



تبدیل انرژی کاربردی

Homepage: <https://aec.birjand.ac.ir/>, ISSN 684X-3092



Study of the electrohydrodynamics of a droplet during the impact process on a heated surface in the film evaporation regime

Alireza Ghanbarpour¹, Pedram Pournaderi^{2*}

¹ Master of Science, Department of Mechanical Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

² Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.

* Corresponding Author Email address: sp.pournaderi@yu.ac.ir

Article info

Article history:

Received: 28 Apr 2026

Revised: 30 Jun 2026

Accepted: 29 Jul 2026

Available online: 5 Aug 2026

Keywords:

Electrohydrodynamics

Impact process

Droplet

Electric permittivity

Electric conductivity

Abstract

In this research, the electrohydrodynamics of a droplet impacting a hydrophilic heated surface in the deposition regime is studied based on the Taylor's leaky dielectric theory. The available studies in this area are very limited. In this study, for the first time, the droplet impact process on a surface based on a sharp version of the level-set method is simulated and discontinuous quantities at the interface are modeled accurately. The droplet spreading extent on the surface and, consequently, the heat transfer rate decrease with an increase in the electric capillary number. At a Reynolds number of 400 and an electric capillary number of 0.49, the maximum spreading radius of the droplet and heat transfer rate decrease 7.6% and 13%, respectively, compared to the case without an electric field. Increasing the electric field strength reduces the amplitude of droplet oscillations and, the droplet reaches equilibrium in a shorter time. Moreover, the maximum spreading radius and the maximum heat transfer rate occurs earlier. Higher the electric conductivity and permittivity ratios enhance both the droplet spreading extent and the heat transfer rate. At a Reynolds number of 400 and electric capillary number of 0.22, increasing the electric conductivity ratio from 1000 to 10000 leads to a 6.23% increase in the maximum spreading radius and a 10.33% increase in the heat transfer rate. Similarly, increasing the electric permittivity ratio results in increases of 8.64% and 16.67%, respectively.

مطالعه الکتروهیدرودینامیک قطره در فرآیند برخورد به سطح گرم در رژیم تبخیر فیلم

علیرضا قنبرپور^۱، پدram پورنادری^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

^۲ دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sp.pournaderi@yu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این تحقیق، الکتروهیدرودینامیک یک قطره هنگام برخورد به یک سطح گرم آبدوست در رژیم برخورد نشست و رژیم انتقال حرارت تک فاز بر اساس تئوری نیمه‌رسانای تیلور مطالعه می‌شود. مطالعات موجود در این زمینه بسیار محدود هستند. در این مطالعه، برای اولین بار فرآیند برخورد قطره به سطح با استفاده از نسخه نامبرای روش سطح تراز شبیه سازی و کمیت‌های ناپیوسته در سطح مشترک با دقت مدل‌سازی می‌شوند. با افزایش عدد موینگی الکتریکی، میزان پخش شدن قطره روی سطح و در نتیجه نرخ انتقال حرارت از سطح کاهش می‌یابد. در عدد رینولدز 400 و عدد موینگی الکتریکی 0.49 حداکثر شعاع پخش قطره و حداکثر نرخ انتقال حرارت نسبت به حالت بدون میدان به ترتیب حدود 7.6 و 13 درصد کاهش می‌یابند. با افزایش شدت میدان الکتریکی، دامنه نوسانات قطره کاهش می‌یابد و قطره در مدت زمان کمتری نسبت به حالت بدون میدان به تعادل می‌رسد. همچنین، حداکثر شعاع پخش و حداکثر نرخ انتقال حرارت سریع‌تر اتفاق می‌افتد. افزایش نسبت‌های ضریب رسانایی الکتریکی و ضریب گذردهی الکتریکی، موجب افزایش میزان پخش قطره و نرخ انتقال حرارت می‌شود. در عدد رینولدز 400 و عدد موینگی الکتریکی 0.22، با افزایش نسبت رسانایی الکتریکی از 1000 به 10000، حداکثر شعاع پخش و حداکثر نرخ انتقال حرارت به ترتیب 6.23 و 10.33 درصد افزایش می‌یابند. همچنین، با افزایش نسبت گذردهی الکتریکی از 100 به 1000، این کمیت‌ها به ترتیب 8.64 و 16.67 درصد افزایش می‌یابند.

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۵/۰۲/۰۸

بازنگری: ۵/۰۴/۰۹

پذیرش: ۵/۰۵/۰۷

نشر برخط: ۵/۰۵/۱۴

کلمات کلیدی:

الکتروهیدرودینامیک

فرآیند برخورد

قطره

گذردهی الکتریکی

رسانایی الکتریکی

۱ - مقدمه

در بسیاری از فرآیندهای صنعتی خشک‌کن‌های پاششی، برخورد ذرات سوخت با دیواره در محفظه احتراق، برخورد ذرات چاپگرهای جوهرافشان، رنگ‌آمیزی بوسیله پاشش اسپری و مبدل‌های حرارتی، فرآیند برخورد قطره به سطح مشاهده می‌گردد. بنابراین، مطالعه و شناخت دینامیک برخورد قطرات مایع با سطح از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

پورناداری و امدادی [۱] برخورد قطره به سطح را با استفاده از مدل‌های زاویه تماس مختلف شبیه‌سازی کردند. آن‌ها دریافتند که در برخورد قطره با سطوح آبگریز، مدل‌های دینامیکی نتایج بهتری ارائه می‌دهند. لی و همکاران [۲] در زمینه برخورد قطرات نیوتنی روی صفحه داغ با عدد ویر پایین مطالعه کردند و دریافتند که افزایش دمای سطح، تاثیر مستقیم و زیادی بر زاویه و شعاع تماس قطرات دارد. لی و همکاران [۳] در زمینه برخورد قطره به سطح کروی به صورت عددی مطالعه کردند. این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که شکل قطره پس از برخورد کاملاً بستگی به سرعت برخورد قطره اندازه و میزان رطوبت سطح کروی دارد. لیو و همکاران [۴] بطور آزمایشگاهی در مورد دینامیک برخورد قطره و تبخیر آن بر روی صفحات با شیارهای ریز و صفحات دارای ساختارهای نامنظم تحقیق کردند. رفتار و چگونگی حالت قطره پس از برخورد به ساختار و بافت سطح بستگی دارد. جین و ونگ [۵] به صورت عددی بر روی دینامیک برخورد قطره بر روی صفحات ناهمگن مطالعه کردند. تاثیر قرارگیری موقعیتهای متفاوت سطح ناهمگن و رطوبت آن مورد تحقیق قرار گرفت. این مطالعه نشان داد که رطوبت سطح نقش بسیار مهمی بر روی فرآیند پخش و بازگشت قطره پس از برخورد دارد و منجر به کاهش زمان تماس می‌شود. هاشمی و همکاران [۶] پژوهشی را در زمینه پخش قطرات مایع بر روی صفحات جامد با استفاده از روش‌های المان محدود و سطح تراز انجام دادند. مسأله با استفاده از مدل جنبش مولکولی در چهارچوب المان محدود به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است. آن‌ها موفق شدند دینامیک خط تماس را در شرایطی که سطح خیس می‌شود با موفقیت مدل‌سازی کنند. همچنین، تکامل زمانی یک قطره محصور در یک حفره مخروطی را هم با دقت خوبی شبیه‌سازی کردند. دو و همکاران [۷] برخورد قطرات به کره‌ها یا سطوح کروی را به صورت عددی مطالعه کردند. در این تحقیق از روش میدان فازی برای تحلیل برخورد قطره به سطوح کروی در عددهای رینولدز و ویر متفاوت استفاده کردند. نتایج حاصل نشان داد که رابطه پیشنهاد شده در تحقیقات قبلی برای تغییرات ضریب پخش قطره با عدد ویر، برای سیالات لزج درست نمی‌باشد. عزت‌نشان و همکاران [۸] برخورد قطره به سطوح منحنی را در نسبت‌های چگالی و لزجت بالا با استفاده از روش شبکه بولتزن شبیه‌سازی کردند. نتایج حاصل نشان داد که اضافه شدن معادله آلن-کاهن به معادله روش شبکه بولتزن به همراه استفاده از زمان آرامش چندگانه، امکان مطالعه انواع جریان‌های چندفازی کاربردی در نسبت‌های چگالی 1000 و نسبت‌های لزجت 100 را فراهم می‌نماید.

