




Semnan University



Research Article

Synthesis Of Hydrophobised Magnetite Nanoparticles For Formation Of Liquid Marbles And Modeling Of Liquid Marble Deformation Under The Gravity Effect

Elnaz Poorreza^a, Mahnaz Mehdipoor^b, Reza Hadji Aghaie Vafaie^{c,*} , Noushin Dadashzadeh^d

^a Ph.D, Faculty of Electrical engineering, Sahand University of technology, Tabriz, Iran

^b Ph.D, Sahand University of technology, Tabriz, Iran

^c Associate Professor, Faculty of Electrical engineering, Bonab, Iran

^d Assistant professor, Faculty of Electrical Engineering, Aras Branch, Islamic Azad University, Jolfa, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 16 July 2022

Revised: 20 May 2023

Accepted: 10 June 2023

Keywords:

Surface tension,
liquid marble,
Magnetic field,
Finite Element Method,
Modelling,
Nanoparticle synthesis.

ABSTRACT

Liquid marbles are emerging discrete droplet microfluidic systems that are a simple alternative to conventional droplet microfluids encapsulated by hydrophobic nanoparticles or micro-particles. One of the most important applications of liquid marbles is their use in biochemistry, biomedicine, nanotechnology and so on. In this research, liquid marbles are studied in two parts of practical and simulation. In the practical part, for the production of liquid marbles, magnetite nanoparticles are first synthesized and hydrophobised with paraffin wax. In the next step, using a micropipette, a droplet of water is placed on the nanoparticles and by tilting the surface, it is rolled on the nanoparticles, which finally forms a "liquid marble". Finally, the opening and closing of the powdery shell studied using a magnetic field induced by a fixed magnet. In the simulation section, by modelling the marble with an elastic shell around the droplet, the effect of the gravitational force on it, was examined and it was observed that the simulation results show well agreement with the practical part.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.27751.2302>

© 2023 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: reza.vafaie@ubonab.ac.ir

How to cite this article:

Poorreza, E., Mehdipoor, M., Hadjiaghaie Vafaie, R., & Dadashzadeh, N. (2023). Synthesis and characterization of hydrophobised magnetite nanoparticles for production of liquid marbles and modeling of liquid marble deformation under the gravity effect. *Journal of Modeling in Engineering*, 21(75), 53-66.
doi: 10.22075/jme.2023.27751.2302

مقاله پژوهشی

سنتر نانو ذرات آبریز شده مگنتیت برای ساخت تیله های مایع مغناطیسی و مدلسازی تغییر شکل تیله مایع تحت تاثیر نیروی گرانش زمین

الناز پوررضا^۱، مهناز مهدی پور^۲، رضا حاجی آقایی وفايي^۳، نوشین داداش زاده^۴

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۲۵	تیله‌های مایع سیستم‌های نو ظهور ریزسیالات قطره‌ای گسسته هستند که جایگزین ساده‌ای برای ریزسیالات قطره‌ای مرسوم بوده که توسط ذرات نانو یا میکرووی آبریز احاطه شده‌اند. از مهمترین کاربردهای تیله‌های مایع میتوان به استفاده از آنها در صنایع بیو شیمی، بیو پزشکی، تکنولوژی نانو و غیره اشاره کرد. در این تحقیق، مطالعه تیله‌های مایع در دو قسمت عملی و شبیه‌سازی صورت گرفته که در قسمت عملی، در ابتدا برای تولید تیله‌های مایع، نانو ذرات مگنتیت (Fe_3O_4)، سنتر و با پارافین آبریز می‌گردند. در مرحله بعد با استفاده از یک میکروپیپت، یک قطره آب بر روی نانو ذرات قرار داده شده و با کج کردن سطح، بر روی نانو ذرات غلت داده شده که نهایتاً "تیله مایع تشکیل می‌گردد. در آخر باز و بسته شدن غلاف پودری شکل با استفاده از میدان مغناطیسی ناشی از آهنربای ثابت مورد مطالعه قرار گرفت. در قسمت شبیه‌سازی، با مدلسازی تیله مایع با پوسته کشسان در اطراف قطره، تاثیر نیروی گرانشی زمین بر تیله مغناطیسی، مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده گردید که نتایج حاصل از شبیه‌سازی مطابقت خوبی با عملی را داراست.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۰	
واژگان کلیدی:	
کشش سطحی،	
تیله مایع،	
میدان مغناطیسی،	
روش المان محدود،	
مدلسازی،	
سنتر نانو ذرات.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.27751.2302>

© 2023 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

هم تحریک و کنترل نمود [۶] و [۳] مجتمع‌سازی با سایر ادوات ریز سیالات امکان پذیر می‌باشد [۵]. در سیستم ریزسیالات قطره‌ای با اعمال پتانسیل الکتریکی به الکترودها بدون استفاده از ادوات مکانیکی نظیر دریچه و پمپ می‌توان عملیات ترکیب یا یکسان‌سازی قطرات، جداسازی و حرکت آنها را انجام داد [۶].

علاوه بر دستکاری قطرات با استفاده از میدان الکتریکی میتوان از میدان مغناطیسی و آکوستیک نیز بهره برد.

دانشی که به مطالعه و بررسی پدیده‌های شیمیایی- فیزیکی در سطح مشترک بین دو فاز می‌پردازد، دانش سطح نامیده می‌شود [۱-۴]. قطرات مجزا به عنوان سیستم دو فاز، در ریز سیالات قطره‌ای کاربردهای گسترده‌ای دارند که این ریزسیالات نسبت به ریزسیالات بر اساس ریزکانال‌ها، دارای مزایایی بوده که [۵] عبارتند از: (۱) اندازه نمونه کاهش می‌یابد (۲) می‌توان قطرات گسسته را به صورت مستقل از

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: reza.vafaie@ubonab.ac.ir

۱. دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۲. دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه بناب

۴. استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ارس

استناد به این مقاله:

پوررضا، الناز، مهدی پور، مهناز، حاجی آقایی وفايي، رضا، & داداش زاده، نوشین. (۱۴۰۲). سنتر نانو ذرات آبریز شده مگنتیت برای ساخت و دستکاری تیله های مایع مغناطیسی و مدلسازی تغییر شکل تیله مایع تحت تاثیر نیروی گرانش زمین. مدل سازی در مهندسی، ۲۱(۷۵)، ۵۳-۶۶. doi: 10.22075/jme.2023.27751.2302

طراحی میکرو پمپ بر اساس اختلاف فشار لاپلاس درونی با استفاده از تیل-های مایع اشاره شده است [۲۸] که در آن دو تیل مایع با پوسته پودری متفاوت از هم به وسیله یک لوله کپیلاری به یکدیگر متصل می‌گردند. همچنین استفاده از پدیده دی الکتروفریز در میدان الکتریکی غیر یکنواخت، نیروی دی الکتروفریز برای حرکت و برخورد تیل-های مایع با یکدیگر گزارش شده است. [۳۲-۲۹]

همانطور که پیشتر اشاره شد به طور کلی روشهای تحریک تیل-های مایع را می‌توان به سه دسته الکترومغناطیسی، مکانیکی و سایر تقسیم‌بندی کرد. شکل (۱) روشهای بکار رفته برای تحریک تیل-های مایع به همراه کاربردهای مربوطه در زمینه‌های مختلف مانند ریزمخلوط گر، ریز پمپ و ریز واکنشگر را نشان می‌دهد. در تحریک الکترو مغناطیسی از نیروی الکتریکی یا مغناطیسی، در تحریک مکانیکی، از نیروی گرانشی زمین و گرادیان فشار، و در سایر موارد از پیش رانندگی خود به خودی، تغییرات PH، تجمع سورفکتانت، اکوستیک و تغییرات دما برای دستکاری تیل-های مذکور استفاده می‌شود.

