



# تأثیر سرعت اولیه برخورد بر دینامیک، نرخ انجماد و شکل اسپلت قطره توخالی، در شرایط پلاسمای حرارتی

هادی صفایی<sup>1</sup>، محسن دوازده امامی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

\* اصفهان، صندوق پستی 84156-83111، mohsen@cc.iut.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 08 آبان 1395

پذیرش: 01 بهمن 1395

ارائه در سایت: 25 بهمن 1395

کلید واژگان:

ذرات تو خالی

مدل کسر حجمی سیال

جریان تراکم پذیر

انجماد

نرم افزار این فوم

## چکیده

در تحقیق حاضر برخورد یک قطره توخالی به سطح و انجماد آن، در شرایط پاشش حرارتی و در سرعت‌های اولیه مختلف، به صورت عددی شبیه سازی شده است. در این شبیه سازی، سرعت برخورد قطره به سطح در محدوده 50 m/s – 300 m/s قرار دارد. در ابتدا مدول الاستیسیته حجمی برای سیال مخلوط محاسبه شده و با استفاده از آن نشان داده شده است که به قطره توخالی، بسیار تراکم پذیرتر از یک قطره فشرده است. برای ردیابی سطح مشترک دوفاز، از شکل تراکم پذیر مدل کسر حجمی سیال استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان می دهد در حین تغییر شکل قطره، چگالی گاز محبوس به  $289 \text{ kg/m}^3$  می رسد که این امر نیز اهمیت تراکم پذیری گاز محبوس را نشان می دهد. در اندک لحظاتی پس از برخورد قطره به سطح، یک موج فشاری در هوا ایجاد می شود. این موج، مقدار گردابی را در اطراف مرز مشترک دو سیال زیاد می کند. این امر تأثیر زیادی بر شکل اسپلت حاصل دارد. همچنین مشاهده می گردد که شکل اسپلت ها در محدوده سرعتی 50 m/s – 300 m/s کاملاً متفاوت با یکدیگر است. به طوری که در سرعت های بالاتر برخورد اسپلت حاصل، دارای تخلخل بیشتری است و قطره سریع تر منجمد می شود.

## Effect of initial impact velocity on dynamics, solidification rate and shape of formed splats of hollow droplets in thermal plasma condition

Hadi Safaei, Mohsen Davazdah Emami\*

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

\* P.O.B. 84156-83111, Isfahan, Iran, mohsen@cc.iut.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 28 November 2016  
Accepted 20 January 2017  
Available Online 13 February 2017

**Keywords:**  
Hollow sphere particle  
VOF model  
Compressible flow  
Solidification  
OpenFOAM

## ABSTRACT

In this research, impact of a hollow droplet on a surface and its solidification in thermal plasma condition is simulated numerically. In this simulation, impact velocity of the droplet on the surface is in the range of 50 m/s-300 m/s. At first, bulk modulus of elasticity of a two phase mixture, is calculated. Using that, it is shown that a hollow droplet is more compressible than a dense droplet. For tracking interface of two fluids, volume of fluid model for compressible flow is used. The results of the research show that during droplet deformation, the density of the trapped gas reaches  $289 \text{ kgm}^{-3}$ . This fact reveals the importance of the trapped gas compressibility. In plasma thermal spraying, impact velocities of particles to the surface is in the range of 50 m/s-300 m/s, therefore, changes in pressure and volume of the trapped gas are important. A few moments after the impact of droplet on the surface, a pressure wave is formed in the air. This wave increases the vorticity in vicinity of interface of two fluids, which has a great effect on shaping the formed splats. Simulations showed that the shape of formed splats varies with velocities in the range of 50 m/s-300 m/s. In higher velocities, the surface of the formed splat is more porous.

## 1- مقدمه

روی سطح زمینه<sup>4</sup> لایه ای به وجود می آید که هدف از آن مقاومت در برابر خوردگی، فرسایش، اکسیداسیون و انتقال حرارت است. هنگامی که هدف از پوشش، مقاومت در برابر حرارت باشد، از مواد با ضریب انتقال حرارت هدایتی پایین استفاده می گردد. برای مثال در پوشش حامل های حرارتی<sup>5</sup>، از زیرکونیم به عنوان ماده پوشش بهره گرفته می شود. به علت پایین بودن ضریب انتقال حرارتی زیرکونیم، احتمال ذوب کامل آن،

برخورد قطره به سطح، پهن شدن و انجماد آن ها کاربردهای مختلفی در علوم مهندسی دارد که از جمله می توان به فرایند پوشش دهی پاشش حرارتی، ساخت توسط رسوب و شکل دادن<sup>1</sup>، جت فلز مایع<sup>2</sup> و میکروساخت های دیجیتالی<sup>3</sup> اشاره کرد. در پوشش دهی توسط پلازما، ذرات پودر تغذیه با عبور از پلازما ذوب شده و با سرعت به سطح زمینه برخورد می کنند. در نهایت

<sup>4</sup> substrate

<sup>5</sup> Thermal barrier coating

<sup>1</sup> Shape Deposition Manufacturing

<sup>2</sup> Liquid Metal Jetting

<sup>3</sup> Digital Microfabrication

## Please cite this article using:

H. Safaei, M. Davazdah Emami, Effect of initial impact velocity on dynamics, solidification rate and shape of formed splats of hollow droplets in thermal plasma condition, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 295-305, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

نشده است. سرعت برخورد قطره به سطح، در شرایط پاشش حرارتی در محدوده  $300 \text{ m/s} - 50 \text{ m/s}$  قرار دارد. از این رو در تحقیق حاضر، برخورد قطره توخالی به سطح، با سرعت‌های اولیه متفاوت بررسی شده و تأثیر پارامتر سرعت بر شکل اسپلت و نرخ انجماد قطره بررسی خواهد شد. برای نیل به این هدف، لازم است از معادلات مناسب که بتوانند فیزیک مساله را به خوبی مدل کنند، بهره گرفت.

در برخورد قطره توخالی به سطح، هوای داخل قطره متراکم می‌شود که این تراکم، با تغییر حجم و چگالی هوا نیز همراه است. در صورتی که سرعت برخورد زیاد باشد، این تغییرات قابل ملاحظه است. همچنین در این تحقیق نشان می‌دهیم، هوای اطراف قطره بر دینامیک برخورد تأثیر زیادی دارد. در مدل‌های عددی به کار رفته تاکنون، هر دو سیال (گاز و مایع) تراکم‌ناپذیر فرض شده‌اند. از این رو در این جا با استفاده از مدل عددی بر مبنای کسر حجمی سیال<sup>۲</sup> برای جریان‌های تراکم‌پذیر، برخورد قطره توخالی به سطح شبیه‌سازی می‌شود. در این مدل معادلات مومنتوم، کسر حجمی و فشار حل شده، و با استفاده از معادله حالت، چگالی هر فاز به دست می‌آید. همچنین با اضافه کردن معادله انرژی و ترم‌های چشمه مرتبط با انجماد، دینامیک برخورد، انتقال حرارت و انجماد قطره شبیه‌سازی خواهد شد.

## 2- تأثیر تراکم‌پذیری گاز

به عنوان معیاری از میزان اهمیت تراکم‌پذیری گاز محبوس می‌توان تغییرات چگالی هوا نسبت به فشار را محاسبه کرد؛ این تغییرات در ادامه آورده خواهد شد. مدول الاستیسیته حجمی سیال نیز، معیار دیگری از میزان تراکم‌پذیری سیال است. این پارامتر در یک جریان دوفازی با استفاده از مدل همگن به صورت  $E_{\text{mix}} = 1/(\alpha/E_d + (1-\alpha)/E_g)$  محاسبه می‌شود، که  $\alpha$  کسر حجمی مایع درون قطره،  $E_g$  مدول الاستیسیته هوا،  $E_d$  مدول الاستیسیته قطره و  $E_{\text{mix}}$  مدول الاستیسیته مخلوط است. برای رسیدن به این رابطه، ابتدا مدول الاستیسیته برای هر یک از فازها به صورت زیر در نظر می‌گیریم [9]:

$$E_d = \frac{-dP}{\left(\frac{dV_d}{V_d}\right)} \quad (1)$$

$$E_g = \frac{-dP}{\left(\frac{dV_g}{V_g}\right)} \quad (2)$$

سپس مدول الاستیسیته برای سیال مخلوط را بصورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$E_{\text{mix}} = \frac{-dP}{\left(\frac{dV}{V}\right)} \quad (3)$$

که  $V = V_g + V_d$  و بنابراین:  $dV = dV_g + dV_d$  با جایگزین کردن  $dV_g$  و  $dV_d$  از روابط (1) و (2) داریم:

$$\begin{aligned} dV &= dV_g + dV_d = -\left(\frac{V_d dP}{E_d} + \frac{V_g dP}{E_g}\right) \\ &= -\left(\frac{V_d}{E_d} + \frac{V_g}{E_g}\right) dP \end{aligned} \quad (4)$$

در نهایت با کمک رابطه (3) و (4)، رابطه (5) حاصل می‌گردد.

$$E_{\text{mix}} = \frac{-dP}{\frac{-(V_d + V_g) dP}{V_d + V_g}} = \frac{1}{\frac{V_d}{V_d + V_g} \frac{1}{E_d} + \frac{V_g}{V_d + V_g} \frac{1}{E_g}} = \frac{1}{\frac{\alpha}{E_d} + \frac{1-\alpha}{E_g}} \quad (5)$$

نمودار "شکل 1" مقادیر مدول الاستیسیته مخلوط را به ازای مقادیر مختلف کسر حجمی ( $\alpha$ ) نشان می‌دهد.

