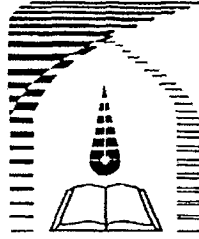


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه حوزه کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا - جلوبرندگی

شبیه‌سازی تراک در مواد شدیدالانفجار با استفاده از تئوری WK

سبحان امامی کوپائی

استاد راهنما

دکتر کیومرث مظاهری

کتابخانه و اطلاعات مرکز علمی
شهریور

۱۳۸۸ / ۴ / ۱

شهریور ۱۳۸۷

۱۱۴۵۷۳



بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای سبحان امامی کوپائی پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان شبیه سازی تراک در مواد شدیدالانفجار با استفاده از تئوری WK در تاریخ ۱۳۸۷/۶/۲۶ ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - هوافضا پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر کیومرث مظاهری	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر مهدی معرفت	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر فتح اله امی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر رضا ابراهیمی	دانشیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر مهدی معرفت	دانشیار	

آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیت های علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد / رساله دکتری نگارنده در رشته مهندسی هوافضا است که در سال ۱۳۸۷ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر کیومرث مظاهری از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتاب های عرضه شده نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

ماده ۶: اینجانب سبجان امامی کوپائی دانشجوی رشته مهندسی هوافضا مقطع کارشناسی ارشد

تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: سبجان امامی کوپائی

تاریخ و امضا: ۱۳۸۷/۷/۲



دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسان‌ها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانشی‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهش‌های علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرح‌های تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایات نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه / رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد. تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه / رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان‌نامه / رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین‌نامه‌های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه / رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم‌الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می‌شود.

نام و نام خانوادگی

سبحان امامی کوپائی

امضاء



تقدیم بہ پدر و مادر عزیزم

آمان کہ ارزش دانستن را بہ من آموختند

باسپاس فراوان از استاد عزیزم جناب آقای دکتر کیومرث مظاهری که اینجانب را با دنیای بی‌پایان پدیده‌های

انفجاری آتش‌گرفته بی‌شک راهمائی‌های ارزشمند و دل‌سوزانه ایشان در طول تحصیل راه‌کنشای اینجانب بوده و تصحیحات

مکرر و با دقت ایشان بر غنای این پایان‌نامه بسیار افزوده است.

همچنین بر نحو لازم می‌دانم که از تمامی دوستانی که در طول انجام این پایان‌نامه اینجانب را یاری رسانیدند تشکر کنم.

مخصوصاً جناب آقای حسین سوری که راهمائی‌های ارزشمندشان گره‌کنشای پیچیدگی‌های بسیار پیش روی اینجانب بود.

چکیده

در تحقیق حاضر انتشار موج تراک در مواد شدید الانفجار ایده‌آل و غیر ایده‌آل مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. برای این منظور کد کامپیوتری تهیه شده است که از مدل ارائه شده توسط وود و کرک‌وود (مدل WK)، که برای تراک کمی خمیده خوداتکا جواب‌های مناسبی به دست می‌دهد استفاده می‌کند. با استفاده از این مدل می‌توان رابطه بین سرعت انتشار تراک و شعاع انحنا تراک خمیده را که در عمل مشاهده می‌شود با دقت نسبتاً خوبی به دست آورد. در این تحقیق به ضعف تئوری چایمن-ژوگت (CJ) در پیش‌بینی سرعت انتشار تراک در مواد منفجره غیرایده‌آل اشاره و با به‌کارگیری تئوری WK این ضعف تا حدودی بر طرف شده است. نتایج به دست آمده از این مدل در مقایسه با نتایج تجربی نشان از دقت نسبتاً خوب این مدل در شبیه‌سازی انتشار تراک در مواد غیر ایده‌آل مخصوصاً در انحناهای کم دارد. مطالعه حاضر نشان می‌دهد که دقت معادلات حالت و نرخ سوزش به کار گرفته شده، نحوه‌ی کالیبره کردن آنها و همچنین نزدیکی قوانین مخلوط انتخابی به فیزیک مساله مورد مطالعه نیز در دقت نتایج تاثیر دارد.