بائو و همکاران [۹] در مورد رفتار قطرات غیریونی ترین ایکس بر روی سطح آب‌گریز با در نظر گرفتن پارامترهای نظیر نرخ پخش مولکولی و کاهش زاویه تماس و چسبندگی قطرات غیریونی تحقیق کردند. آن‌ها دریافتند که قطرات از این نوع بهتر بر روی سطح آب‌گریز می‌مانند. همچنین، انتقال سریع افزودنی‌های سطحی به سطح مشترک در مرحله پخش قطره، عامل کلیدی در نشست قطرات روی سطح می‌باشد. لی و همکاران [۱۰] در زمینه برخورد قطرات با عدد ویر کم بر روی صفحات آب‌گریز مطالعه کردند. این مطالعه نشان داد که نقش و تاثیرگذاری انتقال حرارت هدایت در مقایسه با انتقال حرارت جابجایی بسیار مهم و برجسته می‌باشد. آن‌ها همچنین دریافتند که زیری سطح باعث کاهش حداکثر شعاع پخش قطره و نرخ انتقال حرارت می‌شود. نظری و پورناداری [۱۱] اثر میدان الکتریکی روی فرآیند برخورد یک قطره رسانا به یک سطح داغ در رژیم جوشش فیلمی مطالعه کردند. نتایج نشان داد که تحت اثر میدان الکتریکی، شعاع پخش قطره، زمان تماس و نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. امدادی و پورناداری [۱۲] برخورد یک قطره رسانا به یک سطح را تحت تاثیر میدان الکتریکی با استفاده از روش سطح تراز شبیه‌سازی کردند. بر طبق نتایج حاصل، با افزایش شدت میدان الکتریکی شعاع پخش قطره کاهش می‌یابد. برای سطوح آبگریز، با افزایش شدت میدان الکتریکی، زمان تماس بین قطره و سطح افزایش می‌یابد. تیان و همکاران [۱۳] کل فرآیند برخورد قطره به سطح در حضور میدان الکتریکی شامل تغییر شکل قطره قبل از تماس، تماس اولیه قطره با سطح و فرآیندهای بعد از تماس شامل

پخش و جمع شدن قطره را مطالعه کردند. اعمال میدان الکتریکی قبل از فرآیند برخورد منجر به کشیدگی قطره در جهت عمودی می‌شود. حداکثر شعاع پخش قطره تحت اثر میدان الکتریکی کاهش می‌یابد. همچنین، در حین فرآیند برخورد، تنش‌های الکتریکی تمایل به کشیدن قطره به سمت بالا و تجزیه آن دارند. ژو و همکاران [۱۴] فرآیند برخورد قطره به سطح را در رژیم‌های تبخیر فیلم و جوشش فیلمی در حضور میدان الکتریکی به صورت تجربی مطالعه کردند. در رژیم تبخیر فیلم خروج مایع از قطره به سمت بالا در حین برخورد مشاهده گردید. در رژیم جوشش فیلمی، زمان تماس قطره و ارتفاع قطره در هنگام بلند شدن از سطح با افزایش شدت میدان الکتریکی افزایش می‌یابد. ژو و همکاران [۱۵] اثر میدان الکتریکی را روی دینامیک و انتقال حرارت قطره در فرآیند برخورد با سطح در رژیم تبخیر فیلم تحت اثر میدان الکتریکی با استفاده از روش میدان فازی مطالعه کردند. در فرآیند برخورد روی سطوح آبدوست تحت میدان الکتریکی قوی پدیده جت کوچک القایی مشاهده گردید. قطرات کوچک جدا شده ناشی از جت کوچک القایی باعث بهبود عملکرد خنک کاری قطره شدند. هنگام برخورد روی سطوح آبگریز، میدان الکتریکی باعث کشیدگی قطره قبل از بلند شدن از سطح می‌گردد.

مطالعه پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که مطالعات بسیار محدودی در زمینه برخورد قطرات نیمه رسانا با سطح گرم در رژیم تبخیر فیلم مایع تحت اثر میدان الکتریکی انجام شده است. در این پژوهش، برای اولین بار از روش عددی معرفی شده توسط کنگ و همکاران [۱۶] که مبتنی بر یک رویکرد نامیرا در مدل‌سازی سطح مشترک می‌باشد، برای شبیه‌سازی این مسأله استفاده می‌شود و سپس اثر پارامترهای بی بعد مهم الکتریکی روی این پدیده مطالعه می‌گردد.

۲ - بیان مسأله

در این تحقیق، تاثیر میدان الکتریکی مستقیم بر فرآیند برخورد قطره نیمه‌رسانا به یک سطح آبدوست در رژیم نشست^۱ در حضور میدان الکتریکی شبیه‌سازی می‌شود. پارامترهای بی‌بعد مهم در این مسأله اعداد رینولدز، اونسرج، موینگی الکتریکی، نسبت گذردهی الکتریکی، نسبت رسانایی الکتریکی و نسبت لزجت می‌باشند که به‌ترتیب به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$Re = \frac{\rho_i V_0 D}{\mu_i}, \quad Oh = \frac{\mu_i}{\sqrt{\rho \gamma D}}, \quad Ca_E = \frac{\varepsilon_0 D E_0^2}{\gamma} \quad (1)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_0}, \quad \sigma_r = \frac{\sigma_i}{\sigma_0}, \quad \mu_r = \frac{\mu_i}{\mu_0} \quad (2)$$

V_0 و E_0 به‌ترتیب قطر اولیه قطره، سرعت اولیه قطره و شدت میدان الکتریکی می‌باشند. ρ ، μ ، γ و ε به‌ترتیب چگالی، ضریب لزجت، کشش سطحی و ضریب گذردهی الکتریکی را نمایش می‌دهند. زیرنویس‌های i و 0 به‌ترتیب فاز قطره و محیط را نشان می‌دهند. براساس مطالعات قبلی [۱۷] قطره آب در عدد اونسرج 0.01 برای اعداد رینولدز کمتر از 1000 در رژیم نشست قرار دارد. در این مطالعه، فرایند برخورد قطره در حضور میدان الکتریکی در عدد اونسرج ذکر شده و اعداد رینولدز کمتر از 1000 بررسی می‌شود. انتقال حرارت صورت گرفته باید در رژیم تبخیر فیلم قرار داشته باشد تا تمام حرارت انتقال یافته از سطح صرف افزایش دمای قطره شود. به همین دلیل میزان دمای سطح نباید فراتر از مقداری باشد که قطره دچار تبخیر شود و یا موجب ایجاد حباب درون آن شود. دمای هوا و قطره برابر 20°C و دمای سطح 80°C در نظر گرفته شده است. در این حالت با فرض فشار اتمسفریک جوشش رخ نمی‌دهد. لازم به ذکر است، با توجه به ضعیف بودن میدان‌های اعمال شده، از اثر میدان الکتریکی روی دمای جوش مایع صرف‌نظر شده است. همچنین، زاویه تماس قطره با سطح 75 درجه است. R شعاع اولیه قطره برابر با 1.14 میلی‌متر می‌باشد.

دامنه محاسباتی و شرایط مرزی در شکل (۱) نمایش داده شده‌اند. ابعاد دامنه محاسباتی 5R×5R می‌باشد. مرزهای سمت بالا و راست دامنه محاسباتی به‌صورت

$$\nabla \cdot \tau^E = q^v E - \frac{1}{2} E \cdot E \nabla \epsilon \quad (6)$$

جمله اول نیروی کلمب^۱ را ارائه می‌دهد و جمله دوم ناشی از غیریکنواختی ضریب نفوذ الکتریکی است و نیروی دی الکتریک^۲ نام دارد. q^v چگالی بار آزاد حجمی است. در سیستم‌های دوفازی، زمان مشخصه الکتریکی معمولاً بسیار کوچک‌تر از زمان مشخصه جریان سیال است. در نتیجه، بارهای آزاد به سرعت به سطح مشترک سیال منتقل می‌شوند [۱۹]. بر این اساس، جمله اول در معادله (۶) ناچیز است. همچنین، با توجه به ثابت بودن ضریب گذردهی الکتریکی در هر فاز، جمله دوم در معادله (۶) نیز قابل صرف‌نظر می‌باشد. بنابراین، نیروهای الکتریکی عملاً سهمی در سمت راست معادله مومنتوم نخواهند داشت. در واقع، اثر نیروهای الکتریکی در قالب شرایط پرش در سطح مشترک اعمال می‌گردد که در بخش بعد به آن پرداخته می‌شود. معادله انرژی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T = \frac{1}{\rho C_p} \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (7)$$

در روابط بالا، k و C_p به ترتیب دما، هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی در فشار ثابت را نمایش می‌دهند.