هنگام عبور از پلازما کم است. عدم ذوب زیرکونیم، باعث غیرهمگن شدن خواص آن در طول سطح مقطع شده و نهایتاً این امر به تنزل خواص پوشش می‌انجامد. در پاشش پودرهای توخالی زیرکونیم، می‌توان انتظار داشت که پوسته اطراف حفره هوا، کاملاً ذوب شده و یک توزیع دمای یکنواخت در آن به وجود آید [1]. مطالعات محدود انجام شده در این زمینه نشان از بهبود خواص پوشش دارد، که به عنوان مثال می‌توان به کنترل تخلخل پوشش اشاره کرد. با کنترل تخلخل می‌توان ویژگی عایق حرارتی برای پوشش را فراهم کرد؛ به عبارت دیگر، با استفاده از این نوع پودرها می‌توان موادی با مقاومت حرارتی مختلف و ضریب حرارت هدایتی قابل تنظیم به دست آورد [2].

یک لایه پوشش، از برخورد تعداد زیادی قطره به سطح، حاصل می‌شود. از آن جا که بررسی کل پوشش به صورت عددی کار دشواری است، معمولاً محققین برخورد یک تک قطره به سطح را شبیه‌سازی و ارزیابی می‌کنند. در بیشتر تحقیقات صورت گرفته تاکنون، قطره فشرده<sup>۱</sup> فرض شده است. در زمینه برخورد قطره توخالی به سطح، تحقیقات محدودی انجام شده و اطلاعات کافی در این زمینه وجود ندارد. سولونکو و همکاران [1] رفتار قطره توخالی YSZ را با این فرض که شکل قطره قبل از برخورد به سطح کروی است و یک پوسته نازک از مایع اطراف گاز را فرا گرفته، مورد بررسی قرار دادند. با عکس برداری از برخورد قطره توخالی به سطح، نشان داده شد که در این برخوردها، قطره به صورت انفجاری متلاشی می‌شود. گولیو و همکاران [4,3] در برخورد قطره توخالی گلیسیرین بر روی سطح، وجود یک جت ناهمسو را تشخیص داده و نشان دادند که در اعداد رینولدز کمتر از 30، جت ناهمسو اتفاق نمی‌افتد. آن‌ها همچنین مدل تحلیلی برای پیش‌بینی پهن‌شدگی قطره توخالی بر روی سطح بدست آوردند. کومار و گو [5] در تحلیلی عددی برخورد قطره توخالی  $\text{ZrO}_2$  به سطح را مورد بررسی قرار داده و مشخص کردند که برخورد قطره توخالی به سطح بطور مشخص با برخورد قطره فشرده به سطح تفاوت دارد. علاوه بر این، قطره توخالی نسبت به قطر فشرده در مدت زمان بیشتری جامد می‌شود. همچنین کسر بیشتر از فضای تهی در درون قطره، باعث می‌شود که اسپلت (شکل نهایی قطره پس از برخورد به سطح و انجماد) بوجود آمده در نتیجه برخورد، کوچک‌تر و یکنواخت‌تر باشد. از دیگر نتایج این تحقیق این است که وجود جت ناهمسو باعث به دام افتادن هوای بیشتری در قطره خواهد شد. سولونکو [6] فرایند تولید پودرهای توخالی از پودرهای تجمعی<sup>۲</sup> را به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار داد. پارامترهای موثر بر فرایند تولید، تشخیص داده شد. نشان داده شد که با تغییر شار حرارتی، می‌توان پودرهایی با قابلیت کنترل قطر و ضخامت پوسته به دست آورد. گولدیف [7] روشی جدید برای تولید پودرهای توخالی با قابلیت کنترل قطر و ضخامت را مورد مطالعه قرار داد. در این روش از پلاسمای دما پایین برای تولید پودهای توخالی استفاده شد.

برای کنترل بهتر فرایند پاشش حرارتی لازم است بین خواص پوشش و پارامترهای پاشش، ارتباط کمی برقرار شود. کیفیت پوشش ایجاد شده به پارامترهای زیادی بستگی دارد. تعداد کل پارامترهای موثر در پاشش حرارتی 50 تا 60 است [8]، که از آن جمله می‌توان به، حرکت و حالت قطره قبل از برخورد به سطح، مشخصات سطح، نرخ سرد شدن و انجماد قطره و شکل اسپلت، اشاره کرد. انتقال حرارت مابین قطره و سطح زمینه، سرعت برخورد و نوع قطره برخوردی، نقشی اساسی در شکل قطره اسپلت دارد. در تحقیقات صورت گرفته تاکنون، تأثیر سرعت بر شکل اسپلت و نرخ انجماد قطره بررسی

<sup>1</sup> Dense

<sup>2</sup> Agglomerated

<sup>3</sup> Volume of Fluid (VOF)

نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{V}) = 0 \quad k = \{d, g\} \quad (7)$$

رابطه (7) به صورت زیر بسط داده می‌شود:

$$\alpha_k \left( \frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{V} \rho_k \right) + \alpha_k \rho_k \vec{\nabla} \cdot \vec{V} + \rho_k \left( \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \alpha_k \right) = 0 \quad (8)$$

با اعمال مشتق زنجیره‌ای و با این فرض که  $\rho_k = \rho_k(P)$  رابطه (9) حاصل می‌شود:

$$\left( \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \alpha_k \right) = - \frac{\alpha_k}{\rho_k} \frac{\partial \rho_k}{\partial P} \left( \frac{\partial P}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} P \right) - \alpha_k \vec{\nabla} \cdot \vec{V} \quad (9)$$

با جمع رابطه (9) بر روی تمام فازها و استفاده از تعریف ترم تراکم‌پذیری  $\left( \psi = \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_s \right)$  معادله فشار حاصل می‌شود:

$$\left( \alpha \frac{\psi_d}{\rho_d} + (1 - \alpha) \frac{\psi_g}{\rho_g} \right) \left[ \frac{\partial P}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} P \right] + \vec{\nabla} \cdot (\vec{V}) = 0 \quad (10)$$

معادله مومنتوم [5]:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{V} \vec{V}) - \vec{\nabla} \cdot \{ \nu [ \vec{\nabla} \vec{V} + (\vec{\nabla} \vec{V})^T ] \} = \vec{\nabla} P + \vec{F}_{vol} + \vec{S}_v \quad (11)$$

$\vec{F}_{vol}$  نیروی کشش سطحی است که بعنوان یک نیروی حجمی در نظر گرفته شده و مقدار آن با کمک روش برکبیل محاسبه می‌شود [12]. ترم  $\vec{S}_v$  چشمه مربوط به انجماد است که در ادامه در مورد آن صحبت می‌شود.

### معادله انرژی

معادله انرژی برای جریان تراکم‌پذیر، با صرف نظر کردن از اثرات اتلاف لزجت به صورت زیر است [13]:

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} H) = \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + \frac{\partial P}{\partial t} - \left( \frac{\partial \rho K_E}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} K_E) \right) + S_h \quad (12)$$

در این رابطه  $K_E$  انرژی جنبشی سیال،  $S_h$  ترم چشمه مربوط به انجماد و  $H$  آنتالپی کل ماده است که از مجموع آنتالپی محسوس  $h$  و نهان  $\Delta H$  تشکیل شده است (همانند آنچه در [5] آمده است):

$$H = h + \Delta H, \quad h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (13)$$

با جایگزین کردن مقدار  $H$  از رابطه (13) در رابطه (12)، نهایتاً معادله زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho C_{peff} \vec{V} T)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho C_{peff} \vec{V} T) &= \vec{\nabla} \cdot (k_{eff} \vec{\nabla} T) + \frac{\partial P}{\partial t} \\ &- \left( \frac{\partial \rho K_E}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} K_E) \right) \\ &+ S_h, \quad S_h = \frac{\partial \rho \Delta H}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \Delta H) \end{aligned} \quad (14)$$

$C_{peff}$  ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط و  $K_{eff}$  ضریب انتقال حرارت هدایتی مخلوط است. برای محاسبه ترم  $\theta$  ولر [14] فرض کرد که در ناحیه خمیری گرمای نهان انجماد  $\Delta H$ ، کسری از گرمای نهان کل انجماد  $L$  است ( $\Delta H = \theta L$ )، که  $\theta$  کسر مایع درون قطره است. روسلر [15] تابع  $\theta$  را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\theta = 0.5 \cdot \operatorname{erf} \left( \frac{4(T - T_m)}{(T_l - T_s)} \right) + 0.5 \quad (15)$$

$T_l$  دمای شروع انجماد<sup>1</sup>،  $T_s$  دمای اتمام انجماد<sup>2</sup> و  $T_m$  میانگین  $T_l$  و  $T_s$  است

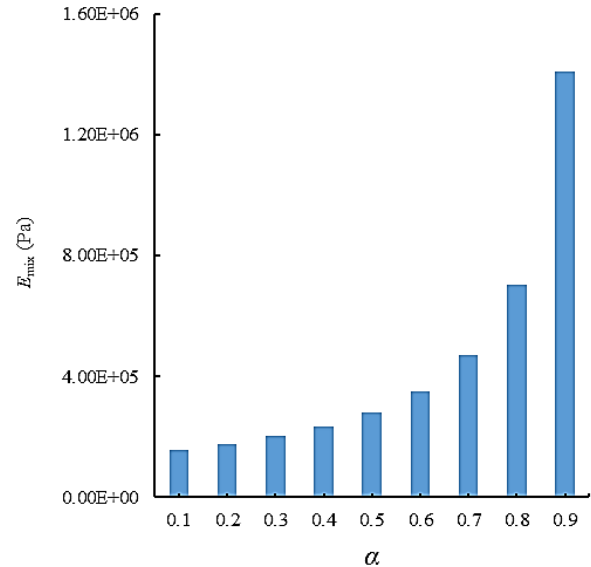


Fig. 1 Variations of the modulus of elasticity of two-phase fluids versus volume fraction

شکل 1 تغییرات مدول الاستیسیته حجمی سیال دوفازی برحسب کسر حجمی مایع

مدول الاستیسیته حجمی مایع در حدود  $E_d \approx 1 \times 10^9$  Pa و برای گاز در یک جریان آیزوترمیک در فشار اتمسفر  $E_g = 1.41 \times 10^5$  Pa در نظر گرفته شده‌اند ( $E_g = \gamma P$  که برای هوا  $\gamma=1.4$  است). تغییرات مدول الاستیسیته حجمی سیال مخلوط نشان می‌دهد که یک قطره توخالی در محدوده‌ای از  $0.0 \leq \alpha \leq 0.9$  بسیار تراکم‌پذیرتر از یک قطره فشرده است. مقدار کسر حجمی هوا در پودرهای حاوی ذرات توخالی در حدود 0.2~0.7 است [10]. از این رو تأثیر گاز محبوس در هنگام تراکم می‌تواند در هیدرودینامیک قطره اهمیت زیادی داشته باشد. با در نظر گرفتن دلایل فوق لازم است از معادلات مناسب برای شبیه‌سازی جریان تراکم‌پذیر دو فازی استفاده شود.

