

تحلیل دینامیکی شکست قطرات اسپری سوخت و بهبود مدل شکست تشابهی تیلور با توجه به اثرات نسبت چگالی دو فاز

امیر امیدوار^{۱*} و حسن خالقی^{۲**}

۱- دانشگاه صنعتی شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا

۲- دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مکانیک

(دریافت: ۱۳۸۸/۳/۳، پذیرش: ۱۳۸۹/۳/۲۵)

در این نوشتار به بررسی و تحلیل دینامیکی شکست قطرات سوخت در شرایط آستانه‌ای شکست و در نزدیکی عدد وبر بحرانی پرداخته شده است. تحقیقات پیشین در زمینه جریان‌های دو فازی پراکنده نشان داده است که عدد وبر بحرانی به نسبت چگالی دو فاز وابسته است، در حالی که در اکثر مدل‌های مرسوم ارائه شده برای شکست قطرات اسپری از جمله مدل تشابهی تیلور، مقدار عدد وبر بحرانی برابر با ۱۲ فرض می‌شود. در این مقاله سعی شده است تا با تحلیل ناپایداری‌های سطحی قطره در شرایط آستانه‌ای شکست، عملکرد مدل مرسوم شکست تشابهی تیلور بهبود یابد. به نحوی که مدل اصلاح شده بتواند اثرات نسبت چگالی دو فاز را در فرایند شکست لحاظ نماید. نتایج این تحقیق نشان داد که در نسل جدید موتورهای دیزل که فشار محفظه احتراق در آن‌ها بسیار بالاست، عدد وبر بحرانی از مقدار ثابت و مرسوم ۱۲ فراتر می‌رود. مقایسه نتایج با داده‌های تجربی نشان داد که مدل اصلاح شده پیشنهادی در این مقاله می‌تواند رفتار اسپری دیزل را با دقت بیشتری نسبت به مدل تشابهی تیلور پیش‌بینی نماید.

واژگان کلیدی: اسپری، شکست قطره، عدد وبر، نسبت چگالی

مقدمه

شکست یک قطره در اثر حرکت در یک محیط پیوسته یکی از پدیده‌های مهم و مؤثر در بسیاری از رخداد‌های طبیعی و یا فرایندهای صنعتی است. به عنوان مثال در چاپگرهای جوهر افشان دستیابی به وضوح قابل قبول کاملاً به فرایند پودرسازی (Atomization) قطرات جوهر وابسته است. همچنین، در بحث ایمنی راکتورهای هسته‌ای و همچنین عملکرد موتورهای دیزل و پاشش مستقیم، پودرسازی و فرایند شکست قطرات نقش مهمی را ایفا می‌کند. کاربرد وسیع جریان‌های مذکور در عرصه‌های گوناگون صنعت و فناوری لزوم دستیابی به شناختی دقیق و منطقی از دینامیک شکست قطره و نحوه تعامل آن با محیط پیوسته اطرافش را به خوبی توجیه می‌کند.

وقتی یک قطره یا ذره در سیال فاز پیوسته حرکت می‌کند نیروهای متفاوتی بر آن وارد می‌شود. برخی از این نیروها از سرعت نسبی قطره و سیال فاز پیوسته ناشی می‌شوند؛ مانند نیروی پسا (Drag). به این نیروها اصطلاحاً نیروهای دایمی می‌گویند. اما نیروهای دیگری نیز بر قطره وارد می‌شوند که به دلیل وجود شتاب نسبی بین قطره و سیال فاز پیوسته به وجود می‌آیند؛ مانند نیروهای باست (Basset) و جرم مجازی. این نیروها به نیروهای گذرا معروف‌اند. با فرض صفر بودن شتاب نسبی بین قطره و سیال فاز پیوسته می‌توان از نیروهای گذرا صرف‌نظر کرد. این فرض در اغلب جریان‌های دوفازی پراکنده فرض قابل قبولی است. اعمال نیروهای پسای ایرودینامیکی اعم از فشاری و اصطکاکی باعث ایجاد تنش بر فصل مشترک قطره با محیط اطرافش می‌شود. نیروهای کشش سطحی با تنش‌های ایجاد شده در فصل مشترک مقابله می‌کنند اما اگر تنش‌های وارد شده

* استادیار (نویسنده مخاطب) - ایمیل: (amir.omidvar@gmail.com)

** دانشیار - ایمیل: (hasan_khaleghi@yahoo.com)

بر جداره قطره از حد معینی تجاوز کنند، نیروهای کشش سطحی یارای مقابله ندارند و قطره خواهد شکست. مشاهدات تجربی حاکی از آن است که شکست قطرات در رژیم‌های مختلفی رخ می‌دهد؛ رژیم ارتعاشی (شکست رایلی)^۱، رژیم بالونی (کیفی یا چترنجاتی)^۲، رژیم گذرا، رژیم لایه‌ای (پوسته‌ای) و رژیم ناگهانی (تصادفی). هاینز نشان داد که گذر از هر یک از رژیم‌های شکست به شدت به عدد وبر جریان وابسته است [۱].

