



شبیه‌سازی سه‌بعدی انتقال حرارت یک قطره غیرنیوتنی با در نظر گرفتن اثرات تبخیر سطحی

عارف خرمی^۱، امین امامیان^۲، امین امیری دلویی^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

۳- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

چکیده

در این مطالعه، مسئله سقوط یک قطره غیرنیوتنی غیر هم‌دمای به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. هندسه مساله به صورت سه بعدی در نظر گرفته شده و از مدل پرکاربرد توانی ($n=0.1$) برای بررسی رفتار غیرنیوتنی قطره استفاده شده است. همچنین، نرم‌افزار کامسول برای شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت قطره غیرنیوتنی انتخاب شده و نتایج حاصل از این تحقیق با کارهای مشابه پیشین مقایسه گردیده و صحت سنجی شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، تبخیر سطحی تأثیر به‌سزایی بر دمای قطره در حال سقوط دارد. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که در نظر گرفتن تبخیر سطحی نسبت به حالت بدون در نظر گرفتن تبخیر سطحی می‌تواند باعث تغییر دمای قطره تا مقدار قابل توجه ۱۰ درجه سانتی‌گراد شود. عوامل موثر بر تبخیر سطحی قطره شامل سرعت سیال و دمای قطره با جزئیات مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که سرعت سیال مهم‌ترین عامل در تغییر میزان تبخیر سطحی در قطره است. با دو برابر کردن میزان سرعت قطره، دمای آن ۸ درجه سانتی‌گراد افت پیدا می‌کند. بررسی مکانیزم حرکت و انتقال حرارت قطره غیرنیوتنی می‌تواند کاربردهای قابل توجهی در فرآیندهای مختلف در صنایع چاپ، رنگ و به خصوص داروسازی داشته باشد.

کلمات کلیدی

سقوط قطره، تبخیر سطحی، مدل غیرنیوتنی توانی، انتقال حرارت، کامسول.

Three-dimensional heat transfer simulation of a non-Newtonian droplet considering the effects of surface evaporation

Aref Khorrami¹, Amin Emamian², Amin Amiri Delouei^{3*}

1- Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2,3- Department of Mechanical Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran

Abstract

In this study, the problem of falling a non-isothermal non-Newtonian droplet has been investigated numerically. The geometry of the problem is considered in three-dimensional form. The widely used power-law model ($n=0.1$) has been used to investigate the non-Newtonian behavior of the droplet. COMSOL software has been selected for the numerical simulation of motion and heat transfer of non-Newtonian droplets. The results of this research have been compared with previous similar works and have been successfully validated. The simulations show that considering the surface evaporation compared to the case without considering the surface evaporation can change the temperature of the droplet up to a significant amount of 10°C. Factors affecting surface evaporation, including fluid velocity and droplet temperature, have been investigated in detail. The results show that fluid velocity is the most important factor in changing the amount of surface evaporation of the droplet. By doubling the drop's velocity, its temperature drops by 8°C. Investigating the mechanism of movement and heat transfer of non-Newtonian drops can have significant applications in various processes used in printing, dyeing, and especially pharmaceutical industries.

Keywords

Droplet falling, Surface evaporation, Non-Newtonian power-law model, Heat transfer, COMSOL.

۱- مقدمه

نمونه‌های دیگر می‌توان به کاربرد قطره در مبدل‌های حرارتی تماس مستقیم اشاره کرد که در آن عمل انتقال حرارت بین دو مایع مخلوط نشدنی صورت می‌گیرد. دیگر کاربردهای این شبیه‌سازی در صنایع رنگ و به‌خصوص چاپگرها است که از رنگ و جوهر به صورت قطره‌ای استفاده می‌کنند. در این صنعت تحقیقات بسیاری در زمینه اندازه‌گیری سایز و حرکت قطرات در حال انجام است و به منظور بهینه‌سازی این‌گونه فرآیندها داشتن اطلاعاتی دقیق از اندازه و سایز قطرات و همچنین رفتار آن‌ها در هنگام پاشش روی کاغذ بسیار مهم است [۸]. راه‌حل‌های تحلیلی و تجربی دارای نتایج دقیق و قابل اعتماد هستند [۹-۱۱]. مدل تئوری تبخیر قطره لیدن‌فر است برای محاسبه ارتفاع لایه بخار زیر قطره به صورت آزمایشگاهی انجام شده است [۱۲] و تأثیر فرآیندهای گرمایش و تبخیر قطرات بر ناپایداری احتراق فرکانس پایین توسط دودانگه و همکاران [۱۳] شبیه‌سازی شده است.

