

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

ر

دانشکده فنی مهندسی
گروه مهندسی عمران

پایان نامه
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
مهندسی عمران - سازه

مدلسازی عددی انتشار امواج انفجار به روش (SPH)

اساتید راهنما: دکتر سهیل محمدی و دکتر نادر عبدلی

استاد مشاور: مهندس صفا پیمان

۱ / ۷ / ۱۳۸۸

پژوهش و نگارش: امیر جمشیدزاده

آموزشگاه عالی مهندسی عمران
تهران

مهر ماه ۱۳۸۷

۱۲۶۸۷۸

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

مظهر شکیبایی و صبر

و

اسوه ایثار و خدمت به خلق

سپاسگزاری

سپاس و ستایش پروردگار مهربان را که توفیق ارزانی فرمود تا رساله حاضر آماده گردد. با کمال میل خرسندم تا مراتب امتنان خود را به استاد بزرگوارم، جناب آقای دکتر محمدی، بواسطه حمایت‌های بی دریغ و راهنمایی‌های ارزنده‌شان، تقدیم نمایم.

همچنین مراتب سپاسگزاری خود را از اساتید بزرگوار، جناب آقایان دکتر عبدلی و دکتر رحیمی و مهندس پیمان که سهم بسزایی در پیشرفت علمی اینجانب داشتند را تقدیم حضورشان نمایم. در اینجا وظیفه خود می‌دانم که صمیمانه تشکر و قدردانی خود را نسبت به زحمات دلسوزانه پدر و مادر عزیزم اعلام نمایم که بیش از همه مصائب و سختی‌هایی را در راستای تکمیل این رساله متحمل گردیده‌اند.



مدیریت تحصیلات تکمیلی

صور تجلسه دفاعیه پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

جلسه دفاعیه پایان نامه تحصیلی آقای امیر جمشیدزاده

دانشجوی کارشناسی ارشد مجتمع فنی مهندسی دانشگاه یزد، در رشته / گرایش : عمران - سازه

تحت عنوان «مدل سازی عددی انتشار امواج انفجار به روش (S.P.H)»

و تعداد واحد: ۶ در تاریخ ۱۳۸۷/۷/۲۵

امضاء

نام و نام خانوادگی

با حضور اعضای هیات داوران متشکل از :

دکتر سهیل محمدی - دکتر نادر عبدلی

۱- استاد راهنما

مهندس صفا پیمان

۲- استاد مشاور

دکتر حسینعلی رحیمی

۳- داور خارج از گروه

دکتر علیرضا شفیعی

۴- داور داخل گروه

تشکیل گردید و پس از ارزیابی پایان نامه توسط هیات داوران ، با درجه ۲ و نمره

مورد تصویب قرار گرفت.

به عدد ۱۸/۵ به حروف هجده و ۵/۱۰

نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه (ناظر)

نام و نام خانوادگی: دکتر محمدجواد صراف

امضاء:

چکیده

در این تحقیق مروری بر پدیده انفجار، انتشار امواج انفجاری و معادلات حاکم بر آنها می‌گردد و سپس به معرفی روشهای بدون مش، روش های ذرات متحرک و بررسی خواص آنها از دیدگاه عددی پرداخته و روش ذرات متحرک استاندارد SPH به عنوان روشی مناسب برای تحلیل مسائل درگیر با سرعت بارگذاری زیاد نظیر انفجار انتخاب گردیده است.

بروز خطاهای عددی در مسأله انتشار موج در محیط دو بعدی سیال به صورت ارتعاشات زائد با فرکانس بالا در میدان سرعت، زمینه ساز انجام مطالعات بر روی ریشه خطاهای عددی و نحوه کنترل آن توسط روش های مختلف مانند اعمال ویسکوزیته مصنوعی گردید. در این راستا با توجه به نوع ناپایداری که ریشه در افزایش شدید سرعت در مسائل مربوط به انفجار می باشد، روش پایداری با استفاده از هموارسازی میدان سرعت انتخاب گردیده است و در ادامه توانمندی این روش پایداری با حل مثالهایی نشان داده شده است.

در بخش پایانی تحقیق، الگوریتمهای تهیه شده برای تحلیل فرایند انتشار موج انفجار در محیط گاز بر مبنای روش ذرات متحرک و پایداری مزبور ارائه گردیده است.

