

# تخمین اندازه‌ی اولیه‌ی قطرات در پاشش سوخت مایع از دستگاه‌های انفجاری هوا- سوخت

محمد مهدی دوستدار<sup>۱</sup>

گروه مهندسی مکانیک

دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(تاریخ دریافت: ۹۰/۳/۳۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۷/۳۰)

## چکیده

دستگاه‌های انفجاری هوا- سوخت برای پاشش سیال عامل به محیط باز اتمسفر و ایجاد امواج دتونیشن در ابر حاصل از آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای مطالعه‌ی عددی میدان جریان در داخل این ابر، نیاز به دانستن شرایط اولیه پاشش از جمله اندازه‌ی اولیه‌ی قطرات وجود دارد. در این مقاله شکست اولیه‌ی سیال در پاشش از دستگاه‌های هوا- سوخت به کمک مدل شکست فیلم مایع مدل‌سازی شده و بر این مبنا، یک کد رایانه‌ای برای انجام محاسبات نوشته و تهیه گردید. سپس نتایج تحلیل عددی شکست اولیه با نتایج تجربی اعتباردهی شده و مقادیر تخمینی از اندازه‌ی قطرات به یک برنامه‌ی مدل‌سازی انتشار ابر دوفازی داده شد و نتایج حاصله با مقادیر تجربی مقایسه گردید. از تلفیق نتایج مطالعه‌ی عددی و آزمایش‌های تجربی، پیشنهادهای برای تخمین اندازه‌ی اولیه قطرات در پاشش انفجاری حاصل از دستگاه‌های هوا سوخت ارائه شده است. در حالت کلی نتایج نشان می‌دهند که اندازه‌ی متوسط قطرات، از مرتبه سانتی‌متر است.

**واژه‌های کلیدی:** شکست اولیه، مدل ناپایداری فیلم، حل عددی، دستگاه هوا سوخت

## An Estimation of Droplet Initial Size in Explosive Dispersal of Liquid Fuel from Fuel-Air Explosive Devices

M.M. Doustdar

Mech. Eng. Dep't.

Imam Hossein Univ.

(Received: 21 June 2011; Accepted: 22 Oct. 2011)

### ABSTRACT

Fuel-air explosive devices are used to disperse liquid fuels into open atmosphere and create detonation waves in the resultant cloud. To numerically study of flow field inside the cloud, the initial conditions of injection as well as the droplet initial size should be designated. In the present paper the primary break up of liquid fuel dispersed from a FAE device was simulated by using film instability model and a computer code was written to perform the calculations. Experimental results were used to validate the numerical one and the estimated droplet initial mean size was given to a far field simulation code as input data. Then the result of this latter simulation was compared with the related experimental results. With regard to numerical and experimental results, we proposed an interval to estimate the initial size of droplet dispersed from a FAE device. Generally, the results show mean droplet diameter is of centimeter order of magnitude.

**Keywords:** Primary Breakup, Film Instability Model, Numerical Simulation

## ۱- مقدمه

دتونیشن از جمله پدیده‌های فیزیکی است که از جذابیت علمی خاصی برخوردار است. یکی از موارد قابل توجه، وقوع دتونیشن در محیط باز اتمسفر است. برای مطالعه دتونیشن در محیط باز لازم است تا در ابتدا ابری از سوخت و هوا را ایجاد کرده و سپس آن را در یک زمان مقتضی و از یک مکان مناسب در داخل ابر مشتعل نمود. دستگاه‌های هوا- سوخت وسایلی هستند که با پاشش انفجاری سوخت به محیط اتمسفر ابر سوخت و هوا را ایجاد می‌کنند. مرسوم است که میدان جریان را پس از پاشش سوخت به دو میدان نزدیک<sup>۱</sup> و دور<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی کنند. از تحلیل میدان نزدیک که در آن شکست اولیه فیلم سیال ( سوخت) به قطرات اتفاق می‌افتد، انتظار می‌رود تا شرایط اولیه قطرات حاصل از شکست فیلم از جمله قطر، دما و سرعت قطرات تخمین زده شود. از تحلیل میدان دور، نرخ تبخیر قطرات، نرخ اختلاط بخار سوخت و هوا، شکل هندسی ابر، انرژی جنبشی آشفته‌گی، محدوده احتراق‌پذیری داخل ابر و اطلاعاتی از این قبیل به دست می‌آیند. در واقع نتایج مطالعه میدان نزدیک به عنوان شرایط اولیه برای مطالعه میدان دور مورد استفاده قرار می‌گیرند.

تلاش‌های متعددی برای تحلیل عددی و تجربی میدان جریان در داخل ابر سوخت و هوا صورت گرفته است. گلاس<sup>۳</sup> [۱]، لیو جی سی<sup>۴</sup> و همکاران [۲] و دوستدار و همکاران [۸]- [۳] میدان جریان دور را در داخل ابر به روش عددی و با استفاده از نسخه‌های کد کیوا<sup>۵</sup> مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعات شرایط اولیه قطرات از جمله قطر آنها به عنوان ورودی به کد داده می‌شود، بنابراین تخمین صحیح آنها حائز اهمیت می‌باشد. لیو<sup>۶</sup> و همکاران [۹] به مطالعه تجربی انفجار حاصل از دستگاه‌های هوا- سوخت پرداخته و نتایج حاصل از آن را ارائه کرده‌اند. گاردنر و گلاس<sup>۷</sup> [۱۰] یک مدل ترکیبی برای میدان‌های نزدیک و دور مطرح نموده‌اند. رژیم‌های

شکست فیلم مایع و تئوری‌های شکست جریان سیال در مراجع [۱۱-۱۲] مطالعه شده‌اند. مراجع [۱۳-۱۴] شکست صفحه‌ای<sup>۸</sup> سیال و ناپایداری آن را مورد بررسی قرار داده‌اند. تنگ<sup>۹</sup> و همکاران [۱۵] به تخمین اندازه‌ی اولیه قطرات حاصل از شکست جت استوانه‌ای پرداختند. مدل‌سازی میدان جریان نزدیک و استخراج روابط حاکم بر این میدان توسط سینگ<sup>۱۰</sup> و همکارش [۱۶] و نیز گاردنر [۱۷] انجام شده است. کویی<sup>۱۱</sup> و همکارانش [۱۸] اثر نحوه‌ی شروع انفجار خرج مرکزی بر میدان جریان و به ویژه سرعت پاشش را مطالعه کرده‌اند. سمیرانت<sup>۱۲</sup> و همکاران [۱۹] نتایج تجربی خود را در مورد ضخامت فیلم سیال در لحظه‌ی شکست و اندازه‌ی قطر قطرات حاصل از شکست فیلم استوانه‌ای ارائه داده‌اند. مطالب عمومی در مورد پدیده‌های شکست اولیه مایع و تشکیل اسپری را می‌توان در مراجع [۲۰-۲۲] یافت. اما به هر حال به خاطر پیچیدگی فیزیک شکست اولیه به‌ویژه در پاشش انفجاری، مطالعات منتشره در مورد تحلیل میدان جریان نزدیک بسیار کمتر از آن چیزی است که در مورد تحلیل میدان دور منتشر شده است.

در این مقاله به بررسی شکست اولیه سیال در پاشش انفجاری از دستگاه‌های هوا- سوخت به منظور تخمین اندازه‌ی متوسط اولیه قطرات پرداخته می‌شود. برای دستیابی به این تخمین، ابتدا شکست اولیه سیال با مدل ناپایداری فیلم مدل‌سازی می‌شود تا ارتباطی نظری ( تئوری) بین فاصله شکست و اندازه‌ی قطرات به وجود آید. سپس به کمک تست تجربی، تقریب مناسبی از فاصله شکست ارائه می‌شود تا تخمینی از اندازه‌ی قطرات نیز به دست آید. آنگاه مقدار این اندازه‌ی تخمینی به یک برنامه‌ی تحلیل میدان دور داده می‌شود و نتایج حاصل از آن با نتایج تست تجربی میدان دور مقایسه و نتیجه‌گیری می‌گردد.

