

سلام افضل





دانشکده مهندسی برق و رباتیک

رشته الکترونیک، گرایش افزاره‌های میکرو و نانوالکترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

# شبیه‌سازی خطای تک الکترون در فن‌آوری اتوماتای سلولی کوانتومی

نگارنده: حمید شیبانی

استاد راهنما

دکتر احسان رحیمی

دی ۱۳۹۸



شماره:

تاریخ:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

### فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای .....  
با شماره دانشجویی..... رشته ..... گرایش .....  
تحت عنوان .....  
که در تاریخ ..... با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به  
شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> قبول (با درجه: .....)	<input type="checkbox"/> مردود
<input type="checkbox"/> نظری	<input type="checkbox"/> عملی

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
			۱- استاد راهنمای اول
			۲- استاد راهنمای دوم
			۳- استاد مشاور
			۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
			۵- استاد ممتحن اول
			۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



## تقدیم به

محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم به خاطر همه‌ی تلاش‌های محبت‌آمیزی  
که در دوران مختلف زندگی‌ام انجام داده‌اند.

## تقدیر و تشکر

از استادان فرزانه و فرهیخته‌ای که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند.

حمید شیبانی

دی ۱۳۹۸



## تعهد نامه

اینجانب حمید شیبانی دانشجوی کارشناسی ارشد رشته الکترونیک مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده پایان نامه با عنوان شبیه سازی خطای تک الکترون در فن آوری اتوماتای سلولی کوانتومی، تحت راهنمایی احسان رحیمی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های دیگر پژوهش گران، به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب این پایان نامه، تا کنون توسط خود، یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارایه نشده است.
- حقوق معنوی این اثر، به دانشگاه صنعتی شاهرود تعلق دارد، و مقالات مستخرج با نام “ دانشگاه صنعتی شاهرود “ یا “ Shahrood University of Technology “ به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده اند، در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در تمام مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در تمام مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته (یا استفاده شده است)، اصل رازداری و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

حمید شیبانی

دی ۱۳۹۸

### مالکیت نتایج و حق نشر

- تمام حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی، در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در این پایان نامه بدون ذکر منبع مجاز نمی باشد.



## چکیده

آتوماتای سلولی کوانتومی (QCA) یک فن‌آوری محاسباتی است که برای ساخت مدارها در ابعاد نانو استفاده می‌شود. این فن‌آوری بر پایه‌ی سلول QCA است که در داخل آن چهار حفره و دو الکترون به صورت مربعی قرار گرفته است. خطاهای مختلفی وجود دارد که ممکن است در سلول‌های QCA رخ دهد. یکی از این خطاها خطای تک الکترون است که می‌تواند در فرآیند تولید و یا استفاده از مدارهای QCA اتفاق بیفتد و باعث شود خروجی مدار مقدار صحیحی نداشته باشد. با توجه به اهمیت بالای این موضوع برنامه‌ای نوشته شده است که بتوان خطای تک الکترون را در مدارهای مختلف محاسبه و بررسی کرد.

نتایج نشان می‌دهد در دروازه‌ی اکثریت که خطای تک الکترون در آن اتفاق افتاده است به ازای برخی از ورودی‌ها خروجی به دست آمده مقدار مطلوبی نیست. نرخ خطا برای دروازه‌ی اکثریت ۵۰٪ است، یعنی نیمی از ورودی‌ها خروجی درستی ندارند. برای دروازه‌های دیگر از جمله دروازه‌های NNI و AOI محاسبات مربوط به انرژی الکتروستاتیک برای ورودی‌های مختلف و موقعیت‌های مختلف برای تک الکترون در سلول خطا انجام شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد به ازای بعضی از ورودی‌ها خروجی صحیح حاصل نشده و خروجی دارای نقص است. نرخ خطا برای دروازه‌ی NNI برابر ۱۰۰٪ و برای دروازه‌ی AOI با توجه به موقعیت سلول خطا مقدار متفاوتی دارد. همچنین خطای تک الکترون با رویکردی جدید برای سیم کوانتومی انجام شده است. به این صورت که خطای تک الکترون به صورت همزمان در دو سلول مجاور و غیر مجاور رخ دهد. نتایج نشان می‌دهد که اگر چنین خطایی روی دهد خروجی سیم تغییر نکرده و نرخ خطا برابر ۰٪ است.

در ادامه ساختارهای جدیدی از دروازه‌ی اکثریت طراحی شده‌اند که دارای سیزده سلول، نه سلول و شش سلول هستند. در تمامی این دروازه‌ها ۲۵٪ بهبود خطای تک الکترون را نسبت به دروازه‌ی اکثریت متداول مشاهده هستیم. در بهترین حالت که روش‌های مختلف پالس‌دهی هم اعمال شده است ۳۷/۵٪ بهبود خطا را در دروازه‌ی اکثریت بهبود یافته با شش سلول داریم.

واژه‌های کلیدی: آتوماتای سلولی کوانتومی، خطای تک الکترون، تحمل‌پذیری خطا



# فهرست مطالب

ف	فهرست شکل‌ها
ش	فهرست جدول‌ها
۱	۱ مقدمه
۱	۱-۱ تعریف و تاریخچه‌ی موضوع
۲	۲-۱ اهمیت موضوع
۳	۳-۱ سؤالات و فرضیات
۴	۴-۱ هدف پژوهش
۴	۵-۱ مراحل پژوهش
۴	۶-۱ ساختار پایان‌نامه
۵	۲ چشم‌اندازی بر فن‌آوری اتوماتای سلولی کوانتومی
۵	۱-۲ مقدمه
۵	۲-۲ مکانیک کوانتوم
۶	۳-۲ نقاط کوانتومی
۷	۴-۲ سلول‌های کوانتومی
۹	۵-۲ پیاده‌سازی سلول QCA
۹	۱-۵-۲ سلول QCA فلزی
۱۰	۲-۵-۲ سلول QCA مولکولی
۱۱	۳-۵-۲ سلول QCA مغناطیسی
۱۲	۶-۲ عناصر منطقی در QCA
۱۲	۱-۶-۲ سیم QCA
۱۳	۲-۶-۲ سیم ۴۵ درجه
۱۳	۳-۶-۲ سیم L شکل
۱۴	۴-۶-۲ مدار مقسم

۱۵	.....	۲-۶-۵ دروازه‌ی معکوس‌کننده
۱۵	.....	۲-۶-۶ دروازه‌ی اکثریت
۱۶	.....	۲-۶-۷ دروازه‌ی اکثریت پنج ورودی
۱۷	.....	۲-۶-۸ دروازه‌ی NNI
۱۸	.....	۲-۶-۹ دروازه‌ی AOI
۱۸	.....	۲-۶-۱۰ دروازه‌ی XOR
۱۹	.....	۲-۶-۱۱ عبور سیم‌ها از روی هم در QCA
۲۰	.....	۲-۶-۱۲ اتمام جمع‌کننده
۲۱	.....	۲-۶-۱۳ پیاده‌سازی حافظه
۲۲	.....	۲-۶-۱۴ سلول QCA مکعبی
۲۲	.....	۲-۷ پالس‌دهی در QCA
۲۴	.....	۲-۸ انتقال اطلاعات
۲۴	.....	۲-۹ ابزارهای طراحی و شبیه‌سازی
۲۴	.....	۲-۹-۱ موتور شبیه‌سازی بردار منسجم
۲۶	.....	۲-۹-۲ موتور شبیه‌ساز دوپایا
۲۷		۳ انواع خطا و روش‌های تحمل‌پذیری در فن‌آوری QCA
۲۷	.....	۳-۱ مقدمه
۲۸	.....	۳-۲ انواع خطا در فن‌آوری QCA
۲۸	.....	۳-۲-۱ جابه‌جایی و عدم تراز
۳۱	.....	۳-۲-۲ حذف و اضافه شدن سلول
۳۲	.....	۳-۲-۳ سلول ثابت
۳۳	.....	۳-۲-۴ چرخش سلول
۳۵	.....	۳-۲-۵ خطای تک الکترون
۳۵	.....	۳-۳ خطای تک الکترون در دروازه‌های منطقی
۳۶	.....	۳-۳-۱ سیم‌بایبری کوانتومی
۳۸	.....	۳-۳-۲ دروازه‌ی معکوس‌کننده
۴۱	.....	۳-۳-۳ دروازه‌ی اکثریت
۴۴	.....	۳-۴ تحمل‌پذیری خطا در فن‌آوری QCA
۴۴	.....	۳-۴-۱ تحمل‌پذیری خطا به روش TMR
۴۸	.....	۳-۴-۲ دروازه‌ی اکثریت بهبود یافته
۵۱	.....	۳-۴-۳ دروازه‌ی معکوس‌کننده‌ی بهبود یافته
۵۲	.....	۳-۴-۴ تمام جمع‌کننده‌ی بهبود یافته

۶۱	طراحی بسته‌ی نرم‌افزاری SEFA	۴
۶۱	۱-۴ مقدمه	
۶۲	۲-۴ نمای کلی برنامه	
۶۳	۱-۲-۴ تابع ورودی‌ها	
۶۴	۲-۲-۴ تابع تعیین سلول خروجی	
۶۴	۳-۲-۴ تابع تعیین سلول‌های ورودی	
۶۴	۴-۲-۴ تابع تعیین سلول خطا	
۶۵	۵-۲-۴ تابع تعیین سلول ثابت	
۶۵	۶-۲-۴ تابع تعیین سلول خطا مطابق با کم‌ترین مقدار انرژی	
۶۶	۷-۲-۴ تابع تعیین سلول ثابت مطابق با کم‌ترین مقدار انرژی	
۶۶	۸-۲-۴ تابع محاسبه‌ی انرژی	
۶۷	۳-۴ یک مثال کاربردی	
۶۹	۵ نتایج شبیه‌سازی خطای تک الکترون	
۶۹	۱-۵ مقدمه	
۷۰	۲-۵ دروازه‌ی اکثریت	
۷۲	۳-۵ دروازه‌ی NNI	
۷۵	۴-۵ دروازه‌ی AOI	
۸۰	۵-۵ سیم دودویی	
۸۴	۶-۵ تحمل‌پذیری خطا در دروازه‌ی اکثریت	
۸۴	۱-۶-۵ بررسی ساختار جدید با سیزده سلول	
۸۶	۲-۶-۵ بررسی ساختار جدید با نه سلول	
۸۸	۳-۶-۵ بررسی ساختار جدید با شش سلول	
۹۳	۷-۵ جمع‌بندی نتایج دروازه‌های تحمل‌پذیر	
۹۳	۱-۷-۵ خطا در سلول تصمیم‌گیر	
۹۴	۲-۷-۵ احتمال خطای کل با یک سلول خطا	
۹۴	۳-۷-۵ احتمال خطای کل با دو سلول خطا	
۹۷	۶ نتیجه‌گیری و کارهای پیشنهادی در آینده	
۹۷	۱-۶ نتیجه‌گیری	
۹۸	۲-۶ کارهای پیشنهادی در آینده	
۹۹	الف بسته‌ی نرم‌افزاری SEFA	
۹۹	الف-۱ فلوجارت و الگوریتم برنامه‌ی متلب	





# فهرست شکل‌ها

۷	۱-۲	هرم ایجاد شده توسط InAs/GaAs
۸	۲-۲	شماتیک و ساختار یک نقطه‌ی کوانتومی
۸	۳-۲	پلاریزاسیون سلول‌های QCA
۹	۴-۲	سلول QCA فلزی
۱۰	۵-۲	تصویر SEM از یک سلول فلزی چهار نقطه‌ای
۱۱	۶-۲	سلول QCA مولکولی
۱۲	۷-۲	بردار مغناطیسی در MQCA
۱۳	۸-۲	سیم دودویی
۱۳	۹-۲	سیم باینری ۴۵ درجه
۱۴	۱۰-۲	سیم L شکل
۱۴	۱۱-۲	مدار مقسم
۱۵	۱۲-۲	دروازه‌ی معکوس‌کننده
۱۵	۱۳-۲	جدول صحت و تصویر دروازه‌ی اکثریت
۱۷	۱۴-۲	دروازه‌ی اکثریت پنج ورودی
۱۷	۱۵-۲	دروازه‌ی منطقی NNI
۱۸	۱۶-۲	دروازه‌ی منطقی AOI
۱۹	۱۷-۲	شماتیک مداری و نحوه‌ی پالس‌دهی دروازه‌ی XOR
۲۰	۱۸-۲	عبور سیم‌ها از روی هم (الف) عبور هم‌صفحه (ب) عبور چند لایه
۲۱	۱۹-۲	شماتیک مداری تمام جمع‌کننده
۲۱	۲۰-۲	جانمایی یک نمونه سلول حافظه‌ی QCA
۲۲	۲۱-۲	سلول QCA مکعبی
۲۳	۲۲-۲	کلاک در مدارهای QCA
۲۵	۲۳-۲	جریان طراحی در QCADesigner
۲۹	۱-۳	نقص جابه‌جایی در دروازه‌ی اکثریت
۳۰	۲-۳	نقص عدم تراز در دروازه‌ی اکثریت

۳۲	.....	نقص جابه‌جایی در سیم دوتایی
۳۳	.....	۴-۳ (الف) نقص در اثر اضافه شدن سلول (ب) نقص در اثر حذف سلول
۳۳	.....	۵-۳ نقص در اثر چرخش سلول
۳۴	.....	۶-۳ نقص در اثر چرخش سلول در دروازه‌ی اکثریت
۳۴	.....	۷-۳ نتایج شبیه‌سازی نقص در اثر چرخش برای دروازه‌ی اکثریت
۳۵	.....	۸-۳ خطای تک الکترون در دروازه‌های اساسی QCA
۳۸	.....	۹-۳ خطای تک الکترون در سیم باینری
۳۹	.....	۱۰-۳ انواع دروازه‌ی معکوس کننده QCA
۴۰	.....	۱۱-۳ خطای تک الکترون در معکوس کننده‌ی زنجیره‌ای
۴۱	.....	۱۲-۳ اثر خطای تک الکترون روی معکوس کننده‌ی بهبود یافته
۴۲	.....	۱۳-۳ خطای تک الکترون در دروازه‌ی اکثریت
۴۵	.....	۱۴-۳ یک مدار TMR در فن‌آوری QCA
۴۶	.....	۱۵-۳ یک مدار اکثریت چندگانه
۴۷	.....	۱۶-۳ محدوده‌ی بهبود احتمال خطا در مدار اکثریت چندگانه
۴۸	.....	۱۷-۳ قابلیت اطمینان مدار اکثریت چندگانه قبل و پس از بازسازی
۴۹	.....	۱۸-۳ دروازه‌ی اکثریت بلوکی مرتب
۵۰	.....	۱۹-۳ دروازه‌ی اکثریت بلوکی نامرتب
۵۰	.....	۲۰-۳ دروازه‌ی اکثریت بلوکی مرتب همراه با حذف سلول
۵۱	.....	۲۱-۳ دروازه‌ی اکثریت بلوکی نامرتب همراه با حذف سلول
۵۲	.....	۲۲-۳ دروازه‌ی معکوس کننده مقاوم در برابر خطا
۵۳	.....	۲۳-۳ سه شماتیک برای یک تمام جمع کننده‌ی یک بیت (الف) پیشنهاد شده در (ب) پیشنهاد شده در (ج) پیشنهاد شده در
۵۴	.....	۲۴-۳ دروازه‌ی اکثریت چرخانده
۵۴	.....	۲۵-۳ دروازه‌ی اکثریت چرخانده‌ی اصلاح شده
۵۵	.....	۲۶-۳ طرح پیشنهادی برای تمام جمع کننده‌ی یک بیتی
۵۶	.....	۲۷-۳ تمام جمع کننده چهار بیتی مقاوم در برابر خطا
۵۶	.....	۲۸-۳ مدل شماتیکی برای بررسی خطای حذف و اضافه شدن سلول در تمام جمع کننده‌ی یک بیتی
۵۷	.....	۲۹-۳ حداکثر سلول ممکن که (الف) می‌توان اضافه کرد (ب) می‌توان حذف کرد در حالی که مدار عملکرد درستی داشته باشد
۵۸	.....	۳۰-۳ نتایج شبیه‌سازی برای دروازه‌ی اکثریت چرخانده‌ی اصلاح شده (الف) AND و (ب) $F = ABC + \bar{D}(A + B + C)$
۵۹	.....	۳۱-۳ نتایج شبیه‌سازی برای (الف) تمام جمع کننده‌ی یک بیتی (ب) تمام جمع کننده‌ی چهار بیتی
۶۰	.....	

۶۲	.....	۱-۴ الگوریتم نمای کلی
۶۳	.....	۲-۴ دروازه‌ی منطقی NNI
۶۴	.....	۳-۴ الگوریتم تابع ورودی
۶۴	.....	۴-۴ الگوریتم تابع تعیین سلول خروجی
۶۵	.....	۵-۴ الگوریتم تابع تعیین سلول‌های ورودی
۶۵	.....	۶-۴ الگوریتم تابع تعیین سلول خطا
۶۶	.....	۷-۴ الگوریتم تابع تعیین سلول ثابت
۶۶	.....	۸-۴ الگوریتم تابع تعیین سلول خطا مطابق با کم‌ترین مقدار انرژی
۶۷	.....	۹-۴ الگوریتم تابع تعیین سلول ثابت مطابق با کم‌ترین مقدار انرژی
۶۷	.....	۱۰-۴ الگوریتم تابع محاسبه‌ی انرژی
۶۸	.....	۱۱-۴ پیاده‌سازی دروازه‌ی اکثریت با خطای تک الکترون در برنامه‌ی متلب
۶۸	.....	۱۲-۴ نتیجه‌ی محاسبات به‌دست آمده برای دروازه‌ی اکثریت توسط برنامه‌ی متلب
۷۱	.....	۱-۵ دروازه‌ی اکثریت با خطای تک الکترون
۷۲	.....	۲-۵ دروازه‌ی منطقی NNI با خطای تک الکترون
۷۵	.....	۳-۵ دروازه‌ی منطقی AOI با خطای تک الکترون در سلول G
۷۸	.....	۴-۵ دروازه‌ی منطقی AOI با خطای تک الکترون در سلول H
۸۰	..	۵-۵ نرخ خطا در دروازه‌های بررسی شده به روش سه پالس با ورودی ثابت
۸۱	.....	۶-۵ سیم دودویی با خطای تک الکترون در دو سلول مجاور
۸۲	.....	۷-۵ سیم دودویی با خطای تک الکترون در دو سلول غیر مجاور
		۸-۵ ساختار جدید دروازه‌ی اکثریت با سیزده سلول مقاوم در برابر خطای تک الکترون
۸۴	.....	الکترون
۸۶	.....	۹-۵ نرخ خطا در دروازه‌ی اکثریت با سیزده سلول و یک سلول خطا
۸۶	.....	۱۰-۵ نرخ خطا در دروازه‌ی اکثریت با سیزده سلول و دو سلول خطا
۸۷	.....	۱۱-۵ ساختار جدید دروازه‌ی اکثریت با نه سلول مقاوم در برابر خطای تک الکترون
۸۸	.....	۱۲-۵ نرخ خطا در دروازه‌ی اکثریت با نه سلول و یک سلول خطا
۸۹	.....	۱۳-۵ نرخ خطا در دروازه‌ی اکثریت با نه سلول و دو سلول خطا
		۱۴-۵ ساختار جدید دروازه‌ی اکثریت با شش سلول حالت اول مقاوم در برابر خطای تک الکترون
۸۹	.....	خطای تک الکترون
		۱۵-۵ ساختار جدید دروازه‌ی اکثریت با شش سلول حالت دوم مقاوم در برابر خطای تک الکترون
۹۱	.....	خطای تک الکترون



# فهرست جدول‌ها

۳۸	۱-۳ انرژی الکترواستاتیک برای موقعیت الکترون‌ها در یک سلول معیوب مطابق با قطبیت سلول قبلی . . . . .
۳۸	۲-۳ انرژی الکترواستاتیک برای قطبیت سلول بعدی مطابق با موقعیت الکترون در سلول خطا . . . . .
۳۹	۳-۳ انرژی الکترواستاتیک برای موقعیت تک الکترون در معکوس کننده‌ی زنجیره‌ای مطابق قطبیت سلول قبلی . . . . .
۴۰	۴-۳ انرژی الکترواستاتیک برای قطبیت سلول بعدی در معکوس کننده‌ی زنجیره‌ای مطابق با موقعیت تک الکترون در سلول خطا . . . . .
۴۱	۵-۳ انرژی الکترواستاتیک برای موقعیت تک الکترون در معکوس کننده بهبود یافته مطابق قطبیت سلول قبلی . . . . .
۴۳	۶-۳ موقعیت پایدار تک الکترون در دروازه‌ی اکثریت . . . . .
۴۳	۷-۳ انرژی الکترواستاتیک برای سلول خروجی در دروازه‌ی اکثریت . . . . .
۴۴	۸-۳ مقادیر منطقی دروازه‌ی اکثریت تحت خطای تک الکترون . . . . .
۷۱	۱-۵ مشخصات دروازه‌ی اکثریت با وجود خطای تک الکترون در رویکرد بدون پالس . . . . .
۷۲	۲-۵ مشخصات دروازه‌ی اکثریت با وجود خطای تک الکترون در سه رویکرد پالس‌دهی . . . . .
۷۲	۳-۵ نرخ خطا در دروازه‌ی اکثریت با خطای تک الکترون . . . . .
۷۳	۴-۵ موقعیت پایدار تک الکترون سلول خطا در دروازه‌ی NNI . . . . .
۷۳	۵-۵ موقعیت پایدار خروجی دروازه‌ی NNI با وجود خطای تک الکترون . . . . .
۷۴	۶-۵ مشخصات دروازه‌ی NNI با وجود خطای تک الکترون در رویکرد سه پالس با ورودی ثابت . . . . .
۷۴	۷-۵ مشخصات دروازه‌ی NNI با وجود خطای تک الکترون در سه رویکرد پالس‌دهی . . . . .
۷۵	۸-۵ نرخ خطا در دروازه‌ی NNI با خطای تک الکترون . . . . .

- ۷۶ . . . . . ۹-۵ موقعیت پایدار تک الکترون دروازه‌ی AOI در سلول خطای G
- ۷۶ ۱۰-۵ موقعیت پایدار خروجی دروازه‌ی AOI با وجود خطای تک الکترون در سلول G
- ۷۶ . . . . . ۱۱-۵ مشخصات دروازه‌ی AOI با وجود خطای تک الکترون در سلول G
- ۷۶ ۱۲-۵ مشخصات دروازه‌ی AOI با وجود خطای تک الکترون در سلول G در سه
- ۷۷ . . . . . رویکرد پالس‌دهی
- ۷۷ . . . . . ۱۳-۵ نرخ خطا در دروازه‌ی AOI با خطای تک الکترون در سلول G
- ۷۸ . . . . . ۱۴-۵ موقعیت پایدار تک الکترون دروازه‌ی AOI در سلول خطای H
- ۷۸ ۱۵-۵ موقعیت پایدار خروجی دروازه‌ی AOI با وجود خطای تک الکترون در سلول H
- ۷۹ . . . . . ۱۶-۵ مشخصات دروازه‌ی AOI با وجود خطای تک الکترون در سلول H
- ۷۹ ۱۷-۵ مشخصات دروازه‌ی AOI با وجود خطای تک الکترون در سلول H در سه
- ۷۹ . . . . . رویکرد پالس‌دهی
- ۸۰ . . . . . ۱۸-۵ نرخ خطا در دروازه‌ی AOI با خطای تک الکترون در سلول H
- ۸۱ ۱۹-۵ انرژی الکترواستاتیک سیم دودویی با وجود خطای تک الکترون در سلول B
- ۸۱ ۲۰-۵ انرژی الکترواستاتیک سیم دودویی با وجود خطای تک الکترون در سلول C
- ۸۱ ۲۱-۵ مشخصات سیم دودویی با وجود خطای تک الکترون در دو سلول کنار هم
- ۸۱ ۲۲-۵ مشخصات سیم دودویی با خطای تک الکترون در دو سلول مجاور در سه
- ۸۲ . . . . . رویکرد پالس‌دهی
- ۸۲ ۲۳-۵ سه رویکرد پالس‌دهی در سیم دودویی با خطای تک الکترون در دو سلول
- ۸۲ . . . . . مجاور
- ۸۲ ۲۴-۵ انرژی الکترواستاتیک سیم دودویی با وجود خطای تک الکترون در سلول D
- ۸۳ ۲۵-۵ مشخصات سیم دودویی با وجود خطای تک الکترون در دو سلول جدا از هم
- ۸۳ ۲۶-۵ مشخصات سیم دودویی با خطای تک الکترون در دو سلول غیر مجاور در
- ۸۳ . . . . . سه رویکرد پالس‌دهی
- ۸۳ ۲۷-۵ سه رویکرد پالس‌دهی در سیم دودویی با خطای تک الکترون در دو سلول
- ۸۳ . . . . . غیر مجاور
- ۸۳ ۲۸-۵ مشخصات دروازه‌ی اکثریت با سیزده سلول با وجود خطای تک الکترون
- ۸۵ . . . . . در سه رویکرد پالس‌دهی
- ۸۵ ۲۹-۵ نرخ خطا در سه رویکرد پالس‌دهی برای دروازه‌ی اکثریت با سیزده سلول
- ۸۵ ۳۰-۵ مشخصات دروازه‌ی اکثریت با نه سلول با وجود خطای تک الکترون در سه
- ۸۷ . . . . . رویکرد پالس‌دهی
- ۸۸ ۳۱-۵ نرخ خطا در سه رویکرد پالس‌دهی برای دروازه‌ی اکثریت با نه سلول
- ۸۸ ۳۲-۵ مشخصات دروازه‌ی اکثریت با شش سلول حالت اول با وجود خطا در یک
- ۹۰ . . . . . سلول در سه رویکرد پالس‌دهی

- ۳۳-۵ نرخ خطای تک الکترون در یک سلول برای دروازه‌ی اکثریت با شش سلول  
۹۰ . . . . . حالت اول
- ۳۴-۵ مشخصات دروازه‌ی اکثریت با شش سلول حالت اول با وجود خطا در یک  
۹۰ . . . . . سلول در سه رویکرد پالس‌دهی
- ۳۵-۵ نرخ خطای تک الکترون در دو سلول برای دروازه‌ی اکثریت با شش سلول  
۹۱ . . . . . حالت اول
- ۳۶-۵ مشخصات دروازه‌ی اکثریت با شش سلول حالت دوم با وجود خطا در یک  
۹۲ . . . . . سلول در سه رویکرد پالس‌دهی
- ۳۷-۵ مشخصات دروازه‌ی اکثریت با شش سلول حالت دوم با وجود خطا در دو  
۹۲ . . . . . سلول در سه رویکرد پالس‌دهی
- ۳۸-۵ نرخ خطا در دروازه‌های اکثریت تحمل‌پذیر با خطا در سلول تصمیم‌گیر . .  
۹۳ . . . . .
- ۳۹-۵ نرخ خطای کل در دروازه‌های اکثریت تحمل‌پذیر با یک سلول خطا . . . .  
۹۴ . . . . .
- ۴۰-۵ نرخ خطای کل در دروازه‌های اکثریت تحمل‌پذیر با دو سلول خطا . . . .  
۹۴ . . . . .





# فصل ۱

## مقدمه

### ۱-۱ تعریف و تاریخچه‌ی موضوع

زمان زیادی از پیدایش نانو فن‌آوری نمی‌گذرد. اولین رویداد در این حوزه در سال ۱۹۵۹ اتفاق افتاد. ایده فن‌آوری نانو توسط دکتر ریچارد فاینمن<sup>۱</sup> در سخنرانی با عنوان آن پایین فضای بسیاری است به بررسی ایده‌های خلاقانه و شگفت‌انگیزی پرداخت که اکنون با نام فن‌آوری نانو شناخته می‌شود. ایده‌ی این دانشمند آن بود که می‌توانیم در آینده‌ی نه چندان دور به دست‌کاری مولکول‌ها و اتم‌ها بپردازیم. در آن زمان این فن‌آوری به اسم کنونی شناخته نشده بود. اولین بار واژه‌ی فن‌آوری نانو توسط نوریو تانیگوشی<sup>۲</sup> استاد دانشگاه علوم توکیو در سال ۱۹۷۴ بیان شد. او این واژه را برای توصیف موادی که ابعاد آن‌ها در حد نانومتر است به کار برد.

تعاریف زیادی از فن‌آوری نانو وجود دارد اما نقطه‌ی مشترک تمامی این تعاریف عبارت‌اند از دست‌کاری کوچک‌ترین اجزای ماده یا اتم. پس تفاوت اصلی بین فن‌آوری نانو و دیگر فن‌آوری‌ها در مقیاس مواد و ساختارهایی است که در این فن‌آوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. به این نکته هم باید توجه کرد که مقیاس مواد تنها ملاک برای مطرح شدن این فن‌آوری نیست و تغییر در خصوصیات ذاتی مواد از جمله رنگ و استحکام نیز مطرح است.

---

<sup>1</sup>Richard Feynman

<sup>2</sup>Norio Taniguchi

نانو فن‌آوری در حوزه‌ی الکترونیک دارای کاربردهای بسیار وسیع و گسترده‌ای است. لیزرهایی با طول موج‌های بسیار دقیق، نانو ترانزیستورها، میکروسکوپ‌های دقیق الکترونی و موارد فراوان دیگر را می‌توان از کاربردهای این علم جدید در الکترونیک بیان کرد.

## ۱-۲ اهمیت موضوع

با پیشرفت روند مجتمع‌سازی مدارهای دیجیتال، پژوهشگران علاوه بر کوشش بر روی ارتقاء فن‌آوری‌های موجود به دنبال روش‌های جدیدی نیز بوده‌اند. در چند دهه گذشته، کوچک‌سازی در ابعاد و افزایش قدرت پردازش توسط فن‌آوری CMOS با موفقیت همراه بوده است. اما مشخص است که قانون مور برای همیشه نمی‌تواند در ساخت افزاره‌های میکروالکترونیک ادامه یابد [۱]، [۲].

امروزه کوچک‌ترین ترانزیستورهای ساخته شده دارای اثرات کوانتومی هستند. این اثرات در آینده نزدیک تمام عملکرد این ترانزیستورها را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد و افزاره‌های کنونی و ترانزیستورهای CMOS، باید با افزاره‌هایی که پذیرای اثرات کوانتومی هستند جایگزین شوند. در اثر پدیده‌ی تونل‌زنی یک جریان نشتی ناشی از الکترون‌ها از الکتروود گیت وارد کانال ترانزیستور می‌شود، این اثری ناخوشایند است که در اثر کوچک‌سازی ابعاد افزارها، در فن‌آوری‌های موجود رخ می‌دهد [۱].

یکی از این ساختارهای جدید که برای کار در دنیای کوانتوم معرفی شده است، اتوماتای سلولی کوانتومی<sup>۱</sup> است که ابتدا توسط جناب آقای لنت<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۳ پیشنهاد شده بود [۳]. این ساختار اطلاعات دودویی را با استفاده از سلول‌های کوانتومی که دو حالت پایدار دارند، نمایش می‌دهد.

رویکرد طراحی این مدارها کاملاً متفاوت از طراحی سنتی مدارهای منطقی به‌خصوص در زمینه‌ی زمان‌بندی است. این فن‌آوری جدید می‌تواند راه‌حلی برای مدارهای محاسباتی بدون ترانزیستور در ابعاد نانو باشد. از اساسی‌ترین عناصری که توسط این فن‌آوری ساخته شده است می‌توان به سیم‌های کوانتومی اشاره کرد. همچنین دروازه‌های پایه‌ای دیجیتال مانند دروازه‌ی اکثریت و معکوس‌کننده به نحوه‌ی موفقیت‌آمیزی ساخته و آزمایش شده‌اند [۴]، [۵]. ساخت مدارهای دیجیتال با استفاده از سلول‌های کوانتومی یکی از کاربردی‌ترین راه‌حل‌هایی است که علاوه بر کاهش ابعاد مدارهای دیجیتال به ابعاد در حد نانو و افزایش فرکانس پالس‌دهی این مدارها به فرکانس‌هایی در حد تراهرتز، توان مصرفی این مدارها را نیز به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد [۶].

حذف جریان الکتریکی در این ساختار یکی از دلایل محبوبیت آن است [۷]، [۸]. هنگامی که تراکم مدارها افزایش پیدا می‌کند، به علت افزایش تعداد افزاره‌ها، میزان مصرف انرژی مدار و

<sup>۱</sup>Quantum cellular automata

<sup>۲</sup>Craig S. Lent

همچنین میزان اتلاف انرژی گرمایی آن زیاد می‌شود. در مدارهای QCA به علت عدم وجود جریان الکتریکی، میزان مصرف انرژی به شدت پایین است و همچنین امکان متراکم‌سازی این گونه مدارها تا سطح مولکولی امکان‌پذیر است.

فعالیت‌های زیادی در چند سال اخیر بر روی طراحی و پیاده‌سازی مدارهای منطقی با استفاده از QCA متمرکز شده است. محدودیت فیزیکی در ابعاد نانو باعث غیرقابل اعتماد بودن فرآیند ساخت مدار در این ابعاد و در نتیجه غیرقابل اطمینان بودن این گونه مدارها می‌شود. نرخ خطا در این گونه مدارها با فن‌آوری‌های ساخت موجود، برای این فن‌آوری نسبت به خطای ساخت در CMOS بسیار بالاتر است [۹]. با وجود اینکه QCA قابلیت‌های فراوانی برای ساخت مدارها دارد، مشکلاتی نیز در بعضی بخش‌های آن وجود دارد. یکی از این مشکلات، امکان خطا در این مدارها است. ماهیت نانومتری مدارهای QCA امکان بسیار زیادی برای ایجاد خطاها را فراهم می‌کند. حتی کوچک‌ترین نقص در هنگام ساخت ممکن است باعث به وجود آمدن خطا در این مدارها شود. انواع مختلف خطاها وجود دارد که در هنگام ساخت مدارهای QCA رخ می‌دهد. برخی از این خطاها عبارت‌اند از: جابه‌جایی سلولی، حذف سلول، چرخش سلولی و اضافه یا کم شدن الکترون‌ها [۱۰]، [۱۱]، [۱۲].

## ۳-۱ سؤالات و فرضیات

آیا خطای تک الکترون در فن‌آوری اتوماتای سلولی کوانتومی می‌تواند باعث تولید خروجی اشتباه در دروازه‌های منطقی شود؟ آیا می‌توان نرخ خطای خروجی دروازه را در هنگام بروز خطای تک الکترون محاسبه کرد؟ آیا می‌توان دروازه را نسبت به خطای تک الکترون تحمل‌پذیر کرد؟ آیا تغییر اندازه‌ی سلول‌های QCA می‌تواند خروجی دروازه را در هنگام بروز خطای تک الکترون تغییر دهد؟ تغییر رویکرد کلاک‌زنی چه تأثیری در خروجی دروازه‌هایی که دچار خطا شده‌اند دارد؟ اگر این خطا در دو سلول اتفاق بیوفتد خروجی چگونه خواهد بود؟ آیا می‌توان محاسبات مربوط به انرژی الکترواستاتیک را در هنگام بروز خطای تک الکترون با نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی کرد؟

## ۴-۱ هدف پژوهش

خطا از مهم‌ترین موانعی است که فن‌آوری اتوماتای سلولی کوانتومی با آن مواجه است. هدف از انجام این پژوهش بررسی یکی از خطایی است که ممکن است در فرآیند تولید یا در هنگام استفاده رخ دهد. هدف این پایان‌نامه بررسی خطای تک الکترون در دروازه‌های اساسی و در صورت امکان تحمل‌پذیر کردن آن‌ها نسبت به این خطا است.

## ۵-۱ مراحل پژوهش

در ابتدا با مطالعه و بررسی مقاله‌های معتبر داخلی و خارجی اطلاعات مورد نیاز برای انجام پروژه را کسب کردیم. در ادامه با محاسبه و تحلیل انواع انرژی‌ها مانند انرژی کینک و الکترواستاتیک بر روی دروازه‌های منطقی اساسی پژوهش را پیش بردیم. سپس روش‌های مختلف کلاک‌زنی را در دروازه‌های منطقی بررسی و تفاوت آن‌ها را گزارش کردیم. پژوهش خود را گسترش دادیم و بروز خطای تک الکترون در دو سلول را به صورت هم‌زمان بررسی کردیم. به علت گسترش و طولانی شدن محاسبات برنامه‌ی محاسباتی خود را تغییر و برنامه‌ی جدیدی را در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی کردیم.

## ۶-۱ ساختار پایان‌نامه

در فصل دوم درباره‌ی فن‌آوری QCA و انواع سلول‌های ساخته شده توضیح مختصری داده شده است. همچنین در ادامه به بررسی انواع دروازه‌های منطقی و نحوه‌ی پالس‌دهی آن‌ها پرداخته‌ایم.

در فصل سوم به صورت کلی انواع خطاهایی که ممکن است در این فن‌آوری روی دهد مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است و در انتهای فصل شرح کاملی درباره‌ی خطای تک الکترون در دروازه‌های مختلف بیان شده همچنین روش‌ها و طرح‌هایی برای تحمل‌پذیری خطا بررسی شده است.

در فصل چهارم بسته‌ی نرم‌افزاری نوشته شده به تفکیک توضیح داده شده است. در این فصل مزایا و معایب برنامه‌ی نوشته شده همراه با یک مثال کاربردی ارائه شده است.

در فصل پنجم دروازه‌های اساسی فن‌آوری QCA به صورت مختصر توضیح داده شده است و نتایج شبیه‌سازی همراه با محاسبات انجام شده بر روی خطای تک الکترون<sup>۱</sup> در این دروازه‌های منطقی بیان شده است. در انتهای فصل ساختارهای جدیدی برای دروازه‌ی اکثریت بررسی شده که در برابر خطای تک الکترون مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند. و در فصل ششم نتیجه‌گیری کلی و پیشنهادهایی برای کارهای آینده ارائه شده است.

