

## تحلیل عددی مشخصه‌های دینامیکی مؤثر در دتونیشن ابر دوفازی سوخت و هوا

کریم مظاهری\*، محمد مهدی دوستدار\*\* و سید مصطفی حسینعلی پور\*،  
دانشکده مهندسی هوا فضا، دانشگاه صنعتی شریف  
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت مقاله: ۸۱/۱۱/۲۹ - دریافت نسخه نهایی: ۸۴/۷/۱۹)

**چکیده** - در این مقاله به مطالعه عددی مشخصه‌های دینامیکی ابر دوفازی سوخت و هوا در محیط باز اتمسفر به منظور بررسی دتونیشن پذیری آن پرداخته می‌شود. مشخصه‌هایی از ابر نظیر نسبت توازن، آشفتگی، شکل، حجم و یکنواختی ابر و نیز توزیع زمان تأخیر در اشتعال به عنوان عوامل مهم در شروع دتونیشن موفق معرفی و مورد مطالعه قرار داده می‌شوند. بر اساس رفتار این مشخصه‌های مهم مناسبترین بازه زمانی و موقعیت مکانی برای شروع احتراق تعیین و پیشنهاد می‌شود. برای تأیید این مدلسازی از تحلیل نظری و مقایسه با برخی نتایج تجربی استفاده شده است.

واژگان کلیدی: حل عددی، جریان دوفازی، محیط باز، دتونیشن

## A Numerical Study of Dynamic Detonability Characteristics of Two-phase Unconfined Fuel-Air Clouds

M. Hosseinalipour, M. M. Doustdar and K. Mazaheri

Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology  
Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology

**Abstract:** A numerical simulation has been carried out to study the detonability characteristics of two-phase unconfined clouds. The parameters equivalence ratio, turbulence, shape, volume and uniformity of the cloud and the delay time distribution are recognized and introduced as the most important factors determining the reactivity of the cloud and influencing the initiation of a successful detonation. With regard to the dynamic behavior of the cloud and the changes in the magnitude of these significant characteristic parameters, the best ranges of time and position for secondary detonator action are determined.

\*\*\* - استادیار

\*\* - دانشجوی دکترا

\* - استاد

Comparisons are also performed with experimental results along with theoretical analyses to validate the numerical results obtained in this study.

**Keywords:** Numerical solution, Two-phase flow, Unconfined, Detonation

## ۱- مقدمه

وقتی یک سوخت مایع و یا گازی در محیط اتمسفر پخش می‌شود ابری از سوخت و هوا شکل می‌گیرد. وقوع جرقه در داخل این ابر می‌تواند منجر به ایجاد موج دتوئیشن در آن شود. به طور عموم این اتفاق نظر وجود دارد که دتوئیشن به خاطر ضربه (ایمپالس) شدید و افزایش فشار فوق‌العاده زیاد، یکی از مخربترین دستاوردهای انفجار مخلوط سوخت و هواست. یکی از مسائل قابل توجه در پژوهشهای امروزی، موضوع وقوع دتوئیشن در محیط دوفازی است، چرا که در بسیاری از مواقع پس از نشر سوخت مایع از مخازن، یک جریان دوفازی در محیط اتمسفر به گونه‌ای شکل می‌گیرد که ابر حاصله، مخلوطی متشکل از قطرات مایع، بخار سوخت و هواست. از سوی دیگر شاید بتوان گفت یکی از بهترین راههای اثبات دتوئیشن‌پذیری یک مخلوط معین از سوخت و هوا، نشان دادن وقوع دتوئیشن در آن مخلوط در یک محیط باز است.

برای ایجاد ابر سوخت و هوا در محیط باز، می‌توان از پاشش سوخت تحت فشار از میان یک انژکتور سود جست. همچنین می‌توان با استفاده از انفجار مقدار کمی از یک ماده منفجره، سوخت مایع را در محیط اتمسفر منتشر کرد. وقتی ابر حاصله به نسبت سوخت به هوا و حجم مناسبی رسید، توسط یک جرقه ثانویه محترق و دچار دتوئیشن می‌شود. نوع سوخت و میزان غلظت آن، اندازه ابر و نرخ رشد آن، مکانیزم جرقه و قدرت آن و نیز محل وقوع جرقه از جمله عواملی اند که سهم به سزایی را در تعیین نوع احتراقی که در ابر انتشار می‌یابد، به عهده دارند.

برای افزایش قابلیت اعتماد به تکرارپذیری وقوع موج دتوئیشن در ابر سوخت و هوا، باید مکانیزمهای مهم در دتوئیشن آئروسولها را به خوبی شناخت. از سوی دیگر برای

کسب راندمان حداکثر، تمام سوخت باید توسط موج دتوئیشن مصرف شود. تحقق این حالت ایده‌آل به مشخصه‌های ابر سوخت و هوا و فرایند شکل‌گیری ابر بستگی زیادی دارد. از این رو مطالعه مکانیزمهای مؤثر در پخش سوخت و بررسی عوامل مؤثر در مشخصه‌های نهایی ابر حائز اهمیت است.

تلاشهای متعددی توسط پژوهشگران برای مدلسازی فرایند پاشش، شروع دتوئیشن و پدیده‌هایی که به آنها مربوط می‌شوند چه به صورت عددی و چه به شکل تجربی انجام شده است. گلاس [۱] به مدلسازی عددی پاشش در رژیم اصطلاحاً میدان دور در دستگاههای پراکنده‌ساز انفجاری سوخت پرداخته است. او برای این مدلسازی از کد کیو-۲ استفاده کرده است. گاردنر [۲] رژیم اصطلاحاً میدان نزدیک را در فرایند پاشش دستگاههای پراکنده‌ساز انفجاری مدل کرده است. برای این منظور او از ترکیب مدل‌های عددی و تحلیلی سود برده و ضمن به کارگیری کد CTH به تشریح برخی از مدل‌های تحلیلی برای تخمین قطر متوسط اولیه قطرات پس از شکست انفجاری جرم سوخت مایع پرداخته است. ماخ ویلادز و همکارانش [۳] یک مدل عددی از رفتار، تغییر شکل و احتراق ابر دوفازی حاوی سوخت هیدروکربنی در محیط باز ارائه کرده‌اند. انرژی بحرانی لازم برای شروع دتوئیشن و حدود دتوئیشن‌پذیری برخی از سوخته‌های هیدروکربنی توسط لیزهونگ و همکارانش [۴] اندازه‌گیری شده است. توماس و همکارش [۵] برخی از مشاهدات خود را در مورد شروع دتوئیشن با استفاده از پاشش محصولات گرم احتراق به داخل مخلوط سوخت و هوا ارائه کرده‌اند. آنها بحثی را در مورد اهمیت اثر افزایش نرخ احتراق در شروع دتوئیشن و نقشی که گردابه‌های داخل جریان در این مورد ایفا می‌کنند مطرح کرده‌اند. آنگوت و همکارش [۶] بر اساس شرط حداقل آزادسازی انرژی و عدد دامکپلر بحرانی

نتایج خود را به گونه‌ای تنظیم کرده‌اند که به ازای یک فشار و غلظت معین می‌توانند این نتایج را به صورت نموداری ارائه کنند که شرایط یا به تعبیری ناحیه دتونیشن موفق را از غیر آن تفکیک می‌کند. آلکسیو و همکارانش [۷] به مطالعه تجربی دتونیشن در ابر سوخت و هوا در مقیاس‌های بزرگ به منظور تعیین پارامترهای مهم دینامیکی نظیر فشار، سرعت موج، و ابعاد بحرانی ابر اقدام کرده‌اند. بندیک و همکارانش [۸] در آزمایش‌های خود دتونیشن‌پذیری برخی از سوختها در حالت دوفازی را نشان داده‌اند. تشریح بسیار خوبی از نحوه مدلسازی پدیده‌های فیزیکی مهم در جریان دوفازی نظیر شکست اولیه، برخورد قطرات، شکست ثانویه و تبخیر ذرات و نیز روشهای آزمون و اندازه‌گیری کمیت‌های مورد علاقه در جریان توأم با اسپری در مراجع [۹-۱۱] ارائه شده است.

در پژوهش حاضر اقدام به تشابه‌سازی عددی فرایند پاشش سوخت مایع به محیط اتمسفر، به منظور مطالعه رفتار دینامیکی ابر سوخت و هوا، شده است. در این راستا مشخصه‌هایی از ابر که در ایجاد قابلیت دتونیشن‌پذیری آن مؤثرند نظیر نسبت توازن، توربولانس، شکل، حجم، یکنواختی و نرخ رشد ابر مورد توجه خاص قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، دستگاه سوخت‌پاش یک نمونه رایج از دستگاه‌های انفجاری سوخت و هواست که در آن فرض می‌شود که سوخت در ابتدا در داخل یک ظرف استوانه‌ای قرار دارد. سپس با انفجار یک ماده منفجره که در امتداد محور ظرف استوانه‌ای کار گذاشته شده، سوخت به محیط اطراف پخش می‌شود. برای مدلسازی ارتفاع این پاشش فرض می‌شود که تعداد زیادی انژکتور با زاویه پاشش کوچک روی محیط ظرف مزبور در امتدادی موازی با محور ظرف چیده شده‌اند. هندسه مورد نظر در این پژوهش از لحظه‌ای آغاز می‌شود که سوخت مایع به طور کامل به قطرات شکسته شده است. برای انجام محاسبات، اصلاحات لازم در متن کد کیوا-۳ وارد شده و از کد اصلاح شده استفاده شده است. مهمترین هدف و دستاورد این تحقیق تعیین محدوده مناسب زمانی و مکانی برای عمل کردن جرقه ثانویه به منظور

ایجاد موج دتونیشن در مخلوط سوخت و هواست. همچنین می‌توان از نتایج این تحقیق در مسائل ایمنی ذخیره‌سازی سوختها نیز استفاده کرد.

