

# طراحی مدار XOR کارآمد مبتنی بر منطق نانومغناطیس

سمیرا سیدصالحی و زینب آزادی مطلق

سلولی کوانتومی<sup>۴</sup> [۴] و ترانزیستورهای نانو لوله کربنی [۵] از جمله مواردی هستند که به عنوان تکنولوژی‌های جایگزین در نظر گرفته شده‌اند. در این میان، طراحی مدارها در منطق نانومغناطیس به دلیل مزیت‌های فراوان از جمله سرعت بالا و توان مصرفی پایین در محاسبات، جایگزین مناسبی برای مدارهای CMOS خواهد بود [۶]. در نانومغناطیس‌ها برهم‌کنش گشتاورهای مغناطیسی به اندازه‌ای قوی است که مدارهای متشکل از مواد نانومغناطیسی می‌توانند در دمای اتاق کار کنند. در پیاده‌سازی اتوماتای سلول کوانتومی مغناطیسی<sup>۵</sup> (MQCA) که منطق نانومغناطیس<sup>۶</sup> (NML) نیز نامیده می‌شود [۷]، عنصر پایه، سلول نانومغناطیسی در مقیاس نانومتری است. هر یک گشتاور مغناطیسی می‌تواند تنها دو وضعیت پایدار داشته باشد که برای نشان دادن منطق ارزش صفر و یک می‌توان از آن استفاده کرد. سلول‌های نانومغناطیس پایه به صورت تک‌حوزه‌ای هستند و بر اساس ماده تشکیل‌دهنده، شکل سلول و مغناطش آن مدل‌های مختلفی از سلول پایه به دست می‌آید. گیت‌ها و سیم‌های نانومغناطیسی با برهم‌کنش گشتاورهای مغناطیسی سلول‌ها بر یکدیگر و با چیدمان درستی از سلول‌های نانومغناطیسی در کنار هم به دست می‌آیند [۸]. برای هم‌زمان‌سازی و انتشار درست سیگنال در طول مدار نیاز به مفهوم ساعت است [۹]. منطق نانومغناطیس می‌تواند به فرکانس بین ۵۰ مگاهرتز تا ۱ گیگاهرتز برسد. با توجه به این که گیت‌های متشکل از مواد نانومغناطیسی در دمای اتاق کار می‌کنند [۱۰] ساخت آنها با تکنولوژی فعلی، با لیتوگرافی پرتو الکترونی یا لیتوگرافی نوری سطح بالا دارای مزایای بیشتری نسبت به سایر روش‌های پیاده‌سازی در QCA می‌باشد [۱۱].

گام اساسی در پیشرفت این تکنولوژی، پیاده‌سازی مدارهای محاسباتی می‌باشد تا با استفاده از آن بتوان کامپیوترهای مبتنی بر سلول‌های نانومغناطیس را پیاده‌سازی کرد. این پژوهش در راستای تحقق بخشیدن کامپیوترهای نانومغناطیسی به طراحی و پیاده‌سازی مدار XOR سه ورودی می‌پردازد که این مدار، عنصر سازنده مدار جمع‌کننده‌ها و تفریق‌کننده‌ها می‌باشد. بیشتر محققان در طراحی مدارهای نانومغناطیس از سلول‌های نانومغناطیس هم‌سطح<sup>۷</sup> استفاده کرده‌اند [۱۲] تا [۱۵] در حالی که سلول‌های نانومغناطیس عمودی<sup>۸</sup> [۱۶] دارای مزایای بیشتری نسبت به سلول‌های نانومغناطیس هم‌سطح هستند. از این رو در این پژوهش، در طراحی مدار XOR از سلول‌های نانومغناطیس عمودی استفاده شده و دو طرح بر پایه گیت اکثریت سه ورودی و پنج ورودی نانومغناطیسی مبتنی بر ساختار یک‌لایه‌ای و چندلایه‌ای پیشنهاد می‌شوند.

چکیده: هدف این مقاله ارائه طرحی جدید و کارآمد برای مدار XOR بر پایه تکنولوژی منطق نانومغناطیس در راستای تحقق بخشیدن به پیاده‌سازی مدارهای محاسباتی نانومغناطیسی از جمله جمع‌کننده، تفریق‌کننده و ضرب‌کننده می‌باشد. منطق نانومغناطیس به دلایلی از جمله سرعت بسیار بالا، توان مصرفی به شدت پایین، قابلیت مجتمع‌سازی و کارکرد در دمای اتاق، یک جایگزین مناسب برای تکنولوژی ساخت ترانزیستورهای متعارف است. برای پیشبرد هدف این پژوهش، ابتدا به معرفی گیت‌های اکثریت در فناوری نانومغناطیس پرداخته می‌شود و سپس دو طرح کارآمد با کمترین مساحت، کمترین تعداد المان نانومغناطیس و کمترین تأخیر برای XOR بر اساس یک گیت اقلیت سه ورودی و یک گیت اکثریت پنج ورودی پیشنهاد می‌شوند. المان‌های پایه مورد استفاده در این دو طرح از نوع سلول‌های نانومغناطیس عمودی متشکل از مواد Co/Pt، به دلیل مزیت‌های نسبی این ماده هستند. در جهت ایجاد عملکرد درست مدار همچنین نیاز به اعمال ساعت است که در این پژوهش ایجاد پارامتر ساعت با یک میدان مغناطیسی خارجی یکنواخت اعمال می‌شود. برای پیاده‌سازی این مدارها از ابزار MagCAD و برای بررسی صحت عملکرد این مدارها از شبیه‌ساز Modelsim استفاده شده است. با توجه به نتایج حاصل از این شبیه‌سازی می‌توان گفت که طرح پیشنهادی XOR سه ورودی تک‌لایه‌ای و چندلایه‌ای پیشنهادی در تعداد گیت‌ها به ترتیب ۵۰٪ و ۲۵٪، در تأخیر به ترتیب ۸۰٪ و ۸۰٪ و در تعداد المان‌های به کار رفته به ترتیب ۲۳٪ و ۲۱٪ نسبت به پژوهش مشابه دارای عملکرد بهتری هستند.

کلیدواژه: سلول نانومغناطیسی، گیت اکثریت، مدار XOR، منطق نانومغناطیس، نانوالکترونیک.

## ۱- مقدمه

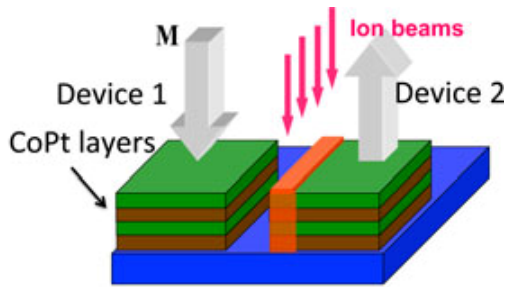
در سال‌های گذشته CMOS تکنولوژی غالب در پیاده‌سازی مدارها با کارایی بالا و توان پایین بوده است. با کاهش ناگزیر اندازه مشخصه ترانزیستورهای CMOS در حد نانومتری، این تکنولوژی با چالش‌های زیادی نظیر دمای بالای تراشه و در نتیجه کاهش دقت مدار عملیاتی، جریان نشتی زیاد، توان مصرفی بالا و غیره روبه‌رو شده است [۱] و در نتیجه تحقیق‌های فراوانی برای یافتن یک جایگزین مناسب برای این مدارها صورت پذیرفته است. فناوری‌های مختلفی از جمله ترانزیستورهای تک‌الکترونی<sup>۱</sup> [۲]، کلیدهای مولکولی<sup>۲</sup>، اسپین‌ترونیک<sup>۳</sup> [۳]، اتوماتای

این مقاله در تاریخ ۱۱ آبان ماه ۱۳۹۷ دریافت و در تاریخ ۲۲ اردیبهشت ماه ۱۳۹۸ بازنگری شد. این تحقیق توسط دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب بر اساس قرارداد شماره ۱۶/۹۴۱/ب پشنتیانی شده است.

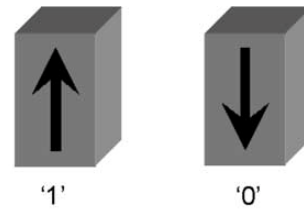
سمیرا سیدصالحی (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، (email: s\_sayedSalehi@azad.ac.ir).  
زینب آزادی مطلق، گروه علوم پایه، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، (email: azadi925@gmail.com).