## ۲- دستگاه‌های انفجاری هوا - سوخت (FAE)

شکل ۱ نمایی شماتیک از یک دستگاه انفجاری هوا - سوخت را نشان می‌دهد. این دستگاه‌ها از یک ظرف معمولاً استوانه‌ای

۸- Sheet

۹- Teng

۱۰- Singh

۱۱- Qi

۱۲- Samirant

۱- Near Field

۲- Far Field

۳- Glass

۴- Liu J.C.

۵- KIVA

۶- Liu

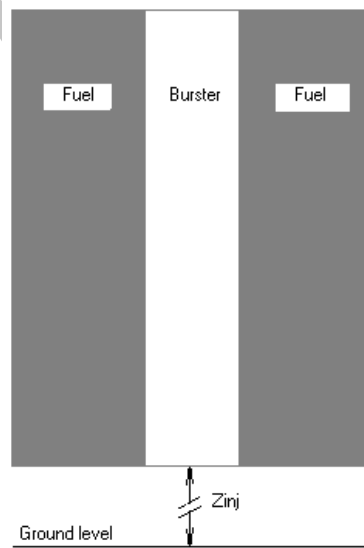
۷- Gardner &amp; Glass

نزدیک در پاشش انفجاری استفاده شده است. با وجود آنکه این کد تخمین خوبی از میدان‌های دما، فشار و سرعت ارائه می‌کند اما به دلیل نداشتن مدلی برای کشش سطحی نمی‌تواند اندازه‌ی اولیه قطرات را پس از شکست انفجاری پیش بینی کند. از این‌رو مدل‌های تحلیلی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مدل‌ها می‌توانند اطلاعات مفیدی را در مورد محدوده‌ی اندازه‌ی قطرات در اختیار قرار دهند. از بین مدل‌های تحلیلی می‌توان به دو مدل کشش سطحی و ناپایداری فیلم اشاره نمود. مدل کشش سطحی مدل ساده‌ای است که بر مبنای حداقل کردن انرژی سطحی بنا نهاده شده است. این مدل می‌تواند زمان شکست را در صورت معلوم بودن اندازه‌ی قطرات و یا اندازه‌ی اولیه قطرات را در صورت معلوم بودن زمان شکست تخمین بزند. مدل ناپایداری فیلم بر مبنای ناپایداری خطی یک فیلم مایع در حال انبساط شعاعی پایه‌گذاری شده است. این مدل می‌تواند تخمینی از محدوده زمان شکست و اندازه‌ی اولیه قطرات را در اختیار قرار دهد. با توجه به اینکه در این مقاله، مدل ناپایداری فیلم برای مطالعه‌ی تحلیلی انتخاب شده است در عبارات زیر کلیات این مدل توضیح داده می‌شود.

#### ۴- مدل ناپایداری فیلم

شکل ۲ نمایی شماتیک از سیال‌های مورد بحث در یک دستگاه انفجاری هوا سوخت را در یک سطح مقطع از نمای بالا نشان می‌دهد. سیال شماره ۱ گازهای حاصل از انفجار خرج اولیه، سیال شماره ۲ سوخت مایع و سیال شماره ۳ هوای محیط می‌باشد. در واقع سوخت اصلی به صورت یک حلقه در نظر گرفته می‌شود که داخل آن گازهای حاصل از انفجار خرج اولیه و بیرون آن هوای محیط قرار دارد. سطح حایل بین سیال‌های ۱ و ۲ و نیز بین سیال‌های ۲ و ۳ به ترتیب سطح تماس ۱ (داخلی) و سطح تماس ۲ (خارجی) نامیده می‌شوند. حلقه سوخت دارای شعاع خارجی  $R_o$ ، شعاع داخلی  $R_i$  و ارتفاعی به اندازه  $h$  است. به خاطر اختلاف فشار گازهای حاصل از انفجار خرج و محیط، حلقه‌ی سوخت و یا به عبارت دیگر فیلم مایع به سمت بیرون افزایش شعاع داده و به تدریج نازک‌تر می‌شود و تحت تأثیر اغتشاشات وارد به سطوح تماس داخلی و خارجی در نهایت به قطرات مایع

شکل تشکیل شده‌اند که در امتداد محور آن مقداری ماده منفجره (خرج اولیه HE) جاسازی می‌شود. سوخت مایع در اطراف این خرج اولیه‌ی مرکزی قرار می‌گیرد. به عبارتی سوخت مایع در حلقه بین سطح بیرونی پوسته‌ی حاوی خرج و سطح درونی پوسته‌ی ظرف اصلی واقع می‌شود. با انفجار خرج اولیه، سوخت مایع به محیط اطراف پاشیده شده و پس از تبخیر و اختلاط با هوا ابری از بخار سوخت، قطرات مایع و هوا شکل می‌گیرد. برای تحلیل دینامیکی میدان جریان در داخل ابر، از جمله تعیین خواص ترمودینامیکی و نحوه‌ی توزیع نسبت سوخت به هوا در داخل آن و تشخیص مناطقی از ابر که به محدوده‌ی دتونیشن‌پذیری رسیده و برای شروع اشتعال مناسب می‌باشند، نیاز به دانستن اطلاعاتی از قبیل فاصله شکست فیلم سیال و نیز اندازه‌ی اولیه‌ی قطرات می‌باشد که در این مقاله به این موضوع پرداخته می‌شود.



شکل (۱): نمای شماتیک از دستگاه سوخت پاش FAE.

#### ۳- مدل‌های تحلیلی شکست فیلم مایع

به‌خاطر فیزیک پیچیده، وجود مقیاس‌های طولی متعدد و اهمیت سطح تماس، مدل‌های زیادی برای تحلیل شکست اولیه‌ی سیال در پاشش انفجاری وجود ندارد. به دلیل همین پیچیدگی‌ها، مدل‌های عددی نیز عمدتاً قادر به تعیین دقیق اندازه‌ی اولیه قطرات در شکست انفجاری مایع نیستند. در مرجع [۱۷] از کد هیدرودینامیکی CTH برای مطالعه میدان

به صورت  $\tau = \frac{t}{z_i / V_i}$  تعریف می‌شود.  $t$  زمان و  $V_i$  یک

مقیاس مناسب بدون بعد سازی سرعت است. اندیس  $n$  مود محوری و اندیس  $m$  مود قطبی (محیطی) اغتشاش را نشان می‌دهد. در اینجا فرض شده که اندیس‌های  $m$  و  $n$  برای هر دو سطح تماس یکسان است. فرض غیرلزج بودن سیال، امکان تعریف توابع پتانسیل را فراهم می‌سازد. همچنین در مرجع [۱۶] تصریح شده که حداکثر خطا در تخمین اندازه‌ی قطرات برای شکست صفحه‌ی سیال وقتی معادلات لزج با غیرلزج جایگزین شوند از ده درصد تجاوز نمی‌کند. در این شرایط معادله‌ی حرکت در هر سه سیال، حلی بر حسب تابع پتانسیل سرعت  $\Phi_i$  خواهد داشت به گونه‌ای که:

$$\nabla^2 \Phi_i = 0, \quad (3)$$

$$\vec{V} = \nabla \Phi_i,$$

که در آن،  $\vec{V}$  سرعت است. شرایط مرزی نیز به این صورت تعریف می‌شود که مؤلفه‌های نرمال سرعت روی سطوح مشترک مساوی باشند یعنی:

$$\begin{aligned} \vec{n}_1 \cdot \nabla \Phi_1 &= \vec{n}_1 \cdot \nabla \Phi_2, \\ \vec{n}_2 \cdot \nabla \Phi_2 &= \vec{n}_2 \cdot \nabla \Phi_3, \end{aligned} \quad (4)$$

