

طراحی یک گیت اکثریت پنج ورودی تحمل پذیر اشکال در اتوماتای سلولی کوانتومی

سمیه جعفر علی جاسبی^۱ فرزانه جهانشاهی جواران^۲ حسین خادم الحسینی^۳ امیر صباغ ملاحسینی^۴

۱- استادیار- دانشکده مهندسی مکانیک- برق و کامپیوتر- واحد علوم و تحقیقات- دانشگاه آزاد اسلامی- تهران- ایران

sjassbi@srbiau.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی مکانیک- برق و کامپیوتر- واحد علوم و تحقیقات- دانشگاه آزاد اسلامی- تهران- ایران

farzanejahanshahi@gmail.com

۳- استادیار- گروه مهندسی کامپیوتر- واحد بیضا، دانشگاه آزاد اسلامی- بیضا- ایران

h.khademolhosseini@srbiau.ac.ir

۴- استادیار- گروه مهندسی کامپیوتر- واحد کرمان- دانشگاه آزاد اسلامی- کرمان- ایران

amir@iauk.ac.ir

چکیده: اتوماتای سلولی کوانتومی یک تکنولوژی جدید جهت پیاده سازی گیت‌های منطقی و مدارهای دیجیتال در مقیاس نانو است. با کاهش ابعاد قطعات، حساسیت مدار بیشتر شده و مدارهای کوانتومی نسبت به عوامل نامساعد محیط آسیب پذیرتر هستند. با توجه به اهمیت طراحی مدارات تحمل پذیر اشکال، در این مقاله به ارائه یک گیت اکثریت پنج ورودی با ویژگی تحمل پذیری اشکال در تکنولوژی اتوماتای سلولی کوانتومی می‌پردازیم و تمام اشکال‌های ممکن در پروسه جایگذاری سلول‌ها در مکان‌های خاصی در روی سطح را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. این اشکال‌ها شامل جابجایی، حذف، چرخش و سلول اضافه می‌باشند. در گام نخست به گیت مورد بررسی چهار نوع اشکال ذکر شده اعمال گردیده و در گام بعدی صحت عملکرد مدار با موتور شبیه‌ساز QCADesigner مورد ارزیابی قرار داده می‌شود. برای یافتن چنین گیت اکثریتی روش‌های مختلفی از جمله روش افزودن سلول (که همان تزریق افزونگی به مدار است) و روش چینش خاص سلول‌ها مورد آزمایش قرار می‌گیرد. سعی بر این است که طرحی یافت شود که حتی الامکان تنها باچینش خاص سلول‌ها توانایی مقاومت در برابر نقص‌های احتمالی را داشته باشد به گونه ای که حداقل سربار به مدار جهت تحمل پذیری اشکال تحمیل شود. نتایج نشان می‌دهد که گیت اکثریت معرفی شده در مقایسه با موارد مشابه از برتری قابل توجهی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: تکنولوژی اتوماتای سلولی کوانتومی، نانو الکترونیک، تحمل پذیری اشکال، گیت اکثریت

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.2.39

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۹/۰۲/۲۲

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵

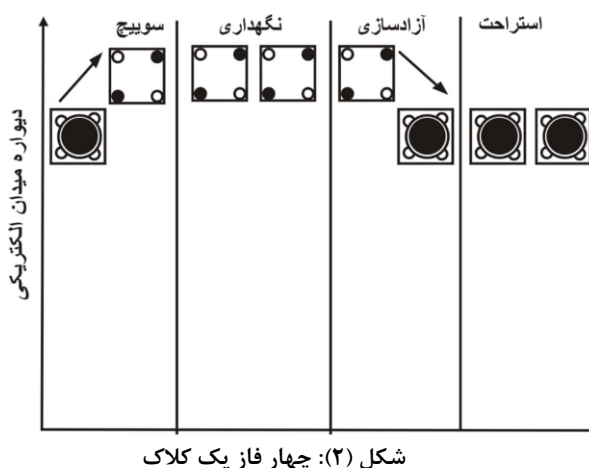
تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۰/۰۳/۰۲

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر حسین خادم الحسینی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - بیضا - خیابان دانشگاه آزاد اسلامی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد بیضا - گروه مهندسی کامپیوتر