لغات کلیدی: SPH، انفجار، مدلسازی، انتشار، امواج

فهرست مطالب

فصل اول - بررسی پدیده انفجار.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۱
۲-۱- تعریف انفجار.....	۲
۳-۱- امواج انفجار ناشی از مواد انفجاری.....	۲
۴-۱- معادلات موج انفجار برای خرج های استوانه ای.....	۴
۱-۴-۱- محیط داخل خرج.....	۴
۲-۴-۱- محیط خارج از خرج.....	۱۰
۵-۱- پارامترهای جبهه موج انفجار.....	۱۱
۶-۱- دیگر پارامترهای مهم موج انفجار.....	۱۶
۷-۱- نمودارهای فشار موج انفجار.....	۱۹
۸-۱- اندرکنش امواج انفجار.....	۲۱
فصل دوم- روش های بدون مش.....	۲۴
۱-۲- مقدمه.....	۲۴
۲-۲- روش های ذرات.....	۲۶
۱-۲-۲- روش های ذرات متحرک، قابلیتها و اشکالات.....	۲۶
فصل سوم- روش ذرات متحرک استاندارد (SPH).....	۲۹
۱-۳- مقدمه.....	۲۹
۲-۳- اساس روش ذرات متحرک استاندارد SPH.....	۳۰
۱-۲-۳- تقریب ذره.....	۳۲
۲-۲-۳- دامنه هموارسازی.....	۳۳

۳-۲-۳- توابع وزن	۳۵
۳-۳- محاسبه مقدار مشتق اول تابع با استفاده از روش SPH	۳۷
۴-۳- محاسبه مقدار مشتق مراتب بالاتر با استفاده از روش SPH	۴۰
۵-۳- عملیات درون یابی مقدار تابع با استفاده از روش SPH	۴۱
۳-۵-۱- صحت سنجی تاثیر انتخاب تابع وزن در دقت عملیات درون یابی مقدار تابع با استفاده از روش SPH	۴۸
۳-۶- برآورد مشتق مرتبه اول تابع با استفاده از روش SPH	۴۹
۳-۷- برآورد مشتق مرتبه اول تابع نسبت به متغیرهای مستقل با استفاده از روش SPH	۵۳
۳-۸- شرط سازگاری	۵۴
۳-۹- اساس روش ذرات متحرک اصلاح شده CSPM	۵۵
فصل چهارم- کاربرد روش ذرات متحرک استاندارد در سیالات	۶۰
۴-۱- مقدمه	۶۰
۴-۲- معادلات حاکم بر سیالات	۶۱
۴-۳- معادلات اویلر برنولی	۶۲
۴-۴- معادلات حالت	۶۳
۴-۵- ذرات متحرک استاندارد SPH برای مسایل سیالات	۶۴
۴-۶- نارسایی های روش ذرات متحرک استاندارد و روش های بهبود آن	۶۸
۴-۶-۱- عدم دقت در اعمال شرایط مرزی	۶۸
۴-۶-۲- ناپایداری های روش ذرات متحرک	۷۰
۴-۷- روش ویسکوزیته مصنوعی	۷۰
۴-۸- روش هموارسازی برای پایدارسازی	۷۱

۷۲.....	۴-۸-۱- پایدارسازی با استفاده از هموارسازی میدان سرعت.....
۷۳.....	۴-۹- الگوریتم SPH برای مسائل دینامیک گاز.....
۷۵.....	فصل پنجم- مدلسازی انتشار امواج انفجار با روش SPH.....
۷۵.....	۵-۱- مقدمه.....
۷۵.....	۵-۲- مساله یک بعدی لوله شوک.....
۷۶.....	۵-۲-۱- حل مساله لوله شوک با استفاده از روش ذرات متحرک استاندارد SPH.....
۷۹.....	۵-۳- مدلسازی انتشار امواج انفجار با استفاده از روش SPH.....
۷۹.....	۵-۳-۱- انفجار در خلاء.....
۸۰.....	۵-۳-۲- حل مساله دو بعدی انتشار امواج در خلاء با استفاده از روش SPH.....
۸۱.....	۵-۳-۳- صحت سنجی بهنگام کردن طول گام زمانی در پایدارسازی.....
۸۴.....	۵-۳-۴- صحت سنجی بهنگام کردن میدان سرعت در پایدارسازی.....
۹۶.....	۵-۳-۵- صحت سنجی پایدارسازی با ویسکوزیته مصنوعی.....
۱۰۰.....	۵-۳-۶- صحت سنجی تاثیر انتخاب دامنه هموارسازی.....
۱۰۲.....	۵-۳-۷- صحت سنجی مسأله ی انفجار دو بعدی در خلاء.....
۱۰۶.....	فصل ششم- دستاوردها و پیشنهادات.....
۱۰۶.....	۶-۱- جمع بندی فعالیت‌های انجام شده و نتایج حاصل.....
۱۰۶.....	۶-۱-۱- خلاصه زمینه های مطالعه.....
۱۰۷.....	۶-۲- نتایج حاصل.....
۱۰۸.....	۶-۳- پیشنهادات.....
۱۰۹.....	فصل هفتم- مراجع.....

