphi_i^2} + \frac{p_j}{\varphi_j^2} (v_i^\beta - v_j^\beta) \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + \frac{1}{\varphi_i} \cdot \tau_i^{\alpha\beta} \varepsilon_i^{\alpha\beta} \quad (28-4)$$

در برنامه نوشته شده در این پژوهش، از فرم دوم بیان SPH تغییرات انرژی درونی استفاده شده است. ذکر این نکته ضروری است که در ماهیت روابط (27-4) و (28-4) تفاوت بنیادی وجود ندارد و تنها نحوه بیان و نمایش است که متفاوت می‌نمایند. مضافاً بدانیم که خطای ناشی از هر دو روش در تقریبات SPH به یک‌میزان بوده و اختلافی وجود نخواهد داشت. روابط SPH برای معادلات بنیادی ناویر استوکس یعنی استخراج چگالی، مومنتوم و انرژی را به‌طور چکیده در جدول (4-1) ارائه کرده‌ایم. ذکر یک نکته ضروری است که به دلیل سرعت فوق‌العاده بالای پدیده انفجار که موضوع اصلی پژوهش ماست، از جملاتی که به‌گونه‌ای شامل لزجت یا ویسکوزیته باشند، صرف‌نظر شده است. نتیجه‌ی چنین فرض بزرگی، تبدیل معادلات ناویر — استوکس به حالتی است که فاقدترم لزجت است و این دقیقاً تعریف سیستم معادلات اوایلر خواهد بود همچنین پدیده انفجار بی در رو فرض شده است.

جدول ۴-۱- بیان SPH از معادلات حاکم

بقای جرم
$\varphi_i = \sum_{j=1}^N m_j \cdot W_{ij}$
$\frac{D\varphi_i}{Dt} = -\varphi_i \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\varphi_j} v_j^\beta \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta}$
$\frac{D\varphi_i}{Dt} = \varphi_i \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\varphi_j} v_{ij}^\beta \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta}$
بقای مومنتوم
$\frac{Dv_i^\alpha}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j \cdot \frac{\sigma_i^{\alpha\beta} + \sigma_j^{\alpha\beta}}{\varphi_i \varphi_j} \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta}$
$\frac{Dv_i^\alpha}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j \cdot \left( \frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\varphi_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\varphi_j^2} \right) \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta}$
بقای انرژی
$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \frac{p_i}{\varphi_i^2} + \frac{p_j}{\varphi_j^2} (v_i^\beta - v_j^\beta) \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + \frac{1}{\varphi_i} \cdot \tau_i^{\alpha\beta} \varepsilon_i^{\alpha\beta}$
$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \frac{p_i + p_j}{\varphi_i \varphi_j} (v_i^\beta - v_j^\beta) \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + \frac{1}{\varphi_i} \cdot \tau_i^{\alpha\beta} \varepsilon_i^{\alpha\beta}$

#### ۴-۴- مدل رفتاری

برای مدل مقاومتی خاک از معیار ون مایسز استفاده می‌گردد. در این مدل از ویسکوزیته آب‌وهوای داخل حفره‌های خاک صرف‌نظر شده است، در نتیجه تمام برش ایجادشده توسط دانه‌های جامد خاک تحمل می‌گردد [36].

$$f = \sqrt{J_2} - \alpha I_1 - k = 0 \quad (29-4)$$

در رابطه فوق  $\alpha$  و  $k$  پارامترهای وابسته به خصوصیات خاک،  $I_1$  نامتغیر اول تنش و  $J_2$  نامتغیر تنش انحرافی 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 و در صورتی که مقدار آن بیشتر از شرط تسلیم باشد، ماده تسلیم و وارد مرحله پلاستیک شده است، در این حالت هر یک از تنش‌ها در پارامتر تصحیح ضرب شده و به سطح تسلیم بازمی‌گردد.

تانسور تنش از دو قسمت فشار همه‌جانبه و تنش انحرافی تشکیل شده است.

$$\sigma^{\alpha\beta} = -P\delta^{\alpha\beta} + \tau^{\alpha\beta} \quad (30-4)$$

قسمت اول معادله فوق از طریق معادله حالت مربوط و قسمت دوم با توجه به نرخ تغییرات تنش انحرافی محاسبه می‌گردد.

$$\tau^{\alpha\beta} = G \cdot \left( \varepsilon^{\alpha\beta} - \frac{1}{3} \delta^{\alpha\beta} \varepsilon^{\gamma\gamma} \right) + \tau^{ik} R_{o}^{jk} + \tau^{jk} R_{o}^{ik} \quad (31-4)$$

$$\varepsilon^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\beta} + \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\alpha} \right) \quad (32-4)$$

در روابط فوق  $G$  مدول برشی،  $\tau^{\alpha\beta}$  نرخ تغییرات تنش برشی و  $\varepsilon^{\alpha\beta}$  نرخ تغییرات کرنش و  $R_o$  دوران می‌باشد.

با استفاده از معادلات بقای ارائه شده، معادلات حرکت برای خاک به صورت روابط (۳۳-۴) تا (۳۶-۴) بازنویسی می‌گردند.

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (33-4)$$

$$\frac{Dv_i}{Dt} = - \sum_{j=1}^N m_j \left( \frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (34-4)$$

$$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left( \frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} \right) (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} W_{ij} + \frac{1}{\rho_i} \tau_i^{\alpha\beta} \varepsilon_i^{\alpha\beta} \quad (35-4)$$

$$\frac{Dx_i^\alpha}{Dt} = v_i^\alpha \quad (36-4)$$

معادلات حرکت برای تانسور نرخ کرنش و دوران نیز به صورت زیر بازنویسی می گردند.

$$\varepsilon_i^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} (v_j^\alpha - v_i^\alpha) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\alpha} \quad (37-4)$$

$$Ro_i^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} (v_j^\alpha - v_i^\alpha) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} - (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\alpha} \quad (38-4)$$

#### ۴-۵- معادله حالت

پس از استخراج معادلات حاکم بر انفجار در خاک، و برای حل همزمان معادلات سه گانه بقای جرم، مومنتوم و انرژی، باید از معادله دیگری به نام معادله حالت استفاده نمود. به عبارت دیگر حل چهار مجهول چگالی، فشار، انرژی و سرعت، نیازمند یک معادله بیش از معادلات سه گانه می باشد. معادله حالت در حقیقت با نشان دادن رفتار مناسب ماده در محیط موردنظر پارامتر فشار را ارائه می نماید. برای مثال در مایعات و یا گازهای ایده آل که هیچ گونه تنش برشی و نیروهای اصطکاکی را تحمل نمی کنند، تنش های ایجاد شده تنها به فشارهای همه جانبه وابسته می باشند حال آنکه در مواد دارای مقاومت برشی مانند خاک، تنش های برشی نیز واردترم تنش می گردند. در مواد دارای مقاومت برشی مانند خاک ها، دانه های جامد تا حدی تنش را تحمل نموده و سپس گسیخته می گردند و حتی در تنش های شدیدتر رفتاری مانند مایعات از خود بروز می دهند [38]. پارامترهای مؤثر در معادله حالت معمولاً ترکیبی از پارامترهای فشار، چگالی، دما، بی نظمی و انرژی درونی می باشد. تعیین سرعت صوت در جامدات نیز مشکل تر از مایعات می باشد. سرعت صوت در تعیین معادله حالت مورد استفاده قرار می گیرد. همچنین در هنگام انتقال اطلاعات بین چند محیط متفاوت (گاز-آب و یا گاز-خاک و ...) باید ناحیه اندرکنش بین این مواد تصحیح گردد. در نظر گرفتن ناحیه اندرکنش در روش های اجزای محدود و تفاضل محدود بسیار ساده تر از روش SPH است. در روش SPH ممکن است ذرات در اثر تغییر شکل های ناگهانی از یکدیگر فاصله

گرفته و دیگر اندرکنش نداشته باشند و یا برعکس، ذرات با مشخصات گوناگون در یکدیگر نفوذ کرده و فروروند. در هر دو حالت، نتایج تعیین شده دارای خطای نسبتاً زیادی می‌باشند. برای حل این مشکل از روش‌های گوناگونی استفاده می‌شود که می‌توان به روش میانگین‌گیری از سرعت ذرات XSPH و الگوریتم اندرکنش ذره به ذره [1] اشاره نمود.

در این پژوهش برای مدل‌سازی رفتار ماده منفجره TNT و تعیین فشار از معادله حالت JWL استفاده می‌شود.

$$p = A \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1}\right) e^{-\left(\frac{R_1}{\eta}\right)} + B \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_2}\right) e^{-\left(\frac{R_2}{\eta}\right)} + \omega\eta\rho_0 e \quad (39-4)$$

در رابطه فوق  $\eta = \frac{\varphi}{\varphi_0}$  (نسبت چگالی گاز ماده منفجره به چگالی گاز اولیه) A، B، R1، R2 و  $\omega$

ثابت‌های مواد منفجره گوناگون می‌باشند. مقادیر استفاده شده برای ماده منفجره TNT در مدل‌سازی در جدول (۲-۴) ارائه شده است.

جدول ۴-۲- پارامترهای معادله حالت برای ماده منفجره (JWL)[1]

$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	A (pa)	B (pa)	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	$\omega$	سرعت اولیه انفجار (m/s)	$e_0$ (j/kg)
۱۶۳۰	$۳/۷۱۲ \times ۱۰^{۱۲}$	$۱۰^۹$ $۳/۲۱ \times$	۴/۱۵	۰/۹۵	۰/۳	۶۹۳۰	$۴/۲۹ \times ۱۰^۶$

همچنین برای تعیین فشار آب نیز، با توجه به تفاوت رفتاری آب در هنگام فشار و کشش، از معادلات حالت ارائه شده در روابط (۴۰-۴) و (۴۱-۴) در حالات مربوط به فشار و کشش استفاده می‌شود. پارامترهای مربوط به معادلات حالت آب در جدول (۳-۴) ارائه شده است.

$$P = a_1\mu + a_2\mu + a_3\mu^3 + (b_0 + b_1\mu + b_1\mu^2)\rho_0 e \quad (40-4)$$

$$P = a_1\mu + (b_0 + b_1\mu)\rho_0 e \quad (41-4)$$

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

جدول ۴-۳ پارامترهای مورد استفاده در معادله حالت آب [1]

$\rho_0 (kg/m^3)$	$C_0$	$a_1 (pa)$	$a_2 (pa)$	$a_3 (pa)$	$b_0$	$b_1$	$e_0 (j/kg)$
۱۰۰۰	۱۴۸۰	$۲/۱ \times ۱۰^۹$	$۹/۲۲۴ \times ۱۰^۹$	$۸/۷۶ \times ۱۰^۹$	۰/۴۹۳۴	۱/۳۹۳	۳۵۷/۱

برای تعیین فشار در خاک و تعیین بخش اول معادله تنش در این پژوهش نیز، از معادله حالت Mie-Grunesien استفاده شده است. با توجه به اینکه ضرایب این معادله باید از طریق آزمایش و مکانیک آماری و استفاده از منحنی هوگونیت<sup>۱</sup> تعیین گردند، مقادیر فشار به دست آمده در این روش قابل اعتماد می باشد. معادله حالت مورد نظر در رابطه زیر ارائه شده است [48]

$$P(\rho, e) = (1 - 0/5\Gamma\mu)P_H(\rho) + \Gamma\rho e \quad (42-4)$$

در رابطه فوق  $\Gamma$  پارامتر مرتبط با خصوصیات خاک،  $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$  و  $P_H$  از رابطه زیر به دست می آید

$$P_H = \begin{cases} a_0\mu + b_0\mu^2 + c_0\mu^3 & \mu > 0 \\ a_0\mu & \mu < 0 \end{cases} \quad (43-4)$$

ثابت های ارائه شده در رابطه فوق با استفاده از منحنی هوگونیت تعیین می شوند. این منحنی مکان هندسی نقاطی است که به وسیله تراکم در اثر موج انفجار ناشی می شود و سرعت ذرات را در مقابل سرعت موج شوک وارد ارائه می دهد و می تواند خواص ماده را در مقایسه با منحنی تنش\_ کرنش برآورده سازد. با استفاده از منحنی هوگونیت می توان ضرایب لازم برای معادله حالت و تعیین فشار را تعیین نموده و مقدار فشار ایجاد شده در خاک توسط انفجار را تعیین نمود. مقادیر  $a_0$ ،  $b_0$  و  $c_0$  در رابطه (۴۳-۴) توسط روابط زیر و با استفاده از منحنی هوگونیت تعیین می گردند.

$$a_0 = \rho_0 \cdot C^2 \quad (44-4)$$

<sup>۱</sup> Hugoniot



$$b_o = a_o[1 + 2(S - 1)] \quad (45-4)$$

$$c_o = a_o[2(S - 1) + 3(S - 1)^2] \quad (46-4)$$

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 می‌باشد.

#### ۴-۶- سایر نکات مدل‌سازی انفجار در خاک با روش SPH

##### ۴-۶-۱- شرایط مرزی

از جمله مشکلات مدل‌سازی عددی با SPH، هم رفتارسازی ذرات است که باعث کم‌دقت شدن در مرزها و همچنین ایجاد ناپایداری‌های عددی می‌گردد.

همان‌طور که پیش‌از این اشاره گردید برآورد مقادیر میدانی با استفاده از روش SPH استاندارد، در ذرات واقع در روی مرز و یا در نزدیکی آن، به علت این‌که نقاط همسایه تنها در یک‌طرف ذره مرکزی قرار می‌گیرند و شرط یکه (واحد) بودن از بین می‌رود، با عدم دقت همراه می‌باشد، این مسئله اعمال شرایط مرزی را دچار مشکل می‌نماید. تاکنون روش‌های زیادی برای بهبود بخشیدن این نارسایی به کار گرفته شده است. در سال ۱۹۸۹، شرط مرزی را با در نظر گرفتن جمله مرزی که در نتیجه انتگرال‌گیری جزء به جزء به دست می‌آید اعمال شد [49]. برخلاف نقاط داخلی که در آن‌ها این جمله صفر می‌باشد، در نزدیکی مرز این جمله صفر نمی‌باشد. در سال ۱۹۹۳، برای اولین بار نقاط مجازی که به صورت قرینه ذرات حقیقی نسبت به مرز تعریف می‌شدند، در نظر گرفته شدند [50]. در سال‌های بعد، این ذرات با تعریف ذراتی که درست روی مرز قرار داشتند انجام شد. خصوصیت این ذرات این بود که با نزدیک شدن ذرات داخلی به آن‌ها، نیروی رانشی متناسب بافاصله نسبی ذره نزدیک شونده وارد می‌کردند. این نیرو برای جلوگیری از نفوذ ذرات داخلی در مرزهای مسئله تعریف شده بود [51]. در کاری که Liu در سال ۲۰۰۲، درباره بررسی انفجار زیرآب انجام داده است شرط مرزی جامد با تعریف دو نوع ذره مجازی اعمال شده است [1]. دسته اول ذرات مجازی که درست روی مرز واقع می‌باشد، دسته دوم

ذرات مجازی که در آن ذرات مجازی خارج مرز تعریف می‌شوند. این ذرات مجازی درست قرینه ذرات داخلی حقیقی که فاصله آن‌ها تا مرز کمتر از طول هموارسازی می‌باشد 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 می‌باشد. ذرات مجازی نوع دو برای جلوگیری از نفوذ ذرات حقیقی به داخل مرز کافی نمی‌باشد، بنابراین از ذرات مجازی نوع یک نیز استفاده می‌شود. بنابراین سه نوع ذره می‌توانند در محدوده دامنه هموارسازی ذرات نزدیک مرز قرار گیرند:

#### (۱) ذرات حقیقی

(۲) ذرات مجازی نوع یک (ذرات روی مرز که واردکننده نیروی رانشی می‌باشند)

(۳) ذرات مجازی نوع دو (ذرات خارج از مرز)

این نکته قابل ذکر است که موقعیت و متغیرهای فیزیکی ذرات مجازی نوع یک تغییر نمی‌کند. اما ذرات نوع دو در هر گام زمانی باید به گونه‌ای بازتولید شوند که خصوصیات ذکر شده از نظر تقارن را دارا باشند. نتایج عددی ارائه شده نشان می‌دهند که اعمال شرایط مرزی به ترتیب ذکر شده بسیار پایدار و مؤثر می‌باشد.

#### ۴-۶-۲- ویسکوزیته مصنوعی

یکی از روش‌های متداول برای پیشگیری از خطای پراکندگی در روش ذرات متحرک افزودن جملاتی مشابه جملات خطا، به معادله دیفرانسیل می‌باشد. این جمله اضافه تحت عنوان ویسکوزیته مصنوعی از نفوذ ذرات در یکدیگر جلوگیری می‌نماید. اولین بار ویسکوزیته مصنوعی برای پایدار نمودن مسئله موج شوک مورد استفاده قرار گرفت [52]. یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای کاهش خطای پراکندگی عددی و نفوذ ذرات در یکدیگر روش ویسکوزیته مصنوعی می‌باشد که با افزودن ترم اضافه

به معادلات پایه سعی بر پایدارسازی حل دارد. این رابطه یکی از متداول ترین ترم‌های پایدارساز می‌باشد [53].

$$\pi_{ij} = \begin{cases} \frac{-\alpha c_{ij} \mu_{ij} + \beta \mu_{ij}^2}{\rho_{ij}} & v_{ij} x_{ij} < 0 \\ 0 & v_{ij} x_{ij} > 0 \end{cases} \quad (47-4)$$

$$\mu_{ij} = \frac{h_{ij} v_{ij} x_{ij}}{|x_{ij}|^2 + \emptyset^2} \quad (48-4)$$

$c_{ij}$  متوسط سرعت موج در ذرات  $I$ ,  $J$  بوده و  $\rho_{ij}$  و  $h_{ij}$  به ترتیب متوسط چگالی و متوسط طول هموارسازی ذرات  $I$ ,  $J$  می‌باشد  $v_{ij}$  نیز سرعت نسبی این دو ذره است. موقعیت نسبی دو ذره نیز با  $x_{ij}$  نشان داده می‌شود. پارامترهای  $\alpha$ ,  $\beta$  و  $k$  ثابت می‌باشند و مقادیر آن‌ها نسبت به مسئله موردنظر تغییرپذیر است.  $\alpha$ ,  $\beta$  و  $\emptyset$  به ترتیب ۱، ۱۰ و  $0/1h_{ij}$  در نظر گرفته شده است.

ترم پایدارسازی ویسکوزیته مصنوعی به تمامی معادلات حاکم اضافه می‌گردد. ترم‌های پایدارساز به صورت نیروهای بین‌ذره‌ای عمل کرده و هنگامی که ذرات در اثر ارتعاشات زائد، با سرعت زیاد به هم نزدیک می‌شوند از نفوذ آن‌ها در یکدیگر ممانعت می‌نماید. معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی با در نظر گرفتن ویسکوزیته مصنوعی به صورت زیر باز نویسی می‌گردند.

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (49-4)$$

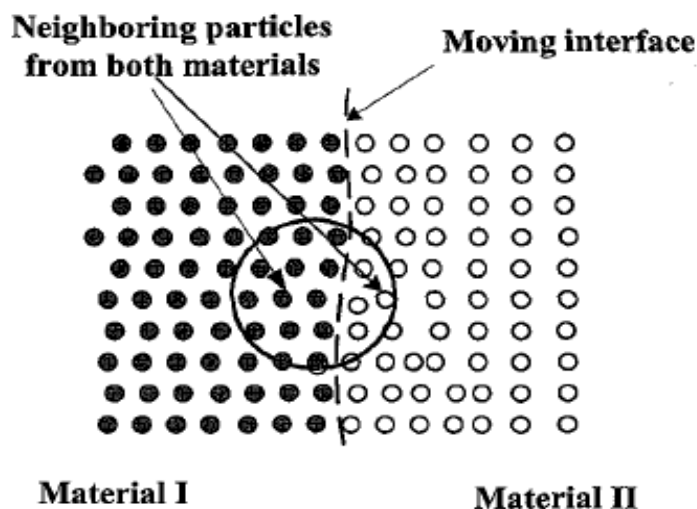
$$\frac{Dv_i}{Dt} = - \sum_{j=1}^N m_j \left( \frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} + \pi_{ij} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \quad (50-4)$$

$$\frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left( \frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} + \pi_{ij} \right) (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} W_{ij} + \frac{1}{\rho_i} \tau_i^{\alpha\beta} \varepsilon_i^{\alpha\beta} \quad (51-4)$$

$$\frac{Dx_i^\alpha}{Dt} = v_i^\alpha \quad (52-4)$$

#### ۴-۷- نیروی پنالته

برای مسائلی با شدت نیرویی بسیار زیاد و شماری از اندرکنش‌های مرزی مانند آنچه در پدیده‌ی انفجار زیرآب رخ می‌دهد، نفوذ غیر فیزیکی و اختلاط ذرات گوناگون در یکدیگر یکی از مسئله‌سازترین مواردی است که جهت دستیابی به حلی پایدار، می‌بایست در جهت رفع آن کوشید. از آنجاکه نفوذ غیر فیزیکی ذرات روش SPH در هم، موجب بروز جواب‌های واگرا، ناپایدار و بی‌معنی می‌شود، لذا شایسته است که به طریقی از این درهم‌آمیختگی که محصول شدت میدان فشار و سرعت به‌ویژه حالات چند ماده‌ای (چند فازی) است، جلوگیری شود. همان‌گونه که در شکل ۴-۵ ملاحظه می‌شود، برخی از ذرات مرز مشترک مجاور دو ماده در یک گام زمانی، ممکن است در گام زمانی بعدی درون همسایگی ذره مرکزی ننگند.

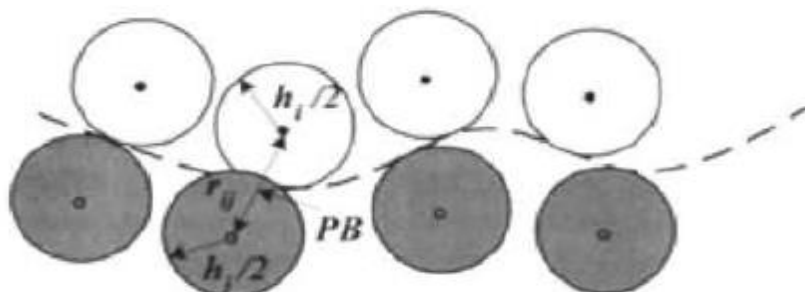


شکل ۴-۵- مرز مشترک بین دو ماده

در نتیجه، یک نیروی پنالته به ذراتی از مواد مختلف در مجاورت مرز مشترکشان و هنگامی که به یکدیگر نزدیک شده و تمایل به نفوذ در همدیگر رادارند، اعمال می‌گردد. معیار سنجش نفوذ را با نشانگر  $pe$  و مطابق رابطه‌ی (۴-۵۳) به دست می‌آورند.

$$pe = \frac{h_i + h_j}{2r_{ij}}$$

(۵۳-۴)



شکل ۴-۶- ذرات بر روی مرز مشترک دو ماده مختلف و نفوذ ذرات در یکدیگر [1]

نیروی پنالتی کاملاً شبیه قالب نیروی بین مولکولی ندارد — جونز و به صورت دو به دو بر روی ذره‌ی نزدیک شونده وارد می‌شود. این نیرو، در امتداد خط واصل مراکز دو ذره و در خلاف جهت یکدیگر وارد می‌آید (به گونه‌ای که دو ذره را دفع و از هم دور کند) [1].

توجه شود که این نیروی مجازی رابطه‌ی (۴-۵۴) می‌بایست با تقسیم بر جرم هر ذره، در قالب و بُعد شتاب بیان شود تا بتوان آن را در معادلات پایستگی اندازه حرکت (مومنتوم) و به موازات جملات پایدار ساز لزجت مصنوعی لحاظ نمود:

$$PB_{ij} = \bar{P}(pe^{n_1} - pe^{n_2}) \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2} \quad (۵۴-۴)$$

در رابطه‌ی اخیر، پارامترهای  $\bar{p}, n_1, n_2$  را به ترتیب مقادیر ۶، ۱۲ و ۱۰<sup>۵</sup> برمی‌گزینند. در حقیقت می‌توانند جهت متعادل سازی شرایط هر مسئله تنظیم و کالیبره شوند. از این رو، سرعت نزدیک شدن (در مسائل برخورد یا سرعت زیاد) و نیز نیروی به دست آمده (در مسائل انفجار) می‌توانند در بازه‌ی گسترده‌ای تغییر کنند. اگرچه نوسانات عددی در نزدیکی مرزهای مشترک (مانند ذرات روی مرز حباب گاز ناشی از انفجار زیرآب) کماکان وجود دارند. با این حال به کارگیری نیروی مجازی پنالتی با

ضرایب معقول به خوبی از نفوذ ذرات در یکدیگر جلوگیری کرده و روند حل شبیه سازی عددی را پایدار

می کند.

فصل پنجم

مدل سازی چاله انفجار در خاک با استفاده

از روش SPH

## ۵-۱- کد نویسی برنامه

### ۵-۱-۱- الگوریتم برنامه

برای مدل‌سازی انفجار در خاک و حل معادلات حاکم با استفاده از روش SPH از زبان برنامه‌نویسی فرترن استفاده شده است. در واقع برنامه نوشته شده توسعه برنامه مورد استفاده توسط لیو [1] بوده است. لیو با استفاده از این برنامه به بررسی و مدل‌سازی مسایل سیالات پرداخته است و نویسندگان، برنامه وی را برای مدل‌سازی انفجار در جامدات و خاک توسعه داده اند. به این منظور نیز ابتدا برنامه لیو با مثال های مورد صحت سنجی قرار گرفته و پس از اطمینان از آن، برنامه برای انفجار در خاک توسعه داده شده و با روش های دیگر صحت سنجی شده است که در ادامه به بیان آن پرداخته می گردد. در این برنامه، ابتدا مکان قرارگیری نقاط، تعداد ذرات، فاصله بین آن‌ها و مشخصات اولیه خاک و مواد منفجره مانند چگالی، سرعت اولیه مدول برشی، انرژی اولیه و ... به صورت ورودی گرفته می شود. سپس معادلات حرکت، با در نظر گرفتن لزجت مصنوعی و نیروی پینالتی و معادلات حالت ارائه شده برای خاک و ماده منفجره، حل می گردد. 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 می گردند. تابع وزن در این پژوهش اسپیلاین مکعبی و مطابق رابطه (۵-۱) در نظر گرفته شده است.

$$W(q, h) = \alpha \begin{cases} \frac{2}{3} - q^2 + \frac{q^3}{2} & 0 \leq q < 1 \\ \frac{1}{6}(2 - q)^3 & 1 \leq q < 2 \\ 0 & q \geq 2 \end{cases} \quad (۵-۱)$$

در رابطه فوق  $q = \frac{x_i - x_j}{h}$  و  $\alpha = \frac{15}{7\pi h^2}$  ،  $x_i$  و  $x_j$  مختصات ذره و  $h$  دامنه هموارسازی می باشد.