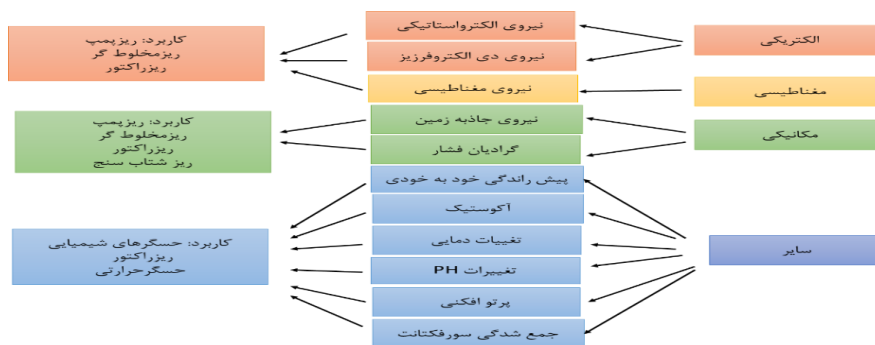
علاوه بر مطالعات در مورد انواع تحریکات در تیل-های مایع، پارامترهای موثری از جمله زاویه تماس، شعاع نانو ذرات و کشش سطحی بر مدول یانگ تیل مایع تاثیرگذار می‌باشند، که این پارامترها توسط گروه بورمشنکو و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر آن این گروه موفق به مدلسازی لایه متشکل از نانو ذرات بصورت لایه کشسان شدند که این حالت کشسانی لایه محافظ در اطراف تیل مایع ناشی از فعل و انفعالات درونی بین نانو ذرات می‌باشد [۲۳].

در توضیح بیشتر برای تحریک به وسیله میدان مغناطیسی در صورتی که در تیل مایع از نانو ذرات مغناطیسی در پوسته استفاده شود و یا مایع درونی تیل به صورت فرو سیال باشد، می‌توان آن را به وسیله میدان مغناطیسی تحریک کرد. پوسته نانو ذرات این تیل-ها قابلیت باز و بسته شدن با میدان مغناطیسی را دارا هست که از این ویژگی می‌توان در کاربردهای بیولوژیکی و ریز راکتورها استفاده نمود. استفاده از نیروی مغناطیسی در تحریک تیل مایع به دلیل در دسترس بودن آن، سادگی، عدم نیاز به ادوات پیچیده مکانیکی، عدم تماس فیزیکی و سازگار بودن آن در کاربردهای زیست سلولی از اهمیت ویژه ای برخوردار می‌باشد [۵، ۳۳].

سیستم‌های ریز سیالات قطره‌ای با چالش‌هایی از قبیل کاهش سرعت حرکت ناشی از اصطکاک مابین تماس قطره با سطح حرکت و همچنین تبخیر سطحی همراه می‌باشد. در سالهای اخیر در راستای کاهش مشکلات مذکور و به دلیل ویژگیهای منحصر به فرد تیل-های مایع، استفاده از این تیل-های مایع برای کاربردهای ریزسیالات مورد توجه قرار گرفته است. تیل-های مایع برای اولین بار توسط دو محقق به نام‌های آسیلوس و کوره در سال ۲۰۰۱ مطرح گردیدند که بعداً تحقیقات بسیاری بر روی آن انجام شده است [۷، ۸].

یک تیل مایع از غلتاندن یک قطره مایع به عنوان هسته بر روی بستری از پودر در ابعاد میکرو یا نانو تشکیل می‌شود که این امر باعث کاهش تبخیر مایع درونی می‌گردد [۹-۱۳] و علاوه بر آن اصطکاک بین تیل مایع و سطح تماس کاهش یافته و سرعت حرکت تیل افزایش می‌یابد [۵، ۶] در واقع هسته تیل مغناطیسی که توسط پوسته متشکل از نانوذرات احاطه شده، به شکل مایع از سطح جامد یا مایع به وسیله پاکت‌های هوایی جدا می‌گردند [۱۴]. با غلتاندن قطره مایع بر روی نانو ذرات و چسبیدن خود به خودی نانو ذرات بر روی سطح مایع تیل مایع تشکیل می‌شود [۱۵-۱۹].

کاربردهای مختلف برای تیل-های مایع گزارش شده است که به عنوان یک نمونه پوسته متخلخل تیل مایع امکان گذار و عبور گاز از پوسته [۲۰، ۲۱] و امکان رشد سلولی را فراهم می‌کند [۲۲]. همچنین، تشخیص آلودگی سطح به کمک تغییر رنگ و متلاشی شدن پوسته از کاربردهای دیگر تیل-های مایع می‌باشند [۲۳، ۲۴]. در نمونه دیگر شتاب سنج دینامیک متشکل از تیل مایع به صورت موفق در سیستم‌های ریزسیالات و الکترووتینگ به کار گرفته شده است [۲۵]. ویژگی غیر چسبان تیل-های مایع با سطح تماس خود باعث می‌شود که از آنها به عنوان حامل مقادیر کم مایعات استفاده گردد [۲۶، ۲۷]. علاوه بر موارد مذکور، این تیل-ها به عنوان بیو راکتور در واکنش‌های شیمیایی برای کاربردهای زیست واکنشگر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۰، ۲۲]. به دلیل حجم کوچک تیل-های مایع، میزان استفاده از معرف و زمان واکنش شیمیایی کاهش می‌یابد. در چنین کاربردی، هر تیل شامل یک معرف بوده که تحت تاثیر یک نیروی خارجی به هم برخورد کرده و امکان ترکیب محتویات درونی آنها فراهم می‌گردد. در تحقیقی دیگر به



شکل ۱- مروری بر روشها و تکنیک های مختلف تحریک تپله های مایع و کاربردهای آنها

$$A_{LP} = \pi R^2 \sin^2 \theta_e \quad (1)$$

در این معادله R شعاع ذره و θ_e زاویه ای است که توسط معادله یانگ تعریف می گردد. سطح A_{PG} به صورت زیر تعریف می گردد:

$$A_{PG} = 2\pi R^2 (1 + \cos \theta_e) \quad (2)$$

اتصال نانو ذره به فصل مشترک مایع هوا، فصل مشترک A_{PG} را به A_{LP} تغییر می دهد. به همین دلیل انرژی آزاد سطح تغییر می کند که با معادله زیر تعیین می گردد:

$$\Delta F = A_{PG}(\gamma_{SL} - \gamma_{SG}) - A_{LP}\gamma_{LG} \quad (3)$$

با جایگزینی معادله (۳) با معادله (۴) که به زاویه یانگ معروف است به معادله (۵) خواهیم رسید.

$$\cos \theta_e = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} \quad (4)$$

در معادلات (۳) و (۴) γ_{LG} ، γ_{SG} ، γ_{SL} به ترتیب کشش سطحی جامد-گاز، جامد-مایع و مایع-گاز را نشان می دهند. انرژی آزاد سطح به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\Delta F = -2\pi R^2 \gamma_{LG} (1 + \cos \theta_e)^2 \quad (5)$$

مقدار انرژی در رابطه (۵) همواره منفی و یا صفر خواهد بود بنابراین اتصال ذرات به سطح مایع در صورتی که حتی آبریز نیز باشند، در راستای پایدار کردن مایع، مطلوب می باشد. طول ذراتی که به سمت خارج از مایع می باشند، با توجه به شکل (۲-ب)، به صورت زیر تعریف می گردد:

$$D = R(1 - \cos \theta_e) \quad (6)$$

۲-۲- کشش سطحی موثر یک تپله مایع

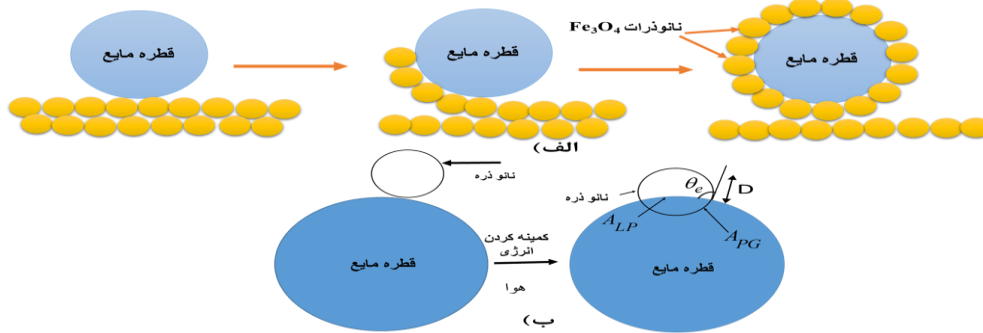
اساسا خواص مکانیکی تپله های مایع بر اساس پیچیدگی سطح آن که شامل فازهای مایع، جامد و گاز بوده مورد تحقیق قرار گرفته اند. با بکارگیری نظریه کشش سطحی

