



TI Magnetophoretic Capacitors for Storing Particles and Cells in a Tri-Axial Magnetic Field

R. Abedini-Nassab¹, S. Bahrami²

¹ Aerospace Department, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² Department of Electrical Engineering, Faculty of Technology and Engineering, University of Neyshabur, Neyshabur, Iran

ABSTRACT: One of the main goals in the field of lab-on-a-chip is the manipulation of microparticles and cells on microfluidic chips. Methods based on magnetic forces, with remote controllability over particle movement, are considered one of the most appealing techniques toward this goal. Recently, inspired by electronic circuits and to transport particles in a controlled fashion in a tri-axial magnetic field, magnetophoretic circuits based on TI-shaped magnetic thin films are introduced. However, to date, capacitors are not used in order to store transported particles in these circuits. Here, TI magnetophoretic capacitors are introduced and characterized. The capability of the capacitor for storing particles of different sizes at various rotating magnetic field frequencies is studied. Towards this goal, finite element methods are used to simulate the magnetic potential energy distribution created by the magnetic thin films. Also, the trajectory of the magnetic particles, considering the drag forces, based on semi-analytical analysis and statistical methods, is investigated. The simulation results are validated experimentally. At the operating frequency of 0.1 Hz loading efficiency of 98% was achieved. Adding this circuit element to the magnetophoretic circuits results in a complete chip, with important applications in lab-on-a-chip systems, single-cell biology, and drug screening.

Review History:

Received: Apr. 24, 2022

Revised: Mar. 13, 2023

Accepted: Apr. 03, 2023

Available Online: May, 11, 2023

Keywords:

Magnetophoretic circuits
capacitors
magnetic microparticles
particle transport
microfluidics.

1- Introduction

Manipulation of microparticles is of interest in many fields, such as biomedical engineering and colloid science. Towards this goal, many methods have been proposed, among which the magnetophoretic circuits are considered a novel promising approach [1, 2]. In these circuits, a magnetic thin film is patterned on a chip, which then gets magnetized in an external magnetic field and precisely transports magnetic particles on it. These circuits are composed of different circuit elements, including conductors, capacitors, and transistors, and offer various particle manipulations such as particle transport, storage, and retrieval.

A recent version of magnetophoretic circuits is based on the TI design [3]. These chips operate in a triaxial magnetic field, with a vertical bias field, in which a repulsive force between the particles prevents them from forming clusters and clogging the chip. Although TI conductors, which transport the particles are already proposed, TI capacitors, where the particles can be stored, are not presented yet. In this work, for the first time, these capacitors are introduced and characterized. We use experimentally validated simulations to find the proper operating frequencies, the performance of the proposed capacitors, and the particle average velocities. With the proposed capacitors, fully operational magnetophoretic circuits can be designed to manipulate particles.

2- Theory and Simulations

A semi-analytical model is used to simulate the magnetic forces. In this method, each magnetic bar (i.e., the I bar and the head and body segments of the T pattern) is modeled as an oblate spheroid [4]. Then, the obtained magnetic potential is used to calculate magnetic potential energy using Equation (1).

$$U = \frac{1}{2} \mu_0 V_p (\chi_p - \chi_f) H^2 \quad (1)$$

where μ_0 , V_p , χ_p , χ_f and H stand for the magnetic permeability of the particle, the volume of the particle, the magnetic susceptibility of the particle, the magnetic susceptibility of the surrounding fluid, and magnetic field intensity, respectively. Then, the magnetic force acting on this particle is calculated based on Equation (2).

$$\vec{F} = -\nabla U \quad (2)$$

*Corresponding author's email: abedini@modares.ac.ir



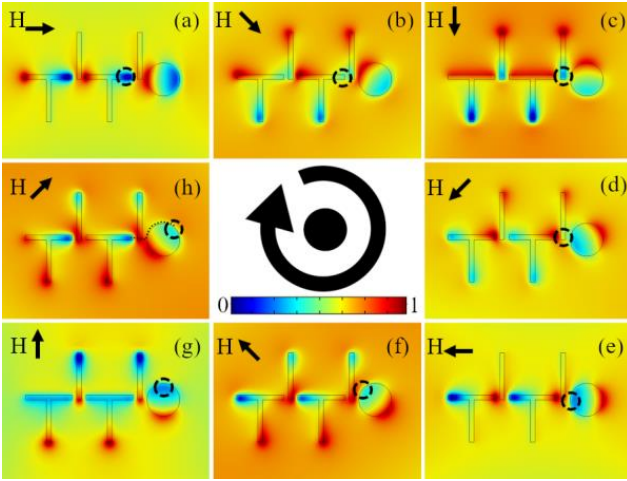


Fig. 1. Energy distribution simulation results for the proposed capacitor based on a magnetic disk. In each panel, the direction of the magnetic field is shown with a black arrow.

The particle velocity is then calculated based on Stokes's law for small particles in a fluidic environment, based on Equation (3).

$$\vec{v} = \frac{\vec{F}}{6\pi\eta_f r_p} \quad (3)$$

where η_f and r_p stand for the viscosity of the fluid and the particle radius, respectively. Calculating the velocity at each time point gives us the particle position at the next time point.

In our simulations with COMSOL software, stationary analysis, and magnetic field physics were chosen. After defining the materials (permalloy with magnetic permeability of 100,000 for the magnetic thin films), a proper mesh to achieve a converged solution was chosen. Then, the boundary conditions (external magnetic field) were defined, before running the calculations.

To fabricate the chips, NFR16D2 photoresist was deposited on silicon wafers and then exposed to UV light. After development, a 5nm thin film of titanium and a 100nm thin film of permalloy were deposited on the chips, using the metal evaporation technique. After a lift-off process, the chips became ready to be used in experiments.

3- Results and Discussion

A TI pattern was fabricated and used for manipulating the particles. The trajectories of particles were recorded experimentally and compared with the ones obtained in simulations. After validating the simulation results, the operation of the capacitor design shown in Figure 1 was evaluated. Our simulation results show that by applying a magnetic field along a magnetic bar or a disk, two magnetic poles with low energies form on both sides, one of which disappears by superimposing a vertical bias field. In a periodic

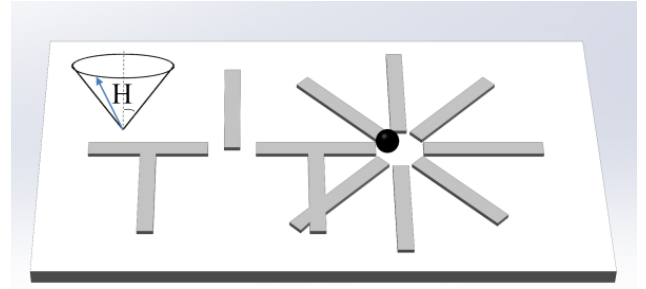


Fig. 2. Schematic of the proposed capacitor based on I bars. H shows the applied magnetic field. The sphere represents a stored particle.

TI magnetic pattern, a rotating in-plane magnetic field, at any angle creates a magnetic pole at the tip of the bars aligned toward the field direction (See Figure 1, where the blue and red regions represent the area with low and high energies, respectively). The successive poles form closely and hand over their follower magnetic particles along the magnetic track towards the magnetic disk (circular pattern in Figure 1). When the particle approaches the disk, it moves to the pole formed by the disk and then circulates it. By further rotating the magnetic field, the particle remains close to the disk. Hence, this geometry behaves as a capacitor, which stores the particles. In Figure 1, the position of the particle at each time point is depicted with dashed circles. The dotted line in Figure 1h represents the particle trajectory. It shows that the particle has moved from the right tip of the T bar in Figure 1a to the upper right side of the circle in Figure 1h.

The ratio of the diameter of the particle to the gap between the TI pattern and the disk is an important parameter for device operation. Based on our achieved results, for proper particle transport along the magnetic track and storage in the capacitor, this ratio cannot be smaller than 1.6.

Another important parameter to be studied is the applied magnetic field frequency. At high frequencies, particles need to move faster to follow the poles, which results in higher drag forces. Based on our studies, at frequencies of 0.1Hz, the particles could move smoothly, and a capacitor loading efficiency of 98% is achieved. At this frequency, the capacitor loading rate is 5.88 particles per minute.

Since the conducting path is composed of the I bars, it may be more interesting to form the capacitors based on them. A three-dimensional (3D) **schematic** of this design is presented in Figure 2. In this design, as opposed to a magnetic disk, the I bars are placed in a circular arrangement. Our simulation results show that the particle moves on the internal perimeter of the capacitor pattern. The ratio of the particle diameter to the gap size for this design to operate properly needs to be greater than 2.6.

In the proposed chips, the position of the particles is synched with the external magnetic field. Hence, the particle velocity is a function of the magnetic field frequency. The movement of the particles is analogous to the movement of electrons in electrical circuits, where electrical current

is proportional to the externally applied electric voltage difference (Ohm's law). Assuming the magnetic pattern periodicity and the magnetic field frequency to be 26 μm and 0.1 Hz, respectively, the average particle velocity on this chip is 2.6 $\mu\text{m/s}$.

4- Conclusion

Magnetophoretic circuits with the ability to precisely transport microparticles offer many important capabilities to lab-on-a-chip systems. In this work, two magnetophoretic capacitors for the circuits based on the TI pattern were introduced for the first time. In the first design, a magnetic disk plays the capacitance role. By choosing a small disk, compact circuits can be designed. But since the particles move in the perimeter of the disk, a small perturbation may distract it from its position. In the second design, magnetic I bars in a circular arrangement form the capacitor. This capacitor stores the particles internally and can better protect them against possible perturbations. But this design occupies a larger area on the chip. At low frequencies, the particle transport is less affected by the drag forces and higher

efficiencies can be achieved. Based on our simulations, at the operating frequency of 0.1 Hz, a particle loading efficiency of 98% resulted. The proposed capacitor can be used in designing fully operational magnetophoretic circuits, with crucial applications in single-cell biology and medicine.

References

- [1] B. Lim, V. Reddy, X. Hu, K. Kim, M. Jadhav, R. Abedini-Nassab, Y.W. Noh, Y.T. Lim, B.B. Yellen, C. Kim, Magnetophoretic circuits for digital control of single particles and cells, *Nat Commun*, 5 (2014) 3846.
- [2] R. Abedini-Nassab, D.Y. Joh, M.A. Van Heest, J.S. Yi, C. Baker, Z. Taherifard, D.M. Margolis, J.V. Garcia, A. Chilkoti, D.M. Murdoch, B.B. Yellen, Characterizing the Switching Thresholds of Magnetophoretic Transistors, *Adv Mater*, 27(40) (2015) 6176-6180.
- [3] R. Abedini-Nassab, S. Bahrami, Synchronous control of magnetic particles and magnetized cells in a tri-axial magnetic field, *Lab Chip*, 21(10) (2021) 1998-2007.
- [4] J.A. Stratton, *Electromagnetic Theory*, McGraw-Hill Book Company, Inc, 1941.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

R. Abedini-Nassab, S. Bahrami, *TI Magnetophoretic Capacitors for Storing Particles and Cells in a Tri-Axial Magnetic Field*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 55(5) (2023) 131-134.