واژگان کلیدی:

ماده شدید الانفجار، شبیه‌سازی عددی، تراک خمیده، مدل WK، تئوری CJ، شعاع انحنا

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ج	فهرست نشانه‌ها.....
ه	فهرست جداول.....
و	فهرست شکل‌ها.....
۱	فصل ۱- مقدمه.....
۲	۱-۱- پیشگفتار.....
۴	۱-۲- مروری بر مدل‌های پایای شبیه‌سازی تراک.....
۱۰	۱-۳- هدف از تحقیق حاضر.....
۱۱	۱-۴- مروری بر مطالب این پایان نامه.....
۱۲	فصل ۲- معادلات حاکم و روش حل عددی.....
۱۳	۲-۱- مقدمه.....
۱۴	۲-۲- معادلات حاکم در تئوری WK.....
۱۴	۲-۲-۱- معادلات اولر واکنشی شبه یک بعدی.....
۱۶	۲-۲-۲- شکل دیگر معادلات حاکم.....
۱۸	۲-۲-۳- نرخ انبساط شعاعی.....
۲۱	۲-۳- حل معادلات WK.....
۲۱	۲-۳-۱- شرط مرزی انتهایی.....
۲۲	۲-۳-۲- تعیین حل تراک خوداتکا.....
۲۳	۲-۳-۳- الگوریتم پیشنهادی برای حل میدان واکنشی تراک با استفاده از تئوری WK.....
۲۵	۲-۳-۴- شرط مرزی ابتدایی.....
۲۷	۲-۴- معادلات حالت به کار رفته در کار حاضر.....
۳۱	۲-۵- مدل‌های سوزش به کار رفته در کار حاضر.....
۳۴	۲-۶- محاسبه مشتقات پاره‌ای موجود در معادلات حاکم.....

۳۵	۲-۷- ساده‌سازی معادلات حاکم برای معادله حالت پلی‌تروپیک
۳۷	۲-۸- جمع‌بندی فصل حاضر
۳۸	۳- فصل ۳- نتایج به‌دست آمده از مدل WK
۳۹	۳-۱- مقدمه
۳۹	۳-۲- ارزیابی کد تهیه شده حاضر
۳۹	۳-۲-۱- مقایسه با مدل ZND
۴۲	۳-۲-۲- مقایسه با مدل DSD
۴۵	۳-۲-۳- مقایسه با مدل شبه یک بعدی شارپ
۴۹	۳-۳- بررسی کارائی مدل WK به‌هنگام استفاده از معادله حالت پلی‌تروپیک
۵۰	۳-۳-۱- شبیه‌سازی انتشار تراک در ماده منفجره نیترومتان
۵۱	۳-۳-۲- بررسی نتایج تئوری WK برای ماده منفجره Comp-B
۵۳	۳-۳-۳- بررسی نتایج تئوری WK برای ماده منفجره PBX-۹۵۰۲
۵۵	۳-۴- بررسی کارائی مدل WK به‌هنگام استفاده از معادله حالت JWL
۵۵	۳-۴-۱- شبیه‌سازی انتشار تراک در ماده منفجره PBX-۹۵۰۲ با استفاده از مدل WK
۶۱	۳-۴-۲- بررسی نتایج تئوری WK برای ماده منفجره TNT
۶۳	۳-۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۶۴	۴- فصل ۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۶۵	۴-۱- مقدمه
۶۵	۴-۲- جمع‌بندی تحقیق حاضر
۶۶	۴-۳- پیشنهادات
۶۸	مراجع
۷۱	واژه‌نامه
۷۶	پیوست‌ها
۷۷	پیوست الف - حل‌های پایای تراک
۸۱	پیوست ب - کتابخانه‌ای از نتایج تجربی برای چند ماده منفجره