فهرست جداول

- جدول ۱-۱- تغییرات فشار دینامیکی و استاتیکی [۴۲]..... ۱۲
- جدول ۱-۲- ضریب تبدیل انرژی مواد منفجره نسبت به TNT [۴۲]..... ۱۵
- جدول ۱-۳- ضریب تبدیل فشار و تکانه ی مواد منفجره نسبت به TNT [۴۲]..... ۱۵
- جدول ۱-۴- مقادیر پارامتر شکل موج [۴۱]..... ۲۰

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- محیط داخل خرج [۳] ۵
- شکل ۲-۱- حجم کنترل ۵
- شکل ۳-۱- بیرون از خروج ۱۰
- شکل (۴-۱) فشار دینامیکی در مقابل بیش فشار جانبی [۴۲] ۱۳
- شکل ۵-۱- سرعت جبهه موج در مقابل بیش فشار جانبی [۴۲] ۱۴
- شکل ۶-۱- اوج بیش فشار جانبی در مقابل فاصله مقیاس شده: مقایسه ای میان نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی [۴۲] ۱۶
- شکل ۷-۱- نمودار زمان - فشار موج انفجار ۱۷
- شکل ۸-۱- پارامترهای موج انفجار برای خرج های کروی TNT [۴۱] ۱۸
- شکل ۹-۱- مکش در مقابل فاصله مقیاس شده [۴۲] ۱۹
- شکل ۱۰-۱- منحنی های موج انفجار: برابری ضربه ای، محافظه کارانه، واقعی ۲۱
- شکل ۱۱-۱- انعکاس عمودی ۲۲
- شکل ۱-۲- مقایسه ارتباط بین گره ها در روش اجزاء محدود و یک روش بدون مش ۲۵
- شکل ۱-۳- تابع وزن w با دامنه تاثیر kh ۳۱
- شکل ۲-۳- ذرات موجود در دامنه هموارسازی ذره مرکزی و نحوه تخصیص مقدار وزن به آنها. ... ۳۳
- شکل ۳-۳- ذره مرکزی i با دامنه هموارسازی kh_i ۳۴
- شکل ۴-۳- ذرات با دامنه های تاثیر ۳۴
- شکل ۵-۳- تابع وزن (LUCY(1977) ۳۶
- شکل ۶-۳- تابع وزن CUBIC SPLINE و مشتق اول آن [۲] ۳۹
- شکل ۷-۳- عملیات درون یابی تابع $y = 1$ با استفاده از روش SPH با طول هموارسازی $h = 0.5$ ۴۲