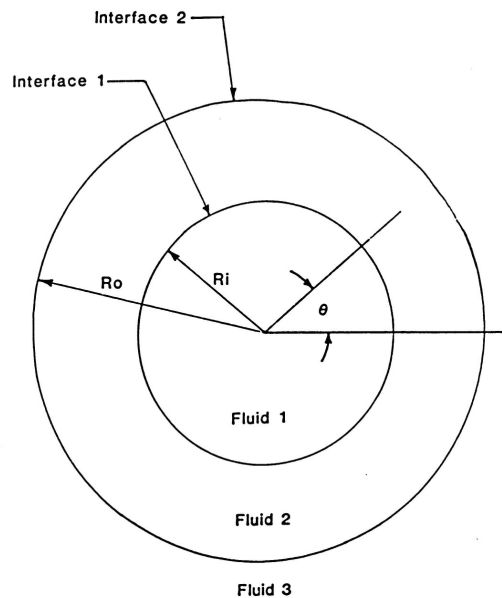
که در آن،  $\vec{n}_i$  بردار نرمال بر سطح مشترک  $i$  است. توابع پتانسیل  $\Phi_i$  بر حسب  $r_i(\tau)$ ،  $r_o(\tau)$ ،  $r_1(\tau)$  و  $\eta_1(\tau)$  قابل حل هستند و در نهایت می‌توان نشان داد که معادلات دیفرانسیل زیر از این حل استخراج می‌شوند [۱۷]:

$$\frac{d}{d\tau} [r_i f_{11} \dot{\eta}_1] - G_r \eta_1 - r_i \frac{d}{d\tau} \left[ \frac{f_{12}}{r_i} \frac{d}{d\tau} [r_i \eta_2] \right] = 0, \quad (5)$$

$$\frac{d}{d\tau} [r_i f_{22} \dot{\eta}_2] - G_r \eta_2 + r_i \frac{d}{d\tau} \left[ \frac{f_{21}}{r_i} \frac{d}{d\tau} [r_i \eta_1] \right] = 0. \quad (6)$$

توابع  $f_{ij}$  تابعی بر حسب توابع اصلاح شده‌ی از نوع اول و دوم بسل می‌باشند که معمولاً در معادلات دیفرانسیل حاکم بر شکست فیلم مایع ظاهر می‌شوند. شکل این توابع به صورت زیر است [۱۷]:

شکسته می‌شود. در مدل مورد بحث در اینجا فیلم سیال غیر لزج، غیر قابل تراکم و جریان کاملاً شعاعی، ایزوگر (حجم ثابت)، غیرچرخشی و ایزوترمال فرض می‌شود. اگر چه این فرضیات برای گازهای در حال انبساط حاصل از انفجار خرج اولیه و یا اتمسفر محیط با محدودیت روبرو هستند اما اجازه می‌دهند تا یک حل تحلیلی به دست آید که به کمک آن می‌توان تخمینی از زمان شکست فیلم مایع و قطر اولیه‌ی قطرات به دست آورد.



شکل (۲): هندسه‌ی استوانه‌ای مورد استفاده در مدل ناپایداری فیلم.

برای انجام این تحلیل فرض می‌شود به صورت زیر اغتشاش کوچکی به اندازه‌ی  $\eta_i Y_m Z_n$  به شعاع‌های درونی و بیرونی فیلم سیال اعمال شود:

$$r_1(\tau) = r_i(\tau) + \eta_1(\tau) Y_m Z_n, \quad (1)$$

$$r_2(\tau) = r_o(\tau) + \eta_2(\tau) Y_m Z_n,$$

$$Y_m = A_m \cos(m\theta) + B_m \sin(m\theta) \quad (2)$$

$$Z_n = \cos(n\pi z).$$

که در این روابط،  $r_i = \frac{R_i}{z_i}$  و  $r_o = \frac{R_o}{z_i}$  به ترتیب

شعاع‌های درونی و بیرونی بدون بعد،  $Z$  نصف ارتفاع دستگاه، و  $A_m$  و  $B_m$  ثوابت هستند.  $\tau$  زمان بدون بعد است که

$$R_i(\cdot) = R_{\infty} (1 - \exp(-at_i)), \quad (14)$$

اگر از  $Z_i$  (نصف ارتفاع دستگاه) برای بدون بعدسازی هندسی،  $V_i$  برای بدون بعدسازی سرعت و  $\frac{Z_i}{V_i}$  برای بدون بعدسازی زمان استفاده شود می‌توان رابطه (۱۴) را به صورت زیر نوشت:

$$r_o(\tau) = r_{\infty} (1 - \exp(-a^*(\tau + \tau_o))), \quad (15)$$

که در آن،  $r_o = \frac{R_o}{Z_i}$ ،  $r_{\infty} = \frac{R_{\infty}}{Z_i}$ ،  $\tau = \frac{t}{Z_i/V_i}$ ،  $\tau_o = \frac{t_o}{Z_i/V_i}$ ، بنابراین  $a^* = a \frac{Z_i}{V_i} = \frac{V_i}{R_{\infty} V_i} = \frac{Z_i}{R_{\infty}}$

یک مقیاس مناسب سرعت خواهد بود. از معادلات (۵-۶) با شرایط اولیه‌ی مناسب می‌توان انتگرال‌گیری عددی نموده و زمان شکستن فیلم سیال و ضخامت آنرا در لحظه‌ی شکست به دست آورد. لحظه‌ی شکست وقتی است که دامنه‌ی هر یک از اغتشاشات داخلی و یا خارجی با ضخامت فیلم مایع برابر شود. به عبارت دیگر زمان شکستن لحظه‌ای است که رابطه زیر برقرار باشد:

$$\max\{|\eta_r(\tau_b)|, |\eta_v(\tau_b)|\} = r_r(\tau_b) - r_i(\tau_b) = w(\tau_b), \quad (16)$$

که در آن،  $w$  ضخامت فیلم و اندیس  $b$  شکست را نشان می‌دهد. این مدل وقتی معتبر است که  $|\eta_i|$  خیلی کوچک‌تر از یک باشد. یک محدوده‌ی کاربردی به شکل  $|\dot{\eta}_i(\cdot)| \leq 1.0 / (aR_{\infty})$  و  $|\eta_i(\cdot)| Z_i < 1 \text{ mm}$  [۱۷] پیشنهاد شده است.  $R_{\infty}$  و  $a$  به ترتیب بر حسب متر و  $1/\text{sec}$  هستند.

#### ۵- برنامه رایانه‌ای

برای حل معادلات مذکور در قسمت قبل یک برنامه‌ی رایانه‌ای به زبان فرترن نوشته شد تا دستگاه معادلات دیفرانسیل (۵-۱۲) را به روش رانج کوتای مرتبه چهار حل نماید. برای تعیین کمیت توابع بسل از قابلیت کتابخانه‌ی کامپایلر پاوراستیشن<sup>۱۳</sup> استفاده گردید. مشتقات توابع بسل نیز بر حسب خود این توابع محاسبه و در داخل برنامه محاسبه می‌گردند [۲۳]. با اجرای برنامه به ازای شعاع داخلی

$$f_{11} = \frac{\beta_r I_m(kr_i)}{k \dot{I}_m(kr_i)} - \frac{\beta_r I_m(kr_i) \dot{K}_m(kr_i) - \dot{I}_m(kr_i) K_m(kr_i)}{k \dot{I}_m(kr_i) \dot{K}_m(kr_i) - \dot{I}_m(kr_i) K_m(kr_i)}, \quad (7)$$

$$f_{12} = \frac{\beta_v I_m(kr_i) \dot{K}_m(kr_i) - \dot{I}_m(kr_i) K_m(kr_i)}{k \dot{I}_m(kr_i) \dot{K}_m(kr_i) - \dot{I}_m(kr_i) K_m(kr_i)}, \quad (8)$$

$$f_{21} = \frac{\beta_r I_m(kr_i) \dot{K}_m(kr_i) - \dot{I}_m(kr_i) K_m(kr_i)}{k \dot{I}_m(kr_i) \dot{K}_m(kr_i) - \dot{I}_m(kr_i) K_m(kr_i)}, \quad (9)$$

$$f_{22} = -\frac{\beta_r K_m(kr_i)}{k \dot{K}_m(kr_i)} + \frac{\beta_r I_m(kr_i) \dot{K}_m(kr_i) - \dot{I}_m(kr_i) K_m(kr_i)}{k \dot{I}_m(kr_i) \dot{K}_m(kr_i) - \dot{I}_m(kr_i) K_m(kr_i)}. \quad (10)$$