## ۲- فرایند پراکنده‌سازی

فرایند پراکنده‌سازی انفجاری سوخت از اندرکنش تعدادی تحول نسبتاً پیچیده تشکیل می‌شود. بر حسب مقدار نسبی نیروهای مطرح در لحظه مورد نظر، این فرایند به تعدادی رژیم تفکیک می‌شود. رژیم اول رژیم پاشش است که در آن نیروهای اینرسی حاصل از انفجار ماده منفجره بر نیروهای آیرودینامیکی بین قطرات و گاز محیطی کاملاً غلبه دارند. مهمترین مشخصه این رژیم حرکت امواج تراکمی و انبساطی در داخل سوخت و محصولات انفجار اولیه است. رژیم دوم رژیم گذراست که در آن نیروهای اینرسی و نیروهای آیرودینامیکی تقریباً از مرتبه یکسانی برخوردارند. امواج مورد بحث در رژیم قبل در اینجا رو به افول نهاده و غلظت سوخت کاهش می‌یابد. رژیم سوم رژیم انبساط است که در آن نیروهای آیرودینامیکی بر نیروهای اینرسی غلبه می‌کنند. امواج موجود در رژیمهای قبل در اینجا دیگر اهمیتی ندارند و غلظت سوخت در داخل ابر نیز نسبتاً کم است. در این رژیم قطرات سوخت به واسطه نیروی پسایی که به آنها وارد می‌شود شتاب منفی دارند. از آنجایی که رژیم انبساط چیزی حدود  $7/8$  حجم نهایی ابر را تشکیل می‌دهد [۱]، فرایندهای این رژیم در کنترل مشخصه‌های نهایی ابر نقش اساسی دارند. از این رو با مدلسازی عددی این رژیم می‌توان مقادیر کمی پارامترهای مؤثر در شروع دتونیشن را با تقریب خوبی به دست آورد. این مدلسازی باید بتواند پدیده‌هایی را که در رژیم انبساط رخ می‌دهند یعنی برخورد قطرات، شکست ثانویه، تبخیر و نیز اندرکنش ادی‌های آشفستگی با قطرات را مورد توجه قرار دهد.

## ۳- برنامه رایانه‌ای

برنامه رایانه‌ای تهیه شده در این پژوهش یک برنامه اصلاح شده

کیوا ۳- است. مدلسازی به کار رفته در این برنامه مبتنی بر مدل اصطلاحاً قطره - جدا<sup>۲</sup> است. در این مدل فاز مایع به صورت بسته‌هایی از ذرات در میدان حل در نظر گرفته می‌شود. هر بسته حاوی تعدادی قطره است. کلیه قطرات موجود در یک بسته دارای خواص ترمودینامیکی، اندازه و سرعت یکسان‌اند. از روش لاگرانژی برای محاسبه سرعت و جابه‌جایی بسته‌ها و از روش اویلری برای حل میدان جریان فاز گازی استفاده می‌شود. برای تخمین خواص ذرات در محل پاشش و یا در پایین دست جریان تکنیک نمونه‌گیری مونت کارلو به کار گرفته می‌شود.

گسسته‌سازی فضایی میدان حل بر مبنای یک روش حجم محدود که به آن ALE گفته می‌شود صورت می‌گیرد. شکل بقای معادلات تا حد ممکن در گسسته‌سازها حفظ می‌شود. از معادلات حاکم قبل از گسسته‌سازی روی سلول محاسباتی انتگرال‌گیری شده و از قضیه دیورژانس برای تبدیل انتگرالهای حجمی به انتگرالهای سطحی استفاده می‌شود. حل گذرای معادلات به روش مارچینگ در قدمهای متوالی زمانی صورت می‌گیرد. هر قدم محاسباتی خود به چند مرحله تفکیک می‌شود. در مرحله اول برخورد، نوسان و شکست قطرات و عبارات چشمه ناشی از اسپری که به معادلات جرم و انرژی مربوط می‌شوند محاسبه می‌شود. در مرحله بعد گرادیان فشار در معادله مومنتم و اتساع ناشی از سرعت در معادلات جرم و انرژی، عبارات چشمه معادله مومنتم و عبارات ناشی از دیفیوژن جرم، مومنتم و انرژی محاسبه می‌شوند. همچنین عبارات چشمه معادلات آشفستگی در این مرحله تعیین می‌شوند. برای حل معادلات این مرحله روش سیمپل که یک روش تکراری دو قدمی است به کار می‌رود. گسسته‌سازی ضمنی معادلات، برای عبارات دیفیوژنی و عباراتی که به انتشار موج فشار مربوط می‌شوند، امکان استفاده از قدمهای زمانی بزرگتر با حفظ دقت را فراهم می‌آورد.

برای محاسبه عبارات جابه‌جایی (کنوکسیون) که در مرحله سوم صورت می‌گیرد، از روش‌های صریح استفاده می‌شود. محاسبات جابه‌جایی در تعدادی زیر قدم محاسباتی

انجام می‌گیرد تا قدم محاسباتی زمانی اصلی، به واسطه شرط پایداری کورانت خیلی محدود نشود. برای مدلسازی آشفستگی از مدل استاندارد k-ε که اصلاحاتی بر روی آن برای احتساب انبساط حجمی و اندرکنش اسپری با آشفستگی صورت گرفته استفاده می‌شود. قانون دیواره نیز برای محاسبه انتقال گرما و پسای لایه مرزی به کار گرفته می‌شود. برای حل میدان جریان، معادلات پیوستگی جرم، مومنتم، انرژی و معادلات آشفستگی به همراه معادله حالت، و معادلات همبستگی باید در هر قدم محاسباتی برای فازگازی حل شوند. اثرات وجود فاز دوم یعنی اسپری مایع بر جریان گاز به صورت عبارات چشمه در معادلات حاکم برفاز گازی لحاظ می‌شود. در معادله پیوستگی جرم، عبارت چشمه‌ای وجود دارد که به خاطر تبخیر قطرات است. جرم بخار شده از اسپری با نرخ که به نرخ تبخیر هر قطره و تعداد قطرات موجود در هر سلول محاسباتی بستگی دارد، به جرم جریان گاز افزوده می‌شود. این جرم بخار شده، مومنتمی را با خود به جریان گاز می‌آورد که به عنوان عبارت چشمه معادله مومنتم باید محاسبه شود. همچنین از نیروی پسای بین قطرات و گاز، تغییری در مومنتم گاز به وجود می‌آید که این اثر نیز به صورت عبارت چشمه در معادله مومنتم ظاهر می‌شود. جرم بخار شده از اسپری حاوی انرژی داخلی و انرژی جنبشی است. همچنین از اصطکاک حاصل از حرکت نسبی بین قطرات و گاز انرژی گرمایی حاصل می‌شود که اینها عبارات چشمه معادله انرژی را به واسطه اسپری تشکیل می‌دهند. کار ادی‌ها در پراکندگی قطرات و اتلاف آشفستگی حاصل از این کار به صورت عبارات چشمه به ترتیب در معادله انرژی جنبشی آشفستگی و معادله اتلاف آشفستگی ظاهر می‌شوند. برای محاسبه این عبارات چشمه لازم است تا تعداد، اندازه و سرعت قطرات در هر سلول در ابتدای هر قدم محاسباتی معلوم باشند و در انتهای هر قدم نیز مقدار این کمیتها با توجه به اندرکنش گاز و قطرات و براساس روابط حاکم محاسبه شود.

معادلات حاکم برفاز گازی و نیز بر فاز مایع و نحوه محاسبه عبارات چشمه که به چگونگی مدلسازی پدیده‌های

فیزیکی مهم نظیر برخورد قطرات، شکست ثانویه، تبخیر، و اندرکنش ادی‌های آشفته‌گی و قطرات مربوط می‌شود در مرجع [۱۲] به خوبی تشریح شده است که از ذکر آن به علت طولانی بودن در اینجا خودداری می‌شود. به علاوه علاقمندان به جزییات بیشتر می‌توانند به مراجع [۹-۱۰] نیز مراجعه کنند.

اصلاحات انجام شده در این پژوهش در متن برنامه کیوا ۳- به گونه‌ای بوده است تا یک نرم افزار برای تحلیل میدان جریان در داخل ابر دوفازی سوخت و هوا در محیط باز به وجود آید. در بخش پیش- پردازنده این کد تغییرات لازم برای خواندن متغیرهای جدید نظیر حدود انفجارپذیری سوخت اعمال شده است. با توجه به اینکه کیوا در اصل برای تحلیل جریان در موتورهای احتراق داخلی تهیه شده است، زیربرنامه‌های زیادی در آن به منظور تأمین این هدف، نظیر بررسی اثر حرکت پیستون، حرکت سوپاپها، جریان در اگزوز و امثال آن، آورده شده است. در این پژوهش، این زیربرنامه‌ها کنار گذاشته شده و در عوض زیربرنامه‌های دیگری برای محاسبه توزیع نسبت توازن، شعاع و ارتفاع ابر، حجم ناحیه واقع در محدوده دتونیشن پذیری، سیرکولاسیون دورگردابه‌های داخل ابر، واریانس‌های نسبت توازن و جرم مخصوص، توزیع زمان تأخیر در احتراق، توزیع گرادیان دما، انرژی جنبشی آشفته‌گی متوسط و امثال آن به برنامه اضافه شد. دستورات کنترلی نیز در برخی قسمتهای برنامه اصلاح شده‌اند. در بخش پس-پردازنده نیز تغییرات لازم به گونه‌ای اعمال شد که خروجیهای برنامه با نرم‌افزارهای گرافیکی موجود سازگار باشند. همچنین تغییرات لازم برای به کارگیری مدل چند نازلی مورد نظر این پژوهش در برنامه وارد شده است. به منظور برخورداری از اعتبار کیوا، تغییری در مدل‌سازیهای این کد اعمال نشده است.