- شکل ۳-۸- عملیات درون یابی تابع $y = 1$ با استفاده از روش SPH با طول هموارسازی $h = 1$ ۴۲
- شکل ۳-۹- عملیات درون یابی تابع $y = 1$ با استفاده از روش SPH با طول هموارسازی $h = 2$ ۴۳
- شکل ۳-۱۰- عملیات درون یابی تابع $y = x^2$ با استفاده از روش SPH با طول هموارسازی $h = 1$ ۴۴
- شکل ۳-۱۱- عملیات درون یابی تابع $y = \sin^2(x) + \cos(x)$ با استفاده از روش SPH با طول هموارسازی $h = 1$ ۴۴
- شکل ۳-۱۲- از بین رفتن شرط مساحت واحد زیر تابع وزن در نقاط مرزی و نزدیک مرز ۴۵
- شکل ۳-۱۳- عملیات درون یابی تابع $f(x, y) = 1$ با استفاده از روش SPH با طول هموارسازی $h = 0.5$ ۴۶
- شکل ۳-۱۴- عملیات درون یابی تابع $f(x, y) = \sin(x) + \cos(y)$ با استفاده از روش SPH با طول هموارسازی $h = 0.5$ ۴۷
- شکل ۳-۱۵- اختلاف مقادیر بدست آمده از روش SPH با مقادیر واقعی ۴۷
- شکل ۳-۱۶- عملیات درون یابی تابع $f(x) = x^2$ با استفاده از روش SPH ۴۸
- شکل ۳-۱۷- محاسبه مشتق تابع $f(x) = \sin(x)$ نسبت به متغیر x با استفاده از روش SPH با طول هموارسازی $h = 0.25$ ۴۹
- شکل ۳-۱۸- محاسبه مشتق تابع $f(x) = \sin(x)$ نسبت به متغیر x با استفاده از روش SPH با طول هموارسازی $h = 0.15$ ۵۰
- شکل ۳-۱۹- محاسبه مشتق تابع $f(x, y) = \sin(x)$ نسبت به متغیر x با استفاده از روش SPH با طول هموارسازی $h = 0.5$ ۵۱
- شکل ۳-۲۰- اختلاف مقادیر بدست آمده از روش SPH با مقادیر واقعی ۵۱
- شکل ۳-۲۱- محاسبه مشتق تابع $f(x, y) = \sin(x) \times \cos(y)$ نسبت به متغیر x با استفاده از روش SPH با طول هموارسازی $h = 0.5$ ۵۲

- شکل ۳-۲۲- اختلاف مقادیر بدست آمده از روش SPH با مقادیر واقعی. ۵۲.....
- شکل ۳-۲۳- محاسبه مشتق تابع $f(x, y) = \sin(x) \times \cos(y)$ نسبت به متغیرهای مستقل y, x با استفاده از روش SPH با طول هموارسازی $h = 0.5$. ۵۳.....
- شکل ۳-۲۴- اختلاف مقادیر بدست آمده از روش SPH با مقادیر واقعی. ۵۴.....
- شکل ۳-۲۵- استفاده از روش ذرات متحرک اصلاح شده CSPM برای کاهش خطای برآزش در مرز. ۵۶.....
- شکل ۳-۲۵- کمبود دقت عملیات درون یابی تابع $f(x, y) = x^3 + y^3$ در مرز با استفاده از روش SPH. ۵۸.....
- شکل ۳-۲۶- دقت عملیات درون یابی تابع در مرز با استفاده از روش CSPM. ۵۸.....
- شکل ۳-۲۷- کمبود دقت در محاسبه مشتق اول تابع $f(x, y) = \sin(x) \times \sin(y)$ در مرز با استفاده از روش SPH. ۵۹.....
- شکل ۳-۲۸- دقت محاسبه مشتق اول تابع $f(x, y) = \sin(x) \times \sin(y)$ در مرز با استفاده از روش CSPM. ۵۹.....
- شکل ۴-۱- حذف ارتعاشات زائد با استفاده از خاصیت هموارسازی. ۷۲.....
- شکل ۵-۱- توزیع سرعت بدست آمده از روش استاندارد SPH پس از ۰/۳ ثانیه. ۷۷.....
- شکل ۵-۲- توزیع سرعت بدست آمده از نرم افزار FLEXPDE پس از ۰/۳ ثانیه. ۷۸.....
- شکل ۵-۳- توزیع فشار بدست آمده از روش استاندارد SPH پس از ۰/۳ ثانیه. ۷۸.....
- شکل ۵-۴- توزیع فشار بدست آمده از نرم افزار FLEXPDE پس از ۰/۳ ثانیه. ۷۹.....
- شکل ۵-۵- توزیع اولیه ذرات خرج TNT و ذرات واقع در مرز آزاد. ۸۲.....
- شکل ۵-۶- توزیع ذرات پس از ۰/۰۰۷ میلی ثانیه. ۸۲.....
- شکل ۵-۷- توزیع ذرات پس از ۰/۰۰۹ میلی ثانیه. ۸۳.....

