

# شبیه‌سازی عددی پدیده شکسته‌شدن یک قطره در مسیر جریان گاز سرد و داغ و مطالعه دینامیک آن در میدان سه‌بعدی

استادیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران،  
e\_ezzateshan@sbu.ac.ir  
دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی،  
تهران، ایران، lkazemi722@gmail.com  
دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی،  
تهران، ایران، ali.khosro.73@gmail.com

اسلام عزت‌نشان\*

لیلا کاظمی

علی اصغر خسروآبادی

## چکیده

در مقاله حاضر، شبیه‌سازی دینامیک قطره و فرآیند شکسته‌شدن آن در جریان گاز سرد و داغ انجام شده و تاثیر پارامترهای فیزیکی بر الگوی جریان دوفازی مورد مطالعه قرار گرفته‌است. در این راستا، از حل عددی معادلات ناویر-استوکس با دو معادله برای دنبال کردن فصل مشترک و مدل‌سازی تبخیر و تقطیر بین قطره و گاز اطراف آن استفاده شده‌است. جهت اطمینان از صحت و دقت الگوریتم عددی انتخاب شده برای مدل‌سازی فرآیند انتقال فاز بین مایع و بخار آن در کنار فاز گاز، مسئله یک‌بعدی استفان و جریان کوئت دوفازی شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج حل تحلیلی مقایسه شده‌است. سپس، دینامیک شکسته‌شدن قطره در مسیر جریان گاز سرد در شرایط مختلف جریان شبیه‌سازی شده و نتایج به‌دست‌آمده مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌است. در نهایت، شبیه‌سازی دینامیک قطره و تبخیر و شکسته‌شدن آن در مسیر جریان گاز داغ انجام شده و نتایج حاصل از حل حاضر ارائه شده‌است. نتایج به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر نشان می‌دهند که نیروهای آیرودینامیکی و ناپایداری‌های کلوین-هلمهولتز و ریلی-تیلور نقش موثری در دینامیک قطره در مسیر جریان گاز سرد دارند.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی عددی، دینامیک قطره، شکسته‌شدن، گاز سرد، گاز داغ.

## Numerical Simulation of a Droplet Breakup phenomenon in Cross Flow of Cold and Hot Gas and its Dynamic investigation in Three-Dimensional Field

E. Ezzatneshan

L. Kazemi

A. A. KhosroAbadi

Aerospace Engineering Group, New Technologies Engineering Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Aerospace Engineering Group, New Technologies Engineering Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Aerospace Engineering Group, New Technologies Engineering Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

## Abstract

In the present paper, the simulation of droplet dynamics and its breakup process in the cross flow of cold and hot gases are performed. Herein, the Navier-Stokes equations are used with employing two additional equations for tracking the liquid-gas interface and for computing the mass transfer due to the evaporation and condensation. Accuracy of the applied numerical algorithm is evaluated by simulation of the Stefan heat transfer problem, two-phase laminar Couette flow, and comparison of the present numerical results with those obtained based on the analytical solution. The dynamics of a droplet break-up in the cold gas are studied and the obtained results are discussed. Then, the study is carried out for the simulation of droplet dynamics in the cross flow of hot gas and the effect of the evaporation on the break-up process is investigated. The present study shows that the aerodynamics forces and Rayleigh-Taylor and Kelvin-Helmholtz instabilities have dominant effects on the droplet dynamics in the cold gas. However, for a droplet in the cross-flow of hot gas, evaporation has a significant effect on the deformation and breakup phenomenon.

**Keywords:** Numerical simulation, droplet dynamics, break-up, cold gas, hot gas.

## ۱- مقدمه

انژکتورهای انواع موتورهای زمینی و هوایی اشاره کرد. شکسته‌شدن قطره در دو مرحله انجام می‌شود؛ مرحله اولیه شامل تغییر شکل قطره اصلی در مسیر جریان گاز و ریز شدن آن به دلیل ناپایداری‌های ریلی-تیلور<sup>۲</sup> یا کلوین-هلمهولتز<sup>۳</sup> است. مرحله دوم شامل شکسته‌شدن مجدد قطرات تشکیل شده از قطره اول و تشکیل قطرات خیلی ریز است، تا آنجایی که دیگر امکان شکسته‌شدن وجود ندارد [۲]. مرحله دوم از شکسته‌شدن با تاثیر بر آهنگ انتقال گرما، سطح تماس فاز مایع با گاز

فرآیند تبدیل قطرات مایع به قطرات ریزتر در مسیر یک جریان را پدیده شکسته‌شدن<sup>۱</sup> می‌گویند که به دلیل ایجاد نیروهای آیرودینامیکی و انتقال انرژی جنبشی بین قطره و گاز اطراف آن اتفاق می‌افتد [۱]. این پدیده کاربردهای گسترده‌ای در سیستم‌های سیالاتی در صنایع مختلف دارد که از آن جمله می‌توان به تولید اسپری از جت مایع، رنگ کردن، فرآیندهای تولید دارو و مواد غذایی و پاشش سوخت در

<sup>2</sup> Rayleigh-Taylor (R-T) instability

<sup>3</sup> Kelvin-Helmholtz (K-H) instability

<sup>1</sup> Break-up

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: e\_ezzateshan@sbu.ac.ir

و فضای اشغال شده توسط قطرات ریز، نقش بسیار مهمی در مشخصات جریان سیال گاز-مایع دارد. به همین دلیل، مطالعه و شناسایی این پدیده دوفازی بسیار مورد توجه محققین در حوزه صنایع مکانیک و هوافضا است.

مطالعه تجربی روی شکسته شدن قطرات یکی از آزمایشات مورد توجه پژوهشگران بوده است [۴،۳]. پژوهش‌های تجربی در گستره وسیعی از نسبت چگالی، نسبت لزجت، عدد رینولدز، عدد وبر و همچنین سیال‌های متفاوت انجام شده است. در بیشتر مطالعات تجربی، دینامیک شکسته شدن یک قطره در مسیر یک جریان گاز سرد مورد توجه بوده [۲، ۵-۷] که در نهایت منجر به دسته‌بندی انواع حالت‌های ریز شدن قطرات در شکل‌های کیسه‌ای<sup>۱</sup>، برشی<sup>۲</sup> و آشوبناک<sup>۳</sup> شده است. در کنار مطالعات تجربی، شبیه‌سازی‌های عددی جهت شناخت دقیق‌تر فرآیندهای فیزیکی موثر در این پدیده استفاده می‌شود [۸-۱۰]. در این میان، روش‌های ساده‌تر عددی امکان تحلیل تاثیر نسبت چگالی، نسبت لزجت و کشش سطحی بین دو فاز مایع و گاز بر دینامیک فصل مشترک قطره را فراهم کرده‌اند [۱۱، ۱۲]. توسعه یافته‌ترین روش‌های عددی همچنان بر پایه حل معادلات ناویر-استوکس است که حل میدان جریان دوفازی را با استفاده از الگوریتم‌هایی مانند حل عددی مستقیم [۸] یا روش VOF<sup>۴</sup> [۱۳] انجام داده و امکان شبیه‌سازی دینامیک شکسته شدن قطره را فراهم می‌کنند.