در این تحقیق به مطالعه عملی و شبیه سازی یک تپله مایع مغناطیسی پرداخته شده که در بخش عملی، تپله های مغناطیسی مایع متشکل از نانو ذرات اکسید آهن سنتر شده و سپس به وسیله پارافین آبریز شده تا در حجم ها و شکل های مختلف ساخته شوند. در قسمت شبیه سازی، باتوجه به اینکه سطوح مایعی که با نانو ذرات جامد پوشیده می شوند می توانند با سطح جامد کشسان جایگزین گردند، تپله مایع با جایگزینی یک لایه کشسان به دور مایع، مدل سازی شده است که در آن تاثیر نیروی گرانشی زمین بر شکل تپله مایع با دو دایره هم مرکز که شامل هسته و پوسته کشسان بوده بوسیله روش المان محدود بررسی گردیده است. نتایج حاصل از شبیه سازی مطابقت خوبی با قسمت عملی داشته که در ادامه کار، حرکت این تپله مایع تحت تاثیر نیروی گرانشی بر روی یک سطح شیب دار خمیده با روش المان محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. در رابطه با کار عملی در زمینه تپله مایع کارهای زیادی توسط پژوهشگران انجام شده است. اما در رابطه با شبیه سازی تپله مایع با یک لایه کشسان با تخصیص ماژول یانگ و عدد پواسون، قبل از ما کاری انجام نشده است. بنابراین نوآوری این تحقیق در قسمت شبیه سازی و جایگزین کردن تپله با معادل جامد آن می باشد.

۲- مبانی اساسی تپله های مایع

۲-۱- دیدگاه از بعد انرژی

زمانی که نانو ذرات بر روی سطح مایع می چسبند انرژی سطح کل کاهش یافته که در صورت کروی بودن این ذرات سطح مشترک مایع- جامد تغییر می کند. شکل (۲-الف) چگونگی اتصال خود به خودی نانو ذرات بر سطح مایع (آب) را نشان می دهد. بر اساس شکل (۲-ب) سطح هندسی A_{LP} به صورت زیر تعریف می گردد [۵]:



شکل ۲- الف) چگونگی اتصال نانو ذرات بر قطره آب وقتی که بر روی بستری از نانو ذرات غلت داده می‌شود. ب) چگونگی قرارگیری یک ذره بر سطح مشترک قطره

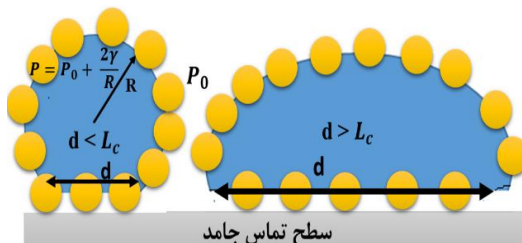
می باشد.

$$B_0 = \frac{\rho g R^2}{\gamma} \quad (9)$$

در معادلات بالا γ کشش سطحی مایع درونی تیله، ρ چگالی، g گرانش زمین، R شعاع تیله مایع می‌باشند. مطابق شل (۳) وقتی تیله مایع کوچک است و ابعاد آن (قطر سطح تماس d) کمتر از طول کاپیلاری می‌باشد ($d < L_c$) نیروی کشش سطحی غالب بوده و تقریباً کروی شکل می‌باشد. زمانی که تیله بزرگتر می‌گردد ($d > L_c$) نیروی گرانشی زمین نیروی غالب بوده و تیله بر سطح گسترده شده و خمیر مانند دیده می‌شود. وقتی که تیله مایع بر روی سطح قرار می‌گیرد به دلیل وزن آن، سطح تماس با سطح، شبیه دیسک می‌باشد. امکان استخراج عدد باندکه یک عدد بدون بعد می‌باشد، از طول کاپیلاری فراهم می‌باشد. این عدد برای تیله‌های کوچک $B_0 < 1$ و برای تیله‌های بزرگ $B_0 > 1$ می‌باشد. همین طور فشار در بیرون و در داخل تیله مایع بر اساس قانون لاپلاس به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$P = P_0 + \frac{2\gamma}{R} \quad (10)$$

که در این جا P_0 فشار اتمسفریک و P فشار در درون تیله می باشد [۳۴].



شکل ۳- مقایسه بین شکل تیله مایع بزرگ و کوچک

موثر γ_{eff} ، این سطح چند فازی قابل توضیح می‌باشد. کشش سطحی موثر یک تیله مایع به عنوان یک خاصیت اساسی آن بر اساس اندازه h_{max} (بیشترین ارتفاع) بصورت زیر است:

$$L_c = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}} \quad (7)$$

$$\gamma_{eff} = \frac{\rho g h_{max}^2}{4} \quad (8)$$

در این معادله L_c طول موینگی^۱، ρ چگالی و g جاذبه زمین می‌باشند. اندازه h_{max} با اندازه‌گیری ارتفاع تیله مایع (h) به عنوان تابعی از قطر افقی آن (d) با افزایش حجم مایع قابل اندازه‌گیری می‌باشد. معمولاً در محاسبات این ارتفاع دو برابر طول کاپیلاری در نظر گرفته می‌شود [۵].

۲-۳- مقایسه بین شکل تیله مایع بزرگ و کوچک

بر اساس نظریه حداقل انرژی سطح^۲ و قانون کلی دینامیک حرارت، اگر یک قطره قابلیت حرکت آزادانه داشته باشد، باید در راستای کم کردن ناحیه سطح^۳ آن باشد. در تعیین شکل مایع طول موینگی و عدد باند^۴ دو فاکتور تعیین‌کننده بوده که شکل این تیله‌های مایع از تعادل بین دو نیروی گرانش زمین و کشش سطحی حاصل می‌گردد. تیله‌های مایع با ابعاد کوچک تقریباً کروی شکل بوده و نیروی غالب در آن کشش سطحی و در تیله‌های مایع با ابعاد بزرگ حالت خمیری^۵ شکل داشته و نیروی گرانش زمین نیروی تعیین‌کننده می‌باشد.

برای بسیاری از مایعات عدد کاپیلاری در حدود ۲ میلی متر بوده که این مقدار برای آب این عدد ۲/۷ میلی متر

⁴ Bond number

⁵ Puddle

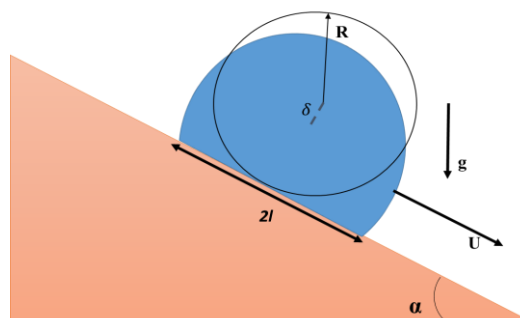
¹ Capillary length

² Minimum surface energy

³ Surface area

۳- تحریک گرانشی تپله های مایع

یکی از ساده ترین روشهای تحریک به منظور حرکت یک تپله مایع، تحریک با استفاده از نیروی گرانشی زمین می باشد. با استفاده از یک سطح کج می توان باعث غلتیدن تپله مایع به سمت پایین گردید. در این پروسه انرژی پتانسیل تبدیل به انرژی جنبشی می گردد. شکل (۴) که توسط پومو^۱ و ماهادوان^۲ در سال ۱۹۹۹ برای یک قطره مایع غلتان مدل شده است در مورد یک تپله مایع نیز صادق می باشد [۳۸].