۱- مقدمه

QCA دارای مکانیزم مبتنی بر کلاک می‌باشد که شامل یک سیگنال چهار کلاک با فرکانس‌های برابر است. یکی از سیگنال‌های کلاک را به عنوان مرجع (فاز = 0) و بقیه را با تاخیر یک (فاز = $\frac{\pi}{2}$)، دو (فاز = π) و سه (فاز = $\frac{3\pi}{2}$) چهارم از پریود در نظر می‌گیریم. کلاک عاملی الکترونیکی است که حرکت الکترون‌ها در داخل سلول را کنترل می‌کند. در واقع نحوه کنترل آن به این صورت است که اگر اطلاعاتی به قسمتی از مدار برسد که باید با چند ورودی دیگر ترکیب شده و خروجی تولید کند، در صورتی که ورودی‌های دیگر دیرتر به آن قسمت مدار برسند، از انتشار اطلاعات در آن قسمت تا رسیدن ورودی‌های دیگر جلوگیری می‌کند. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، هر سیگنال کلاک به چهار بخش سوئیچ^۱، نگهداری^۲، آزادسازی^۳ و استراحت^۴ تقسیم می‌شود [۸].



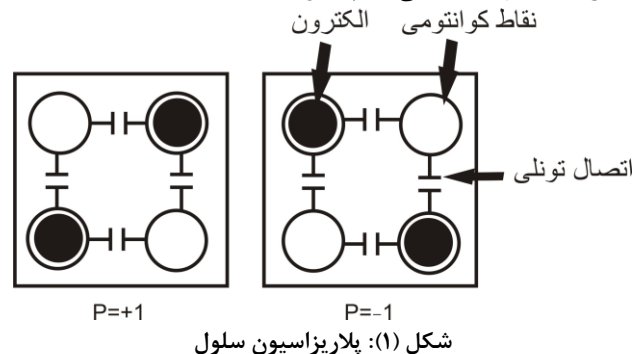
هر سلول نیز بر سلول‌های مجاور تاثیر می‌گذارد. در صورتی که دو سلول در کنار یکدیگر قرار داشته باشند، همواره در وضعیتی قرار می‌گیرند که نیروی دافعه به حداقل برسد. از یک آرایه سلول‌های کنارهم می‌توان مانند یک سیم برای انتشار اطلاعات استفاده کرد. همچنین می‌توان سلول‌ها را به حالت ۴۵ یا ۹۰ درجه قرار داد که سیم ۴۵ درجه با چرخش ۴۵ درجه ای سلول‌ها تشکیل شده است. در این نوع سیم ارزش باینری به صورت متوالی درون سلول‌ها تغییر می‌کند [۹-۱۱]. توانایی عبور سیم‌ها از روی هم نیز از مزیت‌های این تکنولوژی است. همانگونه که در شکل ۳ دیده می‌شود در این حالت سیم‌ها را می‌توان در لایه‌های متفاوت قرار داد و این سیم‌ها روی هم تاثیر منفی ندارند یا اینکه می‌توان با بکارگیری هر دو نوع سلول، دو نوع سیم را از روی هم رد کرد.

با توجه به روند حرکت به سمت فناوری نانو اتوماتای سلولی کوانتومی (QCA) یک تکنولوژی جدید جهت پیاده سازی گیت‌های منطقی و مدارهای دیجیتال در مقیاس نانو است. این تکنولوژی دارای ویژگی‌های بسیاری از قبیل مساحت کم، سرعت پردازش بالا و توان مصرفی کم است و همچنین حذف جریان الکتریکی و حذف عنصر خازن یکی از دلایل محبوبیت آن محسوب می‌گردد [۴-۱]. در QCA اطلاعات توسط اعداد باینری بیان می‌شوند با این تفاوت جای سوئیچ جریان را یک سلول گرفته است. یک وضعیت سلول، ۱ باینری و دیگری ۰ باینری را بیان می‌کند در حالی که هیچ جریانی به سلول وارد یا از آن خارج نمی‌شود. میدان ناشی از شکل بار یک سلول شکل بار یک سلول دیگر را تغییر می‌دهد. این ارتباط متقابل با یک طرح زمانبندی همراه است که باعث تنظیم اثر بین حالات می‌شود و این امر برای محاسبه با کمترین میزان اتلاف توان کافی است. در سال‌های اخیر، اتوماتای سلولی کوانتومی بسیار مورد توجه واقع شده است زیرا طراحی‌ها و شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که اتوماتای سلولی کوانتومی قابلیت‌های زیادی در مقایسه با CMOS خواهد داشت ولی هنوز هم به روشنی معلوم نیست که این فناوری بتواند جایگزین CMOS شود حتی با آنکه بسیاری از مشکلات و موانع ساخت اتوماتای سلولی کوانتومی با گذشت زمان در حال مرتفع شدن می‌باشد [۵].