در مطالعات عددی با بررسی اعداد وبر مختلف به این نتیجه رسیدند که تغییر شکل قطره در عدد وبر یک آغاز شده و با افزایش عدد وبر به شکل بیضی‌گون در می‌آید [۱۴]. در تحقیقات اخیر شکسته شدن قطره در یک میدان با جریان برشی بررسی شده که نشان می‌دهد به ازای گستره‌ای از نرخ برشی مشخص، شکسته شدن قطره تقریباً شبیه به یکدیگر است [۱۳]. هرچند این نتایج تفاوت قابل توجهی با شکسته شدن قطره در یک میدان یکنواخت دارد. به همین ترتیب، اثرات دیواره بر نحوه شکسته شدن یک قطره تحت جریان برشی نیز بررسی و مطالعه شده است [۱۵، ۱۶]. در این مقالات اثر شکل هندسی در شکسته شدن قطره حتی در نسبت لزجت‌های پائین مورد بررسی قرار گرفته است. اخیراً، با استفاده از روش شبکه بولتزمن، شکسته شدن قطرات به صورت دوبعدی و سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است [۱۷-۱۹]. شبیه‌سازی سه‌بعدی که با استفاده از روش شبکه بولتزمن صورت گرفته اثر لزجت فاز پراکنده بر تغییر شکل قطره در عدد موئینگی بحرانی و در عدد رینولدز ۱۰ را مطالعه می‌کند [۱۹]. در بیشتر مطالعات انجام شده بر پایه شبیه‌سازی‌های عددی، دینامیک شکسته شدن قطره در شرایط همدما و با در نظر گرفتن شرایط استاندارد برای هر دو فاز مایع و گاز مورد مطالعه قرار گرفته است. انتظار می‌رود که انتقال گرما بین فاز مایع در اندرکنش با گاز داغ سبب تبخیر شدن قطره و تغییر دینامیک شکسته شدن قطره شود. این مهم در مطالعات عددی انجام شده چندان مورد توجه نبوده است.

در مقاله حاضر، دینامیک یک قطره سه‌بعدی در مسیر جریان گاز در دو شرایط همدما و دارای انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته-

است. بر اساس بررسی نویسندگان مقاله حاضر، مقایسه دینامیک یک قطره در مسیر جریان گاز سرد با شرایط جریان گاز داغ در کارهای انجام شده مورد ارزیابی قرار نگرفته است که در این تحقیق به آن پرداخته می‌شود. همچنین، بررسی چگونگی تاثیر ناپایداری‌های ریلی-تیلور و کلونین-هلمهولتز در فیزیک جریان چندفازی مورد مطالعه که دارای فیزیک پیچیده‌ای است از دیگر اهداف تحقیق حاضر است. به این منظور، از حل عددی معادلات ناویر-استوکس در کنار حل معادله انرژی و مدل دوفازی VOF با استفاده از نرم‌افزار تجاری [۲۰] استفاده شده است. مطالعه اندرکنش گاز داغ با قطره و مدل‌سازی تبخیر فاز مایع با استفاده از روش ارائه شده در مرجع [۲۱] انجام شده و از یک روش فشار مبنا برای گسسته‌سازی میدان حل استفاده شده است. جهت اطمینان از صحت و دقت روش انتخاب شده برای حل فیزیک مورد نظر، نتایج حاصل از حل عددی حاضر برای مسئله استفان [۲۲] و جریان کوئت دوفازی [۲۳] با نتایج تحلیلی موجود برای این مسائل ارزیابی شده است. سپس، تاثیر پارامترهای هندسی و فیزیکی بر دینامیک شکسته شدن قطره، اعم از نسبت چگالی، نسبت لزجت و اعداد رینولدز مختلف با استفاده از حل عددی حاضر در دو شرایط گاز سرد و داغ مورد بررسی قرار گرفته و نتایج به دست آمده با نتایج موجود مقایسه و ارزیابی شده است.

## ۲- معادلات حاکم

در مقاله حاضر از دستگاه معادلات ناویر-استوکس به همراه حل معادله انرژی و روش VOF برای شبیه‌سازی پدیده شکسته شدن یک قطره در مسیر جریان گاز سرد و داغ استفاده می‌شود. در این تحقیق، جریان گاز تراکم‌ناپذیر و در رژیم لایه‌ای در نظر گرفته شده و از اثرات آشفتنگی در میدان حل صرف نظر شده است. معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی به صورت زیر قابل بیان هستند:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\rho(\alpha) \left( \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{V} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} \right) = -\nabla P + \nabla \cdot \left( \mu(\alpha) \left[ \nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T \right] \right) \quad (2)$$

$$\rho(\alpha) c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi \quad (3)$$

که در آن،  $\rho$  چگالی،  $\mathbf{V}$  بردار سرعت،  $P$  فشار،  $\mu$  لزجت دینامیکی،  $t$  زمان،  $c_p$  گرمای ویژه،  $T$  دما،  $k$  رسانایی گرمایی و  $\Phi$  اتلاف لزجت هستند. جهت حل جریان دوفازی و دنبال کردن فصل مشترک بین فازها، کسر حجمی  $\alpha$  فاز مایع با زیرنویس  $l$  و فاز گاز با زیرنویس  $g$  بصورت زیر تعیین می‌شوند:

$$\frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{V} \alpha_l) = \frac{\dot{m}_l}{\rho_l} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \alpha_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{V} \alpha_g) = \frac{\dot{m}_g}{\rho_g} \quad (5)$$

که  $\dot{m}_l = -\dot{m}_g$  انتقال جرم بین دو فاز مایع و گاز را تعیین می‌کنند. جهت مدل‌سازی تبخیر قطره در مسیر گاز داغ، از مدل لی<sup>۵</sup> [۲۱] استفاده شده که بر فرض مخلوط همگن جریان چندفازی استوار است.

<sup>1</sup> Bag

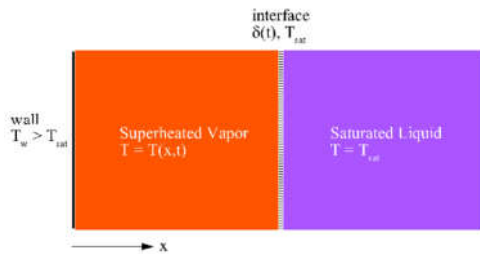
<sup>2</sup> Shear

<sup>3</sup> Catastrophic

<sup>4</sup> Volume of Fluid

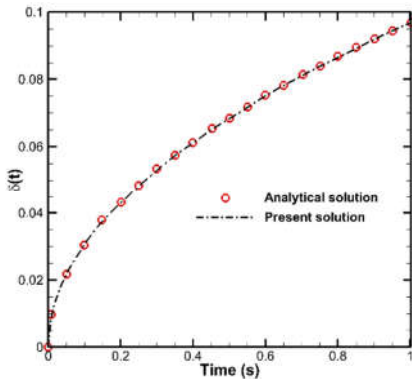
<sup>5</sup> Lee

$$\varepsilon \exp(\varepsilon^2) \operatorname{erf}(\varepsilon) = 2 \frac{c_{p,v}(T_w - T_{sat})}{h_{fg} \sqrt{\pi}} \quad (13)$$



شکل ۱- طرحواره مسئله استفان و پارامترهای فیزیکی آن

در این مسئله، نسبت چگالی فاز مایع و بخار برابر  $\rho_l / \rho_v = 1000$ ، رسانایی گرمایی بخار  $\lambda_v = 0.005 \text{ W/mK}$ ، گرمای ویژه  $c_{p,v} = 200 \text{ J/kgK}$  و گرمای نهان برابر  $h_{fg} = 10^4 \text{ J/kg}$  نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده از حل حاضر برای محل فصل مشترک بین دو فاز با اعمال اختلاف دمایی  $\Delta T = T_w - T_{sat} = 10 \text{ K}$  آورده شده که در مقایسه با حل تحلیلی حاصل از رابطه  $\delta(t)$  از دقت بسیار خوبی برخوردار است. تطابق نتایج حل حاضر با نتایج حل دقیق نشان می‌دهد که الگوریتم عددی مورد استفاده در مقاله حاضر از دقت خوبی برای شبیه‌سازی پدیده انتقال فاز تحت تغییرات دمایی بین مایع و بخار برخوردار است.