4. Quantum Dot Cellular Automata
5. Megnetic Quantum Cellular Automata
6. Nanomagnetic Logic
7. In-plane Nanomagnetic Logic
8. Prependicular Nanomagnetic Logic

1. Single Electron Transistor
2. Molecular Device
3. Spintronic



شکل ۲: ناهمسانگردی مغناطیسی عمودی (PMA).



شکل ۱: تعیین بیت‌های "۰" و "۱" با استفاده از جهت مغناطش نانوذرات.

## ۲- مبانی و پژوهش‌های پیشین

در MQCA کوچک‌ترین عنصر پایه یک سلول نانومغناطیسی است. سلول‌های مغناطیسی بر اساس نوع ماده و جهت مغناطش ماده و نوع ساخت آن بر ۲ نوع می‌باشند. با آرایش مناسبی از سلول‌های نانومغناطیسی می‌توان گیت‌ها و سیم‌های نانومغناطیس را پیاده‌سازی کرد.

### ۲-۱ سلول‌های نانومغناطیس هم‌سطح (iNML)

در سلول‌های نانومغناطیس هم‌سطح معمولاً از ماده پرمالوی، به صورت ساختار تک‌حوزه‌ای، برای ذخیره‌سازی اطلاعات تک‌بیتی در درون آن‌ها استفاده می‌شود [۱۷]. در این سلول‌ها جهت مغناطش نانومگنت‌ها به عنوان حالت‌های منطقی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۸]. معمولاً نانومگنت‌ها در امتداد بعضی جهت‌ها کشیده شده که این جهت‌ها محور آسان مغناطش ناشی از ناهمسانگردی شکلی را تعیین می‌کنند. پیکربندی منطق‌های نانومغناطیسی از روی جهت‌گیری گشتاورهای مغناطیسی در راستای محور آسان مغناطش تعیین می‌شوند (شکل ۱). در این سلول‌ها دو پیکربندی پایدار وجود دارند که توسط یک سد انرژی از هم جدا شده‌اند. این سد انرژی مانع از ایجاد خطای ناشی از جهش بیت‌ها می‌شود.

### ۲-۲ سلول‌های نانومغناطیس عمودی (pNML)

در این نوع سلول‌ها بیشتر از مواد Co/Ni یا Co/Pt استفاده می‌شود. ناهمسانگردی مغناطیسی عمودی (PMA) توسط چندلایه‌های مغناطیسی با ترکیب لایه‌ای خاص مشخص می‌شوند. ضخامت لایه‌ها، تعداد لایه‌ها و همچنین نوع ماده لایه، ناهمسانگردی مؤثر و ضخامت هر لایه را تعیین می‌کنند. چندلایه‌های مغناطیسی می‌توانند به روش‌های متفاوتی تهیه شوند از جمله روش لیتوگرافی پرتو یونی به همراه زدایش [۱۶] می‌تواند برای تهیه لایه‌های نازک در ابعاد زیر میکرومتر به کار رود (شکل ۲). تابش پرتو یونی متمرکز (FIB) با ترکیب درونی لایه‌های Co/Pt منجر به کاهش ناهمسانگردی لایه‌ها می‌شود [۱۹]. مراکز هسته‌ای دیواره حوزه که به صورت مصنوعی تولید می‌شوند (ANC) می‌توانند توسط میزان شدت تابش و اندازه کنترل شوند [۲۰]. در نتیجه، توزیع میدان سوئیچینگ ذاتی (SFD) در نانومگنت‌ها بدون تأثیر باقی می‌ماند و توسط توزیع پایین‌تر ANC‌ها جایگزین می‌شود. با برهم‌نهی میدان‌های جفت‌شدگی از نانومگنت‌های همسایه روی ANC، هسته‌سازی دیواره حوزه‌ها مقید شده و شارش سیگنال جهت‌دهی شده با میدان‌های ساعت خارج از صفحه کلی می‌تواند به دست آید [۲۱].

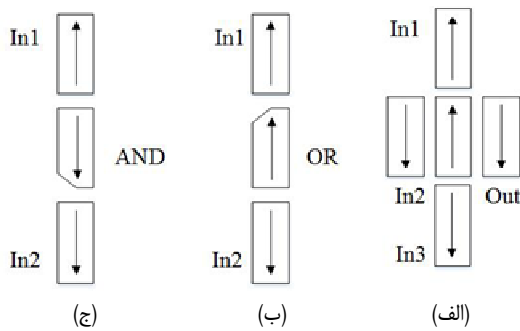
## ۲-۳ ساعت

یکی از مهم‌ترین مسایل در NML، بحث ساعت‌زنی برای انتشار درست اطلاعات در میان سلول‌های نانومغناطیسی می‌باشد. مفهوم ساعت، یک میدان مغناطیسی خارجی است که عموماً با عبور جریان از یک سیم مسی تولید می‌شود. تا به امروز، پژوهش‌های فراوانی در مورد ساختار ساعت‌زنی و مکانیزم آن انجام شده‌اند. معمولاً سیستم ساعت‌زنی<sup>۵</sup> در منطق نانومغناطیس هم‌سطح (iNML) سه‌فاز متشکل از فازهای سوئیچ<sup>۶</sup>، سوئیچ<sup>۷</sup>، نگهداشت<sup>۸</sup> و ریست<sup>۹</sup> می‌باشد [۲۲].

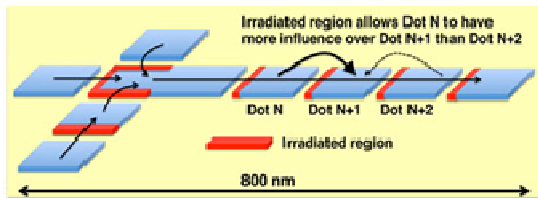
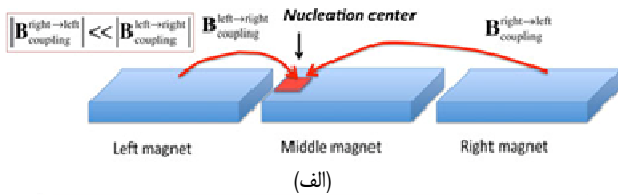
در سلول‌های نانومغناطیس عمودی (pNML) نیز می‌توان سیستم ساعت را اعمال کرد البته در بیشتر موارد به سیستم ساعت در این سلول‌ها اشاره‌ای نشده است. یو و همکارانش [۲۳] یک سیستم ساعت‌زنی برای این نوع سلول‌ها ارائه نمودند که در آن قطعه Co/Pt می‌تواند با یک میدان مغناطیسی خارج از صفحه<sup>۱۰</sup> ساعت‌زنی شده و مجدداً متحول شود [۲۴]. در طول هر چرخه اعمال میدان خارج از صفحه، یک فرایند سوئیچینگ رخ می‌دهد اگر و فقط اگر مگنت همسایه در حالت نیمه‌پایدار موازی قرار داشته باشد. بعد از تعداد دقیق و مشخصی از چرخه‌های میدانی که به وسیله مسیر تعیین می‌شوند، حالت‌های شبه‌پایدار حذف شده و حالت‌های پایه محاسباتی با منطق صحیح به دست می‌آیند. همان طور که در شکل ۳-الف مشاهده می‌شود فرض کنید که مغناطش خارج از صفحه در جهت  $Z$  قرار دارد. منطقه‌های با سایه تاریک، مؤلفه‌های مغناطش در جهت  $+Z$  (حالت یک) و مؤلفه‌های خارج از سایه، مغناطش در جهت  $-Z$  را مشخص می‌کنند (حالت صفر). در اینجا بازه‌های زمانی این میدان اعمالی به فرم سینوسی با  $T_{pulse}$  و بزرگی میدان با  $B_{pulse}$  مشخص شده است. با فرض این که مگنت‌های مورد استفاده در این سیستم از سمت چپ مورد تابش الکترومغناطیسی قرار گرفته‌اند، اطلاعات از سمت چپ به سمت راست شارش می‌یابند. تابش پرتو یونی متمرکز، جهت‌مندی انتشار سیگنال را تعیین می‌کند (از انتشار سیگنال از راست به چپ جلوگیری می‌نماید). زمانی که گذار موج طوری است که  $B_{pulse}$  منفی باشد، شبه‌پایداری بین مگنت‌های  $A$  و  $B$  از بین رفته و مگنت  $B$  به حالت جدید با منطق صحیح وابسته به ورودی جدید سوئیچ می‌کند. با کاربرد متوالی میدان ساعت خارج از صفحه، حالت ورودی به سمت پایین این خط منتشر می‌شود. با کاربرد متوالی میدان متغیر زمانی، بیت‌های چندگانه اطلاعات می‌توانند از طریق قسمت‌های پادفرومغناطیس به طور

5. Clocking
6. Switch
7. Hold
8. Reset
9. Out-of-Plane

1. Perpendicular Magnetic Anisotropy
2. Focused Ion Beam
3. Artificial Domain Wall Nucleation Center
4. Switching Field Distribution



شکل ۵: (الف) گیت اکثریت سه ورودی، (ب) گیت منطقی OR و (ج) گیت منطقی AND.

