

## مدلسازی شکست مایع در ناحیه غلیظ

علی اصغر معصومی<sup>۱</sup>، محمد مهدی دوستدار<sup>۲</sup>، ناصر دشتیان گرامی<sup>۳</sup>

سازمان تحقیقات و خودکفائی نرسا

تهران، سه راه تختی، بلوار هجرت، میدان باکری، تلفن ۳۳۱۹۳۶۵۰

[a\\_maesumi@ofogh.net](mailto:a_maesumi@ofogh.net)

### چکیده

در این تحقیق مدلسازی شکست فیلم سیال در ناحیه غلیظ مورد بررسی قرار گرفته است. پس از بررسی مدل‌های مختلف شکست مایع مدل ناپایداری فیلم بعنوان یک مدل مناسب برای تحلیل انتخاب شده که پس از بررسی روابط حاکم بر این مدل و نوشتن یک برنامه کامپیوتری پارامترهایی نظیر زمان شکست فیلم سیال، محل شکست فیلم سیال، اندازه ذرات سیال در لحظه شکست و همچنین سرعت این ذرات با استفاده از این برنامه قابل محاسبه می‌باشد. نتایج این برنامه با نتایج مراجع دیگر مورد مقایسه قرار گرفته و صحت و سقم نتایج بررسی شده است. پس از اطمینان صحت عملکرد برنامه مطالعه ای پارامتریک از پارامترهای اولیه و تاثیر آن بر روی نتایج خروجی انجام شده است.

واژه‌های کلیدی: شکست مایع - میدان نزدیک - مدلسازی - ناحیه غلیظ.

### ۱- مقدمه

سوخته‌های مایع بخاطر انعطاف پذیری در ذخیره سازی، سهولت در حمل و نقل و قابلیت دسترسی مناسب نقش مهمی را در تامین انرژی دنیای امروز بر عهده دارد. یکی از روشهای رایج در بکارگیری اینگونه سوختهها پاشش آنها بصورت اسپری به داخل جریان گاز یا محفظه احتراق است. اتمیزه شدن مناسب سوخت و اختلاط خوب آن با هوا در داشتن یک احتراق کارآمد نقش مؤثری داشته و باعث افزایش سطح تماس سوخت و هوا و در نتیجه افزایش نرخ تبخیر و احتراق می‌گردد. بعنوان مثال شکستن یک قطره مایع به قطر  $30\text{ mm}$  به قطراتی با قطر  $30\text{ }\mu\text{m}$  باعث ایجاد یک میلیون قطره می‌شود. در این حال اگر فرض شود که قطره بزرگ اولیه و یک میلیون قطره حاصله در شرایط محیطی یکسانی بسوزند آنگاه نرخ احتراق جرمی قطرات کوچک ده هزار برابر بیشتر از نرخ احتراق جرمی قطره اولیه خواهد بود.

موضوع پراکنده سازی سوخته‌های مایع تحت اثر انفجار خرج  $HE$  فرآیند پیچیده ای بوده که از دیر باز مورد تحقیق و بررسی بسیاری از محققین بوده است. [۱-۳]. در این تحقیق به تحلیل و شبیه سازی فاز پراکنده سازی سوخت مایع موجود در حد فاصل بین یک خرج شدید الانفجار میانی و یک پوسته استوانه ای پرداخته می‌شود. این تحلیل شامل بررسی حل مدل‌های تحلیلی با شبیه سازی کامپیوتری در ناحیه غلیظ (میدان نزدیک) در فرآیند انتشار مایع به محیط اطراف می‌باشد.

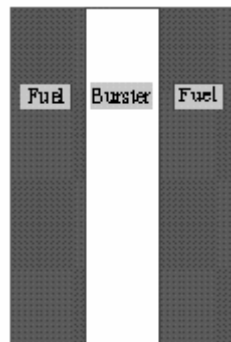
۱- کارشناس ارشد مکانیک

۲- استاد یار مکانیک

۳- کارشناس ارشد مکانیک

## ۲- معرفی مدل‌های شکست

برای مدل کردن پراکنده سازی سوخت مایع تحت اثر انفجار خرج  $HE$  از دستگاهی مطابق شکل (۱) استفاده می شود. این دستگاه از یک خرج انفجاری اولیه برای پراکنده ساختن سوخت مایع و یک پوسته استوانه ای شکل تشکیل شده که خرج اولیه در امتداد خط مرکزی آن بصورت یک استوانه قرار گرفته و سوخت مایع در حد فاصل حلقه ای که از استوانه های خرج اولیه و پوسته تشکیل می گردد قرار گرفته است. با انفجار خرج اولیه و ایجاد فشار فوق العاده زیاد ناشی از خرج اولیه، پوسته شکسته شده و سوخت با فشار زیاد به فضای بیرون رانده شده و به قطرات مایع شکسته می شود.



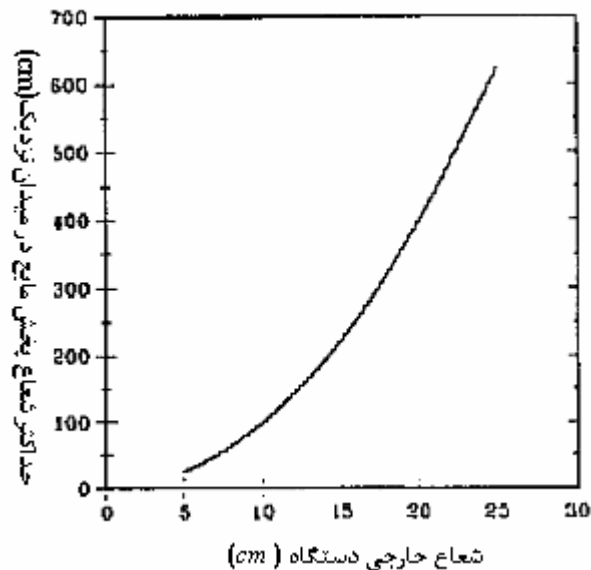
شکل ۱- دستگاه مورد آزمایش

فاز پراکنده سازی انفجاری سوخت مایع و تبدیل آن به قطرات فرآیند پیچیده ای است که در ادامه به بررسی مدل‌های مختلف در این زمینه پرداخته می شود. یکی از روشهایی که برای تحلیل فاز پراکنده سازی استفاده می شود این است که برحسب وضعیت نیروهای حاکم فرآیند پراکنده شدن سوخت به سه رژیم تفکیک می شود [۴]. رژیم اول، رژیم پاشش است که از لحظه انفجار خرج اولیه تا زمانی که جرم اولیه سوخت باندازه کافی پراکنده شده باشد و نیروهای شوک دیگر در میدان حل غلبه نداشته باشند امتداد دارد. در این رژیم نیروهای انفجاری بر نیروهای آئرودینامیکی غلبه دارند. زیرفرآیندهایی که در رژیم پاشش وجود دارند عبارتند از: ۱- انفجار خرج اولیه ۲- شکستن پوسته دستگاه ۳- شکستن اولیه سوخت و شتاب گیری جرم آن، مشخصه این رژیم حضور شوک قوی و نیز رفت و برگشت شوک و موج انبساطی از میان سوخت و گازهای حاصل از انفجار خرج اولیه است.

