فناوری اسکرمیونیک برای محاسبات در مقیاس اتمی و نورومورفیک

بهروز پرهامی
گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کالیفرنیا، سنتا باربارا
پست الکترونیکی: parhami@ece.ucsb.edu

ترجمهٔ: قاسم جابری‌پور
دانشکدهٔ مهندسی کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی
پست الکترونیکی: jaberipur@sbu.ac.ir

یادداشت سردبیر

حدود سه ماه پیش، از آقای دکتر پرهامی که بنیان‌گذار نشریهٔ گزارش کامپیوتر بودند درخواست کردم که برای این ویژه‌نامه، مطلبی بفرستند. البته منظور من بیشتر مطلبی دربارهٔ گزارش کامپیوتر و چهل سال انتشار مداوم آن بود. آقای دکتر پرهامی بزرگوارانه درخواست مرا پذیرفتند و حدود یک ماه پیش این مقاله را به زبان انگلیسی برای من فرستادند. از آنجا که در این نشریه مقالات فارسی به‌چاپ می‌رسد از دوست و همکار ارجمند آقای دکتر جابری‌پور درخواست کردم که مقاله را به فارسی برگردانند. ایشان نیز لطف کرده و این زحمت را تقبّل کردند. سپس مقالهٔ ترجمه شده برای آقای دکتر پرهامی فرستاده شد و ایشان با دقّت نظر مثال‌زدنی و همیشگی خود، متن ترجمه شده را ویرایش کردند که در زیر به نظر خوانندگان گرامی می‌رسد.

از آقای دکتر پرهامی و آقای دکتر جابری‌پور صمیمانه سپاسگزاری می‌کنم.

۱- معرفی

این مقاله بنا به دعوت مدیر مسئول گزارش کامپیوتر، نشریه انجمن انفورماتیک ایران، جهت مشارکت در بزرگداشت ۴۰ سالگی این مجله تهیه شده است. ازاین‌رو، به نظرم رسید که تصوّر میزان پیشرفت فناوری سخت‌افزار کامپیوتر در چهار دهه آینده جالب خواهد بود. آقای داریوش عابدی، دکتر قاسم جابری‌پور و من به‌تازگی مقاله‌ای تهیه کرده‌ایم که فناوری‌های محاسبات در مقیاس اتمی و قرابتشان با منطق اکثریت در آن دوره شده است. این فناوری‌ها برای پیاده‌سازی حساب کامپیوتری و سایر بسته‌های محاسباتی با مصرف توان بسیارکم و در قالب مدارهای فوق‌العاده متراکم مناسب خواهند بود [۱]. بعضی از این فناوری‌ها، گرچه هنوز دور از صرفه اقتصادی، به بهره‌برداری رسیده‌اند، و گروهی دیگر از آن‌ها، در ارتباط با امکان پیاده‌سازی کارآمد، تحت مطالعه‌اند.

در این مقال، من به یک فناوری نوین درخشان در مقیاس اتمی

مبتنی برشبه-ذرات اسکرمیونی می‌پردازم که همانند ممریستور [۲]، ترکیبی از حافظه و امکانات پردازشی را در بردارد. در این راستا، پیشرفت فناوری عملا بر «تنگنای فون‌نیومنی» [۳] غلبه می‌کند. منظورم تاثیر منفی پهنای باند نسبتا کم بین حافظه و زیرسامانه‌های پردازشی است (در مقایسه با سرعت درونی بیشتر درهر دو طرف) که موجب محدودیت سرعت محاسبات می‌شود، آنگاه که لازم است بازیابی داده‌ها از حافظه، پردازش آن‌ها، و بازگشت نتایج به حافظه انجام شوند.