شکل ۴- غلتیدن یک قطره مایع تحت تاثیر میدان گرانشی زمین

بر اساس شکل (۴)، پایین رفتن مرکز قطره به اندازه δ تحت تاثیر وزن آن و شعاع سطح تماس l با رابطه (۱۱) در ارتباط می باشند:

$$l^2 \sim R\delta \quad (11)$$

افزایش انرژی سطح به بهای کاهش انرژی پتانسیل با رابطه (۱۲) در ارتباط می باشند:

$$\rho g R^3 \delta \sim \frac{\gamma l^4}{R^2} \quad (12)$$

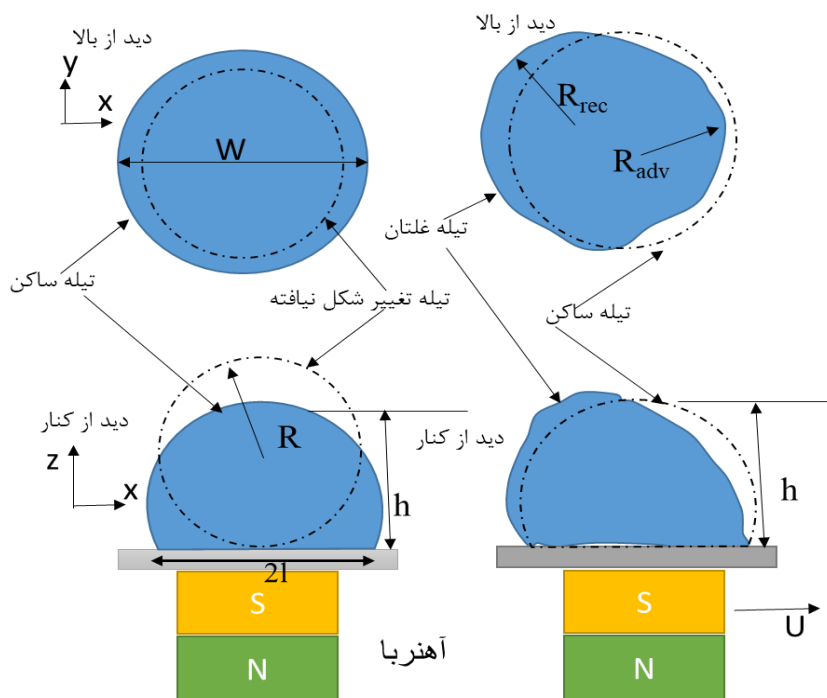
با حل معادلات (۱۱) و (۱۲) به معادله (۱۳) خواهیم رسید:

$$\delta \sim \frac{\rho g R^3}{\gamma} = BoR. l \sim \left(\frac{\rho g}{\gamma}\right)^{\frac{1}{2}} R^2 = Bo^{\frac{1}{2}} R \quad (13)$$

در این مدل با متعادل قرار دادن اتلاف ویسکوزیته و کاهش انرژی پتانسیل سرعت قطره محاسبه می شود.

$$UR^3 \rho g \sin \alpha \sim \mu \int_{V_d} (\nabla u)^2 dV \quad (14)$$

در معادله (۱۴)، U سرعت مرکز جرم تپله مایع، u سرعت درون مایع، V_d حجمی از مایع که اتلاف چسبندگی^۳ در آن اتفاق می افتد و μ چسبندگی دینامیکی مایع می باشد.



شکل ۵ - پارامترهای مختلف تعیین مشخصات تپله مایع تحت تاثیر میدان مغناطیسی دو حالت تپله مایع ساکن و تپله مایع تغییر شکل یافته.

³ Viscosity dissipation

¹ Pomeau

² Mahadevan

این جا Bm عدد باند مغناطیسی می‌باشد.
 $Bm = RMB / \gamma$ در این جا M چگالی مغناطیس
 شونده می‌باشد [۳۵].

تحقیقات بر روی تیله مغناطیسی غلطان توسط گروه نگوین
 با جزئیات انجام شده و روابط بین میدان مغناطیسی،
 سرعت تیله مغناطیسی و شکل آن برای تیله کوچک:

$$R \left(\frac{1}{R_{adv}} - \frac{1}{R_{rec}} \right) \sim Ca Bm^{\frac{1}{4}} \quad (17)$$

و برای تیله مایع بزرگ:

$$R \left(\frac{1}{R_{adv}} - \frac{1}{R_{rec}} \right) \sim Ca Bm^{\frac{5}{4}} \quad (18)$$

استخراج گردیده است. در این جا R_{adv} شعاع پیشرونده و
 R_{rec} شعاع پسرونده می‌باشند. $Ca = \mu U / \gamma$ عدد
 کاپیلاری، μ لزجت مایع و U سرعت حرکت تیله مایع
 می‌باشد [۳۵].

۵- بخش عملی

۵-۱- سنتز نانوذرات آبریز شده

به منظور فرآوری نانوذرات مغناطیسی مگنتیت (Fe_3O_4)
 هیدروفوب و زیست سازگار، از آبریزترین اسیدآمین،
 اسیدآمین ایزولوسین^۳ استفاده شد. فرآیند سنتز نانوذره
 مغناطیسی $Fe_3O_4 @ Isoleucine$ به صورت درجا انجام
 گرفت. مواد مورد نیاز در این فرآیند، ایزولوسین و نمک‌های
 آهن II و III است.

محلول ۲ مولار $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (۹۹٪ خریداری شده از
 Merck) و محلول ۱ مولار $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ (۹۸٪ خریداری شده از
 Merck) تهیه شد و به قدری
 محلول با مگنت هم زده شد تا کاملاً شفاف گردید. این
 محلول در دمای $5 \pm 80^\circ C$ به مدت یک ساعت به دست
 آمد. سپس محلول ایزولوسین به محلول نمک‌های آهن
 اضافه شد و تحت اتمسفر خنثی همزدن ادامه یافت. در
 نهایت محصول نهایی چندین بار توسط اتانول و آب دیونیزه
 شسته شد و در نهایت خشک گردید.

افزایش آبریزی نانوذرات تولید شده در این مرحله،
 بر مبنای پوشش‌دهی این نانوذرات با پارافین واکس حاصل
 شد. در این راستا نانوذرات سنتز شده در مرحله قبل با
 نسبت وزنی ۱:۱۰ با $Pwax$ پوشش‌دهی شدند. به صورت

بر اساس شکل (۴) سرعت مایع به صورت مقابل $|\nabla u| \sim U/R$
 و $V_d \sim l^3$ نوشته می‌شود. با در نظر گرفتن اتلاف
 چسبندگی و جایگزین کردن این معادلات در معادله (۱۴)،
 سرعت تیله مایع به صورت معادله (۱۵) محاسبه می‌شود:

$$U \sim \frac{R^5 \rho g \sin \alpha}{\mu l^3} = \frac{\sin \alpha \gamma^{3/2}}{\mu R (\rho g)^{1/2}} \sim \frac{\gamma Bm^{-1/2} \sin \alpha}{\mu} \quad (15)$$

در معادله (۱۵)، اگر l با معادله (۱۳)، جایگزین شود، به
 قسمت چپ معادله (۱۵) خواهیم رسید که با عکس شعاع
 در ارتباط می‌باشد. بر اساس این معادله سرعت تیله مایع با
 زاویه شیب، چسبندگی دینامیکی، کشش سطحی تیله مایع
 و عدد باند تعریف می‌گردد. علاوه بر این قطرات کوچکتر
 نسبت به قطرات بزرگتر با سرعت بیشتری حرکت می‌کنند.
 از آن جایی که در این روش اتلاف انرژی پتانسیل غیر قابل
 برگشت می‌باشد میزان کنترل پذیری حرکت تیله مایع با
 این تکنیک محدود می‌باشد [۳۵]. تولید میزان کمی انرژی
 الکتریکی با غلطاندن تیله مایع بر الکترودهای شیب‌دار مورد
 تحقیق قرار گرفته است [۳۶]. همین طور یک شتاب‌سنج
 بر پایه تیله مایعی که با نیروی گرانشی تحریک می‌شود،
 گزارش شده است [۳۷].

۴- اصول اولیه تحریک تیله مایع به وسیله میدان

مغناطیسی

تحت تاثیر میدان مغناطیسی شکل تیله مایع
 مغناطیسی مانند یک قطره مغناطیسی تغییر می‌کند. به
 این پدیده مگنتووتینگ^۱ گفته می‌شود. بر اساس شکل (۵)
 برای مشخصه‌سازی ارتفاع h و شعاع تماس l عدد باند
 مغناطیسی به عنوان متغیر مستقل مورد استفاده قرار
 می‌گیرد. نرمالیزه کردن ارتفاع و شعاع تماس بدون بعد، با
 شعاع تغییر شکل نیافته R به معادله زیر ختم می‌شود:

$$h^* = h/R, l^* = l/R \quad (16)$$

با در نظر گرفتن این که میدان مغناطیسی بسیار بزرگتر از
 وزن تیله مایع بوده و شار میدان مغناطیسی که بر تیله مایع
 مغناطیسی وارد می‌شود از فلوی میدان مغناطیسی بحرانی
 بسیار بزرگتر باشد، روابط مقیاسی برای تیله مایع
 مغناطیسی کوچک و تقریباً کروی به صورت $h^* \approx 2, l^* \approx Bm^{1/4}$
 و برای تیله مغناطیسی بزرگ و خمیری شکل به
 صورت $h^* \approx Bm^{-1/2}, l^* \approx Bm^{1/4}$ نوشته می‌شود. در

³ Isoleucine.