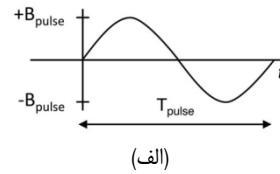


(ب)

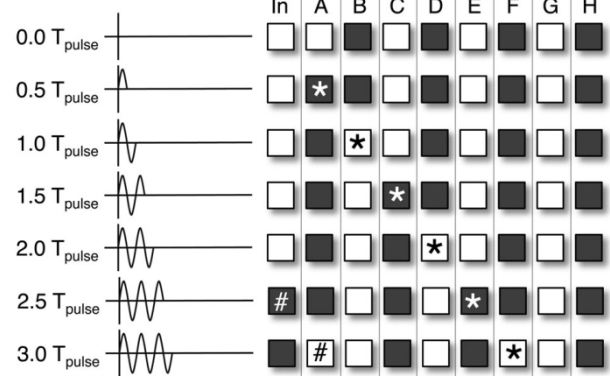
شکل ۶: (الف) آرایش سه سلول نانومغناطیسی عمود مورد تابش قرار گرفته و (ب) گیت اکثریت سه ورودی با سلول‌های مورد تابش قرار گرفته [۲۳].

گیت اکثریت سه ورودی با سلول نانومغناطیس هم‌سطح را نشان می‌دهد. با استفاده از سلول‌های هم‌سطح اربیب می‌توان شکل متفاوتی از گیت‌های AND (شکل ۵-ج) و OR (شکل ۵-ب) را داشت که از لحاظ مساحت و تعداد سلول، نسبت به حالت متعارف بهینه است [۲۶].

یو و همکارانش [۲۳] ساختار یک گیت اکثریت سه ورودی با سلول نانومغناطیسی عمودی معرفی کرده‌اند که در آن تابش الکترومغناطیسی برای شارش سیگنال استفاده شده است. این ساختار بر خلاف منطق نانومغناطیسی هم‌سطح (iNML) (جایی که ورودی‌ها و خروجی‌ها تأثیر یکسانی روی سلول مغناطیسی محاسبه‌گر دارند)، سلول تصمیم‌گیرنده سمت مورد تابش الکترومغناطیسی خود را در سمت ورودی دارد. این ساختار در شکل ۶ معرفی شده و مانند بقیه گیت‌های اکثریت با ثابت نگاه‌داشتن یکی از ورودی‌ها می‌توان منطق AND و OR را به دست آورد. یک جمع‌کننده با سه گیت اقلیت سه ورودی و دو معکوس‌کننده در [۲۷] پیاده‌سازی شده است. در این مقاله از سلول‌های نانومغناطیسی عمودی استفاده گردیده و همچنین برای شبیه‌سازی از ابزار MagCAD استفاده شده است. این شبیه‌ساز قادر به تولید کدهای VHDL است و می‌توان درستی مدار را با این کدها بررسی کرد. دو گیت اقلیت سه ورودی با مفهوم گیت TLG پیاده‌سازی شده‌اند (شکل ۷-ب و ۷-ج) که یکی از این گیت‌ها در دو لایه طراحی شده (شکل ۷-ج) و دیگری در یک لایه پیاده‌سازی شده است (شکل ۷-ب). شکل ۷-الف عبور سیم‌ها را در دو لایه نشان می‌دهد. در نهایت با چیدمان درست از گیت‌های اقلیت و عبور سیم‌ها از هم یک تمام جمع‌کننده معرفی کرده‌اند و درستی مدار ارائه شده را با کدهای VHDL مورد بررسی قرار داده‌اند (شکل ۷-د).



(الف)

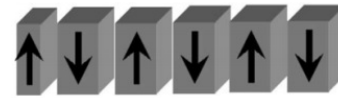


(ب)

شکل ۳: (الف) پالس ساعت اعمال‌شده به صورت out-of-plane و (ب) روش انتشار اطلاعات در درون یک سیم از نانومگنت‌ها (\* شارش داده‌ها را برای اولین ورودی و # شارش داده‌ها را برای حالت ورودی جدید بعد از  $2T_{pulse}$  در طول خط نشان می‌دهد) [۲۳].



(الف)



(ب)

شکل ۴: (الف) آرایش فرومغناطیس گشتاور مغناطیسی نانوذرات و (ب) آرایش پادفرومغناطیس گشتاور مغناطیسی نانوذرات.

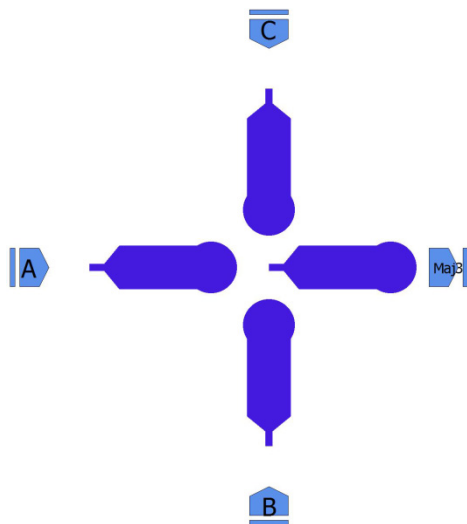
هم‌زمان حرکت کنند و یک خط لوله ذاتی ساخته می‌شود. این طرح ساعت‌زنی به طور تدریجی حالت‌های شبه‌پایدار مدار را خارج می‌کند و آن را در حالت پایه محاسباتی باقی قرار می‌دهد (شکل ۳-ب). مزیت مهم ساعت‌زنی onNML این است که آنها به یک میدان ساعت یکنواخت نیاز دارند که می‌تواند توسط الکترومگنت‌ها بر روی تراشه<sup>۲</sup> تولید شوند.

## ۲-۴ سیم نانومغناطیسی

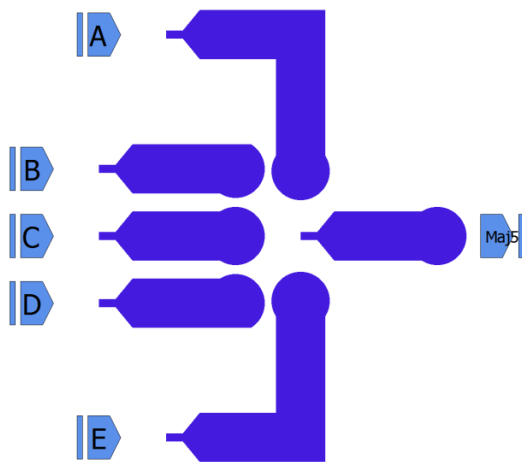
سیم نانومغناطیس یک خط از نانومگنت‌ها با برهم‌کنش نزدیک‌ترین همسایه از مگنت‌ها است که اطلاعات باینری در منطق نانومغناطیس را انتقال می‌دهد. سیم‌ها در iNML به صورت آرایش فرومغناطیس (شکل ۴-الف) و یا به صورت پادفرومغناطیسی (شکل ۴-ب)، حالت مغناطش را منتشر می‌کنند [۲۵].

## ۲-۵ گیت‌های منطقی

گیت منطقی پایه در منطق نانومغناطیس، گیت اکثریت سه ورودی است (شکل ۵-الف). با ثابت نگه داشتن یکی از ورودی‌ها، گیت اکثریت سه ورودی می‌تواند در نقش AND یا OR قرار بگیرد. شکل ۵-الف یک



شکل ۸: چیدمان گیت اکثریت سه ورودی در یک لایه با استفاده از شبیه‌ساز MagCAD.



شکل ۹: چیدمان گیت اکثریت پنج ورودی در یک لایه با استفاده از شبیه‌ساز MagCAD.

یعنی اگر مجموع وزنی  $n$  ورودی از آستانه  $T$  بزرگ‌تر باشد، خروجی گیت به عنوان منطق ۱ در نظر گرفته می‌شود و در غیر این صورت منطق صفر است. ورودی‌ها و خروجی گیت به صورت  $x \in \{0, 1\}$  نمایش داده می‌شوند و  $w_i$  وزن را مشخص می‌کند.