#### ۴- تولید شبکه، شرایط مرزی و اندازه قدم زمانی

با توجه به تخمینی که از ابعاد ابر سوخت و هوا به ازای سرعت اولیه پاشش و جرم سوخت وجود دارد ناحیه مناسبی برای حل انتخاب می‌شود. بدیهی است اگر ابعاد ناحیه حل بیش از حد

نیاز اختیار شود، حجم محاسبات به طور نامطلوبی افزایش می‌یابد. سپس ناحیه حل به تعدادی سلول در امتدادهای مختلف تقسیم‌بندی می‌شود. با توجه به اینکه دستگاه پراکنده‌ساز، که در شکل (۱) نشان داده شده، استوانه‌ای شکل است می‌توان میدان جریان را با فرض تقارن محوری حل کرد. از اینرو قطاعی با زاویه ۰/۵ درجه از این میدان برای انجام محاسبات انتخاب می‌شود، شکل (۲). وقتی از بالا به این قطاع نگاه شود محور تقارن در سمت چپ واقع می‌شود. از این رو شرایط مرزی ناحیه حل به صورت محور در چپ، فشار جریان خروجی<sup>۴</sup> در راست، دوره‌ای<sup>۵</sup> در سمت جلو و عقب، جامد در پایین و فشار جریان ورودی<sup>۶</sup> در بالا تعریف می‌شود [۱۳].

در مرز جامد از قانون دیواره آشفته برای تعیین شرایط مرزی استفاده می‌شود. در مدل  $k-\epsilon$  دو شرط مرزی دیگر یکی برای انرژی جنبشی آشفته‌گی  $k$  و دیگری برای نرخ اتلاف آن  $\epsilon$  مورد نیاز است که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\nabla k \cdot n = 0 \quad (1)$$

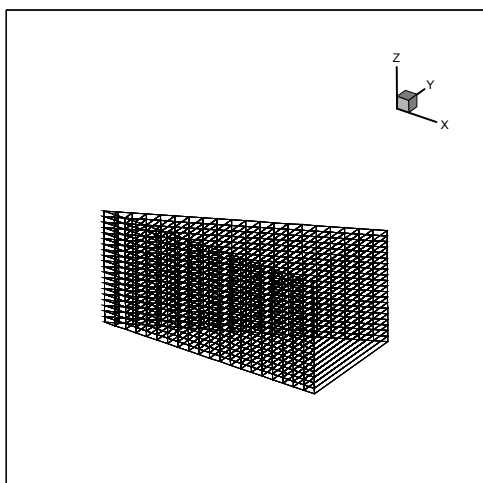
$$\epsilon = c_{\mu\epsilon} \frac{k^{3/2}}{y} \quad (2)$$

$$c_{\mu\epsilon} = \left[ \frac{c_{\mu}}{\text{Pr}_{\epsilon}(c_{\epsilon_2} - c_{\epsilon_1})} \right]^{1/2}$$

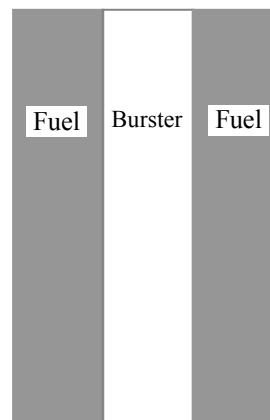
$n$  بردار واحد نرمال بر دیواره است. با توجه به استفاده از قانون دیواره آشفته،  $k$  و  $\epsilon$  در فاصله  $y$  از دیواره محاسبه می‌شوند. نحوه تعیین  $y$  و نیز مقادیر مربوط به  $c_{\mu}$ ،  $c_{\epsilon_1}$ ،  $c_{\epsilon_2}$  و  $\text{Pr}_{\epsilon}$  که ثوابت مدل  $k-\epsilon$  هستند در [۱۲] و نیز [۱۴] آمده است.

اندازه اولیه هر یک از ذرات به هنگام پاشش به کمک تابع توزیع  $\chi$ -squared و به روش استوکاستیک تعیین می‌شود [۱۲]. سرعت، دما و موقعیت اولیه ذرات و نیز زاویه مخروط اسپری به عنوان داده‌های ورودی در اختیار برنامه قرار می‌گیرند. سپس با حل معادلات حاکم آخرین وضعیت و خواص هر یک از ذرات در هر قدم زمانی محاسبه می‌شود.

با توجه به اینکه در روش عددی به کار رفته در این پژوهش، عبارات دیفیوژنی به صورت ضمنی گسسته می‌شوند و



شکل ۲- نمای شبکه محاسباتی



شکل ۱- نمایی شماتیک از دستگاه پراکنده ساز

می توان از مدل تک نازلی و یا مدل چند نازلی استفاده کرد. در مدل تک نازلی زاویه مخروط اسپری را از ضریب منظر<sup>۷</sup> دستگاه می توان تقریب زد. در مدل چند نازلی تعدادی نازل فرضی با زاویه مخروط کم و در فواصل معین از یکدیگر روی پوسته دستگاه و به موازات محور در نظر گرفته می شوند. جریان قطرات سوخت از این نازلها به محیط پاشیده می شود. به خاطر فرض تقارن محوری زاویه پاشش در امتداد  $\theta$  برای هر نازل  $360^\circ$  است. مدل چند نازلی علاوه بر آنکه ارتفاع دستگاه را به نحو بهتری لحاظ می کند ارتفاع ابر را نیز با تقریب نزدیکتری نسبت به نتایج تجربی پیش بینی می کند. در نتایج ارائه شده در قسمت بعد از مدل چند نازلی استفاده شده است. شکل (۳) پاشش مدل چند نازلی را به تصویر می کشد.

## ۶- بحث

ایجاد موج دتونیشن و انتشار آن، تبدیل موج احتراق ملایم<sup>۸</sup> به دتونیشن و نیز مقدار افزایش فشاری که در دتونیشن به وجود می آید بستگی زیادی به میزان فعالیت ابر<sup>۹</sup> و در واقع نرخ آزادسازی انرژی دارد. از اینرو همان طور که قبلاً ذکر شد برخی از مشخصه های ابر سوخت و هوا نظیر نسبت توازن<sup>۱۰</sup>، آشفستگی، شکل، حجم و یکنواختی ابر تأثیر بسیار مهمی در

عبارات جابه جایی نیز در تعدادی زیرقدم محاسبه می شوند بنابراین اندازه قدم محاسباتی زمانی به واسطه شرط پایداری محدود نمی شود، اما تعدادی شرایط دقت وجود دارند که در انتخاب اندازه قدم زمانی باید لحاظ شوند. در جریانهای دوفازی علاوه بر آنکه اندازه قدم زمانی به واسطه اندازه سلولها و نیز میزان تغییر شکل آنها محدود می شود، به خاطر تبادل جرم و انرژی بین فازها نیز محدودیت های دیگری را می بایستی بپذیرد. به عنوان مثال مقدار جرم یا انرژی متبادله بین دوفاز در هر قدم زمانی می بایستی کمتر از درصد معینی از جرم و یا انرژی موجود در سلول محاسباتی باشد. این شرایط دقت در مرجع [۱۲] به خوبی تشریح شده اند. تجارب این پژوهش نشان می دهد که با توجه به مقدار جرم و سرعت نسبتاً زیاد مورد استفاده در پاشش انفجاری، حداکثر اندازه قدم مجاز زمانی بهتر است کوچکتر از حداقلی که شرایط مطرح در [۱۲] را ارضا می کند انتخاب شود. هرچه جرم سوخت یا سرعت پاشش بیشتر شود و یا فشار بخار سوخت کمتر شود اندازه قدم زمانی اولیه و حداکثر مجاز اندازه قدم زمانی می بایستی کاهش یابد.

## ۵- تشابه سازی دستگاه پراکنده ساز

برای مدلسازی فرایند پاشش از دستگاهی مطابق شکل (۱)،

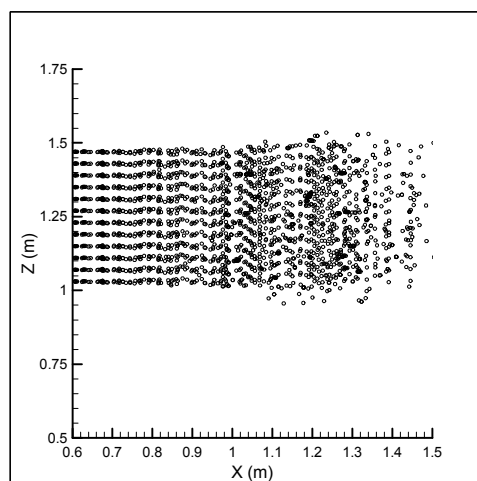
تعداد سلولهای شبکه محاسباتی  $80 \times 80$  و اندازه قدم زمانی از مرتبه  $s \times 10^{-5}$  بوده است. قابل ذکر است که اجراهای متعددی با تعداد سلولها و اندازه قدمهای زمانی مختلف صورت گرفت تا اطمینان لازم از عدم وابستگی نتایج به شبکه محاسباتی و قدمهای زمانی حاصل شود.

### ۶-۱- میدان نسبت توازن

شکل (۴) میدان نسبت توازن (ER) را در برخی زمانهای منتخب نشان می‌دهد. در محاسبه نسبت توازن تنها جرم بخار سوخت لحاظ شده است. با توجه به اینکه مرزهای ابر را می‌توان جایی در نظر گرفت که در آن نسبت توازن به سمت صفر رفته است بنابراین کرانه‌های<sup>۱۱</sup> که کمیت نزدیک به صفر دارد (نه دقیقاً صفر) شاخصی از شکل و حجم ابر است. همچنین از مقایسه میدان نسبت توازن در زمانهای مختلف می‌توان نرخ رشد ابر را به دست آورد و همان طور که قبلاً ذکر شد شکل و حجم ابر به همراه نرخ رشد آن از عوامل مهم تأثیرگذار در شروع موج دتونیشن و انتشار آن هستند. یکی از مهمترین دلایل اهمیت شکل و اندازه ابر این است که برای داشتن موج دتونیشن پایدار ابعاد ابر می‌بایستی با یک ضریبی بزرگتر از عرض سلول دتونیشن باشد. عرض سلول دتونیشن خود معیاری از میزان فعالیت ابر است. هر چه میزان فعالیت ابر بیشتر باشد، عرض سلول دتونیشن آن کوچکتر است [۱۵]. معادله‌ای نیمه تجربی در مورد ارتباط شعاع بحرانی ابر با عرض سلول دتونیشن توسط [۷] به صورت زیر ارائه شده است.