رژیم دوم، رژیم گذرا است که در آن نیروهای آئرودینامیکی وارد بر قطرات قابل توجه می شوند و شوک میرا می گردد در این حالت سوخت درصد حجمی قابل توجهی را از مخلوط دوفازی ندارد و بصورت قطرات مجزائی که در داخل فاز گازی قرار گرفته اند قابل تشخیص است. رژیم سوم، رژیم انبساط است که مشخصه آن شتاب منفی ذرات سوخت بخاطر اثر نیروهای پسای آئرودینامیکی است. در این رژیم نیروهای آئرودینامیکی بر نیروهای انفجاری غلبه نموده و غلظت سوخت نسبتاً کم است و شوک بی اهمیت می گردد. بخاطر محدوده وسیع نیروها و پدیده های مطرح در فرآیند پراکندگی و همچنین عدم شناخت کافی نسبت به رژیم های پاشش و گذرا در برخی مراجع [۴ و ۵] رژیم های مورد بحث در بالا به دو رژیم میدان نزدیک و میدان دور تقسیم می شوند.

رژیم میدان نزدیک شامل فرآیند های پاشش و گذرا بوده و رژیم میدان دور فرآیند انبساط را شامل می شود. مدل میدان نزدیک باید قادر باشد که نیروهای قوی شوک را طی پاشش، شکستن پوسته و شکستن اولیه سوخت را مدل نماید. امتداد زمانی رژیم میدان نزدیک از لحظه انفجار خرج اولیه تا زمانی است که غلظت سوخت به اندازه کافی کم شده و موج

شوک ناشی از انفجار خرج اولیه به اندازه کافی ضعیف گردد. امتداد مکانی این رژیم به ابعاد دستگاه بستگی دارد. که بوسیله نمودار در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- تغییرات شعاع پخش مایع در میدان نزدیک بر حسب شعاع خارجی دستگاه (شعاع داخلی برابر ۱ سانتیمتر) [۴]

هدف از مدل میدان نزدیک بدست آوردن اطلاعاتی نظیر میدان درجه حرارت، میدان فشار، میدان سرعت، توزیع کلی جرم، قطر متوسط ذرات، توزیع اندازه ذرات برای میدان دور است. مدل میدان دور باید بتواند جریان دوفازی ذرات پراکنده شده سوخت را در حالت انبساط مدل کند. اندرکنش ذرات مایع مانند شکستن قطرات و تبخیر نیز باید در این رژیم مدل شود. در ادامه به بررسی مدل‌های شکست فیلم مایع در میدان نزدیک پرداخته می شود.

## ۲-۱- مدل کشش سطحی

مبنای کار این مدل بر اساس کشش سطحی سیال خواهد بود. لذا در این مدل فیلم سیال زمانی شکسته خواهد شد که انرژی آزاد سطحی مایع با انرژی آزاد سطحی قطرات در یک حجم مساوی برابر شود. روابط حاکم بر این مدل در مرجع [۴] موجود می باشد. پس از حل روابط حاکم بر این مدل می توان اندازه قطرات و زمان شکست فیلم مایع را با معلوم بودن یکی از دو پارامتر مذکور، پارامتر دیگر را محاسبه نمود. از آنجائی که معمولاً هیچ یک از این دو پارامتر از ابتدا معلوم نمی باشد لذا این مدل برای استفاده در پراکنده سازی سیال دارای محدودیت است.

## ۲-۲- مدل ناپایداری فیلم

در این مدل یک اغتشاش کوچک در مرز فیلم سیال شروع به رشد کرده و پس از ناپایدار کردن فیلم سیال به رشد خود ادامه داده تا زمانی که مقدار این ناپایداری برابر ضخامت فیلم سیال شود. روابط حاکم بر فیزیک این مدل بطور کامل در مرجع [۴] آمده است. یکی از ویژگیهای این مدل دست یافتن به مقدار پارامترهای سرعت قطرات و اندازه قطرات پس از شکست و همچنین زمان شکست قطرات می باشد. از محدودیتهای این مدل عدم دقت آن در مقایسه با نتایج تست های تجربی می باشد.

### ۲-۳- مدل شکست گِردی (Grady)

این مدل توسط گِردی برای بدست آوردن اندازه قطعات در اثر شکست ناشی از بارگذاری انفجاری در مواد جامد بسط داده شد. اصول کار این مدل بر مبنای پدیده اسپال می باشد. نتایج، نشان می دهد [۶] که مدل گِردی در مدل کردن پدیده اسپال انواع فلزات ترد و شکننده تخمین خوبی داشته است. اگر مدل گِردی به فیزیک حاکم بر یک مایع اعمال شود می توان زمان شکست و اندازه قطرات مایع پس از شکست را محاسبه کرد. برای دسترسی به معادلات حاکم بر این مدل می توان به مرجع [۶] مراجعه کرد.

