

## مطالعه برخورد قطره نانوسیال آب-سیلیکا به سطح داغ با استفاده از مدل تک فازی

مرتضی دیلمی

سید پدram پورنادری\*

کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

### چکیده

یکی از فرایندهای بسیار مهم خنک‌کاری در صنایع، خنک‌کاری از طریق اسپری قطرات می‌باشد. در این پژوهش، برخورد قطره نانوسیال آب-سیلیکا به سطح داغ در رژیم جوشش لایه‌ای مطالعه می‌شود. معادلات حاکم، شامل معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی در حالت تراکم‌ناپذیر می‌باشند. برای اعمال اثر نانوذرات از مدل تک‌فازی استفاده می‌شود. از روش سطح تراز برای ردیابی سطح مشترک و از روش سیال مجازی، برای اعمال ناپیوستگی‌ها روی سطح مشترک استفاده می‌شود. اثر افزودن نانوذرات و نیز اثر سرعت برخورد قطره روی زمان تماس قطره با سطح، میزان پخش شدن قطره و میزان دفع حرارت از سطح داغ بررسی می‌شود. افزایش سرعت برخورد منجر به افزایش پخش شدن قطره و آهنگ انتقال گرما می‌شود. ولی اثر آن روی زمان تماس قطره ناچیز است. افزایش کسر حجمی نانوذرات، باعث افزایش زمان تماس قطره با سطح و میزان پخش شدن قطره روی سطح می‌شود. در سرعت‌های برخورد بالاتر تاثیر اضافه کردن ذرات نانو روی افزایش میزان پخش شدن قطره بیشتر است. افزایش کسر حجمی، منجر به افزایش آهنگ انتقال گرما و میزان گرمای دفع شده از سطح می‌شود. **واژه‌های کلیدی:** برخورد، قطره نانوسیال، سطح داغ، رژیم جوشش لایه‌ای، مدل تک‌فازی.

## Study of the Impact of Water-Silica Nanofluid Drop on a Hot Surface Using the Single-phase Model

M. Deilami

Department of Mechanical Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

P. Pournaderi

Department of Mechanical Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

### Abstract

One of the very important cooling processes in industries is cooling via droplet spraying. In this research, the impact of Water-Silica nanofluid drop on a hot surface in the film boiling regime is studied. Governing equations are incompressible continuity, momentum and energy equations. The level set method is used for interface tracking and the ghost fluid method is used to impose discontinuities at the interface. The effect of adding nanoparticles and also impact velocity on the droplet contact time, droplet spreading and heat transfer from surface is investigated. Droplet spreading and heat transfer rate increase by an increase in impact velocity. But, the effect of impact velocity on the droplet contact time is negligible. Droplet contact time and spreading increase by an increase in nanoparticle's volume fraction. Nanoparticles addition has more effect at higher impact velocities. Volume fraction enhancement, increases heat transfer rate and total heat dissipated from the surface.

**Keywords:** Impact, Nanofluid Drop, Hot Surface, Film Boiling Regime, Single Phase Model

### ۱- مقدمه

در فرایند برخورد قطره با سطح، وقتی دمای سطح از یک مقدار معین (که به آن نقطه لیدن فراست<sup>۱</sup> گفته می‌شود) تجاوز کند، یک لایه بخار بین قطره و سطح ایجاد شده و از خیس شدن سطح به وسیله قطره جلوگیری می‌کند. در این حالت، لایه مانده عایق عمل کرده و از انتقال گرما جلوگیری می‌کند. به این رژیم، رژیم لیدن فراست یا رژیم جوشش لایه‌ای<sup>۲</sup> گفته می‌شود. با توجه به کاربرد گسترده پدیده برخورد قطره به سطوح بسیار داغ خصوصاً در فرایندهای خنک‌کاری، مطالعه این پدیده به منظور درک بهتر آن و افزایش بازده سیستم‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

با افزودن نانوذرات به سیال پایه، مقدار چهار خاصیت ترموفیزیکی سیال شامل چگالی، لزجت، رسانایی گرمایی و گرمای ویژه تغییر می-

کند [۱]. این تغییرات می‌تواند به عوامل مختلفی از جمله کسر حجمی نانوذرات، خواص، نوع، شکل و اندازه نانوذرات، خواص سیال پایه و دما بستگی داشته باشند. سیالات متداولی که در زمینه انتقال گرما استفاده می‌شوند، دارای رسانایی گرمایی پایینی هستند. ذرات نانو به دلیل بالا بودن رسانایی گرمایی، با توزیع در سیال پایه باعث افزایش رسانایی گرمایی سیال می‌گردند. به همین دلیل استفاده از نانوسیالات بجای سیال پایه، ممکن است باعث افزایش راندمان فرایندهای خنک-کاری نظیر خنک‌کاری از طریق اسپری قطرات شود.

تحقیقات متعددی در خصوص برخورد قطرات با سطوح داغ در رژیم جوشش لایه‌ای انجام شده است. کارل و همکارانش [۲] تغییر شکل قطرات خنک میکرونی را هنگام برخورد با سطوح داغ به صورت تجربی و عددی بررسی کردند. آنها در شبیه سازی عددی روش کسر حجمی سیال را برای ردیابی سطح مشترک به کار بردند. آنها برای ارضاء شرط عدم تماس از یک زاویه تماس ۱۸۰ درجه و شرط لغزش آزاد برای سرعت استفاده کردند. هاروی و فلچر [۳] با صرف نظر کردن از جملات جابجایی در لایه بخار تشکیل شده بین قطره و سطح و نیز

<sup>1</sup> Leidenfrost Point

<sup>2</sup> Film Boiling

با حل معادله دما در فازهای جامد، مایع و بخار یک مدل دوبعدی برای لایه بخار ارائه دادند. در واقع آنها از تبخیر قطره صرفنظر کرده و با استفاده از مدل لایه بخار، اثر فشار لایه بخار را به صورت یک جمله چشمه در معادلات مومنتوم وارد کردند. هاروی و فلچر از روش کسر حجمی سیال استفاده کردند و تنها توانستند برخوردهای با انرژی کم را شبیه سازی کنند [۴]. جی و فان [۵] از فرمول بندی میرا شده روش سطح تراز برای شبیه سازی برخوردهای اشباع با سطوح بسیار داغ استفاده کردند. آنها با در نظر گرفتن جملات جابجایی در لایه بخار، مدل لایه بخار هاروی و فلچر را بهبود دادند و توانستند برخوردهای با اعداد وبر کم و متوسط را شبیه سازی کنند. بیانس و همکارانش [۶] به صورت تئوری در مورد عوامل موثر بر طول عمر قطره نظیر شعاع قطره، خواص بخار و اختلاف دمای قطره و سطح بحث کردند. آنها همچنین به صورت تجربی نشان دادند که برای قطرات بزرگ، تبخیر عمدتاً در لایه بخار اتفاق می‌افتد. ولی برای قطرات کوچک تبخیر از سایر قسمت‌های قطره نیز مهم است. چاتزیکیریپاکو و همکارانش [۷] با استفاده از فرمول بندی میرا شده روش سطح تراز، به مطالعه برخورد قطرات اشباع با سطوح داغ پرداختند. آنها برای قطره یک نرخ تبخیر ثابت در نظر گرفتند و اثر آن را فقط در معادله سطح تراز اعمال کردند. پورناداری و پیشه ور [۸] به روش عددی برخورد قطره به سطح داغ در رژیم جوشش لیدن فراست را بررسی کردند. آنها با استفاده از تکنیک سیال مجازی ناپیوستگی کمیت‌ها در سطح مشترک را مدل کردند. همچنین از روش سطح تراز برای ردیابی سطح مشترک استفاده کردند. تاثیر سرعت برخورد قطره و کشش سطحی بر میزان گرمای دفع شده از سطح، توسط آنها بررسی شد. نتایج نشان می‌داد که افزایش سرعت برخورد باعث افزایش دفع گرمای می‌شود. همچنین مشخص شد که با کاهش کشش سطحی ناشی از افزودنی‌های سطحی<sup>۱</sup>، دفع گرما افزایش می‌یابد. همدان و همکاران [۹] به صورت آزمایشگاهی به بررسی برخورد قطره به سطح داغ در رژیم لیدن فراست پرداختند. در اعداد وبر کمتر از ۳۰، قطره بدون تشکیل قطرات ثانویه از سطح جدا می‌شود. ولی برای اعداد وبر بالاتر، قطرات ثانویه پس از جداسدن از سطح تشکیل می‌گردند. دماهای بالاتر از نقطه لیدن فراست تاثیر بسیار کمی بر اندازه ذرات ثانویه دارد. اثر زبری سطح نیز در این محدوده ناچیز است. ویلگاس و همکاران [۱۰] با استفاده از روش سطح تراز و سیال مجازی به بررسی اثر لیدن فراست در فرایند برخورد قطره به سطح داغ پرداختند. آنها به بررسی تغییر شکل یک قطره زیر خنک<sup>۲</sup> در اعداد وبر پایین و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی پرداختند. مطابقت خوبی بین نتایج مشاهده گردید.