که در این روابط،  $k = n\pi$  و  $\beta_i = \rho_i / (\rho_v + \rho_r + \rho_v)$  است. اندیس‌های ۱ الی ۳ مربوط به سیالات مذکور در شکل ۲ و  $\rho$  جرم مخصوص است.  $I_m$  تابع بسل اصلاح شده از نوع اول و از مرتبه  $m$  است و علامت پریم دیفرانسیل نسبت به آرگومان را نشان می‌دهد.  $K_m$  تابع بسل اصلاح شده از نوع دوم و از مرتبه  $m$  است.

آرگومان توابع بسل  $kr$  است. توابع  $G_v$  و  $G_r$  نیز که در معادلات (۵-۶) آمده‌اند به صورت زیر هستند:

$$G_r = (\beta_v - \beta_r) r_i r_i - r_i \frac{d}{d\tau} \left[ \frac{\dot{r}_i}{r_i} f_{11} \right] + \frac{1}{r_i We_r} [1 - m^2 - (kr_i)^2], \quad (11)$$

$$G_v = (\beta_r - \beta_v) r_r r_r - r_r \frac{d}{d\tau} \left[ \frac{\dot{r}_r}{r_r} f_{21} \right] + \frac{1}{r_r We_v} [1 - m^2 - (kr_r)^2]. \quad (12)$$

که در آن،  $We$  عدد وبر است. برای تکمیل شدن مجموعه‌ی معادلات، بایستی تابعیت مفروضی از تغییرات شعاع خارجی یا شعاع داخلی را بر حسب زمان مورد استفاده قرار داد. مرجع [۱۷] رابطه‌ی زیر را برای پیش‌بینی تغییرات شعاع خارجی بر حسب زمان پیشنهاد کرده است که در مدل‌های مختلف تحلیل شکست فیلم از آن استفاده می‌شود:

$$R_i(t) = R_{\infty} (1 - \exp(-a(t + t_o))), \quad (13)$$

در این رابطه،  $R_i(t)$  شعاع خارجی فیلم مایع،  $R_{\infty}$  شعاع نهایی ابر توسعه یافته،  $a$  یک ثابت زمانی و  $t_o$  ثابتی است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

طول موج و روند تغییرات آنها تأثیر دارد هر چند این تأثیر خیلی قابل توجه نیست. با وجود این از مقایسه شکل‌های ۸ و ۷ ملاحظه می‌شود که افزایش  $M$ ، منجر به افزایش دامنه‌ی موج شده و بنابراین زمان شکست را کاهش می‌دهد. این نتیجه قبلاً نیز در شکل ۳ تأیید شده است.

#### ۷- اعتباردهی

اطلاعات منتشر شده در مورد شکست اولیه‌ی فیلم مایع در پاشش انفجاری بسیار محدود می‌باشد. از جمله نتایج منتشر شده‌ی قابل استفاده مربوط به سمیرانت و همکاران [۱۹] می‌باشد که مرجع [۱۷] نیز از این نتایج برای اعتباردهی استفاده کرده است. دستگاه مورد استفاده در آزمایش سمیرانت یک حلقه‌ی استوانه‌ای به شعاع داخلی  $1.5\text{cm}$ ، شعاع خارجی  $5.5\text{cm}$  و ارتفاع  $12\text{cm}$  با سوخت اتیلن اکساید بوده است. نتایج این آزمایش به همراه نتایج شبیه‌سازی مرجع [۱۷] و نتایج شبیه‌سازی مقاله حاضر در جدول ۱ ارائه شده است. مرجع [۱۷] دامنه‌ی اغتشاشات را در لحظه صفر به صورت زیر انتخاب کرده است:

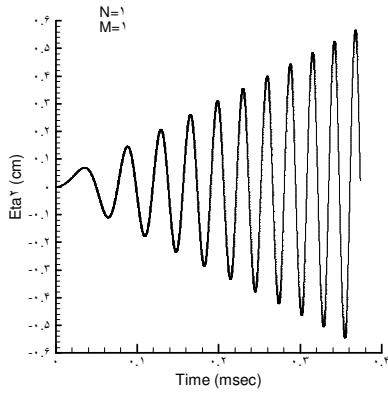
$$\begin{aligned} \eta_1(0) &= -0.01, \\ \eta_2(0) &= \eta_1'(0) = \eta_2'(0) = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

اما به مقدار انتخاب شده برای  $N$  و  $M$  اشاره‌ای نکرده است. عدد داده شده  $0.44\text{ cm}$  برای قطر قطرات توسط این مرجع در جدول ۱ در واقع همان ضخامت فیلم است. زیرا خروجی حل عددی این مرجع، فقط می‌تواند ضخامت فیلم در لحظه‌ی شکست باشد. در حل مقاله‌ی حاضر نیز جواب نزدیک به این مرجع به ازای  $N=1$ ،  $M=2$  و مقادیر مذکور در رابطه (۱۷) برای دامنه‌ی اولیه‌ی اغتشاشات بدست می‌آید. البته در مقاله‌ی حاضر با توجه به تغییر حجم داخل فیلم، جرم مخصوص گازهای حاصل از خرج اولیه در هر قدم زمانی به‌روز می‌شود که به این مورد نیز مرجع [۱۷] اشاره‌ای نکرده است.

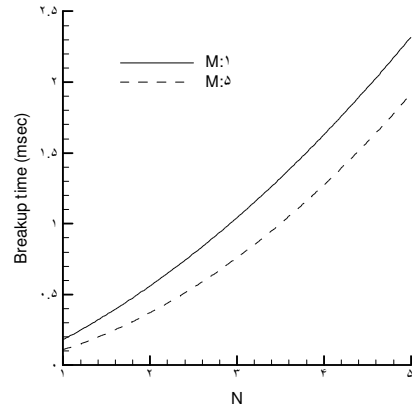
و شعاع خارجی اولیه‌ی فیلم، ارتفاع فیلم، و نوع سیال دامنه‌ی اغتشاشات و نیز ضخامت فیلم در هر گام زمانی محاسبه می‌گردند. وقتی دامنه هر یک از اغتشاشات داخلی و یا خارجی با ضخامت فیلم مایع برابر شود، فیلم دچار شکست می‌شود. در این لحظه ضخامت فیلم، فاصله شکست و زمان شکست محاسبه می‌شوند.