### ۳- انتخاب مدل مناسب و بیان روابط اساسی

در بخش قبل به بررسی چند مدل در رابطه با شکست مایع پرداخته شد. در این بخش مدل مناسب برای شکست فیلم مایع انتخاب خواهد شد. مدل انتخابی باید دارای چند ویژگی باشد: ۱- دارای ورودیهای معلوم باشد یعنی ورودیها و فرضیات اولیه مسئله در آن مدل قابل دسترسی باشد. ۲- نتایج مورد انتظار مسئله برآورده شود. توضیح اینکه تمام اطلاعات خروجی مسئله در حل آن مدل بدست آید. ۳- نتایج بدست آمده خروجی در مقایسه با نتایج تجربی از دقت قابل قبولی برخوردار باشد. برای انتخاب مدل مناسب در مرجع [۴] حلی از هر سه مدل با شرایط اولیه یکسان انجام شده و نتایج این حل با یک آزمایش تجربی در مرجع [۷] در همان شرایط اولیه مقایسه شده است. در این مقایسه از یک مخزن استوانه ای با شعاع داخلی ۱/۵ سانتیمتر و شعاع خارجی ۵/۵ سانتیمتر و ارتفاع ۱۲ سانتیمتر استفاده شده است. مایع مورد استفاده در این حل سوخت اتیلن اکساید می باشد که خواص آن در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- خواص اتیلن اکساید [۴]

$\rho(kg/m^3)$ (دانشیته)	۸۹۹
$\sigma(N/m)$ (کشش سطحی)	۲/۴۲e-۲
$V_d(kg/m-s)$ (سرعت دینامیکی)	۳/۱e-۳
$C(m/s)$ (سرعت صوت)	۱/۶e+۳

نتایج حل مدلهای و همچنین نتایج تجربی در جدول (۲) آمده است. نتیجه گیری از داده های این جدول را می توان بصورت زیر عنوان کرد.

۱- مدل کشش سطحی نمی تواند مدل خوبی برای حل باشد چون در این مدل برای دست یابی به نتایج خروجی باید یکی از دو پارامتر خروجی به عنوان پیش فرض اولیه مدل معلوم باشد تا بتوان به پارامتر دیگر دسترسی پیدا کرد. و همچنین نتایج حاصل از آن در مقایسه با مقدار داده های تجربی از دقت خوبی برخوردار نمی باشد.

۲- مدل گِردی بدلیل اختلاف زیاد نتایج خروجی آن با داده های تجربی مدل مناسبی نمی باشد.

۳- مدل ناپایداری فیلم در مقایسه نتایج آن با نتایج داده های تجربی می تواند به عنوان یک مدل مناسب برای حل مدلسازی شکست فیلم مایع باشد چون نتایج آن تا حدودی رضایت بخش بوده و محدودیت مدل کشش سطحی را هم ندارد اما بدلیل اختلاف زیاد زمان شکست آن با زمان شکست داده های تجربی از اعتبار خوبی برخوردار نمی باشد اگر با کار بر روی این مدل و تغییر پارامترهای اغتشاش و بعضی مقادیر اولیه بتوان اختلاف نتایج این پارامتر را با نتایج داده های تجربی کاهش داد در این صورت می تواند یک مدل مناسب و خوبی از مدلهای موجود در مدلسازی شکست فیلم باشد. در ادامه به بیان روابط حاکم بر این مدل پرداخته می شود

جدول ۲- مقایسه نتایج بدست آمده از مدل‌های مختلف شکست مایع

روش حل	زمان شکست (ms)	قطر متوسط حسابی (cm)
مدل کشش سطحی (با فرض اینکه قطر اولیه قطره ۰/۵ cm باشد)	۰/۳۹	----
مدل کشش سطحی (با فرض اینکه زمان شکست ۱/۳ ms باشد)	----	۰/۲۷
مدل ناپایداری فیلم	۰/۱۱	۰/۴۴
مدل گردی	۲/۱e-۵	۶/۶e-۳
نتایج تجربی مرجع [۷]	۱/۳	۰/۵

در این مدل سیال غیرلزج و غیر قابل تراکم و جریان کاملاً شعاعی، ایزوکر، غیر چرخشی و ایزوترمال فرض می‌شود. همچنین فرض می‌شود که  $Pr \rightarrow 0$ ، (پرانتل)،  $Re \rightarrow \infty$  (رینولدز) و  $M \rightarrow 0$  (ماخ) اما به گونه‌ای که  $Re \cdot Pr \rightarrow \infty$ . اگر چه این فرضیات برای گازهای در حال انبساط حاصل از انفجار خرج اولیه و یا اتمسفر محیط صادق نیست اما اجازه می‌دهند تا یک حل تحلیلی بدست آید. پیش بینی حاصل از این حل، محدوده زمان شکستن مایع و نیز قطر اولیه قطرات را بطور مفیدی تعیین می‌کند. شکل (۳) را در نظر بگیرید. سیال شماره (۱) در لحظه  $t$  دارای شعاع  $R_i(t)$  و ارتفاع  $Z$  است. سیال شماره (۲) در حلقه‌ای قرار گرفته که شعاع خارجی آن  $Ro(t)$  است و در بیرون حلقه آن، محیطی بی نهایت از سیال شماره (۳) واقع شده است.  $Ro(t)$  یک رابطه تجربی بوده که در مرجع [۴] به صورت زیر بیان شده است.

$$R_o(t) = R_\infty [1 - \exp(-a(t + t_0))] \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $R_\infty$  شعاع پخش ذرات مایع در حالت کاملاً توسعه یافته،  $t$  زمان،  $a$  و  $t_0$  ثابت زمانی می باشد. و از شرایط اولیه با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می شود.

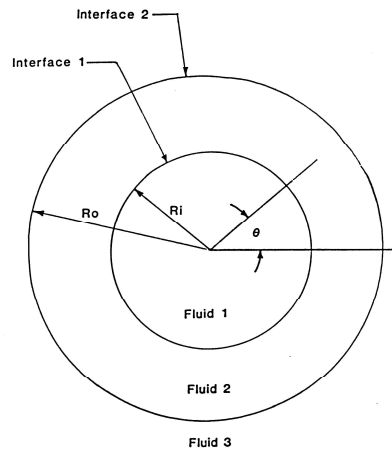
$$R_o(0) = R_\infty [1 - \exp(-at_0)] \quad (2)$$

بنابراین با انجام یک تست تجربی اگر اندازه  $Ro(t)$  در یک  $t$  معین مشخص شود آنگاه از روابط (۱) و (۲) می توان  $a$  و  $t_0$  را محاسبه نمود. لازم بذکر است که در رابطه (۱) مقدار تجربی بدست آمده برای  $R_\infty$  از نتایج تست ها در برخی مراجع [۴]  $30 \cdot Ro(0)$  و در بعضی مراجع دیگر [۸] حدود  $40 \cdot Ro(0)$  می باشد. در روش دیگر برای محاسبه  $a$  از رابطه (۱) در شرایط اولیه صفر مشتق گرفته می شود که رابطه  $V(0) = aR_\infty$  بدست خواهد آمد و با داشتن سرعت فیلم سیال در لحظه صفر مقدار  $a$  بدست خواهد آمد. با این توصیف در صورت دسترسی نداشتن به مقدار  $a$  مرجع [۴] مقدار  $0/3$  بر میلی ثانیه ( $1/msec$ ) را مقدار قابل قبولی برای  $a$  پیشنهاد می کند.

