



Semnan University



Research Article

A Practical Study of the Movement of a Magnetic Liquid Marble and Modeling and Simulation of an Accelerometer-Based on a Liquid Marble Using the Finite Element Method

Reza Haji AghaieVafaie^{a,*} , Elnaz Poorreza^a

^a Faculty of Electrical Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2023-10-05

Revised: 2024-07-01

Accepted: 2024-08-21

Keywords:

Digital microfluidic;
Surface tension;
Magnetic liquid marble;
Liquid marble-based
accelerometer;
Finite elements;
Magnetic force.

ABSTRACT

A liquid marble is a droplet that is surrounded by hydrophobic micro or nano-sized nanoparticles. By using these marbles, the challenges and problems related to droplets are solved. These liquid marbles are very responsive to external magnetic force when using a magnetic coating around the inner droplet or using magnetic contents. In this research, first in the experimental part, the transfer of a magnetic liquid marble is carried out under the influence of the magnetic field of a permanent rectangular magnet. In the next step, in the simulation section, by modeling the magnetic liquid marble by a droplet with an elastic shell, the effect of gravity in the movement of the marble downwards on a curved ramp is done with the finite element method. This liquid marble is used on a ramp as a liquid marble-based accelerometer. In the following, the profiles of total displacement and stress, speed and acceleration of this accelerometer are extracted.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.31992.2541>

© 2025 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:

hadjiaghaie vafaie, R. and poorreza, E. (2025). A practical study of the movement of a magnetic liquid marble and modeling and simulation of an accelerometer-based on a liquid marble using the finite element method.. Journal of Modeling in Engineering, 23(80), 159-174. doi: 10.22075/jme.2024.31992.2541

مطالعه عملی تحریک یک تپله مایع مغناطیسی و مدل سازی و شبیه سازی یک شتاب سنج بر پایه تپله مایع با استفاده از روش المان محدود

رضا حاجی آقائی وفائی^{۱*}، الناز پوررضا^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۱۳	تپله مایع قطره‌ای است که با نانوذرات در سایز میکرو یا نانوی آگریز، محصور می‌شود. با به کارگیری این تپله‌ها، چالش‌ها و مشکلات مربوط به قطره حل می‌گردد. این تپله‌های مایع در هنگام استفاده از پوشش مغناطیسی در اطراف قطره درونی یا استفاده از محتویات مغناطیسی، واکنش زیادی به نیروی مغناطیسی خارجی نشان می‌دهند. در این تحقیق ابتدا در بخش تجربی، انتقال تپله مایع مغناطیسی تحت تأثیر میدان مغناطیسی یک آهنربای مستطیلی دائمی انجام می‌شود. در مرحله بعد، در بخش شبیه‌سازی، با مدل سازی تپله مایع مغناطیسی توسط یک قطره با پوسته الاستیک، اثر گرانش در حرکت تپله به سمت پایین یک سطح شیب‌دار خمیده با روش اجزای محدود انجام می‌گردد. از این تپله مایع بر روی سطح شیب‌دار به عنوان یک شتاب‌سنج بر پایه تپله مایع استفاده می‌شود. در ادامه، نمودارهای جابجایی کل و استرس، سرعت و شتاب این شتاب‌سنج استخراج می‌گردد.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۱۱	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۳۱	
واژگان کلیدی:	
ریز سیال قطره‌ای، کشش سطحی، تپله مایع مغناطیسی، شتاب‌سنج بر پایه تپله مایع، اجزا محدود، نیروی مغناطیسی.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.31992.2541>

© 2025 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

تحلیلی و مولکولی است [۷، ۸]. در ریزسیال گسسته، حرکت یک قطره مایع روی سطح به دلیل نیروی اصطکاک و هیستریسیس^۵ زاویه تماس^۶ یک مشکل جدی است. تبخیر قطره و تلفات دنباله^۷ منجر به کاهش حجم قطرات مایع می‌شود [۹].

برای رفع این کاستی ها راه حل های مختلفی ارائه شده است. مهندسی بستر حامل قطره و خود قطرات مایع در راستای هدف ضد خیس شدن گسترش یافته است [۶]. تپله های مایع قطرات کوچکی هستند که توسط لایه‌ای از ذرات میکرو یا نانو پوشیده شده‌اند. این لایه یک پوشش محافظ روی بسترهای مایع یا جامد ایجاد می‌کند

علم ریزسیالات^۲ به عنوان یک فناوری پشتیبان در برنامه های کاربردی آزمایشگاه روی یک تراشه^۳ در نظر گرفته شده است [۱-۵]. فناوری ریزسیال گسسته^۴، یک زمینه جالب پژوهشی است که با دستکاری قطرات منفرد به جای جریان مایع در ریزسیال مبتنی بر کانال سروکار دارد [۶]. ریزسیال گسسته مبتنی بر قطره و ریزسیال های گسسته مبتنی بر تپله مایع دو دسته از ریزسیال های گسسته می باشند [۶]. هدف از ریزسیالات مبتنی بر قطره، مدیریت و دستکاری حجم های کوچک مایعات در کاربردهای مختلف مانند بیوتکنولوژی، زیست شناسی

³ Lab-on-a-chip

⁴ Digital microfluidic

⁵ Hysteresis

⁶ Contact angle

⁷ Trail

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

۱. دانشکده مهندسی برق، دانشگاه بناب، بناب، ایران

² Microfluidic

استناد به این مقاله:

حاجی آقائی وفائی، رضا و پوررضا، الناز. (۱۴۰۴). مطالعه عملی تحریک یک تپله مایع مغناطیسی و مدل سازی و شبیه سازی یک شتاب سنج بر پایه تپله مایع با استفاده از روش المان محدود. مدل سازی در مهندسی، ۲۳(۸۰)، ۱۷۴-۱۵۹. doi: 10.22075/jme.2024.31992.2541

گرانشی، الکترواستاتیکی و مغناطیسی به دست آورد [۱۹، ۲۲، ۳۴]. یکی از ساده‌ترین روش‌ها برای به حرکت درآوردن تیله مایع، غلتاندن آن بر روی یک بستر شیبدار تحت تأثیر گرانش است. در این روش، اگر نیروی اصطکاک بین بستر جامد و تیله مایع نادیده گرفته شود، انرژی پتانسیل گرانشی به انرژی جنبشی آن تبدیل می‌شود [۶]. تیله مایع برای حرکت بالا و پایین با روش الکتروویتنگ روی دی‌الکتریک^{۱۳} توسط گروه مک هیل^{۱۴} و نیوتن^{۱۵} استفاده شده است [۲۲]. اخیراً نیروی دی‌الکتروفورز^{۱۶}، تولید شده در یک میدان الکتریکی غیریکنواخت [۳۵، ۳۶]، برای تحریک و به حرکت درآوردن یک تیله مایع شناور بر روی سطح آب استفاده شده است [۶]. تیله های مایع در ریزسیال‌ها، میکروپمپ‌ها، میکرومیکسرها، حسگر گاز، زمینه ژنتیکی، فرآیند بیولوژیکی، فناوری نانو، آزمایشگاه روی دستگاه‌های تراشه کاربرد دارند [۳۷، ۳۸]. تحقیقات و کارهای عملی در مورد خاصیت ارتجاعی تیله مایع در سالهای اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [۱۲]. نانوذرات کلئیدی چندلایه پوشاننده تیله را می‌توان با یک پوسته الاستیک نشان داد [۱۲]. خاصیت ارتجاعی این پوسته پودری به دلیل برهمکنش موینگی بین ذرات کلئیدی است و استحکام و بقای تیله مایع را تعیین می‌کند [۱۲].

یک تیله مایع را می‌توان با استفاده از نیروهای مختلف خارجی دستکاری کرد. این روشهای دستکاری در تعدادی از مقالات مروری اخیر گزارش شده است. یک تیله مایع را می‌توان از طریق نیروالکترواستاتیک، نیروی مغناطیسی، نیروی گرانشی، گرادیان فشار و طرح‌های شیمیایی آن فعال کرد. بنابراین، دستکاری تیله مایع به طور بالقوه برای ریزسیالات قطره ای مفید است. ریزسیالات قطره ای در مقایسه با ریزسیال‌های مبتنی بر میکروکانال، دستکاری قطرات گسسته بدون محصور شدن در یک کانال بسته به انعطاف پذیری زیاد و کاربرد همه کاره اجازه می‌دهد.

تیله های مایع مغناطیسی با پوسته ذرات مغناطیسی، می‌توانند توسط نیروی مغناطیسی بیرونی فعال شوند. در سال‌های اخیر، نانوذرات مغناطیسی به دلیل زیست سازگاری به طور گسترده در کاربردهای مختلفی مانند

[۱۰-۱۸]. این قطرات فوق آبریز که به عنوان جامدات نرم قوی عمل می‌کنند، بهترین نامزد برای غلبه بر مشکلات قطرات برهنه می‌باشند [۱۳]. با پوشاندن قطرات مایع با نانوذرات و تبدیل یک بستر مایع روی جامد به بستر جامد روی جامد، تبخیر، از دست دادن دنباله و مشکلات پسماند زاویه تماس برطرف می‌گردد [۱۹-۲۲]. همانطور که گفته شد، تیله مایع با زاویه تماس نزدیک به ۱۸۰، به عنوان جایگزینی برای قطرات مایع در سطح فوق آبریز عمل می‌کند. از زمان اولین گزارش آنها در سال ۲۰۰۱ توسط آسیلوس^۸ و کور^۹، تیله‌های مایع به دلیل خواص منحصر به فرد و جالبشان موضوع اکثر مطالعات شده‌اند [۲۳]. تیله های مایع به دلیل خاصیت خیس نشدن فعال شده توسط بالشتک‌های^{۱۰} هوا بین ذرات چند لایه و بستر حامل، یک جایگاه جایگزین برای آبریز بودن را نشان می‌دهند (شکل ۱ الف). تیله های مایع اصطکاک کمی را روی سطوح حامل مختلف نشان می‌دهند. این ویژگی به تیله های مایع اجازه می‌دهد تا به راحتی در سطوح جامد و حتی مایع بدون نشستن مایع حرکت کنند [۶]. با استفاده از حداقل مقدار انرژی، تیله مایع را می‌توان بدون آلودگی بستر حمل کرد. آنها را می‌توان با استفاده از طیف گسترده ای از پودرها مانند گرافیت، نانوذرات سیلیس، لیکوپودیم^{۱۱}، پلی اتیلن، مس آبریزشده و غیره در حجم‌های مختلف تشکیل داد و به دست آورد [۲۴، ۲۵].