¹ Magnetowetting

² Nguyen

ترکیب نانوذره و ویژگی‌های ساختاری آن، با استفاده از پراش اشعه ایکس تعیین شد. مطابق با شکل (۶) الف) و نتایج حاصل از آن، تشکیل هسته مغناطیسی مگنتیت در نانوذره $Fe_3O_4@Isoleucine - Pwax$ محرز است. در این شکل، مکان پیک‌ها برای هر دو حالت نانو ذرات پوشیده (گراف قهوه ای) و نپوشیده (گراف قرمز رنگ) با پارافین واکس نشان داده شده است. از روی نمودار پیک‌هایی در $2\theta = 30.2^\circ, 35.5^\circ, 43.1^\circ, 53.5^\circ, 56.9^\circ$

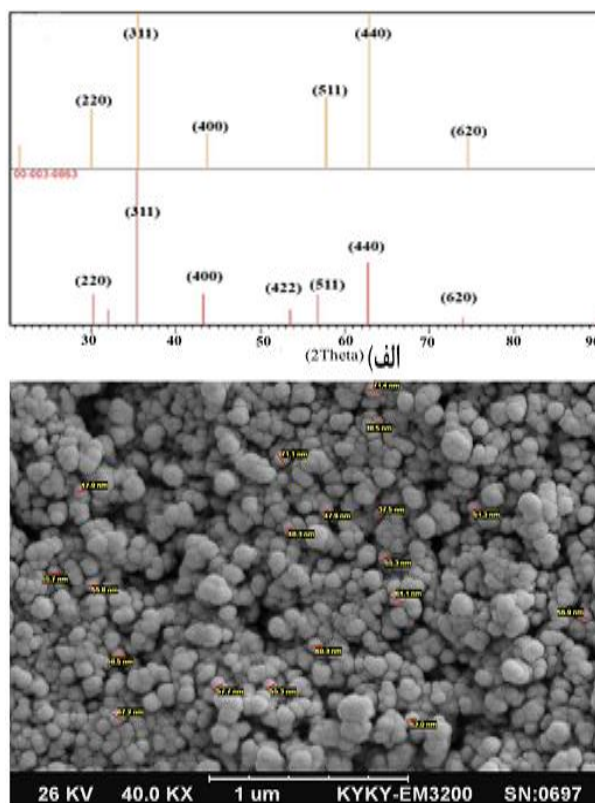
معادل با: $74^\circ, 62.8^\circ$

(220)، (311)، (400)، (422)، (511)، (440)، (620) ظاهر شده‌اند. مکان‌های پیک‌ها برای هر دو حالت قرمز و قهوه‌ای حاکی از آن است که پوشش‌دهی نانو ذرات با پارافین واکس تاثیری بر خاصیت مغناطیسی آن نمی‌گذارد.

خلاصه مخلوطی از پارافین واکس و نانوذرات سوپراآبرگیز $Fe_3O_4@Isoleucine$ به مدت ۱۵ دقیقه در دمای بالای نقطه ذوب پارافین حرارت داده می‌شوند. تحت هم زدن مداوم این ترکیب تا دمای اتاق (۲۵ درجه) سرد می‌گردد. پوشش‌دهی با پارافین واکس باعث کاهش آهنگ تبخیر مایع از تیله مایع مغناطیسی و افزایش طول عمر آن می‌گردد.

۵-۲-تست XRD

به منظور مشخصه‌یابی نانو ذرات $Fe_3O_4@Isoleucine - Pwax$ آنالیزهای پراش اشعه ایکس (XRD) بر روی آن انجام شد. برای ثبت آنالیز پراش اشعه ایکس از دستگاه $\lambda = RIGAKU-Dmax2500$ (۰.۱۵۴ nm) در بازه کاری ۴۰ kV و ۳۰ mA استفاده گردیده است.



(ب)

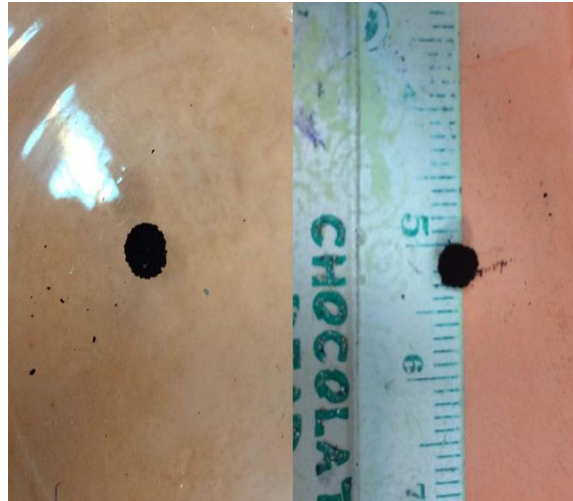
شکل ۶- الف) تست XRD نانو ذرات مغناطیسی. ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی SEM نانو ذرات با پوشش دهی با پارافین واکس

۵-۴- ساخت تیله‌های مغناطیسی

به منظور ساخت تیله‌های مغناطیسی در حجم ۱۵ میکرو لیتر، نخست بر روی سطح شیشه، مقداری پودر نانوذرات $Fe_3O_4@Isoleucine - Pwax$ ریخته شد. سپس با استفاده از میکرو پیپت، مقدار حجم مورد نظر از آب دیونیزه

۵-۳-تست SEM

تصویر میکروسکوپ الکترونی SEM نانوذرات در شکل (۶- ب) نشان داده شده است. شکل این نانوذرات تقریباً کروی است و اندازه نانوذرات $Fe_3O_4@Isoleucine - Pwax$ در حدود ۵۴ نانومتر تخمین زده شد.



شکل ۷ - تصویر تیله مایع مغناطیسی ساخته شده به شعاع حدوداً ۱/۴ میلی متر

جا r شعاع سطح تماس، θ_A زاویه پیشرونده^۱ و θ_R زاویه پسرونده^۲ می باشند [۵]. در شکل (۸-ب) باز شدن پوسته تیله مغناطیسی ساخته شده وقتی یک آهنربا در زیر آن قرار دارد، نشان داده شده است. نقاط سفید رنگ در روی پوسته نانو ذرات سیاه رنگ، مایع درونی را نشان می دهند.

۵-۶- نیروی اعمالی بر تیله مایع مغناطیسی از طرف میدان مغناطیسی آهنربا

در درون نانو ذراتی که اطراف مایع درونی را احاطه می کنند هر ممان مغناطیسی در درون حوزه مغناطیسی در جهت های مختلفی قرار می گیرند. این نواحی وقتی که در معرض میدان مغناطیسی غیر یکنواخت قرار داده شود، همگی در یک جهت قرار می گیرند. در نتیجه یک نیروی مغناطیسی که هم سو با گرادیان میدان مغناطیسی می باشد، تشکیل می گردد. این نیروی مغناطیسی اعمالی بر نانو ذرات از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$F_{mag} = \frac{V\Delta\chi}{\mu_0}(\nabla B)B \quad (19)$$

در معادله بالا V حجم نانو ذرات، $\Delta\chi$ یک عدد بدون بعد که تفاوت پذیرفتاری بین نانو ذره و محیط اطراف آن می باشد. $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (T m A}^{-1}\text{)}$ ثابت تراوایی خلا، B ، ∇B به ترتیب چگالی میدان مغناطیسی (T) و گرادیان میدان مغناطیسی $\text{(T m}^{-1}\text{)}$ می باشد [۵].

