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

محمدمهدی دوستدار '

گروه مهندسی مکانیک دانشگاه جامع امام حسین (ع) (تاریخ دریافت:۹۰/۳/۳۱؛ تاریخ پذیرش:۹۰/۷/۳۰)

چکیدہ

دستگاههای انفجاری هوا- سوخت برای پاشش سیال عامل به محیط باز اتمسفر و ایجاد امواج دتونیشن در ابر حاصل از آن مورد استفاده قرار می گیرند. 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 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، پیشنهاداتی برای تخمین اندازهی اولیه قطرات در پاشش انفجاری حاصل از دستگاههای هوا سوخت ارائه

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

ndostdar@ihu.ac.ir - دانشیار: ۱-

۱– مقدمه

دتونیشن از جمله پدیده های فیزیکی است که از جدابیت علمی خاصی برخوردار است. یکی از موارد قابل توجه، وقوع دتونیشن در محیط باز اتمسفر است. برای مطالعهی 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 می کنند. مرسوم است که میدان جریان را پس از پاشش سوخت به دو میدان نزدیک و دور^۲ تقسیمبندی کنند. از تحلیل میدان نزدیک که در آن شكست اوليه فيلم سيال (سوخت) به قطرات اتفاق مے افتد، انتظار می رود تا شرایط اولیهی قطرات حاصل از شکست فیلم از جمله قطر، دما و سرعت قطرات تخمین زده شود. از تحلیل ميدان دور، نرخ تبخير قطرات، نرخ اختلاط بخار سوخت و هوا، شکل هندسی ابر، انـرژی جنبشـی آشـفتگی، محدودهی احتراق یذیری داخل ابر و اطلاعاتی از این قبیل بهدست میآیند. در واقع نتایج مطالعه ی میدان نزدیک بهعنوان شرایط اولیه برای مطالعهی میدان دور مورد استفاده قرار مي گيرند.

تلاشهای متعددی برای تحلیل عددی و تجربی میدان جریان در داخل ابر سوخت و هوا صورت گرفته است. گلاس^۳ [۱]، لیو جی سی^۴ 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^۵ مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعات شرایط اولیهی قطرات از جمله قطر آنها بهعنوان ورودی به کد داده میشود، بنابراین تخمین صحیح آنها حائز اهمیت میباشد. لیو⁹ و همکاران [۹] به مطالعه تجربی انفجار حاصل از دستگاههای هوا- سوخت پرداخته و نتایج حاصل از آن را ارائه کردهاند. گاردنر و گلاس^۷[۱۰] یک مدل ترکیبی برای میدانهای نزدیک و دور مطرح نمودهاند. رژیمهای

شکست فیلم مایع و تئوری های شکست جریان سیال در مراجع [١٢- ١١] مطالعه شدهاند. مراجع [١۴- ١٣] شکست صفحهی^ سیال و ناپایداری آن را مورد بررسی قرار دادهاند. تنگ و همکاران [۱۵] به تخمین اندازهی اولیه قطرات حاصل از شکست جت استوانهای پرداختند. مدل سازی میدان جریان نزدیک و استخراج روابط حاکم بر این میدان توسط سینگ . و همکارش[18] و نیز گاردنر [17] انجام شده است. کویی^{۱۱} و و همکارانش[۱۸] اثر نحوهی شروع انفجار خرج مرکزی بر میدان جریان و به ویژه سرعت پاشش را مطالعه کردهاند. سمیرانت^{۱۲} 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 یدیدههای شکست اولیه مایع و تشکیل اسیری را می توان در مراجع [۲۲-۲۲] یافت. اما به هـر حـال بـهخـاطر 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 برنامه ی تحلیل میدان دور داده میشود و نتایج حاصل از آن با نتایج تست تجربی میدان دور مقایسه و نتیجه گیری می گردد.

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

- ۱۱- Qi
- ۱۲- Samirant

۱-Near Field

۲- Far Field

۳- Glass

^e- Liu J.C.

