

محاسبه توان سرعت دیواره حوزه مغناطیسی در تراوش انفجاری با مدل

رشد پل زنی ناگهانی

عباس عباسی*، علیرضا راستکار ابراهیم زاده

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

دریافت: 97/05/14 ویرایش نهائی: 1398/02/29 پذیرش: 98/04/16

چکیده

یکی از مفاهیم نانو مقیاس، حرکت دیواره حوزه مغناطیسی می‌باشد و در حوزه‌های مختلفی از جمله ذخیره اطلاعات در حافظه‌ها از آن استفاده می‌شود. حوزه‌های مغناطیسی در اثر عوامل خارجی از جمله جریان یا میدان‌های مغناطیسی خارجی شروع به حرکت می‌کنند و در شروع حرکت، سرعت حرکت دیواره حوزه مغناطیسی به صورت توانی با عوامل خارجی رفتار می‌کند که آن را توان جهش نیز می‌نامند. در این مقاله سعی شده است با استفاده از تئوری تراوش انفجاری و مدل جدید پل زنی ناگهانی، حرکت دیواره مغناطیسی شبیه‌سازی شود و با استفاده از روش مونت کارلو توان سرعت در هنگام تراوش یعنی نقطه بحرانی به دست آید. مقادیر این توان با توجه به آزمایشات تجربی و نیز شبیه‌سازی‌های مختلف اعداد مختلفی گزارش شده است که در این مدل مقدار 2/2 به دست آمده است.

کلیدواژگان: دیواره حوزه مغناطیسی، توان سرعت، تراوش انفجاری، مدل پل زنی ناگهانی

مقدمه

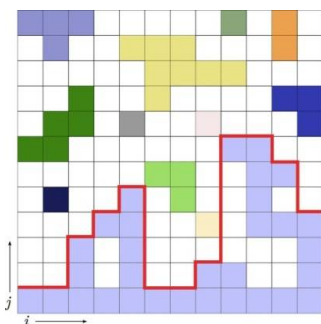
متحرک دیواره که در این حالت سرعت دیواره حوزه مغناطیسی دارای رفتار خطی می‌باشد. در نقطه بحرانی سرعت حرکت دیواره مغناطیسی، یک رفتار توانی یا بی‌مقیاس دارد و می‌توان از توان‌های جهان‌شمولی برای توصیف آنها بهره جست. جهان‌شمولی یک مفهوم مهم در فیزیک آماری است و توان‌های بحرانی توصیف‌گر گذارهای بحرانی و مستقل از جزئیات میکروسکوپی سیستم می‌باشند. کلاس جهان‌شمولی توسط مجموعه‌ای از توان‌های بحرانی که رفتار بی‌مقیاس دارند مشخص می‌شود و این همان نقطه اتصال دنیای میکروسکوپی به دنیای ماکروسکوپی در نقطه بحرانی یا به اصطلاح گذار فاز سکون به متحرک است. رفتارهای بی‌مقیاس در طبیعت فراوان هستند [4-8]. حرکت دیواره مغناطیسی تحت یک عامل خارجی مانند جریان الکتریکی یا

حرکت دیواره مغناطیسی حوزه‌ها یکی از مفاهیم مهم علم فیزیک می‌باشد و در حوزه‌های مختلف علوم از آن تحت عنوان رشد حوزه‌های مغناطیسی استفاده می‌گردد. از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: در ابعاد بزرگ مثلاً ستاره‌شناسی [1]، برای مقیاس نانو، ثبت اطلاعات در حافظه‌ها، انتقال اطلاعات در نانوسیم‌ها [2] و غیره. به همین دلیل در سال‌های اخیر بر روی این موضوع مطالعات زیادی انجام شده است [3]. رشد حوزه‌ها را می‌توان در سه بخش مورد مطالعه قرار داد. بخش اول به نام حالت استاتیک یا سکون که دیواره به طور متوسط حرکت خالصی ندارد. بخش دوم حالت بحرانی که بین حالت سکون و حالت متحرک است و مورد مطالعه این مقاله خواهد بود و بخش سوم، حالت

