

مطالعه عددی برخورد قطره آب به سطح با استفاده از یک رویکرد نامیرا در مدل کردن سطح مشترک

محمد امدادی، سید پدram پورنادری*

دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۹

بازنگری: ۱۳۹۶/۰۲/۱۷

پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۳۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۶/۰۳/۱۶

کلمات کلیدی:

برخورد قطره

روش سطح تراز

روش سیال مجازی

زاویه تماس

خلاصه: در این تحقیق، فرآیند برخورد قطره آب به سطح جامد با استفاده از یک رویکرد نامیرا در مدل کردن سطح مشترک، شبیه‌سازی می‌گردد. این رویکرد بر مبنای حل معادلات مومنوم و پیوستگی با اعمال شرایط پرش مناسب در سطح مشترک می‌باشد. از روش سطح تراز برای ردیابی سطح مشترک و از تکنیک سیال مجازی برای اعمال دقیق شرایط پرش در سطح مشترک استفاده می‌شود. بدین ترتیب از میرا کردن کمیت‌ها در عرض سطح مشترک اجتناب و ناپیوستگی آن‌ها در سطح مشترک حفظ می‌شود. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی و عددی، دقت روش عددی را تأیید می‌کند. نتایج حاصل نشان می‌دهند که روش عددی مورد استفاده، در مقایسه با روش حجم سیال پیش‌بینی دقیق‌تری از رفتار قطره در فرآیند برخورد ارائه می‌دهد. اثر زاویه تماس قطره آب با سطح روی فرآیند برخورد بررسی می‌شود. در زوایای تماس کمتر از 90° ، قطره آب پس از برخورد، روی سطح پخش می‌شود. ولی برای زوایای تماس بیشتر از 90° ، قطره پس از پخش شدن شروع به جمع شدن می‌کند. در این حالت، پس از جمع شدن قطره امکان بلند شدن آن از روی سطح وجود دارد. با افزایش زاویه تماس، بیشینه شعاع پخش شدن قطره کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

به راحتی سطح را تر کند یا می‌تواند همانند جیوه تمایلی برای قرار گرفتن روی سطح نداشته باشد. میزان ترشوندگی^۱ هر سطح بوسیله زاویه تماس بین مایع با سطح جامد مشخص می‌گردد [۳].

پدیده برخورد قطره با سطح مورد توجه بسیاری از محققین بوده است. در این مطالعه پیشینه کار در دو بخش آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطالعات گسترده‌ای بصورت آزمایشگاهی در این زمینه انجام گرفته است که در اینجا به مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود. در آزمایش‌هایی که رایبوو و همکاران [۴] انجام دادند، نتایج متفاوتی از برخورد قطره به سطح جامد گزارش دادند. آنها الگوهای متفاوت جریان از جمله تغییر شکل^۲، پخش شدن^۳، برخاست کامل قطره از روی سطح^۴ و برخاست پاره‌ای قطره از روی سطح^۵ را گزارش کردند. کروکس و همکاران [۵] پدیده برخورد قطره به سطح جامد

بسیاری از پدیده‌هایی که در طبیعت وجود دارند دوفازی یا چندفازی محسوب می‌شوند. حرکت قطره باران در روزهای بارانی در هوا و یا حرکت موج بر روی سطح دریا و شکست امواج نمونه‌هایی از مسائل دوفازی می‌باشند که در طبیعت مشاهده می‌شوند. امروزه یکی از مسائل مهم در جریان‌های دوفازی مدل‌سازی برخورد قطره با سطح جامد است. در فرایندهای تماس قطرات سوخت با دیواره سیلندر، خنک کاری از طریق اسپری قطرات، قالب گیری فلزات، ایجاد پوشش سطوح به‌وسیله اسپری، جت مایع در سامانه‌های جریان‌گاز-جامد و بسیاری از فرایندهای دیگر، نیاز به شناخت دینامیک برخورد قطرات مایع با سطح جامد احساس می‌شود [۱ و ۲]. در اثر برخورد قطره به سطح جامد، قطره می‌تواند به سطح بچسبد یا از سطح جدا شود. حتی ممکن است قطرات به یکدیگر متصل شده و یا به قطرات ریزتر تبدیل شوند. با توجه به خصوصیات قطره و سطح احتمال دارد قطره

- 1 Wettability
- 2 Deposition
- 3 Splash
- 4 Rebounding
- 5 Partial rebounding

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sp.pournaderi@yu.ac.ir



خطی^۴ برای دنبال کردن سطح مشترک بهره بردند. آن‌ها نشان دادند که در سرعت‌های بالا در موقع پخش شدن قطره بر روی سطح هر چه مقدار زاویه تماس کوچک‌تر باشد تعداد قطره‌های ریزی که در فضای اطراف پخش می‌شوند کاهش می‌یابد. گونجال و همکاران [۱۰] به بررسی عددی و آزمایشگاهی برخورد قطره با زوایای تماس مختلف پرداختند. بررسی‌ها بر روی سطوح تفلون و شیشه در محدوده عدد وبر ۲۰-۲ و عدد رینولدز ۲۵۰۰-۵۵۰ انجام شده است. آنها از روش حجم سیال در حل عددی استفاده نمودند. در مطالعه آزمایشگاهی با استفاده از دوربین‌های دیجیتال با سرعت بالا، برخورد، پهن‌شدگی قطره و برگشت قطره از روی سطح مشاهده و نتایج ثبت گردید. تطابق خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده گردید. فوجیتسو و همکاران [۱۱] نیز برخورد سه‌بعدی قطرات به سطوح جامد افقی و شیب‌دار را با اعمال زاویه تماس دینامیکی مدل کردند. آن‌ها با در این شبیه‌سازی از روش حجم سیال برای تعقیب سطح آزاد مایع استفاده کردند. در حالت افقی جریان متقارن می‌باشد و هرچه شیب سطح افزایش می‌یابد شکل قطره نامتقارن‌تر می‌گردد و به میزان بیشتری بر روی سطح جامد پخش می‌شود. با افزایش لزجت قطره، از میزان پخش شدن آن کاسته می‌شود. لانکاد و همکاران [۱۲] اثر زاویه تماس استاتیکی و دینامیکی را به صورت عددی و به کمک روش حجم سیال بررسی نمودند. بررسی‌ها بر روی سطح افقی مسطح انجام گردید. آنها نتیجه گرفتند برای سطوح با رطوبت‌پذیری کم، مدل استاتیکی می‌تواند پیش‌بینی دقیق‌تری از گسترش قطره بدهد. برای ترشوندگی بالا، مدل دینامیکی توصیه می‌شود. رویزمان و همکاران [۱۳] الگوریتم جدیدی برای مدل کردن زاویه تماس دینامیکی توسعه دادند که در آن زاویه تماس دینامیکی تابعی از سرعت لحظه‌ای خط تماس می‌باشد. آن‌ها برای مدل کردن سطح مشترک از روش حجم سیال استفاده نمودند. از مدل ارائه شده برای بررسی پخش قطرات با عدد وبر کم استفاده کردند. آن‌ها ضریب پخش، ارتفاع قطره و زاویه تماس دینامیکی را بدست آورده و با نتایج آزمایش‌ها مقایسه کردند. مورادقلو و همکاران [۱۴]، به کمک روش ردیابی جبهه^۵ و با اعمال زاویه تماس دینامیکی برخورد قطره با سطح را به صورت تقارن محوری شبیه‌سازی کردند. آن‌ها اثر تغییر عدد رینولدز و عدد وبر را بر ضریب پخش قطره بررسی کردند. با افزایش عدد وبر ماکزیمم پهن‌شدگی و

را برای ترکیب آب و گلسیرین با درصدهای متفاوت بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد در شرایط کاملاً یکسان هر یک از این قطرات بسته به مقدار لزجت رفتار متفاوتی دارند و رژیم‌های متفاوتی مشاهده می‌شود. افزایش لزجت منجر به کاهش انرژی لازم برای برخاستن از سطح می‌شود. قطره با ضریب لزجت بالا، تمایل دارد روی سطح باقی بماند. گاتن و همکاران [۶] به بررسی آزمایشگاهی برخورد قطره خالص و قطره ناخالص (همراه با افزودنی‌های سطحی^۱) روی سطوح آب‌دوست^۲ و آبگریز^۳ پرداختند. ماهیت سطح نقش بسیار مهمی را در پدید آمدن رژیم‌های مختلف جریان ایفا می‌کند. تغییر در لزجت و کشش سطحی به طور قابل توجهی در رفتار قطره (پهن‌شدگی قطره روی سطح و برگشت قطره پس از برخورد به سطح) تأثیر می‌گذارد. افزودنی‌های سطحی باعث کاهش کشش سطحی و ترشدن بیشتر سطح می‌گردد. با افزایش لزجت از میزان رطوبت‌پذیری قطره بر روی سطح کاسته می‌شود. تسا و همکاران [۷] به صورت تجربی برخورد قطره بر روی سطوح زبر را بررسی نمودند. آنها از طریق کنترل پارامترهای وبر و زبری سطح، رژیم‌های مختلف برخورد را پیش‌بینی کردند و نشان دادند زبری سطح در اعداد وبر بالا (بیشتر از ۱۲۰) تأثیر خود را در رژیم‌های مختلف بیشتر نشان می‌دهد. وادیلو و همکاران [۸] بصورت آزمایشگاهی، به مطالعه برخورد قطره روی سطح جامد با زاویه تماس ۵ تا ۱۷۹ درجه پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که هر چه زاویه تماس به صفر نزدیک‌تر باشد ترشوندگی بیشتر است و هر چه زاویه تماس به ۱۸۰ نزدیک‌تر باشد آبگریزی افزایش می‌یابد.