تیله مایع با خاصیت ارتجاعی مانند یک جامد نرم رفتار می‌کند و می‌توان آن را با انبرک^{۱۲} کنترل کرد [۱۲، ۲۶]. به دلیل استحکام مکانیکی و خاصیت ارتجاعی پوسته پودری، تیله مایع برای کاربردهای شیمیایی و بیولوژیکی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۷]. یکی از امیدوارکننده ترین کاربردهای تیله مایع در زمینه بیوراکتورها است [۲۸-۳۱]. از آنجایی که پوسته پودری تیله مایع متخلخل است، به سکوی جالبی برای کشت سلول‌ها تبدیل شده است [۳۰، ۳۲]. یک تیله مایع بزرگتر می‌تواند با افزودن مستقیم مایع به مایع هسته یا با ادغام دو تیله مایع کوچکتر تشکیل شود [۱۴، ۳۳]. ویژگی ادغام تیله های مایع در یکدیگر، آنها را قادر می‌سازد تا به عنوان یک مخلوط گر عمل کنند [۳۳]. حمل و نقل تیله مایع را می‌توان به طور موثر با نیروی

¹³ Electrowetting on dielectric

¹⁴ Mchale

¹⁵ Newton

¹⁶ Dielectrophoresis

⁸ Aussillous

⁹ Quéré

¹⁰ Cushions

¹¹ Lycopodium

¹² Tweezer

کار پیشین سنتز شدند [۴۰] و برای آبرگریزی بیشتر از موم پارافین استفاده شد. در قسمت اول کار، در بخش عملی، انتقال تیله مایع تحت اثر نیروی مغناطیسی خارجی یک آهنربای دائم، انجام می‌شود. در بخش دوم، مدل‌سازی و شبیه‌سازی حرکت تیله مایع بر روی سطح شیبدار، با روش اجزاء محدود²¹ مورد بررسی قرار گرفته است. این شبیه‌سازی، اساس حرکت یک تیله مایع بر سطح خمیده یک شتاب‌سنج بر پایه تیله مایع می‌باشد. نمودارهای جابجایی تیله، استرس، سرعت و شتاب استخراج می‌گردد. تا جایی که ما می‌دانیم، مدل‌سازی و شبیه‌سازی حرکت تیله مایع تحت تاثیر نیروی مغناطیسی، قبلاً گزارش نشده است. در مقایسه با مطالعات تجربی تیله مایع، توجه کمی به تحلیل عددی و شبیه‌سازی آنها شده است.

۲- مکانیزم تشکیل تیله مایع

همانگونه که قبلاً گفته شد، یک تیله مایع از غلتیدن یک قطره مایع با استفاده از یک میکرو پیپت بر روی بستری از نانو ذرات و اتصال خود به خودی ذرات بر سطح مایع بوجود می‌آید. در شکل (۱-الف) چگونگی اتصال خود به خودی نانو ذرات بر سطح مایع نشان داده شده است. در شکل (۱-ب) قطره مایع قرار داده شده بر روی بستری از نانو ذرات نشان داده شده است. در شکل (۱-ج) و (۱-د) تیله مایع تشکیل شده نهایی و نمای نزدیک از سطح تیله مایع نشان داده شده است. در مفهوم تشکیل تیله مایع و پایداری مکانیکی آن بر مفهوم حداقل انرژی سطح کلی استوار می‌باشد وقتی نانو ذرات آبرگریز کلوئیدی روی سطح قطرات مایع چسبند [۱۶، ۱۷]. چسبندگی ذرات روی سطح قطرات، سطح هوا/جامد را به میزان $2\pi r^2(1+\cos\theta_e)$ تغییر می‌دهد، در این معادله r شعاع ذرات کروی و θ_e زاویه تماس تعادل است (قانون یانگ). نواحی $2\pi r^2(1+\cos\theta_e)$ و $\pi r^2(\sin^2\theta_e)$ به ترتیب تغییرات در نواحی سطحی مایع/جامد و هوا/مایع می‌باشند [۴۱].

$$\Delta F = 2\pi r^2(1 + \cos\theta_e)(\gamma_{sl} - \gamma_{sv}) - \pi r^2 \sin^2\theta_e \gamma_{lv} \quad (1)$$

که γ_{sl} ، γ_{sv} و γ_{lv} به ترتیب کشش سطحی سه فاز جامد-مایع، جامد-بخار و مایع-بخار هستند.

طبق قانون یانگ $\gamma_{sv} - \gamma_{sl} = \gamma_{lv} \cos\theta_e$ معادله (۱)

زیست پزشکی مورد استفاده قرار گرفته اند. با غلتاندن یک قطره مایع روی بستر نانو ذرات مغناطیسی مانند Fe_3O_4 ، تیله های مایع مغناطیسی تشکیل می‌شوند. نیروی مغناطیسی به عنوان یک روش ساده برای تحریک تیله مایع و نیروی نسبتاً دور، می‌تواند بدون نیاز به تماس فیزیکی به طور موثر عمل کند [۳۹]. اگر پوسته تیله مایع از مواد مغناطیسی مانند اکسید آهن تشکیل شده باشد و یا دارای یک مایع مغناطیسی درونی باشد (فروسپالات)، می‌توان از نیروی مغناطیس برای تحریک آن استفاده کرد [۳۹]. پوسته مغناطیسی آنها می‌تواند به طور برگشت پذیر با نیروی مغناطیسی باز و بسته شود. این ویژگی تیله مایع پتانسیل بالایی برای استفاده در کاربردهای مرتبط با دارورسانی، بیوشیمیایی و بیوپزشکی دارد.

یک حسگر الکترومکانیکی که نیروهای شتاب‌دهنده را اندازه گیری می‌کند شتاب‌سنج نامیده می‌شود. این نیروها ممکن است دینامیک باشند که ناشی از لرزش یا حرکت شتاب‌سنج باشند و یا ایستا باشند مانند نیروی گرانش ثابت. یک شتاب‌سنج از نظر مفهومی مانند یک توده میرایی^{۱۷} روی فنر^{۱۸} رفتار می‌کند. زمانی که شتاب‌سنج در معرض یک میدان شتاب قرار می‌گیرد، جرم جابجا می‌شود و شتاب با اندازه گیری جابجایی جرم سنجیده می‌شود. بسیاری از انواع کلاسیک شتاب‌سنج‌ها در گذشته توسعه و گزارش شده‌اند. اگرچه شتاب‌سنج‌های حالت جامد موثر هستند و در مقایسه با شتاب‌سنج‌های حالت مایع حساسیت بالاتری را ارائه می‌دهند، اما، مونتاز، ساخت و بسته بندی این شتاب‌سنج‌ها پیچیده تر می‌باشند. برای غلبه بر این پیچیدگی‌ها محققان مطالعه در مورد شتاب‌سنج‌های حالت مایع را آغاز کرده‌اند. از مشهورترین این محققین می‌توان به زاو^{۱۹} و زنگ^{۲۰} اشاره کرد [۴۰].

مقاله ما به مطالعه تجربی و شبیه‌سازی تحریک تیله مایع مغناطیسی با یک میدان مغناطیسی خارجی ارائه شده توسط یک آهنربای دائمی اختصاص دارد. استفاده از میدان مغناطیسی به دلیل سادگی، در دسترس بودن و زیست سازگاری، محبوب ترین روش برای دستکاری تیله مایع است. تیله مایع ما از نانو ذرات پودری اکسید آهن مغناطیسی یا مگنتیت تشکیل شده است. نانو ذرات مغناطیسی فوق آبرگریز $Fe_3O_4@Isoleucine$ مطابق با

²⁰ Zeng

²¹ Finite element method

¹⁷ Damped mass

¹⁸ Spring

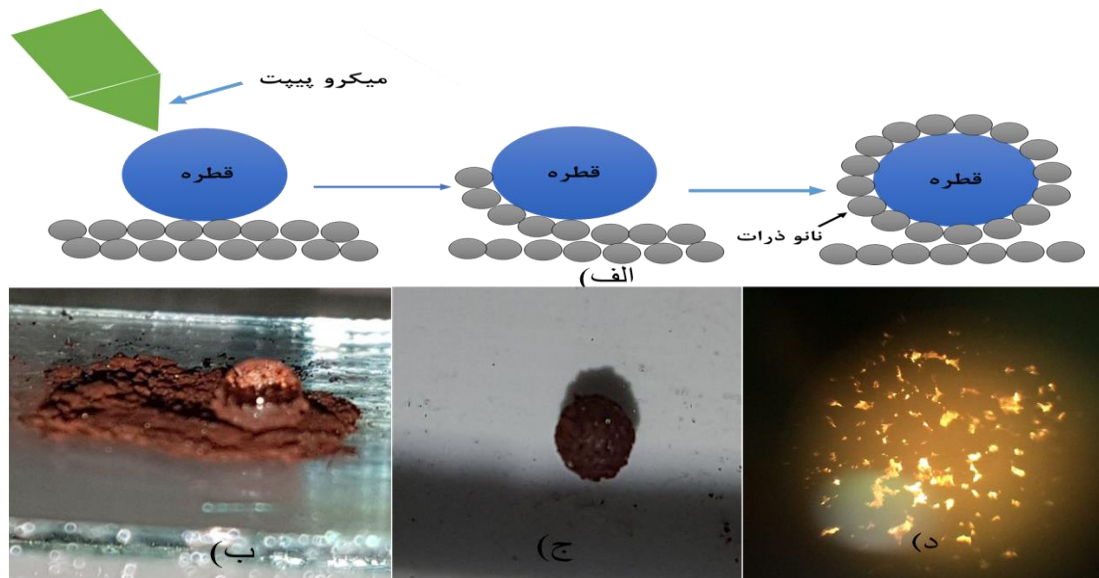
¹⁹ Zhao

همیشه منفی است، اتصال ذرات بر روی سطح مایع، قطره مایع را تثبیت می کند و قطره مایع را به یک جامد نرم تبدیل می کند [۴۱].