معادلات حرکت در جدول (۴-۱) ارائه شده اند و در فصل سوم به تفصیل مورد بحث قرار گرفته اند.

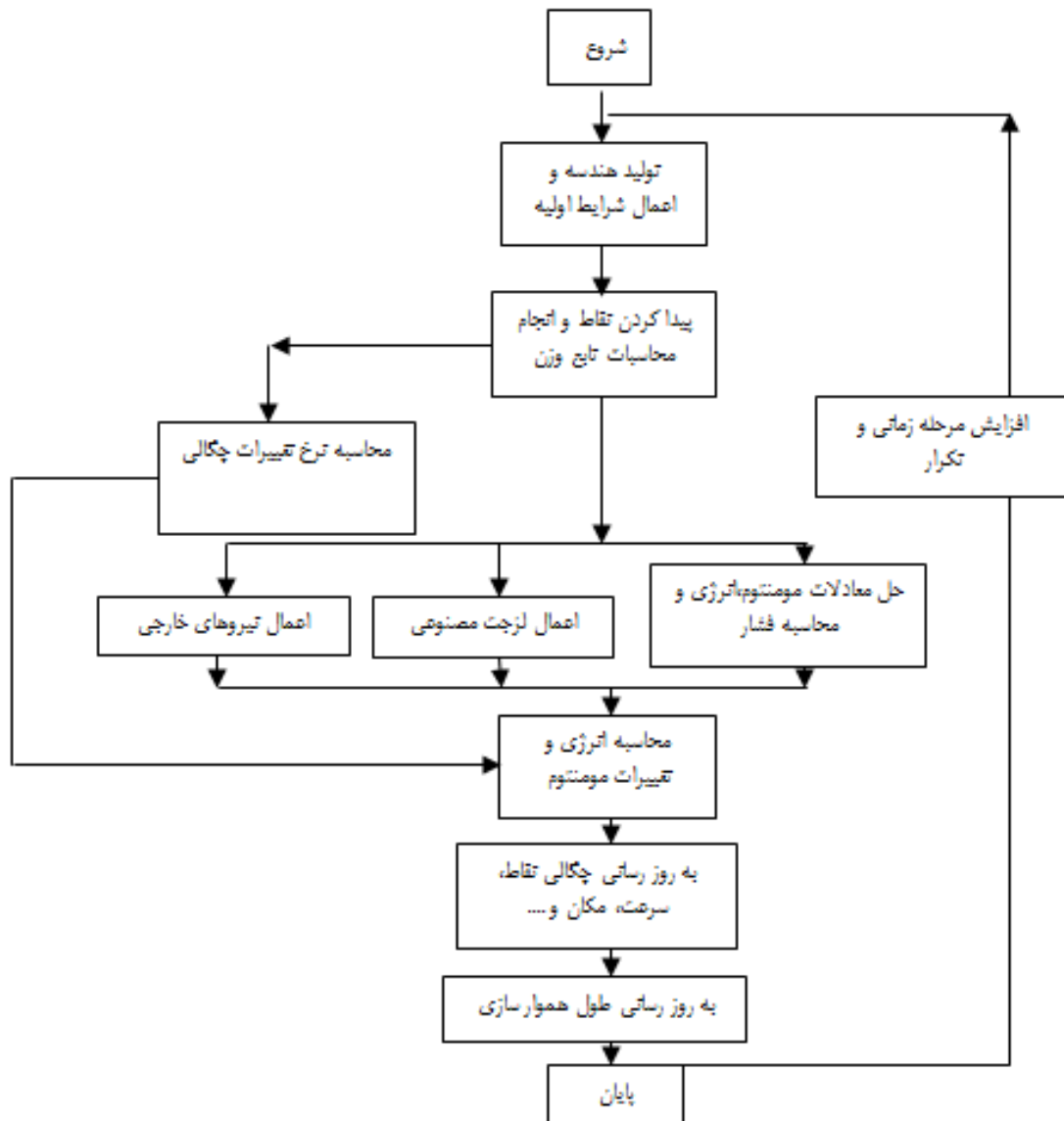
همچنین ویسکوزیته مصنوعی در بخش (۴-۶-۲) و نیروی پینالتی نیز در بخش (۴-۷) مورد بحث

قرار گرفته و از همان روابط در برنامه نویسی استفاده شده است و از ارائه مجدد روابط آن‌ها صرف نظر



گردیده است. برای انتگرال گیری زمانی نیز از روش لیپ فراگ همان طور که در بخش (۲-۲-۶) توضیح داده شد، استفاده شده است. تعداد ذرات داخل دامنه هموار سازی با فرض طول هموار سازی به اندازه  $1/2$  برابر فاصله اولیه نقاط، تعیین می گردد و مقدار طول هموار سازی در ادامه در پارامتر  $k = 2$  ضرب می گردد. سپس چگالی ذرات در دامنه هموار سازی بر اساس تعداد نقاط داخل دامنه و با توجه به ثابت فرض شدن جرم ذرات در طول محاسبات، محاسبه می گردد و طول هموار سازی اولیه با توجه به رابطه (۲-۱۳) تعیین می گردد. همچنین برای اعمال شرایط مرزی از دو نوع ذرات مجازی استفاده می شود. در این روش یک نوع از ذرات مجازی دقیقاً بر روی مرز قرار گرفته و برای جلوگیری از نفوذ ذرات به یکدیگر نیروی دافع وارد می نمایند و ذرات مجازی نوع دوم که درست قرینه ذرات داخلی حقیقی که فاصله آنها تا مرز کمتر از طول هموار سازی می باشد تعریف می شوند. فشار و چگالی آنها درست به اندازه ذره حقیقی متناظرشان است و سرعت آنها قرینه آینه ای سرعت ذرات حقیقی متناظر آنها نسبت به مرز می باشد. در مسئله انفجار، استفاده از هر دو نوع ذره مجازی الزامی می باشد (بخش ۴-۶-۱). فشار ذرات نیز در هر مرحله با استفاده از معادله حالت مربوط تعیین می گردد.

در مراحل زمانی بعدی، ابتدا طول هموار سازی بر اساس چگالی نقاط و طبق رابطه (۲-۱۳) به روز رسانی شده و سپس معادلات حرکت به طریقی که گفته شد مجدداً حل می شوند و در هر مرحله مختصات جدید ذرات و همچنین فشار، چگالی و طول هموار سازی ارائه می گردد. شکل (۵-۱) الگوریتم حل این برنامه را نشان می دهد.

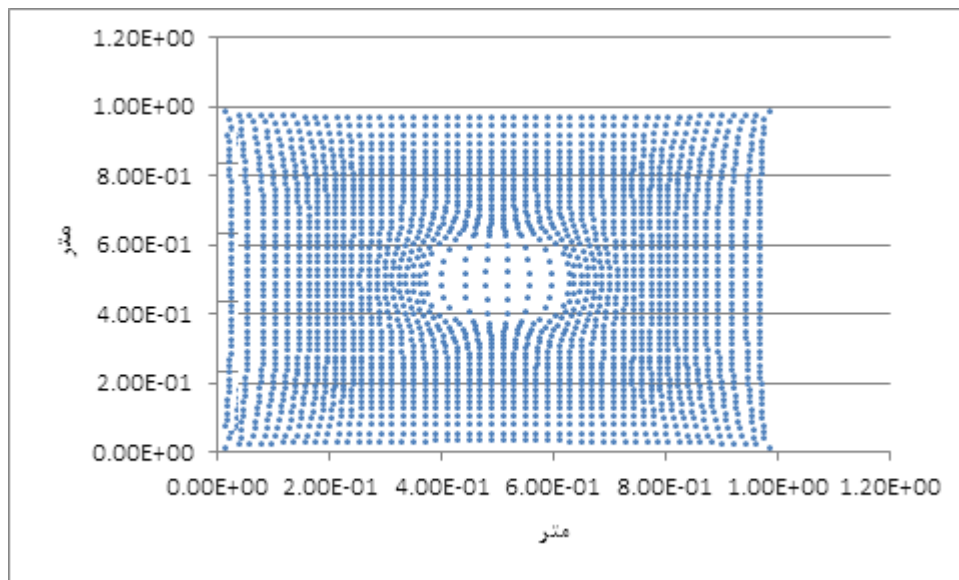


شکل ۵-۱- الگوریتم حل برنامه

## ۵-۱-۲- صحت سنجی

برای صحت سنجی و اطمینان از روند حل معادلات تو سط روش SPH، ابتدا مثالی از کتاب لیو برای انفجار در آب حل و مورد بررسی قرار گرفت. در سال‌های اخیر افراد مختلفی به مدل‌سازی انفجار در آب پرداخته‌اند. مدل‌سازی انفجار در زیرآب با استفاده از روش SPH [۱]، مدل‌سازی انفجار زیرآب با روش اجزای محدود و تأثیر آن بر سازه‌های کشتی مانند [۲۹]، بررسی انفجار زیرآب و تأثیر آن بر ارتعاش یک میله [۳۰] و بررسی انفجار زیرآب با استفاده از نرم‌افزار Autodyn [۳۱] نمونه‌هایی از

این مطالعات می‌باشند. در این مثال انفجار ماده منفجره‌ای مستطیل شکل از نوع TNT و به ابعاد  $0/1 \times 0/1$  متر در داخل محیطی از آب که داخل قاب صلبی به ابعاد  $1 \times 1$  متر قرار دارد، مورد بررسی قرار گرفته است. نحوه توزیع ذرات در شکل (۲-۵) ارائه شده است. همچنین ذرات مجازی برای اعمال شرایط مرزی در اطراف قاب مورد نظر قرار گرفته‌اند. ضرایب مورد استفاده در معادلات حالت برای ماده منفجره و آب نیز مطابق جداول (۲-۴) و (۳-۴) در نظر گرفته شده‌اند. نحوه تشکیل و گسترش حباب انفجار در آب با مثال حل شده لیو منطبق بوده و صحت حل معادلات با روش SPH مشخص است.



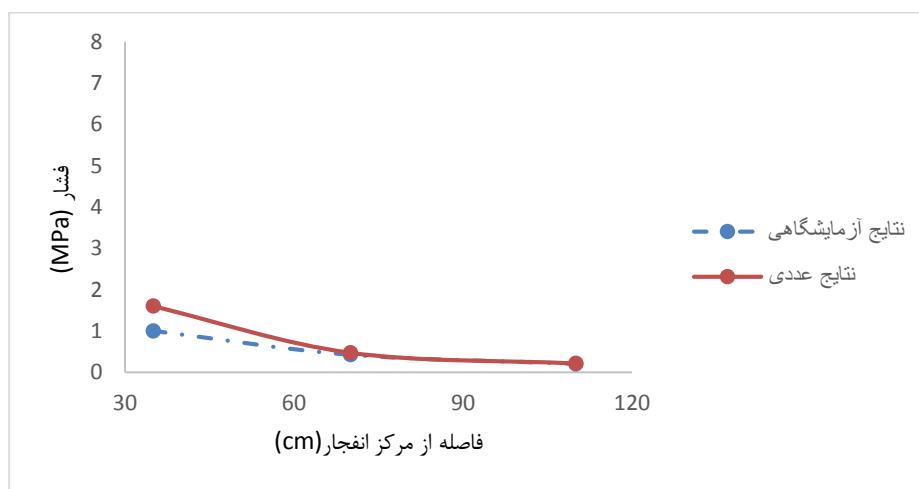
شکل ۵-۲- نحوه تشکیل حباب انفجار در آب

با توجه به اینکه خاک‌ها دارای ماهیت‌های متفاوتی می‌باشند و با توجه به اینکه داده‌ها برای بررسی مسئله انفجار در خاک با استفاده از روش SPH بسیار محدود بوده و برخی از پارامترها عملاً ارائه نشده است، و همچنین کمبود بررسی‌های آزمایشگاهی در این زمینه، صحت سنجی انفجار در خاک بسیار مشکل است. با این وجود برای بررسی انفجار در خاک نیز از بررسی آزمایشگاهی که در پایان‌نامه بررسی انفجار در خاک ارائه شده است، استفاده شده است [38]. مطابق آزمایش انجام گرفته، ماده منفجره C4 به ابعاد  $2 \times 6/4$  سانتی‌متر در عمق ۳ سانتیمتری خاک خشکی با چگالی  $1802 \text{ kg/m}^3$  با ابعاد

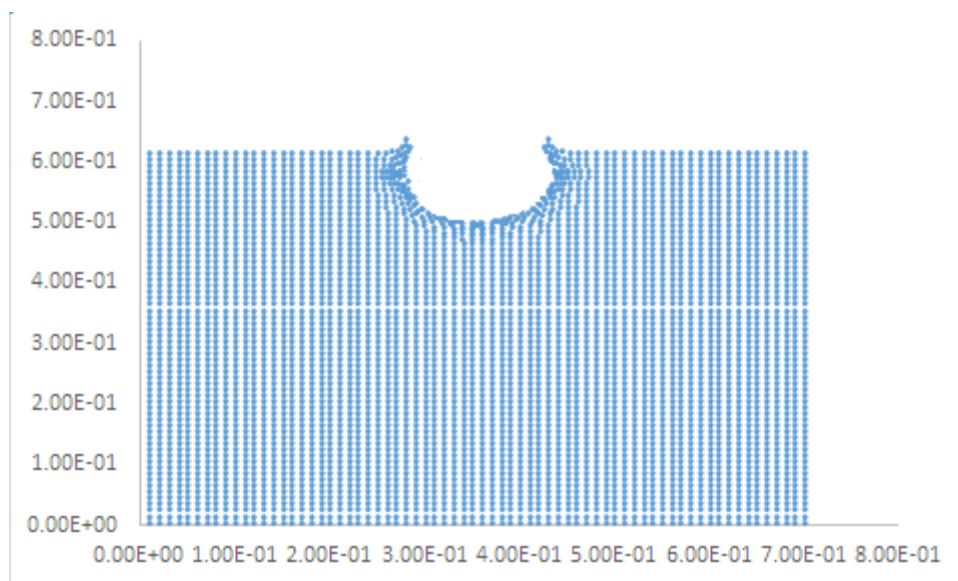
70 × 62/4 سانتی متر قرار داده شده و فشارها در فواصل ۳۰،۷۰ و ۱۱۰ سانتی متری از مرکز انفجار مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات ماده منفجره C4 در جدول (۵-۱) ارائه شده و بقیه پارامترها مانند مثال‌های دیگر این پژوهش فرض شده است. تعداد ۴۲۰۰ ذره به فاصله  $1 \times 1 \text{ cm}$  برای تحلیل استفاده شده و طول هموار سازی اولیه برابر با فاصله اولیه ذرات در نظر گرفته شده است. ابعاد چاله انفجار لیجاد شده پس از ۴۲۰ میکروثانیه با ابعاد نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد. خلاصه این نتایج با نتایج حاصل از مدل سازی عددی مقایسه شده و دقت مناسبی را از خود ارائه می نماید. مطابق شکل (۵-۳) نتایج حاصل از مدل سازی عددی با روش بدون شبکه مقادیر دست بالاتری نسبت به نتایج آزمایشگاهی ارائه می کند و با افزایش فاصله از مرکز انفجار نتایج همگرا می گردند. علت بالاتر بودن نتایج روش عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی، اتلاف انرژی می باشد که در مدل سازی از آن صرف نظر شده است. شکل (۵-۴)، مدل سازی عددی این بررسی آزمایشگاهی را با روش هیدرودینامیک ذرات هموار نشان می دهد.

جدول ۵-۱- پارامترهای معادله حالت برای ماده منفجره (JWL)C4 [38]

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



شکل ۵-۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی



شکل ۵-۴- شکل چاله انفجار در زمان ۴۲۰ میکروثانیه پس از انفجار

## ۵-۲- مدل سازی انفجار در خاک با استفاده از روش SPH

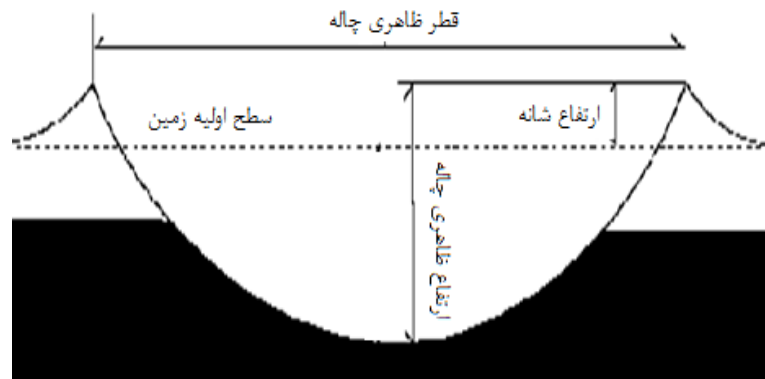
### ۵-۲-۱- مقدمه

مسئله 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، مسئله ساخت پناهگاه ها در خلال جنگ جهانی دوم بوده است. پس از آن با توجه به کاربردهای انفجار در سایر مسائل مهندسی از جمله مسئله خطوط انتقال نفت و گاز، مقاوم سازی سازه های مهم سطحی و زیرزمینی در مقابل حملات تروریستی و پدافند غیرعامل، راه سازی و مسئله انفجار در تونل ها، معادن باعث توجه روزافزون بر انفجار بر روی خاک گشت. با توجه به مشکلات مدل سازی های آزمایشگاهی و خطرات ناشی از انفجار، پس از جنگ جهانی دوم، محققین 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، نا شناخته بودن رفتار خاک های متفاوت تحت بارهای دینامیکی بوده و پیش بینی رفتار خاک، فشارهای به وجود آمده در اثر انفجار، چاله های انفجار به ویژگی های متفاوتی مانند نوع خاک، درصد رطوبت و اشباع خاک مرتبط

است. حل معادلات ناشی از انفجار با توجه به سرعت بالای موج شوک و ایجاد تغییر شکل‌های شدید دارای پیچیدگی‌های محاسباتی بسیاری است.

در این پژوهش انفجار سطحی خاک در یک مدل دلخواه با استفاده از روش بدون شبکه SPH با استفاده از زبان برنامه‌نویسی فرترن، همان‌طور که گفته شد، مدل‌سازی شده و حداکثر فشار ناشی از انفجار در نقاط مختلف، و مشخصات چاله انفجاری ایجادشده در اثر انفجار مورد بررسی قرار گیرد. برنامه‌نویسی انجام‌شده توسعه برنامه لیو [۱] بوده و مدل‌سازی انفجار، معادلات حاکم، اندرکنش‌ها، معادلات مربوط به مقاومت برشی و گسیختگی خاک به آن اضافه گردیده است. تفاوت عمده انفجار در هوا یا آب با خاک، وجود مقاومت برشی در خاک می‌باشد. در حقیقت خاک محیطی سه فازی شامل دانه‌های جامد، آب و هوا می‌باشد. وجود آب یا هوا در حفره‌های خاک، می‌تواند باعث تفاوت در معادله حالت و رفتار خاک گردد، به همین علت خاک‌ها با درصد اشباع‌های متفاوت، تحت اثر انفجار، خصوصیات متفاوتی از خود ارائه می‌دهند. همچنین خاک‌ها می‌توانند چسبنده و یا دانه‌ای باشند و این پارامتر نیز بر روی فشارهای ایجادشده ناشی از انفجار مؤثر است. خاک‌های چسبنده دارای مقاومت داخلی نیز می‌باشند و ذرات رسی چسبندگی لازم بین دانه‌های جامد را فراهم می‌نمایند، درحالی‌که 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 می‌گردد. همچنین تغییر شکل‌هایی نیز ناشی از تراکم خاک به وجود می‌آید [۵۴]. تغییر شکل‌های ناشی از فشار انفجار، سبب ایجاد چاله‌ای در خاک شده که به آن چاله انفجار گفته می‌شود. خصوصیات هندسی چاله ایجادشده 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 قرارداد، مرحله آغازین انفجار و شکل‌گیری چاله انفجاری، انتشار امواج ناشی از انفجار در محیط اطراف و تأثیر فشارهای وارد بر سازه‌های مورد تحلیل [۵۵]. شکل (۵-۵)، نمونه‌ای از چاله انفجاری ایجادشده در اثر انفجار را نشان می‌دهد. در گذشته روابط تجربی

متفاوتی نیز با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده بر روی خاک‌ها برای تعیین حداکثر فشار تولیدی ناشی از انفجار و عمق چاله انفجار ارائه‌شده است [۵۶]. 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.

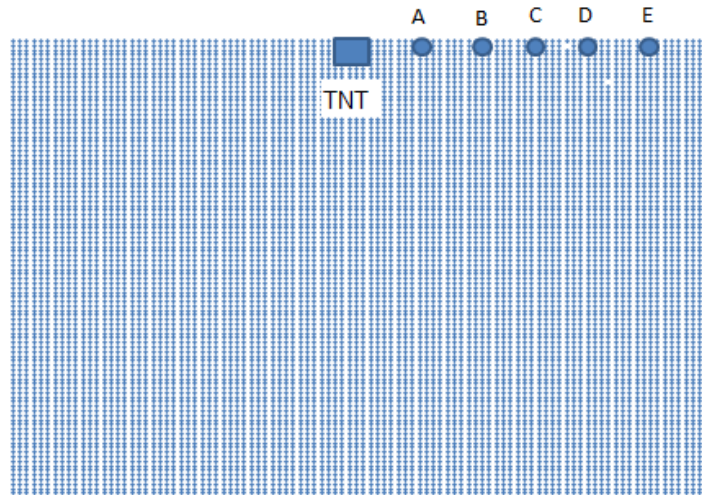


شکل ۵-۵- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی

#### ۵-۲-۲- حل مثال عددی انفجار در خاک ماسه ای

مدل موردنظر انفجار سطحی بر روی خاک ماسه‌ای و خشک، فشار تولیدی، چاله انفجار را بررسی می‌نماید. ماده منفجره تی ان تی با ابعاد متفاوت در نظر گرفته شده است. در شکل (۵-۶) شماتیکی از مدل موردبررسی و مدل SPH تهیه شده، ارائه شده است. تعداد ۱۰۰۰۰ ذره با فاصله  $1 \times 1 \text{ cm}$  و به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده و نقاط A تا E به عنوان نقاط مرجع و به ترتیب از فاصله ۱۵ سانتی‌متر تا ۳۵ سانتی‌متری مرکز انفجار قرار داده شده و بررسی‌های فشار- زمان بر روی آن‌ها انجام می‌گیرد. همچنین وقفه‌های زمانی در حل برنامه برابر ۱۰ میکروثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین ضرایب مورد استفاده در نیروی پنالتی و ویسکوزیته مصنوعی به ترتیب در بخش‌های (۴-۷) و (۴-۶-۲) ارائه شده‌اند. در قسمت‌های مشخصات خاک‌های مورد استفاده در این مثال در جدول (۵-۲) ارائه شده‌اند. خاک ۲ دارای مدول برشی، وزن مخصوص و سرعت صوت بیشتری نسبت به خاک ۱ می‌باشد، بنابراین در اینجا خاک ۱ را خاک ماسه ای سست و خاک ۲ به عنوان خاک ماسه ای متراکم در

نظر گرفته شده است. در روش‌های عددی برای تعیین فشار، از معادلات حالت استفاده می‌شود. برای تعیین فشار انفجار از معادله حالت JWL استفاده می‌شود، پارامترهای این معادله در جدول (۵-۱) ارائه شده است. [۱].



شکل ۵-۶- مدل مورد مطالعه و محل قرارگیری نقاط مرجع مورد مطالعه

جدول ۵-۲- پارامترهای مورد استفاده برای خاک

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

برای تعیین فشار خاک و تعیین بخش اول معادله تنش در این پژوهش، از معادله حالت Mie-Grunesien استفاده شده است. معادله حالت مورد نظر در رابطه زیر ارائه شده است

$$P(\rho, e) = (1 - 0/5\Gamma\mu)P_H(\rho) + \Gamma\rho e \quad (۲-۵)$$

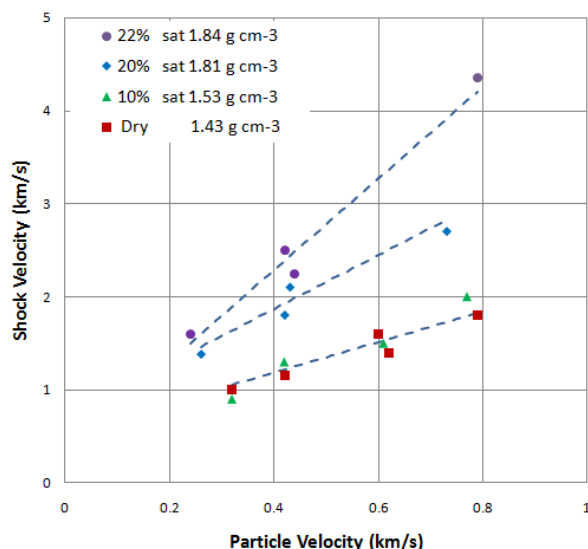
در رابطه فوق  $\Gamma$  پارامتر مرتبط با خصوصیات خاک،  $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ ، همچنین  $e$  انرژی داخلی خاک

و برابر  $4/17 \times 10^{-4} \text{ Mpa}$  در نظر گرفته شده است. و  $P_H$  از رابطه زیر به دست می‌آید



$$P_H = \begin{cases} a_0\mu + b_0\mu^2 + c_0\mu^3 & \mu > 0 \\ a_0\mu & \mu < 0 \end{cases} \quad (3-5)$$

ثابت‌های ارائه‌شده در رابطه فوق با استفاده از منحنی هوگونیت تعیین می‌شوند. مقادیر  $C$  و  $S$  با توجه به منحنی هوگونیت و با توجه به رابطه  $U_S = C + S \cdot U_p$  تعیین می‌شوند.  $U_S$  سرعت شوک و  $U_p$  سرعت ذرات می‌باشد. نمونه‌ای از این منحنی در شکل (5-7) ارائه شده است.