DOI: [10.22060/mej.2023.21335.7430](https://doi.org/10.22060/mej.2023.21335.7430)





خازن‌های مدارهای جنبش مغناطیسی مبتنی بر طرح II به منظور ذخیره‌سازی ذرات و سلول‌ها در یک میدان مغناطیسی سه‌بعدی

روزبه عابدینی نسب*، سجاد بهرامی

گروه هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه نیشابور، نیشابور، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۴
بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۲/۲۱

کلمات کلیدی:

مدارهای جنبش مغناطیسی
خازن
ریزذرات میکرومتری مغناطیسی
انتقال ذرات
ریزسیالات

خلاصه: یکی از اهداف مهم در حوزه آزمایشگاه بر روی تراشه، انتقال ریزذرات میکرومتری و سلول‌ها بر روی تراشه‌های ریزسیالی است. استفاده از نیروهای مغناطیسی با امکان کنترل از راه دور حرکت ذرات، از مناسب‌ترین روشها در این زمینه است. به تازگی، با الهام از مدارهای الکترونیکی و به منظور انتقال کنترل شده ذرات بر روی تراشه در یک میدان مغناطیسی سه‌بعدی، مدارهای جنبش مغناطیسی معرفی شده‌اند که مبتنی بر فیلم نازک مغناطیسی با طرح II هستند. اما تا به امروز در این مدارها از خازن به منظور ذخیره‌سازی ذرات منتقل شده استفاده نشده است. در این پژوهش، خازن‌های مدارهای جنبش مغناطیسی مبتنی بر طرح II پیشنهاد شده و مشخصه‌یابی می‌شود. عملکرد خازن معرفی شده برای ذخیره‌سازی ذرات با قطره‌های مختلف در میدان‌های مغناطیسی دوار با فرکانس‌های مختلف بررسی می‌شود. در این راستا، از روش‌های اجزاء محدود برای شبیه‌سازی توزیع انرژی پتانسیل مغناطیسی حاصل از فیلم نازک مغناطیسی استفاده می‌شود. همچنین، حرکت ذرات در محیط سیال، با در نظر گرفتن نیروی پسا با روش شبه تحلیلی و تحلیل تصادفی مطالعه شده و اعتبار نتایج با آزمایش‌های تجربی تایید می‌گردد. در فرکانس کاری ۰/۱ هرتز راندمان ذخیره‌سازی ذره معادل ۹۸ درصد به دست آمد. با قرار گرفتن این عنصر مداری در مدارهای جنبش مغناطیسی، تراشه مورد نظر تکمیل شده و کاربردهای مهمی در سیستم‌های آزمایشگاه بر روی تراشه، زیست‌شناسی تک سلولی، و غربال‌گری دارویی خواهد داشت.

۱- مقدمه

در مجموعه‌ای از ذرات به وسیله آن‌ها دشوار است. محدودیت موجود در خصوص روش‌های نوری این است که تنها در محیط‌های شفاف قابل اجرا می‌باشند. همچنین اثر تابش طولانی مدت نور به سلول‌ها در این روش‌ها باید بررسی شود. از آنجایی که اکثر سلول‌ها و مولکول‌های زیستی دارای بار الکتریکی ذاتی هستند، استفاده از روش‌های انتقال مبتنی بر نیروهای الکتریکی بسیار مناسب به نظر می‌رسد. اما معمولاً سطح تراشه‌های مبتنی بر این روش‌ها باید از الکترودهای متعددی پوشش داده شود. به همین دلیل سیستم سیم‌کشی آن‌ها پیچیده بوده و تعداد سلول‌های قابل بررسی در آن‌ها محدود است. در این میان، روش‌های مغناطیسی متفاوتی نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این کاربردها در علوم زیستی، شامل جداسازی و حرکت دادن سلول‌ها [۱۵-۱۷]، ویروس‌ها [۱۸، ۱۹]، و اسیدهای نوکلئیک [۲۰-۲۴] (به وسیله‌ی اتصال آن‌ها با ریزذرات میکرومتری یا نانو متری مغناطیسی) [۲۵-۲۷] می‌باشد. روش‌های ذکر شده در موارد مختلفی مانند جداسازی سلول‌های سرطانی [۲۸]، تشخیص بیماری‌ها [۲۹]، آنالیز تک سلولی [۳۰]،

حرکت دادن ریزذرات، شامل جداسازی و مرتب‌سازی بر روی تراشه‌های ریزسیالی، کاربردهای بسیار وسیعی پیدا کرده و یکی از اهداف اصلی در سیستم‌های آزمایشگاه بر روی تراشه است. برای دستیابی به این هدف، از روش‌های مختلفی مبتنی بر نیروهای مغناطیسی [۱-۴]، سیالی [۵، ۶]، صوتی [۷-۱۰]، نوری [۱۱، ۱۲]، و الکتریکی [۱۳، ۱۴] استفاده شده است. با وجود اینکه هر کدام از این روش‌ها مزیت‌هایی دارند اما اکثر آنها با محدودیت‌هایی نیز مواجه هستند که به چند مورد مهم آن در ادامه اشاره می‌شود. اگرچه روش‌های سیالی به صورت وسیعی مورد استفاده قرار گرفته شده و نمونه‌هایی از آن تجاری‌سازی شده‌اند. اما در این روش‌ها، حرکت سیال بر روی ریزذرات زیستی (مانند سلول‌ها) باعث اعمال تنش برشی می‌شود. این تنش می‌تواند عملکرد ذرات زیستی مورد نظر را تحت تاثیر قرار دهد. روش‌های مبتنی بر نیروهای صوتی از سبک‌های مناسب بدون نیاز به برچسب‌گذاری ذرات محسوب می‌شوند اما حرکت دادن ذرات منتخب

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: abedini@modares.ac.ir

مطالعات درمانی بیماری‌های عفونی [۳۱، ۳۲]، تحریک سلول‌های بنیادی [۳۳] و غیره، مورد توجه محققین و دانشمندان قرار گرفته‌است. اما در اکثر این روش‌ها انتقال کنترل‌شده تعداد بالایی تک سلول به صورت اتوماتیک ممکن نیست.

به‌منظور پاسخ به این مشکل، اخیراً با الهام از مدارهای الکتریکی و الکترونیکی، مدارهای جنبش مغناطیسی معرفی شده‌اند [۳۴-۳۶]. تراشه‌های جنبش مغناطیسی از مهندسی طرح‌های مورد نظر در فیلم‌های نازک مغناطیسی بر روی بستر سیلیکونی ایجاد می‌شوند. مدارهای مورد نظر از عنصرهای مداری، مانند مقاومت، خازن و ترانزیستور ساخته شده‌اند. این عنصرها مانند عنصرهای متناظرشان در مدارهای الکتریکی می‌باشند اما در مدارهای جنبش مغناطیسی به جای الکترون‌ها ذرات مغناطیسی و سلول‌ها در محیط ریزسیالی حرکت داده می‌شوند. با استفاده از این مدارها، عملیات مختلفی مانند انتقال کنترل‌شده تک ذرات، ذخیره‌سازی آن‌ها در یک آرایه بر روی تراشه، و بازیابی آن‌ها از آن آرایه نشان داده شده‌است.

نیروی حرکت دهنده ذرات در مدارهای جنبش مغناطیسی نسل اول، با اعمال یک میدان مغناطیسی دوار موازی صفحه تراشه ایجاد می‌شود. اما در این میدان‌ها، ذرات مغناطیسی که به مانند دوقطبی مغناطیسی عمل می‌کنند، به یکدیگر جذب می‌شوند. این نیروی جاذبه بین ذرات باعث ایجاد خوشه (تجمع) ذرات مغناطیسی می‌شود و این پدیده ممکن است عملکرد تراشه را مختل کند [۳۷]. به منظور پاسخ به ایراد ذکر شده، نسل دوم مدارهای جنبش مغناطیسی مبتنی بر طرح TI معرفی شده‌اند [۳۵]. این مدارها در میدان مغناطیسی سه‌بعدی، که با اضافه نمودن یک میدان مغناطیسی عمود بر سطح به میدان دوار موازی صفحه ایجاد می‌شود، عمل می‌کنند. ذرات مغناطیسی در اثر مولفه عمود بر سطح میدان به نوعی جهت داده می‌شوند که یکدیگر را دفع نموده و احتمال تشکیل خوشه‌ها کاهش یابد. بدین ترتیب، بازده مدارهای جنبش مغناطیسی مبتنی بر طرح TI از مدارهای اولیه که در میدان دو بعدی کار می‌کنند بالاتر است.

در مدارهای جنبش مغناطیسی، خازن محل ذخیره تک ذرات مغناطیسی است. این عنصر مداری قبلاً در مدارهای عمل‌کننده در میدان مغناطیسی دوبعدی ارائه شده‌است [۳۴]. اما تا کنون خازن‌های عمل‌کننده در مدارهای مبتنی بر TI و در میدان مغناطیسی سه‌بعدی معرفی نشده‌اند. در پژوهش حاضر، این خازن‌ها طراحی (شماتیک شکل ۱ را برای نمونه ببیند) و مشخصه‌یابی می‌شوند. با استفاده از روش‌های اجزاء محدود و نیز شبه تحلیلی، توزیع انرژی پتانسیل مغناطیسی حاصله و مسیر حرکت ذرات در

این خازن‌ها بررسی شده‌اند. از آنجایی که اندازه ذرات و میزان خاصیت مغناطیسی آنها (به عنوان مثال تعداد ریزذرات نانومتري در برچسب‌گذاری سلول‌ها) متفاوت و تصادفی است، از تحلیل تصادفی برای مطالعه حرکت آنها استفاده شده است. همچنین به منظور اطمینان از صحت نتایج شبیه‌سازی، اعتبار روش‌های شبیه‌سازی به کار رفته با آزمایش‌های تجربی اعتبارسنجی گردیده‌است.

در مدارهای معرفی شده، میدان مغناطیسی دواری به کل تراشه اعمال می‌شود و باعث حرکت ذرات می‌گردد. در نتیجه تعداد زیادی تک ذره می‌توانند با سرعتی همگام شده با میدان مغناطیسی خارجی به صورت همزمان حرکت کنند. این ذرات می‌توانند در خازن‌های تعبیه شده برای انجام مطالعات بعدی (برای مثال بررسی مشخصات انتشار پروتئین تک سلول‌ها) ذخیره شوند. از آنجایی که هر خازن کمتر از 0.1 میلی‌متر مربع را اشغال می‌کند و با در نظر گرفتن رساناهای مغناطیسی مورد نیاز، بر روی تراشه‌ای با طول و عرض ۲ سانتی‌متر، هزاران خازن برای ذخیره‌سازی هزاران ذره و سلول می‌توان قرار داد.

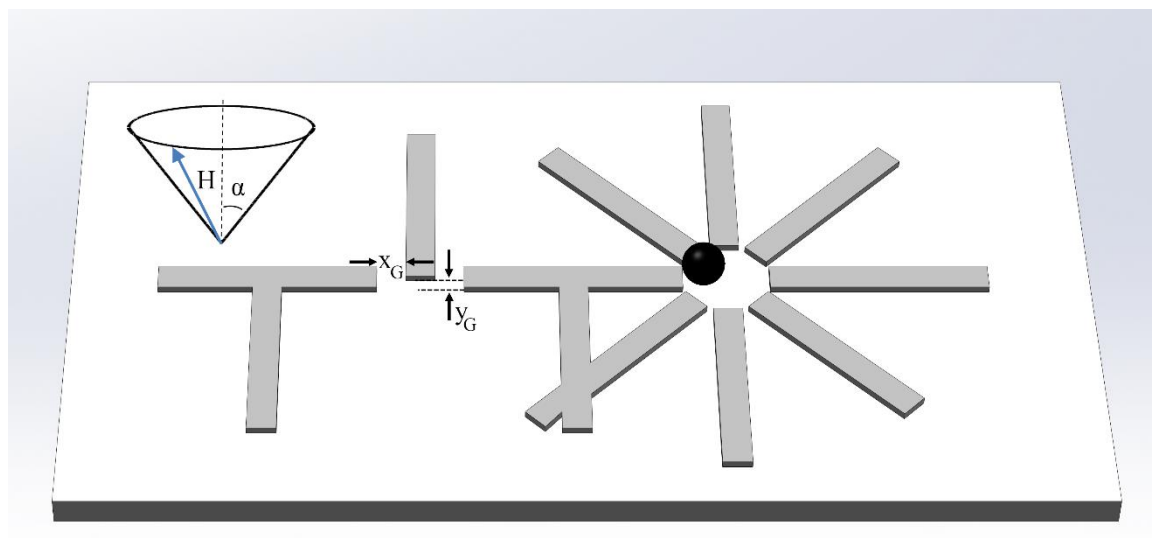
در بخش دوم، روش‌های تئوری مورد استفاده در این کار پژوهشی معرفی شده‌اند. سپس از این روش‌ها برای محاسبه انرژی مغناطیسی، نیروهای وارده، و مسیر حرکت ذرات و سلول‌ها استفاده می‌شود. با استفاده از آزمایش‌های تجربی، اعتبارسنجی روش شبیه‌سازی مورد استفاده انجام می‌گیرد. پس از آن، در بخش سوم، نتایج عددی حاصل برای خازن‌های معرفی شده با هندسه‌های مختلف ارائه می‌گردد. متغیرهای مؤثر در طراحی این خازن‌ها معرفی و بازه مناسب آن‌ها (بازه‌ای که در آن خازن قابلیت ذخیره‌سازی ذره را دارد) مشخص می‌شود. در نهایت، در بخش چهارم، دستاوردهای این پژوهش جمع بندی شده و توضیحاتی کوتاه در خصوص کارهای آینده ارائه می‌گردد.