$x \in \{-1, 1\}$  به جای  $\{0, 1\}$  استفاده می‌شود (که نمایش مناسب‌تری برای بیان گیت‌های مغناطیسی می‌باشد) و فرض می‌گردد که  $T = 0$  است و (۱) به (۲) تبدیل می‌شود

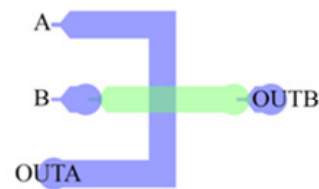
$$F^T(x_1, \dots, x_n) = 1 \text{ if } \sum_{i=1}^n w_i x_i \geq \cdot \quad (2)$$

$$F^T(x_1, \dots, x_n) = 0 \text{ if } \sum_{i=1}^n w_i x_i < \cdot$$

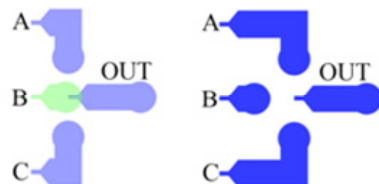
مقدار صفر در تعریف  $T$  تابعیت گیت را محدود نمی‌کند [۲۹].

### ۳-۲ گیت منطقی پنج ورودی نانومغناطیسی

برای چیدمان گیت منطقی پنج ورودی در منطق نانومغناطیس عمودی به دو روش می‌توان عمل کرد: یک روش به صورت ساختار چندلایه‌ای و روش دیگر را در یک ساختار تک‌لایه‌ای می‌توان شبیه‌سازی کرد. شکل ۹ چیدمان گیت اکثریت ۵ ورودی در یک لایه را نشان می‌دهد. برای این طرح نیاز است از سلول‌های ترمینالی‌ای که جهت سیگنال را ۴۵ درجه



(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۷: (الف) چیدمان عبور سیم‌ها، (ب) چیدمان گیت اقلیت سه ورودی در یک لایه، (ج) چیدمان گیت اقلیت سه ورودی در چند لایه و (د) چیدمان مدار تمام جمع‌کننده [۲۷].

بیشترین تأخیر در این مدار برابر با  $2.03 \mu\text{s}$  می‌باشد. این شبیه‌ساز قادر است زمان مسیر بحرانی (زمان انتشار برای طولانی‌ترین نانوسیم) را محاسبه کند که برای گیت اقلیت دولایه‌ای این مقدار با  $5.7 \times 10^{-7} \mu\text{s}$  برابر است و همچنین زمان مسیر بحرانی برای مدار تمام جمع‌کننده  $6.26 \times 10^{-7} \mu\text{s}$  می‌باشد.

### ۳- طرح‌های پیشنهادی

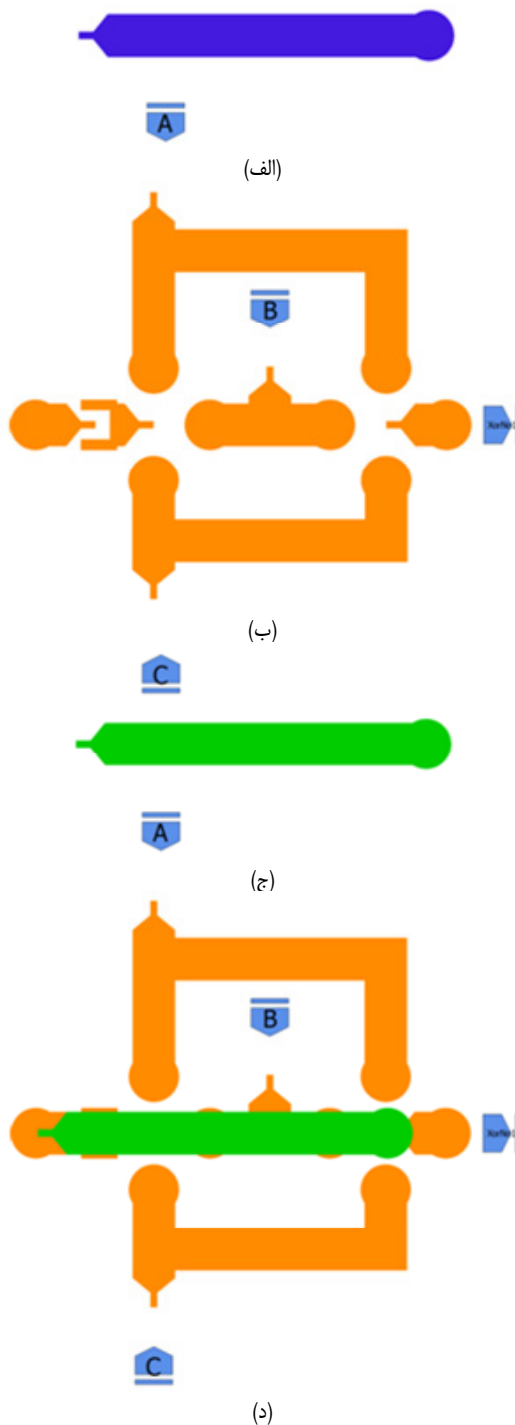
برای پیاده‌سازی مدار XOR از شبیه‌سازی MagCAD استفاده شده است [۲۸]. این ابزار شبیه‌ساز به محققان این امکان را می‌دهد که پیاده‌سازی را به صورت سلول‌های هم‌سطح و عمودی داشته باشند. اعمال ساعت برای همه سلول‌های نانومغناطیسی عمودی یکسان و به صورت یک سیگنال سینوسی در نظر گرفته شده است.

### ۳-۱ گیت منطقی سه ورودی نانومغناطیسی

چیدمان یک گیت اکثریت با استفاده از ابزار MagCAD در شکل ۸ نشان داده شده است. این گیت از سه ورودی تشکیل گردیده که به وسیله سلول ترمینال به مرکز هسته‌سازی در یک لایه وارد شده است. با توجه به کاربرد این گیت در مدار این امکان وجود دارد که یک ورودی یا دو ورودی این مدار از لایه بالایی یا پایینی وارد شوند و طراحی به صورت چندلایه‌ای باشد. گیت‌های اکثریت و اقلیت نانومغناطیس عمودی بر پایه گیت آستانه پیاده‌سازی شده‌اند. گیت آستانه معمولاً به صورت گیتی با  $n$  ورودی و یک خروجی به صورت (۱) تعریف می‌شود [۲۹]

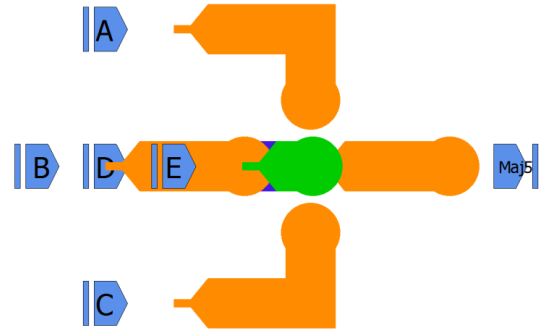
$$F^T(x_1, \dots, x_n) = 1 \text{ if } \sum_{i=1}^n w_i x_i \geq T \quad (1)$$

$$F^T(x_1, \dots, x_n) = 0 \text{ if } \sum_{i=1}^n w_i x_i < T$$

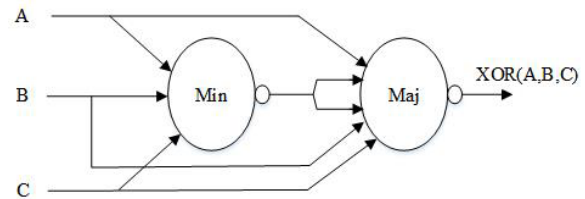


شکل ۱۲: (الف) لایه پایینی برای انتشار معکوس خروجی گیت اقلیت سه ورودی، (ب) لایه اصلی طرح پیشنهادی شامل چیدمان گیت اقلیت سه ورودی و گیت منطقی پنج ورودی، (ج) لایه بالایی برای انتشار معکوس خروجی گیت اقلیت سه ورودی و (د) نمای کلی چیدمان مدار XOR سه ورودی پیشنهادی (شماره یک) با استفاده از شبیه‌ساز MagCAD.

ورودی‌های گیت اکثریت پنج ورودی متصل شده است (شکل ۱۲-ب). همان‌طور که ذکر شد معکوس خروجی گیت اقلیت به دو ورودی از گیت اکثریت پنج ورودی وارد می‌شود که در لایه‌های بالایی و پایینی لایه اصلی، این خروجی‌ها به گیت اکثریت پنج ورودی اعمال می‌شوند. برای انتشار معکوس خروجی گیت اقلیت به ورودی دیگر گیت اکثریت پنج ورودی از لایه بالایی آن استفاده شده که در شکل ۱۲-ج نشان داده شده است. در نهایت نمای کلی چیدمان مدار XOR سه ورودی پیشنهادی در شکل ۱۲-د معرفی شده است.