<sup>1</sup>Single electron fault

## فصل ۲

# چشم‌اندازی بر فن‌آوری اتوماتای سلولی کوانتومی

### ۱-۲ مقدمه

در این فصل، مقدماتی درباره‌ی QCA و مفاهیم اولیه آن شرح داده می‌شود. ابتدا توضیحاتی راجع به نقاط کوانتومی، سلول‌های کوانتومی و نحوه‌ی عملکرد سلول‌ها خواهیم داشت و در ادامه عناصر منطقی پایه در QCA را مورد بررسی قرار می‌دهیم و در انتها مفهوم پالس‌دهی و ابزارهای طراحی و شبیه‌سازی را شرح خواهیم داد.

### ۲-۲ مکانیک کوانتوم

واژه کوانتوم به معنای کوچک‌ترین مقدار هر کمیت فیزیکی که می‌تواند به‌طور مستقل وجود داشته باشد است و نظریه‌ی کوانتوم به بعضی کمیت‌های فیزیکی مانند انرژی یک اتم ساکن، مقدارهای گسسته‌ای نسبت می‌دهد. فیزیک حالت جامد، ذرات بنیادی و هسته‌ای، اتم‌ها و مولکول‌ها از مکانیک کوانتومی به‌عنوان پایه و اساس خود بهره می‌برند. توجه داشته باشید که در ساختار مکانیک کوانتوم، حالت هر سیستم در هر لحظه به‌وسیله‌ی

یک تابع موج<sup>۱</sup> توصیف می‌شود [۱۳]. با داشتن این ابزار ریاضی می‌توان نتایج مختلف را در آزمایش‌ها پیش‌بینی کرد. به‌عنوان مثال، با آن می‌توان احتمال پیدا کردن الکترون را در ناحیه‌ی خاصی در اطراف هسته در یک زمان مشخص محاسبه کرد. در مکانیک کوانتوم برخلاف مکانیک کلاسیک، نمی‌توان به‌صورت هم‌زمان کمیت‌های مزدوج، مانند مکان و تکانه را با هر دقتی پیش‌بینی کرد. به‌عنوان مثال، می‌توان بیان کرد که الکترون در ناحیه‌ی مشخصی از فضا قرار دارد، ولی مکان دقیق آن را نمی‌توان تعیین کرد. البته معنی این حرف آن نیست که الکترون در تمام این ناحیه پخش شده است، بلکه به این نکته اشاره دارد که الکترون در یک ناحیه از فضا یا وجود دارد یا وجود ندارد. این ناتوانی در تعیین مکان الکترون را اصل عدم قطعیت هایزنبرگ می‌گویند [۱۴].

پدیده‌ی دیگری که باعث به وجود آمدن مکانیک کوانتومی شد امواج الکترومغناطیسی مانند نور بوده‌اند. در سال ۱۹۰۰ میلادی مکس پلانک<sup>۲</sup> هنگام مطالعه بر روی تابش جسم سیاه کشف کرد که انرژی این امواج را می‌توان به شکل بسته‌های کوچکی در نظر گرفت. بعد از آن آلبرت انیشتین از این فکر ایده گرفت و نشان داد که امواجی مثل نور را می‌توان با ذره‌ای گسسته مانند فوتون توصیف کرد. با استفاده از این نظریه‌ها دیدگاه جدیدی به نام دوگانگی موج بین ذرات ریز اتمی و امواج الکترومغناطیسی پدید آمد، که در آن ذرات نه موج هستند نه ذره. با توجه به این دیدگاه امواج و ذرات می‌توانند ویژگی‌های هر دو را از خود بروز دهند. نظریه‌ی کوانتوم اولین بار توسط ولفگانگ پاولی<sup>۳</sup> با عنوان ماتریس‌های پاولی مطرح شد که اسپین<sup>۴</sup> الکترون‌ها را در سه جهت فضای سه بعدی توجیه می‌کند. سپس اروین شرودینگر<sup>۵</sup> معادله معروف خود را به ثبت رساند که بنیادی‌ترین معادله غیر نسبیتی در مکانیک کوانتوم برای توصیف حالت یک ذره است [۱۵].

## ۳-۲ نقاط کوانتومی

نقطه‌ی کوانتومی، نیمه‌رساناها یا رساناهایی که دارای ابعادی حدود ۲ تا ۲۰ نانومتر است و بیشتر خصوصیات یک نیمه‌رسانا را از خود نشان می‌دهند. این نانو ذرات به دلیل اندازه‌ی کوچکشان خصوصیات نوری و الکتریکی خاصی را از خود نشان می‌دهند، که الکترون‌ها در پیدایش این خصوصیات نقش مهمی را ایفا می‌کنند. الکترون‌ها در مواد نیمه‌رسانا بازه‌ی مشخصی از انرژی را به خود اختصاص می‌دهند. وقتی الکترون‌ها توسط میدان الکتریکی، نور و گرما تحریک می‌شوند تعدادی از آن‌ها از تراز انرژی پایین‌تر به تراز انرژی بالاتر می‌روند. در شکل ۱-۲ نقطه‌ی کوانتومی ایجاد شده توسط InAs/GaAs نشان داده شده است [۱۶].

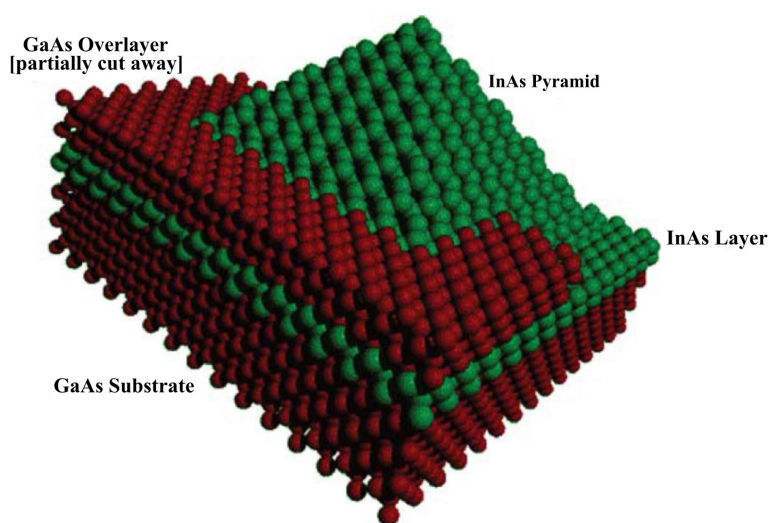
<sup>1</sup>Wave function

<sup>2</sup>Max Planck

<sup>3</sup>Wolfgang Pauli

<sup>4</sup>Spin

<sup>5</sup>Erwin Schrödinger

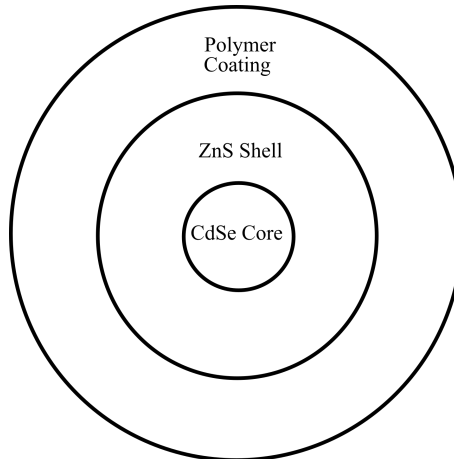


شکل ۱-۲: هرم ایجاد شده توسط InAs/GaAs

نقاط کوانتومی از دیدگاه ساختاری دارای هسته‌ای از جنس نیمه‌های CdSe (کادمیوم سلنید) هستند، که توسط یک پوسته‌ی نیمه‌رسانا از جنس ZnS (روی سولفید) احاطه شده است. البته این ترکیب‌ها می‌توانند از نیمه‌رساناهای دیگری همچون CdS (کادمیوم سولفید) و CdTe (کادمیوم تلورید) تهیه شوند. متناسب با طول موج موردنظر ماده نیمه‌رسانا برای هسته انتخاب می‌شود. برای نشر طیف مرئی از CdS و برای نشر طیف مادون قرمز از CdTe استفاده می‌شود. هسته و پوسته توسط یک لایه‌ی پلیمر پوشیده می‌شوند. که این لایه مشابه سپری برای جلوگیری از سمی شدن سلول‌ها به وسیله کادمیوم است. در شکل ۲-۲ شماتیک و ساختار یک نقطه کوانتومی نشان داده شده است.

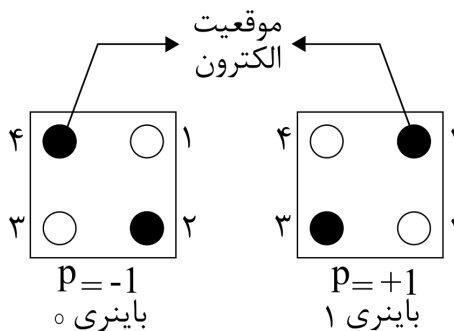
## ۴-۲ سلول‌های کوانتومی

سلول‌های کوانتومی اجزای پایه و اساسی مدارهای QCA را تشکیل می‌دهند. یک سلول QCA از ۴ نقطه کوانتومی تشکیل شده است که به صورت خازنی و سد تونلی باهم جفت شده‌اند. هر سلول شامل دو الکترون آزاد است که می‌توانند بین نقاط کوانتومی تونل‌زنی کنند، اما بین سلول‌ها نمی‌توانند [۳]. در حالتی که هیچ نیرویی به سلول وارد نشده باشد و هیچ‌گونه اختلال الکترواستاتیکی در محیط نباشد، الکترون‌ها مجبور هستند به خاطر نیروی دافعه کولنی میانشان حداکثر فاصله را نسبت به یکدیگر بگیرند. همچنین، می‌توان یک نقطه‌ی



شکل ۲-۲: شماتیک و ساختار یک نقطه‌ی کوانتومی

کوانتومی پنجم را در مرکز سلول کوانتومی اضافه کرد تا رفتار سلول را اندکی بهبود بخشد. اما برای سادگی بیشتر سلول‌های کوانتومی با چهار نقطه مورد بررسی قرار می‌گیرد. اگر ۴ نقطه کوانتومی را در ۴ رأس یک مربع با شرط اینکه فقط ۲ نقطه از ۴ نقطه دارای بار محدودی باشد، قرار دهیم به آن اتوماتای سلولی کوانتومی گفته می‌شود. در این صورت دو حالت پایه ۰ و ۱ به وجود می‌آید. همانطوری که در شکل ۲-۳ دیده می‌شود ۲ حالت پلاریزاسیون<sup>۱</sup> برای نمایش ۰ و ۱ منطقی به کار گرفته می‌شود.



شکل ۲-۳: پلاریزاسیون سلول‌های QCA

قطبیت  $p$  در یک سلول، مقدار اینکه تا چه حد بار الکتریکی بین چهار نقطه توزیع شده است را مشخص می‌کند و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P = \frac{(p_1 + p_3) - (p_2 + p_4)}{p_1 + p_2 + p_3 + p_4} \quad (1-2)$$

که در آن  $p_i$ ، بار الکتریکی در هر یک از چهار نقطه‌ی سلول QCA است. نکته قابل توجه این است که در شرایطی که سلول‌ها از هم جدا باشند، پلاریزاسیون از بین می‌رود، بنابراین زمانی که نیرو به سلول اعمال شود (این نیرو می‌تواند از سلول مجاور QCA اعمال گردد) پلاریزاسیون فعلی سلول از بین رفته و سلول QCA حالت سلول مجاور را به خود می‌گیرد [۷].

<sup>۱</sup>Polarization

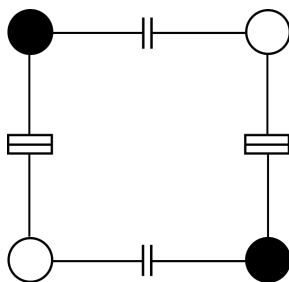


## ۵-۲ پیاده‌سازی سلول QCA

سلول QCA می‌تواند با فلزها، نیمه‌رسانا، مواد مغناطیسی و مولکول‌ها پیاده‌سازی شود. برای ساخت نقاط کوانتومی از مواد نیمه‌رسانا استفاده می‌شود و این نقاط در داخل QCA به صورت خازن به هم متصل می‌شوند [۱۷]. ساخت یک سلول QCA سیلیکونی پایه با چهار نقطه‌ی سیلیکونی گزارش شده که در دمای ۴/۲ درجه کلوین عملکرد قابل قبولی داشته است [۱۷]. در QCA مغناطیسی، حالت‌های منطقی به صورت جهت قطبش مغناطیسی نشان داده می‌شوند. تزویج بین این نقطه‌ها با نقاط مجاور به صورت اندرکنش مغناطیسی است. نمونه‌ای از این سلول‌های مغناطیسی در دمای اتاق ساخته شده و عملکرد خوبی را از خود نشان می‌دهد [۱۸]. همچنین ساخت یک دروازه‌ی اکثریت سه ورودی با استفاده از QCA مغناطیسی گزارش شده است [۱۹]. در ادامه به صورت مختصر انواع سلول‌های QCA را بررسی می‌کنیم.

### ۱-۵-۲ سلول QCA فلزی

نوع فلزی سلول‌های QCA با استفاده از اتصال‌های فلزی و خازن‌های بسیار کوچک ساخته شده است. پیوندهای تونلی ساخته شده از اکسید آلومینیم به مانند مسیری بین نقاط کوانتومی عمل می‌کنند. نقطه‌های کوانتومی از جزایر آلومینیمی تشکیل شده‌اند [۲۰]. در شکل ۴-۲ چگونگی تشکیل این سلول‌ها با چهار نقطه‌ی کوانتومی نشان داده شده است. الکترون‌ها می‌توانند بین نقاط کوانتومی تونل‌زنی کنند.

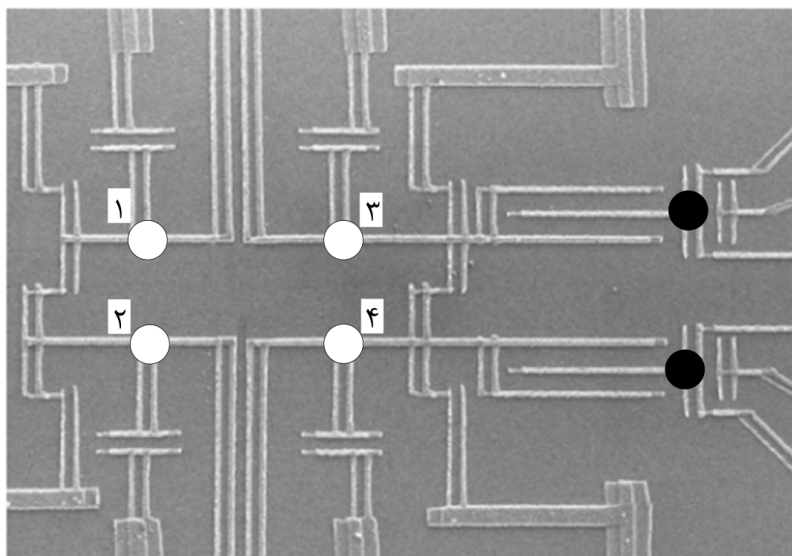


شکل ۴-۲: سلول QCA فلزی

همچنین یک تصویر SEM<sup>۱</sup> از یک سلول چهار نقطه‌ای فلزی در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. چهار نقطه‌ی سفید نشان دهنده‌ی نقاط فلزی است. و دو نقطه‌ی سیاه نشان دهنده‌ی ترانزیستورهای الکترومتر تک الکترونی است که برای اندازه‌گیری خروجی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای ساخت این سلول‌های فلزی در واقع ترکیبی از تکنیک‌های تبخیر دو زاویه‌ای<sup>۲</sup> و لیتوگرافی اشعه الکترونی استفاده می‌شود. از این روش‌ها برای نشان دادن خطوط

<sup>۱</sup>Scanning Electron Micrograph

<sup>۲</sup>Dual-angle evaporation



شکل ۲-۵: تصویر SEM از یک سلول فلزی چهار نقطه‌ای

آلومینیومی نازک با سطوح همپوشانی بسیار کوچک استفاده شده است. با خطوط آلومینیومی می‌توان نقطه‌ها را ساخت و لایه نازک اکسید آلومینیوم داخل فضای همپوشانی، پیوند تونلی را تشکیل می‌دهد. برای آزمایش این سلول فلزی از یک سرد کننده‌ی تبخیری با میدان مغناطیسی یک تسلا استفاده شده تا اثر ابررسانایی آلومینیوم خنثی شود. مدارهای QCA فلزی در دمای بسیار پایین به نحو موفقیت‌آمیزی آزمایش شده و همچنین دروازه‌های اکثریت، سیم‌های باینری، ثبات انتقالی<sup>۱</sup> چند طبقه و حافظه‌ها طراحی شده‌اند [۲۱].

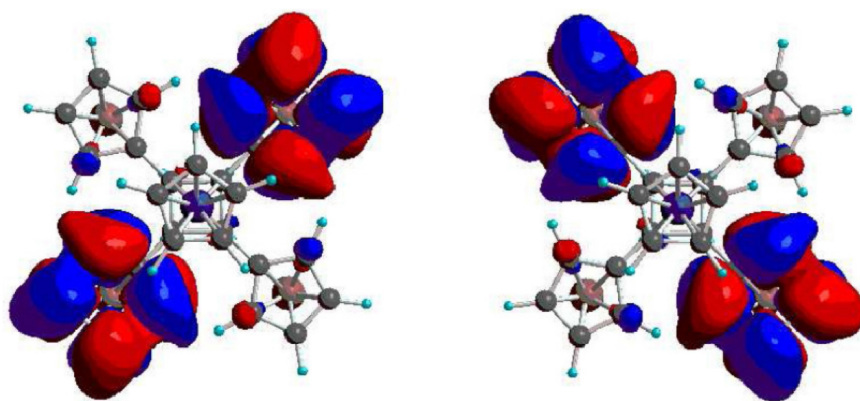
## ۲-۵-۲ سلول QCA مولکولی

برای استفاده در دمای اتاق سلول‌های QCA مولکولی دارای آینده‌ای روشن‌تری هستند. سلول‌های QCA مولکولی فقط در کوچکی ابعاد و تراکم بالا نسبت به سلول‌های فلزی برتری دارند در بقیه موارد سلول‌ها فلزی دارای برتری آشکاری هستند. مولکول‌ها دارای خاصیت خودآرایی<sup>۲</sup> هستند که موجب می‌شود مدارهای ساخته شده کاملاً مشابه یکدیگر باشند و هزینه‌های تولید کاهش می‌یابد. همچنین مولکول‌ها دارای قابلیت خوبی برای نگهداری بارهای الکتریکی هستند. از مهم‌ترین موضوعاتی که وجود دارد سنتز مولکول‌ها و ساخت مدارهای مولکولی است. از طرفی برای ساخت این سلول‌ها انتخاب‌های کمی برای مولکولی که بتواند مورد استفاده قرار گیرد وجود دارد. برای ساخت یک سلول QCA فقط از یک مولکول به تنهایی استفاده می‌شود. همچنین اوربیتال‌های غیر مقید  $\pi$  یا  $d$  به‌عنوان نقاط کوانتومی عمل می‌کنند. بنابراین برای انتقال الکترون از یک نقطه به نقطه‌ای دیگر اثر کمی بر ساختار کلی مولکول دارد [۲۲].

<sup>1</sup>Shift Register

<sup>2</sup>Self assembly

سلول‌هایی با چهار نقطه‌ی کوانتومی و سلول‌هایی با دو نقطه‌ی کوانتومی اخیراً ساخته شده‌اند. باید به نحوی سلول‌های دو نقطه‌ای را ساخت که به‌صورت پیوند کووالانسی به زیرلایه سیلیکونی متصل گردد. همچنین ستون‌هایی تعبیه شده است که وظیفه‌ی آن‌ها عمودی نگه داشتن مولکول‌ها نسبت به سطح است. برای اندازه‌گیری تونل‌زنی بار از یک نقطه به نقطه‌ی دیگر می‌توان از روش خازنی استفاده کرد. HOMO<sup>۱</sup> که بالاترین اوربیتال مولکولی اشغال شده است مربوط می‌شود به دو حالت پایدار فن‌آوری QCA مولکولی چهار نقطه‌ای که در شکل ۲-۶ نشان داده شده است.



(ب) یک منطقی

(الف) صفر منطقی

شکل ۲-۶: سلول QCA مولکولی

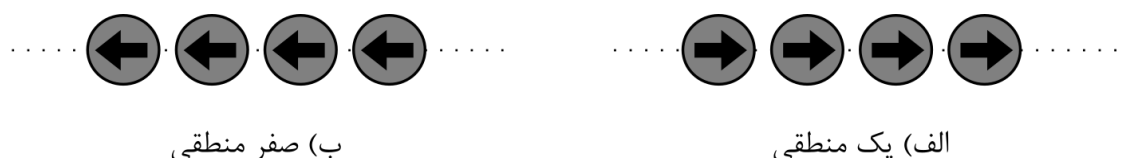
برای سنتز این مولکول از گروه Fehner استفاده شده است. در چهار گوشه‌ی مربع چهار گروه ferrocene قرار گرفته است مطابق شکل ۲-۶. برای مسیر تونل‌زنی یا عامل گذار در مرکز مربع عنصر مشترک CO قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می‌کنید اتم‌های چهارگانه نقطه‌های کوانتومی و مجموعه‌ای از آن‌ها QCA مولکولی را تشکیل می‌دهد.

### ۳-۵-۲ سلول QCA مغناطیسی

اولین بار ایده‌ی سلول‌های QCA مغناطیسی که MQCA نامیده می‌شوند در سال ۲۰۰۰ مطرح شد. در این سلول‌ها فعل‌وانفعالات مغناطیسی بین ذرات نانو وجود دارد. همانطور که در شکل ۲-۷ نشان داده شده است ذرات نانو به‌صورت بردارهای مغناطیسی در یک زنجیره‌ی افقی حرکت می‌کنند.

برخلاف برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی در سلول‌های مولکولی و فلزی در سلول‌های مغناطیسی به‌صورت تعاملات مغناطیسی اطلاعات منطقی جابه‌جا می‌شود. بر اساس تجربه‌های به‌دست آمده از کارکرد MQCA در دمای اتاق، این سلول‌ها به نقاط نسبتاً بزرگی در حدود

<sup>۱</sup>Highest Occupied Molecular Orbital



شکل ۲-۷: بردار مغناطیسی در MQCA

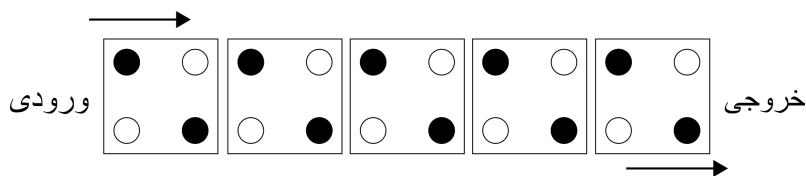
۱۰۰nm نیاز دارند. با توجه به تکنیک‌ها و فن‌آوری‌های موجود امکان ساخت سلول‌های QCA مغناطیسی در دمای اتاق در دسرهای زیادی را به همراه دارد [۱۸].

## ۶-۲ عناصر منطقی در QCA

هنگامی که یک سلول با پلاریزاسیون مشخص در یک راستا در مجاورت سلول دیگری قرار می‌گیرد، نیروی کولنی بین آن‌ها موجب می‌شود سلول دوم همان حالت منطقی سلول اول را به خود بگیرد و در نتیجه انرژی الکترواستاتیک در این سلول به کم‌ترین مقدار برسد. فرآیند انتقال اطلاعات در یک خط به این صورت است. با توجه به نحوه‌ی قرارگیری سلول‌ها در کنار هم و اندرکنش‌های کولنی بین آن‌ها، افزاره‌های منطقی QCA تولید و توسعه می‌یابند [۱]. در ادامه تعدادی از عناصر اساسی در فن‌آوری QCA معرفی و نحوه‌ی پیاده‌سازی آن‌ها نشان داده می‌شود.

### ۱-۶-۲ سیم QCA

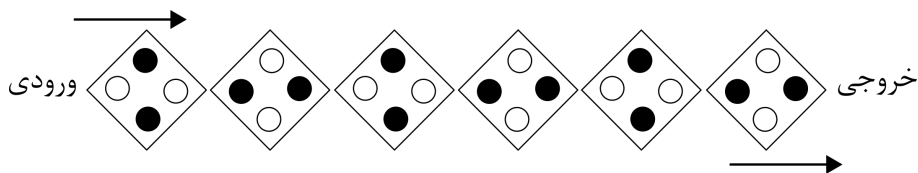
ساده‌ترین ترکیب در فن‌آوری QCA سیم دودویی است همانطور که در بخش قبل بیان شد، نیروی دافعه کولنی فقط بین الکترون‌های داخل سلول برقرار نیست بلکه هر سلول بر سلول‌های مجاور نیز تاثیر گذار است [۲۳]. در حالتی که دو سلول در کنار یکدیگر قرار داشته باشند همواره در وضعیتی قرار می‌گیرند که نیروی دافعه کولنی به حداقل برسد. در این حالت هر دو سلول قطبش یکسان خواهند داشت. همانطور که در شکل ۲-۸ نشان داده شده است با پلاریزه شدن سلول در انتهای سمت چپ سیم، سلول‌ها به ترتیب از چپ به راست پلاریزه می‌شوند و به این ترتیب با توجه به برهم‌کنش کولنی بین سلول‌ها، مقدار ۰ یا ۱ منطقی در طول سیم انتقال می‌یابد. سیم دودویی در QCA حتی در شرایطی که سلول ورودی یا یکی از سلول‌های میانی دارای قطبش ضعیف باشند از قدرت کافی برای انتقال اطلاعات برخوردار است.



شکل ۲-۸: سیم دودویی

### ۲-۶-۲ سیم ۴۵ درجه

یک سیم QCA را طوری می‌توان ساخت که سلول‌های آن در راستای ۴۵ درجه قرار گرفته باشند به این سیم زنجیره‌ی معکوس‌کننده<sup>۱</sup> هم گفته می‌شود. در این حالت سیگنال انتشار یافته در داخل سیم به صورت متناوب برابر با دو مقدار صفر و یک باینری می‌شود. در واقع در این سیم دو سلولی که در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند پلاریته‌ای عکس هم دارند. شکل ۲-۹ این نوع سیم را نشان می‌دهد.



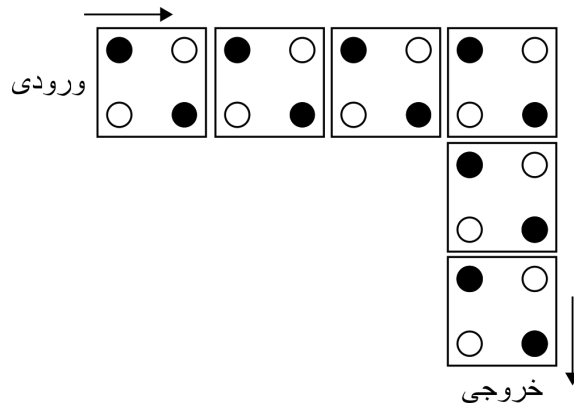
شکل ۲-۹: سیم باینری ۴۵ درجه

در این حالت می‌توان این را بیان کرد که یک ردیف معکوس‌کننده در کنار هم قرار گرفته‌اند. اگر تعداد فرد سلول کنار هم باشند، خروجی برابر با سیگنال اصلی و اگر تعداد سلول‌ها زوج باشد، خروجی مکمل ورودی است. با استفاده از این سیم می‌توان ساختاری را پیاده‌سازی کرد که توسط آن بتوان هم‌زمان به سیگنال اصلی و هم به مکمل آن دسترسی داشت [۲۴].

### ۲-۶-۳ سیم L شکل

نوع دیگری از سیم‌های QCA که برای انتقال اطلاعات استفاده می‌شود سیم L است که در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است. همانطور که در شکل می‌بینید تعداد سه سلول به صورت افقی و سه سلول به صورت عمودی با دقت کنار هم قرار گرفته‌اند که اندرکنش کولنی بین سلول‌ها باعث می‌شود که مقدار منطقی ورودی در طول سیم منتشر شده و به خروجی برسد. این نوع از کنار هم قرار دادن سلول‌های QCA اگر خطایی در هنگام ساخت و پیاده‌سازی رخ ندهد باعث می‌شود همان مقدار ورودی منطقی داده شده در خروجی سیم دیده شود [۲۴].

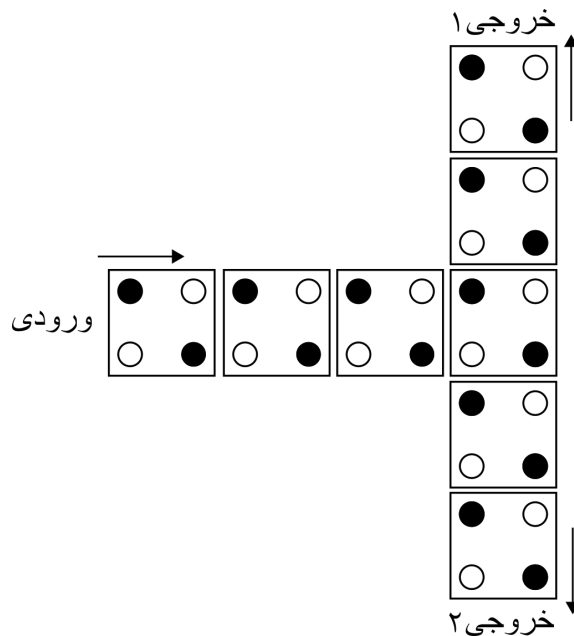
<sup>1</sup>Inverter chain



شکل ۲-۱۰: سیم L شکل

### ۲-۶-۴ مدار مقسم

با استفاده از مقسم<sup>۱</sup> می توان خروجی یک دروازه را به ورودی های چند دروازه ی دیگر متصل کرد. ساختار یک مدار مقسم در فن آوری QCA در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود این ساختار دارای سه شاخه است. هر کدام از این شاخه ها می تواند ورودی و دو شاخه دیگر خروجی باشد. اندرکنش کولنی باعث می شود در هر دو خروجی مقداری برابر با ورودی حاصل شود [۲۴].

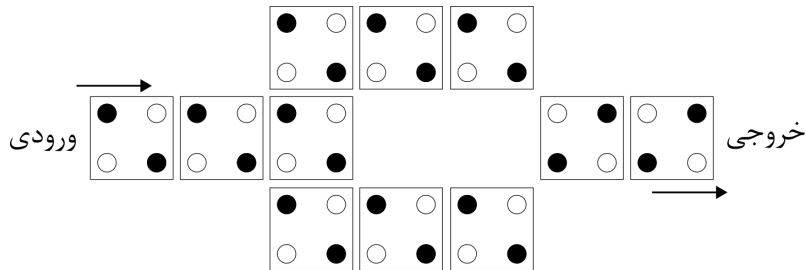


شکل ۲-۱۱: مدار مقسم

<sup>۱</sup>fanout

## ۲-۶-۵ دروازه‌ی معکوس‌کننده

دروازه‌ی معکوس‌کننده<sup>۱</sup> یکی از عناصر اصلی برای پیاده‌سازی مدارهای منطقی است. شکل ۲-۱۲ آرایشی از سلول‌ها که مانند یک معکوس‌کننده عمل می‌کند را نشان می‌دهد. سیگنال ورودی از سیم دودویی در سمت چپ وارد شده و در ادامه به دو سیم موازی انشعاب

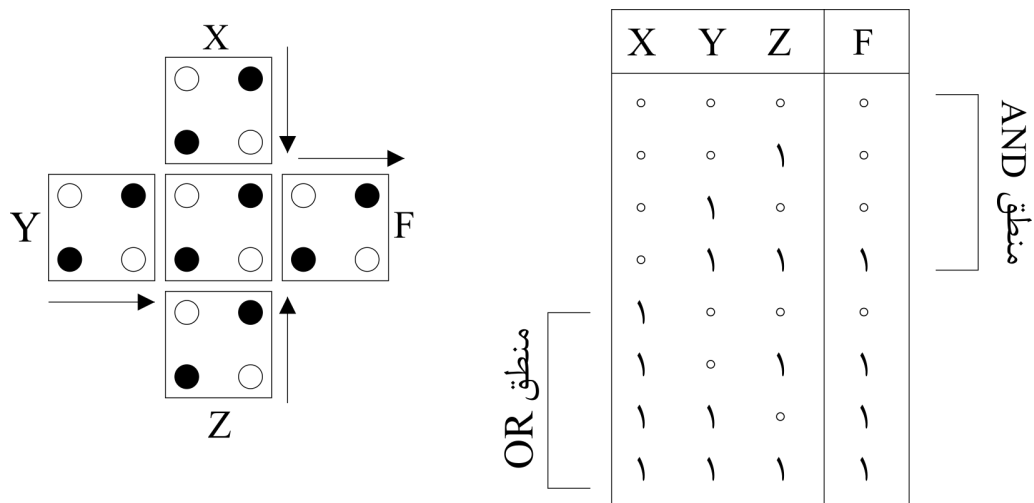


شکل ۲-۱۲: دروازه‌ی معکوس‌کننده

یافته است. در انتهای سمت راست سیم‌های موازی با آرایش قطری به هم پیوند خورده‌اند که موجب می‌شود سیگنال ورودی معکوس گردد. این دروازه معادل NOT منطقی است که معکوس ورودی را در خروجی اعمال می‌کند [۲۵].

## ۲-۶-۶ دروازه‌ی اکثریت

دروازه‌ی اکثریت<sup>۲</sup> یکی از اساسی‌ترین دروازه‌ها در مدارهای QCA است [۲۶]. همانطور که در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است این دروازه از پنج سلول تشکیل شده است. ۳ سلول



شکل ۲-۱۳: جدول صحت و تصویر دروازه‌ی اکثریت

بالایی، پایینی و سلولی که در سمت چپ قرار دارد، ورودی هستند. سلولی که در وسط قرار

<sup>۱</sup>Inverter gate

<sup>۲</sup>Majority gate

دارد سلول اصلی و سلول سمت راست سلول خروجی است. تابع منطقی این دروازه در ادامه آورده شده است:

$$MV(A, B, C) = AB + AC + BC \quad (2-2)$$

اگر مقدار یکی از ورودی‌های دروازه‌ی اکثریت را مقدار ثابت صفر در نظر بگیریم و هر کدام از دو ورودی آزاد دیگر مقدار صفر منطقی داشته باشند نتیجه حاصل صفر می‌شود. در این حالت دروازه‌ی اکثریت مانند یک دروازه AND دو ورودی عمل می‌کند. تابع منطقی آن به شکل زیر است:

$$MV(A, B, C) = AB + A \times 0 + B \times 0 = AB \quad (3-2)$$

به همین ترتیب اگر یکی از ورودی‌ها مقدار ثابت یک منطقی در نظر گرفته شود و هر کدام از دو ورودی آزاد دیگر مقدار یک داشته باشند نتیجه حاصل یک می‌شود و دروازه‌ی اکثریت همانند OR دو ورودی عمل می‌کند. تابع منطقی آن به شکل زیر است:

$$MV(A, B, C) = AB + A \times 1 + B \times 1 = AB + A + B = A + B \quad (4-2)$$

## ۲-۶-۷ دروازه‌ی اکثریت پنج ورودی

این دروازه شامل ۱۰ سلول است که ۵ تا از آن‌ها سلول‌های ورودی هستند. این دروازه مشابه دروازه‌ی اکثریت سه ورودی عمل می‌کند. پیشنهاد این دروازه در مقاله [۲۷] ارائه شده است. تابع منطقی دروازه‌ی اکثریت ۵ ورودی با ورودی‌های A، B، C، D و E به صورت زیر است.

$$(5-2)$$

$$M(A, B, C, D, E) = ABC + ABD + ABE + ACD + ACE + ADE + BCD + BCE + BDE + CDE$$

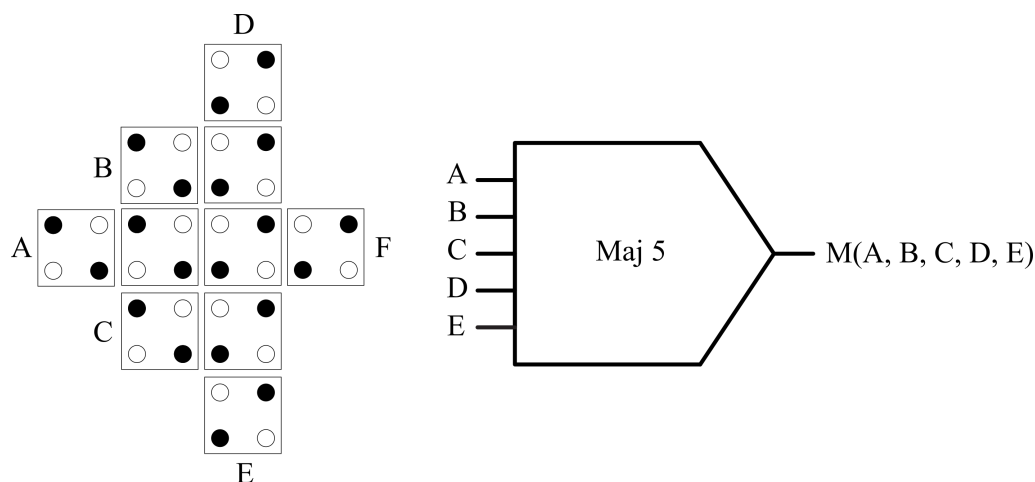
این دروازه در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است.

برای پیاده‌سازی دروازه‌های AND و OR سه ورودی از این دروازه استفاده می‌شود. برای پیاده‌سازی دروازه AND سه ورودی باید دو پایه‌ی این دروازه را صفر منطقی قرار دهیم. برای پیاده‌سازی دروازه OR سه ورودی باید دو پایه‌ی این دروازه را یک منطقی قرار دهیم. تابع منطقی دروازه‌های AND و OR به شکل زیر است:

$$M(A, B, C, 0, 0) = ABC \quad (6-2)$$

$$M(A, B, C, 1, 1) = A + B + C \quad (7-2)$$

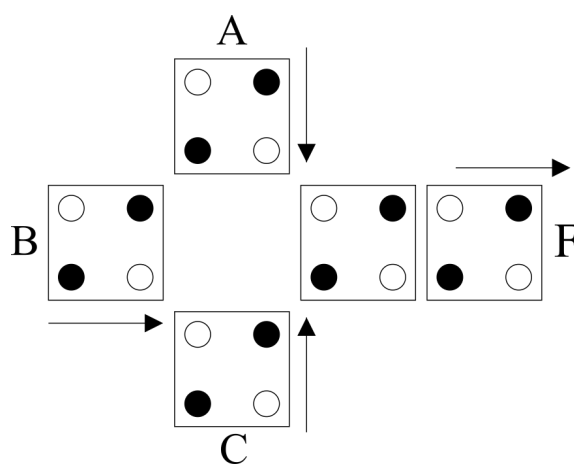




شکل ۲-۱۴: دروازه‌ی اکثریت پنج ورودی [۲۷]

### ۸-۶-۲ دروازه‌ی NNI

دروازه‌ی منطقی NNI<sup>۱</sup> یکی از دروازه‌های منطقی نوین طراحی و شبیه‌سازی شده در فن‌آوری QCA است. این دروازه شامل ۵ سلول و ۳ ورودی است که در شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۵: دروازه‌ی منطقی NNI

این دروازه دارای تابع منطقی مطابق با رابطه ۲-۸ است [۲۸].

