

بررسی تجربی اثرات موئینگی در دینامیک تبخیر سطحی قطرات آب*

امیر کریم دوست یاسوری^(۱)

محمد پسندیده فرد^(۲)

چکیده تبخیر سطحی قطرات آب بر روی سطح جامد دارای کاربردهای فراوانی می‌باشد که از موارد فنی نظیر چاپ جوهرافشان، سرمایه‌های از طریق پاشش و انواع پوشش‌دهی گرفته تا کاربردهای بیولوژیکی و ژئوفیزیکی را شامل می‌شود. در این تحقیق، رفتار سطوح شیشه، پلکسی گلاس، آلومینیم و مس در تبخیر سطحی قطرات آب به صورت تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرض شده است که تبخیر قطره صرفاً ناشی از نفوذ جرم بخار آب از سطح قطره به محیط صورت پذیرد و از اثرات دیگر صرف‌نظر می‌شود. مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که تبخیر سطحی برای سطوح آلومینیم و مس عموماً در سطح تماس ثابت صورت می‌گیرد و این در حالیست که قطره‌ی آب بر سطوح شیشه و پلکسی گلاس معمولاً در بازه‌های زمانی مشخصی رفتار لغزشی را نیز تجربه می‌کند. تغییرات انرژی سطحی ضمن تبخیر سطحی قطره بر روی سطح از دیگر موارد مورد بررسی در این تحقیق است.

واژه‌های کلیدی تبخیر سطحی، زاویه‌ی تماس قطره، انرژی سطحی.

Experimental Study of Capillary Effects on the Dynamics of Surface Evaporation of Water Droplets

A. Karimdoost Yasuri

M. Passandideh-Fard

Abstract The evaporation of liquid droplets is of fundamental importance in a large number of practical situations ranging from technological applications such as ink-jet printing, spray cooling and various coating processes, to a variety of biological and geophysical contexts. In this study, the behavior of the surfaces of Glass, Plexiglas, Aluminum and Copper in the evaporation of water droplets is studied experimentally. It is assumed that the transport of vapour in the atmosphere is dominated by diffusion and other effects are ignored. Experimental observations show that the surface evaporation on the surfaces of Aluminum and Copper are generally carried out in a constant contact area while the water droplets on the surfaces of Glass and Plexiglas usually experience the sliding behavior in certain timescales. Furthermore the changes of surface energy during the process of evaporation of water droplets on the surface are also discussed.

Key Words surface evaporation, droplet contact angle, surface energy.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۱/۷/۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۹/۱۱ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول: استادیار، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان.

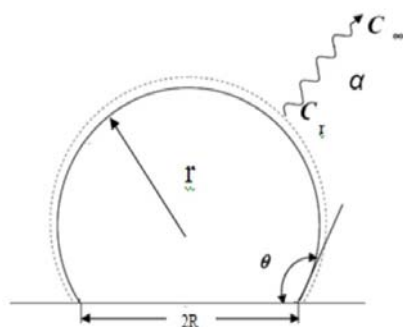
(۲) دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

مقدمه

اخیراً تبخیر سطحی قطرات آب بر روی سطح جامد به علت کاربرد آن در تکنیک رنگ (Dye painting technique) و آرایه DNA/RNA از طریق جریان داخلی (DNA/RNA array through internal flow) توجه زیادی را به خود جلب کرده است [1]. تبخیر سطحی قطره را می‌توان در چاپ جوهرافشان (Ink-jet printing) و در بسیاری از اشکال پوشش‌دهی از طریق پاشش ذرات مایع (Spray coating) نظیر اسپری کشاورزی مشاهده کرد که در آن‌ها معمولاً نرخ تبخیر یا زمان کل تبخیر از جمله موضوعات مورد علاقه است [2]. درک کامل تبخیر قطره دارای اهمیت اساسی در بررسی نرخ فرآیند خشک کردن (The drying rate)، الگوهای جریان داخل قطره‌های در حال خشک شدن و رسوبات باقیمانده (The residual deposits) دارد [3]. تحقیقات نشان می‌دهد که سطوح جامد از حیث تراز انرژی به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند [4]: اول سطوح انرژی بالا که در آن‌ها انرژی پیوند شیمیایی از مرتبه‌ی یک الکترون ولت است و به پیوندهای فلزی و یونی مربوط است و دوم سطوح انرژی پایین که در آن‌ها انرژی پیوند شیمیایی از مرتبه $1kT$ (k ثابت بولتزمن و T دمای کلون است) است و به پلیمرها مربوط می‌شوند. در سطوح اول، انرژی سطحی سطح جامد/ هوا از مرتبه $500 - 5000 \text{ mJ} / \text{m}^2$ می‌باشد و تقریباً همه‌ی مایعات شامل آب بر روی آن‌ها پخش می‌شوند (بنابراین زاویه‌ی تماس (Contact angle) آن‌ها صفر درجه است). در چنین حالتی قطره‌ی مایع تا تبخیر کامل تحت تأثیر دو مکانیسم رقابتی پخش (Spreading) (انبساط خط تماس) و تبخیر (انقباض خط تماس) قطره بر روی سطح جامد است [5]. برای سطوح با انرژی پایین، $10 - 50 \text{ mJ} / \text{m}^2$ می‌باشد و آن‌ها مشخصات خیس‌شدگی جزئی را از خود نشان می‌دهند و زاویه‌ی تماس غیر صفر دارند. اساس فرآیند تبخیر قطره شامل اثر نیروهای سطحی در