عدد وبر بیانگر نسبت نیروهای هیدرودینامیکی متلاشی‌کننده قطره به نیروهای پایدارکننده است. عدد وبر بحرانی خبر از رشد ناپایداری هیدرودینامیکی و آستانه شکست قطره دارد. عدد وبر بحرانی متغیر بسیار مهمی در برآورد اندازه قطرات و رفتار فصل مشترک دو فاز در محاسبات جریان‌های چند فاز پراکنده است. معمولاً تبادل انرژی و تکانه (Momentum) بین دو فاز با مقدار عدد وبر بحرانی ارتباط مستقیم دارد. در جریان‌های دو فاز انفجالی نیز نرخ واکنش‌های شیمیایی به مساحت فصل مشترک وابسته است که این عامل خود به مقدار عدد وبر بحرانی بستگی دارد.

تحلیل‌های ابعادی حاکی از آن است که سه متغیر بی‌بعد بر عدد وبر بحرانی مؤثراند؛ عدد رینولدز، عدد اونسورگ (Ohnesorge) و نسبت چگالی دو فاز. تأثیر دو متغیر اول یعنی عدد رینولدز و عدد اونسورگ بر عدد وبر بحرانی توسط محققان زیادی از جمله پیلیچ و اردمن [۲]، کلو [۳] و گلفاند [۴] بررسی شده است. میزان تأثیر نسبت چگالی دو فاز بر عدد وبر بحرانی نیز در سال ۲۰۰۳ میلادی توسط کوشیزوکا و همکارانش با استفاده از مدلسازی فرایند شکست قطره با روش نیمه‌ضمنی ذرات متحرک (MPS) بررسی شد [۵]. آن‌ها نشان دادند که در جریان‌هایی با نسبت چگالی بسیار کوچک، مقدار عدد وبر بحرانی به شدت به نسبت چگالی دو فاز وابسته است. کوشیزوکا و همکارانش محاسبات خود را برای نسبت چگالی ۱ تا ۹ انجام دادند. در اینجا سؤالات زیادی مطرح می‌شود از جمله اینکه، میزان تأثیرپذیری عدد وبر بحرانی از متغیر نسبت چگالی، در جریان‌های گاز-مایع تا چه حد است؟ در محفظه احتراق کوره‌ها که فشار داخل محفظه نزدیک به فشار اتمسفر است متغیر نسبت چگالی دو فاز بسته به نوع سوخت به کار رفته بین ۷۰۰ تا ۸۰۰ است. در حالی که در موتورهای دیزل معمولی متغیر نسبت چگالی نزدیک به ۳۰ است. در نسل نوین موتورهای دیزل که فشار محفظه احتراق در آن‌ها به مراتب بالاتر است، نسبت چگالی دو فاز به ۱۰ نیز می‌رسد.

در همه مدل‌های ارائه شده برای شکست قطرات اسپری، مقدار عدد وبر بحرانی برابر با ۱۲ فرض شده است [۶]. با توجه به طیف گسترده تغییرات متغیر نسبت چگالی در کاربردهای مختلف اسپری سوخت، این سؤال مطرح است که آیا فرض ثابت بودن مقدار عدد وبر بحرانی در مدل‌های مذکور فرض درستی است یا نه؟ و این فرض تا چه حد می‌تواند باعث ایجاد خطا در محاسبات شکست قطره شود؟

در این پژوهش سعی شده تا به سؤالات مطرح شده پاسخ داده شود و میزان تأثیرپذیری عدد وبر بحرانی از نسبت چگالی دو فاز برای جریان‌های اسپری گاز-مایع در شرایط محیطی مختلف بررسی شود. بدین منظور مقدار عدد وبر بحرانی یک‌بار با مدل تشابهی تیلور و یک‌بار با استفاده از تحلیل ناپایداری کلوین-هلمهولتز محاسبه و نتایج با هم مقایسه شده‌اند. با مقایسه نتایج، رابطه‌ای برای تخمین ضریب C_b در مدل مرسوم تشابهی تیلور پیشنهاد شده است. در پایان نیز میزان تأثیر رابطه پیشنهاد شده برای اصلاح مقدار ضریب C_b در بهبود عملکرد مدل تشابهی تیلور مورد بحث و ارزیابی قرار گرفته است.

محاسبه عدد وبر بحرانی بر مبنای مدل تشابهی تیلور

مدل شکست تشابهی تیلور^۳ (TAB) توسط اوروکه و آمسدن در سال ۱۹۸۷ بیان شد [۷]. مدل TAB یک مدل مرسوم برای محاسبات شکست قطرات است که امروزه در بسیاری از کاربردهای مهندسی از جمله مدلسازی شکست قطرات اسپری استفاده می‌شود. در این مدل فرض بر این است که رفتار نهایی قطره در داخل سیال احاطه‌کننده آن کاملاً مشابه رفتار ارتعاش اجباری

^۱ Rayleigh Breakup

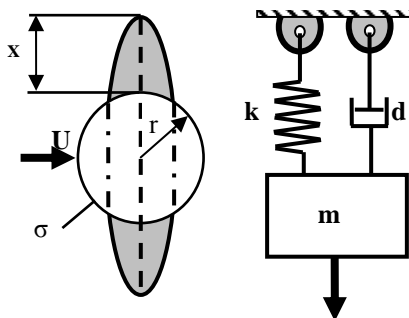
^۲ Bag Breakup

^۳ Taylor Analogy Breakup

یک نوسانگر همساز دارای میراکننده است. نوسان و واپیچش قطرات نیز توسط این مدل قابل بیان است [۷]. معادله حاکم بر حرکت ارتعاش اجباری یک سیستم نوسانگر همساز دارای میراکننده به صورت زیر است:

$$F - kx - d\dot{x} = m\ddot{x} \quad (1)$$

که F نیروی خارجی، k ضریب سختی فنر، d ضریب میراکنندگی، m جرم و x فاصله از حالت تعادل است.