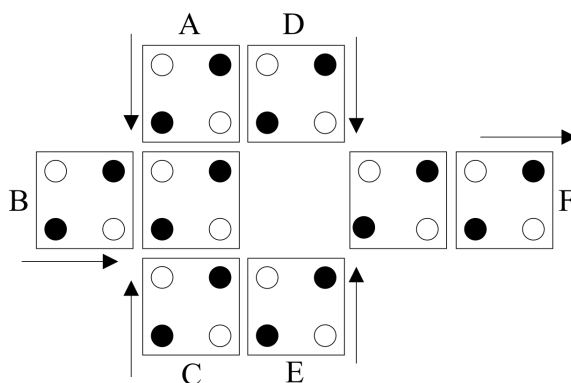
$$NNI(A, B, C) = maj(\bar{A}, B, \bar{C}) = \bar{A}B + B\bar{C} + \bar{C}\bar{A} \quad (۸-۲)$$

نحوه‌ی عملکرد این دروازه به این صورت است که اگر  $B=1$  باشد با ورودی‌های  $A$  و  $C$  می‌توان دروازه‌ی منطقی Nand را ساخت. و همچنین اگر  $B=0$  باشد با توجه به ورودی‌هایی که به  $A$  و  $C$  داده می‌شود می‌توان دروازه‌ی منطقی Nor را ساخت.

<sup>۱</sup>Nand Nor Inverter

## ۹-۶-۲ دروازه‌ی AOI

دروازه‌ی منطقی AOI<sup>۱</sup> که با آن دروازه‌های منطقی AND، OR و Inveter را می‌توان پیاده‌سازی کرد شامل ۷ سلول است که ۵ سلول آن ورودی است. در شکل ۱۶-۲ این ساختار نشان داده شده است [۲۹].



شکل ۱۶-۲: دروازه‌ی منطقی AOI

این دروازه ترکیبی از دو دروازه‌ی اکثریت است که تابع منطقی آن مطابق رابطه ۹-۲ است.

$$AOI(A, B, C, D, E) = \bar{D}\bar{E} + (\bar{D} + \bar{E})(AB + BC + CA) \quad (9-2)$$

از این گیت می‌توان در طراحی و بهینه‌سازی مدارهای QCA استفاده کرد. نحوه‌ی عملکرد این دروازه به این صورت است که ورودی‌های D و E قطبیت مخالف همدیگر را داشته باشند و C=۰ و ترکیب ورودی‌های A و B برابر با یک باشند مقدار خروجی F=۱ می‌شود، در غیر این صورت F=۰ می‌شود. این نحوه‌ی عملکرد اشاره به دروازه‌ی منطقی AND دارد. دوباره وقتی ورودی‌های کنترلی قطبیت مخالف هم داشته باشند و C=۱ باشد و ورودی‌های A یا B دارای مقدار منطقی یک باشد خروجی مقدار F=۱ به خود می‌گیرد در غیر این صورت F=۰ می‌شود. این نحوه‌ی عملکرد همانند دروازه‌ی OR است.

در انتها اگر B تنها ورودی باشد و دیگر ورودی‌های اعمالی مقدار منطقی صفر را به خود بگیرند ساختار دروازه‌ی منطقی AOI همانند دروازه معکوس کننده عمل می‌کند [۳۰].

## ۱۰-۶-۲ دروازه‌ی XOR

رابطه‌ی منطقی برای دروازه‌ی XOR به صورت زیر است:

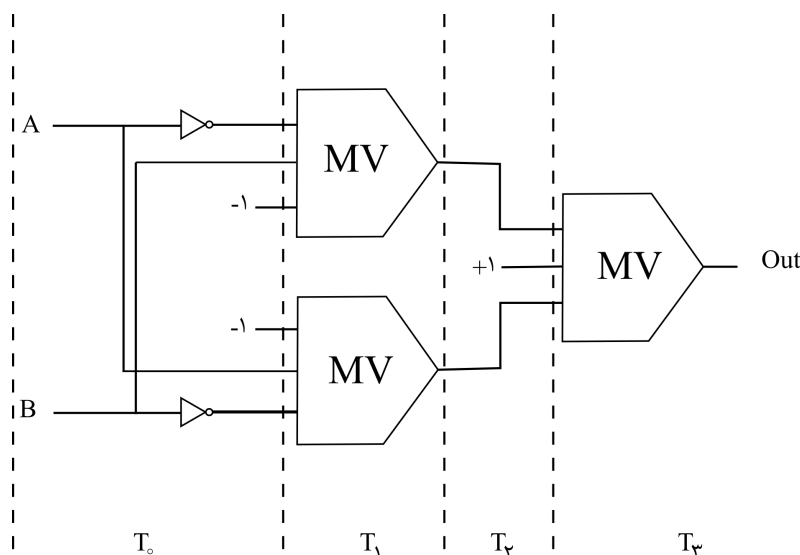
$$out = A \oplus B = \bar{A}B + A\bar{B} \quad (10-2)$$

<sup>1</sup>And Or Inverter

که پیاده‌سازی آن در فن‌آوری QCA با گیت‌های معکوس‌کننده و اکثریت به صورت رابطه‌ی زیر است:

$$out = MV(MV(\bar{A}, B, \circ), MV(A, \bar{B}, \circ), 1) \quad (11-2)$$

که MV به معنای تابع دروازه‌ی اکثریت است [۳۱]. در شکل ۱۷-۲ شماتیک مداری دروازه‌ی منطقی XOR نشان داده شده است. نحوه‌ی پالس‌دهی باید به صورتی باشد که سیگنال‌های



شکل ۱۷-۲: شماتیک مداری و نحوه‌ی پالس‌دهی دروازه‌ی XOR [۳۱]

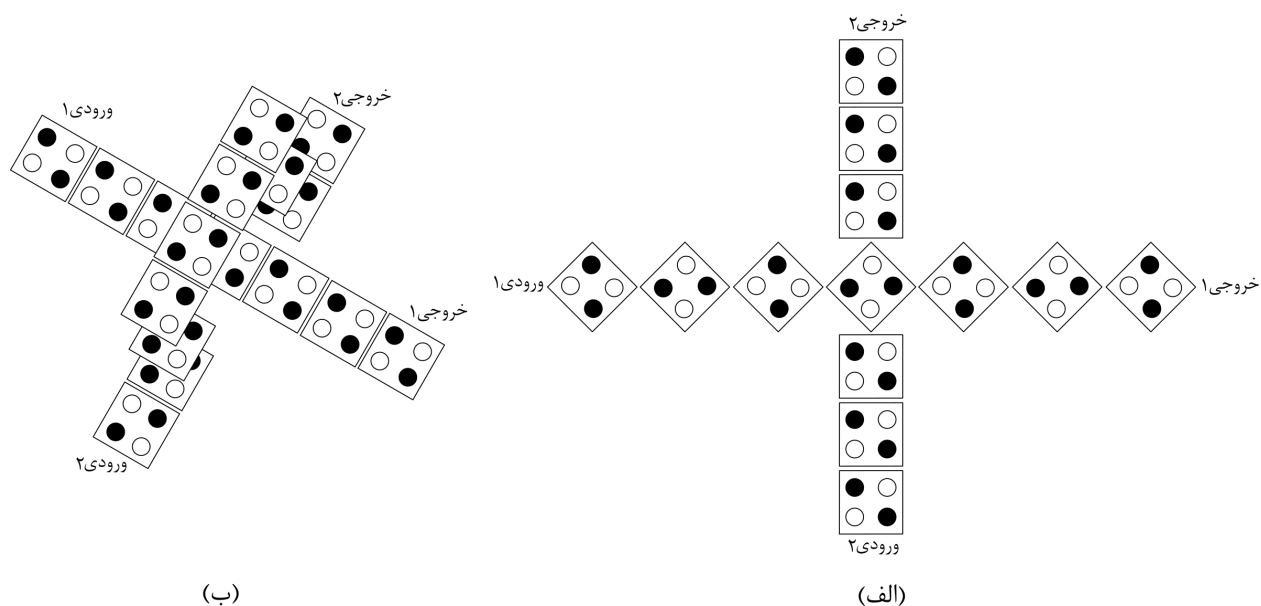
ورودی به دروازه به طور هم‌زمان به آن برسند تا خروجی مطلوب دروازه به دست آید. نحوه‌ی انجام این کار در شکل ۱۷-۲ نشان داده شده است که در آن می‌توانیم  $T_i = (i = 0, 1, 2, 3)$  را چهار فاز پالس‌دهی در فن‌آوری QCA تعیین کنیم.

## ۱۱-۶-۲ عبور سیم‌ها از روی هم در QCA

در فن‌آوری QCA برای عبور سیم‌ها از روی هم بدون تأثیر بر یکدیگر دو روش وجود دارد: عبور چند لایه<sup>۱</sup> و عبور هم‌صفحه<sup>۲</sup> که در شکل ۱۸-۲ نشان داده شده است [۳۲]، [۳۳]. در عبور چند لایه، عبور سیم‌ها با استفاده از چند لایه که روی هم قرار گرفته‌اند صورت می‌گیرد. روش دیگر که عبور هم‌صفحه نام دارد فقط در فن‌آوری QCA مورد استفاده قرار می‌گیرد و در فن‌آوری CMOS وجود ندارد. در این روش سیم باینری و زنجیره‌ی معکوس‌کننده، انتقال دو سیگنال مختلف را بر عهده دارند. مطابق شکل با وجود عبور سیم باینری و زنجیره‌ی معکوس‌کننده از روی هم پلاریزه‌ی آن‌ها هیچ اثری بر یکدیگر نداشته و مقدار منطقی عبور داده شده را تغییر نمی‌دهند.

<sup>1</sup>Two-layer crossing

<sup>2</sup>Coplanar crossing



شکل ۲-۱۸: عبور سیم‌ها از روی هم (الف) عبور هم‌صفحه (ب) عبور چند لایه

## ۲-۶-۱۲ تمام جمع‌کننده

از عناصر مداری مهم در VLSI و QCA می‌توان تمام جمع‌کننده<sup>۱</sup> را نام برد. روابط منطقی برای پیاده‌سازی تمام جمع‌کننده به صورت زیر است:

$$Sum = abc_{in} + a\bar{b}\bar{c}_{in} + \bar{a}b\bar{c}_{in} + \bar{a}\bar{b}c_{in} \quad (۱۲-۲)$$

$$C_{out} = ab + ac_{in} + bc_{in}$$

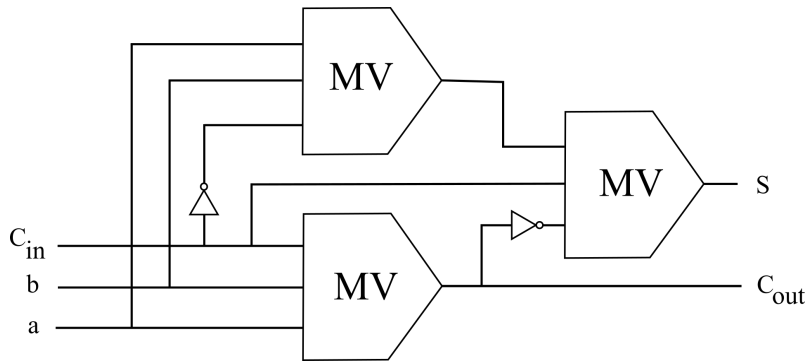
اگر بخواهیم با دروازه‌های معکوس‌کننده و اکثریت پیاده‌سازی کنیم روابط به صورت زیر است:

$$Sum = MV(\overline{MV}(a, b, c_{in}), M(a, b, \bar{c}_{in}), c_{in}) \quad (۱۳-۲)$$

$$C_{out} = MV(a, b, c_{in})$$

در شکل ۲-۱۹ شماتیک مداری تمام جمع‌کننده‌ی یک بیت نشان داده شده است. تمام جمع‌کننده‌ی یک بیتی از سه دروازه‌ی اکثریت و دو دروازه‌ی معکوس‌کننده تشکیل شده است. در جمع‌کننده‌ها معمولاً برای عبور سیم‌ها از روی یکدیگر از روش عبور هم‌صفحه استفاده می‌شود. نحوه‌ی پالس‌دهی در این مدار به صورتی است که سیگنال‌های ورودی به هر دروازه به‌طور هم‌زمان به آن دروازه می‌رسند تا خروجی‌های تمام جمع‌کننده‌ی یک بیت به درستی به دست آید. همچنین تأخیر ورودی به خروجی برای هر یک از خروجی‌های S و  $C_{out}$  به ترتیب ۵ و ۴ پالس ساعت است.

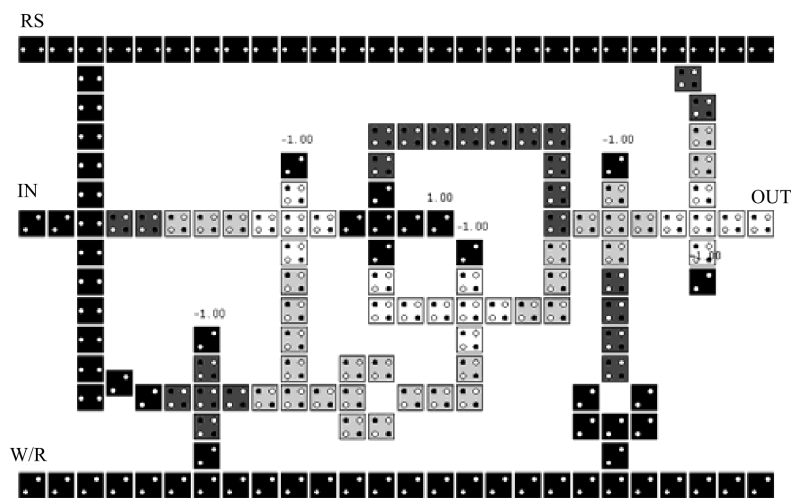
<sup>۱</sup>Full adder



شکل ۲-۱۹: شماتیک مداری تمام جمع کننده [۳۴]

## ۲-۶-۱۳ پیاده‌سازی حافظه

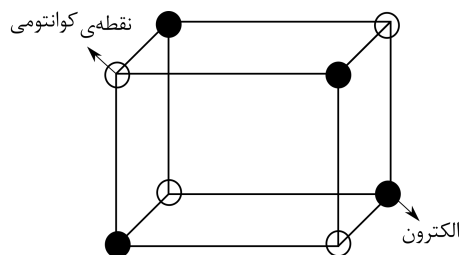
در طراحی و پیاده‌سازی حافظه از گیت‌های منطقی AND، OR، معکوس‌کننده و عبور هم‌صفحه‌ی سیم‌ها از روی یکدیگر استفاده می‌شود تا این اطمینان به دست آید که طراحی انجام شده بهینه است. این مدار قسمت‌های مختلفی دارد که شامل خطوط انتخاب سطر و همچنین تعیین خواندن یا نوشتن است. اگر بخواهیم یک بیت داده را در حافظه‌ی QCA ذخیره کنیم باید از یک حلقه‌ی چهار فاز برای این کار استفاده شود تا داده‌ی موردنظر روی آن قرار گیرد. با توجه به این که این حلقه از هر چهار فاز موجود استفاده می‌کند داده‌ی موردنظر تا زمانی که خط نوشتن فعال نباشد و ورودی جدیدی به سلول حافظه اعمال نشود از بین نمی‌رود. تصویر یک طراحی پیاده‌سازی شده از حافظه‌ی QCA در شکل ۲-۲۰ نشان داده شده است [۳۵].



شکل ۲-۲۰: جانمایی یک نمونه سلول حافظه‌ی QCA [۳۵]

## ۲-۶-۱۴ سلول مکعبی QCA

یک ساختار سه بعدی برای سلول‌های QCA وجود دارد که از هشت نقطه‌ی کوانتومی و چهار الکترون تشکیل می‌شود. به این ساختار که در شکل ۲-۲۱ نشان داده شده است سلول QCA مکعبی<sup>۱</sup> می‌گویند [۳۶].



شکل ۲-۲۱: سلول QCA مکعبی

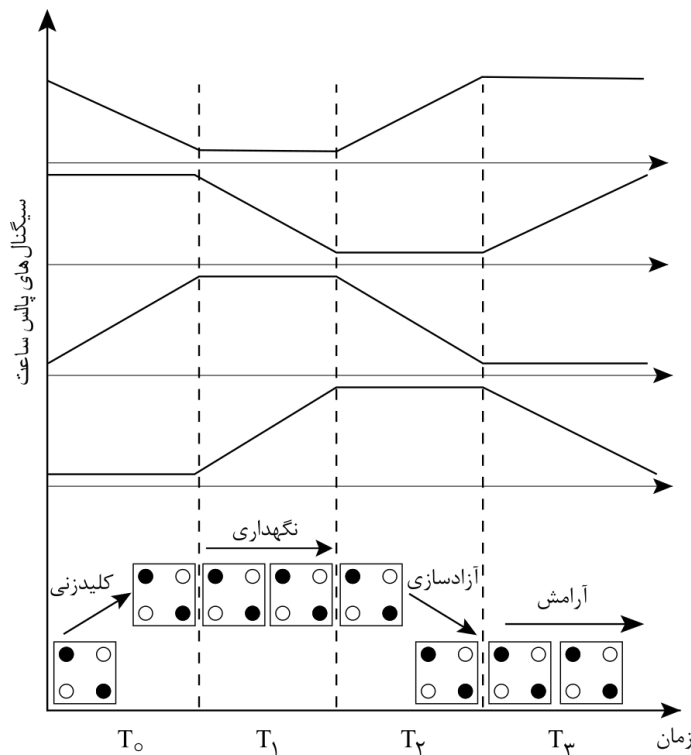
همانطور که می‌دانید به دلیل تمایل الکترون‌ها برای فاصله گرفتن حداکثری از یکدیگر دو حالت پایدار برای قرار گرفتن الکترون‌ها در این سلول وجود دارد که می‌توان آن را معادل صفر و یک منطقی در نظر گرفت. همچنین می‌توان دروازه‌های پایه QCA را با این سلول‌های مکعبی پیاده‌سازی کرد. مهم‌ترین مزیت استفاده از این ساختار جدید پیاده‌سازی بهینه مدارهای QCA است. به این نکته هم باید توجه کرد که طراحی مدارهای QCA با استفاده از این سلول‌های مکعبی مشکل‌تر از حالت طراحی با سلول‌های معمولی است همچنین به دلیل ساختار سه بعدی و مکان قرارگیری نقطه‌های کوانتومی، امکان ساخت آن در عمل بسیار سخت‌تر است.

## ۲-۷ پالس‌دهی در QCA

در VLSI زمان‌بندی از طریق یک سیگنال مرجع یا ساعت کنترل می‌شود و بیشتر برای مدارهای ترتیبی استفاده می‌شود. در QCA زمان‌بندی از طریق سیگنال ساعت یا کلاک صورت می‌گیرد و برای تمامی مدارهای ترکیبی و ترتیبی استفاده می‌شود [۳۷]. در فن‌آوری QCA سیگنال ساعت علاوه بر کنترل جریان اطاعات وظیفه‌ی مهم‌تر رساندن توان مورد نیاز به سلول‌ها را دارد. در حقیقت در QCA بر خلاف CMOS این دو از هم جدا نبوده و این نیز یکی دیگر از تفاوت‌های اساسی بین دو فن‌آوری است. سیگنال ساعت در فن‌آوری QCA توسط یک میدان الکتریکی تولید می‌شود.

وقتی سدها پایین هستند سلول QCA قطبیت مشخصی ندارد و الکترون‌های آزاد به راحتی از طریق اثر تونل‌زنی بین نقاط داخل سلول جابه‌جا می‌شوند. در ادامه وقتی سدها بالا هستند

<sup>1</sup>Cube QCA cell



شکل ۲-۲۲: کلاک در مدارهای QCA

سلول قادر به تغییر حالت خود نیست (الکترون‌های آزاد توان جابه‌جایی بین نقاط را ندارند) در این حالت سلول قطبیت مشخصی دارد.

در QCA هر سیگنال ساعت چهار مرحله دارد که عبارت‌اند از: کلیدزنی<sup>۱</sup>، نگهداری<sup>۲</sup>، آزادسازی<sup>۳</sup> و آرامش<sup>۴</sup> که در شکل ۲-۲۲ نشان داده شده است.

در مرحله‌ی کلیدزنی نیروهای مانع حرکت الکترون‌ها در داخل هر سلول شروع به افزایش می‌کند و حرکت الکترون‌ها به تدریج به‌سختی انجام می‌شود. در این حالت سلول به تدریج با توجه به پلاریزاسیون سلول‌های همسایه‌اش به مقدار نهایی پلاریزاسیون خود می‌رسد.

در مرحله‌ی نگهداری نیروهای مانع حرکت الکترون‌ها در داخل سلول به بیش‌ترین مقدار خود رسیده و مکان الکترون‌ها ثابت باقی می‌ماند. در این حالت سلول به مقدار نهایی پلاریزاسیون خود رسیده و به‌عنوان سلول ورودی می‌تواند روی پلاریزاسیون سلول‌های دیگر تأثیرگذار باشد.

در مرحله‌ی آزادسازی مقدار نیروی مانع شونده رو به کاهش می‌رود و به تدریج الکترون‌ها آزاد می‌شوند. در این حالت سلول پلاریزاسیون خود را به آرامی از دست می‌دهد. در مرحله‌ی آرامش سلول هیچ قطبیت یا پلاریزاسیونی ندارد و الکترون‌ها کاملاً آزادانه در

<sup>1</sup>Switch

<sup>2</sup>Hold

<sup>3</sup>Release

<sup>4</sup>Relax

داخل سلول حرکت می‌کنند.

## ۸-۲ انتقال اطلاعات

در روش‌های متداول انتقال اطلاعات دودویی از طریق جریان الکترون‌ها در کل مسیر، از یک نقطه به نقطه‌ی دیگر منتقل می‌شوند که این انتقال الکترون جریان الکتریکی را به وجود می‌آورد و در نتیجه باعث اتلاف انرژی می‌شود. اما در فن‌آوری QCA انتقال الکترون‌ها در کل مسیر اتفاق نمی‌افتد و الکترون‌ها همان‌گونه که گفته شد فقط در داخل سلول‌ها جابه‌جا می‌شوند و الکترون‌های هر سلول باعث تأثیر روی الکترون‌های سلول مجاور می‌شوند. در نتیجه در طول مسیر جریان الکتریکی ایجاد نخواهد شد و تنها انرژی مصرف شده انرژی مورد نیاز برای جابه‌جایی الکترون‌ها در داخل سلول‌ها است که در مقایسه با انتقال الکترون در کل مسیر بسیار ناچیز است [۳۸].

## ۹-۲ ابزارهای طراحی و شبیه‌سازی

در حال حاضر نرم‌افزار QCADesigner دارای دو موتور شبیه‌سازی مختلف است. هر کدام از این موتورهای شبیه‌سازی مزایا و معایب متفاوتی نسبت به هم دارند. علاوه بر این هر موتور شبیه‌ساز می‌تواند تأیید جامعی از سیستم یا هر مجموعه از بردارهای انتخابی کاربر باشد.

### ۱-۹-۲ موتور شبیه‌سازی بردار منسجم

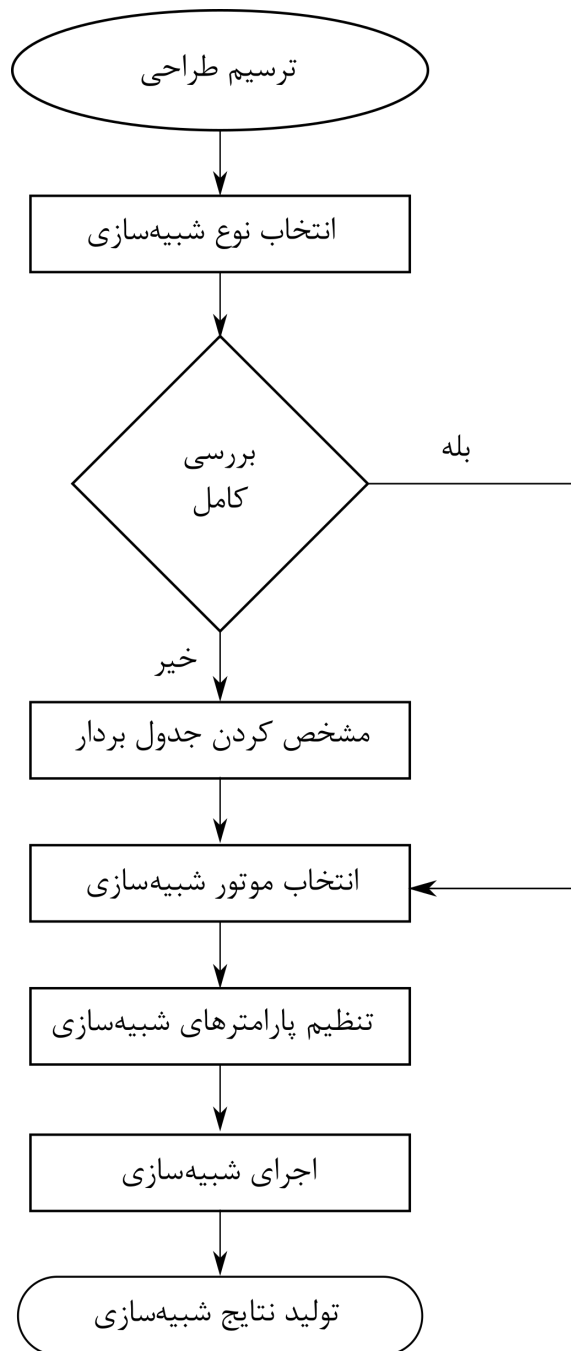
موتور شبیه‌سازی بردار منسجم، که دارای دقت بیشتری است و شبیه‌سازی پویا را فراهم می‌آورد. این موتور به روش ماتریس چگالی که در شبیه‌سازی مکانیک حرکتی QCA استفاده می‌شود عمل می‌کند. نحوه‌ی مدل‌سازی در این موتور شبیه‌ساز مشابه موتور دوپایا است. همچنین دارای اثرات اتلاف توان است و شبیه‌سازی را وابسته به زمان انجام می‌دهد. بردار انسجام  $\lambda$  در رویکرد ماتریس چگالی، در واقع بردار نمایش ماتریس چگالی برای یک سلول است. حرکت در بردار انسجام را می‌توان به صورت رابطه‌ی زیر توصیف کرد.

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = \vec{\Gamma} \times \vec{\lambda} - \frac{1}{\tau} (\vec{\lambda} - \vec{\lambda}_{ss}) \quad (14-2)$$

که در این رابطه  $\vec{\Gamma}$  بردار انرژی، نشان دهنده‌ی محیط انرژی سلول و از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است.

$$\vec{\Gamma} = \frac{1}{\hbar} [-2\gamma, 0, \sum_{j \in s} E_{i,j}^k P_j] \quad (15-2)$$





شکل ۲-۲۳: جریان طراحی در QCADesigner

همچنین برای محاسبه‌ی بردار انسجام حالت پایدار می‌توان از رابطه‌ی زیر استفاده کرد.

$$\vec{\lambda}_{ss} = \frac{\vec{\Gamma}}{|\vec{\Gamma}|} \tanh\left(\frac{h|\vec{\Gamma}|}{\sqrt{2}k_B T}\right) \quad (۱۶-۲)$$

که در آن  $h$  ثابت پلانک کاهش یافته،  $T$  دمای کلوین و  $K$  ثابت بولتزمن است.

$$P_i = \frac{(E_{i,j}^k / \sqrt{2} \gamma) \Sigma_j P_j}{\sqrt{1 + ((E_{i,j}^k / \sqrt{2} \gamma) \Sigma_j P_j)}} \quad (۱۷-۲)$$

بردار انسجام برای هر سلول با توجه به معادله‌ی و با استفاده از یک الگوریتم پیشروی گام به گام زمانی صریح محاسبه می‌شود. در هر گام زمانی و برای هر سلول بررسی می‌شود و سپس بردار انسجام برای هر سلول یک گام زمانی به جلو می‌رود. مشخص کردن ماتریس چگالی حالت به‌طور پیوسته از لحاظ محاسباتی نیاز به زمان بیشتری دارد. با این وجود، شبیه‌سازی با استفاده از موتورهای دوپایا و بردار منسجم در بیشتر موارد نتایج یکسانی را برای مدارهای نیمه‌هادی QCA فراهم می‌کند. بنابراین، معمولاً از موتور شبیه‌سازی دوپایا برای شبیه‌سازی مدارات QCA استفاده می‌شود [۳۵].

## ۲-۹-۲ موتور شبیه‌ساز دوپایا

برای رسیدن به نتایج مطلوب‌تر و دقت بالاتر نیاز به موتور شبیه‌ساز پیشرفته‌تری است. موتور شبیه‌ساز دوپایا<sup>۱</sup> سلول یک سیستم را دو حالتی ساده در نظر می‌گیرد. هامیلتونی آن با استفاده از رابطه‌ی ۱۸-۲ محاسبه می‌شود.

$$H_i = \sum_j \begin{bmatrix} -\frac{1}{4} P_j E_{i,j}^k & -\gamma_i \\ -\gamma_i & \frac{1}{4} P_j E_{i,j}^k \end{bmatrix} \quad (18-2)$$

که  $\gamma$  پتانسیل تونلزنی الکترون‌ها در داخل سلول و  $E(i, j)$  انرژی کینک بین دو سلول است. برای پیدا کردن بردارها و مقادیر ویژه‌ی هامیلتونی باید از الگوریتم ژاکوبی استفاده کنیم. این الگوریتم هر کدام از حالت‌ها را با توجه به انرژی به ترتیب صعودی مرتب می‌کند. حالتی که دارای کم‌ترین انرژی است اول لیست قرار می‌گیرد. بنابراین حالتی که دارای انرژی کمتری است انتخاب می‌شود و پلاریزاسیون سلول‌ها بر این اساس تنظیم می‌شود.

موتور شبیه‌ساز با توجه به تفرانس از پیش تعیین شده پلاریزاسیون هر سلول را تا زمانی که سیستم داخلی همگرا شود محاسبه می‌کند. زمانی که سیستم همگرا شد مقادیر خروجی به‌دست آمده ذخیره می‌شود و مقادیر جدید ورودی تنظیم می‌گردد و شبیه‌سازی مجدداً انجام می‌شود. این روش نسبت به روش تقریب غیرخطی دارای سرعت کمتری است در نتیجه زمان شبیه‌سازی طولانی‌تر می‌شود. مهم‌ترین مزیت این روش این است که نتیجه‌ی به‌دست آمده دارای دقت بالاتری است [۳۵].

<sup>1</sup>Bistable

## فصل ۳

# انواع خطا و روش‌های تحمل‌پذیری در فن‌آوری QCA

### ۱-۳ مقدمه

در کشورها و زبان‌های مختلف عموماً واژه‌های عیب، خرابی و خطا به‌جای هم به‌کار می‌روند، ولی در اینجا معانی مختلفی دارند که به تفکیک معرفی می‌کنیم. عیب (خرابی) یک اشتباه در نرم‌افزار است که باگ<sup>۱</sup> گفته می‌شود. این خطا ممکن است در سخت‌افزار هم وجود داشته باشد. در صورتی که این اشتباه یا نقص در عمل آشکار شود به آن خطا گفته می‌شود. به‌عنوان مثال، اگر در یک مدار جمع‌کننده، خروجی آن بدون توجه به ورودی‌ها و به دلیل نقص مدار مقدار یک داشته باشد این یک بودن خروجی عیب محسوب می‌شود و هنوز به خطا تبدیل نشده است. هنگامی این عیب به خطا تبدیل می‌شود که از این جمع‌کننده استفاده کنیم و خروجی بر حسب ورودی‌ها باید مقدار صفر را نمایش دهد ولی به دلیل خطا، مدار همچنان مقدار یک را نمایش می‌دهد. این تفاوت در بین اشتباه‌های برنامه‌نویسی و خطای زمان اجرای برنامه نیز وجود دارد. به‌عنوان مثال، اگر یک زیر برنامه داشته باشیم که باید مقدار تابع  $\sin(X)$  را حساب کند ولی به‌خاطر نقص در برنامه‌نویسی

---

<sup>۱</sup>bug

قدرمطلق  $\sin(X)$  را محاسبه می‌کند. این اشکال زمانی به خطای در حین اجرا تبدیل می‌شود که مقدار خروجی صحیح باید یک مقدار منفی باشد. خطا می‌تواند در یک سیستم انتشار یابد. به‌عنوان مثال، اگر تغذیه‌ی یک تراشه به زمین وصل شود این اتصال زمین ممکن است باعث بر هم زدن کار دیگر تراشه‌های سیستم شود. برای اینکه انتشار خطا را در یک سیستم محدود کنیم، طراحان از محدوده‌های جدا از هم برای قسمت‌های مختلف سیستم استفاده می‌کنند. که مانند موانعی انتشار عیوب یا خطاهای یک قسمت از سیستم را در کل سیستم کاهش می‌دهند. در مدارهای QCA هم خطاهای مختلفی باعث می‌شوند خروجی سیستم مقدار مطلوبی نداشته باشد. در این فصل به بررسی انواع خطاها که ممکن است در سلول‌های QCA رخ دهد می‌پردازیم و تمامی پژوهش‌های انجام شده بر روی خطای تک الکترون را بررسی می‌کنیم. در بخش آخر نگاهی به روش‌ها و مدارهای تحمل‌پذیر خطا می‌اندازیم.

## ۲-۳ انواع خطا در فن‌آوری QCA

به‌علت زیاد بودن احتمال نقص در فن‌آوری QCA، توجه بسیاری از پژوهشگران را به سمت خود جلب کرده است. این نقص‌ها ممکن است در مراحل مختلف تولید اتفاق بیفتد. مقدار تحمل‌پذیری خطا نشان دهنده‌ی درصد اطمینان از طراحی مدارهای QCA است. انواع مختلف نقص‌ها عبارت‌اند از: ناهماهنگی سلولی<sup>۱</sup>، جابه‌جایی سلولی<sup>۲</sup>، حذف و اضافه شدن سلول<sup>۳</sup>، سلول ثابت<sup>۴</sup>، چرخش سلولی<sup>۵</sup> و خطای تک الکترون است.