- شکل ۵-۸- توزیع ذرات پس از ۰/۰۱ میلی ثانیه..... ۸۳
- شکل ۵-۹- توزیع اولیه ذرات خرج TNT و ذرات واقع در مرز آزاد..... ۸۵
- شکل ۵-۱۰- توزیع ذرات پس از ۰/۰۱ میلی ثانیه..... ۸۵
- شکل ۵-۱۱- توزیع ذرات پس از ۰/۰۲ میلی ثانیه..... ۸۶
- شکل ۵-۱۲- توزیع ذرات پس از ۰/۰۲۵ میلی ثانیه..... ۸۶
- شکل ۵-۱۳- توزیع ذرات پس از ۰/۰۰۵۵ میلی ثانیه..... ۸۷
- شکل ۵-۱۴- توزیع ذرات پس از ۰/۰۱۳۷ میلی ثانیه..... ۸۸
- شکل ۵-۱۵- توزیع ذرات پس از ۰/۰۲ میلی ثانیه..... ۸۸
- شکل ۵-۱۶- توزیع ذرات پس از ۰/۰۲۶ میلی ثانیه..... ۸۹
- شکل ۵-۱۷- تاریخچه زمانی فشار در فاصله ۰/۰۴۴ متر از مرکز برای مدل با تعداد ذرات ۵۴۷... ۸۹
- شکل ۵-۱۸- تاریخچه زمانی فشار در فاصله ۰/۰۵ متر از مرکز برای مدل با تعداد ذرات ۱۳۸۷... ۹۰
- شکل ۵-۱۹- توزیع اولیه ذرات خرج TNT و ذرات واقع در مرز آزاد..... ۹۱
- شکل ۵-۲۰- توزیع ذرات پس از ۰/۰۶ میلی ثانیه با فرض $\frac{h'}{h} = 0.7$ ۹۲
- شکل ۵-۲۱- توزیع ذرات پس از ۰/۱ میلی ثانیه با فرض $\frac{h'}{h} = 0.7$ ۹۲
- شکل ۵-۲۲- توزیع ذرات پس از ۰/۰۰۶۴ میلی ثانیه با فرض $\frac{h'}{h} = 0.4$ ۹۳
- شکل ۵-۲۳- توزیع ذرات پس از ۰/۰۱۱ میلی ثانیه با فرض $\frac{h'}{h} = 0.4$ ۹۳
- شکل ۵-۲۴- تاریخچه زمانی فشار با فرض $\frac{h'}{h} = 0.7$ ۹۴
- شکل ۵-۲۵- تاریخچه زمانی فشار با فرض $\frac{h'}{h} = 0.4$ ۹۴
- شکل ۵-۲۶- توزیع ذرات پس از ۰/۰۱ میلی ثانیه در حالت عدم استفاده از پایدارساز..... ۹۶

- شکل ۵-۲۷- توزیع ذرات پس از $0/007$ میلی ثانیه در حالت عدم استفاده از پایدارساز ۹۷
- شکل ۵-۲۸- توزیع ذرات پس از $0/013$ میلی ثانیه در حالت عدم استفاده از پایدارساز ۹۷
- شکل ۵-۲۹- توزیع ذرات پس از $0/007$ میلی ثانیه با استفاده از پایدارساز ۹۸
- شکل ۵-۳۰- توزیع ذرات پس از $0/013$ میلی ثانیه با استفاده از پایدارساز ۹۸
- شکل ۵-۳۱- تاریخچه فشار-زمان در حالت عدم استفاده از پایدارساز ویسکوزیته مصنوعی ۹۹
- شکل ۵-۳۲- تاریخچه فشار-زمان در حالت استفاده از پایدارساز ویسکوزیته مصنوعی ۹۹
- شکل ۵-۳۳- توزیع ذرات پس از $0/001$ میلی ثانیه ۱۰۱
- شکل ۵-۳۴- توزیع ذرات پس از $0/003$ میلی ثانیه ۱۰۱
- شکل ۵-۳۵- توزیع ذرات پس از $0/005$ میلی ثانیه ۱۰۲
- شکل ۵-۳۶- آرایش اولیه ذرات ۱۰۳
- شکل ۵-۳۷- توزیع ذرات پس از $0/05$ میلی ثانیه ۱۰۴
- شکل ۵-۳۸- توزیع ذرات پس از $0/1$ میلی ثانیه ۱۰۴
- شکل ۵-۳۹- مقایسه تاریخچه فشار-زمان مسأله انفجار در خلاء با استفاده از SPH و مرجع [۱۷].
..... ۱۰۵
- شکل ۵-۴۰- مقایسه تاریخچه چگالی-زمان مسأله انفجار در خلاء با استفاده از SPH و مرجع [۱۷].
..... ۱۰۵