شکل ۱- طرحواره‌ای کلی از تشابه تیلور [۶]

بر طبق مدل TAB برای بیان رفتار ارتعاشی و واپیچشی قطره متحرک در یک محیط سیال نیز می‌توان همین معادله را نوشت. اگر x را میزان تغییر شکل قطره از حالت کروی در نظر بگیریم، از تشابه تیلور ضرایب معادله برای قطره نوسانی واپیچشی به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\frac{F}{m} = C_F \frac{\rho_g u^2}{\rho_l r} \quad (2-الف)$$

$$\frac{k}{m} = C_K \frac{\sigma}{\rho_l r^3} \quad (2-ب)$$

$$\frac{d}{m} = C_d \frac{\mu_l}{\rho_l r^2} \quad (2-ج)$$

که ρ_g و ρ_l به ترتیب چگالی فاز گسسته (مایع) و چگالی فاز پیوسته (گاز) هستند. u سرعت نسبی قطره است. r شعاع قطره تغییر شکل نیافته (کروی)، σ کشش سطحی و μ_l لزجت قطره است. ضرایب بی‌بعد C_d ، C_K و C_F در ادامه تعریف خواهند شد. در این مدل فرض بر این است که زمانی شکست قطره رخ می‌دهد که تغییر شکل آن از یک حد بحرانی فراتر رود. به عبارت دیگر [۷۶]:

$$x > C_b r \quad (3)$$

که C_b عدد ثابت است و معمولاً برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. اگر فرض شود که شکست زمانی رخ می‌دهد که تغییر شکل قطره برابر شعاع آن باشد، در این حالت قطب‌های شمال و جنوب قطره در مرکز آن به هم می‌رسند. این فرض به طور ضمنی بیانگر این حقیقت است که قطره دستخوش یک مد ارتعاشی غالب شده است. با جایگذاری روابط (۲) در (۱) و با فرض $y = x/C_b r$ خواهیم داشت:

$$\ddot{y} = \frac{C_F \rho_g u_{rel}^2}{C_b \rho_l r^2} - \frac{C_K \sigma}{\rho_l r^3} y - \frac{C_d \mu_l}{\rho_l r^2} \dot{y} \quad (4)$$

در این حالت شکست زمانی رخ می‌دهد که $y > 1$ باشد [۷]. از حل معادله بالا برای حالت زیر میرا و با فرض ثابت بودن سرعت نسبی داریم:

$$y(t) = We_c + e^{-\frac{t}{\tau}} \left[(y_0 - We_c) \cos(\omega t) + \frac{1}{\omega} \left(\dot{y}_0 + \frac{y_0 - We_c}{t_d} \right) \sin(\omega t) \right] \quad (5)$$

که

$$We_c = \frac{C_F}{C_K C_b} \cdot \frac{We}{2} \quad (7)$$

$$We = \frac{\rho_g u_{rel}^2 D}{\sigma} \quad (8)$$

$$y_0 = \dot{y}_0 = 0.0 \quad (9)$$

$$\frac{1}{\tau} = \frac{C_d}{2} \frac{\mu_l}{\rho_l r^2} \quad (10)$$

$$\omega^2 = C_K \frac{\sigma}{\rho_l r^3} - \frac{1}{\tau^2} \quad (11)$$

که We بیانگر عدد وبر، τ مقیاس زمانی میرایی لزجی قطرات و ω فرکانس نوسانات سطحی قطره است. از مقایسه با نتایج تجربی مقادیر C_K ، C_F و C_d به دست می‌آیند [7]:

$$C_K = 8.0 ; \quad C_d = 5.0 ; \quad C_F = \frac{1}{3} \quad (12)$$

معادله (5) دارای موده‌های ارتعاشی متفاوتی است. طبق مدل TAB اگر قطره دچار شکست شود این شکست در مود ارتعاش اصلی یا همان هارمونیک اول رخ خواهد داد. بنابراین اگر دامنه نوسانات بی‌بعد (y) در سطح قطره در مود ارتعاش اصلی به مقدار یک برسد ($y=1.0$)، قطره در آستانه شکست قرار خواهد گرفت. در چنین شرایطی عدد وبر جریان برابر با عدد وبر بحرانی خواهد بود. برای محاسبه عدد وبر بحرانی قبل از هر چیز لازم است مقیاس زمانی متناظر با مود ارتعاش اصلی (t_{fund}) محاسبه شود. این مقیاس زمانی متناظر با اولین بیشینه نسبی پاسخ دینامیکی قطره است. به عبارت دیگر (t_{fund}) اولین ریشه غیر صفر معادله $\dot{y}(t) = 0.0$ است. با مشتق‌گیری از رابطه (5) داریم:

$$\dot{y}(t) = \frac{C_F}{C_K C_b} We_g \left(\omega + \frac{1}{\tau^2 \omega} \right) \left(e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega t) \right) = 0.0 \quad (13)$$

در معادله بالا، به غیر از $\sin(\omega t)$ سایر جملات نمی‌توانند صفر باشند. بنابراین داریم:

$$\sin(\omega t) = 0.0 \quad (14)$$

بنابراین

$$t = \frac{k\pi}{\omega} \quad (15)$$

$t_{fund} = \frac{\pi}{\omega}$ به ازاء $k = 1.0$ به دست می‌آید. لذا $t_{fund} = \frac{\pi}{\omega}$.