یکی از مسائل مینا و پایه‌ای در دینامیک سیالات، حرکت یک قطره در حال سقوط در یک فاز سیال مخلوط نشدنی است. در چند سال اخیر بررسی و تحلیل‌های مختلفی بر روی سقوط یا بالا رفتن قطرات در یک سیال دیگر صورت گرفته است که نشان از اهمیت این موضوع دارد [۱۴]. تیلور و آکریووس [۱۵] در حالتی که اعداد بی بعد رینولدز بسیار کم و عدد مویینگی محدود باشد، شکل قطره را به صورت کروی شبیه‌سازی کردند و به صورت تحلیلی نشان دادند که در اعداد رینولدز پایین، قطره شکل کروی خود را از دست می‌دهد. همچنین نشان دادند که در اعداد رینولدز بالا قطره به صورت پهن‌تری در می‌آید. با گذشت زمان عوامل متعدد دیگری نیز که در شکل و اندازه قطره تأثیر دارند، معرفی شده است. از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به خصوصیات رئولوژی سیال داخلی و خارجی و شکل اولیه قبل از سقوط اشاره کرد [۱۶]. گورکان [۱۷] مدل توانی را برای یک قطره در حال سقوط در یک سیال

مسئله‌ی حرکت سیالات چند فازی نیوتنی و غیرنیوتنی در طیف گسترده‌ای از کاربردهای مهندسی و طبیعی از چاپگرها گرفته تا بدن انسان دیده می‌شود [۲، ۱]. شبیه‌سازی حرکت سیالات چند فازی می‌تواند با وجود انتقال حرارت بین فازها و پدیده خنک‌کنندگی که تا حدی در مسئله دخیل است، پیچیده‌تر شود. پتانسیل موجود برای انتقال حرارت بین دو سیال نیز عمدتاً به گرادیان دمایی بین فازها (مانند محیط هوا و قطره در حال سقوط) نسبت داده می‌شود [۳، ۵]. تشکیل قطرات در انتهای نازل‌ها، حرکت و میزان تبخیر آن‌ها در سیالی دیگر مثل هوا، مدت زیادی است که توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. به طور خاص، بررسی حرکت سیالات غیرنیوتنی در سیالات دیگر پژوهشی به‌روز و مهم تلقی می‌شود که در صنایع داروسازی و بیومکانیک بسیار کاربردی است. برای آشکار شدن و فهم بهتر کاربرد و اهمیت آن به چند نمونه از آن‌ها اشاره شده است.

در فرآیند رنگ‌زنی خودرو، بررسی رفتار قطره برای کنترل ضخامت لایه رنگ از اهمیت بالایی برخوردار است چرا که پاشش قطرات اضافی یا ایجاد قطرات ثانویه بعد از آن باعث کاهش کیفیت رنگ در سطح مورد نظر می‌شود که هزینه‌های گزافی را در پی خواهد داشت [۶]. از جمله کاربردهای دیگر این‌گونه شبیه‌سازی‌ها در صنعت، می‌توان به استخراج مایع-مایع اشاره نمود که یک زمینه میان رشته‌ای بین مهندسی مکانیک، مهندسی شیمی و متالوژی است. این استخراج در بسیاری از صنایع، نظیر صنعت نفت (جداسازی ترکیبات آروماتیک از روغن پایه موتور و پالایش آن)، شیمیایی (جداسازی الفین‌ها و پارافین)، مهندسی هوا-فضا، مواد و متالوژی (ذوب و ریخته‌گری) بسیار کاربرد دارد که برای طراحی بهینه عملیات استخراج مایع-مایع وجود اطلاعات دقیقی از رفتار قطره، اندازه، شکل و سرعت آن دارای اهمیت است [۷]. از

قطره غیرنیوتنی در هوا با استفاده از نرم افزار کامسول^۱ مورد بررسی قرار گرفته که از مدل توانی^۲ برای شبیه‌سازی رفتار غیرنیوتنی استفاده شده است. عواملی مانند تغییرات دمایی قطره غیرنیوتنی، و همچنین سرعت قطره در حال سقوط که بر روی تبخیر سطحی دخیل هستند، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. تصویر شماتیک مربوط به هندسه مورد استفاده در این شبیه‌سازی، در شکل ۱ نشان داده شده است. مساله مورد بررسی از دو سیال غیر قابل اختلاط در یکدیگر تشکیل شده که با یکدیگر تبادل حرارتی دارند. در این شبیه‌سازی، تبخیر سطحی بر روی یک قطره غیرنیوتنی بررسی شده است که با استفاده از آن می‌توان میزان خطای مدل‌سازی را نسبت به حالت بدون در نظر گرفتن تبخیر سطحی ارزیابی کرد و نشان داد که این پدیده چه تاثیری بر روی تبخیر قطرات دارد. در این مقاله از مدل توانی ($n=0.1$) برای شبیه‌سازی قطره غیرنیوتنی استفاده شده است.