تحقیقات متعددی نیز بصورت عددی در زمینه پدیده برخورد قطره به سطح انجام شده است. در اولین مدل‌های ارائه شده در این زمینه، از اثر تنش سطحی و زاویه تماس صرف‌نظر شده بود. در مدل‌های بعدی زاویه تماس به صورت یک زاویه ثابت در طول فرآیند برخورد قطره در نظر گرفته شده بود که نسبت به مدل‌های اولیه دقت بیشتری داشت. بوسمن و همکاران [۹] به شبیه‌سازی عددی پدیده پخش قطره روی سطح پرداختند. آنها از متوسط زاویه مشاهده شده در آزمایش‌ها برای انجام شبیه‌سازی استفاده و پدیده پخش را در سرعت‌های بالا مطالعه کردند. در این مدل از الگوریتم ردیابی حجمی

-
- 1 Surfactant
 - 2 Hydrophilic
 - 3 Hydrophobic

4 Linear volume tracking
5 Front tracking

سطح، نیروی اینرسی اولیه تأثیر بیشتری نسبت به زاویه تماس دارد. ولی تأثیر زاویه تماس در فرایند جمع شدن و بلند شدن قطره از روی سطح، قابل توجه می‌باشد. ژانگ و همکاران [۲۰] با استفاده از روش میدان فاز، برخورد قطره به سطح جامد را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها نشان دادند عدد رینولدز نقش غالب را در مرحله پهن‌شدگی قطره ایفا می‌کند. اما در مرحله برگشت قطره نقش عدد وبر مؤثرتر است. میزان ترشوندگی سطح در کل فرایند برخورد تأثیرگذار است. بلند شدن قطره از روی سطح روی سطوح آبگریز و فرایند پخش شدن بدون بلند شدن از روی سطح، روی سطوح آب‌دوست رخ می‌دهد.

همانطور که اشاره شد، مطالعات مختلفی در زمینه شبیه‌سازی برخورد قطره به سطح انجام شده است. در مطالعات قبلی مدل‌سازی سطح مشترک براساس در نظر گرفتن ضخامت برای سطح مشترک و میرا کردن کمیت‌ها در عرض سطح مشترک انجام شده است. کنگ و همکاران [۲۱] با ترکیب روش‌های سطح تراز و سیال مجازی^۳ یک رویکرد نامیرا برای مدل‌سازی سطح مشترک ارائه کردند. بر اساس بررسی انجام شده توسط نویسندگان، تاکنون فرایند برخورد قطره به سطح با استفاده از رویکرد نامیرا در مدل‌سازی سطح مشترک مطالعه نشده است. در این پژوهش، به کمک روش‌های سیال مجازی و سطح تراز، سطح مشترک با حفظ ناپیوستگی کمیت‌ها و بدون میرا کردن آن‌ها مدل می‌شود. نتایج حاصل با نتایج مربوط به روش حجم سیال بر مبنای رویکرد میرا در مدل‌سازی سطح مشترک مقایسه می‌گردد.

۲- معادلات حاکم

۲-۱- معادلات جریان

برای جریان لزج غیرقابل تراکم معادلات جریان که شامل معادلات بقای ممنتوم و پیوستگی می‌باشند به ترتیب به شکل معادلات (۱) و (۲) خواهند بود،

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

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

که در آن \mathbf{u} بردار سرعت، \mathbf{g} بردار گرانش، ρ چگالی سیال، p فشار، t زمان، T عملگر ترانهاده^۴ و $\boldsymbol{\tau}$ تانسور تنش ویسکوز که به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود:

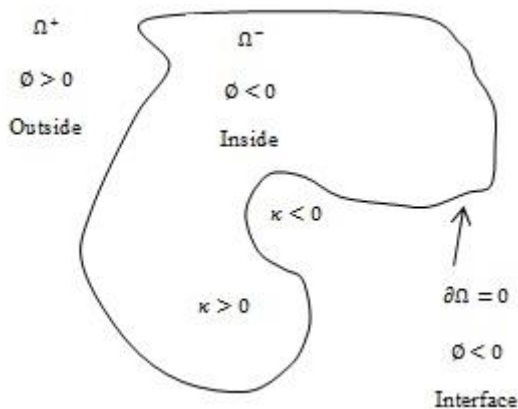
همچنین زمان به تعادل رسیدن قطره پس از برخورد، افزایش می‌یابد. با افزایش عدد رینولدز نیز بیشینه پهن‌شدگی قطره افزایش می‌یابد. ولی تأثیر افزایش عدد رینولدز در افزایش بیشینه پهن‌شدگی قطره، در اعداد رینولدز بیشتر از ۶۰ کاهش می‌یابد. شریکانت و همکاران [۱۵] به مقایسه مدل زاویه تماس استاتیکی برخورد قطره با مدل‌های دینامیکی متفاوت پرداختند. آن‌ها با روش عددی و به کمک روش حجم سیال نشان دادند که نتایج مدل‌های استاتیکی و دینامیکی مطابقت خوبی با کار آزمایشگاهی دارند. همچنین مدل استاتیکی می‌تواند در ترشوندگی‌های کم، پیش‌بینی دقیق‌تری از گسترش قطره ارائه دهد. جعفری و همکاران [۱۶] به بررسی و مقایسه مدل‌های زاویه تماس در پیش‌بینی رفتار قطره پس از برخورد به سطح جامد با استفاده از روش حجم سیال پرداختند. آن‌ها نشان دادند مدل زاویه تماس استاتیکی بهترین مدل برای پیش‌بینی رفتار قطره در محدوده وسیعی از شرایط مختلف برخورد قطره به سطح جامد است. همچنین لزجت سیال در تعیین نوع الگوی برخورد قطره تأثیرگذار است و با افزایش لزجت سیال انرژی بیشتری برای بلند شدن قطره از روی سطح لازم است. مالگارینوس و همکاران [۱۷] روش عددی جدیدی برای مدل کردن زاویه تماس دینامیکی ارائه کردند. در این روش نیازی به تعریف رابطه‌ای برای زاویه تماس نیست و میزان زاویه از طریق تعادل نیروها محاسبه می‌شود. اثر زاویه تماس، بصورت یک عبارت چشمه در رابطه ممنتوم به عنوان یک نیروی شبه چسبندگی اعمال می‌گردد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که این روش در فاز پخش برای اعداد وبر کم (کمتر از ۸۰) بسیار مؤثر است. کلیتز و همکاران [۱۸] نیز به شبیه‌سازی سه بعدی برخورد قطره پرداختند. آن‌ها با استفاده از ترکیب روش حجم سیال و روش سطح تراز^۱ میرا شده و براساس مدل استاتیکی، چهار زاویه تماس متفاوت را بررسی کرده و رفتار قطره را در حین فرایند برخورد با موفقیت شبیه‌سازی کردند. هو و همکاران [۱۹] فرایند دینامیک برخورد قطره روی یک سطح را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. برای دنبال کردن سطح آزاد از روش میدان فاز^۲ کمک گرفتند. مقدار ضریب پخش و بیشینه ارتفاع قطره را در فرایند برخورد با کار تجربی مقایسه کردند و تطابق خوبی بین نتایج مشاهده گردید. اثر زاویه تماس را نیز در فرایند برخورد مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند در مرحله پخش شدن قطره روی

3 Ghost Fluid Method

4 Transpose

1 Level set

2 Phase Field



شکل ۱: تابع سطح تراز در نواحی مختلف

Fig 1: Level set function in different regions

۳-۱- روش سطح تراز

در روش سطح تراز با تعریف یک تابع اسکالر مانند ϕ (تابع سطح تراز) به صورت تابع فاصله علامت‌دار، فضای محاسباتی Ω (همانگونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود)، به سه ناحیه تقسیم می‌گردد.

این تابع در فاز داخل با علامت منفی، در فاز بیرون با علامت مثبت و روی سطح مشترک دارای مقدار صفر می‌باشد. بنابراین مقدار صفر این تابع مشخص‌کننده مکان سطح مشترک است. به صورت ریاضی مکان سطح مشترک را می‌توان به صورت معادله (۷) تعریف کرد:

$$\Gamma = \{X \in \Omega; \phi(X) = 0\} \quad (7)$$

با توجه به اینکه سطح مشترک همواره سطح تراز صفر تابع ϕ می‌باشد، رابطه زیر برقرار است [۲۳ و ۲۴]:

$$\frac{D\phi}{Dt} = 0 \quad (8)$$

رابطه (۸) به صورت معادله (۹) بازنویسی می‌شود:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_{\Gamma} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (9)$$

به علت خطاهای عددی، تابع سطح تراز در طول زمان بعد از حرکت سطح مشترک از حالت تابع فاصله خارج می‌شود. مقداردهی مجدد^۳ تابع سطح تراز راه‌حلی برای رفع این مشکل است. با ثابت نگه داشتن مکان سطح مشترک یا به عبارتی مقدار صفر تابع، کمترین فاصله هر نقطه تا مکان سطح جدید بدست می‌آید. به عبارتی تابع سطح تراز به صورت تابع فاصله اصلاح می‌شود. معمولاً از معادله (۱۰) برای مقداردهی مجدد تابع فاصله استفاده می‌شود [۲۴]:

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

μ لزجت دینامیکی سیال است.