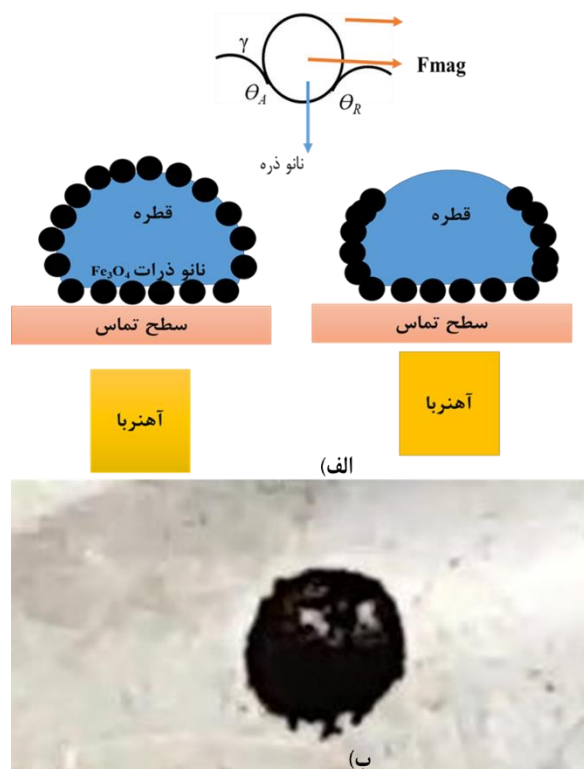
بر روی پودر انداخته شد. بعد از پاشیدن مقدار دیگری از پودر بر روی قطره آب، با استفاده از نیروی مغناطیسی آهنربای ۰/۴ تسلا، تیله های مایع از نانو ذرات باقیمانده جدا شد. بر اساس شکل (۷) ابعاد تیله مایع قابل اندازه گیری می باشد

۵-۵- باز و بسته شدن پوسته تیله مایع مغناطیسی تحت تاثیر میدان مغناطیسی

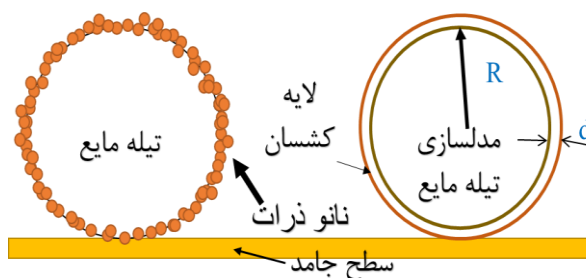
قابلیت باز و بسته شدن پوسته تیله های مایع مغناطیسی تحت تاثیر میدان مغناطیسی یکی از قابلیت های منحصر به فرد آنها می باشد. به دلیل این قابلیت استثنایی امکان دستکاری مایع درونی با یک وسیله دیگر مثل یک کاپیلاری فراهم می باشد. در نتیجه تعویض مایع، ریز واکنش و پروب نوری قابل انجام می باشد [۳۹]. همان طور که قبلاً اشاره شد، از این ویژگی برای کاربردهای ریز راکتور استفاده می گردد [۴۰]. شکل (۸-الف) نحوه باز و بسته شدن لایه نانو ذره را توسط یک آهنربا نشان می دهد. بر اساس این شکل زمانی که آهنربا به تیله مایع نزدیک می شود، نانو ذرات به سمت پایین حرکت می کنند. اما با دور کردن آهنربا مجدداً به حالت اولیه بر می گردند. این پدیده یعنی برگشت نانو ذرات به حالت اولیه را می توان با کمینه شدن انرژی سطح توجیه کرد. بر اساس این شکل زمانی که نانو ذرات نیرویی بزرگتر از $\pi r(\cos\theta_R - \cos\theta_A)$ موازی با سطح مایع دریافت می کنند، شروع به حرکت می کنند. در این

² Receding contact angle

¹ Advancing contact angle



شکل ۸ - الف) شکل شماتیک از مکانیزم باز و بسته شدن نانو ذرات تیله مایع مغناطیسی در حضور آهنربا (ب) باز شدن پوسته تیله مغناطیسی ساخته شده وقتی یک آهنربا در زیر آن قرار دارد

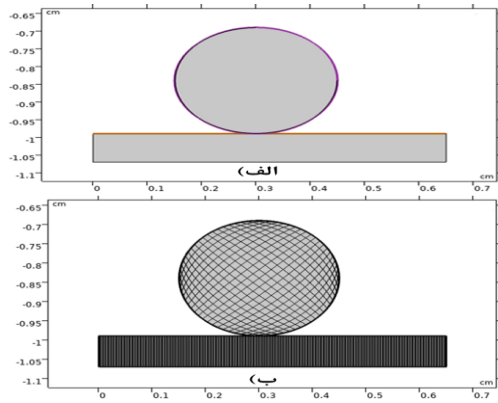


شکل ۹- مدل سازی تیله مایع با یک قطره ای که یک پوسته کشسان در اطراف هسته خود دارد.

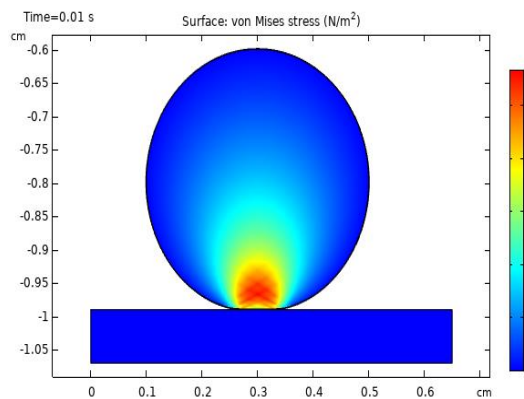
۶- مدل سازی و شبیه سازی

برای درک بیشتر تغییر شکل تیله مایع مغناطیسی تحت تاثیر میدان جاذبه، به وسیله روش المان محدود، به مدل سازی و شبیه سازی این مکانیزم پرداخته ایم. بر اساس شکل (۹) ما تیله مایع مغناطیسی مان را با دو دایره هم مرکز که دایره درونی نمایانگر قطره آب و پوسته کشسان اطراف آن نمایانگر نانو ذرات می باشند، مدل سازی نموده ایم. در این مدل شعاع قطره را $1/5$ میلی متر و ضخامت پوسته نانو ذرات را $d = 30 \times 10^{-8}$ فرض کرده ایم. مدول یانگ $E = 10^3$ Pa و عدد پواسون $\nu = 0.35$ برای لایه کشسان و مدول یانگ $E = 10^2$ و عدد پواسون $\nu = 0.35$ برای قطره آب در نظر می گیریم [۲۳].

در شبیه سازی انجام شده، فیزیک به کار رفته solid mechanics می باشد. همان طور که از شکل مشخص می باشد تیله مایع در نزدیکی سطح تماس در اثر وزن خود دچار خمش می گردد و این تغییر شکل با افزایش حجم و وزن آن بیشتر می گردد. شکل (۱۲) توزیع استرس را در تیله مایع نشان می دهد. این یافته های حاصل از شبیه سازی هماهنگی خوبی با یافته های عملی دارند و صحت آن را نشان می دهند. در شکل (۱۰-الف) مش بندی تیله مایع نشان داده شده است. برای مش بندی از mapped mesh استفاده شده است. شکل (۱۰-ب) نواحی سطح تماس که شامل منبع و هدف می باشد را نشان می دهد. شکل (۱۱) شبیه سازی تغییر شکل تیله مایع ساکن بر روی سطح جامد

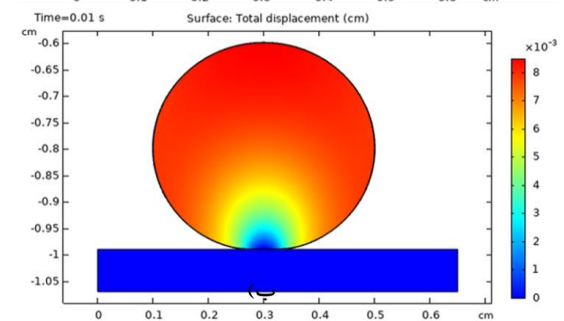
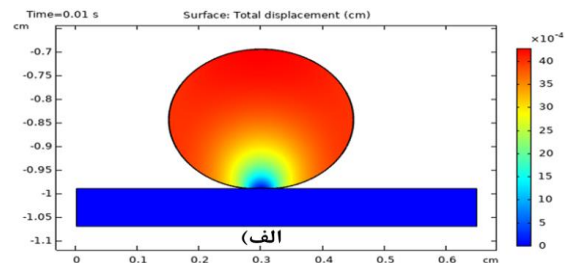


شکل ۱۰- الف) مش بندی و ب) نواحی سطح تماس شبیه سازی تغییر شکل تیله مایع تحت تاثیر وزن آن