۵- KIVA ۶- Liu

V- Gardner & Glass

^{^-} Sheet

۹- Teng

۰- Singh

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 می گیرد. به عبارتی سوخت مایع در حلقه بین سطح بیرونی پوستهی حاوی خرج و سطح درونی پوستهی ظرف اصلی واقع می شود. 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 می گیرد. 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 دتونیشن پذیری رسیده و برای شروع اشتعال مناسب می باشند، نیاز به دانستن اطلاعاتی از قبیل فاصله شکست فیلم سیال و نیز اندازهی اولیهی قطرات می باشد که در این مقاله به این موضوع پرداخته می شود.



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

نزدیک در پاشش انفجاری استفاده شده است. با وجود آنکه این کد تخمین خوبی از میدانهای دما، فشار و سرعت ارائه می کند اما به دلیل نداشتن مدلی برای کشش سطحی نمی تواند اندازهی اولیه قطرات را یس از شکست انفجاری پیش بینی کند. از اینرو مدلهای تحلیلی مورد توجه قرار گرفتهاند. این مدلها می توانند اطلاعات مفیدی را در مورد محدودهی اندازهی قطرات در اختیار قرار دهند. از بین مدل های 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 می تواند زمان شکست را در صورت معلوم بودن اندازهی قطرات و یا اندازهی اولیه قطرات را در صورت معلوم بودن زمان شکست تخمین بزند. مـدل ناپایـداری فـیلم بر مبنای ناپایداری خطبی یک فیلم مایع در حال انبساط شعاعی پایه گذاری شده است. این مدل مے تواند تخمینے از محدوده زمان شکست و اندازهی اولیهی 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 می شود.

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 می دهد. سیال شماره ۱ گازهای حاصل از انفجار خرج اولیه، سیال شماره ۲ سوخت مایع و سیال شماره ۳ هوای محیط می باشد. در واقع سوخت اصلی به صورت یک حلقه در نظر گرفته می شود 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 نامیده می شوند. حلقه سوخت دارای شعاع خارجی . R، شعاع ترتیب سطح تماس ۱ (داخلی) و سطح تماس ۲ (خارجی) کازهای حاصل از انفجار خرج و محیط، حلقهی سوخت و یا 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 می شود و تحت تأثیر اغتشاشات وارد به سطوح تماس داخلی و خارجی در نهایت به قطرات مایع

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



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

$$r_{i}(\tau) = r_{i}(\tau) + \eta_{i}(\tau)Y_{m}Z_{n}, \qquad (1)$$

$$r_{i}(\tau) = r(\tau) + \eta_{i}(\tau)Y Z ,$$

$$Y_{m} = A_{m} \cos(m\theta) + B_{m} \sin(m\theta)$$
(7)
$$Z_{m} = \cos(n\pi z).$$

که در این روابط، $r_i = \frac{R_i}{z_i}$ و $r_i = \frac{R_i}{z_i}$ به ترتیب شعاعهای درونی و بیرونی بدون بعد، z نصف ارتفاع دستگاه، و A_m و B_m ثوابت هستند. τ زمان بدون بعد است که

به صورت
$$\frac{t}{z \, . \, /V}$$
 = τ تعریف می شود. t زمان و V. یک
مقیاس مناسب بدون بعد سازی سرعت است. اندیس n مود
محوری و اندیس m مود قطبی (محیطی) اغتشاش را نشان
می دهد. در اینجا فرض شده که اندیس های m و n برای هر
می دهد. در اینجا فرض شده که اندیس های m و n برای هر
دو سطح تماس یکسان است. فرض غیرلزج بودن سیال، امکان
تعریف توابع پتانسیل را فراهم می سازد. همچنین در مرجع
[18] تصریح شده که حداکثر خطا در تخمین اندازه ی قطرات
برای شکست صفحه ی سیال وقتی معادلات لزج با غیرلزج
جایگزین شوند از ده درصد تجاوز نمی کند. در این شرایط
معادله ی حرکت در هر سه سیال، حلی بر حسب تابع پتانسیل

$$\nabla \Phi_i = \cdot, \tag{(7)}$$

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

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

$$\vec{n}_{\gamma} \cdot \nabla \Phi_{\gamma} = \vec{n}_{\gamma} \cdot \nabla \Phi_{\gamma}, \qquad (f)$$
$$\vec{n}_{\gamma} \cdot \nabla \Phi_{\gamma} = \vec{n}_{\gamma} \cdot \nabla \Phi_{\gamma}, \qquad (f)$$