می تواند با معادله (۲) جایگزین شود:

$$\Delta F = -\gamma\pi r^2(1 + \cos\theta_e)^2 \quad (2)$$

با توجه به معادله (۲)، از آنجایی که مقدار تغییرخالص



شکل ۱- الف) چگونگی اتصال نانو ذرات بر قطره آب وقتی که بر روی بستری از نانو ذرات غلت داده می شود (ب) قطره مایع قرار داده شده بر روی بستری از نانو ذرات (ج) تپله مایع تشکیل شده نهایی (د) نمای نزدیک از تپله مایع

برای بسیاری از مایعات عدد موینگی در حدود ۲ میلی متر در نظر گرفته می شود که این مقدار برای آب مطابق با گزارشات محققین ۲/۷ میلی متر می باشد. در رابطه زیر عدد باند بدین صورت تعریف می گردد [۴۱]:

$$B_0 = \frac{\rho g R^2}{\gamma} \quad (3)$$

در معادله بالا، γ کشش سطحی مایع درونی تپله، ρ چگالی مایع درونی تپله، g گرانش زمین، R شعاع تپله مایع می باشند. مطابق شکل (۲) وقتی تپله مایع کوچک است و مطابق شکل (۲)، ابعاد آن یعنی قطر سطح تماس d کمتر از طول موینگی می باشد، ($d < L_c$) نیروی کشش سطحی نیروی غالب بوده و تقریباً کروی شکل می باشد. زمانی که شعاع تپله و در نتیجه حجم آن بزرگتر می گردد ($d > L_c$)، نیروی گرانشی زمین نیروی غالب بوده و تپله بر سطح گسترده شده و خمیر مانند دیده می شود. عدد باند که یک عدد بدون بعد می باشد، از طول موینگی استخراج می شود. این عدد برای تپله های کوچک $B_0 < 1$ و برای تپله

۳- مقایسه بین اشکل مختلف تپله مایع

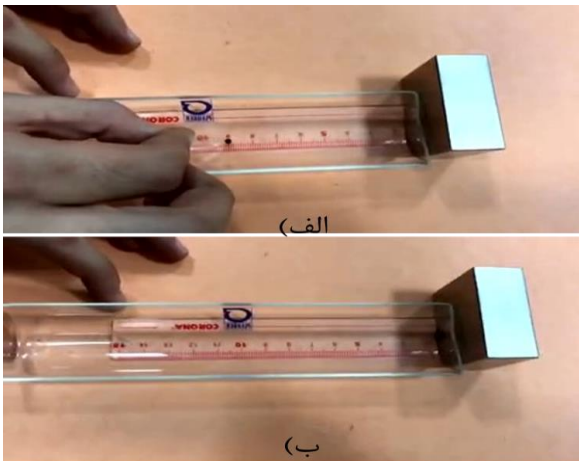
نحوه مرطوب کردن سطوح جامد توسط مایعات برای طیف وسیعی از کاربردها همانند ایجاد لایه های نازک بر روی ویفرهای نیمه هادی، از طریق چسبندگی و پوشش سطوح، اهمیت اساسی دارد. بر اساس نظریه حداقل انرژی سطح و قانون کلی دینامیک حرارت، اگر یک قطره مایع قابلیت حرکت آزادانه داشته باشد، باید در جهت کم کردن ناحیه سطح آن باشد. در تعیین شکل کلی مایع طول موینگی^{۲۲} و عدد باند^{۲۳} دو عامل و فاکتور تعیین کننده می باشد. شکل و مورفولوژی این تپله های مایع از متعادل قرار دادن بین دو نیروی گرانش زمین و کشش سطحی حاصل می گردد. بسته به اینکه کدام یک از این دو نیرو بر دیگری خواهد چربید، شکل تپله مایع مشخص می گردد. تپله های مایع با ابعاد و حجم کوچک تقریباً کروی شکل بوده و نیروی غالب و عملگر در آن کشش سطحی و در تپله های مایع با ابعاد بزرگ و حجم بالا، حالت خمیری^{۲۴} و بیضوی شکل داشته و نیروی گرانش زمین نیروی تعیین کننده می باشد.

²⁴ Puddle

²² Capillary length

²³ Bond number

ربات مینیاتوری در جایگاه یک ریزسیال قطره ای نشان می‌دهد. این آزمایش را با حجم‌های مختلف تیله انجام دادیم و به این نتیجه رسیدیم که با افزایش تیله مایع، حرکت آن به سمت آهنربا با سرعت کمتری اتفاق می‌افتد. زیرا با بزرگتر شدن شعاع تیله، بیشتر بر سطح تماس گسترده تر می‌گردد و در نتیجه شکل تیله مایع از حالت کروی به سمت حالت بیضوی تغییر می‌کند. حرکت این تیله مایع مغناطیسی نه تنها بر سطح صاف بلکه بر روی سطح خمیده نیز امکانپذیر می‌باشد. همین قضیه امکان تولید سیستم‌های ریز سیالات پیچیده را فراهم می‌کند. پوشش نانویی این تیله مایع قابلیت این را دارد که تحت تاثیر نیروی مغناطیسی باز و بسته شود. در این حالت می‌تواند به عنوان یک بیو راکتور در کاربردهایی نظیر کشت سلولی، پزشکی و غیره مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۳- عکس حرکت تیله مایع به سمت آهنربا

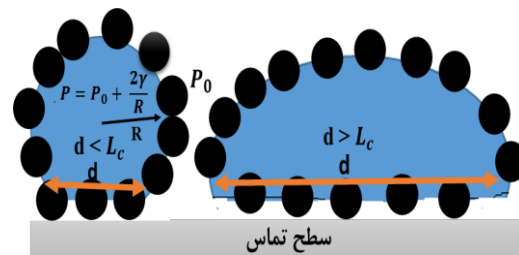
۲-۴- مدل‌سازی و شبیه‌سازی

برای تجزیه و تحلیل بیشتر تغییر شکل تیله مایع مغناطیسی تحت تاثیر میدان جاذبه، به مدل‌سازی و شبیه‌سازی این مکانیزم با استفاده از روش المان محدود، می‌پردازیم. مطابق شکل (۴)، تیله مایع مغناطیسی با دو دایره هم مرکز که دایره درونی نمایانگر قطره آب و پوسته کشسان اطراف آن نمایانگر نانو ذرات می‌باشند مدل‌سازی شده است. در مدل شبیه‌سازی شده، شعاع قطره را در حدود ۱ تا ۱/۵ میلی‌متر و ضخامت پوسته نانو ذرات را $d = 30e^{-8}$ فرض نموده 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 گرفته شده است [۳۹].

های بزرگ $B_0 > 1$ در نظر گرفته می‌شود. فشار در بیرون و در داخل تیله مایع بر اساس قانون لاپلاس به صورت زیر تعریف می‌گردد [۴۲]:

$$P = P_0 + \frac{2\gamma}{R} \quad (۴)$$

که P_0 فشار اتمسفریک و P فشار در درون تیله در نظر گرفته می‌شود [۳۴].



شکل ۲- شکل شماتیک از مقایسه شکل بین تیله مایع بزرگ و کوچک و نیروهای موجود

۴- بحث و نتایج

۴-۱- حرکت تیله مایع ساخته شده به سمت آهنربا

تحت تاثیر میدان مغناطیسی

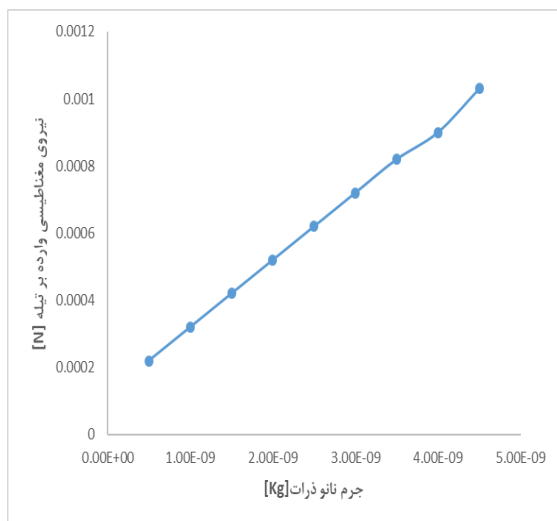
مطابق شکل (۳)، در حضور یک آهنربای دائمی، برای به حرکت درآوردن تیله مایع ساکن، نیروی مغناطیسی بر نیروی اصطکاک غلبه کرده و تیله مایع را برای انتقال در جهت افقی تغییر شکل می‌دهد. شکل (۳) آرایش آزمایشی تحریک مغناطیسی و جابجایی یک تیله مایع با حجم μL ۱۷ و شعاع در حدود ۱ میلی‌متر را بر روی یک سطح شیشه‌ای نشان می‌دهد. سنتز نانوذرات اکسید آهن برای ساخت تیله، مطابق با پژوهش پیشین انجام شده است [۴۳]. همانطور که در شکل نشان داده شده است، با استفاده از یک لایه نازک از یک نوار چسب بر روی یک خط کش، به تدریج تیله مایع مغناطیسی خود را روی سطح شیشه‌ای به سمت آهنربا حرکت دادیم. آهنربا در طرف مقابل صفحه شیشه‌ای ثابت قرار گرفته است. با استفاده از یک خط کش زیر شیشه، مقدار دقیق حرکت تیله مایع مغناطیسی ما تعیین شد. همانطور که در شکل نشان داده شده است، وقتی تیله مایع حدود ۳ سانتی‌متر از آهنربا فاصله داشت، شروع به حرکت به سمت آهنربا کرد. در شکل (۳-ب)، ادغام و متلاشی شدن تیله مایع با آهنربا، زمانی که با سرعت زیاد به آن برخورد می‌کند، نشان داده شده است. تیله مایع مغناطیسی آماده شده، کاربرد بالقوه خود را به عنوان یک