* نویسنده مسئول: abbasisci@gmail.com



انتخاب می‌کنیم و با قانون خاصی با یکی از خوشه‌های همسایه آن ادغام می‌کنیم. انتخاب دو خوشه ادغام شونده توسط قانون‌های خاصی صورت می‌گیرد که در ادامه به آنها خواهیم پرداخت. در این ادغام ابتدا خوشه اصلی با همسایه و همچنین همسایه با همسایه مورد آزمون قوانین قرار می‌گیرد و ممکن است عمل ادغام به صورت همسایه با همسایه یا همسایه با خوشه اصلی انجام شود. عمل ادغام یک خوشه با خوشه دیگر به این صورت است که خوشه ادغام شونده حذف و تعداد سلول‌ها و همسایه‌های آن به سلول‌ها و همسایه‌های خوشه حاصل اضافه می‌شود و به روز رسانی می‌گردد و زمان در سیستم نیز براساس جلد اندازه‌های سلول‌های خوشه ادغام شده به روز رسانی می‌گردد. البته این انتخاب هوشمندانه بازه زمانی باعث مشاهده پرش‌هایی در پارامتر نظم می‌گردد [11]. این فرآیند تا جایی ادامه می‌یابد تا در نهایت تمام خوشه‌ها با هم ادغام شده و کل شبکه تبدیل به یک خوشه شود. می‌توان از شرایط مرزی پریودیک برای راستای افقی شبکه نیز استفاده نمود که از آن در این شبیه‌سازی بهره گرفته‌ایم. در راستای قائم شرایط مرزی پریودیک به علت تراوش از پایین به بالا استفاده نشده است.



شکل 1. شبکه‌ای به طول خطی L که در راستای افقی دارای خاصیت پریودیک می‌باشد. خوشه‌هایی که به زیر چسبیده‌اند دارای خاصیت اسپین

انرژی حاصل از میدان مغناطیسی خارجی در نقطه بحرانی یک رفتار بی‌مقیاس می‌باشد. به عبارت دیگر در حین شروع حرکت دیواره در نقطه بحرانی، سرعت آن رفتار توانی یا بی‌مقیاس دارد [5]. پدیده حرکت دیواره مغناطیسی را می‌توان در فاز شروع حرکت یک پدیده بحرانی نام برد، از این رو سرعت دیواره در نقطه بحرانی حرکت را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

$$v \propto f^\mu \quad 1$$

در این رابطه، μ توان جهش¹ یا توان سرعت² و f را عامل رانش دیواره می‌نامند. آزمایشات تجربی بر روی حرکت دیواره مغناطیسی ناشی از میدان مغناطیسی نشان می‌دهد که μ توان جهش، دارای مقادیر مختلفی از 0/25 الی 1/20 در ماده فرومغناطیسی Pt-Co-Pt [9] می‌باشد. مطالعات اخیر و با استفاده از شبیه‌سازی‌ها و استفاده از مدل‌های میکروسکوپی گوناگون، مقادیر مختلف از جمله 0/1 الی 2 برای توان جهش به دست آورده‌اند [10]. در این مقاله نیز ما با استفاده از یک مدل مربوط به تئوری تراوش انفجاری³ که اخیراً گزارش شده و تحت عنوان پل زنی ناگهانی⁴ معرفی شده است [11] به بررسی سرعت حرکت دیواره در نقطه بحرانی خواهیم پرداخت و سعی می‌کنیم توان سرعت مدل مذکور را به دست آوریم.

مدل‌سازی

برای شروع مدل‌سازی از یک شبکه دو بعدی مطابق شکل 1 به طول خطی L استفاده می‌کنیم که شامل $n = L \times L$ سلول مستقل از هم می‌باشد. با فرض اینکه هر خوشه شامل یک سلول باشد، در شروع زمان، تعداد خوشه‌های شبکه نیز برابر n خواهد بود. به روش مونت کارلو یک خوشه به نام خوشه اصلی به تصادف

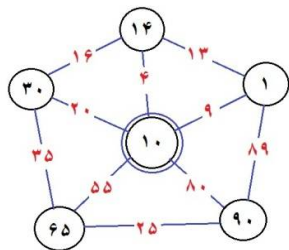
³ Explosive Percolation

⁴ Sudden Bridging

¹ Creep Exponent

² Velocity Exponent

در این رابطه Δ_{ij} قانون کسری بین دو خوشه است و با به‌دست آوردن تعدادی از آنها در فرآیند ادغام باید کمینه‌سازی شود. f پارامتر کنترل‌کننده اندازه خوشه است که می‌تواند در محدوده $0 \leq f \leq 1$ تغییر کند. S_i ، S_j اندازه‌های دو خوشه انتخابی است که همواره باید شرایط $S_i > S_j$ را ارضاء کنند. به‌طور شماتیک می‌توان این قانون را در شکل 2 بیان نمود. همان‌گونه که دیده می‌شود با انتخاب $f = 1$ ، دو خوشه تقریباً هم‌اندازه در هم ادغام می‌شوند و این مزیت قانون کسری است که می‌توان این مزیت را با پارامتر f کنترل نمود. همچنین انتخاب $f = 0$ باعث انتخاب خوشه مینیمم می‌گردد که در اینجا به‌طور جداگانه به نام قانون مینیمم شبیه‌سازی می‌گردد.