### ۱-۲-۳ جابه‌جایی و عدم تراز

از متداول‌ترین نقص‌هایی که در فن‌آوری QCA روی می‌دهد خطای ناشی از جابه‌جایی و عدم تراز سلول‌های QCA است. در نقصی که در اثر جابه‌جایی به وجود می‌آید، سلول معیوب از مکان اصلی خود جابه‌جا می‌شود. در این پژوهش ابعاد سلول  $20 \times 20 \text{ nm}^2$  انتخاب شده است. این جابه‌جایی در شکل ۱-۳ در یک دروازه‌ی اکثریت نشان داده شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده جابه‌جایی سلول A به اندازه‌ی ۱۵ نانومتر یا کمتر تأثیری بر روی عملکرد دروازه ندارد و جابه‌جایی بیشتر از ۲۰ نانومتر برای سلول A باعث می‌شود دروازه‌ی اکثریت رفتار متفاوتی از خود نشان دهد. همچنین برای سلول B با جابه‌جایی کمتر یا مساوی ۴۰ نانومتر تأثیری بر روی کارکرد دروازه ندارد و اگر این جابه‌جایی بیشتر از

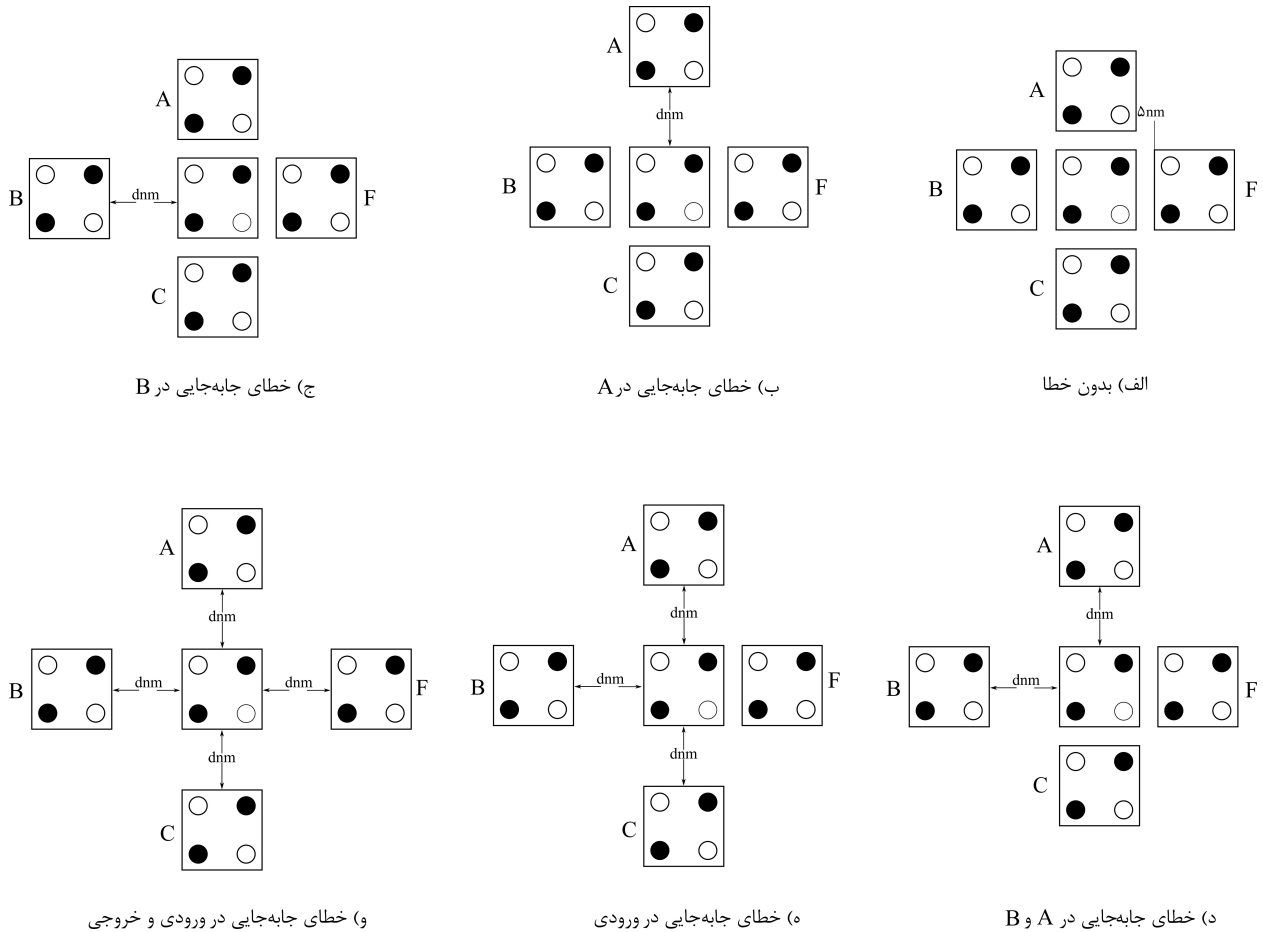
<sup>1</sup> cell misalignment

<sup>2</sup> cell displacement

<sup>3</sup> missing and extra cell

<sup>4</sup> Fixed Cell

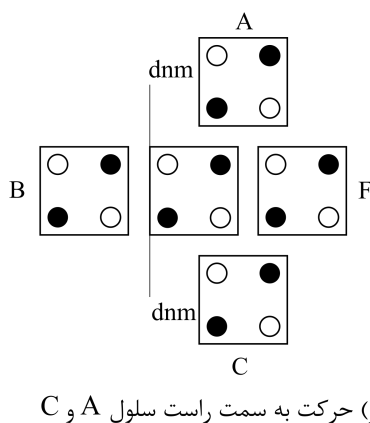
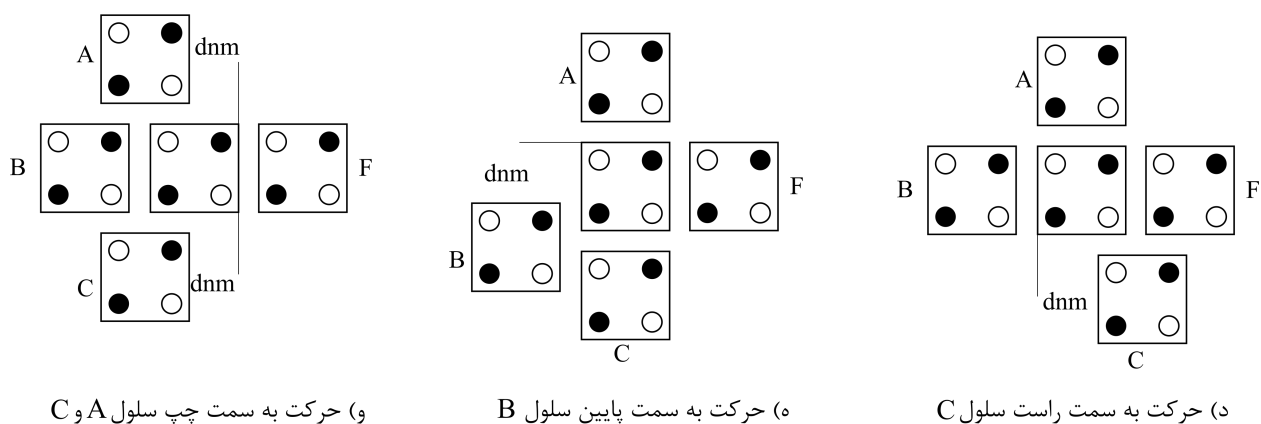
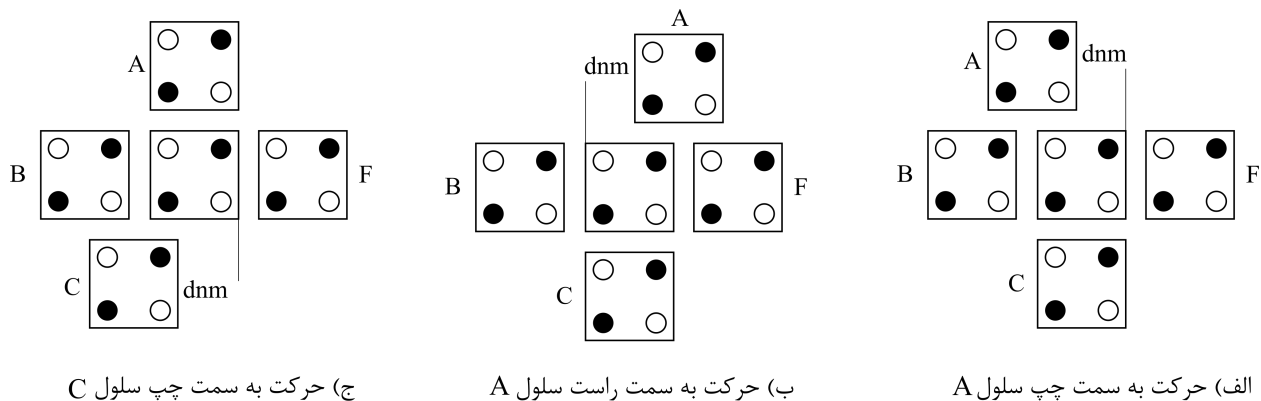
<sup>5</sup> rotated cell



شکل ۳-۱: نقص جابه‌جایی در دروازه‌ی اکثریت

۴۵ نانومتر باشد دروازه رفتار متفاوتی خواهد داشت. در بررسی بعدی اگر تمامی سلول‌های ورودی و خروجی دچار نقص جابه‌جایی کمتر از ۱۵ نانومتر یا بین ۳۰ تا ۴۰ نانومتر شوند دروازه عملکرد درستی خواهند داشت ولی در مورد جابه‌جایی بین ۱۵ تا ۲۵ نانومتر یا بیشتر از ۴۵ نانومتر دروازه رفتار متفاوتی را نشان خواهد داد. در ادامه با بررسی انجام شده بر روی نقص جابه‌جایی در سلول‌های ورودی دروازه‌ی اکثریت این نتایج حاصل شد که اگر تمامی سلول‌های ورودی به اندازه‌ی کمتر از ۱۵ نانومتر یا دقیقاً به اندازه‌ی ۴۰ نانومتر جابه‌جا شوند تأثیری در عملکرد دروازه‌ی اکثریت ندارد ولی در مورد جابه‌جایی بین ۲۰ تا ۲۵ نانومتر یا دقیقاً ۳۵ یا ۳۰ نانومتر یا بیشتر از ۴۵ نانومتر دروازه اکثریت رفتار متفاوتی دارد. در آخرین بررسی انجام شده بر روی دروازه‌ی اکثریت اگر سلول‌های A و B به اندازه‌ی کمتر از ۵ نانومتر نسبت به سلول مرکزی جابه‌جا شوند تأثیری در عملکرد دروازه ندارد ولی در مورد جابه‌جایی بیشتر از ۱۰ نانومتر رفتار متفاوتی را از خود نشان می‌دهد [۹].

در نقصی که در اثر عدم تراز سلول به وجود می‌آید سلول موردنظر نسبت به بقیه‌ی سلول‌ها تراز خود را از دست می‌دهد. این نقص در شکل ۳-۲ در یک دروازه‌ی اکثریت نشان داده شده است.



شکل ۳-۲: نقص عدم تراز در دروازه‌ی اکثریت

در بررسی‌های انجام شده بر روی نقص عدم تراز در دروازه‌ی اکثریت به این نتایج رسیدیم که اگر سلول A به سمت چپ به اندازه‌ی کمتر از ۵ نانومتر نسبت به سلول مرکزی جابه‌جا شود عملکرد دروازه تغییر نمی‌کند ولی در مورد جابه‌جایی بیشتر از ۱۰ نانومتر رفتار دروازه‌ی اکثریت تغییر می‌کند. همچنین اگر سلول A به سمت راست به اندازه‌ی ۵ تا ۱۵ نانومتر جابه‌جا شود بر روی کارکرد دروازه تأثیر ندارد ولی در مورد جابه‌جایی به اندازه‌ی ۲۰، ۲۵ یا ۳۰ نانومتر، دروازه‌ی اکثریت رفتار متفاوتی خواهد داشت. با جابه‌جایی سلول C به سمت چپ

به اندازه‌ی کمتر از ۵ نانومتر تأثیری در عملکرد دروازه ندارد ولی اگر این جابه‌جایی به بیشتر از ۱۰ نانومتر برسد دروازه‌ی اکثریت رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد. در ادامه اگر سلول C به سمت راست به اندازه‌ی ۵ تا ۱۵ نانومتر حرکت کند عملکرد دروازه تغییر نمی‌کند ولی اگر این جابه‌جایی به اندازه‌ی ۲۰ یا ۳۰ نانومتر باشد دروازه عملکرد درستی ندارد. با حرکت سلول‌های A و C به سمت چپ به اندازه‌ی بیشتر از ۵ نانومتر باعث اختلال در عملکرد دروازه می‌شود. همچنین با جابه‌جایی سلول‌های A و C به سمت راست به اندازه‌ی کمتر از ۲۵ نانومتر روی عملکرد دروازه تأثیری ندارد ولی درباره‌ی جابه‌جایی بین ۱۰ تا ۱۵ نانومتر یا بیشتر از ۳۰ نانومتر دروازه رفتار متفاوتی دارد. با حرکت سلول B به سمت بالا یا پایین به اندازه‌ی کمتر از ۲۰ نانومتر بر روی کارکرد دروازه تأثیر ندارد ولی اگر این حرکت به بیشتر از ۴۵ نانومتر برسد دیگر دروازه‌ی اکثریت عملکرد درستی ندارد [۹].

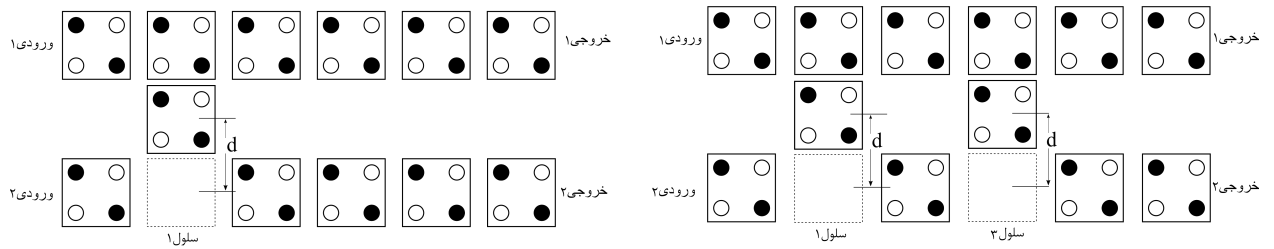
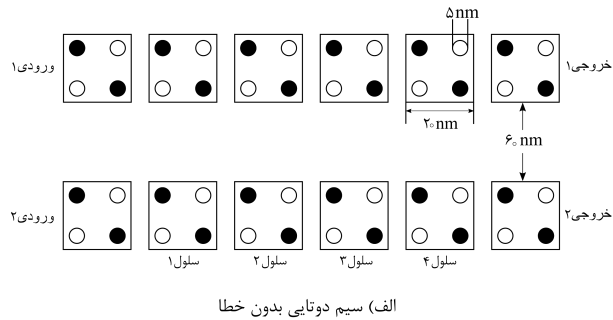
امکان جابه‌جایی و عدم تراز برای همه‌ی سلول‌ها وجود دارد. محاسبات نشان می‌دهد که سلول ورودی B تأثیر بیشتری بر روی سلول مرکزی نسبت به دو سلول ورودی دیگر دارد. بنابراین نقص در این سلول فاجعه‌آمیزتر است. اگر بخواهیم مقایسه‌ای بین نقص در اثر جابه‌جایی و نقص در اثر عدم تراز انجام دهیم نتایج داده‌ها نشان می‌دهد نقص در اثر عدم تراز اثرات مخرب‌تری در خروجی دروازه اکثریت ایجاد می‌کند [۹].

حال نقص در اثر جابه‌جایی سلول QCA را بر عملکرد دو سیم موازی معمولی مورد بررسی قرار می‌دهیم. این دو سیم که در شکل ۳-۳ نشان داده شده است هر سلول آن دارای ابعاد  $20 \times 20$  نانومتر، هر نقطه‌ی کوانتومی ۵ نانومتر، فاصله‌ی بین سلولی ۱۵ نانومتر و فاصله‌ی بین دو سیم ۶۰ نانومتر است. با جابه‌جایی مکان سلول‌ها در سیم پایینی به سمت سیم بالایی به اندازه‌ی  $d$  خطاهایی در عملکرد سیم به وجود می‌آید که به بررسی آن‌ها می‌پردازیم.

اگر سلول‌های اول یا دوم به اندازه‌ی کمتر از ۴۵ نانومتر به سمت بالا جابه‌جا شود عملکرد هر دو سیم درست خواهد بود ولی اگر بیشتر از ۴۵ نانومتر جابه‌جا شوند کارکرد سیم بالایی تغییری نمی‌کند ولی سیم پایینی عملکرد درستی نخواهد داشت. همچنین اگر سلول‌های سوم یا چهارم به اندازه‌ی کمتر از ۳۵ نانومتر به سمت بالا حرکت کنند تغییری در عملکرد سیم باینری ایجاد نمی‌کنند ولی اگر این تغییر بیشتر از ۳۵ نانومتر باشد عملکرد معمولی سیم دچار اختلال می‌شود. اگر سلول‌های اول و دوم با هم به سمت بالا به اندازه‌ی کمتر از ۳۵ نانومتر جابه‌جا شوند کارکرد سیم تغییری نمی‌کند اما اگر این جابه‌جایی به بالای ۳۵ نانومتر برسد عملکرد سیم تغییر می‌کند.

### ۳-۲-۲ حذف و اضافه شدن سلول

روش‌های مختلف لیتوگرافی برای ساخت مدارهای نانوالکترونیک پیشنهاد شده است، با این وجود نقص‌های مشابهی در همه‌ی آن‌ها وجود دارد. این نقص‌ها به دلیل استفاده زیاد و یا کم مواد مقاوم در فرآیند تولید ایجاد می‌شوند. نقص در فرآیند تولید برای یک سیستم QCA



شکل ۳-۳: نقص جابه‌جایی در سیم دوتایی

می‌تواند به دو شکل مدل‌سازی شود: نقص حذف سلول به دلیل استفاده‌ی کم از مواد مقاوم و نقص سلول اضافی به دلیل استفاده‌ی زیاد از مواد مقاوم. این دو نقص در مدارهای QCA به صورت اضافه و یا کم کردن سلول، مدل می‌شوند.

با این حال، در فرآیند تولید کنونی هم در مرحله‌ی سنتز<sup>۱</sup> و هم در مرحله‌ی نشست<sup>۲</sup> امکان به‌وجود آمدن این نقص‌ها وجود دارد. در مرحله‌ی سنتز، سلول‌های QCA تولید می‌شوند و در مرحله‌ی نشست، سلول‌های تولید شده QCA در محل‌های از پیش تعریف شده روی سطح قرار می‌گیرند. نقص در مرحله‌ی سنتز می‌تواند باعث زیاد و یا کم شدن کوانتومی شود. این نقص‌ها از عملکرد صحیح سلول‌های QCA جلوگیری می‌کند. احتمال وقوع خطا در مرحله‌ی نشست بیشتر است که باعث زیاد و یا کم شدن سلول QCA می‌شود. در شکل ۳-۴ نقص در اثر زیاد و یا کم شدن سلول QCA در دروازه‌ی اکثریت نشان داده شده است [۳۹].

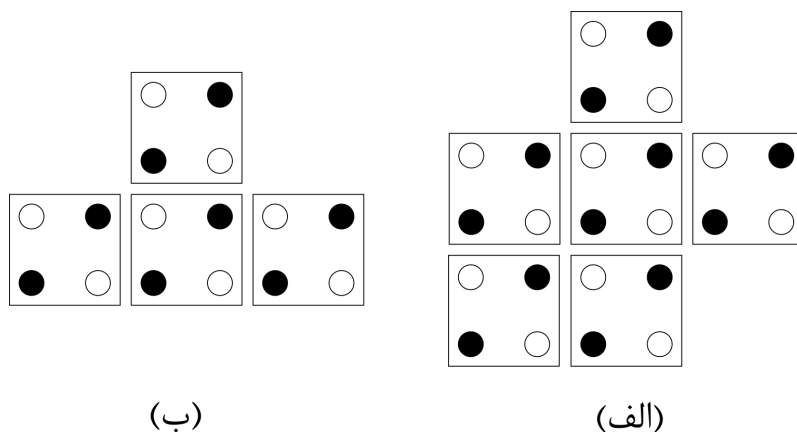
### ۳-۲-۳ سلول ثابت

به دلیل نقص‌هایی که در فرآیند ساخت اتفاق می‌افتد امکان دارد الکترون‌های داخل نقاط کوانتومی نتوانند جابه‌جا شوند. اگر الکترون‌ها جابه‌جا نشوند پلاریزاسیون سلول مربوطه تغییر نکرده و دروازه‌ی مورد نظر نمی‌تواند عملکرد درستی داشته باشد. این نقص را می‌توان با در نظر گرفتن یک سلول با قطبش ثابت مدل‌سازی کرد. راهکارهای

<sup>۱</sup>Synthesis

<sup>۲</sup>Deposition



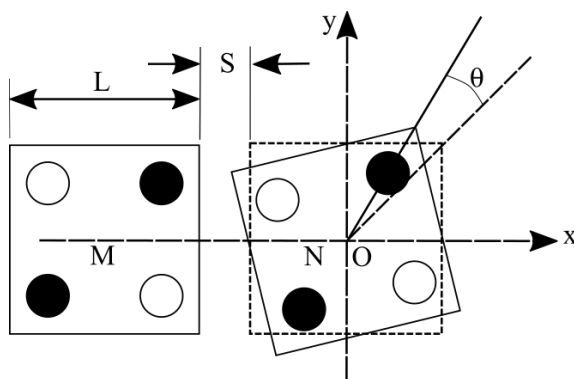


شکل ۳-۴: الف) نقص در اثر اضافه شدن سلول (ب) نقص در اثر حذف سلول

مختلفی جهت کم کردن و حتی از بین بردن این نقص‌ها بعد از فرآیند تولید وجود دارد که با طراحی‌های مناسب می‌توان به این مهم دست پیدا کرد.

### ۳-۲-۴ چرخش سلول

نقص دیگری که در فن آوری QCA امکان دارد اتفاق بیفتد نقص در اثر چرخش سلول‌های کوانتومی است [۱۱]. در شکل ۳-۵ که یکی از دو سلول، دچار خطای چرخش سلولی شده نشان داده شده است. در اینجا سلول M ثابت و سلول N دچار نقص است. L نشان دهنده‌ی

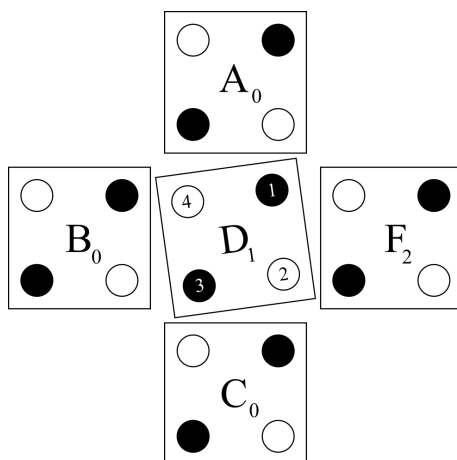


شکل ۳-۵: نقص در اثر چرخش سلول

اندازه‌ی سلول و S نشان دهنده‌ی فاصله‌ی بین دو سلول است. سلول N با توجه به مرکز آن که O نام‌گذاری شده نسبت به عقربه‌های ساعت با زاویه‌ی  $\theta$  چرخیده شده است. حال با فرض اینکه الکترون‌ها در گوشه‌های دو مربع قرار دارند می‌توان تعامل کولنی بین دو سلول که با استفاده از انرژی کینک توصیف می‌شود را بیان کرد. به تفاوت انرژی الکترواستاتیک این دو سلول با قطب‌های مخالف و قطبش مشابه انرژی کینک<sup>۱</sup> گفته می‌شود [۴۰].

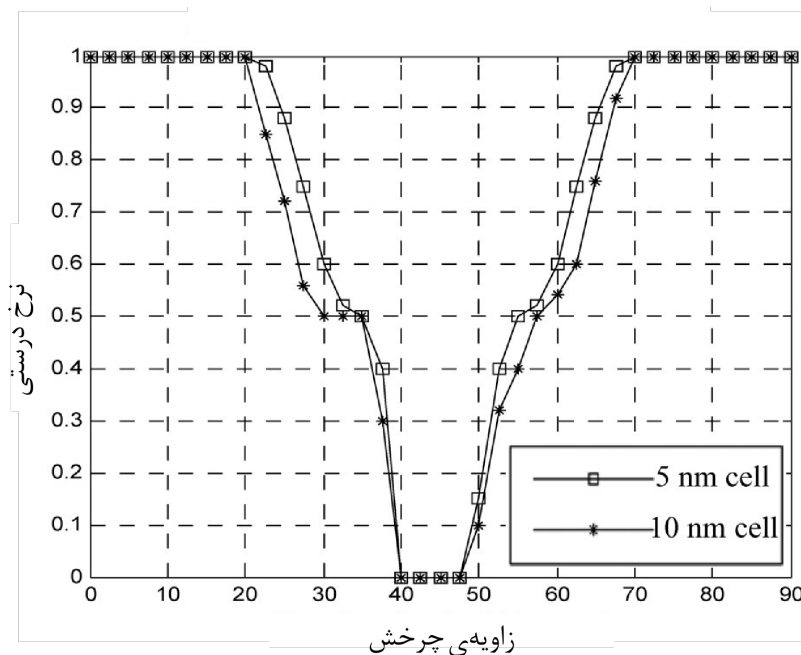
<sup>۱</sup>kink energy

همانطور که می‌دانید دروازه‌ی اکثریت که در شکل ۳-۶ نشان داده شده است یکی از اساسی‌ترین دروازه‌های منطقی فن‌آوری QCA است.



شکل ۳-۶: نقص در اثر چرخش سلول در دروازه‌ی اکثریت

حال اگر نقص در اثر چرخش سلولی در این دروازه و سلول D اتفاق بیفتد نرخ درستی مطابق نمودار ۳-۷ خواهد بود.

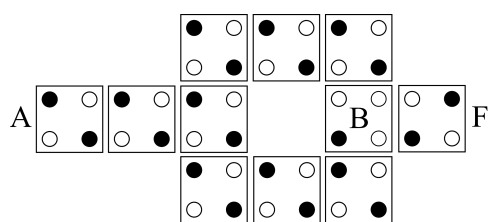


شکل ۳-۷: نتایج شبیه‌سازی نقص در اثر چرخش برای دروازه‌ی اکثریت

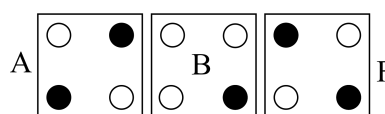
شبیه‌سازی برای اندازه‌ی سلولی ۵ نانومتر و ۱۰ نانومتر انجام شده است که برای اندازه‌ی سلولی کوچک‌تر نرخ درستی یک، زمانی حاصل می‌شود که زاویه‌ی چرخش سلول D از صفر تا ۲۱ درجه و بیش از ۶۹ درجه باشد. همچنین برای اندازه‌ی سلول بزرگ‌تر یعنی ۱۰ نانومتر این زاویه چرخش از صفر تا ۲۰ درجه و بیش از ۷۰ درجه است. با توجه به نتایج به‌دست آمده این برداشت را می‌توان داشت که اندازه‌ی سلول تأثیری کمی بر روی نتیجه‌ی خروجی دارد.

### ۳-۲-۵ خطای تک الکترون

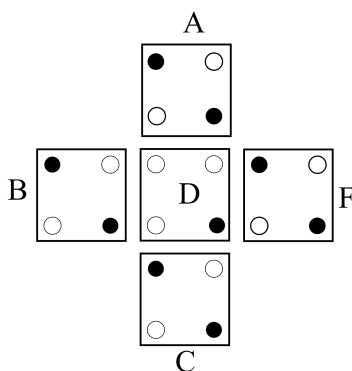
بیشتر پژوهش‌ها در زمینه‌ی خطا بر روی خطا در اثر حذف سلول و جابه‌جایی سلول کوانتومی متمرکز هستند. اما با توجه به اهمیت خطا در اثر حذف تک الکترون ما در این رساله به این موضوع پرداخته‌ایم. پژوهش‌های اندکی در این زمینه انجام شده است که به اختصار به مرور آن‌ها می‌پردازیم. در اثر پدیده‌ی تونل‌زنی امکان کم شدن الکترون‌ها وجود دارد که خطای تک الکترون نامیده می‌شود [۱۲]. در شکل ۳-۸ خطای تک الکترون در دروازه‌های اساسی فن‌آوری QCA نشان داده شده است.



ب) دروازه‌ی معکوس‌کننده با خطای تک الکترون



الف) سیم کوانتومی با خطای تک الکترون



ج) دروازه‌ی اکثریت با خطای تک الکترون

شکل ۳-۸: خطای تک الکترون در دروازه‌های اساسی QCA

در این شکل، خطا در سیم باینری و در سلول B رخ داده است که یکی از الکترون‌های این سلول حذف شده است. همچنین در دروازه‌ی معکوس‌کننده خطای تک الکترون در سلول B اتفاق افتاده است که باعث حذف یک الکترون شده است. در ادامه در دروازه‌ی اکثریت خطا در سلول D که سلول تصمیم‌گیر نامیده می‌شود رخ داده است.

### ۳-۳ خطای تک الکترون در دروازه‌های منطقی

اولین پژوهش در زمینه‌ی خطای تک الکترون بر روی سیم کوانتومی انجام شده است. ما می‌دانیم که یک سلول کوانتومی دارای دو الکترون است که در بیش‌ترین فاصله نسبت به هم قرار گرفته‌اند. حال با توجه به حذف یکی از این الکترون‌ها و موقعیت آن الکترون در داخل

سلول، خروجی سیم دچار نقص می‌شود. با انجام محاسبات مربوطه و شبیه‌سازی‌های انجام شده می‌توان خروجی سیم را تعیین کرد.

در پژوهش بعدی به بررسی دروازه‌ی منطقی معکوس‌کننده پرداخته شده است. در فرآیند ساخت و یا عوامل دیگر یکی از سلول‌های این دروازه دچار نقص تک‌الکترون می‌شود این نقص می‌تواند تا حدی تأثیرگذار باشد که خروجی دروازه با ورودی یکسان باشد و اگر در مدارهای پیچیده با چند معکوس‌کننده رخ دهد باعث نادرست بودن خروجی شده و خروجی مطلوب را ارائه نمی‌دهد. این نشان‌دهنده‌ی اهمیت این نوع خطا در فن‌آوری QCA است.

در انتها به پژوهشی درباره‌ی خطای تک‌الکترون در دروازه‌ی اکثریت نگاهی شده است. خروجی دروازه به ازای ورودی‌های مختلف و مکان تک‌الکترون که در کدام ضلع سلول است مورد محاسبه و شبیه‌سازی قرار گرفته است. نتایج متفاوتی با نرخ خطای مختلفی بیان شده است. دروازه اکثریت دروازه منطقی اساسی این فن‌آوری است.

### ۳-۳-۱ سیم‌باینری کوانتومی

با استفاده از فن‌آوری اتوماتای سلولی کوانتومی (QCA) برای پیاده‌سازی مدارهای منطقی یکی از رویکردهایی است که علاوه بر افزایش فرکانس ساعت مدارهای منطقی و کاهش اندازه‌ی این مدارها، مصرف انرژی را نیز کاهش می‌دهد. ماهیت نانومتری مدارهای QCA توانایی بسیار زیادی برای ایجاد خطاها را فراهم می‌کند. حتی خطاهای بسیار کوچک در فرآیند ساخت خطاهای عظیمی را در سیستم به وجود می‌آورد. سلول‌ها باید با دقت در جایگاه خود در مقیاس نانومتری قرار بگیرند تا به درستی کار کنند. خطای تک‌الکترون خطایی است که در اثر آن سلول‌های کوانتومی یکی از الکترون‌های خود را از دست می‌دهد. با توجه به اینکه هر سلول QCA باید دارای دو الکترون باشد این نوع خطا باعث نقص در سیستم QCA شده و خروجی نامطلوبی را حاصل می‌کند [۱۲].

ارتفاع سد یاد شده که مانع از ورود و خروج الکترون می‌شود دارای مقداری کمتر از ۱ الکترون‌ولت است. با توجه به ذرات یونیزه که ممکن است چند مگا الکترون‌ولت تا چند گیگا الکترون‌ولت انرژی داشته باشند، این انرژی می‌تواند حداقل ۱۰ میلیون الکترون را داخل یا خارج سلول QCA کند. با این حال، با توجه به اندازه‌ی سلول‌ها و محدوده‌ی مؤثر این ذرات الکترون‌ها انگیزه‌ی کمتری برای تونل‌زنی دارند. موقعیت الکترون‌ها و پلاریزاسیون سلول‌ها با توجه به کم‌ترین انرژی الکترواستاتیک به دست می‌آید. می‌توان انرژی الکترواستاتیک را از رابطه‌ی ۳-۱ محاسبه کرد.

$$E_{i,j} = \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r|r_i-r_j|} \quad (1-3)$$

انرژی هر حالت را می‌توان با محاسبه‌ی انرژی الکترواستاتیک بین هر سلول و سلول همسایه‌ی آن محاسبه کرد. معادله ۳-۱ محاسبه‌ی انرژی بین الکترون‌ها در یک نقطه‌ی

کوانتومی در سلول  $i$  و نقطه‌ی دیگر در سلول  $z$  را نشان می‌دهد.  $\varepsilon_0$  نفوذپذیری مطلق و  $\varepsilon_r$  نفوذپذیری نسبی را بیان می‌کند.  $q_i$  و  $q_j$  بار نقاط  $i$  و  $j$  است و  $|r_i - r_j|$  فاصله‌ی بین این دو نقطه است.

انرژی سلول با جمع تمامی نقاط در هر سلول محاسبه می‌شود. انرژی کینک بین دو سلول مجاور به‌عنوان تفاوت در انرژی الکترواستاتیک بین دو حالت قطبیت تعریف می‌شود. انرژی کینک بین سلول  $i$  و  $j$ ،  $E_{i,j}^k$  است که سلول  $i$  حالت خودش را ثابت نگه دارد و انرژی بین سلول‌ها محاسبه می‌شود با توجه به اینکه سلول  $z$  دو حالت خودش را می‌گیرد. بنابراین انرژی کینک تفاوت بین این دو انرژی است. برای مدارهای دو حالتی مانند اینجا، همیلتونی نشان داده شده در معادله ۲-۳ توصیف‌کننده حالات سیستم است. که مقدار قطبیت سلول  $z$  و  $\gamma_i$  انرژی تونل‌زنی الکترون‌ها داخل سلول  $i$  است.

$$H_i = \sum_j \begin{bmatrix} -\frac{1}{4} P_j E_{i,j}^k & -\gamma_i \\ -\gamma_i & \frac{1}{4} P_j E_{i,j}^k \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

معادله‌ی مستقل از زمان شرودینگر ۳-۳ برای تعیین حالت‌های سلول‌هایی که به‌وسیله‌ی این همیلتونی توصیف شده‌اند می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. معادله شرودینگر را می‌توان به یک عبارت برای توصیف قطبش هر سلول کاهش داد که در معادله‌ی ۴-۳ نشان داده شده است.

$$H_i \Psi_i = E_i \Psi_i \quad (3-3)$$

$$P_i = \frac{(E_{i,j}^k / 4\gamma) \sum_j P_j}{\sqrt{1 + ((E_{i,j}^k / 4\gamma) \sum_j P_j)}} \quad (4-3)$$

در این پژوهش یک شبیه‌سازی دقیق سطوح منطقی خطای تک الکترونی در سیم باینری کوانتومی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که اگر خطای تک الکترون در یک سیم باینری رخ دهد مقادیر منطقی سیم معکوس می‌شوند [۱۲].

اما زمانی که این نقص رخ دهد تک الکترون کجا می‌رود؟ نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که اگر سلول قبلی آن دارای قطبیت صفر باشد تک الکترون به موقعیت ۱ می‌رود و اگر سلول قبلی دارای قطبیت یک باشد تک الکترون به موقعیت ۲ می‌رود. این نتایج در جدول ۱-۳ نشان داده شده است [۱۲].

اگر یک سلول معیوب باشد و الکترون آن در موقعیت‌های ۱، ۲، ۳ یا ۴ باشد، سلول بعدی قطبیتی با مقادیر یک، صفر، صفر و یک به ترتیب به‌دست می‌آورد. از جدول ۱-۳ می‌توان نتیجه گرفت که موقعیت‌های ۳ و ۴ نمی‌توانند توسط تک الکترون در یک سلول معیوب اشغال

جدول ۳-۱: انرژی الکترواستاتیک برای موقعیت الکترون‌ها در یک سلول معیوب مطابق با قطبیت سلول قبلی

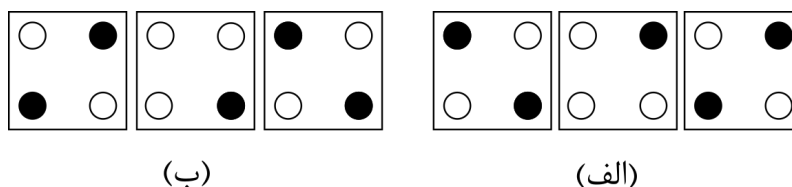
موقعیت ۴	موقعیت ۳	موقعیت ۲	موقعیت ۱	قطبیت سلول قبلی
۰/۰۱۳۴	۰/۰۱۵۲	۰/۰۰۹۲	۰/۰۰۸۹	صفر
۰/۰۱۵۲	۰/۰۱۳۴	۰/۰۰۸۹	۰/۰۰۹۲	یک

شوند. با این حال برای به‌دست آوردن نتیجه کامل شبیه‌سازی، آن‌ها به‌عنوان موقعیت‌های اشغال شده در جدول ۳-۲ در نظر گرفته می‌شوند.

جدول ۳-۲: انرژی الکترواستاتیک برای قطبیت سلول بعدی مطابق با موقعیت الکترون در سلول خطا

سلول بعدی با قطبیت یک	سلول بعدی با قطبیت صفر	موقعیت سلول خطا
۰/۰۱۳۴	۰/۰۱۵۲	موقعیت ۱
۰/۰۱۵۲	۰/۰۱۳۴	موقعیت ۲
۰/۰۰۹۲	۰/۰۰۸۹	موقعیت ۳
۰/۰۰۸۹	۰/۰۰۹۲	موقعیت ۴

شکل ۳-۹ سلول معیوب را در یک سیم باینری نشان می‌دهد.



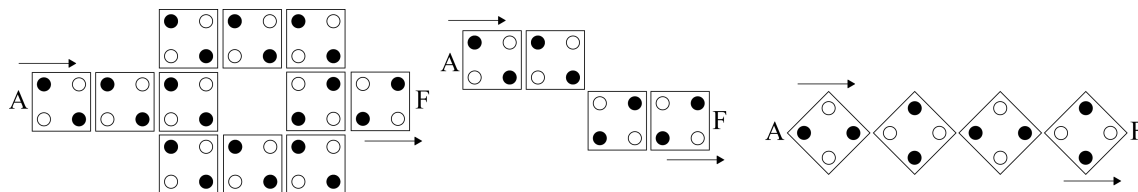
شکل ۳-۹: خطای تک الکترون در سیم باینری

همانطور که در شکل ۳-۹(الف) نشان داده شده است اگر سلول سمت چپ دارای مقدار منطقی صفر باشد، سلول معیوب الکترون خود را در موقعیت ۱ قرار می‌دهد و سلول سمت راست مقدار منطقی یک را به دست می‌آورد. و همانطور که در شکل ۳-۹(ب) نشان داده شده است اگر سلول سمت چپ دارای مقدار منطقی یک باشد، سلول معیوب الکترون خود را در موقعیت ۲ قرار می‌دهد و سلول سمت راست مقدار منطقی صفر را به دست می‌آورد. برطبق نتایج شبیه‌سازی، اگر خطای تک الکترون در یک سیم باینری رخ دهد، مقدار منطقی آن سیم معکوس می‌شود.

### ۳-۳-۲ دروازه‌ی معکوس‌کننده

دروازه‌های مختلفی ممکن است دچار خطای تک الکترون شوند و عملکرد آن‌ها دچار نقص شود. در این بخش دروازه‌ی معکوس‌کننده مورد بررسی قرار گرفته است [۲۵]. در شکل ۳-۱۰

انواع معکوس کننده QCA نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۰: انواع دروازه‌ی معکوس کننده QCA

پالس دهی QCA یک فرآیند برای همگام‌سازی جریان اطلاعات در مدار است. باید توجه داشت که همچنین پالس دهی، جهت جریان اطلاعات را در مدارهای QCA کنترل می‌کند. پالس دهی QCA همچنین توان مورد نیاز برای عملیات مدار را فراهم می‌کند. دقیق‌تر، پالس دهی QCA برای کنترل ارتفاع سد تونل در سلول‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

فرض بر این است که تمام سلول‌ها طول و عرض ۱۸ نانومتر دارند و نقاط کوانتومی دارای قطر ۵ نانومتری است. فاصله مرکز تا مرکز دو سلول همسایه ۲۰ نانومتر است. همچنین فرض شده است که هر سلول به یک منطقه‌ی زمانی خاص اختصاص داده شده و هیچ سلول همسایه با همان منطقه‌ی زمانی وجود ندارد. موقعیت الکترون‌ها و قطبش سلول‌ها با توجه به کم‌ترین انرژی الکترواستاتیک به دست می‌آید.

