



تغییرات سینتیک خط تماس ضمن تبخیر سطحی یک قطره آب بر روی سطح جامد

امیر کریم دوست یاسوری*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۹/۱۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۱/۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۰

چکیده

تبخیر قطره، نقش اساسی در بسیاری از کاربردهای مهندسی نظیر، پیش‌آمیختگی سوخت / هوا، رشد کریستال، چاپ رنگ و جوهرافشان و همچنین کاربردهای زیست مواد و اکتشاف دارو دارد. علیرغم تحقیقات زیاد، مکانیسم سینتیک خط تماس در تبخیر قطره هنوز به خوبی درک نشده است. مشکل اصلی در درک سینتیک قطره، به توصیف حرکت خط تماس روی سطح جامد بر می‌گردد؛ جایی که شرط عدم لغزش هیدرودینامیک نقض می‌شود. در این تحقیق، یک توجیه فیزیکی برای لغزش خط تماس ارائه می‌شود که به کمک مدل مولکولی جریان نزدیک یک سطح، منشأ این لغزش را به گرادینان ممتم اعمالی مابین سطح مشترک مایع / گاز نسبت می‌دهد؛ بدین ترتیب که با حرکت به سمت فاز مایع از لغزش کاسته شده، شرط عدم لغزش کلاسیک غالب می‌شود. به کمک فرآیند عدم لغزش-لغزش در خط تماس، یک مدل فیزیکی برای مرحله دوم تبخیر قطره روی سطح جامد، جایی پیشنهاد می‌شود که قطره در زاویه تماس ثابت، کاهش حجم می‌دهد و امکان‌سنجی آن از طریق مقایسه با داده‌های تجربی، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: سینتیک خط تماس؛ لغزش خط تماس؛ مدل هیدرودینامیک؛ تبخیر قطره.

Variations of the Contact Line Kinetics During the Evaporation of a Water Droplet on Solid Surface

A. Karimdoost Yasuri*

Assist. Prof., Mech. Eng., Lorestan University, Iran.

Abstract

Droplet evaporation plays a vital role in various engineering fields, such as air/fuel-premixing, crystal growth, painting, inkjet printing and the applications of biology and drug discovery. Despite much research, the mechanism of the contact line kinetics in droplet evaporation is still not well understood. The main problem in understanding the drop kinetics concern to description of the contact line movement on the solid surface, where condition of hydrodynamic no-slip is contradicted. In this study, a physical justification is presented for the contact line slip in which the origin of the slip, using the molecular model of the flow near to a wall, is attributed to induced momentum gradient between the liquid / gas interface. As a result of that, approaching toward the liquid phase, the slip is reduced and the classical boundary condition of the no-slip is dominated. Using the slip/no-slip process in the contact line, a physical model for the second stage of evaporation of droplets on solid surfaces is proposed, where the droplet volume is reduced in constant contact angle and its validity is confirmed by comparison with experimental data.

Keywords: Contact Line Kinetics; Contact Line Slip; Hydrodynamic Model; Droplet Evaporation.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۶۶-۳۳۱۲۰۳۳۴؛ فکس: ۰۶۶-۳۳۱۲۰۳۳۴

آدرس پست الکترونیک: yasuri.am@lu.ac.ir

۱- مقدمه

عدم لغزش با استفاده از شبیه سازی دینامیک مولکولی طی تبخیر سطحی قطره صورت گرفت. آنها یافتند که نیروی مماسی وارد بر خط تماس، یک طبیعت نوسانی دندانمانند^{۱۲} دارد. آنها همچنین نشان دادند که طی تبخیر سطحی قطره، نیرویی که باعث حالت چسبیدن قطره (عدم لغزش) به سطح می‌شود، با کاهش زاویه تماس تا مقدار مشخصی افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد [۱۱]. ولی در این تحقیق، منشأ فیزیکی لغزش در خط تماس و چگونگی فرایند لغزش - عدم لغزش توضیح داده نشده است که موضوع اصلی تحقیق حاضر است. تحقیق حاضر، مشتمل بر چهار بخش است: در بخش دوم، به معرفی مفاهیم پایه در مقوله سینتیک خط تماس پرداخته می‌شود تا شناخت کافی از اثرات نیروهای مؤینگی و پیچیدگی‌های آن در تبخیر قطره روی سطح جامد حاصل شود؛ همچنین در این بخش، تئوری وابستگی سرعت خط تماس به زاویه تماس دینامیکی معرفی می‌شود که در آن بحث لغزش خط تماس، کماکان از موضوعات چالش برانگیز است و در ادامه به کمک مدل مولکولی جریان نزدیک یک سطح، یک توجیه فیزیکی برای منشأ لغزش ارائه می‌شود که شدت لغزش را به دوری یا نزدیکی از خط تماس نسبت می‌دهد. مکانیسم تبخیر قطره روی سطح جامد خصوصاً مرحله دوم آن هنوز بخوبی روشن نشده است؛ در بخش سوم، با استفاده از مفاهیم سینتیک خط تماس و همچنین مفهوم لغزش در ناحیه سه‌فاز، یک مدل فیزیکی برای مرحله دوم تبخیر قطره پیشنهاد می‌شود. در بخش چهار نیز، امکان‌سنجی این فرضیه از طریق مقایسه با داده‌های تجربی، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۲- سینتیک خط تماس

در این بخش به معرفی اهمیت پدیده مؤینگی در خط تماس پرداخته می‌شود و با استفاده از دو مدل هیدرودینامیک و سینتیک مولکولی، وابستگی زاویه تماس دینامیکی به سرعت خط تماس شرح داده می‌شود. طبق این دو مدل [۱۲-۱۸]، برای جلوگیری از نامحدود شدن اتلافات در خط تماس در اثر

در طی چندین دهه گذشته، پدیده تبخیر قطره روی سطح، به خاطر نقش اساسی که در بسیاری از کاربردهای مهندسی دارد، بطور وسیعی مورد مطالعه قرار گرفته است [۱-۷]. در سال‌های اخیر، پدیده تشکیل حلقه‌ای از ماده حل‌شونده بر روی سطح بعد از تبخیر قطره که به علت جریان ناشی از تبخیر ایجاد می‌شود، به عنوان یک تکنیک کلیدی در کاربردهای مهندسی زیست‌مواد^۱ نظیر، میکروآرایش‌های^۲ DNA/RNA، قالب برای میکرولنزها^۳، ذرات کلونیدی خود جمع‌شونده^۴، روش‌های لکه‌گذاری برای نگاشت ژن^۵، اکتشاف دارو^۶، تولید مواد نوری و همچنین وسایل الکترونیکی ساخته شده از روش چاپ جوهر افشان^۷، از اهمیت اساسی برخوردار بوده است [۴-۷]. تحقیقات دیگر [۱، ۶، ۸-۹] نشان می‌دهد که فرایند تبخیر قطره، حداقل دارای سه مرحله است: در مرحله اول، شعاع تماس ثابت مانده و زاویه تماس تا زاویه تماس پسر و کاهش می‌یابد (مرحله سطح تماس ثابت)، در مرحله دوم، زاویه تماس تقریباً ثابت مانده، ولی شعاع تماس کاهش می‌یابد (مرحله زاویه تماس ثابت) و مرحله سوم که با کاهش سریع زاویه و شعاع تماس همراه است (مرحله ترکیب). کاهش زاویه تماس در مرحله اول برای شروع حرکت لغزشی توجیه‌پذیر است؛ زیرا به علت پسماند^۸ زاویه تماس، قطره باید در زاویه تماس پسر و شروع به انقباض کند؛ ولی چگونگی مکانیسم کاهش شعاع تماس در عین ثابت ماندن زاویه تماس قطره (نوسان آن حول یک مقدار) در مرحله دوم تبخیر، نامعلوم است. لی^۹ و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۶ با استفاده از روش لیتیس بولتزن نشان دادند، هنگامی که کشش سطحی با دما تغییر می‌کند، اثرات مارانگونی^{۱۰}، نقش زیادی روی لغزش خط تماس دارد. البته در سال ۲۰۱۵، تحقیقی توسط وانگ^{۱۱} و وو^{۱۲} روی منشأ مولکولی مکانیسم لغزش -

¹ Biomaterials² Microarrays³ Microlenses⁴ Self-Assembled Colloidal Particles⁵ Spotting Methods for gene Mapping⁶ Drug Discovery⁷ Ink-Jet Printing⁸ Hysteresis⁹ Li¹⁰ Marangoni¹¹ Wang¹² Wu¹³ Sawtooth-Like Oscillation

در بسیاری از سناریوهای تماس قطره روی سطح، زاویه تماس دینامیکی بصورت تابعی از سرعت خط تماس [۱۲] و [۱۴] باید بعنوان شرط مرزی مورد استفاده قرار بگیرد تا توافق کیفی بهتری از پیش‌بینی‌های عددی با داده‌های تجربی حاصل شود. جنبه‌های ترمودینامیکی تماس قطره روی سطح و زاویه خط تماس، عموماً بخوبی درک شده است؛ ولی جنبه‌های میکروسکوپی آنها هنوز بخوبی درک نشده است. اتلاف انرژی در طی حرکت خط تماس روی سطح جامد را می‌توان به مکانیسم‌های مختلفی نسبت داد. اگر سهم عمده اتلاف به علت جذب و دفع سطحی مولکول‌های داخل ناحیه سه‌فاز باشد، آنگاه تئوری سینتیک مولکولی^۳ وابستگی حرکت خط تماس به زاویه تماس دینامیکی را بهتر توصیف می‌کند [۱۵]؛ ولی اگر اثر لزجت، عامل اصلی اتلاف انرژی نزدیک خط تماس باشد، آنگاه تئوری هیدرودینامیک^۴ باید مورد استفاده قرار بگیرد [۱۶]. ترکیبی از تئوری‌های هیدرودینامیکی و مولکولی (تئوری ترکیبی) هنگامی مورد استفاده قرار می‌گیرد که هر دو نوع اتلاف وجود داشته باشد [۱۷].