۲-۲- شرایط پرش در سطح مشترک

بر اساس اصل بقای ممنتوم، شرایط پرش در سطح مشترک به

$$\left[\begin{pmatrix} n \\ t \end{pmatrix} (pI - \tau) n^T \right]_{\Gamma} = \begin{pmatrix} \sigma \kappa \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

شکل معادله زیر است [۲۱]:

که در آن σ کشش سطحی، κ انحنای سطح، n بردار نرمال بر سطح مشترک و t بردار مماس بر سطح مشترک می‌باشند. $(\cdot)_{\Gamma}$ نشان‌دهنده پرش در کمیت (\cdot) روی سطح مشترک Γ است.

با فرض لزج بودن جریان و جایگذاری تانسور تنش، معادله (۴) را می‌توان به شکل معادلات (۵) و (۶) بازنویسی کرد [۲۱]:

$$\left[p - 2\mu n \cdot \nabla_{\mathbf{u}} \cdot n^T \right]_{\Gamma} = \sigma \kappa \quad (5)$$

$$\left[\mu \nabla_{\mathbf{u}} \right]_{\Gamma} = \left[\mu \right]_{\Gamma} (\nabla_{\mathbf{u}}) \begin{pmatrix} 0 \\ t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ t \end{pmatrix}^T + \left[\mu \right]_{\Gamma} n^T n (\nabla_{\mathbf{u}}) n^T n - \begin{pmatrix} 0 \\ t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ t \end{pmatrix}^T \left[\mu \right]_{\Gamma} (\nabla_{\mathbf{u}})^T \cdot n^T n \quad (6)$$

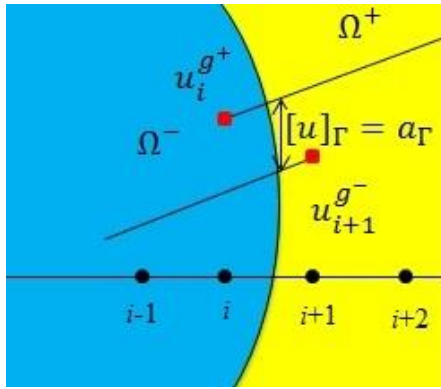
که معادله (۵) بیانگر شرط پرش فشار و معادله (۶) بیان‌کننده شرط پرش مربوط به جملات لزجت روی سطح مشترک می‌باشد.

۳- روش‌های عددی

در این تحقیق، شبیه‌سازی به کمک برنامه نویسی با استفاده از زبان فرترن انجام می‌شود. معادلات مومنتوم استفاده می‌شود. برای رفع مشکل ناپیوستگی کمیت‌ها روی سطح مشترک از روش سیال مجازی استفاده می‌شود. برای به دست آوردن موقعیت سطح مشترک از روش سطح تراز استفاده می‌شود. یکی از مشکلات تابع سطح تراز از دست دادن جرم در طول فرآیند حل می‌باشد. برای رفع این مشکل، از روش وینو^۱ با دقت مرتبه پنج برای گسسته‌سازی جملات جابه‌جایی استفاده می‌شود [۲۲]. همچنین، جملات زمانی در معادلات، با روش رانگ کوتا^۲ با دقت مرتبه سوم گسسته‌سازی می‌شوند [۲۱]. برای گسسته‌سازی جملات دیفیوژن، از تفاضل مرکزی مرتبه دوم استفاده می‌شود.

1 Weighted essentially non-oscillatory

2 Runge-Kutta



شکل ۲: پرش متغیر در سطح مشترک

Fig 2: Jump in a variable at interface

$$\frac{u_{i+2}^+ - u_{i+1}^+}{\Delta x} - \frac{u_{i+1}^+ - u_i^{g+}}{\Delta x} = 0 \quad (16)$$

که مقادیر u_i^{g+} و u_{i+1}^{g-} با توجه به شرط پرش به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$u_{i+1}^{g-} = u_{i+1}^+ - a_\Gamma \quad (17)$$

$$u_i^{g+} = u_i^- + a_\Gamma \quad (18)$$

در نهایت با جایگذاری عبارات بالا، معادلات (۱۵) و (۱۶) به ترتیب به صورت زیر بازنویسی می‌شوند:

$$\frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{\Delta x^2} = \frac{a_\Gamma}{\Delta x^2} \quad (19)$$

$$\frac{u_{i+2} - 2u_{i+1} + u_i}{\Delta x^2} = -\frac{a_\Gamma}{\Delta x^2} \quad (20)$$

برای تعمیم این روش به حالت دوبعدی از رویکرد بعد به بعد^۱ استفاده می‌شود [۲۵]. به عنوان مثال اگر سطح مشترک بین گره‌های (i, j) و $(i+1, j)$ واقع باشد برای محاسبه مقادیر مجازی از معادلات،

$$u_{i+1,j}^{g-} = u_{i+1,j}^+ - a_\Gamma \quad (21)$$

$$u_{i,j}^{g+} = u_{i,j}^- + a_\Gamma \quad (22)$$

و در صورتی که سطح مشترک بین گره‌های (i, j) و

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = S(\phi_0)(1 - |\nabla \phi|) \quad (10)$$

که در آن τ زمان مجازی، ϕ_0 مقدار قبل از اصلاح و $S(\phi_0)$ تابع علامت میراست که به صورت معادله (۱۱) مشخص می‌شود:

$$S(\phi_0) = \frac{\phi_0}{\sqrt{\phi_0^2 + \varepsilon^2}} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱) مقدار $\varepsilon = \max(\Delta x, \Delta y)$ است. با حل معادله مقداردهی مجدد تا حالت دائم، شرط تابع فاصله $(|\nabla \phi| = 1)$ برای تابع سطح تراز ارضاء می‌شود. اغلب با چند تکرار، حل پایای معادله مقداردهی مجدد بدست می‌آید.

با استفاده از تابع ϕ ، بردار نرمال واحد \mathbf{n} و بردار مماسی واحد \mathbf{t} در سطح مشترک با استفاده از معادلات زیر بدست می‌آیند:

$$\mathbf{n} = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \quad (12)$$

$$\mathbf{t} = \begin{pmatrix} n_2 \\ -n_1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

خمیدگی یا انحنای سطح مشترک به صورت گرادیان بردار نرمال محاسبه می‌شود:

$$\kappa = -\nabla \cdot \mathbf{n} \quad (14)$$

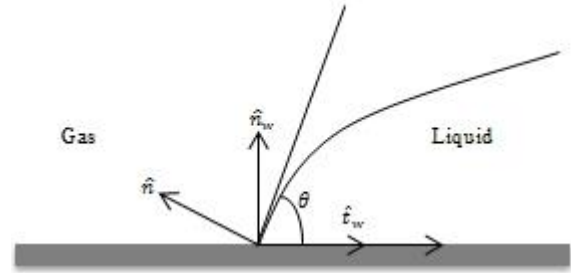
۲-۳- روش سیال مجازی

در این روش، اعمال ناپیوستگی‌ها بدون نیاز به در نظر گرفتن ضخامت برای سطح مشترک انجام می‌شود. به عبارتی دیگر کمیت‌ها در سطح مشترک میرا نمی‌شوند. در این بخش، روش سیال مجازی [۲۱ و ۲۵] به اختصار توصیف می‌شود. برای توضیح این روش، مطابق شکل ۲ متغیر u را که در عرض سطح مشترک ناپیوسته است در نظر بگیرید. فرض کنید $[u]_\Gamma = a_\Gamma$. برای نمونه، گسسته‌سازی معادله ساده $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0$ توضیح داده می‌شود. گسسته‌سازی مناسب با توجه به موقعیت سطح مشترک انجام می‌شود. وقتی که سطح مشترک بین گره‌های x_i, x_{i+1} واقع شده باشد، مشتق u در نقاط x_{i+1}, x_i به ترتیب بدین صورت محاسبه می‌گردد:

$$\frac{u_{i+1}^{g-} - u_i^-}{\Delta x} - \frac{u_i^- - u_{i-1}^-}{\Delta x} = 0 \quad (15)$$

۴- الگوریتم حل عددی

شکل ۴، الگوریتم حل عددی را برای شبیه‌سازی برخورد قطره به سطح با استفاده از یک رویکرد نامیرا در مدل کردن سطح مشترک ارائه می‌شود. در هنگام محاسبه میدان‌های سرعت و فشار باید شرایط پرش با استفاده از روش سیال مجازی اعمال شوند.



شکل ۳: زاویه تماس بین قطره و سطح

Fig 3 : Contact angle between droplet and surface

۵- نتایج

۵-۱- تعریف مسأله

در تحقیق حاضر، برخورد قطره به سطح جامد در حالی که قطره و سطح در شرایط دمایی یکسانی قرار دارند شبیه‌سازی می‌شود. شکل ۵ دامنه محاسباتی و شرایط مرزی را نشان می‌دهد. قطر اولیه قطره D_0 و سرعت برخورد آن V_0 می‌باشد. با توجه به هندسه مسأله، از معادلات حاکم در حالت تقارن محوری استفاده می‌شود. از شرط مرزی تقارن در مرز سمت چپ استفاده می‌شود. در مرزهای بالا و سمت راست دامنه، شرط مرز آزاد (گرادیان صفر برای سرعت‌ها) و روی سطح جامد شرط عدم لغزش اعمال می‌شود.