۲-۲- شرایط مرزی در سطح مشترک

در این مطالعه، ناپیوستگی کمیت A در سطح مشترک به صورت $[A]$ نمایش داده می‌شود. با اعمال معادله بقای مومنتوم در سطح مشترک، شرط ناپیوستگی فشار و نیز شرط ناپیوستگی مربوط به جملات لزج به صورت زیر به دست می‌آیند [۱۸ و ۱۹]:

$$[p] - 2[\mu] n \cdot \nabla u \cdot n^T - n \cdot [\epsilon \left(EE - \frac{1}{2} E \cdot E I \right)] \cdot n^T = \gamma \kappa \quad (8)$$

$$[\mu \nabla u] = [\mu] (\nabla u) \begin{pmatrix} 0 \\ t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n \\ t \end{pmatrix} + [\mu] n^T n (\nabla u) n^T n - \begin{pmatrix} 0 \\ t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ t \end{pmatrix} \left([\mu] (\nabla u^T) + \left[\epsilon \left(EE - \frac{1}{2} E \cdot E I \right) \right] \right) n^T n \quad (9)$$

در روابط بالا، n ، t ، κ به ترتیب بردار عمود یکه، بردار مماس یکه، انحنا می‌باشند. با اعمال معادله بقای انرژی در سطح مشترک، شرط ناپیوستگی زیر به دست می‌آید:

$$[k \nabla T \cdot n] = 0 \quad (10)$$

برای یک مایع نیمه‌رسانا، شرایط ناپیوستگی الکتریکی در سطح مشترک به صورت زیر بیان می‌شود:

$$[\sigma \nabla \psi \cdot n] = 0 \quad (11)$$

$$[\epsilon \nabla \psi \cdot n] = q_s \quad (12)$$

در رابطه بالا، q_s چگالی بار آزاد سطحی است.

مرز آزاد (مقدار صفر برای فشار و گرادیان صفر برای سایر کمیت‌ها)، سمت چپ دامنه به عنوان مرز تقارن و مرز پایین به صورت دیوار (شرط عدم لغزش) با دمای ثابت در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن دو الکترود در مرزهای بالا و پایین دامنه و اعمال اختلاف پتانسیل بین این دو الکترود، قطره در یک میدان الکتریکی مناسب مورد مطالعه قرار می‌گیرد. چنانچه در ادامه خواهیم دید، میدان الکتریکی به صورت گرادیان اختلاف پتانسیل الکتریکی بیان می‌شود.

۳ - معادلات اساسی

۳-۱- معادلات الکترواستاتیک، جریان و انتقال حرارت

برای یک ماده نیمه‌رسانا، معادله زیر برای محاسبه پتانسیل الکتریکی ψ استفاده می‌شود [۱۸ و ۱۹]:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \psi) = 0 \quad (1)$$

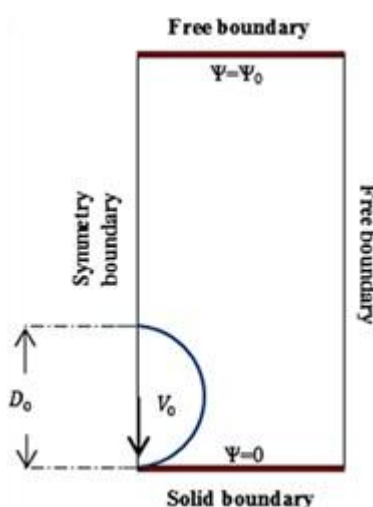


Fig. 1. Geometry and boundary conditions.

شکل ۱. هندسه و شرایط مرزی.

در رابطه بالا، σ ضریب رسانایی الکتریکی است. بعد از محاسبه پتانسیل الکتریکی، میدان الکتریکی به صورت محاسبه $E = -\nabla \psi$ می‌شود. معادلات جریان، شامل معادلات پیوستگی و بقای مومنتوم در حالت تراکم ناپذیر و معادله انرژی هستند [۱۲]:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\tau^H + \tau^E) + g \quad (3)$$

در روابط بالا، p ، u ، g به ترتیب بردار سرعت، فشار و بردار گرانش را نمایش می‌دهند. همچنین، تانسورهای تنش هیدرودینامیکی و الکتریکی به ترتیب به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\tau^H = \mu (\nabla u + \nabla u^T) \quad (4)$$

$$\tau^E = \epsilon \left(EE - \frac{1}{2} E \cdot E I \right) \quad (5)$$

در روابط بالا، I به ترتیب بردار میدان الکتریکی و تانسور همانی هستند. نیروی حجمی (بر واحد حجم) متناظر با تنش ماکسول از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۸]:

۴ - روش‌های عددی

در این تحقیق، روش تفاضل محدود برای حل معادلات به کار گرفته می‌شود. از روش تصویر سازی برای حل معادلات جریان استفاده می‌شود [۱۶]. از ترکیب روش‌های سطح تراز و سیال مجازی برای مدل‌سازی سطح مشترک استفاده می‌شود [۱۶، ۲۰]. روش وینو^۱ و تقریب تفاضل مرکزی به ترتیب برای گسسته‌سازی جملات جابجایی و پخش به کار گرفته می‌شوند. برای اعمال زاویه تماس، از مدل زاویه تماس استاتیکی استفاده می‌شود [۱۲]. شبکه مورد استفاده در این مطالعه از نوع شبکه با سازمان و به صورت یکنواخت می‌باشد. حل معادلات در حالت غیر دائم انجام می‌شود. الگوریتم حل به ترتیب شامل حل معادله الکترواستاتیک، حل معادله جریان، حل معادله دما و حل معادله سطح تراز (تعیین موقعیت سطح مشترک) و تکرار این مراحل تا رسیدن به زمان موردنظر می‌باشد. لازم به ذکر است در فرآیند حل معادلات جریان از نسخه صریح روش تصویرسازی استفاده می‌شود [۱۶]. در فرآیند حل از گام زمانی متغیر بر اساس فرمولاسیون ارائه شده در مرجع [۱۶] استفاده می‌شود. به منظور اطمینان از پایداری روش عددی شرط CFL < 0.25 در طی فرآیند حل اعمال می‌شود.

۴-۱- روش سطح تراز

روش سطح تراز با تعریف یک تابع اسکالر مانند ϕ (تابع سطح تراز) به صورت تابع فاصله فضای محاسباتی را به سه ناحیه تقسیم می‌کند. این تابع در فاز داخل با علامت منفی، در فاز بیرون با علامت مثبت، و روی سطح مشترک دارای مقدار صفر می‌باشد. بنابراین با علامت هر فاز، نوع فاز و سطح مشترک دو سیال مشخص می‌شود. با توجه به اینکه سطح مشترک همواره سطح تراز صفر تابع ϕ می‌باشد، رابطه زیر برقرار است [۱۹]:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_{int} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (13)$$

در رابطه بالا، u_{int} سرعت سیال در سطح مشترک است. به علت خطاهای عددی، تابع سطح تراز در طول زمان بعد از حرکت سطح مشترک از حالت تابع فاصله خارج می‌شود. باز مقداردهی تابع سطح تراز راه حلی برای رفع این مشکل است [۱۹]. با حل معادله باز مقداردهی مجدد، خاصیت تابع فاصله برای تابع سطح تراز در طول فرآیند حل حفظ می‌گردد. این معادله به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = S(\phi_0)(1 - |\nabla \phi|) \quad (14)$$

τ و $S(\phi_0)$ به ترتیب شبه زمان و تابع علامت میرا شده می‌باشند. تابع علامت میرا شده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S(\phi_0) = \frac{\phi_0}{\sqrt{\phi_0^2 + (\max(\Delta x, \Delta y))^2}} \quad (15)$$

ϕ_0 مقدار تابع سطح تراز قبل از باز مقداردهی مجدد می‌باشد.