در اینجا ما بر روی دروازه‌ی معکوس کننده‌ی زنجیره‌ای و دروازه‌ی معکوس کننده صحبت خواهیم کرد. اما دو سوال اساسی وجود دارد:

۱- با توجه به سلول خطا، اگر سلول قبلی دارای قطبیت صفر یا یک باشد تک الکترون کجا قرار می‌گیرد؟

۲- با توجه به سلول خطا، کدام قطبش باید به سلول بعدی آن اعمال شود؟

محاسبات را با توجه به رابطه‌ی ۱-۳ برای معکوس کننده‌ی زنجیره‌ای انجام می‌دهیم، نتایج محاسبات نشان می‌دهد که اگر سلول دچار خطا شود و سلول قبلی آن دارای قطبیت صفر باشد تک الکترون در موقعیت دو می‌رود و اگر سلول قبلی قطبیت یک داشته باشد دوباره تک الکترون در موقعیت دو قرار می‌گیرد. در واقع کم‌ترین انرژی الکترواستاتیک موقعیت تک الکترون را نشان می‌دهد. انرژی هر موقعیت با توجه به سلول قبلی در جدول ۳-۳ نشان داده شده است.

جدول ۳-۳: انرژی الکترواستاتیک برای موقعیت تک الکترون در معکوس کننده‌ی زنجیره‌ای مطابق قطبیت سلول قبلی

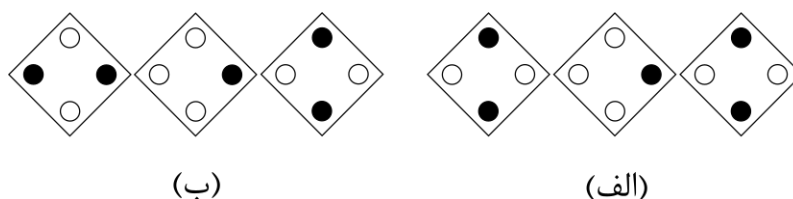
موقعیت ۴	موقعیت ۳	موقعیت ۲	موقعیت ۱	قطبیت سلول قبلی
۰/۰۱۱	۰/۰۰۸۰	۰/۰۰۶۶	۰/۰۰۸۰	صفر
۰/۰۰۹۷	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۷۵	یک

دیگر نتایج محاسبات برای سلول بعدی سلول نقص نشان می‌دهد که اگر تک الکترون در موقعیت‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ قرار بگیرد سلول بعدی مقدار یک را داشته و تغییر نمی‌کند. بنابراین، اگر خطای تک الکترون در یک معکوس‌کننده‌ی زنجیره‌ای رخ دهد مقدار منطقی آن در یک باقی می‌ماند. مقدار انرژی الکترواستاتیک با توجه به موقعیت تک الکترون در سلول خطا و سلول آخر یا به اصطلاح سلول بعدی در جدول ۳-۴ نشان داده شده است.

جدول ۳-۴: انرژی الکترواستاتیک برای قطبیت سلول بعدی در معکوس‌کننده‌ی زنجیره‌ای مطابق با موقعیت تک الکترون در سلول خطا

موقعیت سلول خطا	سلول بعدی با قطبیت صفر	سلول بعدی با قطبیت یک
موقعیت ۱	۰/۰۰۸۰	۰/۰۰۷۵
موقعیت ۲	۰/۰۱۱۱	۰/۰۰۹۷
موقعیت ۳	۰/۰۰۸۰	۰/۰۰۷۵
موقعیت ۴	۰/۰۰۶۶	۰/۰۰۶۳

در شکل ۳-۱۱ اثر خطای تک الکترون برای معکوس‌کننده‌ی زنجیره‌ای نشان داده شده است. با توجه به ۳-۱۱(الف) اگر سلول ورودی مقدار منطقی یک را داشته باشد تک الکترون



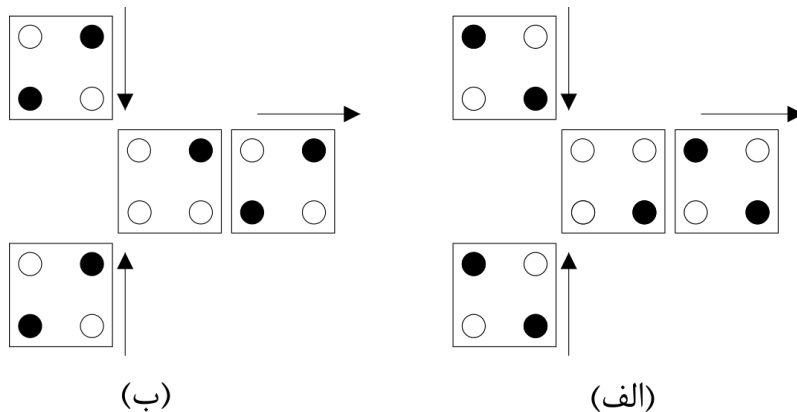
شکل ۳-۱۱: خطای تک الکترون در معکوس‌کننده‌ی زنجیره‌ای

در سلول خطا موقعیت ۲ را داشته و مقدار منطقی سلول خروجی یک می‌شود. در ادامه مطابق شکل ۳-۱۱(ب) اگر سلول ورودی دارای مقدار منطقی صفر باشد تک الکترون در سلول خطا در موقعیت ۲ قرار می‌گیرد و مقدار منطقی سلول خروجی یک می‌شود.

دروازه‌ی دیگری که به بررسی خطای تک الکترون در آن می‌پردازیم نوع بهبود یافته‌ی دروازه‌ی معکوس‌کننده است. در شکل ۳-۱۲ دروازه‌ی معکوس‌کننده‌ی بهبود یافته نشان داده شده است. همانطور که در ۳-۱۲(الف) نشان داده شده است اگر ورودی این دروازه مقدار منطقی صفر داشته باشد تک الکترون در سلول خطا در موقعیت ۲ قرار می‌گیرد. و همچنین مطابق ۳-۱۲(ب) اگر ورودی دارای مقدار منطقی یک باشد تک الکترون در سلول خطا در موقعیت ۱ قرار می‌گیرد. همانطور که قبلاً گفته شد این نتایج با توجه به کم‌ترین انرژی الکترواستاتیک محاسبه شده به دست آمده است. در جدول ۳-۵ مقدار انرژی الکترواستاتیک برای هر موقعیت با در نظر گرفتن قطبیت سلول قبلی گزارش شده است.

با توجه به نتایج به دست آمد این نتیجه را می‌توان گرفت که اگر خطای تک الکترون در سلول مورد بررسی اتفاق بیفتد خروجی این دروازه با مقدار ورودی برابر است و با توجه به





شکل ۳-۱۲: اثر خطای تک الکترون روی معکوس‌کننده‌ی بهبود یافته

جدول ۳-۵: انرژی الکترواستاتیک برای موقعیت تک الکترون در معکوس‌کننده بهبود یافته مطابق قطبیت سلول قبلی

موقعیت ۴	موقعیت ۳	موقعیت ۲	موقعیت ۱	قطبیت سلول قبلی
۰/۰۱۸۶	۰/۰۱۷۸	۰/۰۱۴۲	۰/۰۱۴۳	صفر
۰/۰۱۷۸	۰/۰۱۸۶	۰/۰۱۴۳	۰/۰۱۴۲	یک

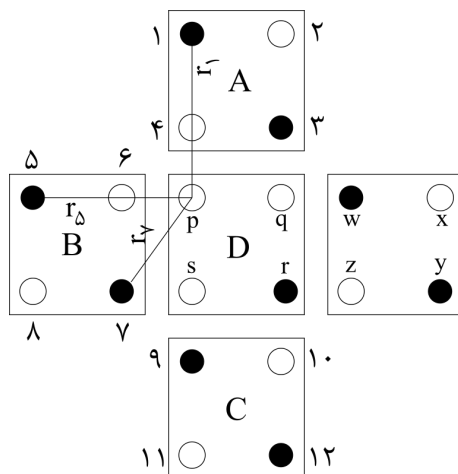
این که این دروازه وظیفه‌ی معکوس کردن ورودی را بر عهده دارد مقدار منطقی خروجی مقدار درستی نیست.

### ۳-۳-۳ دروازه‌ی اکثریت

اخیراً به دلیل توسعه فرآیند تولید مدارهای QCA افزایش انواع جدیدی از خطای پایدار را شاهد هستیم. یکی از انواع خطاهای پایدار، خطای تک الکترون است که در داخل سلول اتفاق می‌افتد. در اینجا به بررسی خطای تک الکترون در دروازه‌ی اکثریت که از اساسی‌ترین دروازه‌های فن‌آوری QCA است می‌پردازیم. نتایج نشان می‌دهد که دروازه‌ی اکثریت در حضور خطای تک الکترون خروجی کاملاً نامنظم را انتقال می‌دهند [۴۱].

خطای تک الکترون بر روی سیم دودویی QCA بررسی شد. در این بررسی موقعیت تک الکترون در سلولی که خطا در آن رخ داده است فقط یک سلول روی آن تأثیرگذار بوده است و با توجه به محاسبات انجام شده دریافتیم خروجی سیم دودویی معکوس شده است. خطای تک الکترون در دروازه‌ی معکوس‌کننده‌ی زنجیره‌ای مورد بررسی قرار گرفت، که در آن هم سلول معیوب تحت تأثیر فقط یک سلول قرار گرفته بود. در تمامی دروازه‌های قبلی، سلول معیوب تحت تأثیر تنها یک سلول به‌عنوان سلول ورودی قرار دارد. در دروازه‌ی اکثریت سلول معیوب تحت تأثیر چندین سلول ورودی قرار می‌گیرد. این واقعاً مسئله مهمی است زیرا سلول معیوب در بیشتر مدارهای QCA تحت تأثیر چندین سلول همسایه قرار می‌گیرد. از آنجایی که دروازه‌ی اکثریت منطق پایه و اولیه‌ی مدارهای QCA است، سلول‌های آن

باید دقیق تراز باشند همراه با محدود بودن الکترون‌های داخلش در مقیاس نانو تا عملکرد درستی را حاصل کند. علاوه بر این، سلول مرکزی سیستم دروازه‌ی اکثریت منطق را به سلول خروجی هدایت می‌کند. برای شناسایی خطای تک الکترون در سیستم معیوب، اولاً موقعیت تک الکترون را برای بردارهای ورودی مختلف تعیین می‌گردد. دوماً باید قطبش مربوط به سلول خروجی در پاسخ به بردار ورودی برای هر موقعیت تک الکترون بررسی شود. در ابتدا برای پیدا کردن موقعیت الکترون در سلول یک سیستم، ما باید انرژی الکترواستاتیک را در موقعیت‌های مختلف سلول تجزیه و تحلیل کنیم. برای هر یک از ترکیب‌های ورودی، موقعیت الکترون با داشتن حداقل انرژی به عنوان موقعیت موردنظر خود محسوب می‌شود. نقاط کوانتومی در سلول‌های ورودی از ۱ تا ۱۲ تعیین شده و نقاط کوانتومی سلول خروجی با  $w, x, y, z$  که در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۳: خطای تک الکترون در دروازه‌ی اکثریت

الکترون در سلولی که خطا در آن رخ داده است می‌تواند در ۴ نقطه‌ی  $p, q, r, s$  قرار بگیرد. برای محاسبه‌ی انرژی الکترواستاتیک در موقعیت  $P$  ناشی از الکترون در موقعیت ۱ در سلول  $A$  از رابطه  $\frac{K_{eq}}{r_1}$  استفاده می‌شود، که  $r_1$  فاصله‌ی بین ۱ و  $p$  است. به‌طور مشابه، انرژی الکترواستاتیک در موقعیت  $p$  ناشی از الکترون موقعیت ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۱ محاسبه می‌شود. محاسبه‌ی انرژی الکترواستاتیک کل در موقعیت  $p$  (نشان داده شده با  $U_p$ ) برای ورودی  $000$  به‌صورت زیر است:

$$U_p = \frac{K_{eq}}{r_1} + \frac{K_{eq}}{r_3} + \frac{K_{eq}}{r_5} + \frac{K_{eq}}{r_7} + \frac{K_{eq}}{r_9} + \frac{K_{eq}}{r_{11}}$$

$$U_p = \frac{K_{eq}}{20} + \frac{K_{eq}}{18/11} + \frac{K_{eq}}{20} + \frac{K_{eq}}{18/11} + \frac{K_{eq}}{20} + \frac{K_{eq}}{42/04}$$

با توجه به  $k_{eq} = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} = 23/04 \times 10^{-20}$  مقدار  $U_p = 6/54 \times 10^{-20} j$  است. به‌طور مشابه برای دیگر نقاط  $q, r, s$  و مقادیر مختلف ورودی مقدار انرژی الکترواستاتیک محاسبه

گردیده که در جدول ۳-۶ نشان داده شده است. با مقایسه مقادیر انرژی الکترواستاتیک به‌دست آمده برای نقاط  $r, q, s$  و کمترین مقدار انرژی و پایدارترین حالت برای این ترکیب ورودی  $r$  است.

جدول ۳-۶: موقعیت پایدار تک الکترون در دروازه‌ی اکثریت

ورودی	$U_p$	$U_q$	$U_r$	$U_s$	موقعیت پایدار
۰۰۰	۶/۵۴	۱۵/۲۹	۵/۸۳	۲۶/۲۶	r
۰۰۱	۶/۳۰	۱۵/۵۳	۱۵/۷۸	۱۶/۲۵	p
۰۱۰	۱۶/۴	۱۵/۵۳	۵/۵۸	۱۶/۲۵	r
۰۱۱	۱۶/۲۵	۱۵/۷۸	۱۵/۵۳	۷/۵۶	s
۱۰۰	۱۶/۵۰	۵/۳۳	۵/۵۸	۲۶/۴۵	q
۱۰۱	۱۶/۲۵	۵/۵۸	۱۵/۵۳	۱۶/۵	q
۱۱۰	۲۶/۴۵	۹/۷۴	۵/۳۴	۱۷/۲۵	r
۱۱۱	۲۶/۲	۵/۸۳	۱۵/۲۳	۴۶/۵۴	q

همچنین برای تعیین مقدار صفر یا یک بودن خروجی محاسباتی انجام گرفته است. اگر تک الکترون در موقعیت  $p$  قرار داشته باشد و خروجی دروازه مقدار منطقی صفر، که الکترون‌ها نقاط  $w$  و  $y$  را در سلول خروجی داشته باشند از این رو مقدار انرژی الکترواستاتیک مطابق زیر محاسبه می‌شود.

$$EE_0 = \frac{K_{eq}}{r_{pw}} + \frac{K_{eq}}{r_{py}} + \frac{K_{eq}}{r_{z0}} + \frac{K_{eq}}{r_{42/04}} = 1/7 \times 10^{-20}$$

که  $r_{pw}$  فاصله‌ی بین نقاط  $p$  و  $w$  است و  $r_{py}$  فاصله‌ی بین نقاط  $p$  و  $y$  است. به‌صورت مشابه برای خروجی منطقی یک، الکترون‌ها نقاط  $x$  و  $z$  را در سلول خروجی اشغال می‌کنند. مقدار این انرژی برای حالتی که تک الکترون در سلول خطا در موقعیت  $p$  قرار داشته باشد برابر است با  $1/46 \times 10^{-20}$  است. در جدول ۳-۷ برای موقعیت‌های دیگر تک الکترون در سلول خطا و با در نظر گرفتن قطبیت خروجی مقدار انرژی الکترواستاتیک محاسبه شده است. در جدول

جدول ۳-۷: انرژی الکترواستاتیک برای سلول خروجی در دروازه‌ی اکثریت

موقعیت الکترون در سلول خطا	قطبیت خروجی صفر	قطبیت خروجی یک	خروجی پایدار
p	۱/۷	۱/۴۶	۱
q	۱۲/۳۷	۲/۴۲	۱
r	۲/۴۲	۱۲/۳۷	۰
s	۱/۴۶	۱/۷	۰

۳-۸ خروجی دروازه‌ی اکثریت با وجود خطای تک الکترون برای ترکیب‌های مختلف ورودی گزارش شده است. با توجه به جدول مشخص است که نتایج درستی به ازای بعضی از ورودی‌ها

جدول ۳-۸: مقادیر منطقی دروازه‌ی اکثریت تحت خطای تک الکترون

ورودی	موقعیت پایدار	خروجی	نتیجه
۰۰۰	r	۰	درست
۰۰۱	p	۱	خطا
۰۱۰	r	۰	درست
۰۱۱	s	۰	خطا
۱۰۰	q	۱	خطا
۱۰۱	q	۱	درست
۱۱۰	r	۰	خطا
۱۱۱	q	۱	درست

با وجود خطای تک الکترون حاصل نمی‌شود. نرخ خطا در دروازه‌ی اکثریت برابر ۵۰٪ است. بنابراین، همانطور که قبلاً ذکر شد خطای تک الکترون باعث خرابی مدارهای QCA می‌شود.

### ۳-۴ تحمل‌پذیری خطا در فن‌آوری QCA

در مراحل مختلف ساخت و استفاده از مدارها و دروازه‌های فن‌آوری QCA امکان وقوع خطا وجود دارد. خطا در این فن‌آوری بسیار مرسوم بوده و به یک چالش جدی برای پژوهشگران تبدیل شده است. به همین خاطر روش‌هایی طراحی شده است که می‌تواند باعث تحمل‌پذیری بیشتر مدارها و دروازه‌های QCA در برابر خطا شود. همچنین پژوهشگران برای دروازه‌های اساسی ساختار جدیدی طراحی کرده‌اند که مقاومت بیشتری در برابر خطا از خود نشان می‌دهند. در ادامه به مرور این روش‌ها و طراحی‌های جدید انجام شده می‌پردازیم.

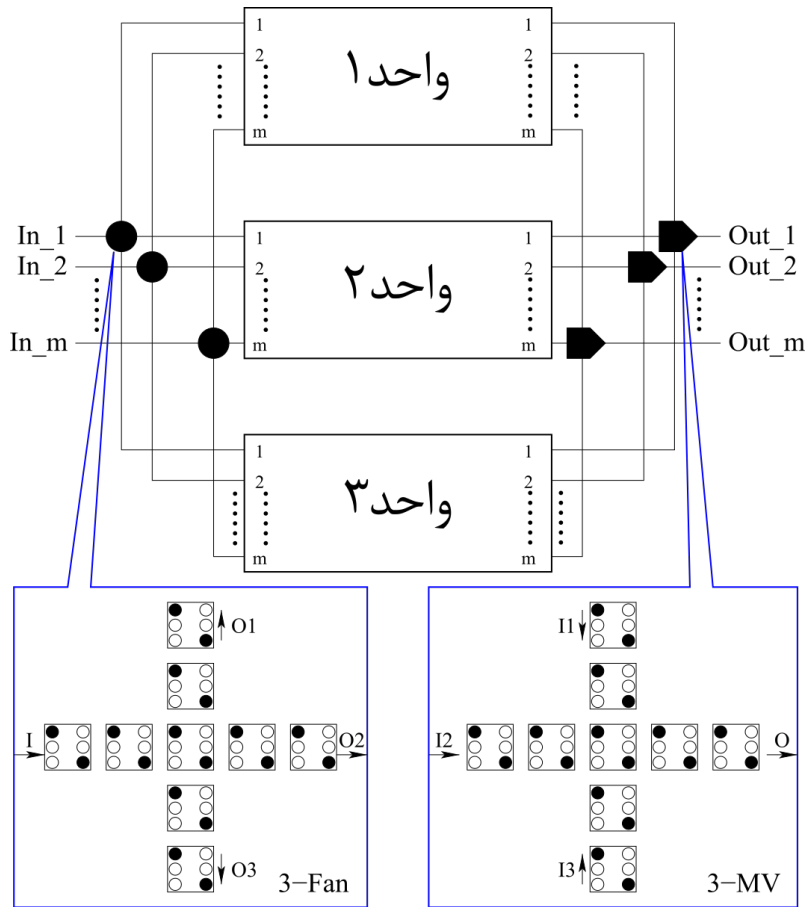
#### ۳-۴-۱ تحمل‌پذیری خطا به روش TMR

یکی از پرکاربردترین روش‌هایی که برای تحمل‌پذیری خطا در فن‌آوری QCA استفاده می‌شود مدارهای افزونه<sup>۱</sup> است که در مدارهای VLSI<sup>۲</sup> هم مورد استفاده قرار می‌گیرد. TMR (افزونه‌ی واحد سه‌گانه<sup>۳</sup>) یک فن‌آوری بسیار گسترده‌ای برای تحمل‌پذیری خطا است. شکل ۳-۱۴ یک مدار TMR را در فن‌آوری QCA نشان می‌دهد که با وجود اینکه بیشتر واحدها دچار خطا شده‌اند خروجی صحیحی را نشان می‌دهد. افزونه‌های واحد سه‌گانه

<sup>۱</sup>redundant

<sup>۲</sup>Very Large Scale Integration

<sup>۳</sup>Triple Module Redundant



شکل ۳-۱۴: یک مدار TMR در فن‌آوری QCA [۴۲]

می‌توانند به منظور افزایش قابلیت اطمینان سیستم، به کار گرفته شوند. قابلیت اطمینان سیگنال به عنوان احتمال اینکه سیگنال به صورت بدون خطا و یا صحیح باشد تعریف می‌شود. اگر دروازه‌ی اکثریت بدون خطا فرض شود، سپس هر مرحله از فن‌آوری TMR می‌تواند باعث بهبود قابلیت اطمینان سیگنال شود چون:

$$R_{out} = (R_{in})^3 + 3(R_{in})^2(1 - R_{in}) \quad (۵-۳)$$

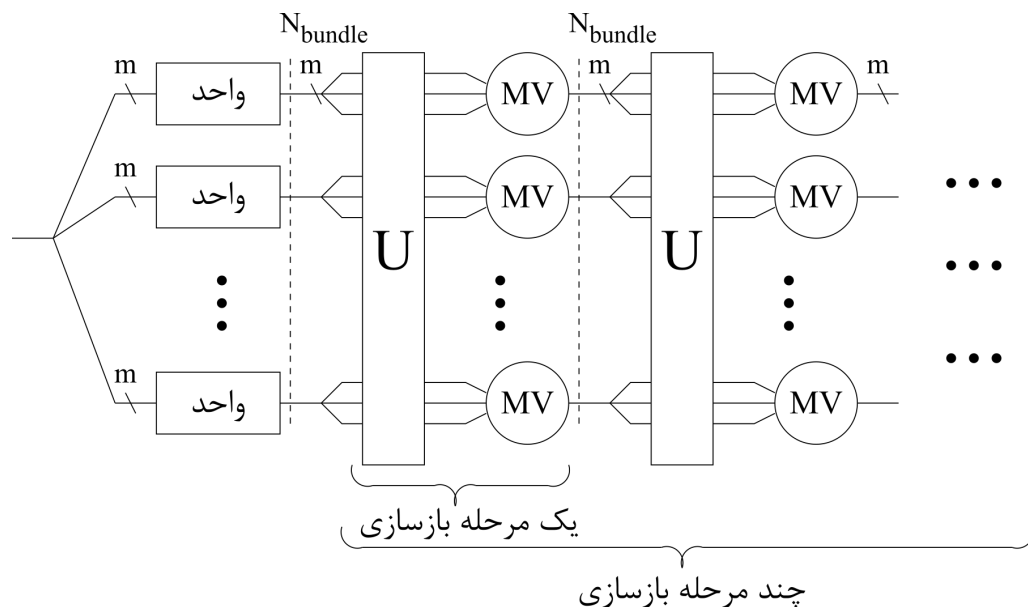
که  $R_{in}$  قابلیت اطمینان سیگنال ورودی است. قابلیت اطمینان خروجی مدار TMR ( $R_{out}$ ) بالاتر از قابلیت اطمینان ورودی ( $R_{in}$ ) است وقتی که  $(R_{in}) > 50\%$  باشد. اگر این را به مدار NMT توسعه دهیم، سپس قابلیت اطمینان افزایش پیدا می‌کند چون:

$$R_{out} = \sum_{i=0}^{(N-1)/2} \binom{N}{i} (R_{in})^{N-i} (1 - R_{in})^i \quad (۶-۳)$$

وقتی که  $(R_{in}) > 50\%$  است مدارهای TMR برای فن‌آوری QCA بسیار مفید هستند زیرا باعث افزایش تحمل‌پذیری دروازه‌ی اکثریت شده که از مدارهای پایه برای فن‌آوری QCA به حساب می‌آید.

برای یک مدار QCA با نرخ خطای بالا، باید یک فن‌آوری مناسب و کارآمد را انتخاب کنیم که قابلیت تحمل‌پذیری هر دو خطای ناشی از ساخت (دائمی) و عملکردی (گذرا) را در نظر بگیرد. با توجه به محدودیت‌های فن‌آوری‌های ساخت موجود، مدارهای QCA در زمان تولید غیرقابل اعتماد هستند. خطاهایی که اینجا به آن می‌پردازیم خطاهای ناشی از ساخت است [۴۲].

هیچکدام از فن‌آوری‌های سنتی به‌تنهایی نمی‌توانند راه‌حل مناسبی برای تحمل‌پذیری خطا در فن‌آوری QCA باشند. آن‌ها یا قادر به مقابله با میزان خطای بالای مدارهای QCA نیستند یا سطوح افزونگی قابل قبولی ندارند. برای فن‌آوری QCA، به دلیل اجزای مترکم دروازه‌ی اکثریت یک طرح TMR می‌تواند راه‌حل خوبی برای تحمل‌پذیری خطا در این دروازه باشد. این طرح در شکل ۱۵-۳ نشان داده شده است که توانایی خوبی برای بازسازی سیگنال را دارد. این مدار پیشنهاد شده اکثریت چندگانه<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. در ادامه قابلیت تحمل‌پذیری



شکل ۱۵-۳: یک مدار اکثریت چندگانه [۴۲]

خطا و همچنین سرعت بازسازی سیگنال بررسی می‌شود. در معادله‌ی ۷-۳  $x_1$  احتمال خطا در خروجی دروازه‌ی اکثریت است که در آن  $x$  معادل احتمال خطا در ورودی دروازه‌ی اکثریت و  $\epsilon$  بیان‌کننده‌ی نرخ خطا است.

$$x_1 = 1 - (1 - \epsilon)[(1 - x)^3 + 3x(1 - x)^2] \quad (7-3)$$

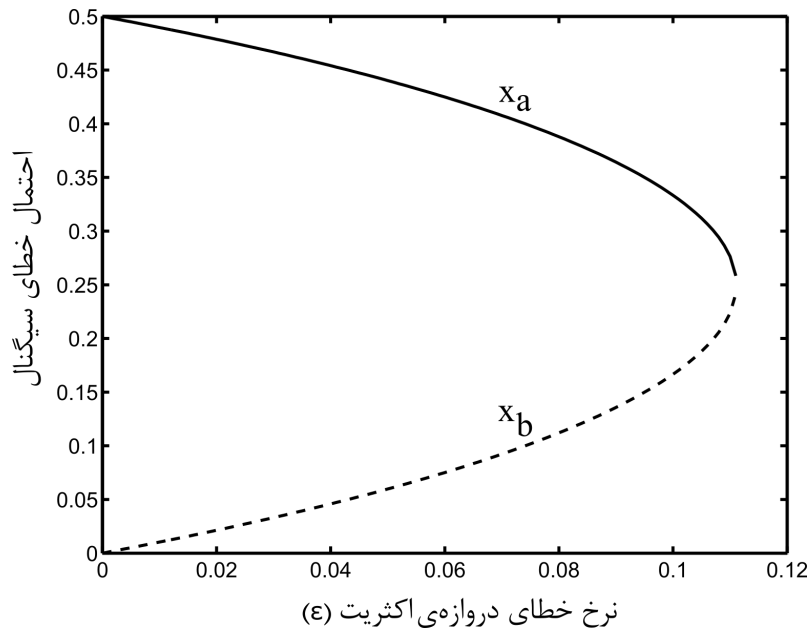
قابلیت اطمینان زمانی بهبود پیدا می‌کند که  $x_1 < x$  باشد. با توجه به نامعادله‌ی زیر

$$x_b < x < x_a \quad (8-3)$$

<sup>1</sup>majority multiplexing

$$x_a = \frac{(1 - \epsilon) + \sqrt{(9\epsilon - 1)(\epsilon - 1)}}{4(1 - \epsilon)}; x_b = \frac{(1 - \epsilon) - \sqrt{(9\epsilon - 1)(\epsilon - 1)}}{4(1 - \epsilon)}$$

اگر  $\frac{1}{9} < \epsilon < 1$  باشد نتیجه‌ی به‌دست آمده نمی‌تواند رضایت‌بخش باشد. تنها وقتی که  $\epsilon \in [0, \frac{1}{9}]$ ، سیگنال‌های  $x \in [x_b, x_a]$  می‌توانند به یک احتمال خطا برابر با  $x_b$  بازگردانده شوند. شکل ۳-۱۶، احتمال خطای سیگنال را در مقایسه با میزان خطای دروازه‌ی اکثریت نشان می‌دهد. سرعت ترمیم در اینجا به‌عنوان بهبود احتمال خطا تعریف می‌شود که می‌تواند

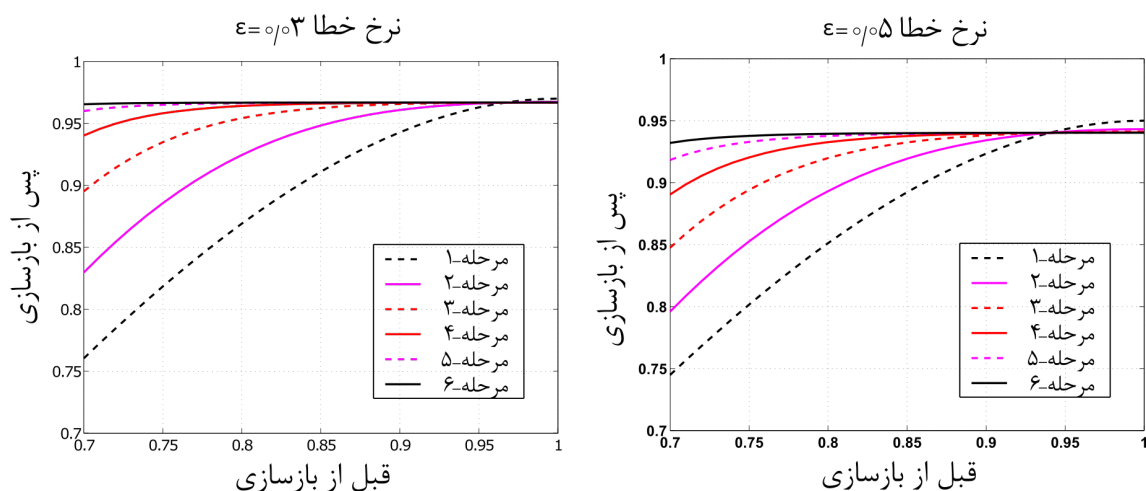


شکل ۳-۱۶: محدوده‌ی بهبود احتمال خطا در مدار اکثریت چندگانه [۴۲]

با یک مرحله بازسازی به‌دست آید. معمولاً به‌عنوان یک معیار شایستگی برای تعیین تعداد مراحل بازسازی که برای ساخت یک مدار قابل اطمینان لازم است استفاده می‌شود [۴۲]. برای یک مدار اکثریت چندگانه، احتمال خطا پس از یک مرحله بازسازی توسط رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$P[FF\ after\ stage] = (1 - \epsilon)[(1 - x)^3 + 3x(1 - x)^2] \quad (9-3)$$

شکل ۳-۱۷، نشانگر قابلیت اطمینان سیگنال پس از تعداد مختلف مراحل بازسازی است. به‌عنوان مثال، با نرخ خطای برابر با ۰/۳ و قابلیت اطمینان سیگنال قبل از بازسازی برابر ۰/۸ مدار اکثریت چندگانه به چهار مرحله بازسازی نیاز دارد تا به تحمل‌پذیری کامل خطا دست یابد. با توجه به بالا بودن نرخ خطا در فن‌آوری QCA طرح پیشنهادی برای دروازه‌ی اکثریت می‌تواند بسیار امیدوار کننده باشد.



شکل ۳-۱۷: قابلیت اطمینان مدار اکثریت چندگانه قبل و پس از بازسازی [۴۲]

### ۳-۴-۲ دروازه‌ی اکثریت بهبود یافته

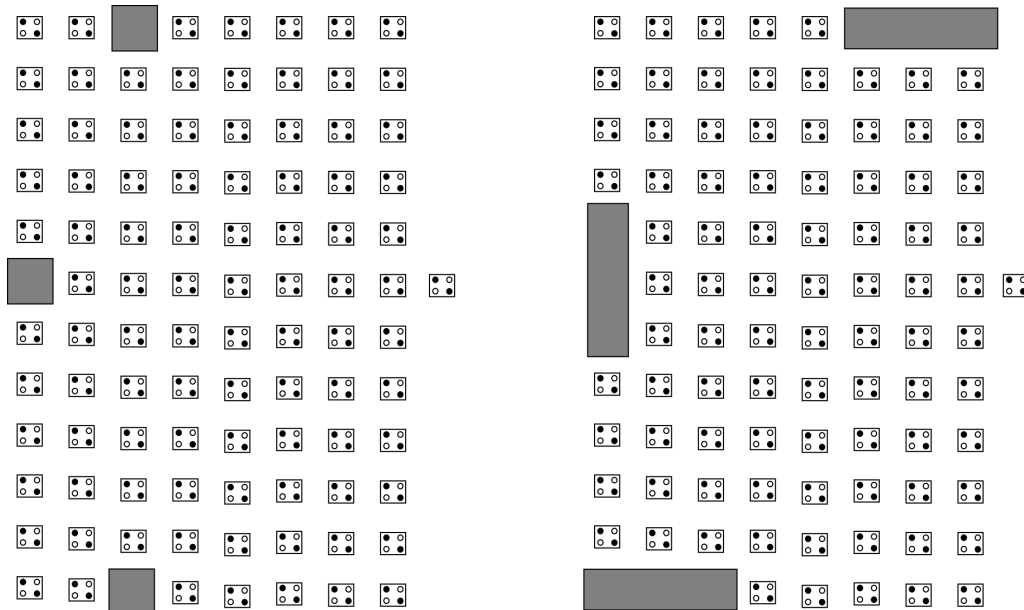
همانطور که می‌دانید دروازه‌ی اکثریت، دروازه‌ی اصلی در فن‌آوری QCA است و با توجه به نتایج مطالعاتی که در مورد تحمل‌پذیری در برابر خطا انجام شده می‌توان دید که این دروازه مقاومت زیادی در برابر خطاهای ساخت ندارد. مشکل دیگر برای ساخت مدارها به صورت کاربردی، چگونگی چیدمان سایر سلول‌ها است. که این چیدمان به دقت بسیار بالایی برای صحیح کار کردن نیاز دارد، این دقت حدوداً برابر نصف طول سلول است. به عنوان مثال، در مورد همین دروازه‌ی اکثریت باید علاوه بر دقیق بودن چیدمان خود دروازه، چیدمان سلول‌های ورودی و خروجی هم باید با دقت انجام شده باشد که این مهم با توجه به فن‌آوری‌های موجود در حال حاضر بسیار سخت اتفاق می‌افتد.

این مشکل در روند ساخت سلول‌ها در تعداد زیاد و محل قرارگیری هر کدام از آن‌ها قابل بررسی است. با این وجود پیش‌بینی می‌شود که روند ساخت سلول‌ها در نهایت به صورت خود سازمانی<sup>۱</sup> انجام شود. اما در حال حاضر هیچ‌گونه نمونه‌ی مناسبی برای این روش وجود ندارد و سوال‌های متعددی درباره‌ی اینکه آیا این روش می‌تواند کنترل لازم را در روند ساخت داشته باشد یا نه مطرح است.

در نهایت قرار دادن تعداد زیادی از سلول‌های QCA در کنار هم برای ساخت یک مجموعه در محل دقیق خودش کار بسیار سختی است. به بیان دیگر پیاده‌سازی به صورت عملی آرایه‌های QCA دارای بی‌نظمی زیادی خواهد بود و این واقعیت ما را به سمت روشی کاملاً متمایز از روش‌های موجود در ساخت دروازه‌های منطقی QCA می‌برد. در واقع به جای تحلیل یک سلول مجزا به عنوان یک ابزار منطقی ما باید رفتار مجموعه‌ای از سلول‌ها که یک آرایه‌ی دو بعدی را تشکیل داده‌اند بررسی کنیم. در شکل ۳-۱۸ از آرایه‌ای از سلول‌ها استفاده شده که مانند یک دروازه‌ی اکثریت عمل می‌کنند.

<sup>۱</sup>self-assemble





شکل ۳-۱۸: دروازه‌ی اکثریت بلوکی مرتب

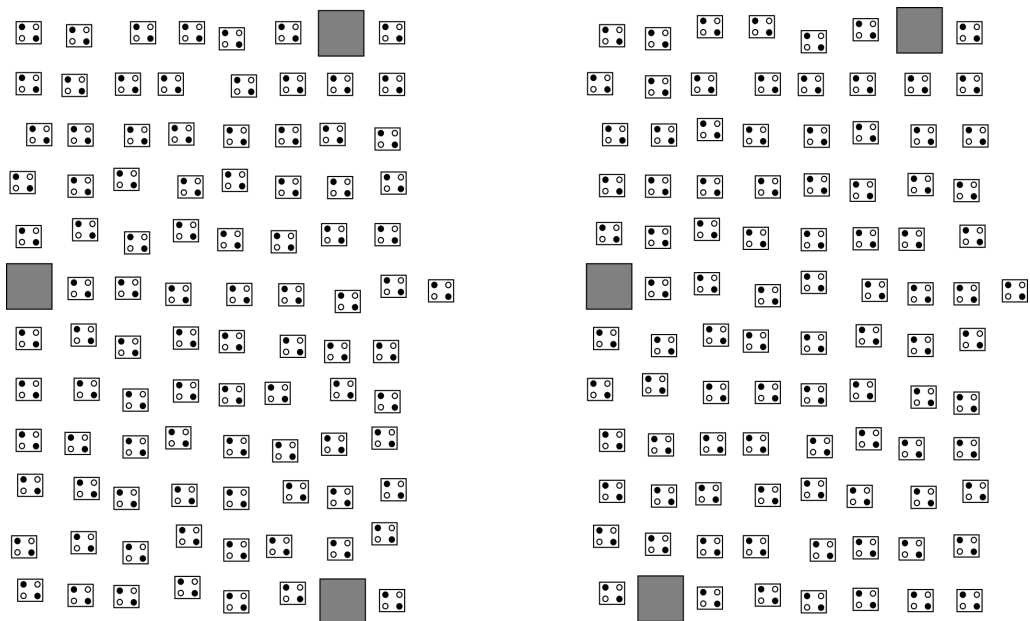
در این طراحی مانند دروازه‌ی اکثریت متداول ورودی‌ها در سه طرف مختلف ساختار و خروجی در طرف چهارم قرار گرفته است. ورودی‌های این ساختار بسیار انعطاف‌پذیر بوده به‌صورتی که می‌توان هر کدام از ۸ سلول افقی یا ۱۱ سلول عمودی را به‌عنوان ورودی مورد استفاده قرار داد.