۵-۲- مطالعه شبکه

ابتدا به منظور مطالعه شبکه، فرایند برخورد قطره آب به قطر ۳ mm، سرعت برخورد ۰/۷ m/s و زاویه تماس ۱۱۰ درجه با سطح شبیه‌سازی می‌شود. چگالی، لزجت و کشش سطحی قطره به ترتیب 1000 kgm^{-3} ، $10^{-3} \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ و 0.073 Nm^{-1} می‌باشند. ناحیه محاسباتی $1/20.5 \text{ kgm}^{-3}$ و $0.00151 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ می‌باشند. ناحیه محاسباتی $8 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده است. عدد بر $We = \rho V_0^2 D_0 / \sigma$ متناظر برای این مسأله برابر با ۲۰ است. یکی از کمیت‌های مهم در مطالعه برخورد قطرات با سطوح، قطر پخش شدن قطره است که مبین میزان پهن شدن قطره روی سطح است. بنابراین، در تعریف این کمیت قطر قطره در تماس با سطح ملاک می‌باشد. شکل ۶ تغییرات این کمیت را در مرحله پخش شدن قطره برای شبکه‌های مختلف نشان می‌دهد. با گذشت زمان، تحت اثر نیروی اینرسی قطر پخش شدن قطره افزایش می‌یابد. چنانچه مشاهده می‌شود، اختلاف نتایج عددی برای شبکه‌های $R_0 / \Delta x = 180$ و $R_0 / \Delta x = 90$ ناچیز می‌باشد. بنابراین در تمام شبیه‌سازی‌ها از شبکه با رزولوشن $R_0 / \Delta x = 90$ استفاده می‌شود.

$(i, j + 1)$ واقع باشد برای محاسبه مقادیر مجازی از معادلات،

$$u_{i,j+1}^{g-} = u_{i,j}^{g+} - a_{\Gamma} \quad (23)$$

$$u_{i,j}^{g+} = u_{i,j}^{g-} + a_{\Gamma} \quad (24)$$

استفاده می‌شود.

۳-۳- زاویه برخورد استاتیکی

یکی از ساده‌ترین و رایج‌ترین مدل‌ها، مدل زاویه برخورد استاتیکی (زاویه تعادلی) است. این مدل زاویه قطره روی خط سه گانه (خط تلاقی سه فاز جامد، مایع و گاز) را در طول برخورد ثابت در نظر می‌گیرد. این زاویه که در شکل ۳ نشان داده شده است، نمایانگر مقدار ترشوندگی سطح جامد می‌باشد.

از معادله زیر برای اعمال زاویه تماس استفاده می‌شود [۱۷ و ۱۸]:

$$\mathbf{n} = \cos(\theta)\mathbf{n}_w + \sin(\theta)\mathbf{t}_w \quad (25)$$

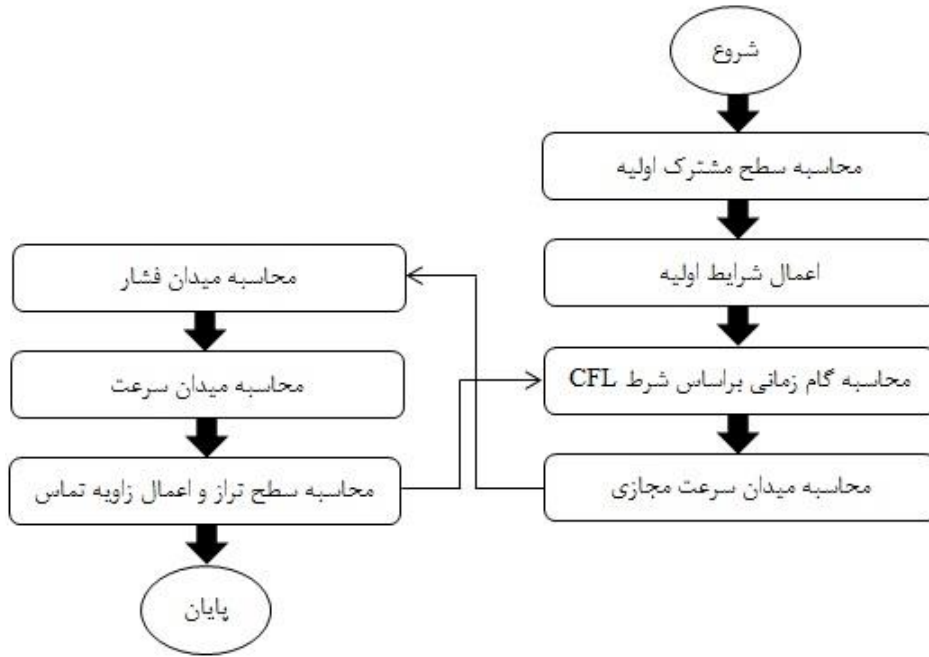
که θ زاویه تماس، \mathbf{n}_w بردار نرمال واحد روی دیوار و \mathbf{t}_w بردار مماسی واحد روی دیوار می‌باشد.

با ضرب داخلی \mathbf{n}_w در طرفین معادله (۲۵) و با علم به اینکه که بردارهای واحد روی دیوار بر هم عمود می‌باشند، داریم:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_w = \cos(\theta) \quad (26)$$

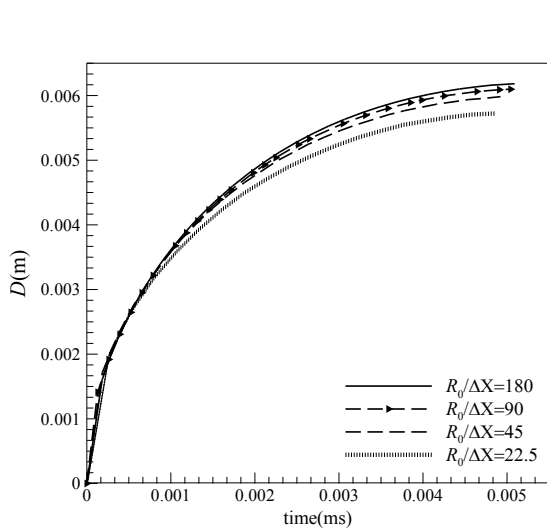
با توجه به رابطه (۱۲) و مقدار بردار نرمال واحد روی دیوار $\mathbf{n}_w = (0, -1)^T$ و با توجه به اینکه خواص تابع فاصله $|\nabla \phi| = 1$ می‌باشد. شرط مرزی نیومن^۱ برای تابع سطح تراز به صورت معادله زیر بدست می‌آید:

$$\phi_y = -\cos(\theta) \quad (27)$$



شکل ۴: الگوریتم حل عددی

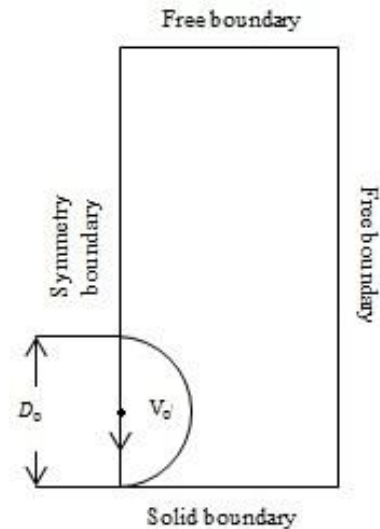
Fig 4: Numerical solution algorithm



شکل ۶: تغییرات قطر پخش شدن قطره با زمان برای شبکه‌های مختلف

Fig 6: Variations of the droplet spreading diameter versus time for various grids

سرعت برخورد 0.7 m/s که معادل عدد وبر ۲۰ می‌باشد، شبیه‌سازی می‌شود. شکل ۷ نتایج شبیه‌سازی را به همراه نتایج آزمایشگاهی [۶] در مراحل مختلف فرآیند برخورد نمایش می‌دهد. ابتدا قطره تحت اثر نیروی اینرسی روی سطح پخش می‌شود. نیروهای لزجت و کشش سطحی در برابر پخش شدن قطره مقاومت می‌کنند. با پخش شدن



شکل ۵: دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

Fig 5: Computational domain and boundary conditions

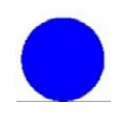



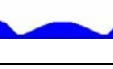
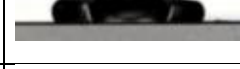




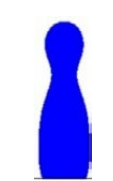

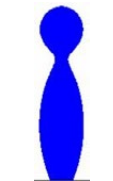

۳-۵- بررسی اعتبار مدل عددی

در این بخش، اعتبار مدل عددی از طریق مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی و عددی بررسی می‌شود. ابعاد دامنه محاسباتی برای مقایسه با نتایج آزمایشگاهی [۸] $20 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ می‌باشد و پارامترهای شبیه‌سازی مشابه حالت قبل است. ابتدا مسأله برای

به حداکثر میزان پخش‌شدگی خود رسیده و با غلبه نیروی ناشی از کشش سطحی بر نیروی اینرسی فرآیند جمع شدن قطره آغاز می‌شود. با گذشت زمان قطره جمع شده و سرانجام تحت اثر نیروی اینرسی در آستانه بلند شدن از روی سطح قرار می‌گیرد. چنانچه ملاحظه می‌گردد، مدل عددی به خوبی منحنی قطره را در مراحل مختلف برخورد باز تولید می‌نماید. لازم به ذکر است که اختلاف نتایج در بعضی زمان‌ها به دلیل ارائه نتایج به صورت دوبعدی-تقارن محوری می‌باشد و با دوران منحنی قطره حول محور تقارن، شکل‌های سه بعدی مشابه حاصل می‌شوند.