که در آن، n_i بردار نرمال بر سطح مشترک i است. توابع پتانسیل $\eta_i (\tau) \cdot r_o(\tau)$ بر حسب $\eta_i (\tau) \cdot r_o(\tau)$ ($\eta_i (\tau) \cdot r_o(\tau)$ و قابل حل هستند و در نهایت میتوان نشان داد که معادلات دیفرانسیل زیر از این حل استخراج میشوند [۱۷]:

$$\frac{d}{d\tau}[r_i f_{\uparrow,\gamma} \dot{\eta}_{\uparrow}] - G_{\uparrow} \eta_{\uparrow} - r_i \frac{d}{d\tau} [\frac{f_{\uparrow\gamma}}{r_{\cdot}} \frac{d}{d\tau} [r_{\cdot} \eta_{\gamma}]] = \cdot, \qquad (\Delta)$$

$$\frac{d}{d\tau}[r_i f_{\tau\tau} \dot{\eta}_{\tau}] - G_{\tau} \eta_{\tau} + r_{\tau} \frac{d}{d\tau} [\frac{f_{\tau\tau}}{r_{\tau}} \frac{d}{d\tau} [r_{\tau} \eta_{\tau}]] = \cdot . \quad (F)$$

توابع f_{ij} توابعی بر حسب توابع اصلاح شدهی از نوع اول و دوم بسل میباشند که معمولا در معادلات دیفرانسیل حاکم بر شکست فیلم مایع ظاهر میشوند. شکل این توابع به صورت زیر است[۱۷]: $R_{\cdot}(\cdot) = R_{\infty}(1 - \exp(-at_{\cdot})), \qquad (1\%)$

اگر از
$$z$$
. (نصف ارتفاع دستگاه) برای بدون بعدسازی
هندسی، V . برای بدون بعدسازی سرعت و $\frac{z}{V_{\cdot}}$ برای
بدون بعدسازی زمان استفاده شود می توان رابط و (۱۴) را به
صورت زیر نوشت:

$$r_o(\tau) = r_\infty(1 - \exp(-a^*(\tau + \tau_{\cdot}))), \qquad (1\Delta)$$

یک مقیاس مناسب سرعت خواهد بود.

از معادلات (۶–۵) با شرایط اولیهی مناسب می توان انتگرال گیری 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:

 $\max\{|\eta_{i}(\tau_{b})|, |\eta_{\tau}(\tau_{b})|\} = r_{\cdot}(\tau_{b}) - r_{i}(\tau_{b}) = w(\tau_{b}), \quad (18)$ $\sum e_{i} e$

۵- برنامه رایانهای

برای حل معادلات مذکور در قسمت قبل یک برنامهی رایانهای به زبان فرترن نوشته شد تا دستگاه معادلات دیفرانسیل (۱۲–۵) را به روش رانج کوتای مرتبه چهار حل نماید. برای تعیین کمیت توابع بسل از قابلیت کتابخانهای کامپایلر پاوراستیشن^{۱۲} استفاده گردید. مشتقات توابع بسل نیز بر حسب خود این توابع محاسبه و در داخل برنامه محاسبه می گردند [۲۳]. با اجرای برنامه به ازای شعاع داخلی

$$f_{11} = \frac{\beta_{1}}{k} \frac{I_{m}(kr_{i})}{\dot{I}_{m}(kr_{i})} - \frac{\beta_{1}}{k} \frac{I_{m}(kr_{i})\dot{K}_{m}(kr_{.}) - \dot{I}_{m}(kr_{.})K_{m}(kr_{i})}{\dot{I}_{m}(kr_{i})\dot{K}_{m}(kr_{.}) - \dot{I}_{m}(kr_{.})\dot{K}_{m}(kr_{i})},$$
(Y)

$$f_{1,1} = \frac{\beta_{1}}{k} \frac{I_{m}(kr_{i})\dot{K}_{m}(kr_{i}) - \dot{I}_{m}(kr_{i})K_{m}(kr_{i})}{\dot{I}_{m}(kr_{i})\dot{K}_{m}(kr_{i}) - \dot{I}_{m}(kr_{i})\dot{K}_{m}(kr_{i})},$$
(A)