فهرست نشانه‌ها

یکا	شرح	نشانه
mm/ μ s	سرعت انتشار تراک	D
mm/ μ s	سرعت انتشار تراک CJ	D_{CJ}
KJ/mol	انرژی تشکیل ماده منفجره	E^0
KJ/mol	انرژی تشکیل محصولات گازی	H^0
$\text{GPa}^{-2}\mu\text{s}^{-1}$	ثابت نرخ واکنش وابسته به فشار	G
mm	شعاع انحناء جبهه تراک در محور استوانه	R_c
KJ/(gr.mol.K)	ثابت جهانی گازها	R_{un}
mm	شعاع ستون ماده منفجره	R_0
K	دما	T
mm/ μ s	سرعت محوری ذره در دستگاه آزمایشگاه	U_p
cc/mol	حجم مولی محصولات گازی	V_g
mm/ μ s	سرعت انبساط شعاعی دیواره استوانه	V_r
cc/mol	حجم مولی در شرایط استاندارد	V_0
mm/ μ s	سرعت صوت	c
KJ/(gr.K)	ظرفیت حرارتی حجم ثابت	c_v
mm	قطر ستون ماده منفجره	dia
mm	قطر بحرانی	dia_{cr}
KJ/gr	انرژی داخلی مخصوص	e
A^2	کوالیوم هندسی	k
mol	تعداد مول گونه‌های گازی	n_g
GPa	فشار	p
KJ/gr	گرمای حاصل از انفجار	q
mm	مختصات شعاعی	r
μ s	زمان	t
mm/ μ s	مولفه سرعت محوری در دستگاه تراک	u
cc/gr	حجم مخصوص	v

mm	مختصات محوری	x
	کسر مولی گونه i ام	x_i
mm	طول ناحیه واکنش	z^*
μs^{-1}	نرخ واکنش شیمیایی	\mathcal{R}
GPa	مدول بالک هم‌دما	β_0
	مشتق مدول بالک نسبت به فشار	β'_0
	نسبت گرماهای ویژه	γ
	پارامتر صوتی	η
mm^{-1}	انحناء جبهه تراک	κ
	متغیر پیشرفت واکنش	λ
gr/cc	چگالی	ρ
mm/ μs	ضریب ترمیستی	σ
mm/ μs	مولفه سرعت شعاعی ذره	ω
mm/ μs^2	نرخ انبساط شعاعی	ω_t
μs^{-1}	پارامتر تولید فشار	ψ

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۳۰	جدول ۱-۲ ضرائب معادله حالت BKW.....
۳۱	جدول ۲-۲ پارامترهای مورد استفاده در معادله حالت مرناقان.....
۳۳	جدول ۳-۲ ثابت نرخ سوزش برای چند واکنشگر.....
۴۶	جدول ۱-۳ ضرائب مورد استفاده در معادله حالت و نرخ سوزش ماده منفجره ANFO.....
۵۰	جدول ۲-۳ داده‌های تجربی و عددی برای نیترومتان.....
۶۰	جدول ۳-۳ ضرائب نرخ سوزش آغازش و رشد برای ماده منفجره PBX-۹۵۰۲.....
۶۱	جدول ۴-۳ ضرائب معادله حالت JWL برای ماده منفجره PBX-۹۵۰۲.....
۶۲	جدول ۵-۳ ضرائب نرخ سوزش آغازش و رشد برای ماده منفجره TNT (Casting).....
۶۳	جدول ۶-۳ ضرائب معادله حالت JWL برای ماده منفجره TNT (Casting).....