با جاگذاری $y = 1.0$ و $t_{fund} = \frac{\pi}{\omega}$ در معادله (5)، عدد وبر بحرانی به دست می‌آید:

$$We_{crit} = \frac{2C_K C_b}{C_F \left(1 + e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}} \right)} \quad (16)$$

ملاحظه می‌شود که مقدار به دست آمده برای عدد وبر بحرانی در رابطه (16) به چگالی فاز گازی وابسته نیست، در حالی که بررسی‌های ابعادی و همچنین تحقیقات کوشیزوکا و همکارانش حاکی از وابستگی عدد وبر بحرانی به نسبت چگالی دو فاز است. با جاگذاری مقادیر τ و ω از روابط (10) و (11) می‌توان به آسانی نشان داد که مقدار $\omega\tau$ به سمت مقادیر خیلی بزرگ میل می‌کند. بنابراین داریم:

$$\omega\tau = \sqrt{\frac{32\sigma\rho_l r}{25\mu_l^2} - 1} \quad (17)$$

با توجه به اینکه برای اغلب قطرات اسپری سوخت‌های دیزل $\rho_l = O(10^2)$ ، $\sigma = O(10^{-2})$ ، $\mu_l = O(10^{-3})$ و $r = O(10^{-3})$ لذا مقدار $\omega\tau$ خیلی بزرگ بوده و می‌توان به راحتی نتیجه گرفت که:

$$1 + e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}} \cong 2 \quad (18)$$

بدین ترتیب رابطه (۱۶) را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$We_{crit} \cong \frac{C_k C_b}{C_F} \quad (19)$$

که با توجه به مقادیر ارائه شده در رابطه (۱۲)، خواهیم داشت:

$$We_{crit} \cong 12 \quad (20)$$

در ادامه مقدار عدد وبر بحرانی را بر اساس تحلیل ناپایداری‌های سطحی قطره مورد بررسی قرار خواهیم داد.

تحلیل ناپایداری کلونین - هلمهولتز در سطح قطره

مشاهدات تجربی حاکی از آن است که شکست قطره با سازوکارهای مختلفی رخ می‌دهد؛ تغییر شکل قطره، لایه لایه شدن لایه مرزی و تحریک‌های سطحی که می‌تواند ناشی از ناپایداری‌های کلونین - هلمهولتز (KH) یا رایلی - تیلور (RT) باشد [۴]. در واقع این سازوکارها به صورت جداگانه عمل نمی‌کنند و به طور همزمان در رخداد شکست شرکت دارند. ناپایداری KH به دلیل حرکت نسبی مماسی در فصل مشترک دو فاز به وجود می‌آید اما ناپایداری RT در مواردی که سیستم تحت تأثیر بردار شتابی عمود بر فصل مشترک دو فاز قرار می‌گیرد، ظاهر می‌شود. این ناپایداری نشئت گرفته از لختی سیال چگال‌تر است. از آنجا که ناپایداری‌های سطحی متأثر از نسبت چگالی دو فاز است لذا در این مقاله به منظور برآورد میزان وابستگی عدد وبر بحرانی به متغیر نسبت چگالی دو فاز، ناپایداری‌های سطحی با روش مود معمولی (Normal) بررسی شده است.

برای ناپایداری KH یک تحریک سطحی مانند ϕ در معادله لاپلاس صدق می‌کند [۸]:

$$\nabla^2(\phi) = 0.0 \quad (21)$$

می‌توان جواب این معادله را به صورت زیر فرض کرد:

$$\phi(x, t) = \phi_0 e^{i(kx - \omega t)} \quad (22)$$

که k عدد موج و ω سرعت زاویه‌ای تحریک مورد نظر است. با توجه به رشد توانی تحریک مذکور در ناحیه خطی داریم [۸]:

$$\omega = k \left(\frac{\rho_c u_c + \rho_d u_d}{\rho_c + \rho_d} \pm \frac{\sqrt{(\rho_c + \rho_d)k\sigma - \rho_c \rho_d (u_c - u_d)^2}}{\rho_c + \rho_d} \right) \quad (23)$$

عدد موج بحرانی و طول موج بحرانی به ترتیب عبارتند از:

$$k_{cr} = \frac{\rho_c \rho_d (u_c - u_d)^2}{\sigma(\rho_c + \rho_d)} \quad (24)$$

$$\lambda_{cr} = \frac{2\pi}{k_{cr}} \quad (25)$$

در این معادلات، u سرعت، ρ چگالی و زیرنویس‌های c و d مربوط به فاز پیوسته و قطره هستند. σ کشش سطحی قطره است. شعاع بحرانی قطره بزرگ‌ترین شعاعی است که قطره می‌تواند در شرایط هیدرودینامیکی مورد نظر پایدار بماند. لذا برای به دست آوردن عدد وبر بحرانی کافی است در تعریف عدد وبر قطر قطره را برابر با دو برابر طول موج بحرانی تحریک فرض کرد:

$$We_{cr} = \frac{\rho_c (u_c - u_d)^2 (2\lambda_{cr})}{\sigma} \quad (26)$$

که با جاگذاری رابطه (۲۵) در رابطه (۲۶) خواهیم داشت:

$$We_{cr} = 4\pi \left(1 + \frac{\rho_c}{\rho_d} \right) = 4\pi \left(1 + \frac{1}{S} \right) \quad (27)$$

که S نسبت چگالی قطره به چگالی فاز پیوسته است. همان طور که از معادله (27) پیداست، با افزایش نسبت چگالی دو فاز، عدد وبر بحرانی کاهش می‌یابد. اگر چگالی قطره از چگالی فاز پیوسته اطراف آن خیلی بیشتر باشد ($S \gg 1.0$) آنگاه وبر بحرانی به مقدار 4π میل می‌کند که تقریباً همان مقداری است که در همه مدل‌های شکست قطره به آن اشاره شده است ($We_{crit} = 12.0$) ولی با کاهش نسبت چگالی (S) مقدار عدد وبر بحرانی نیز افزایش می‌یابد.