شکل 5-7- نمودار سرعت موج شوک-سرعت ذرات [38]

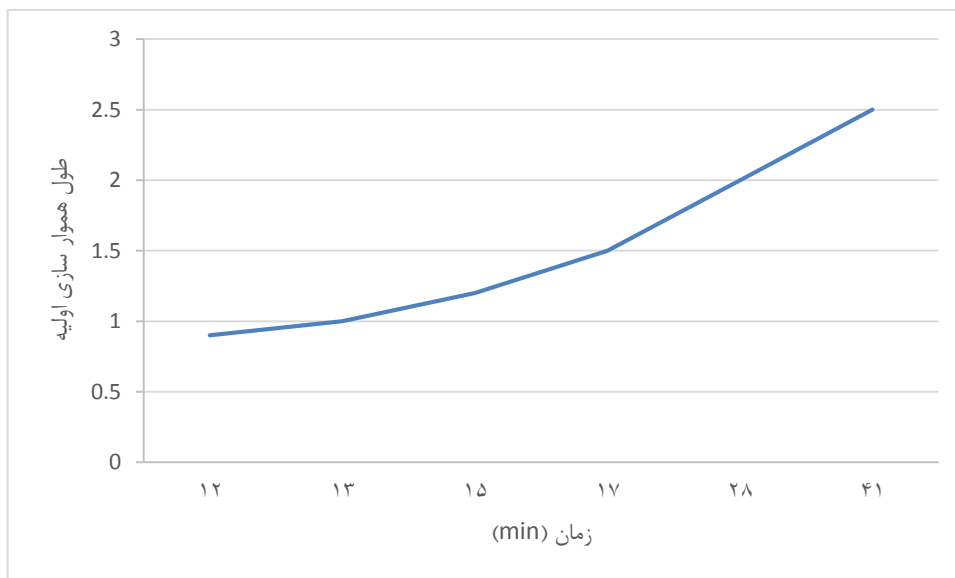
### 5-2-2-1- تحلیل حساسیت مدل

در این قسمت به بررسی تاثیر پارامترهای ورودی بر روی مدل سازی انجام شده پرداخته شده است. تعداد نقاط، طول هموار سازی و انرژی داخلی خاک به عنوان پارامترهای مهم ورودی بررسی شده اند. به این منظور مدل سازی با تعداد نقاط متفاوت انجام گرفته و ابعاد چاله و فشارهای تولیدی بررسی شده اند. تعداد ذرات در مدل های متفاوت به ترتیب  $25 \times 25$ ،  $40 \times 40$ ،  $50 \times 50$  و  $100 \times 100$  فرض شده است. بر اساس نتایج به دست آمده فشار ایجاد شده برای مدل های با تعداد ذرات  $50 \times 50$ ،  $40 \times 40$  و  $100 \times 100$  تقریبا یکسان به دست آمده و مقادیر مناسبی ارائه می نماید. با افزایش تعداد ذرات زمان حل مساله افزایش یافته و می توان فشار را در نقاط بیشتری تعیین نمود. در صورتی که تعداد ذرات بسیار کم باشد، برای مثال برای مدل  $25 \times 25$  ذره، شکل

چاله تعیین شده دارای دقت پایین تری خواهد بود. به همین جهت برای افزایش دقت در شکل چاله انفجار ایجاد شده در تمامی مدل ها تعداد ذرات  $50 \times 50$  و  $100 \times 100$  در نظر گرفته شده است.

طول هموار سازی اولیه نیز یکی از پارامترهای مهم ورودی می باشد. برای بررسی حساسیت مدل بر طول هموار سازی نیز طول هموار سازی اولیه را برای مقادیر  $0/9$ ،  $1$ ،  $1/2$ ،  $1/5$ ،  $2$  و  $2/5$  برابر فاصله اولیه نقاط فرض شده است. در صورتی که طول هموار سازی کمتر از  $0/9$  فاصله اولیه نقاط در نظر گرفته شود، تعداد ذرات داخل دامنه هموار سازی کاهش یافته و تاثیر ذرات بر روی یکدیگر کم شده و مدل جواب مناسبی ارائه نمی نماید. با افزایش مقدار طول هموار سازی، تعداد ذرات داخل دامنه هموار سازی افزایش یافته و حجم محاسبات بسیار بالا می رود ولی بر روی جواب های نهایی تاثیر گذار نمی باشد. شکل (۵-۸) مدت زمان حل برنامه برای طول هموارسازی های متفاوت را در بازه زمانی ۵۰ میکروثانیه ارائه نموده است.

در این منحنی محور قائم ضریب طول هموار سازی اولیه را نشان می دهد، به این معنا که وقتی عدد ۲ در محور قائم، نشان داده شده، طول هموار سازی اولیه انتخاب شده، ۲ برابر فاصله اولیه ذرات از یکدیگر می باشد. همانطور که مشاهده می شود، زمان حل مساله با افزایش طول هموار سازی اولیه افزایش می یابد. به عبارت دیگر اگر طول هموار سازی اولیه را ۲ برابر فاصله اولیه ذرات فرض کنیم، برای تحلیل تنها ۵۰۰ میکروثانیه، حدود ۷ ساعت زمان صرف می شود. در این پژوهش طول هموار سازی اولیه، ۱ تا  $1/2$  برابر فاصله اولیه ذرات در نظر گرفته شده است.



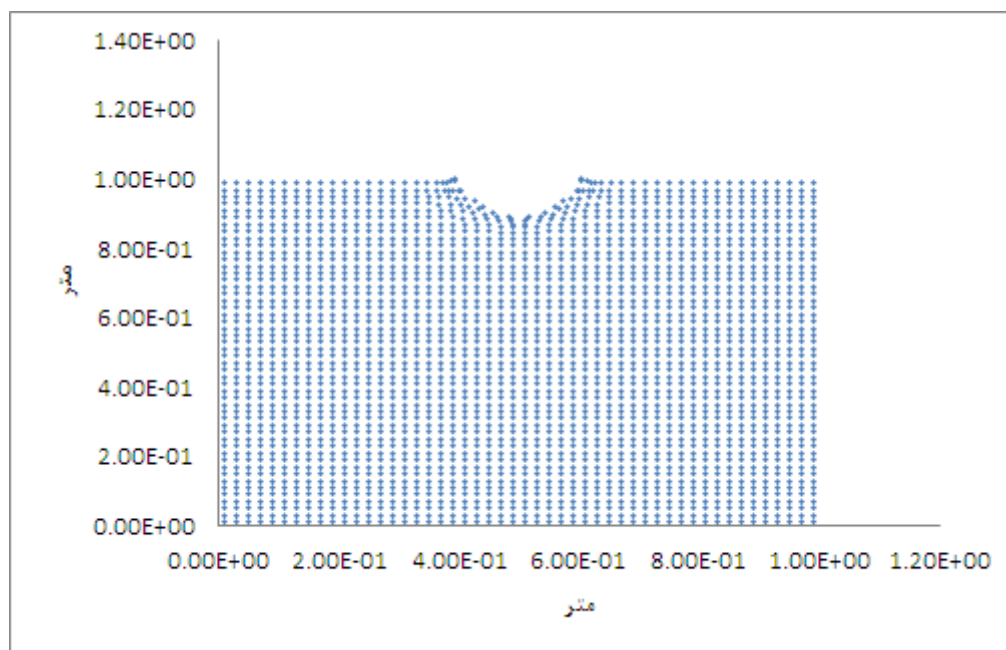
شکل ۵-۸- تغییرات زمان حل مساله با افزایش طول هموار سازی اولیه برای ۵۰ میکروثانیه

سایر پارامترهای ورودی مانند انرژی داخلی، چگالی و سرعت صوت خاک نیز باید با دقت مناسبی ارائه گردد. تغییر این پارامترها به صورت مستقیم باعث تغییر در فشار ذرات می گردد. بنابراین باید با دقت مناسبی آن ها را وارد نمود. سایر پارامترهای ورودی مانند ضرایب مورد استفاده برای ویسکوزیته مصنوعی و یا نیروی پנالتی باید مطابق همان مقادیر داده شده در نظر گرفته شوند. تغییر در مقدار این پارامترها می تواند باعث ایجاد ناپایداری های عددی گردد.

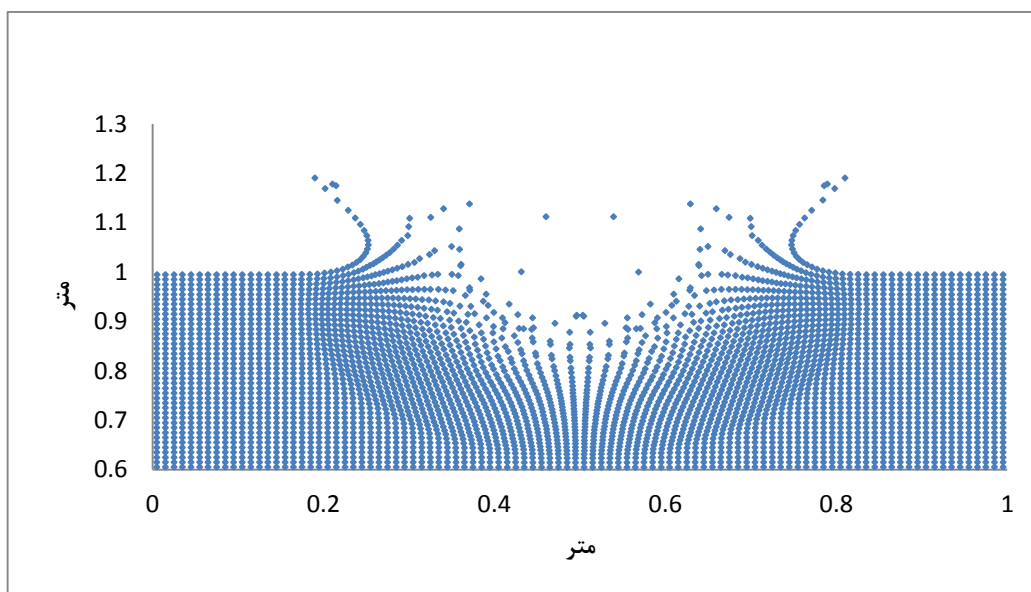
### الف- بررسی انفجار در خاک ماسه ای سست

در این قسمت به بررسی انفجار سطحی بر روی خاک ماسه ای سست پرداخته شده و فشارهای ناشی از انفجار و روند شکل گیری چاله انفجار برای ماده منفجره تی ان تی با ابعاد مختلف  $4 \times 4 \text{ cm}$  ،  $4 \times 6 \text{ cm}$  و  $6 \times 6 \text{ cm}$  بررسی شده است. تعداد ذره بافاصله  $1 \times 1 \text{ cm}$  و به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده و نقاط A تا E به عنوان نقاط مرجع و به ترتیب از فاصله ۱۵ سانتی متر تا ۳۵ سانتی متری مرکز انفجار قرار داده شده و بررسی های فشار- زمان بر روی آن ها انجام می گیرد. انرژی داخلی خاک برابر  $4/17 \times 10^{-4} \text{ Mpa}$  در نظر گرفته شده است. پس از انجام مدل سازی و تحلیل،

می‌توان تغییر شکل‌های نقاط مختلف، نمودار تغییر مکان-زمان، نمودار فشار-زمان را تعیین نمود. شکل (۹-۵) نمونه‌ای از مدل‌سازی انفجار، تغییر مکان نقاط و ایجاد چاله انفجاری را برای ماده منفجره‌ای به ابعاد  $4 \times 4 \text{ cm}$  و در زمان ۲۰۰ میکروثانیه 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 باگذشت زمان گسیختگی‌های خاک بیشتر می‌شوند. شکل (۵-۱۰) چاله انفجار ایجاد شده و نحوه گسیختگی خاک را از نمای نزدیک‌تر ارائه داده است. تعیین موقعیت نقاط در هر لحظه از مزایای این روش نسبت به برخی دیدگاه‌های دیگر عددی مانند روش‌های معمول در دیدگاه اوپلری است.



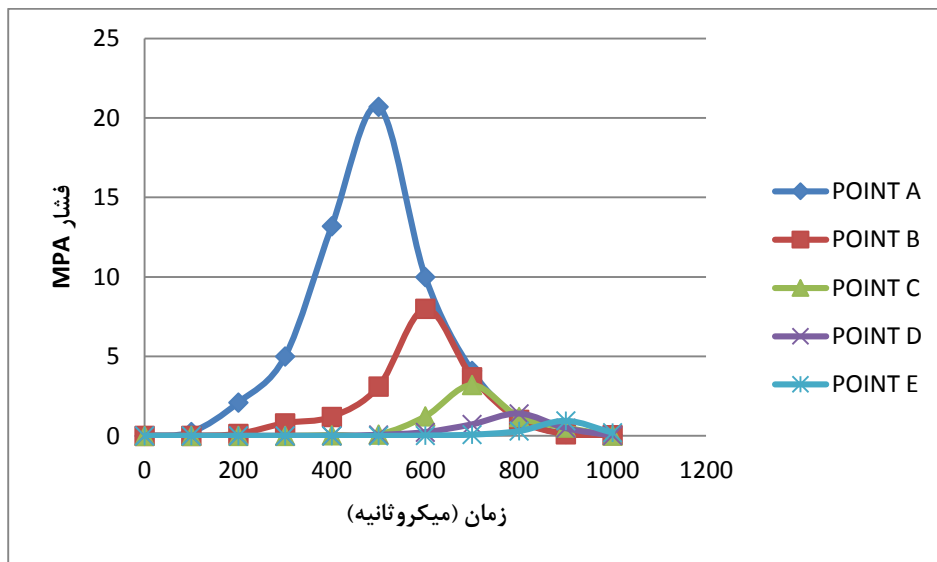
شکل ۵-۹- تشکیل چاله انفجار در زمان ۲۰۰ میکروثانیه در خاک سست



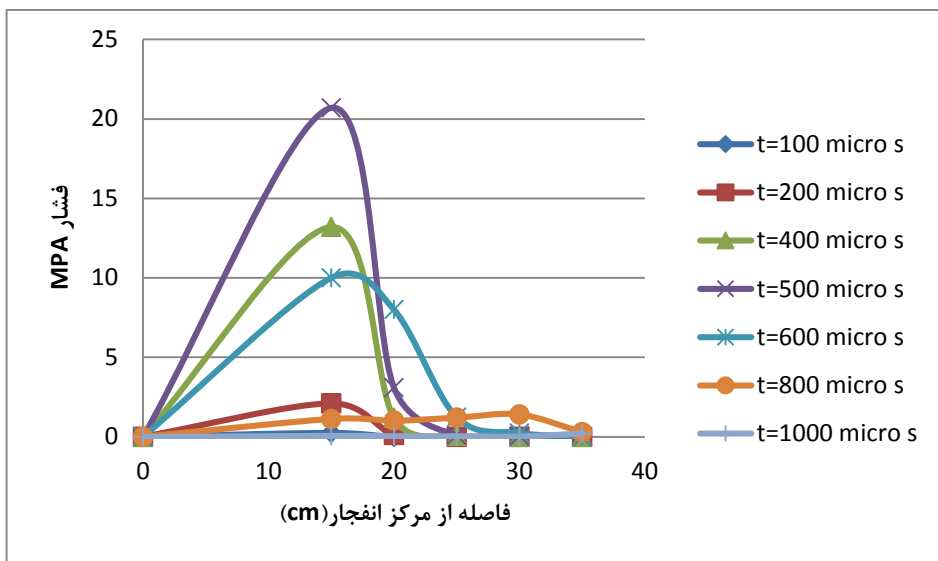
شکل ۵-۱۰- نحوه ایجاد چاله انفجاری و گسیختگی خاک

برای مطالعه دقیق‌تر، منحنی‌های فشار- زمان برای برخی نقاط مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور ۵ نقطه به فواصل ۵ سانتی‌متری از یکدیگر تعیین شده (نقاط A تا E) و تاریخچه فشار ناشی از انفجار در این نقاط بررسی می‌گردد (شکل ۵-۱۱). مطابق نتایج به دست آمده، هرچه قدر فاصله نقاط از مرکز انفجار بیشتر باشد، موج ناشی از انفجار دیرتر به آن نقطه می‌رسد. همچنین مقدار فشار حداکثر تولید شده نیز با افزایش فاصله کاهش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، منحنی فشار، پس از رسیدن به نقطه حداکثر، به سرعت کاهش یافته و زایل می‌گردد. با بررسی نمودارهای فشار- زمان، مشاهده می‌شود که زمان رسیدن به فشار حداکثر برای نقطه A، حدود ۵۰۰ میکروثانیه است که این زمان برای نقطه E به حدود ۹۰۰ 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 نمود، در حالی که در سایر روش‌های عددی و همچنین در آزمایشگاه با توجه به ضربه شدید و اعوجاج بالای شبکه‌ها این امکان وجود ندارد.

شکل (۵-۱۲) 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 ۶۰۰ میکروثانیه، موج ناشی از انفجار از نقاط A و B عبور نموده و به نقطه C رسیده است. در این زمان، فشار نقطه C به مقدار پیک خود رسیده (حدود ۸ 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 ۸۰۰ میکروثانیه اتفاق می‌افتد.

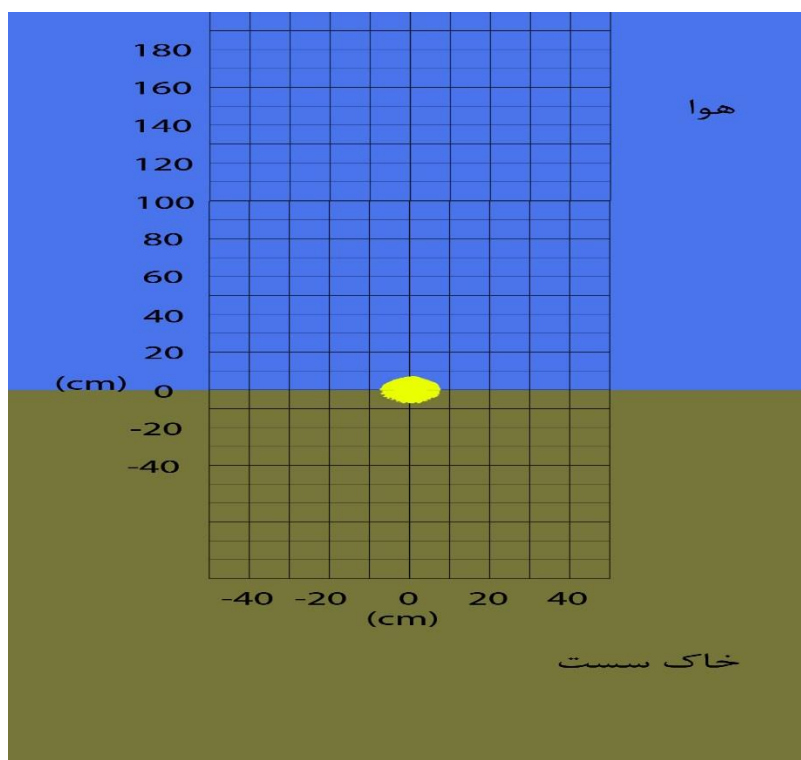


شکل ۵-۱۱- منحنی فشار-زمان برای نقاط A (۱۵ سانتی‌متری انفجار) تا E (۳۵ سانتی‌متری انفجار) برای ماده منفجره  $4 \times 4^{cm}$

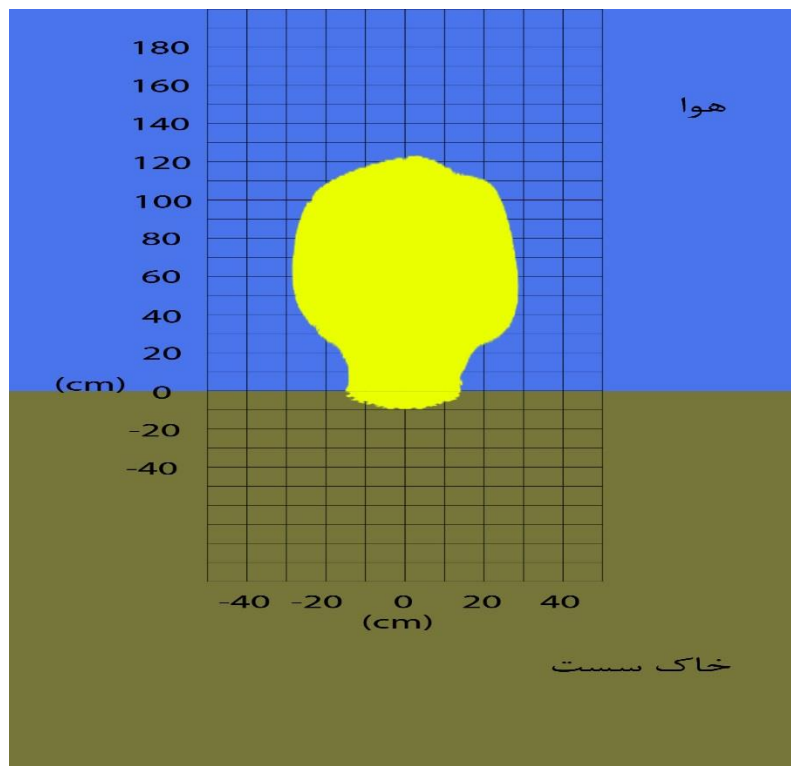


شکل ۵-۱۲- نمودار فشار تولیدی بر حسب فاصله از مرکز انفجار برای خاک سست (ماده منفجره  $4 \times 4 \text{ cm}$ )

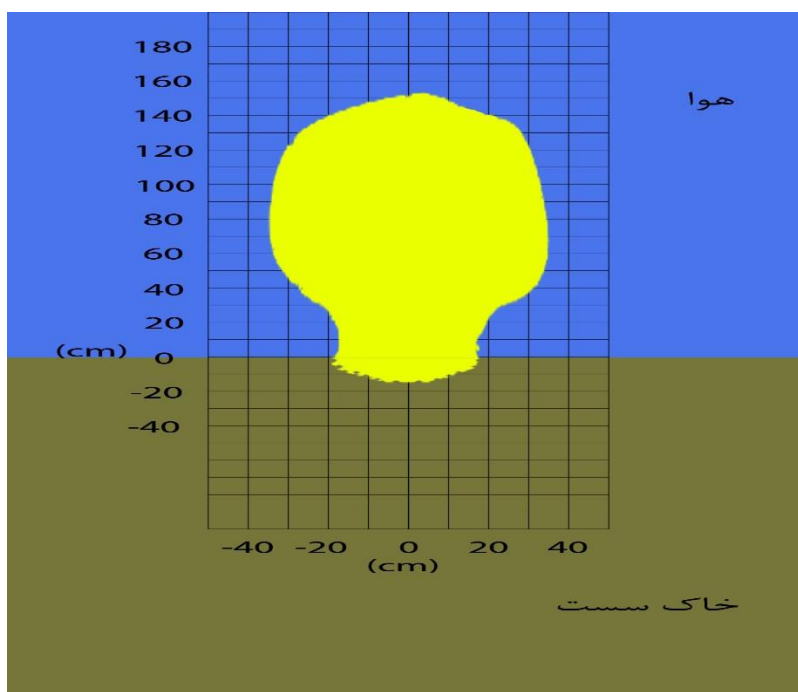
شکل‌های (۵-۱۳) تا (۵-۱۵) به صورت شماتیک انفجار را در زمان‌های ۳۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکروثانیه نشان می‌دهد. در این شکل‌ها روند شکل‌گیری چاله انفجار و نحوه پخش خاک در هوا نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان عمق و قطر چاله افزایش می‌یابد و ذرات تا ارتفاع بالاتری پرتاب می‌شوند.