تحقیقات زیادی نیز در زمینه جریان نانوسیال انجام شده است. لیو و کیو [۱۱] به مطالعه آزمایشگاهی انتقال گرمای جوشش هسته‌ای در فرایند برخورد جت نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم به سطح پرداختند. تاثیر کسر حجمی نانوذرات و شرایط جریان بر انتقال گرمای جوششی و شار گرمایی بحرانی بررسی شد. نتایج نشان دهنده افزایش شار گرمایی بحرانی نسبت به آب می‌باشد. همچنین با افزایش سرعت جت، شار گرمایی افزایش می‌یابد. شار گرمایی بحرانی نانوسیال در مقادیر کسر

حجمی پایین افزایش می‌یابد، ولی پس از این که کسر حجمی از یک مقدار معین بیشتر شود، شار گرمایی تغییر چندانی نمی‌کند. گولوبویچ و همکاران [۱۲] به مطالعه آزمایشگاهی و تحلیلی شار گرمایی بحرانی در فرایند جوشش قطره نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم و نانوسیال آب-اکسید بیسموت روی سطح پرداختند. از نتایج مشخص شد که با افزایش کسر حجمی نانوذرات تا یک مقدار مشخص، شار گرمایی بیشینه افزایش می‌یابد و پس از آن افزایش کسر حجمی تاثیری بر شار گرمایی بیشینه ندارد. همچنین از نتایج آزمایشگاهی مشخص شد که اندازه نانوذرات تاثیری بر شار گرمایی بیشینه ندارد. شار گرمایی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم نسبت به نانوسیال آب-اکسید بیسموت بیشتر می‌باشد. امین فر و همکاران [۱۳] به صورت عددی، جوشش قطره نانوسیال بر روی سطح را در رژیم جوشش هسته‌ای بررسی کردند. نانوذرات مورد استفاده آنها سیلیکا و آلومینا بود. از معادلات پیوستگی، بقای مومنتم، انرژی و معادله کسر حجمی با استفاده از مدل مخلوط استفاده شد. بر اساس نتایج حاصل شار گرمایی با افزایش اختلاف دمای دیوار و دمای اشباع افزایش می‌یابد. عابدینی و همکاران [۱۴] به بررسی جوشش جریان نانوسیال در لوله با استفاده از روش عددی پرداختند. آنها از مدل دوفازی مخلوط<sup>۳</sup> در شبیه سازی-ها استفاده کردند و با استفاده از روش حجم محدود و الگوریتم SIMPLE، به حل معادلات حاکم پرداختند. نانوسیال مورد استفاده آنها آب-آلومینا بود. آنها تاثیر نانوسیال با غلظت‌های مختلف بر روی شار گرمایی را بررسی کردند. نتایج نشان می‌داد که افزایش کسر حجمی نانوسیال باعث افزایش شار گرمایی می‌شود. اسمایی و همکاران [۱۵] به صورت عددی به آنالیز عملکرد حرارتی نانوسیال در یک لوله حرارتی با استفاده از مدل تک‌فازی پرداختند. جریان دو فازی گاز و سیال با تغییر فاز مورد بررسی قرار گرفت. آنها به مقایسه سیال آب و نانوسیال آب-اکسید مس به عنوان سیال عامل پرداختند. با استفاده از نانوسیال، مشخصات انتقال حرارت بهتری نسبت به آب مشاهده شد. با افزایش کسر حجمی نانوسیال انتقال حرارت افزایش می‌یابد. گرکن و همکاران [۱۶] به صورت عددی و آزمایشگاهی به بررسی نرخ تبخیر قطرات نانوسیال اتانول-آلومینیوم در مقادیر کسر حجمی مختلف پرداختند. نتایج هر دو روش کاهش نرخ تبخیر با افزایش کسر حجمی تا ۱/۵ درصد را نشان می‌داد و پس از آن افزایش کسر حجمی تا ۳ درصد تاثیری بر نرخ تبخیر نداشت.

پژوهش‌های محدودی در زمینه برخورد قطره به سطح داغ در رژیم لیدن فراست به صورت عددی انجام شده است. ولی با توجه به بررسی‌های انجام شده توسط نویسندگان، تا کنون اثر افزودن نانوذرات به سیال در فرایند برخورد قطرات به سطح در رژیم لیدن فراست (جوشش لایه‌ای) و در محدوده اعداد وبر کم و متوسط (که فروپاشی قطره اتفاق نمی‌افتد) بررسی نشده است. در این تحقیق، نویسندگان قصد دارند در ادامه تحقیق پیشین خود [۸]، اثر افزودن نانوذرات روی هیدرودینامیک و انتقال گرما قطره در فرایند برخورد به سطح داغ در رژیم جوشش لایه‌ای را در محدوده اعداد وبر کم و متوسط بررسی کنند.

<sup>1</sup> Surfactant<sup>2</sup> Subcooled<sup>3</sup> Mixture

$$\begin{bmatrix} \mathbf{n} \\ \mathbf{t} \end{bmatrix} \left( \rho \mathbf{I} - \boldsymbol{\tau}^H \mathbf{n}^T \right) \Big|_{\Gamma} = \begin{pmatrix} \sigma \kappa - \dot{m}^2 \left[ \frac{1}{\rho} \right]_{\Gamma} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

که  $\sigma$  کشش سطحی می‌باشد. با جای گذاری تانسورهای تنش در معادله بالا روابط به ترتیب در دو راستای نرمال و مماس به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\left[ p - 2\mu \mathbf{n} \cdot \nabla \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}^T \right]_{\Gamma} = \sigma \kappa - \dot{m}^2 \left[ \frac{1}{\rho} \right]_{\Gamma} \quad (11)$$

$$\mathbf{t} \cdot \left[ \mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \right]_{\Gamma} \cdot \mathbf{n}^T = 0 \quad (12)$$

با استفاده از معادله (۱۱) پرش فشار در سطح مشترک محاسبه می‌شود. در جریان‌های بدون تغییر فاز، سرعت در سطح مشترک پیوسته است:

$$[\mathbf{u}]_{\Gamma} = [\mathbf{v}]_{\Gamma} = 0 \quad (13)$$

مشتقات مماسی سرعت نیز پیوسته هستند:

$$[\nabla \mathbf{u} \cdot \mathbf{t}]_{\Gamma} = [\nabla \mathbf{v} \cdot \mathbf{t}]_{\Gamma} = 0 \quad (14)$$

با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴) و معادله پیوستگی، معادله (۱۲) به شکل زیر بازنویسی می‌شود [۱۸]:

$$\begin{aligned} [\mu \nabla \mathbf{u}]_{\Gamma} &= [\mu]_{\Gamma} (\nabla \mathbf{u}) \begin{pmatrix} 0 \\ \mathbf{t} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \mathbf{t} \end{pmatrix}^T + \\ &[\mu]_{\Gamma} \mathbf{n}^T \mathbf{n} (\nabla \mathbf{u}) \mathbf{n}^T \mathbf{n} - \end{aligned} \quad (15)$$

لازم به ذکر است معادله (۱۵) که برای مدل کردن جملات لزج استفاده می‌شود، به دلیل پرش در سرعت در جریان‌های همراه با تغییر فاز معتبر نمی‌باشد. ولی هنوز نیز می‌توان با استفاده از استراتژی معرفی شده توسط تانگوی و همکاران [۱۹]، جملات لزج در جریان‌های همراه با تغییر فاز را با بکارگیری معادله (۱۵) مدل کرد. در بخش روش‌های عددی به این موضوع اشاره می‌شود.