مطالعات تجربی وسیعی در زمینه پدیده تبخیر قطره روی سطح جامد موجود است [۷-۱۷]. یکی از اهداف اصلی مورد نظر این آزمایش‌ها، درک پدیده‌ای است که در تبخیر قطره، خصوصاً مکانیسم حرکت خط تماس دینامیکی رخ می‌دهد. مدلسازی رفتار سیال در مجاورت خط تماس دینامیکی پیچیده است؛ زیرا فرض شرط مرزی عدم لغزش در سطح مشترک جامد/مایع، منجر به نامحدود شدن نیرو در خط تماس می‌شود [۱۹]. این مشکل را می‌توان بوسیله جایگزین کردن شرط مرزی عدم لغزش با یک مدل لغزشی حل کرد [۱۴]. گرچه این روش مشکلات ریاضی را کم می‌کند، ولی هیچ مدرک تجربی وجود ندارد تا تعیین کند که کدامیک از مدل‌های لغزشی موجود مناسب‌تر است. در سال ۲۰۰۲ روکنستین^۵ [۲۰]، به بررسی فیزیکی منشأ لغزش در ناحیه خط تماس پرداخت. وی اظهار کرد که سرعت لغزش نزدیک لبه جلوی قطره به علت غیریکنواختی پتانسیل شیمیایی، تبدالی مابین مولکول‌های مایع قرار گرفته در خط

تکینگی^۱، باید در ناحیه خط تماس لغزش داشته باشیم که در انتهای این بخش، یک توجیه فیزیکی برای آن ارائه خواهد شد.

۲-۱- پدیده مؤینگی در خط تماس

تماس قطره روی سطح جامد در دو حالت دینامیکی و تعادلی بطور شماتیک در شکل ۱ معرفی می‌شوند. بسیاری از فرآیندهای تکنولوژیکی (مثل تمیزکاری، رنگ‌زنی یا چسب-زنی) به اینکه چقدر مایع سطح جامد را تر می‌کند، بستگی دارد. این قابلیت، بوسیله مقدار زاویه تماس تعادلی θ_e تشکیل شده در نقطه‌ای روی خط تماس فازهای جامد و مایع بدست می‌آید (شکل ۱).

شرط تعادل، بوسیله معادله یانگ^۲ توصیف می‌شود:

$$\gamma \cos \theta_e = \gamma_{sg} - \gamma_{sl} \quad (1)$$

که در آن γ ، γ_{sg} و γ_{sl} بترتیب، کشش‌های سطحی در سه - سطح مایع/گاز، جامد/گاز و جامد/مایع هستند. در استخراج رابطه (۱) فرض می‌شود، سطح جامد صاف، همگن، ایزوتروپ و صلب باشد. همانطور که از معادله (۱) دیده می‌شود، زاویه تماس تعادلی به کشش‌های سطح مشترک بستگی داشته، در حالت استاتیک کامل قطره بر روی سطح اندازه-گیری می‌شود [۱۹]. اگر خط تماس حرکت کند، زاویه تماس قطره در هر لحظه تحت عنوان زاویه تماس دینامیکی (θ_d) شناخته می‌شود که در شکل ۱-ب نشان داده شده است. برخلاف زاویه تماس تعادلی، زاویه تماس دینامیکی تنها یک خاصیت مادی نیست، بلکه تابعی از سرعت خط تماس متحرک نیز است [۱۳]. ناحیه‌ای که سه‌فاز به هم می‌رسند، تحت عنوان خط تماس (ناحیه سه‌فاز) معروف است. به علت پسماند زاویه تماس، خط تماس با زوایای تماس متفاوت پیشرو و پسرو به ترتیب در دو جهت گاز و مایع حرکت می‌کند. مطابق شکل ۲، زاویه تماس دینامیکی به وجود آمده را در حین پخش شدن قطره روی سطح (و حرکت خط تماس به سمت فاز گاز)، زاویه تماس پیشروی (θ_a)، و در حین جمع شدن قطره (و حرکت خط تماس به سمت فاز مایع)، زاویه تماس پسروی (θ_r)، می‌نامند [۱۳].

³ The Molecular Kinetic Theory

⁴ The Hydrodynamic Theory

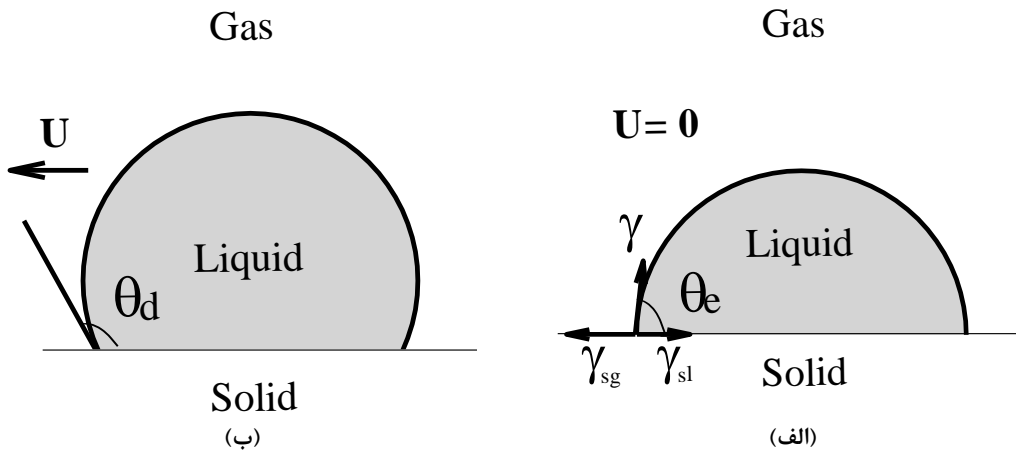
⁵ Ruckenstein

¹ Singularity

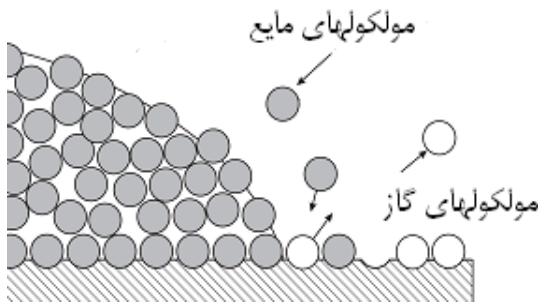
² Young Equation

برای وابستگی زاویه تماس دینامیکی به سرعت خط تماس، بحث لغزش خط تماس - یکی از چالش‌های مطرح شده در این پژوهش - مطرح می‌شود.

