

## مقاوم سازی گیت معکوس کننده منطقی اتوماتای سلولی کوانتومی در برابر خطای محیط خشن

مژده مهدوی

گروه الکترونیک، واحد شهرقدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، m.mahdavi@qodsiau.ac.ir

### چکیده

مدارهای دیجیتالی که در ابعاد میکرو و یا نانو طراحی شده اند در اثر برخورد یک ذره باردار و در حین عملکرد صحیح، ناگهان دچار تغییر وضعیت شده و این امر باعث اغتشاش در عملکرد مدار و بوجود آمدن خطا در مدار خواهد شد. این ذرات در محیطهای خشن الکتریکی، میتوانند عملکردهای متفاوتی را بر روی مدار ایجاد نمایند که برحسب عملکرد و نوع مدار، این تغییرات میتواند گذرا یا دائمی بوده که هرچه ابعاد مدار کمتر باشد حساسیت مدار نسبت به تاثیر ذرات باردار، بیشتر خواهد شد. امروزه در مدارهایی با ابعاد نانو معمولاً از تکنولوژی خاصی در حین طراحی و ساخت مدار، برای مقاوم سازی و ایجاد مصونیت از تغییرات ناگهانی در محیطهای خشن استفاده میشود. اتوماتای سلولی کوانتومی بدلیل کاهش چشمگیر در توان مصرفی و ابعاد مدار، امروزه جایگاه ویژه ای را در نانو الکترونیک پیدا کرده است و به کمک روشهای مقاوم سازی میتوان تحمل پذیری این تکنولوژی را در محیطهای باردار الکتریکی بهبود بخشید. در این مقاله، به ارائه روش جدیدی جهت افزایش مقاوم سازی و شنبیه سازی آن در گیت منطقی معکوس کننده در تکنولوژی اتوماتای سلولی کوانتومی می پردازیم و به کمک نرم افزار آن را شبیه سازی می نمایم.

### کلیدواژه

اتوماتای سلولی کوانتومی، مقاوم سازی، نانو الکترونیک، محیط خشن الکتریکی

### مقدمه

خطای مدار در پی دارد. به همین دلیل این گروه اثرات رخداد یکتاً<sup>۴</sup> نامیده شده اند. بار الکتریکی ایجاد شده توسط یک ذره الکتریکی، محدوده وسیعی از اثرات را در پی دارد. واژگونی بیت های حافظه<sup>۵</sup>، اثرات لحظه ای، وقفه در عملکرد، پدیده قفل شدگی<sup>۶</sup> و پدیده گسستگی دی الکتریک<sup>۷</sup>، نمونه هایی از این تاثیرات می باشند. بطور کلی با کاهش ابعاد ادوات و افزایش سرعت مدار، حساسیت تکنولوژی نسبت به تاثیرات رخداد یکتا بیشتر می شود. تاکنون استفاده از مدارات میکرو الکترونیک بدلیل قابلیت های بالا، از جمله بازپیکربندی مجدد، در کاربردهای فضایی و دریایی رایج بود اما این قطعات نسبت به تاثیرات محیط خشن، بسیار حساس می باشند. از طرفی دیگر، اتوماتای سلولی کوانتومی<sup>۸</sup> بدلیل حداقل توان مصرفی، پیشنهاد

طی سال های اخیر، کاهش ابعاد قطعه و در کنار آن تغییرات تکنولوژی، حساسیت مدارها را نسبت به اثرات گذرای محیط های خشن الکتریکی<sup>۱</sup>، افزایش داده است. اثرات گذرا بر اثر برخورد ذرات یونیزه کننده منفرد مانند یون های سنگین و یا تشعشعات یونیزه کننده با نرخ دوز بالا، ایجاد می شوند. در فضا و حتی در سطح دریا، اثرات گذرا، مشکلی جدی برای مدارهای الکترونیکی بوده و دلیلی برای طراحی مدارهای خاص برای این موارد می باشد. اثرات گذرا بلافاصله پس از برخورد یون های سنگین در مدار مشاهده می شوند. در این نوع برخورد، پالس جریانی با دامنه قابل توجه در یک لحظه ایجاد می شود که منشاء اثرات نامطلوب دیگری است. در این حالت، عامل میکروسکوپی<sup>۲</sup> یعنی برخورد ذره باردار، تاثیر ماکروسکوپی<sup>۳</sup> و

۴ Single Event Upset-SEU  
۵ Reversal of memory bits  
۶ Locking phenomenon  
۷ The phenomenon of dielectric rupture  
۸ Quantum Cellular Automata-QCA

۱ Harsh electrical environment  
۲ Microscopic  
۳ Macroscopic

مانند کم شدن یک الکترون در سلول، منجر به رخداد خطای شدیدی در مدار خواهد شد که این مساله برای گیت معکوس کننده QCA در این مقاله بررسی شده است و راهکاری برای افزایش مقاومت در برابر این خطا ارائه شده است. در ادامه و در بخش بعد، تاثیر محیط خشن بر QCA بیان خواهد شد. سپس، مروری کوتاه بر QCA خواهیم داشت. در بخش بعد تاثیر خطای تک الکترون بر گیت معکوس کننده بررسی شده است و نتایج شبیه سازی آنها مورد بحث و بررسی قرار می گیرند. بخش انتهایی شامل ارائه روش برای افزایش مقاوم سازی گیت منطقی می باشد و نتیجه گیری مقاله در بخش آخر خواهد آمد.