با توجه به معادله بقای انرژی در سطح مشترک، شرط پرش برای میدان دما به صورت زیر می‌باشد:

$$h_v \dot{m} + [k \nabla T \cdot \mathbf{n}]_{\Gamma} = 0 \quad (16)$$

در روابط بالا  $h_v$  گرمای نهان تبخیر می‌باشد. زمانی که دمای قطره ثابت و برابر با دمای اشباع مایع باشد معادله (۱۶) را به صورت زیر ساده سازی می‌گردد:

$$\dot{m} = \frac{-k_g \nabla T \cdot \mathbf{n} \Big|_{\Gamma}}{h_v} \quad (17)$$

نرخ تبخیر از معادله بالا محاسبه می‌شود.

### ۳-۲- معادلات حاکم بر نانوسیال

در این تحقیق، برای اعمال اثر نانوذرات از مدل تک‌فازی استفاده می‌شود. در مدل تک‌فازی فرض می‌شود که سیال پایه و نانوذرات در تعادل گرمایی بوده و با سرعت یکسانی حرکت می‌کنند. در این روش، نانوسیال مثل یک سیال همگن در نظر گرفته می‌شود و معادلات شبیه به معادلات سیال همگن هستند، با این تفاوت که خواص موثر نانوسیال بعنوان خواص ترموفیزیکی استفاده می‌شوند. خواص نانوسیال به غلظت

### ۲- معادلات حاکم

#### ۱-۲- معادلات جریان

معادلات پایه برای جریان لزج غیر قابل تراکم عبارتند از:

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

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{g} \quad (2)$$

در رابطه بالا  $\rho$  چگالی،  $\mathbf{u}$  بردار سرعت،  $\mathbf{g}$  بردار گرانش و  $\boldsymbol{\tau}$  تانسور تنش لزج است که به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\boldsymbol{\tau} = \mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \quad (3)$$

در این رابطه  $\mu$  لزجت دینامیکی و بالانویس  $T$  عملگر ترانهاده است.

معادله انرژی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \frac{\nabla \cdot (k \nabla T)}{\rho C_p} \quad (4)$$

$T$  میدان دما،  $k$  رسانایی گرمایی،  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت است.

#### ۲-۲- شرایط پرش

از شرط پرش به عنوان شرط مرزی در سطح مشترک برای حل معادلات استفاده می‌شود. فرض کنید دامنه محاسباتی  $\Omega$  از طریق مرز مشترک  $\Gamma$  به دو زیر دامنه  $\Omega^+$  و  $\Omega^-$  تقسیم می‌شود. پرش کمیت  $A$  در سطح مشترک  $\Gamma$  به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$[A]_{\Gamma} = A^+ - A^- \quad (5)$$

$A^+$  و  $A^-$  بترتیب مقدار کمیت  $A$  در دو زیر دامنه  $\Omega^+$  و  $\Omega^-$  می‌باشند. در جریان‌های همراه با تبخیر با توجه به بقای جرم در سطح مشترک می‌توان نوشت [۱۷، ۱۶]:

$$\dot{m} = \rho_l (\mathbf{u}_{int} - \mathbf{u}_l) \cdot \mathbf{n} = \rho_g (\mathbf{u}_{int} - \mathbf{u}_g) \cdot \mathbf{n} \quad (6)$$

$\dot{m}$  نرخ تبخیر در واحد سطح و زیرنویس‌های  $l$  و  $g$  به ترتیب فاز مایع و گاز را نمایش می‌دهند. بردار سرعت در سطح مشترک  $\mathbf{u}_{int}$  نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{u}_{int} = \mathbf{u}_l + \mathbf{u}_s \quad (7)$$

$\mathbf{u}_s$  بخشی از سرعت سطح مشترک است که به دلیل تبخیر ظاهر می‌شود:

$$\mathbf{u}_s = \frac{\dot{m}}{\rho} \mathbf{n} \quad (8)$$

از معادلات (۶)، (۷) و (۸) شرط پرش سرعت در سطح مشترک به شکل زیر نتیجه می‌شود:

$$[\mathbf{u}]_{\Gamma} = \dot{m} \left[ \frac{1}{\rho} \right]_{\Gamma} \mathbf{n} \quad (9)$$

بنابراین در جریان‌های همراه با تغییر فاز میدان سرعت در سطح مشترک ناپیوسته می‌باشد.

از طریق اصل بقای مومنوم در سطح مشترک شرایط پرش برای سطح در حال حرکت با سرعت محلی در راستای نرمال به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = S(\phi_0)(1 - |\nabla \phi|) \quad (21)$$

که در آن  $\phi_0$  مقدار تابع  $\phi$  بدست آمده از حل معادله سطح تراز،  $\tau$  زمان مجازی و  $S(\phi_0)$  تابع علامت میرا شده است که به صورت  $S(\phi_0) = \frac{\phi_0}{\sqrt{\phi_0^2 + \Delta x^2}}$  تعریف می‌شود.

### ۲-۲- روش تصویرسازی

همان‌گونه که گفته شد از روش تصویرسازی [۱۸] برای حل معادلات جریان استفاده می‌شود. همچنین روش سیال مجازی برای اعمال شرایط پرش در سطح مشترک بکار می‌رود. معادله (۱۵) که برای محاسبه جملات لزج استفاده می‌شود در جریان همراه با تغییر فاز معتبر نمی‌باشد. با تصحیح روش تصویرسازی استاندارد می‌توان از معادله (۱۵) مدل کردن جملات لزج استفاده نمود [۱۹]. در ادامه به توضیح این روش پرداخته می‌شود.

با کمک رابطه (۹) میدان‌های سرعت گاز و مایع را به کل دامنه تعمیم داده می‌شود:

$$\mathbf{u}_1^{\text{ghost}} = \mathbf{u}_g - \mathbf{n} \cdot \mathbf{n} \left[ \frac{1}{\rho} \right]_{\Gamma} \mathbf{n} \quad (22)$$

$$\mathbf{u}_g^{\text{ghost}} = \mathbf{u}_l + \mathbf{n} \cdot \mathbf{n} \left[ \frac{1}{\rho} \right]_{\Gamma} \mathbf{n} \quad (23)$$

هر یک از این دو میدان تعمیم یافته در کل دامنه پیوسته هستند. در گام نخست روش تصویرسازی اصلاح شده، شبه سرعت‌ها برای فازهای مایع و گاز با استفاده از میدان‌های توسعه یافته سرعت مایع و گاز محاسبه می‌شوند:

$$\mathbf{u}_l^* = \mathbf{u}_l^n - \Delta t \left( \left( \mathbf{u}_l^n \cdot \nabla \right) \mathbf{u}_l^n - \frac{\nabla \cdot \tau^n}{\rho_l} - \mathbf{g} \right) \quad (24)$$

$$\mathbf{u}_g^* = \mathbf{u}_g^n - \Delta t \left( \left( \mathbf{u}_g^n \cdot \nabla \right) \mathbf{u}_g^n - \frac{\nabla \cdot \tau^n}{\rho_g} - \mathbf{g} \right) \quad (25)$$