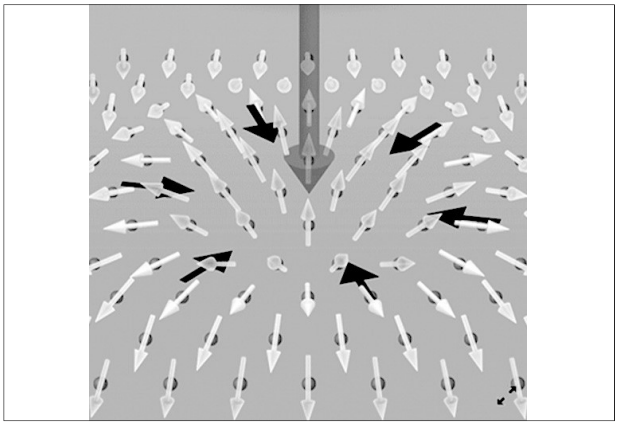
۲. اسکرمیون چیست؟

هرچند درواقع اسکرمیون‌ها فناوری تازه‌ای به‌شمار نمی‌روند، کاربرد آن‌ها در حافظه و توابع پردازشی تازگی دارد [۴]. کشف اسکرمیون به دهه ۱۹۶۰ برمی‌گردد، هنگامی که تونی اسکرم فیزیک‌دان نظری، که این فناوری بعدا به افتخار او نام گرفت، عناصر شبه-ذره‌ای را برای توصیف رفتار پروتون و نوترون مطرح کرد [۵]، اما در نهایت تلاشش با موفقیت قرین نشد. بیشتر از پنج دهه لازم بود تا دانشمندان بیابند که اسکرمیون‌ها را می‌توان با مواد مغناطیسی، به صورت خیلی متراکم و قابل اطمینان ایجاد کرد.

یک اسکرمیون مغناطیسی عبارت است از کوچک‌ترین اختلال ممکن در یک مغناطیس یک‌نواخت، یعنی، یک ناحیه نقطه‌ای مغناطیسی شدن وارون، که، همان‌طورکه در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، با چرخنده‌های پیچان احاطه شده است[۶] . اسکرمیون‌ها، با اندازه چند نانومتری خود، در زمره شبه-ذرات طبقه‌بندی می‌شوند: آن‌ها در غیاب یک حالت مغناطیسی وجود ندارند و بروز الکترودینامیک آن‌ها با معادلات ماکسول به سادگی قابل توصیف نیست. اسکرمیون‌ها قابل ایجاد، حرکت، تعامل با هم و نابودی‌اند. با ماندگاری درازمدت (non-volatility) خود بخصوص به‌عنوان ابزار ذخیره‌سازی به‌کار می‌آیند. یافته‌های پژوهشگران MIT [۷] حاکی از آن است که کمبود سرعت فعلی آن‌ها با بهره‌بردن از مواد دیگر قابل رفع است تا بتوانند با ملزومات محاسبات سریع رقابت کنند. استفاده عملی از فناوری اسکرمیونی مستلزم حل مشکلات تولید و بهبود روندهای خواندن/نوشتن است. برآوردها حاکی از برطرف شدن این مشکلات در یک دهه یا بیشتر است. اما همه باور دارند که کارآمدی در سرعت و انرژی به مقیاس چند برابر با توفیق در گسترش اسکرمیون‌ها با واقعیت قرین و دسترس پذیراست.

۳. رایانش نورومورفیک

تلاش برای تقلید از فرآیندهای محاسباتی مغز، به منظور بهره‌مندی از انعطاف و کارائی فوق‌العاده در مصرف انرژی آن‌ها سابقه طولانی



شکل ۱: هسته اسکرمیونی یک ناحیه شبه-نقطه‌ای از مغناطیس وارونه (در این‌جا، به سمت بالا) در یک مغناطیس یک‌نواخت است، بایک پیچش محوری متقارن که بافت چرخش را به جهت متعارف (در این‌جا، به سمت پایین) برمی‌گرداند.

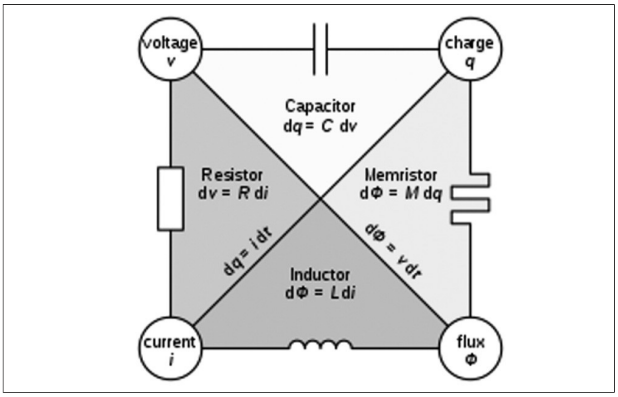
دارد [۸]. ابزارهای محاسباتی فعلی قادر به شبیه‌سازی رفتار تنها بخش کوچکی از ساده‌ترین مغزهای حیوانی هستند. بنابراین، امیدواری زیادی به موفقیت محاسبات نورومورفیک [۹]، که مطالعه عناصر محاسباتی شبه-عصبی و سازوکارهای مربوطه را به‌هم پیوند می‌زند، وجود دارد.