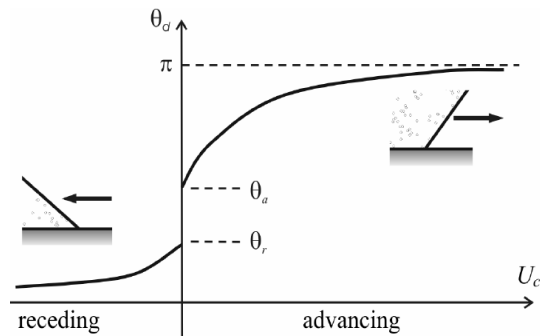
تماس است؛ اما وی بیان نکرد که منشأ غیریکنواختی پتانسیل شیمیایی مولکول‌های مایع چیست و به چه علت به وجود می‌آید. در ادامه به معرفی دو تئوری هیدرودینامیک و سینتیک مولکولی پرداخته می‌شود که در آنها با ارائه رابطه‌ای



شکل ۱- تماس قطره بر روی سطح جامد در الف) حالت تعادل که با زاویه تماس تعادلی θ_e مشخص می‌شود و ب) حالت دینامیکی که بوسیله سرعت خط تماس U و زاویه تماس دینامیکی θ_d قابل بیان است



شکل ۳- شماتیکی از فرآیند جذب و دفع سطحی مولکول‌ها



شکل ۲- زوایای تماس پیشرو و پسرو

طبق این تئوری، سرعت خط تماس بوسیله فرکانس جابجایی مولکول‌ها^۱ κ و طول λ تعیین می‌شود که نشان-دهنده جابجایی‌های مولکولی^۲ است. طول λ ، تحت تأثیر اندازه مولکول‌های مایع و شدیداً وابسته به فضای محل‌های جذب در سطح است. برای مولکول‌های مایعی که به جلو حرکت می‌کنند، فرکانس جابجایی مولکولی κ^+ و برای آنهایی که به عقب حرکت می‌کنند، κ^- است؛ بنابراین سرعت خط

۲-۲- وابستگی زاویه تماس به سرعت خط تماس بر

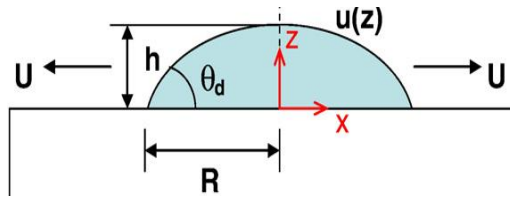
اساس تئوری سینتیک مولکولی

در این تئوری فرض می‌شود که مولکول‌های مایع به محل‌های جذب در سطح جامد چسبیده و مولکول‌های گاز را از این محل‌ها دفع می‌نمایند [۱۵]. بررسی این جذب و دفع سطحی به صورت آماری، نشان‌دهنده رفتار ماکروسکوپیک خط تماس در منطقه سه فازی مایع / گاز / جامد است.

شکل ۳، نشان‌دهنده مدل تئوری جنبشی مولکولی است.

¹ Molecular Displacement Frequency

² Molecular Displacement Length



شکل ۴- پارامترهای بکار رفته برای توصیف حرکت خط تماس در مدل هیدرودینامیک

تئوری فوق‌الذکر که بر اساس نظریه ساده شده‌ای از هو و کرایون است، توسط دی جونز^۶ بطور مفصل شرح داده شده است [۲۳]. دی جونز مطالعه خود را روی جریان ساده در یک گوشه^۷ که روی یک سطح جامد پیش می‌رود، متمرکز کرد و رابطه (۳) را بین سرعت خط تماس U و زاویه تماس دینامیکی θ_d پیشنهاد کرد:

$$\gamma(\cos \theta_d - \cos \theta_e) = \pm \frac{3\mu U}{\theta_d} \ln\left(\frac{R}{\varepsilon}\right) \quad (3)$$

که علامت مثبت و منفی به ترتیب برای حالت‌های حرکت خط تماس پیشرو و پسرو است و در آن R ، شعاع تماس قطره و μ ، لزجت دینامیکی سیال است. ε ، مسافت برش (طول لغزش) نزدیک خط تماس است که برای حذف واگرایی اتلاف لزجت در گوشه سیال اعمال می‌شود. نتایج تجربی [۱۶، ۱۷، ۲۱ و ۲۲]، وابستگی تابعی سرعت خط تماس (U) به زاویه تماس دینامیکی (θ_d) را برای بسیاری از سیستم‌های مایع / جامد بصورت رابطه فوق‌الذکر تأیید کرده است. با در نظر گرفتن مسافتی از خط تماس به عنوان ناحیه لغزش (به طول ε)، مشکل واگرا شدن اتلاف حل و این رابطه از لحاظ فیزیکی قابل کاربرد است. در ادامه با استفاده از مفهوم مدل مولکولی جریان نزدیک یک سطح، یک توجیه برای منشأ لغزش ارائه می‌شود.

۲-۴- منشأ لغزش خط تماس

از نقطه نظر علمی، مساله تبخیر قطره به علت تکینگی در ناحیه سه‌فاز، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. به علت عدم درک میکروسکوپی ناحیه سه‌فاز، روابط موجود برای شار تبخیر و تنش لزجت منجر به مقادیر نامحدود (بینهایت)

تماس بوسیله فرمول $U = (\kappa^+ - \kappa^-)\lambda\kappa = \lambda$ تعریف می‌شود که κ فرکانس خالص جابجایی مولکولی (فرکانس پرش) است. برای حرکت خط تماس و فائق آمدن بر انرژی مانع از جابجایی مولکولی، باید کار انجام شود. این کار به وسیله نیروی کشش سطحی انجام می‌شود که با $\gamma(\cos \theta_e - \cos \theta_d)$ نشان داده شده و بر واحد طول خط تماس بیان می‌شود. کار انجام شده توسط این نیرو کاملاً در منطقه تماس بوده، از هرگونه اتلاف خارج از این منطقه صرفنظر می‌شود. با تلفیق این ایده و استفاده از تئوری نرخ فعال شده انتقال مایعات^۱، رابطه (۲) بین U و θ_d توسط بلیک^۲ ارائه شده است [۱۵]:

$$U = 2\kappa_w \lambda \sinh\left[\frac{\gamma\lambda^2(\cos \theta_e - \cos \theta_d)}{2k_B T}\right] \quad (2)$$

در آن k_B و T به ترتیب، ثابت بولتزمن و دمای کلوین است و مقادیر κ و λ از طریق آزمایش بدست می‌آیند. مشاهدات تجربی [۱۴، ۱۵ و ۱۸] نشان می‌دهد که این رابطه بخوبی می‌تواند وابستگی U به θ_d را برای سیستم‌های مختلف جامد / مایع پیش‌بینی کند.

۲-۳- وابستگی زاویه تماس به سرعت خط تماس بر اساس مدل هیدرودینامیک

یکی از تئوری‌های اساسی دیگر که وابستگی سرعت خط تماس را به زاویه تماس دینامیکی مرتبط می‌کند، تئوری هیدرودینامیک است. درک مکانیسم تبخیر قطره که با تغییرات شعاع تماس و همچنین زاویه تماس همراه است، نیازمند شناخت این وابستگی است. اولین بار، مدل هیدرودینامیک حرکت خط تماس، توسط هو و کریون^۳ [۲۱] بعنوان راهی برای توصیف تناقض حرکت خط تماس روی سطح جامد و شرط مرزی عدم لغزش مابین مایع و جامد ارائه شد که در مکانیک سیالات وجود دارد. این تئوری که بعداً توسط کوکس^۴ [۱۶] و وایناو^۵ [۲۲] توسعه پیدا کرد، حرکت خط تماس را به اتلاف ویسکوز مایع مرتبط می‌کند (شکل ۴).

¹ Frenkel-Eyring Activated Rate Theory of Transport in Liquids

² Blake

³ Huh & Scriven

⁴ Cox

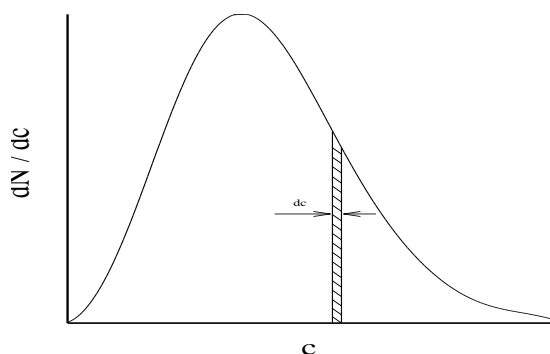
⁵ Voinov

⁶ De Gennes

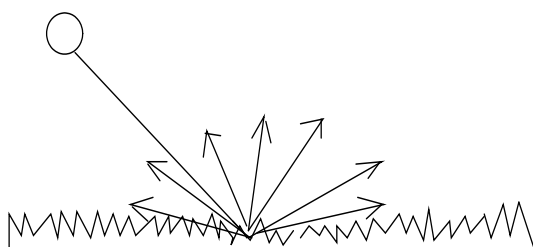
⁷ wedge

کند، سیال بازتابیده نیز چنین خواهد کرد؛ ولی، در یک سیال واقعی، سطح از دید یک مولکول برخورد کننده صاف نیست؛ زیرا مولکول دارای قطر بسیار کوچکی در حدود 10^{-8} cm است؛ بنابراین سطح در برابر مولکول یک مرز ناصاف خواهد بود. در این حالت بازتاب را پخشیده گویند و ممکن است مولکول با هر زاویه‌ای از سطح دور شود [۲۵] (شکل ۶).

در نتیجه در بازتاب پخشیده، رویهم رفته، از مولفه مماسی سرعت مولکول‌ها کاسته می‌شود. در حالت پیوسته، جریان مولکولی در نزدیک یک سطح از برهمکنش بین مولکول‌های برخوردکننده و بازتابیده حاصل می‌شود. چنانچه میانگین پیمایش آزاد^۲ مولکولی خیلی کوچک باشد، برخوردهای بسیار زیادی در نزدیکی سطح رخ می‌دهد. مثلاً مولکول‌هایی که با مولکول‌های بازتابیده از سطح برخورد می‌کنند، بطور متوسط بخشی از مماسی خود را از دست می‌دهند.