۲- معادلات حاکم

در این بخش روابط مهم به کار گرفته شده و همچنین معادلات حاکم بر شبیه‌سازی حاضر بیان شده است. در مطالعه‌ی حاضر شبیه‌سازی حرکت قطره به عنوان فاز گسسته در فاز پیوسته مورد بررسی قرار گرفته و جریان مورد بررسی جریانی آشفته، ناپایا و محوری فرض گردیده است که از دو سیال غیر قابل اختلاط تشکیل شده است. از تغییرات خواص فیزیکی مانند چگالی و کشش سطحی صرف نظر شده است. روابط مربوط به جریان‌های تراکم ناپذیر برای این شبیه‌سازی استفاده شده است:

$$\rho \nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + K] + F \quad (2)$$

$$\rho(u \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

نیوتنی در نظر گرفته است. امین‌زاده و همکاران [۱۸] میزان تغییرات در حرکت قطره، اندازه و شکل آن را به صورت آزمایشگاهی شبیه‌سازی کرده‌اند. در این پژوهش، تاثیراتی در رفتار مایعات، نظیر خواص غیرنیوتنی بررسی شد و مشخص گردید که افزودن ویژگی‌های ویسکوالاستیک در قطرات، موجب افزایش پایداری در شکل آن‌ها می‌شود. چن و همکاران [۱۹] سرمایه‌ی تبخیری قطره‌ای را که به یک سطح گرم برخورد می‌کند، به صورت عددی ارزیابی کردند. پان و همکاران [۲۰] مکانیسم‌های تبخیر قطرات آب را در شرایط آب‌گریز و فوق آب‌گریز مطالعه کردند. ریموندو و همکاران [۲۱] میزان تبخیر از سطح آب گرم و روابط آن با ویژگی‌های حرارتی هوایی در یک جریان اجباری را بررسی کردند. عواملی که در این شبیه‌سازی مورد توجه قرار گرفته است شامل وابستگی بین نرخ تبخیر، سرعت هوا و اختلاف دمای هوا بوده است. نتایج نشان داد میزان تبخیر، عمدتاً وابسته به سرعت جریان هوا می‌باشد. باقی موارد نیز در این آزمایش لحاظ شدند ولی تاثیرپذیری سرعت جریان بیش از باقی آن‌ها به ثبت رسید. همچنین نظریه‌ای از سوی کلیفت و همکاران [۲۲] مبتنی بر تغییر شکل کرووی قطره در ازای عدد مویینگی بی‌نهایت وجود دارد که بیان می‌کند تحت این شرایط قطره کرویت خود را از دست می‌دهد. اسمولیانسکی و همکاران [۲۳] تغییرات دینامیکی حباب‌های گاز در یک سیال را مورد مطالعه قرار دادند که در آن مقادیر مختلفی برای کشش سطحی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که پارامتر کشش سطحی عاملی تاثیرگذار بر روی دینامیک قطره است. آن‌ها به‌ازای اعداد رینولدز بالا توانستند شکل حباب بیضوی نامتقارن را شبیه‌سازی کنند. اخیراً دینامیک تبخیر قطرات [۲۵، ۲۴] و مقاومت حرارتی و انتقال جرم در رابط مایع-گاز یک قطره در حال تبخیر [۲۶] مورد مطالعه قرار گرفته است.

در مطالعه حاضر، شبیه‌سازی سه بعدی سقوط یک

^۱ COMSOL Multiphysics® software

^۲ Power-law non-Newtonian model

میزان و نرخ انتقال حرارت بین قطره و محیط معرفی شده است:

$$\rho C_p u \nabla T + \nabla \cdot q = s, \quad (9)$$

که

$$q = k \nabla T \quad (10)$$

در معادلات فوق C_p ظرفیت گرمایی ویژه و T توزیع دما هستند. همچنین K تانسور رسانایی و S منبع گرما هستند.

۲-۲- انتقال رطوبت در هوا

برای به دست آوردن میزان سیال تبخیر شده از قطره معلق در هوا از معادلات ذیل استفاده می‌کنیم. شایان ذکر است که تبخیر در این شبیه‌سازی لحاظ شده است چرا که میزان تبخیر در قطره غیرنیوتنی قابل توجه است. که در ادامه به آن پرداخته شده است [۱۴].

$$M_v u \cdot \nabla C_v + \nabla \cdot g = G \quad (11)$$

$$g = -M_v D \nabla C_v \quad (12)$$

$$C_v = \phi C_{sat} \quad (13)$$

در معادلات فوق C_v غلظت بخار، C_{sat} غلظت اشباع بخار، ϕ رطوبت نسبی و D بیانگر ضریب انتشار هستند. شرایط مرزی در مسئله حاضر، شرط عدم لغزش و عایق بر روی دیواره‌ها و سرعت ورودی ثابت برابر ۳ متر بر ثانیه و فشار محیط در خروجی هستند.