۲- مفاهیم اولیه QCA

در شکل ۱ یک سلول QCA چهار نقطه ای آمده است این چهار نقطه کوانتومی به شکل یک مربع قرار می‌گیرند.

دقیقاً دو الکترون متحرک درون سلول قرار می‌گیرند که توانایی حرکت بین نقاط کوانتومی متفاوت درون یک سلول را با استفاده از تونل زنی الکترونی دارند و حالت‌های پایدار وقتی برقرارند که حفره‌ها به صورت قطری اشغال شده باشند. محل قرارگیری این دو الکترون در حفره‌ها با توجه به قانون دافعه کولنی در گوشه‌های مخالف اریب خواهد بود که دو ساختار را ایجاد می‌کند. این دو ساختار دو قطب +۱ و -۱ را نمایش می‌دهند که در محاسبات، مقدارهای منطقی ۱ و ۰ را به ترتیب به آنها نسبت می‌دهیم [۶ و ۷].

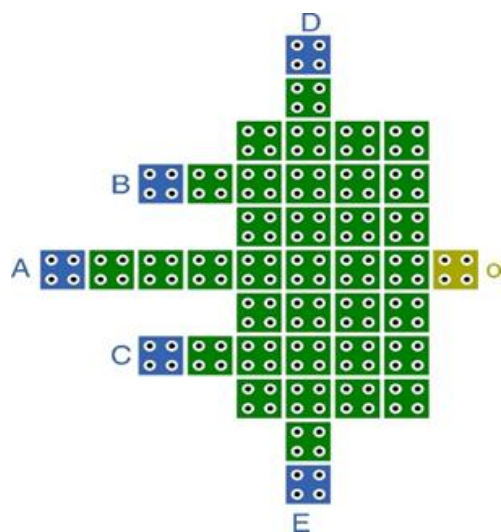


شکل (۱): پلاریزاسیون سلول

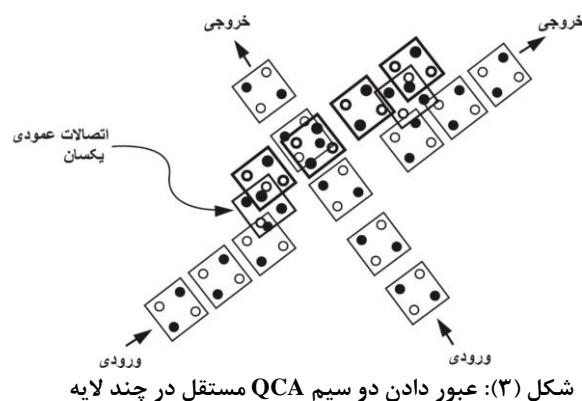
اشکال سلول اضافه اشکالی است که هنگام فرایند جایگذاری سلول‌ها ممکن است یک یا تعدادی سلول اضافی به مدار اضافه گردد [۲۰ و ۲۱].

۴- طرح پیشنهادی گیت اکثریت پنج ورودی تحمل پذیر اشکال

گیت اکثریت پنج ورودی تحمل پذیر اشکال پیشنهادی در شکل ۵ نمایش داده شده است. این گیت با ۴۱ سلول کوانتومی در فضای اشغالی 388×4 نانومتر مربع طراحی شده است. از جنبه ساختاری چینش مناسب سلول‌های ورودی و طول سیم‌های مورد استفاده سبب تاثیر هماهنگی آن‌ها و در نتیجه ایجاد گیت اکثریت پنج ورودی شده است. نتایج شبیه‌سازی حاصل از موتورهای شبیه‌ساز QCADesigner نشان دهنده کارایی صحیح مدار برای تمام ۳۲ ترکیب ورودی است. بردارهای آزمون بصورت متوالی به ورودی‌ها اعمال شده و شکل موج حاصل توسط هریک از موتورهای جداگانه بررسی شده است. تطبیق شکل موج‌ها نشان دهنده صحت عملکرد مدار طراحی شده است. شکل ۶ نتیجه شبیه‌سازی bistable approximation مدار را نمایش داده است.