### 3- معادلات حاکم

در تحقیق حاضر برای ردیابی مرز مشترک بین دو سیال از مدل میلر و همکاران [11] استفاده شده است. این مدل، روشی فشار مبنا برای جریان‌های دو فازی تراکم‌پذیر است، که با استفاده از تکنیک کسر حجمی سیال، مرز مشترک دو فاز را ردیابی می‌کند. برای شبیه‌سازی انجماد قطره، معادله انرژی به مجموعه معادلات مرجع [11] اضافه می‌شود. معادلات حاکم بر مساله عبارتند از:

معادله کسر حجمی سیال [11]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{V}) &= \frac{-\alpha \psi_d}{\rho_d} \frac{DP}{Dt} = \alpha(1 - \alpha)\beta + \alpha \vec{\nabla} \cdot (\vec{V}) \\ \beta &= \left\{ \left( \frac{\psi_d}{\rho_d} \right) - \left( \frac{\psi_g}{\rho_g} \right) \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

که  $\psi$  بیانگر تراکم‌پذیری  $\left( \psi = \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_s \right)$  سیال است. در تحقیق حاضر برای هوا، معادله حالت گاز واقعی ( $P = z\rho RT$ ) در نظر گرفته شده، و فرض می‌شود، مایع اندکی تراکم‌پذیر است و از معادله حالت ایزوترم برای آن استفاده می‌شود. بنابراین ترم تراکم‌پذیری برای هوا و مایع به ترتیب  $\psi_d = 1/zRT$  و  $\psi_g = 1/a^2$  خواهد شد که  $a$  سرعت صوت در مایع است.

### معادله فشار [11]

برای به دست آوردن معادله فشار، ابتدا معادله بقای جرم برای هر یک از فازها

<sup>1</sup> Liquidus

<sup>2</sup> Solidus

رخ نمی‌دهد، حل می‌شود. اعداد رینولدز و وبر و سایر مشخصات قطره نظیر ضخامت، همانند مرجع [3] انتخاب شده‌اند، بدین منظور، قطره گلیسرین به قطر خارجی 5.25 mm و قطر داخلی 4.389 mm با سرعت 5.94 m/s به یک سطح صاف برخورد می‌کند. برای بهتر مشخص شدن نتایج، شبیه‌سازی عددی بصورت سه بعدی انجام شده است. استقلال نتایج از تعداد المان‌ها با شبیه‌سازی‌های مختلف و با تعداد المان‌های 2.8، 3 و 3.4 میلیون انجام شد و در نهایت دامنه حل با تعداد 3 میلیون المان انتخاب گردید. جدول 1 خواص گلیسرین را نشان می‌دهد.

تغییر شکل قطره به مانند آنچه در "شکل 2" نشان داده شده است اتفاق می‌افتد. در این شکل، نتایج حل عددی و آزمایشگاهی آورده شده است. پس از برخورد اولیه قطره به سطح، مایع و هوای محبوس در قطره تغییر شکل می‌دهند. با گذشت زمان، و پس از برخورد پوسته مایع به سطح، قسمتی از مایع به سمت مرکز و قسمت دیگری از آن به سمت خارج از مرکز جاری می‌شود. در طی این فرایند ضخامت این پوسته رفته رفته کاهش می‌یابد. جریانی که به سمت مرکز قطره حرکت می‌کند تشکیل یک جت ناهمسو را می‌دهد. تشکیل این جت ناهمسو در مراجع [3] قابل مشاهده است.

در حالتی مشابه، شبیه‌سازی با سرعت‌های اولیه برخورد 3 m/s و 20 m/s نیز انجام شده است. متوسط ضخامت جت ناهمسو 2.05 mm، 1.52 mm و 0.92 mm به ترتیب برای سرعت‌های اولیه برخورد 3 m/s، 5.94 m/s و 20 m/s می‌باشد. با کاهش سرعت اولیه برخورد، گسیختگی پوسته احاطه کننده قطره به تعویق می‌افتد. در این شبیه‌سازی، گسیختگی پوسته احاطه کننده در زمان‌های 1.6 ms، 1.0 ms و 0.3 ms به ترتیب برای سرعت‌های اولیه برخورد 3 m/s، 5.94 m/s و 20 m/s اتفاق می‌افتد. "شکل 3" طول جت ناهمسو را در سرعت‌های اولیه مختلف نشان می‌دهد. در سرعت اولیه 5.94 m/s، مقادیر آزمایشگاهی [3] نیز آورده شده‌اند.

مشخص است که با افزایش سرعت برخورد، جت ناهمسو سریعتر اتفاق می‌افتد و طول جت ناهمسو بیشتر است. مقایسه طول لحظه‌ای جت ناهمسو با آزمایشگاهی نیز تطابق مناسب این نتایج را نشان می‌دهد. در "شکل 4" مقادیر آزمایشگاهی [3] و عددی متوسط سرعت جت بالارونده در سرعت‌های اولیه برخورد مختلف مقایسه شده است. در روش آزمایشگاهی سرعت متوسط، از عکسبرداری لحظه‌ای برخورد قطره حاصل شده است. در شبیه‌سازی عددی، این مقدار از متوسط سرعت قسمت بالای جت به دست آمده است. با وجود این که در تمام موارد نتایج حل عددی، مقدار کمتری را نسبت به روش آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند اما نتایج حاصله با نتایج آزمایشگاهی به‌طور قابل قبولی مطابقت دارد.

## 5- رفتار قطره تو خالی هنگام برخورد به سطح در شرایط واقعی پاشش حرارتی

### 5-1- دینامیک برخورد

در این بخش برخورد قطره زیرکونیم ( $ZrO_2$ ) به سطح صاف با سرعت‌های اولیه 50 m/s، 100 m/s، 150 m/s، 200 m/s، 250 m/s و 300 m/s

جدول 1 خواص گلیسرین [16]

Table 1 properties of the glycerin

| $\mu$<br>(kgm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ) | $\sigma$<br>(Nm <sup>-1</sup> ) | $\rho$<br>(kgm <sup>-3</sup> ) | Contact<br>angle |
|-----------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------|
| 0.142                                         | 0.06324                         | 1261                           | 140°             |

$(T_m = (T_l + T_s)/2)$ . با کمک این رابطه، ترم چشمه  $S_h$  به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S_h = -\rho L \frac{4 \left( \frac{T - T_m}{T_l - T_s} \right)^2}{(T_l - T_s) \sqrt{\pi}} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} T \right) \quad (16)$$

روش ارائه شده توسط روسلر [15] برای استفاده در نرم‌افزار این‌فوم و برای فرمولاسیون تک دامنه‌ای، روش مناسبی است. مزیت استفاده از رابطه فوق این است که می‌توان ترم  $S_h$  را به‌صورت هموار به سمت راست رابطه (11) منتقل کرد و دما را بصورت ضمنی مورد محاسبه قرار داد.

با وجود تغییر فاز و انجماد، لازم است معادله مومنتوم اصلاح شود. این اصلاح به‌گونه‌ای است که با انجماد کامل قطره، سرعت آن نیز صفر شود. بدین منظور ترم چشمه مناسبی باید در سمت راست رابطه (8) اضافه شود. این ترم چشمه توسط ولر [14] به‌صورت زیر مشخص شد:

$$\vec{S}_v = -A\vec{V} \quad (17)$$

که:

$$A = \frac{-C(1 - \theta)^2}{(\theta^3 + \varepsilon)} \quad (18)$$

$C$  یک ثابت بزرگ است و مقدار آن به ریخت‌شناسی<sup>1</sup> محیط متخلخل بستگی دارد.  $\varepsilon$  مقدار کوچکی است که برای جلوگیری از تقسیم بر صفر در مخرج استفاده می‌شود. در فرمول‌بندی حاضر، به‌جای بررسی تک تک فازها بصورت مجزا، از خواص متوسط آن‌ها استفاده می‌شود. بدین منظور ضرایب  $C_{peff}$ ،  $K_{eff}$  و ... به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند: (لازم به ذکر است که قطره شامل فاز مایع و جامد است.)

$$\begin{aligned} k_{eff} &= \alpha k_d + (1 - \alpha)k_g \\ k_d &= \theta k_l + (1 - \theta)k_s \\ C_{peff} &= \alpha C_{pd} + (1 - \alpha)C_{pg} \end{aligned} \quad (19)$$

همچنین  $\rho$  در روابط فوق به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\begin{aligned} \rho &= \alpha \rho_d + (1 - \alpha)\rho_g \\ \rho_d &= \theta \rho_l + (1 - \theta)\rho_s \end{aligned} \quad (20)$$

زیر نویس‌های  $s$ ،  $l$ ،  $g$  و  $d$  به ترتیب به معنای جامد، مایع، و گاز است.