## اصول و روش ها

### تاثیر محیط خشن الکتریکی بر اتوماتای سلولی کوانتومی

محیط خشن الکتریکی محیطی است که شامل ذرات متفاوتی است که می توانند توسط ایجاد اثرات نامطلوب، روی مدارهای مجتمع تاثیرات متفاوتی بگذارند. این ذرات بطور کلی شامل الکترون ها، فوتون ها، ذرات آلفا و یون های سنگین هستند. هنگامی که مواد نیمه هادی با تابش های پرانرژی گوناگون پرتوتابی می شوند، در خواص الکتریکی، فیزیکی و نوری آنها تغییرات موقت و پایداری پدید می آید. بدلیل آنکه یکی از خواص مهم تابش های پرانرژی، خاصیت یونیزه کنندگی آنها می باشد آنها را به نام پرتوهای یونیزه کننده<sup>۶</sup> می نامند. چنین پرتوهایی در محیط های مختلف مانند فضا یا دریا دو نوع تاثیر بر مدارهای دیجیتال با تکنولوژی CMOS می گذارند که یا بصورت خطای گذرا<sup>۷</sup> بوده که این خطاها مخرب نیستند و معمولاً بصورت پالس های گذرا ظاهر شده و تاثیر آنی در مدار خواهند داشت و دسته دیگر از خطاها با قرارگیری مدار دیجیتال به مدت طولانی در محیط خشن بصورت فرسایشی رخ می دهد که به مرور باعث از کارافتادگی قطعه و مدار دیجیتال می گردد که به این نوع از خطا، خطای فرسایشی<sup>۸</sup> گویند.

با افزایش سرعت مدارات و پیدایش تکنولوژی های سریعتر امروزی که در نتیجه کوچک شدن ابعاد قطعات الکترونیکی می باشد، تاثیر ناخواسته پرتوهای یونیزه کننده چشمگیرتر شده است و مدارهای دیجیتال نیز نسبت به انواع خطا حساس تر شده اند. تاثیر رخداد یکتا نمونه ای از پدیده هایی است که می توانند مدارات و ادوات در مقیاس نانو را تحت تاثیر قرار دهند. در این نوع پدیده ها، ذرات در محیط الکتریکی می توانند موجب شوند تا الکترون ها به درون یا بیرون از یک سلول تونل

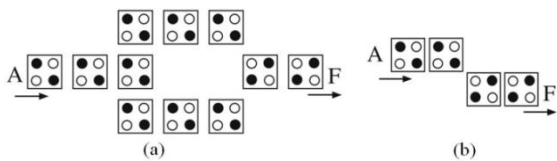
مناسبی جهت ساخت مدارهای محاسباتی در ابعاد نانو می باشند و پیش بینی می شود که در آینده، مدارهای نانو الکترونیک جایگزین مناسبی در تمامی کاربردها، به خصوص کاربردهای فضایی و دریایی خواهند شد.

اتوماتای سلولی کوانتومی که اولین بار در سال ۱۹۹۳ معرفی گردید [۱]، یک فن آوری نوین را در سطح نانو ارائه می دهد. استفاده از تکنولوژی QCA برای پیاده سازی مدارات منطقی، یکی از روش هایی است که علاوه بر کاهش ابعاد مدارات منطقی و افزایش سرعت این مدارات، توان مصرفی را نیز کاهش می دهد [۲-۱]. سلول های QCA دارای نقطه های کوانتومی هستند که موقعیت الکترون ها در آنها، سطح باینری صفر و یک را تعیین خواهد کرد. این مهمترین ویژگی مدارات QCA در مقایسه با مدارات معمول CMOS است که در آنها حالت های منطقی بوسیله قرارگیری تعداد محدودی الکترون در نقطه کوانتومی مشخص می گردد و جریانی در مدار ردوبدل نمی شود و توان مصرفی کاهش می یابد. انواع مختلف نقص های نابجایی سلول ممکن است طی تولید مدارات و ادوات QCA حادث شود. برخی از آنها با عناوین سلول جابجا شده<sup>۱</sup>، سلول غیر هم محور<sup>۲</sup>، سلول حذف شده<sup>۳</sup> و سلول چرخیده<sup>۴</sup> در مقالات گذشته گذشته بررسی شده اند [۵-۸]. همچنین اخیراً روش های مقاوم سازی انواع مدارهای ترکیبی در این تکنولوژی نیز بررسی شده است [۹-۱۱]. نقص های دیگری نظیر کنده شدن یک الکترون وجود دارند که ممکن است در مدارات و ادوات QCA پیش آید و بدلیل آنکه منطق گیت در این تکنولوژی به جابجایی تک الکترون وابسته است بنابراین تاثیر این نقص غیر قابل چشم پوشی است [۳]. اثر رخداد یکتا، نمونه ای از انواع پدیده هایی است که می توانند مدارات و ادوات QCA را به شدت تحت تاثیر قرار دهند. این نوع پدیده ها می توانند موجب شوند تا الکترون ها به درون یا بیرون از یک سلول تونل زنی<sup>۵</sup> کرده و بنابراین سلول های باقیمانده ممکن است دارای صفر، یک، دو، سه و یا چهار الکترون باشند. این مهمترین تاثیری است که می تواند در محیط های الکتریکی برای مدارات QCA رخ دهد. باتوجه به ساختار QCA با دو الکترون در نقاط کوانتومی، می بینیم که سلول های معیوب می توانند منجر به عملکرد غلط مدار شوند [۱۲]. هدف اصلی این مقاله، مدل سازی خطای تک الکترون و افزایش تحمل پذیری آن در گیت معکوس کننده است که تاکنون شبیه سازی کاملی برای آن، صورت نگرفته است. با توجه به کاهش ابعاد در این فن آوری، پدید آمدن نقص جزئی