#### ۶- نتایج

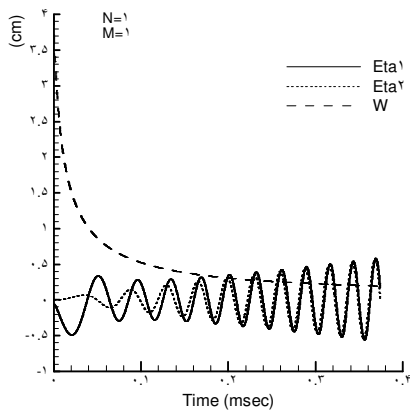
در این قسمت برخی از نتایج به‌دست آمده از اجرای برنامه به‌عنوان نمونه مطرح می‌شوند. مشخصات هندسی و خواص سیال مورد استفاده در آزمایش مرجع [۱۹] به‌عنوان ورودی به برنامه داده شده‌اند. شکل‌های ۴-۳ به ترتیب تغییرات زمان شکست فیلم و ضخامت فیلم در لحظه‌ی شکست را بر حسب تغییرات شاخص مود محوری اغتشاش یعنی  $N$  نشان می‌دهند. در این شکل‌ها مود قطبی اغتشاش ( $M$ ) به‌عنوان پارامتر استفاده شده است. برای وضوح بیشتر در شکل‌ها حروف بزرگ  $M$ ،  $A$  و  $N$  به‌کار رفته‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش شاخص  $N$  زمان شکست افزایش و ضخامت فیلم در لحظه‌ی شکست کاهش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود با افزایش  $M$ ، زمان شکست کاهش و ضخامت فیلم افزایش یافته است. شکل ۵ تغییرات موج اغتشاشی  $\eta_1$  را بر حسب زمان به ازای شاخص‌های  $N=1$  و  $M=1$  نشان می‌دهد. طبق این شکل دامنه موج در ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته و طول موج با افزایش زمان کاهش می‌یابد. شکل ۶ تغییرات موج اغتشاش  $\eta_2$  را بر حسب زمان نشان می‌دهد که طبق آن دامنه موج روند صعودی دارد اما طول موج با افزایش زمان کاهش می‌یابد. شکل ۷ کاهش ضخامت فیلم همزمان با افزایش دامنه‌ی امواج اغتشاشی، و لحظه‌ی شکست فیلم را به نمایش گذاشته است. همان‌طور که گفته شد وقتی دامنه هر یک از اغتشاشات داخلی و یا خارجی با ضخامت فیلم مایع ( $w$ ) برابر شود فیلم دچار شکست می‌شود. در این شکل همچنین ملاحظه می‌شود که دامنه و طول موج مربوط به  $\eta_1$  و  $\eta_2$  به تدریج به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند. شکل ۸ تغییرات  $\eta_1$ ،  $\eta_2$  و ضخامت فیلم را به ازای  $N=1$  و  $M=5$  نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییر  $M$  در دامنه،



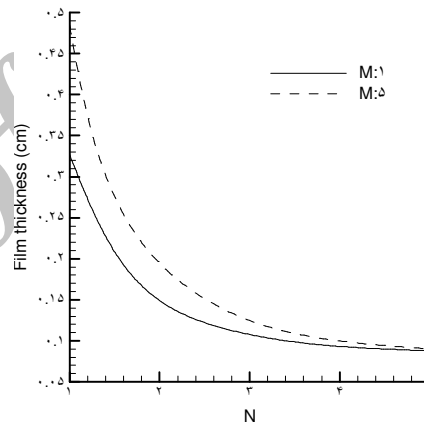
شکل (۶): تغییرات  $\eta_2$  بر حسب زمان به ازای یک مود اغتشاشی با پارامترهای  $N=1$  و  $M=1$ .



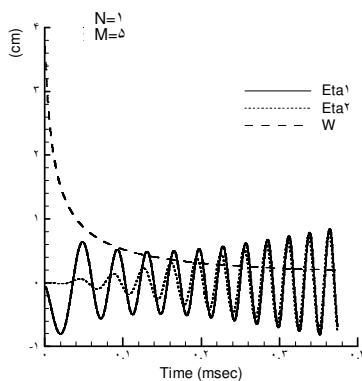
شکل (۳): تغییرات زمان شکست بر حسب تغییرات شاخص مود محوری اغتشاش  $N$ .



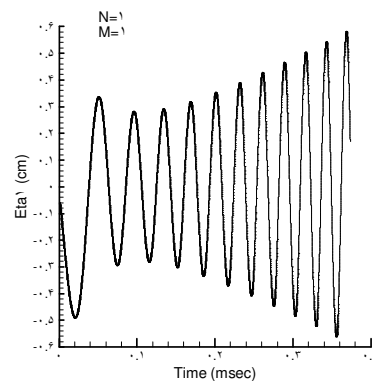
شکل (۷): تغییرات ضخامت فیلم مایع به همراه تغییرات  $\eta_1$  و  $\eta_2$  بر حسب زمان برای مود اغتشاشی با پارامترهای  $N=1$  و  $M=1$ .



شکل (۴): تغییرات ضخامت فیلم در لحظه شکست بر حسب تغییرات شاخص مود محوری اغتشاش  $N$ .

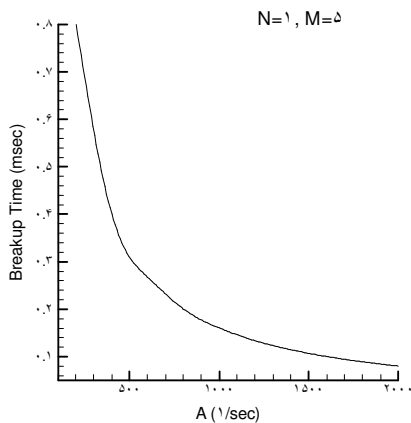


شکل (۸): تغییرات ضخامت فیلم مایع به همراه تغییرات  $\eta_1$  و  $\eta_2$  بر حسب زمان برای مود اغتشاشی با پارامترهای  $N=1$  و  $M=5$ .

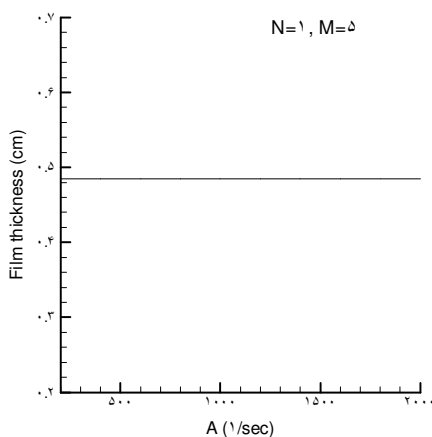


شکل (۵): تغییرات  $\eta_1$  بر حسب زمان به ازای یک مود اغتشاشی با پارامترهای  $N=1$  و  $M=1$ .

می‌یابد. از این‌رو همان‌گونه که فیلم مایع با سرعت بیشتری نازک می‌شود، اغتشاش نیز با سرعت بیشتری افزایش دامنه داده و بنابراین شکست همواره در ضخامت بخصوصی اتفاق می‌افتد. لذا قطر قطرات بدون تغییر باقی مانده و متأثر از متغیر  $A$  نمی‌باشد. به همین علت همان‌طور که در ردیف آخر جدول ۱ نشان داده شده اگر  $A = 200 \frac{1}{s}$  انتخاب شود آنگاه تطابق نتایج مدل ناپایداری فیلم با نتایج آزمایش مرجع [۱۹] بسیار خوب می‌شود. شاید مهم‌ترین دست آورد این مقایسه را بتوان افزایش اعتماد به این نحوه مدل‌سازی شکست فیلم مایع قلمداد نمود.



شکل (۹): تغییرات زمان شکست بر حسب تغییرات پارامتر زمانی  $A$ .



شکل (۱۰): تغییرات ضخامت فیلم در لحظه شکست بر حسب تغییرات پارامتر زمانی  $A$ .

جدول (۱): مقایسه نتایج حل عددی با نتایج موجود.