شکل ۵- توزیع بولتزمن برای تعداد مولکول‌های در واحد دامنه سرعت



شکل ۶- شماتیکی از سطح واقعی (زبر)

می‌شود؛ به عبارت دیگر، در نقطه سه فاز شار تبخیر و تنش لزجت اصطلاحاً دارای تکینگی هستند. در طی تبخیر قطره، خصوصاً در سطوح مسطح، خط تماس می‌لغزد و این در حالی است که هنوز دلیل مشخصی برای این لغزش ارائه نشده است؛ ضمن اینکه این لغزش با شرط مرزی عدم لغزش کلاسیک هم در تناقض است. امروزه حل چنین مشکلاتی در تراز مولکولی و بدست آوردن شرایط مرزی مربوطه در تراز ماکروسکوپی، یکی از اهداف اصلی محققان است. در این بخش، به کمک مدل مولکولی جریان نزدیک یک سطح، منشأ لغزش در ناحیه خط تماس مورد بررسی قرار می‌گیرد. جریان یک سیال در حالت پیوسته را می‌توان ترکیبی از یک حرکت مولکولی تصادفی دانست که با یک جریان جهت‌دار منظم برهم نهاده شده است. توزیع سرعت‌های مولکولی در یک سیال در حال تعادل، توسط ماکسول^۱ محاسبه شده است. طبق توزیع ماکسول [۲۴]، تعداد مولکول‌ها در واحد دامنه سرعت چنین بدست می‌آید:

$$\frac{dN}{dc} = 4\pi N\alpha^3 c^2 e^{-\beta^2 c^2} \quad (۴)$$

که در آن α و β مقادیر ثابت، N تعداد کل مولکول‌ها و c سرعت مولکولی است. این معادله تعداد مولکول‌های dN که دارای سرعتی در محدوده c تا $c+dc$ هستند را مطابق شکل ۵ بدست می‌دهد.

توزیع مولکولی ماکسول برای یک گاز در حالت تعادل بدست آمده که در آن برخوردهای مولکولی کاملاً کشسان است؛ مولکول‌ها هیچ نیرویی به یکدیگر وارد نمی‌کنند، بطور یکنواخت توزیع شده‌اند و احتمال هر سرعت مولکولی در کلیه جهت‌ها یکسان است. در جریان یک سیال، می‌خواهیم آنچه را که نزدیک سطح در ناحیه سه‌فاز رخ می‌دهد، بررسی کنیم. یک مولکول به دو طریق ممکن است از یک سطح جامد ثابت بازتابیده شود. چنانچه سطح جامد کاملاً صاف باشد، بازتاب را آینه‌ای یا مستقیم می‌گویند. در بازتاب آینه‌ای، زاویه برخورد با زاویه بازتابش برابر است و تغییری در مولفه سرعت در جهت مماسی رخ نمی‌دهد. جهت مولفه عمودی تغییر می‌کند، ولی مقدار آن ثابت می‌ماند. در بازتاب آینه‌ای، چنانچه سیال برخوردکننده از توزیع ماکسولی پیروی

² Mean Free Path

¹ Maxwellian Distribution

بین دو مولکول برای این فاز از مرتبه 10^{-10} متر است [۲۶]؛ در نتیجه چگالی تعداد برخورد به سطح در فاز مایع در مقایسه با فاز گاز بسیار بیشتر است، ضمن اینکه شار ممتم در فاز مایع، بیشتر از فاز گاز است؛ بنابراین در فاز مایع و در نقطه‌ای به اندازه کافی دور از خط تماس (ناحیه سه‌فاز)، مولکول‌های مایع برخورد کننده، ممتم مولکول‌های بازتابنده مایع را به اندازه کافی گند می‌کنند و در این ناحیه شرط عدم لغزش صدق می‌کند؛ ولی در لبه خط تماس، مولکول‌های مایع در طرف دیگر با فاز گاز مواجهند که چگالی تعداد برخورد و همچنین شار ممتم آن، کمتر از فاز مایع است؛ در نتیجه دیگر مثل سابق، ممتم مولکول‌های بازتابنده فاز مایع به اندازه کافی گند نمی‌شود که روی سطح ساکن شود؛ بنابراین با سرعتی معادل مولفه مماسی مولکول برخورد کننده روی سطح حرکت می‌کند. نتیجه اساسی این نظریه، یعنی حاکم شدن شرط عدم لغزش با حرکت به سمت فاز مایع، نتایج تحقیقات قبلی را نیز تأیید می‌کند [۲۰، ۲۷ و ۲۸].

۳- تبخیر سطحی یک قطره آب بر روی سطح جامد با توجه به سینتیک خط تماس

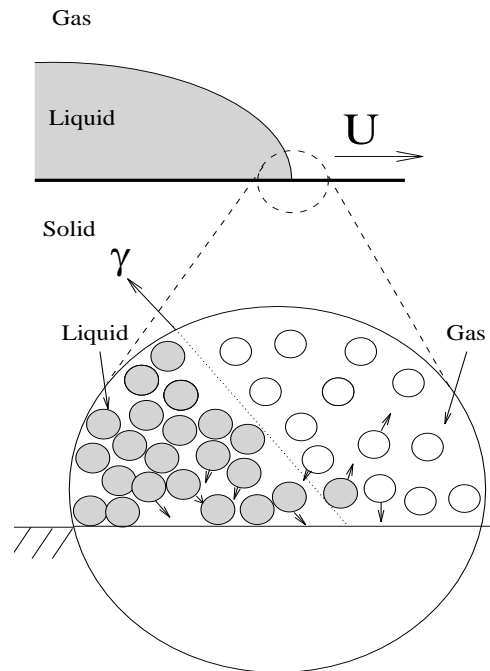
در این بخش، ابتدا مراحل مختلف تبخیر قطره بطور مختصر آورده می‌شود. در ادامه با تمرکز روی دو مرحله اول و دوم فرآیند تبخیر، روابطی برای مدت زمان بازه‌های عدم لغزش برای مرحله اول و همچنین بازه‌های عدم لغزش-لغزش برای مرحله دوم ارائه می‌شود.

۳-۱- مراحل مختلف تبخیر سطحی یک قطره

تحقیقات نشان می‌دهد [۱ و ۲۹] که در حضور پسماند زاویه تماس، سه مرحله را می‌توان برای فرآیند تبخیر قطره در نظر گرفت: اول مرحله‌ای که در آن قطره در سطح تماس ثابت تا زاویه تماس پسر θ_f ، کاهش زاویه تماس می‌دهد. دوم مرحله‌ای که در آن قطره با زاویه تماس پسر θ_f ثابت، کاهش شعاع تماس R می‌دهد و مرحله سوم که با کاهش توأمان شعاع تماس R و زاویه تماس θ مواجه است. در این تحقیق، به دو مکانیسم مرحله اول و دوم تبخیر قطره پرداخته می‌شود.

ناحیه سه‌فاز در خط تماس از یک طرف به مایع و از طرف دیگر به گاز یا بخار مرتبط است. در ناحیه خط تماس، با حرکت به سمت فاز گاز، جریان بازتابیده مایع، دیگر مثل سابق فقط با مولکول‌های مایع برخورد کننده مواجه نمی‌شود، بلکه با مولکول‌های گاز با ممتم کمتر نیز برخورد می‌کند. این برخورد به اندازه کافی دارای انرژی نیست که حرکت مماسی مولکول‌های مایع را گند کند؛ یعنی مولکول‌هایی که از جریان آزاد به سطح می‌رسند، این فرصت را نداشته‌اند که تماماً با برخورد با مولکول‌های مایع، گند شوند؛ لذا با سرعت جریان آزاد به سطح می‌رسند؛ در نتیجه مولکول‌های مایع در این ناحیه می‌لغزند و این لغزش از لبه خط تماس به سمت فاز مایع کاهش می‌یابد؛ زیرا با حرکت به سمت فاز مایع به تعداد مولکول‌های مایعی افزوده می‌شود که ممتم مماسی مولکول‌های بازتابیده را گند می‌کنند (شکل ۷ را ببینید).