شکل ۲- تغییرات زمانی موقعیت فصل مشترک در مسئله استفان در نسبت چگالی  $\rho_l / \rho_v = 1000$  و اختلاف دمایی  $\Delta T = 10 \text{ K}$

جهت اعتبارسنجی روش حل برای مدل‌سازی انتقال فاز بین مایع و بخار با حضور فاز گاز، مسئله جریان کوئت دوفازی [۲۳] در رژیم لایه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در این مسئله، یک لایه از مایع داغ ساکن مطابق شکل ۳ در نظر گرفته می‌شود که یک گاز غیرقابل تقطیر با سرعت حالت پایا برای مسئله کوئت از روی آن در جریان است. سرعت و دمایی گاز در فاصله  $\delta$  از سطح مایع به ترتیب برابر  $u_\infty$  و  $T_\infty$  در نظر گرفته شده است. به این ترتیب، اگر دمایی سطح مایع  $T_s$  برابر دمایی تبخیر آن در نظر گرفته شود، انتقال جرم بین مایع و بخار آن در لایه مرزی جریان گاز گذرنده شکل می‌گیرد. کسر

کسر حجمی بخار بر اساس مدل لی با استفاده از معادله انتقال زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \mathbf{V}_v) = \dot{m}_{lV} - \dot{m}_{vI} \quad (6)$$

که زیرنویس  $v$  معرف مشخصات فاز بخار است.  $\dot{m}_{lV}$  و  $\dot{m}_{vI}$  به ترتیب نرخ تبخیر و تقطیر قطره را نشان می‌دهند، بطوری که اگر دمایی قطره بالاتر از دمایی تبخیر شود، تبخیر اتفاق افتاده و نرخ تبخیر بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{m}_{lV} = c_f \alpha_l \rho_l \frac{(T_l - T_{sat})}{T_{sat}} \quad (7)$$

در صورتی که دمایی تبخیر کمتر باشد، فاز بخار تقطیر می‌شود و نرخ آن بصورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\dot{m}_{vI} = c_f \alpha_v \rho_v \frac{(T_{sat} - T_v)}{T_{sat}} \quad (8)$$

در این روابط،  $c_f$  ضریب تبخیر یا تقطیر است که به زمان آرامش<sup>۱</sup> جریان وابسته است و بصورت زیر تعیین می‌شود:

$$c_f = \frac{6}{d_b} \beta \sqrt{\frac{M}{2\pi R T_{sat}}} L \left( \frac{\alpha_v \rho_v}{\rho_l - \rho_v} \right) \quad (9)$$

که در آن،  $M$  معرف مقدار شار بر سطح واحد،  $R$  ثابت جهانی گاز،  $T_{sat}$  دمایی تبخیر،  $d_b$  قطر حباب و  $\beta$  یک ضریب ثابت است که نشان می‌دهد چه مقدار از مولکول‌های بخار در سطح مایع جذب می‌شوند. در نهایت، چگالی و لزجت میدان جریان چندفازی بصورت روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$\rho = \alpha_l \rho_l + \alpha_v \rho_v + \alpha_g \rho_g \quad (10)$$

$$\mu = \alpha_l \mu_l + \alpha_v \mu_v + \alpha_g \mu_g \quad (11)$$

### ۳- نتایج و بحث

در این بخش، روش حل عددی مورد نظر برای شبیه‌سازی دینامیک شکسته شدن یک قطره در مسیر جریان گاز سرد و گاز داغ مورد استفاده قرار گرفته است.

#### ۳-۱- اعتبارسنجی روش حل عددی

جهت اعتبارسنجی روش حل مورد نظر، ابتدا نتایج حاصل از حل عددی حاضر با نتایج تحلیلی مسئله یک‌بعدی استفان [۲۲] مقایسه و ارزیابی شده است. در این مسئله، تبخیر و انتقال فاز بین مایع و بخار آن برای طرحواره نشان داده شده در شکل ۱ حل می‌شود که در آن یک دیوار با دمایی بالای دمایی تبخیر مایع قرار دارد. بنابراین، در نزدیکی مرز دیواره بخار تشکیل شده و با گذر زمان، فصل مشترک بین فاز بخار و مایع به سمت راست پیشروی می‌کند. محل دقیق فصل مشترک بر اساس زمان  $\delta(t)$  از رابطه تحلیلی زیر قابل پیش‌بینی است [۲۴]:

$$\delta(t) = 2\varepsilon \sqrt{\frac{\lambda_v t}{\rho_v c_{p,v}}} \quad (12)$$

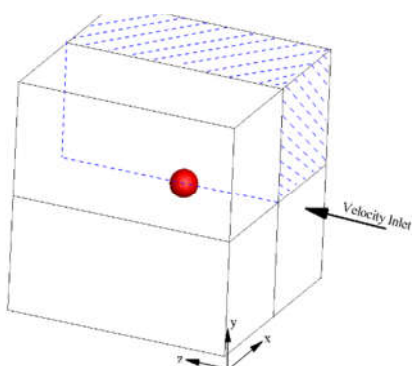
که در آن،  $\varepsilon$  از حل عددی رابطه زیر بدست آمده است:

<sup>۱</sup> Relaxation Time

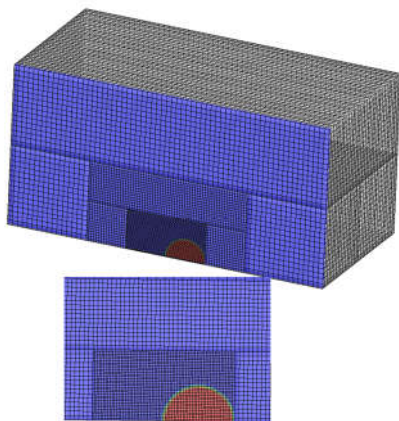
### ۲-۳- مشخصات هندسی و پارامترهای فیزیکی برای

#### مطالعه دینامیک شکسته شدن قطره

در مطالعه حاضر، شبیه‌سازی دینامیک قطره در یک میدان سه-بعدی مکعبی مد نظر است (مطابق شکل ۵) که جهت کاهش هزینه محاسباتی، یک قطاع از میدان حل با در نظر گرفتن شرط مرزی تقارن شبیه‌سازی شده است (قطاع هاشور خورده). همانطور که در شکل مشخص است، شرط مرزی سرعت ورودی در ضلع سمت راست مکعب و در راستای محور  $z$  اعمال شده و بقیه مرزهای میدان حل به عنوان شرط مرزی خروجی فشار در نظر گرفته شده‌اند. طول میدان حل ۸ برابر قطر قطره  $8D$  انتخاب شده و موقعیت مرکز قطره از ورودی جریان در فاصله  $3.5D$  قرار دارد. با هدف کاهش تعداد المان‌های شبکه، میدان حل به سه ناحیه بلوکی تقسیم شده و اندازه المان‌های شبکه در نقاط دورتر از قطره بزرگتر انتخاب شده است. شبکه تولید شده برای قطاع مورد نظر از میدان حل و در نقاط نزدیک قطره در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵- هندسه میدان حل برای شبیه‌سازی دینامیک شکسته شدن یک قطره در مسیر جریان گاز

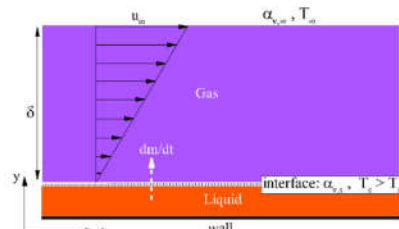


شکل ۶- شبکه بلوکی میدان حل حول قطره و موقعیت آن

در دینامیک یک قطره و شکسته شدن آن، نیروهای اینرسی، لزجت، کشش سطحی و مقدار چگالی فاز مایع و گاز اطراف آن، همچنین مشخصات هندسی قطره موثر هستند. این مشخصات به صورت دو عدد بی بعد و بر  $(We)$  و رینولدز  $(Re)$  قابل بیان هستند:

حجمی بخار در فاصله  $\delta$  از سطح مایع با  $\alpha_{v,\infty}$  نشان داده شده که مقدار آن ۰ است. در محل فصل مشترک، کسر حجمی بخار  $\alpha_{v,s}$  بر اساس حل میدان جریان تعیین می‌شود که با در نظر گرفتن دمای ثابت برای سطح مایع  $T_s = const.$  در این مسئله، ضریب بی بعد انتقال جرم  $B_M$  به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$B_M = \frac{\alpha_{v,s} - \alpha_{v,\infty}}{1 - \alpha_{v,s}} \quad (14)$$