۲- تئوری و شبیه‌سازی

ذره مغناطیسی در محیط ریزسیالی تراشه مورد نظر، نیروهای مغناطیسی، لزجت، اصطکاک، و براونی را تجربه می‌کند. بر این اساس، نیروی کلی اعمال شده توسط رابطه (۱) قابل محاسبه است.

$$\vec{F} = \vec{F}_{mag} + \vec{F}_{vis} + \vec{F}_f + \vec{F}_{br} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، F_{mag} ، F_{vis} ، F_f و F_{br} به ترتیب نیروهای مغناطیسی، لزجت، اصطکاک، و براونی (بر حسب نیوتون) می‌باشند. به منظور شبیه‌سازی



شکل ۱. نمای خازن مبتنی بر طرح TI که در میدان مغناطیسی سه بعدی (H) کار می‌کند. کره سیاه رنگ نمایانگر ذره مغناطیسی ذخیره شده در خازن است.

Fig. 1. View of the capacitor based on TI design operating in a tri-axial magnetic field (H). The black sphere represents a magnetic particle stored in the capacitor.

X می‌باشند. در روابط (۲-۴)، ξ نشان دهنده مختصات شعاعی و η و ζ نشان دهنده مختصات زاویه‌ای در دستگاه مختصات بیضوی اند. F_1 ، F_2 ، و F_3 به صورت رابطه (۵) محاسبه می‌شوند.

(۵)
(الف)

$$F_1 = \sqrt{\xi + a^2}$$

(ب)

$$F_2 = \sqrt{\eta + a^2}$$

(ج)

$$F_3 = \sqrt{\zeta + a^2}$$

ثابت‌های C_1 ، C_2 ، و C_3 در روابط (۲) و (۳)، با لحاظ نمودن شرایط مرزی بر روی سطح شمش به صورت روابط (۶ و ۷) بدست می‌آیند.

(۶)

$$\varphi_{out}|_{\xi=0} = \varphi_{in}|_{\xi=0}$$

(۷)

$$\mu_0 \left[\frac{\partial \varphi_{out}}{\partial \xi} \right]_{\xi=0} = \mu_1 \left[\frac{\partial \varphi_{in}}{\partial \xi} \right]_{\xi=0}$$

نیروی مغناطیسی از یک مدل شبه تحلیلی استفاده می‌شود. I ها و دو بخش بدنه و سر T ها در فیلم‌های نازک مغناطیسی (شکل ۱ را ببینید) که هر کدام را از این پس یک شمش مغناطیسی می‌نامیم، با بیضوی‌های پخ تقریب زده می‌شوند. میدان حاصل از ماده مغناطیسی به شکل بیضوی پخ که به صورت یکنواخت مغناطیسه می‌شود با شعاع‌های a ، b ، و c به ترتیب در راستاهای x ، y ، و z قبلاً ارائه شده است [۳۸]. بر اساس این مدل، پتانسیل مغناطیسی حاصل از مغناطیسه شدن هر شمش به صورت روابط (۲-۴) نوشته می‌شود.

$$\varphi_{out} = \varphi_{ext} + \varphi_{mag} = F_1(\xi)F_2(\eta)F_3(\zeta) \left[C_1 + C_2 \int_{\xi}^{\infty} \frac{ds}{R_s(s+a^2)} \right] \quad (2)$$

$$\varphi_{in} = C_3 F_1(\xi)F_2(\eta)F_3(\zeta) \quad (3)$$

$$R_s = \sqrt{(s+a^2)(s+b^2)(s+c^2)} \quad (4)$$

در روابط (۲-۴)، φ_{out} ، φ_{in} ، φ_{ext} و φ_{mag} به ترتیب پتانسیل‌های خارج از شمش، داخل شمش، حاصل از میدان اعمالی خارجی، و حاصل از مغناطیسه شدن شمش، در اثر اعمال یک میدان خارجی یکنواخت در راستای

رابطه (۱۲) نوشت.

$$\lambda = \tau c \sigma \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، τ ضریب تصحیح برای تطبیق نتایج مدل خطی با مدل بیضوی پخ است. این ضریب با استفاده از روش حداقل مربعات بین میانگین حجمی میدان حاصله در دو روش، و کمینه نمودن اختلاف محاسبه شد. با دست آمدن پتانسیل مغناطیسی، شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۱۳) قابل محاسبه خواهد بود.

$$H_{out} = -\nabla \varphi_{out} \quad (13)$$

علاوه بر روش شبه تحلیلی ذکر شده، از نرم افزار کامسول برای به دست آوردن توزیع انرژی در تراشه‌های معرفی شده استفاده شد. در این روش پس از ایجاد طرح II مورد نظر، مواد و فیزیک مرتبط به مسئله تعیین شدند. سپس، به منظور اطمینان از پاسخ صحیح، شبکه‌ای مناسب (با واحد های سازنده شبکه با اندازه بیشینه ۱ میکرومتر و اندازه کمینه ۰/۲ میکرومتر) انتخاب شد. در نهایت، برای حل مسئله، از فیزیک میدان مغناطیسی استفاده شد.

در رابطه (۱) می‌توان با تقریب خوبی از نیروهای براونی و اصطکاک صرف نظر کرد [۳۹] و بر اساس رابطه استوکس، سرعت ذره مغناطیسی (با واحد متر بر ثانیه) را به صورت رابطه (۱۴) نوشت.

$$\vec{v} = \frac{\vec{F}}{6\pi\eta_f r_p} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، η_f و r_p به ترتیب، ضریب لزجت مایع و شعاع ذره می‌باشند. با توجه به مقدار پایین عدد رینولدز در مسئله حاضر، از شتاب صرف نظر می‌شود. به علاوه می‌توان رابطه نیروی مغناطیسی (کلوین) با انرژی را به صورت رابطه (۱۵) نوشت.

$$\vec{F} = -\nabla U \quad (15)$$

در روابط (۶) و (۷)، μ_0 و μ_1 به ترتیب تراوایی مغناطیسی خلاء و پرملوی (با واحد هانری بر متر مربع) می‌باشند. h_ξ ثابت متری بوده و از رابطه (۸) بدست می‌آید.

$$h_\xi = 0.5 \left[\frac{(\xi - \eta)(\xi - \zeta)}{(\xi + a^2)(\xi + b^2)(\xi + c^2)} \right]^{0.5} \quad (8)$$

با جایگذاری ثابت‌ها در روابط (۱) و (۲)، پتانسیل‌های مغناطیسی به صورت رابطه (۹) حاصل می‌شوند.

$$\varphi_{out} = \varphi_{ext} \left[\frac{A_a(0, \xi)}{A_a(0, \infty)} + \frac{A_b(0, \xi)}{A_b(0, \infty)} + \frac{A_c(0, \xi)}{A_c(0, \infty)} \right] \quad (9)$$

$$\varphi_{in} = - \left[\frac{\bar{H}_{ext} \cdot x}{A_a(0, \infty)} + \frac{\bar{H}_{ext} \cdot y}{A_b(0, \infty)} + \frac{\bar{H}_{ext} \cdot \hat{z}}{A_c(0, \infty)} \right] \quad (10)$$

در روابط (۹) و (۱۰)، H_{ext} میدان مغناطیسی خارجی اعمالی (با واحد آمپر بر متر) بوده و A_a ، A_b ، A_c به صورت رابطه (۱۱) بدست می‌آیند.

$$A_i(p, q) = 1 + \frac{abc}{2} \left(\frac{\mu_1 - \mu_0}{\mu_0} \right) \int_p^q \frac{ds}{(s + i^2) R_s} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، p و q مقادیر 0 ، ∞ و ξ را می‌گیرند. برای حالت‌هایی که میدان مغناطیسی در راستای محورهای مختصات Y و Z اعمال می‌شود، می‌توان روابط مشابهی نوشت. پتانسیل مغناطیسی A ها از روابط (۹) و (۱۰) قابل محاسبه است. اما در خصوص T ها، در محل تقاطع بخش‌های بدنه و سر، همپوشانی آن دو باعث ناسازگاری توزیع دوقطبی‌های مغناطیسی می‌شود. برای حل این مشکل، فرض می‌کنیم فیلم نازک مغناطیسی به صورت یکنواخت مغناطیسی می‌شود. در نتیجه دوقطبی‌های مغناطیسی در محیط فیلم‌ها تشکیل می‌شوند و از دوقطبی‌های موجود در فضای داخل آن‌ها، با توجه به فرض ذکر شده، صرف‌نظر می‌شود. همچنین، فرض می‌شود که ضخامت فیلم نازک بسیار کم بوده و در نتیجه، کل بار در محیط فیلم‌ها، بار خطی است. در این صورت، چگالی بار خطی حاصل را می‌توان به صورت

۳- آزمایش‌های تجربی و راستی‌آزمایی نتایج شبیه‌سازی

هدف نهایی، شبیه‌سازی خازن معرفی شده در شکل ۱ است. اما برای تحلیل مناسب آن، از تحلیل بخش‌های سازنده آن آغاز می‌کنیم. در یک میدان مغناطیسی خارجی، یک ماده مغناطیسی به شکل قرص (استوانه) و یا بیضوی پخ، مغناطیسه شده و بر اساس تئوری مغناطیس کلاسیک [۳۸]، بیشینه اندازه میدان و چاهک انرژی در دو سمت آن و در جایی که بردار عمود بر محیط آن مماس بر خطوط میدان است، ایجاد می‌شود. نتیجه شبیه‌سازی انجام شده در شکل ۲(الف)، این چاهک‌های انرژی را (نواحی آبی) نشان می‌دهند. به منظور اعتبارسنجی این نتیجه، در آزمایش تجربی، قرص مغناطیسی در یک میدان مغناطیسی قرار داده شده است. همانطور که در شکل ۲(ب) نمایش داده شده است، ذرات مغناطیسی در نقاط متناظر با چاهک‌های انرژی در شکل ۲(الف) قرار گرفته‌اند و نتایج شبیه‌سازی و تجربی همخوانی دارند.

در یک شمش مغناطیسی، در هنگامی که میدان مغناطیسی خارجی در راستای محور اصلی آن اعمال می‌شود، چاهک‌های انرژی در دو سر آن ایجاد شده و عمیق‌ترند (شکل ۲(پ)). حال با اعمال یک میدان مغناطیسی عمود بر صفحه تراشه، یکی از این چاهک‌های انرژی حذف شده و به قله انرژی تبدیل می‌شود (شکل ۲(ت) را ببینید). به این ترتیب و بر اساس رابطه (۱۴)، بر روی تراشه مورد نظر ذرات مغناطیسی اطراف شمش‌ها به سمت چاهک‌های انرژی موجود جذب می‌شوند. با چرخش میدان مغناطیسی خارجی، چاهک‌های انرژی و ذرات مغناطیسی دنبال کننده آنها در کل تراشه به دور قرص‌های استوانه‌ای مغناطیسی حرکت می‌کنند و آنهایی که در پیرامون شمش‌ها قرار دارند بین سرهای این شمش‌ها جابجا می‌شوند.