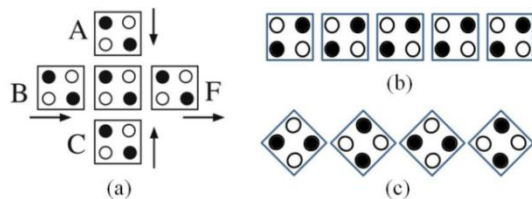
<sup>۱</sup> Cell Displacement  
<sup>۲</sup> Cell Misalignment  
<sup>۳</sup> Cell Omission  
<sup>۴</sup> Cell Rotation  
<sup>۵</sup> Tunneling

<sup>۶</sup> Ionizing radiation  
<sup>۷</sup> Transient Faults  
<sup>۸</sup> Attrition Faults

اکثریت‌گیر و تنظیم یکی از ورودی‌هایش به منطق یک پیاده‌سازی نمود [۲۸-۲۴].



شکل ۱: (a) گیت معکوس‌کننده افزون شده، (b) گیت معکوس‌کننده



شکل ۲: (a) گیت اکثریت‌گیر، (b) سیم باینری، (c) سیم ۴۵ درجه

## ایده‌ها و نوآوری‌ها

### تاثیر نقص تک الکترون

تاثیر برخورد ذرات باردار و یونیزه‌کننده به مدارات اتوماتای سلولی کوانتومی حائز اهمیت است. یک سلول اتوماتای سلولی کوانتومی شامل چهار نقطه کوانتومی و دو الکترون می‌باشد که این دو الکترون اضافی درون دو نقطه کوانتومی جای گرفته‌اند. سد پتانسیلی بین دو نقطه کوانتومی کمتر از یک الکترون ولت است. یعنی یک الکترون برای جابجایی از یک نقطه کوانتومی به نقطه کوانتومی دیگر، به کمتر از یک الکترون ولت انرژی نیاز دارد.

ذرات یونیزه‌کننده دارای چندین مگا الکترون ولت تا چندین گیگا الکترون ولت انرژی هستند. با فرض اینکه مثلاً ذره یونیزه‌کننده دارای ده مگا الکترون ولت انرژی باشد، این ذره می‌تواند باعث جابجایی ده میلیون الکترون گردد. وقتی مدار اتوماتای سلولی کوانتومی در معرض تابش ذره یونیزه‌کننده قرار می‌گیرد، با برخورد یک ذره به مدار اتوماتای سلولی کوانتومی، امکان تونل‌زنی میلیون‌ها الکترون به داخل یا خارج سلول‌های اتوماتای سلولی کوانتومی فراهم می‌شود. با توجه به ابعاد سلول‌های اتوماتای سلولی کوانتومی و تاثیر ذرات یونیزه‌کننده در تونل‌زنی تعداد زیادی الکترون به داخل و یا خارج سلول‌های اتوماتای سلولی کوانتومی، بررسی تاثیر تشعشعات در ایجاد خطای مدارات اتوماتای سلولی کوانتومی ضروری به نظر می‌رسد. بعد از اتمام پدیده تونل‌زنی و جابجایی الکترون‌ها، برخی سلول‌های اتوماتای سلولی کوانتومی ممکن است دارای یک، دو، سه و یا چهار الکترون گردند در حالی که برخی سلول‌ها دارای الکترون نخواهند بود. همانگونه که بیان شد، در