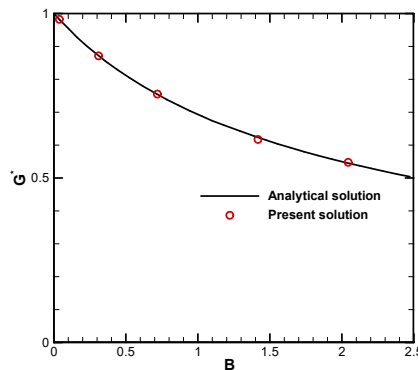
شکل ۲- طرحواره هندسی و متغیرهای فیزیکی جریان کوئت دوفازی

حل تحلیلی این مسئله [۲۵،۲۳] نشان می‌دهد که ضریب بی بعد

انتقال جرم هدایتی  $G^*$  با ضریب  $B_M$  رابطه زیر را دارد:

$$G^* = \frac{\ln(1+B_M)}{B_M} \quad (15)$$

این رابطه تحلیلی برای ارزیابی حل عددی حاضر استفاده شده است. در این راستا، هندسه جریان کوئت دوفازی با در نظر گرفتن لایه آب ساکن در دمای سطح  $T_s = 300 - 350 K$  مورد بررسی قرار گرفته که یک جریان هوا در شرایط استاندارد جوی با توزیع سرعت خطی از  $\delta = 50 cm$  با  $u_\infty = 5 m/s$  از روی آن عبور می‌کند. در دماهای مختلف، مقادیر کسر حجمی بخار حاصل از شبیه‌سازی بعد از رسیدن حل به شرایط پایا در محل فصل مشترک و دور از دیواره اندازه‌گیری شده و مقادیر ضرایب  $B_M$  و  $G^*$  محاسبه شده است. مقایسه نتایج بدست آمده از حل حاضر با نتایج تحلیلی در شکل ۴ آورده شده است. تطابق بسیار خوب این نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم عددی حاضر دقت خوبی برای شبیه‌سازی انتقال جرم بین آب و بخار در حضور یک گاز غیرقابل تقطیر را دارا است.



شکل ۴- نتایج حاصل از حل عددی حاضر برای ضرایب انتقال جرم و داده‌های حل تحلیلی در مسئله جریان کوئت دوفازی

نمای جانبی در ستون سمت چپ ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، برخورد جریان گاز سرد به قطره کروی شکل سبب ایجاد نقطه سکون در لبه جلو قطره شده و به علت ایجاد اختلاف فشار بین بالادست و پایین دست، قطره از حالت کروی به حالت پخ تغییر شکل داده است. با رشد شعاعی شکل قطره با گذر زمان، ضخامت قطره کاهش یافته و نیروی برشی و اینرسی جریان اطراف قطره باعث مسطح شدن و تورفتگی روی سطح قطره می‌شود که در واقع آغاز پدیده شکسته شدن قطره را بدنبال دارد. در مطالعه حاضر برای جریان در حالت ۱، این تغییر شکل در زمان بی بعد  $t^* = 4.38$  اتفاق افتاده و شکسته شدن برشی قطره قابل مشاهده است. در شکستن برشی، فیلمی از مایع به طور پیوسته از سطح قطره جدا شده و به سرعت پس از جدا شدن به قطرات ریزتر تقسیم می‌شوند. این پدیده ناشی از ناپایداری کلین-هلمهولتز است [۲۶]. در شکل ۷، تشکیل قطرات ریز حاصل از شکسته شدن قطره اصلی در زمان  $t^* = 7.71$  مشهود است. لازم به یادآوری است که در حل حاضر، نسبت چگالی بین فاز مایع و گاز پایین است که نشان دهنده چگال بودن فاز گاز است. بنابراین، مقدار عدد وبر جهت شکسته شدن قطره پایین است.

جدول ۱- شرایط مختلف جریان دوفازی برای مطالعه عبور گاز سرد از روی یک قطره در شرایط همدم

پارامتر	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴
عدد رینولدز Re	۵۰	۵۰	۸۰	۲۰
نسبت چگالی $\rho^*$	۴۰	۲۰	۲۰	۸۰
نسبت لزجت $\mu^*$	۰/۵	۰/۵	۵	۲۰

در شکل ۹ تغییرات زمانی دینامیک قطره در مسیر جریان گاز سرد در شرایط جریان حالت ۲ (طبق جدول ۱) نشان داده شده است. در این حالت، نسبت چگالی بین فاز مایع و گاز نصف شده که بر مقدار کشش سطحی بین این دو فاز تاثیر می‌گذارد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، به علت وجود اختلاف فشار بین لبه جلویی قطره با پایین دست آن در کشش سطحی پایین، شکل قطره به حالت تخت در آمده و سپس جریان گاز یک حفره در میانه قطره بوجود می‌آورد. در زمان  $t^* = 5.84$ ، قطره به شکل حلقوی در آمده و جریان گاز از بین آن عبور می‌کند. علت حلقوی شدن شکل قطره اختلاف فشار زیاد بین لبه بالادست و پایین دست آن است که سبب حرکت سریع مرز مشترک قطره به سمت داخل می‌شود. در نتیجه، قطره حالت حلقه به خود می‌گیرد که جریان فاز مایع تشکیل دهنده آن به سمت بیرون در حال چرخش است. این امر سبب بزرگتر شدن حلقه فاز مایع شده و با گذر زمان قطر حلقه کاهش می‌یابد. در نهایت، اثر نیروهای آیرودینامیکی سبب ناپایدار شدن سطح فاز مایع و جدایش قطرات ریز از آن می‌شود که در زمان  $t^* = 11.69$  مشهود است. افزایش سرعت جریان گاز عبوری از میان حلقه در این زمان به خوبی نشان می‌دهد که خطوط جریان در داخل حلقه فاز مایع شکل گرفته و گردابه‌های پشت قطره ضعیف شده‌اند که نتایج آن در شکل ۱۰ ارائه شده است. مقایسه نتایج حاصل از حل عددی حاضر بین شرایط جریان با  $\rho^* = 40$  و

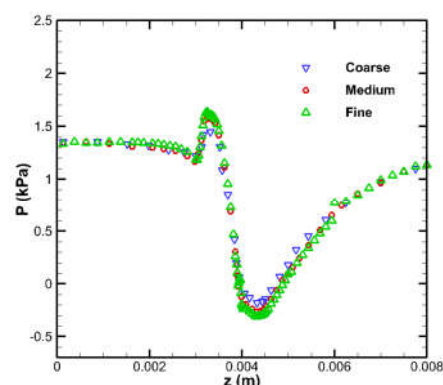
$$We = \frac{\rho U^2 D}{\sigma} \quad (16)$$

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (17)$$

همچنین، نسبت چگالی  $\rho^* = \rho_l / \rho_g$  و نسبت لزجت  $\mu^* = \mu_l / \mu_g$  بین دو فاز جزء اعداد بی بعد موثر در فیزیک جریان دوفازی دینامیک قطره محسوب می‌شوند. در مطالعه حاضر تاثیر این اعداد بی بعد بر ساختار شکسته شدن قطره در مسیر جریان گاز سرد و داغ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حل حاضر، زمان مشخصه جریان بصورت  $t_c = D/U$  تعریف شده و نتایج به دست آمده بر اساس زمان بی بعد ارائه شده‌اند.