شکل ۵-۱۳- شکل شماتیک انفجار در خاک سست در زمان ۳۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $4 \times 4 \text{ cm}$ )



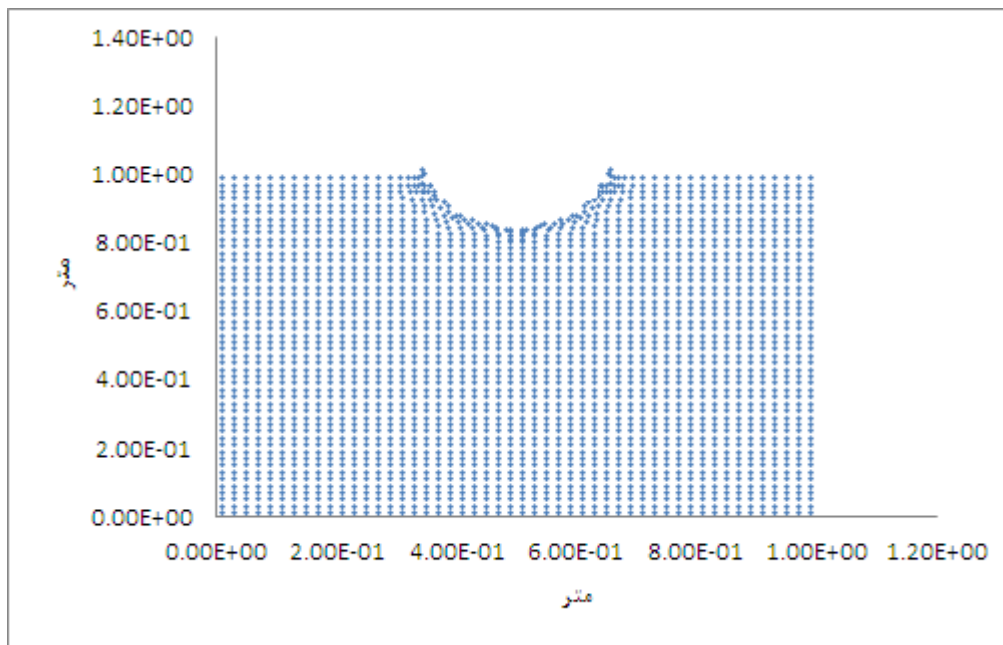
شکل ۵-۱۴- شکل شماتیک انفجار در خاک سست در زمان ۱۰۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $4 \times 4 \text{ cm}$ )



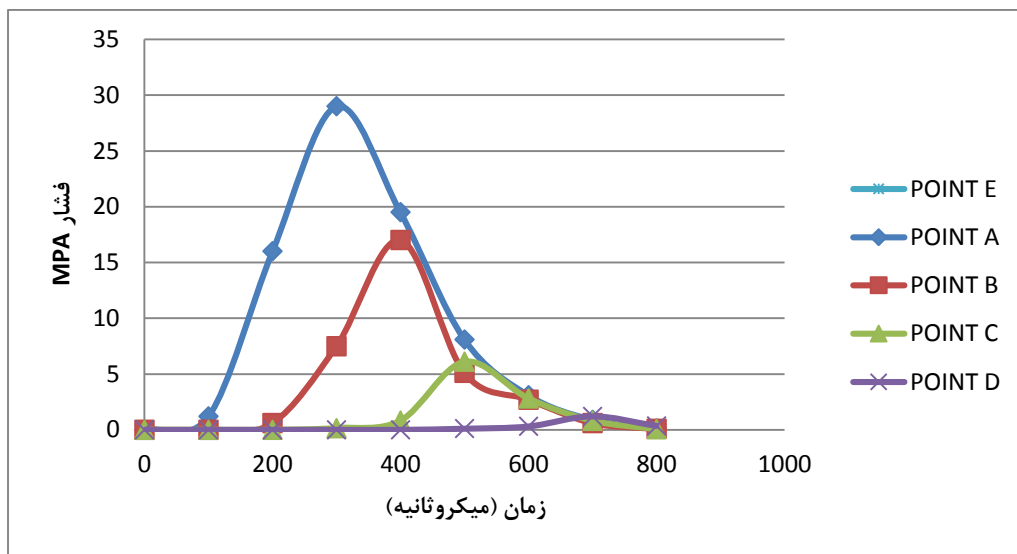
شکل ۵-۱۵- شکل شماتیک انفجار در خاک سست در زمان ۲۰۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $4 \times 4 \text{ cm}$ )



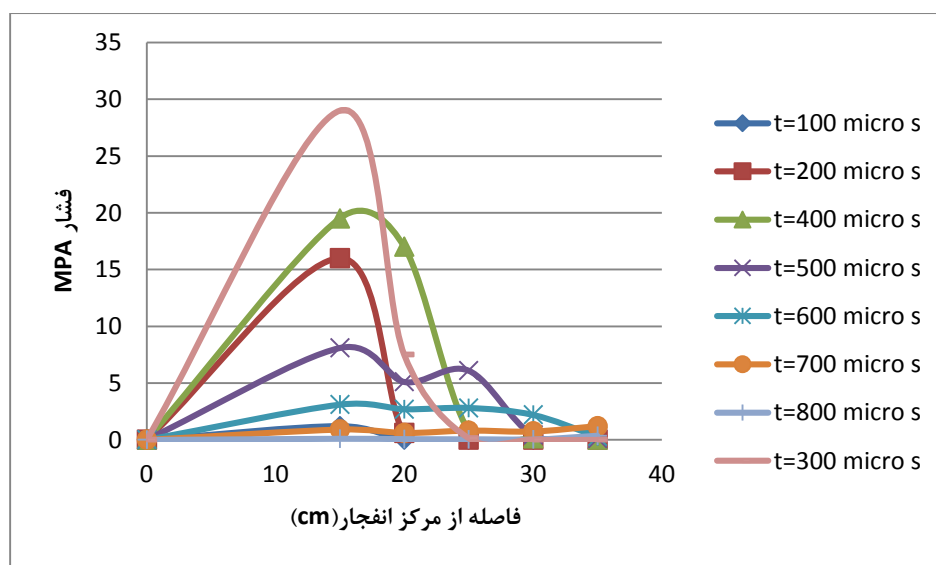
شکل (۵-۱۶) چاله انفجاری ایجاد شده در زمان ۱۰۰ میکروثانیه برای ماده منفجره تی ان تی با ابعاد  $6 \times 6 \text{ cm}$  را نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های (۵-۱۷) و (۵-۱۸) نمودارهای فشار زمان و فشار مکان را برای این مدل ارائه می‌دهند. مطابق نتایج به دست آمده، هرچقدر فاصله نقاط از مرکز انفجار بیشتر باشد، موج ناشی از انفجار دیرتر به آن نقطه می‌رسد. همچنین مقدار فشار حداکثر تولید شده نیز با افزایش فاصله کاهش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، منحنی فشار، پس از رسیدن به نقطه حداکثر، به سرعت کاهش یافته و زایل می‌گردد. با بررسی نمودارهای فشار-زمان، مشاهده می‌شود که زمان رسیدن به فشار حداکثر برای نقطه A، حدود ۳۰۰ میکروثانیه است که این زمان برای نقطه E به حدود ۷۰۰ میکروثانیه افزایش می‌یابد. با مقایسه با مثال قبلی که دارای مقدار ماده منفجره کمتری بود مشاهده می‌شود که حداکثر فشار تولیدی در این مثال افزایش یافته و زمان رسیدن به حداکثر فشار کاهش یافته است. طبیعی است که با افزایش مقدار ماده منفجره و ثابت بودن سایر پارامترها ابعاد چاله انفجاری نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۵-۱۶- تشکیل چاله انفجار در زمان ۱۰۰ میکروثانیه در خاک سست برای ماده منفجره  $6 \times 6 \text{ cm}$



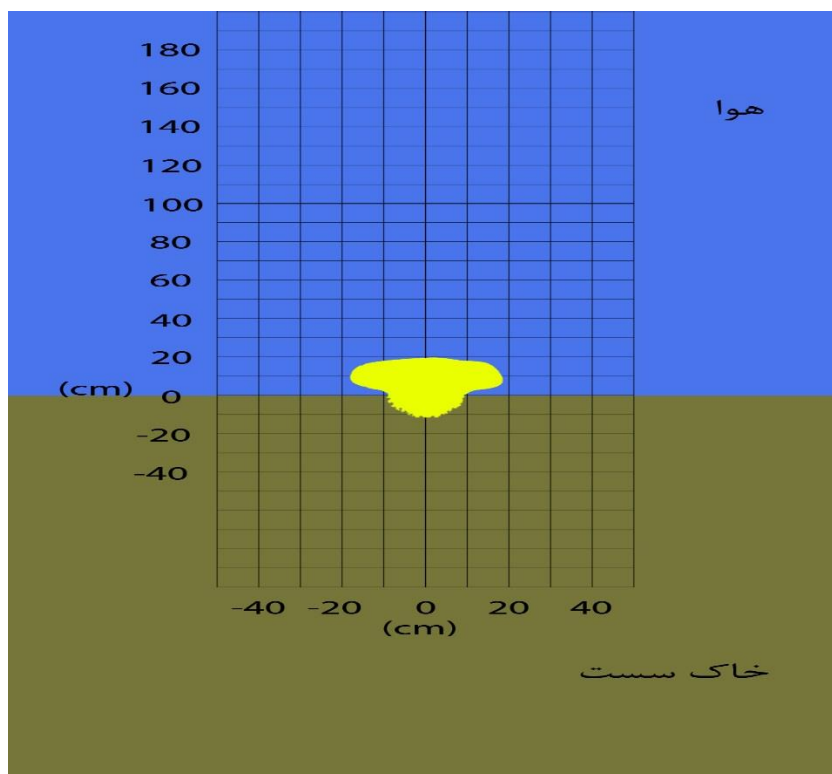
شکل ۵-۱۷- منحنی فشار-زمان برای نقاط A (۱۵ سانتی متری انفجار) تا E (۳۵ سانتی متری انفجار) برای ماده منفجره  $6 \times 6 \text{ cm}$



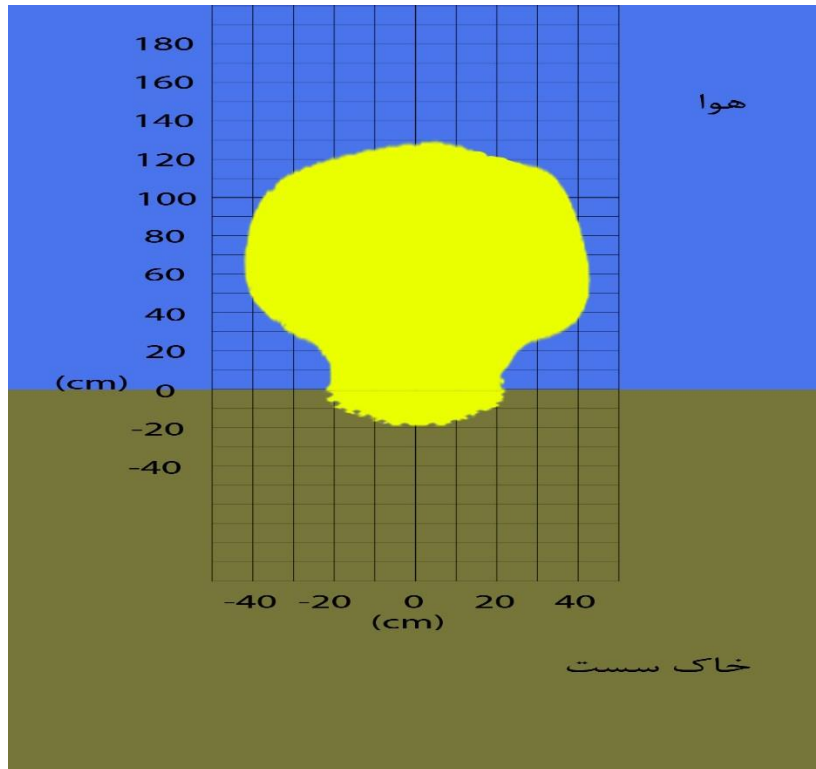
شکل ۵-۱۸- نمودار فشار تولیدی بر حسب فاصله از مرکز انفجار (ماده منفجره  $6 \times 6 \text{ cm}$ )

یکی از مزایای روش بدون شبکه نسبت به سایر دیدگاه‌های عددی مانند روش‌های معمول اویلری 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.

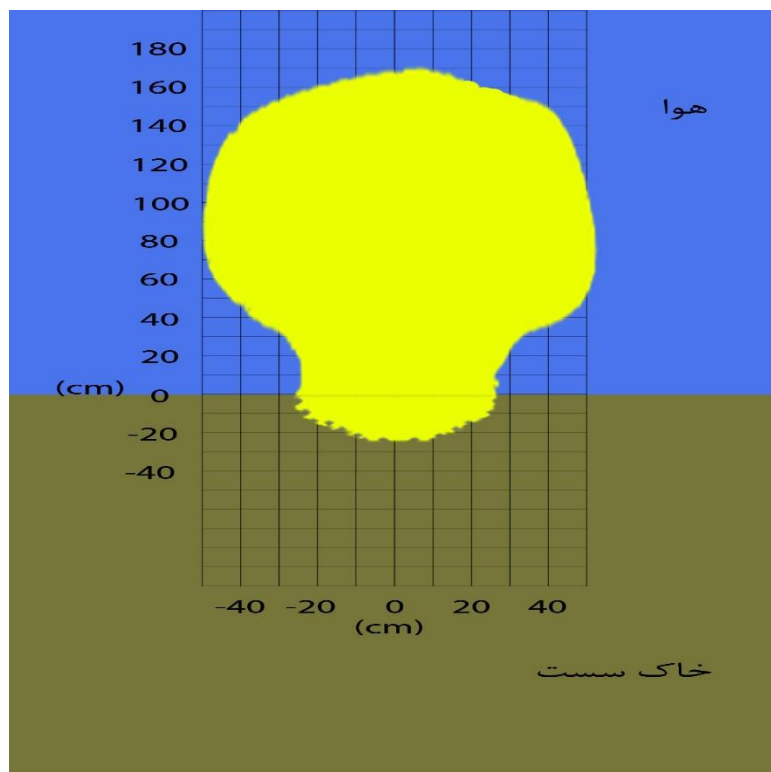
شکل های (۵-۱۹) تا (۵-۲۱) روند شکل گیری چاله انفجار را به صورت شماتیک در زمان های ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرو ثانیه نشان می دهند. همانطور که در این شکل ها مشخص است، در زمان ۵۰ میکروثانیه ذرات خاک تا ارتفاع حدود ۲۰ سانتی متر و در زمان ۲۰۰ میکروثانیه تا ارتفاع حدود ۱۷۰ سانتی متر پرتاب می شوند. قطر چاله نیز با افزایش زمان از ۵۰ تا ۲۰۰ میکرو ثانیه از مقدار ۲۲ سانتی متر به ۵۲ سانتی متر افزایش می یابد. عمق چاله نیز در این زمان ها از مقدار ۱۰ سانتی متر به ۲۴ سانتی متر افزایش می یابد.



شکل ۵-۱۹- شکل شماتیک انفجار در خاک سست در زمان ۵۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $6 \times 6 \text{ cm}$ )

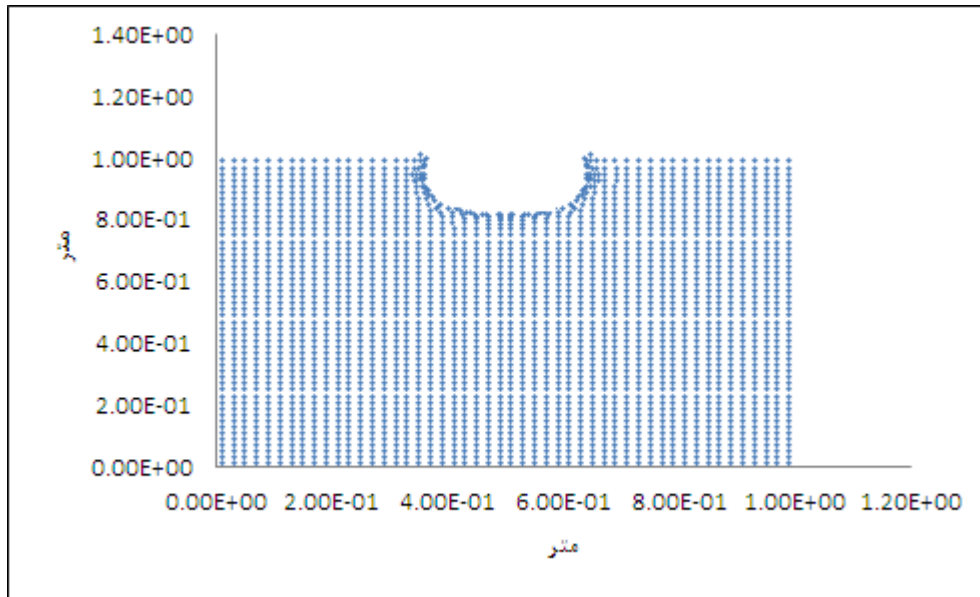


شکل ۵-۲۰- شکل شماتیک انفجار در خاک سست در زمان ۱۰۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $6 \times 6 \text{ cm}$ )

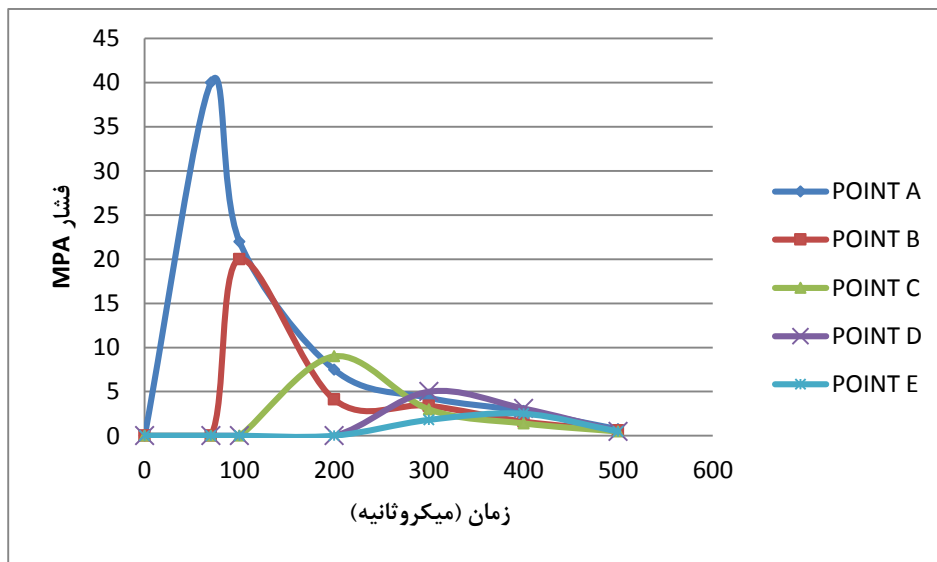


شکل ۵-۲۱- شکل شماتیک انفجار در خاک سست در زمان ۲۰۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $6 \times 6 \text{ cm}$ )

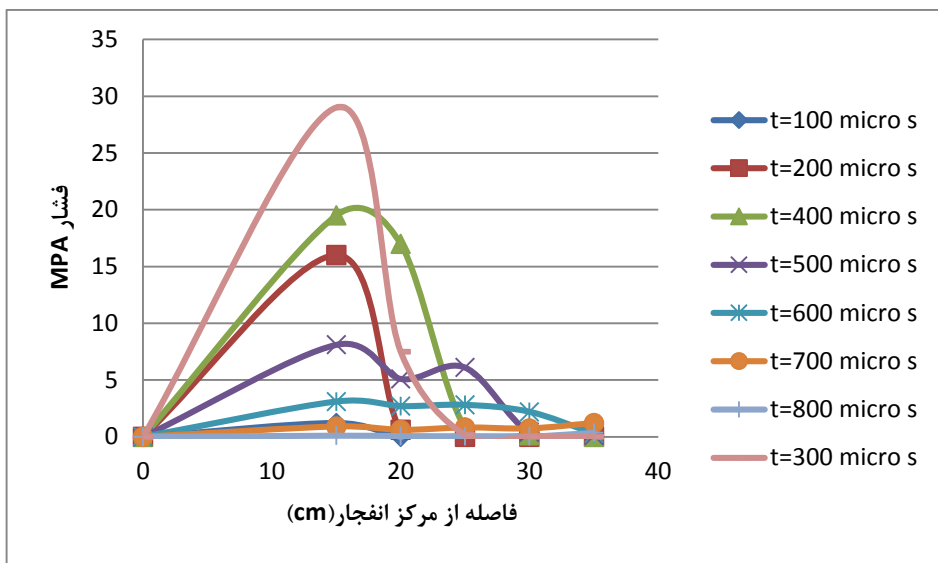
شکل (۵-۲۲) نیز چاله انفجاری ایجاد شده در زمان ۱۰۰ میکروثانیه و برای ماده منفجره تی ان تی به ابعاد  $10 \times 10 \text{ cm}$  را نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های (۵-۲۳) و (۵-۲۵) نمودارهای فشار زمان و فشار مکان را برای این مدل ارائه می‌دهند. مطابق نتایج به دست آمده، هرچقدر فاصله نقاط از مرکز انفجار بیشتر باشد، 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، به سرعت کاهش یافته و زایل می‌گردد. با بررسی نمودارهای فشار- زمان، مشاهده می‌شود که زمان رسیدن به فشار حداکثر برای نقطه A، حدود ۷۰ میکروثانیه و برای نقطه B حدود ۱۰۰ میکروثانیه است که این زمان برای نقطه E به حدود ۴۰۰ میکروثانیه افزایش می‌یابد. فشار نقطه A در این حالت به حدود ۴۰ مگا پاسکال می‌رسد. با مقایسه با مثال‌های قبلی که دارای مقدار ماده منفجره کمتری بود مشاهده می‌شود که حداکثر فشار تولیدی در این مثال افزایش یافته و زمان رسیدن به حداکثر فشار کاهش یافته است. شکل‌های (۵-۲۵) تا (۵-۲۷) نیز روند شکل‌گیری چاله انفجار را به صورت شماتیک در زمان‌های ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ میکروثانیه نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است، در زمان ۳۰ میکروثانیه ذرات خاک تا ارتفاع حدود ۹۸ سانتی‌متر و در زمان ۱۰۰ میکروثانیه تا ارتفاع حدود ۱۳۵ سانتی‌متر پرتاب می‌شوند. قطر چاله نیز با افزایش زمان از ۳۰ تا ۱۰۰ میکروثانیه از مقدار ۱۹ سانتی‌متر به ۵۸ سانتی‌متر افزایش می‌یابد. عمق چاله نیز در این زمان‌ها از مقدار ۱۵ سانتی‌متر به ۳۲ سانتی‌متر افزایش می‌یابد.



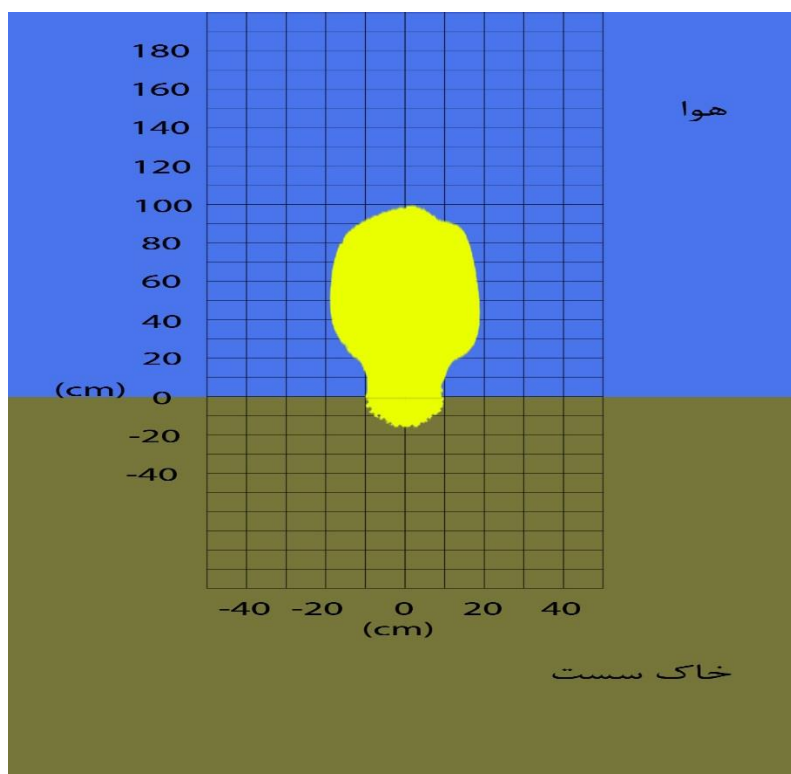
شکل ۵-۲۲- تشکیل چاله انفجار در زمان ۱۰۰ میکروثانیه برای ماده منفجره  $10 \times 10 \text{ cm}$



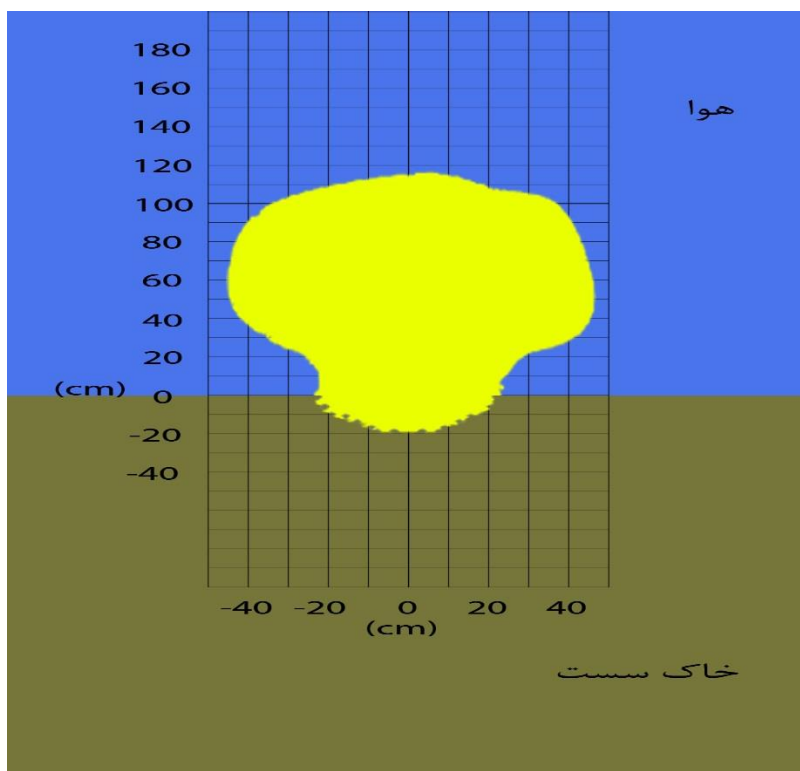
شکل ۵-۲۳- منحنی فشار-زمان برای نقاط A (۱۵ سانتی متری انفجار) تا E (۳۵ سانتی متری انفجار) برای ماده منفجره  $10 \times 10 \text{ cm}$