مایع مغناطیسی تغییر می کند. به این پدیده، مگنتووتینگ^{۲۵} گفته می شود. در درون نانو ذرات، همانهای مغناطیسی موجود می باشد. هر ممان مغناطیسی درون نانو ذرات، در درون حوزه مغناطیسی در جهت های مختلفی قرار می گیرد. این نواحی وقتی که در معرض میدان مغناطیسی خارجی غیر یکنواخت قرار داده شود، همگی همسو با هم قرار می گیرند. در نتیجه این همسویی، یک نیروی مغناطیسی که هم جهت با گرادیان میدان مغناطیسی می باشد تشکیل می گردد. نیروی مغناطیسی وارد شده بر نانو ذرات از رابطه زیر محاسبه می گردد [۴۱]:

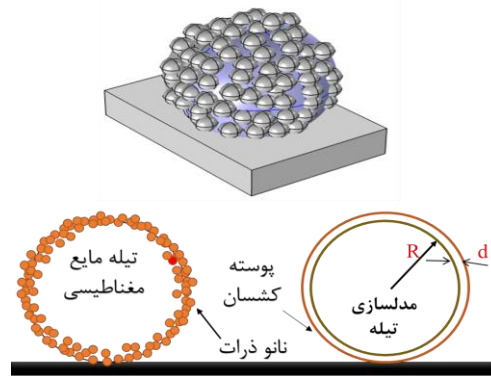
$$F_{mag} = \frac{V\Delta\chi}{\mu_0} (\nabla B) B \quad (5)$$

در معادله بالا، V نشانگر حجم نانو ذرات، $\Delta\chi$ نشانگر یک عدد بدون بعد می باشد که تفاوت پذیرفتاری^{۲۶} بین نانو ذره و محیط اطراف آن نانو ذرات می باشد. $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ و چگالی میدان مغناطیسی و گرادیان میدان مغناطیسی می باشند.

در شکل (۵) شبیه سازی نیروی اعمالی بر تیله مایع از طرف میدان مغناطیسی آهنربا بر حسب افزایش جرم نانوذرات نشان داده شده است. همانطور که در شکل نشان داده شده، با افزایش جرم نانو ذرات احاطه کننده تیله، نیروی وارده افزایش می یابد. لازم به ذکر است که اندازه تقریبی نانو ذرات بر حسب کیلوگرم از مقالات برگرفته شده است [۴۱].



شکل ۵- شبیه سازی نیروی اعمالی بر تیله مایع از طرف میدان مغناطیسی آهنربا بر حسب افزایش جرم نانوذرات



شکل ۴- مدلسازی تیله مایع با یک قطره ای که یک پوسته کشسان در اطراف هسته خود دارد.

برای ایجاد درک عمیق تر از حرکت و تغییر شکل تیله مایع روی سطح منحنی، مدل سازی و شبیه سازی پروسه حرکت تیله مایع با استفاده از روش المان محدود انجام شده است. ویژگی های ساده و راحت روش اجزای محدود برای تحلیل و بهینه سازی ساختارهای توپولوژیکی پیچیده مانند تیله مایع بسیار مناسب می باشد. همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است، تیله مایع مغناطیسی با دو دایره هم مرکز که دایره کوچک نشان دهنده یک قطره آب مایع بوده و پوسته الاستیک در اطراف قطره آب که نشان دهنده نانوذرات کلئیدی مغناطیسی است، مدل سازی شده است. در این مدل و تقریب ارائه شده، شعاع قطره تقریباً (R) بر اساس شعاع قطره واقعی در نظر گرفته شده و با توجه به محدودیت های نرم افزاری بر روی لایه حداقل ضخامت، ضخامت لایه مغناطیسی به ترتیب ۳۰۰ نانو در نظر گرفته شده است. خواص آب مانند چگالی در شبیه سازی های زیر تعریف و اضافه می شود. همانطور که قبلاً ذکر شد تیله به عنوان یک جامد نرم عمل می کند. با توجه به این واقعیت، تأثیر مایع داخلی تیله بر روی لایه نادیده گرفته می شود. اصطکاک مایع به پوسته الاستیک و جریان مایع در داخل تیله قابل اغماض می باشد. سپس، مدول یانگ تقریباً $E = 3 \times 10^3$ Pa و نسبت پواسون $\nu = 0.35$ را برای پوسته الاستیک در نظر می گیریم [۳۹]. طبق پژوهش های قبلی ما، مقدار مدول یانگ محاسبه شد و به خوبی با کار گروهی بورماشنکو مطابقت دارد.

۴-۲-۱- شبیه سازی نیروی اعمالی بر تیله مایع مغناطیسی از طرف میدان مغناطیسی آهنربا
تحت تاثیر میدان مغناطیسی، شکل و زاویه تماس یک تیله

²⁶ Susceptibility

²⁵ Magnetowetting

۴-۲-۲- شبیه‌سازی گرانشی یک شتاب‌سنج بر پایه

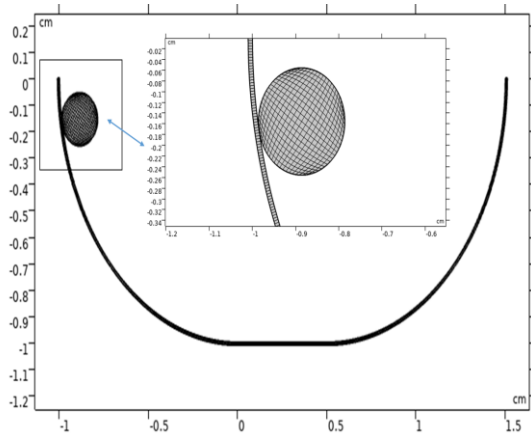
تیله مایع

یکی از ساده‌ترین و کاربردی‌ترین روشهای تحریک و دستکاری به منظور حرکت یک تیله مایع، تحریک با استفاده از نیروی گرانشی زمین می‌باشد. با استفاده از یک سطح کج و شیبدار می‌توان باعث غلتیدن تیله مایع به سمت پایین گردید. در این پروسه حرکتی، انرژی پتانسیل ذخیره شده بر تیله، تبدیل به انرژی جنبشی می‌گردد. به شرطی که از نیروی اصطکاک بین تیله و سطح چشمپوشی شود. در اصل همین تبدیل انرژی، نیروی تحریک کننده حرکت تیله به سمت پایین می‌باشد. گروه آسیلوس بر حرکت تیله بر سطح خمیده مطالعه و رفتار تیله را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۱]. گروه یانگ بر امکان تولید الکتریسته از حرکت تیله مایع بر الکترودهای مورب مطالعه کردند [۴۴].

همانطور که در بالا ذکر شد، با توجه به مزیت شتاب‌سنج‌های حالت مایع، به‌ویژه شتاب‌سنج‌های مبتنی بر تیله مایع، در این مطالعه، رفتار شتاب‌سنج مبتنی بر تیله مایع بررسی می‌شود. شتاب‌سنج به‌عنوان وسیله‌ای برای اندازه‌گیری شتاب کل، از یک تیله مایع به‌عنوان یک جرم ثابت که روی یک سطح منحنی نشسته است، تشکیل شده است. تیله مایع تحت نیروی گرانش شروع به غلتیدن می‌کند. این نیرو تیله مایع را پس از طی مسیر بستر، به موقعیت اول باز می‌گرداند. با توجه به اینکه تیله دارای ناحیه تماس به شکل خمیده است، ممکن است به مقادیر بسیار پایین شتاب حساس نباشد. برای غلبه بر حساسیت کم شتاب‌سنج‌های مبتنی بر تیله مایع، ناحیه تماس باید تا جایی که به صفر می‌رسد کاهش یابد [۴۲]. همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است، یک تیله مایع در بالای یک بستر منحنی مدل‌سازی شده و اجازه داده شده تا از یک بستر منحنی با ارتفاع کم به سمت پایین بغلتد. ضریب اصطکاک ساکن ۰.۹ برای ناحیه تماس در نظر گرفته شده است. این شکل تنظیم مش شبیه‌سازی‌های ما را نشان می‌دهد. برای این قسمت از مش mapped برای هسته و پوسته تیله و ناحیه تماس که به‌عنوان بستر در نظر گرفته می‌شود، استفاده شده است. تعداد ثابت عناصر برای مبدا و مقصد به ترتیب ۳۰۰ و ۱۵ مورد انتخاب شدند. در این فرآیند، همانطور که قبلاً ذکر شد، انرژی پتانسیل گرانشی به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود که منجر به حرکت رو به