۴-۲- روش سیال مجازی

در این مطالعه، شرایط ناپیوستگی در سطح مشترک با استفاده از روش سیال مجازی [۲۰، ۱۶] اعمال می‌شوند. در این روش، مطابق شکل (۲) با تعریف گره‌های مجازی هر فاز به درون فاز دیگر گسترش می‌یابد. مقدار کمیت ناپیوسته در گره‌های مجازی، با استفاده از شرایط ناپیوستگی مربوطه به دست می‌آید. به عنوان مثال در شکل (۲) برای به دست آوردن مقادیر مجازی در سمت راست سطح مشترک باید مقدار پرش از مقدار کمیت در گره‌های سمت راست کم شود. بدین ترتیب، مشتق کمیت‌های ناپیوسته در سطح مشترک، با استفاده از مقادیر گره‌های مجازی محاسبه می‌شوند. در شکل (۲) سطح مشترک بین گره‌های k و $k+1$ قرار گرفته است و مقدار پرش در

کمیت u می‌باشد. به عنوان نمونه، معادله لاپلاس در گره k به صورت زیر گسسته می‌شود:

$$\frac{[u_{k+1}^{g+} - u_k^-]}{\Delta x} - \frac{[u_k^- - u_{k-1}^-]}{\Delta x} = 0 \quad (16)$$

در این روش، با توجه به ناپیوستگی کمیت u در سطح مشترک، با معرفی گره‌های مجازی در فاز ۲، سیال فاز ۱ به فاز ۲ گسترش می‌یابد. با اعمال شرط پرش در سطح مشترک، معادله (۱۶) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\frac{[u_{k+1}^{g+} - u_k^-]}{\Delta x} - \frac{[u_k^- - u_{k-1}^-]}{\Delta x} = 0 \quad (17)$$

برای جزئیات بیشتر به مراجع [۱۶، ۲۰] مراجعه شود.

۵ - نتایج و بحث

۵-۱- اعتبارسنجی و مطالعه شبکه

ابتدا نتایج هیدرودینامیک برخورد قطره نیمه‌رسانا به سطح تحت میدان الکتریکی با نتایج مقاله امدادی و پورنادری [۱۲] که به مطالعه برخورد قطره رسانا به سطح در حضور میدان الکتریکی پرداخته است، مورد مقایسه قرار می‌گیرد. زاویه تماس استاتیکی قطره و سطح برابر ۹۰ درجه و سرعت اولیه برخورد V_0 برابر با ۰.۳۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. شدت میدان الکتریکی اعمال شده برابر با $E_0 = 600 \text{ kV m}^{-1}$ است. شبکه محاسباتی از نسبت $\frac{R}{\Delta x} = 48$ تبعیت می‌کند.

شکل (۳) تغییرات قطر پخش قطره را بر حسب زمان تحت میدان الکتریکی اعمال شده نشان می‌دهد. تطابق خوبی بین نتایج کار حاضر با نتایج امدادی و پورنادری [۱۲] مشاهده می‌گردد. هنگامی که قطره به حداکثر شعاع پخش خود می‌رسد، اختلاف نتایج کمتر از ۳ درصد می‌باشد. این مقایسه تطابق نتایج مربوط به قطره آب (مایع با رسانایی بالا) که با استفاده از مدل نیمه‌رسانا حاصل شده است را با نتایج مدل رسانای کامل نشان می‌دهد.

سلواکومار و لی [۲۱] به صورت عددی برخورد قطره آب با سطح گرم در غیاب میدان الکتریکی را شبیه‌سازی کردند. دمای قطره و هوا به ترتیب ۲۰ و ۵۰ درجه سانتی-گراد می‌باشند. همچنین، برخورد در عدد ویر ۵۰ با زاویه تماس استاتیکی ۱۵۶ درجه انجام می‌شود. شکل (۴) تغییرات عدد ناسلت در امتداد سطح برخورد را در زمان بی-بعد $t^* = tV_0/D = 0.05$ نشان می‌دهد. تطابق قابل قبولی بین نتایج کار حاضر و نتایج سلواکومار و لی مشاهده می‌شود. اختلاف عدد ناسلت در فازهای مایع و گاز به ترتیب حدود ۲ و ۱۲ درصد می‌باشد. این اختلاف را می‌توان به اختلاف در روش‌های عددی مورد استفاده نسبت داد. سلواکومار و لی با ترکیب روش‌های حجم سیال و سطح تراز و میرا سازی کمیت‌ها در سطح مشترک (در نظر گرفتن ضخامت برای سطح مشترک) این مسأله را شبیه‌سازی کردند. در کار حاضر، با ترکیب روش‌های سطح تراز و سیال مجازی و با اعمال دقیق شرایط پرش در سطح مشترک، بدون در نظر گرفتن ضخامت و بدون میرا نمودن کمیت‌ها در سطح مشترک، مسأله مدل‌سازی می‌شود.

حال با استفاده از شبکه‌های مختلف به بررسی تغییرات نتایج به دست آمده و انتخاب شبکه مناسب پرداخته می‌شود. نتایج این بررسی در شکل (۵) ارائه شده است. در زمانی که قطره به حداکثر شعاع پخش خود می‌رسد، اختلاف نتایج بین دو شبکه درشت و متوسط ۲.۵ درصد و اختلاف نتایج بین دو شبکه متوسط و ریز ۱.۶ درصد است. این مطلب نشانه کم شدن اختلاف نتایج با ریز کردن شبکه و همگرایی نتایج به سمت یک مقدار مشخص می‌باشد. جدول (۱) مقدار عدد ناسلت را در امتداد سطح برخورد در فاز گاز (در حالت بدون اعمال میدان) برای ۳ شبکه مختلف ارائه می‌دهد. اختلاف نتایج بین شبکه درشت و متوسط ۳ درصد است که با ریزتر شدن شبکه به ۰.۸ درصد کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج ارائه شده و با در نظر گرفتن

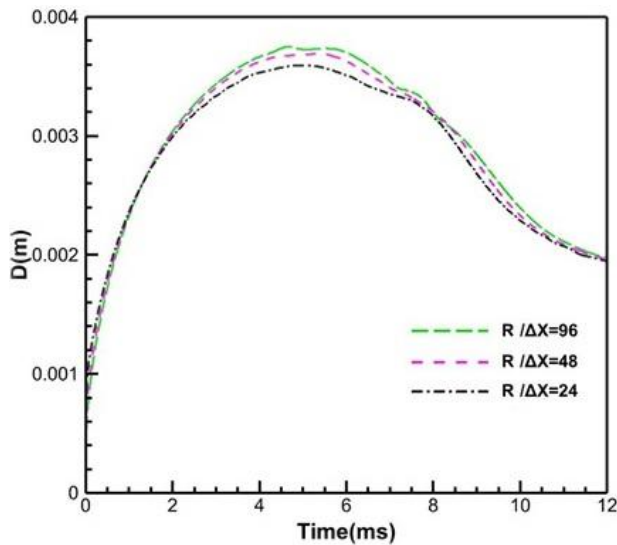


Fig. 5. Variations of droplet spreading diameter with time for three different meshes.

شکل ۵. تغییرات قطر پخش قطره با زمان برای سه شبکه مختلف.



Fig. 6. Different stages of the droplet impact ($Re=400$, $Oh=0.01$, $Ca_e=0.49$).

شکل ۶. مراحل مختلف برخورد قطره ($Re=400$, $Oh=0.01$, $Ca_e=0.49$).

جدول ۱. مقدار عدد ناسلت روی سطح در فاز گاز برای سه شبکه مختلف.

Table 1. The Nusselt number values on the surface in the gas phase for three different grids.