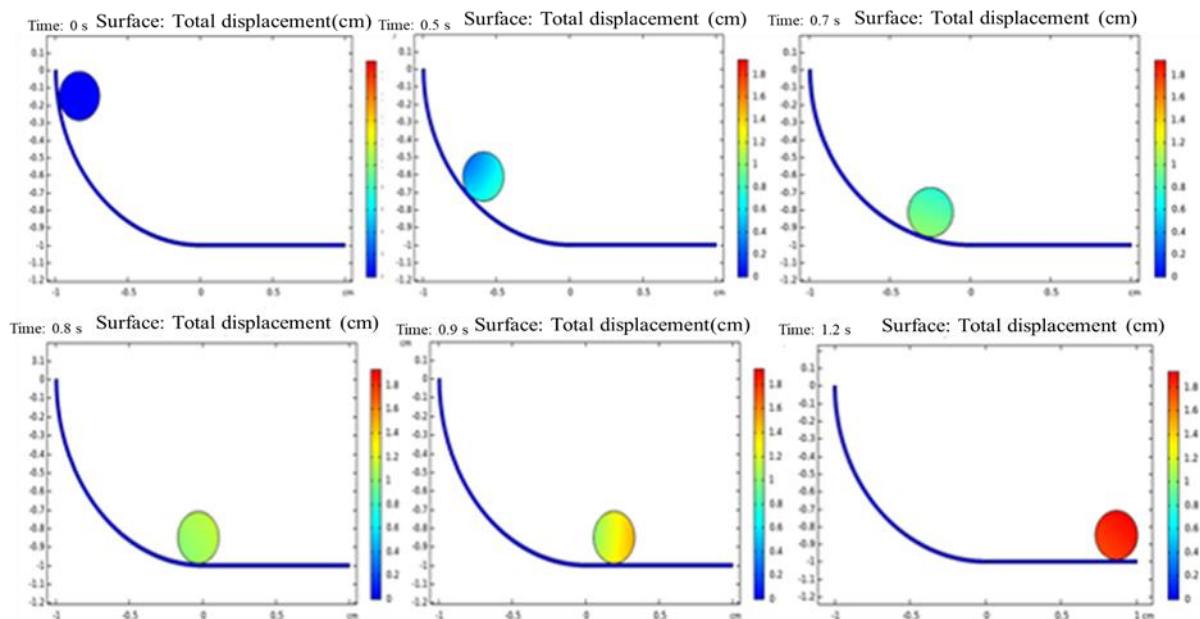


شکل ۱۲- نتایج حاصل از شبیه سازی توزیع استرس در تیله مایع

را تحت تاثیر نیروی گرانش زمین نشان می دهد. در شکل (۱۱-الف) شعاع دایره درونی را $1/5$ میلی متر ($0/15$ سانتی متر) و در شکل (۱۱-ب) این شعاع 2 میلی متر ($0/2$ سانتی متر) در نظر گرفته شده است. بر اساس شکل (۱۱) با افزایش شعاع و در نتیجه حجم مایع قطر افقی تیله مایع افزایش می یابد.



شکل ۱۱ - نتایج حاصل از شبیه سازی تاثیر نیروی گرانش بر شکل تیله مایع در حالتی که شعاع الف) $0/2$ ، ب) $0/15$ در نظر گرفته می شود.



شکل ۱۳ - تصاویر حرکت تیله مایع بر روی سطح خمیده

مایع به سنتز و آبرگیز کردن نانو ذرات مگنتیت پرداخته ایم. در مرحله بعدی به ساخت تیله مایع مغناطیسی در ابعاد تقریبی میلی متری پرداخته ایم. با استفاده از نیروی مغناطیسی یک آهنربا باز و بسته شدن لایه پودری تیله مایع را به صورت عملی مشاهده نمودیم و در انتها با استفاده از مدل سازی و شبیه سازی با روش المان محدود تاثیر نیروی گرانش بر شکل ظاهری تیله مایع را بررسی نموده ایم. یافته های حاصل از شبیه سازی درستی یافته های حاصل از قسمت عملی را تایید می کنند. در ادامه شبیه سازیهای قبلی، حرکت این تیله مایع تحت تاثیر نیروی گرانشی که بر وزن آن وارد می گردد، با استفاده از روش المان محدود بر روی سطح شیب دار خمیده شبیه سازی گردید. در رابطه با کار عملی در زمینه تیله مایع کارهای زیادی توسط محققین انجام شده و در این زمینه ما اولین نیستیم. اما در رابطه با شبیه سازی تیله مایع با یک لایه کشسان با تخصیص ماژول یانگ، قبل از این تحقیق کاری انجام نشده است. بنابراین نوآوری این تحقیق در بعد شبیه سازی تیله مایع، و جایگزین کردن آن با یک جامد نرم معادل می باشد.

در ادامه به شبیه سازی حرکت یک تیله مایع وقتی که در بالای یک سطح خمیده قرار می گیرد، می پردازیم. همان گونه که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، یک تیله با شعاع ۰/۱۴ میلی متر در بالای یک سطح جامد شیب دار قرار می گیرد. این تیله در اثر نیروی گرانش زمین شروع به حرکت می کند و در انتها در بازه زمانی حدود ۱ ثانیه بر روی سطح افقی ساکن می گردد. در این پروسه انرژی پتانسیل تیله بر بالای سطح خمیده، به انرژی جنبشی تبدیل می گردد. از آنجایی که حرکت یک تیله مایع بر روی سطوح خمیده در برخی از کاربردها از جمله شتاب سنج های بر پایه تیله های مایع حائز اهمیت است، شبیه سازی این پروسه حرکتی از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد.

۷- نتیجه گیری

قطرات مایعی که توسط نانو-میکرو ذرات احاطه شده باشند را تیله مایع می گویند که جایگزین بسیار مناسبی برای مفهوم آبرگیزی می باشند. کار ما در مورد تاثیر نیروی گرانش زمین بر شکل ظاهری تیله مایع مغناطیسی با روش عملی و شبیه سازی می باشد. در ابتدای کار برای تولید تیله

مراجع

- [۱] لشکرلوکی، مصطفی. "پیش بینی کشش سطحی مایعات یونی بر پایه ایمیدازولیوم با بکارگیری شبکه عصبی مصنوعی"، نشریه مدل سازی در مهندسی ۱۷، ۵۸ (۱۳۹۸): ۱-۱۳.
- [۲] طغری سمیرمی، داود، و شیرین میرفروغی. "بررسی عددی انتقال حرارت آمیخته نانو سیال با خواص متغیر داخل حفره مستطیلی کم عمق با درپوش متحرک"، نشریه مدل سازی در مهندسی ۱۶، ۵۵ (۱۳۹۷): ۳۳۷-۳۵۰.
- [۳] ضیایی راد، مسعود، و پیمان الیاسی. "بررسی عددی جریان نوسانی نانوسیال در کانال مستطیلی شکل در حالت غیردائم"، نشریه مدل سازی در مهندسی ۱۴، ۴۴ (۱۳۹۵): ۲۱-۳۴.
- [۴] حامدی استخرسر، محمد هادی، و روح الله ارفعی. "بررسی عددی پارامترهای مؤثر بر عملکرد مدل برهم کنش ادی و قطره برای کاربرد در قطره گیر زیگزاگی ساده باصفحات موج دار"، نشریه مدل سازی در مهندسی ۱۰، ۳۱ (۱۳۹۱): ۶۹-۸۴.
- [5] Zhao, Yan, Zhiguang Xu, Marzieh Parhizkar, Jian Fang, Xungai Wang, and Tong Lin, "Magnetic liquid marbles, their manipulation and application in optical probing", *Microfluidics and nanofluidics* 13, no. 4, (2012): 555-564.
- [6] Fair, Richard B., "Digital microfluidics: is a true lab-on-a-chip possible?", *Microfluidics and Nanofluidics* 3, no.3, (2007): 245-281.
- [7] Aussillous, Pascale, and David Quéré, "Liquid marbles", *Nature* 411, no. 6840, (2001): 924.
- [8] Aussillous, Pascale, and David Quéré, "Properties of liquid marbles", *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 462, no. 2067, (2006): 973-999.
- [9] Bormashenko, Edward, Roman Pogreb, Tamir Stein, Gene Whyman, Marcelo Schiffer, and Doron Aurbach. "Electrically deformable liquid marbles", *Journal of Adhesion Science and Technology* 25, no.12, (2011): 1371-1377.