فصل اول - بررسی پدیده انفجار

۱-۱ - مقدمه

معاهده منع آزمایشات هسته ای که در دهه ۱۹۶۰ به تصویب رسید، هرگونه آزمایش هسته ای در جو را ممنوع و متوقف می ساخت. در هر حال تأثیرات فراگیر ناشی از امواج انفجار در مقیاس وسیع، بر روی سازه ها همچنان موضوع قابل بحث و مورد تحقیق مطالعات جهانی باقی مانده است.

سری های دو سالانه شبیه سازی های انفجار اتمی در آمریکا، امکان ادامه این گونه تحقیقات را فراهم آورد. از جدیدترین این تحقیقات می توان از پروژه Direct Course (۱۹۸۳)، به عنوان نوعی انفجار هوایی شامل ۶۰۰ تن نیترات آمونیوم و سوخت نفتی (ANFO) که در محفظه کروی شکل در بالای یک برج به ارتفاع ۵۰ متر تعبیه شده و نیز انفجارهای سطحی نیم کروی با استفاده از حداکثر ۴۵۰۰ تن (ANFO)، از قبیل پروژه های Minr Scale (۱۹۸۵)، Misty Picture (۱۹۸۷)، Misers Gold (۱۹۸۹) و Distant Image (۱۹۹۱) نام برد. اسناد این آزمایشات در گزارشات سمپوزیم MABS [۴۲] بخوبی جمع آوری شده است.

کاربرد تونل های انفجار برای ارزیابی پاسخ های سازه ای در یک محیط انفجار اتمی، از ویژگی های کارهایی است که هم اکنون در انگلستان، فرانسه، آلمان و کانادا صورت می گیرد. مؤسسه سلاحهای هسته ای در فولنس انگلستان، اقدام به ایجاد تونل انفجار با استفاده از انفجار مقادیر نسبتاً کم مواد منفجره متعارف کرده است. بیش فشار حدود ۴۵ کیلوپاسکال با مدت زمان فاز مثبت بیش از ۳۰۰ ms، در محدوده ای به قطر ۱۰/۷ متر، قابل حصول می باشد. تأسیسات مشابهی در Center d' Etudes de Gramant نزدیک تولس فرانسه نیز موجود می باشد. این آزمایش با استفاده از گازهای فشرده که ابتدا در ۷ سیلندر تحت فشار قرار دارند، ایجاد می

گردد. برش انفجاری پرده های گازبند (gas - Tight diaphragm) موجب آزادسازی هوای فشرده به منظور تولید شبیه سازی انفجاری می شود. از جدیدترین تأسیساتی که به همین منظور مشغول به کار هستند، می توان از تأسیسات واقع در Reiteralpe واقع در آلمان نام برد که از تونل های دامنه ای و هوای فشرده برای شبیه سازی انفجار اتمی استفاده می کنند.

در این راستا با توجه به اینکه هدف از این رساله مدلسازی امواج انفجار با استفاده از روش ذرات متحرک استاندارد SPH¹ می باشد، بنابراین در این بخش مقدمه ای از پدیده انفجار در حالات و شرایط متفاوت برای آشنایی با این پدیده ارائه گردیده است.

۲-۱- تعریف انفجار

انفجار، مقادیر عظیمی انرژی آزاد می کند که ضمن گرم کردن محیط اطراف، فشارهای موضعی بسیار ایجاد می کند. این تغییرات فشار به سمت اطراف و خارج حرکت می نماید و ضمن ایجاد ضربه به صورت موج انفجار پدیدار می گردد. هنگامی که ماده انفجاری با شدت انفجار بالا، فشرده شده و منفجر می گردد، تقریباً ۱۰۰ درصد از انرژی آزاد شده آن تبدیل به انرژی انفجار می گردد.