شکل ۱۰: چیدمان گیت منطقی پنج ورودی در سه لایه با دو ورودی معکوس با استفاده از شبیه‌ساز MagCAD.



شکل ۱۱: دیاگرام بلوکی مدار XOR سه ورودی با استفاده از گیت اقلیت سه ورودی و گیت اکثریت پنج ورودی (در این طرح سه ورودی به گیت اقلیت سه ورودی و گیت اکثریت پنج ورودی اعمال شده‌اند و همچنین خروجی گیت اقلیت به دو ورودی گیت اکثریت پنج ورودی متصل شده و تابع خروجی مدار  $Maj(A, B, C, \bar{D}, \bar{E}) = XOR(A, B, C)$  است).

چرخش می‌دهند استفاده کرد. این گیت به دلیل استفاده از یک لایه، دارای تأخیر کمتری نسبت به گیت متناظرش در چندلایه‌ای می‌باشد اما بر حسب نیاز، بعضی مواقع در طراحی نیاز است در چند لایه مدار را طراحی کرد و همچنین طرح با ساختار چندلایه‌ای از تأثیر نوبت کمتری در ورودی‌ها نسبت به طرح متناظرش در تک‌لایه‌ای برخوردار است. به عبارت دیگر، طرح پیشنهادی در یک لایه به دلیل نزدیک بودن ورودی‌ها ممکن است بر روی هم تأثیر داشته باشند. شکل ۹ یک طرح ممکن از یک گیت اکثریت با پنج ورودی را نشان می‌دهد که این گیت پیشنهادی در ابزار طراحی شده است. شکل ۱۰ بیانگر این است که دو ورودی  $D$  و  $E$  تأثیر معکوس روی مرکز هسته‌سازی دارند و در واقع خروجی گیت برابر است با  $Maj(A, B, C, \bar{D}, \bar{E})$ .

### ۳-۳ مدار XOR سه ورودی پیشنهادی شماره یک

طراحی که می‌توان برای XOR سه ورودی پیشنهاد کرد متشکل از یک گیت اکثریت پنج ورودی و یک گیت اقلیت سه ورودی می‌باشد. دیاگرام این طرح در شکل ۱۱ معرفی شده است. تا به حال با استفاده از این ساختار مدارات XOR در تکنولوژی QCA با فناوری فلزی مطرح شده‌اند. در تکنولوژی نانومغناطیس در پژوهشی Breitkreutz و همکارانش [۳۰] به صورت تجربی این مدار را پیاده‌سازی کرده‌اند که چیدمان آن با این طرح متفاوت است. این طرح در تکنولوژی نانومغناطیس بر اساس سلول‌های عمودی، تا به حال با استفاده از شبیه‌ساز MagCAD شبیه‌سازی نشده است. چیدمان طرح پیشنهادی به دو صورت امکان‌پذیر است. ابتدا چیدمان XOR سه ورودی پیشنهادی در سه لایه طراحی می‌شود. برای مشخص شدن طرح، هر لایه به طور مجزا نشان داده شده است. شکل ۱۲-الف لایه زیرین را نشان می‌دهد که برای استفاده از انتشار معکوس خروجی گیت اقلیت سه ورودی به گیت اکثریت پنج ورودی می‌باشد. لایه اصلی شامل گیت اقلیت سه ورودی و گیت اکثریت پنج ورودی است که معکوس خروجی گیت اقلیت سه ورودی به دو تا از

برابر صفر باشند و یکی از ورودی‌های  $A$ ،  $B$  و  $C$  برابر با یک باشد خروجی مدار باید برابر یک شود. همان طور که در شکل ۱۵ ملاحظه می‌گردد خروجی به دست آمده با نتیجه مورد نظر برابر است. این خروجی بعد از  $1806 \text{ ns}$  به دست می‌آید.

شکل‌های ۱۷ و ۱۸ به ترتیب خروجی مدار گیت XOR سه ورودی در ساختار تک‌لایه‌ای و چندلایه‌ای را نشان می‌دهند. با توجه به تأخیر این دو مدار پیشنهادی، تأخیر در مدار سه لایه‌ای کمتر است.

تنها یک مدار XOR سه ورودی هست که با ابزار MagCAD شبیه‌سازی شده که جدول ۱ نتایج مقایسه طرح‌های پیشنهادی با مدار ذکر شده در [۲۷] را نشان می‌دهد. از نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که طرح‌های XOR سه ورودی پیشنهادی در پارامترهای تعداد گیت، المان‌های نانومغناطیس و تأخیر بهبود داشته‌اند.

### ۵- نتیجه‌گیری

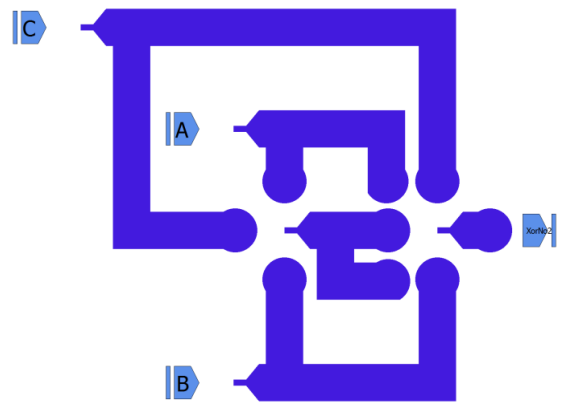
منطق نانومغناطیس (NML) یکی از فناوری‌هایی است که اطلاعات باینری را با ایزولاسیون‌های مغناطیسی که توسط لیتوگرافی تعیین می‌شوند، ذخیره و پردازش می‌کند. در این پژوهش با استفاده از سلول نانومغناطیس عمودی، گیت‌های منطقی سه ورودی و پنج ورودی با ساختار تک‌لایه‌ای و چندلایه‌ای پیشنهاد شدند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی که توسط ابزار MagCAD صورت گرفت حاکی از آن است که گیت منطقی پنج ورودی تک‌لایه‌ای نسبت به چندلایه‌ای دارای تأخیر کمتری است اما به دلیل نزدیکی ورودی‌ها در طرح تک‌لایه‌ای وجود نویز بیشتر است. هدف از این پژوهش پیاده‌سازی مدارهای XOR در رسیدن به مدارهای دیجیتال بنیادی در کامپیوترهای مبتنی بر سلول‌های نانومغناطیس بوده است. در نتیجه با گیت‌های بنیادی پیشنهادی نانومغناطیس بر پایه گیت‌های اقلیت و اکثریت سه ورودی و پنج ورودی طرح‌های پیشنهادی در شبیه‌ساز MagCAD شبیه‌سازی شدند. یک طرح XOR سه ورودی مبتنی بر یک گیت اقلیت سه ورودی و یک گیت اکثریت سه ورودی معرفی شد که چیدمان این طرح بر اساس ساختار تک‌لایه‌ای و چندلایه‌ای شبیه‌سازی شد. با توجه به نتایج حاصل شده، می‌توان نتیجه گرفت طرح چندلایه‌ای دارای تأخیر کمتری نسبت به طرح تک‌لایه‌ای است. بیشتر طرح‌های ارائه شده توسط محققان با استفاده از سلول‌های نانومغناطیس هم‌سطح هستند که قابل مقایسه با طرح پیشنهادی در این پژوهش نیستند. دو طرح با سلول‌های نانومغناطیس عمودی ارائه شده‌اند که یکی از طرح‌ها به صورت تجربی پیاده‌سازی شده است و در نتیجه تنها امکان مقایسه با یک طرح وجود داشت که نتایج حاصل نشان می‌دهند که طرح پیشنهادی XOR سه ورودی تک‌لایه‌ای و چندلایه‌ای پیشنهادی در تعداد گیت‌ها به ترتیب  $50\%$  و  $25\%$  در تأخیر به ترتیب  $80\%$  و  $80\%$  و در تعداد المان‌های به کار رفته به ترتیب  $23\%$  و  $21\%$  نسبت به مدار ارائه شده در [۲۷] بهبود یافته‌اند.

### ۶- سپاسگزاری

از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب برای حمایت مالی در انجام این طرح سپاسگزار هستیم.