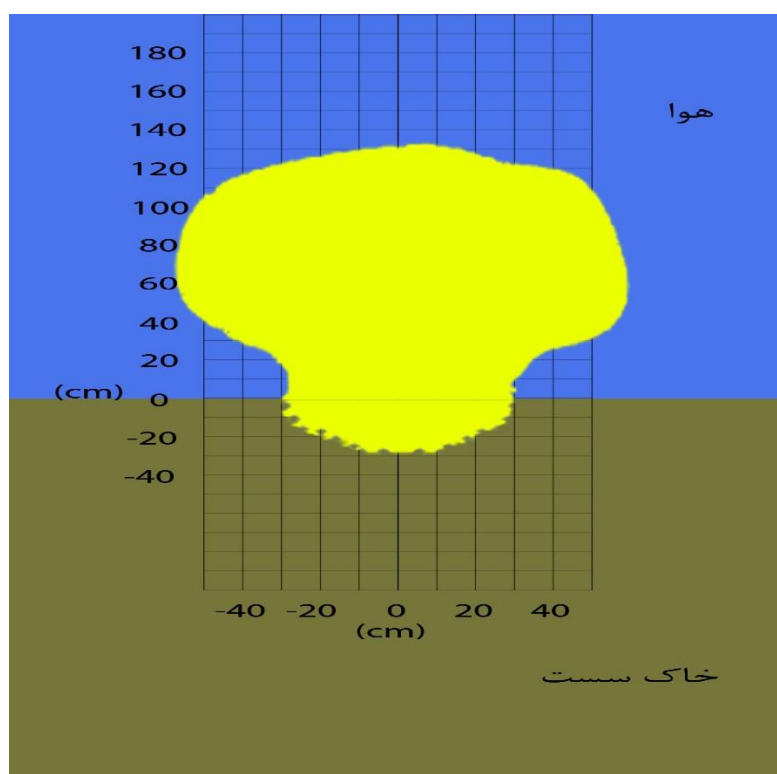
شکل ۵-۲۴- نمودار فشار تولیدی برحسب فاصله از مرکز انفجار (ماده منفجره  $10 \times 10^{cm}$ )



شکل ۵-۲۵- شکل شماتیک انفجار در خاک سست در زمان ۳۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $10 \times 10^{cm}$  سانتی متر)



شکل ۵-۲۶- شکل شماتیک انفجار در خاک سست در زمان ۵۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $10 \times 10^{cm}$  سانتی متر)

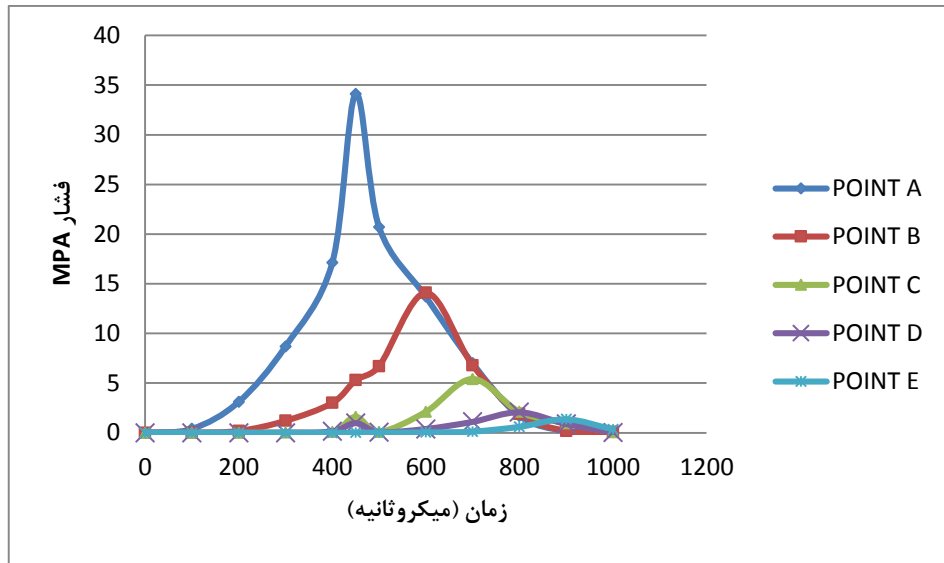


شکل ۵-۲۷- شکل شماتیک انفجار در خاک سست در زمان ۱۰۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $10 \times 10^{cm}$  سانتی متر)

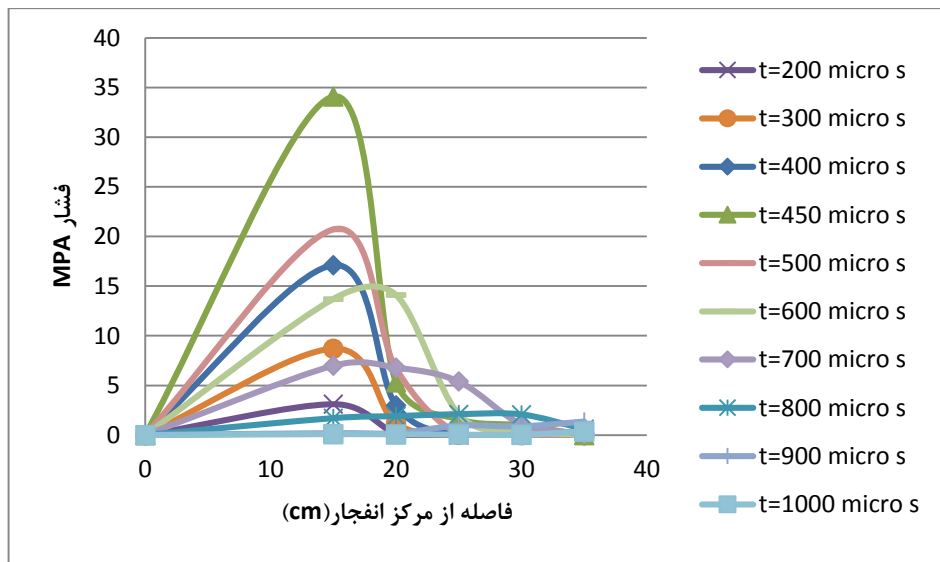


## ب- بررسی انفجار در خاک ماسه ای متراکم

در این قسمت به بررسی انفجار سطحی بر روی خاک ماسه‌ای سست پرداخته شده و فشارهای ناشی از انفجار و روند شکل‌گیری چاله انفجار برای ماده منفجره تی ان تی با ابعاد مختلف  $4 \times 4 \text{ cm}$ ،  $6 \times 6 \text{ cm}$  و  $10 \times 10 \text{ cm}$  بررسی شده است. تعداد ۱۰۰۰۰ ذره بافاصله  $1 \times 1 \text{ cm}$  و به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده و نقاط A تا E به عنوان نقاط مرجع و به ترتیب از فاصله ۱۵ سانتی‌متر تا ۳۵ سانتی‌متری مرکز انفجار قرار داده شده و بررسی‌های فشار- زمان بر روی آن‌ها انجام می‌گیرد. انرژی داخلی خاک برابر  $4/17 \times 10^{-4} \text{ Mpa}$  در نظر گرفته شده است. مشخصات خاک متراکم (خاک ۲) در جدول (۲-۵) ارائه شده است. شکل‌های (۵-۲۸) و (۵-۲۹) منحنی‌های فشار- زمان و فشار- مکان را برای ماده منفجره به ابعاد  $4 \times 4 \text{ cm}$  نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، منحنی فشار، پس از رسیدن به نقطه حداکثر، به سرعت کاهش یافته و زایل می‌گردد. با بررسی نمودارهای فشار- زمان، مشاهده می‌شود که زمان رسیدن به فشار حداکثر برای نقطه A، حدود ۴۵۰ میکروثانیه است و حداکثر فشار تولیدی آن به مقدار ۳۴/۱ مگا پاسکال می‌رسد. با مقایسه نتایج به دست آمده با مورد مشابه در خاک سست، می‌توان نتیجه گرفت که مقدار حداکثر فشار تولیدی برای خاک متراکم نسبت به خاک سست و همچنین زمان رسیدن به حداکثر فشار در خاک سست نسبت به خاک متراکم بیشتر است. با توجه به متفاوت بودن خصوصیات خاک و پارامترهای مؤثر در محاسبه فشار مانند سرعت صوت و چگالی این افزایش مقدار فشار قابل توجیه می‌باشد. منحنی فشار زمان نسبت به مورد مشابه در خاک سست، فشرده‌تر شده است. شکل‌های (۵-۳۰) تا (۵-۳۲) نیز روند شکل‌گیری چاله را به صورت شماتیک در زمان‌های ۳۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکروثانیه ارائه داده است.

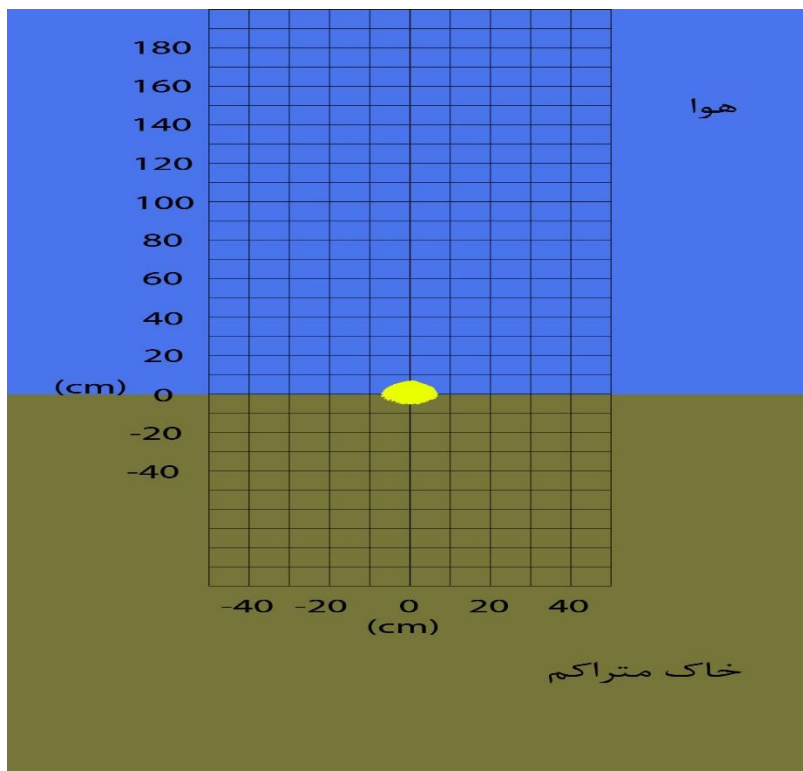


شکل ۵- ۲۸- منحنی فشار-زمان برای نقاط A (۱۵ سانتی متری انفجار) تا E (۳۵ سانتی متری انفجار) برای ماده منفجره ۴ × ۴ cm<sup>۲</sup> متر اکم

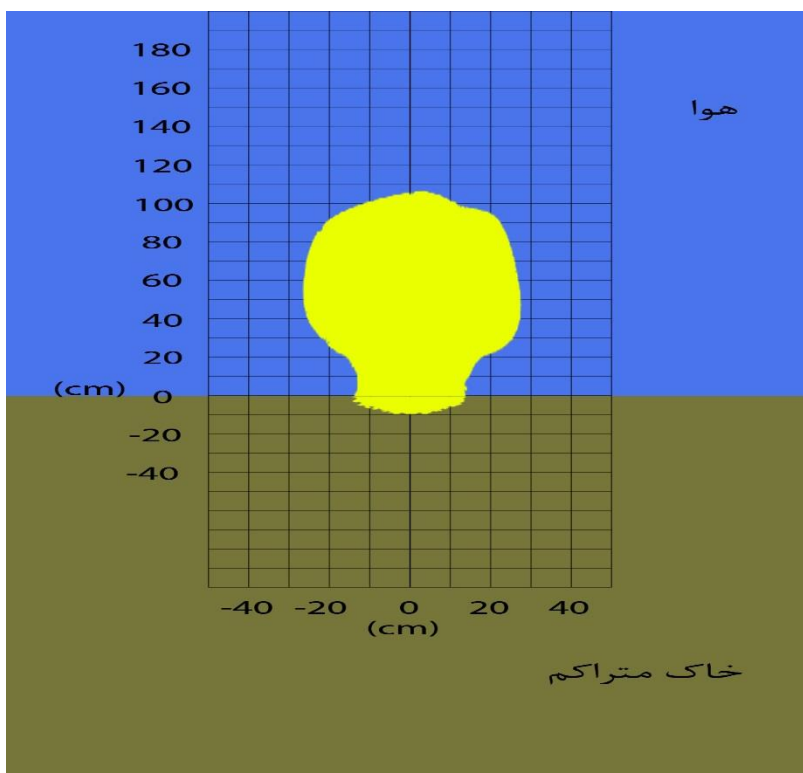


شکل ۵- ۲۹- نمودار فشار تولیدی بر حسب فاصله از مرکز انفجار در خاک متر اکم (ماده منفجره ۴ × ۴ cm<sup>۲</sup> سانتی متر)

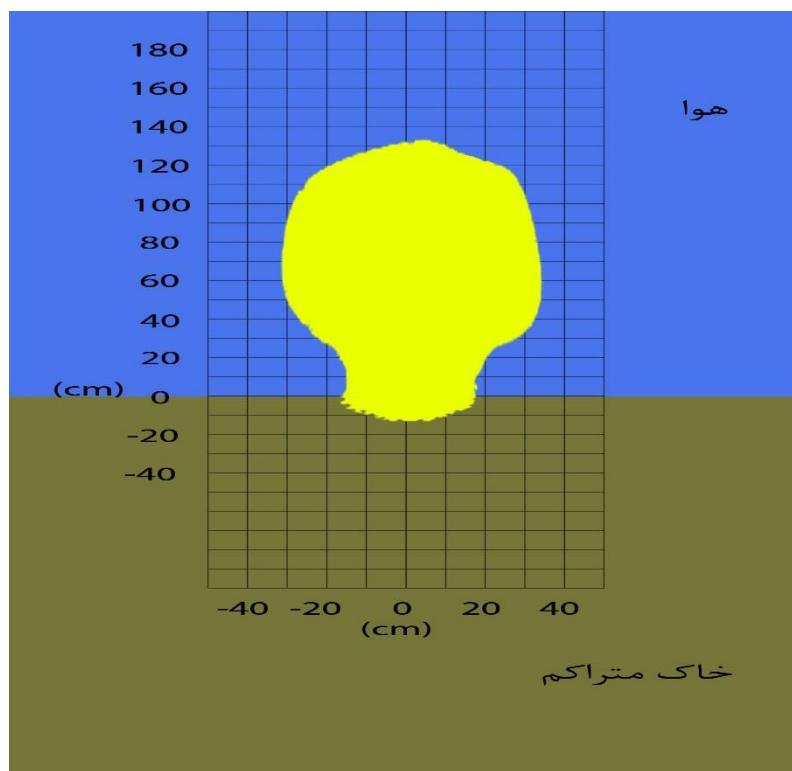
همانطور که در شکل های (۵-۳۰) تا (۵-۳۲) مشخص است، در زمان ۳۰ میکروثانیه ذرات خاک تا ارتفاع حدود ۷ سانتی متر و در زمان ۲۰۰ میکروثانیه تا ارتفاع حدود ۸۸ سانتی متر پرتاب می شوند. قطر چاله نیز با افزایش زمان از ۳۰ تا ۲۰۰ میکروثانیه از مقدار ۸ سانتی متر به ۳۵ سانتی متر افزایش می یابد. عمق چاله نیز در این زمان ها از مقدار ۴ سانتی متر به ۱۳ سانتی متر افزایش می یابد.



شکل ۵-۳۰- شکل شماتیک انفجار در خاک ۲ در زمان ۳۰ میکروثانیه  
(ماده منفجره  $4 \times 4 \text{ cm}$  سانتی متر)



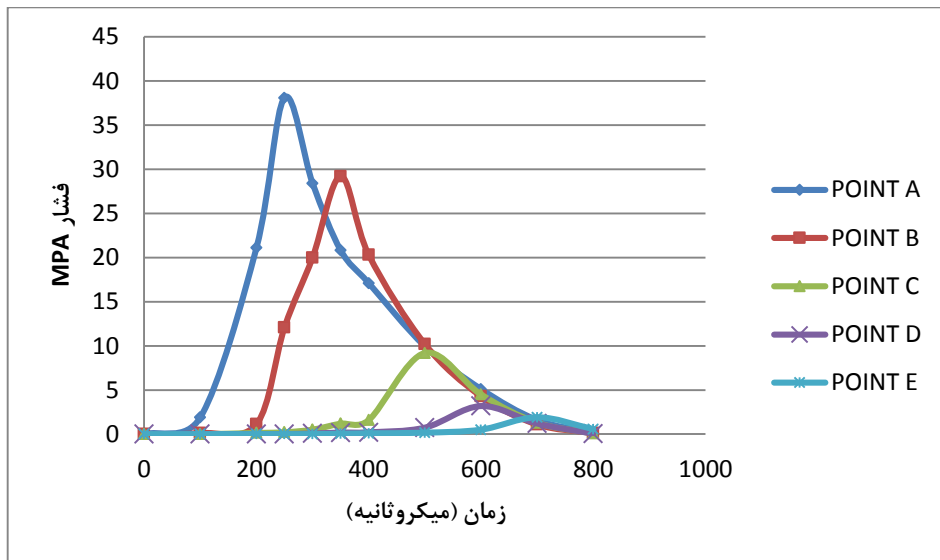
شکل ۵-۳۱- شکل شماتیک انفجار در خاک ۲ در زمان ۱۰۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $4 \times 4 \text{ cm}$  سانتی متر)



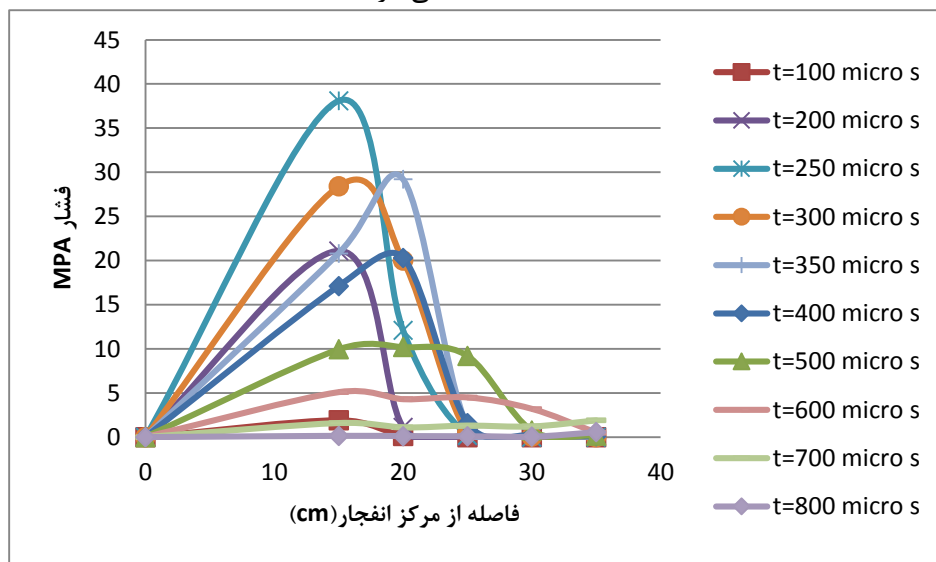
شکل ۵-۳۲- شکل شماتیک انفجار در خاک ۲ در زمان ۲۰۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $4 \times 4 \text{ cm}$  سانتی متر)

شکل های (۵-۳۳) و (۵-۳۴) نمودارهای فشار زمان و فشار مکان را برای خاک ماسه ای متراکم و ماده منفجره تی ان تی به ابعاد  $6 \times 6 \text{ cm}$  ارائه می دهد. مطابق نتایج به دست آمده، هرچقدر 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 زایل می گردد. با بررسی نمودارهای فشار- زمان، مشاهده می شود که زمان رسیدن به فشار حداکثر برای نقطه A، حدود ۲۵۰ میکروثانیه است که این زمان برای نقطه B به حدود ۳۵۰ میکروثانیه افزایش می یابد. با مقایسه با مثال قبلی که دارای مقدار ماده منفجره کمتری بود مشاهده می شود که حداکثر فشار تولیدی در این مثال افزایش یافته و زمان رسیدن به حداکثر فشار کاهش یافته است. با مقایسه نتایج به دست آمده با مورد مشابه در خاک ماسه ای سست، می توان نتیجه گرفت که مقدار حداکثر فشار تولیدی برای خاک متراکم نسبت به خاک سست و همچنین زمان رسیدن به حداکثر فشار در خاک سست نسبت به خاک متراکم بیشتر است. با توجه به متفاوت

بودن خصوصیات خاک و پارامترهای مؤثر در محاسبه فشار مانند سرعت صوت و چگالی این افزایش مقدار فشار قابل توجه می‌باشد. منحنی فشار زمان به مورد مشابه در خاک سست، فشرده‌تر شده است.



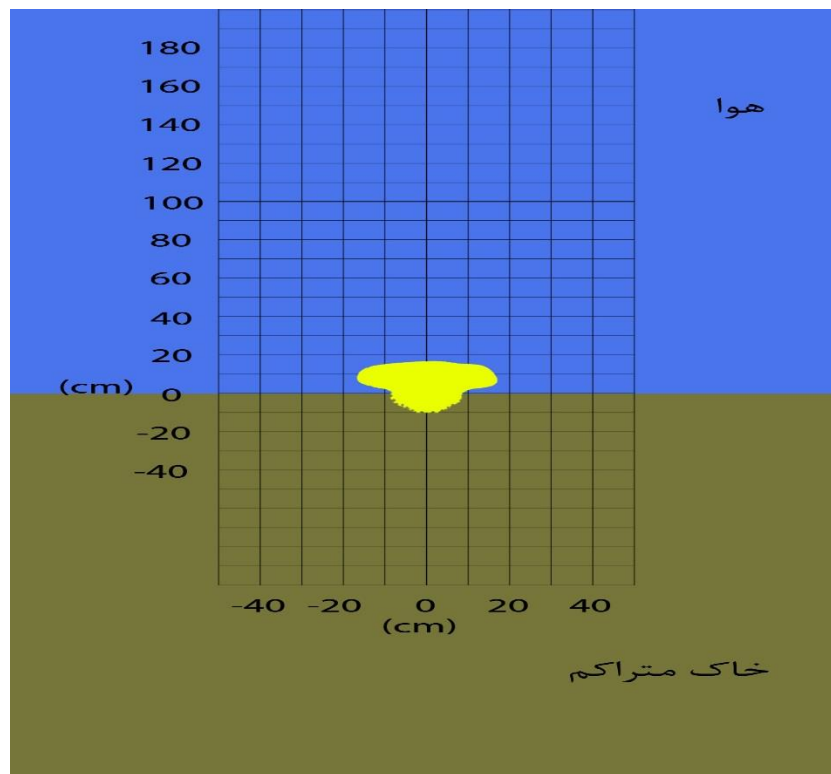
شکل ۵-۳۳- منحنی فشار-زمان برای نقاط A (۱۵ سانتی‌متری انفجار) تا E (۳۵ سانتی‌متری انفجار) برای ماده منفجره  $6 \times 6 \text{ cm}$  سانتی‌متر



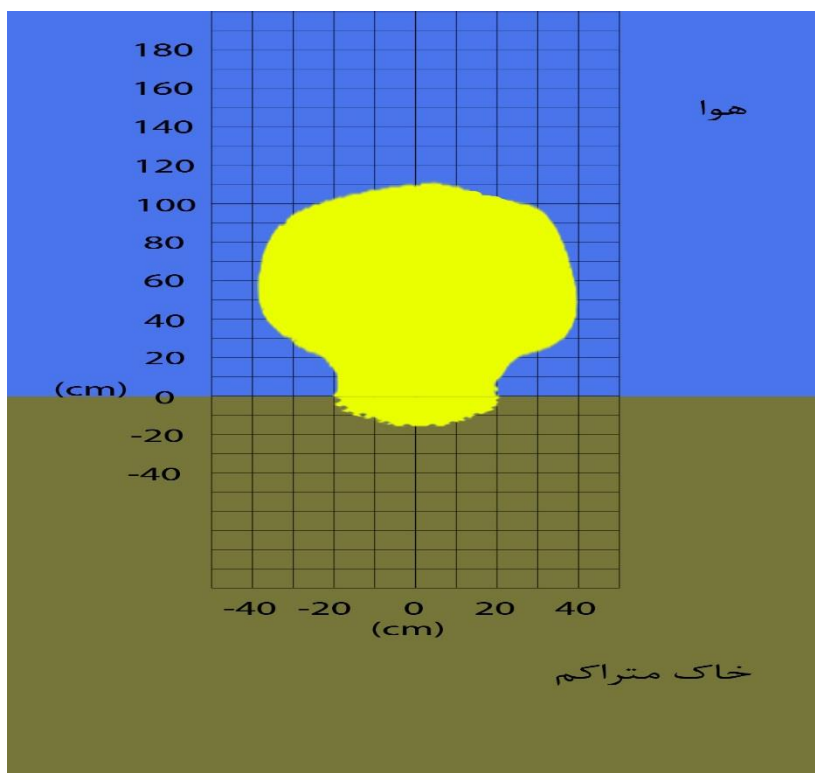
شکل ۵-۳۴- نمودار فشار تولیدی بر حسب فاصله از مرکز انفجار در خاک ۲ (ماده منفجره  $6 \times 6 \text{ cm}$  سانتی‌متر)

شکل های (۵-۳۵) تا (۵-۳۷) نیز روند شکل گیری چاله را به صورت شماتیک در زمان های ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکروثانیه ارائه داده است. مطابق این شکل ها، در زمان ۵۰ میکروثانیه ذرات خاک تا ارتفاع

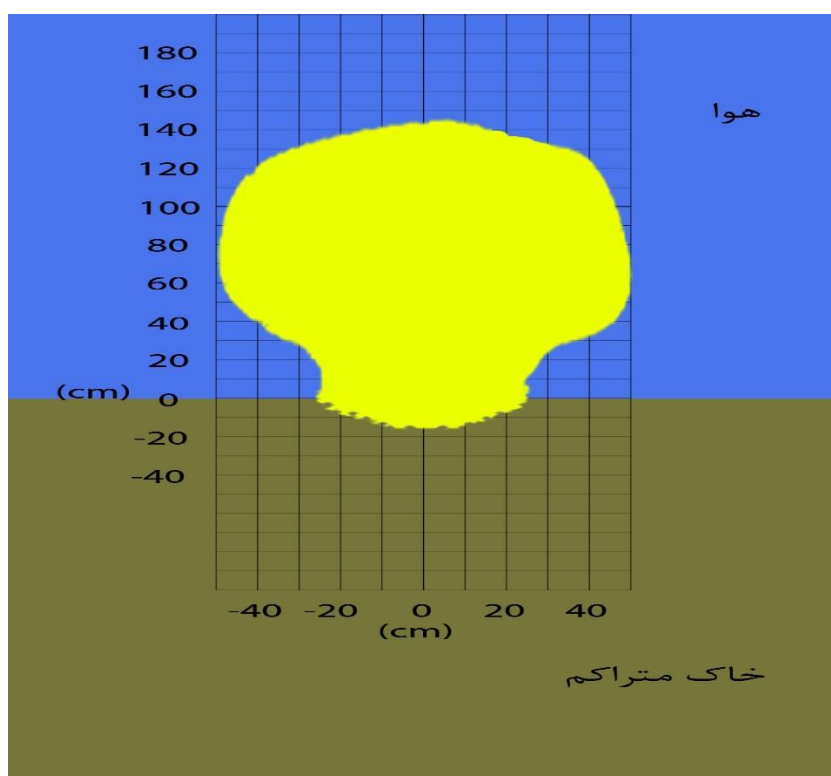
حدود ۱۶ سانتی متر و در زمان ۲۰۰ میکروثانیه تا ارتفاع حدود ۱۵۵ سانتی متر پرتاب می شوند. قطر چاله نیز با افزایش زمان از ۵۰ تا ۲۰۰ میکروثانیه از مقدار ۱۶ سانتی متر به ۵۱ سانتی متر افزایش می یابد. عمق چاله نیز در این زمان ها از مقدار ۱۰ سانتی متر به ۱۷ سانتی متر افزایش می یابد.