میانگین پیمایش آزاد در فاز گاز در شرایط معمولی در حدود 50 نانومتر و فاصله میانگین بین دو مولکول از مرتبه 10^{-9} متر است؛ در حالیکه میانگین پیمایش آزاد برای فاز مایع از حدود 5 تا 10 نانومتر تغییر می‌کند و فاصله میانگین



شکل ۷- لغزش در ناحیه خط تماس به علت عدم توازن ممتم اعمالی در ناحیه سه فاز

۳-۲- رابطه‌ای برای مدت زمان مرحله اول تبخیر (زمان عدم لغزش)

تحقیقات نشان می‌دهد که برای قطره‌های به اندازه کافی کوچک، یعنی دارای شعاع کمتر از طول موئینگی $L=(\gamma/\rho g)^{0.5}$ می‌توان از پخش مولکولی و گرانش صرفنظر کرده، از تقریب قطره بصورت بخشی از کلاهک کره استفاده کرد (برای قطرات آب، طول موئینگی در حدود ۲/۶mm است) [۳۰]. با استفاده از روابط هندسی از شکل ۸، حجم قطره بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$V = \int_{\cos\theta}^r \pi(r^2 - z^2) dz = \frac{\pi r^3}{3} (\cos^3 \theta - 3 \cos \theta + 2) \quad (5)$$

که در آن:

$$r = R / \sin \theta \quad (6)$$

با ترکیب دو رابطه اخیر حجم قطره بصورت تابعی از شعاع تماس و زاویه تماس لحظه‌ای با رابطه (۷) بدست می‌آید:

$$V = \frac{\pi R^3}{3} \left(\frac{\cos^3 \theta - 3 \cos \theta + 2}{\sin^3 \theta} \right) \quad (7)$$

برای مرحله عدم لغزش، همانطور که بیان شد، فرض می‌شود شعاع تماس ثابت می‌ماند و زاویه تماس قطره به علت کاهش حجم، کم می‌شود؛ در این حالت نرخ تبخیر قطره را می‌توان بطور تقریبی بصورت رابطه (۸) نوشت:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{\pi R^3}{(1 + \cos \theta_e)^2} \frac{d\theta}{dt} \quad (8)$$

به منظور تخمین مدت زمان بازه عدم لغزش، از معادله (۸) بین θ_e تا θ_r انتگرال‌گیری می‌شود که در آن θ_r آستانه زاویه تماسی است که خط تماس، شروع به عقب کشیدن می‌کند (با فرض اینکه مرحله عدم لغزش از زاویه تماس تعادلی شروع شود). از آنجا می‌توان رابطه‌ای تقریبی بصورت زیر برای مدت زمان مرحله عدم لغزش (مرحله اول تبخیر) ارائه کرد:

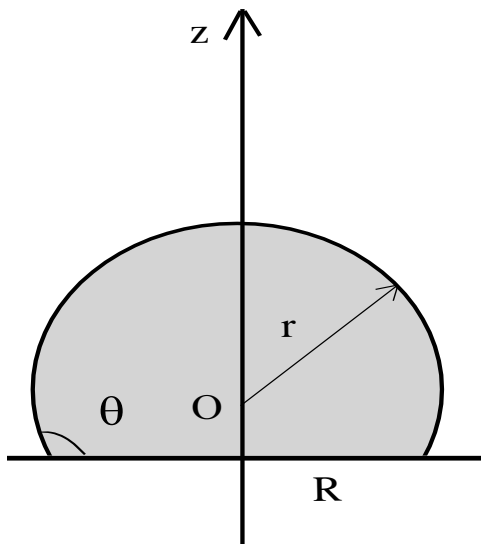
$$t_{ns} = \frac{\pi R^3 \cdot (\theta_r - \theta_e)}{(1 + \cos \theta_e)^2 \cdot dV / dt} \quad (9)$$

بحث و بررسی پیرامون دقت این رابطه و مقایسه با مقادیر تجربی زمان عدم لغزش در بخش چهارم خواهد آمد.

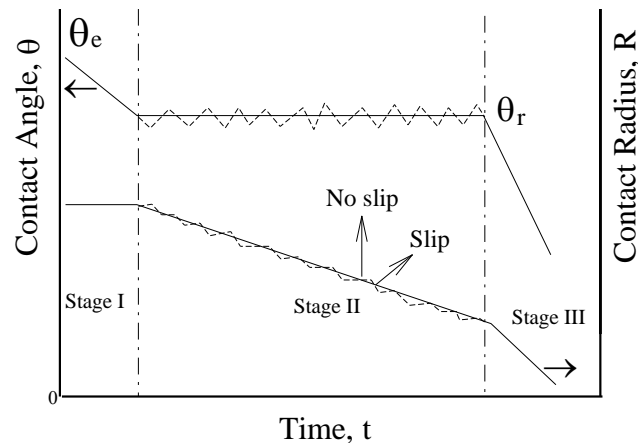
۳-۳- رابطه‌ای برای مدت زمان مرحله دوم تبخیر (بازه عدم لغزش-لغزش)

در مرحله دوم تبخیر، قطره با نوسانی اندک حول یک زاویه تماس ثابت می‌لغزد؛ طبق دو مدل هیدرودینامیک و سینتیک مولکولی، زاویه تماس به سرعت خط تماس وابسته است و حرکت لغزشی همراه با نوسان زاویه تماس، قابل بررسی است؛ فرض می‌شود در مرحله دوم تبخیر قطره، خط تماس یک حرکت عدم لغزش-لغزش را حداقل در بازه‌های زمانی مشخصی طی می‌کند؛ بدین ترتیب که مرحله دوم، اجتماعی از فرآیندهای عدم لغزش-لغزش در بازه‌های زمانی کوچک فرض می‌شود که در مجموع، مرحله دوم تبخیر قطره را می‌سازد. مدل پیشنهادی اولیه برای مرحله دوم تبخیر، بصورت شماتیک در شکل ۹ نشان داده شده است.

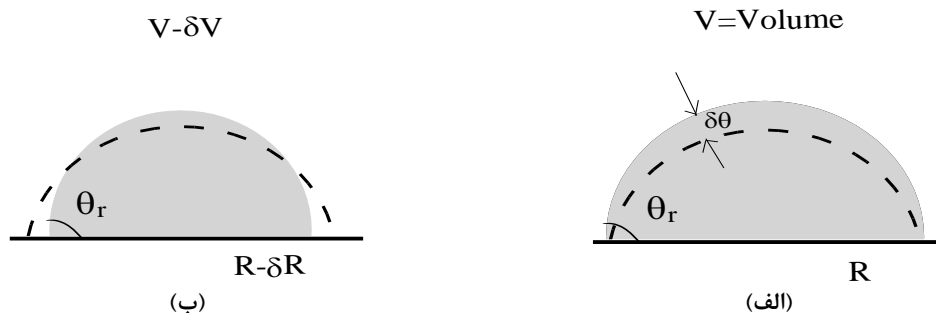
پیشنهاد می‌شود که قطره حرکت عدم لغزش-لغزش را بصورت زیر تجربه می‌کند: بازه زمانی اول، شعاع تماس ثابت مانده و زاویه تماس اندکی کاهش می‌یابد تا در آستانه حرکت لغزشی قرار بگیرد؛ در بازه زمانی دوم، شعاع تماس سریعاً کاهش یافته و به علت پسماند، زاویه تماس دوباره به زاویه تماس اولیه بر می‌گردد. این سیکل تا شروع مرحله سوم مرحله تبخیر، بارها تکرار می‌شود (شکل ۱۰ را ببینید).



شکل ۸- شماتیکی از یک قطره بصورت تقریبی از کلاهک کروی بر روی سطح



شکل ۹- مراحل مختلف تبخیر قطره بر روی سطح جامد و مکانیسم پیشنهادی اولیه بصورت اجتماعی از بازه‌های زمانی عدم- لغزش-لغزش برای مرحله دوم تبخیر



شکل ۱۰- مکانیسم تبخیر قطره در مرحله دوم: اجتماعی از فرآیندهای (الف) حالت عدم لغزش که با کاهش زاویه تماس به مقدار $\delta\theta$ در شعاع تماس ثابت صورت می‌گیرد و (ب) حالت لغزشی که با کاهش سریع شعاع تماس و برگشت زاویه تماس به زاویه تماس پسرو θ_r همراه است

تماس دینامیکی نظیر، تئوری سینتیک مولکولی یا هیدرودینامیک استفاده شود. ابتدا با استفاده از تئوری سینتیک مولکولی، به برآورد رابطه‌ای برای این مدت زمان پرداخته می‌شود. در این حالت، طبق تئوری سینتیک مولکولی (معادله ۲)، رابطه بین سرعت خط تماس و زاویه تماس دینامیکی بصورت رابطه (۱۱) قابل بیان است:

$$\frac{dR}{dt} = 2\kappa_w \lambda \sinh\left[\frac{\gamma \lambda^2 (\cos \theta_r - \cos \theta_d)}{2k_B T}\right] \quad (11)$$

در آن R ، شعاع تماس قطره است. چون در طی فرآیند لغزش تغییرات زاویه تماس کوچک است؛ در نتیجه آرگومان تابع \sinh مقدار کوچکی است و با فرض زاویه تماس به اندازه کافی کوچک، $\cos \theta = 1 - \theta^2/2$ رابطه (۱۱) بصورت زیر ساده می‌شود:

برای امکان‌سنجی این فرضیه ابتدا در گام اول به محاسبه بازه‌های زمانی عدم لغزش-لغزش پرداخته می‌شود. برای محاسبه بازه زمانی عدم لغزش، باید از معادله (۸) بین θ_r تا $\theta_r - \delta\theta$ انتگرال‌گیری شود که در آن $\delta\theta$ ، مقدار کاهش زاویه تماسی است که خط تماس، شروع به برگشت می‌کند (با فرض اینکه مرحله عدم لغزش از زاویه تماس پسرو شروع شود). از آنجا می‌توان رابطه تقریبی (۱۰) را برای بازه زمانی عدم لغزش (t_{ns}) ارائه کرد:

$$t_{ns} = \frac{-\pi R^3 \cdot \delta\theta}{(1 + \cos \theta_r)^2 \cdot dV / dt} \quad (10)$$

ولی برای بازه زمانی لغزش (t_s)، چون خط تماس می‌لغزد، ناچار باید از تئوری‌های وابستگی سرعت خط تماس به زاویه

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\gamma\theta_d(t)}{3\mu\text{Ln}(R/\varepsilon)} (\cos\theta_d - \cos\theta_r) \quad (21)$$

با فرض زاویه تماس کوچک، رابطه بصورت (۲۲) ساده می-شود:

$$\frac{dR}{dt} \approx \frac{\gamma\theta_d}{6\mu\text{Ln}(R/\varepsilon)} (\theta_d^2 - \theta_r^2) \quad (22)$$

از آنجا که زاویه تماس زیاد تغییر نمی-کند، در نتیجه رابطه اخیر بصورت (۲۳) بازنویسی می-شود:

$$\frac{dR}{dt} \approx \frac{\gamma\theta_r^2}{3\mu\text{Ln}(R/\varepsilon)} (\theta_r - \theta_d) \quad (23)$$

در ادامه مشابه حالت قبل، وابستگی زمانی زاویه تماس دینامیکی در مرحله لغزش بصورت رابطه (۲۴) بدست می-آید:

$$t_s = t_0 \ln\left(\frac{\delta\theta}{\theta_r - \theta_d(t)}\right) \quad (24)$$

که در آن ثابت زمانی t_0 برابر است با:

$$t_0 = \frac{\mu\text{Ln}(R/\varepsilon)}{\gamma} \cdot \left(\frac{4V}{\pi\theta_r^{10}}\right)^{1/3} \quad (25)$$

مقدار $\text{Ln}(R/\varepsilon)$ که از آزمایش‌های تجربی بدست می-آید، معمولاً از مرتبه ۱۰ است و برای یک سیستم مشخص مایع/جامد، مقدار ثابتی است.

۴- نتایج و بحث

در این بخش به بررسی و اعتبارسنجی روابط توسعه داده شده در این تحقیق پرداخته می-شود. به منظور ارزیابی دقت رابطه زمانی مرحله اول تبخیر قطره (رابطه ۹)، زمان مورد نیاز برای مرحله اول تبخیر بوسیله این رابطه محاسبه و با مقادیر تجربی در جدول ۱ مقایسه می-شوند.

همانطور که مشاهده می-شود، بین مقادیر بدست آمده از رابطه (۹) با مقادیر تجربی اختلاف اندکی وجود دارد که ناشی از تقریب نرخ تبخیر قطره (dV/dt) است. در ادامه برای امکان‌سنجی فرضیه پیشنهادی در بخش (۳-۳)، بازه-های زمانی عدم‌لغزش/لغزش با استفاده از روابط توسعه داده شده (۱۰)، (۱۹) و (۲۴) محاسبه شده و در جدول ۲ آمده است. برای قطرات آب داریم: $\mu=1\text{mPa.s}$ ، $\gamma=72/4\text{mN/m}$ و مقدار $\theta\delta$ با استفاده از مقادیر تجربی [۶ و ۳۲] معادل $\theta\delta=3^0$ فرض می-شود:

$$\frac{dR}{dt} \approx \frac{\gamma(\theta_d^2 - \theta_r^2)}{2\zeta} \quad (12)$$

که:

$$\zeta \approx \frac{\kappa\lambda^3}{k_B T} \quad (13)$$

ζ اصطکاک خط تماس بوده [۳۱] و از داده‌های تجربی از مرتبه ۰/۱ pa.s است. با استفاده از سری تیلور از معادله (۷)، حجم قطره بصورت رابطه (۱۴) قابل تقریب است:

$$V \approx \frac{\pi R^3 \theta_d}{4} + O(\theta_d^3) \quad (14)$$

چون فرض می-شود که قطره در این فرآیند خیلی سریع می-لغزد تا به زاویه تماس سابق برسد، بنابراین حجم قطره در این مدت زمان ثابت فرض می-شود: ثابت $V=$ ، در نتیجه خواهیم داشت:

$$\frac{dV}{dt} = 3R\dot{\theta}_d + R\dot{\theta}_d = 0 \quad (15)$$

با ترکیب روابط (۱۲) تا (۱۵) بدست می-آید:

$$\frac{3\gamma}{2\zeta} \theta_d (\theta_r^2 - \theta_d^2) = \left(\frac{4V}{\pi\theta_d}\right)^{1/3} \cdot \frac{d\theta_d}{dt} \quad (16)$$

از آنجا که θ_d در طی لغزش، کمی تغییر می-کند، در نتیجه خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \theta_d (\theta_r^2 - \theta_d^2) &= \theta_d (\theta_r - \theta_d)(\theta_r + \theta_d) \approx \\ \theta_r (\theta_r - \theta_d)(\theta_r + \theta_r) &= 2\theta_r^2 (\theta_r - \theta_d) \end{aligned} \quad (17)$$

با این تقریب، می-توان رابطه (۱۶) را بصورت (۱۸) بازنویسی کرد:

$$\frac{3\gamma}{\zeta} \theta_r^2 (\theta_r - \theta_d) = \left(\frac{4V}{\pi\theta_r}\right)^{1/3} \cdot \frac{d\theta_d}{dt} \quad (18)$$

با انتگرال‌گیری از این رابطه و با این فرض که زاویه تماس در لحظه برگشت قطره معادل $\theta_r - \delta$ باشد، رابطه (۱۹) را داریم:

$$t_s = t_0 \ln\left(\frac{\delta\theta}{\theta_r - \theta_d(t)}\right) \quad (19)$$

که در آن ثابت زمانی t_0 برابر است با:

$$t_0 = \frac{\zeta}{3\gamma} \cdot \left(\frac{4V}{\pi\theta_r^7}\right)^{1/3} \quad (20)$$

در ادامه با استفاده از تئوری هیدرودینامیک، این مدت زمان برآورد می-شود. طبق رابطه (۳) داریم:

جدول ۱- مقایسه زمان سپری شده در مرحله اول تبخیر از مقادیر تجربی و رابطه (۹)

| حجم اولیه $V_0(\text{mm}^3)$ | شعاع تماس $R_0(\text{mm})$ | زاویه تماس تعادلی $\theta_c(^{\circ})$ | نرخ تبخیر $dV/dt(\mu\text{L}/\text{min})$ | مدت زمان مرحله اول تبخیر | | سطح Substrate | مرجع Ref |
|---------------------------------|-------------------------------|---|--|--------------------------|-------------------------|-------------------|-------------|
| | | | | t_{ns} (min) تجربی | t_{ns} (min) محاسباتی | | |
| ۲/۱۹ | ۱/۲۰ | ۶۷ | -۰/۱۰۸ | ۴/۹۷ | ۳/۱۷ | PMMA ^a | ۶ |
| ۳/۱۸ | ۱/۴۰ | ۶۷ | -۰/۱۳۵ | ۴/۹۷ | ۴/۰۲ | PMMA | ۶ |
| ۵/۰۵ | ۱/۶۲ | ۶۷ | -۰/۱۵۱ | ۶/۰۳ | ۵/۵۷ | PMMA | ۶ |
| ۷/۸۱ | ۱/۸۷ | ۶۷ | -۰/۱۷۶ | ۶/۸۳ | ۷/۳۶ | PMMA | ۶ |
| ۲/۱۴ | ۱ | ۸۷ | -۰/۰۹۹ | ۶/۷۵ | ۵/۹۸ | PAMS ^b | ۶ |
| ۲/۹۶ | ۱/۱۶ | ۸۷ | -۰/۱۲۱ | ۶/۷۵ | ۷/۶۴ | PAMS | ۶ |
| ۴/۹۲ | ۱/۳۴ | ۸۷ | -۰/۱۴۵ | ۹/۹۰ | ۹/۸۳ | PAMS | ۶ |
| ۷/۳۵ | ۱/۵۴ | ۸۷ | -۰/۱۵۷ | ۱۲/۲۴ | ۱۳/۷۸ | PAMS | ۶ |
| ۵ | ۱ | ۱۶۰/۶ | -۱۷/۷۲ | ۲/۹۴ | ۴/۳۳ | AKD ^c | ۲۸ |
| ۵ | ۱/۱۹ | ۱۲۲/۵ | -۲ | ۹/۹۶ | ۱۱/۲۷ | OTS ^d | ۲۸ |
| ۵ | ۱/۶ | ۵۸/۶ | -۰/۲۳۵ | ۱۳/۵۶ | ۱۸/۳۹ | Glass | ۲۸ |

^a Polymethylmethacrylate. ^b Poly(α -methyl styrene). ^c Alkylketene dimmer. ^d Octadecyltrichlorosilane.