همانطور که قبلاً گفته شد از مشکلات اصلی در ساخت مدارها بر پایه‌ی QCA این است که تعداد زیادی از سلول‌ها باید با دقت در کنار هم قرار بگیرند. اگر دروازه‌ها و به‌طور کلی طراحی‌ها حساسیت زیادی به محل قرار گرفتن سلول‌ها به‌طور دقیق نداشته باشند، مشکلاتی که در ساخت داریم به‌طور کلی حل می‌شود. به همین خاطر همانطور که در شکل ۳-۱۹ نشان داده شده است یک دروازه‌ی اکثریت جدید را از این دیدگاه مورد بررسی قرار دادیم به این صورت که تمامی سلول‌ها به‌طور تصادفی از محل اصلی خود جابه‌جا شده و تأثیر این حرکت سلول‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است و نتایج نشان می‌دهد این جابه‌جایی‌ها در کارکرد دروازه بی‌تأثیر است.

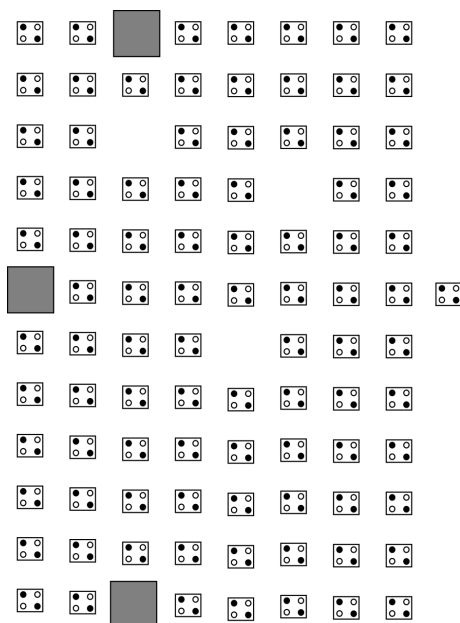
از دیگر دیدگاه‌هایی که وجود دارد، در مورد حذف یا عدم کارکرد درست سلول‌ها در دروازه‌ی اکثریت است که مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل ۳-۲۰ یک ساختار بلوکی منظم ارائه شده است که به‌صورت تصادفی تعدادی از سلول‌های آن حذف شده است.

بررسی‌ها در مورد این ساختار نشان می‌دهد که این دروازه در برابر این نقص از خود مقاومت نشان می‌دهد و عملکرد درستی دارد.

نوع دیگری از نقص‌های مورد مطالعه، در واقع ترکیبی از دو نقص قبلی است یعنی وجود آرایه‌های سلولی نامنظم همراه با حذف یا عدم کارکرد سلول‌ها که در شکل ۳-۲۱ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد این چیدمان هم از خود در برابر نقص‌ها مقاومت نشان می‌دهد.

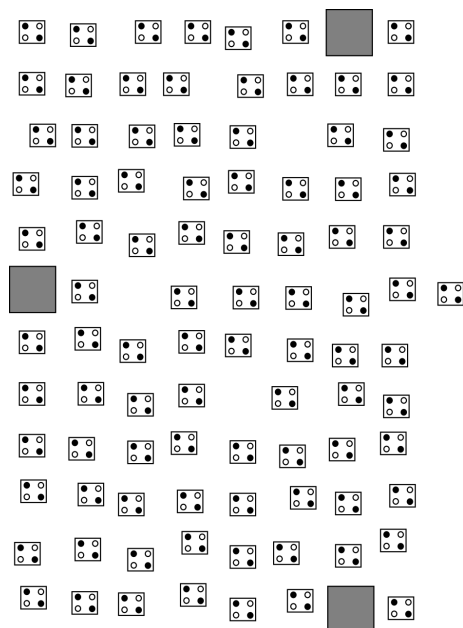


شکل ۳-۱۹: دروازه‌ی اکثریت بلوکی نامرتب



شکل ۳-۲۰: دروازه‌ی اکثریت بلوکی مرتب همراه با حذف سلول

به صورت کلی نتایج برای دروازه اکثریت به این صورت است که میزان بی‌نظمی و تعداد سلول‌های حذف شده در عملکرد درست این دروازه بسیار اهمیت دارد. ولی این مطالعه نشان داد ساختار بلوکی پیشنهاد شده نسبت به دروازه‌ی اکثریت متداول دارای مقاومت بالاتری در برابر نقص‌های ساخت است [۴۳].

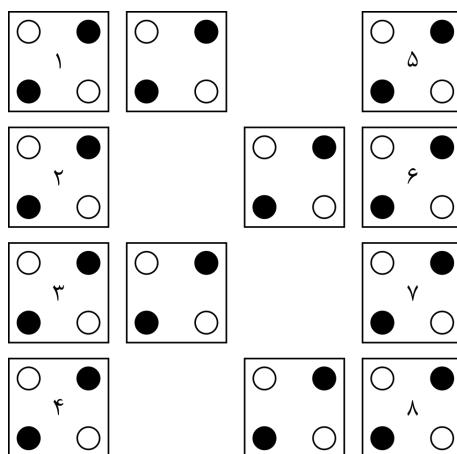


شکل ۳-۲۱: دروازه‌ی اکثریت بلوکی نامرتب همراه با حذف سلول

### ۳-۴-۳ دروازه‌ی معکوس‌کننده‌ی بهبود یافته

در فن‌آوری QCA دو دروازه‌ی اکثریت و معکوس‌کننده از اساسی‌ترین دروازه‌های منطقی هستند. در قسمت قبل به بررسی یک نمونه از دروازه‌ی اکثریت با خاصیت مقاوم در برابر خطا پرداختیم. حال در این قسمت به بررسی یک نمونه دروازه‌ی منطقی معکوس‌کننده با خاصیت مقاوم در برابر خطا می‌پردازیم. انتظار می‌رود دروازه‌ی معکوس‌کننده هم مانند دروازه‌ی اکثریت در برابر نقص‌های جابه‌جایی و حذف سلول از خود مقاومت نشان دهد و خروجی صحیحی داشته باشد. در این قسمت هم با افزایش تعداد سلول‌ها و تشکیل یک ساختار آرایه‌ای این کار انجام شده است. در اینجا به دلیل اینکه ورودی باید به قسمت‌های مختلفی تقسیم شده و در انتها با هم ترکیب شوند و به یک خروجی برسند به نظر کار سخت می‌آید ولی با توجه به خصوصیات ذاتی فن‌آوری QCA که در هنگام تقسیم کاهش توان نخواهیم داشت و همچنین عدم وجود مشکل برای ترکیب چندین سیگنال مختلف بنابراین ایجاد آرایه‌ای از سلول‌ها مشکلی را به وجود نمی‌آورد.

طراحی پیشنهاد شده برای دروازه‌ی معکوس‌کننده که در برابر خطا مقاوم دارد در شکل ۳-۲۲ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است در طراحی پیشنهادی بین ورودی و خروجی چندین مسیر مختلف وجود دارد. به دلیل مسیرهای مختلف بین ورودی و خروجی در هر مسیر محاسبات به صورت مستقل انجام می‌شود و خطا در هر مسیر به مسیرهای دیگر اثر نمی‌گذارد و در نهایت نتیجه این محاسبات با هم ترکیب شده و نتیجه‌ی نهایی مشخص می‌شود. نکته‌ای که در اینجا وجود دارد این است که اگر خطا در قسمت رأی‌گیری اتفاق بیفتد قابل تصحیح نیست.



شکل ۳-۲۲: دروازه‌ی معکوس کننده مقاوم در برابر خطا

در این دروازه‌ی جدید می‌توان از سلول‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به‌عنوان ورودی و از سلول‌های ۵، ۶، ۷ و ۸ به‌عنوان خروجی استفاده کرد. نتایج محاسبات انجام شده نشان می‌دهد مکان ورودی هیچ تأثیری در نتیجه خروجی ندارد ولی بین خروجی‌ها مقداری تفاوت وجود دارد و بهترین خروجی سلول شماره‌ی ۶ است. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده مشخص شد در این دروازه نسبت به دروازه‌ی معکوس‌کننده‌ی متداول در برابر خطاهای جابه‌جایی سلولی مقاومت بالاتری از خود نشان می‌دهد. اگر بخواهیم این دروازه در برابر خطاها از خود مقاومت بیشتری نشان دهد باید از آرایه‌های بیشتری استفاده کنیم [۴۴].

### ۳-۴-۴ تمام جمع‌کننده‌ی بهبود یافته

جمع‌کننده‌های دودویی از اهمیت زیادی در عملیات ریاضی برخوردار هستند. این نکته هم لازم به ذکر است که محاسبات ریاضی در رایانه‌ها، مانند تفریق و ضرب معمولاً توسط جمع‌کننده‌ها انجام می‌شود و این کاربرد زیاد باعث اهمیت این ساختار و مطرح شدن طرح‌های جایگزین برای جمع‌کننده شده است. توابع منطقی تمام جمع‌کننده به شرح زیر است:

$$Sum = A \oplus B \oplus C \quad (۱۰-۳)$$

$$C_{out} = AB + AC + BC$$

اولین مجموعه معادلات بر پایه‌ی دروازه‌ی اکثریت برای تمام جمع‌کننده در شکل ۳-۲۳ (الف) نشان داده شده است. همچنین در آن از معکوس‌کننده نیز استفاده شده است. معادلات مربوط به این تمام جمع‌کننده در ادامه آورده شده است [۲۶]:

$$Sum = M(M(\bar{A}, B, C), M(A, \bar{B}, C), M(A, B, \bar{C})) \quad (۱۱-۳)$$

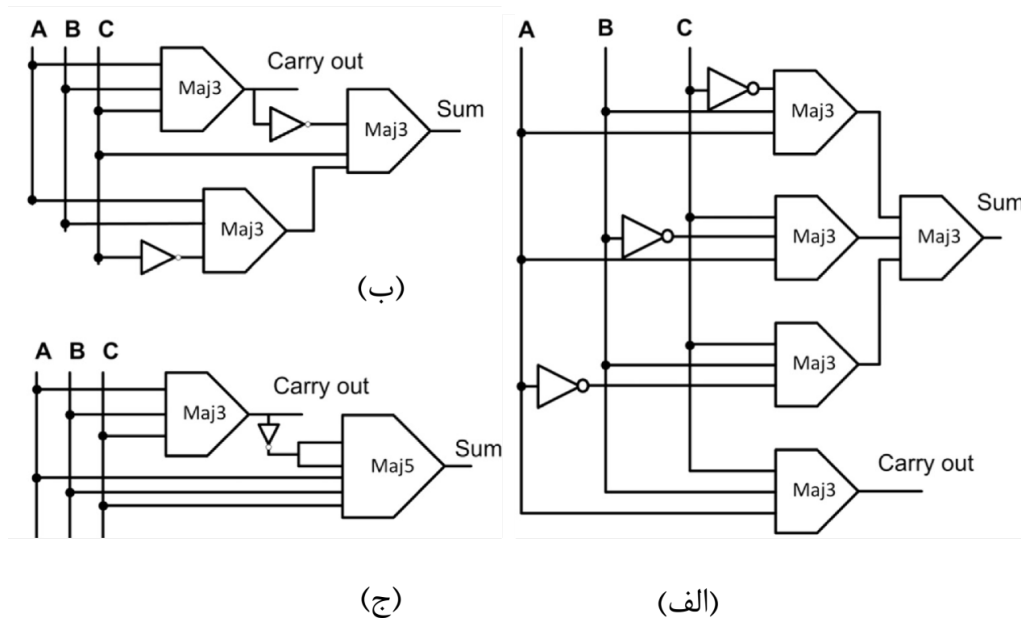
$$C_{out} = M(A, B, C)$$

در مرجع [۴۵] یک معادله جدید برای جمع‌کننده بیان شده است. با استفاده از این معادله‌ی مؤثر یک تمام جمع‌کننده مانند شکل ۳-۲۳ (ب) ارائه شده است. که از سه دروازه‌ی اکثریت و یک معکوس‌کننده برای محاسبه‌ی یک بیت جمع استفاده شده است. این معادله‌ی جدید در ادامه آورده شده است:

$$Sum = M(\bar{C}_{out}, C, M(A, B, \bar{C})) \quad (۱۲-۳)$$

پس از پیشنهاد دروازه‌ی اکثریت پنج ورودی پژوهش‌های زیادی بر روی تمام جمع‌کننده بر پایه‌ی دروازه‌ی اکثریت پنج ورودی ارائه شده یکی از آن‌ها در مرجع [۴۶] آورده شده است. در شکل ۳-۲۳ (ج) شماتیک این تمام جمع‌کننده آورده شده است که از دروازه‌ی اکثریت و دروازه‌ی معکوس‌کننده برای پیاده‌سازی آن استفاده شده است. معادله‌ی معرفی شده برای خروجی جمع‌کننده در ادامه آورده شده است:

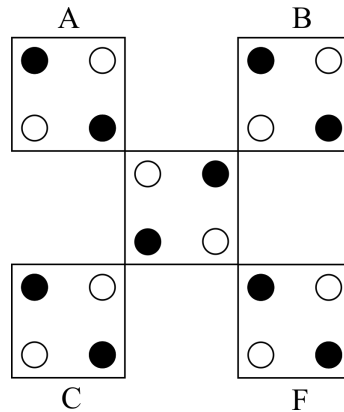
$$Sum = \Delta - M(A, B, C, \bar{C}_{out}, \bar{C}_{out}) \quad (۱۳-۳)$$



شکل ۳-۲۳: سه شماتیک برای یک تمام جمع‌کننده‌ی یک بیت (الف) پیشنهاد شده در [۲۶] (ب) پیشنهاد شده در [۴۵] (ج) پیشنهاد شده در [۴۶]

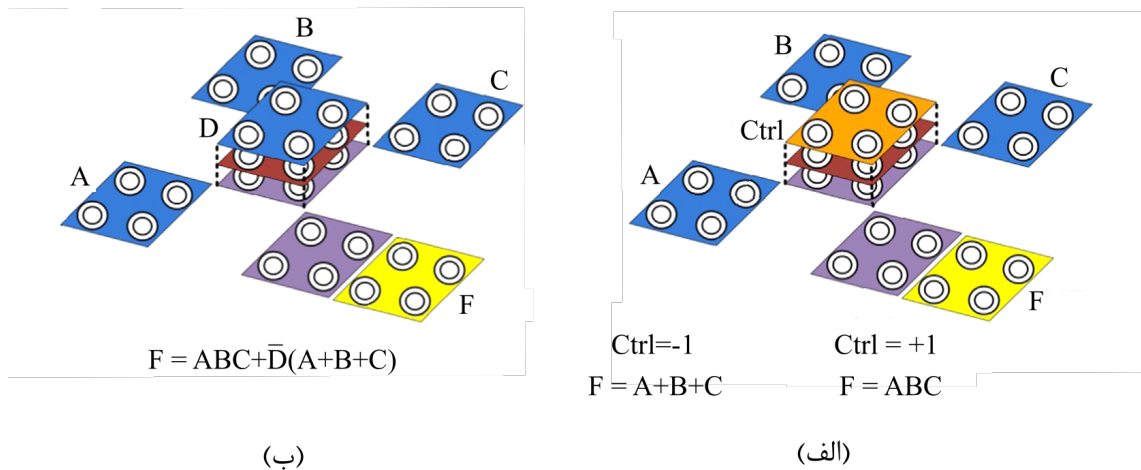
همانطور که قبلاً گفته شد دروازه‌ی اکثریت متداول نقش اساسی در پیاده‌سازی یک جمع‌کننده دارد. اما اگر بخواهیم جمع‌کننده عملکرد دقیق‌تری در مواجهه با خطاهای جابه‌جایی و عدم تراز داشته باشد می‌توانیم از دروازه‌ی اکثریت چرخانده استفاده کنیم. این دروازه در شکل ۳-۲۴ نشان داده شده است. اگر بالای دروازه‌ی اکثریت چرخانده یک سلول کنترل‌کننده یا یک سلول محرک<sup>۱</sup> اضافه کنیم یک دروازه‌ی اکثریت چرخانده‌ی اصلاح شده داریم. که با

<sup>۱</sup>drive



شکل ۳-۲۴: دروازه‌ی اکثریت چرخانده

آن می‌توان ساختار منطقی AND سه ورودی و OR سه ورودی را پیاده‌سازی کنیم. به این ترتیب سلول کنترل دارای مقدار منطقی یک برای ساختار AND و مقدار منطقی صفر برای ساختار OR است. در شکل ۳-۲۵ (الف) پیاده‌سازی این دروازه نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۵: دروازه‌ی اکثریت چرخانده‌ی اصلاح شده [۴۷]

شکل ۳-۲۵ (ب) وقتی سلول کنترل‌کننده در یک دروازه‌ی اکثریت چرخانده‌ی اصلاح شده به‌عنوان سلول ورودی عمل می‌کند نشان داده شده است. معادله‌ی آن در ادامه آورده شده است:

$$F = ABC + \bar{D}(A + B + C) \quad (3-14)$$

ما از این تابع برای پیاده‌سازی یک تمام جمع‌کننده‌ی یک بیتی مؤثر با انتساب سلول ورودی D به  $C_{out}$  می‌توانیم استفاده کنیم.

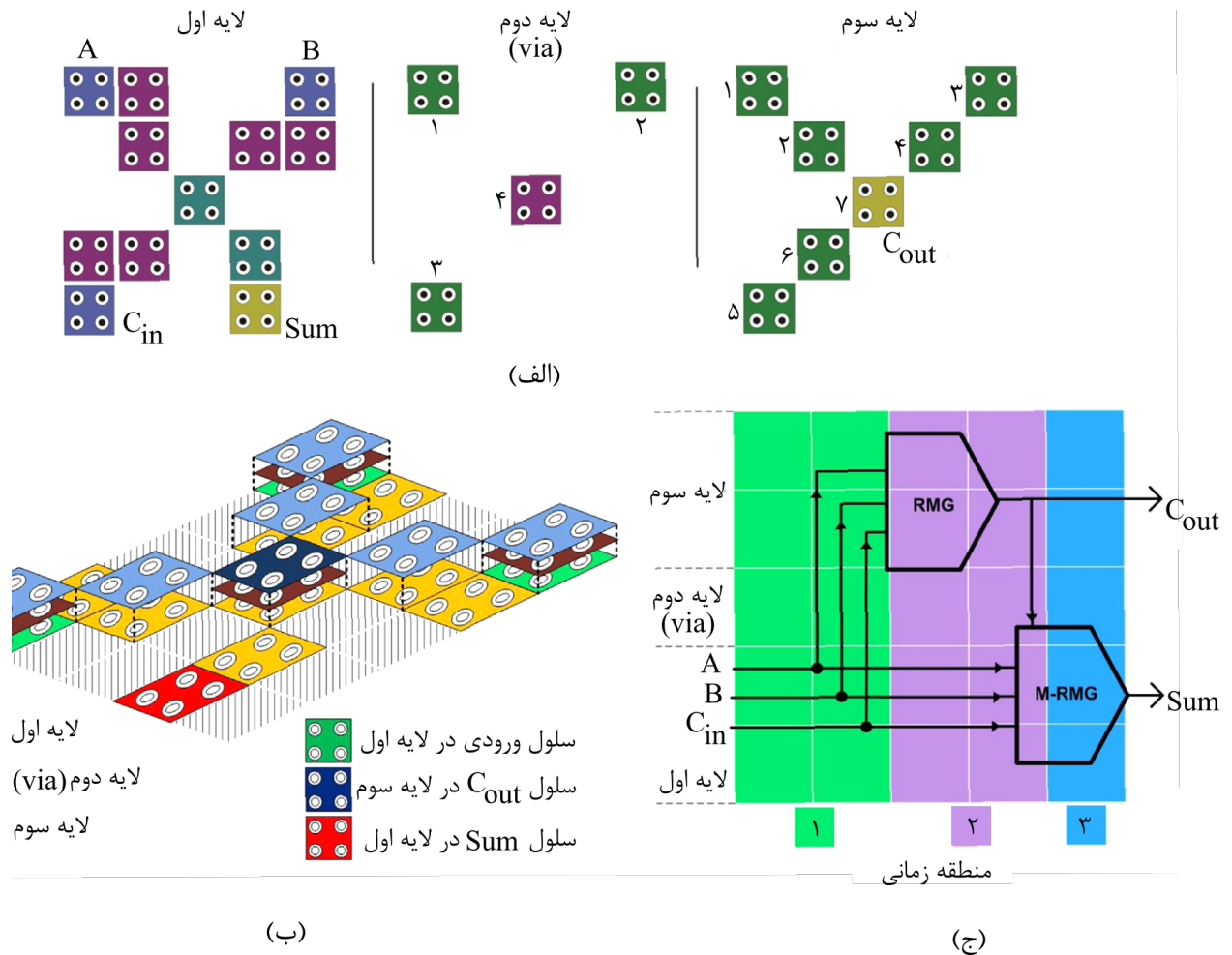
تابع منطقی برای خروجی جمع‌کننده و حامل بیت‌ها برای یک تمام جمع‌کننده‌ی یک بیتی آورده شده است:

$$C_{out} = AB + AC + BC = M(A, B, C) \quad (3-15)$$

$$Sum = A \oplus B \oplus C_{in} = ABC + \overline{ABC} + \overline{A}BC + A\overline{BC} = ABC + (\overline{AB} \cdot \overline{AC} \cdot \overline{BC}) \cdot (A + B + C)$$

$$= ABC + (\overline{AB + AC + BC}) \cdot (A + B + C) = ABC + \overline{C_{out}}(A + B + C)$$

در شکل ۳-۲۶ شماتیک و طرح بندی سلول ها و مراحل پالس دهی مورد نیاز برای تمام جمع کننده ی یک بیتی پیشنهاد شده نشان داده شده است. لایه اول دارای سه ورودی به

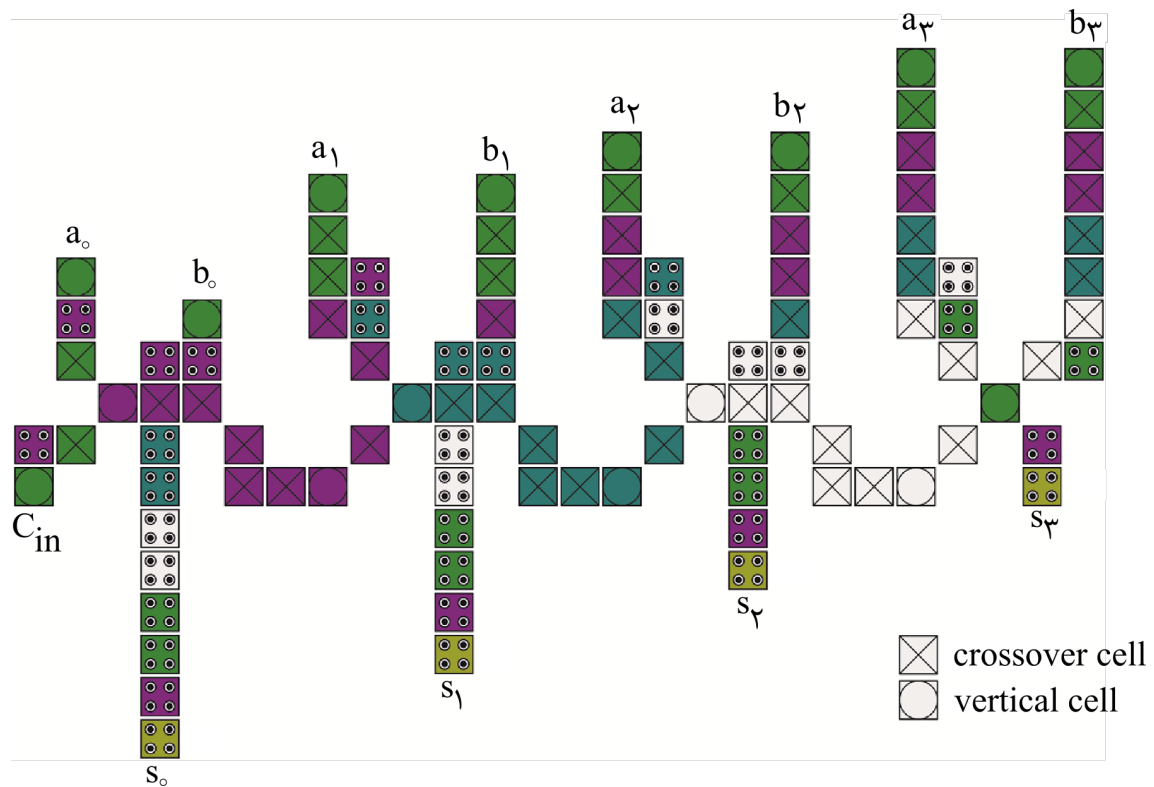


شکل ۳-۲۶: طرح پیشنهادی برای تمام جمع کننده ی یک بیتی [۴۷]

نام های A، B و  $C_{in}$  و همچنین دارای خروجی مطلوب به نام Sum است. بیت حامل توسط دروازه ی اکثریت چرخانده در لایه سوم تولید می شود و مستقیماً به خروجی ( $out = C_{out}$ ) منتقل می شود. پس از یک مرحله ی زمانی (منطقه ی زمانی دوم) آن به سمت پایین که سلول کنترل کننده است منتقل می شود. از آنجایی که  $C_{out}$  در اولین لایه قرار دارد برای تغذیه دروازه ی اکثریت چرخانده ی اصلاح شده از آن استفاده می شود. همچنین برای داشتن یک خروجی پایدار نیاز به یک مرحله پالس دهی داریم (منطقه ی زمانی سوم). بنابراین، برای طراحی یک تمام جمع کننده ی یک بیتی به سه مرحله پالس دهی برای داشتن خروجی پایدار نیاز داریم همانطور که در شکل ۳-۲۶ (ج) نشان داده شده است. به دلیل اینکه سلول خروجی توسط سلول های دیگر احاطه نشده است برای اتصال به مدارهای دیگر نیاز به سیم های متقاطع

وجود ندارد. بنابراین با استفاده از ساختارهای چند لایه علاوه بر کاهش مساحت اشغال شده و کاهش تعداد سلول‌ها میزان خطا نیز کاهش می‌یابد [۴۷].

در شکل ۳-۲۷ یک تمام جمع‌کننده‌ی چهار بیتی با قابلیت تحمل‌پذیری خطا نشان داده شده است. برای پیاده‌سازی این تمام جمع‌کننده از تمام جمع‌کننده‌ی یک بیتی پیشنهادی



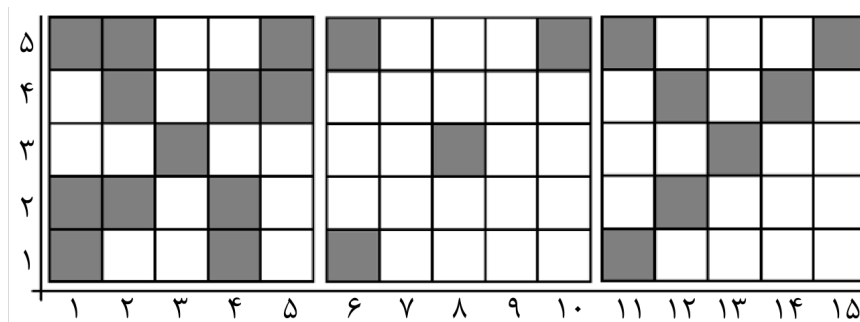
شکل ۳-۲۷: تمام جمع‌کننده چهار بیتی مقاوم در برابر خطا [۴۷]

استفاده شده است. این تمام جمع‌کننده شامل ۱۶۵ سلول است که مساحتی به اندازه‌ی  $20/0$  میکرومتر مربع را به خود اختصاص داده است. همانطور که در شکل ۳-۲۷ نشان داده شده است  $a_0 - a_3$ ،  $b_0 - b_3$  و  $C_{in}$  به‌عنوان ورودی و  $s_0 - s_3$  خروجی این جمع‌کننده را تشکیل می‌دهند [۴۷].

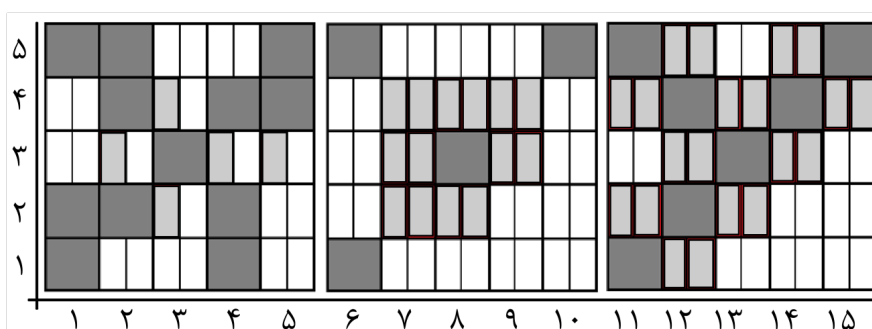
در ادامه به بررسی خطاهای جابه‌جایی و عدم تراز در هر سه لایه‌ی تمام جمع‌کننده‌ی یک بیتی می‌پردازیم. در اینجا اندازه‌ی سلول ۱۸ نانومتر تعیین شده است. به‌جز سلول شماره‌ی ۴ در لایه‌ی دوم که در شکل ۳-۲۶ (الف) نشان داده شده است بقیه‌ی سلول‌ها در برابر خطا مقاوم هستند. همچنین سلول‌های ۲، ۴ و ۶ در لایه سوم را می‌توان بدون اینکه در عملکرد جمع‌کننده مشکلی به‌وجود آید حذف کرد. از این رو می‌توان یک تمام جمع‌کننده‌ی یک بیتی با تنها ۲۰ سلول را پیاده‌سازی کرد [۴۷].

در شکل ۳-۲۸ (الف) مساحت اشغال شده و اشغال نشده در سه لایه با استفاده از دو رنگ متفاوت نشان داده شده است. رنگ خاکستری نشان دهنده‌ی مساحت اشغال شده و رنگ سفید نشان دهنده‌ی مساحت اشغال نشده است. بنابراین نقص در اثر حذف سلول در ناحیه‌ی

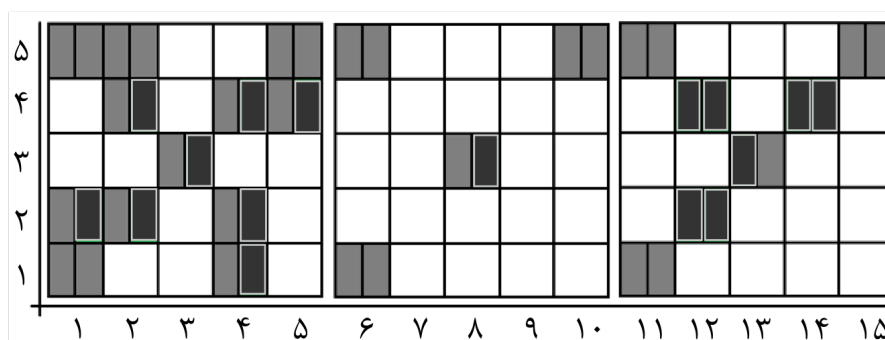




(الف)



(ب)

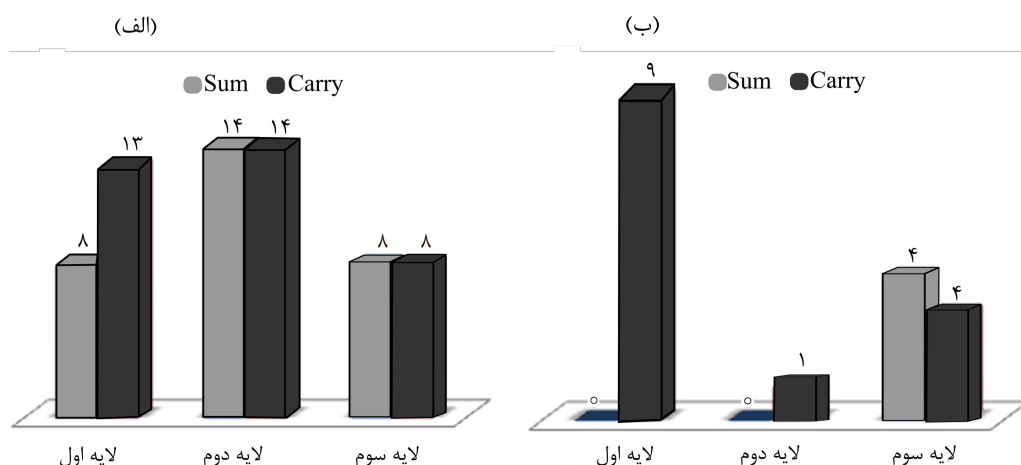


(ج)

- این سلول یعنی اضافه کردن سلول هیچ تأثیری بر روی Sum و  $C_{out}$  ندارد.
- این سلول یعنی اضافه کردن سلول باعث خطا در Sum می‌شود و تأثیری بر روی  $C_{out}$  ندارد.
- این سلول یعنی اضافه کردن سلول باعث خطا در Sum و  $C_{out}$  می‌شود.
- این سلول یعنی Sum و  $C_{out}$  در برابر حذف سلول مقاوم هستند.
- این سلول یعنی فقط  $C_{out}$  در برابر حذف سلول مقاوم است.
- این سلول یعنی حذف سلول باعث خطا در Sum و  $C_{out}$  می‌شود.

شکل ۳-۲۸: مدل شماتیکی برای بررسی خطای حذف و اضافه شدن سلول در تمام جمع‌کننده‌ی یک بیتی [۴۷]

خاکستری و نقص در اثر اضافه شدن سلول در ناحیه‌ی سفید اتفاق می‌افتد. تحمل‌پذیری خطای حذف سلول و اضافه شدن سلول برای تمام جمع‌کننده‌ی یک بیتی پیشنهادی و تأثیر این خطاها بر روی Sum و  $C_{out}$  در شکل ۲۸-۳ (ب) و ۲۸-۳ (ج) نشان داده شده است. در شکل ۲۹-۳ حداکثر تک سلولی که می‌تواند حذف یا اضافه شود در حالی که مدار عملکرد مناسب خود را حفظ کند نشان داده شده است. می‌توانیم سلول‌هایی را در ناحیه‌ی



شکل ۲۹-۳: حداکثر سلول ممکن که (الف) می‌توان اضافه کرد (ب) می‌توان حذف کرد در حالی که مدار عملکرد درستی داشته باشد [۴۷]

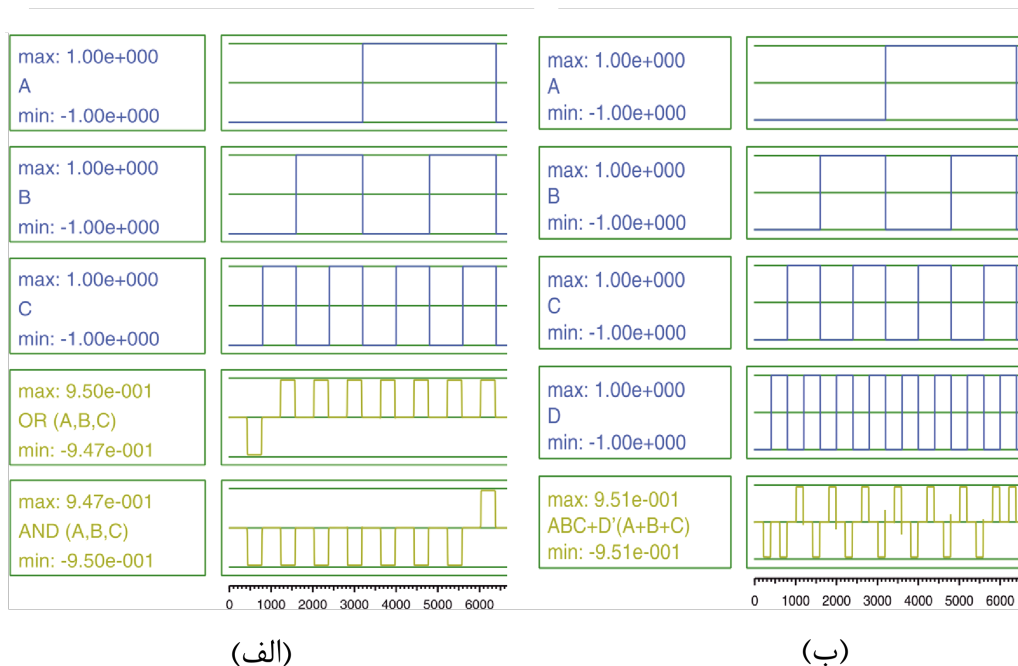
سفید نشان داده شده در شکل ۲۸-۳ (الف) اضافه کنیم به نحوی که مدار کارکرد مناسب خوب را ادامه دهد. این میزان افزایش مجاز تعداد سلول‌ها در سه لایه به تفکیک Sum و  $C_{out}$  در شکل ۲۹-۳ (الف) نشان داده شده است. همچنین حداکثر سلول‌های ممکن که می‌توان حذف کرد در شکل ۲۹-۳ (ب) در سه لایه به تفکیک Sum و  $C_{out}$  آورده شده است. کاملاً مشخص است که لایه‌ی سوم نسبت به نقص حذف سلول نسبت به لایه‌ی دوم مقاوم‌تر است زیرا سلول‌های بیشتری در لایه سوم وجود دارد که می‌توان حذف کرد در حالی که برای انتقال سیگنال بین لایه‌ی اول و لایه‌ی سوم تمام سلول‌های لایه دوم مورد نیاز است. از سوی دیگر وجود مساحت اشغال نشده‌ی بیشتر در لایه دوم نسبت به لایه سوم قابلیت تحمل‌پذیری خطا در برابر نقص اضافه شدن سلول را افزایش می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که تمام جمع‌کننده‌ی یک بیتی در برابر خطای اضافه شدن سلول تحمل‌پذیری بیشتری از خود نشان می‌دهد [۴۷].