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ نمودار توزیع فشار در پشت جبهه تراک، موج انبساطی تیلور در این شکل به خوبی مشاهده می‌شود.	۴
شکل ۲-۱ طرحواره‌ای از انتشار موج تراک در ماده منفجره، مفاهیمی نظیر جبهه خمیده، مکان صوتی، انتهای ناحیه واکنش و انبساط عرضی در این شکل به خوبی مشاهده می‌شوند.	۶
شکل ۱-۲ داده‌های ورودی و نتایج به دست آمده از تئوری WK	۱۳
شکل ۲-۲ دستگاه مختصات متصل به جبهه پیش‌تاز برای تراک دو بعدی	۱۵
شکل ۳-۲ هندسه ترسیم شده از جریان عبوری از موج ضربه‌ای برای به دست آوردن ω	۱۹
شکل ۴-۲ خواص جریان در جلو و پشت جبهه موج ضربه‌ای، در دستگاه مختصات متصل به تراک	۲۵
شکل ۱-۳ نمودار تغییرات فشار، سرعت ذره، چگالی و مکان بر حسب درجه واکنش در طول ناحیه واکنش	۴۱
شکل ۲-۳ نمودار سرعت تراک D بر حسب انحناء جبهه تراک، K	۴۳
شکل ۳-۳ نمودار فشار در مکان صوتی p^* بر حسب انحناء جبهه تراک، K	۴۳
شکل ۴-۳ نمودار چگالی در مکان صوتی ρ^* ، بر حسب انحناء جبهه تراک، K	۴۴
شکل ۵-۳ نمودار سرعت ذره نسبت به آزمایشگاه در مکان صوتی u^* ، بر حسب انحناء جبهه تراک، K	۴۴
شکل ۶-۳ منحنی تغییرات سرعت تراک بر حسب شعاع انحناء، داده‌های مثلثی و لوزی شکل مربوط به نتایج کد حاضر با فرض انبساط شعاعی متغیر $(\omega(x))$ و ثابت $(\omega(0))$ می‌باشند. همچنین دایره‌های توخالی و خط پر از شبیه‌سازی عددی و حل شبه یک بعدی مرجع ۳۰ آورده شده‌اند.	۴۷
شکل ۷-۳ توزیع فشار بر حسب مسافت در طول ناحیه واکنش، نتایج موجود برای حل‌های شبه یک بعدی شارپ و WK در شعاع انحنای 127.3 mm و تا مکان صوتی و برای حل عددی در ستون ماده منفجره با قطر 100 mm و تا انتهای ناحیه واکنش رسم شده‌اند.	۴۸

شکل ۳-۸ تغییرات متغیر پیشرفت واکنش بر حسب مسافت در طول ناحیه واکنش نتایج موجود برای حل‌های شبه یک بعدی شارپ و WK در شعاع انحنای ۱۲۷,۳ mm و تا مکان صوتی و برای حل عددی در ستون ماده منفجره با قطر ۱۰۰mm و تا انتهای ناحیه واکنش رسم شده‌اند. ۴۹

شکل ۳-۹ رابطه بین شعاع انحنای جبهه تراک و قطر خرج برای Comp B، X-۰۲۱۹ و TNT مایع ۵۲

شکل ۳-۱۰ مقایسه منحنی سرعت- قطر به دست آمده از تئوری WK با نتایج تجربی برای Comp B ۵۳

شکل ۳-۱۱ نمودار $D-R_c$ برای ماده منفجره PBX-۹۵۰۲ با دمای اولیه $24^{\circ}C$ به کمک معادله حالت پلی‌تروپیک و نرخ سوزشی وابسته به فشار ۵۴

شکل ۳-۱۲ نرخ واکنش بر حسب متغیر پیشرفت واکنش در مدل آغازش و رشد ۵۶

شکل ۳-۱۳ توزیع متغیر پیشرفت واکنش در طول ناحیه واکنش در مدل آغازش و رشد ۵۶

شکل ۳-۱۴ نمودار $D-K$ برای ماده منفجره PBX-۹۵۰۲ ۵۷

شکل ۳-۱۵ نمودار $D-R_c$ برای ماده منفجره PBX-۹۵۰۲ با دمای اولیه $24^{\circ}C$ ، مقایسه نتایج حاضر با نتایج کد چیتا ۵۸