مجاورت خط تماس متحرک می‌باشد که در مراجع [6, 7] به آن پرداخته شده است. تحقیقات زیادی پیرامون تبخیر سطحی قطرات آب بر روی سطوح جامد با استفاده از روش‌های تجربی [8-17] و شبیه‌سازی کامپیوتری [18, 19] وجود دارد. چاندر و همکاران [20] در سال ۱۹۹۶ اثر تغییرات زاویه‌ی تماس قطره در تبخیر قطره بر روی سطوح داغ را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که با کاهش زاویه‌ی تماس، سطح تماس بین قطره و سطح جامد افزایش می‌یابد که این امر باعث افزایش هدایت حرارت قطره و در نهایت نرخ تبخیر قطره می‌شود. تحقیقات هو و همکاران [21] در سال ۲۰۰۲ نشان داد که نرخ تبخیر قطره برای زوایای تماس اولیه‌ی کوچک ($\theta_i < 40^\circ$) تقریباً ثابت می‌ماند؛ آن‌ها هم‌چنین با استفاده از رفتار خط تماس، زاویه‌ی تماس پس‌روی (Receding contact angle) قطره‌ی آب بر سطح شیشه‌ی تمیز را ۲ تا ۴ درجه گزارش کردند. همه‌ی تحقیقات مذکور وابستگی خطی نرخ تبخیر به شعاع خط تماس قطره را گزارش کرده‌اند. بیردی و همکاران [22] شاید اولین بار وابستگی خطی نرخ تبخیر به شعاع تماس قطره را ذکر کردند. دیگان [16] یک دهه بعد، تبخیر قطره و تشکیل رسوبات حلقه مانند از یک ناخالصی را بر روی سطح بررسی کرد. او نشان داد که تشکیل حلقه به علت ایجاد نیروی موئینگی است که در نتیجه‌ی آن بیشتر تبخیر در نزدیک ناحیه‌ی خط تماس رخ می‌دهد. بیردی و همکاران [22] هم‌چنین نشان دادند که نرخ تبخیر قطره بر سطوح آبدوست ($\theta_0 < 90^\circ$) نسبت به زمان ثابت می‌ماند و طی آن زاویه‌ی تماس قطره در سطح تماس ثابت کاهش می‌یابد. ولی نرخ تبخیر بر سطوح آبگریز ($\theta_0 > 90^\circ$) تغییرات غیرخطی دارد که در طی آن سطح تماس در زاویه‌ی تماس ثابت کاهش می‌یابد. این در حالیست که کولینچ در سال ۲۰۰۹ رفتار غالب قطره حین تبخیر سطحی برای دو سطح شدیداً آبگریز ($\theta_0 > 150^\circ$) ولی با پسماند (Hysteresis) پایین و بالا را به ترتیب لغزشی و

مطابق شکل (۱)، برای قطره‌ای که بر روی سطح جامد قرار گرفته است نرخ تبخیر به علت ممانعت سطح، کمتر از مقدار رابطه‌ی (۱) خواهد بود [21]. در ادامه به معرفی روش انجام تحقیق، مشخصات دستگاه آزمایش و جمع‌آوری اطلاعات پرداخته می‌شود.



شکل ۱. یک قطره بر روی سطح

روش انجام آزمایش

سطوح شیشه، پلکسی گلاس، آلومینیم و مس برای انجام آزمایش به کار می‌رود. از نمونه‌های سطح جامد عاری از هر نوع آلودگی سطحی برای انجام آزمایش استفاده می‌شود. با استفاده از سرنگ، قطره‌ای از آب بر روی سطح جامد گذاشته می‌شود و با یک دوربین CCD (Coupled-Camera Devise) از لحظه‌ی تماس قطره بر روی سطح تا لحظه‌ی ناپدید شدن آن از فرآیند تبخیر سطحی قطره در بازه‌های زمانی ۰/۵ دقیقه عکس گرفته می‌شود. تصاویر به دست آمده بعد از انتقال به کامپیوتر با استفاده از نرم‌افزار تحلیل تصویر (Image processing) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و کمیت‌هایی نظیر ارتفاع خط مرکزی قطره (ارتفاع ماکزیمم) و شعاع تماس قطره اندازه‌گیری می‌شوند. جدول (۱) جزئیات دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد.

چیدمان دستگاه آزمایش مطابق شکل (۲) می‌باشد و آزمایش‌ها در محیط با دمای 26 ± 2 درجه‌ی سانتی‌گراد و رطوبت نسبی بین $3\% \pm (40-50)$ صورت گرفته است.

غیرلغزشی گزارش کرد [23]. وی نشان داد که رفتار لغزشی یا غیر لغزشی خط تماس حین تبخیر سطحی قطره هم تابع قابلیت خیس‌شدگی (آبگریزی و آبدوستی) سطح و هم تابع پسماند زاویه‌ی تماس (اختلاف زاویه‌ی تماس پیشرو و پسرو) است. بنابراین علی‌رغم تحقیقات زیاد هنوز معیاری برای پیش‌بینی رفتار لغزشی یا غیرلغزشی قطره بر روی سطح ضمن تبخیر قطره در دست نیست و کماکان تمایز سطوح برای چنین رفتاری از موضوعات چالش برانگیز محسوب می‌شود. تحقیق حاضر اثر جنس سطح را در قالب سطوح مختلف شیشه، پلکسی‌گلاس (Plexiglas)، آلومینیم و مس بر روی تبخیر سطحی قطرات آب به صورت تجربی مورد بحث و بررسی قرار می‌دهد. با معرفی موانع انرژی در مقابل تبخیر، معیاری برای لحظه‌ی وقوع لغزش خط تماس در حین تبخیر قطرات بر روی سطح ارائه می‌شود. در نهایت تغییرات انرژی سطحی قطره ضمن تبخیر سطحی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

معادله‌ی حاکم بر نرخ تبخیر سطحی قطره

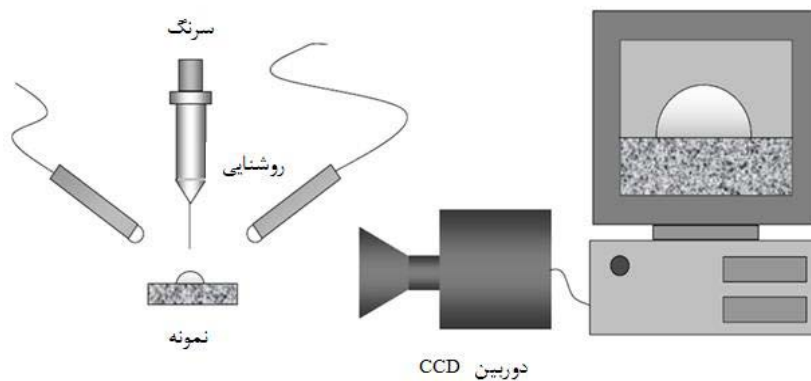
معادلات حاکم بر نرخ نفوذ جرم بخار هوا و نرخ هدایت حرارت از لحاظ ریاضی مشابه هستند. ماکسول معادله نرخ نفوذ کلی غلظت بخار را از یک قطره به شعاع r در حالت شبه تعادلی یا حالت پایدار و با فرض این‌که غلظت بخار در سطح قطره c_r با غلظت حالت تعادل (یعنی غلظت بخار اشباع در دمای سطح قطره) معادل باشد به صورت زیر به دست آورد [24]:

$$\dot{m} = \alpha(c_r - c_\infty) \frac{S}{r} \quad (1)$$

که در آن α ضریب نفوذ بخار آب در هوا، c_∞ غلظت بخار آب در فاصله‌ی خیلی دور و S سطح خارجی قطره است و داریم $c_\infty = \Phi c_r$ که در آن Φ رطوبت نسبی محیط است. این رابطه برای یک قطره که در شرایط آزاد و شناور در محیط قرار دارد صادق است. اما