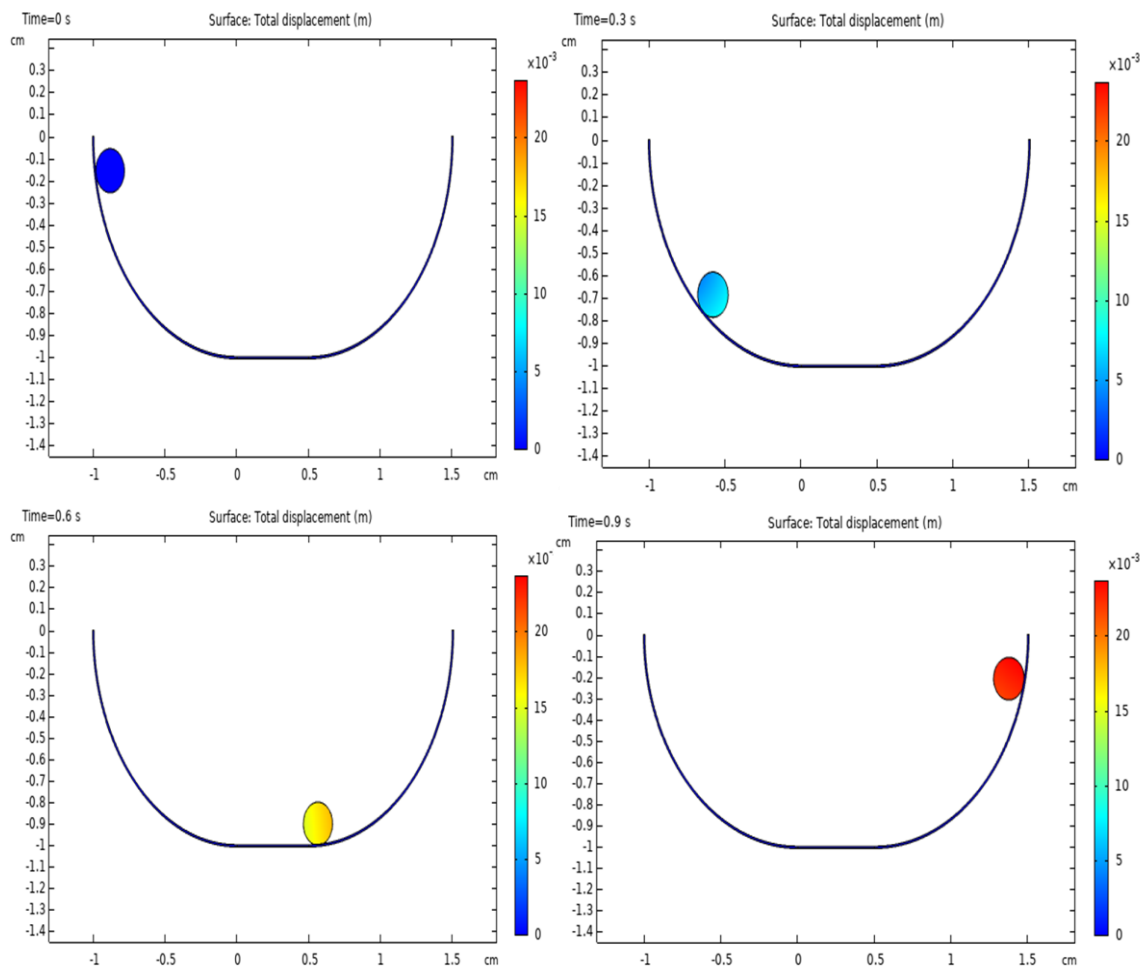
پایین تیله مایع می‌شود. لازم به ذکر است که تنها نیروی گرانش بر روی تیله مایع اعمال می‌شود. ما یک شبیه‌سازی دوبعدی مستقل از فرآیند حرکت تیله مایع مغناطیسی تحت نیروی گرانش روی یک بستر منحنی انجام دادیم. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از مدول مکانیکی ساختاری برای پیش‌بینی و کشف تغییر شکل و روند حرکت تیله مغناطیسی ما بر روی بستر منحنی شتاب‌سنج پیشنهادی انجام شد. کل تیله مایع به‌عنوان یک ماده الاستیک خطی با مدول یانگی که در بخش قبل بیان شد، مدل‌سازی شد. شکل (۷) موقعیت و توزیع جابجایی کل یک تیله مایع مغناطیسی را وقتی که در بالای یک بستر منحنی آزاد می‌شود و تا بالای منحنی سمت راست می‌رسد، در هر ۰.۹ ثانیه نشان می‌دهد. شکل (۸) موقعیت و توزیع استرس von mises همان تیله مایع مغناطیسی را در هر ۰.۹ ثانیه نشان می‌دهد.

در ادامه برای درک بهتر و عمیق‌تر، شبیه‌سازی جابجایی تیله مایع با اندازه‌های مختلف انجام شد. شکل (۹) و شکل (۱۰) مجموعه‌ای از عکس‌های دنباله‌ای سرعت و شتاب تیله مایع با همان شعاع را در ۰.۹ ثانیه، نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مقدار شتاب به‌عنوان مشتق مقدار سرعت نسبت به زمان تعریف می‌شود، رفتار تیله در هر دو شکل یکسان است. شکل (۱۱) توزیع چگالی انرژی ذخیره شده در شتاب‌سنج مبتنی بر تیله مایع در بازه زمانی ۰.۹ ثانیه نشان می‌دهد. شکل (۱۲) توزیع چگالی انرژی جنبشی در شتاب‌سنج مبتنی بر تیله مایع در بازه زمانی ۰.۹ ثانیه را نشان می‌دهد. شکل (۱۳) جابجایی کل دو تیله مایع مغناطیسی با شعاع ۱ میلی‌متر و ۱.۳ میلی‌متر را در ۰.۹ ثانیه نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، مشاهده می‌شود که تیله کوچکتر مسافت بیشتری را نسبت به تیله بزرگتر طی می‌کند. این نتایج، با این واقعیت که با افزایش حجم تیله به دلیل نیروی گرانش، تیله خمیری شکل می‌شود و حرکت، زمان بیشتری می‌برد، کاملاً مطابقت دارد. شکل (۱۴) تصاویر شبیه‌سازی شده از جابجایی کل تیله مایع مغناطیسی با شعاع ۱ میلی‌متر در ابتدا و انتهای حرکت در بازه زمانی ۰ و ۰.۹ ثانیه را نشان می‌دهد. در این حالت موقعیت ابتدایی تیله با توجه به شکل، متفاوت از یکدیگر در نظر گرفته شده است. به این صورت که با توجه به شکل، مکان اولیه تیله در زمان صفر، کمی پایینتر در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود که با پایین آوردن مکان اولیه

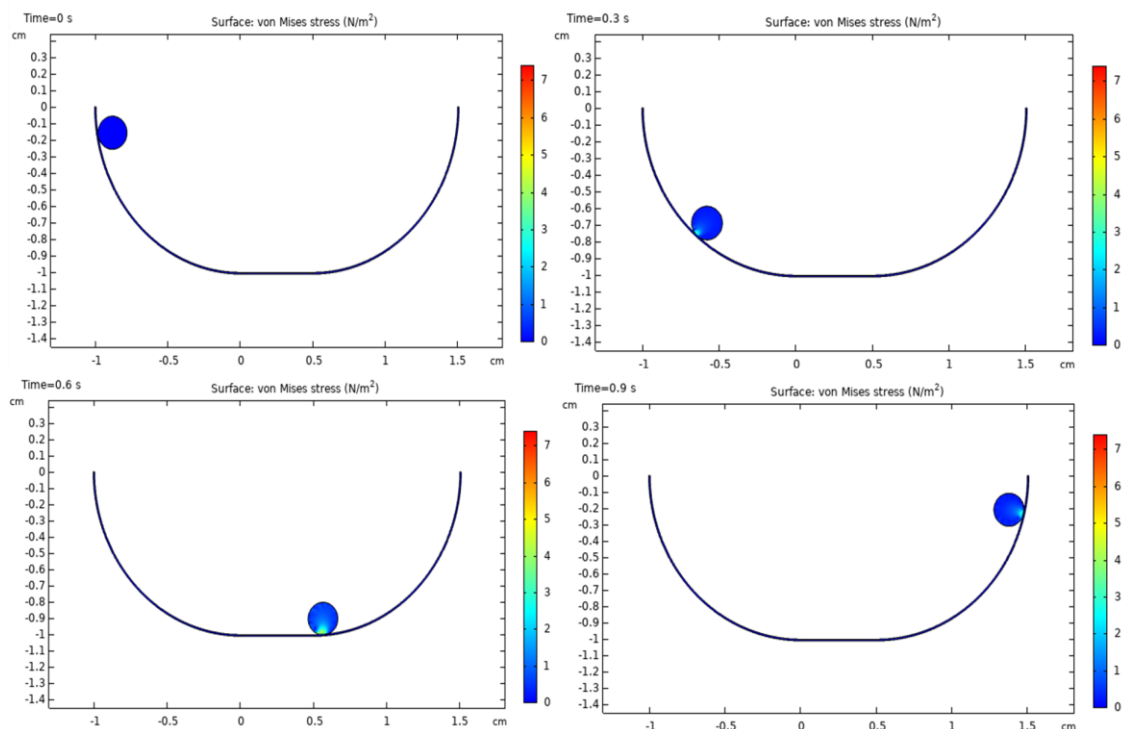


شکل ۶- مش بندی انجام شده در شبیه سازی

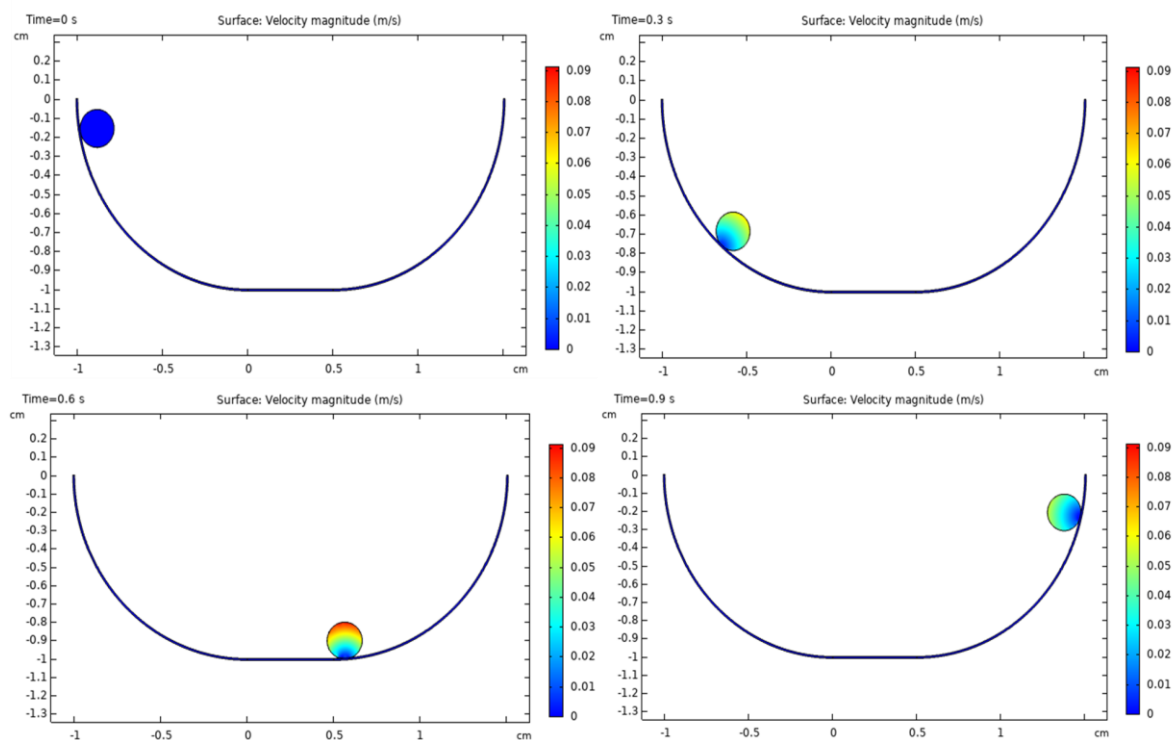
تیله، مکان ثانویه تیله در زمان ۰.۹ ثانیه پایین تر می گردد. این مساله را می توان با کاهش انرژی پتانسیل تیله با کاهش ارتفاع اولیه تیله و در نتیجه کاهش انرژی جنبشی معادل توجیه کرد. شکل (۱۵) نمودار فشار سطح تماس بر حسب مازول یانگ شتاب سنج مبتنی بر تیله مایع در بازه زمانی ۰.۹ ثانیه نشان می دهد. مطابق شکل مذکور، وقتی مازول یانگ تیله افزایش می یابد، تماس سطحی با بستر کوچک تر می شود و روی سطح منحنی صاف نمی شود، بنابراین فشار تماس تیله افزایش می یابد. در این شبیه سازی شعاع تیله ۱ و ۱.۳ میلی در نظر گرفته شده است