مأخذ	فاصله شکست (cm)	زمان شکست (ms)	ضخامت فیلم در لحظه شکست (cm)	قطر متوسط حسابی (cm)
نتایج تجربی [۱۹]	-	۱/۳	۰/۳	۰/۵
حل عددی مرجع [۱۷] $A = 1.4695 \times 10^3 \frac{1}{s}$	-	۰/۱۱	-	۰/۴۴
حل عددی حاضر با $N=1, M=0.7$ $A = 1.4695 \times 10^3 \frac{1}{s}$	۴۶/۵۳	۰/۱۸	۰/۳۰۲	۰/۳-۰/۱۶
حل عددی حاضر با $N=1, M=0.7$ $A = 200 \frac{1}{s}$	۴۶/۵۳	۱/۳۰۵	۰/۳۰۲	۰/۳-۰/۱۶

نکته‌ی قابل توجهی که در ارتباط با آزمایش مرجع [۱۹] وجود دارد این است که ضخامت فیلم سیال درست قبل از شکستن ۰/۳ cm و درست بعد از شکستن قطر متوسط قطرات ۰/۵ cm بوده است. از این‌رو مرجع [۱۷] رابطه زیر را پیشنهاد داده است:

$$w(t_b) \leq D \leq 2w(t_b), \quad (18)$$

رابطه فوق به این معنی است که قطر متوسط قطرات ( $D$ ) بین ضخامت فیلم در لحظه شکست و دو برابر آن قرار دارد. بنابراین مدل ناپایداری فیلم می‌تواند یک حد پائینی و یک حد بالایی برای قطر متوسط قطرات را بدست آورد. به همین خاطر در ستون آخر جدول ۱ بازه‌ی تخمینی قطر قطرات برای حل حاضر بین ضخامت فیلم در لحظه شکست و دو برابر آن آمده است.

از سوی دیگر شکل‌های ۹-۱۰ تأثیر متغیر  $A$  را، که در رابطه (۱۳) به صورت  $a$  ظاهر شده، در رفتار شکست فیلم مایع نشان می‌دهند. هر چه  $A$  بزرگتر باشد شعاع‌های بیرونی و درونی فیلم سریع‌تر رشد می‌کنند و بنابراین ضخامت فیلم سریع‌تر کاهش یافته و زمان شکست کوتاه‌تر می‌شود. از سوی دیگر با افزایش  $A$ ، سرعت رشد دامنه‌ی اغتشاش نیز افزایش



## ۸- آزمایش دستگاه انفجاری هوا- سوخت

در این قسمت به نتایج آزمایش دستگاه انفجاری هوا- سوخت FAE در اندازه‌ی رایج آن پرداخته می‌شود. سیال مورد استفاده در این آزمایش آب بوده است. دلیل استفاده از آب تطابق بهتر خواص آب مورد استفاده در آزمایش با خواص به‌کار رفته در نرم‌افزار شبیه‌سازی می‌باشد. مشخصات دستگاه مورد استفاده به شرح زیر است:

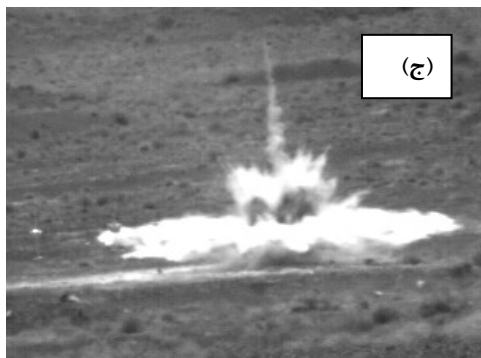
نوع سیال: آب ، خرج مرکزی:  $C^4$  ، ارتفاع ظرف: cm  $47/7$  ، جرم سیال: kg  $20/6$  ، جرم خرج: kg  $0/150$  ، قطر بیرونی ظرف: cm  $23/6$  ، ارتفاع پایه ظرف: cm  $116$  ، قطر درونی سیال: cm  $2/6$  ، جنس پوسته ظرف: ST37 ، تجهیزات اصلی مورد استفاده شامل دوربین سرعت بالای رنگی  $5000\text{ fps}$  ، دوربین سرعت بالای سیاه و سفید  $1000\text{ fps}$  ، دوربین فیلمبرداری دیجیتال ، دوربین عکس‌برداری- فیلمبرداری ، دستگاه تست شرایط محیط ( شامل دما، فشار، رطوبت و سرعت باد) می‌باشد. شاخص‌های اندازه‌گیری ابعاد ابر در فواصل  $1/5$  ،  $3$  ،  $4/5$  ،  $6$  و  $9$  متری از مرکز انفجار (محور ظرف استوانه‌ای) قرار داده شده‌اند. با انفجار خرج اولیه، آب در محیط اتمسفر پخش شده و ابری از هوا، بخار آب و قطرات آب مایع شکل می‌گیرد. شکل‌های ۱۱-۱۲ چیدمان اولیه آزمایش و شکل ابر را در چند زمان منتخب نشان می‌دهند. به کمک دوربین سرعت بالا از انتشار ابر فیلمبرداری شده که از آنجا می‌توان شعاع و ارتفاع ابر را در هر لحظه تعیین نمود. از سوی دیگر به کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی ابر می‌توان انتشار ابر را به روش عددی مدل‌سازی نمود. این نرم‌افزار که اصلاح شده‌ی کد KIVA-3V است توسط همین مؤلف آماده شده و توضیحات مبسوط مربوط به آن در مراجع [۳-۸] به‌ویژه مرجع [۵] آمده است.



(الف)



(ب)



(ج)

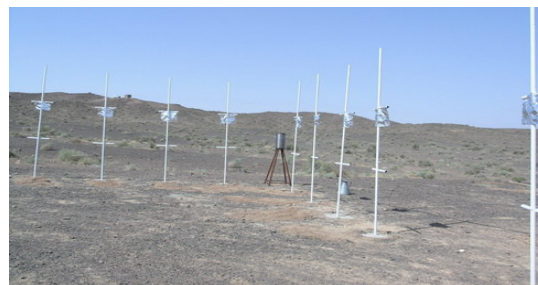


(د)

شکل (۱۲): تصویر انتشار ابر در چند زمان منتخب.

الف:  $t=2\text{ ms}$  ب:  $t=20\text{ ms}$

ج:  $t=50\text{ ms}$  د:  $t=100\text{ ms}$



شکل (۱۱): میدان آزمایش قبل از شروع آزمایش.

بنابراین با استفاده از میان‌یابی خطی و تناسب معکوس  $r_b r_c$  برابر می‌شود با:

$$r_b r_c = ۵.۶۲$$

با توجه به اینکه  $R_{o_0} = ۱۱.۸ \text{ cm}$ ، از اینجا فاصله شکست  $R_{ob} \sim ۶۷ \text{ cm}$  بدست می‌آید. تجربه‌ی مؤلف نیز این فاصله شکست را قابل قبول می‌داند. مرجع [۱] نیز، بدون ذکر جزئیات، در انتخاب فاصله شکست برای دستگاهی با ابعادی کمی متفاوت، مقداری نزدیک به این عدد ( $۷۵ \text{ cm}$ ) را انتخاب نموده است.

به ازای رعایت فاصله‌ی شکست فوق با اجرای برنامه‌ی ناپایداری فیلم ضخامت فیلم حدود  $۱ \text{ cm}$  به دست می‌آید بنابراین طبق رابطه (۱۸) داریم:

$$۱ \text{ cm} \leq D \leq ۲ \text{ cm} \Rightarrow ۱.۵ \leq \text{smr} \leq ۳ \text{ cm}, \quad (۲۰)$$

شعاع متوسط سائوتر است که سه برابر شعاع متوسط حسابی است و در مسائل جریان‌های دوفازی به همراه احتراق به عنوان شعاع متوسط استفاده می‌شود.