### ۳-۳- دینامیک شکسته شدن قطره در جریان گاز سرد

برای مطالعه پارامترها و بررسی حالت‌های مختلف شکسته شدن قطرات که در کاربردهایی مانند اسپری یافت می‌شود، تاثیر تغییر نسبت چگالی و نسبت لزجت در اعداد رینولدز مختلف و در عدد وبر  $We = 20$  مد نظر قرار گرفته است. مقادیر این اعداد در شرایط مختلف جریان در جدول ۱ آورده شده که از این به بعد به عنوان حالت‌های ۱ تا ۴ شناخته می‌شوند. در این حالت، دمای گاز ورودی  $T = 300 K$  در نظر گرفته شده و مقدار اولیه دما برای فاز مایع داخل قطره برابر  $T = 300 K$  است. برای اطمینان از استقلال نتایج حل عددی از اندازه شبکه، جریان حول قطره برای حالت ۱ در سه شبکه بلوکی مختلف با حدود ۴۰۰ هزار المان (coarse)، ۶۰۰ هزار المان (medium) و ۸۰۰ هزار المان (fine) شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از آن برای توزیع فشار بر روی خط مرکزی میدان حل در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، تغییرات مقدار فشار از شبکه medium به شبکه fine محسوس نیست. با این حال، در حل حاضر همواره از شبکه با ۸۰۰ هزار المان برای مطالعه دینامیک قطره استفاده شده است.

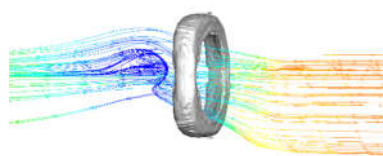


شکل ۷- استقلال حل از اندازه شبکه برای جریان گاز سرد حول

قطره در شرایط جریان  $Re = 50$  و  $\rho^* = 20$ ،  $\mu^* = 0.5$

نتایج به دست آمده از حل حاضر برای حالت ۱ از عبور جریان گاز سرد از روی یک قطره و دینامیک آن در شکل ۸ آورده شده است. در این شکل، تغییرات زمانی شکل قطره از نمای مایل در ستون سمت راست نشان داده شده و خطوط هم‌تراز سرعت میدان به همراه شکل قطره از

شده‌اند. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، با وجود افزایش سرعت جریان (عدد رینولدز بالا)، افزایش لزجت فاز مایع سبب پایدارتر شدن دینامیک سطح مشترک شده و پخش شونده‌گی فاز مایع کاهش یافته است. در این حالت، نیروی اینرسی در زمان  $t^* = 2.33$  سبب می‌شود که قطره به شکل پخ در بیاید، اما لزجت بالای قطره در این زمان مانع از هم گسیختگی در وسط قطره می‌شود. از طرفی، افزایش سرعت جریان سبب تغییر شکل لبه‌های نازک قطره شده (زمان بی‌بعد  $t^* = 3.50$ ) و با گذر زمان این لبه‌ها نازک‌تر می‌شوند. این حالت از کیسه‌ای شدن قطره در این شرایط جریان با نتایج ارائه شده در مرجع [۱۳] مطابقت دارد.

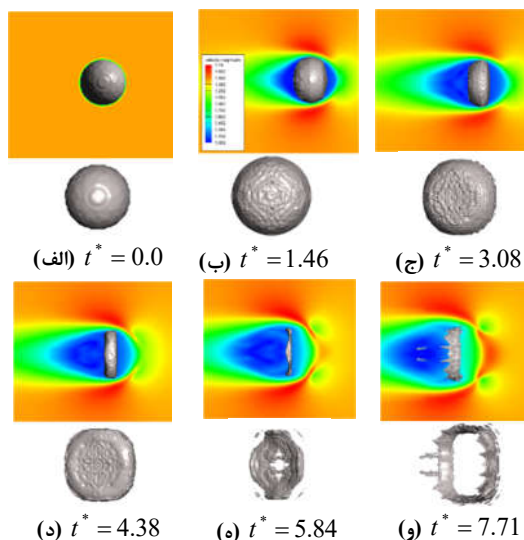


شکل ۱۰- خطوط جریان داخل حلقه قطره در مسیر جریان گاز سرد با  $\rho^* = 20$  و  $\text{Re} = 50$  در زمان بی‌بعد  $t^* = 5.84$

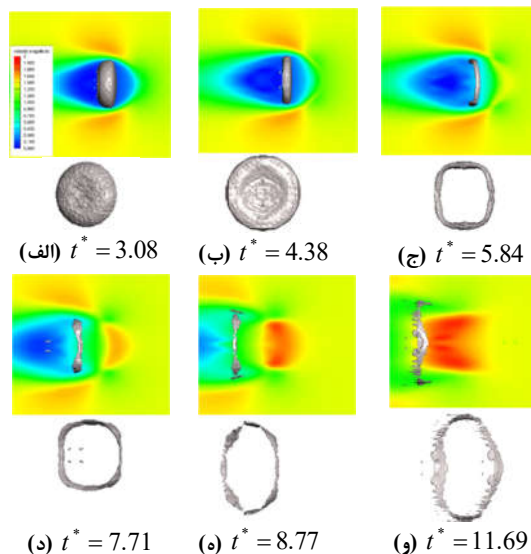
همانطور که از شکل مربوط به میدان سرعت قطره مشخص است، پس از این حالت، میزان حداکثر سرعت که در لبه‌های قطره ایجاد شده است، باعث می‌شود نیروی برشی بر نیروی کشش سطحی قطره غلبه کند و قطره از لبه‌ها دچار شکسته‌شدن برشی شود که با ناپایداری‌های کلوین-هلمهولتز مرتبط است. با کاهش ضخامت میانی قطره، در نهایت اختلاف فشار سبب گسیخته شدن قطره در زمان  $t^* = 5.84$  شده و پدیده شکسته‌شدن قطره اصلی و تشکیل قطرات ریزتر کامل می‌شود. نتایج حل حاضر برای حالت ۳ نشان می‌دهد که فرآیند شکسته‌شدن قطره در هر دو صورت کیسه‌ای و برشی قابل مشاهده است.

در شکل ۱۲ تاثیر افزایش هم‌زمان نسبت چگالی به  $\rho^* = 80$  و نسبت لزجت به  $\mu^* = 20$  بر دینامیک شکسته‌شدن قطره در مسیر جریان گاز بررسی شده‌است. در این حالت، غالب بودن نیروهای بین مولکولی نسبت به نیروهای آیرودینامیکی سبب شده که تغییر شکل قطره در مسیر جریان در مقایسه با حالت‌های ۱ تا ۳ کندتر شده‌است. در این حالت، علاوه بر اینکه قطره با گذر زمان از حالت کروی خارج می‌شود، ناپایداری‌های ریلی-تیلور در فصل مشترک ظاهر می‌شوند (زمان بی‌بعد  $t^* = 4.00$ ). نفوذ این ناپایداری‌ها به میانه قطره در کنار کم شدن ضخامت آن سبب می‌شود که به یکباره قطره از هم بپاشد. این فرآیند در زمان بین  $t^* = 5.71$  و  $t^* = 8.00$  اتفاق افتاده‌است. مقایسه دینامیک قطره در حالت ۴ با حالت‌های ۱ تا ۳ نشان می‌دهد که با افزایش نسبت چگالی و نسبت لزجت بین دو فاز مایع و گاز، با وجود پایین بودن عدد رینولدز، فرآیند شکسته‌شدن قطره به نوعی آشوبناک است. این نوع شکسته شدن در کنار کاهش توان مورد نیاز برای پاشش گاز که سرعت پایینی دارد، سبب تولید اسپری با کیفیت می‌شود که یکی از اهداف صنایع مرتبط است.

$\rho^* = 20$  نشان می‌دهد که پدیده شکسته‌شدن قطره در مسیر گاز با چگالی بالا دینامیک پیچیده‌ای دارد و منجر به تشکیل قطرات ریزتر می‌شود. علت این امر را می‌توان در غالب بودن اثر نیروهای آیرودینامیکی حاصل از گاز با چگالی بالا بر روی فصل مشترک بین دو فاز دانست.