جدول ۱ وسایل انجام آزمایش

وسيله	ملاحظات
دوربين	Camera Model: GRAS-03K2M/C, 1/3" KAI 0340D CCD
لنز دوربين	TEC-M55
سرنگ آزمایش	میکرولیتر
سطح جامد مورد آزمایش	پلکسی گلاس، شیشه، مس و آلومینیم
مایع مورد آزمایش	آب



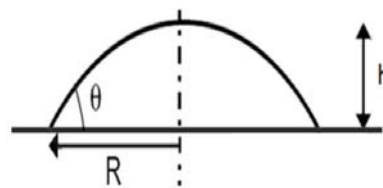
شکل ۲ شماتیکی از تجهیزات آزمایش در تحقیق حاضر

عدد باند به دست آمده برای آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق در محدوده‌ی $0/2-0/4$ است که نشان می‌دهد تنش سطحی غالب است. بنابراین می‌توان شکل قطره طی تبخیر قطره را به عنوان بخشی از کره در نظر گرفت. در این حالت می‌توان با استفاده از روابط هندسی زاویه‌ی تماس قطره را به صورت زیر به دست آورد [21]:

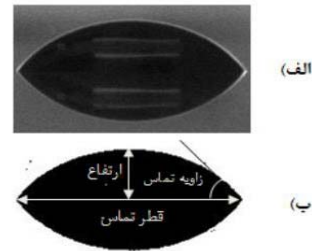
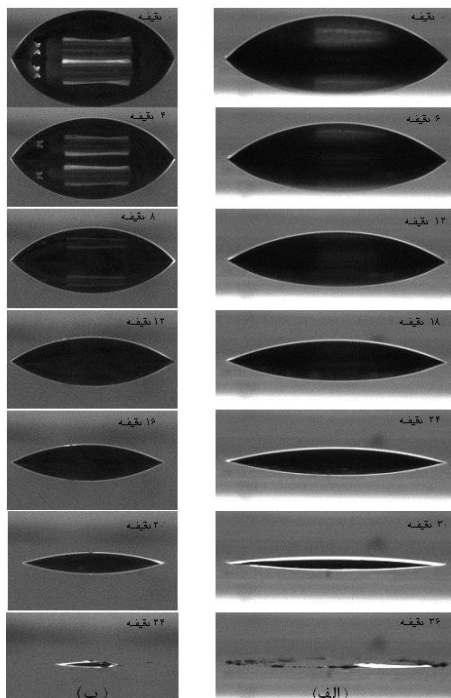
$$\theta = 2 \text{Arc tan} \left(\frac{h}{R} \right) \quad (2)$$

شکل (۴) نمونه‌ای از تصویر واقعی قطره بر روی سطح و تصویر آن بعد از انتقال به نرم‌افزار پردازش تصویر را نشان می‌دهد.

به منظور تعیین این که شکل قطره بر روی سطح جامد شکل کره‌ی به خود می‌گیرد یا خیر، از عدد باند (Bond number) استفاده می‌شود که به صورت نسبت نیروی گرانش به نیروی کشش سطحی با رابطه‌ی $Bo = \Delta \rho g R h_0 / \gamma$ تعریف می‌شود که در آن $\Delta \rho$ اختلاف چگالی بین آب و هوا، g ثابت گرانش، R شعاع خط تماس، h_0 ارتفاع اولیه‌ی خط مرکزی قطره و γ کشش سطحی آب/هوا است [1, 21] (شکل ۳).



شکل ۳ پارامترهای قابل اندازه‌گیری قطره بر روی سطح



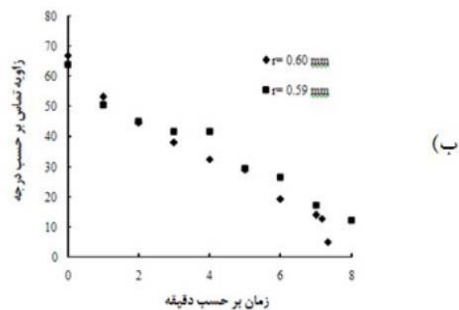
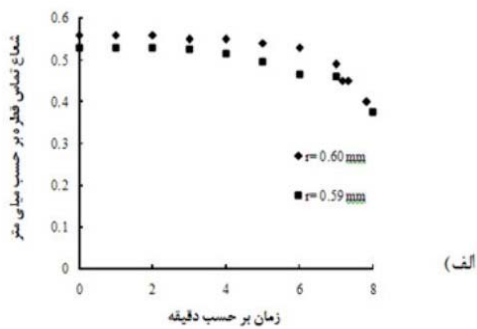
شکل ۴ نمونه‌ای از الف) تصویر واقعی قطره بر روی سطح
ب) تصویر بعد از انتقال به نرم‌افزار پردازش تصویر برای
اندازه‌گیری مشخصه‌های قطره در حال تبخیر

نرم‌افزار تحلیل تصویر اطلاعات ارزشمندی را برای تعیین کمیت‌های مورد علاقه در فرآیند تبخیر سطحی قطره می‌دهد که در ذیل به آن پرداخته می‌شود. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان با عملیاتی نظیر ترشولد (Threshold)، لبه‌ی سطح مشترک قطره را مشخص کرد و به راحتی کمیت‌هایی نظیر قطر تماس و ارتفاع خط مرکزی قطره را به دست آورد.

شکل (۵) تصاویر قطرات آب در حال تبخیر را بر روی یک سطح آلومینیم و یک سطح پلکسی گلاس از لحظه‌ی تماس با سطح تا لحظه‌ی ناپدید شدن آن را نشان می‌دهد. برای وضوح بیشتر تغییر شکل قطره حین تبخیر، عکس‌برداری از آن با یک زاویه‌ی ۱۵ درجه نسبت به افق صورت گرفته است. در نتیجه با توجه به صاف بودن سطح آزمایش، تصویر قطره روی سطح نیز در تصاویر مشاهده می‌شود.

از آن‌جا که فرآیند تبخیر سطحی در حالت هم‌دما صورت می‌گیرد (دمای حباب تر (Wet bulb) هوا) لذا تبخیر سطحی برای سطوح مختلف با خواص حرارتی جسم جامد مرتبط نیست. نتایج به دست آمده قابل تکرار می‌باشد و با تکرار آزمایش، تغییر قابل توجهی مشاهده نمی‌شود. شکل (۶) تغییرات شعاع و زاویه‌ی تماس قطره با دو شعاع اولیه $r = 0.59, 0.60 \text{ mm}$ (مطابق شکل (۱) با استفاده از رابطه‌ی $r = R/\sin(\theta)$) را ضمن تبخیر سطحی بر روی سطح پلکسی گلاس نشان می‌دهد.