با توجه به پیوستگی میدان‌های سرعت تعمیم یافته، از رابطه (۱۵) برای مدل کردن جملات لزج در هرکدام از دو رابطه بالا استفاده می‌گردد. در گام دوم سمت راست معادله پواسون فشار به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{f} = \nabla \cdot \mathbf{u}_l^* \quad \phi < 0 \quad (26)$$

$$\mathbf{f} = \nabla \cdot \mathbf{u}_g^* \quad \phi > 0 \quad (27)$$

در گام سوم معادله پواسون حاصل با اعمال شرط پرش فشار حل می‌گردد:

$$\nabla \cdot \left( \frac{\nabla p^{n+1}}{\rho} \right) = \frac{\mathbf{f}}{\Delta t} \quad (28)$$

در آخر سرعت‌ها در گام جدید از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_l^{n+1} = \mathbf{u}_l^* - \Delta t \frac{\nabla p^{n+1}}{\rho} & \phi < 0 \\ \mathbf{u}_g^{n+1} = \mathbf{u}_g^* - \Delta t \frac{\nabla p^{n+1}}{\rho} & \phi > 0 \end{cases} \quad (29)$$

در بخش ۳-۳ روش سیال مجازی برای اعمال شرایط پرش هنگام گسسته‌سازی معادلات توصیف می‌شود.

### ۳-۳- حل معادله انتقال گرما

نانوذرات بستگی دارد. برای چگالی نانوسیال، معمولاً معادله زیر استفاده می‌شود [۲۰، ۲۱]:

$$\rho_{nf} = \psi \rho_p + (1 - \psi) \rho_f \quad (18)$$

در روابط بالا  $\psi$  کسر حجمی نانوذرات می‌باشد. اندیس‌های  $f, p$  و  $nf$  به ترتیب به ذره، سیال پایه و نانوسیال اشاره دارند.

از رابطه زیر نیز برای محاسبه لزجت نانوسیال استفاده می‌شود [۲۲]:

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 7.3\psi + 123\psi^2) \quad (19)$$

با توجه به اینکه در این تحقیق قطره در دمای اشباع می‌باشد، نیازی به محاسبه رسانایی گرمایی و ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال نمی‌باشد.

### ۳- روش‌های عددی

در این تحقیق، از یک کد کامپیوتری بر مبنای روش تفاضل محدود برای گسسته‌سازی معادلات حاکم بر روی یک شبکه جابجاشده<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. معادلات جریان به کمک روش تصویرسازی<sup>۲</sup> [۱۸] حل می‌شوند. جملات جابجایی در تمام معادلات توسط روش وینو<sup>۳</sup> [۲۳] مرتبه پنج و جملات پخش نیز از طریق تقریب مرکزی مرتبه دو گسسته می‌شوند. برای گسسته‌سازی جملات زمانی، روش رانگ کوتای<sup>۴</sup> TVD [۱۸] مرتبه سوم به خدمت گرفته می‌شود. از شرط CFL برای اعمال محدودیت گام زمانی استفاده می‌شود [۱۸]. برای ردیابی سطح مشترک از روش سطح تراز<sup>۵</sup> [۲۵، ۲۴] استفاده می‌شود. کمیت‌های ناپیوسته در سطح مشترک با استفاده از تکنیک سیال مجازی<sup>۶</sup> مدل می‌گردند [۲۶، ۱۸].

### ۳-۱- روش سطح تراز

برای تعیین محل دقیق سطح مشترک در هر گام زمانی از تابع سطح تراز  $\phi$  استفاده می‌شود. این تابع اسکالر به صورت تابع فاصله تعریف شده و مقدار آن در سطح مشترک صفر و در قطره و سیال محیط به ترتیب منفی و مثبت می‌باشد.

با توجه به اینکه سطح مشترک همواره سطح تراز صفر تابع  $\phi$  می‌باشد، رابطه زیر برای این تابع برقرار است:

$$\phi_t + \mathbf{u}_{int} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (20)$$

$\mathbf{u}_{int}$  سرعت سطح مشترک است. با حل معادله بالا، موقعیت سطح مشترک در گام زمانی بعد شناسایی می‌شود. متأسفانه با وجود مقداردهی اولیه تابع سطح تراز به صورت تابع فاصله، با حل رابطه (۲۰) خاصیت تابع فاصله برای کمیت  $\phi$  حفظ نمی‌شود. این مشکل با کمک بازمقداردهی تابع سطح تراز در هر گام زمانی با استفاده از رابطه (۲۱) رفع می‌گردد:

<sup>1</sup> Staggered

<sup>2</sup> Projection Method

<sup>3</sup> Weighted Essentially Nonoscillatory (WENO)

<sup>4</sup> Runge-Kutta

<sup>5</sup> Total Variation Diminishing

<sup>6</sup> Level set

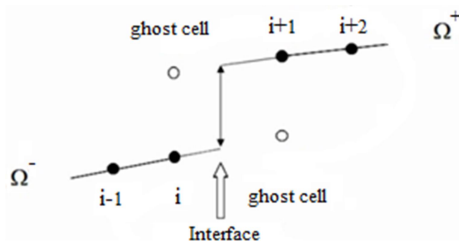
<sup>7</sup> Ghost Fluid Method

$$u^+(x) - u^-(x) = a(x_\Gamma) \quad (34)$$

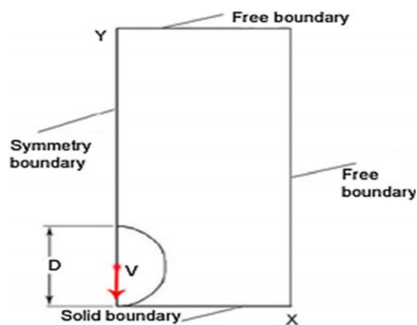
بنابراین برای هر مقدار از  $u_i^-$  در ناحیه  $\Omega^-$  یک تعریف به صورت  $u_i^{g+}(x) = u_i^-(x) + a(x_\Gamma)$  که در شرایط مرزی نیز صدق می‌کند وجود دارد. به همین ترتیب به ازاء هر مقدار  $u_i^+$  در ناحیه  $\Omega^+$ ، رابطه‌ای به صورت  $u_i^{g-}(x) = u_i^+(x) - a(x_\Gamma)$  بیان می‌گردد.

#### ۴- نتایج

همانطور که پیشتر اشاره شد، پورانداری و پیشه‌ور [۸] با توسعه یک کد بر اساس روش‌های سطح تراز و سیال مجازی با اعمال مناسب ناپیوستگی‌ها در سطح مشترک و محاسبه دقیق نرخ تبخیر، فرایند برخورد قطره با سطح داغ در رژیم لیدن فراست را با موفقیت شبیه‌سازی کردند. در این تحقیق، با اعمال مدل تک‌فازی در کد مذکور برخورد قطره نانوسیال آب-سیلیکا به سطح داغ شبیه‌سازی می‌شود. شکل ۲ هندسه و شرایط مرزی در فرایند برخورد را نمایش می‌دهد. با توجه به هندسه مسئله و تقارن حول محور  $Y$  از معادلات در حالت تقارن محوری استفاده می‌شود. طول دامنه محاسباتی ۴ میلی‌متر، ارتفاع دامنه محاسباتی ۱۲ میلی‌متر و شعاع قطره ۱/۱۵ میلی‌متر می‌باشد. از یک شبکه  $36 \times 120$  در محاسبات استفاده می‌شود. همچنین به منظور شبیه‌سازی دقیق لایه بخار در نزدیک سطح از تکنیک



شکل ۱- پرش یک کمیت در سطح مشترک



شکل ۲- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی [۸]

برای معادله انرژی جملات جابجایی به صورت صریح و جملات پخش به روش ضمنی گسسته‌سازی می‌گردند.

$$\rho C_p T^{n+1} - \Delta t \nabla \cdot (k \nabla T^{n+1}) = \rho C_p T^n - \rho C_p \Delta t (\mathbf{u} \cdot \nabla) T^n \quad (30)$$

دما در فاز مایع ثابت و برابر با دمای اشباع می‌باشد. بنابراین معادله دما فقط برای فاز گاز و با شرط مرزی دیریگله<sup>۱</sup> در سطح مشترک حل می‌گردد.