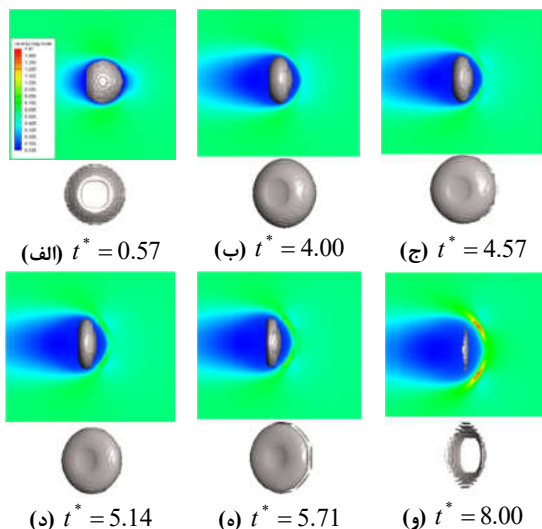
شکل ۸- تغییرات شکل و شکسته‌شدن قطره از نمای مایل (سمت راست) و میدان سرعت اطراف قطره از نمای جانبی (سمت چپ) با عبور جریان گاز سرد در حالت ۱ با  $\rho^* = 40$ ،  $\mu^* = 0.5$  و  $\text{Re} = 50$



شکل ۹- تغییرات شکل و شکسته‌شدن قطره از نمای مایل (سمت راست) و میدان سرعت اطراف قطره از نمای جانبی (سمت چپ) با عبور جریان گاز سرد در حالت ۲ با  $\rho^* = 20$ ،  $\mu^* = 0.5$  و  $\text{Re} = 50$

در مطالعه حالت ۳ از عبور جریان گاز سرد بر روی یک قطره، عدد رینولدز به مقدار  $\text{Re} = 80$  و نسبت لزجت به  $\mu^* = 5$  افزایش یافته‌است. نتایج به‌دست‌آمده برای این حالت در شکل ۱۱ نشان داده-

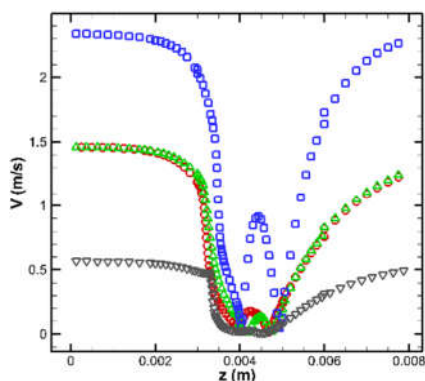
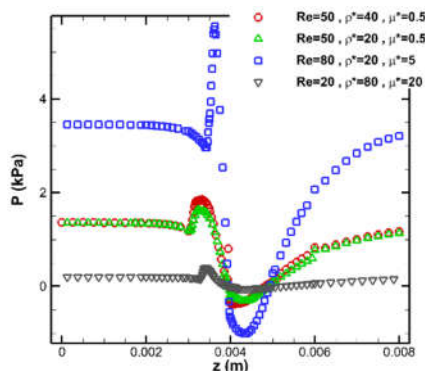




شکل ۱۲- تغییرات شکل و شکسته شدن قطره از نمای مایل (سمت راست) و میدان سرعت اطراف قطره از نمای جانبی (سمت چپ) با عبور جریان گاز سرد در حالت ۴ با  $\mu^* = 20$ ،  $\rho^* = 80$  و  $Re = 20$

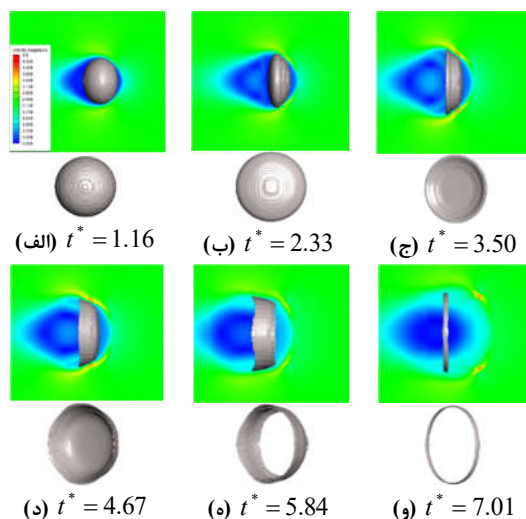
جهت ارائه یک الگو برای زمان وقوع پدیده شکسته شدن قطره در مسیر یک جریان گاز سرد بر اساس نسبت چگالی و نسبت لزجت، از تعریف یک پارامتر بی بعد مانند  $A$  استفاده شده است:

$$A = \frac{\mu_l}{\mu_g} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (18)$$



شکل ۱۳- پروفیل فشار (بالا) و سرعت (پایین) برای میدان جریان گاز سرد حول قطره در لحظه وقوع شکسته شدن برای ۴ حالت مختلف

پروفیل سرعت و فشار در طول خط مرکزی میدان در جهت محور  $z$  برای ۴ شرایط جریان مورد مطالعه، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در همه حالتها، مقدار سرعت از لحظه ورود جریان به داخل میدان حل تا زمانی که به قطره برسد، روند کاهشی دارد. به دلیل سکون جریان در لبه جلویی قطره، مقدار فشار در آن نقطه افزایش یافته است. در پشت قطره به دلیل وجود گرادیان فشار معکوس و ایجاد گردابه، نوسان سرعت در جریان قابل مشاهده است که در نهایت، مقدار سرعت در پایین دست جریان به سرعت ورودی میل می کند. این نتایج نشان می دهد که در یک عدد رینولدز مشخص ( $Re = 50$ ) و با نسبت لزجت ثابت ( $\mu^* = 0.5$ )، تغییر نسبت چگالی از  $\rho^* = 20$  به  $\rho^* = 40$  تاثیر محسوسی در مشخصات میدان جریان ندارد. اما با ثابت نگه داشتن مقدار نسبت چگالی در  $\rho^* = 20$ ، افزایش نسبت لزجت از  $\mu^* = 0.5$  به  $\mu^* = 50$ ، سبب افزایش سرعت و فشار جریان در اطراف قطره می شود که تاثیر آن بر دینامیک شکسته شدن قطره محسوس بود.



شکل ۱۱- تغییرات شکل و شکسته شدن قطره از نمای مایل (سمت راست) و میدان سرعت اطراف قطره از نمای جانبی (سمت چپ) با عبور جریان گاز سرد در حالت ۳ با  $\mu^* = 5$ ،  $\rho^* = 20$  و  $Re = 80$

در جدول ۲، نتایج به‌دست‌آمده از حل حاضر برای زمان شروع شکسته‌شدن قطره  $t_b^*$  برای حالت‌های مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده‌است. همانطور که در این جدول دیده می‌شود، با افزایش پارامتر  $A$  به حدود  $A=1$ ، زمان شکسته‌شدن قطره کاهش یافته، اما با افزایش دوباره آن به حدود  $A=2.2$ ، این زمان افزایش یافته است. این الگو نشان می‌دهد که کاهش نسبت لزجت به همراه کاهش نسبت چگالی تاثیر مشابهی با افزایش نسبت لزجت به همراه کاهش نسبت چگالی دارد. از دیدگاه فیزیکی، این رفتار نشان می‌دهد که شکسته‌شدن قطرات در مسیر جریان فاز دوم با نسبت لزجت و نسبت چگالی‌های نزدیک به هم سریع‌تر اتفاق می‌افتد.