اصلاح مدل شکست تشابهی تیلور

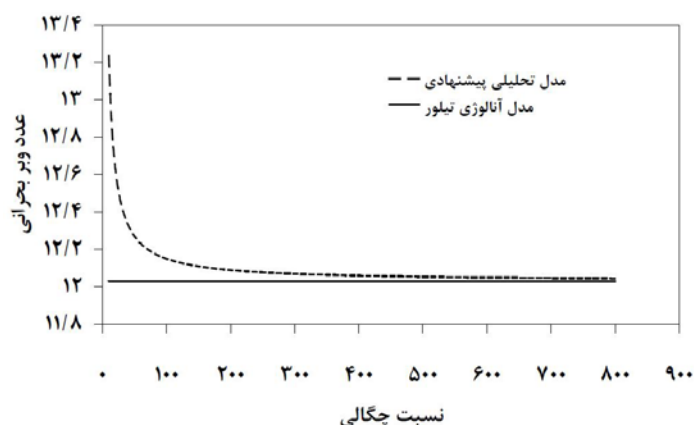
با مقایسه روابط (27) و (19) چنین به نظر می‌رسد که می‌توان به منظور اعمال اثرات نسبت چگالی دو فاز، در رابطه (19) ضریب C_b را به جای مقدار ثابت $0/5$ به صورت زیر در نظر گرفت:

$$C_b = 0.5 \times \left(1 + \frac{1}{S} \right) \quad (28)$$

بدین ترتیب رابطه (19) را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$We_{crit} \cong \frac{0.5 \times C_k}{C_F} \cdot \left(1 + \frac{1}{S} \right) = 12 \left(1 + \frac{1}{S} \right) \quad (29)$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود رابطه (29) هماهنگی زیادی با رابطه (27) دارد. بنابراین چنین نتیجه‌گیری می‌شود که می‌توان با فرض رابطه (28) برای محاسبه ضریب C_b عملکرد مدل TAB را تا حدودی بهبود بخشید و اثرات تحریک‌های سطحی را نیز در محاسبات شکست قطره لحاظ کرد. همان‌طور که قبلاً نیز به آن اشاره شد، در مواردی که فشار در محفظه احتراق بالاست، چگالی فاز گازی نسبتاً زیاد است؛ در چنین شرایطی نمی‌توان از جمله نسبت چگالی صرف‌نظر کرد. در محفظه احتراق کوره‌ها که فشار داخل محفظه نزدیک به فشار اتمسفر است متغیر نسبت چگالی دو فاز بسته به نوع سوخت به کار رفته بین 600 تا 800 است. در حالی که در موتورهای دیزل معمولی متغیر نسبت چگالی نزدیک به 30 است. در نسل نوین موتورهای دیزل که فشار محفظه احتراق در آن‌ها به مراتب بالاتر است، نسبت چگالی دو فاز حتی به مقدار 10 نیز می‌رسد. بنابراین به نظر می‌رسد که با توجه به متفاوت بودن متغیر نسبت چگالی دو فاز، در کاربردهای مختلف اسپری سوخت، مقدار عدد وبر بحرانی نیز متفاوت باشد. بدین منظور در شکل (2) مقدار عدد وبر بحرانی برای یک قطره سوخت در نسبت چگالی 10 تا 800 رسم شده است.



شکل ۲- عدد وبر بحرانی برای یک قطره سوخت

همان‌طور که دیده می‌شود، مدل مرسوم تشابهی تیلور برای سایر مقادیر نسبت چگالی، تقریباً عدد وبر ثابتی معادل 12 را پیش‌بینی می‌کند. در حالی که نتایج مدل اصلاح شده پیشنهادی، حاکی از افزایش نسبی عدد وبر بحرانی در نسبت‌های چگالی

اندک است. بنابراین پیش‌بینی می‌شود که مقدار عدد وبر بحرانی در محفظه احتراق موتورهای دیزل جدید که در فشارهای خیلی بالا عمل می‌کنند نزدیک به ۱۳/۲ باشد.