شکل ۵-۳۵- شکل شماتیک انفجار در خاک ۲ در زمان ۵۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $6 \times 6 \text{ cm}$  سانتی متر)

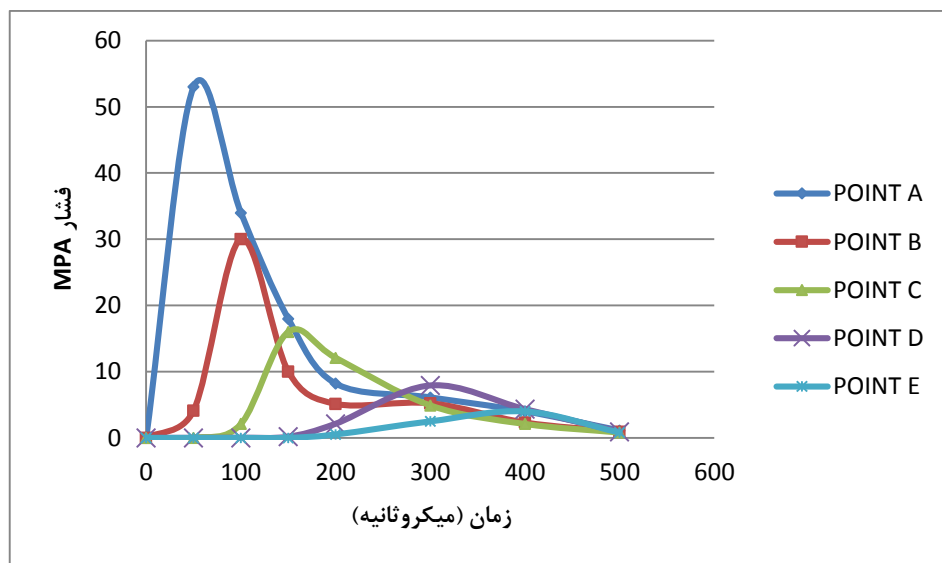


شکل ۵-۳۶- شکل شماتیک انفجار در خاک ۲ در زمان ۱۰۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $6 \times 6 \text{ cm}$  سانتی متر)



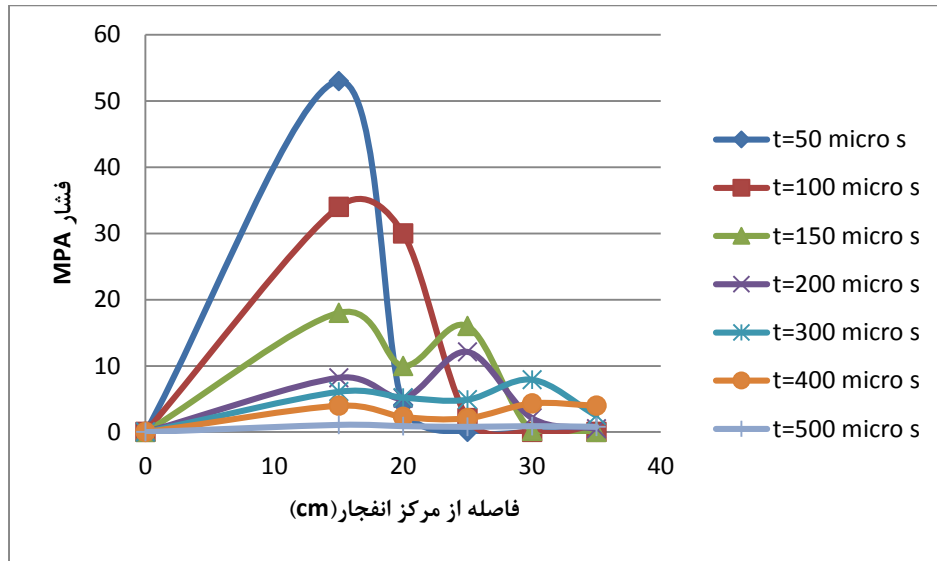
شکل ۵-۳۷- شکل شماتیک انفجار در خاک ۲ در زمان ۲۰۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $6 \times 6 \text{ cm}$  سانتی متر)

شکل‌های (۵-۳۸) و (۵-۳۹) نمودارهای فشار زمان و فشار مکان را برای خاک متراکم و ماده منفجره به ابعاد  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  ارائه می‌دهند. با بررسی نمودارهای فشار-زمان، مشاهده می‌شود که زمان رسیدن به فشار حداکثر برای نقطه A، حدود ۵۰ میکروثانیه و برای نقطه B حدود ۱۰۰ میکروثانیه است که این زمان برای نقطه E به حدود ۴۰۰ میکروثانیه افزایش می‌یابد. فشار نقطه A در این حالت به حدود ۵۲ مگا پاسکال می‌رسد. با مقایسه با مثال‌های قبلی که دارای مقدار ماده منفجره کمتری بود مشاهده می‌شود که حداکثر فشار تولیدی در این مثال افزایش یافته و زمان رسیدن به حداکثر فشار کاهش یافته است. طبیعی است که با افزایش مقدار ماده منفجره و ثابت بودن سایر پارامترها ابعاد چاله انفجاری نیز افزایش می‌یابد. شکل‌های (۵-۴۰) تا (۵-۴۲) نیز روند شکل گیری چاله را به صورت شماتیک در زمان‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکروثانیه ارائه داده است. مطابق این شکل‌ها، در زمان ۳۰ میکروثانیه ذرات خاک تا ارتفاع حدود ۸۸ سانتی‌متر و در زمان ۱۰۰ میکروثانیه تا ارتفاع حدود ۱۱۵ سانتی‌متر پرتاب می‌شوند. قطر چاله نیز با افزایش زمان از ۳۰ تا ۱۰۰ میکروثانیه از مقدار ۱۸ سانتی‌متر به ۵۴ سانتی‌متر افزایش می‌یابد. عمق چاله نیز در این زمان‌ها از مقدار ۱۲ سانتی‌متر به ۲۴ سانتی‌متر افزایش می‌یابد.

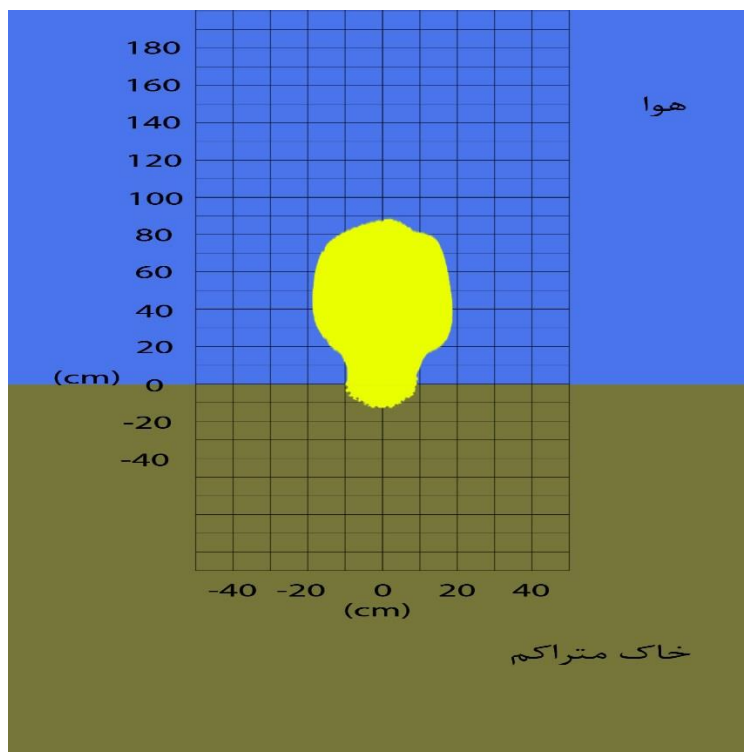


شکل ۵-۳۸- منحنی فشار-زمان برای نقاط A (۱۵ سانتی‌متری انفجار) تا E (۳۵ سانتی‌متری انفجار) برای ماده منفجره  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  متر در خاک متراکم

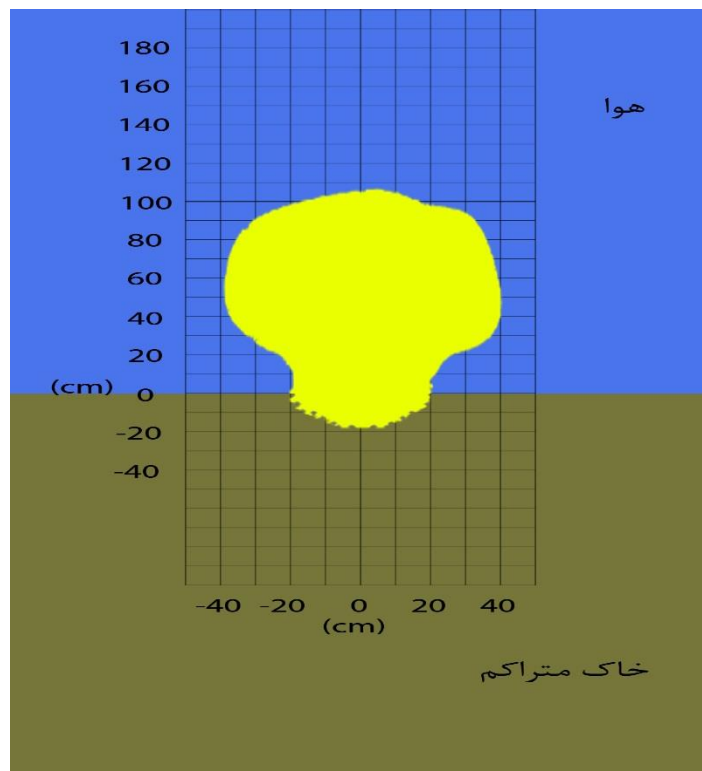




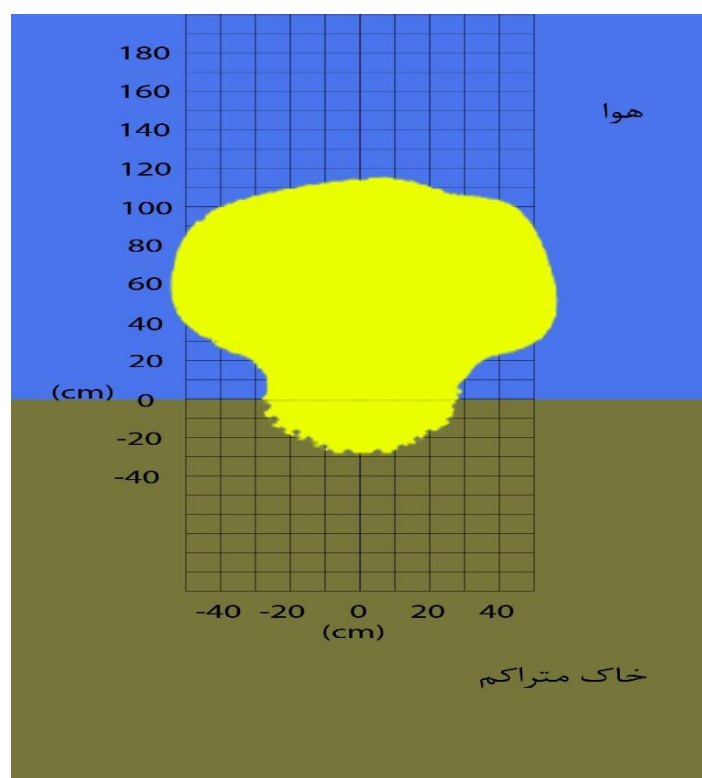
شکل ۵-۳۹- نمودار فشار تولیدی بر حسب فاصله از مرکز انفجار در خاک متراکم (ماده منفجره  $10 \times 10^{cm}$  سانتی متر)



شکل ۵-۴۰- شکل شماتیک انفجار در خاک ۲ در زمان ۳۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $10 \times 10^{cm}$  سانتی متر)



شکل ۵-۴۱- شکل شماتیک انفجار در خاک ۲ در زمان ۵۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $10 \times 10^{cm}$  سانتی متر)



شکل ۵-۴۲- شکل شماتیک انفجار در خاک ۲ در زمان ۱۰۰ میکروثانیه (ماده منفجره  $10 \times 10^{cm}$  سانتی متر)

## ۵-۳- بررسی چاله‌های انفجاری

### ۵-۳-۱- بررسی چاله انفجار در خاک یک لایه

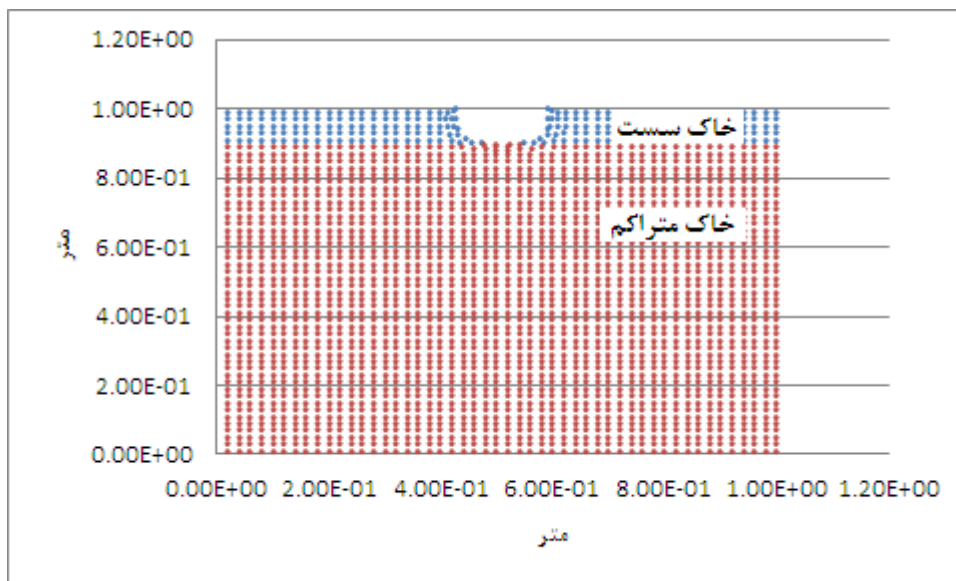
پس از مدل‌سازی و تحلیل بارگذاری انفجار در خاک چاله‌های انفجاری ناشی از بارگذاری‌های مختلف برای هر دو نوع خاک ماسه ای سست و متراکم که مشخصات آن‌ها در جدول (۵-۲) ارائه شد، موردبررسی قرار گرفته است. بررسی چاله‌های انفجاری با توجه به هندسه چاله بسیار مشکل بوده و به صورت دقیق امکان‌پذیر نمی‌باشد. شکل هندسی چاله به عوامل متعددی از جمله مقدار ماده منفجره، نوع خاک وابسته است و با توجه به گستردگی انواع خاک‌ها و خصوصیات آن‌ها، حتی دقیق‌ترین محاسبات نیز حدود ۱۰ الی ۴۰ درصد دارای انحراف می‌باشند [40]. در انفجارهای سطحی چاله تشکیل‌شده و اندرکنش بسیار پیچیده‌ای بین تأثیرات گرانش، پارامترهای مقاومتی خاک و شرایط بارگذاری اتفاق می‌افتد. در تحلیل نتایج به دست آمده، قطر بیرونی و ارتفاع چاله برای هر دو نوع خاک موردبررسی و برای بارگذاری‌های متفاوت انفجاری ارائه شده‌اند. مطابق جدول (۵-۳) و به‌طور کلی با افزایش مقدار ماده منفجره، قطر و عمق چاله انفجاری افزایش می‌یابند. همچنین با مقایسه مقادیر به دست آمده برای دو نوع خاک، مشاهده می‌شود که ابعاد چاله‌های انفجاری، تحت بارگذاری‌های یکسان، در خاک دوم نسبت به خاک اول کاهش یافته است که ناشی از سخت‌تر شدن خاک دوم می‌باشد. چگالی، مدول برشی و سرعت صوت در خاک دوم بیشتر از خاک اول بوده و تأثیرات سختی باعث کاهش ابعاد چاله انفجاری شده است.

جدول ۵-۳- قطر و عمق چاله انفجاری ایجادشده در خاک ۱ و ۲

خاک ۲			خاک ۱		
ابعاد ماده منفجره (cm)	قطر چاله انفجاری (cm)	عمق چاله انفجاری (cm)	ابعاد ماده منفجره (cm)	قطر چاله انفجاری (cm)	عمق چاله انفجاری (cm)
4 × 4 <sup>cm</sup>	۳۶	۱۳	4 × 4 <sup>cm</sup>	۳۸	۱۵
6 × 6 <sup>cm</sup>	۵۱	۱۷	6 × 6 <sup>cm</sup>	۵۲	۲۴
10 × 10 <sup>cm</sup>	۵۴	۲۴	10 × 10 <sup>cm</sup>	۵۸	۳۲

### ۵-۳-۲- بررسی چاله انفجار در خاک دو لایه

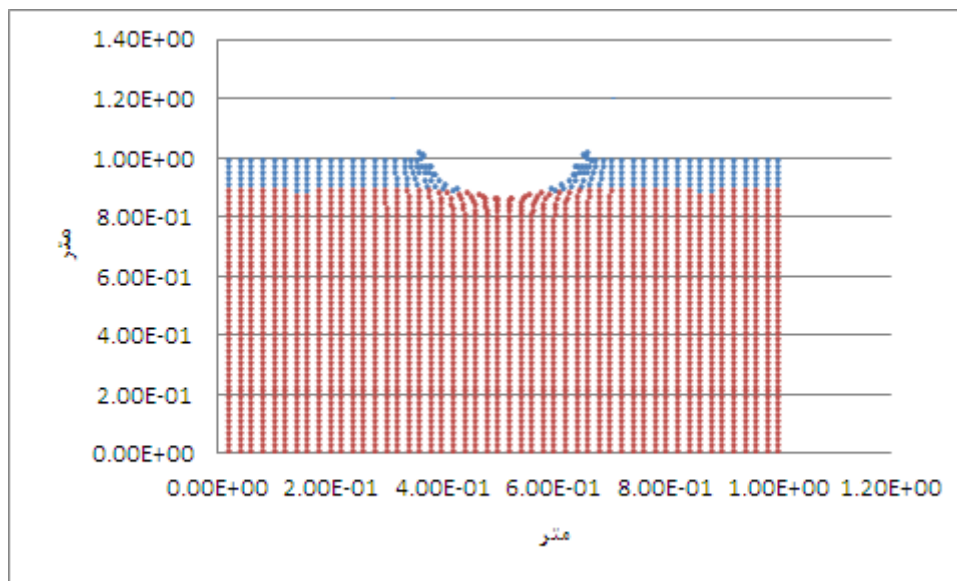
در این مثال به بررسی چاله انفجار در خاکی دولایه پرداخته شده است. ابعاد مدل  $1 \times 1^m$  فرض شده است. تعداد ذره با فاصله  $1 \times 1^{cm}$  و به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده و ماده منفجره تی ان تی به ابعاد  $6 \times 6^{cm}$  در روی سطح و مرکز خاک قرار داده شده است. لایه فوقانی خاک، ماسه سست (خاک ۱) و لایه پائینی خاک ماسه ای متراکم فرض شده است. ضخامت لایه فوقانی بین ۱۰ تا ۲۰ سانتیمتر متغیر فرض شده و در هر حالت ابعاد چاله انفجاری مورد بررسی قرار گرفته است. طول هموار سازی اولیه برابر با فاصله اولیه بین ذرات فرض شده و انرژی داخلی خاک برابر  $4/17 \times Mpa$  در  $10^{-4}$  در نظر گرفته شده است. شکل های (۵-۴۳) تا (۵-۴۵) نحوه انفجار و شکل گیری چاله انفجار را در زمان های ۵۰ تا ۳۰۰ میکروثانیه برای خاک دو لایه نشان می دهد. در این حالت ضخامت لایه سست ۱۰ سانتی متری و ضخامت لایه متراکم زیرین ۹۰ سانتی متر فرض شده است. همان طور که در شکل های ارائه شده مشخص است، با افزایش زمان قطر و عمق چاله افزایش یافته و چاله انفجاری شکل می گیرد. همچنین در زمان های پس از ۳۰۰ میکروثانیه، ذرات اطراف چاله انفجاری وارد مرحله پلاستیک شده و خاک دچار گسیختگی می گردد. قطر و عمق چاله انفجاری ایجاد شده برای این حالت به ترتیب برابر با ۵۲ و ۱۸ سانتی متر می باشد. عمق چاله انفجاری در این حالت نسبت به عمق چاله انفجاری در خاک سست با مقدار ماده منفجره مشابه، کاهش یافته است ولی قطر چاله انفجار تغییر محسوسی نداشته است.