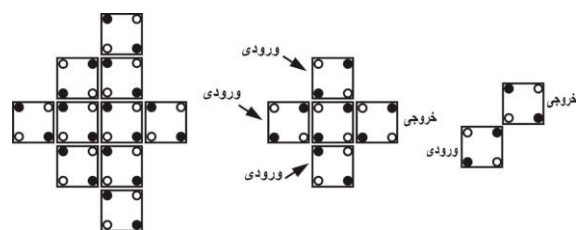


شکل (۵): گیت اکثریت پنج ورودی تحمل پذیر اشکال پیشنهادی طراحی شده با حداقل پیچیدگی سخت‌افزاری در فناوری اتوماتای سلولی کوانتومی



شکل (۳): عبور دادن دو سیم QCA مستقل در چند لایه

گیت معکوس کننده و گیت اکثریت دو گیت پایه در فناوری QCA می‌باشند. گیت اکثریت با در نظر گرفتن تمام حالات ورودی، خروجی اش همواره اکثریت را نشان می‌دهد. بیشتر مدارها بر پایه این دو گیت ساخته می‌شوند [۱۵-۱۲]. در شکل ۴ دو گیت اکثریت ۳ و ۵ ورودی و یک گیت معکوس کننده نشان داده شده است.



شکل (۴): گیت‌های (الف) معکوس کننده، (ب) اکثریت سه ورودی و (ج) اکثریت پنج ورودی

۳- انواع اشکال‌ها

در مرحله ساخت QCA رخداد نقص در هر دو فاز سنتز (که در آن تک سلول‌ها ساخته می‌شوند) و جایگذاری (که در آن سلول‌ها در مکان‌های خاصی در روی سطح قرار داده می‌شوند) محتمل است. نقص در مرحله سنتز ممکن است باعث شود سلول یا سلول‌هایی تعدادی از حفره‌ها و یا الکترون‌های خود را از دست دهند یا تعدادی حفره یا الکترون اضافی کسب کنند. این گونه نقص‌ها عملیات صحیح سلول را مختل می‌کنند و معمولاً به راحتی قابل تشخیص هستند اما نقص در پروسه جایگذاری محتمل‌تر از پروسه سنتز است. به نقص‌های بوجود آمده در فاز جایگذاری misplacement گفته می‌شود. اشکال‌های ممکن که در این تکنولوژی اتفاق می‌افتند شامل اشکال جابجایی، اشکال حذف، اشکال چرخش و اشکال سلول اضافه می‌باشند [۱۹-۱۶]. اشکال جابجایی اشکالی است که سلول‌های کوانتوم در جهت اصلی خود جابجا می‌شوند. اشکال حذف اشکالی است که سلولی از مدار جا افتاده است. اشکال چرخش یعنی سلول در تناسب با سلول‌های مجاور به گونه ای می‌چرخد که جهت سلول تغییر می‌کند و

۴-۲- تحمل پذیری اشکال جابجایی

نتایج حاصل از تحلیل اشکال جابجایی گیت پیشنهادی در جدول ۱ نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است، جابجایی ۱۰ سلول انتخابی به همراه سلول‌های ورودی و خروجی مدار به عنوان سلول‌های آزمون در چهار راستای شمال، جنوب، شرق و غرب مورد بررسی قرار گرفته‌اند. حداکثر میزان مجاز اشکال جابجایی در فرآیند چینه‌سولوی برای هر یک از سلول‌ها با حفظ عملکرد صحیح سلول خروجی (O) مورد بررسی قرار گرفته است. نظر به اهمیت بالای سلول‌های ورودی و خروجی عملکرد دو سلول را مورد بررسی قرار می‌دهیم، برای مثال سلول A می‌تواند تا ۵ و ۱ نانومتر در سمت غرب و شرق (حرکت افقی) جابجا شود و از طرفی ۶ نانومتر جابجایی در راستای عمودی برای این سلول قابل تصور است. سلول D با ۵ نانومتر جابجایی در راستای افقی و ۴ نانومتر در راستای شمال بصورت قابل توجهی تحمل پذیری مدار را بالا برده است. این نکته شایان توجه است که تمامی سلول‌های میانی که توسط سلول‌های دیگر محصور شده‌اند تحمل پذیری ۱ نانومتر جابجایی در چهار جهت را دارا هستند.