تأثیر نسبت چگالی دو فاز بر قطر متوسط قطرات فرزند

با اعمال اصلاحیه ارائه شده در رابطه (۲۸) برای ضریب C_b در مدل مرسوم تشابهی تیلور، نه تنها مقدار عدد وبر بحرانی به عنوان شرایط آستانه‌ای شکست از متغیر نسبت چگالی دو فاز متأثر می‌شود، بلکه مقدار متوسط قطر قطرات فرزند (قطرات تولید شده ناشی از فرایند شکست) نیز از متغیر نسبت چگالی دو فاز متأثر می‌پذیرد. بر اساس مدل تشابهی تیلور، قطر متوسط قطرات فرزند از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۷]:

$$SMD = \frac{D}{2.33 + 0.125 \frac{\rho_l D^3}{8\sigma} \dot{y}^2} \quad (30)$$

که SMD قطر متوسط قطرات فرزند و D قطر قطره مادر است. \dot{y} سرعت تغییر شکل قطره است که عبارت است از:

$$\dot{y} = \frac{C_F}{C_k C_b} \cdot \frac{We}{2} \cdot \left(\omega + \frac{1}{\tau^2 \omega} \right) \left(e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega t) \right) \quad (31)$$

در مدل مرسوم تشابهی تیلور، $C_b = 0.5$ فرض شده است [۷]. با اعمال رابطه پیشنهادی (رابطه ۲۸) برای ضریب C_b مقدار \dot{y} و به تبع آن متوسط قطر قطرات فرزند از متغیر نسبت چگالی دو فاز متأثر می‌پذیرد.

مقایسه نتایج مدل TAB اصلاح شده با مدل شکست TAB مبنا

در این بخش از مقاله به منظور بررسی عملکرد مدل شکست TAB اصلاح شده، مدل مذکور در یک کد رایانه‌ای جریان اسپری با نام EPISO اعمال شده و نتایج با مدل TAB مبنا مقایسه شده است.

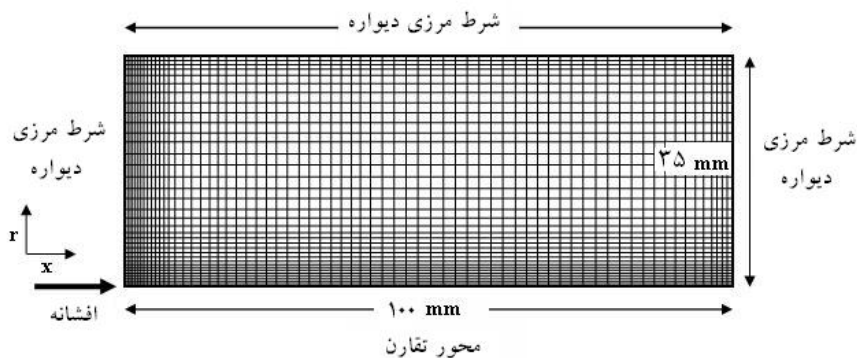
این کد در ابتدا توسط واتکینز و همکاران در انگلستان توسعه یافت [۹-۱۳] سپس در ایران توسط خالقی و همکاران بارها برای مدلسازی جریان‌های دوفاز و تک فاز در داخل سیلندر مورد استفاده قرار گرفت و تحولات چشمگیری در ساختار آن به وجود آمد [۱۴-۱۸]. کد رایانه‌ای مذکور بر مبنای مدل قطرات مجزا (DDM) استوار است به طوری که معادلات بقا برای فاز پیوسته (فاز گازی) در مختصات اولری و معادلات بقای فاز گسسته (فاز مایع) در مختصات لاگرانژی نوشته و حل می‌شوند. تعامل بین دو فاز نیز از طریق افزودن جمله‌های چشمه به معادلات بقای فاز گازی لحاظ می‌شود.

برای مدلسازی فرایندهای انتقال گرما و تبخیر قطرات اسپری از مدل ال وکیل [۱۹] استفاده شده است. همچنین برای محاسبه تعامل قطرات مایع و گردابه‌های اغتشاشی از مدل گاسمن و یونیدی [۲۰] بهره گرفته شده است. تعامل بین قطرات اسپری و برخورد آن‌ها با یکدیگر نیز بر اساس مدل گاوایسس [۲۱] محاسبه و لحاظ شده است.

کد محاسباتی از الگوریتم غیرتکرار پیرو [۲۲] برای بیان وابستگی بین میدان‌های سرعت و فشار بهره می‌گیرد. معادلات بقای فاز گازی با روش حجم محدود گسسته‌سازی می‌شوند، مشتقات زمانی با روش ضمنی اولر و عبارتهای شامل انتقال همرفتی و پخشی با روش هیبرید اختلاف بالادستی و اختلاف مرکزی تخمین زده می‌شوند. معادلات دیفرانسیل معمولی حاکم بر جریان فاز مایع (قطرات) با روش ضمنی دو نقطه‌ای اولر گسسته‌سازی می‌شوند. جزئیات بیشتر در مورد روش‌های عددی و ساختار محاسباتی کد رایانه‌ای را می‌توان در مراجع [۱۶] تا [۱۸] دید.

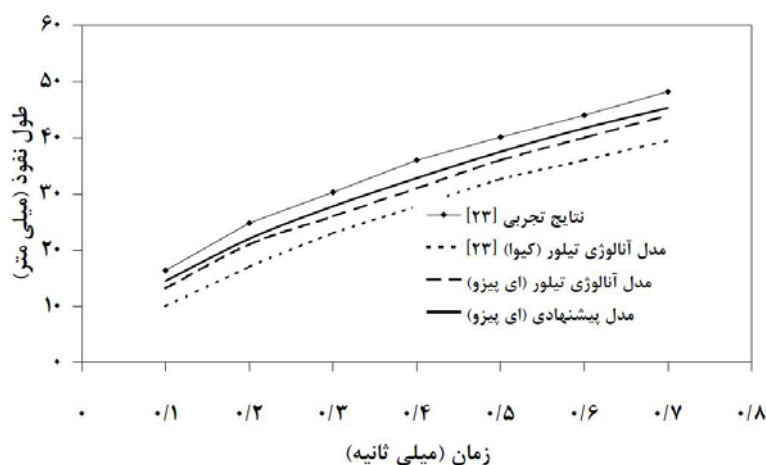
در این پژوهش، معادلات بقای جرم، تکانه، انرژی، انرژی جنبشی اغتشاش، تلفات انرژی جنبشی اغتشاش و معادله بقای جزء جرمی بخار سوخت برای فاز گازی در یک میدان دو بعدی با تقارن محوری به صورت عددی حل می‌شوند. معادلات در یک میدان حل محاسباتی 100×35 میلی‌متر با 60 مش در راستای محوری و 50 مش در راستای شعاعی گسسته‌سازی و حل می‌شوند. در شکل (۳) نمایی کلی از میدان حل، شبکه محاسباتی و شرایط مرزی حاکم بر مسئله نشان داده شده است.