۳- هندسه مسئله و شبکه‌بندی

در این بخش به بررسی هندسه شبیه‌سازی می‌پردازیم. در ابتدا باید عنوان کرد سقوط قطره غیرنیوتنی در هوا به صورت سه بعدی مورد مطالعه قرار گرفته است و برای این کار از یک سلول مکعبی به ابعاد طول ۸۵ سانتی‌متر و عرض ۱۸ سانتی‌متر در ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر استفاده شده است.

$$\rho(u \cdot \nabla) \varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu T}{\sigma_\varepsilon} \right) \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} f_\varepsilon \quad (4)$$

$$\nabla G \cdot \nabla G + \sigma_w G (\nabla \cdot \nabla G) = (1 + 2\sigma_w) G^4 \quad (5)$$

که

$$K = (\mu + \mu_T) (\nabla \mu + (\nabla \mu)^T) \quad (6)$$

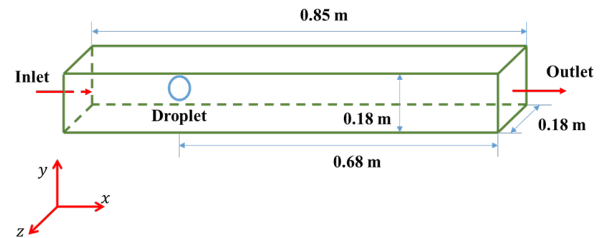
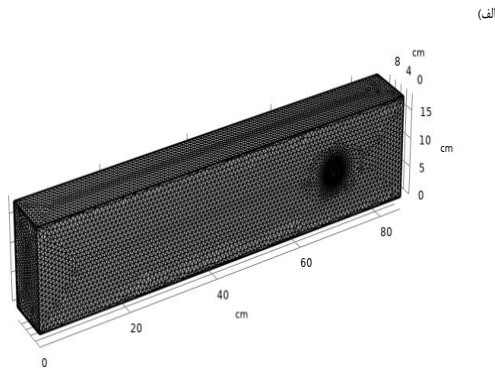
$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} f_\mu \quad (7)$$

$$P_k = \mu_T [\nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T)] \quad (8)$$

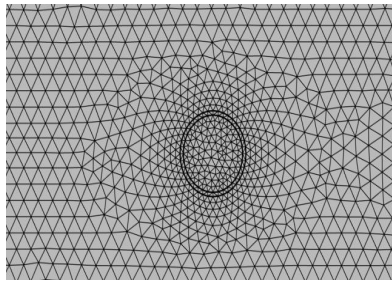
در معادلات فوق ρ چگالی، u سرعت و P نمایانگر فشار هستند. همچنین F بیانگر نیروی حجمی، k انرژی جنبشی در حالت آشفته $\left(\frac{3}{2} (U_{ref} l_T)^2 \right)$ و U_{ref} سرعت مرجع هستند که مقدار آن برابر با U_0 است l_T شدت آشفتگی را نشان می‌دهد. همچنین μ و μ_T به ترتیب ویسکوزیته آشفتگی و دینامیکی هستند. ε سرعت اتلاف انرژی جنبشی است و شش ثابت $C_{\varepsilon 2}$, $C_{\varepsilon 1}$, σ_ε , σ_k , C_μ بر اساس مدل‌های $k-\varepsilon$ نوشته شده‌اند که به ترتیب برابر با ۰/۰۹، ۱، ۱/۳، ۱/۴۴ و ۱/۹۲ هستند [۲۷]. مدل $k-\varepsilon$ یکی از رایج‌ترین مدل‌های دو معادله‌ای آشفتگی است. علت برتری آن نسبت به سایر مدل‌ها، تطبیق خوب با نتایج آزمایشگاهی است که منجر به استفاده از آن در اغلب شبیه‌سازی‌ها گردیده است. دو معادله‌ای بودن این مدل بدان معناست که شامل دو معادله انتقال اضافی برای نشان دادن خواص آشفتگی جریان است. یک مدل دو معادله‌ای، اثراتی مانند: انتقال گرما و انتشار انرژی متلاطم را به حساب می‌آورد. اولین متغیر انتقال یافته، انرژی جنبشی آشفتگی (k) و متغیر دوم انتقال یافته، میزان اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی (ε) است. متغیر دوم مقیاس آشفتگی را تعیین می‌کند، در حالی که متغیر اول، k ، انرژی در آشفتگی را مشخص می‌کند [۲۸].