با قرار دادن مناسب شمش‌های مغناطیسی در طرح II، با اعمال میدان مغناطیسی دوار سه‌بعدی (شامل مؤلفه گردان موازی سطح تراشه و مؤلفه ثابت عمود بر سطح)، ذرات در راستای مسیر II مغناطیسی منتقل می‌شوند. به منظور اعتبارسنجی تجربی، مدار مغناطیسی مبتنی بر طرح II ساخته شده و آزمایش‌های تجربی متناظر انجام گرفت. همانطور که در شکل‌های ۲(ث) و (د) نشان داده شده است، مسیر حرکتی حاصل از شبیه‌سازی (نقطه‌چین مشکی رنگ) با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی (نقطه‌های قرمز رنگ) همخوانی دارند. نتیجه نمایش داده شده در شکل ۲(ث) مبتنی بر آزمایش با استفاده از ذرات مغناطیسی میکرومتری است. نتایج این آزمایش در شکل ۲(د) با استفاده از سلول‌های زنده برچسب گذاری شده با ریزذرات نانومتری مغناطیسی تکرار شدند. نتایج هر دو آزمایش تجربی صحت شبیه‌سازی‌ها

در رابطه (۱۵)، U نشان دهنده انرژی پتانسیل مغناطیسی (با واحد ژول) است. در اینجا، انرژی پتانسیل مغناطیسی انرژی حاصل در سطح تراشه بر اثر اعمال میدان مغناطیسی است که امکان تبدیل به انرژی مکانیکی و حرکت دادن ذرات را دارد. این انرژی از رابطه (۱۶) بدست می‌آید.

$$U = \frac{1}{2} \mu_0 V_p (\chi_p - \chi_f) H^2 \quad (16)$$

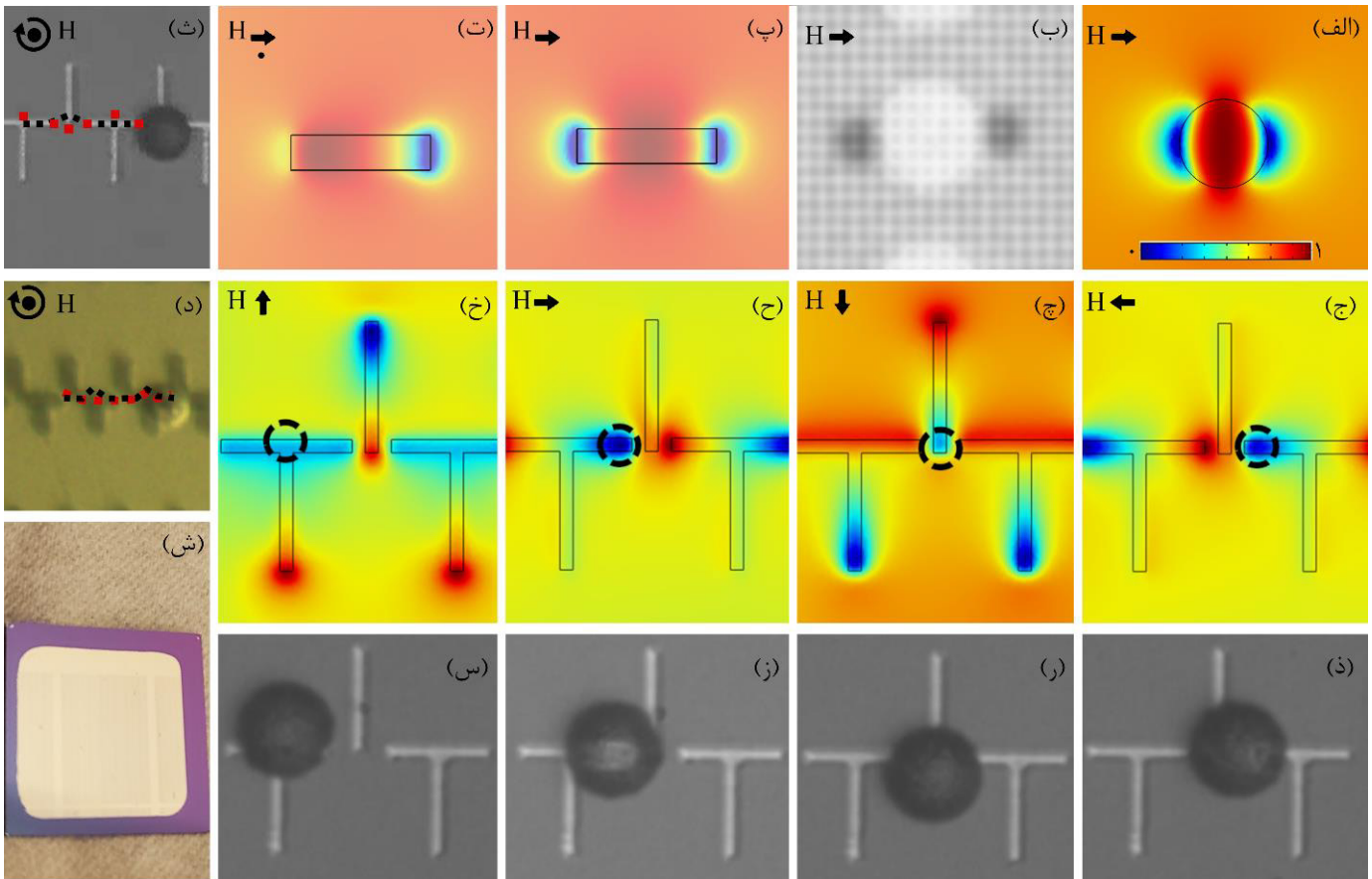
در رابطه (۱۶)، V_p ، χ_p و χ_f به ترتیب حجم ذره (با واحد متر مربع)، پذیرفتاری مغناطیسی ذره، و پذیرفتاری مغناطیسی سیال حامل ذره می‌باشند. و نیز نیروی اعمالی به ذره بر اساس رابطه (۱۷) با میدان مغناطیسی اعمالی مرتبط است.

$$d_p / x_c \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)، $\vec{B} = \mu \vec{H}$ (با واحد تسلا) و $\vec{m} = \chi V \vec{H}$ (با واحد آمپر بر متر).

در شبیه‌سازی‌های توزیع انرژی انجام شده به وسیله نرم افزار کامسول، حوزه مطالعه ایستا و فیزیک مغناطیس انتخاب شد. به منظور تعیین شرایط مرزی، طرح مغناطیسی در مرکز مکعبی به ابعاد ۱۰۰۰ میکرومتر قرار داده شد و میدان مغناطیسی (۸۰۰۰ آمپر بر متر) در وجوه آن تعیین شد. بدین ترتیب میدان مغناطیسی خارجی اعمالی تعیین شد. جنس ماده مدارهای مغناطیسی پرملوی با نفوذپذیری مغناطیسی نسبی ۱۰۰۰۰۰ انتخاب شد. پس از انتخاب شبکه مناسب که در آن نتایج همگرا شدند، تعداد ۳۵۲۵۵۸۹ واحد ایجاد شد.

به منظور محاسبه حرکت ذرات در تحلیل‌های تصادفی، با جایگذاری روابط (۱۷-۱۵) در رابطه (۱۴)، سرعت لحظه‌ای ذره بدست آمد. سپس، مکان ذره در لحظه t ، بر اساس مکان آن در لحظه $t-1$ (به ترتیب، r_{i-1} و r_i)، از رابطه $\vec{r}_i = \vec{r}_{i-1} + \vec{v}_{i-1} \Delta t$ بدست آمد. در این رابطه، زمان بین دو لحظه (با واحد ثانیه) بوده و v از رابطه (۱۴) جایگذاری می‌گردد. در این محاسبات، ضریب لزجت سیال حامل ذرات ۰/۸ (mPa.s) و به عنوان ماده ای غیرمغناطیسی در نظر گرفته شد. همچنین ذرات مغناطیسی به عنوان دوقطبی‌های مغناطیسی در نظر گرفته شدند که نیرو به مرکز آنها اعمال می‌شود و مغناطیس پذیری آنها ۰/۰۵ است.



شکل ۲. شبیه‌سازی انرژی مغناطیسی و اعتبارسنجی تجربی نتایج. الف) یک قرص مغناطیسی که در میدان مغناطیسی موازی صفحه قرار گرفته است. ب) آزمایش تجربی قرص مغناطیسی در میدان مغناطیسی و نمایش جذب ذرات مغناطیسی در دو چاه انرژی متناظر بخش (الف). پ) یک شمش مغناطیسی که در میدان مغناطیسی موازی صفحه قرار گرفته است. ت) یک شمش مغناطیسی که در یک میدان مغناطیسی سه بعدی قرار گرفته است. ث) یک ذره مغناطیسی در حال حرکت بر روی مسیر مغناطیسی TI و مقایسه مسیر حرکت آن ذره بر اساس شبیه‌سازی (نقطه چین مشکی) و آزمایش تجربی (نقاط قرمز) نشان داده شده است. ج-خ) نتایج شبیه‌سازی توزیع انرژی در طرح TI در زوایای مختلف نمایش داده شده است. ذ-س) نتایج آزمایش تجربی معادل شبیه‌سازی‌های ارائه شده در شکل‌های ج-خ (زمان و زاویه میدان مغناطیسی مساوی) نمایش داده شده است. د) نتایج آزمایش تجربی مسیر حرکت سلول زنده بر روی مسیر TI (نقاط قرمز) با پیش‌بینی مسیر حرکت بر اساس شبیه‌سازی (نقطه چین مشکی) مقایسه شده است. ش) تراشه ساخته شده نمایش داده شده است. فلش‌های مشکی رنگ نماینده جهت میدان مغناطیسی خارجی و فلش‌های دوار نماینده جهت چرخش میدان دوار می‌باشند. نقطه کنار فلش نمایش‌دهنده مولفه عمود بر سطح میدان است. در شبیه‌سازی‌ها نواحی آبی و قرمز، به ترتیب، کمینه و بیشینه انرژی را نمایش می‌دهند.

Fig. 2. Magnetic energy simulation and experimental validation of the results. a) A magnetic disk in an in-plane magnetic field. b) The experimental tests of a magnetic disk in a magnetic field and illustration of attraction of magnetic particles in two energy wells corresponding to (a). c) A magnetic bar in an in-plane magnetic field. d) A magnetic bar in a tri-axial magnetic field. e) A magnetic particle moving along a TI magnetic track, and the comparison of its trajectories based on simulations (black dotted line) and experiments (red dots). e-h) The energy distribution simulation results for the TI design at various angles are shown. j-m) Experimental results corresponding to the simulations in (e-h) (equivalent time and magnetic field angles) are illustrated. i) Cell experimental trajectory on the TI track (red dots) is compared with the simulation predicted trajectory (black dotted line). n) The fabricated chip is presented. The black arrows represent the magnetic field direction and the circular arrows stand for the magnetic field rotation. The dot close to the arrow depicts the vertical component of the magnetic field. In simulations, the blue and red regions stand for the regions with low and high energies, respectively.

است. عملکرد این طرح با اجرای شبیه سازی‌های لازم برای پارامترهای مختلف مطالعه گردید. یکی از پارامترهای مهم، زاویه‌ای است که میدان مغناطیسی اعمالی با راستای عمود بر سطح می‌سازد (از این پس این زاویه را زاویه مخروطی (α) میدان می‌نامیم) (شکل ۱ را ببینید). مناسب‌ترین زاویه مخروطی برای عملکرد مناسب طرح TI، بر اساس نتایج آزمایش‌های تجربی کارهای گذشته، حدود ۴۵ درجه است [۳۵]. به همین دلیل، شبیه‌سازی‌های کار حاضر نیز زاویه مخروطی ۴۵ درجه برای میدان اعمالی انتخاب شده است، تا در عملکرد مدارهای اصلی TI اختلالی پیش نیاید.