مرجع [۲] پیشنهاد نموده در صورتی که اطلاعاتی راجع به قطر اولیه‌ی قطرات حاصل از پاشش در دستگاه FAE موجود نباشد از  $D = ۰.۷/۵ \text{ cm}$  ( $\text{smr} = ۰.۷/۵ \text{ cm}$ ) استفاده شود. این مرجع همچنین جدول محدودی را برای تخمین قطر اولیه قطرات ارائه نموده است. سیال مورد استفاده پروپیلن اکساید بوده است اما با توجه به یکسان بودن مرتبه‌ی کشش سطحی مایعاتی از این قبیل استفاده از آن برای موارد دیگر هم نگران‌کننده نیست. به هر حال به کمک جدول این مرجع نیز  $\text{smr} \approx ۱.۲۵ \text{ cm}$  به دست می‌آید.

با مقادیر پیشنهادی مرجع [۲] و مقدار تخمینی بدست آمده از روش این مقاله در رابطه‌ی (۲۰)، برنامه‌ی شبیه‌ساز میدان جریان داخل ابر به اجرا درآمد و نتایج مربوط به شعاع و ارتفاع ابر با نتایج تجربی مقایسه گردید. در استخراج نتایج شبیه‌سازی از کانتور با درصد جرمی  $۰.۰۰۵$  برای نمایش شعاع و ارتفاع ابر استفاده شده است. شکل‌های ۱۳-۱۴ نتیجه این مقایسه را نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود استفاده از تخمین بدست آمده از رابطه‌ی (۲۰) برای قطر اولیه‌ی قطرات تطابق قابل قبولی را با نتایج تجربی به همراه دارد و به نظر می‌رسد نتایج بهتری را نسبت

نرم‌افزار کیوا ضمن حل معادلات حاکم بر فاز گازی شکست ثانویه‌ی قطرات، جابجایی، تبخیر و اختلاط آنها را با هوا می‌تواند مدل‌سازی و تعقیب نماید. بنابراین نتایج شکست اولیه که همان اندازه‌ی اولیه قطرات است باید به عنوان ورودی به آن داده شوند. برای این منظور نرم‌افزار ناپایداری فیلم، که در این مقاله مورد بحث قرار گرفته است، می‌تواند در تخمین اندازه‌ی اولیه قطرات مورد استفاده قرار گیرد. با به کارگیری نرم‌افزار ناپایداری فیلم ملاحظه می‌شود که به ازای (N) ها و (M) های مختلف، جواب‌های مختلفی بدست می‌آیند. بنابراین داشتن تقریبی از یکی از متغیرهای خروجی - مثلاً فاصله شکست - می‌تواند کارگشا باشد. در عمل نیز با استفاده از خرج بدون دود و تصویربرداری سرعت بالا از زاویه مناسب امکان تخمین فاصله شکست وجود دارد. برای تقریب فاصله‌ی شکست، پیشنهاد مقاله‌ی حاضر تعریف اعداد بدون بعد مناسب و استفاده از نتایج آزمایش مرجع [۱۹] به عنوان مبنا می‌باشد. با توجه به غیرقابل تراکم بودن فیلم مایع و اصل بقاء جرم می‌توان از رابطه‌ی زیر فاصله شکست را برای آزمایش مرجع [۱۹] بدست آورد:

$$\begin{aligned} (R_1^* - R_1^*)_t &= (R_1^* - R_1^*)_{t_0}, \\ \text{At } t = 0 \quad R_1 &= ۱.۵ \text{ cm}, \quad R_1^* = ۵.۵ \text{ cm}, \\ \text{At } t = t_b \quad R_1 - R_1 &= ۰.۳ \text{ cm} \Rightarrow R_1^* = ۴۶.۸۲ \text{ cm}, \end{aligned} \quad (۱۹)$$

با توجه به تأثیر ارتفاع و ضخامت اولیه فیلم در فاصله شکست، اعداد بدون بعد  $\text{htr} = \frac{h}{w}$  و  $r_b r_c = \frac{R_{ob}}{R_{o_0}}$  تعریف می‌کنیم.  $h$  ارتفاع فیلم،  $w$  ضخامت فیلم در لحظه‌ی صفر،  $R_{ob}$  و  $R_{o_0}$  شعاع بیرونی فیلم سیال به ترتیب در لحظه‌ی صفر و لحظه‌ی شکست است. برای آزمایش مرجع [۱۹] این اعداد عبارتند از:

$$\begin{aligned} \text{htr} &= \frac{h}{w} = \frac{۱۲}{۵.۵ - ۱.۵} = ۳, \\ r_b r_c &= \frac{R_{ob}}{R_{o_0}} = \frac{۴۶.۸۲}{۵.۵} = ۸.۵۱۳. \end{aligned}$$

برای دستگاه FAE مورد آزمایش نیز این اعداد به صورت زیر می‌باشند:

$$\text{htr} = \frac{h}{w} = \frac{۴۷.۷}{۱۱.۸ - ۱.۳} = ۴.۵,$$

نتایج عددی نشان می‌دهد که بازه فوق‌الذکر کشیدگی ابر یا به عبارتی نسبت شعاع به ارتفاع ابر را بهتر تقریب می‌زند. به هر حال یک نکته‌ی مشترک قابل تأکید در نتایج مراجع [۲]، [۱۷]، [۱۹] و مقاله حاضر این است که اندازه‌ی قطرات در پاشش انفجاری از دستگاه‌های FAE از مرتبه‌ی سانتی‌متر است.

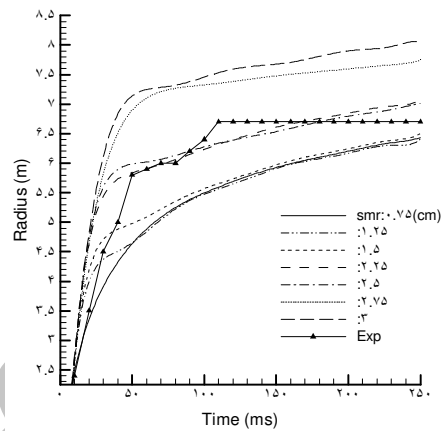
### ۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله بر اساس مدل‌سازی ناپایداری فیلم مایع یک برنامه رایانه‌ای تهیه شده و به کمک آن شکست اولیه فیلم مایع مورد تحلیل عددی قرار گرفت. مقایسه نتایج این تحلیل میدان نزدیک با نتایج تجربی نشان داد که این مدل‌سازی قابلیت خوبی در پیش بینی شکست اولیه فیلم مایع دارد. اجرای برنامه برای یک دستگاه FAE رایج، اندازه اولیه قطرات را در بازه  $1.5 \text{ cm} \leq \text{smr} \leq 3 \text{ cm}$  تخمین زد. مقایسه نتایج تحلیل عددی میدان دور با نتایج تست تجربی نشان داد که بازه فوق‌الذکر نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد. روش ارائه شده در این مقاله، برای تخمین فاصله شکست بر مبنای تعریف و به‌کارگیری اعداد بدون بعد مناسب، هر چند که متکی بر تعداد بسیار محدودی آزمایش تجربی است اما آزمایش‌های تجربی بیشتر، مورد ارزیابی دقیق‌تر قرار گیرد. نتایج نشان می‌دهند که اندازه‌ی قطرات در پاشش انفجاری از دستگاه‌های FAE از مرتبه‌ی سانتی‌متر است. پیشنهاد این مقاله به کاربران نرم‌افزارهای تحلیل عددی میدان جریان داخل ابر حاصل از FAE استفاده از بازه  $2.25 \text{ cm} \leq \text{smr} \leq 2.5 \text{ cm}$  برای انتخاب اندازه متوسط اولیه قطرات است که معمولاً به‌عنوان داده‌ی ورودی در این نرم‌افزارها مورد نیاز می‌باشد.