$\frac{R}{\Delta X}=24$	$\frac{R}{\Delta X}=48$	$\frac{R}{\Delta X}=96$
35.94	37.02	37.32

۵-۲- اثر عدد موینگی الکتریکی

در شکل (۶) مراحل برخورد قطره برای عدد رینولدز 400، عدد اونسرج 0.01 و عدد موینگی الکتریکی 0.49 مشاهده می‌شود. ابتدا قطره با توجه به سرعت برخورد و نیروی اینرسی شروع به پخش شدن روی سطح می‌کند و تا آنجایی که غلبه بر نیروهای کشش سطحی و اصطکاک ممکن باشد پیش می‌رود و به حداکثر میزان پخش خود در زمان 22 میلی ثانیه می‌رسد. در ادامه با کاهش نیروی اینرسی که صرف غلبه بر نیروی کشش سطحی و نیروی الکتریکی اعمال شده بر سطح مشترک شده است، قطره وارد مرحله بعدی فرایند شده و شروع به جمع شدن و برگشت می‌کند و میزان پخش روی سطح کاهش می‌یابد.

شکل (۷) اثر عدد موینگی الکتریکی روی قطر پخش قطره را برای اعداد رینولدز 100 و 400 نشان می‌دهد. در عدد رینولدز 100 مشاهده می‌شود که ابتدا تحت اثر نیروی اینرسی شعاع پخش قطره افزایش یافته و بعد از رسیدن به حداکثر مقدار خود تحت تاثیر نیروهای کشش سطحی و الکتریکی کاهش می‌یابد. مطابق شکل، با اعمال میدان الکتریکی میزان پخش شدن قطره روی سطح کاهش می‌یابد. در حالت بدون میدان، میزان پخش قطره نسبت به حالت‌هایی که میدان اعمال شده است بیشتر است که دلیل آن عدم وجود تنش‌های الکتریکی بر روی سطح قطره می‌باشد. در واقع اعمال میدان الکتریکی، میزان پخش شدن قطره روی سطح کاهش یافته می‌یابد. دلیل این امر این است که تحت اثر میدان، تنش‌های الکتریکی بر روی سطح مشترک ایجاد می‌شوند و به همراه نیروی کشش سطحی و نیروی لزج مقاومت بیشتری از خود در مقابل پخش شدن قطره نیمه‌رسانا روی سطح نشان می‌دهند. افزایش شدت میدان الکتریکی منجر به افزایش تنش‌های الکتریکی بر سطح مشترک شده و در نهایت کاهش میزان پخش و تغییر شکل قطره روی سطح را در پی خواهد داشت. در حالی که قطره تحت تاثیر میدان الکتریکی نمی‌باشد نسبت به حالتی که تحت میدان الکتریکی قرار می‌گیرد در مدت زمان کمتری به حداکثر میزان پخش خود می‌رسد که این خود دلالت بر

دقت و هزینه محاسباتی شبکه $\frac{R}{\Delta X}=48$ به عنوان شبکه مناسب برای این مطالعه انتخاب می‌شود و در ادامه شبیه‌سازی‌ها از این شبکه استفاده خواهد شد.

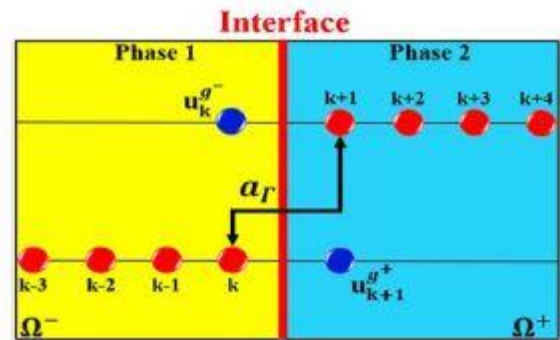


Fig. 2. Description of the ghost fluid method.

شکل ۲. توصیف روش سیال مجازی.

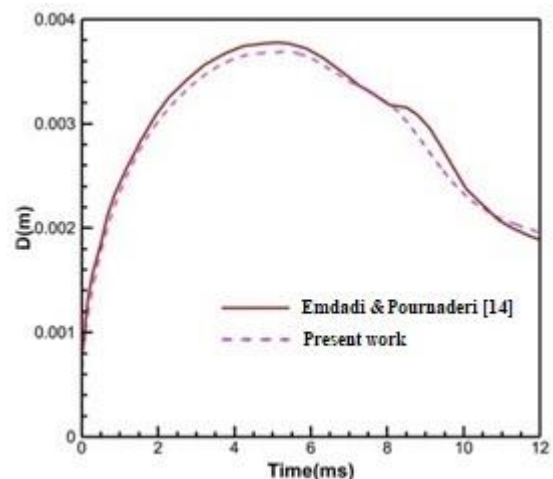


Fig. 3. Comparison of the simulation results with the numerical results [12].

شکل ۳. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج عددی [۱۲].

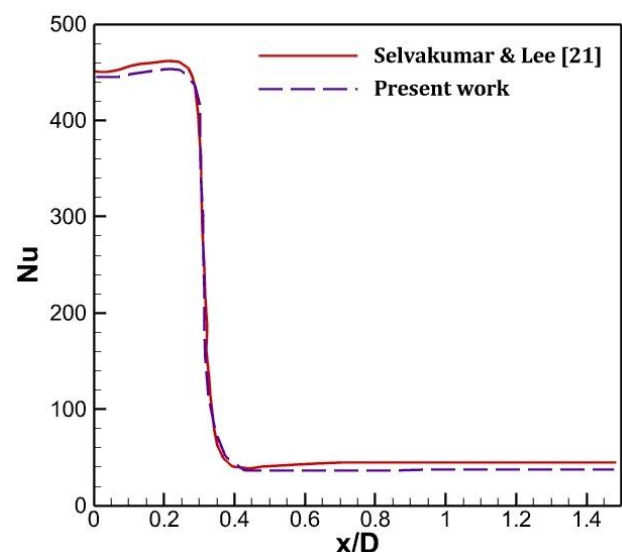


Fig. 4. Comparison of the variations of Nusselt number with the numerical results [21].

شکل ۴. مقایسه تغییرات عدد ناسلت با نتایج عددی [۲۱].

برای عدد رینولدز 400 نیز با وجود افزایش سرعت برخورد قطره و نیروی اینرسی رفتار مشابهی مشاهده می‌گردد. هر چند، تحت اثر نیروی اینرسی بیشتر، میزان پخش شدن قطره روی سطح در این حالت بیشتر است. همچنین، قطره سریع‌تر به حداکثر میزان شعاع پخش خود می‌رسد. در اعداد رینولدز 100 و 400 تحت اثر یک میدان الکتریکی با عدد موینگی الکتریکی 0.49، حداکثر شعاع پخش قطره نسبت به حالت بدون میدان به ترتیب حدود 13.9 و 7.6 درصد کاهش می‌یابند. در عدد رینولدز 400، افزایش عدد موینگی الکتریکی تأثیر قابل توجهی روی مدت زمان فرآیند (پخش شدن و جمع شدن قطره) نداشته است. ولی در عدد رینولدز 100 و میدان الکتریکی قوی‌تر، فرآیند پخش شدن و جمع شدن قطره سریع‌تر به اتمام رسیده و قطره بواسطه انرژی برخورد اولیه دوباره شروع به پخش شدن روی سطح می‌کند. با توجه به شکل (۷) می‌توان نتیجه گرفت که هنگامی که شدت میدان الکتریکی افزایش یابد دامنه نوسانات قطره کاهش می‌یابد و موجب می‌شود قطره در مدت زمان کمتری نسبت به حالت بدون میدان به تعادل برسد.