فرکانس گردش میدان اعمالی یکی دیگر از عوامل مهم در عملکرد تراشه است. در فرکانس‌های پایین (کمتر از ۰/۱ هرتز)، چاهک‌های مغناطیسی با سرعتی کمتر حرکت داده می‌شوند و ذرات فرصت دنبال نمودن این چاهک‌ها را دارند. اما در فرکانس‌های بالاتر، ذرات به وسیله نیروی پسا اعمال شده از سوی سیال به آن‌ها از دنبال کردن چاه‌ها بازداشته می‌شوند. در نتیجه، حرکت ذره وابسته به دو نیروی مغناطیسی و پسا است. نیروی پسا به شعاع ذرات بستگی دارد. همچنین نیروی مغناطیسی به میزان خاصیت مغناطیسی ذرات وابسته است. در نتیجه، در اینجا با استفاده از رابطه (۱۳) تحلیل تصادفی (توزیع نرمال اندازه و پذیرفتاری مغناطیسی ذرات) راندمان خازن معرفی شده در ذخیره‌سازی ذرات بررسی شده و نتایج آن در شکل ۴ آمده است. بر اساس این نتایج، عملکرد طرح مورد نظر در فرکانس‌های پایین (کمتر از ۰/۱ هرتز)، با راندمان بالاتری همراه است (یعنی درصد بیشتری از ذرات وارد خازن می‌شوند).

از آنجایی که کاربرد اصلی مدارهای جنبش مغناطیسی در آنالیز تک ذره ای است، معمولاً هدف تراشه معرفی شده ذخیره‌سازی یک ذره (و یا دو ذره، در آزمایش‌های بررسی اثر دو ذره بر روی هم) در هر خازن است. به این ترتیب، در آرایه‌ای از خازن‌ها بر روی تراشه، تعداد زیادی تک (یا جفت) ذره چیده می‌شوند. اما در صورتی که در کاربردی خاص، ذخیره‌سازی تعداد بیشتری ذره مورد نیاز باشد با در نظر گرفتن حداکثر یک ذره در هر دوره تناوب طرح رسانای مغناطیسی، فرکانس ۰/۱ هرتز، و راندمان ۹۸ درصد، نرخ بارگذاری خازن ۵/۸۸ ذره در دقیقه است.

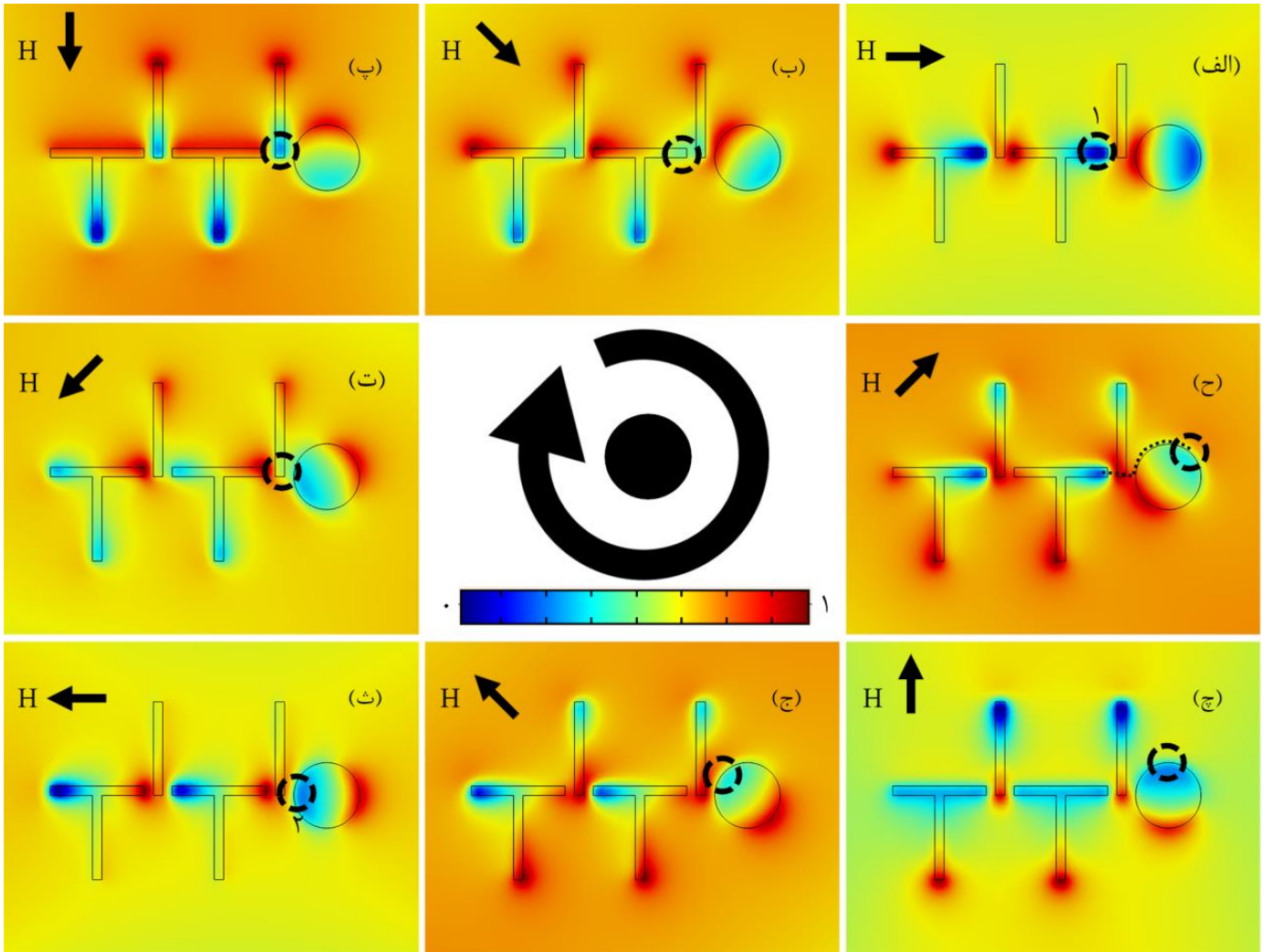
برای مطالعه اصولی اثر اندازه ذرات، پارامترهای بی بعد $\beta_x = d_p / x_g$ و $\beta_y = d_p / y_g$ تعریف می‌شوند که در آن‌ها d_p ، x_p و y_p به ترتیب قطر ذره مغناطیسی، فاصله I با T در راستای X و این فاصله در راستای Y (واحد متر) می‌باشند (شکل ۱ را ببینید). برای انتقال مناسب ذرات در طرح TI، نیاز است β_x و β_y بزرگتر از ۲/۶ باشند. اما در طرح خازن، علاوه بر پارامترهای

را تایید کرد. برای بررسی دقیق‌تر، نتایج شبیه‌سازی‌ها در چهار لحظه مهم، که در آنها میدان مغناطیسی در راستای شمش‌های مغناطیسی قرار دارد، در شکل‌های ۲(ج-خ) آورده شده است. این نتایج با نتایج آزمایش تجربی معادل آنها (در همان لحظات)، که در شکل‌های ۲(د-س) نمایش داده شده‌اند، مقایسه شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود همخوانی در تمام این لحظات وجود دارد. بدین ترتیب، مدل مورد استفاده به صورتی مناسب عمل می‌کند و می‌توان از آن برای شبیه‌سازی سایر طرح‌های مدارهای جنبش مغناطیسی استفاده نمود.

به منظور ساخت تراشه‌ها، ابتدا تراشه سیلیکونی با استفاده از استون و الکل تمیز شده و با گاز نیتروژن خشک گردید. سپس طرح مورد نظر با استفاده از روش لیتوگرافی نوری در ماده حساس به نور منفی NFR16D2 بر روی تراشه ایجاد شد. در مرحله بعد، با استفاده از روش لایه‌نشانی بر روی سطح تراشه، یک فیلم نازک ۵ نانومتری تیتانیوم و بر روی آن، یک فیلم نازک با ضخامت ۱۰۰ نانومتر از جنس پرمولوی ایجاد گردید. سپس تراشه در استون قرار داده شد، تا قسمت‌های اضافی از تراشه جدا شوند و طرح مغناطیسی مورد نظر بر تراشه باقی بماند. تصویری از تراشه ساخته شده در شکل ۲(ش) نمایش داده شده است.

۴- نتایج

پس از اطمینان از عملکرد مناسب روش شبیه‌سازی مورد استفاده و مقایسه نتایج با نتایج تجربی، از این روش برای طراحی عنصر مداری جدید مورد نظر استفاده شد. پس از انتقال ذرات، نیاز به ذخیره‌سازی آن‌ها در مکان‌های مورد نظر است. عنصر مداری که این هدف را ممکن می‌سازد و با ذخیره‌سازی ذرات از انتقال آن‌ها به مکان‌های دیگر جلوگیری می‌کند، خازن نامیده می‌شود. نوع ساده خازن می‌تواند از یک قرص استوانه‌ای مغناطیسی تشکیل شود. همانطور که در نتایج شبیه‌سازی‌ها در شکل ۳ برای زوایای مختلف در یک دور گردش میدان مغناطیسی خارجی ملاحظه می‌شود، ذره مغناطیسی پس از انتقال در راستای مسیر TI، به قرص با شعاع ۷ میکرومتر رسیده، به آن منتقل شده، و به دور آن می‌گردد. در این شکل ذره از نقطه ۱ در بخش (الف)، با گردش میدان مغناطیسی خارجی، بر روی مسیر TI شروع به دنبال نمودن چاه انرژی (ناحیه آبی رنگ) کرده و حرکت می‌کند. این ذره در بخش (ث) در نقطه ۲ به خازن وارد شده، تا آخر (بخش ح)) در آنجا باقی مانده و به سایر بخش‌های مدار منتقل نمی‌شوند. مسیر حرکت ذره در این پروسه در شکل ۳(ح) با خطچین مشکی رنگ نمایش داده شده

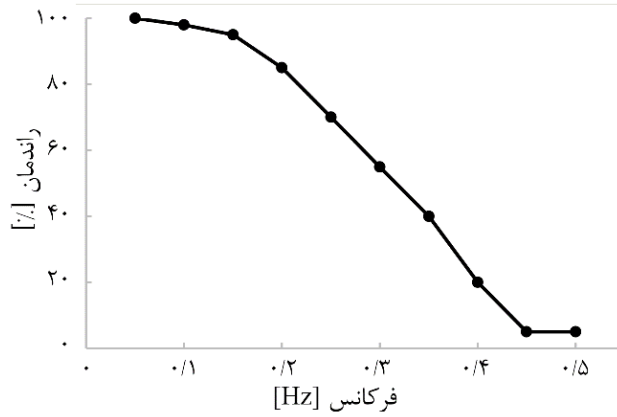


شکل ۳. خازن با طرح قرص مغناطیسی برای مسیر مغناطیسی مبتنی بر طرح TI. مسیر حرکت ذره از نقطه ۱ بر روی مسیر TI تا نقطه ۲ در داخل خازن (ث) و پس از آن (ح - ج) نمایش داده شده است. خازن قرصی با شعاع ۷ میکرومتر است. در اینجا فلش‌های کوچک نشان‌دهنده جهت میدان مغناطیسی خارجی (H) در هر بخش بوده و فلش چرخان مرکزی جهت گردش میدان را نمایش می‌دهد. مولفه میدان عمود بر صفحه در تمام مراحل علاوه بر میدان گردان داخل صفحه اعمال شده است. نواحی آبی و قرمز، به ترتیب، نشان‌دهنده نواحی با کمینه و بیشینه انرژی می‌باشند. دایره خط‌چین مکان ذره را در هر میدان نمایش می‌دهد. نقطه چین در بخش (ح) مسیر حرکت ذره در کل فرایند را نشان می‌دهد.

Fig. 3. The capacitor with the disk design for the magnetic track based on the TI design. The particle trajectory from point 1 on the TI path to point 2 inside the capacitor (e) and after that (f-g) is shown. The disk radius is 7 μm . Here, the small arrows represent the external magnetic field (H) direction at each panel and the circular arrow at the center shows the magnetic field rotation. The magnetic field vertical component in all steps in addition to the rotating field is applied. The blue and red regions stand for the regions with low and high energies, respectively. The dotted line in (h) shows the full particle trajectory.