شکل ۳-۱۶ نمودار $D-K$ برای ماده منفجره PBX-۹۵۰۲ با دمای اولیه $75^{\circ}C$ به کمک معادله حالت JWL و نرخ سوزش آغازش و رشد ۵۹

شکل ۳-۱۷ نمودار $D-K$ برای ماده منفجره TNT به کمک معادله حالت JWL و نرخ سوزش آغازش و رشد ۶۲

فصل ۱

مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

مواد شدیدالانفجار^۱ - یا مواد منفجره با چگالی انرژی بسیار زیاد- در دسته‌ای از مواد احتراق پذیر قرار می‌گیرند که به آنها مواد پرانرژی گفته می‌شود. در این گونه مواد سوخت و اکسید کننده به‌طور پیش مخلوط در هر مولکول ماده منفجره وجود دارند.

در بسیاری از مواد احتراق پذیر انجام واکنش در اثر عبور موج احتراقی دفلاگريشن^۲ (شعله) که با سرعتی مادون صوت منتشر می‌شود صورت می‌گیرد. ساز و کار انتشار شعله بر پایه نفوذ مولکولی و حرارتی به ماده نسوخته می‌باشد. در موج احتراقی دفلاگريشن به‌علت ضخامت بسیار کم ناحیه واکنش، گرادیان‌های دما و غلظت گونه‌ها نیروی رانشی ایجاد می‌کنند که باعث خود اتکایی شعله می‌شود [۱].

اما در مواد شدیدالانفجار، انتشار موج احتراقی تراک^۳ که با سرعتی مافوق صوت حرکت می‌کند باعث احتیعال و تراکیدن ماده منفجره می‌شود. ساز و کار انتشار تراک نیز دیگر در اثر نفوذ حرارتی نمی‌باشد بلکه تراکم حاصل از عبور یک موج ضربه‌ای قوی است که باعث انتشار تراک می‌شود. در اثر عبور این موج ضربه‌ای دمای ماده منفجره تا حد خود اشتعالی افزایش یافته و انرژی آزاد شده از احتراق نیز با تقویت این موج آن را پایدار نگه داشته و باعث خوداتکایی تراک می‌شود. در فرآیند تراک ماده اولیه^۳ تا ^۸۱۰ بار سریعتر از یک شعله مصرف می‌شود [۲].

مواد شدیدالانفجار دارای ویژگی‌های منحصر به فردی می‌باشند. برای مثال ماده شدیدالانفجار PBX-۹۵۰۲ دارای سرعت تراکی در حدود ۸۰۰۰ m/s (سه برابر سرعت صوت در همین ماده) چگالی انرژی آزاد شده بسیار زیاد در حدود ۵ MJ/kg و چگالی اولیه‌ای در حدود ۲۰۰۰ kg/m^۳ می‌باشد. ترکیب این سه کمیت منجر به تولید انرژی بسیار زیادی می‌شود. این انرژی تولیدی بسیار زیاد، علاوه