هدف حل معادلات (6)، (10) و (11) و همچنین معادله انرژی است. معادلات (6) و (10) کوپل هستند. برای حل معادلات، از الگوریتم و نحوه گسسته‌سازی ذکر شده در مرجع [11] استفاده شده است. برای این کار، در حلگر اینترفوم<sup>2</sup> از نرم‌افزار این‌فوم، الگوریتم فوق افزوده شده است. برای حل مساله انجماد، معادله انرژی به این حلگر اضافه شده و معادله مومنتوم اصلاح گردیده است.

## 4- صحنه‌گذاری

مدل ارائه شده توسط میلر [11]، با استفاده از مساله شاک تیوب<sup>3</sup> صحنه‌گذاری شده است. برای مساله خاص برخورد قطره توخالی به سطح، تراکم گاز محبوس در قطره و اثرات آن بر دینامیک برخورد، در سرعت‌های بالا اهمیت می‌یابد. از آن‌جا که آزمایشات در سرعت‌های بالا و برای مسایل واقعی وجود ندارد، برای صحنه‌گذاری مدل، برخورد یک قطره توخالی گلیسرین به سطح، به‌صورت عددی شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی [3] مقایسه شده است. در آزمایش مذکور اثرات انتقال حرارت در نظر گرفته نشده است با این حال در شبیه‌سازی عددی حاضر، به دلیل آنکه معادله حالت برای گاز وابسته به دما است، معادله انرژی با این فرض که تبدیل فاز در گلیسرین

<sup>1</sup> Morphology

<sup>2</sup> InterFoam

<sup>3</sup> Shock Tube

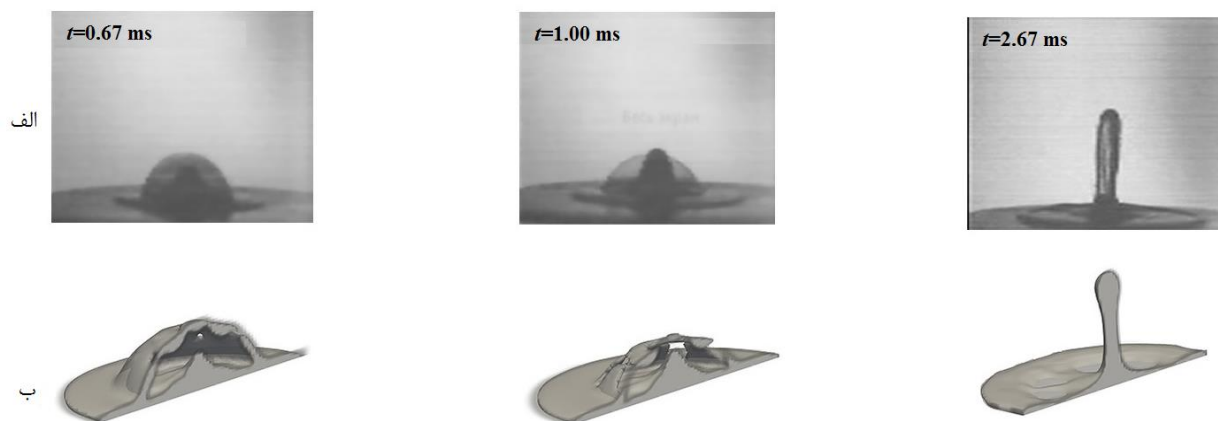


Fig. 2 Comparison of (a) the experimental and (b) simulated hollow droplet impact behavior on the surface

شکل 2 مقایسه رفتار الف) آزمایشگاهی [3] و ب) عددی برخورد قطره توخالی به سطح

به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. قطر خارجی قطره  $D_0 = 50 \mu\text{m}$  و قطر داخلی آن  $d_0 = 25 \mu\text{m}$  می‌باشد. دمای اولیه قطره 3000 K و دمای هوای اطراف و بستر برخورد 652 K است. جدول 2 خواص زیرکونیم را نشان می‌دهد. دامنه حل مساله، در "شکل 5" نشان داده شده است. برای کسب نتایج بهتر، از شبکه ریز در نزدیکی سطح زمینه و همچنین در نزدیکی محور تقارن استفاده شده است.

برای اطمینان از استقلال نتایج از شبکه، شبیه‌سازی با شبکه‌های مختلف (1.2، 1.4 و 1 میلیون) انجام شد و در نهایت شبکه با 1.2 میلیون گره انتخاب گردید. گام زمانی برای این شبیه‌سازی با در نظر گرفتن عدد کورانت برابر 0.2 به دست می‌آید، با این حال برای اطمینان استقلال نتایج از گام زمانی، از عدد کورانت 0.1 و 0.4 نیز استفاده شد و نتایج حاصل مشابه بود. مکان اولیه قطره را اندکی ( $5 \mu\text{m}$ ) بالاتر از سطح زمینه در نظر می‌گیریم تا میدان سرعت قبل از برخورد قطره به سطح، به حالت پایدار برسد. به عنوان شرایط مرزی، در مرزهایی که با اتمسفر در تماس‌اند برای سرعت، شرط گرادیان صفر و برای فشار، شرط فشار ثابت اتمسفر در نظر گرفته شده است. در روی مرز پایینی (محل برخورد قطره به سطح) برای سرعت، شرط عدم لغزش در نظر گرفته شده است.

در لحظات ابتدایی شبیه‌سازی، به دلیل اختلاف دمای قطره و هوای اطراف، در هوا یک شوک ایجاد می‌شود. "شکل 6" تغییرات عدد ماخ در حین

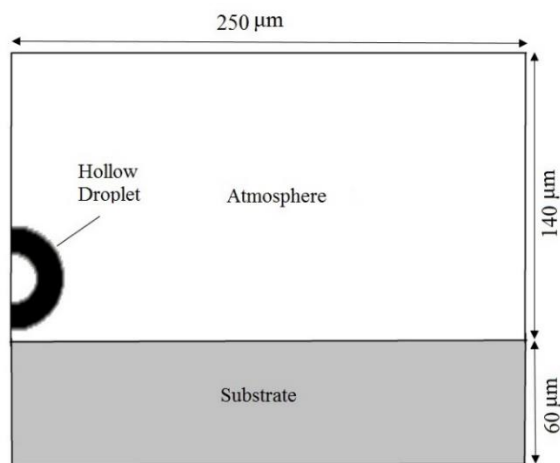


Fig. 5 Schematic view of the domain of solution

شکل 5 طرحواره‌ای از دامنه حل مساله

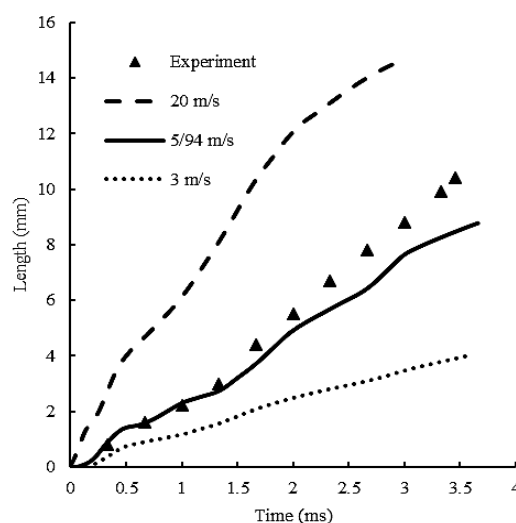


Fig. 3 Time evolution of the counter jet length for different impact velocities

شکل 3 تغییر شکل زمانی طول جت ناهمسو در سرعت‌های اولیه مختلف

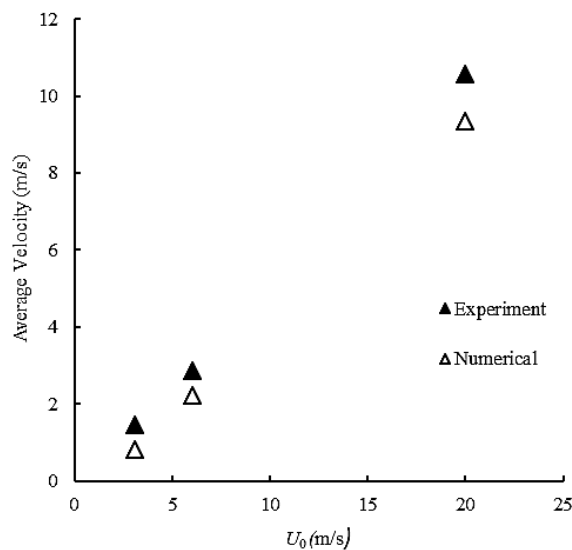


Fig. 4 Comparison of the experimental [3] and simulated average rising speed of the counter jet front for different impact velocities

شکل 4 مقایسه نتایج آزمایشگاهی [3] و عددی سرعت متوسط جت بالا رونده

جدول 2 خواص  $ZrO_2$  [17, 18]Table 2 properties of the  $ZrO_2$ 

| $L$<br>( $Jkg^{-1}$ ) | $C_p$<br>( $Jkg^{-1}K$ ) | $T_s$<br>(K) | $T_l$<br>(K) | $k_s$<br>( $Wm^{-1}K^{-1}$ ) | $k_l$<br>( $Wm^{-1}K^{-1}$ ) | Contact<br>angle | $\mu$<br>( $kgm^{-1}s^{-1}$ ) | $\sigma$<br>( $Nm^{-1}$ ) | $\rho$<br>( $kgm^{-3}$ ) |
|-----------------------|--------------------------|--------------|--------------|------------------------------|------------------------------|------------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| $1.41 \times 10^5$    | 713                      | 2949         | 2951         | 2                            | 3                            | $90^\circ$       | 0.021                         | 0.43                      | 5890                     |

جدایی قسمتی از قطره، روی سطح می‌شود. در "شکل 9" تغییرات گردابی با فرض تراکم‌پذیری سیال، در سرعت‌های اولیه برخورد مختلف، در زمان 0.1  $\mu s$  نشان داده شده است.