$$f_{\tau_{1}} = \frac{\beta_{\tau}}{k} \frac{I_{m}(kr_{.})\dot{K}_{m}(kr_{.}) - \dot{I}_{m}(kr_{.})K_{m}(kr_{.})}{\dot{I}_{m}(kr_{i})\dot{K}_{m}(kr_{i}) - \dot{I}_{m}(kr_{.})\dot{K}_{m}(kr_{i})},$$
(9)

$$f_{\tau\tau} = -\frac{\beta_{\tau}}{k} \frac{K_m(kr.)}{\dot{K}_m(kr.)} + \frac{\beta_{\tau}}{k} \frac{I_m(kr.)\dot{K}_m(kr_i) - \dot{I}_m(kr_i)K_m(kr.)}{\dot{I}_m(kr.)\dot{K}_m(kr_i) - \dot{I}_m(kr_i)\dot{K}_m(kr.)}.$$
 (1.)

 $\beta_i = \rho_i / (\rho_1 + \rho_r + \rho_r)$ و $k = n\pi$ در این روابط، π است. اندیسهای ۱ الی ۳ مربوط به سیالات مذکور در شکل است. اندیسهای ۱ الی ۳ مربوط به سیالات مذکور در شکل ۲ و ρ جرم مخصوص است. Im تابع بسل اصلاح شده از نوع اوّل و از مرتبه m است و علامت پریم دیفرانسیل نسبت به آرگومان را نشان میدهد. Km تابع بسل اصلاح شده از نوع دوّم و از مرتبه m است.

آرگومان توابع بسل kr است. توابع G, و G, نیز که در معادلات (۶–۵) آمدهاند بهصورت زیر هستند:

$$G_{\gamma} = (\beta_{\gamma} - \beta_{\gamma})r_{i}r_{i} - r_{i}\frac{d}{d\tau}[\frac{\dot{r}_{i}}{r_{i}}f_{\gamma\gamma}]$$

$$+ \frac{\gamma}{r_{i}We_{\gamma}}[\gamma - m^{\gamma} - (kr_{i})^{\gamma}],$$

$$(11)$$

$$G_{\rm v} = (\beta_{\rm v} - \beta_{\rm v})r_{\rm v}r_{\rm v} - r_{\rm v}\frac{d}{d\tau}[\frac{\dot{r}_{\rm v}}{r_{\rm v}}f_{\rm vv}]$$
(17)

$$+\frac{1}{r_{\cdot}We_{\tau}}[1-m^{\tau}-(kr_{\cdot})^{\tau}].$$

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:

$$R_{\cdot}(t) = R_{\infty}(1 - \exp(-a(t+t_{\cdot}))), \qquad (17)$$

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

۱۳- Power Station

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

8- نتايج

در این قسمت برخی از نتایج بهدست آمده از اجرای برنامه بهعنوان نمونه مطرح می شوند. 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 به کار رفتهاند. همان گونه که ملاحظه می شود با افزایش شاخص N زمان شکست افزایش و ضخامت فیلم در لحظهی شکست کاهش مییابد. همچنین ملاحظه می شود با افزایش M، زمان شکست کاهش و ضخامت فيلم افزايش يافته است. شكل ٥ تغييرات موج اغتشاشی η_{1} را بر حسب زمان به ازای شاخص های \mathbb{N}^{-1} و M=۱ نشان میدهـد. طبـق ایـن شـکل دامنـه مـوج در ابتـدا كاهش و سپس افزایش یافته و طول موج با افزایش زمان کاهش می یابد. شکل ۶ تغییرات موج اغتشاش η را بر حسب زمان نشان میدهد که طبق آن دامنه موج روند صعودی دارد اما طول موج با افزایش زمان کاهش می یابد. شکل ۷ کاهش ضخامت فیلم همزمان با افزایش دامنه ی امواج اغتشاشی، و لحظه ی 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 می شود که دامنه و طول موج مربوط به η_{1} و η_{2} به تدريج به يكديگر نزديكتر ميشوند. شكل ٨ تغييرات سان M=۵ و منخامت فیلم را به ازای N=۱ و M=۵ نشان آ میدهد. همانطور که مشاهده میشود تغییر M در دامنه،

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 می شود که افزایش M، منجر به افزایش دامنهی موج شده و بنابراین زمان شکست را کاهش می دهد. این نتیجه قبلاً نیز در شکل ۳ تأیید شده است.