در شکل (۳) سطح تماس بین سیال‌های (۱) و (۲) با سطح مشترک داخلی (۱) و سطح تماس بین سیال‌های (۲) و (۳) با سطح مشترک خارجی (۲) نامگذاری می گردد. در مقایسه با دستگاه مورد آزمایش سیال شماره (۱) گازهای حاصل از انفجار خرج اولیه، سیال شماره (۲) سوخت مایع و سیال شماره (۳) هوای محیط است. حرکت سطح مشترک داخلی و خارجی با فرض ثابت بودن حجم و مشتق گرفتن از آن بصورت زیر خواهد شد.

$$r_i(\tau) \dot{r}_i(\tau) = r_o(\tau) \dot{r}_o(\tau) \quad (3)$$

در رابطه فوق  $r_o(\tau)$  همان رابطه (۱) در حالت بی بعد می باشد



شکل ۳- هندسه استوانه‌ای مورد استفاده در مدل ناپایداری فیلم [۴]

$$r_o(\tau) = r_\infty [1 - \exp(-a^*(\tau + \tau_o))] \quad (۴)$$

$$a^* = \frac{z}{R_\infty}, r_\infty = \frac{R_\infty}{z}, T_o = \frac{z}{aR_\infty}$$

اگر فرض می‌شود که اغتشاشی به اندازه  $\eta_i Y_m Z_n$  به شعاعها اعمال شود یعنی:

$$r_1(\tau) = r_i(\tau) + \eta_1(\tau) Y_m Z_n \quad (۵)$$

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

$$Y_m = A_m \cos(m\theta) + B_m \sin(m\theta), \quad Z_n = \cos(n\pi z)$$

$A_m$  و  $B_m$  ثوابت هستند. اندیس  $n$  مود محوری و اندیس  $m$  مود قطبی (محیطی) را نشان می‌دهد. در اینجا فرض شده که اندیسهای  $m$  و  $n$  برای هر دو سطح تماس یکسان است. مرجع [۴] اظهار داشته که وقتی مقادیر  $m$  و  $n$  برای دو سطح تماس تفاوت داشته باشند تنها حل ممکن، حل بدیهی می باشد. از این رو انتخاب یکسان اندیسها فرض معتبری است. در این شرایط معادله حرکت در هر سه سیال حلی بر حسب تابع پتانسیل سرعت،  $\Phi_i$ ، خواهد داشت به گونه‌ای که:

$$\nabla^2 \Phi_i = 0 \quad (۶)$$

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

شرایط مرزی نیز به این صورت تعریف می‌شود که مؤلفه‌های نرمال سرعت روی سطوح مشترک مساوی باشند یعنی:

$$\vec{n}_1 \cdot \nabla \Phi_1 = \vec{n}_1 \cdot \nabla \Phi_2 \quad \text{و} \quad \vec{n}_2 \cdot \nabla \Phi_2 = \vec{n}_2 \cdot \nabla \Phi_3$$

که  $\vec{n}_i$  بردار نرمال بر سطح مشترک  $I$  است. با روش پلسِت (Plesset) که در مرجع [۴] به آن اشاره شده،  $\Phi_1$  عبارت

است از:

$$\Phi_1 = r_1(\tau) \dot{r}_1(\tau) \ln r + \left[ \frac{\dot{\eta}_1}{\eta_1} + \frac{\dot{r}_1(\tau)}{r_1(\tau)} \right] \frac{I_m(kr)}{kI'_m(kr_1)} Y_m Z_n \quad (۷)$$

$$0 < r < r_1(\tau) \quad \& \quad k = n\pi$$

$I_m$  تابع بسل اصلاح شده از نوع اول و از مرتبه  $m$  است و علامت پریم، دیفرانسیل نسبت به آرگومان را نشان می‌دهد.

در سیال (۳):

$$\Phi_3 = r_o(\tau) \dot{r}_o(\tau) \ln r + \left[ \frac{\dot{\eta}_2}{\eta_2} + \frac{\dot{r}_o(\tau)}{r_o(\tau)} \right] \frac{K_m(kr)}{kK'_m(kr_o)} Y_m Z_n \quad (۸)$$

$$r_o(\tau) < r < \infty$$

Km تابع بسمل اصلاح شده از نوع دوم و از مرتبه m است. برای سیال شماره (۲):

$$\Phi_2 = r_o(\tau) \dot{r}_o(\tau) \ln r + \eta_1 Y_m Z_n \left[ \frac{\dot{\eta}_1}{\eta_1} + \frac{\dot{r}_i(\tau)}{r_i(\tau)} \right] Q_1 + \eta_2 Y_m Z_n \left[ \frac{\dot{\eta}_2}{\eta_2} + \frac{\dot{r}_o(\tau)}{r_o(\tau)} \right] Q_2 \quad (9)$$

روابط مربوط به Q1 و Q2 در مرجع [۴] آمده است. همچنین می‌توان نشان داد که روابط زیر برقرارند.

$$\frac{d}{d\tau} [r_i f_{11} \dot{\eta}_1] - G_1 \eta_1 - r_i \frac{d}{d\tau} \left[ \frac{f_{12}}{r_o} \frac{d}{d\tau} [r_o \eta_2] \right] = 0 \quad (10)$$

$$\frac{d}{d\tau} [r_o f_{22} \dot{\eta}_2] - G_2 \eta_2 + r_o \frac{d}{d\tau} \left[ \frac{f_{21}}{r_i} \frac{d}{d\tau} [r_i \eta_1] \right] = 0 \quad (11)$$