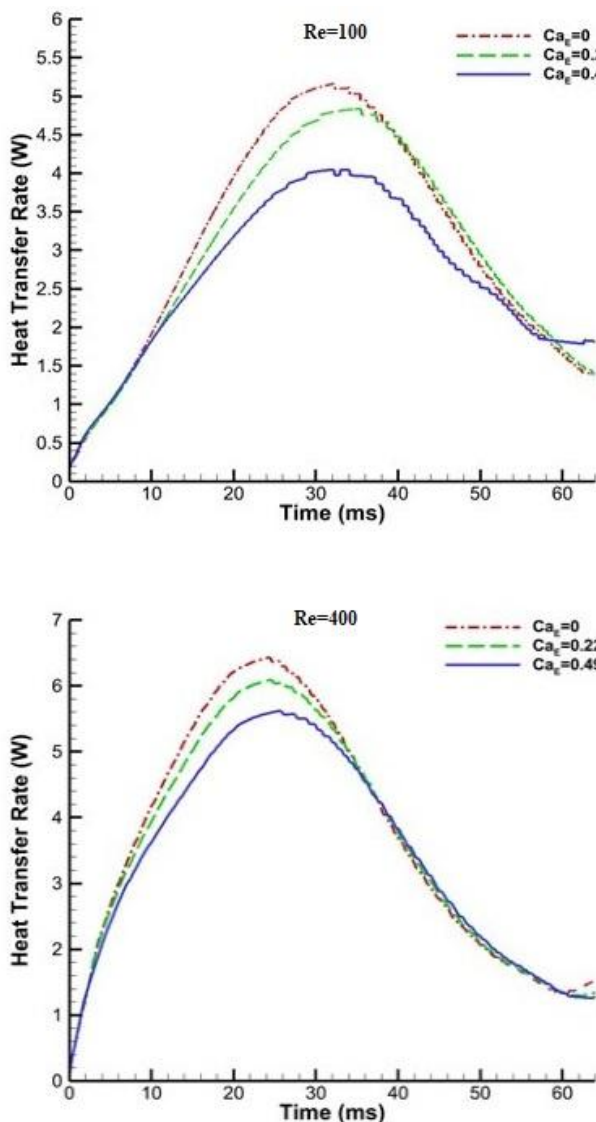


Fig. 8. Effect of the electric capillary number on the heat transfer rate at Reynolds numbers of 100 and 400.

شکل ۸. اثر عدد موینگی الکتریکی روی نرخ انتقال حرارت در اعداد رینولدز 100 و 400.

تأثیر تنش‌های الکتریکی و مقاومت آن‌ها در مقابل پخش شدن قطره دارد. برای درک بیشتر فیزیک مسأله، یک قطره ساکن تحت اثر میدان الکتریکی را در نظر بگیرید. در این حالت قطره تحت اثر تنش‌های الکتریکی دچار تغییر شکل می‌شود. بر اساس مقدار نسبت ضریب رسانایی الکتریکی و همچنین نسبت ضریب گذردهی الکتریکی دو فاز، این تغییر شکل می‌تواند در جهت میدان الکتریکی (تغییر شکل پرولیت^۱) یا در جهت عمود بر میدان الکتریکی (تغییر شکل آبلیت^۲) باشد. نمودار تغییر شکل-سیرکولاسیون^۳ ارائه شده در [۲۲] نشان می‌دهد که تغییر شکل قطره در مسأله حاضر (با توجه به مقادیر ϵ_r و σ_r) در جهت میدان الکتریکی (امتداد عمودی) می‌باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در مسأله برخورد قطره نیز تنش‌های الکتریکی تمایل به تغییر شکل قطره در جهت عمودی دارند. این امر باعث می‌شود این تنش‌ها به عنوان یک نیروی مقاوم در برابر پخش شدن قطره مقاومت کنند که نتیجه آن کاهش میزان پخش قطره روی سطح خواهد بود.

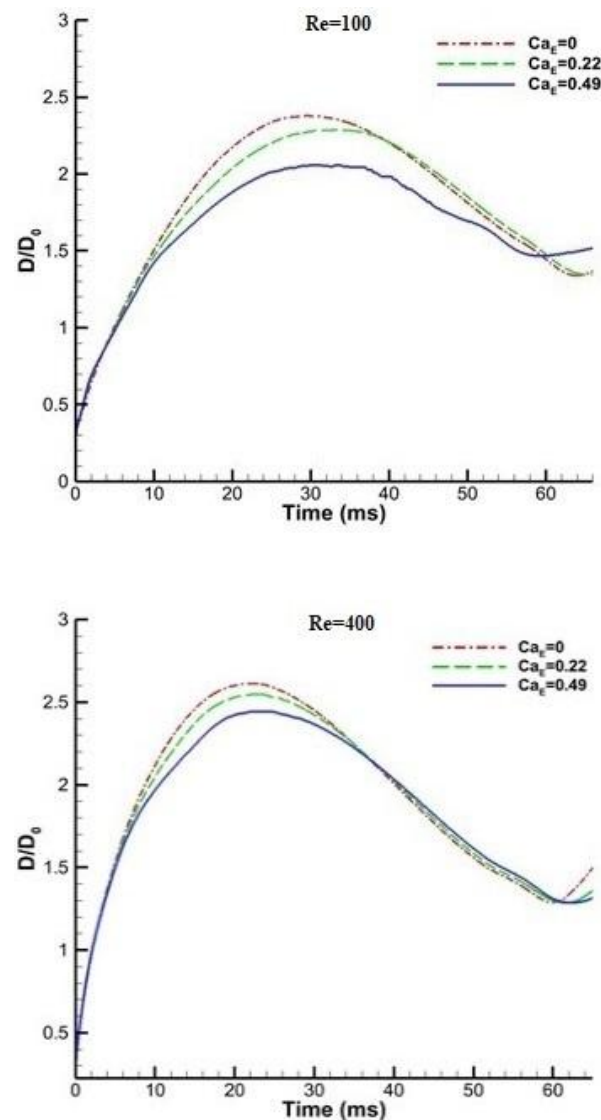


Fig. 7. Effect of the electric capillary number on the droplet spreading diameter at Reynolds numbers of 100 and 400.

شکل ۷. اثر عدد موینگی الکتریکی روی قطر پخش قطره در اعداد رینولدز 100 و 400.

1. Prolate
2. Oblate
3. Circulation

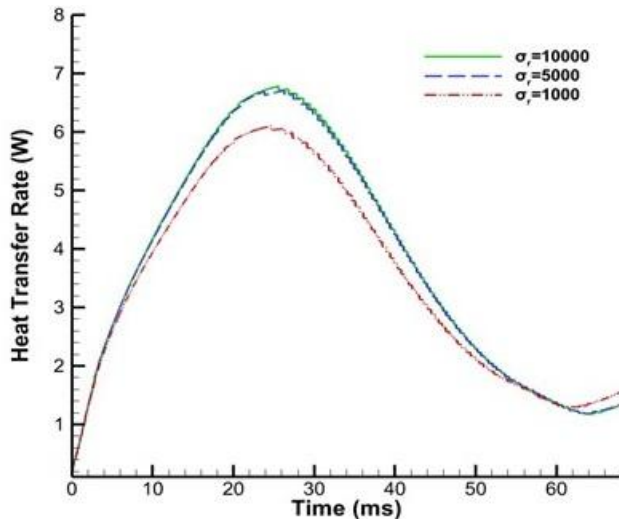


Fig. 10. Effect of the electric conductivity ratio on the heat transfer rate.
 شکل ۱۰. اثر نسبت رسانایی الکتریکی روی نرخ انتقال حرارت از سطح.

۵-۴- اثر نسبت ضریب گذردهی الکتریکی

شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به ترتیب اثر نسبت ضریب گذردهی الکتریکی در بازه ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ را روی قطر پخش قطره و نرخ انتقال حرارت در عدد رینولدز ۴۰۰ و عدد موینگی الکتریکی ۰.۲۲ نشان می‌دهند. با افزایش نسبت ضریب گذردهی قطره به محیط، ϵ_r ، میزان پخش قطره روی سطح افزایش می‌یابد. علت این امر این است که افزایش نسبت ضریب گذردهی الکتریکی باعث کاهش اثر نیروهای مقاوم الکتریکی می‌گردد. همچنین، مدت زمان لازم برای رسیدن قطره به حداکثر شعاع پخش شدگی، با افزایش نسبت ضریب گذردهی الکتریکی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که نرخ انتقال حرارت از سطح با افزایش ϵ_r افزایش می‌یابد. این امر را می‌توان به افزایش سطح تماس قطره با سطح در اثر افزایش ضریب گذردهی الکتریکی نسبت داد. در عدد رینولدز ۴۰۰ و عدد موینگی الکتریکی ۰.۲۲، با افزایش نسبت گذردهی الکتریکی از ۱۰۰ به ۱۰۰۰، حداکثر شعاع پخش قطره و حداکثر نرخ انتقال حرارت به ترتیب ۸.۶۴ و ۱۶.۶۷ درصد افزایش می‌یابند.