۷- اعتباردهی

اطلاعات منتشر شده در مورد شکست اولیه ی فیلم مایع در پاشش انفجاری بسیار محدود می باشد. از جمله نتایج منتشر شده ی قابل استفاده مربوط به سمیرانت و همکاران [۱۹] می باشد که مرجع [۱۷] نیز از این نتایج برای اعتباردهی استفاده کرده است. دستگاه مورد استفاده در آزمایش سمیرانت یک حلقه ی استوانه ای به شعاع داخلی ۱۰.۵ شعاع خارجی ۵.۵cm و ارتفاع ۱۲cm با سوخت اتیلن شبیه سازی مرجع [۱۷] و نتایج شبیه سازی مقاله حاضر در شبیه سازی مرجع [۱۷] و نتایج شبیه سازی مقاله حاضر در جدول ۱ ارائه شده است. مرجع [۱۷] دامنه ی اغتشاشات را در لحظه صفر به صورت زیر انتخاب کرده است:

$\eta_{1}(\cdot) = -\cdot \cdot \cdot,$	
$\eta_{\tau}(\cdot) = \eta'_{\tau}(\cdot) = \eta'_{\tau}(\cdot) = \cdot.$	

اما به مقدار انتخاب شده برای N و M اشارهای نکرده است. عدد داده شده شده می برای B و M اشارهای نکرده است. در جدول **۱** در واقع همان ضخامت فیلم است. زیرا خروجی حل عددی این مرجع، فقط می تواند ضخامت فیلم در لحظهی شکست باشد. در حل مقالهی حاضر نیز جواب نزدیک به این شکست باشد. در حل مقالهی حاضر نیز جواب نزدیک به این مرجع به ازای ۲=۱۸ M و مقادیر مذکور در رابطه (۱۷) مرجع به ازای ۲=۱۸ ساله و مقادیر مدکور در رابطه (۱۷) مرجع مداخل فیلم، جرم مقالهی حاضر با توجه به تغییر حجم داخل فیلم، جرم مخصوص گازهای حاصل از خرج اولیه در هر قدم زمانی بهروز می شود که به این مورد نیز مرجع [۱۷] اشارهای نکرده است.

www.SID.ir



شکل (۳): تغییرات زمان شکست بر ح تغییرات شاخص مود محوری اغتشاش N. M:۱ M:۵ شکل (۴): تغییرات ضخامت فیلم در لحظهٔ شکست بر حسب تغییرات شاخص مود محوری اغتشاش N.

شکل (۵): تغییرات η , بر حسب زمان به ازای یک مود اغتشاشی با پارامترهای N=۱ و N=۱ .

www.SID.ir

مییابد. از اینرو همان گونه 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 همان طور که در ردیف آخر جدول I نشان داده شده اگر $\frac{1}{s}$ ۲۰۰ = A انتخاب شود آنگاه تطابق نتایج مدل ناپایداری فیلم با نتایج آزمایش مرجع [۱۹] بسیار خوب می شود. شاید مهمترین دست آورد این مقایسه را بتوان افزایش اعتماد به این نحوه مدل سازی شکست فیلم مایع قلمداد نمود.



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

مأخذ	فاصله	زمان	ضخامت	قطر
	شکست	شکست	فیلم در	متوسط
	(cm)	(ms)	لحظة	حسابى
			شكست	(cm)
			(cm)	
نتایج تجربی [۱۹]	-	۱/٣	۰/٣	۰/۵
حل عددی مرجع [۱۷]				
A=1 4890×1." -	-	•/\\	-	•/44
S				
حل عددی حاضر با				
N=1, M= \cdot/\cdot Y	48/08	·/\A	•/٣•٢	•/٣-•/۶
A=1.4990×1.5-			,	,. ,.
S				
حل عددی حاضر با				
N=), M= \cdot/\cdot Y	48/27	۱/۳۰۵	۰/۳۰۲	•/٣-•/۶
$A = \forall \cdots \frac{1}{2}$				
S				

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

 $\mathbf{w}(\mathbf{t}_{b}) \le \mathbf{D} \le \mathbf{\tilde{v}} \mathbf{w}(\mathbf{t}_{b}), \tag{1A}$

(ابطه فوق به این معنی است که قطر متوسط قطرات (D) بین ضخامت فیلم در لحظهی 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 لحظهی شکست و دو برابر آن آمده است.