همان‌طور که مشخص است شبکه محاسباتی انتخاب شده غیر یکنواخت است، به طوری که در نزدیکی محور پاشش اسپری (محور تقارن) و نواحی نزدیک به افشانه (Injector)، به دلیل وجود گرادیان‌های شدید، از شبکه بسیار ریزتری نسبت به سایر نواحی استفاده شده است. البته در نزدیکی دیواره‌ها نیز شبکه تا حدی ریزتر از نقاط میانی میدان است. فواره (Jet) مایع به شکل توده‌های کروی سیال (Blob) در مختصات $x=0$ و $r=0$ به داخل میدان تزریق می‌شود. این قطرات که در ابتدا هم‌اندازه با قطر نازل افشانه‌اند با سرعتی برابر با سرعت تزریق (u_{inj}) وارد میدان می‌شوند.



شکل ۳- نمایی کلی از میدان حل، شبکه محاسباتی و شرایط مرزی

لازم به ذکر است که شرایط استقلال از شبکه محاسباتی و گام زمانی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که با شبکه محاسباتی 60×50 و انتخاب گام زمانی ۵ میکرو ثانیه، شرایط استقلال از شبکه محاسباتی و گام زمانی برقرار می‌شود. در اینجا به منظور بررسی عملکرد مدل اصلاح شده، نتایج طول نفوذ اسپری سوخت به داخل محیط گازی با نتایج گزارش شده در مرجع [۲۳] در شرایط کاملاً مشابه مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است نتایج کد EPISO در مقایسه با KIVA از هماهنگی بیشتری با داده‌های تجربی برخوردار است. همچنین به وضوح دیده می‌شود که با اعمال اصلاحیه پیشنهاد شده در این پژوهش نتایج طول نفوذ اسپری به داده‌های تجربی نزدیک‌تر می‌شود. البته این امر چندان دور از انتظار نیست. همان‌طور که در بخش‌های قبل به آن اشاره شد، با اعمال اصلاحیه پیشنهاد شده برای ضریب C_b ، مقادیر عدد وبر بحرانی و متوسط قطر قطرات فرزند در محیط‌های گازی با فشار بالا به مراتب بیشتر از چیزی است که مدل TAB مبنای پیشنهاد می‌کند. بنابراین با زیاد شدن عدد وبر بحرانی و به تبع آن تأخیر در رخداد فرایند شکست قطرات و همچنین با درشت‌تر شدن قطرات فرزند، نرخ تبخیر قطرات کم شده و طول نفوذ اسپری افزایش یابد.



شکل ۴- مقایسه نتایج با برخی داده‌های تجربی و عددی گزارش شده

بحث و نتیجه گیری

به طور کلی نتایج به دست آمده در این تحقیق را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- ۱- اصلاح مدل تشابهی تیلور به منظور لحاظ نمودن اثرات تحریک های سطحی در فصل مشترک قطره با محیط گازی اطراف.
- ۲- بررسی ها نشان داد که وقتی نسبت چگالی دو فاز خیلی بزرگ است، در شرایط آستانه ای شکست (عدد وبر جریان به عدد وبر بحرانی نزدیک است) فرایند شکست قطرات بیشتر متأثر از سازوکار تغییر شکل قطره است. در حالی که در جریان هایی با نسبت چگالی کم نقش تحریک های سطحی در فصل مشترک دو فاز محسوس تر می شود.
- ۴- نتایج این تحقیق نشان داد که در موتورهای دیزل معمولی که فشار داخل محفظه احتراق از ۵۰ بار تجاوز نمی کند، در نظر گرفتن عدد وبر بحرانی برابر با مقدار ثابت و مرسوم ۱۲، خطای زیادی را به دنبال ندارد. ولی در موتورهای دیزل جدید که فشار داخل محفظه احتراق در آن ها خیلی بالاتر است عدد وبر بحرانی نزدیک به ۱۳/۲ است.
- ۵- بررسی ها نشان داد که علاوه بر عدد وبر بحرانی و شرایط آستانه ای شکست قطره، خواص پس از شکست نیز به نسبت چگالی دو فاز وابسته است. با کاهش نسبت چگالی فاز مایع به فاز گاز، قطر متوسط قطرات فرزند افزایش می یابد.
- ۶- مقایسه نتایج مدل TAB اصلاح شده با مدل TAB مینا نشان داد که اصلاحیه پیشنهادی می تواند عملکرد مدل را تا حد نسبتاً زیادی بهبود بخشد.