بزنند و بنابراین سلول‌های باقیمانده ممکن است دارای صفر، یک، دو، سه و یا چهار الکترون باشند. ذرات یونیزه‌کننده دارای چندین مگا الکترون ولت تا چندین گیگا الکترون ولت انرژی هستند. با فرض اینکه مثلاً ذره یونیزه‌کننده دارای ده مگا الکترون ولت انرژی باشد، این ذره می‌تواند باعث جابجایی ده میلیون الکترون در مدار اتوماتای سلولی کوانتومی گردد. وقتی مدار اتوماتای سلولی کوانتومی در معرض تابش ذره یونیزه‌کننده قرار می‌گیرد، با برخورد یک ذره به مدار اتوماتای سلولی کوانتومی، امکان تونل‌زنی میلیون‌ها الکترون به داخل یا خارج سلول‌های اتوماتای سلولی کوانتومی فراهم می‌شود. با توجه به سائز سلول‌های اتوماتای سلولی کوانتومی و تاثیر ذرات یونیزه‌کننده در تونل‌زنی تعداد زیادی الکترون به داخل و یا خارج سلول‌های اتوماتای سلولی کوانتومی، بررسی تاثیر محیط‌های خشن الکتریکی در ایجاد اشکال در مدارات اتوماتای سلولی کوانتومی ضروری به نظر می‌رسد. این مهمترین تاثیر است که می‌تواند در اثر SEUها برای مدارات QCA رخ دهد. در حالی که در مدارهای CMOS شاهد تاثیر گذرا در مدارهای دیجیتال هستیم در مدارهای QCA اینگونه تاثیرات بصورت دایم بوده و از این جهت مقاوم سازی گیت‌های منطقی QCA در محیط خشن الکتریکی ضروری می‌باشد.

### مروری بر اتوماتای سلولی کوانتومی

امروزه قابلیت‌های تراشه‌های برنامه‌پذیر، ارائه روش‌های بدیعی را می‌طلبد که علاوه بر حفظ فضای لازم جهت پیاده‌سازی، توان مصرفی، سرعت و دیگر پارامترهای مطلوب در طراحی مدارهای محاسباتی را نیز بهبود بخشد. با استفاده از نانوالکترونیک می‌توان ظرفیت ذخیره سازی اطلاعات را افزایش داد که نهایتاً با کوچکتر شدن ابعاد، کاهش توان مصرفی و افزایش سرعت را نیز بدنبال دارد. از جمله کاربردهای فناوری نانو در الکترونیک، اتوماتای سلولی کوانتومی است که بدلیل ویژگی‌های منحصر بفرد آن روز بروز در حال پیشرفت است و تاکنون تحقیقات وسیعی در مورد پیاده‌سازی مدارهای محاسباتی گوناگون در این تکنولوژی شده است و نظرات مختلفی نیز ارائه شده است [۲۳-۱۳].

گیت‌های منطقی پایه در QCA شامل تابع منطقی اکثریت‌گیر<sup>۱</sup> و معکوس‌کننده<sup>۲</sup> می‌باشد که در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند. تابع منطقی اکثریت‌گیر تنها با ۵ سلول قابل پیاده‌سازی است. تابع AND منطقی را می‌توان با تابع منطقی اکثریت‌گیر و تنظیم یکی از ورودی‌هایش به منطق صفر پیاده‌سازی نمود. تابع OR منطقی را می‌توان با تابع منطقی

<sup>۱</sup> Majority  
<sup>۲</sup> Inverter

- با در نظر گرفتن سلول معیوب، قطبشی که به سلول بعدی تحمیل می‌شود، چیست؟

### نتایج شبیه سازی نقص تک الکترونی

در ابتدا، سلول معیوب که دارای تک الکترون است، را توسط سلول قبل، با منطق صفر و یک، تحریک می‌نماییم و موقعیت الکترون در سلول معیوب را بدست می‌آوریم. نتایج شبیه‌سازی در جدول ۱ آمده است.

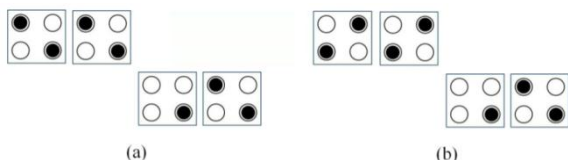
جدول ۱: انرژی کولنی موقعیت الکترون‌ها در سلول معیوب گیت معکوس کننده بر اساس قطبش سلول قبلی

منطق سلول قبلی	موقعیت ۱	موقعیت ۲	موقعیت ۳	موقعیت ۴
صفر	۰.۰۰۸۰۳۷۳	۰.۰۰۶۶۵۰۳	۰.۰۰۸۰۳۷۳	۰.۰۱۱۰۹۲۱
یک	۰.۰۰۷۵۲۵۱	۰.۰۰۶۳۲۰۲	۰.۰۰۷۵۲۵۱	۰.۰۰۹۷۵۴۴