مقدار گردابی در مرز مشترک دوسیال، با افزایش سرعت اولیه برخورد، به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. حتی با افزایش سرعت اولیه برخورد، این مقدار گردابی در زمان پهن شدن قطره به طور مستمر باقی می‌ماند. در

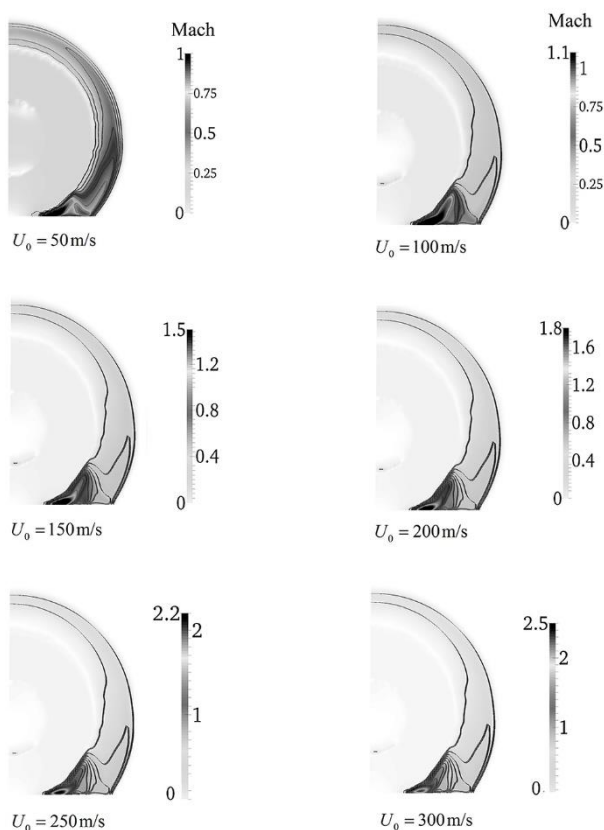


Fig. 7 Variations of mach number in different initial velocities

شکل 7 تغییرات عدد ماخ هنگام برخورد قطره به سطح در سرعت‌های اولیه مختلف

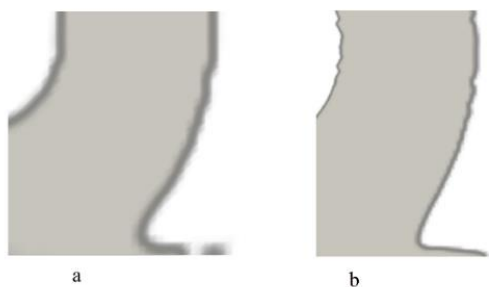


Fig. 8 Droplet shape in initial moments of impact a) compressible model b) incompressible model

شکل 8 شکل قطره در لحظات اولیه برخورد به سطح (الف) مدل تراکم‌پذیر (ب) مدل تراکم‌ناپذیر

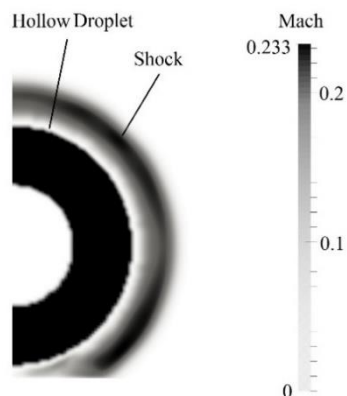


Fig. 6 Variations of mach number due to initial shock because of temperature difference

شکل 6 تغییرات عدد ماخ در اثر شوک اولیه به دلیل اختلاف دما

ایجاد این شوک را در سرعت اولیه  $U_0 = 100$  m/s نشان می‌دهد. از آن‌جا که علت به وجود آمدن این موج فشاری اختلاف دما است، در سرعت‌های اولیه دیگر (50 m/s و ...) نیز، شوک بوجود آمده و تغییرات عدد ماخ مشابه همین حالت است.

پس از لحظاتی، ابتدا قسمت زیرین قطره با سطح تماس پیدا می‌کند. هنگام برخورد قطره به سطح، مجدداً یک شوک در هوا (در زمان 0.1  $\mu s$ ) ایجاد می‌شود. در "شکل 7" تغییرات عدد ماخ هنگام برخورد قطره به سطح، در سرعت‌های اولیه مختلف نشان داده شده است.

با افزایش سرعت برخورد، شوک ایجاد شده شدیدتر و عدد ماخ به مقدار 2.5 نیز می‌رسد. شوک (موج فشاری) ایجاد شده در این مرحله تأثیر زیادی بر دینامیک و انجماد قطره هنگام پهن شدن دارد. این تأثیر را از دو جهت می‌توان بررسی کرد. از یک جهت این موج بر دینامیک قطره، و از جهت دیگر بر انجماد قطره تأثیر دارد. در ابتدا تأثیر این موج بر دینامیک قطره بررسی می‌شود. در صورت استفاده از مدل تراکم‌ناپذیر، چنین موج فشاری قابل شبیه‌سازی نیست و دینامیک برخورد و نحوه انجماد قطرات کاملاً متفاوت از مدل تراکم‌پذیر است. برای روشن شدن تفاوت دو مدل، شکل قطره در زمان 0.1  $\mu s$ ، برای سرعت اولیه  $U_0 = 100$  m/s، و برای هر دو مدل تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر نشان داده شده است (شکل 8).

همان‌طور که مشخص است، در صورت استفاده از مدل تراکم‌پذیر، قسمتی از قطره روی سطح گسیخته می‌شود. علت این امر وابسته به تغییرات مقدار گردابی  $\xi = \nabla \times \vec{V}$  در سطح مشترک دو سیال است. در محل برخورد قطره به زمین، به واسطه شوک ایجاد شده، در نواحی نزدیک به مرز مشترک دو سیال، مقدار گردابی به شدت زیاد می‌شود. مقدار گردابی زیاد، به معنای افزایش تنش برشی در مرز مشترک دو سیال است. تنش برشی و به تبع آن تبادل مومنتوم باعث می‌شود سیال سریع‌تر روی سطح پهن شود. این امر باعث نازک‌تر شدن لبه قطره که در حال پهن شدن است شده، و موجب

<sup>1</sup> Vorticity

صورتی که از فرض تراکم‌ناپذیری سیال استفاده شود، در جریان شوک ایجاد نمی‌شود و مقدار گردابی بسیار کمتر از حالت تراکم‌پذیر می‌شود. "شکل 10" مقدار گردابی را با فرض تراکم‌ناپذیری سیال، در سرعت برخورد  $U_0 = 100$  m/s نشان می‌دهد.

در این حالت، برخلاف فرض تراکم‌پذیری، قطره به‌صورت هموار روی سطح پهن می‌شود (شکل 8-ب).

با افزایش سرعت برخورد، و در نتیجه افزایش عدد ماخ در هوا، ریز قطرات بیشتری از قطره اصلی جدا می‌شوند. در "شکل 11" مراحل برخورد قطره به سطح، با فرض تراکم‌پذیری، در سرعت اولیه  $U_0 = 100$  m/s، در زمان‌های مختلف نشان داده شده است.

پس از برخورد اولیه به سطح و ایجاد شوک، قطره روی سطح پهن می‌شود. در زمان  $0.2 \mu\text{s}$  یک جت ناهمسو ایجاد شده که به سمت بالا حرکت می‌کند. با گذشت زمان، هوای محبوس داخل قطره، متراکم شده و در لحظه  $0.4 \mu\text{s}$  به بیشترین مقدار تراکم می‌رسد. در این لحظه فشار هوا در داخل

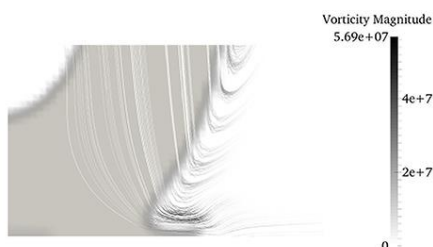


Fig. 10 Vorticity magnitude assuming incompressible fluid

شکل 10 مقدار گردابی با فرض تراکم‌ناپذیری سیال

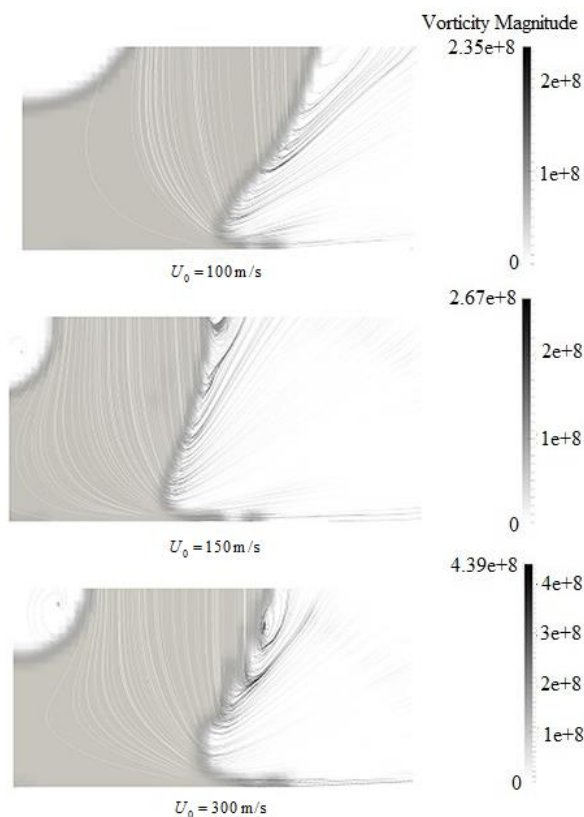


Fig. 9 Vorticity magnitude in different initial velocities assuming compressible fluid