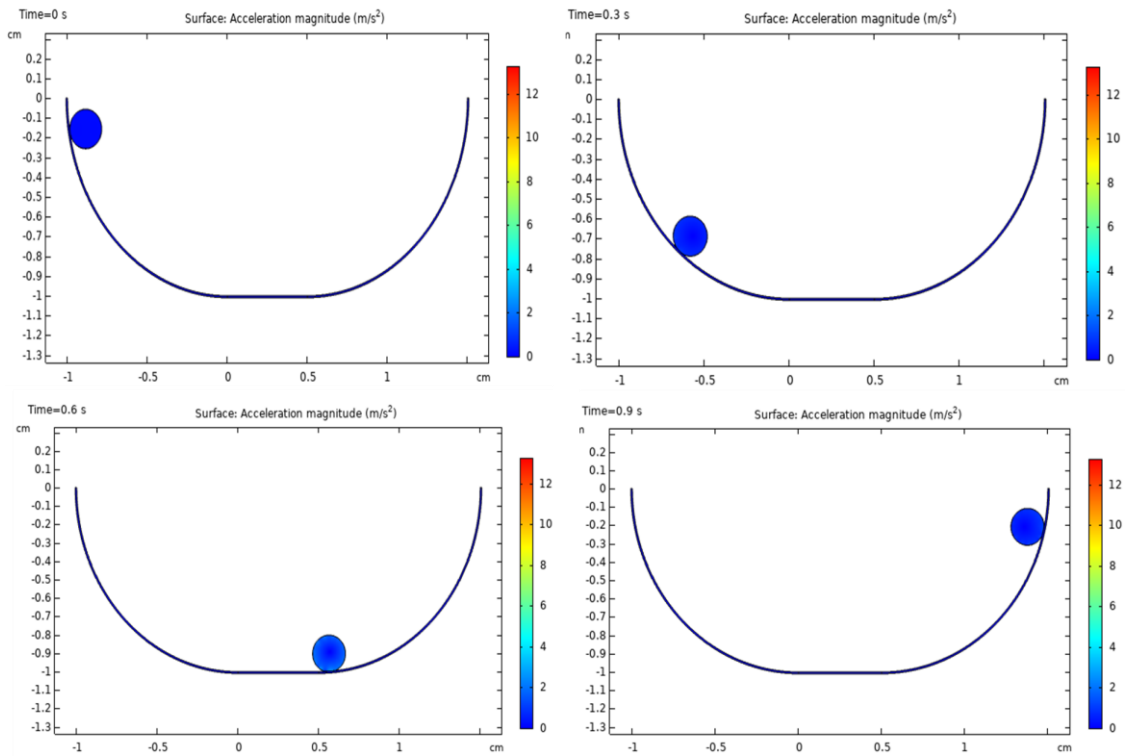
شکل ۷- توزیع جابجایی شتاب سنج مبتنی بر تیله مایع در بازه زمانی ۰.۹ ثانیه



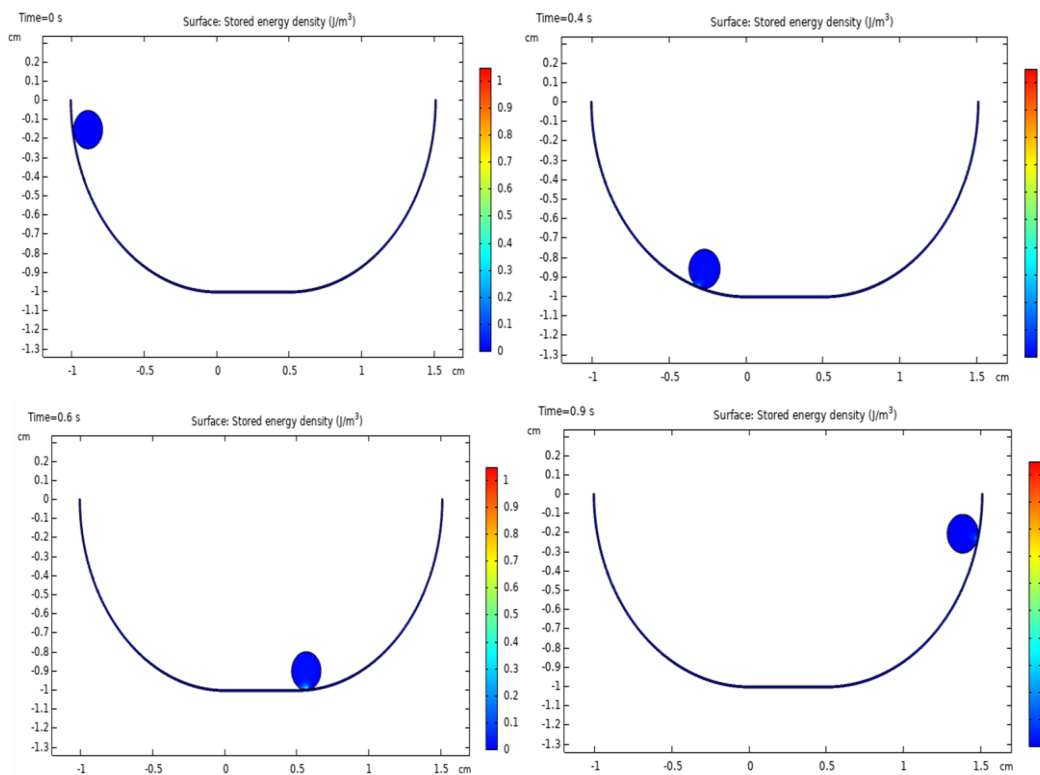
شکل ۸- توزیع استرس شتاب‌سنج مبتنی بر تیله مایع در بازه زمانی ۰.۹ ثانیه



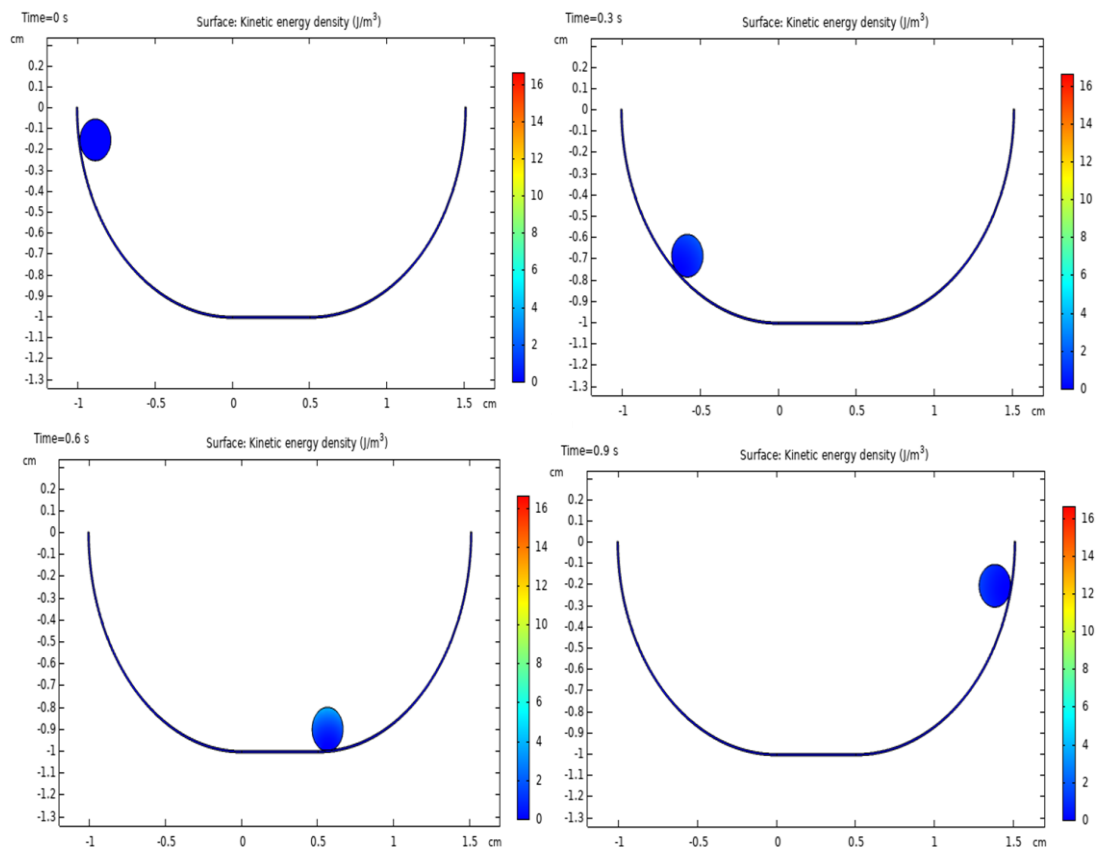
شکل ۹- توزیع اندازه سرعت شتاب‌سنج مبتنی بر تیله مایع در بازه زمانی ۰.۹ ثانیه