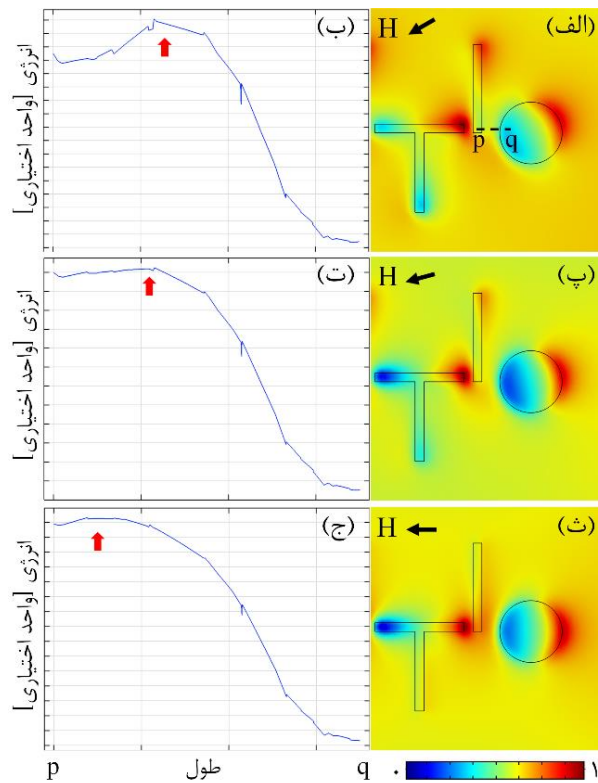
برای هر زاویه میدان مغناطیسی اعمال نمایش داده شده است. این سد انرژی که در نمودارهای شکل ۴ (ب، ت و ج) به سادگی دیده شده و با فلش قرمز نشان داده شده‌اند، در زاویه‌های مختلف باقی می‌ماند. اما با انتخاب β_c مناسب، سد انرژی از بین می‌رود (مانند نتایج شبیه‌سازی انجام شده در شکل ۳). بر اساس شبیه‌سازی‌های ما و β_c مورد نیاز، اضافه شدن این خازن به طرح، محدودیتی در عملکرد سیستم ایجاد نمی‌کند.

ذکر شده، نیاز به بررسی فاصله میان قرص و طرح TI نیز می‌باشد. این پارامتر با $\beta_c = d_p / x_c$ تعریف می‌شود. بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده، با انتخاب β_c بزرگتر از ۱/۶، انتقال ذره مناسب انجام می‌پذیرد. در شکل ۵، نتایج این تحلیل برای مثالی از انتخاب نامناسب ($\beta_c = 1$) نمایش داده شده است که در آن ذخیره‌سازی ذره در خازن به دلیل سد انرژی موجود بین مسیر TI و خازن اتفاق نمی‌افتد. برای مشاهده بهتر سد انرژی موجود، منحنی تغییرات انرژی در راستای خط pq (مشخص شده در شکل ۵ (الف))



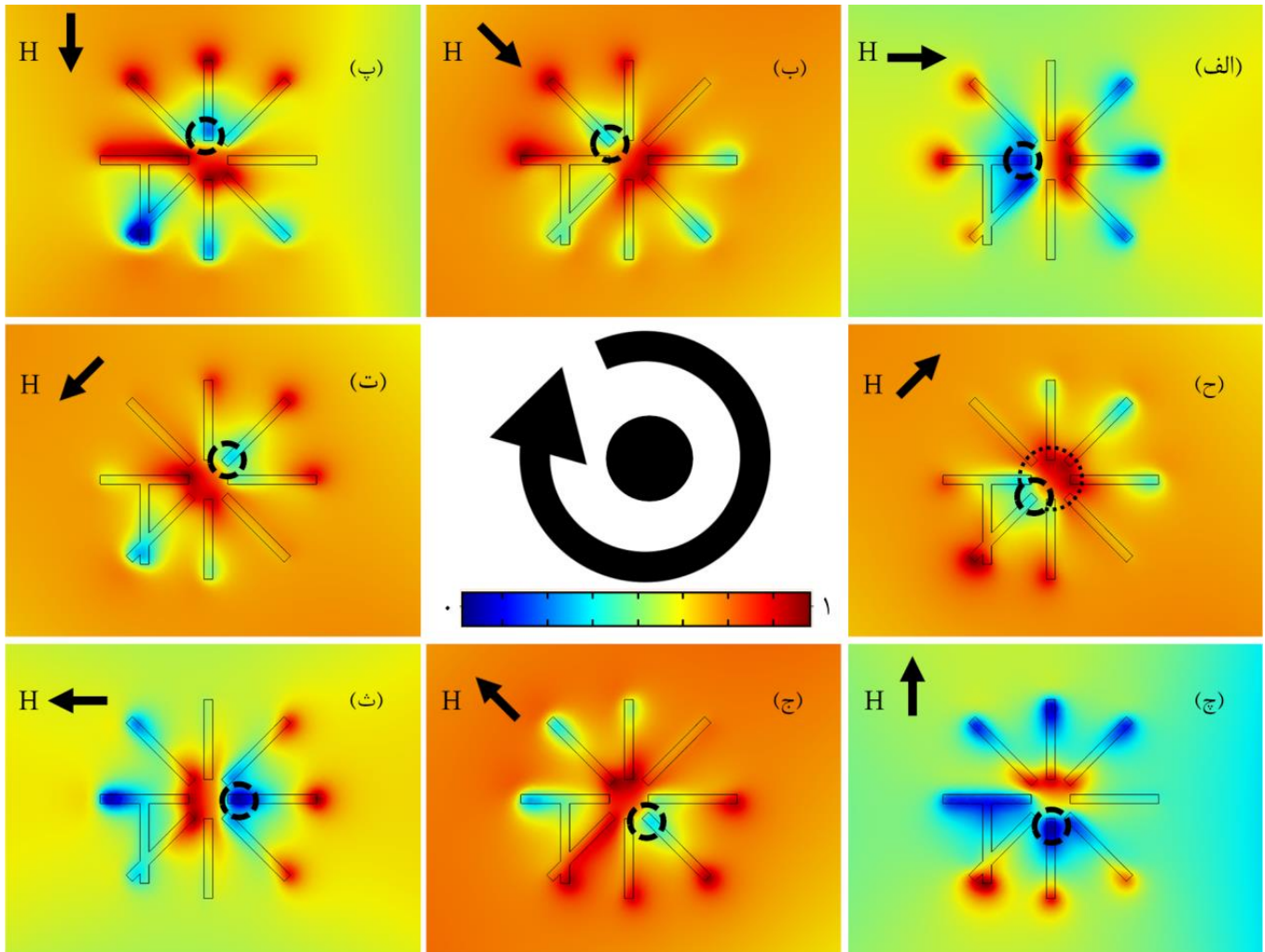
شکل ۴. راندمان عملکرد خازن شکل ۳ در ذخیره‌سازی ذرات بر حسب فرکانس میدان مغناطیسی اعمالی. میانگین شعاع این ذرات ۴/۲ میکرومتر است.

Fig. 4. The particle loading efficiency of the capacitor of Fig. 3 as a function of the applied magnetic field frequency. The average radius of particles is 4.2 μm .



شکل ۵. شبیه‌سازی انرژی مغناطیسی خازن قرصی برای حالت $\beta c=1$ (قطر ذره و فاصله بین قرص و شمش ورودی هر کدام ۴ میکرومتر می‌باشند). در بخش‌های (الف، پ و ت) نواحی آبی رنگ و قرمز رنگ، به ترتیب، نماینده نواحی با انرژی کم و زیاد می‌باشند. نمودارهای انرژی در راستای مسیر pq (بخش الف را ببینید) برای زوایای میدان مغناطیسی خارجی نمایش داده شده در بخش‌های الف، پ و ت، به ترتیب، در بخش‌های پ، ت و ج نمایش داده شده‌اند. فلش‌های کوچک مشکی رنگ جهت میدان مغناطیسی اعمالی را نشان می‌دهند که در هر مرحله ۱۵ درجه به زاویه میدان اضافه شده است. فلش‌های کوچک قرمز رنگ سد انرژی موجود بین شمش و خازن را نمایش می‌دهد.

Fig. 5. Magnetic energy simulation results for disk capacitor for $\beta c=1$ (the particle diameter and the gap size are both 4 μm). In panels (a, c, and e), the blue and red regions stand for the regions with low and high energies, respectively. Energy plots along the pq path (See panel (a)) for the shown external magnetic field directions illustrated in panels (a, c, and e) are presented in (b, d, and f), respectively. The small black arrows depict the applied magnetic field direction, which is changed by 15° at each step. The small red arrows show the energy barrier between the bar and the capacitor.

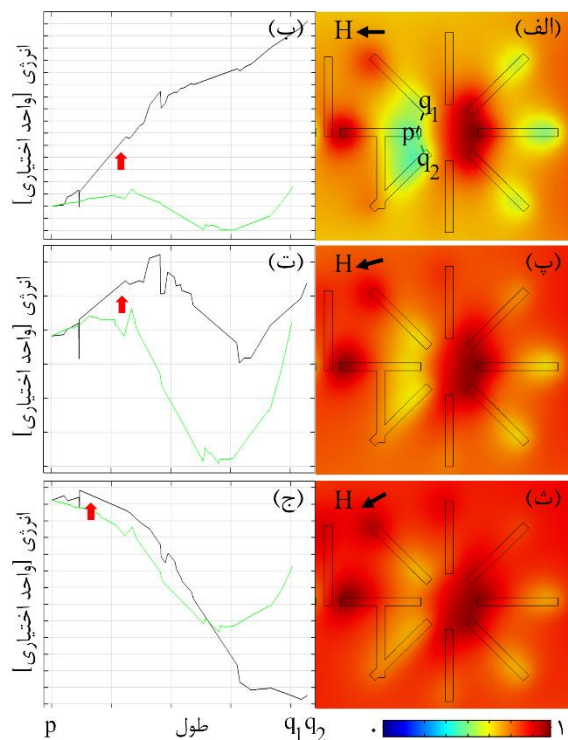


شکل ۶. خازن با طرح شمش مغناطیسی برای مسیر مغناطیسی مبتنی بر طرح TI. ذره مغناطیسی از T در سمت چپ طرح در بخش الف وارد خازن شده و با گردش میدان (ب-ح) در خازن باقی می‌ماند. در اینجا فلش‌های کوچک نشان‌دهنده جهت میدان مغناطیسی خارجی (H) در هر بخش بوده و فلش چرخان مرکزی جهت گردش میدان را نمایش می‌دهد. میدان عمود بر صفحه در تمام مراحل علاوه بر میدان گردان داخل صفحه اعمال شده است. نواحی آبی و قرمز، به ترتیب، نشان‌دهنده نواحی با کمینه و بیشینه انرژی می‌باشند. دایره خط‌چین مکان ذره را در هر میدان نمایش می‌دهد. نقطه چین در بخش (ح) مسیر حرکت ذره در کل فرایند را نشان می‌دهد.

Fig. 6. Capacitor with magnetic bar design for the magnetic track based on the TI design. The magnetic particle enters from the left T in (a) into the capacitor, and by rotation of the magnetic field in (b-h) remains in the capacitor. Here, the small arrows represent the external magnetic field (H) direction at each panel and the circular arrow at the center shows the magnetic field rotation. The magnetic field vertical component in all steps in addition to the rotating field is applied. The blue and red regions stand for the regions with low and high energies, respectively. The dotted line in (h) shows the full particle trajectory.

بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده، در اینجا نیز باید فاصله دو شمش و اندازه ذره به نوعی باشند که نسبت آنها (β) از $\frac{2}{6}$ بزرگتر باشد. نتایج شبیه‌سازی‌های انرژی، برای حالتی که این رابطه برقرار نباشد، در شکل ۷ نمایش داده شده است. منحنی‌های انرژی در راستای مسیرهای pq_1 و pq_2 ، برای مشاهده راحت‌تر سدهای انرژی در شکل‌های ۷ (ب، ت و ج) نمایش داده شده‌اند. در اینجا، که قطر ذره ۵ میکرومتر و فاصله دو شمش مجاور در خازن ۴ میکرومتر در نظر گرفته شده است، ذره در ابتدا در شکل

اما از آنجایی که طرح اصلی در این مدارها (TI) بر اساس ترکیب شمش‌ها می‌باشد، در اینجا خازن دومی معرفی می‌گردد که خود از ترکیب شمش‌ها و قرار گرفتن آن‌ها در مسیری دایره‌ای به وجود آمده است. نتایج شبیه‌سازی این طرح در زوایای مختلف، در یک دور گردش میدان، در شکل ۶ نمایش داده شده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ها، ذره پس از ورود به خازن از طریق T در سمت چپ طرح شکل ۶(الف)، با چرخش میدان، از یک شمش به شمش دیگر منتقل شده و در داخل خازن باقی می‌ماند.