رقابت شدیدی برای پدیدآوردن سامانه‌های نورومورفیک در بین فناوری‌های متعدد مورد علاقه پژوهشگران درگرفته است. ممریستور (مخفف memory resistor)، چهارمین عنصر مداری پایه‌ای غیرفرّار در عداد مقاومت، خازن، و سلف (شکل ۲) است که تا کنون پتانسیل بسیار زیادی در این زمینه از خود نشان داده است [۲]. اسکرمیون‌ها نیز از جمله نامزدهای اصلی برای کمک به تحقق این سبک محاسباتی در آینده نزدیک هستند.

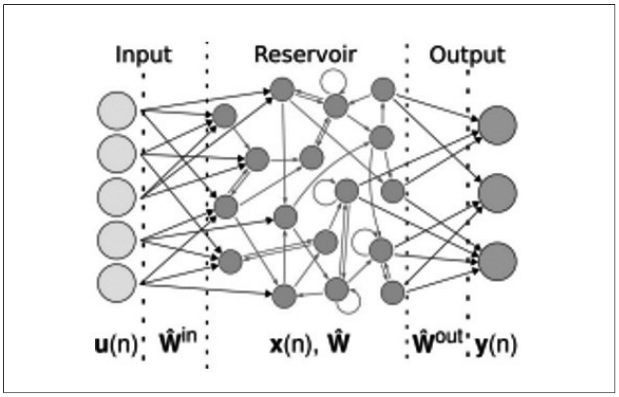
یک روش که برای بهره‌بری موثر از اسکرمیون‌ها مورد اعتنا است، محاسبات مخزنی نام دارد [۱۰]، که در آن شبکه‌های عصبی بازگشتی از لایه‌های ورودی و خروجی تشکیل شده است، با اتصالات یک‌سویه به مجموعه‌ای از گره‌های داخلی مخزنی، که خودشان دوسویه متصل‌اند، و بالقوه حلقه‌های تک-گرهی یا چند گرهی تشکیل می‌دهند (شکل ۳). شبکه‌های عصبی شبیه به شبکه شکل۳ معمولا برای طبقه‌بندی سیگنال‌های ورودی مشابه با تولید خروجی‌های یکسان استفاده می‌شود. محاسبات مخزنی به ما توانائی می‌دهد تا چنین توابعی را به سرعت و با هزینه بالاسری کم برای مرحله آموزش انجام دهیم.

۴. نگاه به آینده

دانشمندانی که بر روی این فناوری کار می‌کنند امیدوارند که



شکل ۲: ممریستور، که فرضیه وجودی آن در ۱۹۷۱ بر اساس تقارن مفهومی عناصر مداری مطرح شد، عملا در ۲۰۰۷ به واقعیت پیوست [تصویر از ویکی‌پدیا]



شکل ۳: یک شبکه عصبی مرکب از گره‌های ورودی (چپ)، خروجی (راست)، و مخزنی (وسط). گره‌های ورودی /خروجی دارای اتصالات یک‌طرفه‌اند، در حالی‌که گره‌های مخزنی ممکن است به صورت دوطرفه متصل شده و تشکیل حلقه دهند [۱۰].

اسکرمیون‌ها جایگزین همه انواع حافظه در رایانه‌های ما خواهند شد با حافظه‌های متراکم و ماندگار که مفهوم راه‌اندازی[1] کامپیوتر را منسوخ کند. هم‌چنین اسکرمیون‌ها می‌توانند نقش‌های ذخیره‌سازی و پردازش اطلاعات را از طریق توانایی تعامل خود ترکیب کنند. چنین ترکیبی از امکانات ذخیره‌سازی و پردازش به طرح‌های کارآمد برای تحقق ساختارهای محاسباتی مغز-مانند منجر خواهد شد.