۲-۱- انتقال حرارت در هوای مرطوب

در این بخش معادله انرژی مورد استفاده برای محاسبه



شکل ۱: هندسه و شماتیک مورد مطالعه



شکل ۲: نمایی از شبکه‌بندی الف) کل هندسه و ب) اطراف قطره

۳-۱- شبکه‌بندی

برای شبکه‌بندی شبیه‌سازی‌ها عمدتاً از دو روش شبکه‌بندی با ساختار و بی‌ساختار استفاده می‌شود که با توجه به هندسه مسئله و روند حل می‌تواند هر یک از مورد استفاده قرار گیرد. شبکه‌بندی بی‌ساختار که معمولاً در هندسه‌های پیچیده به کار گرفته می‌شود، به حجم بالای اطلاعاتی نیاز دارد. این در حالی است که برای هندسه‌های ساده‌تر مدل شبکه‌بندی با ساختار مناسب‌تر بوده و سرعت حل را افزایش می‌دهد. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، دمای میانگین بی‌بعد قطره برای اندازه‌های مختلف شبکه بررسی شده است. با در نظر گرفتن دقت قابل قبول و همچنین هزینه محاسباتی، شبکه با ۳۴۲۵۰۰ المان انتخاب شده است. شایان ذکر است که دما با استفاده از دمای بالادست (T_{upstr}) بی‌بعد شده است.

جدول ۱: استقلال از شبکه برای مطالعه حاضر

تعداد المان	۲۲۹۵۰۰	۳۰۸۴۰۰	۳۴۲۵۰۰	۴۰۵۶۰۰
دمای بی‌بعد	۳/۳۸	۳/۴۹	۳/۵۵	۳/۵۶
خطا (درصد)	-	۲/۱۵	۱/۶	۰/۲۸

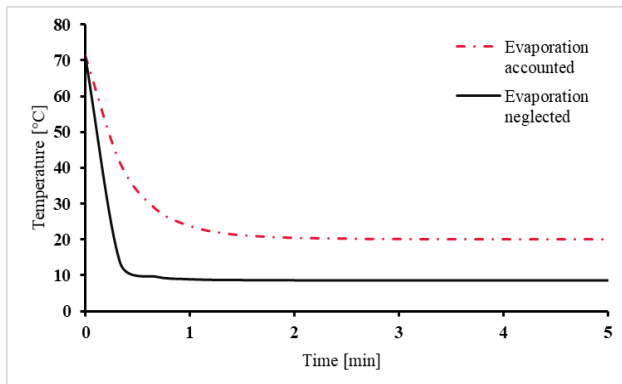
۴- نتایج و بحث

۴-۱- استقلال از شبکه‌بندی و اعتبار سنجی

در این مسئله از روش المان محدود (FEM) برای حل عددی استفاده شده است. این روش برای معادلات دیفرانسیل جزئی روی دامنه‌های پیچیده که همبستگی و یکنواختی کافی ندارند، بسیار مناسب است. در این روش، معادلات حاکم بر مساله از فرم دیفرانسیلی به فرم انتگرالی معادل تبدیل می‌شوند. همچنین هندسه پیچیده به المان‌های کوچک‌تری تقسیم می‌شود و معادلات دیفرانسیل ساده‌تر شده و قابل حل می‌گردند. معادلات گسسته‌سازی شده به سیستمی از معادلات جبری تبدیل می‌شوند که بیانگر تقریبی از تابع مجهول بر روی هر المان است. در نهایت با استفاده از حساب تغییرات، پاسخی برای حل مسئله یا به حداقل رساندن تابع خطا یافت می‌شود. برای بیان صحت‌سنجی شبیه‌سازی انجام شده، نتایج با مطالعه عبدالنژاد و همکاران [۲۹] مقایسه شده است. همانطور که در شکل ۲ قابل مشاهده است دقت انجام این شبیه‌سازی مطلوب بوده و تطابق قابل قبولی بین نتایج وجود دارد.

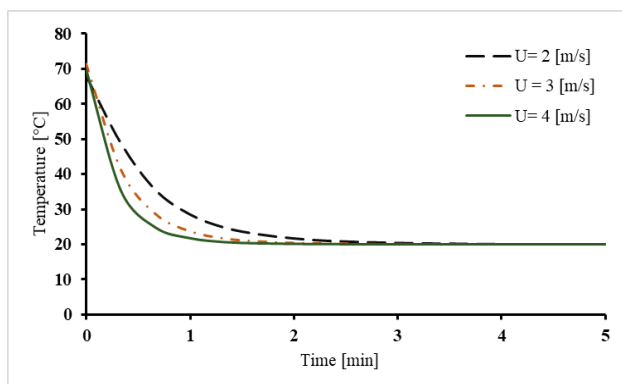
امین امیری دلویی و همکاران

یافت. می‌توان بیان کرد، با وجود تغییر دمایی حدود $^{\circ}\text{C}$ ۱۳ در انتهای بازه‌ی زمانی، باید از صرف نظر کردن میزان تبخیر سطحی خودداری کرد.