شکل 2. نحوه ادغام دو خوشه در قانون کسری و محاسبه Δ_{ij} بین خوشه اصلی با همسایه‌ها و همچنین بین همسایه با همسایه و انتخاب مینیمم. با نظر گرفتن $f = 1$ ، دو خوشه $S_i = 14$ و $S_j = 10$ با قانون کسری $\Delta_{ij} = 4$ ادغام خواهد شد. همچنین انتخاب قانون بیشینه و کمینه با خوشه $S_j = 10$ به ترتیب، خوشه‌های $S_i = 90$ و $S_i = 1$ خواهند شد.

همان‌طور که در شکل 3 دیده می‌شود با مرور زمان اندازه خوشه‌ها در شبکه بزرگ‌تر و رفته رفته در نهایت در شبکه دو خوشه بزرگ از مرتبه شبکه باقی‌مانده و با ادغام آن دو یک حالت پل زنی ناگهانی در شبکه صورت می‌گیرد. در نتیجه می‌توان در مطالعه اندازه‌های

بالا می‌باشند و دیواره مغناطیسی (خط قرمز) به صورت بالاترین اسپین بالای هر ستون تعریف می‌شود.

قوانین ادغام را به چهار قانون کلی می‌توان تعمیم داد که به ترتیب به شرح ذیل می‌باشند.

(الف) قانون بیشینه: در این قانون خوشه اصلی با خوشه‌ای همسایه‌ای که دارای بیشترین اندازه (تعداد سلول) است ادغام می‌شود. در صورت وجود چند خوشه مشابه بیشینه، به تصادف یکی از خوشه‌های بیشینه انتخاب می‌شود.

(ب) قانون کمینه: در این قانون خوشه اصلی با خوشه همسایه‌ای که دارای کمترین اندازه (تعداد سلول) است ادغام می‌شود. در صورت وجود چند خوشه مشابه کمینه، به تصادف یکی از خوشه‌های کمینه انتخاب می‌شود.

(ج) قانون تصادفی: در این قانون خوشه اصلی به تصادف با یکی از خوشه‌های همسایه بدون در نظر گرفتن اندازه آنها، ادغام می‌شود.

(د) قانون کسری: در اینجا ابتدا قانون کسری مربوط به رابطه 2 بین خوشه اصلی و تک تک خوشه‌ای همسایه و نیز همسایه با همسایه نزدیک محاسبه شده و سپس مقدار کمینه از بین آنها انتخاب و دو خوشه مربوطه ادغام می‌شود. در صورت وجود چند عبارت کمینه، یکی از آنها به تصادف انتخاب و سپس عملیات ادغام انجام می‌شود. در قانون کسری از رابطه زیر کمک می‌گیریم:

$$\Delta_{ij} = f \times S_i - S_j \quad 2$$

همان‌طور که در رابطه 3 دیده می‌شود فقط در حالتی اسپین خوشه حاصل صفر است که هر دو خوشه دارای اسپین صفر باشند و در غیر این صورت اسپین خوشه حاصل برابر یک خواهد شد. این بدین معنی است که به محض اتصال یک خوشه به خوشه‌ای با اسپین بالا، خود نیز تبدیل به اسپین بالا می‌شود و این چنین خاصیت مغناطیسی رشد می‌یابد. برای مشخص کردن مرز بین ناحیه مغناطیسی و غیر مغناطیسی می‌توان مانند شکل 1 بالاترین سلول که داری اسپین بالا است را مرز بین دو ناحیه دانست. در نتیجه براساس این تعریف یک مرز بین دو ناحیه مشخص می‌شود. مطابق شکل 1 ارتفاع ستون $h(i, t)$ در لحظه t ، را می‌نامیم که دارای بالاترین سلول با خاصیت اسپین بالاست. در هر لحظه ارتفاع متوسط را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$\bar{h}(t) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L h(i, t) \quad 4$$

در نتیجه سرعت حرکت دیواره مغناطیسی را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\bar{v}(t) = \frac{\bar{h}(t+\delta t) - \bar{h}(t)}{\delta t} \quad 5$$