شکل ۵ نما از پهلوی یک قطره آب ضمن تبخیر سطحی آن بر روی الف) آلومینیم ب) پلکسی گلاس



شکل ۶ آهنگ تغییرات، الف) شعاع تماس، ب) زاویه‌ی تماس نسبت به زمان بر روی سطح پلکسی گلاس در شعاع‌های اولیه 0.59 و 0.60 میلی‌متر (تکرارپذیری آزمایش)

نتایج و بحث

در این بخش به بیان نتایج آزمایش و بحث و بررسی پیرامون آن‌ها پرداخته می‌شود که به چهار قسمت جداگانه تقسیم شده است. در قسمت اول به تبخیر سطحی قطرات آب در اندازه‌های مختلف بر روی یک سطح آلومینیمی و یک سطح پلکسی گلاس پرداخته می‌شود. تبخیر سطحی قطرات آب بر روی سطوح مختلف و هم‌چنین مقایسه‌ی آن‌ها با هم در قسمت دوم بحث می‌شود. در قسمت سوم با معرفی موانع انرژی در مقابل تبخیر، معیاری برای لحظه‌ی وقوع لغزش خط تماس ضمن تبخیر قطره ارائه می‌شود و در قسمت چهارم به بررسی تغییرات انرژی سطحی طی تبخیر قطره بر روی سطوح مختلف پرداخته می‌شود.

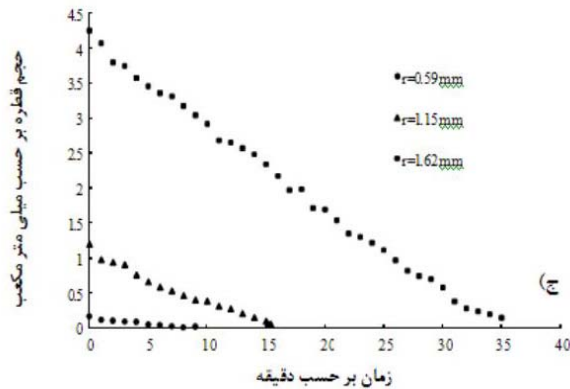
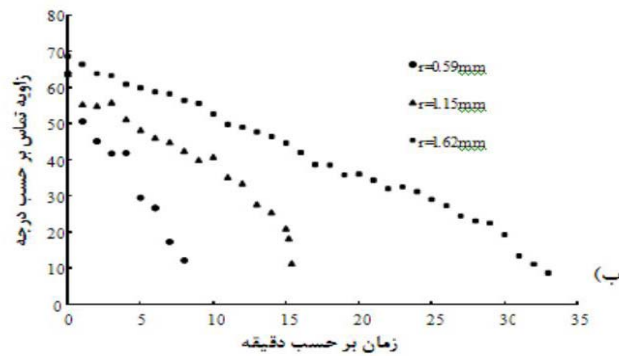
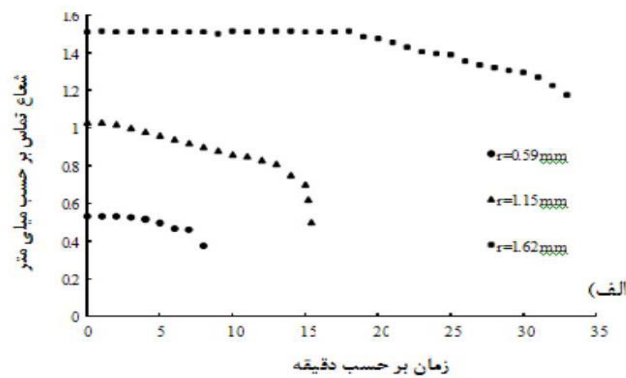
تأثیر اندازه‌ی اولیه‌ی قطره بر اثرات موئینگی ضمن تبخیر سطحی. تأثیر اندازه‌ی اولیه‌ی قطره در تبخیر سطحی برای سطوح آلومینیم و مس و همین‌طور برای سطوح شیشه و پلکسی گلاس دارای روند مشابهی است. بنابراین در این حالت رفتار تبخیر سطحی قطرات آب در شعاع‌های اولیه‌ی مختلف (r مطابق شکل ۱) بر روی یک سطح آلومینیم و یک سطح پلکسی گلاس مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۷) آهنگ تغییر شعاع تماس (R)، زاویه‌ی تماس (θ) و حجم قطره (V) را نسبت به زمان برای شعاع‌های اولیه‌ی مختلف قطره آب بر روی سطح پلکسی گلاس از لحظه‌ی تماس قطره بر روی سطح تا لحظه‌ی ناپدید شدن آن نشان می‌دهد. توجه شود که حجم قطره با در نظر گرفتن قطره به صورت بخشی از کره با استفاده از روابط هندسی به صورت $V = \pi h(3R^2 + h^2)/6$ به دست آمده است [21].

همان‌طور که مشاهده می‌شود کل روند تبخیر قطره، در سه مرحله صورت می‌گیرد: نخست مرحله‌ای است که در آن زاویه‌ی تماس قطره در سطح تماس

نسبتاً ثابت کاهش می‌یابد (مرحله‌ی سطح تماس ثابت که در آن شعاع تماس قطره در بازه‌های زمانی $t=0$ تا $t=3 \text{ min}$ برای قطره با شعاع اولیه‌ی 0.59 mm ، $t=0$ تا $t=6 \text{ min}$ برای قطره با شعاع اولیه‌ی 1.15 mm و $t=0$ تا $t=18 \text{ min}$ برای قطره با شعاع اولیه‌ی 1.62 mm تقریباً ثابت می‌ماند)؛ دوم مرحله‌ای است که در آن سطح تماس قطره جز در بازه‌های زمانی مشخص کاهش می‌یابد (در بازه‌های زمانی $t=6 \text{ min}$ تا $t=7 \text{ min}$ برای قطره با شعاع اولیه‌ی 0.59 mm ، $t=12 \text{ min}$ تا $t=13 \text{ min}$ برای قطره با شعاع اولیه‌ی 1.15 mm و $t=23 \text{ min}$ تا $t=25 \text{ min}$ برای قطره با شعاع اولیه‌ی 1.62 mm) و مرحله‌ی سوم با کاهش سریع و توأمان شعاع تماس R و زاویه‌ی تماس θ همراه است (مرحله‌ی ترکیب که در زمان‌های $t > 7 \text{ min}$ برای قطره با شعاع اولیه‌ی 0.59 mm ، $t > 14 \text{ min}$ برای قطره با شعاع اولیه‌ی 1.15 mm و $t > 30 \text{ min}$ برای قطره با شعاع اولیه‌ی 1.62 mm صورت می‌گیرد). این رفتار قطره را می‌توان به پسماند زاویه‌ی تماس (اختلاف زاویه‌ی تماس پیشرو و پسرو) نسبت داد؛ به طوری که سطوح با پسماند بالا در بیشتر زمان تبخیر در مرحله‌ی سطح تماس ثابت $R = \text{const}$ قرار می‌گیرند و این در حالی است که قطره بر روی سطوح با پسماند پایین، در بیشتر مدت زمان تبخیر، فرآیند زاویه‌ی تماس ثابت $\theta = \text{const}$ را تجربه می‌کند [25]. کاهش شعاع تماس قطره باید در زاویه‌ی تماس پسروی صورت بگیرد، در نتیجه زمانی که پسماند زاویه‌ی تماس زیاد است، ابتدا زاویه‌ی تماس قطره تا زاویه‌ی تماس پسرو کاهش می‌یابد و سپس روند تبخیر در زاویه‌ی تماس ثابت ادامه می‌یابد و در نهایت که ضخامت قطره کوچک شد، هم زاویه و هم شعاع تماس کاهش می‌یابد. از آن‌جا که پسماند سطح ناشی از زبری و غیر یکنواختی سطح است می‌توان گفت که چنین رفتاری به خواص سطح برمی‌گردد. توجه به شکل (۷-ج) نشان می‌دهد که نرخ تبخیر یک