با استفاده از نرم افزار QCA Designer شبیه‌سازی مربوط به طراحی پیشنهادی انجام شده است تا از عملکرد درست آن اطمینان حاصل گردد. نتایج شبیه‌سازی برای دروازه‌ی AND و OR سه ورودی و تابع

$$F = ABC + \bar{D}(A + B + C) \quad (۱۶-۳)$$

که با استفاده از دروازه‌ی اکثریت چرخانده‌ی اصلاح شده ساخته شده در شکل ۳۰-۳ نشان

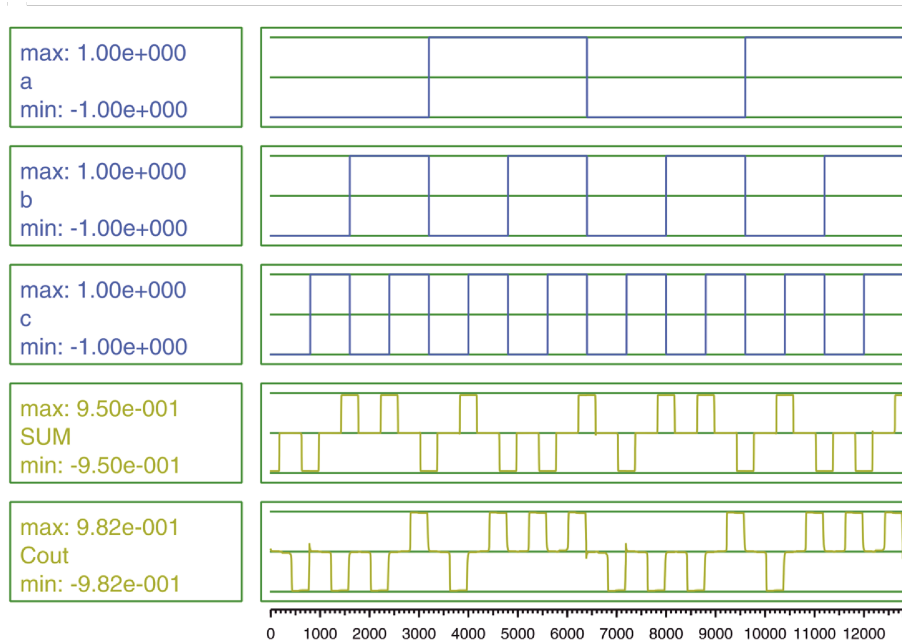
داده شده است. همچنین نتیجه شبیه سازی برای تمام جمع کننده ی یک بیتی و چهار بیتی در شکل ۳-۳۱ نشان داده شده است.



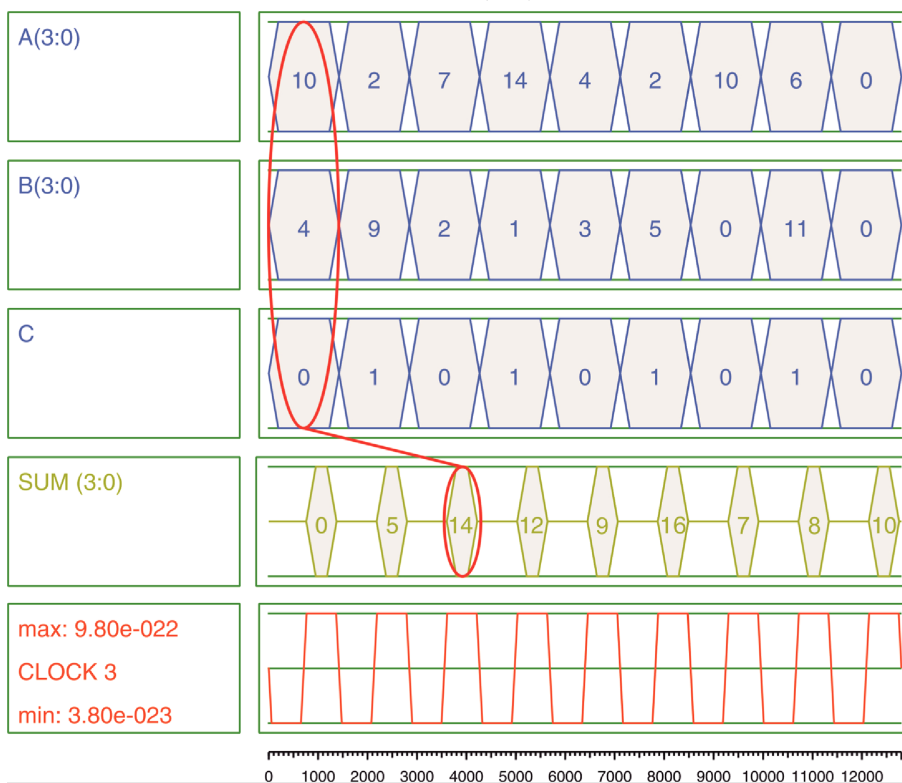
شکل ۳-۳۰: نتایج شبیه سازی برای دروازه ی اکثریت چرخانده ی اصلاح شده (الف) AND و OR

سه ورودی (ب)  $F = ABC + \bar{D}(A + B + C)$  [۴۷]

## ۶۰ انواع خطا و روش‌های تحمل‌پذیری در فن‌آوری QCA



(الف)



(ب)

شکل ۳-۳۱: نتایج شبیه‌سازی برای (الف) تمام جمع‌کننده‌ی یک بیتی (ب) تمام جمع‌کننده‌ی چهار بیتی [۴۷]

## فصل ۴

# طراحی بسته‌ی نرم‌افزاری SEFA

### ۱-۴ مقدمه

با توجه به اهمیت موضوع یک فصل جداگانه برای بررسی و توضیح بسته‌ی نرم‌افزاری SEFA<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده است. این بسته در نرم‌افزار متلب نوشته شده و برای رفع نیازهای ایجاد شده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با استفاده از این بسته می‌توان خروجی منطقی کلیه‌ی دروازه‌های موجود در فن‌آوری QCA را به دست آورد و محدودیتی برای تعداد سلول‌ها و تعداد ورودی‌ها وجود ندارد. همچنین در خروجی این بسته مقدار انرژی الکترواستاتیک برای ترکیب‌های مختلف ورودی گزارش می‌شود. برای اینکه بتوان سنجش درستی از پایداری مقدار منطقی خروجی ارائه داد پارامتری به نام  $\Delta E$  تعریف شده است که هر چقدر بیشتر باشد خروجی دارای پایداری بیشتری خواهد بود.

از مهم‌ترین ویژگی‌های این بسته می‌توان به امکان گذاشتن سلول خطای تک الکترون اشاره کرد که در راستای تحقق بخشیدن به اهداف پایان‌نامه طراحی شده است. با استفاده از این قابلیت می‌توان یک سلول خطا و حتی دو سلول خطا به صورت همزمان برای دروازه‌ی مربوطه تعریف کرد و خروجی را مشاهده کرد.

در ادامه برای ساده‌سازی فهم برنامه‌ی نوشته شده، برنامه را به توابع مختلف تقسیم‌بندی

---

<sup>۱</sup>Single Electron Fault Automata

کرده و هر کدام را جداگانه بررسی کرده‌ایم. در بخش بعدی نمای کلی برنامه همراه با توضیحات ارائه شده است.

## ۲-۴ نمای کلی برنامه

نمای کلی برنامه‌ی نوشته شده توسط متلب در شکل ۱-۴ نشان داده شده است.

```

input : Input function
output: Electrostatic energy and truth table
while true do
  for i <= 3 do
    determination of output cells
    for j <= 2n do
      determination of input cells
      if i >= 2 then
        for l <= (4 * n3) do
          Determination of single
          electrons according to the
          lowest energy
          Determination of constant cell
          according to the lowest energy
          Energy calculation
        end
      else
        for K <= (4 * n3) do
          Determination of single
          electrons
          determination of constant cells
          Energy calculation
        end
      end
    end
  end
end
end
end

```

شکل ۱-۴: الگوریتم نمای کلی

نحوه‌ی عملکرد کلی برنامه به این صورت است که ابتدا ورودی‌های موردنیاز را وارد می‌کنیم، سپس برنامه وارد حلقه‌ی متغیر  $i$  می‌شود که برای حذف سلول خروجی یا قرار دادن مقدار منطقی صفر و یا یک تعبیه شده است. سپس با توجه به داده‌های وارد شده موقعیت سلول خروجی تعیین می‌شود. دوباره برنامه برای قرار دادن ورودی‌ها در موقعیتشان وارد یک حلقه‌ی دیگر می‌شود. در ادامه با توجه به دستور شرطی گذاشته شده ابتدا برنامه وارد حلقه‌ی متغیر  $K$  می‌شود در غیر این صورت حلقه‌ی متغیر  $l$  را اجرا می‌کند.

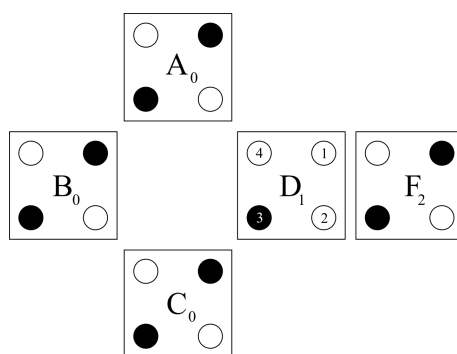
در حلقه‌ی متغیر  $K$  ورودی‌ها تعیین شده و خروجی تعیین نشده است. با این وجود موقعیت سلول خطا و سلول‌های ثابت در این حلقه تعیین و سپس انرژی الکترواستاتیک

محاسبه می‌شود. سپس مقایسه‌ای بین انرژی‌های به‌دست آمده انجام می‌شود و موقعیت تک الکترون در سلول خطا که دارای کم‌ترین مقدار انرژی است مشخص می‌شود. این فرآیند برای سلول ثابت هم انجام می‌شود.

حال با توجه به داده‌های به‌دست آمده در حلقه‌ی متغیر  $K$  برنامه وارد حلقه‌ی متغیر 1 می‌شود که با توجه به انرژی‌های به‌دست آمده، تک الکترون در سلول خطا و الکترون‌ها در سلول ثابت در موقعیتی قرار می‌گیرند که دارای کم‌ترین مقدار انرژی هستند و در انتها انرژی الکترواستاتیک محاسبه و صفر یا یک بودن خروجی تعیین می‌شود. الگوریتم نمای کلی برنامه‌ی متلب نوشته شده در شکل ۱-۴ نشان داده شده است.

### ۱-۲-۴ تابع ورودی‌ها

تابع ورودی نوشته شده به این صورت است که ابتدا باید تعداد سطر و ستون دروازه‌ی موردنظر را وارد کرد. به‌عنوان مثال برای وارد کردن سلول  $D$  دروازه‌ی منطقی  $NNI$  که در شکل ۲-۴ نشان داده شده است، سطر را ۲ و ستون را ۳ قرار می‌دهیم. سپس تعداد



شکل ۲-۴: دروازه‌ی منطقی  $NNI$

سلول‌های ورودی و موقعیت هر کدام از آن‌ها را وارد کنیم. به‌طور مشابه برای سلول خروجی تعداد و موقعیتشان را مشخص می‌کنیم.

سپس یک دستور شرطی وجود و یا عدم وجود سلول ثابت را مشخص می‌کند و اگر موجود بود باید تعداد و موقعیت هر کدام را وارد کنیم. دروازه‌ی  $NNI$  نشان داده شده فاقد سلول ثابت است. به‌طور مشابه برای سلول خطا دستور شرطی قرار داده شده است که در صورت وجود سلول خطا باید تعداد و موقعیت هر سلول مشخص شود. لازم به ذکر است که دروازه‌ی  $NNI$  دارای یک سلول خطا است. در برنامه‌ی نوشته شده حداکثر تعداد سلول‌های خطا دو عدد بوده و امکان وارد کردن سلول خطای بیشتر وجود ندارد. الگوریتم تابع ورودی برنامه در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.

```

Function Input is
  d=Import dimension of QCA circuit
  n=Number of input
  p=Specify position of input
  n1=Number of output
  p1=Specify position of output cell
  if Do you have constant cell? then
    | n2=Number of constant cell
    | p2=Specify position of constant cell
  end
  if Do you have fault cell? then
    | n3=Number of fault cell
    | p3=Specify position of constant cell
  end
end

```

شکل ۴-۳: الگوریتم تابع ورودی

## ۲-۲-۴ تابع تعیین سلول خروجی

در تابع تعیین سلول خروجی ابتدا خروجی را بی‌اثر قرار می‌دهیم. سپس با استفاده از دو دستور شرطی یک بار خروجی را برابر صفر منطقی در نظر می‌گیریم و بار دیگر آن را برابر یک قرار می‌دهیم. الگوریتم تابع تعیین سلول خروجی برنامه در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.

```

Function Determine output cell is
  p1=empty;
  if i=2 then
    | p1=Logical zero;
  end
  if i = 3 then
    | p1=Logical one;
  end
end

```

شکل ۴-۴: الگوریتم تابع تعیین سلول خروجی

## ۳-۲-۴ تابع تعیین سلول‌های ورودی

در این تابع ابتدا کد باینری که باید در ورودی قرار بگیرد ساخته می‌شود. سپس با استفاده از یک حلقه و دو دستور شرطی مقدار منطقی سلول‌های ورودی قرار داده می‌شود. الگوریتم تابع تعیین سلول‌های ورودی برنامه در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.

## ۴-۲-۴ تابع تعیین سلول خطا

در این تابع با دو دستور شرطی علاوه‌بر امکان قرار دادن یک سلول خطا این قابلیت در برنامه قرار داده شده است که بتوان دو سلول خطا را در دروازه‌ی موردنظر قرار داد و نتایج



```

Function Determine input cell is
| j1=j-1;
| b=de2bi(j1,n);
| for i1 <= n do
|   | if b(i1)=0 then
|   |   | p(i1)=Logical zero;
|   | end
|   | if b(i1)=1 then
|   |   | p(i1)=Logical one;
|   | end
| end
end
end

```

شکل ۴-۵: الگوریتم تابع تعیین سلول‌های ورودی

موردنظر را به دست آورد. در این تابع موقعیت تک الکترون در سلول خطا تعیین می‌شود. الگوریتم تابع تعیین سلول خطای برنامه در شکل ۴-۶ نشان داده شده است.

```

Function Determination of single electrons is
| if n3=1 then
|   | p3(1)=Fault cell;
| end
| if n3=2 then
|   | p3(1)=Fault cell;
|   | p3(2)=Fault cell;
| end
end
end

```

شکل ۴-۶: الگوریتم تابع تعیین سلول خطا

## ۴-۲-۵ تابع تعیین سلول ثابت

در این تابع ابتدا وارد حلقه می‌شود که تعیین کننده‌ی تعداد حالت‌هایی است که سلول‌های ثابت می‌توانند داشته باشند. سپس هر عدد حالت‌ها به کد باینری تبدیل می‌شود. در ادامه با استفاده از یک حلقه و دو دستور شرطی مقادیر منطقی در موقعیت از قبل تعیین شده قرار می‌گیرند. الگوریتم تابع تعیین سلول ثابت برنامه در شکل ۴-۷ نشان داده شده است.

## ۴-۲-۶ تابع تعیین سلول خطا مطابق با کم‌ترین مقدار انرژی

در این تابع با استفاده از دو دستور شرطی امکان قرار دادن، یک و یا دو سلول خطا فراهم شده است. سپس با توجه به حالتی از تک الکترون در سلول خطا که در آن دارای کم‌ترین مقدار انرژی است در موقعیت از قبل تعیین شده قرار می‌گیرد. الگوریتم تابع تعیین سلول خطا مطابق با کم‌ترین مقدار انرژی برنامه در شکل ۴-۸ نشان داده شده است.

```

Function Determination of constant cells is
  for  $i2 \leq 2^{n2}$  do
     $i21=i2-1$ ;
     $b=de2bi(i21,n2)$ ;
    for  $i3 \leq n2$  do
      if  $b(i3)=0$  then
         $p2=Logical\ zero$ ;
      end
      if  $b(i3)=1$  then
         $p2=Logical\ one$ ;
      end
    end
  end
end

```

شکل ۴-۷: الگوریتم تابع تعیین سلول ثابت

```

Function Determination of single electrons
according to the lowest energy is
  if  $n3=1$  then
     $p3(1)=Fault\ cell(LE)$ ;
  end
  if  $n3=2$  then
     $p3(1)=Fault\ cell(LE)$ ;
     $p3(2)=Fault\ cell(LE)$ ;
  end
end

```

شکل ۴-۸: الگوریتم تابع تعیین سلول خطا مطابق با کم‌ترین مقدار انرژی

## ۷-۲-۴ تابع تعیین سلول ثابت مطابق با کم‌ترین مقدار انرژی

در این تابع ابتدا موقعیتی که در آن سلول‌های ثابت دارای کم‌ترین مقدار انرژی الکترواستاتیک هستند تبدیل به اعداد باینری می‌شود و با استفاده از یک حلقه و دو دستور شرطی مقادیر منطقی موردنظر در سلول ثابت قرار می‌گیرد. در واقع مقدار منطقی قرار داده شده برای هر سلول ثابت دارای کم‌ترین مقدار انرژی الکترواستاتیک است که پایدارترین حالت ممکن می‌شود. الگوریتم تابع تعیین سلول ثابت مطابق با کم‌ترین مقدار انرژی برنامه در شکل ۴-۹ نشان داده شده است.

## ۸-۲-۴ تابع محاسبه‌ی انرژی

با استفاده از این تابع می‌توان انرژی الکترواستاتیک را محاسبه کرد. ابتدا ساختار دروازه‌ی موردنظر وارد یک متغیر می‌شود. سپس با استفاده از دو تابع دیگر موقعیت الکترون‌ها و تعداد آن‌ها مشخص می‌شود. با استفاده از دو حلقه‌ای که در الگوریتم مشخص شده است انرژی بین الکترون‌ها و سپس حاصل جمع تمامی آن‌ها محاسبه می‌شود. الگوریتم تابع محاسبه‌ی انرژی

**Function** *Determination of constant cell according to the lowest energy is*

```

p=position LE;
p=p-1;
b=de2bi(p,n2);
for i4 <= n2 do
    if b(i4)=0 then
        | p2=Logical zero;
    end
    if b(i4)=1 then
        | p2=Logical one;
    end
end
end
end

```

شکل ۴-۹: الگوریتم تابع تعیین سلول ثابت مطابق با کمترین مقدار انرژی

برنامه در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است.

**Function** *Energy calculation is*

```

am=circuit structure;
[row,col]=find(am);
o=number of one;
for i5 <= o do
    for i6 = i5 : o - 1 do
        murow=abs(row(i6+1)-row(i5));
        mucol=abs(col(i6+1)-col(i5));
        disrow=murow*r;
        discol=mucol*r;
        dis=sqrt((disrow)2 + (discol)2);
        Energy=k * q * q / dis * 6.241509 * 1018;
    end
end
end
end

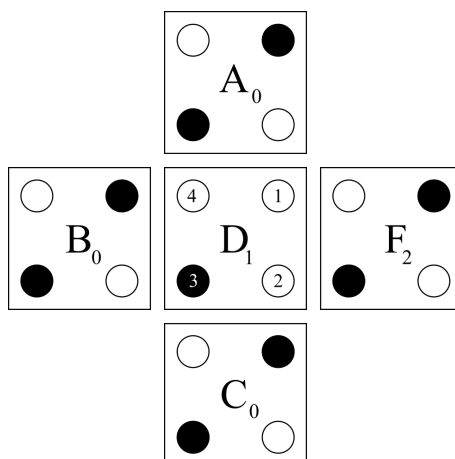
```

شکل ۴-۱۰: الگوریتم تابع محاسبه‌ی انرژی

## ۴-۳ یک مثال کاربردی

در این قسمت می‌خواهیم با استفاده از برنامه‌ی متلب نوشته شده دروازه‌ی اکثریت با پنج سلول که در سلول تصمیم‌گیر آن خطا رخ داده است را پیاده‌سازی کنیم. این دروازه در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است.

ابتدا اطلاعات موردنیاز را وارد می‌کنیم. این دروازه دارای سه سطر و سه ستون است. سپس باید تعداد سلول‌های ورودی و موقعیت هر کدام از آن‌ها را وارد کنیم. به‌طور مشابه باید برای سلول خروجی تعداد و موقعیت سلول را تعیین کنیم. سپس با توجه به عدم وجود سلول



شکل ۴-۱۱: پیاده‌سازی دروازه‌ی اکثریت با خطای تک الکترون در برنامه‌ی متلب

ثابت گزینه‌ی مربوطه را انتخاب می‌کنیم. در انتها به خاطر وجود یک سلول خطا، گزینه‌ی مربوطه را انتخاب و تعداد و موقعیت آن را مشخص می‌کنیم. جواب به‌دست آمده برای این دروازه مطابق تصویر زیر است.

Result:

Dec	Binary			Out
0	0	0	0	0
1	1	0	0	1
2	0	1	0	0
3	1	1	0	0
4	0	0	1	1
5	1	0	1	1
6	0	1	1	0
7	1	1	1	1

Energy	deltaE
2.3780	0.8255
2.3540	1.2469
2.3587	0.7609
2.3540	1.2469
2.3980	1.2469
2.3587	0.7609
2.3980	1.2469
2.3780	0.8255

شکل ۴-۱۲: نتیجه‌ی محاسبات به‌دست آمده برای دروازه‌ی اکثریت توسط برنامه‌ی متلب

# فصل ۵

## نتایج شبیه‌سازی خطای تک الکترون

### ۵-۱ مقدمه

یک سلول QCA دارای چهار نقطه کوانتومی است که دو الکترون از طریق اثر تونل‌زنی می‌توانند آن‌ها را اشغال کنند. انرژی سد بین سلولی حدود  $1\text{eV}$  فرض شده است که برای جلوگیری از تونل‌زنی بین سلولی کافی است [۱۱]. در حالت بدون نقص یک سلول کوانتومی باید دارای دو الکترون باشد که در حداکثر فاصله از هم قرار گرفته‌اند. اما در اثر پدیده‌ی تونل‌زنی یا عوامل دیگر این سلول یک الکترون خود را از دست می‌دهد و دارای یک الکترون در درون خود می‌شود. ما در این پژوهش برای دروازه‌ی اکثریت، دروازه‌ی NNI، دروازه‌ی AOI به این پدیده پرداخته و همچنین رویکردهای مختلف این خطا را برای سیم دودویی بررسی کرده‌ایم. در ادامه ساختارهای مختلفی از دروازه‌ی اکثریت را طراحی کرده‌ایم که در برابر خطای تک الکترون از خود مقاومت نشان می‌دهند.

از نظر ابعاد، سلول‌های QCA دارای ابعاد  $18 \times 18\text{nm}^2$  و فاصله‌ی بین سلولی صفر در نظر گرفته شده است. قطر نقطه‌ی کوانتومی  $5\text{nm}$  تعیین شده است. در این پژوهش فاصله‌ی مرکز تا مرکز بین دو نقطه کوانتومی هم برابر  $9\text{nm}$  و هم برای تعیین  $7\text{\AA}$  و بررسی و شبیه‌سازی شده است. لازم به ذکر است که برای دستیابی به بیش‌ترین ثبات، الکترون‌های سلول QCA باید به نحوی تنظیم شوند که انرژی الکترواستاتیک آن‌ها در کم‌ترین مقدار باشد. انرژی الکترواستاتیک بین دو سلول با استفاده از رابطه ۵-۱ محاسبه می‌شود که در این رابطه U

انرژی الکترواستاتیک،  $k$  ثابت کولن،  $q_1$  و  $q_2$  بار الکتریکی و  $r$  فاصله بین دو بار الکتریکی است. معادله‌ی ۲-۵ مجموع انرژی‌های الکترواستاتیک بین دو سلول است [۴۸].

$$U = \frac{kq_1q_2}{r} \quad (1-5)$$

می‌دانیم:

$$kq_1q_2 = 9 * 10^9 * (1/6)^2 * 10^{-38} = 23/04 * 10^{-29}$$

$$U_T = \sum_{i=1}^n U_i \quad (2-5)$$

در تمامی بررسی‌ها از سه رویکرد مختلف پالس‌دهی استفاده شده است:

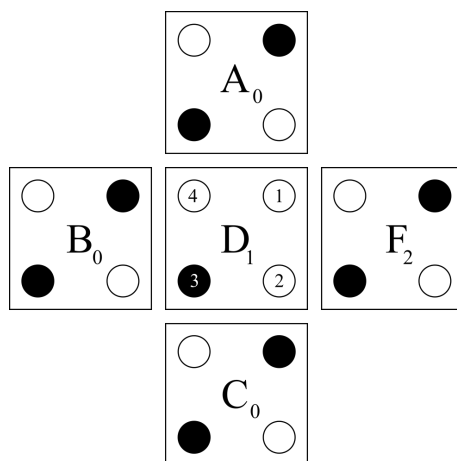
- ۱- بدون پالس: با یک پالس خروجی تعیین می‌شود.
- ۲- سه پالس با ورودی ثابت: در پالس اول ورودی‌ها تعیین می‌شود، پالس دوم بقیه‌ی سلول‌ها به‌جز سلول خروجی و پالس سوم خروجی تعیین می‌شود.
- ۳- سه پالس با ورودی متغیر: در پالس اول ورودی‌ها تعیین می‌شود، پالس دوم بقیه‌ی سلول‌ها به‌جز سلول خروجی و در پالس سوم ورودی‌ها بی‌اثر شده و خروجی تعیین می‌شود.

## ۲-۵ دروازه‌ی اکثریت

از آنجایی که دروازه‌ی اکثریت منطق اساسی و اولیه‌ی مدارهای QCA است، سلول‌های آن باید دقیق تراز باشند همراه با محدود بودن الکترون‌های داخلش در مقیاس نانو تا عملکرد درستی را حاصل کند. علاوه بر این، سلول مرکزی دروازه‌ی اکثریت منطق را به سلول خروجی هدایت می‌کند. همانطور که در شکل ۱-۵ نشان داده شده است سلول D سلولی است که خطای تک الکترون در آن رخ می‌دهد.

با توجه به رویکرد بدون پالس و رابطه‌ی ۲-۵ برای محاسبه‌ی انرژی الکترواستاتیک در دروازه‌ی اکثریت که در آن خطای تک الکترون اتفاق افتاده است ورودی‌ها را تعیین می‌کنیم و سپس الکترون را در نقاط مختلف سلول D قرار داده و سلول خروجی را مقدار منطقی صفر و یک می‌دهیم. کمترین مقدار انرژی به‌دست آمده پایدارترین حالت و جواب موردنظر است. در جدول ۱-۵ کمترین مقدار انرژی برای هر حالت و نتیجه‌ی نهایی گردآوری شده است.

همانطور که مشاهده می‌کنید در بیشتر حالت‌ها خروجی مقدار صحیح را نشان نمی‌دهد و نرخ خطا برای این دروازه برابر با ۷۵٪ است. در این جدول  $\Delta E$  تقسیم اختلاف کمترین مقدار انرژی با انرژی کینک است که هر چقدر این مقدار بیشتر باشد خروجی دروازه پایداری



شکل ۵-۱: دروازه‌ی اکثریت با خطای تک الکترون

جدول ۵-۱: مشخصات دروازه‌ی اکثریت با وجود خطای تک الکترون در رویکرد بدون پالس

ورودی	انرژی الکترواستاتیک	$\Delta E$	خروجی	نتیجه
۰۰۰	$2.359 \text{ ev}$	$0.64$	۱	خطا
۰۰۱	$2.354 \text{ ev}$	$0.15$	۱	خطا
۰۱۰	$2.359 \text{ ev}$	$0.76$	۰	درست
۰۱۱	$2.354 \text{ ev}$	$0.15$	۰	خطا
۱۰۰	$2.354 \text{ ev}$	$0.15$	۱	خطا
۱۰۱	$2.359 \text{ ev}$	$0.76$	۱	درست
۱۱۰	$2.354 \text{ ev}$	$0.15$	۰	خطا
۱۱۱	$2.359 \text{ ev}$	$0.64$	۰	خطا
نرخ خطا				٪۷۵

بیشتری دارد. در مرجع [۴۱] محاسبات مربوط به خطای تک الکترون در رویکرد سه پالس با ورودی ثابت انجام شده است و نرخ خطای به دست آمده برابر ۵۰٪ شده است. در جدول ۵-۲ نتایج مربوط به هر سه رویکرد پالس‌دهی جمع‌آوری شده است. با توجه به جدول تغییر روش پالس‌دهی باعث تغییر در پایداری خروجی می‌شود. همچنین در رویکرد سه پالس با ورودی متغیر خروجی دارای بیش‌ترین پایداری است.

در جدول ۵-۳ نرخ خطا برای سه رویکرد مختلف پالس‌دهی نشان داده شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت تغییر در نحوه‌ی پالس‌دهی می‌تواند باعث تغییر در نتیجه‌ی نهایی شود. همانطور که مشاهده می‌کنید در رویکرد بدون پالس نرخ خطای خروجی نسبت به دو رویکرد دیگر ۲۵٪ افزایش داشته است. همچنین خروجی در دو روش پالس‌دهی با مقدار نرخ خطای یکسان برابر با اکثریت ورودی‌های A و C و در مواردی که این دو ورودی برابر نیستند، خروجی معکوس ورودی B خواهد بود.

تمام این محاسبات با تغییر فاصله‌ی بین دو نقطه‌ی کوانتومی در ابعاد مولکولی یعنی  $7\text{\AA}$

جدول ۵-۲: مشخصات دروازه‌ی اکثریت با وجود خطای تک الکترون در سه رویکرد پالس‌دهی

مقدار مطلوب	$\Delta E$	سه پالس با ورودی متغیر	$\Delta E$	سه پالس با ورودی ثابت	$\Delta E$	بدون پالس	ورودی
۰	۱/۲۷	۰	۰/۸۲	۰	۰/۶۴	۱	۰۰۰
۰	۱/۲۷	۱	۱/۲۴	۱	۰/۱۵	۱	۰۰۱
۰	۱/۲۷	۰	۰/۷۶	۰	۰/۷۶	۰	۰۱۰
۱	۱/۲۷	۰	۱/۲۴	۰	۰/۱۵	۰	۰۱۱
۰	۱/۲۷	۱	۱/۲۴	۱	۰/۱۵	۱	۱۰۰
۱	۱/۲۷	۱	۰/۷۶	۱	۰/۷۶	۱	۱۰۱
۱	۱/۲۷	۰	۱/۲۴	۰	۰/۱۵	۰	۱۱۰
۱	۱/۲۷	۱	۰/۸۲	۱	۰/۶۴	۰	۱۱۱

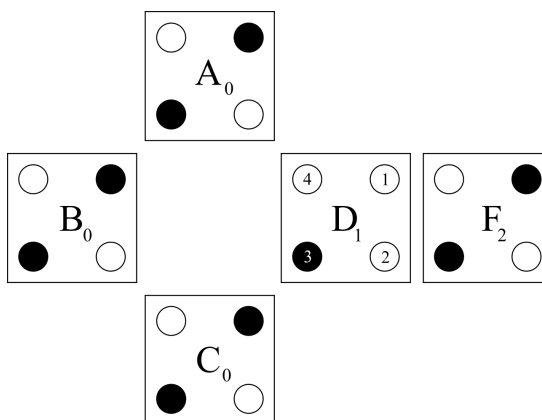
جدول ۵-۳: نرخ خطا در دروازه‌ی اکثریت با خطای تک الکترون

نرخ خطا	رویکرد پالس‌دهی
٪۷۵	بدون پالس
٪۵۰	سه پالس با ورودی ثابت
٪۵۰	سه پالس با ورودی متغیر

تکرار شد و نتایج یکسانی به‌دست آمد.

## ۳-۵ دروازه‌ی NNI

دروازه‌ی منطقی QCA سه ورودی که در این قسمت به‌بررسی خطای تک الکترون آن می‌پردازیم در شکل ۲-۵ نشان داده شده است. این دروازه به این صورت عمل می‌کند که



شکل ۲-۵: دروازه‌ی منطقی NNI با خطای تک الکترون

توانایی پیاده‌سازی دروازه‌های منطقی اساسی از جمله NOR، NAND و NOT را دارد.



دروازه منطقی NNI شامل سه سلول ورودی (A,B,C) و یک سلول خروجی F و سلول D است، که سلول D در این دروازه سلولی است که خطای تک الکترون در آن رخ می‌دهد. برای بررسی خطای تک الکترون در این دروازه با رویکرد سه پالس با ورودی ثابت ابتدا باید موقعیت تک الکترون را برای ترکیب‌های مختلف ورودی تعیین کنیم. سپس با در نظر گرفتن موقعیت تک الکترون در سلول خطا و ترکیب‌های مختلف ورودی قطبیت سلول خروجی را مشخص می‌کنیم. به این نکته هم باید توجه کرد که مقدار منطقی موردنظر سلول خروجی کم‌ترین میزان انرژی الکترواستاتیک است. حال با توجه به ترکیب‌های مختلف ورودی، انرژی الکترواستاتیک را برای موقعیت‌های مختلف تک الکترون در سلول خطا مورد بررسی قرار می‌دهیم. با استفاده از رابطه ۲-۵ محاسبات مربوطه را انجام می‌دهیم. نتایج این محاسبات در جدول ۴-۵ گردآوری شده است. واحد انرژی الکترواستاتیک در این جدول بر حسب  $ev$  است.

جدول ۴-۵: موقعیت پایدار تک الکترون سلول خطا در دروازه‌ی NNI

ورودی	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	موقعیت پایدار
۰۰۰	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۳۲	۱/۳۴	۲
۰۰۱	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۳۳	۱/۳۳	۱
۰۱۰	۱/۲۴	۱/۲۳	۱/۳۱	۱/۳۳	۲
۰۱۱	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۳۳	۱/۳۳	۲
۱۰۰	۱/۲۲	۱/۲۲	۱/۳۲	۱/۳۲	۱
۱۰۱	۱/۲۳	۱/۲۴	۱/۳۳	۱/۳۱	۱
۱۱۰	۱/۲۲	۱/۲۲	۱/۳۲	۱/۳۲	۲
۱۱۱	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۳۴	۱/۳۲	۱

اکنون با توجه به تعیین موقعیت تک الکترون در سلول خطا می‌توانیم خروجی را تعیین کنیم. در جدول ۵-۵ با توجه به موقعیت پایدار تک الکترون به ازای ترکیب ورودی  $A=0$ ،  $B=0$  و  $C=0$  مقادیر انرژی الکترواستاتیک برای خروجی دروازه‌ی منطقی NNI محاسبه شده است.

جدول ۵-۵: موقعیت پایدار خروجی دروازه‌ی NNI با وجود خطای تک الکترون

ورودی	موقعیت الکترون در سلول خطا	پلاریزاسیون خروجی صفر	پلاریزاسیون خروجی یک	خروجی پایدار
۰۰۰	۲	۱/۹۵	۱/۹۹	۰

در جدول ۶-۵ نتایج محاسبات بر روی خطای تک الکترون در دروازه‌ی منطقی NNI نوشته شده است.

جدول ۵-۶: مشخصات دروازه‌ی NNI با وجود خطای تک الکترون در رویکرد سه پالس با ورودی ثابت

ورودی	موقعیت پایدار	$\Delta E$	خروجی	نتیجه
۰۰۰	۲	۰/۶۴	۱	خطا
۰۰۱	۱	۰/۱۵	۱	خطا
۰۱۰	۲	۰/۷۶	۰	خطا
۰۱۱	۲	۰/۱۵	۰	خطا
۱۰۰	۱	۰/۱۵	۱	خطا
۱۰۱	۱	۰/۷۶	۱	خطا
۱۱۰	۲	۰/۱۵	۰	خطا
۱۱۱	۱	۰/۶۴	۰	خطا
نرخ خطا				٪۱۰۰

در این جدول به ازای ترکیب‌های مختلف ورودی و موقعیت پایدار تک الکترون در سلول خطا، خروجی دروازه تعیین شده است. با توجه به مقایسه انجام شده با خروجی صحیح دروازه‌ی NNI، نرخ خطا در این دروازه با وجود خطای تک الکترون برابر با ٪۱۰۰ است. در جدول ۵-۷ نتایج مربوط به سه رویکرد مختلف پالس‌دهی نشان داده شده است. همچنین مقدار  $\Delta E$  برای ورودی‌های مختلف محاسبه و گزارش شده است. در رویکردهای مختلف پالس‌دهی پایداری خروجی دچار تغییر می‌شود و در روش بدون پالس خروجی دارای کم‌ترین پایداری است.

جدول ۵-۷: مشخصات دروازه‌ی NNI با وجود خطای تک الکترون در سه رویکرد پالس‌دهی

ورودی	بدون پالس	$\Delta E$	سه پالس با ورودی ثابت	$\Delta E$	سه پالس با ورودی متغیر	$\Delta E$	مقدار مطلوب
۰۰۰	۰	۰/۰۷	۰	۱/۲۷	۰	۱/۲۷	۱
۰۰۱	۱	۰/۰۱	۱	۱/۲۷	۱	۱/۲۷	۰
۰۱۰	۰	۰/۱۰	۰	۱/۲۷	۰	۱/۲۷	۱
۰۱۱	۰	۰/۰۱	۰	۱/۲۷	۰	۱/۲۷	۱
۱۰۰	۱	۰/۰۱	۱	۱/۲۷	۱	۱/۲۷	۰
۱۰۱	۱	۰/۱۰	۱	۱/۲۷	۱	۱/۲۷	۰
۱۱۰	۰	۰/۰۱	۰	۱/۲۷	۰	۱/۲۷	۱
۱۱۱	۱	۰/۰۷	۱	۱/۲۷	۱	۱/۲۷	۰

در جدول ۵-۸ نرخ خطا برای سه رویکرد مختلف پالس‌دهی نشان داده شده است. در این دروازه تغییر رویکرد پالس‌دهی تأثیری بر روی خروجی نداشته و در تمامی روش‌ها نرخ خطا یکسان است.