این نتایج با استفاده از رابطه انرژی کولنی محاسبه شده‌اند، بدین صورت که براساس مکان قرارگیری الکترون‌های سلول قبل از سلول معیوب و نیز تک الکترون موجود در سلول معیوب، امکان قرارگیری الکترون در چهار نقطه کوانتومی وجود دارد ولی از بین این چهار نقطه، الکترون در موقعیتی قرار می‌گیرد که کمترین انرژی کولنی را به سیستم تحمیل کند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی جدول ۱، تک الکترون بازای ورودی‌های صفر و یک منطقی روی سلول قبلی، در موقعیت ۲ قرار می‌گیرد. حال که موقعیت الکترون در سلول معیوب مشخص شد باید منطق سلول بعد از سلول معیوب را مشخص کنیم. برای حالت دوم، شبیه‌سازی ارائه شده در جدول ۲ نشان می‌دهد که اگر یک سلول معیوب باشد و الکترون آن در موقعیت ۲ باشد، سلول بعدی قطبش صفر منطقی را خواهد داشت.

جدول ۲: انرژی کولنی قطبش سلول بعدی در گیت معکوس کننده بر اساس موقعیت الکترون در سلول معیوب

موقعیت الکترون در سلول معیوب	منطق صفر برای سلول بعدی	منطق یک برای سلول بعدی
موقعیت ۲	۰.۰۱۳۳۹۸۹	۰.۰۱۵۱۹۶۳



شکل ۳: تاثیر سلول معیوب بر گیت معکوس کننده، (a) ورودی صفر منطقی، (b) ورودی یک منطقی

انرژی کولنی برای هر قطبش محاسبه شده است و حداقل انرژی کولنی، بعنوان قطبش هدف در نظر گرفته شده است.

حالت عادی تنها دو الکترون در سلول اتوماتای سلولی کوانتومی وجود دارند که نمایانگر سطح منطقی سلول می‌باشند و الکترون‌های بیشتر یا کمتر موجب عدم کارکرد صحیح مدار اتوماتای سلولی کوانتومی خواهد شد. بدلیل اینکه انرژی مورد نیاز برای بازگشت الکترون‌ها به مکان اصلیشان در مدار اتوماتای سلولی کوانتومی وجود ندارد، برخلاف مدارهای CMOS که پدیده SEU می‌تواند منجر به خطای گذرا شود، در مدارات اتوماتای سلولی کوانتومی، پدیده SEU می‌تواند باعث ایجاد یک خطای ماندگار در عملکرد گردد. بنابراین مصون سازی نسبت به تاثیرات نامطلوب محیط تشعشعات، مهمترین چالش برای کاربرد و پیاده‌سازی مدارات نانو الکترونیک می‌باشد. در این بخش، مدل‌سازی خطا برای سیم باینری QCA ارائه خواهد شد. فرض بر این است که همه سلول‌ها دارای طول و عرض ۱۸ nm و ابعاد نقطه برابر ۵ nm هستند. فاصله مرکز تا مرکز هر دو سلول همسایه برابر ۲۰ nm می‌باشد. بنابراین می‌توان ابعاد سلول را برابر ۲۰ nm در نظر گرفت. بعنوان مثال ابعاد سلول ۲۰ nm در [۲۹] و ابعاد سلول ۲۵ nm در [۵] استفاده شده‌اند. بنابراین فرض ۲۰ nm برای شبیه‌سازی QCA معتبر می‌باشد. فاصله مرکز تا مرکز دو نقطه کوانتومی همسایه در یک سلول QCA برابر ۹ nm است (بعنوان مثال نقاط ۱ و ۲ در شکل ۱). با توجه به مقادیر فوق، سایر ابعاد قابل محاسبه هستند. بعنوان نمونه، اگر دو سلول همسایه را در نظر بگیریم، فاصله بین نقطه شماره ۴ در سلول سمت چپ و نقطه ۱ در سلول سمت راست برابر ۲۹ nm است.

علاوه بر این برای جلوگیری از پیچیده شدن محاسبات فرض شده است که هر سلول به یک ناحیه کلاک منحصر به فرد مربوط شده است و هیچ دو سلول همسایه‌ای با ناحیه کلاک مشابه وجود ندارند که البته صحت نتایج با وسیعتر شدن کلاک نیز بررسی شده است. موقعیت الکترون‌ها و قطبش سلول‌ها از واقعیت حداقل انرژی کولنی بدست آمده‌اند. انرژی کولنی از رابطه ۱ بدست می‌آید:

$$E_{i,j} = \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r |r_i - r_j|} \quad (1)$$

که در این رابطه  $q_i$  و  $q_j$  بار الکترون،  $\epsilon_0$  ثابت خلا و  $\epsilon_r$  ثابت تراوایی نسبی ماده سازنده سلول است که گالیوم آرسناید فرض شده است. همه شبیه‌سازی‌ها با نرم افزار MATLAB انجام شده‌اند. دو سوال اصلی باید برای گیت معکوس کننده که در بر دارنده سلول معیوب است، پاسخ داده شوند:

- با در نظر گرفتن سلول معیوب، تک الکترون این سلول با وجود قطبش صفر یا یک سلول قبلی، در کدام موقعیت قرار می‌گیرد؟

دارای افزونگی دوتایی است، معیوب شدن سلول خروجی، باعث انتقال اطلاعات خطا و کاهش استحکام سیستم نشده است و به عبارت دیگر گیت معکوس کننده در برابر خطای تک الکترونی تحمل پذیر و مقاوم شده است. نتایج کامل شبیه سازی تحمل پذیری خطای تک الکترونی در گیت معکوس کننده با افزونگی دوتایی در شکل ۵ مشاهده می شود.