در جریان‌های همراه با تبخیر میدان دما در سطح مشترک پیوسته است اما با توجه به معادله (۱۶)، پدیده تبخیر باعث می‌شود که آهنگ انتقال گرما ناپیوسته باشد و در نتیجه گرادینان دما نیز در سطح مشترک ناپیوسته شود. بنابراین برای محاسبه جملات جابجایی در گره‌های نزدیک به سطح مشترک مقادیر دمای مجازی برای فاز دیگر مورد نیاز است. این مقادیر مجازی با برون‌یابی در سطح مشترک تعیین می‌شوند [۲۸].

#### ۳-۴- روش سیال مجازی

به طور کلی دو رویکرد میرا<sup>۲</sup> [۵،۳] و نامیرا<sup>۳</sup> (روش سیال مجازی) [۲۶،۱۸] برای مدل‌سازی سطح مشترک وجود دارد. رویکرد میرا بر مبنای در نظر گرفتن ضخامت مشخصی برای سطح مشترک و محاسبه خواص سیال به کمک یک تابع هوی‌ساید<sup>۴</sup> در عرض سطح مشترک می‌باشد. در واقع، در این رویکرد کمیت‌ها در عرض سطح مشترک میرا می‌شوند. کشش سطحی به صورت یک نیروی حجمی در سطح مشترک اعمال می‌شود. در رویکرد نامیرا (روش سیال مجازی)، بدون در نظر گرفتن ضخامت برای سطح مشترک، شرایط پرش مناسب برای هر کمیت به نحو مناسبی در سطح مشترک اعمال می‌شود. در واقع، کمیت‌ها در سطح مشترک میرا نمی‌شوند و ناپیوستگی کمیت‌ها در سطح مشترک حفظ می‌گردد. در شکل ۱ پرش کمیت  $u$  در سطح مشترک در یک بعد مشاهده می‌شود. دامنه محاسباتی  $\Omega$  از طریق مرز مشترک  $\Gamma$  به دو زیر دامنه  $\Omega^+$  و  $\Omega^-$  تقسیم می‌شود. معادله پواسون یک بعدی با ضریب متغیر را با در نظر گرفتن شرط پرش در مقدار تابع به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\nabla \cdot (\beta(x) \nabla u(x)) = f(x) \quad (31)$$

$$[u]_\Gamma = a_\Gamma \quad (32)$$

فرض می‌کنیم که  $\beta(x)$  در هر زیر دامنه پیوسته و مقدار آن همواره غیر صفر باشد. اما این امکان وجود دارد که در مرز مشترک  $\Gamma$  ناپیوسته باشد. با توجه به تعریف پرش روی سطح مشترک شرایط پرش به صورت رابطه (۳۳) بازنویسی می‌گردد:

$$[u]_\Gamma = u^+(x) - u^-(x) \quad (33)$$

که بالانویس " $\pm$ " اشاره به زیردامنه‌های  $\Omega^\pm$  دارد. مقدار پرش تابع بر روی سطح مشترک است. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، شرط پرش در سطح مشترک به صورت زیر اعمال می‌شود:

<sup>1</sup>Dirichlet  
<sup>2</sup>Smeared-out  
<sup>3</sup>Sharp  
<sup>4</sup>Heaviside Function

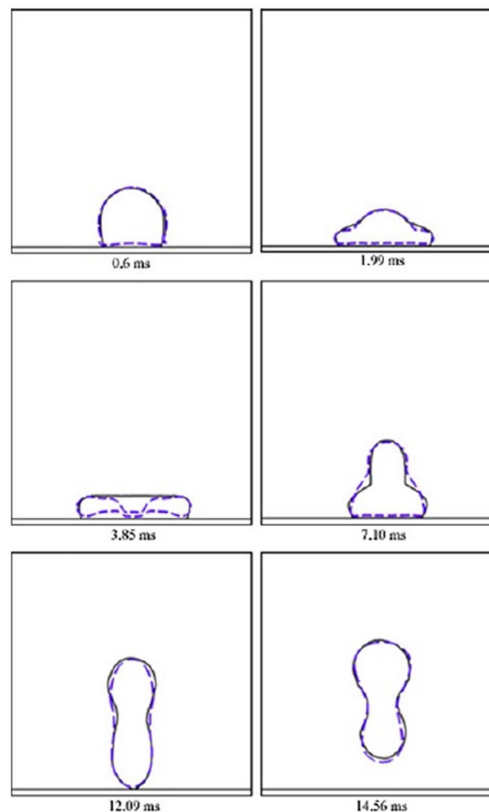
در پدیده برخورد قطره به سطح داغ در رژیم جوشش لایه‌ای عدد وبر<sup>۱</sup> (نسبت نیروی اینرسی به کشش سطحی) پارامتر بی بعد حاکم بر مسأله می‌باشد [۳۱]:

$$We = \frac{\rho V^2 D}{\sigma} \quad (35)$$

بر اساس اطلاع نویسندگان تاکنون فرآیند برخورد قطره نانوسیال به سطح در رژیم جوشش لایه‌ای بررسی نشده است. ولی از آنجایی که در مدل تک فازی برای نانوسیال، تنها خواص سیال بر اساس یک کسر حجمی ثابت تغییر می‌کند، اعتبار نتایج از طریق بررسی فرآیند برخورد سیال خالص (کسر حجمی صفر) و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی می‌تواند تایید شود. شکل ۳ مراحل مختلف برخورد قطره آب خالص به سطح را در سرعت برخورد ۰/۶۳ متر بر ثانیه (عدد وبر ۱۵) نمایش می‌دهد. در تمام مراحل مختلف برخورد شامل پخش شدن، جمع شدن و بلند شدن از سطح، نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی [۳۱] تطابق خوبی دارند. برای مقایسه بهتر در لحظه حداکثر پخش شدن (۳/۸۵ میلی ثانیه)، شکل تقارن محوری حاصل از شبیه‌سازی باید حول محور تقارن چرخانده شود.

شکل ۴ تغییر شکل قطره نانوسیال آب-سیلیکا حین فرآیند برخورد بازا کسر حجمی ۰/۰۱ و سرعت برخورد ۰/۶۳ متر بر ثانیه (عدد وبر ۱۵/۹۰) را نمایش می‌دهد. پس از برخورد قطره در اثر نیروی اینرسی شروع به پخش شدن می‌کند. نیروی کشش سطحی در برابر پخش شدن قطره مقاومت می‌کند. با پخش شدن بیشتر قطره روی سطح میزان نیروی کشش سطحی در اثر افزایش انحنا افزایش می‌یابد. زمانی که قطره به بیشینه میزان پخش شدگی خود می‌رسد، نیروی کشش سطحی نیز به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در این لحظه، غلبه نیروی کشش سطحی بر نیروی اینرسی موجب جمع شدن قطره می‌شود. سرانجام پس از جمع شدن قطره نیروی اینرسی باعث بلند شدن قطره از روی سطح می‌شود. لازم به ذکر است به دلیل تشکیل لایه بخار بین قطره و سطح و عدم تماس قطره با سطح، اثر نیروی لزجت ناچیز است. در شکل ۵ نتایج شبیه‌سازی برای کسر حجمی ۰/۰۴ (عدد وبر ۱۷/۰۶) ارائه شده است. با مقایسه شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش کسر حجمی ضریب پخش شدن قطره (نسبت بیشینه شعاع قطره به شعاع اولیه) اندکی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش کسر حجمی، زمان تماس قطره با سطح از ۱۲/۱۴ میلی‌ثانیه به ۱۲/۷۸ میلی‌ثانیه افزایش می‌یابد.