جدول ۲- محاسبه بازه‌های زمانی عدم لغزش-لغزش در مرحله دوم تبخیر قطره
(ترتیب مراجع و سطوح مربوطه همانند جدول ۱ است)

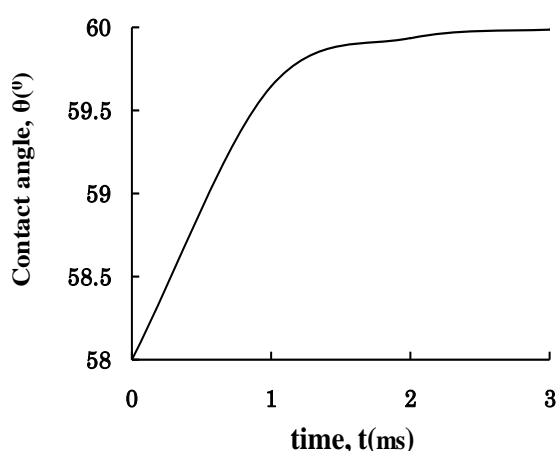
| حجم اولیه $V_0(\text{mm}^3)$ | شعاع تماس $R_0(\text{mm})$ | زاویه تماس- پسرو $\theta_r(^{\circ})$ | ثابت زمانی $t_0(\text{ms})$ | | بازه عدم لغزش ^۱ Δt_{ns} (min) | بازه لغزش Δt_s (ms) | |
|---------------------------------|-------------------------------|---|-----------------------------|--------------|--|-----------------------------|---------------------------|
| | | | سینتیک مولکولی | هیدرودینامیک | | سینتیک مولکولی ^۲ | هیدرودینامیک ^۳ |
| ۲/۱۹ | ۱/۲۰ | ۶۰ | ۰/۵۸ | ۰/۱۶ | ۰/۷۸ | ۲/۳ | ۰/۶ |
| ۳/۱۸ | ۱/۴۰ | ۶۰ | ۰/۶۶ | ۰/۱۹ | ۰/۹۸ | ۲/۴ | ۰/۶۵ |
| ۵/۰۵ | ۱/۶۲ | ۶۰ | ۰/۷۷ | ۰/۲۲ | ۱/۳۷ | ۳ | ۰/۷ |
| ۷/۸۱ | ۱/۸۷ | ۶۰ | ۰/۸۹ | ۰/۲۵ | ۱/۸۰ | ۴ | ۰/۸ |
| ۲/۱۴ | ۱ | ۷۵ | ۰/۳۴ | ۰/۰۷ | ۰/۶۹ | ۱/۲ | ۰/۲ |
| ۲/۹۶ | ۱/۱۶ | ۷۵ | ۰/۳۸ | ۰/۰۸ | ۰/۸۹ | ۱/۴ | ۰/۳ |
| ۴/۹۲ | ۱/۳۴ | ۷۵ | ۰/۴۵ | ۰/۱۰ | ۱/۱۴ | ۱/۸ | ۰/۴ |
| ۷/۳۵ | ۱/۵۴ | ۷۵ | ۰/۵۱ | ۰/۱۱ | ۱/۶ | ۲/۲ | ۰/۴۵ |
| ۵ | ۱ | ۱۵۶ | ۰/۰۸ | ۰/۰۱ | ۰/۸۱ | ۰/۳ | ۰/۱ |
| ۵ | ۱/۱۹ | ۷۰ | ۰/۵۳ | ۰/۱۳ | ۰/۰۵ | ۲/۲ | ۰/۴ |
| ۵ | ۱/۶ | ۱۴ | ۲۲/۸۹ | ۲۸/۱۲ | ۰/۴۹ | ۹۰ | ۱۰۰ |

^۱ بازه زمانی عدم لغزش محاسبه شده از رابطه (۱۰). ^۲ بازه زمانی لغزش محاسبه شده از تئوری سینتیک مولکولی (رابطه ۱۹). ^۳ بازه زمانی لغزش محاسبه شده از تئوری هیدرودینامیک (رابطه ۲۴).

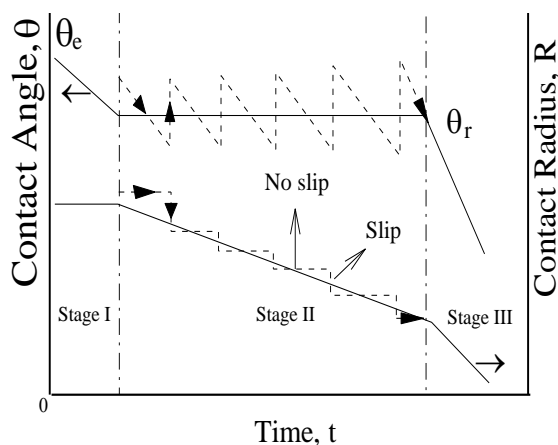
قطره با حجم $2/19 \text{ mm}^3$ در شکل ۱۱ آمده است که در آن زاویه تماس بعد از تقریباً $2/3$ میلی ثانیه به زاویه تماس ۶۰ درجه مجانب می‌شود.

نحوه محاسبه زمان لغزش بدین ترتیب است که با ترسیم زاویه تماس بر حسب زمان (روابط ۱۹ و ۲۴)، می‌توان مدت زمانی را بدست آورد که زاویه تماس به زاویه تماس پسرو مجانب می‌شود. برای نمونه، زمان تقریبی لغزش برای یک

نهایت به شرط عدم لغزش کلاسیک می‌رسد. با استفاده از رفتار سینتیک خط تماس و تئوری‌های وابستگی زاویه تماس به سرعت خط تماس، یک مدل فیزیکی برای مرحله دوم تبخیر قطره روی سطح جامد ارائه شد که در آن شعاع تماس، ضمن ثابت ماندن ظاهری زاویه تماس، کاهش می‌یابد. مطابقت خوبی بین مقادیر بازه عدم لغزش-لغزش بدست آمده از این مدل با مقادیر تجربی مشاهده شد که بیانگر توافق مدل ارائه شده با رفتار زاویه و شعاع تماس در مرحله دوم تبخیر قطره است.



شکل ۱۱- تغییرات زمانی زاویه تماس دینامیکی در بازه لغزش با استفاده از تئوری سینتیک مولکولی



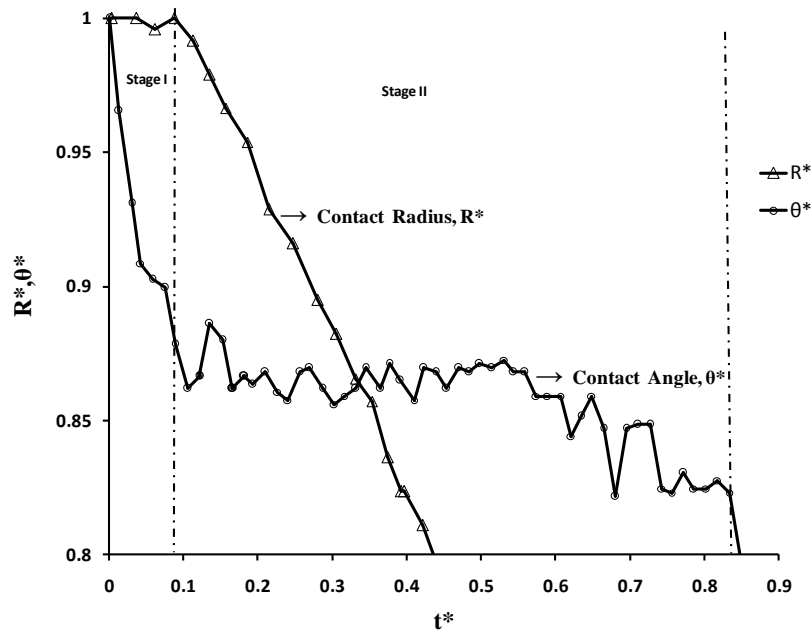
شکل ۱۲- تصحیح مدل در نظر گرفته شده برای مرحله دوم تبخیر قطره (برای وضوح بیشتر در نمایش گام‌های لغزش و عدم لغزش اغراق شده است)