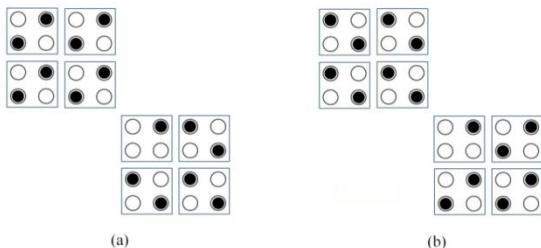
جدول ۳: موقعیت الکترون در سلول معیوب با در نظر گرفتن منطق ورودی و منطق سلول افزونه

منطق ورودی	منطق سلول افزونه	انرژی موقعیت ۱	انرژی موقعیت ۲	انرژی موقعیت ۳	انرژی موقعیت ۴
"۰"	"۰"	۰.۰۳۹۶۸۲	۰.۰۴۱۹۵۳	۰.۰۴۵۴۸۰	۰.۰۴۳۶۵۷
	"۱"	۰.۰۳۹۶۷۵	۰.۰۴۳۴۲۶	۰.۰۴۳۳۵۸	۰.۰۴۳۰۱۵
"۱"	"۰"	۰.۰۳۸۶۸۶	۰.۰۴۱۳۱۰۹	۰.۰۴۴۵۶۲	۰.۰۴۱۸۲۳
	"۱"	۰.۰۳۸۶۹۸	۰.۰۴۲۷۰۲	۰.۰۴۲۴۵۹	۰.۰۴۱۱۹۹

جدول ۴: انرژی کولنی سلول های بعدی با در نظر گرفتن ورودی گیت معکوس کننده

منطق ورودی گیت	منطق سلول بعدی	
	"۰"	"۱"
"۰"	۰.۰۶۳۴۱۹۴	۰.۰۶۱۲۹۸
"۱"	۰.۰۶۱۱۰۹۹	۰.۰۶۰۹۱۵۴

بررسی این نقص در QCA از آن جهت دارای اهمیت است که الکترون جدا شده از سلول QCA که تحت عوامل مختلفی می تواند از مکان اصلیش دور شود و باعث تک الکترونی شدن سلول QCA شود، انرژی مورد نیاز برای برگشت به مکان اصلیش را ندارد و بنابراین نقصی که در مدارات CMOS می تواند باعث ایجاد خطای گذرا شود، در مدارات QCA می تواند باعث یک خطای ماندگار شود و باید راهکاری برای افزایش مقاومت این مدارات در برابر چنین نقصی منظور شود. تمامی اعداد بر حسب میلی الکترون-ولت (meV) بوده و بیانگر انرژی الکتروستاتیکی در صورت قرار گرفتن تک الکترون در هر یک از نقاط کوانتومی سلول معیوب می باشند.

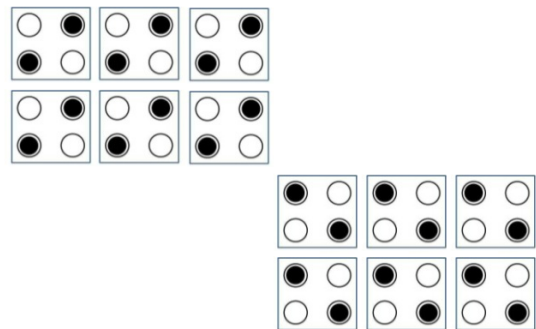


شکل ۵: نتایج کامل شبیه سازی خطای تک الکترونی در گیت معکوس کننده با افزونگی دوتایی

انرژی کولنی هر قطبش در جدول ۲ نمایش داده شده است. می توان از جدول ۱ نتیجه گرفت که موقعیت های ۱، ۳ و ۴ در سلول معیوب نمی توانند توسط تک الکترون اشغال شوند. شکل ۳ تاثیر وجود یک سلول معیوب در ایجاد خطا در گیت معکوس کننده را نشان می دهد. با توجه به نتایج شبیه سازی، اگر یک نقص تک الکترون در گیت معکوس کننده حادث شود، مقدار منطقی خروجی گیت بدون توجه به مقدار ورودی، صفر خواهد شد.

### افزایش تحمل پذیری خطا در گیت منطقی معکوس کننده

برای افزایش تحمل پذیری خطای تک الکترونی در گیت معکوس کننده از روش افزونگی دوتایی استفاده شده است که در شکل ۴ دیده می شود. برای بررسی تمامی حالات ممکن رخداد خطا، شانزده حالت باید در نظر گرفته شود. در هر حالت باید ابتدا تاثیر سلول های قبلی بر روی سلول معیوب بررسی شود و سپس تاثیر سلول معیوب بر روی سلول های بعدی مورد محاسبه و تحلیل قرار گیرد.