در شکل ۸ نتایج شبیه‌سازی به همراه نتایج آزمایشگاهی [۶] برای سرعت برخورد $1/39 \text{ m/s}$ (عدد وبر ۸۰) نشان داده شده است. در این حالت، به دلیل افزایش نیروی اینرسی، بیشینه قطر پخش شدن قطره افزایش می‌یابد. همچنین در مقایسه با حالت قبل، مدت زمان کمتری طول می‌کشد تا قطره از روی سطح بلند شود. در این حالت، در مرحله بلند شدن قطره از روی سطح، به دلیل غلبه نیروی اینرسی بر نیروی کشش سطحی، یک قطره کوچک از قطره اولیه جدا می‌گردد. چنانچه ملاحظه می‌گردد، روش عددی مراحل مختلف برخورد قطره را به خوبی پیش‌بینی می‌نماید.

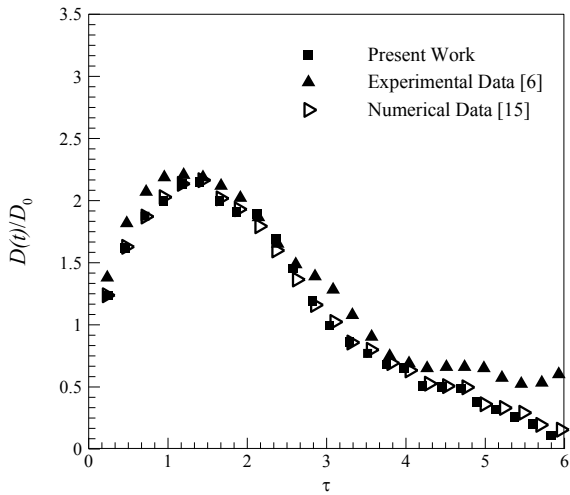
شکل ۹ قطر پخش شدن قطره در حالت بی‌بعد $(D(t)/D_0)$ را نسبت به زمان بی‌بعد $(\tau = tV_0/D_0)$ برای سرعت برخورد 0.17 m/s نمایش می‌دهد که مقادیر عددی آن در جدول ۱ نیز نمایش داده شده است. در بخش قابل توجهی از فرآیند برخورد، تطابق خوبی بین نتایج کار حاضر با نتایج آزمایشگاهی [۸] وجود دارد. در بخش انتهایی فرآیند (بازه زمانی ۱۷ تا ۲۳ میلی‌ثانیه)، که قطره در مرحله بلند شدن از سطح قرار دارد، اختلاف بین نتایج کار حاضر و آزمایشگاهی افزایش می‌یابد. در این تحقیق از مدل زاویه تماس استاتیکی استفاده شده است. در این مدل یک زاویه تماس ثابت برای کل فرآیند برخورد در نظر گرفته می‌شود. در عمل، زاویه تماس قطره با سطح در طول فرآیند برخورد تغییر می‌کند. مدل‌های دینامیکی زاویه تماس را به صورت متغیر و براساس سرعت خط تماس محاسبه می‌کنند [۱۲]. اختلاف نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی را می‌توان ناشی از دقیق نبودن مدل زاویه تماس استاتیکی خصوصاً در مرحله بلند شدن قطره دانست. در شکل ۹ نتایج عددی شریکانت و همکاران [۱۵] نیز ارائه شده است. آن‌ها در شبیه‌سازی خود از روش حجم سیال بر

| نتایج عددی | نتایج آزمایشگاهی | زمان |
|---|--|--------|
|  |  | 0 ms |
|  |  | 2 ms |
|  |  | 5.5 ms |
|  |  | 10 ms |
|  |  | 14 ms |
|  |  | 17 ms |
|  |  | 23 ms |

شکل ۷: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی برخورد قطره آب

روی سطح جامد ($We=20, V_0=0.17 \text{ m/s}, D_0=3 \text{ mm}$)
Fig 7: Comparison of the experimental and numerical results for the water droplet impact on the solid surface ($We=20, V_0=0.17 \text{ m/s}, D_0=3 \text{ mm}$)

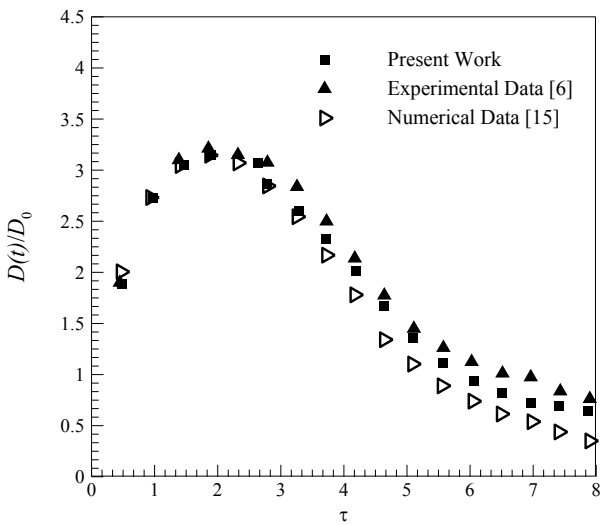
بیشتر قطره، نیروی مقاوم ناشی از کشش سطحی به دلیل افزایش انحناء در لبه قطره افزایش می‌یابد. سرانجام در زمان $5/5 \text{ ms}$ قطره



شکل ۹: تغییرات قطر پخش شدن قطره آب با زمان در

فرآیند برخورد ($We=20, V_0=0.7 \text{ m/s}, D_0=3 \text{ mm}$)

Fig 9: Variations of the water droplet spreading diameter versus time in the impact process ($We=20, V_0=0.7 \text{ m/s}, D_0=3 \text{ mm}$)



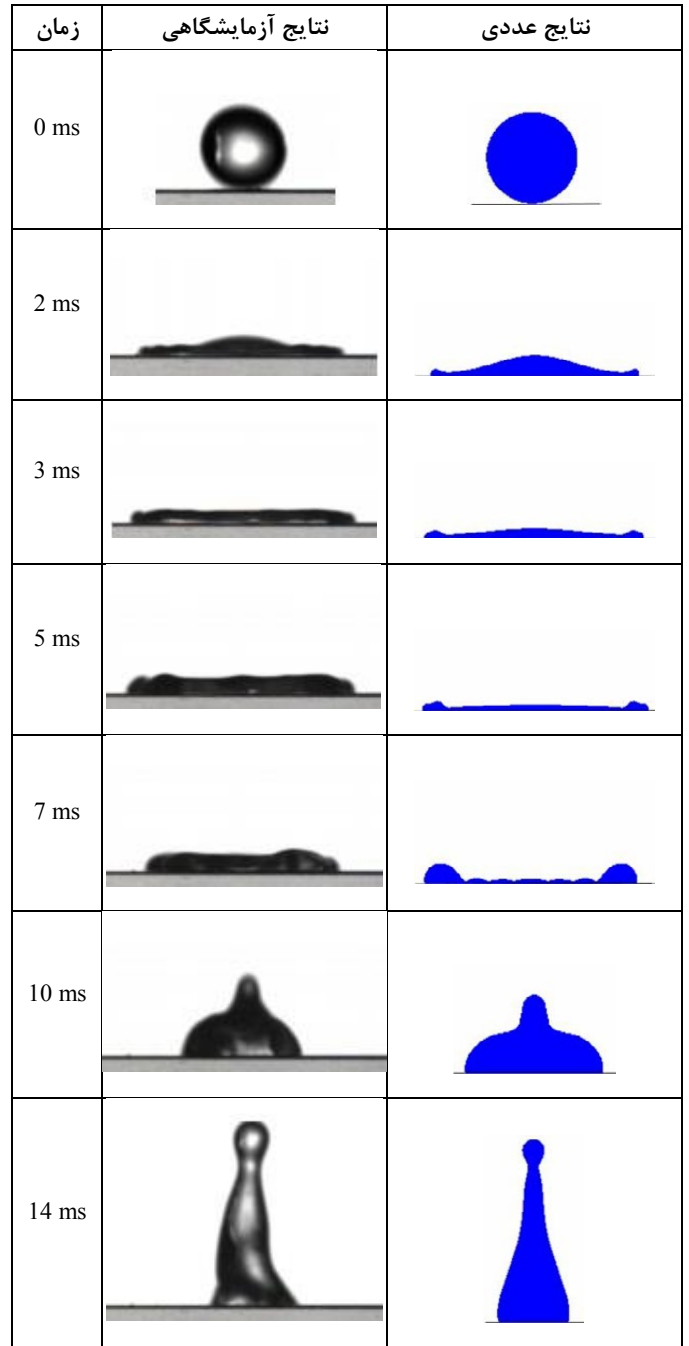
شکل ۱۰: تغییرات قطر پخش شدن قطره آب با زمان در

فرآیند برخورد ($We=80, V_0=1.39 \text{ m/s}, D_0=3 \text{ mm}$)

Fig 10: Variations of the water droplet spreading diameter versus time in the impact process ($We=80, V_0=1.39 \text{ m/s}, D_0=3 \text{ mm}$)

می‌شوند. همچنین، کشش سطحی به صورت یک نیروی حجمی در سطح مشترک اعمال می‌شود. در تمام مراحل فرآیند برخورد، تطابق خوبی بین نتایج کار حاضر با نتایج عددی [۱۵] وجود دارد.