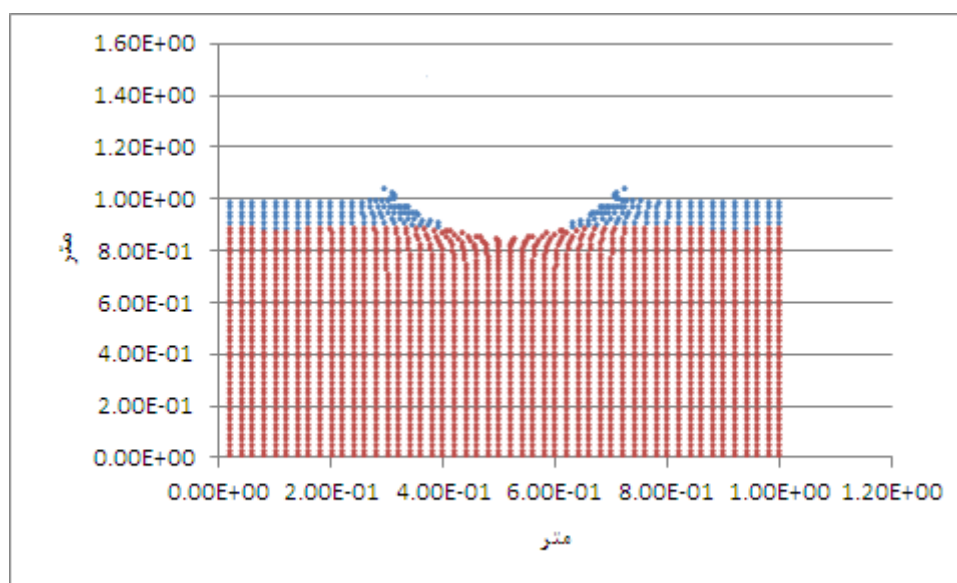
شکل ۵-۴۳- شکل گیری چاله انفجار در خاک دو لایه در زمان ۵۰ میکروثانیه



شکل ۵-۴۴- شکل گیری چاله انفجار در خاک دو لایه در زمان ۱۰۰ میکروثانیه



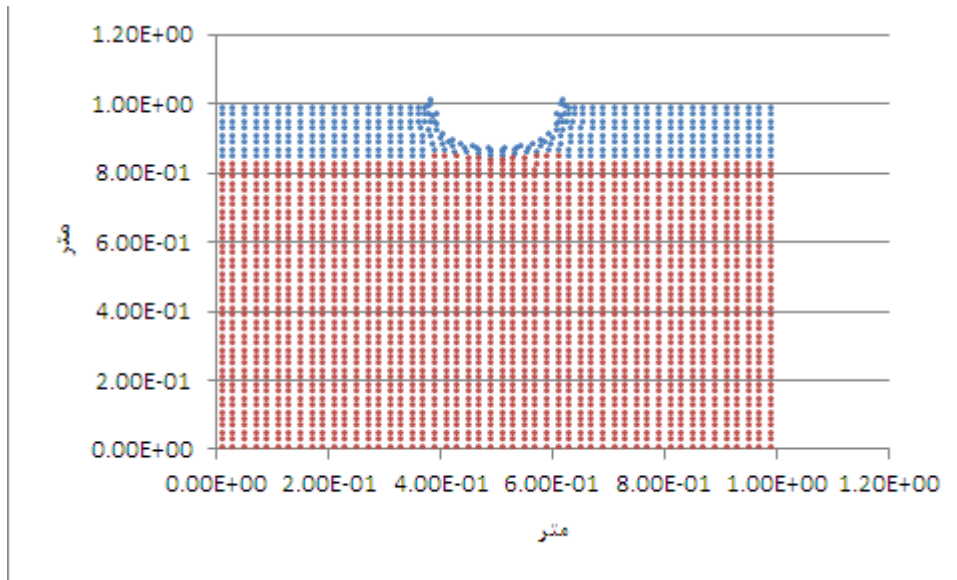
شکل ۵-۴۵- شکل گیری چاله انفجار در خاک دو لایه در زمان ۲۰۰ میکروثانیه



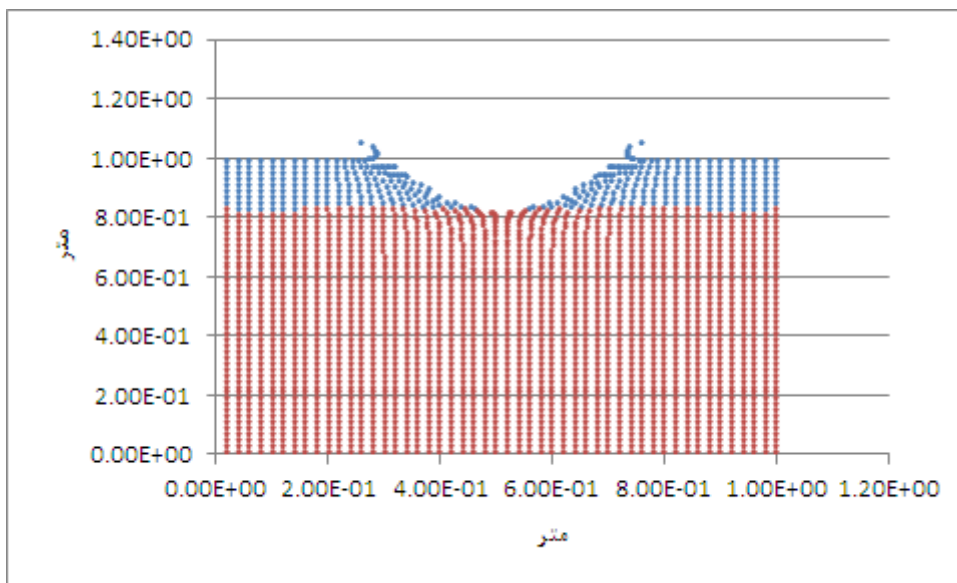
شکل ۵-۴۶- شکل گیری چاله انفجار در خاک دو لایه در زمان ۳۰۰ میکروثانیه

در ادامه، ضخامت لایه فوقانی خاک دو لایه افزایش می یابد. در شکل های (۴۷-۵) و (۴۸-۵)، ضخامت لایه سست ۱۵ سانتی متر و ضخامت لایه متراکم زیرین ۸۵ سانتی متر فرض شده است و روند شکل گیری چاله انفجاری را در زمان های ۱۰۰ و ۴۰۰ میکروثانیه نشان می دهد. مطابق نتایج

تحلیل، با افزایش ضخامت لایه سست، قطر چاله انفجاری ایجاد شده و عمق چاله انفجار به ترتیب برابر با ۵۲ و ۲۰ سانتی متر تعیین می شوند.



شکل ۵-۴۷- شکل گیری چاله انفجار در خاک دو لایه در زمان ۱۰۰ میکروثانیه (ضخامت لایه سست ۱۵ سانتی متر)

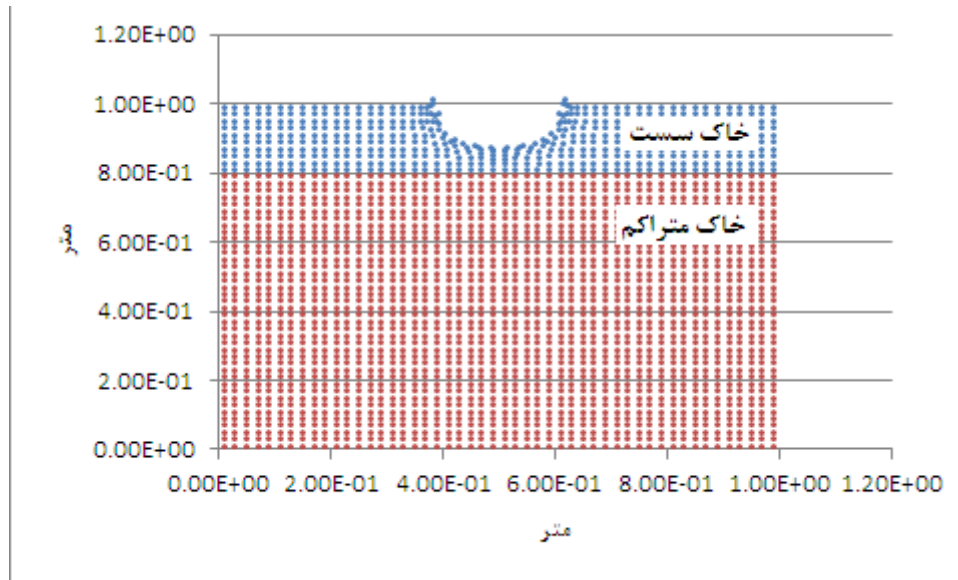


شکل ۵-۴۸- شکل گیری چاله انفجار در خاک دو لایه در زمان ۴۰۰ میکروثانیه (ضخامت لایه سست ۱۵ سانتی متر)

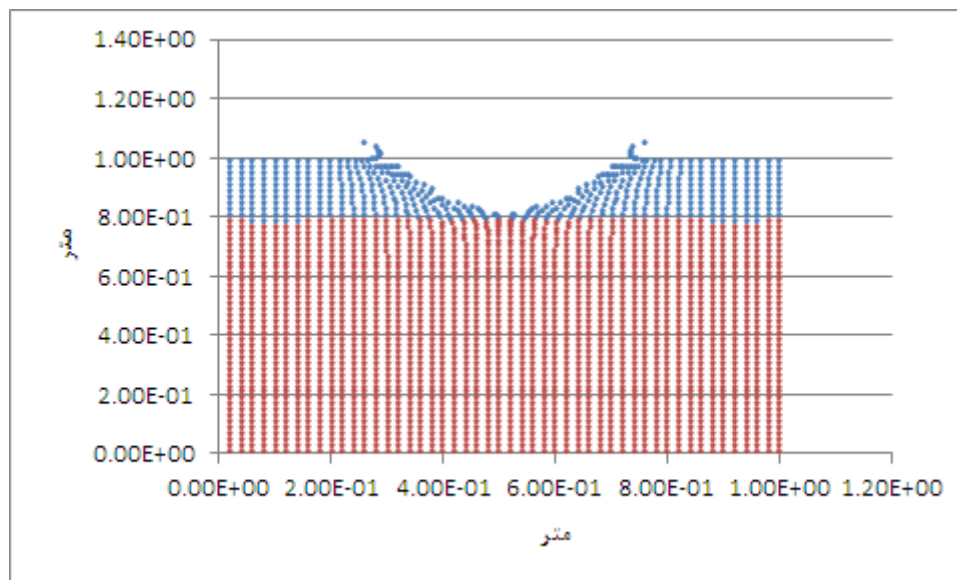
در شکل های (۵-۴۹) و (۵-۵۰)، ضخامت لایه سست ۲۰ سانتی متی و ضخامت لایه متراکم

زیرین ۸۰ سانتی متر فرض شده است و روند شکل گیری چاله انفجاری را در زمان های ۱۰۰ و ۴۰۰

میکروثانیه نشان می دهد. مطابق نتایج تحلیل، با افزایش ضخامت لایه سست، قطر چاله انفجاری ایجاد شده و عمق چاله انفجار افزایش یافته و به ترتیب برابر با ۵۴ و ۲۲ سانتی متر تعیین می شوند.



شکل ۵- ۴۹- شکل گیری چاله انفجار در خاک دو لایه در زمان ۱۰۰ میکروثانیه (ضخامت لایه سست ۲۰ سانتی متر)



شکل ۵- ۵۰- شکل گیری چاله انفجار در خاک دو لایه در زمان ۴۰۰ میکروثانیه (ضخامت لایه سست ۲۰ سانتی متر)

با توجه به نتایج به دست آمده و با توجه به اینکه لایه زیرین خاک دارای مدول برشی و سختی بیشتری می باشد، مشاهده می شود که تغییر ضخامت لایه فوقانی تأثیر چندانی بر قطر چاله ایجاد شده ندارد و



قطر چاله انفجاری تا حدودی مستقل از ضخامت لایه می‌باشد. در حالی که هر چه ضخامت لایه فوقانی 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 ضعیف‌تر از لایه پایینی می‌باشد، عمق چاله انفجاری نیز افزایش می‌یابد. ابعاد چاله انفجاری در خاک دو لایه، با توجه به ضخامت لایه فوقانی در جدول (۴-۵) ارائه شده است.

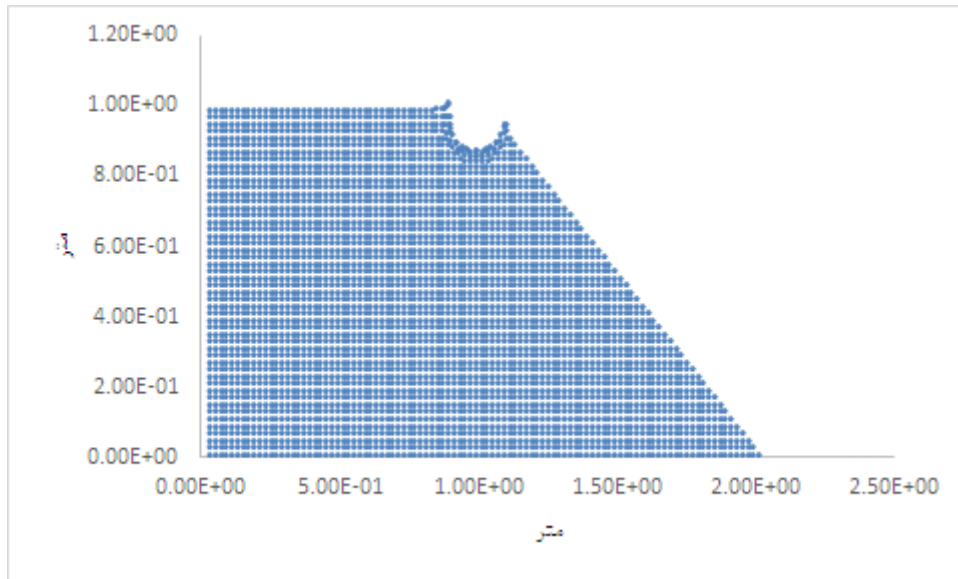
جدول ۵-۴- قطر و عمق چاله انفجاری در خاک دو لایه

ابعاد ماده منفجره (cm)	قطر چاله انفجاری (cm)	عمق چاله انفجاری (cm)	ضخامت لایه فوقانی (cm)
$6 \times 6^{cm}$	۵۲	۱۸	۱۰
$6 \times 6^{cm}$	۵۲	۲۰	۱۵
$6 \times 6^{cm}$	۵۴	۲۲	۲۰

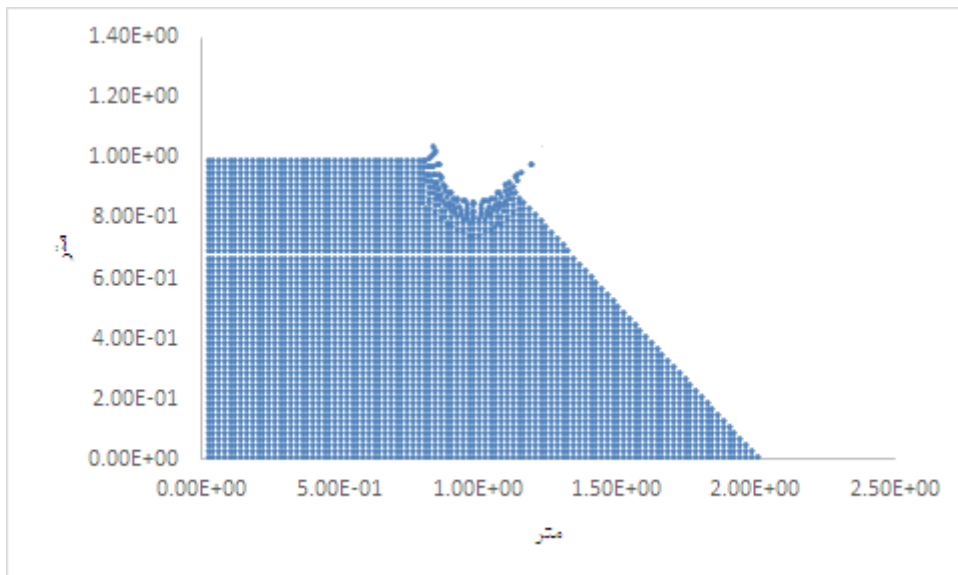
#### ۵-۳-۳- بررسی چاله انفجار در شیروانی خاکی

در این مثال به بررسی چاله انفجار در شیروانی خاکی پرداخته شده است. ابعاد مدل  $2 \times 1^m$  فرض شده و زاویه شیب ۴۵ درجه می‌باشد. تعداد ۳۷۷۵ ذره با فاصله  $1 \times 1^{cm}$  و به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده و ماده منفجره تی ان تی به ابعاد  $6 \times 6^{cm}$  در روی سطح و لبه شیروانی خاکی قرار داده شده است. جنس خاک شیروانی از نوع خاک ماسه ای سست (خاک ۱) فرض شده است. طول هموار سازی اولیه برابر با فاصله اولیه بین ذرات فرض شده و انرژی داخلی خاک برابر  $4/17 \times Mpa$  در  $10^{-4}$  در نظر گرفته شده است. شکل های (۵-۵) تا (۵-۴) روند شکل گیری چاله انفجاری در لبه شیب را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل های ارائه شده مشاهده می‌شود، با گذشت زمان عمق و قطر چاله انفجاری افزایش می‌یابد و همچنین خاک در لبه شیب شروع به گسیختگی نموده و ناحیه پلاستیک شکل گرفته در زیر چاله انفجاری گسترش می‌یابد. عمق چاله در لبه شیب کمتر می‌باشد، که با توجه به قرار گرفتن ماده منفجره در لبه شیب قابل توجیه است. ذرات خاک از لبه شیب با افزایش زمان، گسیخته شده و به سمت بیرون پرتاب می‌گردند، و همزمان ابعاد چاله نیز بیشتر می‌شود. در

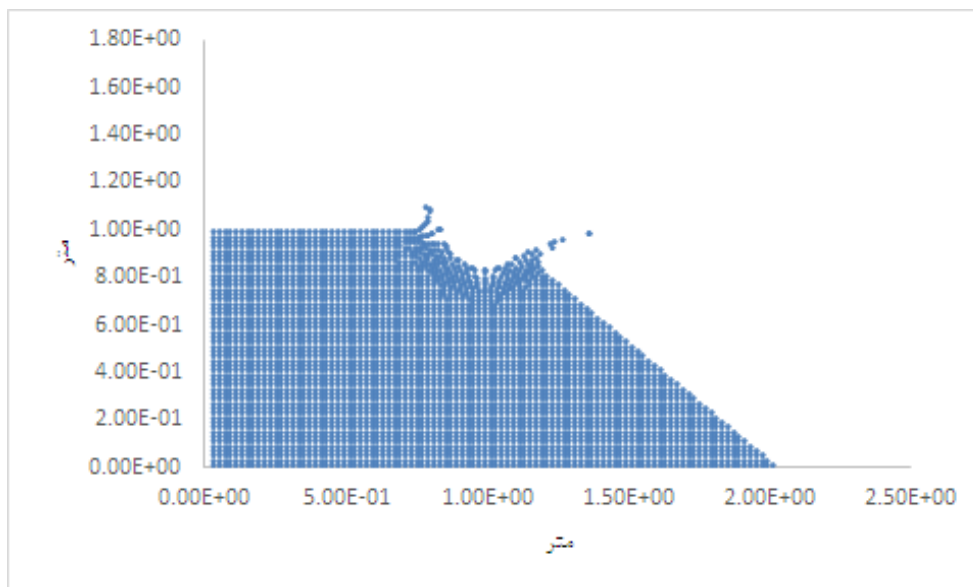
زمان های بیش ۳۰۰ میکروثانیه، چاله انفجاری با توجه به اینکه در سمت شیب محصور شده نمی باشد، شکل چاله تغییر نموده و خاک ها به اطراف و روی شیب پاشیده می گردند. با توجه به اینکه چاله انفجاری روی شیب دارای تقارن نمی باشد، برای تعیین ابعاد می توان از میانگین گیری استفاده نمود. عمق چاله انفجاری از بالای شیب، ۱۹ و قطر چاله ۴۶ سانتی متر بدست می آید.



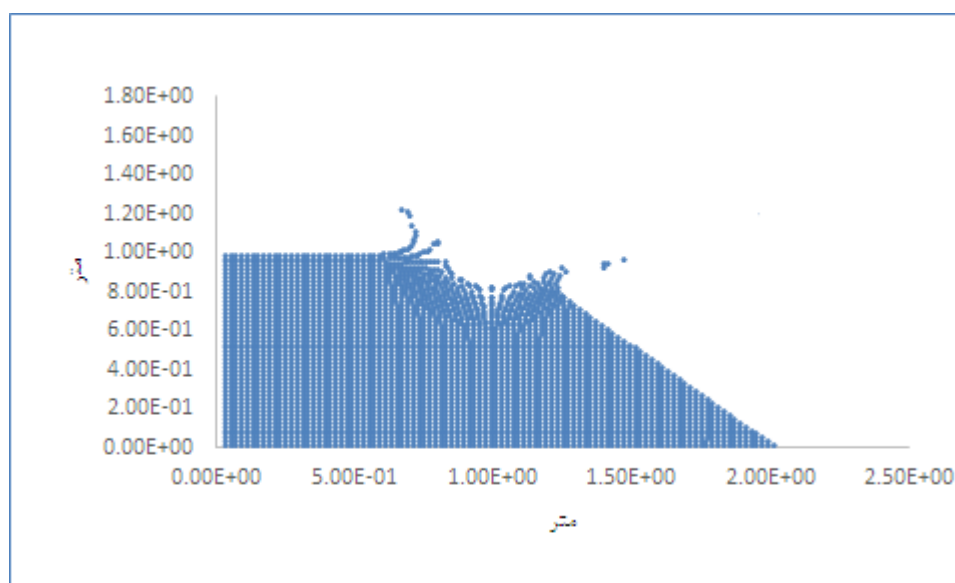
شکل ۵- ۵۱- تشکیل چاله انفجاری روی شیروانی خاکی در زمان ۵۰ میکرو ثانیه



شکل ۵- ۵۲- تشکیل چاله انفجاری روی شیروانی خاکی در زمان ۱۰۰ میکرو ثانیه



شکل ۵-۵۳- تشکیل چاله انفجاری روی شیروانی خاکی در زمان ۲۰۰ میکرو ثانیه



شکل ۵-۵۴- تشکیل چاله انفجاری روی شیروانی خاکی در زمان ۴۰۰ میکرو ثانیه

### ۵-۳-۴- بررسی چاله انفجار در روی سطح خاک زیر آب

در این مثال به بررسی انفجار در زیر سطح آب و بر روی خاک اشباع پرداخته شده است. ابعاد مدل  $1 \times 1^m$  فرض شده است. تعداد ذره با فاصله  $1 \times 1^{cm}$  و به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده و ماده منفجره تی ان تی به ابعاد  $4 \times 4^{cm}$  در روی سطح و مرکز خاک اشباع و در زیر آب قرار داده شده است. ضخامت لایه ماسه ای اشباع ۸۰ سانتی متر و ضخامت لایه آب فوقانی آن ۲۰ سانتی متر

فرض شده است. طول هموار سازی اولیه برابر با فاصله اولیه بین ذرات در نظر گرفته شده است. برای آب از معادله حالت ارائه شده در رابطه های (۴-۴۰) و (۴-۴۱) و برای خاک از معادله حالت ارائه شده در رابطه (۴-۴۲) استفاده شده است. مدل مقاومتی تنها برای خاک در نظر گرفته شده می شود. مشخصات مورد استفاده برای آب و خاک ماسه ای اشباع در جداول (۵-۵) و (۵-۶) داده شده است. مدول برشی و سرعت صوت در خاک اشباع مورد نظر نسبت به خاک های خشک در نظر گرفته پائین تر است.

جدول ۵-۵- پارامترهای مورد استفاده در معادله حالت آب [1]

$\rho_o(kg/m^3)$	$C_o$	$a_1(pa)$	$a_2(pa)$	$a_3(pa)$	$b_o$	$b_1$	$e_o(j/kg)$
۱۰۰۰	۱۴۸۰	$۲/۱ \times ۱۰^۹$	$۹/۲۲۴ \times ۱۰^۹$	$۸/۷۶ \times ۱۰^۹$	۰/۴۹۳۴	۱/۳۹۳	۳۵۷/۱

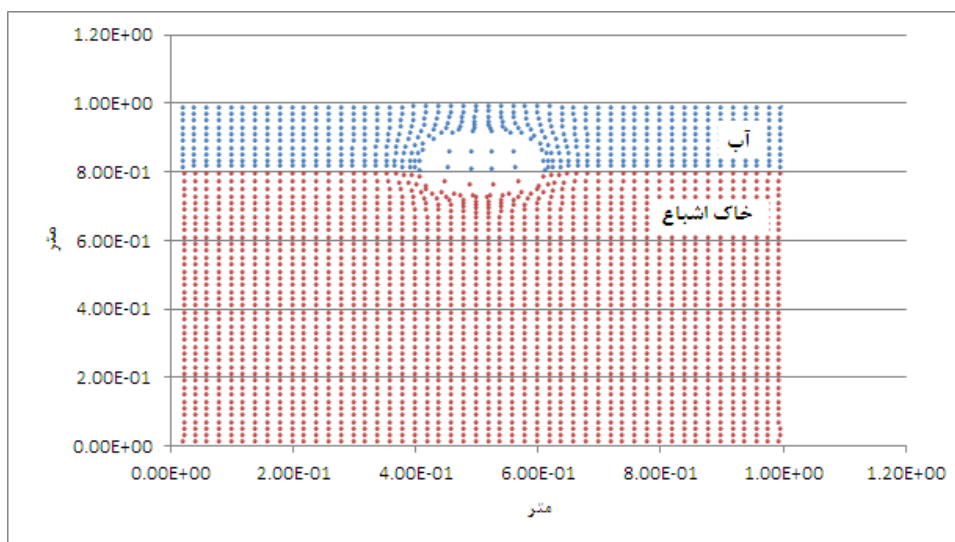
جدول ۵-۶- پارامترهای مورد استفاده برای خاک اشباع

$\rho_o(kg/m^3)$	$C_o(\frac{m}{s})$	$\Gamma$	$G(MPa)$	$S$	$\alpha$	$k$	
۱۸۴۰	۳۲۰	۰,۱۱	۲۰	۴/۹۲	۰/۲۵	۰/۲	خاک اشباع

تفاوت عمده انفجار در خاک با انفجار در زیر آب دینامیک هسته گازی حاصل از احتراق ماده منفجره (حباب) است. این هسته‌ی گازی پرفشار، به سرعت منبسط می‌گردد. چون فشار آن بسیار بیشتر از فشار آب یا هوای پیرامونش است. در انفجارهای معمولی (انفجار در هوا) با در انفجار زیر آب، به محض احتراق کامل ماده منفجره، طی یک واکنش بسیار سریع مواد جامد به گاز تبدیل شده و پس از گذشت چند میکروثانیه، اولین امواج شوک تولید می‌گردد. سرعت در نزدیکی ماده منفجره به مراتب بیشتر از سرعت انتشار صوت در محیط سیال خواهد بود. پس از انتشار موج شوک، محصولات گازی انفجار با یک نرخ تدریجی کاهنده، رو به بیرون منبسط شده و باعث ایجاد ضربه می‌گردند. فشار بالای اولیه در حباب گاز با گذشت زمان 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 لایه‌ی مرزی (حباب)

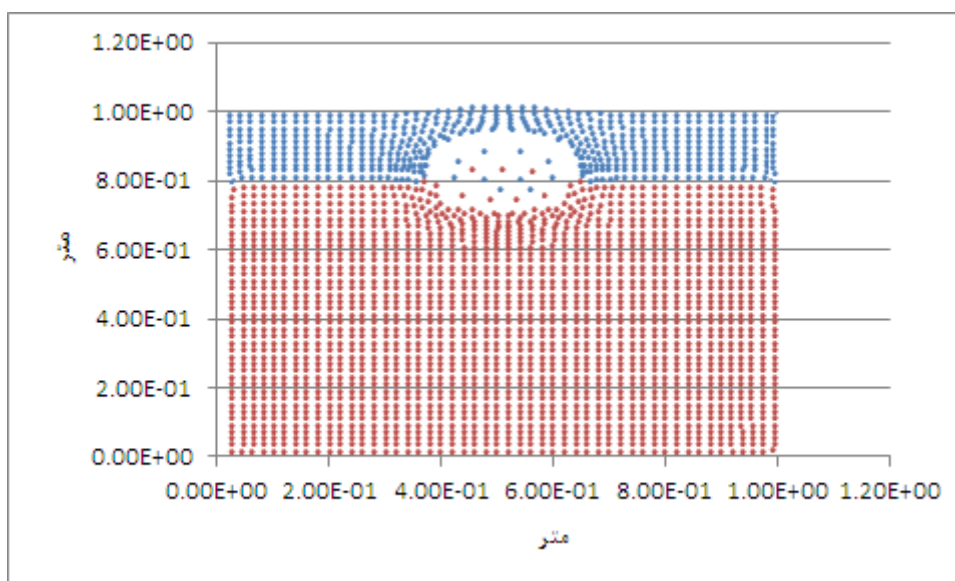
به سیال مجاورش وارد می‌کند، آب اطراف حباب سرعت زیادی به سمت بیرون پیدا کرده و قطر حباب به سرعت افزایش می‌یابد. انبساط برای یک‌زمان نسبتاً طولانی ادامه می‌یابد و فشار داخلی حباب گاز به تدریج کاهش می‌یابد. اما به دلیل اینرسی ذاتی آب، حرکت کماکان ادامه می‌یابد. فشار گاز در زمان‌های بعدی به کمتر از مقدار تعادل افت می‌کند و این کمبود فشار موجب توقف حرکت رو به بیرون حباب می‌گردد و حباب با سرعت شروع به انقباض (حرکت رو به درون) می‌کند. حرکت روبه‌داخل تا موقعی ادامه می‌یابد که قابلیت تراکم‌پذیری گاز - که در مرحله‌ی انبساط حباب کم‌اهمیت و ناچیز است - به صورت یک مانع قوی عمل کرده تا حرکت به‌طور ناگهانی برعکس شود. لذا اینرسی آب و خواص گاز و آب، شرایط لازم را برای یک سیستم نوسانی فراهم می‌کند و حباب در حقیقت سیکل‌های تکراری انبساط و انقباض را به خود می‌بیند.