شکل ۴: روش افزونگی دوتایی در گیت معکوس کننده

نتایج شبیه سازی بازای ورودی ها و منطق سلول افزونه کنار سلول معیوب که در مجموع شانزده حالت را پوشش می دهند، در جدول ۳ نمایش داده شده است. با توجه به این جدول و نتایج بدست آمده، در صورتی که ورودی گیت، "۰" منطقی باشد، منطق سلول افزونه، "۱" منطقی و موقعیت تک الکترون، موقعیت ۱ خواهند بود. علاوه بر این، در صورتی که ورودی گیت، "۱" منطقی باشد، منطق سلول افزونه، "۰" منطقی و موقعیت تک الکترون، موقعیت ۱ خواهند بود. حال باید بررسی کنیم که با وجود قرار گرفتن تک الکترون در موقعیت ۱ و منطق سلول افزونه کنار سلول معیوب، منطق سلول های بعدی چه خواهد بود. جدول ۴ بیانگر پلاریزاسیون سلول های بعدی می باشد.

همانگونه که مشاهده می شود، دو حالت ممکن برای دو سلول که بعد از سلول تک الکترونی قرار گرفته اند، بررسی شده است. با استفاده از روش بیان شده، در حالتی که گیت معکوس کننده

## نتیجه گیری

تاثیر رخداد یکتا نمونه‌ای از پدیده‌هایی است که می‌تواند مدارات و ادوات اتوماتای سلولی کوانتومی را تحت تاثیر قرار دهند. این نوع پدیده‌ها می‌توانند موجب شوند تا الکترون‌ها به درون یا بیرون از یک سلول تونل بزنند. با در نظر گرفتن ساختار این مدارات، سلول‌های معیوب می‌توانند منجر به عملکرد غلط مدار شوند. در این مقاله، مدل‌سازی خطای تک الکترون و افزایش تحمل‌پذیری آن در گیت معکوس کننده بررسی شده است.

نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که اگر یک نقص کاهش تک الکترون، در گیت معکوس کننده حادث شود و تنها یکی از سلول‌ها دچار این نقص شود، مقدار منطقی آن گیت معکوس خواهد شد و دیگر عملکرد اصلی را از خود نشان نخواهد داد. علاوه بر آن چون الکترون جدا شده از سلول، انرژی برگشت به مکان اصلیش را ندارد، این نقص باعث یک خطای ماندگار در مدار QCA می‌شود، درحالی‌که چنین نقصی در تکنولوژی CMOS فقط خطای گذرای را ایجاد می‌کند.

در این تحقیق با استفاده از روش افزونگی به ارائه راهکار در جهت افزایش تحمل پذیری خطا در گیت معکوس کننده سلولی کوانتومی پرداخته‌ایم که این روش قابلیت صددرصدی را برای حذف این خطا در مدارات بدنبال خواهد داشت. این روش برای اولین بار در افزایش مقاومت مدارهای اتوماتای سلولی بکار می‌رود و تاکنون روشی برای حذف خطای تک الکترون در این تکنولوژی ارائه نشده است.