شکل ۱۰ آهنگ پخش قطره را نسبت به زمان بی‌بعد برای سرعت



شکل ۸: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی برخورد قطره آب

روی سطح جامد ($We=80, V_0=1.39 \text{ m/s}, D_0=3 \text{ mm}$)

Fig8 :Comparison of the experimental and numerical results for the water droplet impact on the solid surface ($We=80, V_0=1.39 \text{ m/s}, D_0=3 \text{ mm}$)

مبنای رویکرد میرا^۱ در مدل‌سازی سطح مشترک استفاده کردند. در این رویکرد، با در نظر گرفتن ضخامت

برای سطح مشترک، کمیت‌ها در عرض سطح مشترک میرا

1 Smearred out

جدول ۱: مقادیر عددی قطر بی بعد پخش شدن قطره روی سطح جامد ($We=20, V_0=0.7 \text{ m/s}, D_0=3 \text{ mm}$)

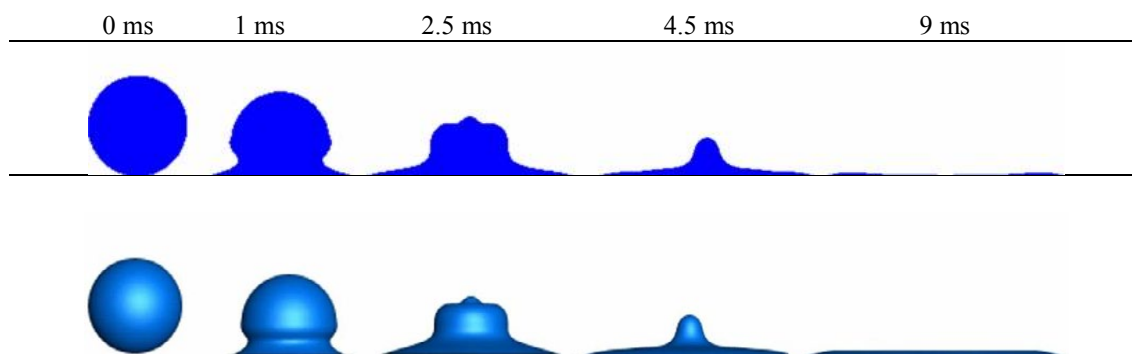
Table 1: Numerical values of the droplet non-dimensional spreading diameter ($We=20, V_0=0.7 \text{ m/s}, D_0=3 \text{ mm}$)

| زمان بی بعد | قطر بی بعد پخش شدن قطره (نتایج آزمایشگاهی [۸]) | قطر بی بعد پخش شدن قطره (نتایج عددی [۱۵]) | قطر بی بعد پخش شدن قطره (نتایج کار حاضر) |
|-------------|--|---|--|
| ۰/۵۰ | ۱/۸۲۱۷ | ۱/۶۸۵۴ | ۱/۶۷۸۳ |
| ۱ | ۲/۲۰۹۰ | ۲/۰۶۵۶ | ۲/۰۲۹۷ |
| ۱/۵ | ۲/۱۶۶۰ | ۲/۱۰۸۷ | ۲/۰۸۷۱ |
| ۲ | ۱/۹۵۸۰ | ۱/۸۷۹۱ | ۱/۹۰۰۶ |
| ۲/۵ | ۱/۵۶۳۵ | ۱/۴۹۱۸ | ۱/۵۲۰۵ |
| ۳ | ۱/۳۱۹۷ | ۱/۰۹۰۲ | ۱/۰۲۵۶ |
| ۳/۵ | ۰/۹۴۶۷ | ۰/۸۲۴۸ | ۰/۷۷۴۶ |
| ۴ | ۰/۷۰۲۹ | ۰/۶۴۵۵ | ۰/۶۳۱۱ |
| ۴/۵ | ۰/۶۵۹۸ | ۰/۴۹۴۹ | ۰/۵۰۲۰ |
| ۵ | ۰/۶۵۲۶ | ۰/۳۳۷۱ | ۰/۳۳۷۱ |
| ۵/۵ | ۰/۵۲۳۶ | ۰/۲۹۴۱ | ۰/۲۲۹۵ |
| ۶ | ۰/۶۳۸۳ | ۰/۱۶۵۰ | ۰/۱۰۰۴ |

جدول ۲: مقادیر عددی قطر بی بعد پخش شدن قطره روی سطح جامد ($We=80, V_0=1.39 \text{ m/s}, D_0=3 \text{ mm}$)

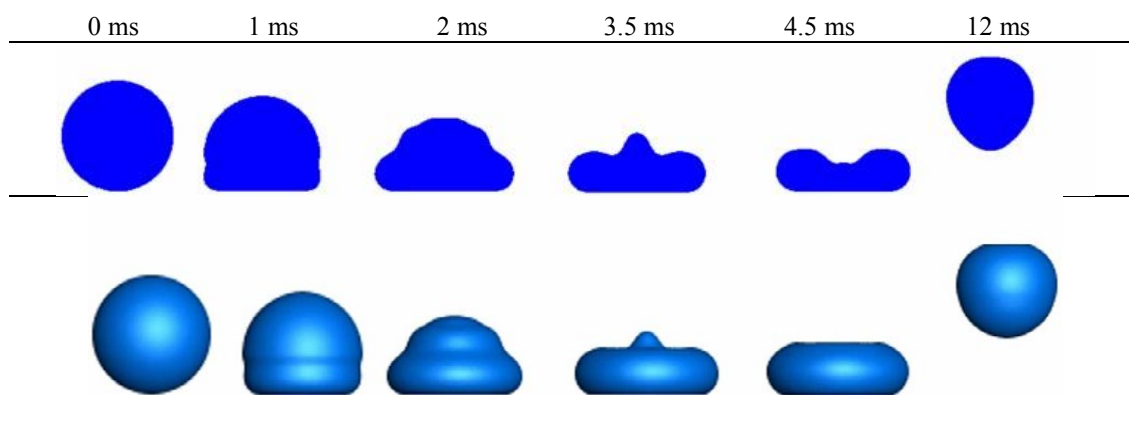
Table 2: Numerical values of the droplet non-dimensional spreading diameter ($We=80, V_0=1.39 \text{ m/s}, D_0=3 \text{ mm}$)

| زمان بی بعد | قطر بی بعد پخش شدن قطره (نتایج آزمایشگاهی [۸]) | قطر بی بعد پخش شدن قطره (نتایج عددی [۱۵]) | قطر بی بعد پخش شدن قطره (نتایج کار حاضر) |
|-------------|--|---|--|
| ۰/۵۰ | ۱/۹۸۲۶ | ۲/۰۹۳۲ | ۱/۹۶۴۱ |
| ۱ | ۲/۶۲۸۱ | ۲/۷۷۵۶ | ۲/۷۵۷۲ |
| ۱/۵ | ۳/۱۲۶۰ | ۳/۰۷۰۷ | ۳/۰۶۱۵ |
| ۲ | ۳/۱۹۹۸ | ۳/۱۲۶۰ | ۳/۱۳۵۲ |
| ۲/۵ | ۳/۱۲۶۰ | ۲/۹۸۷۷ | ۳/۰۸۹۱ |
| ۳ | ۲/۹۵۰۸ | ۲/۱۷۱۱ | ۲/۷۳۸۷ |
| ۳/۵ | ۲/۶۷۴۲ | ۲/۳۵۱۴ | ۲/۴۸۰۵ |
| ۴ | ۲/۲۸۷۰ | ۱/۹۲۸۲ | ۲/۱۳۹۳ |
| ۴/۵ | ۱/۹۰۸۸ | ۱/۴۸۴۶ | ۱/۷۸۸۹ |
| ۵ | ۱/۵۲۱۵ | ۱/۱۴۳۴ | ۱/۴۲۹۳ |
| ۵/۵ | ۱/۳۰۰۲ | ۰/۹۱۲۹ | ۱/۱۵۲۷ |
| ۶ | ۱/۱۳۴۲ | ۰/۷۴۶۹ | ۰/۹۵۹۰ |
| ۶/۵ | ۱/۰۱۴۳ | ۰/۶۱۹۸ | ۰/۸۲۰۷ |
| ۷ | ۰/۹۶۸۲ | ۰/۵۳۴۸ | ۰/۷۲۵۸ |
| ۷/۵ | ۰/۸۲۹۹ | ۰/۴۱۵۰ | ۰/۶۹۱۶ |



شکل ۱۱: مقایسه نتایج شبیه‌سازی (ردیف اول) با نتایج عددی مرجع [۱۸] (ردیف دوم) ($We=3.83$, $v_0=0.35$ m/s, $D_0=2.28$ mm, $\theta=50^\circ$)

Fig 11: Comparison of the simulation (the first row) and numerical [18] (the second row) results ($We=3.83$, $v_0=0.35$ m/s, $D_0=2.28$ mm, $\theta=50^\circ$)



شکل ۱۲: مقایسه نتایج شبیه‌سازی (ردیف اول) با نتایج عددی مرجع [۱۸] (ردیف دوم) ($We=3.83$, $v_0=0.35$ m/s, $D_0=2.28$ mm, $\theta=179^\circ$)

Fig 12: Comparison of the simulation (the first row) and numerical [18] (the second row) results ($We=3.83$, $v_0=0.35$ m/s, $D_0=2.28$ mm, $\theta=179^\circ$)