از سوی دیگر شکلهای ۱۰-۹ تأثیر متغیر A را، که در رابطه (۱۳) بهصورت 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 کاهشیافته 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 به کار رفته در نرمافزار شبیه سازی می باشد. مشخصات دستگاه مورد استفاده به شرح زیر است:

نوع سیال: آب ، خرج مرکزی: ^{C۴} ، ارتفاع ظرف: cm ۰، ۰/ ۱۵۰ kg ، جرم خرج: ۲۰/۶ kg ، ۲۰/۶ قطر بیرونی ظرف:۲۳/۶ cm ، ارتفاع پایه ظرف: ۱۱۶ cm ، قطر درونی سیال:CT۳۷، جنس یوسته ظرف: ST۳۷، تجهيزات اصلى مورد استفاده شامل دوربين سرعت بالاى رنگی ۵۰۰۰fps، دوربین سرعت بالای سیاه و سفید fps ۱۰۰۰، دوربین فیلمبرداری دیجیتال، دوربین عکسبرداری-فیلمبرداری، دستگاه تست شرایط محیط (شامل دما، فشار، رطوبت و سرعت باد) می باشد. شاخصهای اندازه گیری ابعاد ابر در فواصل ۱/۵، ۳، ۴/۵ ، ۶ و ۹ 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 می گیرد. شکل های ۱۲–۱۱ 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 می توان شعاع و ارتفاع ابر را در هار لحظه تعیین نمود. از سوی دیگر به کمک نرمافزار شبیهسازی ابر مى توان انتشار ابر را به روش عددى مدلسازى نمود. اين نرمافزار که اصلاح شدهی کد KIVA-۳۷ است توسط همین مؤلف آماده شده و توضيحات مبسوط مربوط به آن در مراجع [۸–۳] بهویژه مرجع [۵] آمده است.



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



نرمافزار کیوا ضمن حل معادلات حاکم بر فاز گازی شکست ثانویهی قطرات، جابجایی، تبخیر و اختلاط آنها را با هوا مىتواند مدلسازى و تعقيب نمايد. بنابراين نتايج شكست اوليه كه همان اندازهي اوليه قطرات است بايد بهعنوان ورودي به آن داده شوند. برای این منظور نرمافزار ناپایداری فیلم، که در این مقاله مورد بحث قرار گرفته است، می تواند در تخمین اندازهی اولیه قطرات مورد استفاده قرار گیرد. با به کارگیری نرمافزار ناپایداری فیلم ملاحظه می شود که به ازای (N) ها و (M)های مختلف، جوابهای مختلفی بدست می آیند. بنابراین داشتن تقریبی از یکی از متغیرهای خروجی -مثلاً فاصلهٔ شکست- می تواند کار گشا باشد. در عمل نیز با استفاده از خرج بدون دود و تصویربرداری سرعت بالا از زاویه مناسب امكان تخمين فاصله شكست وجود دارد. براى تقريب فاصلهى شکست، پیشنهاد مقالهی حاضر تعریف اعداد بدون بعد مناسب و استفاده از نتایج آزمایش مرجع [۱۹] بهعنوان مبنا می باشد. با توجه به غیرقابل تراکم بودن فیلم مایع و اصل بقاء جرم می توان از رابطهی زیر فاصله شکست را برای آزمایش مرجع [١٩] بدست آورد:

$$(\mathbf{R}_{\cdot}^{\mathsf{T}} - \mathbf{R}_{i}^{\mathsf{T}})_{\cdot} = (\mathbf{R}_{\cdot}^{\mathsf{T}} - \mathbf{R}_{i}^{\mathsf{T}})_{t_{b}},$$