شکل 9 مقادیر گردابی در سرعت‌های اولیه مختلف با فرض تراکم‌پذیری سیال

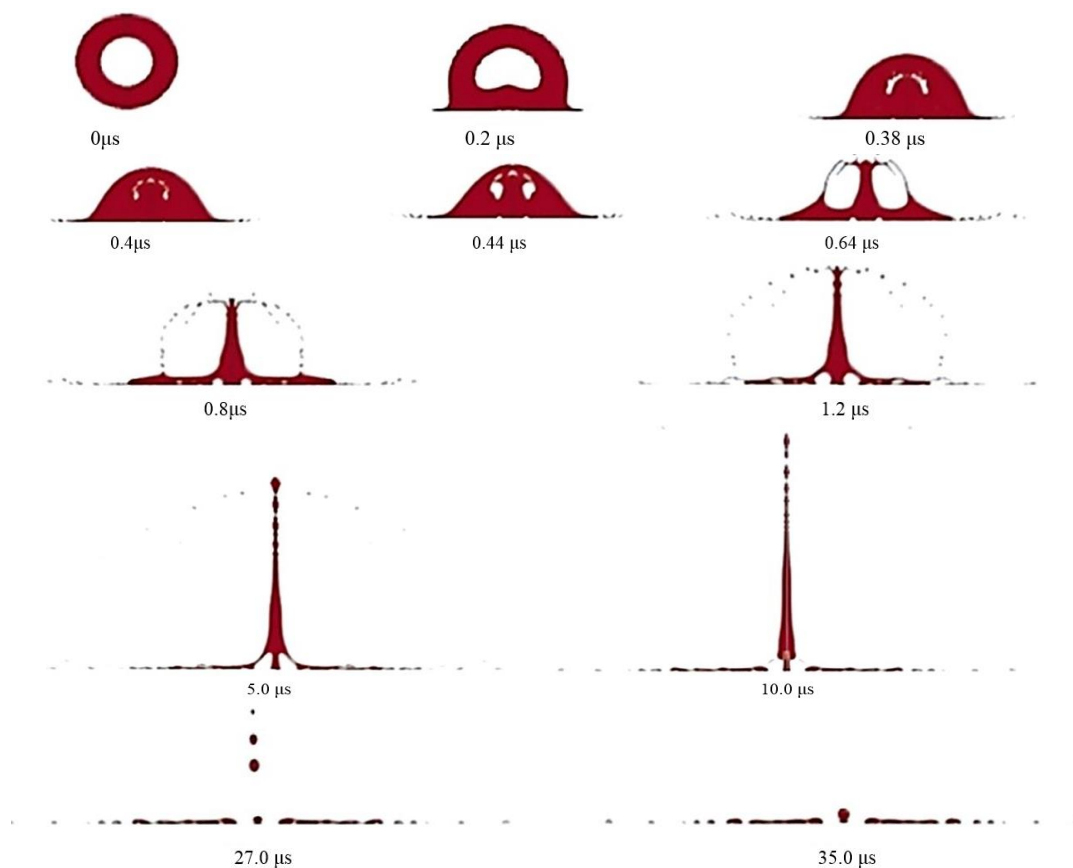


Fig. 11 Snapshots of the droplet impact on the surface

شکل 11 مراحل برخورد قطره توخالی

پوسته مایع پایین رونده با سرعت تقریبی 100 m/s به یکدیگر برخورد کنند. در این لحظه، فشار در نقطه برخورد جت و پوسته سیال، به  $2.8 \times 10^8$  Pa می‌رسد. این افزایش فشار، به متلاشی شدن قطره کمک می‌کند. در نمودار "شکل 14"، سرعت گسیختگی قطرات برحسب سرعت اولیه برخورد، نشان داده شده است.

طبق این نمودار با افزایش سرعت برخورد، گسیختگی مشهودتر است و قطرات با سرعت‌های بیشتری به اطراف پرتاب می‌شوند.

در صورت استفاده از مدل تراکم‌ناپذیر، هوا امکان تغییر حجم و چگالی ندارد. در این صورت برخلاف حالت تراکم‌پذیر، در اطراف حفره هوا گردابه بوجود نمی‌آید. همچنین از آن‌جا که هوا از مسیر حرکت جت ناهمسو کنار نمی‌رود، باعث می‌شود سرعت جت بالا رونده و پوسته سیال پایین رونده در لحظه برخورد، به ترتیب به 53 m/s و 55 m/s کاهش می‌یابد. تغییر شکل قطره با فرض تراکم‌ناپذیری در مرجع [5] و همچنین در "شکل 15" در بخش انجماد قطره آورده شده است، به همین دلیل در اینجا از آوردن آن خودداری می‌کنیم. از تغییر شکل قطره در مدل تراکم‌ناپذیر، مشاهده می‌شود، حجم هوا ثابت مانده و قطره متلاشی نمی‌شود.

گسیختگی قطره، باعث خروج مایع از دامنه حل می‌شود. در سرعت 100 m/s، مایع خارج شده تقریباً 70 درصد وزن قطره را تشکیل می‌دهد. با افزایش سرعت برخورد، مقدار مایع بیشتری از دامنه حل خارج می‌شود. در جدول 3 درصد وزنی مقدار جرم خارج شده بر حسب سرعت اولیه برخورد آورده شده است.

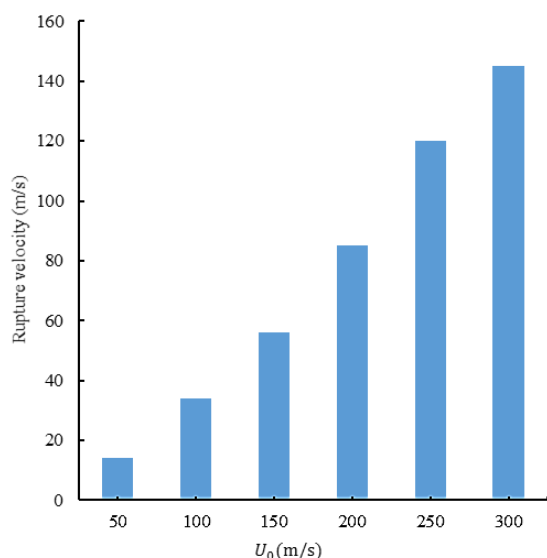


Fig. 14 Rupture velocity versus the impact velocity

شکل 14 سرعت گسیختگی برحسب سرعت برخورد قطره به سطح

جدول 3 نسبت جرم خارج شده از دامنه حل به جرم اولیه قطره

| درصد جرم خارج شده | سرعت اولیه برخورد به سطح (m/s) |
|-------------------|--------------------------------|
| 5%                | 50                             |
| 70%               | 100                            |
| 74%               | 150                            |
| 82%               | 200                            |
| 82%               | 250                            |
| 85%               | 300                            |

قطره به بیشترین مقدار خود (حدوداً  $1 \times 10^7$  Pa) می‌رسد. با افزایش فشار، چگالی هوا نیز زیاد می‌شود. در نمودار "شکل 12"، تغییرات چگالی هوای محبوس در قطره برحسب زمان نشان داده شده است.

با متراکم شدن هوا، چگالی آن به مقدار  $289 \text{ kg/m}^3$  می‌رسد. این مقدار چگالی تأثیر بسزایی بر دینامیک قطره دارد. همچنین اهمیت استفاده از مدل تراکم‌پذیر که قبلاً به آن اشاره شده بود، واضح می‌گردد. افزایش فشار هوای داخل قطره، به دیواره مایع نیرو وارد کرده و با حرکت رو به عقب مایع و انبساط گاز، یک گردابه در اطراف حفره هوا ایجاد می‌گردد (شکل 13). این گردابه، به حرکت عمودی مایع در جت ناهمسو شتاب می‌دهد و باعث می‌شود ضخامت جت ناهمسو کم شود. در نهایت در جهت عمود، در لحظه  $0.5 \mu\text{s}$  گسیختگی رخ دهد. در سرعت‌های پایین برخورد (50 m/s) چنین گسیختگی وجود ندارد، اما با افزایش سرعت سیال این گسیختگی سریع‌تر و شدیدتر اتفاق می‌افتد. از دیگر اثرات افزایش فشار و چگالی گاز محبوس، گسیختگی انفجاری قطره است (شکل 11 در زمان  $0.8 \mu\text{s}$ ). افزایش فشار، بر دیواره مایع احاطه کننده قطره نیرو وارد کرده و باعث انبساط گاز می‌شود. این انبساط، متلاشی شدن قطره را به همراه دارد. علت دیگر متلاشی شدن قطره، تغییر حجم هوا است. زیرا در این صورت هوا از مسیر حرکت جت ناهمسو کنار می‌رود. این امر باعث می‌شود در زمان  $0.4 \mu\text{s}$  جت بالارونده و