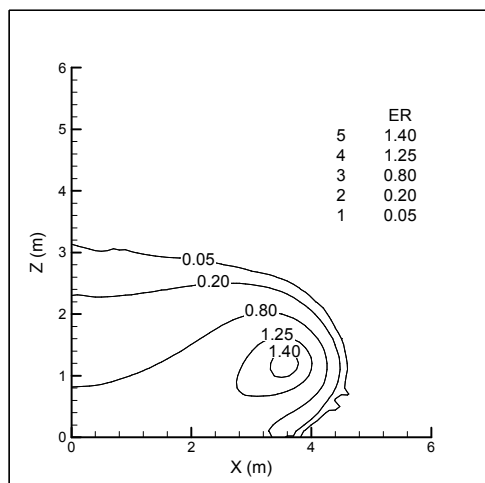
$$R_c = (8-12)b \quad (3)$$

که در آن  $R_c$  شعاع بحرانی و  $b$  عرض سلول دتونیشن است. از سوی دیگر باید به موج دتونیشن این فرصت داده شود تا مسافت مناسبی را در داخل ابر طی کند و از قدرت کافی برخوردار شود. مشاهدات تجربی نشان می‌دهند که وقتی ابعاد ابر به مقادیر بحرانی نزدیک می‌شود موج دتونیشن حاصله رفتار نوسانی دارد، به این معنی که سرعت موج و فشار آن به صورت پله‌ای نوسان می‌کنند [۷]. نکته دیگری که در شکل (۴) مشهود

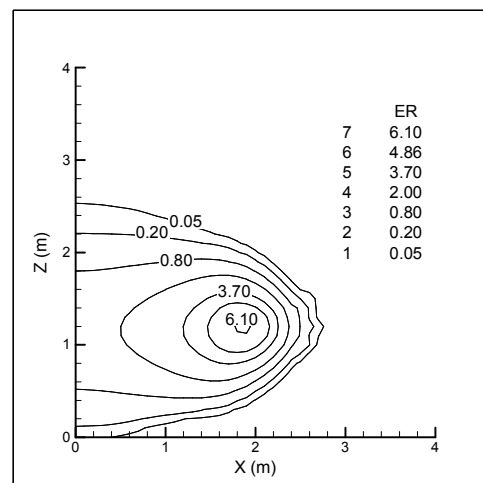


شکل ۳- نمایی از مدلسازی پاشش در مدل چند نازلی

میزان فعالیت ابر و در نتیجه در شروع موج دتونیشن مستقیم و نیز غیرمستقیم دارند. بنابراین برای تعیین بهترین محدوده از زمان و نیز مکان برای عمل کردن جرعه ثانویه، می‌بایستی به مطالعه تغییرات این مشخصه‌های مهم با زمان پرداخت و بر اساس وضعیت ابر در زمانهای مختلف زمان و مکان مناسب برای جرعه ثانویه را انتخاب کرد. ذکر این نکته مفید است که آزمایشهای مختلف نشان می‌دهند [۱۵] که فشار انفجار می‌تواند به محل جرعه بسیار حساس باشد. در بسیاری از مواقع تغییر محل جرعه از بدترین نقطه به نقطه مطلوبتر می‌تواند مرتبه فشار حداکثر را تغییر دهد. در این قسمت برخی از نتایج به دست آمده در این تشابه‌سازی به طور نمونه مطرح و مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. در استخراج این نتایج کلیه پدیده‌های مهم فیزیکی یعنی برخورد، شکست ثانویه و تبخیر قطرات لحاظ شده است. برای کسب این نتایج از 15 kg بنزین استفاده شده است. ارتفاع دستگاه پراکنده‌ساز 0.48 m، قطر آن 0.3 m و فاصله آن تا زمین 1 m است. سرعت پاشش 150 m/s و شعاع متوسط سائوتر 1 cm است [۲ و ۱۶]. با توجه به سرعت پاشش و شعاع دستگاه سوخت پاش مدت پاشش نیز قابل تعیین است [۱ و ۲]. البته مقادیر سرعت پاشش، جرم سوخت و یا سایر پارامترها در مواردی که خود به عنوان متغیر آمده‌اند، در داخل و یا زیرنویس شکل ذکر شده است. ناحیه حل  $8 \times 8 \text{ m}^2$



(ب)



(الف)

شکل ۴- میدان نسبت توازن در دو زمان منتخب: الف -  $t=20$  ms ، ب -  $t=200$  ms

کجای ابر باید واقع شود. حداقل انرژی لازم برای شروع دتونیشن نیز خود تابع خواص ترمودینامیکی مخلوط داخل ابر است. در مرجع [۴] حداقل انرژی لازم برای شروع دتونیشن برای برخی از سوختها و در بعضی نسبت توازنها ذکر شده است. مرجع [۷] نیز معادله نیمه تجربی زیر را پیشنهاد کرده است.

$$E_m = 50\rho U_d^2 b^3 \quad (۴)$$

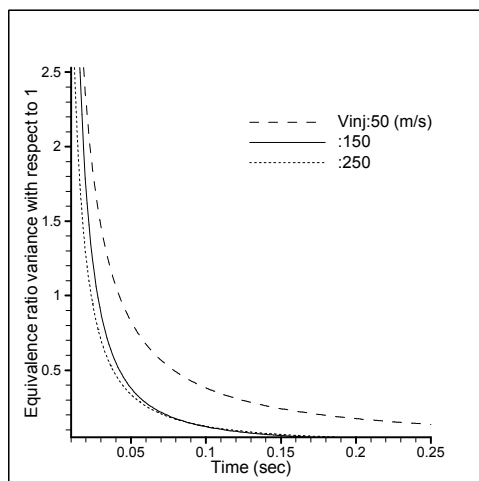
که در آن  $E_m$  انرژی حداقل برای شروع دتونیشن،  $\rho$  دانسیته ابر،  $U_d$  سرعت موج دتونیشن پایدار و  $b$  عرض سلول دتونیشن است. بنابراین تحلیل میدان نسبت توازن علاوه بر آنکه بیان می‌دارد که کدام ناحیه از ابر در محدوده دتونیشن‌پذیری در هر لحظه قرار دارد، نشان دهنده اینکه به چه میزان انرژی برای اشتعال ابر در یک نقطه منتخب در داخل این محدوده احتیاج است نیز هست. توجه به این نکته که مکانیزم انتقال این حداقل انرژی نیز می‌تواند در موفقیت شروع دتونیشن تأثیرگذار باشد حائز اهمیت است.

اگر حجم قسمتی از ابر که در محدوده دتونیشن‌پذیری قرار دارد حجم مؤثر و جرم مربوط به این حجم جرم مؤثر نامیده شود، مطالعه تغییرات این جرم و یا حجم با زمان می‌تواند در انتخاب زمان مناسب برای جرقه ثانویه مؤثر باشد. (شکل ۶)

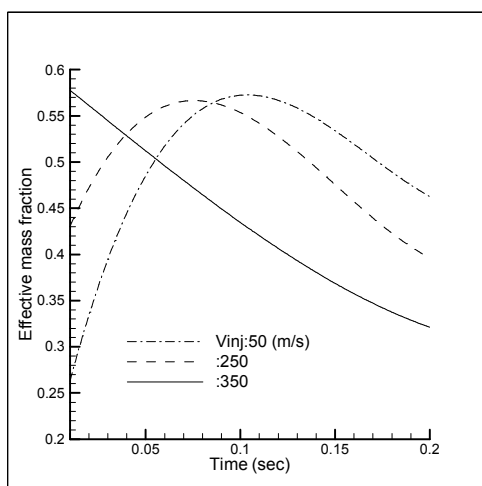
است وجود گرادیان شدید نسبت توازن در زمانهای اولیه و کاهش این گرادیان با افزایش زمان است. این امر در شکل (۵) به خوبی نشان داده شده است. نایکنواختی در نسبت توازن نیز می‌تواند منجر به ایجاد رفتار نوسانی در موج دتونیشن و نایکنواختی آن شود. بنابراین با مطالعه میدان نسبت توازن می‌توان محدوده‌هایی از زمان را برای عملکرد جرقه ثانویه انتخاب کرد که منجر به ایجاد موج پایدار شود. این شکلهای بیانگر این نکته‌اند که زمانهای اولیه پس از پاشش از لحاظ یکنواختی نسبت توازن و نیز ابعاد ابر فرصت مناسبی برای اشتعال ابر نیستند و بهتر است به مخلوط سوخت و هوا مجال لازم برای یکنواختی بیشتر داده شود. پدیده ناپایداری موج دتونیشن حاصل از جرقه زود هنگام در آزمونهای تجربی [۷] ملاحظه شده است.