## مراجع

- Logic Synthesis of And-Or-Inverter (AOI) Gate Design for QCA Implementation,” IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems vol. 24, No. 12, pp. 1881-1893, Dec. 2005.
- [6] J. Huang, M. Momenzadeh, M. B. Tahoori, and F. Lombardi, “Defect Characterization for Scaling of QCA Devices,” proceedings of 19th IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems, 2004.
- [7] P. Gupta, N. K. Jha, and L. Lingappan, “A Test Generation Framework for Quantum Cellular Automata Circuits,” IEEE Trans. on VLSI Sys., vol. 15, No. 1, pp.24-36, Jan. 2007.
- [8] D. Alfenas Reis, and F. S. Torres, “A Novel Methodology for Robustness Analysis of QCA Circuits,” Proc. of IEEE International Conf. on Integrated Circuit and System Design, Salvador, 31 Aug.-4 Sept. 2015.
- [9] D. Kumar, and D. Mitra, “Design of Practical Fault-Tolerant Adder in QCA,” ELSEVIER Trans. on Microelectronics, Vol. 53, No. 1, pp.90-104, July 2016.
- [10] S. Hashemi, and K. Navi, “A Novel Robust QCA Full adder,” ELSEVIER Trans. on Procedia Materials Science, vol. 11, No. 133, pp.376-380, Dec. 2015.
- [11] V. Dhare, and U. Mehta, “Fault Analysis of QCA Combinational Circuit at Layout and Logic Level,” Proc. of IEEE International Conf. on Electrical and Computer Engineering, Dhaka, 19-20 Dec. 2015.
- [12] M. Mahdavi, M. A. Amiri, and S. Mirzakuchaki, “SEU Effects on QCA Circuits,” Proc. of IEEE International Conf. on Test and Diagnosis, China, Apr. 2009.
- [13] Amiri, M.A., Mahdavi, M., Mirzakuchaki, S., “QCA Implementation of A5/1 Stream Cipher,” 2nd Int. Conf. on Advances in Circuits, Elec. and Micro-elect., 2009.
- [14] M. A. Amiri, S. Mirzakuchaki and M. Mahdavi, “Logic-Based QCA Implementation of a 4×4 S-Box,” Informacije MIDEM, Vol. 40, pp. 197-203, 2010.
- [15] M. A. Amiri, S. Mirzakuchaki and M. Mahdavi, “Cryptography in Quantum Cellular Automata,” Cellular Automata - Innovative Modelling for Science and Engineering, Dr. A. Salcido (Ed.), InTech, pp. 285-296, 2011.
- [16] Karim, Fazal, and Konrad Walus, “Efficient simulation of correlated dynamics in quantum-dot cellular automata,” IEEE Trans. on Nanotechnology, Vol. 13, pp. 294-307, 2014.
- [17] Yang, Xiaokuo, Li Cai, Shuzhao Wang, Zhuo Wang, and Chaowen Feng, “Reliability and performance evaluation of QCA devices with rotation cell defect,” IEEE Transactions on Nanotechnology, Vol.11, pp.1009-1018, 2012.
- [18] Das, Kunal, and Debashis De, “A study on diverse nanostructure for implementing logic
- [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] M. B. Tahoori, J. Huang, M. Momenzadeh, and F. Lombardi, “Testing of Quantum Cellular Automata,” IEEE Trans. on Nanotechnology, Vol. 3, No. 4, pp. 432-442, Dec. 2004.
- [3] M. Momenzadeh, M. B. Tahoori, J. Huang, and F. Lombardi, “Quantum Cellular Automata: New Defects and Faults for New Devices,” proceedings of 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2004.
- [4] M. Momenzadeh, J. Huang, and F. Lombardi, “Defect Characterization and Tolerance of QCA Sequential Devices and Circuits,” proceedings of 20th IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems, 2005.
- [5] M. Momenzadeh, J. Huang, M. B. Tahoori, and F. Lombardi, “Characterization, Test, and

- [25] M. A. Amiri, M. Mahdavi, and S. Mirzakuchaki, "QCA Implementation of a Mux-Based FPGA CLB," *proc. of Int. Conf. On Nanoscience and Nanotechnology*, Australia, Feb. 2008, pp. 141-144.
- [26] K. Hennessy and C. S. Lent, "Clocking of Molecular Quantum-dot Cellular Automata," *J. Vac. Sci. Technol.* vol. 19, No. 5, pp. 1752-1755, Sep. 2001.
- [27] K. Kim, K. Wu, and R. Karri, "The Robust QCA Adder Designs Using Composable QCA Building Blocks," *IEEE Trans. On Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems* vol. 26, NO. 1, Jan. 2007.
- [28] V. Vankamamidi, M. Ottavi, and F. Lombardi, "Two-Dimensional Schemes for Clocking/Timing of QCA Circuits," *IEEE Trans. On Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems* vol. 27, No. 1, pp. 34-44, Jan. 2008.
- [29] Heumpil Cho and Earl E. Swartzlander, "Adder Designs and Analyses for Quantum-Dot Cellular Automata," *IEEE Trans. on Nanotechnology*, vol. 6, No. 3, pp. 374-383, May. 2007.
- gate design for QCA, "International Journal of Nanoscience, Vol. 10, pp. 263-269, 2011.
- [19] V. Vankamamidi, M. Ottavi and F. Lombardi, "Two-dimensional schemes for clocking/timing of QCA circuits," *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.*, Vol. 27, pp. 34-44, 2008.
- [20] K. Hennessy and C. S. Lent, "Clocking of Molecular Quantum-dot Cellular Automata," *J. Vac. Sci. Tech.*, Vol.19, pp.1752-1755, 2001.
- [21] D. Tougaw, and M. Khatun, "A scalable signal distribution network for quantum-dot cellular automata," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, Vol. 12, pp. 215-224, 2013.
- [22] J. S. Chandra, K. Suresh, and B. Ghosh, "Clocking Scheme Implementation for Multi-Layered Quantum Dot Cellular Automata Design," *Journal of Low Power Electronics*, Vol. 10, pp. 272-278, 2014.
- [23] P. D. Tougaw, C. S. Lent, and W. Prod, "Bistable Saturation in Coupled Quantum-dot Cells," *J. Appl. Phys.* Vol. 74, No. 5, pp. 3558-3565, Sep. 1993.
- [24] P.D. Tougaw and C.S. Lent, "Logical Devices Implemented Using Quantum Cellular Automata," *J. Appl. Phys.* Vol. 75(3), pp. 1818-1825, 1994.