At $\mathbf{t} = \mathbf{\cdot} \quad \mathbf{R}_{i} = \mathbf{\cdot} \mathbf{\cdot} \mathbf{c} \mathbf{m}$, $\mathbf{R}_{\cdot} = \mathbf{\cdot} \mathbf{\cdot} \mathbf{c} \mathbf{m},$
At $\mathbf{t} = \mathbf{t}_{b} \quad \mathbf{R}_{\cdot} - \mathbf{R}_{i} = \mathbf{\cdot} \mathbf{\cdot} \mathbf{c} \mathbf{m} \Rightarrow \mathbf{R}_{\cdot} = \mathbf{\cdot} \mathbf{\cdot} \mathbf{c} \mathbf{m},$ (19)

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

$$htr = \frac{n}{W_{.}} = \frac{\gamma}{\Delta_{.}\Delta - \gamma_{.}\Delta} = \gamma,$$
$$r_{b}r_{.} = \frac{R_{ob}}{R_{o}} = \frac{\gamma}{\Delta_{.}\Delta} = \Lambda_{.}\Delta\gamma\gamma.$$

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

$$htr = \frac{h}{W_{\cdot}} = \frac{\Psi V V}{W_{\cdot} A - V F} = \Psi A,$$

www.SID.ir

 $r_b r_c = \delta_c \hat{\gamma} \gamma$

با توجه به اینکه R_o. = ۱۱.^۸cm، از اینجا فاصله شکست ۲۷ مه R_{ob} می Rبدست می آید. 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 cm) را انتخاب نموده است.

به ازای رعایت فاصلهی شکست فوق با اجرای برنامهٔ ناپایداری فیلم ضخامت فیلم حدود ۱cm بهدست میآید بنابراین طبق رابطه (۱۸) داریم:

 $cm \le D \le cm \implies 1.2 \le smr \le cm,$ (7.)

smr شعاع متوسط سائوتر است که سه برابـر شـعاع متوسط حسابی است و در مسائل جریانهای دوفازی به همراه احتراق بهعنوان شعاع متوسط استفاده میشود.

مرجع [۲] پیشنهاد نموده در صورتی که اطلاعاتی راجع به قطر اولیه قطرات حاصل از پاشش در دستگاه FAE موجود نباشد از D=۰/۵ cm (smr=۰/۷۵cm) 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 نگران کننده نیست. به هر حال به کمک جدول این مرجع نیز نگران کننده نیست. به هر حال به کمک جدول این مرجع نیز

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 ۲۰۰۵ برای نمایش شبیهسازی از کانتور با درصد جرمی ۲۰۰۵ برای نمایش شعاع و ارتفاع ابر استفاده شده است. شکلهای ماحظه میشود استفاده از تخمین بدست آمده از رابطهی ملاحظه میشود استفاده از تخمین بدست آمده از رابطهی تجربی به همراه دارد و به نظر میرسد نتایج بهتری را نسبت

به مقادیر انتخاب شده از مرجع [۲] ارائه میدهد. بهویژه با انتخــاب قطــر اولیــهی قطــرات در بــازهی ۲.۲۵ ≤ smr ≤ ۲.۵cm نتـایج حـل عــددی تطـابق نزدیکتری را با نتایج تجربی نشان میدهند. در این بازه، شیب نمودار شعاع ابر-زمان بهتر پیش بینی میشود.



بنابراین بر اساس نتایج شکلهای **۱۴–۱۳** و تجربهی نگارنده، پیشنهاد اینن مقالیه به کارگیری مقیداری بین ۲.۲۵ cm تا ۲.۲۵ cm برای شعاع اولیه سائوتر در شبیهسازی عددی است. تجربهٔ این نویسنده از مشاهده شعاع و ارتفاع ابر برای سوختهایی مثل بنزین و بوتیلن اکساید و مقایسه آن با