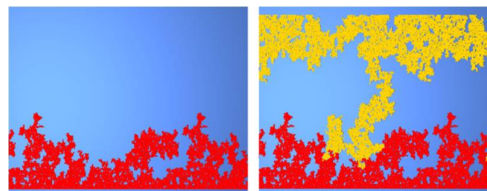
که در آن $\bar{h}(t + \delta t)$ ارتفاع متوسط دیواره در بازه زمان بعدی می‌باشد. بازه زمانی یا تحول زمانی شبکه هم از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد [12]:

$$\delta t = \sqrt{\frac{\delta n}{N}} \quad 6$$

که در آن δn تعداد اندازه خوشه ادغام شده است. زمان را در هر لحظه به صورت زیر در شبکه محاسبه می‌کنیم:

$$t =: t + \delta t \quad 7$$

خوشه، پرش‌هایی از مرتبه شبکه به چشم دید. برای مطالعه خواص مغناطیسی در چنین شبکه‌ای، می‌توان با به کار بردن خوشه‌ها با خاصیت مغناطیسی تحت عنوان اسپین بالا و اسپین صفر به مطالعه خواص مغناطیسی سیستم پرداخت.



الف

ب

شکل 3. دو شکل از رشد سطح مغناطیسی الف: قبل از تراوش ب: بعد از تراوش: چگونگی تراوش از مرتبه سیستم در یک لحظه که آن تحت عنوان پل زدن ناگهانی معرفی شده است.

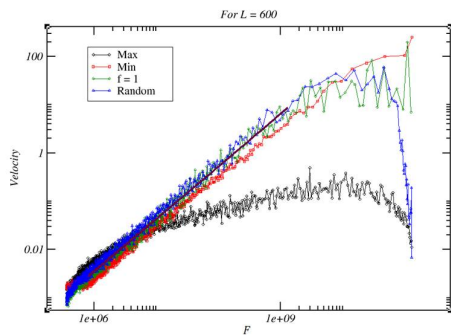
می‌توان اسپین برخی از سلول‌ها را به عنوان بذر اولیه به صورت اسپین بالا قرار داد و بقیه اسپین سلول‌ها را به صورت اسپین صفر در نظر گرفت. در حین عمل ادغام دو خوشه، اسپین خوشه حاصل از رابطه 3 می‌تواند به دست آید. در صورتی که اسپین بالا را با 1 و اسپین صفر را با 0 نشان دهیم روابط مربوط به اسپین خوشه حاصل چنین به دست می‌آید:

$$1 + 1 \rightarrow 1 \quad 3 \text{ الف}$$

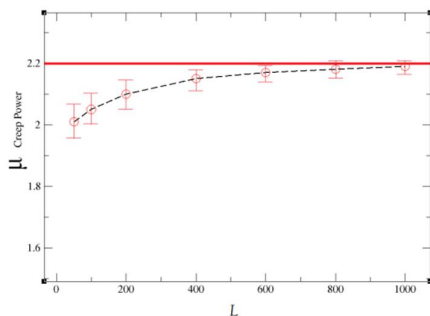
$$1 + 0 \rightarrow 1 \quad 3 \text{ ب}$$

$$0 + 1 \rightarrow 1 \quad 3 \text{ پ}$$

$$0 + 0 \rightarrow 0 \quad 3 \text{ ت}$$



نمودار 2. نمودار لگاریتمی سرعت برحسب عامل خارجی برای یک طول $L = 600$ با 1000 اجرا برای تمام قانون‌های انتخاب که به ترتیب بیشینه، کمینه، کسری و تصادفی رسم شده‌اند.

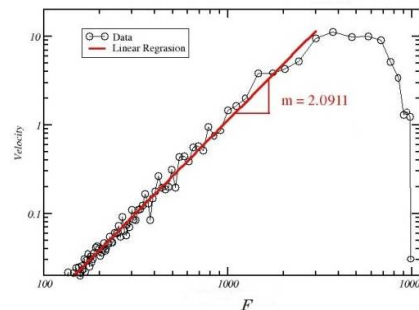


نمودار 3. نمودار توان جهش برحسب طول شبکه، خط مجانبی با خط قرمز مشخص شده است.

نتایج

در این مقاله با استفاده از تئوری تراوش انفجاری و مدل جدید پل‌زنی ناگهانی استفاده کرده و رشد دیواره مغناطیسی را شبیه‌سازی کردیم. با توجه به رشد دیواره مغناطیسی توانستیم رفتار توانی را برای چهار قانون انتخابی در مدل مذکور مشاهده و بعد از به‌دست آوردن توان‌ها، ثابت کنیم توان سرعت دیواره برای قانون‌های معرفی شده یکسان و همه آنها جزء یک کلاس جهان‌شمولی می‌باشند. توان سرعت برای این کلاس، عدد $2/2 \pm 0/02$ به‌دست آوردیم. این توان سرعت در مقایسه با توان‌های معرفی شده چه از طریق آزمایشگاهی و چه از طریق شبیه‌سازی مقدار بالاتری را

که در لحظه شروع شبیه‌سازی آن را صفر فرض می‌کنیم.