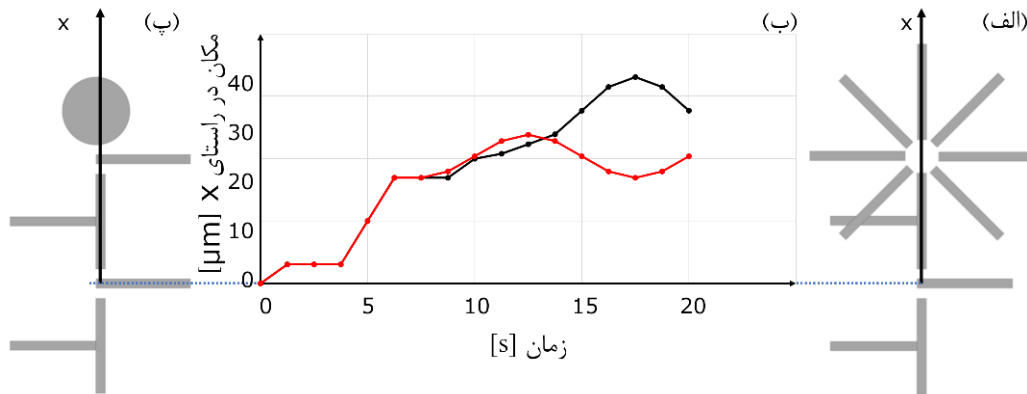
شکل ۷. شبیه‌سازی انرژی مغناطیسی خازن با طرح شمش مغناطیسی برای حالت $\beta c = 1/25$ (قطر ذره ۴ میکرومتر و فاصله بین دو شمش ۴ میکرومتر می‌باشند). در بخش‌های (الف، پ و ث) نواحی آبی و قرمز، به ترتیب، نماینده نواحی با انرژی کم و زیاد می‌باشند. نمودارهای انرژی در راستای مسیرهای pq_1 و pq_2 (بخش الف را ببینید) برای زوایای میدان مغناطیسی خارجی نمایش داده شده در بخش‌های الف، پ و ث، به ترتیب، در بخش‌های ب، ت و ج نمایش داده شده‌اند. فلش‌های کوچک مشکی جهت میدان مغناطیسی اعمالی را نشان می‌دهند که در هر مرحله ۱۵ درجه به زاویه میدان اضافه شده است. فلش‌های کوچک قرمز سد انرژی موجود بین T ورودی خازن و شمش هدف در داخل خازن را نمایش می‌دهد.

Fig. 7. Magnetic energy simulation results for the bar capacitor for $\beta c = 1.25$ (the particle diameter and the gap between the two bars are both 4 μm). In panels (a, c, and e), the blue and red regions stand for the regions with low and high energies, respectively. Energy plots along the pq_1 and pq_2 paths (See panel (a)) for the shown external magnetic field directions illustrated in panels (a, c, and e) are presented in (b, d, and f), respectively. The small black arrows depict the applied magnetic field direction, which is changed by 15° at each step. The small red arrows show the energy barrier between the inlet T and the target bar inside the capacitor.

راستای محور X) را در خازن‌های این طرح‌ها بر حسب زمان نشان می‌دهند. فرکانس میدان خارجی 0.1 هرتز در نظر گرفته شده و مسیرهای طی شده در دو دوره تناوب اتفاق افتاده است. در این بررسی، ذره مورد نظر به ترتیب پس از $6/26$ و $12/5$ ثانیه وارد خازن‌های نمایش داده شده در شکل‌های ۸ (الف) و ۸ (پ) شده است.

کمیت دیگری که از نمودار شکل ۸ (ب) دریافت می‌شود سرعت حرکت ذره است. اما در واقع آنچه اهمیت دارد و می‌تواند نشان دهنده نحوه عملکرد دستگاه باشد، سرعت متوسط ذرات در طول مسیر حرکت است. این سرعت از رابطه $v = fd$ محاسبه می‌شود که در آن f و d ، به ترتیب، فرکانس میدان مغناطیسی گردان اعمالی به تراشه و دوره تناوب تراشه (فاصله یک

۷) (الف) در نقطه p قرار دارد. هدف رساندن ذره به نقطه q_1 در خازن است. اما به دلیل عدم انتخاب β مناسب، ذره به جای q_1 به q_2 منتقل می‌شود. دلیل این امر وجود سد پتانسیل در مسیر pq_1 (که با فلش کوچک قرمز نمایش داده شده است) و عدم وجود آن در مسیر pq_2 در شکل ۷ (ج) است. شکل ۸ تغییرات مکان ذره در راستای محور X بر حسب زمان را در دو خازن معرفی شده نمایش می‌دهند. راستای X راستای انتقال ذرات در رسانای مغناطیسی به سمت خازن معرفی شده بوده و به همین دلیل حرکت ذره در این راستا مد نظر است. شکل‌های ۸ (الف) و ۸ (پ)، به ترتیب شماتیک خازن‌های نمایش داده شده در شکل‌های ۳ و ۶ را نشان می‌دهند و متحنی‌های قرمز و مشکی در شکل ۸ (ب)، به ترتیب موقعیت مکانی ذره (در



شکل ۸. (الف و پ) طرح مربوط به دو خازن معرفی شده نمایش داده شده است. (ب) نمودارهای تغییرات مکانی ذره در راستای محور x بر حسب زمان در فرکانس 0.1 هرتز برای خازن‌های نمایش داده شده در (الف) و (پ)، به ترتیب، با منحنی‌های قرمز و مشکی نمایش داده شده‌اند. نقطه‌چین‌های آبی به منظور مشخص نمودن نقطه شروع حرکت ذره در دو طرح رسم شده‌اند. بازه تکرار طرح مورد نظر 26 میکرومتر در نظر گرفته شده است.

Fig. 8. a and c) The two capacitor designs are shown. b) The position change at x -direction versus time at a frequency of 0.1 Hz for the capacitors shown in (a and c) are illustrated with the red and black curves, respectively. The blue dotted line is placed to define the particle movement starting point in the two designs. The periodicity of the design is considered to be $26 \mu\text{m}$.

استفاده گردید که با وجود سادگی به نحوی مناسب عمل کرده و محدودیتی در عملکرد مدارهای TI ایجاد نمی‌کند. از آنجایی که شعاع قرص می‌تواند کوچک باشد، این خازن فضای کمی بر روی تراشه اشغال می‌کند. اما با توجه به اینکه ذره، پس از ورود به خازن، در مسیر خارجی (دور) قرص حرکت می‌کند، اگر به هر دلیل ناخواسته‌ای (مانند اغتشاش و ...) ذره از خازن دور شود، ممکن است به آن باز نگردد. در طراحی دوم، از خود طرح TI استفاده گردید و خازنی شامل شمش‌های مغناطیسی مهندسی شد. در این طرح، ذره پس از ورود به خازن، در مسیر داخلی آن حرکت می‌کند و به نوعی در مقابل اغتشاش‌های کوچک مقاوم است. از آنجایی که شعاع داخلی این طرح و فاصله شمش‌های خازن از یکدیگر از مقداری کمتر نمی‌تواند باشد، این خازن نسبت به خازن قرصی فضای بیشتری را بر روی تراشه اشغال می‌کند. با شبیه‌سازی توزیع انرژی مغناطیسی و مسیر حرکت ذرات، هندسه هر دو طرح و ذرات قابل ذخیره بررسی شدند. در فرکانس کاری 0.1 هرتز راندمان ذخیره‌سازی ذره معادل 98 درصد به دست آمد که در فرکانس‌های پایین‌تر این راندمان افزایش می‌یابد. سرعت میانگین ذره در تراشه معرفی شده $2/6$ میکرومتر بر ثانیه است. با استفاده از نتایج حاصل از این پژوهش و پارامترهای معرفی شده، می‌توان مدارهای جنبش مغناطیسی تکمیل شده را ساخت. این مدارها می‌توانند در پروژه‌های مهمی از جمله مطالعه تک‌سلولی در علوم زیستی و پزشکی مورد استفاده قرار گیرند.

I با I بعدی) می‌باشند. در صورتی که مقادیر f و d ، به ترتیب، 0.1 هرتز و 26 میکرومتر در نظر گرفته شوند، سرعت میانگین حرکت ذرات بر روی تراشه $2/6$ میکرومتر بر ثانیه خواهد بود. از آنجایی که حرکت ذرات با میدان مغناطیسی خارجی اعمالی همگام است، سرعت آن‌ها تابعی از فرکانس اعمالی است ($v \propto f$). این پدیده مشابه قانون اهم در مدارهای الکتریکی است که در آن جریان الکتریکی (و سرعت حرکت الکترون‌ها) در راستای هادی تابعی از ولتاژ اعمالی (V) است ($v \propto V$).

علاوه بر واکاوی ذکر شده، با استفاده از مدل شبه تحلیلی، این نوع خازن نیز مورد آنالیز تصادفی قرار گرفت. بر اساس نتایج این تحلیل، این خازن در فرکانس‌های پایین (کمتر از 0.1 هرتز) راندمانی شبیه به آنچه در مورد خازن قرصی گفته شد (شکل ۴) نشان می‌دهد و به همان صورت با افزایش فرکانس، راندمان افت می‌کند. در نتیجه از نظر فرکانس کاری تفاوتی بین این دو نوع خازن وجود ندارد.

۵- نتیجه گیری

مدارهای جنبش مغناطیسی، با توانایی انتقال دقیق ذرات مغناطیسی بر روی تراشه، قابلیت‌های زیادی در حوزه آزمایشگاه بر روی تراشه ارائه می‌دهند. در این کار پژوهشی، دو خازن در مدارهای جنبش مغناطیسی مبتنی بر طرح TI که قابلیت ذخیره‌سازی تک‌ذرات در میدان‌های سه‌بعدی را دارند، معرفی شدند. در طراحی اول، از یک قرص استوانه‌ای مغناطیسی

۶- فهرست علائم

x_p	فاصله I با T در راستای x (m)	F	نیروی کلی اعمال شده به ذره (N)
y_p	فاصله I با T در راستای y (m)	F_{mag}	نیروی مغناطیسی (N)
x_c	فاصله میان قرص و طرح TI (m)	F_{vis}	نیروی لزجت (N)
d	دوره تناوب تراشه (فاصله یک I با I بعدی) (m)	F_f	نیروی اصطکاک (N)
		F_{br}	نیروی براونی (N)
		φ_{out}	پتانسیل خارج از بیضوی پخ در اثر اعمال یک میدان خارجی یکنواخت (V)
		φ_{in}	پتانسیل داخل بیضوی پخ در اثر اعمال یک میدان خارجی یکنواخت (V)
		φ_{ext}	پتانسیل حاصل از میدان اعمالی خارجی در اثر اعمال یک میدان خارجی یکنواخت (V)
		φ_{mag}	پتانسیل حاصل از مغناطیسه شدن بیضوی پخ در اثر اعمال یک میدان خارجی یکنواخت (V)
		μ_0	تراوایی مغناطیسی خلاء (H/m^2)
		μ_1	تراوایی مغناطیسی پرملوی (H/m^2)
		h_{ξ}	ثابت
		H_{ext}	میدان مغناطیسی خارجی اعمالی (A/m)
		H_{out}	میدان مغناطیسی حاصل از مغناطیسه شدن ماده مغناطیسی
		τ	ضریب تصحیح برای تطبیق نتایج مدل خطی با مدل بیضوی پخ
		σ	چگالی بار الکتریکی (C)
		λ	چگالی بار خطی (C)
		V	سرعت ذره (m/s)
		η_f	ضریب لزجت مایع (mPa.s)
		r_p	شعاع ذره (m)
		d_p	قطر ذره (m)
		U	انرژی (J)
		V_p	حجم ذره (m^3)
		χ_p	پذیرفتاری مغناطیسی ذره
		χ_f	پذیرفتاری مغناطیسی سیال حامل ذره
		B	چگالی شار مغناطیسی (T)
		M	ممان مغناطیسی (A/m)
		r_i	مکان ذره در لحظه i
		Δt	تغییرات زمان
		f	فرکانس (Hz)
		β_x	پارامتر بی بعدسازی d_p / x_g
		β_y	پارامتر بی بعدسازی d_p / y_g
		β_c	پارامتر بی بعدسازی d_p / x_c