شکل ۶ تغییر شکل نانوسیال آب-سیلیکا حین فرآیند برخورد بازا کسر حجمی ۰/۰۱ و سرعت برخورد ۱/۴ متر بر ثانیه را نمایش می‌دهد. در این حالت نسبت به سرعت برخورد ۰/۶۳ متر بر ثانیه به دلیل افزایش نیروی اینرسی میزان پخش شدن قطره روی سطح افزایش می‌یابد. همچنین، هنگام بلند شدن قطره از روی سطح غلبه نیروی اینرسی بر نیروی کشش سطحی موجب تشکیل یک قطره ثانویه می‌شود. در شکل ۷ نیز نتایج شبیه‌سازی در سرعت برخورد ۱/۴ متر بر ثانیه برای کسر حجمی ۰/۰۴ ارائه شده است. مقایسه شکل‌های ۶ و



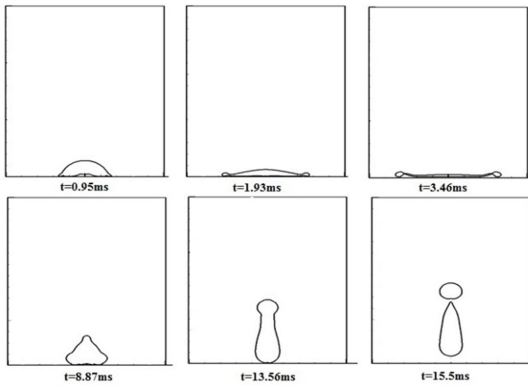
شکل ۳- تغییر شکل قطره آب خالص حین فرآیند برخورد بازا سرعت برخورد ۰/۶۳ متر بر ثانیه. خطوط پر و خط چین بترتیب نتایج آزمایشگاهی [۳۱] و نتایج شبیه‌سازی [۸] را نمایش می‌دهند.

جدول ۱- مقادیر کشش سطحی نانوسیال آب-سیلیکا [۲۱]

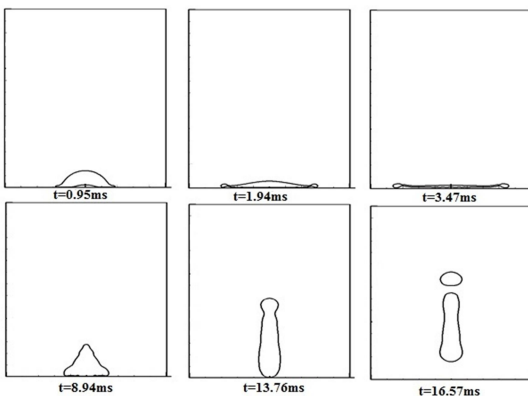
$\sigma$ (N/m)	$\psi$
0.056	0.01
0.0556	0.02
0.0554	0.03
0.0549	0.04

فشرده‌سازی شبکه در نزدیک سطح استفاده می‌شود [۸]. روی تمام مرزها بجز مرز تقارن از شرط مرزی دیریشله  $400^\circ\text{C}$   $T_{\text{boundary}} =$  برای دما استفاده می‌شود. دمای اولیه گاز نیز  $400^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. قطره در حالت اشباع ( $100^\circ\text{C}$ )  $T_{\text{sat}} =$  می‌باشد. با توجه به اینکه غلظت نانوذرات در این تحقیق حداکثر ۴ درصد می‌باشد، از تاثیر نانوذرات بر دمای اشباع صرف نظر می‌شود [۲۹، ۲۸]. چگالی نانوذرات سیلیکا ۲۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد [۳۰]. در جدول ۱ مقادیر تقریبی کشش سطحی نانوسیال آب-سیلیکا بازا مقادیر کسر حجمی مختلف ارائه شده است [۲۸].

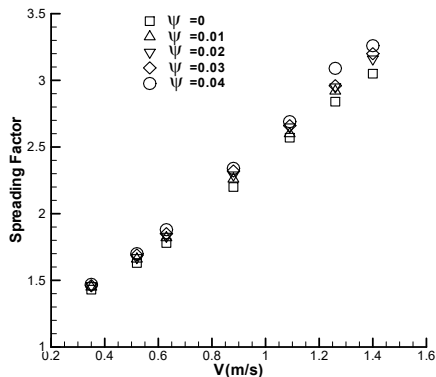
<sup>1</sup> Weber Number



شکل ۶- تغییر شکل قطره نانوسیال آب- سیلیکا حین فرایند برخورد بازاء کسر حجمی ۰/۰۱ و سرعت برخورد ۱/۴ متر بر ثانیه



شکل ۷- تغییر شکل قطره نانوسیال آب- سیلیکا حین فرایند برخورد بازاء کسر حجمی ۰/۰۴ و سرعت برخورد ۱/۴ متر بر ثانیه

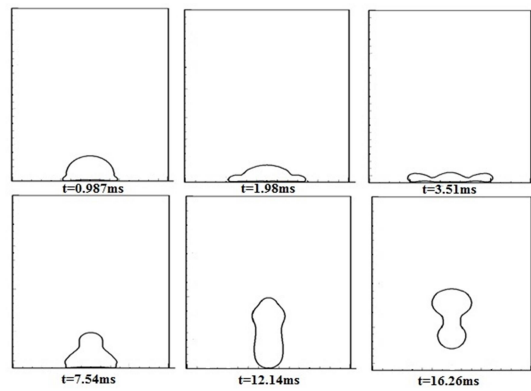


شکل ۸- ضریب پخش شدن قطره نانوسیال آب- سیلیکا بر حسب سرعت برخورد قطره در مقادیر مختلف کسر حجمی

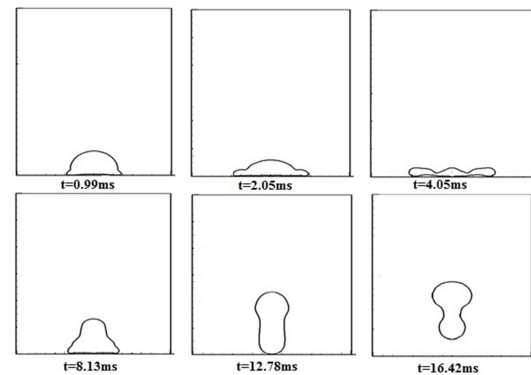
۷ نشان می‌دهد که با افزایش کسر حجمی، ضریب پخش شدن قطره و زمان تماس قطره با سطح افزایش می‌یابد.

شکل ۸ ضریب پخش شدن قطره (نسبت بیشینه شعاع قطره به شعاع اولیه) را بر حسب سرعت برخورد و بازاء مقادیر مختلف کسر حجمی نمایش می‌دهد. با افزایش سرعت برخورد به دلیل افزایش نیروی اینرسی میزان پخش شدن قطره افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش کسر حجمی ضریب پخش شدن قطره افزایش می‌یابد. این افزایش ناشی از افزایش عدد وبر در اثر تغییر خواص سیال می‌باشد. در واقع با افزایش کسر حجمی، نسبت نیروی اینرسی به کشش سطحی افزایش می‌یابد. میزان افزایش ضریب پخش شدن قطره در سرعت‌های برخورد بالاتر بیشتر است.