مراجع

1. Hinze, J. O., "Fundamentals of Hydrodynamic Mechanism of Splitting in Dispersion Process," *AICHE Journal*, 1, No.3, pp. 289-295, 1955.
2. Pilch, M., and Erdman, C. A., "Use of Breakup Time Data and Velocity History Data to Predict the Maximum Size of Stable Fragments for Acceleration Induced Breakup of a Liquid Drop," *Int. J. Multiphase Flow*, 13, pp. 741-752, 1987.
3. Kolev, N. I., "Fragmentation and Coalescence Dynamics in Multiphase Flows," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 22, pp. 211-220, 1993.
4. Gelfand, B. E., "Droplet Breakup Phenomena in Flows with Velocity Lag," *Prog. Energy Combust. Sci.* 22, pp. 201-212, 1996.
5. Duan, R. Q., Koshizuka, S., and Oka, Y., "Numerical and Theoretical Investigation of Effect of Density Ratio on the Critical Weber Number of Droplet Breakup," *Journal of Nuclear Science and Technology*, 40, No. 7, pp. 501-508, 2003.
6. Baumgarten, C., "Mixture Formation in Internal Combustion Engines," Hannover, Germany, Springer, 2006.
7. O'Rourke, P. J., and Amsden, A. A., "The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup," *SAE Paper 872089*, 1987.
8. Liu, H., "An Investigation of Thermal Modulation Effect on Liquid Sheet Breakup," PhD Thesis, University of Alabama, 2008.
9. Beshay, K. R., Gosman, A. D., and Watkins, A. P., *SAE Report 861570*, 1986.
10. Ahmadi-Befrui, B., Gosman, A. D., and Watkins, A. P., "Flows in Internal Combustion Engines," *ASME*, pp. 27-32, 1984.
11. Gosman, A. D., Tsui, Y. Y., and Watkins, A. P., *SAE Report 840229*, 1984.
12. Watkins, A. P., "Computation of Diesel Sprays by a Non-Iterative Implicit Solution Scheme," *Atom Spray Tech*, 3, pp. 261-290, 1987.
13. Watkins, A. P., and Khaleghi, H., "Modeling Diesel Spray Evaporation Using a Non-Iterative Implicit Solution Scheme," *Appl Math Modeling*, 12, pp. 468-474, 1990.
14. Khaleghi, H., and Fallah, E., "Iterative and Non-Iterative Solution of Engine Flows Using ASM and k-ε Turbulence Models," 11th annual conference of CFD society of Canada, Canada, 2003.
15. Khaleghi, H., and Hosseini, S. M., "Numerical Modeling of Spray Combustion in DI Diesel Engine Using Partially Stirred Reactor (PaSR) Model," 11th annual conference of CFD society of Canada, Canada, 2003.
۱۶. معتمدی ذکاء، ح؛ "تحلیل جریان دو بعدی داخل سیلندر در طی فرایند تراکم با استفاده از مدل توربولانسی تنش های رینولدز (RSM)،" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، اسفندماه ۱۳۸۵.
۱۷. خالقی، ح؛ امیدوار، ا؛ و معتمدی ذکاء، ح؛ "مدلسازی عددی جریان دوفازی اغتشاشی ناهمسانگرد داخل سیلندر با استفاده از مدل تنش های رینولدز،" فصلنامه علمی-پژوهشی شریف، شماره ۴۷، تیرماه ۱۳۸۸.
18. Kaleghi, H., Ganji, D. D., and Omidvar, A., "Comparison of Various Droplet Breakup Models in Gas-Liquid Flows in High Pressure Environments," *IJST Journal*, 32, No. B4, pp. 385-400, 2008.
19. El Wakil, M. M., Ueyhara, O. A., and Myers, F. S., "A Theoretical Investigation of the Heating-up Period of Injected Fuel Droplets Vaporizing in Air," *NACA Technical Note 3179*, 1954.

20. Gosman, A. D., and Ioannides, E., "Aspects of Computer Simulation of Liquid-Fuelled Combustors," Energy, 7, NO.6, pp. 482-490, 1983.
21. Gavaises, M., "Modeling of Diesel Fuel Injection Processes," PhD Thesis, Imperial College of Science and Technology and Medicine, University of London, London, UK, 1997.
22. Issa, R. I., "Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator Splitting," J. Comp. Phys, 62, NO. 1, pp. 40-65, 1986.
23. Rotondi, R., Bella, G., Grimaldi, C., and Postrioti, L., "Atomization of High Pressure Diesel Sprays: Experimental Validation of a New Breakup Model," SAE Paper 2001-01-1070, 2001.

English Abstract

A Dynamic Analysis of Fuel Droplets Breakup and Modification of Taylor Analogy Breakup (TAB) with Respect to Density Ratio Effects

A. Omidvar¹ and H. Khaleghi²

1- Department of Mechanical Engineering, Shiraz University of Technology

2- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University

This paper presents a dynamic investigation of fuel droplets breakup at the vicinity of critical Weber number. Based on prior research, the critical Weber number depends on density ratio. However, in traditional diesel spray droplet breakup models such as TAB, the critical Weber number is considered to be constant at a value of 12. In this article, some modification has been proposed in order to improve Taylor analogy breakup model with respect to density ratio effects. The results of the present research indicate that at higher combustion chamber pressure levels, critical Weber number is greater than the custom value of 12 in novel diesel engines. In addition, the results from our proposed model are in good agreement with experimental data reported by other researchers. It is, therefore, concluded that the new modified model is effectively more reliable in comparison with TAB model.

Keywords: Spray, Droplet breakup, Weber number, Density ratio