همانطور که از جدول ۲ قابل مشاهده است، مقادیر پیش-بینی شده برای بازه‌های زمانی عدم لغزش و لغزش در مرحله دوم تبخیر، معقول و منطقی به نظر می‌رسد. بازه زمانی لغزش به غیر یک مورد از مرتبه ۱ میلی ثانیه است که بدین معنی است در این مدت زمان، شعاع تماس خیلی سریع کاهش یافته و زاویه تماس به زاویه تماس اولیه بر می‌گردد؛ این در حالی است که بازه زمانی عدم لغزش از مرتبه ۱ دقیقه بوده و این مدت زمانی است که قطره در سطح ثابت فرصت دارد، کاهش زاویه دهد؛ بنابراین با بدست آمدن مقادیر تقریبی بازه‌های زمانی عدم لغزش و لغزش، می‌توان مدل فیزیکی در نظر گرفته در شکل ۹ را بصورت شکل ۱۲ تصحیح کرد. در این شکل، همانطور که مشهود است، در بازه عدم لغزش (از مرتبه ۱ دقیقه)، سطح تماس ثابت است، ولی زاویه تماس کاهش می‌یابد و در بازه لغزش (از مرتبه ۱ میلی ثانیه)، زاویه تماس افزایش یافته، ولی سطح تماس کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که قطره در مرحله دوم تبخیر، با نوسان زاویه تماس حول یک مقدار (زاویه تماس پسرو)، اجتماعی از سیکل‌های عدم لغزش-لغزش را تجربه می‌کند. در شکل ۱۳، یک نمونه از مقادیر تجربی [۶] تغییرات زاویه و شعاع تماس بی‌بعد نسبت به زمان بی‌بعد برای مقایسه آمده است که در آن شعاع تماس نسبت به شعاع اولیه ($R^*=R/R_0$)، زاویه تماس نسبت به زاویه تماس تعادلی ($\theta^*=\theta/\theta_e$) و زمان نسبت به زمان کل تبخیر ($t^*=t/t_e$) بی‌بعد شده است. دقت در این نمودار، مشخص می‌کند که مدل پیشنهادی به خوبی رفتار داده‌های تجربی را توجیه می‌کند. در حالت ماکروسکوپی به نظر می‌رسد که زاویه تماس ثابت است؛ این در حالی است که یک نگاه دقیق به تغییرات میکروسکوپی زاویه و شعاع تماس، وجود سیکل عدم لغزش-لغزش را آشکار می‌کند.

۵- جمع بندی

در این مقاله، با استفاده از جریان سیال نزدیک یک سطح، منشأ لغزش ناحیه سه فاز مطالعه و بررسی شد. نشان داده شد که سرعت لغزش در ناحیه خط تماس به علت عدم توازن ممنت‌م اعمالی سطح مشترک مایع/گاز ایجاد می‌شود که با حرکت به سمت فاز مایع، این گرادیان کاهش یافته و در



شکل ۱۳- مقادیر تجربی تغییرات شعاع و زاویه تماس بی بعد نسبت به زمان بی بعد

لزجت دینامیکی، Pa.s
زاویه تماس

μ
 θ

۶- علائم
حروف انگلیسی

پیشرو
بولتزمن
دینامیکی
تعادلی
گاز
مایع
پسرو
جامد، لغزش
عدم لغزش

سرعت مولکولی، m/s
ارتفاع قطره، m
ثابت بولتزمن، N.m/K
تعداد مولکولها
شعاع تماس، m
دما، K
زمان، s
سرعت خط تماس، m/s
حجم قطره، m³
محورهاى مختصات، m

زیر نویس
a
B
d
e
g
l
r
s
ns

حروف یونانی

α, β
 $\delta\theta$
 ε
 γ
 ξ
 κ
 λ

ضرایب ثابت
تغییر زاویه تماس
طول لغزش، m
تنش سطحی، N/m
اصطکاک خط تماس، Pa.s
فرکانس جابجایی مولکولی، 1/s
طول جابجایی مولکولی، m

۷- مراجع

[1] Bourgs-Monnier C, Shanahan MER (1995) Influence of evaporation on contact angle. Langmuir 11: 2820-2829.
[2] Shanahan MER (2001) Spreading of water: Condensation effects. Langmuir 17:8229-8235.
[3] Hu H, Larson RG (2002) Evaporation of a sessile droplet on a substrate. J Phys Chem B 106:1334-1344.

- [16] Cox RG (1986) The dynamics of the spreading of liquids on a solid surface. Part 1, Viscous Flow, *J Fluid Mech* 168:169-194.
- [17] Petrov PG, Petrov JG (1992) A combined molecular-hydrodynamic approach to wetting kinetics. *Langmuir* 8:1762-1776.
- [18] Ranabothu SR, Karnezis C, Dai LL (2005) Dynamic wetting: Hydrodynamic or molecular-kinetic? *J Colloid Interface Sci* 288: 213-221.
- [19] Pasandideh-Fard M, Qiao YM, Chandra S, Mostaghimi J (1996) Capillary effects during droplet impact on a solid surface. *Phys Fluid* 8:650-659.
- [20] Ruckenstein E (2002) Microscopic origin of macroscopic wetting. *Colloid Surface A* 206:3-10.
- [21] Huh C, Scriven LE (1971) Hydrodynamic model of steady movement of a solid/liquid/fluid contact line. *J Colloid Interface Sci* 35(1):85-101.
- [22] Voinov OV (1976) Hydrodynamics of wetting. *J Fluid Mech* 11:714-721.
- [23] De Gennes PG (1985) Wetting: Statics and dynamics. *Rev Mod Phys* 57(3).
- [24] Lee J, Sears FW, Turcotte DL (1963) *Statistical thermodynamics*. Reading, Mass., Addison-Wesley Publishing Co., Inc., p. 81.
- [25] John JEA (1984) *Gas dynamic*. Dean, School of Engineering, University of Massachusetts, 2nd ed.
- [26] Jennings S (1988) The mean free path in air. *J Aerosol Sci* 19:159-167.
- [27] Ruckenstein E (1992) Dynamics of partial wetting. *Langmuir* 8:3038-3039.
- [28] Ruckenstein E, Dunn CS (1977) Slip velocity during wetting of solids. *J Colloid Interface Sci* 59(1).
- [29] Sefiane K, Tadriss L (2006) Experimental investigation of the de-pinning phenomenon on rough surfaces of volatile drops. *Int Commun Heat Mass Trans* 33:482-490.
- [30] Foister RT (1990) The kinetics of displacement wetting in liquid/liquid/solid systems. *J Colloid Interface Sci* 136(1).
- [31] De Ruijter MJ, Blake TD, De Coninck J (1999) Dynamic wetting studied by molecular modeling simulations of droplet spreading. *Langmuir* 15: 7836-7847.
- [32] Shin DH, Lee SH, Jung J, Yoo JY (2009) Evaporating characteristics of sessile droplet on hydrophobic and hydrophilic surfaces. *Microelectron Eng* 86:1350-1353.
- [4] Hu H, Larson RG (2006) Marangoni effect reverses coffee-ring depositions. *J Phys Chem B* 110:7090-7094.
- [5] Girard F, Antoni M, Faure S, Steinchen A (2006) Evaporation and marangoni driven convection in small heated water droplets. *Langmuir* 22:11085-11091.
- [6] Kim J, Ahn S, Kim JH, Zin W (2007) Evaporation of water droplets on polymer surfaces. *Langmuir* 23:6163-6169.
- [7] Kim J, Ahn S, Kim JH, Kim JS, Cho K, Jung JC, Chang T, Ree M, Zin W (2008) Evaporation of sessile droplets of dilute aqueous solutions containing Sodium n-Alkylates from polymer surfaces: Influences of Alkyl length and concentration of solute. *Langmuir* 24:11442-11450.
- [۸] کریم دوست یاسوری الف، پسندیده فرد م (۱۳۹۱) مطالعه تجربی و تحلیلی دینامیک تبخیر سطحی قطرات آب بر روی سطوح مختلف. نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک ۲۳(۲): ۸۱-۹۸
- [۹] کریم دوست یاسوری الف، پسندیده فرد م (۱۳۹۳) بررسی تجربی اثرات موئینگی در تبخیر سطحی قطرات آب. نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک ۱-۳ (۲): ۲۵
- [10] Li Q, Zhou P, Yan HJ (2016) Pinning-depinning mechanism of the contact line during evaporation on chemically patterned surfaces: A lattice Boltzmann study. *Langmuir* 32 (37): 9389-9396.
- [11] Wang F, Wu H (2015) Molecular origin of contact line stick-slip motion during droplet evaporation. *Sci Rep* 5: 17521.
- [12] Roisman IV, Opfer L, Tropea C, Raessi M, Mostaghimi J, Chandra S (2008) Drop impact onto a dry surface: Role of the dynamic contact angle. *Colloid Surface A* 322:183-191.
- [13] Šikalo S, Wilhelm HD, Roisman IV, Jakirlic S, Tropea C (2005) Dynamic contact angle of spreading droplets: Experiments and simulations. *Phys Fluid* 17:062103(1-13).
- [14] Bayer I, Megaridis CM (2006) Contact angle dynamics in droplets impacting on flat surfaces with different wetting characteristics. *J Fluid Mech* 558: 415-449.
- [15] Blake TD, Haynes JM (1969) Kinetics of liquid/liquid displacement. *J Colloid Interface Sci* 30(3).