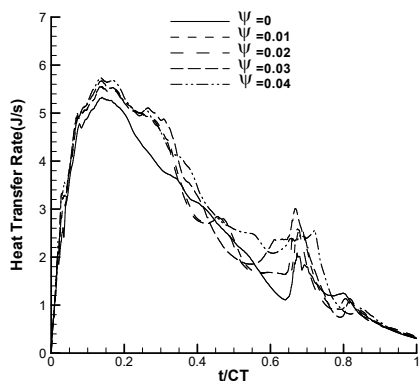
شکل ۹ تغییرات زمان تماس قطره با سطح را بر حسب کسر حجمی در سرعت‌های برخورد مختلف نمایش می‌دهد. منظور از زمان تماس زمانی است که قطره در مجاورت سطح قرار دارد. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت، تاثیر سرعت برخورد روی زمان تماس قطره ناچیز است. به عبارت دیگر زمان تماس قطره با سطح تقریباً مستقل از سرعت برخورد است. همچنین، افزایش کسر حجمی می‌تواند باعث افزایش زمان تماس قطره شود.



شکل ۴- تغییر شکل قطره نانوسیال آب- سیلیکا حین فرایند برخورد بازاء کسر حجمی ۰/۰۱ و سرعت برخورد ۰/۶۳ متر بر ثانیه



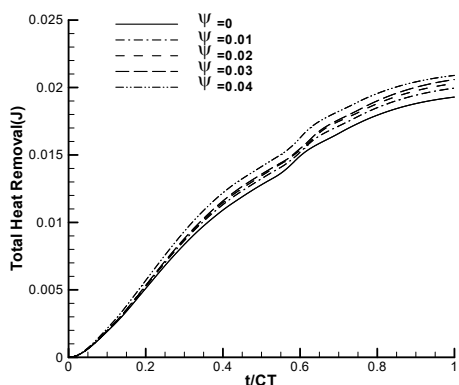
شکل ۵- تغییر شکل قطره نانوسیال آب- سیلیکا روی حین فرایند برخورد بازاء کسر حجمی ۰/۰۴ و سرعت برخورد ۰/۶۳ متر بر ثانیه



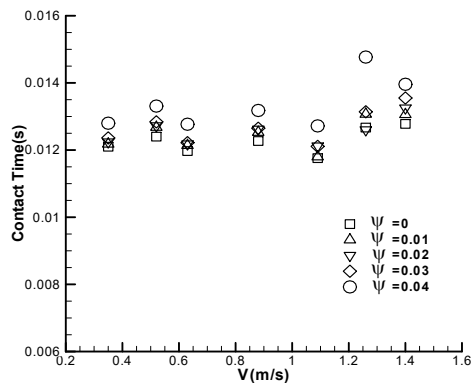
شکل ۱۱- تغییرات آهنگ انتقال گرما از سطح برحسب مقادیر مختلف کسرحجمی در سرعت برخورد ۱/۴ متر بر ثانیه

شکل ۱۱ تغییرات آهنگ انتقال گرما از سطح برحسب مقادیر مختلف کسرحجمی را در سرعت برخورد ۱/۴ متر بر ثانیه ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در این حالت نیز آهنگ انتقال گرما به طور متوسط با افزایش کسرحجمی افزایش می‌یابد. همچنین در این حالت نسبت به حالت قبل با افزایش سرعت برخورد نیروی اینرسی افزایش و در نتیجه ضخامت لایه مرزی کاهش می‌یابد. کاهش ضخامت لایه مرزی سبب افزایش آهنگ انتقال گرما می‌شود.

شکل های ۱۲ و ۱۳ بترتیب تغییرات کل گرمای دفع شده از سطح برحسب مقادیر مختلف کسرحجمی را در سرعت‌های برخورد ۰/۶۳ و ۱/۴ متر بر ثانیه نمایش می‌دهند. با افزایش کسرحجمی کل گرمای دفع شده از سطح افزایش می‌یابد. علت این امر، افزایش آهنگ انتقال گرما و نیز افزایش زمان تماس قطره با افزایش مقدار کسرحجمی می‌باشد. مقایسه شکل های ۱۲ و ۱۳ نشان می‌دهد که با افزایش سرعت برخورد، کل گرمای دفع شده از سطح به دلیل افزایش آهنگ انتقال گرما و ضریب پخش شدن قطره افزایش می‌یابد.



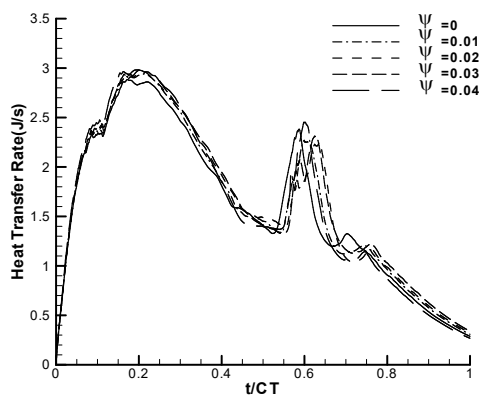
شکل ۱۲- تغییرات کل گرمای دفع شده از سطح برحسب مقادیر مختلف کسرحجمی در سرعت برخورد ۰/۶۳ متر بر ثانیه



شکل ۹- زمان تماس قطره نانوسیال آب-سیلیکا برحسب سرعت برخورد قطره در مقادیر مختلف کسرحجمی

واتچرز<sup>۱</sup> و وسترلینگ<sup>۲</sup> [۳۱]، به صورت تجربی نشان دادند که زمان تماس قطره با سطح در رژیم جوشش لایه‌ای با جذر نسبت چگالی به کشش سطحی متناسب است. افزودن نانوذرات به سیال موجب افزایش این نسبت می‌شود.

شکل ۱۰ تغییرات آهنگ انتقال گرما از سطح برحسب مقادیر مختلف کسرحجمی را در سرعت برخورد ۰/۶۳ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌گردد، با افزایش کسرحجمی نانوذرات، آهنگ انتقال گرما افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه نانوسیال در دمای اشباع است، این افزایش ارتباطی با خواص گرمایی نانوسیال ندارد. با افزودن نانوذرات، چگالی نانوسیال حاصل نسبت به آب افزایش و کشش سطحی آن کاهش می‌یابد. بنابراین عدد وبر افزایش می‌یابد. در این حالت، افزایش نیروی اینرسی نسبت به نیروی کشش سطحی سبب کاهش ضخامت لایه بخار بین سطح و قطره می‌شود. کاهش ضخامت لایه بخار منجر به افزایش گرادیان دما روی سطح و در نتیجه افزایش آهنگ انتقال گرما می‌شود.



شکل ۱۰- تغییرات آهنگ انتقال گرما از سطح برحسب مقادیر مختلف کسرحجمی در سرعت برخورد ۰/۶۳ متر بر ثانیه

<sup>1</sup> Watchers

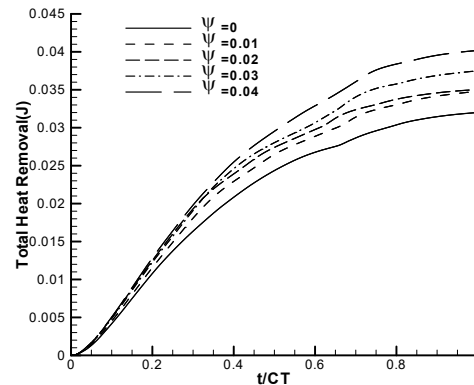
<sup>2</sup> Westerling



میزان آهنگ انتقال گرما در فرایند برخورد قطره نانوسیال با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. در این حالت، افزایش نیروی اینرسی نسبت به نیروی کشش سطحی سبب کاهش ضخامت لایه بخار بین سطح و قطره می‌شود. کاهش ضخامت لایه بخار منجر به افزایش گرادیان دما روی سطح و در نتیجه افزایش آهنگ انتقال گرما می‌شود. با افزایش کسر حجمی کل گرمای دفع شده از سطح نیز افزایش می‌یابد. علت این امر، افزایش آهنگ انتقال گرما و نیز افزایش زمان تماس قطره با افزایش مقدار کسر حجمی می‌باشد.