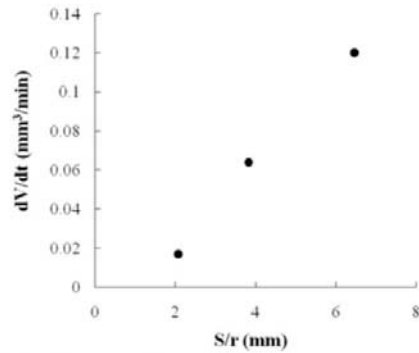
خارجی و در نتیجه افزایش سطح تبخیر بیشتر می شود؛ این نتیجه با استفاده از رابطه ی (۱) که در آن نرخ تبخیر به صورت $dV/dt \propto (S/r)$ بیان شده نیز قابل توجیه است. با به دست آوردن نرخ تبخیر (dV/dt) از طریق برازش یک تابع خطی به تغییرات حجم قطره نسبت به زمان می توان ارتباط آن را با (S/r) در لحظه ی تماس قطره بر روی سطح به دست آورد.

قطره با حجم اولیه ی بیشتر زمانی که حجم آن در اثر تبخیر به یک قطره با حجم اولیه ی کمتر می رسد بیشتر از نرخ تبخیر قطره ای است که با همان حجم اولیه ی کمتر شروع به تبخیر می کند. این مطلب بدین معنی است که نرخ تبخیر قطره به قطر اولیه ی آن (r) وابسته است. توجه به آهنگ تغییرات حجم قطره نسبت به زمان، این حقیقت را آشکار می سازد که نرخ تبخیر قطره با افزایش حجم قطره به علت بالا رفتن سطح



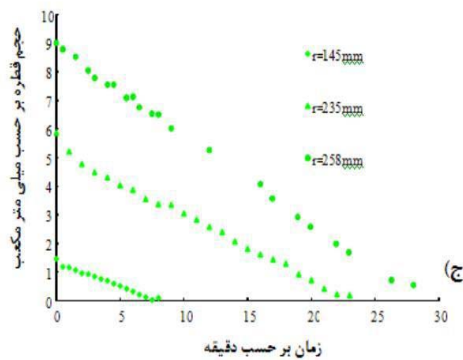
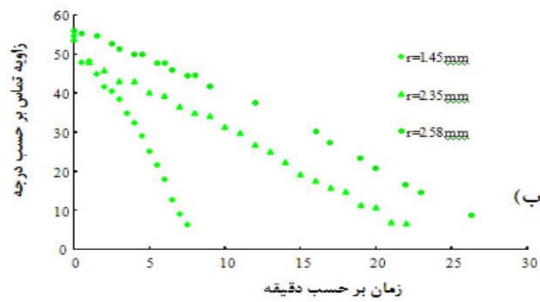
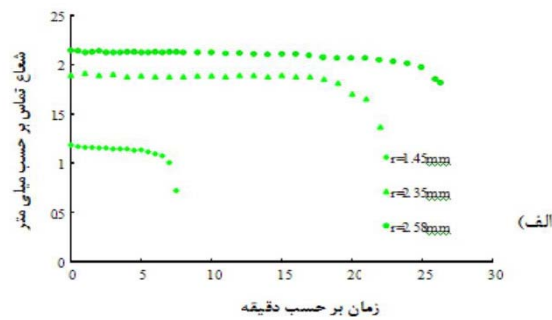
شکل ۷ آهنگ تغییرات، (الف) شعاع تماس، (ب) زاویه ی تماس و

ج) حجم قطره نسبت به زمان بر روی سطح پلکسی گلاس در شعاع‌های اولیه مختلف



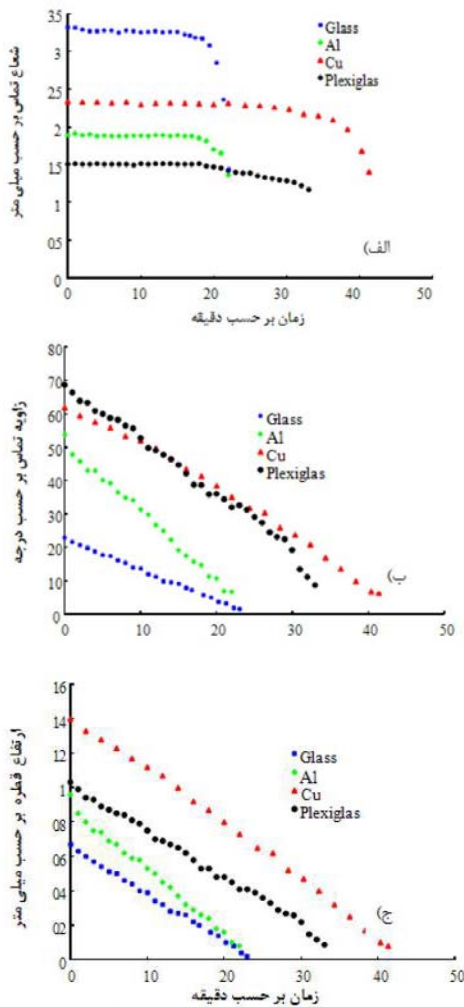
شکل ۸ تغییرات نرخ تبخیر بر حسب نسبت سطح خارجی قطره به شعاع اولیه آن در