از سوی دیگر یک مخلوط پیش‌آمیخته سوخت و هوا تنها زمانی دچار دتونیشن می‌شود که میزان نسبت توازن آن در داخل محدوده دتونیشن‌پذیری آن سوخت قرار داشته باشد. با توجه به اینکه محدوده دتونیشن‌پذیری بنزین بین نسبت توازن ۰/۸ تا ۳/۷ قرار دارد، بنابراین شکلهای مربوط به میدان نسبت توازن نشان می‌دهند که در هر لحظه کدام ناحیه از ابر در داخل محدوده دتونیشن‌پذیری قرار دارد و جرقه ثانویه در

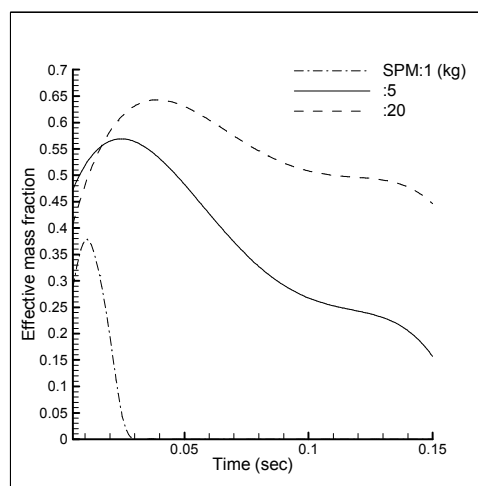




شکل ۵- تغییرات واریانس نسبت توازن با زمان در مقایسه با نسبت توازن یک



(ب)



(الف)

شکل ۶- تغییرات نسبت جرم مؤثر به جرم کل با زمان:

الف -  $V_{inj}=250 \text{ m/s}$  - ب -  $SPM=15 \text{ kg}$

پاشش به ویژه به جرم سوخت پاشیده شده<sup>۱۲</sup> (SPM) و نیز سرعت پاشش<sup>۱۳</sup> ( $V_{inj}$ ) بستگی دارد. از این رو همان طور که در شکل (۶-الف) برای جرم سوخت 1 kg ملاحظه می شود نقطه ماکزیمم جرم مؤثر در مراحل زمانی اولیه حادث می شود و سپس منحنی مربوطه با شیب نسبتاً تندی به سمت صفر می رود. بنابراین در چنین حالتی فرصت نسبتاً کمتری برای عمل کردن جرقه ثانویه وجود دارد و تقریباً پس از 30 ms از شروع پاشش دیگر هیچ ناحیه ای از ابر در داخل محدوده دتونیشن پذیری قرار

تغییرات جرم مؤثر را با زمان نشان می دهد. اندازه جرم مؤثر به واسطه سرریز نواحی با نسبت توازن بزرگتر از حد بالای محدوده دتونیشن پذیری و نیز به خاطر تبخیر قطرات افزایش یافته و به خاطر انبساط ابر و نیز سرریز نواحی داخل محدوده به نواحی با نسبت توازن کمتر از حد پایین محدوده فوق الذکر کاهش می یابد. بنابراین انتظار می رود که این جرم در یک نقطه به ماکزیمم خود رسیده و سپس کاهش یابد. اینکه این نقطه ماکزیمم در چه زمانی حاصل می شود خود به شرایط اولیه

ندارد. برای بهبود شرایط در این وضعیت یا باید سرعت پاشش را کاهش داد و یا آنکه از جرم سوخت بیشتری استفاده کرد. توجه به نحوه تغییر کمیت پارامترهای مورد نظر با زمان می‌تواند در انتخاب زمان مناسب برای جرقة ثانویه کاملاً مؤثر باشد. با توجه به اینکه سیستم اشتعال خود دارای تأخیر زمانی است و نیز از سوی دیگر پس از گذشت زمان ابر پراکنده می‌شود و غلظت سوخت در داخل آن به زیر حد اشتعال‌پذیری می‌رسد بنابراین یک بازه زمانی مؤثر نیز وجود دارد که طول آن به شرایط اولیه پاشش از جمله جرم سوخت و سرعت پاشش وابسته است. در این بازه زمانی کمیت اغلب پارامترهای فیزیکی مورد علاقه مثلاً انرژی جنبشی آشفستگی متوسط یا حجم مؤثر و امثال آن یا سیر نزولی یا صعودی - نزولی و یا صعودی دارد. براینده این رفتارها برای کمیت‌های مؤثر در شروع دتونیشن می‌بایستی در تعیین محدوده زمانی مناسب برای جرقة ثانویه مدنظر قرار گیرد.

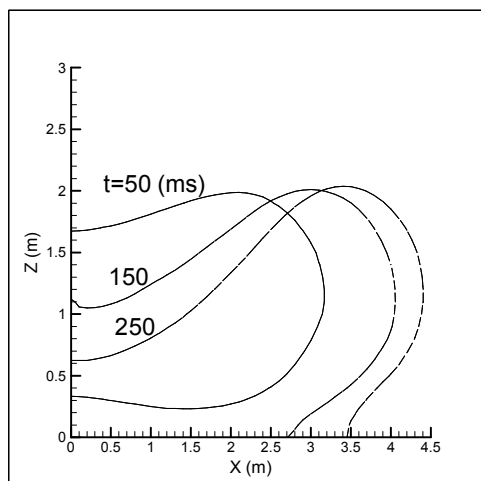
نکته دیگری که از مطالعه میدان نسبت توازن به دست می‌آید این است که محدوده دتونیشن‌پذیری در داخل ابر نه تنها به سمت راست جابه‌جا می‌شود بلکه در پاد ساعتگرد نیز چرخش می‌کند. این موضوع در شکل (۷) نشان داده شده است. بنابراین نواحی مجاور دستگاه پراکنده‌ساز با گذشت زمان به تدریج از بالا به پایین و از چپ به راست از محدوده دتونیشن‌پذیری خارج می‌شوند. تشریح این پدیده به کمک میدان سرعت که در قسمت بعد آمده بهتر صورت می‌گیرد.

#### ۶-۲- میدان سرعت

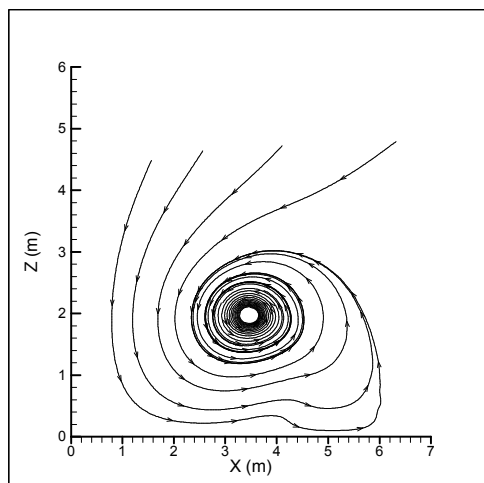
شکل (۸) خطوط جریان را در بعضی زمانهای منتخب نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود پس از پاشش سوخت دو گردابه نسبتاً قوی در داخل میدان جریان ایجاد می‌شود. گردابه بالایی در جهت پاد ساعتگرد و گردابه پایینی در جهت ساعتگرد چرخش می‌کنند. به خاطر اثر زمین گردابه پایینی زودتر از گردابه بالایی مضمحل می‌شود. آنگاه تمام میدان حل همان گونه که در شکل (۸-ب) نشان داده شده تحت تأثیر گردابه

بالایی قرار می‌گیرد. این امر دلیل اصلی چرخش کرانه حجم مؤثر در شکل (۷) است. با افزایش سرعت پاشش قدرت این گردابه‌ها بیشتر می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که میزان چرخش کرانه حجم مؤثر ازدیاد یابد. این موضوع در شکل (۹) مورد تأیید قرار گرفته است و کرانه‌های مربوط به سرعت‌های بزرگتر چرخش بیشتری را نشان می‌دهند. با افزایش ارتفاع محل پاشش، اثر زمین در انحلال گردابه پایینی بسیار کم می‌شود. از این رو همان گونه که در شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود کرانه حجم مؤثر با گذشت زمان تنها به سمت راست جابه‌جا می‌شود و چرخش قابل توجهی ندارد.

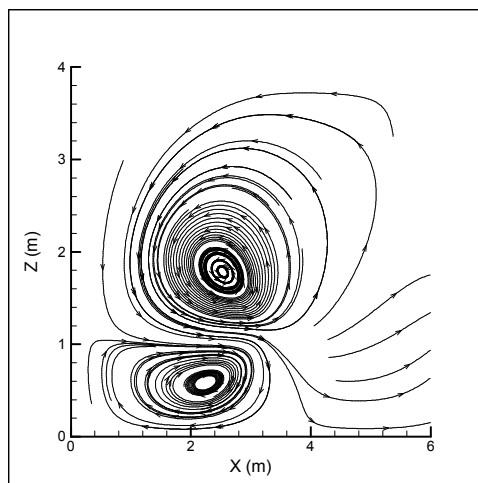
موقعیت محل جرقة ثانویه نسبت به مرکز گردابه‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. اگر جرقة در مرکز یک گردابه واقع شود آنگاه اصطلاحاً انتشار آرام بر انتشار آشفته تقدم می‌یابد. اما اگر جرقة در محیط یک گردابه واقع شود آنگاه انتشار آشفته بر انتشار آرام تقدم جسته و نرخ آزادسازی انرژی و پیشروی احتراق افزایش می‌یابد. افزایش نرخ سوختن باعث ازدیاد سرعت جریان و افزایش آشفستگی در جلوی جبهه شعله می‌شود. به نظر می‌رسد که شروع دتونیشن در ابر، با نرخ زیاد آزادسازی انرژی که در پی افزایش شدت احتراق در گردابه‌ها به وجود می‌آید ارتباط دارد. وقتی جرقة ثانویه در بیرون گردابه‌ها زده شود و احتراق در آن ناحیه شروع شود، به خاطر گرادیان فشار مطلوب، محصولات گرم احتراق به سرعت به سمت مرکز گردابه‌ها مکیده شده و اختلاطی سریع را با مخلوط سوخت و هوای نسوخته انجام می‌دهند که این امر منجر به ایجاد یک احتراق نیرومند می‌شود. این احتراق قوی باعث افزایش نرخ آزادسازی انرژی و تشکیل نقاط داغ<sup>۱۴</sup> در ابر و شروع دتونیشن می‌شود. از مقایسه مقیاس زمانی مکش محصولات احتراق به داخل گردابه‌ها و مقیاس زمانی واکنش‌های شیمیایی می‌توان وقوع احتراق شدید را پیش‌بینی کرد. اگر مقیاس زمانی مکش و اختلاط محصولات احتراق و مخلوط نسوخته در مقایسه با مقیاس زمانی واکنش‌های شیمیایی بزرگ باشد آنگاه نرخ آزادسازی انرژی کم خواهد بود. اما اگر مکش و اختلاط