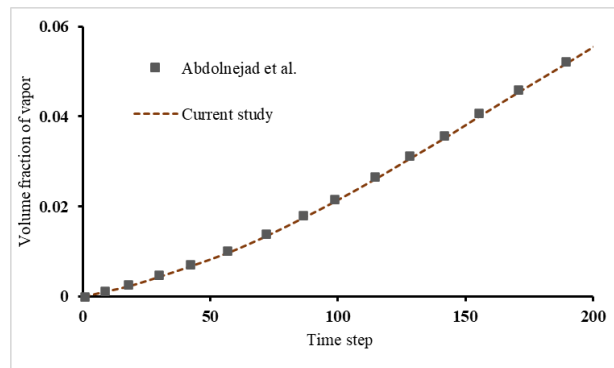


شکل ۵: میزان تبخیر سطحی در برابر زمان با وجود تبخیر سطحی و بدون در نظر گرفتن تبخیر سطحی

در ادامه میانگین دمای قطره غیرنیوتنی در حال سقوط، زمانی که تبخیر سطحی در نظر گرفته شده است، در سرعت‌های ۲، ۳ و ۴ متر بر ثانیه و دمای بالادست 293 K $T_{\text{upstr}} =$ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آن در شکل ۶ قابل مشاهده است. دمای قطره، با اعمال سرعت‌های مختلف، در محدوده زمانی ۰ تا ۳ دقیقه تغییرات قابل توجهی دارد، اما بعد از گذشت بیش از ۴ دقیقه در تمامی سرعت‌ها قطره به طور کامل تبخیر شده است. همانطور که در شکل ۶ مشهود است. با افزایش سرعت، شیب گرادینان دمایی نیز افزایش می‌یابد و به همان نسبت، قطره نیز با سرعت بیشتری تبخیر می‌شود.



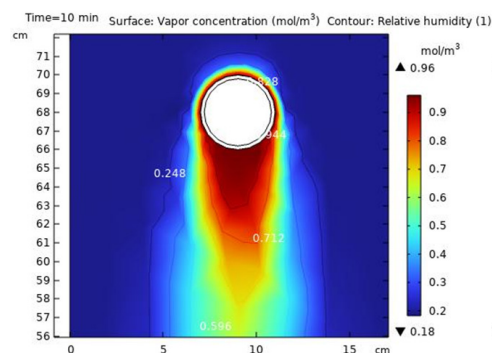
شکل ۶: نمودار تبخیر سطحی در برابر زمان برای سرعت‌های ۲، ۳ و ۴ متر بر ثانیه



شکل ۳: مقایسه نتایج تحقیق حاضر با مطالعه عبدالنژاد و همکاران [۲۹].

همانطور که در شکل ۴ قابل مشاهده است میزان

تبخیر سطحی در سطح قطره غیرنیوتنی مورد بررسی قرار گرفته است. تبخیر سطحی در این مطالعه میزان بالایی داشته و بر روند حل تاثیر به‌سزایی دارد. همانطور که انتظار می‌رود میزان رطوبت نسبی در سطح بسیار زیاد بوده و میزان تبخیر قطره در طول ۱۰ دقیقه به حدود ۳۰ گرم رسیده است که عدد قابل توجهی است.



شکل ۴: میزان تبخیر سطحی ایجاد شده در سطح قطره که در زمان $t=10\text{ min}$ ثبت شده است.

در این مطالعه، بررسی روی سقوط قطره غیرنیوتنی در سیال هوا به دو صورت: (۱) با وجود تبخیر سطحی و (۲) بدون در نظر گرفتن تبخیر سطحی، انجام شده است که می‌توان در شکل ۵ تفاوت بین آن‌ها را مشاهده نمود. شکل ۵، دمای قطره غیر نیوتنی را در بازه زمانی پنج دقیقه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با وجود تبخیر سطحی، دما مقدار بیشتری دارد و بعد از گذشت دو دقیقه تغییرات به شکل ثابتی ادامه خواهد

و به اختلاف بیش از ۸ درجه سانتی‌گراد نسبت به حالت پیشین خود می‌رسد. همچنین فرض عدم وجود تبخیر سطحی در قطره می‌تواند باعث خطاهای قابل توجهی در محاسبات شود که میزان اختلاف دمای آن به بیش از ۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در بهینه‌سازی فرایندهای شامل حرکت قطره در صنایع مختلف مربوط به چاپ‌گرها، تولید رنگ و داروسازی بسیار مفید خواهد بود.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