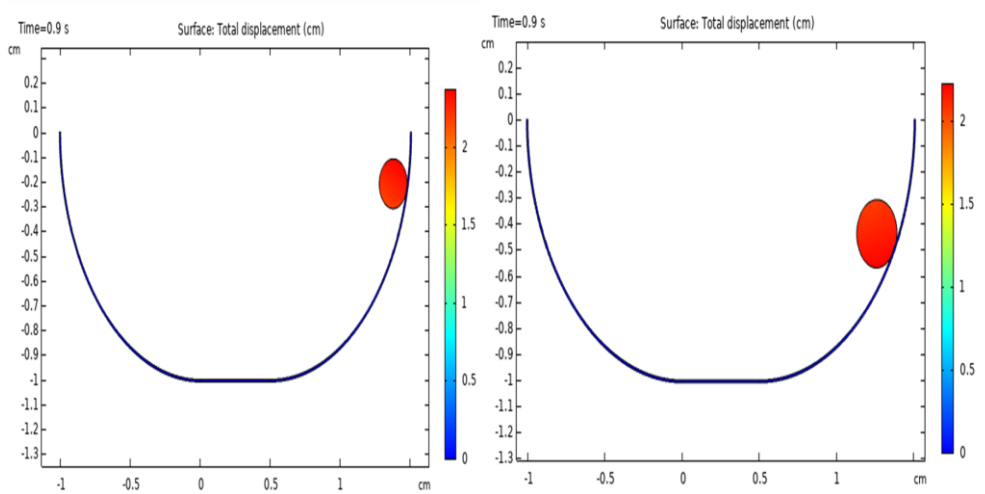
شکل ۱۰- توزیع اندازه شتاب شتابسنج مبتنی بر تیله مایع در بازه زمانی ۰.۹ ثانیه



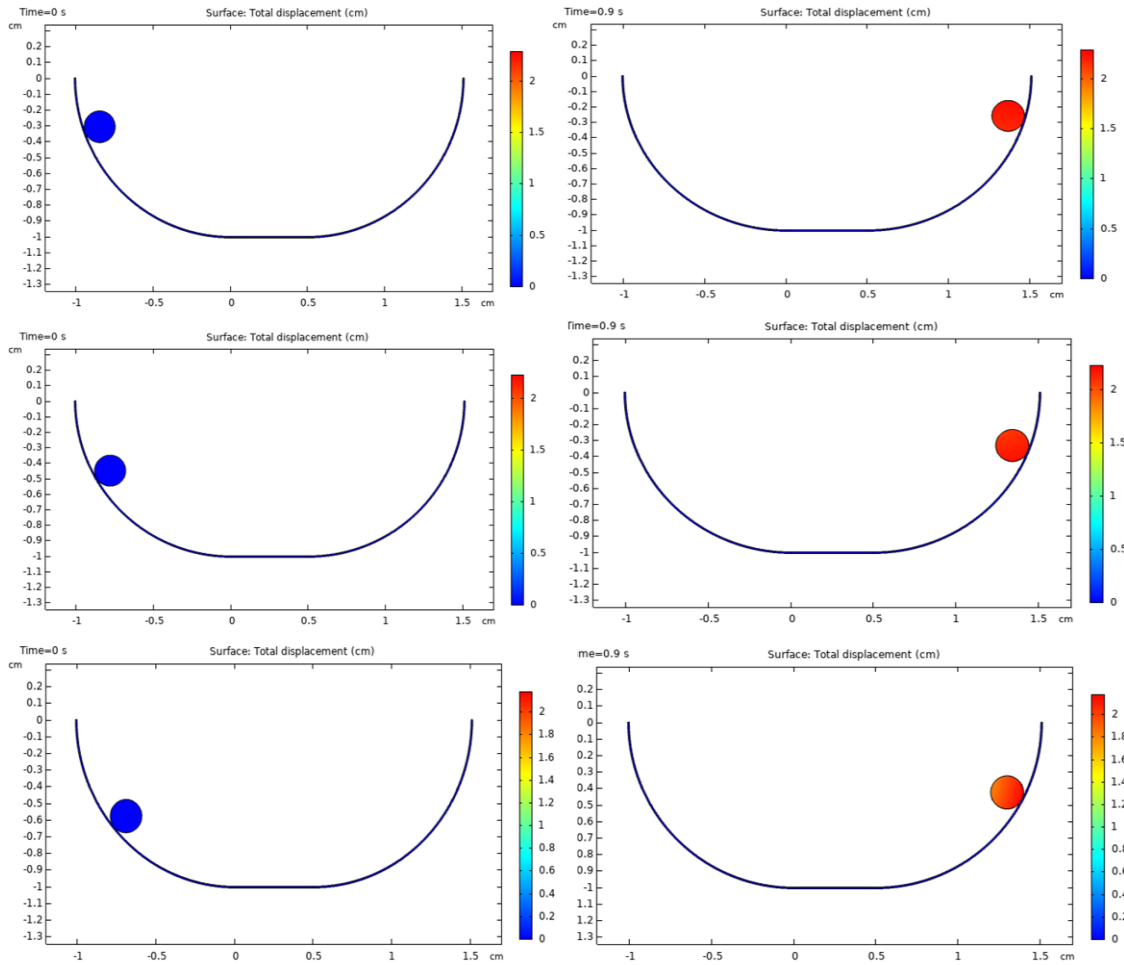
شکل ۱۱- توزیع چگالی انرژی ذخیره شده در شتابسنج مبتنی بر تیله مایع در بازه زمانی ۰.۹ ثانیه



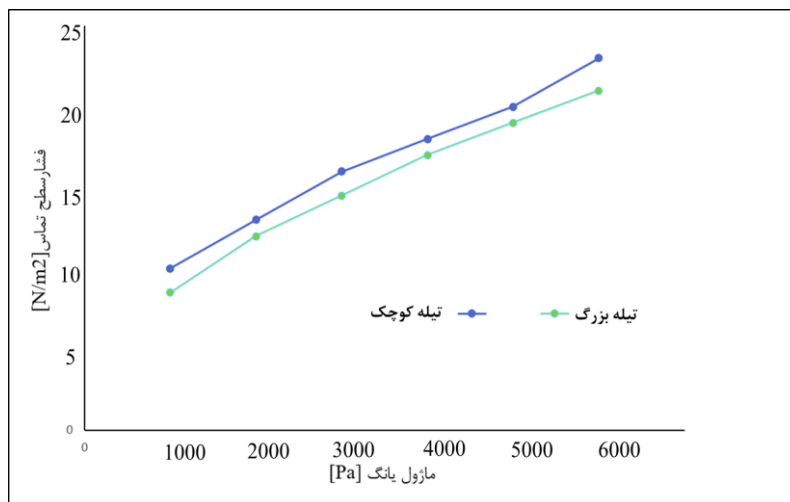
شکل ۱۲- توزیع چگالی انرژی جنبشی در شتاب‌سنج مبتنی بر تپله مایع در بازه زمانی ۰.۹ ثانیه



شکل ۱۳- جابجایی کل دو تپله مایع مغناطیسی با شعاع ۱ میلی‌متر و ۱.۳ میلی‌متر در ۰.۹ ثانیه



شکل ۱۴- جایجایی کل تپله مایع مغناطیسی با شعاع ۱ میلی متر در ابتدا و انتهای حرکت در بازه زمانی ۰ و ۰.۹ ثانیه



شکل ۱۵- نمودار فشار سطح تماس بر حسب ماژول یانگ شتابسنج مبتنی بر تپله مایع در بازه زمانی ۰.۹ ثانیه

۵- نتیجه گیری

قطرات مایعی که توسط نانو- میکرو ذرات احاطه شده باشند را تیله مایع می‌گویند که جایگزین بسیار مناسبی برای مفهوم آبگریزی می‌باشند. تیله های مایع در راستای حل مشکلات و چالش‌های قطرات مایعی که در کاربردهای ریز سیالات گسسته وجود داشتند، به وجود آمدند. در پژوهش انجام شده در ابتدا به صورت عملی تحریک مغناطیسی یک تیله را بررسی نموده ایم و با شبیه سازی نمودار نیروی مغناطیسی با افزایش جرم نانو ذرات را بررسی کرده ایم. حرکت تیله مایع با کمک آهنربا یک قابلیت و کاربرد عالی به عنوان یک بیو راکتور در علم پزشکی و غیره فراهم می‌کند. در انتها با استفاده از مدل‌سازی و شبیه سازی با روش المان محدود تاثیر نیروی گرانش بر شکل ظاهری تیله مایع را بررسی و در ادامه شبیه سازیهای قبلی، حرکت این تیله مایع تحت تاثیر نیروی گرانشی که بر وزن آن وارد می‌گردد، با استفاده از روش المان محدود بر روی سطح شیب دار خمیده شبیه سازی گردید. این شبیه سازیها برای کاربرد در شتاب سنج بر پایه تیله مایع استفاده می‌گردد. در رابطه با کار عملی در زمینه تیله مایع مغناطیسی کارهای زیادی توسط محققین در سالهای اخیر انجام شده و در این زمینه ما پژوهش ما اولین نیست. اما در رابطه با شبیه سازی تیله

مراجع

- [1] F. Jiang, Y. Xu, J. Song, H. Lu. "Numerical Study on the Effect of Temperature on Droplet Formation inside the Microfluidic Chip." *Journal of Applied Fluid Mechanics* 12, no. 3 (2019): 831-843.
- [2] M. Lashkarbolooki. "Prediction of surface tension of ionic liquid based on imidazolium using artificial neural network." *Journal of Modeling in Engineering* 17, no. 58 (2019): 1-3. (in Persian)
- [3] D. Toghraie Semiromi, S. Mirforoughi. "Numerical investigation of nanofluid mixed convection heat transfer with variable properties within a shallow lid driven cavity." *Journal of Modeling in Engineering* 16, no. 55 (2018): 337-50. (in Persian)
- [4] M.H. Hamed Estakharser, R. Rafai. "Numerical investigation of parameters affecting the performance of the eddy-droplet interaction model for application in a simple zigzag drip catcher with corrugated plates." *Journal of Modeling in Engineering* 10, no. 31 (2012):69-84. (in Persian)
- [5] M. Ziaei-Rad, P. Elyasi. "Numerical Modeling of Unsteady Pulsating nanofluid flow in a rectangular channel." *Journal of Modeling in Engineering* 14, no.44 (2016): 21-34. (in Persian)
- [6] 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.
- [7] H. Al-Kaidy, N. Tippkötter. "Superparamagnetic hydrophobic particles as shell material for digital microfluidic droplets and proof-of-principle reaction assessments with immobilized laccase." *Engineering in Life Sciences* 16, no. 3 (2016): 222-230.
- [8] B. Wang, Y. Liu, Y. Zhang, Z. Guo, H. Zhang, J.H. Xin, L. Zhang. "Bioinspired superhydrophobic Fe₃O₄@ polydopamine@ Ag hybrid nanoparticles for liquid marble and oil spill." *Advanced Materials Interfaces* 2, no. 13 (2015): 1500234.