شکل ۷- تغییرات کرانه حجم مؤثر در زمانهای منتخب



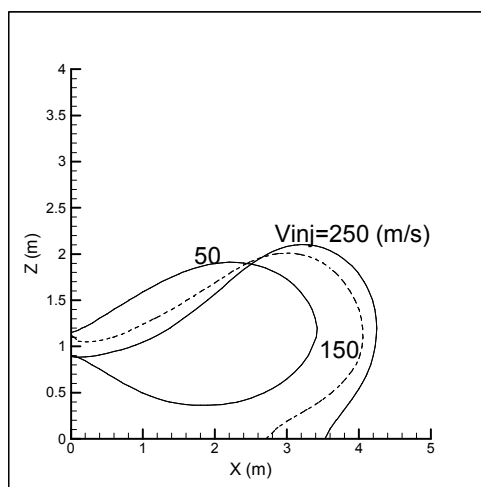
(ب)



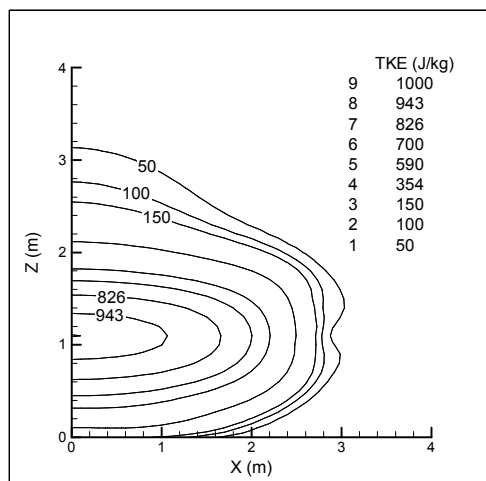
(الف)

شکل ۸- نمای خطوط جریان در زمانهای منتخب:

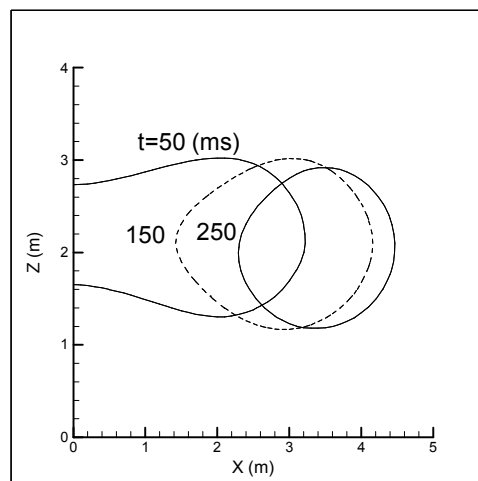
الف -  $t=50$  ms - ب -  $t=250$  ms



شکل ۹- مقایسه کرانه حجم مؤثر برای سرعتهای منتخب در یک زمان معین،  $t=150$  ms



شکل ۱۱- کرانه‌های انرژی جنبشی آشفته‌گی در یک زمان معین،  $t=50$  ms



شکل ۱۰- مقایسه کرانه حجم مؤثر در زمانهای منتخب در ارتفاع پاشش دو متر

یکنواختی موج دتوئیشن و رفتار آن دارد. شکل (۱۳) تغییرات واریانس جرم مخصوص را با زمان نشان می‌دهد. همان گونه که ملاحظه می‌شود واریانس جرم مخصوص با گذشت زمان کاهش می‌یابد. این بدان معنی است که با گذشت زمان، همان طور که انتظار می‌رود، ابر به سوی یکنواختی بیشتر می‌رود. بر این اساس بهتر است برای رسیدن به یکنواختی بیشتر، جرعه ثانویه را در مراحل زمانی دیرتر یا به عبارتی با تأخیر زمانی بیشتر فعال کرد.

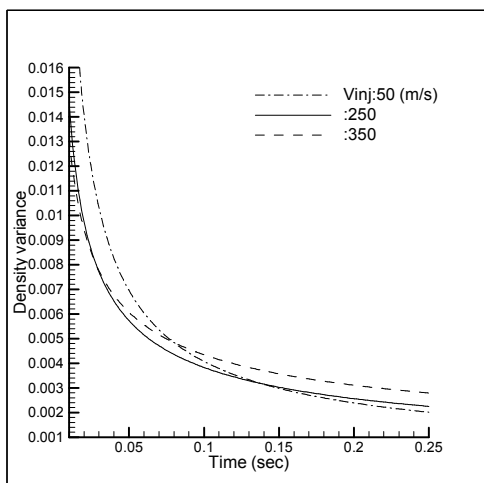
از مجموع مباحث مطرح شده در این قسمت می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب زمان مناسب برای عملکرد جرعه ثانویه می‌بایستی با رعایت همه جوانب و به عبارتی پدیده‌های مؤثر صورت گیرد. از دید توربولانس جریان و قدرت گردابه‌ها در افزایش نرخ احتراق بهتر است جرعه زودتر زده شود و از لحاظ یکنواختی نسبت توازن و جرم مخصوص در داخل ابر بهتر است جرعه ثانویه به تأخیر افتد. برای جرمهای سوخت و سرعتهای اولیه پاشش که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند، مناسبترین بازه زمانی برای زدن جرعه ثانویه بین 50 ms تا 150 ms پس از پاشش سوخت است. قبل از  $t=50$ ms و گرادانهای نسبت توازن در داخل ابر با توجه به شکلهای (۴) و (۵) زیاد است و احتمال رفتار نوسانی موج انفجار و همچنین احتمال عدم اختلاط مناسب بیشتر است. بعد از  $t=150$  ms نیز

محصولات احتراق در زمان کوتاهتری نسبت به مقیاسهای زمانی واکنشهای شیمیایی صورت گیرد آنگاه می‌توان یک انفجار و نرخ زیاد آزادسازی انرژی را انتظار داشت. نحوه و زمان آزادسازی انرژی در نوع موج انفجار حاصله نیز تأثیر بسیار مهمی دارد. بنابراین به نظر می‌رسد ناحیه بین دو گردابه وقتی در داخل محدوده دتوئیشن‌پذیری از لحاظ نسبت توازن باشد، ناحیه مناسبی برای زدن جرعه ثانویه و اشتعال ابر است.

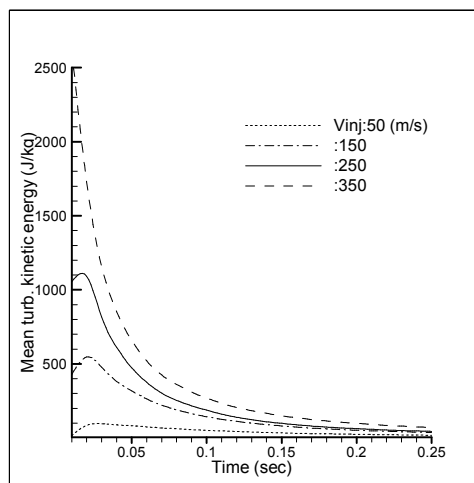
شکل (۱۱) کرانه‌های انرژی جنبشی آشفته‌گی<sup>۱۵</sup> (TKE) را در یک زمان معین نشان می‌دهد. به کمک این کرانه‌ها می‌توان میزان انرژی جنبشی آشفته‌گی و سهم آن را در افزایش نرخ آزادسازی انرژی در هر نقطه منتخب برای جرعه ثانویه تقریب و محاسبه کرد. شکل (۱۲) تغییرات متوسط انرژی جنبشی آشفته‌گی با زمان را نشان می‌دهد. همان گونه که انتظار می‌رود کمیت انرژی جنبشی آشفته‌گی با گذشت زمان کاهش می‌یابد. از این رو اگر تمایل به استفاده از اثرات مثبت آشفته‌گی در افزایش نرخهای انتقال و نیز در نرخ احتراق و آزادسازی انرژی وجود دارد باید جرعه ثانویه را از لحاظ زمانی به جلو انداخت.

### ۳-۶- یکنواختی

یکی دیگر از مشخصه‌های بسیار مهم ابر سوخت و هوا، یکنواختی آن است. یکنواختی ابر تأثیر قابل توجهی در



شکل ۱۳- تغییرات واریانس جرم مخصوص  
با زمان  $(\text{kg}/\text{m}^3)^2$



شکل ۱۲- تغییرات متوسط انرژی جنبشی آشفستگی با  
زمان برای سرعت‌های منتخب

پاشش نشان می‌دهد. همان گونه که انتظار می‌رود با افزایش سرعت پاشش و ازدیاد قدرت گردابه‌ها، نفوذ سوخت به اطراف محل پاشش با سرعت بیشتری صورت می‌گیرد. بنابراین نقاط مورد نظر در زیر دستگاه پراکنده‌ساز زودتر به محدودهٔ دتونیشن‌پذیری می‌رسند.