۱. High Explosive (HE)

۲. Deflagration

۳. Detonation

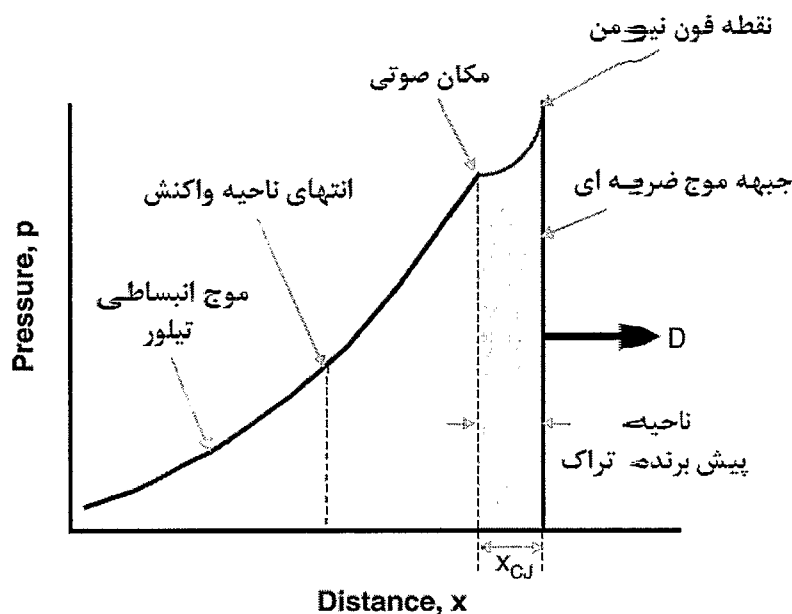
بر صنایع نظامی، باعث به‌کارگیری روز افزون این‌گونه مواد در صنایع غیر نظامی مختلف نیز شده است. از کاربردهای غیر نظامی این مواد می‌توان به شکل‌دهی و جوشکاری انفجاری، متالورژی پودر، تخریب بناهای فرسوده، استخراج معادن، راه‌سازی، حفاری چاه‌های نفت و غیره اشاره کرد. اگرچه از چگالی انرژی بسیار زیاد مواد شدیداً انفجار می‌توان به عنوان یک ویژگی ممتاز یاد کرد، اما اگر آزادسازی انرژی این‌گونه مواد تحت مدیریت صحیح رخ ندهد خسارت‌های جبران‌ناپذیری را برای کارکنان و دستگاه‌های مربوطه به همراه می‌آورد. از این‌رو است که به‌همراه افزایش کاربرد این‌گونه مواد، تحقیقات و مطالعات بر روی پدیده انفجار و به‌خصوص موج تراک نیز بسیار گسترده و فراگیر شده است. در این میان جزئیات سینتیک شیمیایی فرآیند انفجار در مواد گازی به‌طور وسیعی مورد مطالعه قرار گرفته است، اما این اطلاعات در خصوص مواد شدیداً انفجار به‌مراتب کمتر می‌باشد. مهم‌ترین دلیل برای این موضوع فشار و دمای بسیار زیاد تولیدی، در پشت جبهه تراک می‌باشد (فشار ۴۰ GPa و دمای ۴۰۰۰ K بسیار متداول می‌باشد).

به طور کلی موج تراک از یک موج ضربه‌ای پیش‌تاز که با ناحیه واکنش خود به‌صورت جفت منتشر می‌شوند تشکیل شده است. با عبور موج ضربه‌ای واکنش آغاز شده و تا انتهای ناحیه واکنش ادامه می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۱-۶ مشاهده می‌شود، می‌توان جریان سیال در پشت جبهه موج ضربه‌ای^۱ را به سه قسمت متمایز تقسیم کرد. ناحیه اول که ناحیه ما بین جبهه موج ضربه‌ای و مکان صوتی می‌باشد، ناحیه پیش‌برنده تراک^۲ نامیده می‌شود. مکان صوتی، مکان هندسی نقاطی در پائین دست جریان است که سرعت ذره در آنجا نسبت به موج ضربه‌ای، برابر سرعت صوت محلی می‌باشد. رژیم جریان در این ناحیه نسبت به جبهه موج ضربه‌ای مادون صوت بوده و انرژی آزاد شده در آن باعث تقویت جبهه تراک می‌شود. در ناحیه دوم، که ناحیه بین مکان صوتی و انتهای ناحیه واکنش می‌باشد، واکنش ماده منفجره هنوز دامنه دارد اما به‌علت آن‌که رژیم جریان در این ناحیه، نسبت به

^۱. Shock Front

^۲. Detonation Driving Zone

جبهه موج ضربه‌ای مافوق صوت می‌باشد، انرژی آزاد شده تاثیری بر جبهه موج ضربه‌ای نخواهد گذاشت. واکنش در نقطه انتهایی ناحیه واکنش تکمیل می‌شود و فشار جریان غیر واکنشی در پائین دست این نقطه به وسیله امواج انبساطی تیلور^۱ تا فشار محیط کاهش می‌یابد [۳].