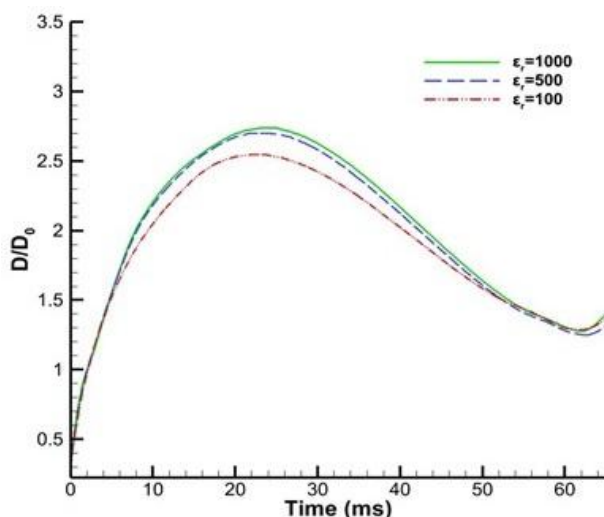


Fig. 11. Effect of the electric permittivity ratio on the droplet spreading diameter.
 شکل ۱۱. اثر نسبت گذردهی الکتریکی روی قطر پخش قطره.

شکل (۸) اثر عدد موینگی الکتریکی روی نرخ انتقال حرارت از سطح را برای اعداد رینولدز ۱۰۰ و ۴۰۰ نشان می‌دهد. نمودار نرخ انتقال حرارت مشابه نمودار پخش قطره رفتار می‌کند و متناسب با افزایش یا کاهش مقدار تماس قطره با سطح، نرخ انتقال حرارت نیز افزایش یا کاهش می‌یابد. بنابراین، با افزایش شدت میدان الکتریکی، نرخ انتقال حرارت به دلیل کاهش ناحیه تماس قطره با سطح کاهش می‌یابد. چنانچه مشاهده می‌شود، با افزایش عدد موینگی الکتریکی، زمان بیشتری لازم است تا حداکثر میزان انتقال حرارت از سطح اتفاق بیفتد. از سوی دیگر، با افزایش عدد رینولدز، حداکثر میزان انتقال حرارت در زمان کمتری اتفاق می‌افتد. در اعداد رینولدز ۱۰۰ و ۴۰۰ تحت اثر یک میدان الکتریکی با عدد موینگی الکتریکی ۰.۴۹، حداکثر نرخ انتقال حرارت نسبت به حالت بدون میدان به ترتیب حدود ۲۱.۸ و ۱۳ درصد کاهش می‌یابند. با توجه به نتایج حاصل، افزایش عدد رینولدز و متعاقب آن افزایش نسبی نیروی اینرسی منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت می‌گردد.

۵-۳- اثر نسبت ضریب رسانایی الکتریکی

شکل‌های (۹) و (۱۰) به ترتیب اثر نسبت ضریب رسانایی الکتریکی در بازه ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ را روی قطر پخش قطره و نرخ انتقال حرارت در عدد رینولدز ۴۰۰ و عدد موینگی الکتریکی ۰.۲۲ نشان می‌دهند. با توجه به نتیجه به دست آمده، افزایش نسبت ضریب رسانایی الکتریکی قطره به محیط، σ_r ، موجب افزایش میزان پخش قطره می‌شود. در واقع، افزایش σ_r موجب کاهش تاثیر نیروهای الکتریکی اعمال شده به قطره می‌شود و با کاهش این نیروی مقاوم، میزان پخش قطره روی سطح افزایش می‌یابد. به علاوه، در نسبت ضریب رسانایی الکتریکی کمتر، قطره زودتر به حداکثر میزان شعاع پخش می‌رسد و مدت زمان فرایند برخورد (پخش شدن و جمع شدن)، کمتر می‌شود. با توجه به شکل (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت که نرخ انتقال حرارت از سطح با افزایش σ_r افزایش می‌یابد. دلیل این امر افزایش ناحیه تماس قطره با سطح با افزایش نسبت ضریب رسانایی الکتریکی می‌باشد. در عدد رینولدز ۴۰۰ و عدد موینگی الکتریکی ۰.۲۲، با افزایش نسبت رسانایی الکتریکی از ۱۰۰۰ به ۱۰۰۰۰، حداکثر شعاع پخش قطره و حداکثر نرخ انتقال حرارت به ترتیب ۶.۲۳ و ۱۰.۳۳ درصد افزایش می‌یابند.

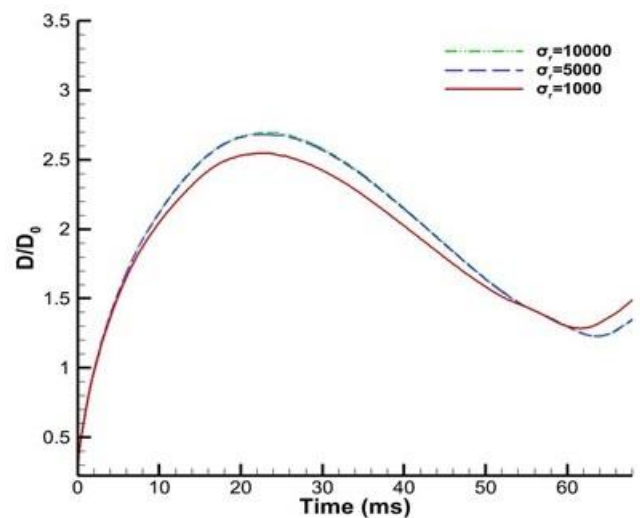


Fig. 9. Effect of the electric conductivity ratio on the droplet spreading diameter.
 شکل ۹. اثر نسبت رسانایی الکتریکی روی قطر پخش قطره.

S	تابع علامت میرا (-)
t	زمان (s)
t	بردار مماس یکه (-)
T	دما (K)
u	سرعت (ms^{-1})
V	اندازه سرعت (ms^{-1})
x	مختصه محور افقی (m)
y	مختصه محور عمودی (m)

علامت یونانی

ϵ	ضریب گذردهی الکتریکی (Fm^{-1})
ϕ	تابع سطح تراز (m)
γ	کشش سطحی (Nm^{-1})
κ	انحنای (m^{-1})
ψ	پتانسیل الکتریکی (V)
σ	ضریب رسانایی الکتریکی (Sm^{-1})
τ	تانسور تنش (Nm^{-2})
μ	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})

بالانویس ها

E	الکتریکی
g	مجازی
H	هیدرودینامیکی
T	ترانواده

زیرنویس ها

E	الکتریکی
h	هیدرودینامیکی
i	فاز قطره
int	سطح مشترک
o	فاز محیط
r	نسبت
s	سطحی
0	اولیه

۸ - مراجع

- [1] P. Pournaderi, M. Emdadi, "Study of droplet impact on a wall using a sharp interface method and different contact line models", Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 12, pp. 1001-12, 2019.
- [2] B. Li, L. Chen, S. Joo, "Impact dynamics of Newtonian and viscoelastic droplets on heated surfaces at low Weber number", Case Studies in Thermal Engineering, Vol. 26, pp. 101109, 2021.
- [3] X. Li, Y. Fu, D. Zheng, H. Fang, Y. Wang, "A numerical study of droplet impact on solid spheres: The effect of surface wettability, sphere size, and initial impact velocity", Chemical Physics, Vol. 550, pp. 111314, 2021.
- [4] J. Lyu, L. Gao, Y. Li, M. Bai, D. Gao, Z. Yongfei, "Dynamics of droplet impact and evaporation on the regular micro-grooved and irregular microstructured surfaces", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 125, pp. 105282, 2021.
- [5] L. Jin, Y. Wang, "Numerical study on surface-heterogeneity-induced anisotropic impact dynamics of droplet", Colloid and Interface Science Communications, Vol. 44, pp. 100495, 2021.
- [6] M. R. Hashemi, P. B. Ryzhakov, R. Rossi, "Three dimensional modeling of liquid droplet spreading on solid surface: An enriched finite element/level-set approach", Journal of Computational Physics, Vol. 442, pp. 110480, 2021.
- [7] Y. Du, J. Liu, Y. Li, J. Du, X. Wu, Q. Min, "Numerical study on droplets impacting solid spheres: Effect of fluid properties