جدول (۱): حداکثر تحمل پذیری در برابر اشکال جابجایی (اعداد

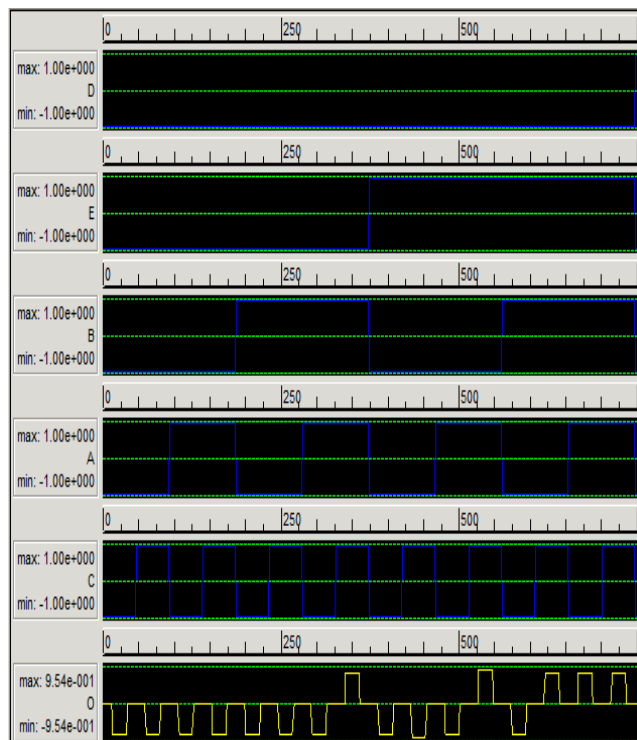
نمایش داده شده حداکثر جابجایی مجاز بر حسب نانومتر با حفظ

عملکرد صحیح خروجی هستند)

سلول مورد بررسی	جابجایی در راستای افقی (غرب)	جابجایی در راستای افقی (شرق)	جابجایی در راستای عمودی (جنوب)	جابجایی در راستای عمودی (شمال)
A	۵	۱	۶	۶
B	۲	۱	۳	۳
C	۲	۱	۳	۳
D	۵	۵	۱	۴
E	۵	۵	۴	۱
O	۱	۳	۳	۳
1	۵	۱	۱	۵
2	۱	۱	۱	۱
3	۱	۶	۱	۱
4	۱	۱	۱	۱
5	۱	۱	۱	۱
6	۱	۱	۴	۴
7	۱	۱	۱	۱
8	۱	۱	۱	۱
9	۱	۶	۷	۱
10	۱	۱	۱	۱

۴-۳- تحمل پذیری اشکال حذف

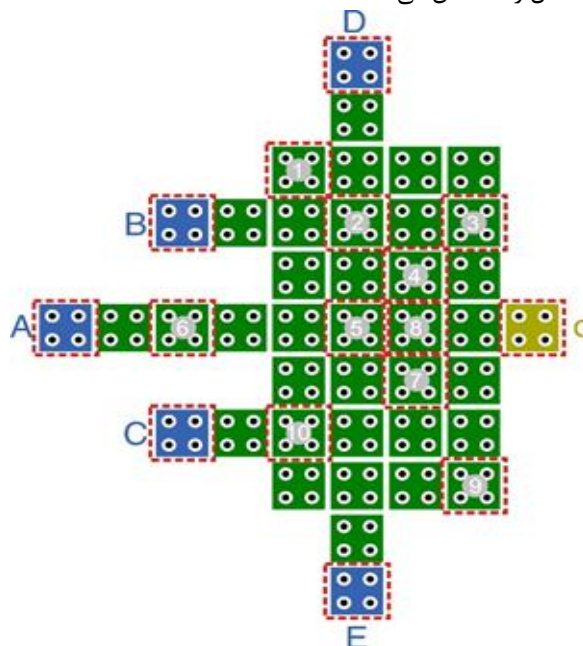
همانطور که در جدول ۲ نمایش داده شده است، تحمل پذیری اشکال مدار پیشنهادی در برابر اشکال حذف به ترتیب با سنجش خروجی



شکل (۶): نتایج شبیه سازی گیت اکثریت پنج ورودی تحمل پذیر اشکال پیشنهادی

۴-۱- تحلیل تحمل پذیری اشکال

همانطور که در شکل ۷ نمایش داده شده است، برای اعمال اشکال‌ها روی گیت اکثریت پنج ورودی تعدادی از سلول‌های مدار به عنوان سلول آزمون در نظر گرفته شده‌اند. این سلول‌ها در نقاط حساس‌تر برای بررسی انتخاب شده‌اند. شماره‌های مشخص شده ناحیه اعمال اشکال را مشخص می‌کنند.