جدول ۲- زمان شکسته‌شدن قطره  $t_b^*$  در مسیر جریان گاز سرد

براساس پارامتر $A$ برای چهار شرایط مطالعه شده				
$A$	۰/۰۸	۰/۱۱	۱/۱۲	۲/۲۴
$t_b^*$	۴/۳۸	۴/۳۸	۳/۴۹	۴/۵۶

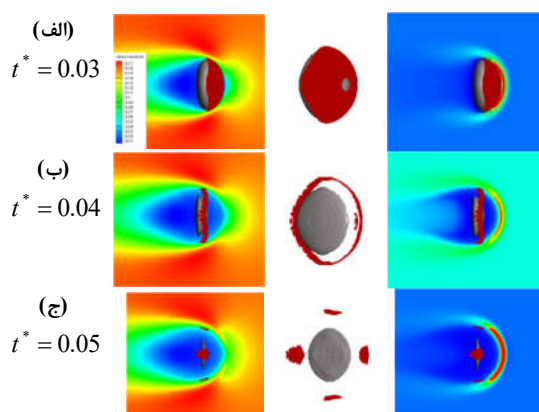
### ۳-۴- دینامیک شکسته‌شدن قطره در جریان گاز داغ

جهت مطالعه دینامیک شکسته‌شدن قطره در مسیر جریان گاز داغ، میدان حل نشان داده شده در شکل ۶ مورد استفاده قرار گرفته و معادله انرژی به دستگاه معادلات حاکم اضافه شده‌است. در این حالت، دمای گاز ورودی  $T=800K$  در نظر گرفته شده و مقدار اولیه دما برای فاز مایع داخل قطره برابر  $T=300K$  است. در مقاله حاضر، ابتدا نتایج حاصل از برخورد گاز داغ به قطره با  $We=20$ ،  $Re=20$ ،  $\rho^*=80$  و  $\mu^*=20$  در شکل ۱۴ ارائه شده‌است. در این شکل، فاز بخار حاصل از تبخیر سطح قطره در تماس با گاز داغ با رنگ سرخ مشخص است. میدان دمای حول قطره در ستون سمت راست شکل، دینامیک شکل قطره در ستون میانی و میدان سرعت حول قطره در ستون چپ شکل نمایش داده شده‌است. در ابتدای حل و در زمان بی‌بعد  $t^*=0.03$ ، که سطح تماس قطره با جریان عبوری بیشتر است، میزان تبخیر نیز زیاد بوده و با کاهش قطر قطره گذر زمان، ناحیه بخار اطراف آن نیز کاهش می‌یابد. در لبه جلویی قطره که گاز داغ تقریباً به حالت سکون می‌رسد، دمای کل افزایش یافته و در لبه‌های قطره با افزایش سرعت جریان کاهش یافته‌است که در میدان دمای اطراف قطره در شکل ۱۴ کاملاً مشهود است. برخورد جریان گاز داغ به قطره سبب تغییر شکل آن و کاهش ضخامت فاز مایع در لبه‌های اطراف قطره می‌شود. سرعت بالای جریان و نازک شدن فاز مایع در این نواحی سبب می‌شود که نرخ تبخیر قطره در اطراف آن بیشتر شود که این امر در  $t^*=0.04$  کاملاً مشهود است. با کاهش اندازه قطره در زمان  $t^*=0.05$ ، نرخ تبخیر نیز کاهش یافته و فاز بخار فقط در لبه‌های اطراف قطره در میدان حل مشاهده می‌شود.

مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از حل حاضر برای دو حالت گاز سرد و گاز داغ در شرایط جریان  $We=20$ ،  $Re=20$ ،  $\rho^*=80$  و  $\mu^*=20$  که به ترتیب در شکل ۱۲ و شکل ۱۴ ارائه شده‌اند، نشان می‌دهد که دینامیک شکسته‌شدن قطره در شرایط عبور گاز داغ متفاوت از دینامیک شکسته‌شدن آن در مسیر جریان گاز سرد است.

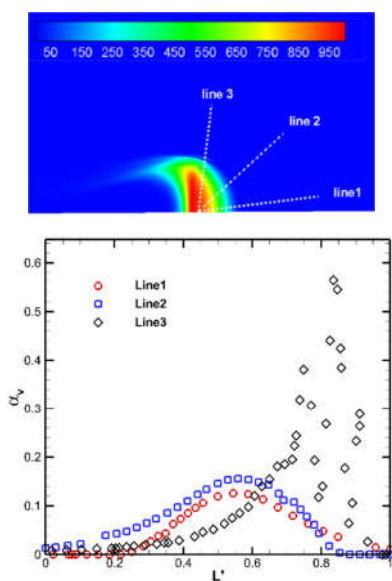
همانطور که در شکل ۱۲ نیز مشخص بود، ناپایداری‌های ریلی-تیلور در کنار نیروهای آیرودینامیکی پدیده غالب در دینامیک قطره در مسیر گاز سرد هستند که سبب تغییر شکل آن و در نهایت شکسته‌شدن قطره می‌شوند. اما با عبور جریان گاز داغ، پدیده تبخیر اهمیت زیادی پیدا می‌کند و روند تغییر شکل قطره از این پدیده تاثیر می‌پذیرد. علت این امر را می‌توان در سرعت وقوع فرآیند تبخیر در مقایسه با تاثیر نیروهای آیرودینامیکی و ناپایداری‌ها بر سطح قطره عنوان کرد. همانطور که نتایج حل حاضر در شکل‌های ۱۲ و ۱۴ نشان می‌دهند، پدیده تبخیر قطره در مسیر جریان گاز داغ فقط در حدود زمان بی‌بعد  $t^* \approx 0.05$  اتفاق افتاده‌است. اما دینامیک قطره در مسیر جریان گاز سرد بر اثر نیروهای آیرودینامیکی و ناپایداری‌ها خیلی کندتر و در حدود زمان بی‌بعد  $t^* \approx 8.00$  منجر به شکسته‌شدن آن شده‌است.

جهت مطالعه تغییرات دینامیک قطره در مسیر جریان گاز داغ با تغییر پارامترهای فیزیکی میدان حل، فرآیند تبخیر حاصل از حل عددی حاضر در شرایط جریان  $\mu^*=5$ ،  $\rho^*=20$ ،  $We=20$  و  $Re=80$  در شکل ۱۵ نمایش داده شده‌است. نتایج به‌دست‌آمده و مقایسه آنها نشان می‌دهد که افزایش عدد رینولدز جریان از  $Re=20$  در شکل ۱۴ به  $Re=80$  در شکل ۱۵ سبب شده که اولاً تغییر شکل قطره بسیار سریع‌تر اتفاق بیافتد (در حدود زمان بی‌بعد  $t^* \approx 0.005$ )، بطوری‌که قبل از شروع فرآیند تبخیر، قطره به شکل مسطح درآمد‌است. دوم اینکه، به دلیل سرعت بالای جریان در برخورد با قطره، یک ناحیه سکون در لبه جلویی قطره ایجاد شده که گاز داخل آن در تماس با قطره سردتر شده‌است. گازهای سردشده در ناحیه سکون در لبه جلویی قطره مانع از برخورد گازهای داغ جریان بالادست به سطح قطره می‌شود. این امر در نتایج به‌دست‌آمده برای میدان دما در  $t^*=0.004$  و  $t^*=0.005$  کاملاً مشهود است. بنابراین، تبخیر قطره در این شرایط جریان از سطح جلویی آن شروع نمی‌شود، بلکه عبور جریان گاز داغ از لبه‌های نازک‌شده اطراف قطره مسطح فرآیند تبخیر را رقم می‌زند.