روابط مربوط به  $G_i$  و  $f_{ij}$  نیز در مرجع [۴] آمده است. از معادلات دیفرانسیلی (۱۰) و (۱۱) با شرایط اولیه مناسب می‌توان انتگرالگیری عددی نمود و به ازای تغییر جرم مخصوص سیالات مورد استفاده، تغییر اغتشاش (m,n) و تغییر تابع  $\rho_0(\tau)$  رفتار حل را بررسی نمود. برای استفاده از این مدل، می‌توان به ازای شرایط اولیه مناسب  $\eta_i(0)$  و  $\dot{\eta}_i(0)$ ، زمان شکستن فیلم سیال و قطر اولیه قطرات را از لحظه‌ای که دامنه ناپایداری با ضخامت فیلم برابر می‌شود، بدست آورد. به عبارتی زمان شکستن لحظه‌ای است که:

$$\max \{ |\eta_1(\tau_b)|, |\eta_2(\tau_b)| \} = r_o(\tau_b) - r_i(\tau_b) = w(\tau_b) \quad (12)$$

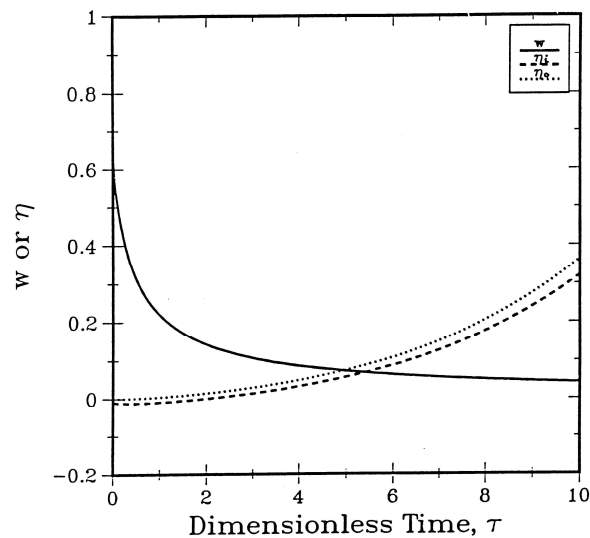
پیش بینی می‌شود قطر اولیه برابر با  $w(\tau_b)$  باشد. شکل (۴) نمونه‌ای از نتایج این مدل را نشان می‌دهد. این مدل وقتی معتبر است که  $|\eta_i|$  خیلی کوچکتر از یک باشد. با توجه به ساختار فیزیکی دستگاه انتظار می‌رود دامنه اغتشاش اولیه کوچک باشد مثلاً از مرتبه میلی متر و امثال آن. بنابراین یک محدوده کاربردی به صورت  $|\eta_i(0)| z < 1 \text{ mm}$  قابل استفاده است. برای مقاصد محاسباتی استفاده از رابطه زیر پیشنهاد می‌شود:

$$|\eta_i(0)| \leq \max \{ \min \{ 0.01, (1.0 \text{ mm}) / z \}, 0.01 \} \quad (13)$$

برای سرعت اغتشاشی نیز محدوده‌ای وجود دارد که در مرجع [۴] به شکل زیر پیشنهاد شده است:

$$|\dot{\eta}_i(0)| \leq \max \{ \min \{ 0.01, (1.0 \text{ m} / \text{sec}) / (aR_o) \}, 0.01 \} \quad (14)$$

مدل مورد بحث در اینجا مدل پایداری خطی است و وقتی معتبر است که  $|\eta_i(\tau)|$  خیلی کوچکتر از یک باشد. برای پیش بینی زمان شکستن و قطر متوسط اولیه در واقع به یک مدل غیر خطی احتیاج است. این بدان معنی خواهد بود که زمان شکستن پیش بینی شده خیلی کوچک و قطر متوسط پیش بینی شده خیلی بزرگ خواهد بود. دلیل اینکه زمان شکستن پیش بینی شده خیلی کوچک خواهد بود این است که نرخ رشد ناپایداری در رژیم جریان غیر خطی کاهش می‌یابد. بنابراین مدل خطی که این کاهش در آن دیده نمی‌شود زمان شکستن را کوتاهتر پیش بینی می‌کند. دلیل اینکه قطر متوسط پیش بینی شده خیلی بزرگتر از مقادیر واقعی خواهد بود این است که در رژیم جریان غیر خطی، اجزاء اغتشاشی با مقیاس کوچک نسبت به اجزاء با مقیاس بزرگتر، رشد سریعتری دارند. بنابراین مودهای اغتشاشی که باعث شکستن می‌شوند در عمل نسبت به مود بحرانی پیش بینی شده توسط مدل خطی کوچکترند (به عبارتی n یا m بزرگتری دارند). از اینرو قطر اولیه واقعی کوچکتر از آن چیزی است که توسط مدل خطی پیش بینی می‌شود. اما به هر حال مدل خطی می‌تواند محدوده مفیدی از حد پائین زمان شکستن و حد بالای قطر اولیه را ارائه دهد. بعلاوه چون شرایط اولیه مجهول است، می‌توان حداکثر مجاز  $|\eta_i(0)|$  و  $|\dot{\eta}_i(0)|$  را برای ایجاد سریعترین رشد اغتشاش انتخاب نمود. در این صورت می‌توان کوتاهترین زمان شکستن و بزرگترین قطر متوسط را پیش بینی نمود.



شکل ۴- تغییرات اغتشاش  $\eta_i$  و ضخامت فیلم  $w(\tau)$  [۴].

مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که قطر متوسط قطرات بعد از شکستن فیلم در محدوده ای از رابطه زیر قرار دارد [۴].

$$w(\tau_b) \leq D \leq 2w(\tau_b) \quad (15)$$

در رابطه فوق  $w(\tau_b)$  ضخامت فیلم در لحظه شکست است. بنابراین به کمک روابط (۱۲) و (۱۵) می‌توان زمان شکستن و قطر اولیه قطرات را تعیین نمود. برای بدست آوردن سرعت تقریبی قطرات می‌توان از رابطه (۱) نسبت به زمان مشتق گرفت و با قرار دادن مقدار زمان شکست در آن سرعت قطرات در لحظه شکست فیلم مایع را محاسبه کرد.