نمودار 1. نمودار لگاریتمی سرعت برحسب عامل خارجی که دارای رفتار توانی برای $L = 100$ با 1000 اجرا با استفاده از قانون انتخاب تصادفی.

بحث

با فرض اینکه عامل خارجی با زمان به صورت خطی افزایش می‌یابد می‌توان محور زمان را به‌عنوان عامل خارجی انتخاب و در نتیجه می‌توان نمودار سرعت برحسب عامل خارجی را رسم کنیم. همان‌طور که در نمودار 1 مشاهده می‌شود سرعت طبق رابطه 1 برای 1000 اجرا در هر نقطه، دارای رفتار توانی یا بی‌مقیاس نسبت به عامل خارجی است. توجه داریم که رفتار ناگهانی در انتهای نمودارها به علت تراوش سطح مغناطیسی به‌قسمت بالای شبکه می‌باشد. در نمودار 2 برای یک طول با توجه به چهار قانون انتخاب معرفی شده، رسم شده است که هر چهار انتخاب دارای رفتار توانی با توان یکسان را نشان می‌دهند. رفتار ناگهانی انتهای نمودار باز به علت تراوش سطح مغناطیسی می‌باشد. این توان را برای طول‌های مختلف رسم و به‌دست می‌آوریم تا به‌روش مجانبی آنرا در حد ترمودینامیک به‌دست آوریم. نمودار 3 توان سرعت را برای طول‌های مختلف نشان می‌دهد. در حد ترمودینامیک به‌روش مجانبی توان سرعت را مقدار $\mu = 2/2 \pm 0/02$ به‌دست آوردیم.

[11] A.A. Saberi, S.H. Ebrahimmazhad Rahbari, H. Dashti-Naserabadi, A. Abbasi, Y.S. Cho, J. Nagler. Universality in boundary domain growth by sudden bridging. *Scientific Reports* **6** (2016) 21110.

[12] M. Schröder, S.H. Ebrahimmazhad Rahbari, J. Nagler, Crackling noise in fractional percolation. *Nature Communications* **4** (2013) 2222.

نشان می‌دهد که حاکی از یک جهش در نقطه بحرانی حرکت دیواره است.

مرجع‌ها

[1] R.A. Matzner, *Dictionary of Geophysics, Astrophysics and Astronomy*, CRC Press, (2001).

[2] R. Varga, A. Zhukov, J.M. Blanco, M. Ipatov, V. Zhukova, J. Gonzalez, P.Vojtaník. Fast magnetic domain wall in magnetic microwires, *Physical Review B* **74** (2006) 212405-212409.

[3] M. Tibu, M. Lostun, T-A. Óvári, H. Chiriac. Simultaneous magneto-optical Kerr effect and Sixtus-Tonks method for analyzing the shape of propagating domain walls in ultrathin magnetic ires, *Review of Scientific Instruments* **83** (2012) 064708-064708.

[4] D. Stauffer, A. Aharony, *In Introduction to Percolation Theory*, Taylor & Francis, London, (1994).

[5] M. Sahimi, *In Applications of Percolation Theory*, Taylor & Francis, London, (1994).

[6] A.A. Saberi, Recent advances in percolation theory and its applications. *Physics Reports* **578** (2015) 1-32.

[7] R.M. D'Souza, J. Nagler, Anomalous critical and supercritical phenomena in explosive percolation, *Nature Physics* **11** (2015) 531-538.

[8] L. Berger, Exchange interaction between ferromagnetic domain wall and electric current in very thin metallic films, *Journal of Applied Physics* **55** (1984) 1954-1963.

[9] M. Yamanouchi, J. Ieda, F. Matsukura, S.E. Barnes, S. Maekawa, H. Ohno, Universality Classes for Domain Wall Motion in the Ferromagnetic Semiconductor (Ga,Mn)As, *Science* **317** (2007) 1726-1729.

[10] Jae-Chul Lee, Kab-Jin Kim, Jisu Ryu, Kyoung-Woong Moon, Sang-Jun Yun, Gi-Hong Gim, Kang-Soo Lee, Kyung-Ho Shin, Hyun-Woo Lee, and Sug-Bong Choe, Universality Classes of Magnetic Domain Wall Motion, *Physical Review Letters* **107** (2011) 067201-067206.