این امر استفاده از تابع هموار سطح تراز برای محاسبه انحناء می‌باشد. همچنین در این تحقیق، با استفاده از یک رویکرد نامیرا مبتنی بر تکنیک سیال مجازی شرایط پخش مناسب در سطح مشترک اعمال می‌شوند به نحوی که ناپیوستگی کمیت‌هایی نظیر چگالی، لزجت و فشار در سطح مشترک حفظ می‌گردد. در حالی که در تحقیق عددی شریکانت و همکاران، با توجه به استفاده از رویکرد میرا در مدل‌سازی سطح مشترک، کمیت‌های مذکور در سطح مشترک پیوسته در نظر گرفته می‌شوند. زاویه تماس در روش‌های سطح تراز و حجم سیال با استفاده از معادله (۲۶) اعمال می‌شود. بردار نرمال در این رابطه در روش سطح تراز با استفاده از تابع هموار و پیوسته سطح تراز و در روش حجم سیال با استفاده از تابع کسر حجمی (که در سطح

برخورد $1/39$ m/s نمایش می‌دهد و مقادیر عددی آن نیز در جدول ۲ آورده شده است. تطابق خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی [۶] مشاهده می‌شود. مانند حالت قبل، در مراحل انتهایی که قطره در مرحله بلند شدن از سطح قرار دارد، اختلاف بین نتایج بیشتر است. در این شکل نتایج عددی شریکانت و همکاران [۱۵] نیز ارائه شده است. چنانچه ملاحظه می‌گردد، نتایج کار حاضر تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. این تفاوت بین نتایج را می‌توان به اختلاف روش‌های عددی استفاده شده نسبت داد. در تحقیق حاضر، از روش سطح تراز برای ردیابی سطح مشترک استفاده می‌شود. در حالی که در کار انجام شده توسط شریکانت و همکاران از روش حجم سیال برای این منظور استفاده شده است. روش سطح تراز در مقایسه با روش حجم سیال، نیروی کشش سطحی را دقیق‌تر محاسبه می‌نماید. علت

از لزجت کمتر است. بنابراین در پایان فرایند جمع شدن، قطره به واسطه نیروی اینرسی از روی سطح بلند می‌شود. با افزایش زاویه تماس، مدت زمان کمتری طول می‌کشد تا قطره از روی سطح بلند شود.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، فرآیند برخورد قطره آب به سطح با استفاده از یک رویکرد نامیرا در مدل‌سازی سطح مشترک، شبیه‌سازی می‌گردد. این رویکرد مبتنی بر حل معادلات بقاء جرم و مومنتوم در حالت تراکم ناپذیر و اعمال شرایط پرش مناسب در سطح مشترک می‌باشد. از روش سطح تراز برای ردیابی سطح مشترک و از تکنیک سیال مجازی برای اعمال شرایط پرش در سطح مشترک استفاده می‌شود. تحقیقات عددی که تاکنون در زمینه برخورد قطرات با سطوح انجام شده‌اند بر اساس میرا کردن خواص سیال و جریان نظیر چگالی، لزجت و فشار در سطح مشترک می‌باشند. نتایج مهم این تحقیق به شرح زیر می‌باشند: مدل عددی با دقت خوبی می‌تواند رفتار قطره را در مراحل مختلف برخورد برای اعداد وبر کم و متوسط (که از هم پاشیدگی قطره اتفاق نمی‌افتد) پیش‌بینی نماید.

۱- روش سطح تراز مبتنی بر رویکرد نامیرا در مدل کردن سطح مشترک، در مقایسه با روش حجم سیال نتایج دقیق‌تری در شبیه‌سازی فرآیند برخورد قطره خصوصاً در سرعت‌های برخورد بالاتر ارائه می‌دهد.

۲- با افزایش سرعت برخورد، میزان پخش شدن قطره روی سطح افزایش می‌یابد. همچنین، مدت زمان کمتری طول می‌کشد تا قطره از روی سطح بلند شود.

۳- زاویه تماس نقش مهمی در فرآیند برخورد قطره آب به سطح دارد. در زوایای تماس کمتر از 90° ، قطره تمایل به پخش شدن روی سطح دارد. در حالی که برای زوایای بیشتر از 90° ، قطره پس از پخش شدن، شروع به جمع شدن می‌کند. در این حالت احتمال بلند شدن قطره از روی سطح نیز وجود دارد.

۴- با افزایش زاویه تماس، میزان پخش شدن قطره روی سطح کاهش می‌یابد.

۵- با افزایش زاویه تماس، مدت زمان کمتری طول می‌کشد تا قطره از روی سطح بلند شود.

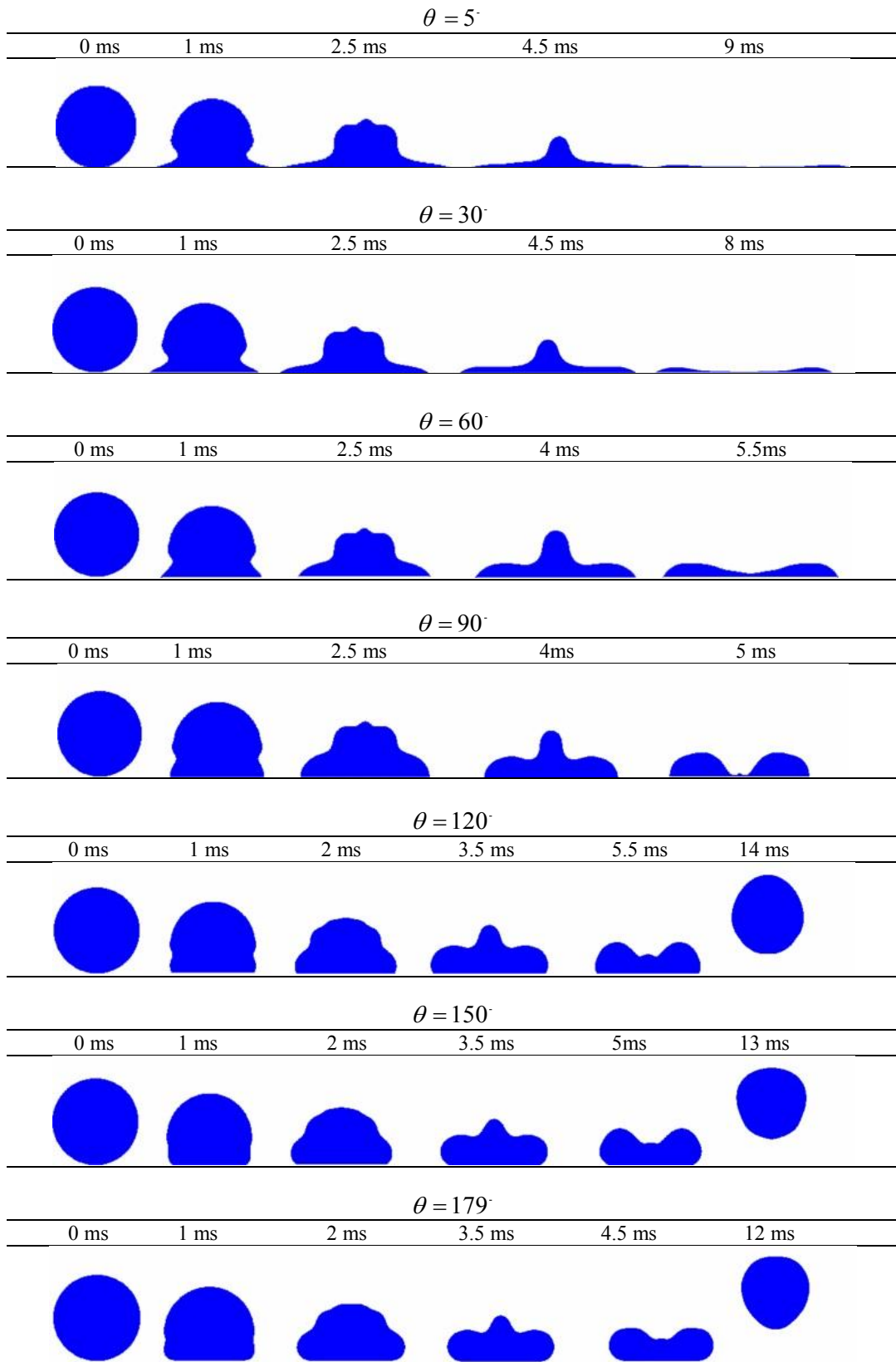
مشترک ناپیوسته می‌باشد) محاسبه می‌شود. بنابراین، اعمال زاویه تماس نیز در روش سطح تراز دقیق‌تر می‌باشد.

در ادامه نتایج شبیه‌سازی با نتایج عددی مرجع [۱۸] مقایسه می‌گردد. این تحقیق، بر مبنای ترکیب روش‌های حجم سیال و سطح تراز در حالت میرا شده می‌باشد. قطر و سرعت برخورد قطره به ترتیب $2/28 \text{ mm}$ و $0/35 \text{ m/s}$ و خواص سیال مشابه قبل می‌باشد. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نتایج شبیه‌سازی را به همراه نتایج عددی مرجع [۱۸] به ترتیب برای زوایای تماس ۵ و ۱۷۹ درجه نمایش می‌دهند. تطابق خوبی بین نتایج مشاهده می‌گردد. در شکل ۱۲ اختلاف ظاهری شکل قطره در لحظه $4/5$ میلی‌ثانیه به دلیل ارائه نتایج به صورت دوبعدی-تقارن محوری می‌باشد و با دوران منحنی قطره حول محور تقارن، شکل سه بعدی مشابه نتیجه آزمایشگاهی حاصل می‌شود.