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]، هر حال یک نکتهی مشترک قابل تأکید در نتایج مراجع [۱۷]، [۱۹] و مقالهٔ 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 برنامهٔ رایانهای تهیه شده و به کمک آن شکست اولیه فیلم مايع مورد تحليل عددى قرار گرفت. مقايسه نتايج اين تحليل 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 قط_رات را در ب_ازه N.4 cm ≤ smr ≤ ۳ cm تخم_ین زد. مقایسه نتایج تحلیل عددی میدان دور با نتایج تست تجربی نشان داد که بازه فوقالذکر نتایج قابل قبولی ارائه می دهد. روش ارائه شده در این مقاله، برای تخمین فاصله شکست بر مبنای تعریف و به کار گیری اعداد بدون بعد مناسب، هـر چنـد که متکی بر تعداد بسیار محدودی آزمایش تجربی است اما بسیار امیدوارکننده بهنظر می رسد و می تواند به کمک 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 داخـــل ابــر حاصـل از FAE اســـتفاده از بــازه ۲.۲۵cm ≤ smr ≤ ۲.۵cm برای انتخاب اندازه متوسط اولیه قطرات است که معمولاً بهعنوان دادهی ورودی در این نرمافزارها مورد نیاز می باشد.

مراجع

- Glass, M.W. "Far-Field Dispersal Modeling for Fuel-Air Explosive Devices", Sandia National Laboratories Report, SAND۹۰-۰۵۲۸, May ۱۹۹۰.
- Y. 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

- Y. Sirignano, W.A. and Mehring, C. "Review of Theory of Distortion and Disintegration of Liquid Streams", Progress in Energy and Combustion Sci., Vol. Y?, No. Y, pp. ? · ٩-? ۵۵, Y · · · .
- ¹⁷. 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. ⁷^A, No. ⁶-^V, pp. 1.177-1.17V, 1919.
- 14. Li, X. and Tankin, R.S. "On the Temporal Instability of a Two-dimensional Viscous Liquid Sheet", J. Fluid Mech., Vol. YY7, pp. 472-447, 1991.
- Ya. 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. YY, No. Y, pp. 189-187, 1992.
- 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.
- ^{1V}. Gardner, D.R. "Near-Field Dispersal Modeling for Liquid Fuel-Air Explosives", Sandia National Lab. Rep., SAND⁹ · · · ⁶^{A⁵}, July ¹⁹⁹ · .
- ^{1A}. 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. ⁴V, No. ⁶, pp. ⁶Y³-⁶Y^T, ⁷··V.
- 19. Samirant, M., Smeets, G., Baras, C., Royer, H., and Oudin, L.H. "Dynamic Measurements in Combustible and Detonable Aerosols", Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Vol. 19, No. 7, pp. 97-09, 1969.
- Y.Lin, S.P. "Breakup of Liquid Sheets and Jets", Cambridge Univ. Press, Y...".
- 1. Bayvel, L. and Orzechowski, Z. "Liquid Atomization", Taylor & Francis, USA, 199".
- ^{YY}. Lefebvre, A.H., "Atomization and Sprays", Hemisphere Pub. Co., 19A9.
- ۲۳. Spiegle, M.R. "Mathematical Handbook", Schaum's Outline Series, ۲۹۸۸.

Fuel-Air Explosions, Schaumburg, Illinois, pp. **rf1_r3f**, 199A.

- ^v. 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. ⁵, No. ¹, pp. ⁶^w-^V^e, ^v··⁹, (In Persian).
- ⁶. 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. ⁶¹, No. ^δ, pp. ^{δ1.-δ1., 1..δ}.
- Doustdar, M.M. "Numerical Solution of Flow with Spray in Open Atmosphere", Ph.D. Dissertation, Sharif Univ. of Tech., Iran, V. *.
- ⁷. 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 11th Annual Conf. of the CFD Soc. of Canada, pp. "99-*.7, *..*.
- ^V. 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. ^Y · ^Y-Y · , ^Y · · ^Y.
- ^A. 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. ⁹Υ, ^Υ··Υ.
- ⁹. 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. ^{FF}, No. ^Y, pp ^YI^T-^YI^Y, ^Y··^A.
- ۱۰. Gardner, D.R. and Glass, M.W. "A Coupled Nearfield Far-Field Dispersal Model for Fuel-Air Explosives", Sandia National Lab. Rep., SAND۹۰-۰۶۸۷, ۱۹۹۱.
- Carvalho, I.S., Heitoyr, M.V., and Santos, D. "Liquid Film Disintegration Regimes and Proposed Correlations", Int. J. Multiphase Flow, Vol. ¹Λ, No. Δ, pp. ^{VV}Γ-VΛ⁹, ¹Υ··¹.