لحظه‌ی تماس برای قطرات با اندازه‌های متفاوت بر روی سطح پلکسی گلاس

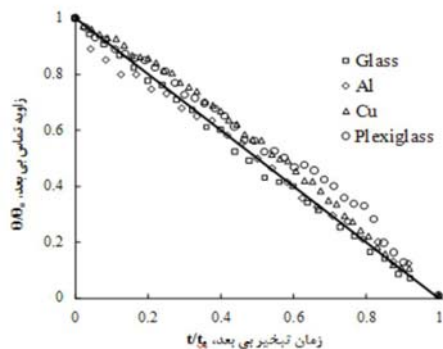


شکل ۹ آهنگ تغییرات، الف) شعاع تماس، ب) زاویه‌ی تماس و

ج) حجم قطره نسبت به زمان بر روی سطح آلومینیم در شعاع‌های اولیه‌ی مختلف

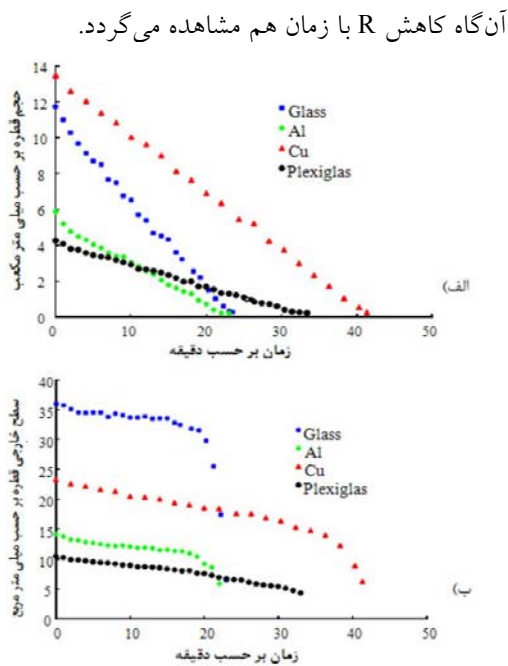


شکل ۱۰ آهنگ تغییرات، الف) شعاع تماس ب) زاویه‌ی تماس ج) ارتفاع قطره (h) طی فرآیند تبخیر سطحی؛ اندازه‌ی اولیه‌ی قطره بر روی سطوح شیشه، آلومینیم، مس و پلکسی گلاس به ترتیب برابر است با ۸/۵۷، ۲/۳۴، ۲/۶۵ و ۱/۶۲ میلی‌متر



همان‌طور که شکل (۸) به‌خوبی نشان می‌دهد با افزایش نسبت سطح خارجی قطره به شعاع آن در لحظه‌ی تماس، نرخ تبخیر قطره افزایش می‌یابد. توجه به شکل (۷-ج) نشان می‌دهد که نرخ تبخیر قطره با افزایش زمان به‌دلیل کاهش سطح خارجی قطره، به‌صورت مجانبی و با شیب ملایمی به سمت صفر میل می‌کند که با نتایج دیگر محققان [1, 3, 25-28] نیز مطابقت دارد.

تأثیر جسم جامد بر اثرات موئینگی ضمن تبخیر سطحی. تغییرات شعاع تماس قطره، زاویه‌ی تماس و ارتفاع خط مرکزی قطره از لحظه‌ی تماس تا لحظه‌ی ناپدید شدن آن بر روی چهار سطح شیشه، آلومینیم، مس و پلکسی گلاس در شکل (۱۰) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که برای همه‌ی سطوح به‌جز پلکسی گلاس، فرآیند تبخیر سطحی صرفاً با کاهش زاویه‌ی تماس صورت می‌گیرد و شعاع تماس طی فرآیند تبخیر به غیر از چند دقیقه‌ی آخر که به‌سرعت کاهش می‌یابد، تقریباً ثابت می‌ماند. آهنگ تغییرات زاویه‌ی تماس و ارتفاع قطره نسبت به زمان برای همه‌ی سطوح تقریباً خطی می‌باشد و مقدار آن برای دو سطح آلومینیم و مس بیشتر از دو سطح دیگر است. رفتار سطح شیشه به‌علت پخش شدن قطره آب بر روی آن کاملاً متمایز از رفتار سطح پلکسی گلاس است. به‌علت خاصیت آب‌دوستی بالای شیشه (زاویه‌ی تماس اولیه‌ی قطره آب بر روی شیشه ۲۲/۸ درجه است)، اندرکنش بین مولکول‌های مایع با سطح جامد زیاد است که سبب می‌شود قطره آب به‌صورت لایه‌ی نازکی روی سطح را بپوشاند و سطح تماس آن در بیشتر زمان تبخیر ثابت بماند.

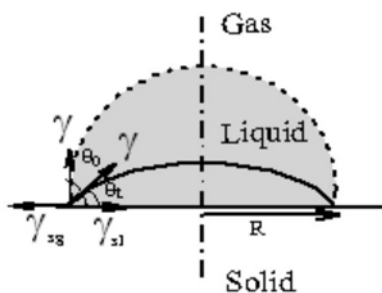


شکل ۱۲ آهنگ تغییرات (الف) حجم قطره (ب) سطح خارجی قطره نسبت به زمان

تغییرات انرژی سطحی ضمن تبخیر. در حالت تعادل زاویه‌ی تماس قطره بر روی سطح جامد صاف با استفاده از معادله‌ی یانگ (Young's equation) به صورت زیر توصیف می شود [31]:

$$\gamma \cos \theta_0 = \gamma_{sg} - \gamma_{sl} \quad (3)$$

که در آن θ_0 زاویه‌ی تماس تعادلی قطره و γ و γ_{sg} ، γ_{sl} به ترتیب انرژی‌های سطحی سطح مشترک‌های جامد/مایع، جامد/گاز و مایع/گاز هستند.



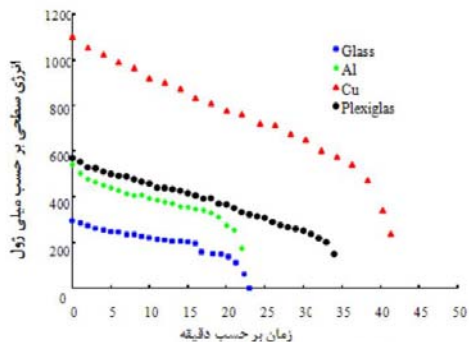
نسبت به زمان بی بعد

شکل (۱۱) تغییرات زاویه‌ی تماس که با زاویه‌ی تماس تعادلی بی بعد شده ($\hat{\theta} = \theta / \theta_0$) نسبت به زمان که با زمان کل تبخیر بی بعد شده ($\hat{t} = t / t_0$) را نشان می دهد. مشاهده می شود که تقریباً نقاط بر روی خط $\hat{\theta} + \hat{t} = 1$ قرار می گیرند [29]. به نظر می رسد که به شرط این که سطح تماس در حین تبخیر سطحی ثابت بماند (مثلاً برای سطوح آلومینیم، مس و شیشه) آن گاه روند تغییرات زاویه‌ی تماس بی بعد نسبت به زمان بی بعد، کلی و مستقل از نوع سطح است. می توان گفت که هرچه قطره در حین تبخیر، لغزش کمتری را تجربه کند، نقاط به این خط نزدیکتر خواهند بود و بالعکس. همان طور که از شکل (۱۱) مشاهده می گردد روی سطح پلکسی گلاس به علت لغزش خط تماس نقاط در فاصله‌ی دورتری از خط مذکور قرار می گیرند.