در ادامه توجه داریم که اسکرمیون‌ها با میله‌های مغناطیسی در مقیاس اتمی [۱۱]، یک فناوری در مقیاس اتمی دیگر در دست بررسی برای ابزارهای محاسباتی پرتراکم و فوق‌العاده کم مصرف [۱]، متفاوتند. در واقع، پس از گذراندن دهه‌ها درخشندگی فناوری‌های مبتنی بر سیلیکون، فناوری‌های مغناطیسی در اشکال مختلف باز می‌گردند، با امعان نظر به دو خاصیت مطلوبشان، یعنی غیرفرّاری و مینیاتوری شدنشان در سال‌های اخیر.

اکنون که قانون مقیاس مور و سایر روندهای بهبود توانی به پایان اعتبار خود نزدیک می‌شوند، من مشتاقانه تحولات امیدوارکننده در فناوری‌های محاسبات مقیاس-اتمی را دنبال می‌کنم که در بین جامعه محاسبات جاذبه‌ای بسیار قوی دارد. آنگاه که گزارش کامپیوتر، ۵۰ سالگی خود را جشن بگیرد، باید خبرهای خوبی در مورد استفاده گسترده از اسکرمیون‌ها و دیگر فناوری‌های مقیاس-اتمی در زمینه ذخیره‌سازی و محاسبات از راه برسد. اسکرمیون‌هائی که در ساختار فیلم‌های نازک پدیدار گشته‌اند، به ویژه برای کاربردهای عملی امیدوار کننده‌اند، چرا که اکنون تا ابعاد نانو کوچک شده‌اند [۱۲] .

منابع

[1] Parhami, B., D. Abedi, and G. Jaberipur, “Majority Logic, Its Applications, and Atomic-Scale Embodiments,” Paper submitted for publication after revisions, June 2019.

[2] Adam, G. C., B. D. Hoskins, M. Prezioso, F. Merrikh-Bayat, B. Chakrabarti, and D. B. Strukov., “3-D Memristor Crossbars for Analog and Neuromorphic Computing Applications,” IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 64, No. 1, pp. 312-318, January 2017.

[3] Backus, J., “Can Programming Be Liberated from the von Neumann Style? A Functional Style and Its Algebra of Programs” (1977 Turing Lecture), Communications of the ACM, Vol. 21, No. 8, pp. 613-641, August 1978.

[4] Williams, L., “A Change in Computing,” E&T Magazine, Vol. 14, No. 5, pp. 66-69, June 2019.

[5] Skyrme, T. H. R., “A Unified Field Theory of Mesons and Baryons,” Nuclear Physics, Vol. 31, pp. 556-569, 1962.

[6] Marrows, C. H., “An Inside View of Magnetic Skyrmions,” Physics, Vol. 8, Item 40, May 2015.

[7] Caretta, L., M. Mann, F. Buttner, K. Ueda, B. Pfau, C. M. Gunther, P. Hessing, A. Churikova, C. Klose, M. Schneider, and D. Engel, “Fast Current-Driven Domain Walls and Small Skyrmions in a Compensated Ferrimagnet,” Nature Nanotechnology, Vol. 13, No. 12, pp. 1154-1160, 2018.

[8] Minsky, M. and S. Papert, Perceptrons, MIT Press, 1969.

[9] Nawrocki, R. A., R. M. Voyles, and S. E. Shaheen, “A Mini Review of Neuromorphic Architectures and Implementations,” IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 63, No. 10, pp. 3819-3829, August 2016.

[10] Bourianoff, G., et al., “Potential Implementation of Reservoir Computing Models Based on Magnetic Skyrmions,” AIP Advances, Vol. 8, No. 5, May 2018.

[11] Porod, W. and M. Niemier, “Better Computing with Magnets: The Simple Bar Magnet, Shrunk Down to the Nanoscale, Could Be a Powerful Logic Device,” IEEE Spectrum, Vol. 52, No 9, pp. 44-48 & 59-60, 2015

[12] Finocchio, G., F. Buttner, R. Tomasello, M. Carpentieri, and M. Klaui, “Magnetic Skyrmions: From Fundamental to Applications,” J. Physics D, Vol. 49, September 2016.

1- boot