منابع

- [1] Y.M. Bae, B. Jeong, J.-I. Kim, D.-G. Kang, K.Y. Shin, D.-W. Yoo, Array of 3D permanent micromagnet for immunomagnetic separation, Journal of Micromechanics and Microengineering, 29(8) (2019) 085007.
- [2] L.F. Huergo, K.A. Selim, M.S. Conzentino, E.C.M. Gerhardt, A.R.S. Santos, B. Wagner, J.T. Alford, N. Deobald, F.O. Pedrosa, E.M. de Souza, M.B. Nogueira, S.M. Raboni, D. Souto, F.G.M. Rego, D.L. Zanette, M.N. Aoki, J.M. Nardin, B. Fornazari, H.M.P. Morales, V.A. Borges, A. Nelde, J.S. Walz, M. Becker, N. Schneiderhan-Marra, U. Rothbauer, R.A. Reis, K. Forchhammer, Magnetic Bead-Based Immunoassay Allows Rapid, Inexpensive, and Quantitative Detection of Human SARS-CoV-2 Antibodies, ACS Sens, 6(3) (2021) 703-708.
- [3] R. Abedini-Nassab, M. Pouryosef Miandoab, M. Şaşmaz, Microfluidic Synthesis, Control, and Sensing of Magnetic Nanoparticles. A Review, Micromachines, 12(7) (2021) 768.
- [4] R. Abedini-Nassab, M. Eslamian, Recent patents and advances on applications of magnetic nanoparticles and thin films in cell manipulation, Recent Pat Nanotechnol, 8(3) (2014) 157-164.
- [5] D. Di Carlo, D. Irimia, R.G. Tompkins, M. Toner, Continuous inertial focusing, ordering, and separation of particles in microchannels, Proc Natl Acad Sci U S A, 104(48) (2007) 18892-18897.
- [6] S.T. Gebreyesus, A.A. Siyal, R.B. Kitata, E.S. Chen, B. Enkhbayar, T. Angata, K.I. Lin, Y.J. Chen, H.L. Tu, Streamlined single-cell proteomics by an integrated microfluidic chip and data-independent acquisition mass spectrometry, Nat Commun, 13(1) (2022) 37.
- [7] R. Abedini-Nassab, S.M. Emami, A.N. Nowghabi, Nanotechnology and Acoustics in Medicine and Biology,

- transcriptomics approach, *Sci Rep*, 10 (2020) 18433.
- [17] R.S. Molday, S.P. Yen, A. Rembaum, Application of magnetic microspheres in labelling and separation of cells, *Nature*, 268(5619) (1977) 437-438.
- [18] K.Y. Lien, J.L. Lin, C.Y. Liu, H.Y. Lei, G.B. Lee, Purification and enrichment of virus samples utilizing magnetic beads on a microfluidic system, *Lab Chip*, 7(7) (2007) 868-875.
- [19] D.G. Rackus, M.D. Dryden, J. Lamanna, A. Zaragoza, B. Lam, S.O. Kelley, A.R. Wheeler, A digital microfluidic device with integrated nanostructured microelectrodes for electrochemical immunoassays, *Lab Chip*, 15(18) (2015) 3776-3784.
- [20] Z.H. Fan, S. Mangru, R. Granzow, P. Heaney, W. Ho, Q. Dong, R. Kumar, Dynamic DNA hybridization on a chip using paramagnetic beads, *Anal Chem*, 71(21) (1999) 4851-4859.
- [21] X. Shi, C.H. Chen, W. Gao, S.H. Chao, D.R. Meldrum, Parallel RNA extraction using magnetic beads and a droplet array, *Lab Chip*, 15(4) (2015) 1059-1065.
- [22] S. Klein, T.G. Muller, D. Khalid, V. Sonntag-Buck, A.M. Heuser, B. Glass, M. Meurer, I. Morales, A. Schillak, A. Freistaedter, I. Ambiel, S.L. Winter, L. Zimmermann, T. Naumoska, F. Bubeck, D. Kirrmaier, S. Ullrich, I. Barreto Miranda, S. Anders, D. Grimm, P. Schnitzler, M. Knop, H.G. Krausslich, V.L. Dao Thi, K. Borner, P. Chlanda, SARS-CoV-2 RNA Extraction Using Magnetic Beads for Rapid Large-Scale Testing by RT-qPCR and RT-LAMP, *Viruses*, 12(8) (2020) 863.
- [23] S. Berensmeier, Magnetic particles for the separation and purification of nucleic acids, *Appl Microbiol Biotechnol*, 73(3) (2006) 495-504.
- [24] M. Heiss, F. Hagelskamp, V. Marchand, Y. Motorin, S. Kellner, Cell culture NAIL-MS allows insight into human tRNA and rRNA modification dynamics in vivo, *Nat Commun*, 12(1) (2021) 389.
- [25] A. Shamloo, A. Naghdloo, M. Besanjideh, Cancer cell enrichment on a centrifugal microfluidic platform using hydrodynamic and magnetophoretic techniques, *Sci Rep*, 11(1) (2021) 1939.
- Recent Pat Nanotechnol, 16(3) (2022) 198-206.
- [8] W. Connacher, N. Zhang, A. Huang, J. Mei, S. Zhang, T. Gopesh, J. Friend, Micro/nano acoustofluidics. materials, phenomena, design, devices, and applications, *Lab Chip*, 18(14) (2018) 1952-1996.
- [9] Y. Zhang, X. Chen, Particle separation in microfluidics using different modal ultrasonic standing waves, *Ultrason Sonochem*, 75 (2021) 105603.
- [10] S. M. Zareei, M. Jamshidian, S. Sepehrirahnama, S. Ziaei-Rad, A Review of Studies on the Motion of Particles Under the Influence of Acoustic Waves in Microfluidic Systems, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 52(7) (2020) 475-478 (In Persian).
- [11] C.J. Bustamante, Y.R. Chemla, S. Liu, M.D. Wang, Optical tweezers in single-molecule biophysics, *Nature Reviews Methods Primers*, 1(1) (2021) 25.
- [12] P.Y. Chiou, A.T. Ohta, M.C. Wu, Massively parallel manipulation of single cells and microparticles using optical images, *Nature*, 436(7049) (2005) 370-372.
- [13] M. Punjiya, H.R. Nejad, J. Mathews, M. Levin, S. Sonkusale, A flow through device for simultaneous dielectrophoretic cell trapping and AC electroporation, *Sci Rep*, 9(1) (2019) 11988.
- [14] K. Samlali, F. Ahmadi, A.B.V. Quach, G. Soffer, S.C.C. Shih, One Cell, One Drop, One Click: Hybrid Microfluidics for Mammalian Single Cell Isolation, *Small*, 16(34) (2020) e2002400.
- [15] A.F. Aissa, A.B.M.M. Islam, M.M. Ariss, C.C. Go, A.E. Rader, R.D. Conrardy, A.M. Gajda, C. Rubio-Perez, K. Valyi-Nagy, M. Pasquinelli, L.E. Feldman, S.J. Green, N. Lopez-Bigas, M.V. Frolov, E.V. Benevolenskaya, Single-cell transcriptional changes associated with drug tolerance and response to combination therapies in cancer, *Nat Commun*, 12(1) (2021) 1628.
- [16] K. Peng, D. Sant, N. Andersen, R. Silvera, V. Camarena, G. Pinero, R. Graham, A. Khan, X.M. Xu, G. Wang, P.V. Monje, Magnetic separation of peripheral nerve-resident cells underscores key molecular features of human Schwann cells and fibroblasts an immunochemical and

- Marelli, P.J. Lehner, N.J. Matheson, Functional proteomic atlas of HIV infection in primary human CD4+ T cells, *Elife*, 8 (2019) e41431.
- [33] V. Du, N. Luciani, S. Richard, G. Mary, C. Gay, F. Mazuel, M. Reffay, P. Menasche, O. Agbulut, C. Wilhelm, A 3D magnetic tissue stretcher for remote mechanical control of embryonic stem cell differentiation, *Nat Commun*, 8(1) (2017) 400.
- [34] B. Lim, V. Reddy, X. Hu, K. Kim, M. Jadhav, R. Abedini-Nassab, Y.W. Noh, Y.T. Lim, B.B. Yellen, C. Kim, Magnetophoretic circuits for digital control of single particles and cells, *Nat Commun*, 5 (2014) 3846.
- [35] R. Abedini-Nassab, S. Bahrami, Synchronous control of magnetic particles and magnetized cells in a tri-axial magnetic field, *Lab on a Chip*, 21 (2021) 1998-2007.
- [36] R. Abedini-Nassab, D.Y. Joh, M.A. Van Heest, J.S. Yi, C. Baker, Z. Taherifard, D.M. Margolis, J.V. Garcia, A. Chilkoti, D.M. Murdoch, B.B. Yellen, Characterizing the Switching Thresholds of Magnetophoretic Transistors, *Adv Mater*, 27(40) (2015) 6176-6180.
- [37] R. Abedini-Nassab, D.Y. Joh, M. Van Heest, C. Baker, A. Chilkoti, D.M. Murdoch, B.B. Yellen, Magnetophoretic Conductors and Diodes in a 3D Magnetic Field, *Adv Funct Mater*, 26(22) (2016) 4026-4034.
- [38] J.A. Stratton, *Electromagnetic theory*, McGraw-Hill Book Company, Inc, 1941.
- [39] P.K. Panigrahi, *Transport Phenomena in Microfluidic Systems*, Wiley, 2015.
- [26] A. Omelyanchik, E. Levada, J. Ding, S. Lendinez, J. Pearson, M. Efremova, V. Bessalova, D. Karpenkov, E. Semenova, I. Khlusov, L. Litvinova, M. Abakumov, A. Majouga, N. Perov, V. Novosad, V. Rodionova, Design of Conductive Microwire Systems for Manipulation of Biological Cells, *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(6) (2018) 1-5.
- [27] D. Tukmachev, O. Lunov, V. Zablotskii, A. Dejneka, M. Babic, E. Syková, Š. Kubinová, An effective strategy of magnetic stem cell delivery for spinal cord injury therapy, *Nanoscale*, 7(9) (2015) 3954-3958.
- [28] L. Luo, Y. He, Magnetically driven microfluidics for isolation of circulating tumor cells, *Cancer Med*, 9(12) (2020) 4207-4231.
- [29] R. Prucek, A. Panáček, Ž. Gajdová, R. Večeřová, L. Kvítek, J. Gallo, M. Kolář, Specific detection of *Staphylococcus aureus* infection and marker for Alzheimer disease by surface enhanced Raman spectroscopy using silver and gold nanoparticle-coated magnetic polystyrene beads, *Sci Rep*, 11(1) (2021) 6240.
- [30] A. Chen, T. Byvank, W.J. Chang, A. Bharde, G. Vieira, B.L. Miller, J.J. Chalmers, R. Bashir, R. Sooryakumar, On-chip magnetic separation and encapsulation of cells in droplets, *Lab Chip*, 13(6) (2013) 1172-1181.
- [31] G. Zhang, B.T. Luk, X. Wei, G.R. Campbell, R.H. Fang, L. Zhang, S.A. Spector, Selective cell death of latently HIV-infected CD4, *Cell Death Dis*, 10(6) (2019) 419.
- [32] A. Naamati, J.C. Williamson, E.J. Greenwood, S.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Abedini-Nassab, S. Bahrami, *TI Magnetophoretic Capacitors for Storing Particles and Cells in a Tri-Axial Magnetic Field*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 55(5) (2023) 643-658.

DOI: 10.22060/mej.2023.21335.7430