#### ۴- بررسی حل معادلات حاکم

در این بخش معادلات دیفرانسیل حاکم بر مدل ناپایداری فیلم با نوشتن یک برنامه کامپیوتری حل شده است. معادلات دیفرانسیل (۱۰) و (۱۱) از نوع معادلات دیفرانسیل مرتبه دو بوده که برای حل آن از زبان برنامه نویسی فرترن استفاده شده است. برنامه نوشته شده شامل فایل ورودی، فایل خروجی، فایل اصلی و فایل اجرایی می‌باشد. فایل ورودی کلیه پارامترها و فرضیات اولیه مسئله که عبارتند از:  $R_i0$  (شعاع داخلی اولیه فیلم)،  $R_o0$  (شعاع خارجی (بیرونی) اولیه فیلم)،  $H$  (ارتفاع دستگاه)،  $\sigma_1$  (کشش سطحی در سطح حایل بین سیالات در شعاع خارجی)،  $\rho_1$  (جرم مخصوص سیال در داخل فیلم (گازهای ناشی از انفجار))،  $\rho_2$  (جرم مخصوص سیال تشکیل دهنده فیلم (سوخت اصلی)) و  $\rho_3$  (جرم مخصوص سیال محیطی (هوا)) را شامل می‌باشد و فایل خروجی پارامترهای  $T_b$  (زمان شکست فیلم)،  $V$  (سرعت قطرات)،  $D$  (قطر قطرات) و  $R_b$  (محل شکست فیلم) را در بر می‌گیرد. پارامترها و فرضیات اولیه که در فایل ورودی ثبت شده است در فایل اصلی برنامه فراخوانی شده و با حل معادلات دیفرانسیلی حاکم با روش رانج کوتاه، نتایج حاصله از حل در فایل خروجی ثبت می‌شود عملیات فراخوانی و ثبت پارامترها و همچنین حل معادلات در فایل اصلی برنامه صورت گرفته و اجرای آن از طریق شورت کات فایل اجرایی انجام می‌شود. برای محاسبه مقادیر توابع بسط موجود در معادلات از توابع کتابخانه ای فرترن استفاده شده است.

#### ۵- نتایج و بحث

برنامه نوشته شده برای حل معادلات دیفرانسیلی حاکم در مدل ناپایداری فیلم برای شرایط اولیه زیر حل شده است.

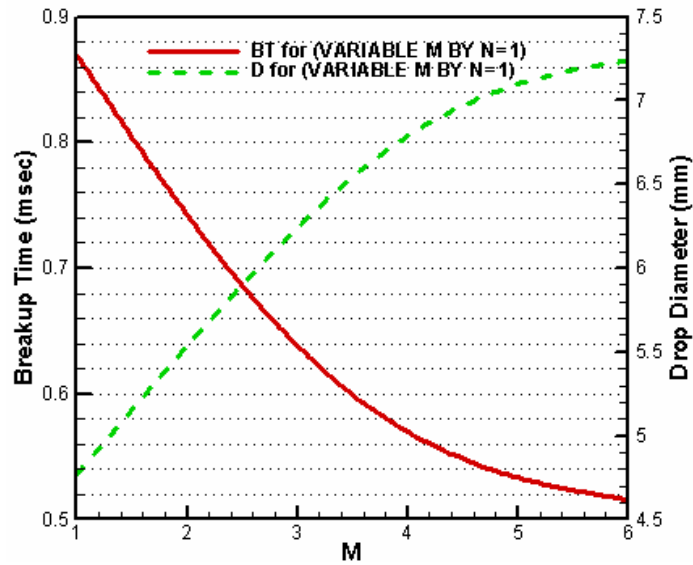


$\rho_1 = 1(\text{kg}/\text{m}^3)$  ,  $\sigma_2 = 2.42E - 2(\text{N}/\text{m})$  ,  $\sigma_1 = 1E - 8(\text{N}/\text{m})$  ,  $H = 12\text{cm}$  ,  $R_o = 5.5\text{cm}$  ,  $R_i = 1.5\text{cm}$   
 $\rho_2 = 899(\text{kg}/\text{m}^3)$  و  $\rho_3 = 1(\text{kg}/\text{m}^3)$  نتایج حاصل از این حل با نتایج حاصل از حل مدل ناپایداری فیلم در مرجع [۴] و نتایج تست تجربی در مرجع [۷] مقایسه شده است که نتیجه این مقایسه در جدول (۳) می باشد.

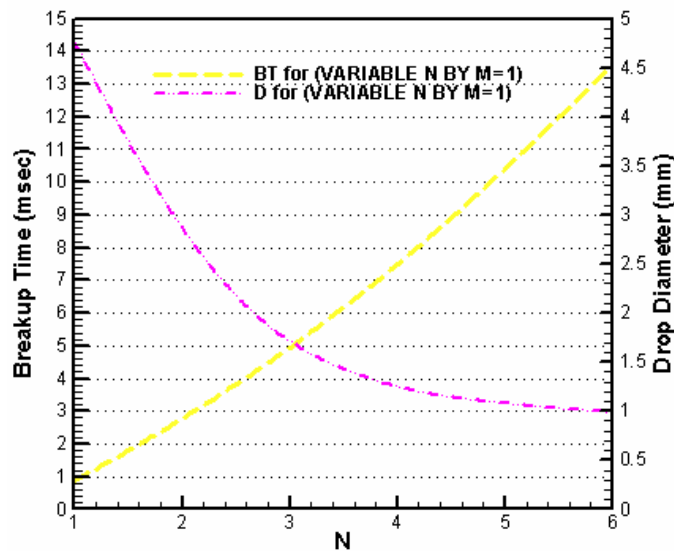
جدول ۳- مقایسه نتایج بدست آمده از مدل‌های مختلف شکست مایع