شکل ۱-۱ نمودار توزیع فشار در پشت جبهه تراک، موج انبساطی تیلور در این شکل به خوبی مشاهده می‌شود.

مدل‌های ارائه شده برای شبیه‌سازی تراک براساس فرضیات به کار رفته در آنها دارای دقت و توانایی‌های متفاوتی می‌باشند. در بخش آینده نگاهی گذرا بر مدل‌های ارائه شده و ویژگی‌های آنها خواهیم داشت.

۲-۱- مروری بر مدل‌های پایای شبیه‌سازی تراک

از زمانی که پدیده تراک برای ولین بار توسط برتلوت (Berthelot) و وی‌الی (Vieille) و همچنین ملارد (Mallard) و له‌شتلیه (Le Chatelier) در سال‌های ۱۸۸۱ و ۱۸۸۲ شناخته شد، تلاش دانشمندان برای به دست آوردن محلی دقیق، فراگیر و کارآمد از رفتار موج تراک، تاکنون ادامه دارد. در

^۱ Taylor Rarefaction Wave

این راستا چپمن (Chapman) و ژوگت (Jouguet) در اوایل قرن بیستم اولین مدل شناخته شده برای شبیه‌سازی تراک پایای یک بعدی را ارائه کردند [۲]. در این مدل موج تراک موجی است کاملاً تخت که با سرعت ثابت D_{CJ} منتشر می‌شود. واکنش در پشت جبهه تراک به صورت آنی یعنی با نرخ واکنش بی‌نهایت روی می‌دهد، بنابراین از ضخامت ناحیه واکنش صرف نظر می‌شود. تئوری CJ یک تئوری تعادلی بوده و سینتیک در آن نقشی ایفا نمی‌کند.

تئوری CJ اگر چه سرعت انتشار و فشار نقطه CJ را برای مواد منفجره ایده‌آل (مواد منفجره همگن) که در آنها انرژی شیمیایی با عبور جبهه تراک به سرعت آزاد می‌شود، با دقت قابل قبولی محاسبه می‌کند، اما برای مواد منفجره غیرایده‌آل (مواد مرکب ناهمگن یا مواد منفجره غیرحساس) که دارای ناحیه واکنش به مراتب بزرگتری می‌باشند این جواب‌ها از دقت قابل قبولی برخوردار نیستند. برای جلوگیری از آغازهای غیر مترقبه و نهایتاً افزایش ایمنی، در مواد منفجره غیرایده‌آل از ترکیباتی استفاده شده تا مقاومت این‌گونه مواد را در برابر آغازش تراک افزایش دهد. از این‌رو این مواد، موادی غیر حساس بوده و دارای ناحیه واکنشی در حدود چند میلیمتر می‌باشند. نرخ واکنش این مواد در مقایسه با مقیاس زمانی هیدرودینامیک (10^{-6} sec) بسیار کندتر بوده و رسیدن به نقطه تعادل ترموشیمیایی در آنها بسیار دیر اتفاق می‌افتد [۴].

برای رسیدن به فهم قابل قبول از تراک در مواد غیر ایده‌آل باید برهم کنش سینتیک شیمیایی با موج تراک را نیز در نظر گرفت. از این‌رو در اوایل دهه ۱۹۴۰، زلدویچ (Zeldovich (۱۹۴۰))، فون نیومن (von Neumann (۱۹۴۲)) و دورینگ (Doering (۱۹۴۳)) به‌طور مستقل تئوری‌ای را ارائه دادند که بعدها به نام تئوری ZND مشهور شد. در این تئوری، که همچنان یک تئوری پایای یک بعدی می‌باشد، تراک از یک موج ضربه‌ای تخت به‌همراه یک ناحیه واکنش با ضخامت محدود تشکیل شده است. در تئوری ZND معادلات اولر واکنشی برای ناحیه واکنش حل شده و متغیرهای جریان در این ناحیه به‌دست می‌آیند.