غلظت اشباع بخار	C_{sat}
غلظت بخار	C_v
ظرفیت گرمایی ویژه	C_p
ضریب انتشار	C
نیروی حجمی، N/m^2	F
تانسور رسانایی	K
انرژی جنبشی مدل آشفستگی	k
شدت آشفستگی	l_T
منبع گرما	S
توزیع دما	T
دمای بالا دست	T_{upsr}
سرعت سیال	u
سرعت مرجع، m/s	U_{ref}

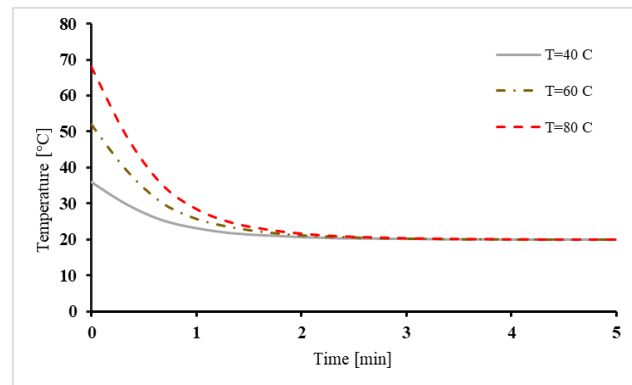
علائم یونانی

چگالی، kg/m^3	ρ
رطوبت نسبی	Φ
ویسکوزیته آشفستگی	μ_T
ویسکوزیته دینامیکی	μ
سرعت اتلاف انرژی جنبشی مدل آشفستگی	ϵ

۷- مراجع

- [1] M. Mahdavi, M. Sharifpur, and J. P. Meyer, "Fluid flow and heat transfer analysis of nanofluid jet cooling on a hot surface with various roughness," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 118, p. 104842, 2020.
- [2] A. Abed, S. Shcheklein, and V. Pakhaluev, "Comparative study on steady and unsteady heat transfer analysis of a spherical element using air/water mist two-phase flow," *Thermal Science*, vol. 25, no. 1 Part B, pp. 625-635, 2021.
- [3] S. Semenov, V. Starov, M. Velarde, and R. Rubio, "Droplets evaporation: Problems and solutions," *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 197, no. 1,

یکی از عوامل مهم در تغییرات دمای میانگین و میزان تبخیر سطحی قطره، مقادیر مختلف دمای قطره پیش از سقوط است. در شبیه‌سازی حاضر، دمای قطره در ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفته است. سرعت سقوط قطره در این بخش ثابت و برابر ۲ متر بر ثانیه است که نتایج آن در شکل ۷ قابل مشاهده است. همانطور که انتظار می‌رود با افزایش دمای قطره، دمای میانگین در هنگام سقوط افزایش یافته و با سرعت بیشتری شروع به کاهش می‌کند. می‌توان این‌گونه بیان کرد که قطره در ماه‌های مختلف تقریباً در بازه زمانی یکسانی کاملاً تبخیر شده و تبخیر سطحی موجود، وابستگی ناچیزی به افزایش دما دارد.



شکل ۷: نمودار تبخیر سطحی در برابر زمان برای دمای قطره در ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد (سرعت سقوط قطره ۲ متر بر ثانیه است)

۵- نتیجه‌گیری

در این شبیه‌سازی عددی سه بعدی، تبخیر سطحی یک قطره غیرنیوتنی در هنگام سقوط در هوا مورد مطالعه قرار گرفته است. این شبیه‌سازی بررسی‌هایی در مورد میزان تغییر تبخیر سطحی قطره در هنگام سقوط و روابط آن با دما انجام شده که سیال مورد مطالعه از نوع سیال توانی ($n=0.1$) است. شبیه‌سازی با نرم افزار محاسبات عددی کامسول صورت گرفته است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که بیشترین تاثیر در تبخیر سطحی قطره وابسته به سرعت سیال و دمای آن در هنگام سقوط است. با افزایش دو برابری سرعت، میزان افت دما شدیدتر شده