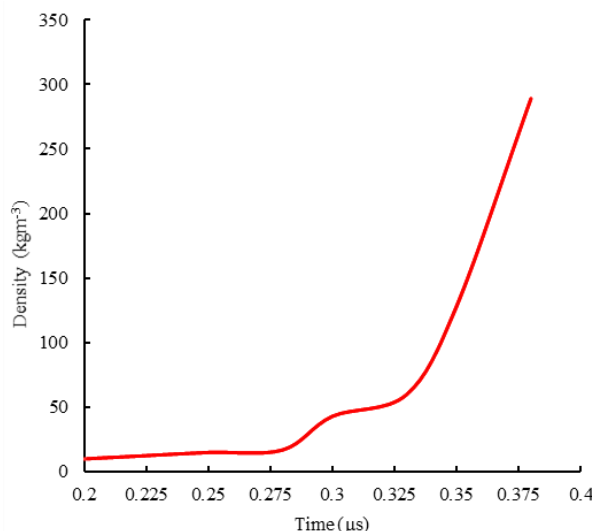


Fig. 12 Variation of trapped air density with time

شکل 12 تغییرات چگالی هوای محبوس با زمان

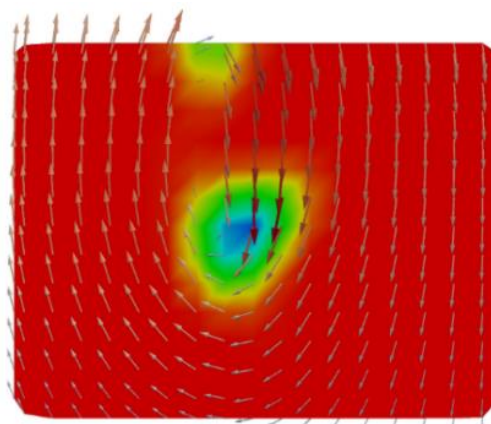
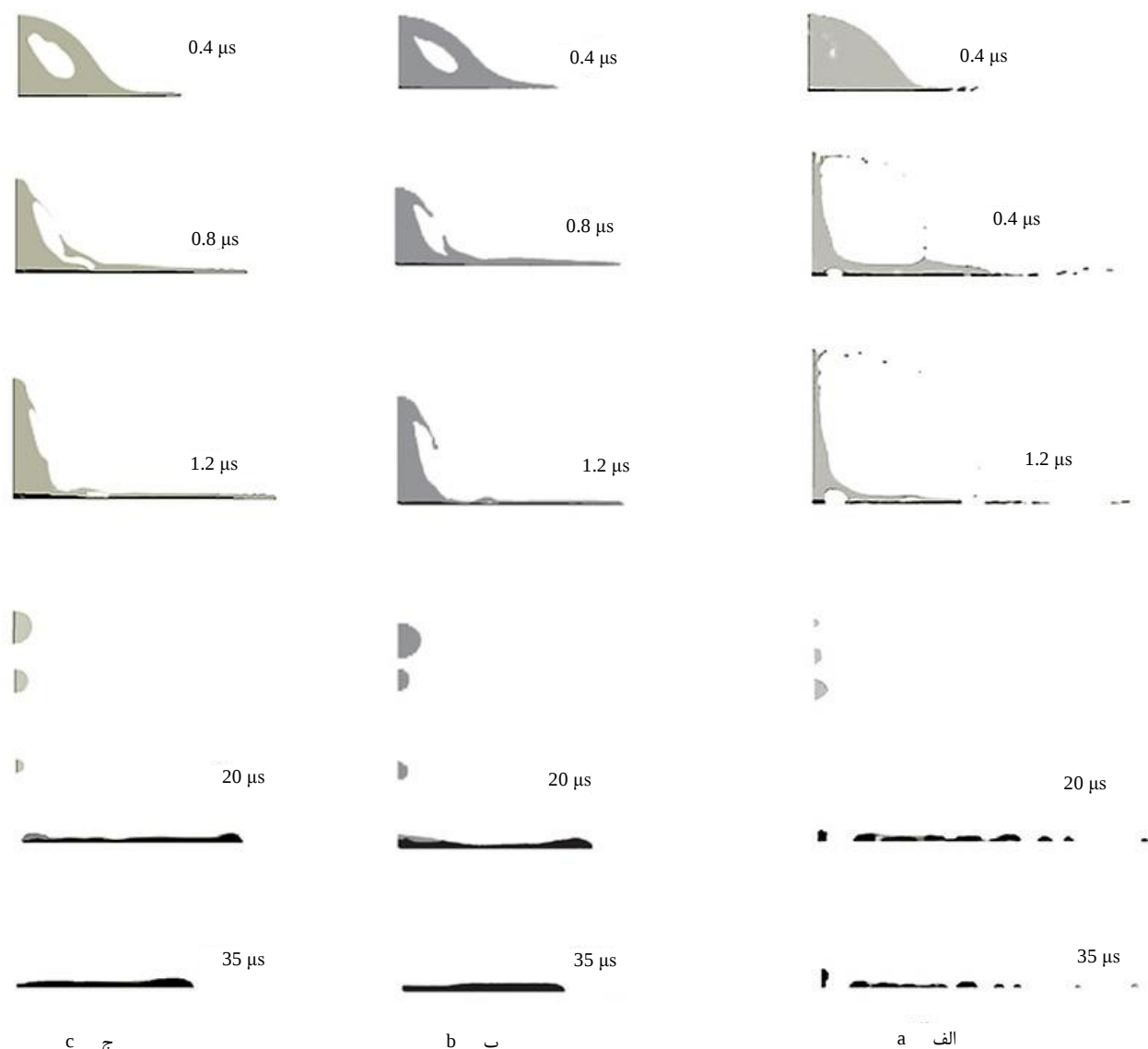


Fig. 13 Vortex in vicinity of the trapped air

شکل 13 گردابه ایجاد شده در اطراف حفره هوا



**Fig. 15** Snapshots of droplet solidification for hollow droplets (black color shows the solidify zone) a) incompressible model (current research) b) incompressible model (reference [5]) c) compressible model

شکل 15 مراحل انجماد قطره (نواحی مشکی رنگ) الف) فرض تراکم‌ناپذیری (تحقیق حاضر) ب) فرض تراکم‌ناپذیری (مرجع [5]) ج) فرض تراکم‌ناپذیری (تحقیق حاضر)

گسیختگی آن روی سطح می‌شود (در زمان  $1.2 \mu s$  در مدل تراکم‌ناپذیر و در زمان  $0.4 \mu s$  در مدل تراکم‌پذیر). با گذشت زمان بر ضخامت لایه‌ی منجمد شده افزوده می‌گردد و در نهایت قطره در زمان تقریبی  $35 \mu s$  کاملاً منجمد می‌شود. در صورتی که بازگشت ریز قطرات حاصل از جت ناهمسو در نظر گرفته نشود این زمان به حدود  $24 \mu s$  تقلیل می‌یابد. با مقایسه مراحل و زمان انجماد مشاهده می‌گردد که مطابقت مناسبی بین نتایج تحقیق حاضر با نتایج مرجع [5] وجود دارد.

با این حال در صورت استفاده از مدل تراکم‌ناپذیر (شکل 15-الف) مراحل انجماد قطره کمی متفاوت است. منشأ اصلی این تفاوت، شوک ایجاد شده در لحظه برخورد قطره به سطح است. این شوک باعث جدا شدن ریز قطراتی از قطره اصلی همچنین باریک‌تر شدن ضخامت در لبه‌های قطره، که در حال پهن شدن روی سطح است، می‌شود. این امر، انجماد سریع‌تر قطره در لبه‌ها را به همراه دارد. "شکل 16" قسمتی از قطره منجمد شده را در لبه‌ی آن که با سرعت اولیه  $100 \text{ m/s}$  به سطح برخورد کرده است، در زمان  $0.4 \mu s$  نشان

طبق داده‌های جدول با افزایش سرعت برخورد، بازده (نسبت جرم اولیه به جرم نهایی قطره) کاهش پیدا می‌کند. در سرعت‌های پایین برخورد ( $50 \text{ m/s}$ )، تقریباً جرمی از ناحیه حل خارج نمی‌شود.

## 2-5- انجماد قطره

برای بررسی مسأله انجماد، در ابتدا لازم است مدل عددی ارائه شده برای انجماد قطره صحه‌گذاری شود. برای این کار مراحل انجماد قطره را با مرجع [5] مقایسه می‌کنیم. از آن‌جا که در این مرجع از فرض تراکم‌ناپذیری سیال استفاده شده است، در این‌جا مراحل انجماد قطره با استفاده از هر دو فرض تراکم‌پذیری و تراکم‌ناپذیری سیال، برای سرعت برخورد  $100 \text{ m/s}$  نشان داده می‌شود. مقاومت حرارتی بین قطره و سطح زمینه با توجه به مرجع [19]،  $1.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{KW}^{-1}$  فرض شده است. "شکل 15" مراحل انجماد قطره را نشان می‌دهد. انجماد قطره از زمان تقریبی  $0.4 \mu s$  با تشکیل لایه‌ای از قطره منجمد شده روی سطح شروع می‌شود. انجماد در لبه‌های قطره باعث

می‌دهد.

بدلیل انجماد در لبه‌ها، مجدداً قطره گسیخته می‌شود. این گسیختگی سبب کاهش زمان انجماد در مدل تراکم‌پذیر می‌شود. زمان انجماد قطره بدون در نظر گرفتن بازگشت ریز قطرات در صورت استفاده از مدل تراکم‌ناپذیر، در حدود  $24 \mu s$  و در مدل تراکم‌پذیر، در حدود  $20 \mu s$  است. گسیختگی قطره در تمام سرعت‌ها مشاهده می‌گردد. با انجماد، اسپلت‌هایی با شکل‌های مختلف و برحسب سرعت‌های اولیه مختلف ایجاد می‌شود. فرم نهایی قطره منجمد شده، برحسب سرعت‌های اولیه برخورد در "شکل 17" نشان داده شده است.