#### ۶-۴- توزیع زمان تأخیر

توزیع زمان تأخیر در اشتعال عاملی است که می‌تواند در تعیین نوع احتراقی که در ابر منتشر می‌شود و نیز در انتخاب محل و زمان مناسب برای جرقه کاربرد داشته باشد. مخلوط اشتعال‌پذیری را در نظر بگیرید که در آن توزیعی از زمان تأخیر در احتراق خود به خودی به صورت  $\tau(x,y,z)$  وجود داشته باشد. به طور کلی زمان تأخیر  $\tau(x,y,z)$  تابعی از ترکیب مخلوط و خواص ترمودینامیکی است. در اینجا شکل دقیق تابع  $\tau$  خیلی مهم نیست بلکه آنچه که اهمیت دارد این است که بعد از یک زمان تأخیر، در نقطهٔ  $(x,y,z)$  آزادسازی انرژی شروع می‌شود. انفجار اولیه در جایی شروع خواهد شد که مینیمم زمان تأخیر را داشته باشد و سپس به صورت خود به خودی با سرعت  $u_{sp}$  که  $u_{sp} = \left(\frac{\partial \tau}{\partial X}\right)^{-1}$ ، انتشار می‌یابد.  $u_{sp}$  سرعت انتشار موج آزادسازی خود به خودی انرژی شیمیایی،  $\tau$  زمان

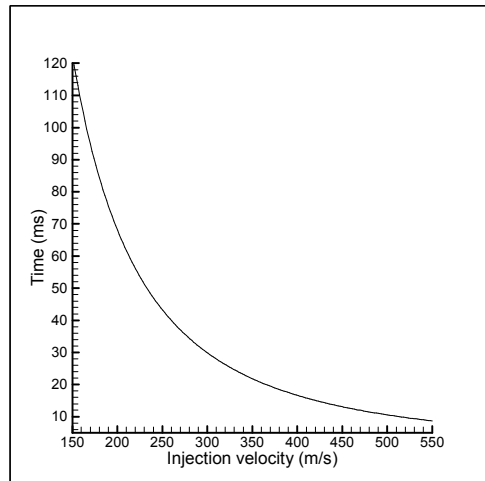
با توجه به شکلهای (۶) و (۱۲) میزان جرم موثر و نیز آشفستگی جریان کم است و احتمال سرعت و قدرت گرفتن موج احتراق کاهش می‌یابد. هر چه جرم سوخت پاشیده شده بیشتر باشد بهتر است به مرزهای بالایی محدودهٔ ذکر شده نزدیک شد و هر چه سرعت پاشش بیشتر باشد می‌توان جرقه را زودتر فعال کرد. معمولاً حوالی نسبت توازن ۱ به کمترین انرژی نسبی برای اشتعال نیاز دارد. بیشترین فشار حاصل از احتراق نیز در این حوالی به دست می‌آید. زمان مناسب برای اشتعال ابر در حوالی نسبت توازن یک در شکل (۵) نشان داده شده است. در مورد محل جرقه ثانویه نیز ناحیه‌ای که در داخل محدوده دتونیشن‌پذیری از لحاظ نسبت توازن و در محیط گردابه‌ها قرار دارد مناسب به نظر می‌رسد. از سوی دیگر برای داشتن راندمان بهینه، محل جرقه باید به گونه‌ای انتخاب شود که تمام سوخت توسط موج دتونیشن مصرف شود. بنابراین نواحی نزدیک به زمین به ویژه در مجاورت دستگاه پراکنده‌ساز از این نظر مناسب‌ترند. شاید بتوان گفت یکی از مناسبترین محلها، نقاط زیر دستگاه پراکنده‌ساز است که در حوالی زمین قرار دارند. بدیهی است که زمان مناسب و مکان مناسب نیز خود در اندرکنش با یکدیگرند. شکل (۱۴) نحوهٔ تغییر زمان لازم برای رسیدن نقاط زیر دستگاه به حدود دتونیشن‌پذیری را بر حسب سرعت

$$\tau(x, y, z) = \frac{c_v R (T(x, y, z))^2 \exp(E/RT(x, y, z))}{f Q \lambda (x, y, z) E} \left[ 1 + \frac{2RT(x, y, z)}{E} \right] \quad (5)$$

در این معادله  $c_v$  گرمای ویژه در حجم ثابت،  $R$  ثابت جهانی گاز،  $T$  دما،  $E$  انرژی اکتیواسیون،  $f$  ضریب فرکانس در قانون آرنیوس،  $Q$  گرمای واکنش و  $\lambda$  غلظت سوخت است. به طور منطقی می توان نتیجه گرفت که بهترین نقطه برای اشتعال داخلی ابر جایی است که کمترین زمان تأخیر را دارد. شکل (۱۵) تغییرات زمان تأخیر بدون بعد را بر حسب زمان نشان می دهد. همان گونه که ملاحظه می شود زمان تأخیر به طور متوسط تمایل به کاهش را با گذشت زمان نشان می دهد. البته در سرعت های بالاتر حداقل زمان تأخیر نیز بیشتر شده است که دلیل این امر به نحوه توزیع دما و غلظت سوخت مربوط می شود. شکل (۱۶) تغییرات ارتفاع و شعاع نقطه با حداقل زمان تأخیر را بر حسب زمان نشان می دهد. در این شکلها برای نمایش سمت تغییرات از تطبیق خطی استفاده شده است. شعاع و ارتفاع نقطه با حداقل زمان تأخیر با ازدیاد سرعت، افزایش می یابد. در سرعت های کمتر با گذشت زمان نقطه با حداقل زمان تأخیر در شعاع های کوچکتر واقع می شود. همچنین ملاحظه می شود که ارتفاع نقطه با حداقل زمان تأخیر با گذشت زمان کاهش می یابد که دلیل این امر می تواند افزایش دما به خاطر اثر میراکندگی زمین روی گردابه پایینی و تبدیل انرژی جنبشی آن به انرژی داخلی باشد.

#### ۷- آزمایشهای تجربی

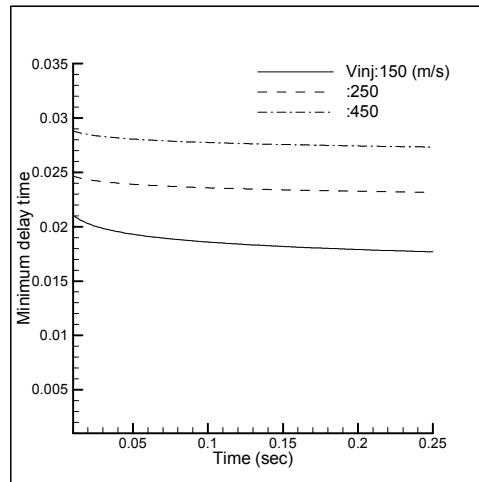
به منظور تأیید برخی از نتایج عددی، از نتایج تعداد محدودی آزمایش تجربی که برای مطالعه شروع دتونیشن و اثرات آن بر محیط اطراف ترتیب داده شده بود، استفاده شده است. در این آزمایشها دستگاه پراکنده ساز مطابق شکل (۱) بوده است. یعنی یک ظرف استوانه ای که در امتداد محور آن یک ماده منفجره و در حلقه بین پوسته ماده منفجره و پوسته ظرف، سوخت اصلی قرار می گیرد. از سوخت های مایع مختلف به ویژه



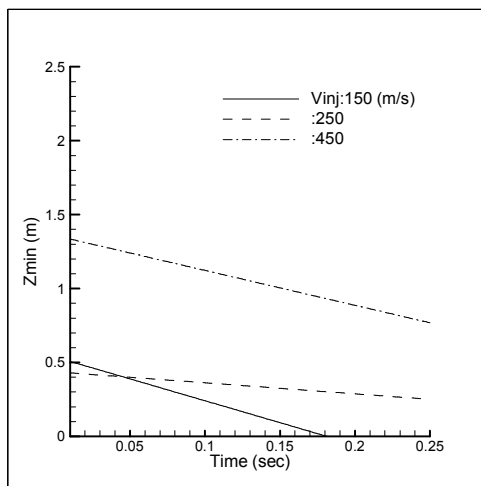
شکل ۱۴- تغییرات زمان رسیدن نقاط زیر دستگاه پراکنده ساز به حدود دتونیشن پذیری بر حسب سرعت پاشش

تأخیر و  $X$  یک بعد هندسی است.  $u_{sp}$  می تواند هر مقداری را از صفر تا بینهایت داشته باشد. از مقایسه بین سرعت موج آزادسازی انرژی،  $u_{sp}$ ، سرعت موج دتونیشن،  $u_{CJ}$ ، و سرعت صوت می توان نوع احتراقی را که در ابر منتشر می شود پیش بینی کرد [۱۷]. دتونیشن زمانی امکان وقوع می یابد که  $u_{sp} \leq u_{CJ}$  باشد. تبدیل بین انواع احتراق براساس ارتباط بین فرایندهای گاز دینامیکی و فرایندهای شیمیایی تعیین می شود. سهم فرایندهای شیمیایی با  $u_{sp}$  و سهم فرایندهای گاز دینامیکی توسط امواج فشاری و یا امواج شوک تعریف می شود. وقتی مقیاس زمانی فرایندهای گاز دینامیکی نزدیک به مقیاس زمانی آزادسازی انرژی شیمیایی باشد تقویت فرایندهای انفجاری را می توان انتظار داشت. کاهش گرادیان زمان تأخیر باعث افزایش  $u_{sp}$  و افزایش احتمال احتراق انفجاری خواهد شد.