مایع با یک لایه کشسان معادل با لایه پوششی نانو ذرات، با تخصیص ماژول یانگ، قبل از این تحقیق کاری انجام نشده است و یک خلاء در مطالعات وجود دارد. بنابراین نوآوری این تحقیق در زمینه شبیه سازی تیله مایع مغناطیسی، و جایگزین کردن آن با یک جامد نرم معادل کلی و در ادامه شبیه سازی حرکت آن بر روی سطح خمیده یک شتاب سنج می‌باشد. نمودارهای جابجایی، استرس سرعت، شتاب، انرژی ذخیره شده و جنبشی شتاب سنج شبیه سازی و در مقاله آورده شده است.

تعارض منافع

نویسندگان این اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان

رضا حاجی آقائی وفائی: ایده پردازی و جمع آوری

اطلاعات مقاله

الناز پوررضا: ایده پرداز مقاله

- [9] M. Dandan, and H. Yildirim Erbil. "Evaporation rate of graphite liquid marbles: comparison with water droplets." *Langmuir* 25, no. 14 (2009): 8362-8367.
- [10] P. Aussillous, and D. Quéré. "Liquid marbles." *Nature* 411, no. 6840 (2001): 924-927.
- [11] P. Aussillous, D. Quéré. "Properties of liquid marbles." *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 462, no. 2067 (2006): 973-999.
- [12] E. Bormashenko, R. Pogreb, R. Balter, H. Aharoni, Y. Bormashenko, R. Grynyov, L. Mashkevych, D. Aurbach, O. Gendelman. "Elastic properties of liquid marbles." *Colloid and Polymer Science* 293, no. 8 (2015): 2157-2164.
- [13] E. Bormashenko, R. Pogreb, T. Stein, G. Whyman, M. Schiffer, D. Aurbach. "Electrically deformable liquid marbles." *Journal of Adhesion Science and Technology* 25, no. 12 (2011): 1371-1377.
- [14] E. Bormashenko, R. Pogreb, A. Musin, R. Balter, G. Whyman, D. Aurbach. "Interfacial and conductive properties of liquid marbles coated with carbon black." *Powder Technology* 203, no. 3 (2010): 529-533.
- [15] E. Bormashenko, R. Balter, D. Aurbach. "Micropump based on liquid marbles." *Applied Physics Letters* 97, no. 9 (2010): 091908.
- [16] E. Bormashenko, R. Pogreb, Y. Bormashenko, A. Musin, T. Stein. "New investigations on ferrofluidics: ferrofluidic marbles and magnetic-field-driven drops on superhydrophobic surfaces." *Langmuir* 24, no. 2 (2008): 12119-12122.
- [17] E. Bormashenko, R. Pogreb, G. Whyman, A. Musin, Y. Bormashenko, Z. Barkay. "Shape, vibrations, and effective surface tension of water marbles." *Langmuir* 25 (2009): 1893-1896.
- [18] Q. Wang, N. Xiang, J. Lang, B. Wang, D. Jin, L. Zhang. "Reconfigurable Liquid-Bodied Miniature Machines: Magnetic Control and Microrobotic Applications." *Advanced Intelligent Systems* 6, no. 2 (2024): 2300108.
- [19] M. Newton, D. Herbertson, S. Elliott, N. Shirtcliffe, G. McHale. "Electrowetting of liquid marbles." *Journal of Physics D: Applied Physics* 40, no.1 (2006): 20.
- [20] G. McHale, M.I. Newton. "Liquid marbles: principles and applications." *Soft Matter* 7, (2011): 5473-5481.
- [21] G. McHale, S. Elliott, M. Newton, D. Herbertson, K. Esmer. "Levitation-free vibrated droplets: resonant oscillations of liquid marbles." *Langmuir* 25, no.1 (2009): 529-533.
- [22] G. McHale, D. Herbertson, S. Elliott, N. Shirtcliffe, M. Newton. "Electrowetting of nonwetting liquids and liquid marbles." *Langmuir* 23, no. 2 (2007): 918-924.
- [23] F. Celestini, E. 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.
- [24] G. Alp, E. Alp, N. Aydogan. "Magnetic liquid marbles to facilitate rapid manipulation of the oil phase: Synergistic effect of semifluorinated ligand and cationic surfactant mixtures." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 585 (2020): 124051.
- [25] S. Hanosh, B.S. Lekshmi, S.N. Varanakkottu, S.D. George. "Simple Fabrication of PDMS-Grafted Hydrophobic Iron Oxide Particles for Oil-Water Separation and Stimuli-Responsive Liquid Marbles." *ACS Applied Polymer Materials*, (2023).
- [26] Y. Zhao, J. Fang, H. Wang, X. Wang, T. Lin. "Magnetic liquid marbles: manipulation of liquid droplets using highly hydrophobic Fe₃O₄ nanoparticles." *Advanced Materials* 22, no. 6 (2010): 707-710.
- [27] X. Lin, W. Ma, H. Wu, S. Cao, L. Huang, L. Chen, A. Takahara. "Superhydrophobic magnetic poly (DOPAm-co-PFOEA)/Fe₃O₄/cellulose microspheres for stable liquid marbles." *Chemical Communications* 52, no. 9 (2016): 1895-1898.
- [28] F. Sarvi, K. Jain, T. Arbatan, P.J. Verma, K. Hourigan, M.C. Thompson, W. Shen, P.P. Chan. "Cardiogenesis of embryonic stem cells with liquid marble micro-bioreactor." *Advanced Healthcare Materials* 4, no. 1 (2015): 77-86.
- [29] T. Arbatan, L. Li, J. Tian, W. Shen. "Liquid marbles as micro-bioreactors for rapid blood typing." *Advanced Healthcare Materials* 1, no. 1 (2012): 80-83.
- [30] T. Arbatan, A. Al-Abboodi, F. Sarvi, P.P.Y. Chan, W. Shen. "Tumor inside a pearl drop." *Advanced Healthcare Materials* 1, no. 4 (2012): 467-469.

- [31] N.k. Nguyen, A. Chuang, P. Singha, G. Kijanka, M.A. Burford, C.H. Ooi, N.T. Nguyen. "Liquid marble—A high-yield micro-photobioreactor platform." *Reaction Chemistry & Engineering* 8, no. 11 (2023): 2710-2716.
- [32] M. Tenjimbayashi, S. Yamamoto, and K. Uto. "Drycells: Cell-Suspension Micro Liquid Marbles for Single-Cell Picking." *Advanced Materials* 35, no. 30 (2023): 2300486.
- [33] Y. Xue, H. Wang, Y. Zhao, L. Dai, L. Feng, X. Wang, T. Lin. "Magnetic liquid marbles: a "precise" miniature reactor." *Advanced Materials* 22, no. 43 (2010): 4814-4818.
- [34] G. McHale, M. Newton. "Liquid marbles: topical context within soft matter and recent progress." *Soft Matter* 11, no. 13 (2015): 2530-2546.
- [35] E. Poorreza, R.H. Vafaie, M. Mehdipoor, A. Pourmand, H.B. Ghavifekr. "Microseparator based-on 4-phase travelling wave dielectrophoresis for lab-on-a-chip applications" (2013).
- [36] E. Poorreza, R.H. Vafaie, M. Mehdipoor, A. Pourmand, H.B. Ghavifekr. "A novel miniaturized travelling wave dielectrophoresis microseparator for lab-on-a-chip applications." *2012 8th International Symposium on Mechatronics and its Applications*, IEEE, 2012, pp. 1-6.
- [37] E. Bormashenko, A. Musin. "Revealing of water surface pollution with liquid marbles." *Applied Surface Science* 255, no. 12 (2009): 6429-6431.
- [38] Z. Zhao, Y. Zhang, L. Ren, B. Xiang, J. Li. "Facile preparation of colorful liquid marbles and liquid marbles used in water pollutant detection." *Journal of Adhesion Science and Technology* 31, no. 10 (2017): 1125-1132.
- [39] E. Poorreza, H.B. Ghavifekr. "Synthesis and Characterization of Hydrophobized Fe₃O₄ Nanoparticles for Production of Liquid Marble and Modeling of Liquid Marble Deformation Due to Gravity." *Russian Journal of Physical Chemistry A* 95, no. 7 (2021): 1411-1417.
- [40] H. Zeng, Y. Zhao. "Dynamic behavior of a liquid marble based accelerometer." *Applied Physics Letters* 96, no. 11 (2010): 114104.
- [41] Y. Zhao, Z. Xu, M. Parhizkar, J. Fang, X. Wang, T. Lin. "Magnetic liquid marbles, their manipulation and application in optical probing." *Microfluidics and Nanofluidics* 13, no. 4 (2012): 555-564.
- [42] M. Ghanbari, G. Rezazadeh. "A liquid-state high sensitive accelerometer based on a micro-scale liquid marble." *Microsystem Technologies* 26, no. 2 (2020): 617-623.
- [43] E. Poorreza, M. Mehdipoor, R. Hadjiaghaie Vafaie, N. Dadashzadeh. "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, no. 75 (2023): 53-66.
- [44] Z. Yang, E. Halvorsen, T. Dong. "Power generation from conductive droplet sliding on electret film." *Applied Physics Letters* 100, no. 21 (2012): 213905.