در قسمتهای زیر امواج انفجار ناشی از انفجار مواد انفجاری در هوای آزاد و روی زمین، تشریح می شود و شرایط موجود در جبهه موج انفجار مورد بررسی قرار می گیرد.

۳-۱- امواج انفجار ناشی از مواد انفجاری

هنگامی که یک ماده انفجاری شروع به واکنش می کند، مراحل زیر یکی پس از دیگری به وقوع می پیوندد: ابتدا، واکنش انفجار تولید گازهای داغی می کند که می توانند دارای فشارهای

¹ Smoothed Particle Hydrodynamics

۳۰۰-۱۰۰ کیلو بار و درجه حرارت حدود ۴۰۰۰-۳۰۰۰ درجه سانتیگراد، باشند. سپس این گازهای انفجاری به شدت انبساط یافته و گسترش می یابند به نحوی که هوای اطراف از آنها اشباع شده و در نتیجه یک لایه از هوای فشرده شده که همان موج انفجار است، در جبهه این گازها تشکیل می شود. این لایه شامل بیشترین مقدار انرژی آزاد شده از انفجار است. هنگامیکه گازهای ناشی از انفجار انبساط می یابد، همزمان با حرکت جبهه موج به سوی خارج و دور شدن از منبع، فشار هوای متراکم در جبهه موج انفجار، با افزایش فاصله کاهش می یابد. در نهایت به تدریج که گازهای انفجاری سردتر می شوند و انبساط و گسترش بیشتری می یابند، فشار آنها تا میزان کمی پایینتر از فشار اتمسفر کاهش می یابد. این به آن علت است که اگر چه ممکن است فشار استاتیکی این گازها در حد اتمسفر باشد، اما مادامیکه مولکولهای گاز دارای جرم بوده و حرکت می کنند، این انتشار تا از بین رفتن مومنتوم (تکانه حرکت) آنها، ادامه می یابد. گازها در این مرحله بیش از حد انتشار یافته اند یا به عبارتی دیگر «بیش انبساط» پیدا کرده اند و نتیجه آن است که شاهد یک جریان برگشتی نسبت به منبع خواهیم بود. این جریان، نشان از اختلاف فشار کم میان شرایط جوی و فشار گازها می باشد. شکل موج انفجار، منطقه «کم فشار» را که در آن فشار، کمتر از فشار جو می باشد و به آن فاز منفی گویند، تحت تأثیر قرار می دهد. با بازگشت گازها و هوایی که با فشار از منبع دور شده اند، شرایط به حالت تعادل باز می گردد.

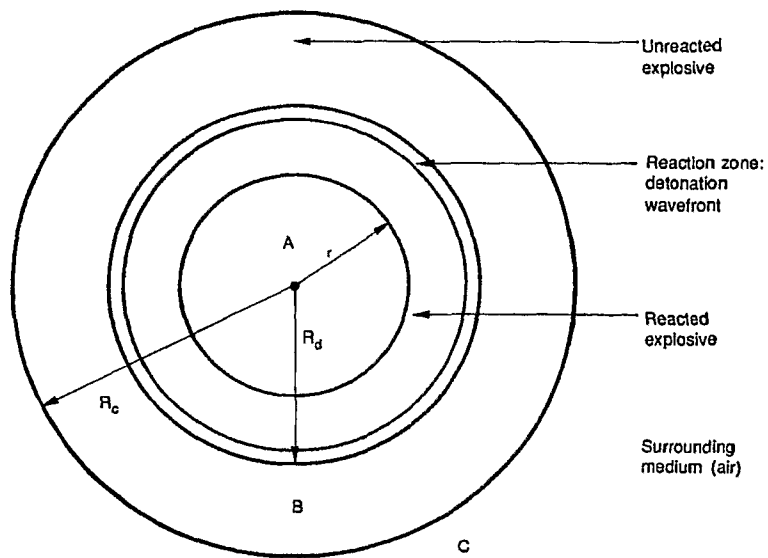
معادله حرکت که برای تشریح یک موج انفجار ضروری است، معادله پیچیده ای است که اولین بار توسط Brode به روش عددی نوشته شده است و سپس توسط Kingery به لحاظ تجربی تعدیل و اصلاح گردیده است در زیر به تجزیه و تحلیل رئوس این مطالب می پردازیم.