شکل‌های (۵-۵۵) تا (۵-۵۸) نحوه انفجار و شکل‌گیری چاله انفجار در زیر آب را در زمان‌های متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های ارائه شده مشخص است، با افزایش زمان قطر و عمق چاله افزایش یافته و همچنین حباب ناشی از انفجار در آب نیز به سمت بالا گسترش می‌یابد. مطابق شکل (۵-۵۵)، حباب انفجار در آب و چاله انفجاری در خاک شکل گرفته و در حال گسترش می‌باشد. در زمان ۱۰۰ میکروثانیه هنوز موج انفجار به سطح آب نرسیده است و قطر چاله انفجاری حدود ۲۲ سانتی‌متر می‌باشد.



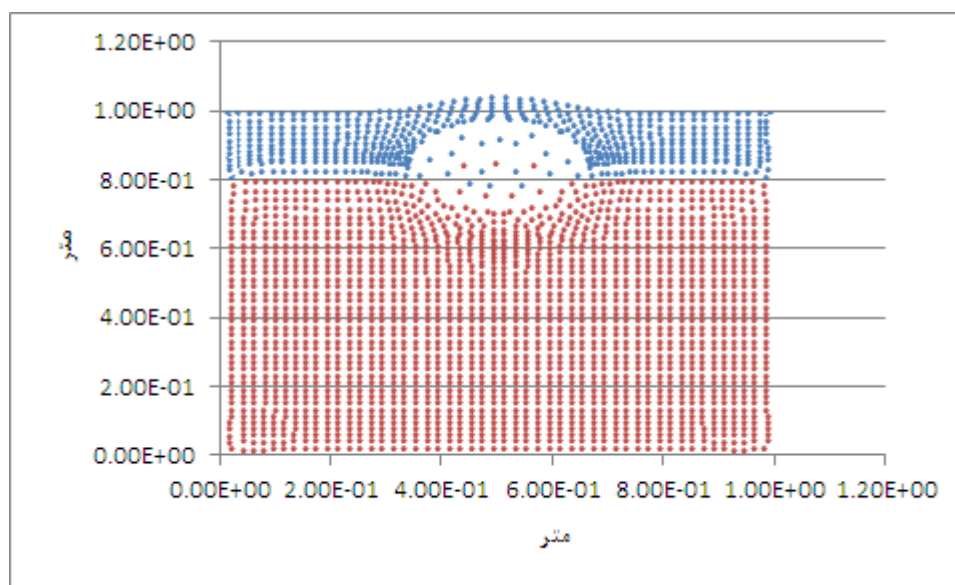
شکل ۵-۵۵- انفجار روی خاک اشباع در زیر آب در زمان ۱۰۰ میکرو ثانیه

در زمان ۱۵۰ میکروثانیه موج انفجار مطابق شکل (۵-۵۶) باعث ایجاد تغییرات در سطح آب می گردد. در این زمان، عمق چاله انفجاری در حدود ۱۰ سانتی متر و قطر حباب شکل گرفته حدود ۱۸ سانتی متر می باشد. مشاهده می شود که قطر حباب شکل گرفته بیش از عمق چاله می باشد و سطح آب حدود ۳ سانتی متر بالا آمده است. در چاله انفجاری شکل گرفته ذرات آب و خاک داخل یکدیگر نفوذ می نمایند.

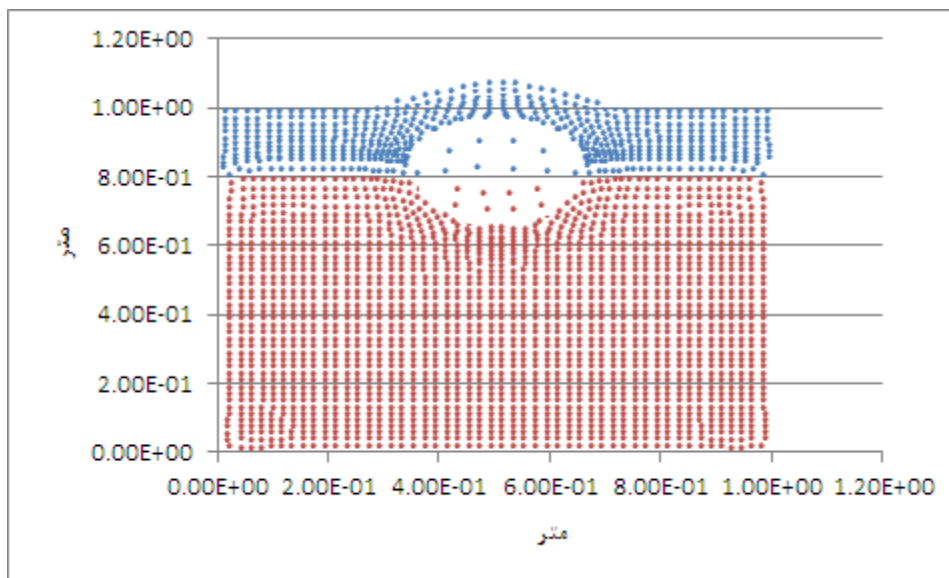


شکل ۵-۵۶- انفجار روی خاک اشباع در زیر آب در زمان ۱۵۰ میکرو ثانیه

همچنین در زمان های پس از ۲۰۰ میکروثانیه (شکل ۵-۵۷)، ذرات اطراف چاله انفجاری وارد مرحله پلاستیک شده و خاک دچار گسیختگی می گردد. تغییرات سطح آب افزایش یافته و حباب انفجار در حال انبساط می باشد. در شکل (۵-۵۸) چاله انفجاری تقریباً شکل گرفته و عمق و عرض چاله انفجاری ایجاد شده به ترتیب ۱۲ و ۳۳ سانتی متر می باشد که نسبت به ابعاد چاله انفجاری در خاک های خشک مورد بررسی در بخش (۵-۳-۱) و برای ماده منفجره یکسان، کوچکتر است. کوچک تر شدن چاله انفجاری در خاک اشباع به علت فشار آب موجود در آن می باشد. در خاک خشک ابعاد چاله انفجاری بیش از چاله ایجاد شده در خاک اشباع می باشد.



شکل ۵-۵۷- انفجار روی خاک اشباع در زیر آب در زمان ۲۰۰ میکروثانیه



شکل ۵-۵۸- انفجار روی خاک اشباع در زیر آب در زمان ۳۰۰ میکرو ثانیه



فصل ششم

## نتیجه‌گیری و پیشنهادها

## ۶-۱- نتیجه‌گیری

در این رساله با استفاده از زبان برنامه‌نویسی فرترن، انفجار در خاک با استفاده از روش عددی بدون شبکه SPH مدل‌سازی شده است. بدین منظور بر اساس الگوریتم ارائه‌شده، معادلات حرکت در محیط خاک با در نظر گرفتن اندرکنش بین ماده منفجره و خاک، با استفاده از روش لیپ فراگ حل می‌گردند. برای معتبر سازی مدل‌سازی انجام‌شده، مقادیر فشار به‌دست‌آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است که مطابقت مناسبی دارد. بر اساس تحلیل‌های انجام شده می‌توان نتایج زیر را ارائه نمود:

۱- تعداد ذرات برای مدل‌سازی باید به نحوی انتخاب شود که شکل چاله انفجاری به صورت مناسب ارائه نماید. بنا بر بررسی‌های انجام شده در صورتی که تعداد ذرات بین  $100 \times 100$  و  $50 \times 50$  در نظر گرفته شود، حجم محاسبات و نتایج خروجی قابل قبول و مناسب می‌باشد. تعداد ذرات کمتر از این مقدار، شکل چاله انفجار را با دقت مناسب ارائه نکرده و دقت را پایین می‌آورد. تعداد ذرات بیشتر از این محدوده نیز تنها باعث افزایش زمان حل می‌گردد.

۲- در معادلات حرکت باید لزجت مصنوعی برای جلوگیری از ناپایداری‌های عددی موردنظر قرار گیرد. در صورتی که لزجت مصنوعی در معادلات حرکت در نظر گرفته نشود، ناپایداری عددی ایجاد شده و جواب‌های نادرست ارائه می‌گردند.

۳- طول هموارسازی یکی از پارامترهای مهم در روش بدون شبکه SPH است. طول هموارسازی باید به‌صورت متغیر با زمان و چگالی نقاط فرض گردد، در صورتی که طول هموارسازی در مسئله انفجار به‌صورت ثابت فرض شود، در فواصل نزدیک به مرکز انفجار نمی‌توان به نتایج قابل‌قبولی دست‌یافت. مقدار اولیه طول هموارسازی برابر با فاصله اولیه بین ذرات تا  $1/2$  برابر فاصله اولیه بین ذرات فرض می‌گردد. این مقدار علاوه بر ارائه نتایج منطقی و درست، زمان حل برنامه را نیز کاهش می‌دهد. در صورتی که طول هموارسازی اولیه بیش از این مقادیر فرض گردد، حجم محاسبات و زمان حل برنامه بسیار بالا رفته ولی در جواب‌های ارائه شده تاثیر چندانی نمی‌گذارد.

۴- برای در نظرگیری اندرکنش بین ماده منفجره و خاک، 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. تغییر در این ضرایب می‌تواند باعث ناپایداری های عددی گردد.

۵- با توجه به اینکه روش‌های بدون شبکه، عملکرد مناسبی در مقابل ضربات شدید و فشارهای بالا دارند، نتایج را در فواصل نزدیک تر 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.

۶- پارامترهای ورودی مانند سرعت صوت و انرژی داخلی خاک به صورت مستقیم بر روی فشار ذرات تاثیر داشته و در نتیجه باید با دقت مناسبی وارد گردند.

۷- مقادیر حداکثر فشار تولیدی در خاک متراکم با فرض ثابت بودن مقدار ماده منفجره، بیشتر از مقادیر به دست آمده برای خاک سست می‌باشد. علت این مسئله بیشتر بودن سرعت صوت و چگالی خاک متراکم نسبت به خاک سست می‌باشد.

۸- از بررسی چاله‌های انفجاری نتیجه‌گیری می‌شود که با افزایش مقدار ماده منفجره، عمق و قطر چاله نیز افزایش می‌یابد. شکل‌گیری چاله‌ها نیز در همان زمان‌های بسیار کوتاه اولیه کامل شده و پس از آن با گذشت زمان، بقیه خاک‌های اطراف وارد مرحله پلاستیک و گسیختگی می‌گردند. همچنین ابعاد چاله انفجاری در خاک متراکم نسبت به مقادیر مشابه مواد منفجره، کاهش یافته است که علت آن را می‌تواند بیشتر بودن سختی خاک متراکم باشد.

۹- بررسی و مدل‌سازی چاله‌های انفجاری در خاک دولایه بیانگر این نکته است که قطر چاله انفجاری ایجاد شده به مشخصات لایه فوقانی وابسته بوده و مستقل از مشخصات لایه پایینی خاک عمل می‌کند، حال آنکه ارتفاع چاله انفجاری ایجاد شده به مشخصات خاک لایه پایینی وابسته بوده و با تغییر ضخامت لایه، عمق چاله نیز تغییر می‌نماید. به طوری که اگر سختی خاک لایه پایینی بیش از سختی

خاک بالایی باشد، مقدار ارتفاع چاله انفجاری نسبت به حالتی که خاک یک‌لایه با سختی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است، کاهش می‌یابد.

۱۰- در حالت انفجار در خاک اشباع زیر آب، حباب انفجار باعث ایجاد تغییرات در سطح آب گشته و نسبت گسترش حباب انفجار در آب بیشتر از خاک اشباع می‌باشد. همچنین ابعاد چاله انفجاری در خاک اشباع نسبت به خاک خشک با ماده منفجره یکسان کمتر می‌باشد.

## ۶-۲- پیشنهادها برای ادامه مطالعه

با توجه به اینکه موضوع بررسی انفجار در خاک و چاله‌های انفجاری با روش SPH، موضوع جدیدی می‌باشد، می‌توان بررسی‌های بیشتری نیز بر روی آن انجام داد که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد:

۱- توابع وزن متفاوت بر روی م‌ساله انفجار مورد مطالعه قرار گرفته و تابع وزن بهینه برای انفجار

در خاک تعیین گردد

۲- انفجار در خاک‌های اشباع و چاله‌های انفجاری ناشی از آن بررسی گردد.

۳- پدیده روانگرایی در اثر بارگذاری انفجار در خاک‌های اشباع بررسی شود.

۴- انفجار بر روی شیروانی‌های خاکی مورد مطالعه قرار گرفته و تأثیر آن بر پایداری شیب‌ها بررسی گردد.

۵- چاله‌های انفجاری در انفجارهای زیرزمینی بررسی شده و پدیده قیف انفجار بررسی گردد.

۶- اندرکنش بین خاک و سازه‌ها در اثر انفجار بررسی شود.

لازم به ذکر است با توجه به متفاوت بودن خصوصیات خاک‌ها داده‌های آزمایشگاهی بسیار می‌تواند مفید باشد و در صورت فراهم شدن شرایط برای مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی انفجار زمینه تحقیق بسیار وسیع‌تر خواهد بود.



1. Liu G.R , Liu M.B(2003),“**Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method**”;World Scientific Publishing,PP.473.
۲. داریان اس، جلیلی س(۱۳۹۱)، "مهندسی ضربه و انفجار با آموزش نرم افزار **Autodyne**"، چاپ اول، انتشارات مهندسیین داریان.
3. Liu G.R , Gu Y.T(2005), "**AN INTRODUCTION TO MESHFREE METHODS AND THEIR PROGRAMMING**", Springer, Netherlands,PP.496.
4. Zhongqi Wang, Yong Lu,Hong Hao.Karen chong(2005),”A full coupled numerical analysis approach for buried structures subjected to subsurface blast”, **Comput Struct**,, 83,PP 339-356.
5. Lucy L.B (1977),”Numerical approach to testing the fission hypothesis”, **Astron. J**, 82,pp 1013-1024.
6. Monaghan JJ(1992),”**Smoothed particle hydrodynamics:Annual Review of Astronomical and Astrophysics**",30:PP 543-574.
7. Kordilla J(2014), Ph.D. thesis, "**Flow and Transport in Saturated and Unsaturated Fractured Porous Media: Development of Particle Based Modelling Approach**",Universitat.
8. Liu M.B,Liu G.R and Lam K.Y(2003),”Constructing smoothing functions in smoothed particle hydrodynamics with applications” **J Comput Appl Math**,155,2,PP:263-284.
9. Johnson G.R and Beissel S.R(1996),”Normalized smoothed functions for SPH impact computations”, **INT J NUMER METH ENG** ,39 PP:2725-2741
10. Chen JK, Beraun J.E, Jih CJ(1999),”A Corrective smoothed particle method for boundary value problems in Heat conduction”, **Comput Methods Appl Mech Eng**,46 PP:231-252.
- 11 . Liu M.B,Liu G.R ,Lam K.Y, Zong Z(2003), "Smoothed particle hydrodynamics for numerical simulation of underwater explosion", **Comput Mech**,,30,PP 106-118.
12. Benz W. (1989), "**Smoothed particle hydrodynamics: a review**", NATO Workshop,Les; Arcs, France.

13. Nelson RP and Papaloizou John C.B(1994).”**Variable Smoothing length and energy conservation in smoothed particle hydrodynamics**”, Monthly Notices of Royal Astronomical society, 270,PP:1-20.
14. Liu G.R, Liu M.B and Lamky(2002),”A general approach for constructing smoothing function for mesh free Methods”, Proceedings of the 9 th International conference on computing in civil and building engineering.PP 431-436,Taipei,Taiwan.
15. Smith,P.D and Hetherington JG(1994).”**Blast and Ballistic loading of structures**”.Butterworth Heinemann, CRC Press,1,PP:336.
۱۶. مقررات ملی ساختمان. مبحث بیست و یکم. پدافند غیرعامل ویرایش ششم ۱۳۸۸
17. Bulson, P.S(2003),”**Explosive loading of engineering structures**”,an imprint of champan & hall.
18. Stoner R,G and Bleankey W(1948).”The attenuation of spherical shock waves in air”,**Jor appl.phys**,19,7,670.
19. Kennedy WD(1946).” **Explosion and explosives in Air**” In effect of impact and explosion ,summery tech.Rep DW2,NRDC,Washington,Vol 1,chap 2.
20. Kingery,C N(1968).”**Parametric Analysis of sub-kiloton Nuclear and high explosive blast** “ BRL Report 1393,Aberdeen proving Ground,Maryland USA.
21. Lampson CW(1946)” **Effect of impact and explosions** “, Explosions in Earth NRDC Washington ,USA, Vol1, chapter 3.
22. Chadwic P,Cox A.D and Hopkins MG(1964).”**Mechanics of deep underground explosions**”, Phil.Trans.Roy soc,series A,No. 1069,VOL 256,April.
23. Christopherson DG(1946).” **Structural Defense** “, UK Ministry of security , Research and experiments Department, Rc 450.
24. Lampson CW(1946),”**Effect of impact and explosions explosion in earth**”, Summery tech.Dept DW 2,NRDC Washington USA,VOL 1, Chapter3.
25. Penny and Dasgupta H.K(1942), British Report ,RC 333.
26. Kirkwood JG and Brinkley SR(1945).”**Theory of the propagation of shock waves from explosive sources in Air and Water**” US OSRD Report 4814.
27. Herring(1941),”**Theory of the Pulsation of the gas bubble producedby an underwater explosions**”.US NRDC Division 6.Report C4-SR 20.
28. Hans, U. M(1999), “Review: 27.Hydrocodes For Structure Response to Underwater Explosion”; **J. Shock VIB**, 6, 81-96.

29. Sprague, M.A.; Geers, T.(2006) “A Spectral element/Finite element Analysis of ship-like Structure Subjected to Underwater Explosion”; **J. COMPUT METHOD APPL M**, 195, 2149-2167.
30. Kobashi,W.; Matsou, A. (2006) “Explosion Simulation by Smoothed Particle Hydrodynamics”; **J. COMPUT MECH**, 1397-1403.
31. Zhang,A.man.;Yang,Wen-Shan.;YaoXiong-liong(2012). “Numerical Simulation of Underwater Contact Explosion”; **APPL OCEAN RES**,34, 10-20.
32. Christian Kaurin, Magnus olaf Varslot(2010),”**Blast loading on square steel plates**”,Master thesis,Institutt for konstruksjonsteknikk.
33. Wei X.Y, Zhao Z.Y , GU J(2009)” Numerical simulation of Rock mass damage induced by under Ground explosion”, **Int. J. Rock Mech. Min. Sci**,46, PP 1206-1213.
34. Lio H(2009),”**Dynamic Analysis of subway Structures under Blast loading**”,Department of Civil engineering, The city collage of New York,NY 10031,USA
35. Zhongqi Wang, Yong Lu,Hong Hao.Karen chong(2005),”A full coupled numerical analysis approach for buried structures subjected to subsurface blast”, **Comput Struct**, 83,PP 339-356.
36. Wang Z, Lu Y, Bai C(2011),”Numerical simulation of explosion- induced soil liquefaction and its effect on surface structure”, **Finite Elem Anal Des**,47 PP:1079-1090.
37. Anirban De(2012),”Numerical Simulation of surface explosions over dry,cohesionless soil”,Elsivier LTD, **COMPUT GEOTECH** ,43:PP:72-79.
38. Ji Chong An (2010), PHD thesis,”**Soil behavior under blast loading**”, university of Nebraska.
39. R.D. Ambrosini, RD., B. Luccioni, R. Danesi, J. Riera and M. Rocha (2002). "Size of Craters Produced by Explosive Charges on or Above the Ground Surface". **Shock Waves**, 12(1):PP.69-78.
40. LuccioniMB, Ambrosini RD.(2006), "Craters Produced By Underground Explosion",**Mecanica Computational**, XXV: PP. 1603-1614.
41. Nagy N.M (2015)" Numerical Evaluation Of Cratores Produced By Explosion On The Soil Surface". **Acta .Phys.Pol.A** 128.



۴۲. امام زاده ش و پوربھی م(۱۳۸۵)، "مروری بر روشهای مدل سازی عددی انفجار زیر آب و اثر آن بر سازه های دریایی"، هفتمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی، تهران، سازمان بنادر و کشتی رانی

۴۳. موسوی س، زمانی ج، علوی نیا ع(۱۳۸۵)، " شبیه سازی عددی انفجار بر روی دال های بتنی"، مواد پر انرژی، شماره ۲، دوره ۱، صفحه ۵۱ تا ۵۸.

۴۴. کریمی فرزقی ب، نادری ر،(۱۳۹۴) "مقایسه روش عددی بدون شبکه SPH و دیدگاه های اولیه و لاگرانژی در مدل سازی انفجار در آب"، مجله علوم و فن آوری های پدافند نوین، جلد ۶ شماره ۳ صفحات ۱۸۳-۱۹۱.

۴۵. کلاته ف، فانی ر(۱۳۹۵) "مدل سازی رفتار دینامیکی مخازن هوایی ذخیره سیال تحت بار انفجاری"، مواد پر انرژی جلد، ۱۱، شماره ۴، صفحات ۶۷-۸۰.

۴۶. کریمی فرزقی ب، نادری ر(۱۳۹۶) "مدل سازی عددی انفجار در آب با استفاده از روش بدون شبکه ذرات هموار ساز"، مجله علوم و فن آوری های پدافند نوین، جلد ۸ شماره ۲ صفحات ۱۶۱-۱۶۹.

47. Fulk D.A. (1994), PhD. Thesis, "A numerical analysis of smoothed particle hydrodynamics", Air Force Institute of Technology.

۴۸. امانی فرد ن (۱۳۸۹)، "آشنایی با روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) و کاربردهای آن"، جلد اول، چاپ اول، انتشارات دانشگاه گیلان.

49. Campbell P. M. (1989), "Some new algorithms for boundary values problems in smoothed particle hydrodynamics", DNA Report, DNA-88-286.

50. Libersky L. D., Petscheck A. G, Carney T. C, Hipp J. R. and Allahdadi F. A.(1993), "High strain Lagrangian hydrodynamics-a three-dimensional SPH code for dynamic material response", **J. Comput. Phys.**,109: 67-75.

51. Randies P. W. and Libersky L. D. (1996), "Smoothed particle hydrodynamics some recent improvements and applications", **Comput Methods Appl Mech Eng**, 138:375-408.

52. Monaghan J. J. (1985), "Particle methods for hydrodynamics", Computer Physics

Report, 3:71-124.

53. Crespo A,j(2008), Ph.D. thesis, "Application of the Smoothed Particle Hydrodynamics Model SPHsics to Free-Surface Hydrodynamics" Universidade de vigo Departamento de fisica Aplicada.

54. Wang Z, Lu Y, Bai C (2008)" Numerical Analysis Of Blast-Induced Liquefaction Of Soils" . **Comput Geotech**, 35:196-209.

55. Wang Z, Lu,Y, Hao H ,ChongK(2005), "A Full Coupled Numerical Analysis Approach For Buried Structures Subjected To Subsurface Blast" . **Comput Struct**, 83:339-356.

56. Baker W E,Westine P S, Dodge F T (1991) ,"Similarity methodes In Engineering Dynamics", Elsevier Science.

## **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 test, numerical models is used to analyze this phenomenon. Using the smooth particle hydrodynamics,SPH methodology avoids disadvantages of traditional numerical methods in treating large deformations in the extremely transient explosion process. Since explosion crater in soil is an important problem and most of the studies are experimental, this thesis 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 SPH methodology. The craters, pressure caused by explosion in soil and soil surface changes are studied for two types of soil with different properties. Each type of soil, studied for different explosive loading with different dimensions.

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, soil slope and explosion on the saturated soil and underwater is studied. This code can be used for modeling of soil explosion and craters.

According to the obtained results, it is concluded that the maximum explosion pressure in dense soil is more than loose soil. Also the arrival time to the maximum pressure reduced for condense soil because the sound speed and density in dense soil is more than loose soil. In both type of soil, increasing the explosive load, resulted more pressure and bigger crater is constructed.

Craters dimension in condense soil is less than loose soil. For two layer soil, if the looser soil supposed as the upper layer, the crater dimension decreased in height and constant in width. Also the craters in soil slopes. The explosion on the saturate soil which is under water shows that the explosion bubble in the water is greater than saturated soil.

**Keywords:** soil Explosion,craters,Numerical Modeling, SPH, meshless methods





**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Civil Engineering**

P.h.D. thesis in Geotechnical Engineering

**Numerical Explosion Modelling in Granular Soils  
Using Smooth Particle Hydrodynamic Method**

By: Behnam Karimi Ferezghi

Supervisor:  
Dr Reza Naderi

September 2017