### مراجع

[۱] م. حاجی‌رحیمی و ا. ا. کبیر، "طراحی عملگر گسترش تصاویر دوسطحی در تکنولوژی CMOS با توان کم و سرعت بالا"، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر/ایران، سال ۶، شماره ۴، صص. ۲۷۸-۲۸۶، زمستان ۱۳۸۷.



شکل ۱۳: چیدمان مدار XOR سه ورودی پیشنهادی در یک لایه (شماره دو) با استفاده از شبیه‌ساز MagCAD.

### ۳-۴ مدار XOR سه ورودی پیشنهادی شماره دو

در شکل ۱۳ چیدمان دیگری برای بلوک دیاگرام شکل ۱۱ در یک لایه مشاهده می‌شود. در این طرح به جای استفاده از گیت اکثریت پنج ورودی در سه لایه، از گیت اکثریت سه ورودی در یک لایه استفاده شده است. در نهایت برای اعمال سیگنال به ورودی  $A$ ، باید از عبور سیم‌ها از روی هم از لایه دیگری استفاده کنیم که با این چیدمان فقط به یک لایه اضافی نیاز است.

طرح پیشنهادی مذکور با طرح ارائه شده در پژوهش Breitkreutz و همکارانش [۳۰] مشابه است با این تفاوت که چیدمان طرح پیشنهادی این پژوهش به طوری است که یک ورودی در داخل مدار وجود دارد که با اضافه کردن یک لایه می‌توان به ورودی، سیگنال اعمال کرد در صورتی که در مدار پیشنهادی Breitkreutz و همکارانش [۳۰] باید دو لایه اضافه کرد تا به دو ورودی، سیگنال ورودی را وارد کرد. همچنین در آن طرح نیاز به معکوس کننده در خروجی است و در نتیجه یک گیت بیشتر نیاز است.

### ۴- نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی

در شبیه‌ساز MagCAD [۲۸]، پنج فایل خروجی تولید می‌کند که یکی از این فایل‌ها مربوط به خود برنامه MagCAD می‌باشد و بقیه فایل‌های قابل اجرا در شبیه‌ساز Modelsim هستند. یکی از فایل‌های ایجاد شده Testbench است. شکل ۱۴ شکل موج خروجی گیت اکثریت سه ورودی را نشان می‌دهد و همان طور که مشاهده می‌گردد خروجی بامعنی بعد از  $324 \text{ ns}$  حاصل می‌شود.

در خروجی مدار علاوه بر مقدار تولید شده، سه پارامتر نیز تولید می‌شود:

- پارامتر ۰: نشان‌دهنده زمان انتشار از آخرین دیواره حوزه<sup>۱</sup>

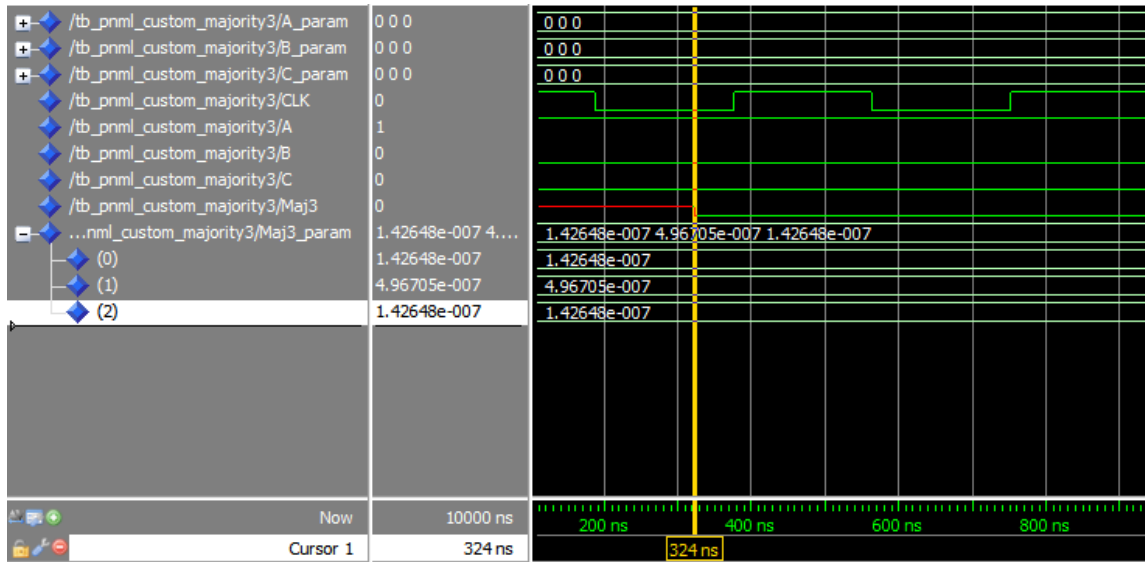
- پارامتر ۱: نشان‌دهنده کمترین زمان هسته‌سازی<sup>۲</sup>

- پارامتر ۲: نشان‌دهنده مسیر بحرانی<sup>۳</sup>

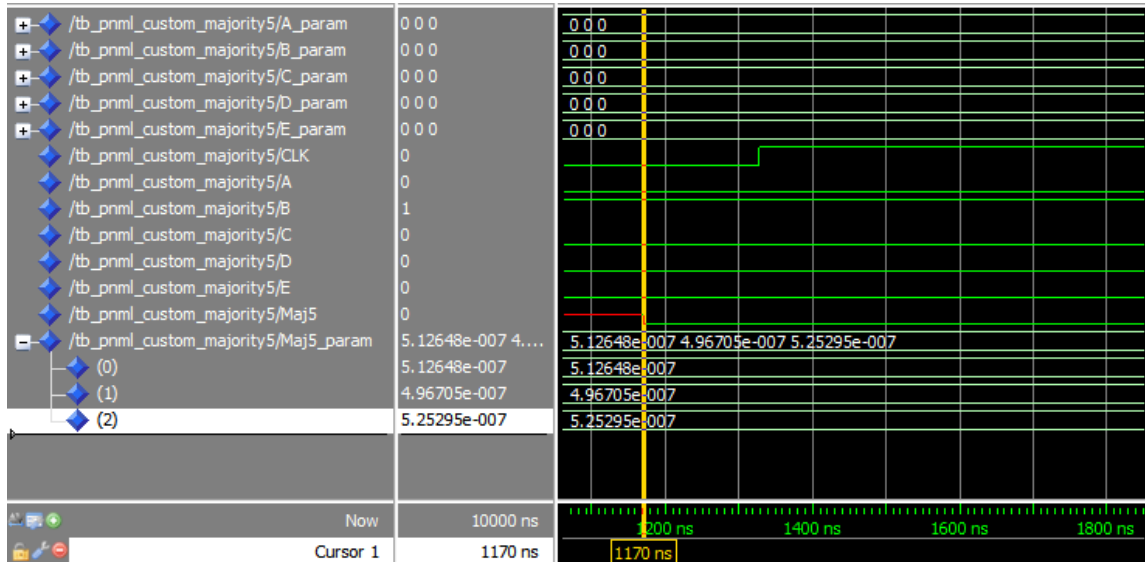
همان طور که ملاحظه می‌کنید زمانی که ورودی‌های مدار  $A=1$ ،  $B=0$  و  $C=0$  باشند، خروجی حاصل (Maj3) صفر می‌باشد. شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب خروجی گیت اکثریت پنج ورودی در سه لایه و خروجی گیت اکثریت پنج ورودی در یک لایه را نشان می‌دهند.