۴-۵- مطالعه اثر زاویه تماس

زاویه تماس، تحت تأثیر برهمکنش بین جامد و مایع و نیز مشخصات فصل مشترک بین فازهای گاز، مایع و جامد قرار دارد. این برهمکنش‌ها به واسطه نیروهای جاذبه و چسبندگی که در واقع نیروهای بین مولکولی هستند، اتفاق می‌افتند. بنابراین با تغییر جنس سطح، زاویه تماس قطره با سطح نیز تغییر می‌کند. در این بخش، تأثیر زاویه تماس بر هیدرودینامیک فرآیند برخورد بررسی می‌شود. قطر و سرعت برخورد قطره به ترتیب $2/28 \text{ mm}$ و $0/35 \text{ m/s}$ و خواص سیال مشابه قبل می‌باشد.

شکل ۱۳ نتایج شبیه‌سازی را برای زوایای تماس مختلف نمایش می‌دهد. براساس نتایج حاصل، با افزایش زاویه تماس ضریب پخش شدن قطره (D_{\max} / D_0) روی سطح کاهش می‌یابد. شکل ۱۴ نیز به صورت کمی میزان کاهش ضریب پخش شدن قطره را با افزایش زاویه تماس نمایش می‌دهد. با توجه به این کاهش، می‌توان گفت که با افزایش زاویه تماس میزان ترشوندگی سطح توسط قطره کاهش می‌یابد. در زوایای تماس کمتر از 90° به دلیل غلبه نیروی اینرسی بر نیروی کشش سطحی، قطره به طور کامل روی سطح پخش شده و به حالت تعادل می‌رسد. ولی در زوایای تماس بیشتر از 90° ، پس از رسیدن قطره به حداکثر شعاع پخش شدن به دلیل غلبه نیروی کشش سطحی بر نیروی اینرسی، قطره شروع به جمع شدن می‌کند. با توجه به اینکه قطره تماس کمتری با سطح دارد، اثر نیروهای ناشی



شکل ۱۳: تاثیر زاویه تماس در فرآیند برخورد قطره آب ($We = 3/83$, $V_0 = 0/30$ m/s, $D_0 = 2/28$ mm)

Fig 13: Effect of the contact angle on the water droplet impact process

مراجع

[1] M. Pasandideh-Fard, S. Chandra, J. Mostaghimi, A three-dimensional model of droplet impact and solidification, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(11) (2002) 2229-2242.

[2] M. Pasandideh-Fard, V. Pershin, S. Chandra, J. Mostaghimi, Splat shapes in a thermal spray coating process: simulations and experiments, *Journal of Thermal Spray Technology*, 11(2) (2002) 206-217.

[3] M. Pasandideh-Fard, Y. Qiao, S. Chandra, J. Mostaghimi, Capillary effects during droplet impact on a solid surface, *Physics of fluids*, 8(3) (1996) 650-659.

[4] R. Rioboo, C. Tropea, M. Marengo, Outcomes from a drop impact on solid surfaces, *Atomization and sprays*, 11(2) (2001).

[5] R. Crooks, J. Cooper-White, D.V. Boger, The role of dynamic surface tension and elasticity on the dynamics of drop impact, *Chemical Engineering Science*, 56(19) (2001) 5575-5592.

[6] K.P. Gatne, Experimental investigation of droplet impact dynamics on solid surfaces, University of Cincinnati, 2006.

[7] P. Tsai, S. Pacheco, C. Pirat, L. Lefferts, D. Lohse, Drop impact upon micro-and nanostructured superhydrophobic surfaces, *Langmuir*, 25(20) (2009) 12293-12298.

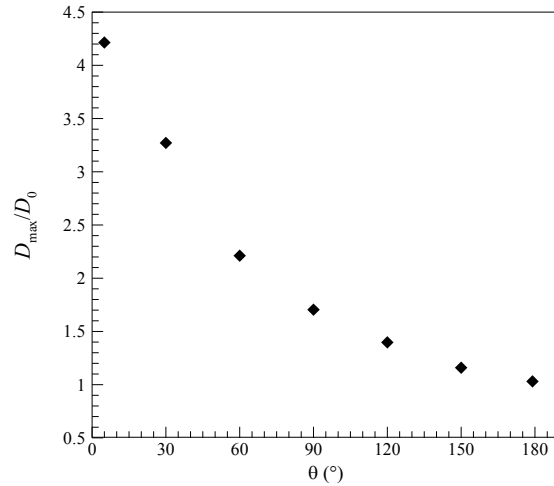
[8] D. Vadillo, A. Soucemarianadin, C. Delattre, D. Roux, Dynamic contact angle effects onto the maximum drop impact spreading on solid surfaces, *Physics of fluids*, 21(12) (2009) 122002.

[9] M. Bussmann, S. Chandra, J. Mostaghimi, Modeling the splash of a droplet impacting a solid surface, *Physics of fluids*, 12(12) (2000) 3121-3132.

[10] P.R. Gunjal, V.V. Ranade, R.V. Chaudhari, Dynamics of drop impact on solid surface: experiments and VOF simulations, *AIChE Journal*, 51(1) (2005) 59-78.

[11] H. Fujimoto, Y. Shiotani, A.Y. Tong, T. Hama, H. Takuda, Three-dimensional numerical analysis of the deformation behavior of droplets impinging onto a solid substrate, *International Journal of Multiphase Flow*, 33(3) (2007) 317-332.

[12] S.F. Lunkad, V.V. Buwa, K. Nigam, Numerical simulations of drop impact and spreading on horizontal



شکل ۱۴: ضریب پخش شدن قطره آب (D_{max}/D_0) در زوایای

تماس مختلف ($We=3.83$, $v_0=0.35$ m/s, $D_0=2.28$ mm)

Fig 14: Water droplet spreading factor at different contact angles ($We=3.83$, $v_0=0.35$ m/s, $D_0=2.28$ mm)

فهرست علائم

علائم انگلیسی

| | |
|------------------------|------|
| فشار، Nm^{-2} | p |
| عدد وبر | We |
| قطر قطره، m | D |
| بردار سرعت، ms^{-1} | u |
| بردار گرانش، ms^{-2} | g |
| بردار نرمال واحد | n |
| بردار مماس واحد | t |

علائم یونانی

| | |
|---------------------------------|----------|
| لزجت دینامیکی، $kgm^{-1}s^{-1}$ | μ |
| چگالی، kgm^{-3} | ρ |
| زمان مجازی، s | τ |
| اپراتور گرادیان | ∇ |
| کشش سطحی، Nm^{-1} | σ |
| انحنای، m^{-1} | κ |
| تابع سطح تراز، m | ϕ |

بالانویس ها

| | |
|----------|-----|
| ترانهاده | T |
|----------|-----|

زیرنویس ها

| | |
|-----------|----------|
| سطح مشترک | Γ |
| دیوار | w |

- [19] J. Hu, R. Jia, X. Huang, X. Xiong, K.-t. Wan, Numerical Simulation of the Dynamics of Water Droplet Impingement on a Wax Surface, in, ASEE, 2015.
- [20] Q. Zhang, T.-Z. Qian, X.-P. Wang, Phase field simulation of a droplet impacting a solid surface, *Physics of fluids*, 28(2) (2016) 022103.
- [21] M. Kang, R.P. Fedkiw, X.-D. Liu, A boundary condition capturing method for multiphase incompressible flow, *Journal of Scientific Computing*, 15(3) (2000) 323-360.
- [22] R.P. Fedkiw, T. Aslam, B. Merriman, S. Osher, A non-oscillatory Eulerian approach to interfaces in multimaterial flows (the ghost fluid method), *Journal of computational physics*, 152(2) (1999) 457-492.
- [23] S.-b. Li, Z. Yan, R.-d. Li, L. Wang, Numerical simulation of single bubble rising in shear-thinning fluids by level set method, *Journal of Central South University*, 23(4) (2016) 1000-1006.
- [24] L.R. Villegas, S. Tanguy, G. Castanet, O. Caballina, F. Lemoine, Direct numerical simulation of the impact of a droplet onto a hot surface above the Leidenfrost temperature, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 104 (2017) 1090-1109.
- [25] X.-D. Liu, R.P. Fedkiw, M. Kang, A boundary condition capturing method for Poisson's equation on irregular domains, *Journal of computational physics*, 160(1) (2000) 151-178.
- and inclined surfaces, *Chemical Engineering Science*, 62(24) (2007) 7214-7224.
- [13] I. Roisman, L. Opfer, C. Tropea, M. Raessi, J. Mostaghimi, S. Chandra, Drop impact onto a dry surface: Role of the dynamic contact angle, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 322(1-3) (2008) 183-191.
- [14] M. Muradoglu, S. Tasoglu, A front-tracking method for computational modeling of impact and spreading of viscous droplets on solid walls, *Computers & Fluids*, 39(4) (2010) 615-625.
- [15] S.A. Bokil, On Computational Modeling of Dynamic Drop-Surface Interactions During Post-Impact Spreading of Water and Aqueous Surfactant Solution, University of Cincinnati, 2013.
- [16] S. Jafari, M.R. Ansari, N. Samkhaniani, Contact angle comparison of droplet impact on solid surface using VOF, *Modares Mechanical Engineering*, 15(3) (2015) 84-94.
- [17] I. Malgarinos, N. Nikolopoulos, M. Marengo, C. Antonini, M. Gavaises, VOF simulations of the contact angle dynamics during the drop spreading: standard models and a new wetting force model, *Advances in colloid and interface science*, 212 (2014) 1-20.
- [18] M. Klitz, Numerical Simulation of Droplets with Dynamic Contact Angles, Universitäts-und Landesbibliothek Bonn, 2015.