- CFD study on the evaporative cooling of a water droplet located in a duct,” *Reports in Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 149-155, 2021.
- [15] T. Taylor and A. Acrivos, “On the deformation and drag of a falling viscous drop at low Reynolds number,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 18, no. 3, pp. 466-476, 1964.
- [16] H. A. Stone, “Dynamics of drop deformation and breakup in viscous fluids,” *Annual review of fluid mechanics*, vol. 26, no. 1, pp. 65-102, 1994.
- [17] T. Gürkan, “Motion of a circulating power-law drop translating through Newtonian fluids at intermediate Reynolds numbers,” *Chemical Engineering Communications*, vol. 80, no. 1, pp. 53-67, 1989.
- [18] M. Aminzadeh, A. Maleki, B. Firoozabadi, and H. Afshin, “On the motion of Newtonian and non-Newtonian liquid drops,” *Scientia Iranica*, vol. 19, no. 5, pp. 1265-1278, 2012.
- [19] J.-n. Chen, Z. Zhang, R.-n. Xu, X.-l. Ouyang, and P.-x. Jiang, “Numerical investigation of the flow dynamics and evaporative cooling of water droplets impinging onto heated surfaces: an effective approach to identify spray cooling mechanisms,” *Langmuir*, vol. 32, no. 36, pp. 9135-9155, 2016.
- [20] Z. Pan, S. Dash, J. A. Weibel, and S. V. Garimella, “Assessment of water droplet evaporation mechanisms on hydrophobic and superhydrophobic substrates,” *Langmuir*, vol. 29, no. 51, pp. 15831-15841, 2013.
- [21] A. M. Raimundo, A. R. Gaspar, A. V. M. Oliveira, and D. A. Quintela, “Wind tunnel measurements and numerical simulations of water evaporation in forced convection airflow,” *International journal of thermal sciences*, vol. 86, pp. 28-40, 2014.
- [22] R. Clift, J. R. Grace, and M. E. Weber, “*Bubbles, drops, and particles*,” 2005.
- [23] A. Smolianski, H. Haario, and P. Luukka, “Numerical bubble dynamics,” in *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 14: Elsevier, 2003, pp. 94.946-1
- [24] O. Avni and Y. Dagan, “Dynamics of evaporating respiratory droplets in the vicinity of vortex dipoles,” *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 148, p. 103901, 2022.
- [25] L. Gao et al., “Dynamics of inner bubble during water droplet evaporation on conical micro-pillars surfaces,” pp. 265-278, 2011.
- [4] M. Norouzi, H. Abdolnezhad, and S. Mandani, “An experimental investigation on inertia motion and deformation of Boger drops falling through Newtonian media,” *Meccanica*, vol. 54, no. 3, pp. 473-490, .2019
- [5] S. P. Fisenko and J. A. Khodyko, “Low pressure evaporative cooling of micron-sized droplets of solutions and its novel applications,” *International journal of heat and mass transfer*, vol. 52, no. 15-16, pp. 3842-3849, 2009.
- [6] T. Kékesi, G. Amberg, and L. P. Wittberg, “Drop deformation and breakup,” *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 66, pp. 1-10, 2014.
- [7] K. Bäumlér, M. Wegener, A. Paschedag, and E. Bänsch, “Drop rise velocities and fluid dynamic behavior in standard test systems for liquid/liquid extraction—experimental and numerical investigations,” *Chemical engineering science*, vol. 66, no. 3, pp. 426-439, 2011.
- [8] O. Breslouer, “Rayleigh-plateau instability: falling jet,” Project Report, 2010.
- [9] A. Emamian, M. Norouzi, and M. Davoodi, “Drops with circular stagnation lines: combined effects of viscoelastic and inertial forces on drop shape,” *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 3, 04p. 104795, 2022.
- [10] M. Norouzi, A. Emamian, and M. Davoodi, “A new mathematical technique for analysis of internal viscoplastic flows through rectangular ducts,” *Journal of Engineering Mathematics*, vol. 127, no. 1, pp. 1-26, 2021.
- [11] M. Norouzi, A. Emamian, and M. Davoodi, “An analytical and experimental study on dynamics of a circulating Boger drop translating through Newtonian fluids at inertia regime,” *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 267, pp. 1-13, 2019.
- [12] S. Mirzaparikhany and M. Ansari, “A Theoretical Model for Evaporation of Leidenfrost Drop for Prediction of Vapor Layer Thickness under the Drop,” *Modares Mechanical Engineering*, vol. 19, no. 4, pp. 969-979, 2019.
- [13] D. Dodange, M. Heydari, and E. Valizade, “The effects of processes heating and evaporation of droplet on the Low frequency combustion instability,” *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 7, no. 4, pp. 251-265, 2017.
- [14] A. Khorrami, A. Emamian, and S. Karimnejad, “A

International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 131, p. 105841, 2022.

[26] J. G. Plascencia, E. Bird, and Z. Liang, "Thermal and mass transfer resistance at a liquid-gas interface of an evaporating droplet: A molecular dynamics study," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 192, p. 122867, 2022.

[27] S. Fan, B. Lakshminarayana, and M. Barnett, "Low-Reynolds-number k-epsilon model for unsteady turbulent boundary-layer flows," *AIAA journal*, vol. 31, no. 10, pp. 1777-1784, 1993.

[28] B. Mohammadi and O. Pironneau, "Analysis of the k-epsilon turbulence model," 1st ed., Wiley, 1994.

[29] M. N. H. Abdolnezhad, and A. Emamian, "Numerical investigation of a sedimenting droplet's falling dynamics and evaporation in a viscous fluid flow," *International conference on applied research in science and engineering*, 2018.