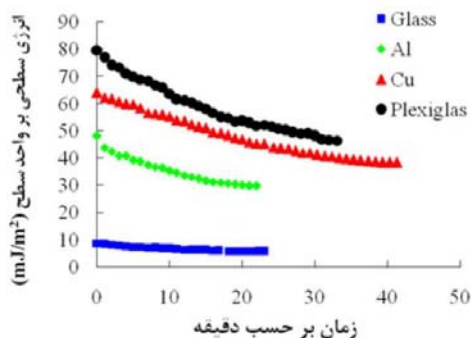
در شکل (۱۲) آهنگ تغییرات حجم و سطح خارجی قطره نسبت به زمان نشان داده شده است.

همان طور که مشاهده می شود گرچه حجم قطره نسبت به زمان با شیب ملایمی به سمت صفر میل می کند ولی با تقریب خوبی با یک تابع خطی قابل بیان است؛ این نتیجه که با تحقیقات گذشته [22, 30] نیز مطابقت دارد. به دلیل ثابت ماندن سطح تماس در بخش عمده‌ی زمان تبخیر قابل توجیه است. نرخ تبخیر سطوح به غیر از شیشه با نسبت سطح خارجی به شعاع در لحظه‌ی تماس قطره بر روی سطح متناسب است (یعنی $dV / dt \propto (S / r)$). دلیل رفتار متمایز شیشه این است که قطره‌ی آب بر روی سطح شیشه پخش می شود، بنابراین برای ارزیابی درست رفتار قطره‌ی آب بر روی این سطح، باید علاوه بر ملاحظات انتقال بخار آب از طریق نفوذ، تأثیر نیروهای برهمکنش قوی ناشی از آب دوستی بالای شیشه نیز در نظر گرفته شود. به نظر می رسد تا زمانی که لایه‌ی نازکی (فیلمی) از مایع روی سطح قرار دارد و تبخیر به صورت شبه تعادلی صورت می گیرد، شعاع تماس ثابت می ماند. وقتی نسبت h/R خیلی کوچک شد و به سمت صفر میل کرد

سطحی بر واحد سطح برای سطوح مختلف مشابه است و پلکسی گلاس و شیشه به ترتیب دارای بیشترین و کمترین انرژی سطحی بر واحد سطح می باشند.



شکل ۱۴ آهنگ تغییرات انرژی سطحی بر حسب زمان



شکل ۱۵ آهنگ تغییرات انرژی سطحی بر واحد سطح

بر حسب زمان

جمع بندی

تبخیر سطحی قطرات آب بر روی سطوح مختلف به صورت تجربی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. رفتار متفاوتی از حرکت لغزش و عدم لغزش بر روی سطوح مشاهده شد. نتایج تجربی نشان داد که نرخ تبخیر یک قطره با حجم اولیه بیشتر زمانی که حجم آن در اثر تبخیر به یک قطره با حجم اولیه کمتر می رسد بیشتر از نرخ تبخیر قطره ای است که با همان حجم اولیه کم تر شروع به تبخیر می کند. آهنگ تغییرات زاویه ای تماس و ارتفاع قطره نسبت به زمان

شکل ۱۳ بالانس نیرو در نقطه ی سه فاز

فرض می شود که طی تبخیر قطره بر روی سطح جامد، مرز قطره با غلبه بر موانع انرژی به طرف یک موقعیت جدید حرکت می کند که طی آن انرژی سطحی کاهش می یابد. انرژی سطحی در هر لحظه برای قطره آب بر روی سطح به صورت زیر تعریف می شود [32]:

$$E_s = \gamma S + \pi R^2 (\gamma_{sl} - \gamma_{sg}) \quad (4)$$

که در آن S سطح خارجی قطره است و با تقریب قطره به صورت بخشی از کره و با استفاده از روابط هندسی در هر لحظه به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$S = \frac{2\pi R^2}{1 + \cos \theta_t} \quad 0^\circ \leq \theta_t \leq 90^\circ \quad (5)$$

با استفاده از معادله ی یانگ و رابطه ی (۵)، E_s در رابطه ی (۴) به صورت زیر به دست می آید:

$$E_s = \gamma \pi R^2 \left(\frac{2}{1 + \cos \theta_t} - \cos \theta_0 \right) \quad (6)$$

با توجه به مقادیر اندازه گیری شده از آزمایش برای مقادیر R ، θ_0 و θ_t آهنگ تغییرات انرژی سطحی نسبت به زمان برای سطوح آزمایش از رابطه ی بالا در شکل (۱۴) ارائه شده است.

مشاهده می گردد که روند تغییرات انرژی سطحی برای همه ی سطوح مشابه است. بدین ترتیب که با کاهش حجم قطره در نتیجه ی تبخیر، از یک مقدار مشخص شروع به کاهش می کند و در لحظات پایانی تبخیر که لغزش شروع می شود، به سرعت کاهش می یابد. شکل (۱۵) انرژی سطحی بر واحد سطح ($E_s/\pi R^2$) را نسبت به زمان نشان می دهد.

همان طور که مشاهده می شود روند تغییرات انرژی

شد که برای ارزیابی درست تبخیر سطحی بر روی سطوح آب‌دوستی نظیر شیشه، باید اندرکنش قوی بین مولکول‌های مایع با سطح جامد در نظر گرفته شود.