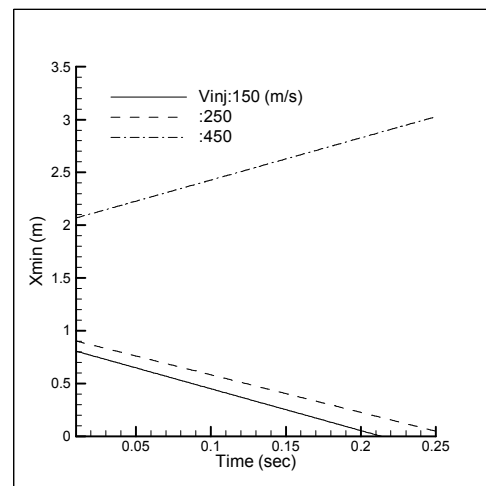
با توجه به اینکه در پژوهش حاضر، سوخت مایع با سرعت اولیه نسبتاً زیاد به داخل هوای محیط پاشیده می شود می توان انتظار داشت که آشفتنگی حاصل از اندرکنش قطرات پاشیده شده و هوای محیط باعث ایجاد توزیعی از زمان تأخیر در داخل ابر شود. برای محاسبه تغییرات  $\tau$  در داخل ابر می توان از معادله زیر استفاده کرد [۱۷]:



شکل ۱۵- تغییرات زمان تأخیر بدون بعد بر حسب زمان برای سرعت‌های پاشش منتخب



(ب)



(الف)

شکل ۱۶- تغییرات موقعیت نقطه با مینیمم زمان تأخیر: الف- در امتداد شعاع ب- در امتداد ارتفاع

85cm از سطح زمین بوده است. هرچند که مقادیر و اطلاعات داخل ابر می‌توانند مهم و مفید باشند اما تاکنون ثبت آنها به شکل قابل اعتماد میسر نشده است. با وجود این می‌توان شکل، حجم و نرخ رشد ابر را از تصاویر تولید شده در آزمایشها به دست آورد. در شکل (۱۸) مقادیر مربوط به شعاع ابر در زمانهای مختلف که به روش عددی این پژوهش محاسبه شده‌اند با مقادیر تجربی آنها، که از آزمایشهای فوق‌الذکر به دست آمده‌اند، مقایسه شده است. در روش تجربی، برای تعیین شعاع ابر فاصله بین لبه جلویی ابر تا محور دستگاه سوخت

بنزین به عنوان سوخت اصلی و از C4 به عنوان ماده منفجره استفاده شده است. از تعدادی شاخص، تابلوی شیشه‌ای و لوازم اندازه‌گیری برای مطالعه اثرات دتونیشن بر محیط اطراف استفاده شده است. یک دوربین سرعت بالا با قابلیت دوهزار عکس در هر ثانیه و یک دوربین ویدئویی نیز برای به تصویر کشیدن فرایند پاشش و انفجار به کار گرفته شده است. در شکل (۱۷) برخی از تصاویر منتخب از فرایند پاشش و شروع دتونیشن به عنوان نمونه نشان داده شده است. در این آزمایش جرم سوخت (بنزین) 120 kg و ارتفاع دستگاه پراکنده‌ساز



(ب)



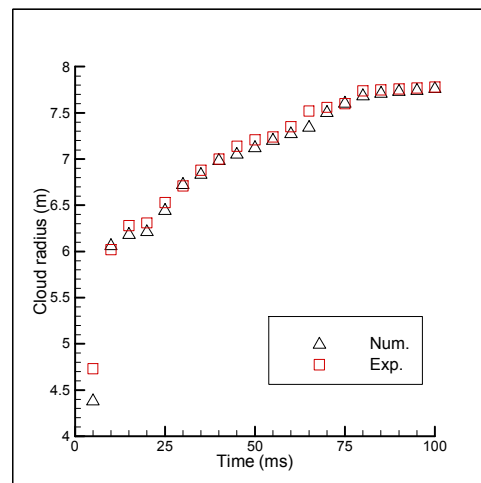
(الف)



(ج)

شکل ۱۷- تصاویری از انتشار و دتوئیشن ابر سوخت و هوا در چند زمان منتخب:

الف -  $t=60\text{ ms}$  - ب -  $t=140\text{ ms}$  - ج -  $t=220\text{ ms}$



شکل ۱۸- مقایسه نتایج عددی این تحقیق با نتایج تجربی



پاش به کمک شاخصهایی که در میدان آزمایش وجود داشته‌اند اندازه‌گیری شده است. در روش عددی از متوسط کرانه‌های با نسبت توازن کوچکتر از 0.1 و عمدتاً کرانه  $ER=0.02$  استفاده شده است. برای تخمین مقادیر اولیه آزمایشها نظیر سرعت پاشش و اندازه متوسط قطرات، که به عنوان اطلاعات ورودی مورد نیاز برنامه عددی‌اند، از روشها و نتایج ارائه شده در مراجع [۱۶،۲،۱] استفاده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود نتایج حل عددی تطابق خوبی با نتایج تجربی بویژه پس از سپری شدن زمانهای اولیه پس از پاشش را دارند. علاوه بر این انحنا منحنیهای روش عددی و نتایج تجربی نیز از نزدیکی خوبی برخوردارند. بنابراین روش عددی نتایج کاملاً رضایت بخشی را در تعیین اندازه ابر و نیز نرخ رشد آن ارائه می‌دهد. شاید بتوان گفت مهمترین دستاورد این مقایسه آن است که مدل‌های استفاده شده در این حل عددی [۱۳،۱۲] برای تشابه‌سازی پدیده‌های فیزیکی حاکم بر جریان دوفازی در محیط باز به نحو مطلوبی عمل می‌کنند.

## ۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل عددی برای تشابه‌سازی مشخصه‌های ابر سوخت و هوا به منظور مطالعه دتونیشن‌پذیری آن ارائه شده است. مشخصه‌هایی نظیر نسبت توازن، آشفستگی،

یکنواختی، شکل و حجم ابر به عنوان متغیرهای مهم و تأثیرگذار در شروع موفق دتونیشن معرفی و مورد مطالعه قرار گرفتند. از مطالعه میدان نسبت توازن می‌توان به بررسی تغییرات شکل و حجم ابر و نیز تغییر حجم ناحیه‌ای از ابر که در داخل محدوده دتونیشن‌پذیری قرار دارد پرداخت. از بررسی میدان سرعت و خطوط جریان می‌توان محل و قدرت گردابه‌ها را تعقیب و مطالعه کرد. این گردابه‌ها می‌توانند در افزایش نرخ احتراق و شروع دتونیشن نقش بسیار مؤثری داشته باشند. مطالعه میدان جرم مخصوص بیانگر حرکت ابر به سمت یکنواختی بیشتر با گذشت زمان است. بررسی توزیع زمان تأخیر در اشتعال نیز می‌تواند در تعیین نوع احتراقی که در ابر منتشر می‌شود و نیز تشخیص نقاط مناسب برای شروع احتراق به کار رود. بر اساس این مطالعات محدوده زمانی و نیز محل‌های مناسب برای زدن جرقه ثانویه و اشتعال ابر پیشنهاد شده است. این مدلسازی می‌تواند برای به دست آوردن مقادیر بهینه برای ضریب منظر<sup>۷</sup> دستگاه پراکنده‌ساز، نسبت جرم سوخت به جرم ماده منفجره اولیه و محل مناسب مشتعل‌کننده ثانویه به کار گرفته شود. همچنین از نتایج این شبیه‌سازی می‌توان در تعیین فاصله ایمن بین مخازن نگهداری سوخت و منابع تأمین جرقه به منظور اجتناب از وقوع انفجار در مواقع نشت تصادفی سوخت استفاده کرد.

## واژه نامه

1. fuel air explosive devices
2. discrete-droplet model
3. law of the wall
4. pressure outflow
5. periodic
6. pressure inflow
7. aspect ratio
8. deflagration
9. cloud reactivity
10. equivalence ratio(ER)
11. contour
12. spray mass
13. injection velocity
14. hot spots
15. turbulent kinetic energy (TKE)

1. Glass, M.W., "Far-Field Dispersal Modeling for Fuel-Air Explosive Devices," Sandia National Laboratories Report, SAND90-0528, May 1990.
2. Gardner, D.R., "Near-Field Dispersal Modeling for Liquid Fuel-Air Explosives," Sandia National Laboratories Report, SAND90-0686, July 1990.
3. Makhviladze, G.M., Roberts, J.P., and Yakush, S.E., "Combustion of Two-Phase Hydrocarbon Fuel Clouds Released Into the Atmosphere," *Combustion and Flame*, Vol. 118, pp. 583-605, 1999.
4. Lizhong, Y., Weicheng, F., Xiaodong, Z., and Qing'an, W., "Analysis of Fire and Explosion Hazards of Some Hydrocarbon-Air Mixtures," *Journal of Hazardous Materials*, A84, pp. 123-131, 2001.
5. Thomas, G.O., and Jones, A., "Some Observations of the Jet Initiation of Detonation," *Combustion and Flame*, Vol. 120, pp. 392-398, 2000.
6. Ungut, A., and Shuff, P.J., "Deflagration to Detonation Transition from a Venting Pipe," *Combustion Science and Technology*, Vol. 63, pp. 75-87, 1989.
7. Alekseev, V.I., Dorofeev, S.B., Sidorov, V.P., and Chaivanov, B.B., "Experimental Study of Large Scale Unconfined Fuel Spray Detonations," *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol. 154, pp. 95-104, 1993.
8. Benedick, W.B., Tieszen, S.R., Knystautas, R., and Lee, J.H.S., "Detonation of Unconfined Large Scale Fuel Spray-Air Clouds," *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol. 133, pp. 297-310, 1991.
9. Sirignano, W.A., *Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays*, Cambridge University Press, U.K., 1999.
10. Crowe, C., Sommerfeld, M., and Tsuji, Y., *Multiphase Flows with Droplets and Particles*, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, 1998.
11. Frohn, A., and Roth, N., *Dynamics of Droplets*, Springer-Verlag, Berlin, 2000.
12. Amsden, A.A., O'Rourke, P.J., Butler, T.D., "KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays," Los Alamos National Laboratory Report LA-11560-MS, May 1989.
13. Amsden, A.A., "KIVA-3: A KIVA Program with Block-Structured Mesh for Complex Geometries," Los Alamos National Laboratory Report LA-12503-MS, March 1993.
14. White, F. M., *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill, Inc., Singapore, 1991.
15. Bjerketvedt, D., Bakke, J.R., and Wingerden, K.V., "Gas Explosion Handbook," *Journal of Hazardous Materials*, Vol 52, pp. 1-150, 1997.
16. Liu, J.C., Xue, S.S., Zhu, G. S., Zhang, Z. C. and Xie, L. F. "Experimental and Numerical Study on Explosive Dispersal and Fuel-Air Cloud," in: *Proc. of the Colloquium on Gas, Vapor, Hybrid and Fuel-Air Explosions*, Schaumburg, Illinois, pp. 341-354, 1998.
17. Bartenev, A.M., and Gelfand, B.E., "Spontaneous Initiation of Detonations," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 26, pp. 29-55, 2000.