اگر در گیت اکثریت پنج ورودی در چند لایه، ورودی‌های  $D$  و  $E$

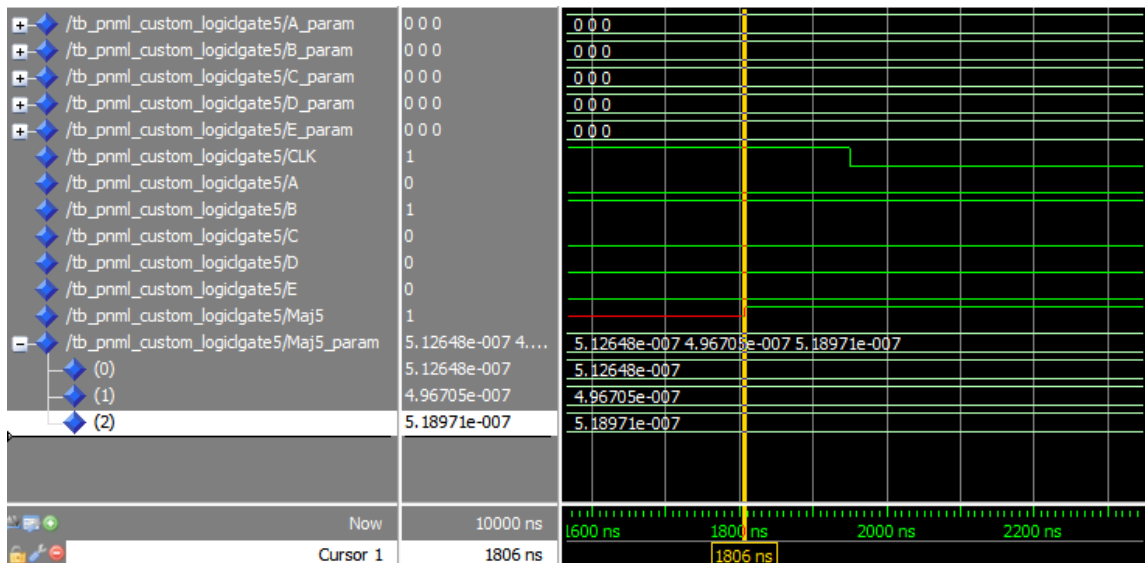
1. Domain Wall
2. Nucleation Time
3. Critical Path



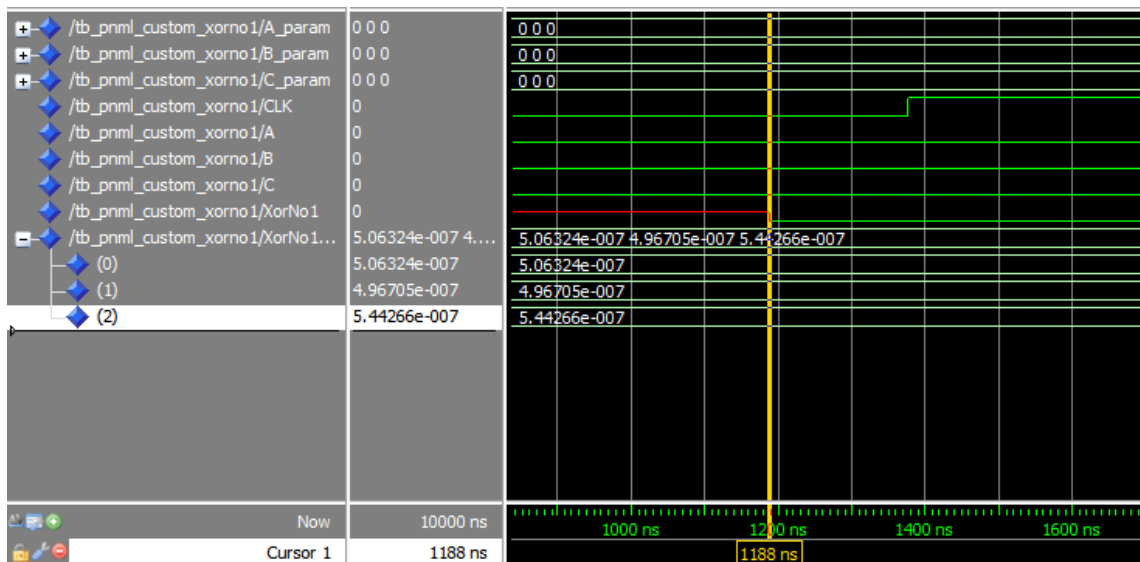
شکل ۱۴: شکل موج ورودی‌ها و خروجی گیت اکثریت سه ورودی تک‌لایه‌ای نانومغناطیسی (شکل ۸) که با اعمال مقدار یک و دو تا صفر در ورودی‌ها مقدار صفر در خروجی بعد از ۳۲۴ ns به دست آمده است. پارامتر مهم در این مدارها مسیر بحرانی است که با شماره دو نمایش داده شده و مقدار آن  $1.42648 \times 10^{-7} \mu s$  می‌باشد.



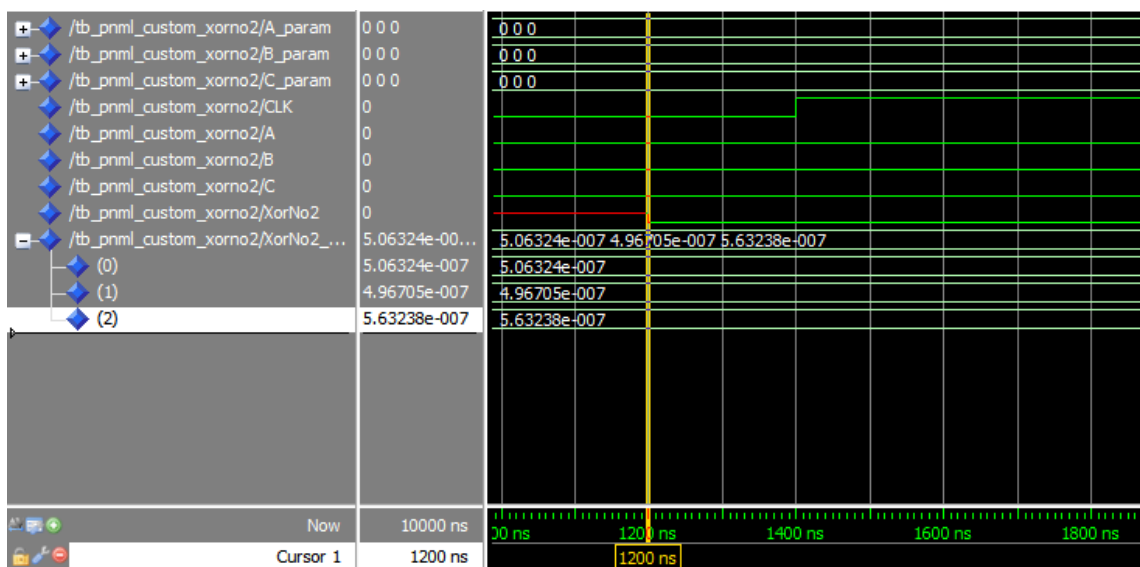
شکل ۱۵: شکل موج ورودی‌ها و خروجی گیت اکثریت پنج ورودی نانومغناطیسی تک‌لایه‌ای (شکل ۹). در این شکل خروجی صفر با تأخیر ۱۱۷۰ ns حاصل شده و مسیر بحرانی در گیت اکثریت پنج ورودی تک‌لایه‌ای  $5.25295 \times 10^{-7} \mu s$  می‌باشد.



شکل ۱۶: شکل موج ورودی‌ها و خروجی گیت اکثریت پنج ورودی نانومغناطیسی سه‌لایه‌ای (شکل ۱۰). در این شکل خروجی یک با تأخیر ۱۸۰۶ ns حاصل شده و مسیر بحرانی در گیت اکثریت پنج ورودی سه‌لایه‌ای  $5.18971 \times 10^{-7} \mu s$  می‌باشد.



شکل ۱۷: شکل موج ورودی‌ها و خروجی مدار XOR نانومغناطیسی سه‌لایه‌ای (شکل ۱۲). در این شکل خروجی صفر با تأخیر ۱۱۸۸ ns حاصل شده و مسیر بحرانی در این مدار  $5.44266 \times 10^{-7}$  μs می‌باشد.



شکل ۱۸: شکل موج ورودی‌ها و خروجی مدار XOR نانومغناطیسی تک‌لایه‌ای (شکل ۹). در این شکل خروجی صفر با تأخیر ۱۲۰۰ ns حاصل شده و مسیر بحرانی در این مدار  $5.63238 \times 10^{-7}$  μs می‌باشد.

جدول ۱: مقایسه مدارهای XOR سه ورودی.

تعداد لایه‌ها	Critical Path (μs)	تأخیر (ns)	تعداد المان‌های نانومغناطیس (pNML)	تعداد گیت‌ها
سه	$6.26 \times 10^{-7}$	۶۰۵۰	۵۱	۴
سه	$5.44266 \times 10^{-7}$	۱۱۸۸	۴۰	۳
یک	$5.63238 \times 10^{-7}$	۱۲۰۰	۳۹	۲

[7] S. X. Hu, J. Nahas, M. T. Niemier, and A. Orlov, "Nanomagnet logic (NML)," *Field-Coupled Nanocomputing: Paradigms, Progress, and Perspectives*, vol. 8280, pp. 21-32, May 2014.

[8] A. Imre, G. Csaba, L. Ji, A. Orlov, G. Bernstein, and W. Porod, "Majority logic gate for magnetic quantum-dot cellular automata," *Science*, vol. 311, no. 5758, pp. 205-208, Jan. 2006.