۴-۱- معادلات موج انفجار برای خرج های استوانه ای

به منظور دستیابی به یک راهبرد و رویکرد ساده تر برای رویارویی با سؤالات و مشکلات پیش رو در ادامه، اثرات ساختار و ویژگی های موج انفجار را از ۳ موقعیت، مورد مطالعه قرار می دهیم. اولین موقعیت، داخل مواد انفجاری است، جایی که انفجار ماده محترقه از آنجا آغاز می شود. دومین منطقه، منطقه ای خارج از ماده انفجاری، یعنی محدوده اطراف آن است که انفجار در آنجا شکل می گیرد. در نهایت در بخش های پایانی، اندرکنش موج انفجار با جسم سخت، مورد بحث قرار می گیرد که در آن موج انفجار تولید بارگذاری سازه ای می کند.

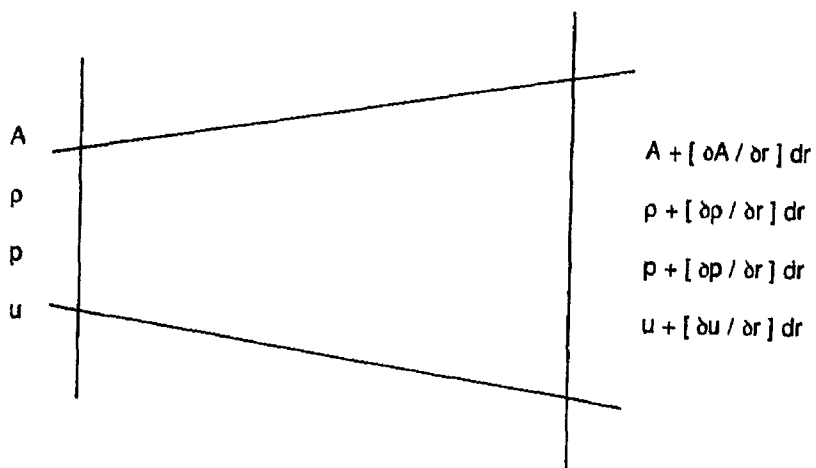
۴-۱-۱- محیط داخل خرج

یک خرج استوانه ای شامل ماده انفجاری با شعاع R_c را در نظر بگیرید که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، آغاز واکنش از مرکز این خرج صورت می گیرد و جبهه موج انفجار دارای شعاع R_f می باشد. منطقه واکنش نیز منطقه باریکی در پشت جبهه موج است. با مراجعه به شکل ۱-۱ در ناحیه A ، (جایی که واکنش کامل است) پارامترهای فشار p ، چگالی ρ ، سرعت ذره U و حرارت T ، همه با توجه به شعاع از مرکز خرج r و زمان t ، تغییر می کنند. ارتباط دقیق میان فشار، شعاع و زمان بستگی به نوع ماده انفجاری که خرج را متراکم می سازد، دارد. در ناحیه B ، که بالای یک ناحیه نازک واکنش نیافته که در فشار محیط P_{ex} و درجه حرارت T_{ex} قرار دارد، در حالت سکون شتاب ذره ای معادل صفر دارد. انرژی داخلی e_{ex} آن به ازای هر واحد جرم (انرژی ویژه) بوده و سرعت صوت در ماده انفجاری واکنش نیافته C_{ex} می باشد. ناحیه C در شرایط جو محیط قرار داشته و از این رو فشار آن فشار جوی P_0 ، حرارت آن T_0 و شتاب ذره معادل صفر می باشد هوا نیز دارای انرژی ویژه e_0 و سرعت صوت C_0 خواهد بود.



شکل ۱-۱- محیط داخل خرج [۳]

برای دستیابی به معادلاتی که بتوانند نوسانات فشار و شتاب ذره و دیگر موارد را ارزیابی و تحلیل نماید، حجم کنترل المانی را به شعاع r در داخل ماده واکنش یافته و یا انفجار یافته، همانطور که در شکل ۲-۱ آمده است، در نظر بگیرید.



شکل ۲-۱- حجم کنترل [۳]