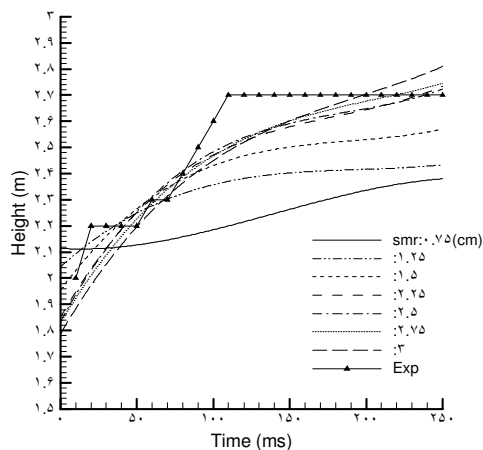
### مراجع

1. Glass, M.W. "Far-Field Dispersal Modeling for Fuel-Air Explosive Devices", Sandia National Laboratories Report, SAND90-0528, May 1990.
2. Liu, J.C., Xue, S.S., Zhu, G.S., Zhang, Z.C., and Xie, L.F. "Experimental and Numerical Study of Explosive Dispersal and Fuel-Air Cloud", in: Proc. of the Colloquium on Gas, Vapor, Hybrid and

به مقادیر انتخاب شده از مرجع [۲] ارائه می‌دهد. به‌ویژه با انتخاب قطر اولیه‌ی قطرات در بازه  $2.25 \text{ cm} \leq \text{smr} \leq 2.5 \text{ cm}$  نتایج حل عددی تطابق نزدیک‌تری را با نتایج تجربی نشان می‌دهند. در این بازه، شیب نمودار شعاع ابر- زمان بهتر پیش بینی می‌شود.



شکل (۱۳): مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی برای شعاع ابر.



شکل (۱۴): مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی برای ارتفاع ابر.

بنابراین بر اساس نتایج شکل‌های ۱۳-۱۴ و تجربه‌ی نگارنده، پیشنهاد این مقاله به‌کارگیری مقاداری بین  $2.25 \text{ cm}$  تا  $2.5 \text{ cm}$  برای شعاع اولیه سائوتر در شبیه‌سازی عددی است. تجربه این نویسنده از مشاهده شعاع و ارتفاع ابر برای سوختهایی مثل بنزین و بوتیلن اکساید و مقایسه آن با

۱۲. Sirignano, W.A. and Mehring, C. "Review of Theory of Distortion and Disintegration of Liquid Streams", *Progress in Energy and Combustion Sci.*, Vol. ۲۶, No. ۴, pp. ۶۰۹-۶۵۵, ۲۰۰۰.
۱۳. Senecal, P.K., Schmidt, D.P., Nouar, I., Rutland, C.J., Reitz, R.D., and Corradini, M.L. "Modeling High-speed Viscous Liquid Sheet Atomization", *Int. J. of Multiphase Flow*, Vol. ۲۵, No. ۶-۷, pp. ۱۰۷۳-۱۰۹۷, ۱۹۹۹.
۱۴. Li, X. and Tankin, R.S. "On the Temporal Instability of a Two-dimensional Viscous Liquid Sheet", *J. Fluid Mech.*, Vol. ۲۲۶, pp. ۴۲۵-۴۴۳, ۱۹۹۱.
۱۵. Teng, H., Kinoshita, C.M., and Masutani, S.M. "Prediction of Droplet Size from the Breakup of Cylindrical Liquid Jets", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. ۲۱, No. ۱, pp. ۱۲۹-۱۳۶, ۱۹۹۵.
۱۶. Singh, S.K. and Singh, V.P. "Extended Near-field Modeling and Droplet Size Distribution for Fuel-Air Explosive Warhead", *Defence Sci. J.*, Vol. ۵۱, No. ۳, pp. ۳۰۳-۳۱۴, ۲۰۰۱.
۱۷. Gardner, D.R. "Near-Field Dispersal Modeling for Liquid Fuel-Air Explosives", Sandia National Lab. Rep., SAND۹۰-۰۶۸۶, July ۱۹۹۰.
۱۸. Qi, Z., Kezhen, W., Aimin, L., Denggui, W., and Bin, Q. "Numerical Simulation on Dispersal Character of Fuel by Central HE", *Defence Sci. J.*, Vol. ۵۷, No. ۴, pp. ۴۲۵-۴۳۳, ۲۰۰۷.
۱۹. Samirant, M., Smeets, G., Baras, C., Royer, H., and Oudin, L.H. "Dynamic Measurements in Combustible and Detonable Aerosols", *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. ۱۴, No. ۲, pp. ۴۷-۵۶, ۱۹۸۹.
۲۰. Lin, S.P. "Breakup of Liquid Sheets and Jets", Cambridge Univ. Press, ۲۰۰۳.
۲۱. Bayvel, L. and Orzechowski, Z. "Liquid Atomization", Taylor & Francis, USA, ۱۹۹۳.
۲۲. Lefebvre, A.H., "Atomization and Sprays", Hemisphere Pub. Co., ۱۹۸۹.
۲۳. Spigle, M.R. "Mathematical Handbook", Schaum's Outline Series, ۱۹۸۸.
- Fuel-Air Explosions, Schaumburg, Illinois, pp. ۳۴۱-۳۵۴, ۱۹۹۸.
۲. Doustdar, M.M. "Numerical Study of Injection Initial Condition Effects on the Rotation of Flammable Region in a Fuel-Air Cloud", *Mech. and Aerospace Eng. J.*, Vol. ۵, No. ۱, pp. ۶۳-۷۴, ۲۰۰۹, (In Persian).
۴. Doustdar, M.M., Mazaheri, K., and Hosseinalipour, M. "Computational Analysis of Injection Velocity Effects on Dynamic Parameters of Unconfined Fuel Vapor Clouds", *Combustion Explosion and Shock Wave*, Vol. ۴۱, No. ۵, pp. ۵۱۰-۵۲۰, ۲۰۰۵.
۵. Doustdar, M.M. "Numerical Solution of Flow with Spray in Open Atmosphere", Ph.D. Dissertation, Sharif Univ. of Tech., Iran, ۲۰۰۴.
۶. Doustdar, M.M., Mazaheri, K., and Hosseinalipour, M. "Numerical Study of Ground Effect on the Detonability Characteristics of Unconfined Two-phase Clouds", in: *Proc. of ۱۱th Annual Conf. of the CFD Soc. of Canada*, pp. ۳۹۹-۴۰۶, ۲۰۰۳.
۷. Doustdar, M.M., Hosseinalipour, M., and Mazaheri, K. "Numerical Study of a Two-Phase Unconfined Fuel-Air Cloud Characteristics to Consider its Detonability", *Proc. of the Tenth Annual Conf. of the CFD Soc. of Canada*, pp. ۲۰۴-۲۱۰, ۲۰۰۲.
۸. Doustdar, M.M., Mazaheri, K., and Hosseinalipour, M. "A Numerical Solution for Far-Field Regime in Fuel-Air Explosive Devices", *Proc. of the Ninth Asian Congress of Fluid Mech.*, Isfahan, Iran, pp. ۹۲, ۲۰۰۲.
۹. Liu, G., Hou, F., Cao, B., Xie, L., Shen, Zh., and Zhou, T. "Experimental Study of Fuel-Air Explosive", *Combustion Explosion and Shock Wave*, Vol. ۴۴, No. ۲, pp ۲۱۳-۲۱۷, ۲۰۰۸.
۱۰. Gardner, D.R. and Glass, M.W. "A Coupled Near-field Far-Field Dispersal Model for Fuel-Air Explosives", Sandia National Lab. Rep., SAND۹۰-۰۶۸۷, ۱۹۹۱.
۱۱. Carvalho, I.S., Heitoyr, M.V., and Santos, D. "Liquid Film Disintegration Regimes and Proposed Correlations", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. ۲۸, No. ۵, pp. ۷۷۳-۷۸۹, ۲۰۰۲.