شکل (۷): گیت اکثریت پنج ورودی تحمل پذیر اشکال پیشنهادی به همراه نقاط مورد تحلیل برای اشکال جابجایی، حذف و چرخش

شده است، از میان این محل‌ها ۱۲ محل آزمون با توجه به حساسیت محل قرارگیری انتخاب و شماره‌گذاری شده‌اند. از میان تمام مکان‌های مورد بررسی تنها در یک محل افزوده شدن سلول سبب تغییر مقدار خروجی شده است که نشان دهنده تحمل پذیری ۹۱٫۶٪ مدار پیشنهادی در مقابل اشکال افزونگی است.



شکل (۸): مدار گیت اکثریت پنج ورودی تحمل پذیر اشکال پیشنهادی به همراه نقاط مورد تحلیل برای اشکال افزونگی

جدول (۴): تحمل پذیری اشکال افزونگی و اثر آن روی خروجی‌ها

خروجی 0	سلول مورد بررسی
بدون تغییر	1
بدون تغییر	2
تغییر	3
بدون تغییر	4
بدون تغییر	5
بدون تغییر	6
بدون تغییر	7
بدون تغییر	8
بدون تغییر	9
بدون تغییر	10
بدون تغییر	11
بدون تغییر	12

۴-۶- نتایج مقایسه ساختاری گیت‌های اکثریت پنج

ورودی با گیت پیشنهادی

جدول ۵ مقایسه جامع سخت‌افزاری گیت‌های اکثریت پنج ورودی را نمایش می‌دهد. در این جدول گیت پیشنهادی از جنبه ساختاری در زمینه‌های تعداد سلول مصرفی، مساحت اشغالی و چگونگی دسترسی به سلول‌های ورودی و خروجی با ۷ مدار پیشین مقایسه شده است. مدار پیشنهادی دارای میانگین درصد تحمل پذیر اشکال کمترین در

مدار ارزیابی شده‌اند. شکل موج حاصل از شبیه‌سازی پس از حذف هر سلول با شکل موج حاصل از مدار بی‌اشکال مقایسه شده است و در صورت حفظ خروجی نتیجه گزارش شده است. در جدول ۲، از ۱۰ سلول مورد بررسی اشکال حذف، نادیده گرفتن ۴ سلول بر خروجی تاثیری نداشته است و بنابراین ۴۰٪ را می‌توان به عنوان درصد تحمل پذیری اشکال حذف در نظر گرفت.

جدول (۲): تحمل پذیری اشکال حذف و اثر آن روی خروجی

خروجی 0	سلول مورد بررسی
بدون تغییر	1
تغییر	2
تغییر	3
تغییر	4
بدون تغییر	5
تغییر	6
تغییر	7
بدون تغییر	8
بدون تغییر	9
تغییر	10

۴-۴- تحمل پذیری اشکال چرخش

برای بررسی اثرات اشکال چرخش سلول و بررسی اثر آن روی خروجی جدول ۳ در نظر گرفته شده است. آنچنان که مشخص است در ۴۰٪ موارد پوشش اشکال اعمالی چرخش انجام گرفته است.

جدول (۳): تحلیل تحمل پذیری اشکال با تکیه بر تحمل پذیری

اشکال چرخش و اثر آن روی خروجی

خروجی 0	سلول مورد بررسی
بدون تغییر	1
تغییر	2
تغییر	3
تغییر	4
بدون تغییر	5
تغییر	6
تغییر	7
بدون تغییر	8
بدون تغییر	9
تغییر	10

۴-۵- تحمل پذیری اشکال افزونگی سلول

برای تحلیل اشکال افزونگی سلول روی مدار گیت اکثریت پنج ورودی پیشنهادی شکل ۸ در نظر گرفته شده است. مستطیل ۹ در ۱۱ نمایش داده شده تمامی مکان‌های ممکن برای افزونگی سلول به مدار پیشنهادی را مشخص کرده است. همانطور که در جدول ۴ نمایش داده