[9] M. Niemier, et al., "Clocking structures and power analysis for nanomagnet-based logic devices," in *Proc. of the Int. Symp. on Low Power Electronics and Design*, pp. 26-31, Portland, OR, USA, 27-29 Aug. 2007.

[2] L. A. Ponomarenko, et al., "Chaotic Dirac billiard in graphene quantum dots." *Science*, vol. 320, no. 5874, pp.356-358, Apr. 2008.

[3] S. Wolf, et al., "Spintronics: a spin-based electronics vision for the future," *Science*, vol. 294, no. 5546, pp. 1488-1495, Nov. 2001.

[4] C. S. Lent, P. D. Tougaw, W. Porod, and G. H. Bernstein, "Quantum cellular automata," *Nanotechnology*, vol. 4, no. 1, pp. 49-57, Jan. 1993.

[5] S. Lin, Y. B. Kim, and F. Lombardi, "A novel CNTFET-based ternary logic gate design," in *Proc. 52nd IEEE Int. Midwest Symp. on Circuits and Systems, MWSCAS'09*, pp. 435-438, Cancun, Mexico, 2-5 Aug. 2009.

[6] G. Turvani, L. D'Alessandro, and M. Vacca, "Physical simulations of high speed and low power nanomagnet logic circuits," *J. of Low*



- [24] I. Eichwald, *et al.*, "Nanomagnetic logic: error-free, directed signal transmission by an inverter chain," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 48, no. 11, pp. 4332-4335, Oct. 2012.
- [25] A. Orlov, *et al.*, "Magnetic quantum-dot cellular automata: recent developments and prospects," *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, vol. 3, no. 1, pp. 55-68, Mar. 2008.
- [26] E. Varga, M. T. Niemier, G. Csaba, G. H. Bernstein, and W. Porod, "Experimental realization of a nanomagnet full adder using slanted-edge magnets," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 49, no. 7, pp. 4452-4455, Jul. 2013.
- [27] F. Riente, U. Garlando, G. Turvani, M. Vacca, M. R. Roch, and M. Graziano, "MagCAD: tool for the design of 3-D magnetic circuits," *IEEE J. on Exploratory Solid-State Computational Devices and Circuits*, vol. 3, pp. 65-73, Sept. 2017.
- [28] U. Garlando and F. Riente, "ToPoliNano & MagCAD: a complete framework for design and simulation of digital circuits based on emerging technologies," in *Proc. IEEE 15th Int. Conf. on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design, SMACD'18*, pp. 153-156, Jul. 2018.
- [29] A. Papp, *et al.*, "Threshold gate-based circuits from nanomagnetic logic," *IEEE Trans. on Nanotechnology*, vol. 13, no. 5, pp. 990-996, Sept. 2014.
- [30] S. Breikreutz, *et al.*, "Experimental demonstration of a 1-bit full adder in perpendicular nanomagnetic logic," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 49, no. 7, pp. 4464-4467, Jul. 2013.
- [10] R. Cowburn and M. Welland, "Room temperature magnetic quantum cellular automata," *Science*, vol. 287, no. 5457, pp. 1466-1468, Feb. 2000.
- [11] A. Orlov, A. Imre, G. Csaba, L. Ji, W. Porod, and G. Bernstein, "Magnetic quantum-dot cellular automata: recent developments and prospects," *J. of Nanoelectronics and Optoelectronics*, vol. 3, no. 1, pp. 55-68, Mar. 2008.
- [12] T. R. Soares, I. F. Silva, L. G. Melo, and O. P. V. Neto, "A new methodology for design and simulation of NML circuits," in *Proc. IEEE 7th Latin American Symp. on Circuits & Systems, LASCAS'16*, pp. 259-262, Florianopolis, Brazil, 28 Feb.-2 Mar. 2016.
- [13] X. Yang, L. Cai, and Q. Kang, "Magnetic quantum cellular automata-based logic computation structure: a full-adder study," *J. of Computational and Theoretical Nanoscience*, vol. 9, no. 4, pp. 621-625, Apr. 2012.
- [14] B. Zhang, X. Yang, Z. Wang, and M. Zhang, "Innovative orderly programmable in-plane majority gates using trapezoid shape nanomagnet logic devices," *Micro & Nano Letters*, vol. 9, no. 5, pp. 359-362, May 2014.
- [15] T. R. Soares, J. G. N. Rahmeier, V. C. De Lima, L. Lascasas, L. G. C. Melo, and O. P. V. Neto, "NMLSim: a nanomagnetic logic (NML) circuit designer and simulation tool," *J. of Computational Electronics*, vol. 17, no. 3, pp. 1370-1381, Sept. 2018.
- [16] J. Kiermaier, S. Breikreutz, X. Ju, G. Csaba, D. Schmitt-Landsiedel, and M. Becherer, "Field-coupled computing: investigating the properties of ferromagnetic nanodots," *Solid-State Electronics*, vol. 65, pp. 240-245, Nov. 2011.
- [17] J. F. Pulecio and S. Bhanja, "Magnetic cellular automata coplanar cross wire systems," *J. of Applied Physics*, vol. 107, no. 3, Article ID 034308, Feb. 2010.
- [18] S. Breikreutz, *et al.*, "Experimental demonstration of a 1-bit full adder in perpendicular nanomagnetic logic," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 49, no. 7, pp. 4464-4467, Jul. 2013.
- [19] C. Vieu, *et al.*, "Modifications of magnetic properties of Pt/Co/Pt thin layers by focused gallium ion beam irradiation," *J. of Applied Physics*, vol. 91, no. 5, pp. 3103-3110, Mar. 2002.
- [20] S. Breikreutz, J. Kiermaier, S. Vijay Karthik, G. Csaba, D. Schmitt-Landsiedel, and M. Becherer, "Controlled reversal of Co/Pt dots for nanomagnetic logic applications," *J. of Applied Physics*, vol. 111, no. 7, Article ID 07A715, Apr. 2012.
- [21] S. Breikreutz, J. Kiermaier, X. Ju, G. Csaba, D. Schmitt-Landsiedel, and M. Becherer, "Nanomagnetic logic: demonstration of directed signal flow for field-coupled computing devices," in *Proc. IEEE Proceedings of the European Solid-State Device Research Conf., ESSDERC'11*, pp. 323-326, Helsinki, Finland, 12-16 Sept. 2011.
- [22] M. Vacca, *et al.*, "Electric clock for nanomagnet logic circuits," *Field-Coupled Nanocomputing*, vol. 8280, pp. 73-110, Jun. 2014.
- [23] X. Ju, M. T. Niemier, M. Becherer, W. Porod, P. Lugli, and G. J. I. T. O. N. Csaba, "Systolic pattern matching hardware with out-of-plane nanomagnet logic devices," *IEEE Trans. on Nanotechnology*, vol. 12, no. 3, pp. 399-407, Mar. 2013.

**سمیرا سیدصالحی** تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی کامپیوتر گرایش سخت‌افزار در سال ۱۳۸۴ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز و مقطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی کامپیوتر گرایش معماری کامپیوتر به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۰ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات به پایان رسانده است و هم‌اکنون عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی کامپیوتر دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی مدار با فناوری نانو از جمله آتاماتای سلولی کوانتومی نانومغناطیس، معماری کامپیوتر، محاسبات، شبکه روی تراشه.

**زینب آزادی مطلق** در سال ۱۳۸۲ مدرک کارشناسی فیزیک کاربردی را از دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی تهران و در سال ۱۳۸۶ مدرک کارشناسی ارشد فیزیک ماده چگال را با کسب رتبه‌ی اول از دانشگاه اصفهان دریافت نمود. وی در سال ۱۳۸۹ در مقطع دکتری فیزیک دانشگاه خوارزمی تهران پذیرفته شد. در طی تحصیل در مقطع دکتری به همکاری علمی با صنایع قطعات الکترونیک ایران (صایران) پرداخت. وی در سال ۱۳۹۴ از مقطع دکتری فیزیک ماده چگال دانشگاه خوارزمی فارغ التحصیل شد. نام‌برده از سال ۱۳۹۰ استاد فیزیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی وی متنوع می‌باشد از جمله: سنتز نانومواد و بررسی خواص فیزیکی آنها، بررسی نانوذرات مغناطیسی، تهیه‌ی لایه‌های نازک و کاربرد آنها در صنایع و تکنولوژی‌های پیشرفته، بررسی خواص اپتوالکترونیکی نانوذرات.