در حین تبخیر برای همه‌ی سطوح تقریباً خطی می‌باشد و مقدار آن برای دو سطح آلومینیم و مس بیشتر از دو سطح شیشه و پلکسی گلاس است. هم‌چنین مشاهده

مراجع

1. Shin, D.H., Lee, S.H., Jung, J. and Yoo, J.Y., "Evaporating characteristics of sessile droplet on hydrophobic and hydrophilic surfaces", *Microelectron. Eng.*, Vol. 86, pp.1350–1353, (2009).
2. Douglas Baines, W. and James David, F., "Evaporation of a Droplet on a Surface", *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 33, pp. 411-416, (1994).
3. Gelderblom, H., Varo, G.M., Nair, H., Houselt, A., Lefferts, L., Snoeijer, J.H. and Detlef, L., "How water droplets evaporate on a superhydrophobic substrate", *Physical Review E*, Vol. 83, 026306 (1-6), (2011).
4. de Gennes, P.G., Brochard-Wyart, F. and Quéré, D., "*Capillarity and Wetting Phenomena*", Springer, Berlin, (2003).
5. Starov, V. and Sefiane, K., "On evaporation rate and interfacial temperature of volatile sessile drops", *Colloids and Surfaces A*, Vol. 333, pp. 170–174, (2009).
6. Gokhale, S.J., Plawsky, J.L. and Wayner, P.C., "Experimental investigation of contact angle, curvature, and contact line motion in dropwise condensation and evaporation", *J. Colloid Interf. Sci.*, Vol. 259, pp. 354-367, (2003).
7. Gokhale, S.J., Plawsky, J.L. and Wayner, P.C., "Spreading, evaporation, and contact line dynamics of surfactant-laden microdrops", *Langmuir*, Vol. 21, pp. 8188-8199, (2005).
8. Deegan, R.D. Bakajin, O. Dupont, T.F. Huber, G. Nagel, S.R. and Witten, T.A., "Contact line deposits in an evaporating drop", *Phys. Rev. E*, Vol. 62, pp. 756-767, (2000).
9. Guéna, G., Allancon, P. and Cazabat, A.M., "Receding contact angle in the situation of complete wetting: experimental check of a model used for evaporating droplets", *Colloids Surf. A*, Vol. 300, pp. 307-320, (2007).
10. Guéna, G., Poulard, C., Voë, M., De Coninck, J. and Cazabat, A.M., "Evaporation of sessile liquid droplets", *Colloids Surf. A*, Vol. 291, pp. 191-199, (2006).
11. Guéna, G., Poulard, C. and Cazabat, A.M., "The dynamics of evaporating sessile droplets", *Colloid J. (Russian Academy of Sciences, English Translation)*, Vol. 69 (1), pp. 1-15, (2007).
12. Guéna, G., Poulard, C. and Cazabat, A.M., "Evaporating drops of alkane mixtures", *Colloids Surf. A*, Vol. 298, pp. 2-13, (2007).

13. Guéna, G., Poulard, C. and Cazabat, A.M., "The leading edge of evaporating droplets", *J. Colloid Interf. Sci.*, Vol. 312, pp. 164-169, (2007).
 14. David, S., Sefiane, K. and Tadrist, L., "Experimental investigation of the effect of thermal properties of the substrate in the wetting and evaporation of sessile drops", *Colloids Surf. A*, Vol. 298, pp. 108-117, (2007).
 15. Hu, H. and Larson, R.G. "Marangoni Effect Reverses Coffee-Ring Depositions", *J. Phys. Chem. B*, Vol. 110(14), pp. 7090-7094, (2006).
 16. Deegan, R.D., "Pattern formation in drying drops", *Phys. Rev. E*, Vol. 1, pp. 475-583, (2000).
 17. Sefiane, K. and Tadrist, L., "Experimental investigation of the de-pinning phenomenon on rough surfaces of volatile drops", *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, Vol. 33, pp. 482-491, (2006).
 18. Girard, F., Antoni, M. Faure, S. and Steinchen, A. "Evaporation and Marangoni driven convection in small heated water droplets", *Langmuir*, Vol. 22, pp. 11085-11093, (2006).
 19. Girard, F., Antoni, M., Faure, S. and Steinchen, A., "Numerical study of the evaporating dynamics of a sessilewater droplet", *Microgravity Sci. Technol.*, XVIII-3/4, pp. 43-52, (2006).
 20. Chandra, S., di Marzo, M., Qiao, Y.M. and Tartarini, P., "Effect of Liquid-Solid Contact Angle on Droplet Evaporation", *Fire Safety J.*, Vol. 27, pp. 141-158, (1996).
 21. Hu, H. and Larson, R.G., "Evaporation of a Sessile Droplet on a Substrate", *J. Phys. Chem. B*, Vol. 106, pp. 1334-1344, (2002).
 22. Birdi, K.S. Vu, D.T. and Winter, A., "A Study of the evaporation rates of small water drops placed on a solid-surface", *J. Phys. Chem.*, Vol. 93, pp. 3702-3703, (1989).
 23. Kulinich, S.A. and Farzaneh, M., "Effect of contact angle hysteresis on water droplet evaporation from super-hydrophobic surfaces", *App. Surf. Sci.*, Vol. 255, pp. 4056-4060, (2009).
 24. Picknett, R.G. and Bexon, R., "The Evaporation of Sessile or Pendant Drops in Still Air", *J. Colloid Interf. Sci.*, Vol. 61, No. 2, pp. 336-350, (1977).
۲۵. کریم دوست یاسوری، امیر و پسندیده فرد، محمد، "مطالعه تجربی و تحلیلی دینامیک تبخیر سطحی قطرات آب بر روی سطوح مختلف"، نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، سال بیست و سوم، شماره دو، صفحات ۸۱-۹۸، (۱۳۹۱).
26. Lee, K.S., Cheah, C.Y. , Copleston, R.J. Starov, V.M. and Sefiane, K., "Spreading and evaporation of sessile droplets: Universal behaviour in the case of complete wetting", *Colloids Surf. A*, Vol. 323, pp. 63-72, (2008).
 27. Lim, T. Han, S. Chung, J., Chung, J.T., Ko, S. and Grigoropoulos, C.P., "Experimental study on spreading and evaporation of inkjet printed pico-liter droplet on a heated substrate", *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 52, pp. 431-441, (2009).
 28. Schnfeld, F. Graf, K., Hardt, S. and Butt, H., "Evaporation dynamics of sessile liquid drops in still air with constant contact radius", *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 51, pp. 3696-3699, (2008).

29. Popov, Y.O., "Evaporative deposition patterns: spatial dimensions of the deposit", *Phys. Rev. E* 71, 036313–1-036313–17, pp. 1-17, (2005).
30. Lee, K.S. Cheah, C.Y., Copleston, R.J., Starov, V.M. and Sefiane, K., "Spreading and evaporation of sessile droplets: universal behaviour in the case of completewetting", *Colloids Surf. A*, Vol. 63, pp. 1–3, (2008).
31. Toshev, B.V. and Platikanov, D., "Wetting: Gibbs' superficial tension revisited", *Colloids Surf. A*, Vol. 291, pp. 177–180, (2006).
32. Shanahan, M.E.R. and Sefiane, K., "Kinetics of Triple Line Motion during Evaporation", *Contact Angle, Wettability and Adhesion*, Vol. 6, Koninklijke Brill NV, Leiden, pp. 19–31, (2009).