- [10] Ooi, Chin Hong, Anh Van Nguyen, Geoffrey M Evans, Oleg Gendelman, Edward Bormashenko, and Nam-Trung Nguyen. "A floating self-propelling liquid marble containing aqueous ethanol solutions", *Rsc Advances* 5, no.122, (2015): 101006-101012.
- [11] Bormashenko, Edward, Yelena Bormashenko, Roman Pogreb, and Oleg Gendelman. "Janus droplets: liquid marbles coated with dielectric/semiconductor particles", *Langmuir* 27, no.1, (2010): 7-10.
- [12] Celestini, F, and Ed Bormashenko. "Propulsion of liquid marbles: A tool to measure their effective surface tension and viscosity", *Journal of colloid and interface science* 532, (2018): 32-36.
- [13] Bormashenko, Edward, Yelena Bormashenko, Roman Grynyov, Hadas Aharoni, Gene Whyman, and Bernard P Binks. "Self-propulsion of liquid marbles: Leidenfrost-like levitation driven by Marangoni flow", *The Journal of Physical Chemistry C* 119, no. 18, (2015): 9910-9915.
- [14] Ooi, Chin Hong, Raja Vadivelu, Jing Jin, Kamalalayam Rajan Sreejith, Pradip Singha, Nhat-Khuong Nguyen, and Nam-Trung Nguyen. "Liquid marble-based digital microfluidics—fundamentals and applications", *Lab on a Chip* 21, no. 7, (2021): 1199-1216.
- [15] Polwaththe-Gallage, Hasitha-Nayanajith, Emilie Sauret, Nam-Trung Nguyen, Suvash C Saha, and YuanTong Gu. "A novel numerical model to predict the morphological behavior of magnetic liquid marbles using coarse grained molecular dynamics concepts", *Physics of Fluids* 30, no.1, (2018): 017105.
- [16] Shang, Qianqian, Lihong Hu, Yun Hu, Chengguo Liu, and Yonghong Zhou. "Fabrication of superhydrophobic fluorinated silica nanoparticles for multifunctional liquid marbles", *Applied Physics A* 124, no. 1, (2018): 25.
- [17] Kawashima, Hisato, Ryo Okatani, Hiroyuki Mayama, Yoshinobu Nakamura, and Syuji Fujii. "Synthesis of hydrophobic polyanilines as a light-responsive liquid marble stabilizer", *Polymer* 148, (2018): 217-227.
- [18] Zhao, Zhijian, Xiaoxue Yao, Wen Zhao, Bo Shi, Sreepathy Sridhar, Yuan Pu, Stevin Pramana, Dan Wang, and Steven Wang. "Highly transparent liquid marble in liquid (HT-LMIL) as 3D miniaturized reactor for real-time bio-/chemical assays", *Chemical Engineering Journal* 443, (2022): 136417.
- [19] Yao, Guansheng, Jinliang Xu, Yijun Feng, Lin Wang, and Guohua Liu. "Solar-driven interfacial evaporation of a hanging liquid marble", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 234, (2022): pp. 111430.
- [20] Arbatan, Tina, Lizi Li, Junfei Tian, and Wei Shen. "Liquid marbles as micro-bioreactors for rapid blood typing", *Advanced healthcare materials* 1, no.1, (2012): 80-83.
- [21] Arbatan, Tina, Lizi Li, Junfei Tian, and Wei Shen. Microreactors: "Liquid Marbles as Micro-bioreactors for Rapid Blood Typing" (*Adv. Healthcare Mater.* 1/2012), *Advanced healthcare materials* 1, no. 1, (2012): 78-79.
- [22] Sarvi, Fatemeh, Kanika Jain, Tina Arbatan, Paul J Verma, Kerry Hourigan, Mark C Thompson, Wei Shen, and Peggy PY Chan. "Cardiogenesis of embryonic stem cells with liquid marble micro-bioreactor", *Advanced healthcare materials* 4, no.1, (2015): 77-86.
- [23] Bormashenko, Edward, Roman Pogreb, Revital Balter, Hadas Aharoni, Yelena Bormashenko, Roman Grynyov, Leonid Mashkevych, Doron Aurbach, and Oleg Gendelman. "Elastic properties of liquid marbles", *Colloid and Polymer Science* 293, no. 8, (2015): 2157- 2164
- [24] Bormashenko, Edward, Roman Pogreb, Albina Musin, Revital Balter, Gene Whyman, and Doron Aurbach. "Interfacial and conductive properties of liquid marbles coated with carbon black", *Powder Technology* 203, no. 3, (2010): 529-533.
- [25] McHale, Glen, DL Herbertson, SJ Elliott, NJ Shirtcliffe, and MI Newton. Electrowetting of nonwetting liquids and liquid marbles, *Langmuir* 23, no. 2, (2007): 918-924.
- [26] Liu, Zhou, Xiangyu Fu, Bernard P Binks, and Ho Cheung Shum. "Coalescence of electrically charged liquid marbles", *Soft Matter* 13, no. 1, (2017): 119-124.
- [27] Zhao, Yan, Zhiguang Xu, Haitao Niu, Xungai Wang, and Tong Lin. "Magnetic liquid marbles: Toward "lab in a droplet" ", *Advanced Functional Materials* 25, no. 3, (2015): 437-444.
- [28] Bormashenko, Edward, Revital Balter, and Doron Aurbach. "Micropump based on liquid marbles", *Applied Physics Letters* 97, no. 9, (2010): 091908.

- [29] J. Jin, C.H. Ooi, K.R. Sreejith, J. Zhang, A.V. Nguyen, G.M. Evans, D.V. Dao, N.-T. Nguyen, "Accurate dielectrophoretic positioning of a floating liquid marble with a two-electrode configuration", *Microfluidics and Nanofluidics* 23, no. 7, (2019): 85.
- [30] Jin, Jing, Kamalalayam Rajan Sreejith, Chin Hong Ooi, Dzung Viet Dao, and Nam-Trung Nguyen. "Critical trapping conditions for floating liquid marbles", *Physical Review Applied* 13, no. 1, (2020): 014002.
- [31] Jin, Jing, Chin Hong Ooi, Kamalalayam Rajan Sreejith, Jun Zhang, Anh V Nguyen, Geoffrey M Evans, Dzung Viet Dao, and Nam-Trung Nguyen. "Dielectrophoretic trapping of a floating liquid marble", *Physical Review Applied* 11, no. 4, (2019): 044059.
- [32] Poorreza, Elnaz, Reza Hadjiaghaie Vafaie, Mahnaz Mehdipoor, Adel Pourmand, and Habib Badri Ghavifekr. "Microseparator based-on 4-phase travelling wave dielectrophoresis for lab-on-a-chip applications", *Indian journal of pure and applied physics* 51, no. 7, (2013): 506-515.
- [33] Nam-Trung Nguyen. "Deformation of ferrofluid marbles in the presence of a permanent magnet", *Langmuir* 29, no. 45, (2013): 13982-13989.
- [34] Ghanbari, Mina, and Ghader Rezazadeh. "A liquid-state high sensitive accelerometer based on a micro-scale liquid marble", *Microsystem Technologies* 26, no. 2, (2020): 617-623.
- [35] Ooi, Chin Hong, and Nam-Trung Nguyen. "Manipulation of liquid marbles", *Microfluidics and Nanofluidics* 19, no. 3, (2015): 483-495.
- [36] Yang, Zhaochu, Einar Halvorsen, and Tao Dong. "Power generation from conductive droplet sliding on electret film", *Applied Physics Letters* 100, no. 21, (2012): 213905.
- [37] Zeng, H, and Y Zhao. "Dynamic behavior of a liquid marble based accelerometer", *Applied Physics Letters* 96, no. 11, (2010): 114104.
- [38] Mahadevan, L, and Yves Pomeau. "Rolling droplets", *Physics of Fluids* 11, no. 9, (1999): 2449-2453.
- [39] Feng, Yijun, Guansheng Yao, Jinliang Xu, Lin Wang, and Guohua Liu. "Effect of surface roughness on the solar evaporation of liquid marbles," *Journal of Colloid and Interface Science* 629, (2023): 644-653,
- [40] Lekshmi, Bindhu Sunilkumar, and Subramanyan Namboodiri Varanakkottu. Janus liquid marbles: "Fabrication techniques, recent developments, and applications", *Droplet*, (2023): e44.