## ۶- مراجع

- [1] Wong K., and Leon O. De, Applications of Nanofluids: Current and Future. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 21, pp. 1-11, 2010.
- [2] Karl A., Anders K., Rieber M. and Frohn N, Deformation of liquid droplets during collisions with hot walls: Experimental and Numerical Results. *Particle & Particle Systems Characterization*, Vol. 13, pp. 186-190, 1996.
- [3] Harvie D. J. E., and Fletcher D. F., A hydrodynamic and thermodynamic simulation of droplet impacts on hot surfaces, part I: theoretical model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 2633-2642, 2001.
- [4] Harvie D. J. E., and Fletcher D. F., A hydrodynamic and thermodynamic simulation of droplet impacts on hot surfaces, part II: theoretical model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 2643-2659, 2001.
- [5] Ge Y., and Fan L. S., Three-dimensional simulation of impingement of a liquid droplet on a flat surface in the Leidenfrost regime. *Physics of Fluids*, Vol. 17, pp. 1-20, 2005.
- [6] Bianche AL., Chevy F., Clanet C., Lagubeau G., and Quere D., On the elasticity of an inertial liquid shock. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 554, pp. 47-66, 2006.
- [7] Chatzikiyakou D., Walker SP., Narayanan C, and Lakehal D., Comparison of measured and modelled droplet-hot wall interactions. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 1398-1405, 2009.
- [8] Pournaderi P, and Pischevar A. R., A numerical investigation of droplet impact on a heated wall in the film boiling regime. *Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 1525-1538, 2012.
- [9] Hamdan Kh.S., Kim D-E, and Moon S-Ki, Droplets behavior impacting on a hot surface above the Leidenfrost Temperature. *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 80, pp. 338-347, 2015.
- [10] Villegas L. R., Alis R., Lepilliez M., and Tanguy S., A Ghost fluid/level set method for boiling flows and liquid evaporation: Application to the Leidenfrost effect. *Journal of Computational Physics*, Vol. 316, pp. 789-813, 2016.
- [11] discontinuities. *Journal of Computational Physics*, Vol. 172, pp. 71-98, 2001.
- [12] Gibou F., Chen L., Nguyen D. and Banerjee S., A level set based sharp interface method for the multiphase incompressible Navier-Stokes equations with phase change. *Journal of Computational Physics*, Vol. 222, pp. 536-555, 2007.
- [13] Kang M., Fedkiw R. P., and Liu X. D., A boundary condition capturing method for multiphase incompressible flow. *Journal of Scientific Computing*, Vol. 21, pp. 323-369, 2000.
- [14] Tanguy S., Menard T., and Berlemont A., A Level set method for vaporizing two-phase flows. *Journal of Computational Physics*, Vol. 221, pp. 837-853, 2007.
- [15] Xuan Y., and Roetzel W., Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 3701-3707, 2000.
- [16] Pak B. C., and Cho Y. I., Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, Vol. 11, pp. 151-170, 1998.



شکل ۱۲- تغییرات کل گرمای دفع شده از سطح برحسب مقادیر مختلف کسر حجمی در سرعت برخورد ۱/۴ متر بر ثانیه

## ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، برخورد یک قطره نانوسیال آب-سیلیکا در حالت اشباع به سطح داغ در رژیم لیدن فراست شبیه‌سازی می‌شود. در این تحقیق با بکارگیری روش سیال مجازی پرش کمیت‌هایی نظیر چگالی، لزجت، فشار و سرعت در سطح مشترک به خوبی اعمال می‌شود. همچنین برای ردیابی سطح مشترک از روش سطح تراز استفاده می‌شود. اثر نانوذرات به کمک مدل تک‌فازی اعمال می‌شود. نتایج برای مقادیر کسر حجمی کمتر از ۴ درصد و اعداد وبر حدود ۸۰ و کمتر (که از هم پاشیدن قطره اتفاق نمی‌افتد) [۳۱] ارائه شده است.

با افزایش سرعت برخورد به دلیل افزایش نیروی اینرسی میزان پخش شدن قطره افزایش می‌یابد. همچنین، ضخامت لایه بخار کاهش و آهنگ انتقال گرما افزایش می‌یابد. با افزایش کسر حجمی نانوذرات ضریب پخش شدن قطره افزایش می‌یابد. این افزایش ناشی از افزایش عدد وبر در اثر تغییر خواص سیال می‌باشد. میزان افزایش ضریب پخش شدن قطره در سرعت‌های برخورد بالاتر بیشتر است. زمان تماس قطره با سطح تقریباً مستقل از سرعت برخورد است. همچنین، افزایش کسر حجمی می‌تواند باعث افزایش زمان تماس قطره شود.

- [11] Liu Zh., and Qiu Y., Boiling heat transfer characteristics of nanofluids jet impingement on a plate surface. *Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 699-706, 2007.
- [12] Golubovic M. N., Hettiarachchi M., Worek W. M., and Minkowycz W. J., Nanofluids and critical heat flux, experimental and analytical study. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 1281-1288, 2009.
- [13] Aminfar H., Mohammadpourfard M., and Sahraro M., Numerical simulation of nucleate pool boiling on the horizontal surface for nano-fluid using wall heat flux partitioning method. *Computers and Fluids*, Vol. 66, pp. 29-38, 2012.
- [14] Abedini E., Behzadmehr A., Mansouri S. H., and Sarvari S. M. H., Numerical investigation of subcooled flow boiling of a nanofluid. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 64, pp. 232-239, 2013.
- [15] Gerken W., Thomas A., Koratkar N., and Oehlschlaeger M., Nanofluid pendant droplet evaporation: Experiments and modeling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 74, pp. 263-268, 2014.
- [16] Nguyen D., Fedkiw R. P., and Kang M., A boundary condition capturing method for incompressible flame

- [22] Wang X., Xu X., and Choi S.U.S., Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. *Journal of thermophysics and Heat transfer*, Vol. 13, pp. 474-480, 1999.
- [23] Fedkiw R. P., Aslam T., Merriman B., and Osher S., A non-oscillatory Eulerian approach to interfaces in multimaterial flows (the ghost fluid method), *Journal of Computational Physics*, Vol. 152, pp. 457-492, 1999.
- [24] Sussman M., Smereka P., and Osher S., A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow. *Journal of Computational Physics*, Vol. 114, pp. 146-159, 1994.
- [25] Osher S., and Fedkiw R. P., *Level set methods and dynamic implicit surfaces*. Springer-Verlag, 2003.
- [26] Liu X. D., Fedkiw R. P., and Kang M., A boundary condition capturing method for Poisson's equation on irregular domains. *Journal of Computational Physics*, Vol. 160, pp. 151-178, 2000.
- [27] Aslam T., A partial differential equation approach to multidimensional extrapolation. *Journal of Computational Physics*, Vol. 193, pp. 349-355, 2003.
- [28] Li X., Tu J., and Buongiorno J., On two-fluid modeling of nucleate boiling of dilute nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 69, pp. 443-450, 2014.
- [29] Das S., Putra N., and Roetzel W., Pool boiling characteristics of nano-fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 851-862, 2003.
- [30] Sugano T., Physical and chemical properties of Si-SiO<sub>2</sub> transition regions. *Surface Science*, Vol. 98, pp. 145-153, 1980.
- [31] Wachters L., and Westerling N., The heat transfer from a hot wall to impinging water drops in the spheroidal state. *Chemical Engineering Science*, Vol. 21, pp. 1047-1056, 1966.