محل شکست قطرات (m)	سرعت تقریبی قطرات در لحظه شکست ( $\text{m}/\text{s}$ )	قطر قطرات (cm)	زمان شکست (ms)	روش حل
-----	-----	۰/۴۴	۰/۱۱	حل مدل ناپایداری فیلم مرجع [۴]
-----	-----	۰/۵	۱/۳	نتایج تجربی مرجع [۷]
۰/۴۲۹	۱۷۸۰	۰/۴۹	۰/۱۸	حل برنامه در $M = N = 1$ و $V_0 = 2400(\text{m}/\text{s})$
۱/۴۵	۲۸۸	۰/۱۴۴	۱/۴۲	حل برنامه در $M = 1$ و $N = 4$ و $V_0 = 2400(\text{m}/\text{s})$
۱/۴۳	۳۱۴	۰/۱۴۶	۱/۳۷	حل برنامه در $M = 2$ و $N = 4$ و $V_0 = 2400(\text{m}/\text{s})$
۰/۳۳۲	۱۹۳	۰/۶۳	۱/۳	حل برنامه در $M = 3$ و $N = 1$ و $V_0 = 2400(\text{m}/\text{s})$
۰/۴۲۹	۳۶۶	۰/۴۹	۰/۸۹	حل برنامه در $M = N = 1$ و $V_0 = 490(\text{m}/\text{s})$
۱/۴۵	۵۹	۰/۱۴۴	۶/۹۵	حل برنامه در $M = 1$ و $N = 4$ و $V_0 = 490(\text{m}/\text{s})$
۱/۴۳	۶۵	۰/۱۴۶	۶/۶۷	حل برنامه در $M = 2$ و $N = 4$ و $V_0 = 490(\text{m}/\text{s})$
۰/۳۳	۳۹۵	۰/۶۳	۰/۶۴	حل برنامه در $M = 3$ و $N = 1$ و $V_0 = 490(\text{m}/\text{s})$

همانطور که در جدول (۳) نشان داده شده است بازای  $M$  و  $N$  های مختلف جوابهای متفاوتی در پارامترهای خروجی مشاهده می شود و نتایج پارامترهای خروجی بازای  $M = N = 1$  و سرعت اولیه فیلم برابر با ۲۴۰۰ متر بر ثانیه (که از فرضیات اولیه مسئله در مرجع [۴] می باشد نتایج خروجی با نتایج بدست آمده در مرجع [۴] تقریباً نزدیک می باشد ولی مقدار زمان شکست فیلم با نتایج تجربی دارای اختلاف زیادی می باشد). در حل دوم که در شرایط اولیه قبلی ولی با سرعت اولیه فیلم برابر با ۴۹۰ متر بر ثانیه (بنا به توصیه مرجع [۴] برای وقتی که مقدار این سرعت معلوم نباشد). نتایج خروجی با نتایج تجربی بدست آمده در مرجع [۷] دارای اختلاف کمی بوده و نتایج حاصله قابل قبول می باشد. از نتایج بدست آمده از جدول (۳) می توان نتیجه گرفت که  $M$  و  $N$  از جمله پارامترهایی می باشد که می تواند بر روی نتایج خروجی این مدل تاثیر گذار باشد. لذا تعیین مقدار این دو پارامتر برای کالیبره کردن نرم افزار بسیار لازم و ضروری می باشد. شکل (۵) تغییرات  $M$  و  $N$  بر حسب قطر قطرات و زمان شکست فیلم را نشان می دهد.



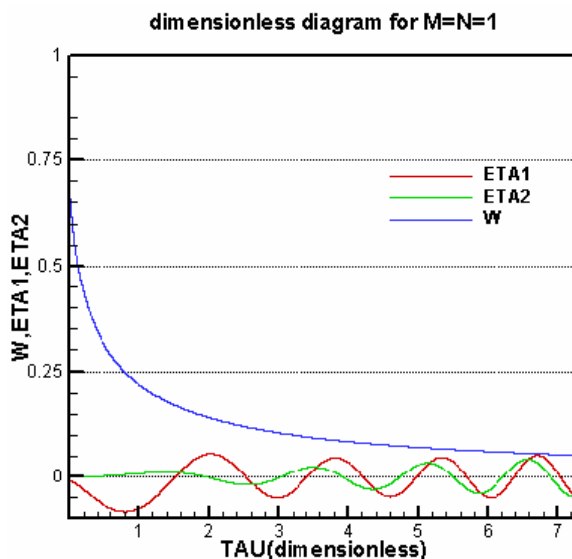
شکل ۵- تغییرات  $M$  بر حسب قطر قطرات و زمان شکست



شکل ۶- تغییرات  $N$  بر حسب قطر قطرات و زمان شکست

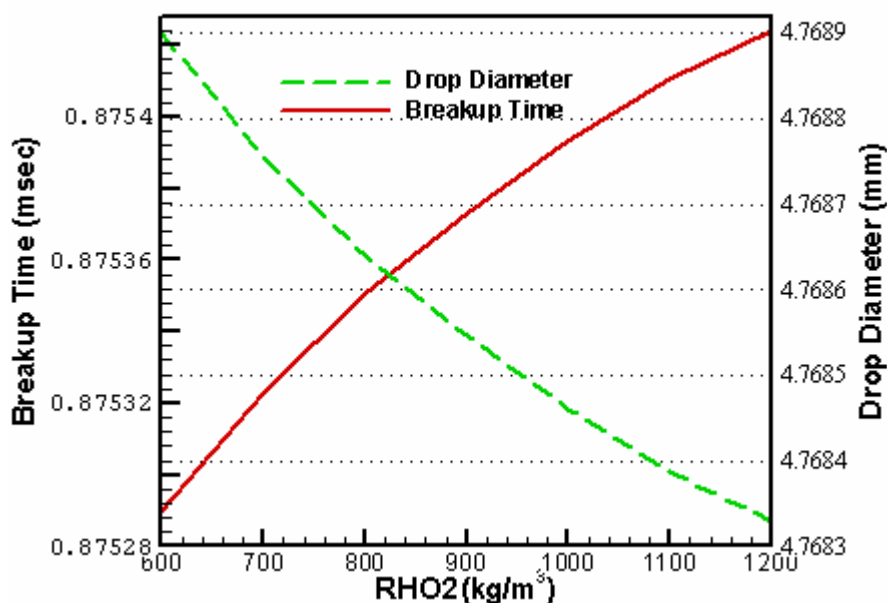
همانطور که در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است با افزایش  $M$  قطر قطرات افزایش و زمان شکست کاهش یافته و با افزایش  $N$  قطر قطرات کاهش و زمان شکست افزایش داشته است. یعنی می‌توان نتیجه گرفت که اغتشاشات با مقادیر  $M$  بزرگتر و  $N$  کوچکتر تمایل بیشتری به ناپایداری داشته و سریعتر به مرز شکست فیلم سیال خواهند رسید. لذا برای رسیدن به مقادیر واقعی این پارامترها باید از نتایج تجربی استفاده کرد.