با افزایش سرعت برخورد، اسپلت با تخلخل بیشتر ایجاد می‌شود که علت این امر، ایجاد شوک قوی‌تر، و به دنبال آن جدا شدن ریز قطرات بیشتری از قطره اصلی است. اگرچه اسپلت حاصل در سرعت بالاتر، بسیار متخلخل است ولی این بدان معنا نیست که با افزایش سرعت برخورد، تخلخل کلی پوشش زیاد می‌شود. زیرا تخلخل‌های به وجود آمده در اسپلت بسیار ریز هستند و فضای خالی بین آن‌ها می‌تواند توسط قطرات بعدی که به سطح برخورد می‌کنند پر شود. علاوه بر نتایج فوق، زمان کلی انجماد قطره بدون در نظر گرفتن بازگشت ریز قطرات حاصل از جت ناهمسو به سطح، با افزایش سرعت برخورد، کاهش می‌یابد. در جدول 4 زمان انجماد کامل قطره بر حسب سرعت



Fig. 16 Solidification of droplet in its edges (black color zone)

شکل 16 انجماد قطره در لبه آن (ناحیه مشکی رنگ)

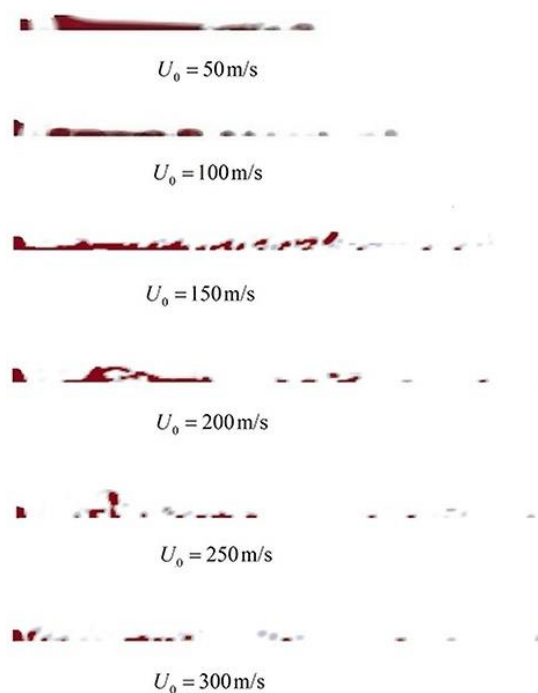


Fig. 17 Final shape of splat for various initial velocities

شکل 17 شکل نهایی اسپلت‌ها در سرعت‌های اولیه مختلف

جدول 4 زمان کلی انجماد قطرات در سرعت‌های اولیه مختلف

Table 4 Total solidification time of droplet in different initial velocities

| سرعت اولیه برخورد به سطح (m/s) | زمان انجماد قطره ( $\mu s$ ) |
|--------------------------------|------------------------------|
| 50                             | 30                           |
| 100                            | 20                           |
| 150                            | 18                           |
| 200                            | 15                           |
| 250                            | 12                           |
| 300                            | 10                           |

برخورد نشان داده شده است. علت انجماد سریع‌تر قطرات در سرعت‌های بالاتر برخورد، گسیختگی و ناپیوستگی بیشتر قطره و وجود قطرات ریزتر حاصله است که این امر نرخ سرد شدن قطره را تسریع می‌کند.

#### 6- نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر برخورد یک قطره توخالی به سطح و فرایند انجماد آن، به صورت عددی مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. برای ردیابی سطح مشترک مایع-گاز از مدل کسر حجمی برای سیالات تراکم‌پذیر استفاده شده است. در ابتدای فرایند شبیه‌سازی، یک شوک به دلیل اختلاف دمای قطره با هوا در محیط اطراف رخ می‌دهد که تأثیر چندانی بر دینامیک برخورد قطره ندارد. پس از برخورد قطره به سطح، مجدداً شوک دیگری در هوای اطراف ناحیه برخورد رخ می‌دهد. این شوک باعث افزایش مقدار گردابی در فصل مشترک بین مایع و هوا شده و به تبع آن تنش برشی در این ناحیه افزایش می‌یابد، در نهایت این امر باعث گسیختن مایع روی سطح می‌شود. علاوه بر این، شوک به وجود آمده لبه‌های قطره را نازک‌تر می‌کند که این امر باعث انجماد سریع قطره در لبه‌ها می‌شود. تراکم‌پذیر فرض نمودن گاز، دینامیک متفاوتی را نیز نتیجه می‌دهد. با این فرض گاز محبوس در حین تغییر شکل قطره، متراکم شده و سپس با انبساط گاز، باعث متلاشی شدن قطره می‌گردد. شکل نهایی اسپلت و زمان کلی انجماد قطره، تا حدی به شوک ایجاد شده در لحظه برخورد قطره به سطح بستگی دارد. به طوری که با افزایش سرعت برخورد، تخلخل اسپلت حاصل بیشتر شده و همچنین زمان کلی انجماد قطره کاهش می‌یابد.

#### 7- فهرست علائم

|           |                                            |
|-----------|--------------------------------------------|
| $C_p$     | ظرفیت گرمای مخصوص ( $J/kg \cdot K$ )       |
| $d_0$     | قطر داخلی قطره ( $\mu m$ )                 |
| $D_0$     | قطر خارجی قطره ( $\mu m$ )                 |
| $E$       | مدول الاستیسیته حجمی (Pa)                  |
| $H$       | آنتالپی کل ( $J/kg$ )                      |
| $k$       | ضریب انتقال حرارت هدایتی ( $W/m \cdot K$ ) |
| $L$       | گرمای نهان ذوب ( $J/kg$ )                  |
| $P$       | فشار ( $kg/m \cdot s^2$ )                  |
| $T$       | دما (K)                                    |
| $\vec{V}$ | میدان سرعت ( $ms^{-1}$ )                   |
| $U_0$     | سرعت اولیه برخورد ( $ms^{-1}$ )            |

#### علائم یونانی

|        |                                  |
|--------|----------------------------------|
| $\mu$  | لزجت دینامیکی ( $kg/m \cdot s$ ) |
| $\rho$ | چگالی ( $kg/m^3$ )               |

- microspheres with required wall thickness, *Ceramics International*, Vol. 41, No. 1, pp. 101-107, 2015.
- [8] P. Fauchais, Understanding plasma spraying, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 37, No. 9, pp. R86, 2004.
- [9] R. W. Fox, A. T. McDonald, *Introduction to fluid mechanics*, Eighth Edition, pp. 42, New York: Wiley, 2011.
- [10] O. P. Solonenko, I. P. Gulyaev, A. V. Smirnov, Thermal plasma processes for production of hollow spherical powders: Theory and experiment, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol. 6, No. 2, pp. 219-234, 2011.
- [11] S. Miller, H. Jasak, D. Boger, E. Paterson, A. Nedungadi, A pressure-based, compressible, two-phase flow finite volume method for underwater explosions, *Computers & Fluids*, Vol. 87, No. 2, pp. 132-143, 2013.
- [12] J. U. Brackbill, A continuum method for modeling surface tension, *Journal of Computational Physics*, Vol. 100, No. 2, pp. 335-354, 1992.
- [13] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Gergman, A. S. Lavine, *Introduction to Heat Transfer*, Seventh Edition, pp. 1029, New York: Wiley, 2011.
- [14] V. R. Voller, C. Prakash, A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, No. 8, pp. 1709-1719, 1987.
- [15] F. Rösler, D. Brüggemann, Shell-and-tube type latent heat thermal energy storage: Numerical analysis and comparison with experiments, *Heat and mass transfer*, Vol. 47, No. 8, pp. 1027-1033, 2011.
- [16] A. Kumar, S. Gu, S. Kamnis, Simulation of impact of a hollow droplet on a flat surface, *Applied Physics A*, Vol. 109, No. 1, pp. 101-109, 2012.
- [17] A. Kumar, S. Gu, Porous surfaces via impinging and solidifying molten hollow melt droplets on substrates, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 65, No. 6, pp. 771-775, 2012.
- [18] H. Liu, H. S. Jazi, M. Bussmann, J. Mostaghimi, Experiments and modeling of rapid solidification of plasma-sprayed yttria-stabilized zirconia, *Acta Materialia*, Vol. 57, No. 20, pp. 6013-6021, 2009.
- [19] S. Shakeri, S. Chandra, Splashing of molten tin droplets on a rough steel surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, No. 23, pp. 4561-4575, 2002.

- $\gamma$  نسبت گرماهای ویژه
- $\theta$  کسر مایع درون قطره
- $\alpha$  کسر حجمی سیال
- $\sigma$  کشش سطحی ( $\text{Nm}^{-1}$ )

## زیرنویس‌ها

- d قطره
- g گاز
- l مایع
- mix مخلوط
- s جامد

## 8- مراجع

- [1] O. P. Solonenko, I. P. Gulyaev, A. V. Smirnov, Plasma processing and deposition of powdered metal oxides consisting of hollow spherical particles, *Technical Physics Letters*, Vol. 34, No. 12, pp. 1050-1052, 2008.
- [2] O. P. Solonenko, A. V. Smirnov, Spreading and solidification of hollow molten droplet under its impact onto substrate: computer simulation and experiment, *5th International Workshop on Complex System*, Sendai, Japan, September 25-28, 2007.
- [3] I. Gulyaev, O. Solonenko, P. Y. Gulyaev, A. Smirnov, Hydrodynamic features of the impact of a hollow spherical drop on a flat surface, *Technical Physics Letters*, Vol. 35, No. 10, pp. 885-888, 2009.
- [4] I. Gulyaev, O. Solonenko, Hollow droplets impacting onto a solid surface, *Experiments in fluids*, Vol. 54, No. 1, pp. 1-12, 2013.
- [5] A. Kumar, S. Gu, H. Tabbara, S. Kamnis, Study of impingement of hollow  $\text{ZrO}_2$  droplets onto a substrate, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 220, No. 2, pp. 164-169, 2013.
- [6] O. Solonenko, Similarity criteria of HOSP formation at plasma processing of agglomerated particles, *High-Tech Plasma Processes Conference*, Toulouse, France, June 23-27, 2014.
- [7] I. Gulyaev, Experience in plasma production of hollow ceramic