شکل ۱۴- دینامیک قطره در مسیر گاز داغ، شکل قطره و ناحیه بخار از نمای مایل (وسط)، میدان دما (راست) و میدان سرعت (سمت چپ) در  $Re=20$  و  $We=20$ ،  $\rho^*=80$ ،  $\mu^*=20$





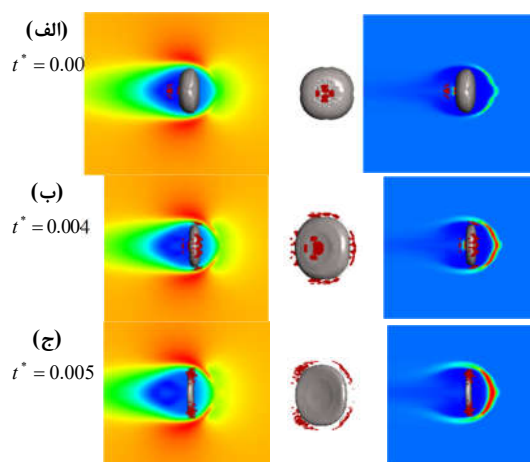
شکل ۱۶- خطوط هم‌تراز چگالی برای قطره در مسیر جریان گاز داغ در  $t^* = 0.04$  (بالا) و پروفیل‌های کسر حجمی بخار بر روی سه خط مشخص شده (پایین) با  $\mu^* = 20$ ،  $\rho^* = 80$ ،  $We = 20$  و  $Re = 20$

#### ۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، با مقایسه نتایج حل عددی حاضر با داده‌های حاصل از حل تحلیلی مسئله انتقال حرارت استفان، از دقت و صحت الگوریتم عددی اطمینان حاصل شد. سپس، دینامیک شکسته‌شدن قطره در مسیر جریان گاز سرد و داغ در شرایط مختلف جریان انجام شده و تاثیر پارامترهای فیزیکی بر ساختار و الگوی جریان دوفازی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که به‌دلیل غالب بودن اثر نیروهای آیرودینامیکی حاصل از گاز با چگالی بالا، پدیده شکسته‌شدن قطره در مسیر گاز سرد منجر به تشکیل قطرات ریزتر می‌شود. در شکسته‌شدن قطره در مسیر جریان گاز سرد، نیروهای آیرودینامیکی و ناپایداری‌های کلوین-هلمهولتز و ریلی-تیلور نقش موثری دارند. اما در دینامیک قطره در مسیر جریان گاز داغ، فرآیند تبخیر نقش موثرتری بر دینامیک قطره و نحوه شکسته‌شدن آن دارد. بطوری‌که قبل از تاثیر نیروهای آیرودینامیکی و ناپایداری‌ها، فرآیند تبخیر شروع شده و تغییر شکل قطره را رقم می‌زند.

#### ۵- مراجع

- [1] Lefebvre A. H., McDonell V. G., *Atomization and sprays*, CRC Press, 2017.
- [2] Dai Z. and Faeth G. M., Temporal properties of secondary drop breakup in the multimode breakup regime, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 27, No. 2, pp. 217-236, 2001.
- [3] Hsiang L. P. and Faeth G. M., Near-limit drop deformation and secondary breakup, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 18, no. 5, pp. 635-652, 1992.
- [4] 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



شکل ۱۵- دینامیک قطره در مسیر گاز داغ، شکل قطره و ناحیه بخار از نمای مایل (وسط)، میدان دما (راست) و میدان سرعت (سمت چپ) در  $\mu^* = 5$ ،  $\rho^* = 20$ ،  $We = 20$  و  $Re = 80$

برای مطالعه فرآیند تبخیر قطره در مسیر جریان گاز داغ، میدان چگالی اطراف قطره در مسیر جریان گاز داغ و پروفیل‌های کسر حجمی بخار در اطراف قطره بر روی خطوط مشخص شده در شکل ۱۶ استخراج و مورد بررسی قرار گرفته‌است. برای این مطالعه، دینامیک قطره در شرایط ارائه شده در شکل ۱۴ و در زمان بی‌بعد  $t^* = 0.04$  انتخاب شده‌است. مقایسه این نتایج موید این مطلب است که به‌دلیل وجود ناحیه سکون جریان در راستای افقی و ممانعت از برخورد جریان گاز داغ به لبه جلویی قطره، کسر حجمی بخار در راستای خط ۱ کمتر از خطوط ۲ و ۳ است. به همین ترتیب، کسر حجمی بخار در راستای خط ۳ به دلیل افزایش تماس گاز داغ با سطح قطره در لبه‌های نازک‌شده اطراف آن بیشتر است. این نتایج نشان می‌دهند که فرآیند تبخیر قطره در مسیر جریان گاز داغ از لبه‌های اطراف آن شروع می‌شود و به سمت مرکز قطره ادامه می‌یابد. همچنین، دینامیک قطره در مسیر جریان گاز داغ و تغییر شکل آن، بیشتر از نیروهای آیرودینامیکی، وابسته به فرآیند تبخیر است.

- [24] Alexiades V., *Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes*, Hemisphere, Washington, DC: CRC Press, 1993.
- [25] Schlottke J. and Weigand B., Direct numerical simulation of evaporating droplets, *Journal of Computational Physics*, Vol. 227, No. 10, pp. 5215-5237, 2008.
- [26] Zhao H. et al., Transition Weber number between surfactant-laden drop bag breakup and shear breakup of secondary atomization, *Fuel*, Vol. 221, pp. 138-143, 2018.
- [5] Hsiang L. P. and Faeth G. M., Drop deformation and breakup due to shock wave and steady disturbances, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 21, No. 4, pp. 545-560, 1995.
- [6] Cao X. K. et al., A new breakup regime of liquid drops identified in a continuous and uniform air jet flow, *Physics of Fluids*, Vol. 19, No. 5, pp. 057103, 2007.
- [7] Guildenbecher D. R., López-Rivera C., and Sojka P. E., Secondary atomization, *Experiments in Fluids*, Vol. 46, No. 3, pp. 371-402, 2009.
- [8] Quan S. and Schmidt D. P., Direct numerical study of a liquid droplet impulsively accelerated by gaseous flow, *Physics of Fluids*, Vol. 18, No. 10, pp. 102103, 2006.
- [9] Battistoni M. and Grimaldi C. N., Numerical analysis of injector flow and spray characteristics from diesel injectors using fossil and biodiesel fuels, *Applied Energy*, Vol. 20, pp. 656-666, 2012.
- [10] Yang W., et al., Transitions of deformation to bag breakup and bag to bag-stamen breakup for droplets subjected to a continuous gas flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 111, pp. 884-894, 2017.
- [11] Loth E., Quasi-steady shape and drag of deformable bubbles and drops, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 34, No. 6, pp. 523-546, 2008.
- [12] Helenbrook B. T. and Edwards C. F., Quasi-steady deformation and drag of uncontaminated liquid drops, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 28, No. 10, pp. 1631-1657, 2002.
- [13] Kékesi T., Amberg G., and Wittberg L. P., Drop deformation and breakup in flows with shear, *Chemical Engineering Science*, Vol. 140, pp. 319-329, 2016.
- [14] Kékesi T., Amberg G. and Prah Wittberg L. , Drop deformation and breakup, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 66, pp. 1-10, 2014
- [15] Janssen P. J. A. and Anderson P. D. , Boundary-integral method for drop deformation between parallel plates, *Physics of Fluids*, vol. 19, no. 4, p. 043602, 2007.
- [16] Guido S., Shear-induced droplet deformation: Effects of confined geometry and viscoelasticity, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, vol. 16, no. 1, pp. 61-70, 2011.
- [17] Fakhari A. and Rahimian M. H., Simulation of falling droplet by the lattice Boltzmann method, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 14, no. 7, pp. 3046-3055, 2009.
- [18] Komrakova A. E., Shardt O. , Eskin D. and Derksen J. J., Lattice Boltzmann simulations of drop deformation and breakup in shear flow, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 59, pp. 24-43, 2014.
- [19] Komrakova A. E., Shardt O., Eskin D. and Derksen J. J., Effects of dispersed phase viscosity on drop deformation and breakup in inertial shear flow, *Chemical Engineering Science*, vol. 126, pp. 150-159, 2015.
- [20] ANSYS Fluent Theory Guide, ANSYS, Inc, 2015.
- [21] Lee W. H. , A Pressure Iteration Scheme for Two-Phase Flow Modeling, *Multiphase Transport Fundamentals, Reactor Safety, Applications*, Hemisphere, Washington, DC., pp. 61-82, 1980.
- [22] Son G. and Dhir V. K., Numerical Simulation of Film Boiling Near Critical Pressures with a Level Set Method, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 120, No. 1, pp. 183, 1998.
- [23] Kays W. M., Crawford M. E., *Convective Heat and Mass Transfer*, Third Edition: McGraw-Hill, Inc, 1993.