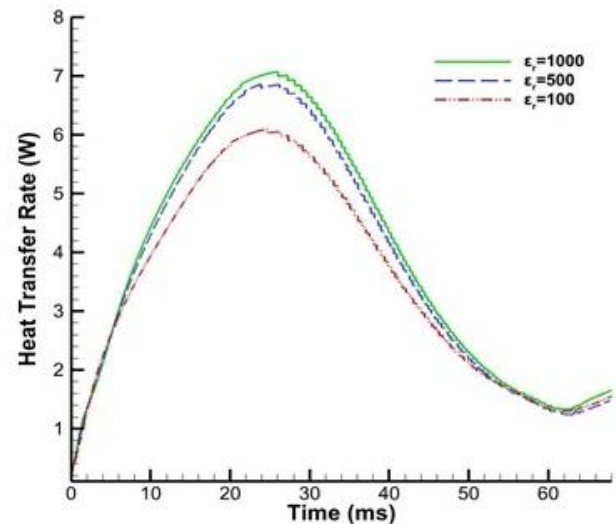


Fig. 12. Effect of the electric permittivity ratio on the heat transfer rate.
شکل ۱۲. اثر نسبت گذردهی الکتریکی روی نرخ انتقال حرارت از سطح.

۶ - نتیجه گیری

در این تحقیق، فرآیند برخورد یک قطره نیمه‌رسانا به یک سطح گرم آبدوست در رژیم برخورد نشست و رژیم انتقال حرارت تک فازی شبیه‌سازی و مطالعه می‌شود. معادلات اساسی شامل معادلات جریان، انرژی و الکترواستاتیک به همراه شرایط پرش در سطح مشترک می‌باشند. با استفاده از روش‌های سطح تراز و سیال مجازی، کمیت‌های ناپیوسته در سطح مشترک با دقت مدل می‌شوند.

بر طبق نتایج حاصل، با افزایش شدت میدان الکتریکی، میزان پخش شدن قطره روی سطح و در نتیجه نرخ انتقال حرارت از سطح کاهش می‌یابد. در عدد رینولدز 400 و عدد موینگی الکتریکی 0.49 حداکثر شعاع پخش قطره و حداکثر نرخ انتقال حرارت نسبت به حالت بدون میدان به ترتیب حدود 7.6 و 13 درصد کاهش می‌یابند. افزایش نسبت‌های ضریب رسانایی و ضریب گذردهی الکتریکی، موجب افزایش میزان پخش قطره و نرخ انتقال حرارت می‌شود. در عدد رینولدز 400 و عدد موینگی الکتریکی 0.22، با افزایش نسبت رسانایی الکتریکی از 1000 به 10000، حداکثر شعاع پخش و حداکثر نرخ انتقال حرارت به ترتیب 6.23 و 10.33 درصد افزایش می‌یابند. همچنین، با افزایش نسبت گذردهی الکتریکی از 100 به 1000، این کمیت‌ها به ترتیب 8.64 و 16.67 درصد افزایش می‌یابند.

از کاربردهای مهم این مسأله می‌توان به خنک‌کاری سطوح گرم توسط اسپری قطرات مایع اشاره کرد. بر طبق نتایج حاصل، اعمال میدان الکتریکی منجر به کاهش میزان خنک‌کاری می‌شود. همچنین، افزایش عدد رینولدز موجب افزایش میزان خنک‌کاری می‌گردد.

در ادامه این تحقیق می‌توان اثر میدان الکتریکی متناوب را روی این پدیده بررسی کرد. همچنین، می‌توان برخورد قطره در سایر رژیم‌های برخورد یا سایر رژیم‌های انتقال حرارت را مطالعه کرد. استفاده از مدل‌های زاویه تماس دینامیکی و بررسی اثر مدل زاویه تماس نیز می‌تواند یکی از زمینه‌های تحقیقات آینده در این حوزه باشد.

۷ - فهرست علامت

C	ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
Ca	عدد موینگی (-)
D	قطر قطره (m)
E	بردار میدان الکتریکی (Vm^{-1})
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
k	هدایت حرارتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
n	بردار عمود یکه (-)
Oh	عدد اونسرج (-)
p	فشار (Pa)
q	چگالی بار سطحی (Cm^{-2})
R	شعاع قطره (m)
Re	عدد رینولدز (-)

- and sphere diameter", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol. 625, pp. 126862, 2021.
- [8] E. Ezzatneshan, A. Khosroabadi, A. Fattahi, "Studying of droplet impingement on hydrophilic and hydrophobic curved surfaces by lattice Boltzmann method based on Allen-Cahn equation", Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, Vol. 53, pp. 2869-2886, 2021, [in Persian فارسی].
- [9] Z. Bao, A. Zeng, T. Gao, Y. Gao, Q. He, Y. Huang, J. Chou, L. Yu, C. Zhang, F. Du, "Controlling impact behavior on superhydrophobic surfaces for droplets of nonionic surfactants by tailoring hydrophilic chain length", Journal of Molecular Liquids, Vol. 346, pp. 117071, 2022.
- [10] J. Li, P. B. Weisensee, "Low Weber number droplet impact on heated hydrophobic surfaces", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 130, pp. 110503, 2022.
- [11] H. Nazari, P. Pournaderi, "The electric field effect on the droplet collision with a heated surface in the Leidenfrost regime", Acta Mechanica, Vol. 230, pp.787-787, 2019.
- [12] M. Emdadi, P. Pournaderi, "Numerical simulation of conducting droplet impact on a surface under an electric field", Acta Mechanica, Vol. 231, pp. 1083-1103, 2020.
- [13] Y. Tian, Z. Peng, Y. Liu, L. Di, Z. Zhan, D. Ye, Y. Guan, X. Zhou, W. Deng, Y. Huang, "Effects of the electric field on the overall drop impact on a solid surface", Physical Review Fluids, Vol. 7, pp. 113604, 2020.
- [14] H. Xu, J. Wang, K. Yu, B. Li, W. Zhang, L. Zuo, H. B. Kim, "Droplet impact on hot substrates under a uniform electric field", Physics of Fluids, Vol. 34, pp. 092111, 2022.
- [15] H. Xu, J. Wang, H. Wang, B. Li, K. Yu, J. Yao, W. Zhang, L. Zuo, "Numerical investigation of droplet impact and heat transfer on hot substrates under an electric field", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 229, pp. 125721, 2024.
- [16] M. Kang, R. P. Fedkiw, X. D. Liu, "A boundary condition capturing method for multiphase incompressible flow", Journal of Scientific Computing, Vol. 15, pp 323-360, 2000
- [17] C. H. R. Mundo, M. Sommerfeld, C. Tropea, "Droplet-wall collisions: experimental studies of the deformation and breakup process", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 21, pp. 151-173, 1995.
- [18] H. Paknemat, A. R. Pishevar, P. Pournaderi, "Numerical simulation of drop deformations and breakup modes caused by direct current electric fields", Physics of Fluids, Vol. 24, pp. 102101, 2012.
- [19] R. Ghadami, P. Pournaderi, "Numerical study of droplet impact on a superheated surface under an electric field based on perfect and leaky dielectric theories", Heat Transfer, Vol. 53, pp. 3579-3604, 2024.
- [20] X. D. Liu, R. P. Fedkiw, M. Kang, "A boundary condition capturing method for Poisson's equation on irregular domains", Journal of Computational Physics, Vol. 160, pp. 151-178, 2000.
- [21] R. D. Selvakumar, H. Lee, "Bouncing modes and heat transfer of a dielectric droplet in the presence of an external electric field", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 191, pp. 122837, 2022.
- [22] A. Esmaeeli, P. Sharifi, "The transient dynamics of a liquid column in a uniform transverse electric field of small strength", Journal of Electrostatics, Vol. 69, pp. 504-511, 2011.