مراجع

- [1] C.S.Lent, P.D.Tougaw, W.Porod, and G.H.Bernstein, "Quantum cellular automata," Nanotechnology, vol.4, no.1, pp.49-57, 1993.
- [2] P. D. Tougaw and C. S. Lent, "Dynamic behavior of quantum cellular automata," Journal of Applied Physics, vol. 80, pp. 4722-4736, 1996.
- [3] W. Porod, "Quantum-dot devices and quantum-dot cellular automata", Inter. J. Bifurcation and Chaos, vol. 7, no. 10 pp. 2199-2218, 1997.
- [4] H. Mohammadi, K. Navi, and M. Hosseinzadeh, "An Efficient Quantum-Dot Cellular Automata Full Adder Based on a New Convertible 7-Input Majority-Not Gate," IETE Journal of Research, pp. 1-9, 2020.
- [5] A. Roohi and H. Khademolhosseini, "Quantum-dot cellular automata: computing in nanoscale," Reviews in Theoretical Science, vol. 2, pp. 46-76, 2014.
- [6] B. Sen, M. Dutta, R. Mukherjee, R. K. Nath, A. P. Sinha, and B. K. Sikdar, "Towards the design of hybrid QCA tiles targeting high fault tolerance," Journal of Computational Electronics, vol. 15, pp. 429-445, 2016.
- [7] C.S.Lent, P.D.Tougaw, "A device architecture for computing with quantum dots," Proceedings of the IEEE, vol.85, no.4, pp.541-557, Apr 1997.
- [8] P. D. Tougaw and C. S. Lent, "Logical devices implemented using quantum cellular automata," Journal of Applied physics, vol. 75, pp. 1818-1825, 1994.
- [9] W. Wang, K. Walus, and G. A. Jullien, "Quantum-dot cellular automata adders," in Nanotechnology, 2003. IEEE-NANO 2003. 2003 Third IEEE Conference on, 2003, pp. 461-464.
- [10] H. Khademolhosseini and Y. Nemati, "A New Design for Two-input XOR Gate in Quantum-dot Cellular Automata," Journal of Advances in Computer Research, vol. 10, pp. 1-8, 2019.
- [11] R. Binaei and M. Gholami, "Introducing New Structures for D-Type Latch and Flip-Flop in Quantum-Dot Cellular Automata Technology and its Use in Phase-Frequency Detector, Frequency Divider and Counter Circuits," (in eng), Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research vol. 18, no. 1, pp. 71-80, 2021.
- [12] M. Kamrani, H. Khademolhosseini, A. Roohi, and P. Aloustanimirmahalleh, "A novel genetic algorithm based method for efficient QCA circuit design," in Advances in Computer Science, Engineering & Applications, ed: Springer, 2012, pp. 433-442.
- [13] S. R. Heikalabad, M. N. Asfestani, and M. Hosseinzadeh, "A full adder structure without cross-wiring in quantum-dot cellular automata with energy dissipation analysis," The Journal of Supercomputing, vol. 74, pp. 1994-2005, 2018.
- [14] A. Norouzi and S. R. Heikalabad, "Design of reversible parity generator and checker for the implementation of nano-communication systems in quantum-dot cellular automata," Photonic Network Communications, pp. 1-13, 2019.
- [15] S.-S. Ahmadpour, M. Mosleh, and S. R. Heikalabad, "A revolution in nanostructure designs by proposing a novel QCA full-adder based on optimized 3-input XOR," Physica B: Condensed Matter, vol. 550, pp. 383-392, 2018.
- [16] M. R. Gadim and N. J. Navimipour, "A new three-level fault tolerance arithmetic and logic unit based on quantum dot cellular automata," Microsystem Technologies, vol. 24, pp. 1295-1305, 2018.

مقایسه با سه گیت تحمل پذیر اشکال پیشنهادی ارائه شده در مراجع [۲۲ و ۲۳ و ۲۸] است. از طرفی گیت نوین در این پژوهش به همراه گیت‌های ارائه شده در مراجع [۲۲ و ۲۳ و ۲۸-۲۵] دارای دسترسی همزمان تک لایه به سلول‌های ورودی و خروجی می‌باشند. این امر به طور قابل ملاحظه‌ای فرآیند ساخت مدارهای اتوماتای سلولی کوانتومی را تسهیل می‌کند زیرا نیازی به ساختارهای چند لایه یا سیم کشی‌های لایه‌ای وجود نخواهد داشت و ورودی‌ها و خروجی مدار به راحتی قابلیت اتصال به مدارات دیگر را دارا هستند.

جدول (۵): مقایسه ساختاری گیت‌های اکثریت پنج ورودی

گیت	مساحت (nm ²)	تعداد سلول	دسترسی به سلول خروجی	دسترسی به سلول‌های ورودی	میانگین درصدی تحمل پذیری اشکال
مدار تحمل پذیر اشکال پیشنهادی	۳۸۸۰۴	۴۱	بله	بله	۶۰/۷۵
مدار تحمل پذیر اشکال در [۲۲]	۳۴۴۴۴	۴۲	بله	بله	۵۱/۲۰
مدار تحمل پذیر اشکال در [۲۳]	۳۸۸۰۴	۵۱	خیر	بله	۴۸/۳۰
مدار بدون تحمل پذیری اشکال در [۲۴]	۷۶۴۴	۱۰	بله	خیر	کمتر از ۱۰
مدار بدون تحمل پذیری اشکال در [۲۵]	۴۵۲۴	۱۰	خیر	بله	کمتر از ۱۰
مدار بدون تحمل پذیری اشکال در [۲۶]	۱۶۲۸۴	۱۸	بله	بله	کمتر از ۱۰
مدار بدون تحمل پذیری اشکال در [۲۷]	۹۶۰۴	۱۳	بله	بله	کمتر از ۱۰
مدار تحمل پذیر اشکال در [۲۸]	۲۲۴۰۰	۲۸	بله	بله	۳۴