شکل (۷) تغییرات ضخامت فیلم سیال و توابع اغتشاش را بر حسب زمان در حالت بدون بعد نشان می‌دهد در این شکل  $W$  ضخامت فیلم سیال می‌باشد که در زمان بی بعد  $\tau = 6.85$  برابر با رشد توابع اغتشاش شده است و این لحظه در روند حل برنامه کامپیوتری بعنوان زمان شکست فیلم سیال ثبت خواهد شد.



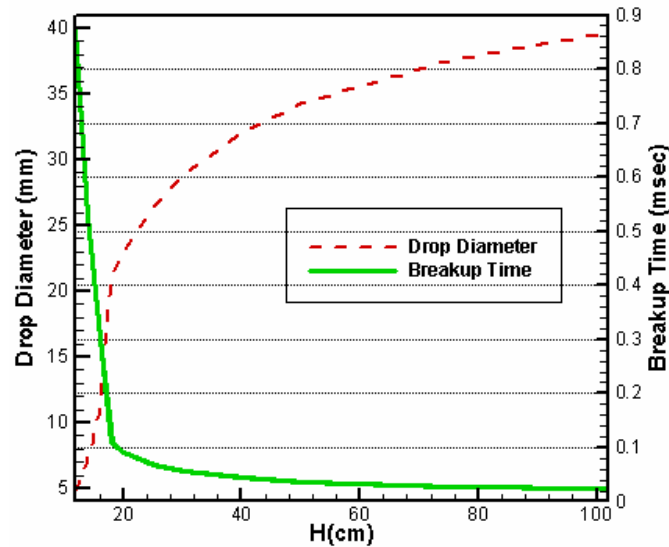
شکل ۷- تغییرات ضخامت و اغتشاشات فیلم سیال بر حسب زمان در حالت بدون بعد

نمودار تغییرات دانسیته مایع بر حسب قطر قطرات و زمان شکست فیلم در شکل (۸) نشان داده شده است



شکل ۸- تاثیر دانسیته سوخت بر زمان شکست فیلم سیال و قطر قطرات در لحظه شکست فیلم

از شکل (۸) می توان نتیجه گرفت که با افزایش دانسیته فیلم سیال پایدارتر شده و زمان شکست آن دیرتر رخ می دهد هر چند که این افزایش بسیار کم و ناچیز می باشد. از جمله پارامترهایی که بر روی پایداری فیلم سیال تاثیر بسزایی دارد ارتفاع دستگاه مورد آزمایش می باشد که روند تغییرات این پارامتر بر حسب قطر قطرات و زمان شکست فیلم سیال در شکل (۹) نشان داده شده است. با در نظر گرفتن شکل (۹) می توان نتیجه گرفت که افزایش ارتفاع دستگاه مورد آزمایش فیلم سیال را ناپایدارتر کرده و خیلی زود دچار شکست می شود.



شکل ۹- تاثیر ارتفاع دستگاه آزمایش بر زمان شکست فیلم سیال و قطر قطرات در لحظه شکست فیلم

## ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق مدلسازی شکست فیلم سیال در ناحیه غلیظ با انتخاب مدل ناپایداری فیلم و بررسی روابط حاکم بر این مدل و نوشتن یک برنامه کامپیوتری به زبان فرترن انجام گرفت. نتایج بدست آمده از برنامه با مراجع دیگر مقایسه شد تا از نحوه عملکرد برنامه اطمینان حاصل شود. سپس مطالعه پارامتریک برای دانستن چگونگی تاثیر پارامترها بر نتایج خروجی انجام شد که نتایج حاصله را می توان به صورت زیر بیان نمود.

- با افزایش  $M$  قطر قطرات افزایش و زمان شکست کاهش یافته اما با افزایش  $N$  قطر قطرات کاهش و زمان شکست افزایش داشته است. که از این تغییرات می توان نتیجه گرفت که اغتشاشات با مقادیر  $M$  بزرگتر و  $N$  کوچکتر تمایل بیشتری به ناپایداری داشته و سریعتر به مرز شکست فیلم سیال خواهند رسید. لذا برای رسیدن به مقادیر واقعی این مقادیر باید از نتایج تجربی استفاده کرد.

- با افزایش دانسیته مایع، فیلم سیال پایدارتر شده و زمان شکست آن دیرتر رخ می دهد ولی میزان این تغییرات بسیار کم و ناچیز می باشد.

- افزایش ارتفاع دستگاه مورد آزمایش فیلم سیال را ناپایدارتر کرده و خیلی زود دچار شکست می شود و در نتیجه اندازه ذرات مایع به میزان قابل توجهی بزرگتر خواهد شد.

## مراجع

- 1- C. Kot, D. Morita, H. Nielson, H. Napadensky, R. Remaly, T. Stanley, A. Tulis, D. Werle, A. Wiedermann, "Liquid Fuel- Air Explosive Technology Program Volume I. Technical Discussion," AFATL-TR-72-224 (December 1972).
- 2- A. I. Ivandaev, A. G. Kutushev, R. I. Nigmatulin, "Numerical Investigation of The Expansion of a Cloud of Dispersed Particles or Drops Under The Influence of an Explosion," Fluid Dynamics 17, 68-74 (1982).
- 3- M. Rosenblatt, G. E. Eggum, K. N. Kreyenhagen, "DICE-FAE Analysis of Fule Dispersal and Detonation From a Fule-Air-Explosive Device," Air Force Armament Laboratory Report AFATL-TR-76-33, (March 1976).
- 4- Gardner D.R., "Near-Field Dispersal Modeling for Liquid Fuel-Air Explosives", Sandia National Laboratories Report, AND90-0686, July 1990.
- 5- Glass M.W., "Far-Field Dispersal Modeling for Fuel-Air Explosives Devices", Sandia National Laboratories Report, SAND90-0528, 1990.
- 6- D. E. Grady, "The Spall Strength of Condensed Matter," J. Mech. Phys. Solids 36, 353-384 (1985)
- 7- M. Samirant, G. Smeets, C. Baras, H. Royer, L. R. Oudin, "Dynamic Measurements in Combustible and Detonable Aerosols," Propellants, Explosives, Pyrotechnics 14, 47-56(1989).

۸- دوستدار، م.م، "حل عددی جریان توأم با اسپری"، پایان نامه دکتری، دانشکده هوا و فضا، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۳.