۵- نتیجه‌گیری

ارائه طرح‌های تحمل‌پذیر اشکال در فناوری QCA نیز نظیر سایر فناوری‌ها بسیار مورد توجه بوده است. در این مقاله گیت اکثریت پنج ورودی نوین تحمل‌پذیر اشکال با حداقل سربار به مدار در فناوری QCA طراحی و پیاده‌سازی شده است. برای این مدار علاوه بر تحلیل ساختاری صورت گرفته، تحلیل تحمل‌پذیری مداری در هنگام اعمال چهار اشکال جابه‌جایی، حذف، چرخش و افزونگی مورد بررسی قرار گرفت و صحت عملکرد مدار با موتورهای شبیه‌ساز QCADesigner آزموده شد.

- [17] S.-S. Ahmadpour and M. Mosleh, "A novel fault-tolerant multiplexer in quantum-dot cellular automata technology," *The Journal of Supercomputing*, vol. 74, pp. 4696-4716, 2018.
- [18] V. Dhare and U. Mehta, "Defect characterization and testing of QCA devices and circuits: A survey," in *2015 19th International Symposium on VLSI Design and Test*, 2015, pp. 1-2.
- [19] Tahoori, M. B., Huang, J., Momenzadeh, M., & Lombardi, F. (2004). Testing of quantum cellular automata. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 3(4), 432-442.
- [20] R. K. Kumamuru, A. O. Orlov, R. Ramasubramaniam, C. S. Lent, G. H. Bernstein, and G. L. Snider, "Operation of a quantum-dot cellular automata (QCA) shift register and analysis of errors," *Electron Devices, IEEE Transactions on*, vol. 50, pp. 1906-1913, 2003.
- [21] H. Khademolhosseini, S. Angizi, and Y. Nemati, "A Fault-Tolerant Design for 3-Input Majority Gate in Quantum-Dot Cellular Automata," *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, vol. 13, pp. 93-103, 2018.
- [22] R. Farazkish and K. Navi, "New efficient five-input majority gate for quantum-dot cellular automata," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 14, p. 1252, 2012.
- [23] R. Farazkish, "A new quantum-dot cellular automata fault-tolerant five-input majority gate," *Journal of nanoparticle research*, vol. 16, p. 2259, 2014.
- [24] K. Navi, R. Farazkish, S. Sayedsalehi, and M. R. Azghadi, "A new quantum-dot cellular automata full-adder," *Microelectronics Journal*, vol. 41, pp. 820-826, 2010.
- [25] K. Navi, S. Sayedsalehi, R. Farazkish, and M. R. Azghadi, "Five-input majority gate, a new device for quantum-dot cellular automata," *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, vol. 7, pp. 1546-1553, 2010.
- [26] R. Akeela and M. D. Wagh, "A five-input majority gate in quantum-dot cellular automata," in *NSTI Nanotech*, 2011, pp. 978-981.
- [27] A. Roohi, H. Khademolhosseini, S. Sayedsalehi, and K. Navi, "A symmetric quantum-dot cellular automata design for 5-input majority gate," *Journal of Computational Electronics*, vol. 13, pp. 701-708, 2014.
- [28] S. S. Ahmadpour, M. Mosleh, and S. R. Heikalabad, "An efficient fault-tolerant arithmetic logic unit using a novel fault-tolerant 5-input majority gate in quantum-dot cellular automata," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 82, p. 106548, 2020.
- [29] R. Binaei and M. Gholami, "Introducing New Structures for D-Type Latch and Flip-Flop in Quantum-Dot Cellular Automata Technology and its Use in Phase-Frequency Detector, Frequency Divider and Counter Circuits," (in eng), *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research* vol. 18, no. 1, pp. 71-80, 2021.

زیر نویس ها

¹ Quantum Cellular Automata

² Switch

³ Hold

⁴ Release

⁵ Relax