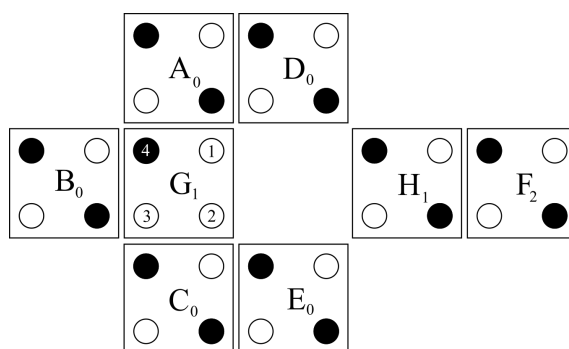
جدول ۵-۸: نرخ خطا در دروازه‌ی NNI با خطای تک الکترون

نرخ خطا	رویکرد پالس دهی
٪۱۰۰	بدون پالس
٪۱۰۰	سه پالس با ورودی ثابت
٪۱۰۰	سه پالس با ورودی متغیر

تمام این محاسبات با تغییر فاصله‌ی بین دو نقطه‌ی کوانتومی در ابعاد مولکولی یعنی  $7\text{\AA}$  تکرار شد و نتایج یکسانی به دست آمد.

## ۴-۵ دروازه‌ی AOI

دروازه‌ی منطقی AOI با خطای تک الکترون در شکل ۵-۳ نشان داده شده است. بررسی



شکل ۵-۳: دروازه‌ی منطقی AOI با خطای تک الکترون در سلول G

خطای تک الکترون در دروازه‌ی منطقی AOI در سلول‌های G و H به صورت جداگانه انجام شده است. ابتدا با در نظر گرفتن سلول G به عنوان سلول خطا محاسبات را انجام داده و مقدار منطقی خروجی را به دست می‌آوریم. حال با توجه به رویکرد سه پالس ورودی ثابت و به ازای ترکیب‌های ورودی مختلف موقعیت تک الکترون را در سلول خطای مربوطه محاسبه می‌کنیم. با توجه به این که موقعیت تک الکترون در سلول خطا و قطبیت سلول H در یک پالس تعیین می‌شوند باید به صورت هم‌زمان کم‌ترین مقدار انرژی را به دست بیاوریم. با استفاده از رابطه ۵-۲ محاسبات مربوط به موقعیت تک الکترون در سلول G و قطبیت در سلول H انجام شد و در جدول ۵-۹ جمع‌آوری شده است.

اکنون با در نظر گرفتن موقعیت تک الکترون در سلول G می‌توان خروجی دروازه‌ی منطقی AOI را به ازای ترکیب‌های مختلف ورودی محاسبه کرد. در جدول ۵-۱۰ مقدار انرژی الکترواستاتیک برای خروجی دروازه محاسبه شده است که برابر با کم‌ترین مقدار انرژی است.

جدول ۵-۹: موقعیت پایدار تک الکترون دروازه‌ی AOI در سلول خطای G

ورودی	پلاریزاسیون سلول (H)	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	موقعیت پایدار
۰۱۰۰۰	۱	۴/۴۴	۴/۴۲	۴/۴۶	۴/۳۸	۴
۰۱۰۰۱	۱	۴/۳۸	۴/۳۹	۴/۴۴	۴/۴۰	۱
۰۱۰۱۰	۰	۴/۴۴	۴/۴۰	۴/۴۰	۴/۴۱	۲
۰۱۰۱۱	۰	۴/۳۹	۴/۳۸	۴/۴۰	۴/۴۴	۲
۰۱۱۰۰	۱	۴/۴۶	۴/۴۷	۴/۴۳	۴/۳۹	۴
۰۱۱۰۱	۱	۴/۴۰	۴/۴۴	۴/۴۱	۴/۴۰	۱
۰۱۱۱۰	۰	۴/۴۷	۴/۴۶	۴/۳۹	۴/۴۳	۳
۰۱۱۱۱	۰	۴/۴۲	۴/۴۴	۴/۳۸	۴/۴۶	۳
۰۰۰۰۰	۱	۴/۳۹	۴/۳۸	۴/۴۳	۴/۳۵	۴
۰۰۰۱۰	۱	۴/۳۸	۴/۳۶	۴/۳۷	۴/۴۳	۲

جدول ۵-۱۰: موقعیت پایدار خروجی دروازه‌ی AOI با وجود خطای تک الکترون در سلول G

ورودی	موقعیت الکترون در سلول خطا	پلاریزاسیون خروجی صفر	پلاریزاسیون خروجی یک	خروجی پایدار
۰۱۰۰۰	۴	۵/۴۷	۵/۴۴	۱

در جدول ۵-۱۱ نتایج محاسبات بر روی خطای تک الکترون در دروازه منطقی AOI وقتی خطا در سلول G باشد نوشته شده است.

جدول ۵-۱۱: مشخصات دروازه‌ی AOI با وجود خطای تک الکترون در سلول G

ورودی	G موقعیت پایدار	خروجی	نتیجه
۰۱۰۰۰	۴	۱	خطا
۰۱۰۰۱	۱	۱	خطا
۰۱۰۱۰	۲	۰	درست
۰۱۰۱۱	۲	۰	خطا
۰۱۱۰۰	۴	۱	خطا
۰۱۱۰۱	۱	۱	درست
۰۱۱۱۰	۳	۰	خطا
۰۱۱۱۱	۳	۰	خطا
۰۰۰۰۰	۴	۱	درست
۱۱۱۱۱	۲	۱	خطا
نرخ خطا			٪۶۰

در این جدول به ازای ترکیب‌های مختلف ورودی و موقعیت پایدار تک الکترون در سلول خطا، خروجی دروازه تعیین شده است. با توجه به مقایسه انجام شده با خروجی صحیح دروازه‌ی AOI نرخ خطا در این حالت برابر با ٪۶۰ است. اگر به‌عنوان دروازه‌ی AND استفاده

شود در صورتی که ورودی‌های A و C با هم برابر و B معکوس آن‌ها باشد خروجی مقدار صحیحی دارد. در ادامه اگر به‌عنوان دروازه‌ی OR استفاده شود در صورتی که ورودی‌های A و C با هم برابر و B معکوس آن‌ها باشد خروجی مقدار صحیحی دارد. و در انتها اگر به‌عنوان دروازه‌ی معکوس‌کننده استفاده شود خروجی به‌ازای ورودی‌های مختلف مقدار صحیحی دارد. در جدول ۵-۱۲ نتایج به‌دست آمده برای سه رویکرد پالس‌دهی گزارش شده است. در رویکردهای مختلف پالس‌دهی پایداری خروجی دچار تغییر می‌شود و در روش بدون پالس خروجی دارای کم‌ترین پایداری است.

جدول ۵-۱۲: مشخصات دروازه‌ی AOI با وجود خطای تک الکترون در سلول G در سه رویکرد پالس‌دهی

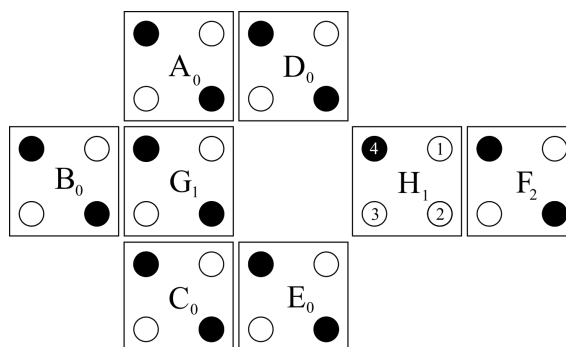
ورودی	بدون پالس	$\Delta E$	سه پالس با ورودی ثابت	$\Delta E$	سه پالس با ورودی متغیر	$\Delta E$	مقدار مطلوب
۰۱۰۰۰	۱	۰/۰۳	۱	۱/۰۹	۱	۱/۰۹	۰
۰۱۰۰۱	۱	۰/۰۵	۱	۱/۰۹	۱	۱/۰۹	۰
۰۱۰۱۰	۰	۰/۰۰۴	۰	۱/۰۹	۰	۱/۰۹	۰
۰۱۰۱۱	۰	۰/۰۵	۰	۱/۰۹	۰	۱/۰۹	۱
۰۱۱۰۰	۱	۰/۰۱	۱	۱/۰۹	۱	۱/۰۹	۰
۰۱۱۰۱	۱	۰/۰۰۴	۱	۱/۰۹	۱	۱/۰۹	۱
۰۱۱۱۰	۰	۰/۰۱	۰	۱/۰۹	۰	۱/۰۹	۱
۰۱۱۱۱	۰	۰/۰۳	۰	۱/۰۹	۰	۱/۰۹	۱
۰۰۰۰۰	۱	۰/۵۳	۱	۱/۰۹	۱	۱/۰۹	۱
۱۱۱۱۱	۰	۰/۵۳	۰	۱/۰۹	۰	۱/۰۹	۰

در جدول ۵-۱۳ نرخ خطا در روش‌های مختلف پالس‌دهی آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌کنید تغییر روش پالس‌دهی تأثیری در نتیجه‌ی خروجی ندارد و در هر سه روش نرخ خطا یکسان است.

جدول ۵-۱۳: نرخ خطا در دروازه‌ی AOI با خطای تک الکترون در سلول G

نرخ خطا	رویکرد پالس‌دهی
٪۶۰	بدون پالس
٪۶۰	سه پالس با ورودی ثابت
٪۶۰	سه پالس با ورودی متغیر

در ادامه با در نظر گرفتن خطای تک الکترون در سلول H مطابق با شکل ۵-۴ مقدار منطقی خروجی را محاسبه می‌کنیم. به‌طور مشابه به ازای ترکیب‌های مختلف ورودی با توجه به هم پالس بودن سلول H و



شکل ۴-۵: دروازه‌ی منطقی AOI با خطای تک الکترون در سلول H

سلول G کم‌ترین مقدار انرژی الکترواستاتیک را به‌صورت هم‌زمان در این دو سلول محاسبه می‌کنیم. نتایج این محاسبات در جدول ۴-۵ گردآوری شده است.

جدول ۴-۵: موقعیت پایدار تک الکترون دروازه‌ی AOI در سلول خطای H

ورودی	پلاریزاسیون سلول (G)	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	موقعیت پایدار
۰۱۰۰۰	۰	۴/۶۶	۴/۶۶	۴/۷۷	۴/۷۷	۱
۰۱۰۰۱	۰	۴/۶۷	۴/۶۷	۴/۷۸	۴/۷۸	۱
۰۱۰۱۰	۰	۴/۶۷	۴/۶۷	۴/۷۹	۴/۷۹	۱
۰۱۰۱۱	۱	۴/۶۷	۴/۶۷	۴/۷۸	۴/۷۸	۲
۰۱۱۰۰	۰	۴/۷	۴/۷	۴/۸۱	۴/۸۱	۱
۰۱۱۰۱	۱	۴/۶۷	۴/۶۷	۴/۷۹	۴/۷۹	۲
۰۱۱۱۰	۱	۴/۷	۴/۷	۴/۸۱	۴/۸۱	۲
۰۱۱۱۱	۱	۴/۶۶	۴/۶۶	۴/۷۷	۴/۷۷	۲
۰۰۰۰۰	۰	۴/۶	۴/۶	۴/۷۲	۴/۷۳	۲
۰۰۰۱۰	۰	۴/۶۲	۴/۶۲	۴/۷۴	۴/۷۵	۲

حال با در نظر گرفتن موقعیت تک الکترون در سلول H می‌توان خروجی دروازه‌ی منطقی AOI را به ازای ترکیب‌های مختلف ورودی و با دانستن کم‌ترین مقدار انرژی در سلول G محاسبه کرد. در جدول ۴-۵ مقدار انرژی الکترواستاتیک برای خروجی این دروازه محاسبه شده است.

جدول ۴-۵: موقعیت پایدار خروجی دروازه‌ی AOI با وجود خطای تک الکترون در سلول H

ورودی	موقعیت الکترون در سلول خطا	پلاریزاسیون خروجی صفر	پلاریزاسیون خروجی یک	خروجی پایدار
۰۱۰۰۰	۱	۵/۶۸	۵/۶۴	۱

در جدول ۴-۵ نتایج محاسبات بر روی خطای تک الکترون در دروازه منطقی AOI وقتی خطا در سلول H باشد نوشته شده است. با توجه به مقایسه انجام شده با خروجی صحیح دروازه‌ی AOI نرخ خطا در این دروازه برابر با ۱۰۰٪ است. یعنی اگر در دروازه‌ی

جدول ۵-۱۶: مشخصات دروازه‌ی AOI با وجود خطای تک الکترون در سلول H

ورودی	پلاریزاسیون پایدار سلول (G)	موقعیت پایدار سلول (H)	خروجی	نتیجه
۰۱۰۰۰	۰	۱	۱	خطا
۰۱۰۰۱	۰	۱	۱	خطا
۰۱۰۱۰	۰	۱	۱	خطا
۰۱۰۱۱	۱	۲	۰	خطا
۰۱۱۰۰	۰	۱	۱	خطا
۰۱۱۰۱	۱	۲	۰	خطا
۰۱۱۱۰	۱	۲	۰	خطا
۰۱۱۱۱	۱	۲	۰	خطا
۰۰۰۰۰	۰	۲	۱	خطا
۰۰۰۱۰	۰	۲	۱	درست
نرخ خطا				٪۱۰۰

AOI خطا در سلول H رخ دهد خروجی به ازای مقادیر مختلف ورودی مقدار صحیحی ندارد. همچنین در جدول ۵-۱۷ نتایج محاسبات در سه رویکرد مختلف پالس‌دهی آورده شده است. در رویکردهای مختلف پالس‌دهی پایداری خروجی دچار تغییر می‌شود و در روش بدون پالس خروجی دارای کم‌ترین پایداری است.

جدول ۵-۱۷: مشخصات دروازه‌ی AOI با وجود خطای تک الکترون در سلول H در سه رویکرد پالس‌دهی

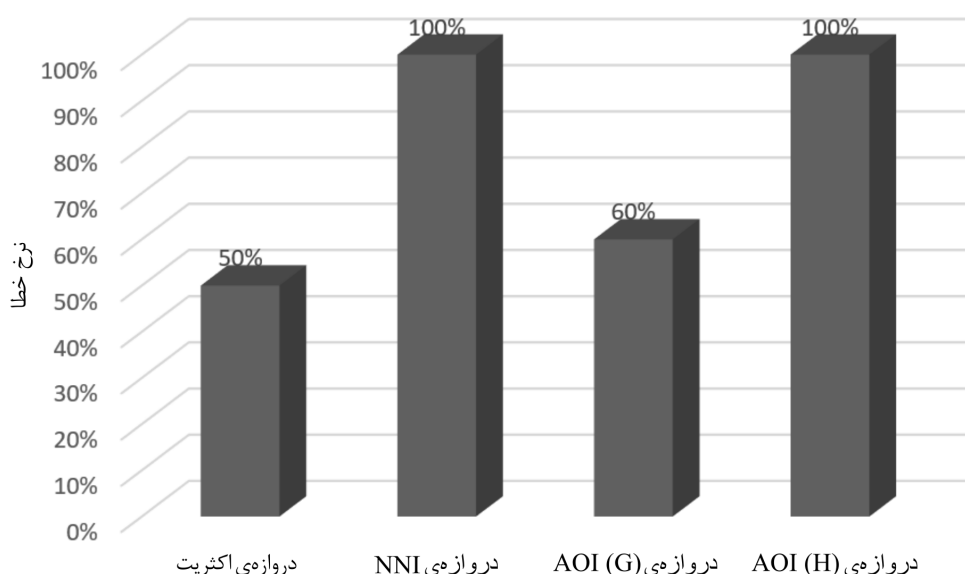
ورودی	بدون پالس	$\Delta E$	سه پالس با ورودی ثابت	$\Delta E$	سه پالس با ورودی متغیر	$\Delta E$	مقدار مطلوب
۰۱۰۰۰	۱	۰/۰۲	۱	۱/۲۷	۱	۱/۲۷	۰
۰۱۰۰۱	۱	۰/۰۱	۱	۱/۲۷	۱	۱/۲۷	۰
۰۱۰۱۰	۱	۰/۰۱	۱	۱/۲۷	۱	۱/۲۷	۰
۰۱۰۱۱	۰	۰/۰۱	۰	۱/۲۷	۰	۱/۲۷	۱
۰۱۱۰۰	۱	۰/۰۱	۱	۱/۲۷	۱	۱/۲۷	۰
۰۱۱۰۱	۰	۰/۰۱	۰	۱/۲۷	۰	۱/۲۷	۱
۰۱۱۱۰	۰	۰/۰۱	۰	۱/۲۷	۰	۱/۲۷	۱
۰۱۱۱۱	۰	۰/۰۲	۰	۱/۲۷	۰	۱/۲۷	۱
۰۰۰۰۰	۰	۰/۰۷	۰	۱/۲۷	۰	۱/۲۸	۱
۱۱۱۱۱	۱	۰/۰۷	۱	۱/۲۷	۱	۱/۲۸	۰

در جدول ۵-۱۸ نرخ خطا در سه روش پالس‌دهی جمع‌آوری شده و همانطور که مشاهده می‌کنید در تمامی روش‌ها نرخ خطا یکسان است.

جدول ۵-۱۸: نرخ خطا در دروازه‌ی AOI با خطای تک الکترون در سلول H

نرخ خطا	رویکرد پالس‌دهی
۱۰۰٪	بدون پالس
۱۰۰٪	سه پالس با ورودی ثابت
۱۰۰٪	سه پالس با ورودی متغیر

تمام این محاسبات با تغییر فاصله‌ی بین دو نقطه‌ی کوانتومی در ابعاد مولکولی یعنی  $7\text{\AA}$  تکرار شد و نتایج یکسانی به دست آمد. در نمودار ۵-۵ نرخ خطای دروازه‌های بررسی شده به روش سه پالس با ورودی ثابت جمع‌آوری شده است.

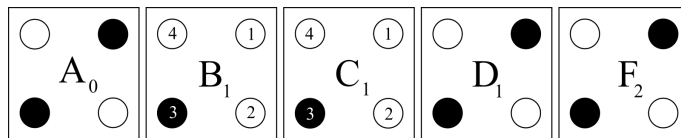


شکل ۵-۵: نرخ خطا در دروازه‌های بررسی شده به روش سه پالس با ورودی ثابت

## ۵-۵ سیم دودویی

در این قسمت به خطای تک الکترون در سیم دودویی می‌پردازیم. در گزارش‌های قبلی خطای تک الکترون برای سیم دودویی و برای یک سلول انجام شده است که خروجی سیم معکوس ورودی بوده است [۱۲]. اما در این گزارش خطای تک الکترون در دو سلول سیم دودویی به صورت هم‌زمان رخ می‌دهد. سیم مورد بررسی دارای پنج سلول QCA است که در شکل ۵-۶ نشان داده شده است. محاسبه‌ی خطا با دو رویکرد انجام می‌شود که در ابتدا خطا در دو سلول مجاور رخ می‌دهد و در بخش بعدی یک سلول بین دو سلول خطا قرار می‌گیرد و با توجه به رابطه‌ی ۵-۲ محاسبات مربوط به آن جمع‌آوری می‌شود.





شکل ۵-۶: سیم دودویی با خطای تک الکترون در دو سلول مجاور

با توجه به رویکرد سه پالس با ورودی ثابت، برای بررسی خطا در سیم دودویی به ازای ورودی‌های منطقی مختلف موقعیت تک الکترون در سلول B محاسبه شد و نتایج آن در جدول ۵-۱۹ آورده شده است. با در نظر گرفتن موقعیت تک الکترون در سلول خطای B

جدول ۵-۱۹: انرژی الکترواستاتیک سیم دودویی با وجود خطای تک الکترون در سلول B

ورودی	موقعیت ۱	موقعیت ۲	موقعیت ۳	موقعیت ۴
۰	۰/۲۳	۰/۲۴	۰/۳۴	۰/۳
۱	۰/۲۴	۰/۲۳	۰/۳	۰/۳۴

که مقدار موردنظر ما کم‌ترین مقدار انرژی الکترواستاتیک است، موقعیت تک الکترون را در سلول خطای C محاسبه می‌کنیم. نتایج محاسبات در جدول ۵-۲۰ آورده شده است.

جدول ۵-۲۰: انرژی الکترواستاتیک سیم دودویی با وجود خطای تک الکترون در سلول C

ورودی	موقعیت ۱	موقعیت ۲	موقعیت ۳	موقعیت ۴
۰	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۴۴	۰/۴۸
۱	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۴۸	۰/۴۴

با در نظر گرفتن موقعیت تک الکترون در سلول‌های خطا مقدار منطقی خروجی محاسبه شده و در جدول ۵-۲۱ گردآوری شده است. نتایج خروجی نشان می‌دهد که اگر سیم دودویی

جدول ۵-۲۱: مشخصات سیم دودویی با وجود خطای تک الکترون در دو سلول کنار هم

ورودی	پلاریزاسیون خروجی صفر	پلاریزاسیون خروجی یک
۰	۱/۵۵	۱/۵۸
۱	۱/۵۸	۱/۵۵
	نرخ خطا	%۰

موردنظر دارای دو سلول خطای تک الکترون باشد خروجی مقدار صحیح را نشان می‌دهد. در ادامه رویکردهای مختلف پالس‌دهی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در جدول ۵-۲۲ نتایج به‌دست آمده گردآوری شده است.

در رویکردهای مختلف پالس‌دهی پایداری خروجی دچار تغییر می‌شود و در روش بدون پالس خروجی دارای کم‌ترین پایداری است.

جدول ۵-۲۲: مشخصات سیم دودویی با خطای تک الکترون در دو سلول مجاور در سه رویکرد پالس‌دهی

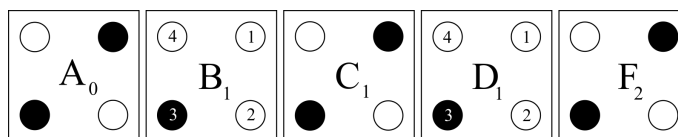
مقدار مطلوب	$\Delta E$	سه پالس با ورودی متغیر	$\Delta E$	سه پالس با ورودی ثابت	$\Delta E$	بدون پالس	ورودی
۰	۱/۰۹	۰	۱/۰۹	۰	۰/۱۹	۰	۰
۱	۱/۰۹	۱	۱/۰۹	۱	۰/۱۹	۱	۱

در جدول ۵-۲۳ نرخ خطا در سه روش پالس‌دهی جمع‌آوری شده و همانطور که مشاهده می‌کنید در تمامی روش‌ها نرخ خطا یکسان است.

جدول ۵-۲۳: سه رویکرد پالس‌دهی در سیم دودویی با خطای تک الکترون در دو سلول مجاور

نرخ خطا	رویکرد پالس‌دهی
%۰	بدون پالس
%۰	سه پالس با ورودی ثابت
%۰	سه پالس با ورودی متغیر

تمام این محاسبات با تغییر فاصله‌ی بین دو نقطه‌ی کوانتومی در ابعاد مولکولی یعنی  $7\text{\AA}$  تکرار شد و نتایج یکسانی به‌دست آمد. حال به بررسی رویکرد دوم می‌پردازیم. همانطور که در شکل ۵-۷ نشان داده شده است در این حالت بین دو سلول خطای یک سلول قرار می‌گیرد.



شکل ۵-۷: سیم دودویی با خطای تک الکترون در دو سلول غیر مجاور

انرژی الکترواستاتیک و موقعیت تک الکترون در سلول B مطابق حالت قبل است که در جدول ۵-۱۹ آورده شده است. با توجه به موقعیت تک الکترون در سلول B و مقدار منطقی محاسبه شده برای سلول C موقعیت تک الکترون را در سلول D محاسبه و بررسی می‌کنیم. نتایج به‌دست آمده از این محاسبات در جدول ۵-۲۴ گردآوری شده است.

جدول ۵-۲۴: انرژی الکترواستاتیک سیم دودویی با وجود خطای تک الکترون در سلول D

موقعیت ۴	موقعیت ۳	موقعیت ۲	موقعیت ۱	ورودی
۱/۰۴	۱	۰/۹۱	۰/۹۲	۰
۱	۱/۰۴	۰/۹۲	۰/۹۱	۱

در انتها با در نظر گرفتن موقعیت تک الکترون در سلول B و سلول D مقدار منطقی خروجی سیم دودویی را محاسبه کرده و نتایج به دست آمده در جدول ۵-۲۵ جمع آوری شده است.

جدول ۵-۲۵: مشخصات سیم دودویی با وجود خطای تک الکترون در دو سلول جدا از هم

ورودی	پلاریزاسیون خروجی یک	پلاریزاسیون خروجی یک
۰	۱/۵۲	۱/۵۶
۱	۱/۵۶	۱/۵۲
	نرخ خطا	%۰

از مقادیر جدول فوق این نتیجه را می توان گرفت که اگر دو سلول A و C به صورت هم زمان دچار خطای تک الکترون شوند خروجی سیم دودویی مقدار صحیح را نشان داده و تغییر نمی کنند. در ادامه رویکردهای مختلف پالس دهی مورد بررسی قرار می گیرد که در جدول ۵-۲۶ نتایج به دست آمده گردآوری شده است.

جدول ۵-۲۶: مشخصات سیم دودویی با خطای تک الکترون در دو سلول غیر مجاور در سه رویکرد پالس دهی

ورودی	بدون پالس	$\Delta E$	سه پالس با ورودی ثابت	$\Delta E$	سه پالس با ورودی متغیر	$\Delta E$	مقدار مطلوب
۰	۰	۰/۱۷	۰	۱/۲۴	۰	۱/۲۴	۰
۱	۱	۰/۱۷	۱	۱/۲۴	۱	۱/۲۴	۱

در رویکردهای مختلف پالس دهی پایداری خروجی دچار تغییر می شود و در روش بدون پالس خروجی دارای کمترین پایداری است.

در جدول ۵-۲۷ نرخ خطا در سه روش پالس دهی جمع آوری شده و همانطور که مشاهده می کنید در تمامی روش ها نرخ خطا یکسان است.

جدول ۵-۲۷: سه رویکرد پالس دهی در سیم دودویی با خطای تک الکترون در دو سلول غیر مجاور

رویکرد پالس دهی	نرخ خطا
بدون پالس	%۰
سه پالس با ورودی ثابت	%۰
سه پالس با ورودی متغیر	%۰

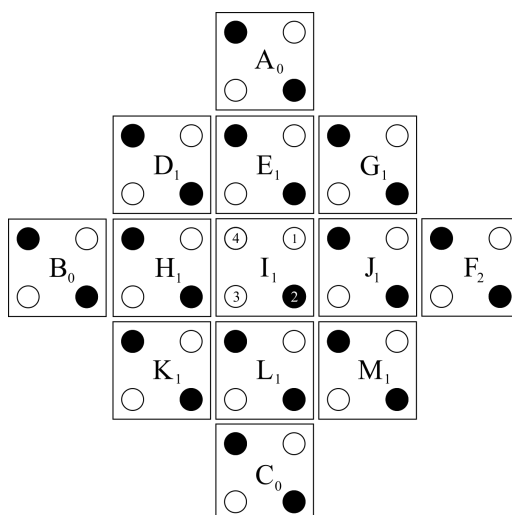
تمام این محاسبات با تغییر فاصله ی بین دو نقطه ی کوانتومی در ابعاد مولکولی یعنی  $7\text{\AA}$  تکرار شد و نتایج یکسانی به دست آمد.

## ۵-۶ تحمل‌پذیری خطا در دروازه‌ی اکثریت

با توجه به بررسی‌های انجام شده بر روی دروازه‌ی اکثریت اگر سلول تصمیم‌گیر آن دچار خطای تک الکترون شود ۵۰٪ از اطلاعات خروجی درست خواهند بود. اکنون در این بخش ساختارهای جدیدی از دروازه‌ی اکثریت ارائه می‌دهیم که تحمل‌پذیری بیشتری نسبت به خطای تک الکترون از خود نشان می‌دهند. لازم به ذکر است، تمامی نتایج و محاسبات به‌دست آمده برای این ساختارهای جدید، توسط برنامه‌ی پیچیده‌ای که توسط نرم‌افزار متلب نوشته شده انجام گرفته است.

### ۵-۶-۱ بررسی ساختار جدید با سیزده سلول

همانطور که در شکل ۵-۸ مشاهده می‌کنید این ساختار جدید از دروازه‌ی اکثریت دارای ۱۳ سلول است که سلول‌های A، B و C به‌عنوان ورودی و سلول F خروجی دروازه است. اگر



شکل ۵-۸: ساختار جدید دروازه‌ی اکثریت با سیزده سلول مقاوم در برابر خطای تک الکترون

در این ساختار خطا در سلول تصمیم‌گیر، یعنی سلول I با رویکرد پالس‌دهی سه پالس با ورودی ثابت اتفاق بیفتد نرخ خطا ۲۵٪ است که نسبت به دروازه‌ی اکثریت متداول از خود مقاومت بیشتری در برابر خطای تک الکترون نشان می‌دهد. در جدول ۵-۲۸ دیگر نتایج به‌دست آمده گزارش شده است. در رویکردهای مختلف پالس‌دهی پایداری خروجی دچار تغییر می‌شود و در روش بدون پالس خروجی دارای کم‌ترین پایداری است.

در جدول ۵-۲۹ نرخ خطا برای سه رویکرد مختلف پالس‌دهی نشان داده شده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت تغییر در نحوه‌ی پالس‌دهی می‌تواند باعث تغییر در نتیجه‌ی نهایی شود. همانطور که مشاهده می‌کنید در رویکرد بدون پالس نرخ خطای خروجی نسبت به دو رویکرد دیگر ۲۵٪ افزایش داشته است.

جدول ۵-۲۸: مشخصات دروازه‌ی اکثریت با سیزده سلول با وجود خطای تک الکترون در سه رویکرد پالس‌دهی

مقدار مطلوب	$\Delta E$	سه پالس با ورودی متغیر	$\Delta E$	سه پالس با ورودی ثابت	$\Delta E$	بدون پالس	ورودی
۰	۰/۶۴	۰	۰/۶۴	۰	۰/۱۳	۰	۰۰۰
۰	۰/۶۴	۰	۰/۶۴	۰	۰/۰۷	۱	۰۰۱
۰	۰/۶۳	۰	۰/۶۴	۰	۰/۶۲	۰	۰۱۰
۱	۰/۶۴	۱	۰/۶۴	۱	۰/۰۷	۰	۰۱۱
۰	۰/۶۱	۱	۰/۶۴	۱	۰/۰۷	۱	۱۰۰
۱	۰/۶۳	۱	۰/۶۴	۱	۰/۶۲	۱	۱۰۱
۱	۰/۶۱	۰	۰/۶۴	۰	۰/۰۷	۰	۱۱۰
۱	۰/۶۴	۱	۰/۶۴	۱	۰/۱۳	۱	۱۱۱

جدول ۵-۲۹: نرخ خطا در سه رویکرد پالس‌دهی برای دروازه‌ی اکثریت با سیزده سلول

نرخ خطا	رویکرد پالس‌دهی
٪۵۰	بدون پالس
٪۲۵	سه پالس با ورودی ثابت
٪۲۵	سه پالس با ورودی متغیر

با توجه به ویژگی‌هایی که در نرم‌افزار نوشته شده وجود دارد می‌توان سلول خطا را در ۹ موقعیت مختلف نام‌گذاری شده در شکل قرار داد و نتایج را مشاهده کرد. در نمودار ۵-۹ نتایج به‌دست آمده گزارش شده است.

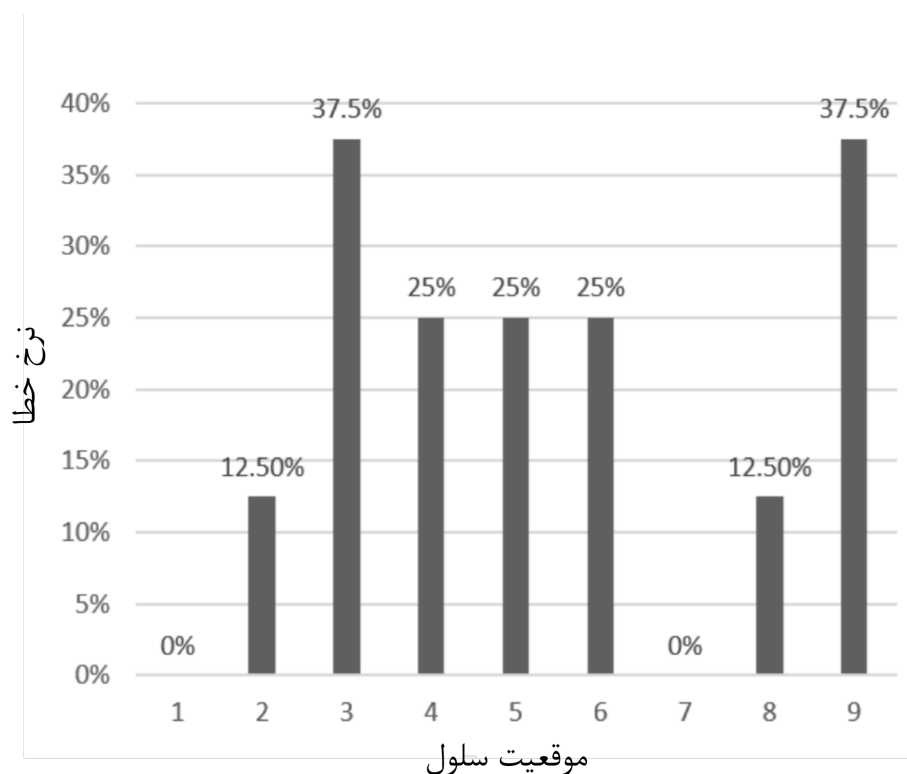
با توجه به رابطه‌ی ۵-۳ که مربوط به قانون احتمال کل است می‌تواند نرخ خطای کل را در این ساختار محاسبه کرد.

$$P(A) = \sum_n P(A \cap B_n) = \sum_n P(A|B_n)P(B_n) \quad (۵-۳)$$

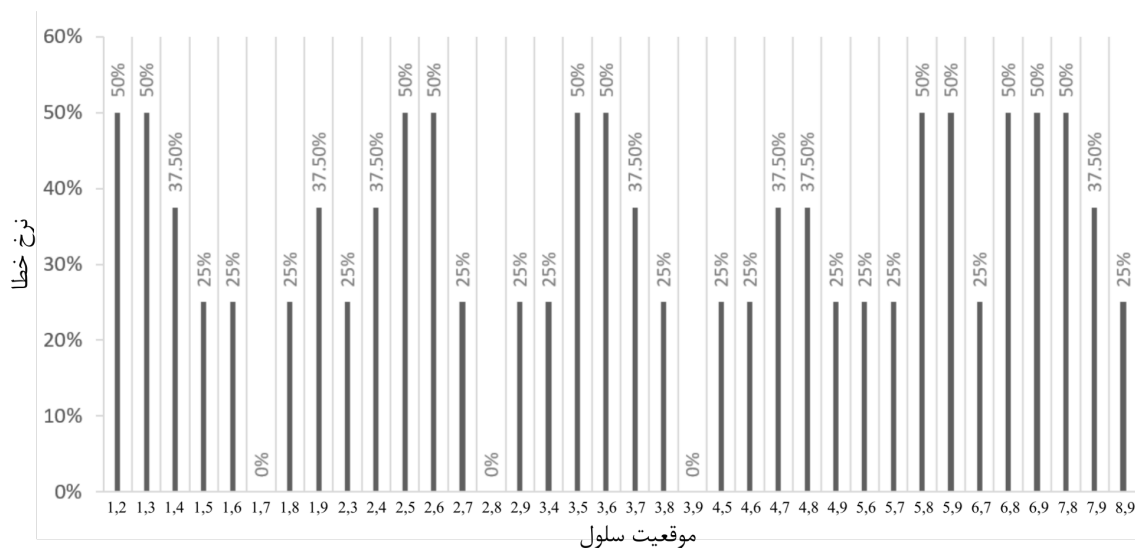
در این رابطه  $P(B_n)$  احتمال رخ داد خطا در سلول n ام و  $P(A|B_n)$  احتمال خطا در دروازه‌ی منطقی وقتی که سلول n ام انتخاب شده است. با قرار دادن مقادیر در این رابطه و انجام محاسبات به نرخ خطای کل ۱۹/۵٪ رسیدیم.

در ادامه حالتی بررسی شده است که دو سلول به‌صورت هم‌زمان دچار خطای تک الکترون شوند. در این مورد ۳۶ حالت انتخاب مختلف برای سلول خطا وجود دارد. در نمودار ۵-۱۰ نرخ خطای تمامی این حالت‌ها آورده شده است.

بنابراین، اگر در دروازه‌ی اکثریت با سیزده سلول دو سلول به‌صورت هم‌زمان دچار خطای تک الکترون شوند نرخ خطای کل برابر ۳۲/۷٪ می‌شود.



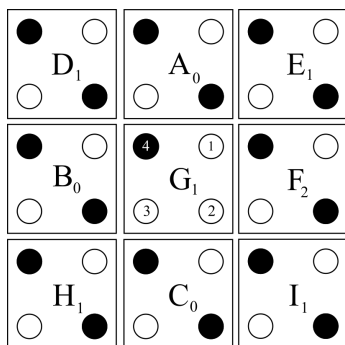
شکل ۵-۹: نرخ خطا در دروازه‌ی اکثریت با سیزده سلول و یک سلول خطا



شکل ۵-۱۰: نرخ خطا در دروازه‌ی اکثریت با سیزده سلول و دو سلول خطا

## ۵-۶-۲ بررسی ساختار جدید با نه سلول

در شکل ۵-۱۱ یک ساختار جدید از دروازه‌ی اکثریت که دارای ۹ سلول است طراحی شده است. در این ساختار برای تحمل‌پذیری بیشتر از دروازه‌ی اکثریت متداول، از ۴ سلول اضافی استفاده شده است که سلول‌های A، B و C به‌عنوان ورودی و F سلول خروجی است. اگر خطای تک الکترون در سلول تصمیم‌گیر رخ دهد در حالت پالس‌دهی سه پالس با ورودی ثابت



شکل ۵-۱۱: ساختار جدید دروازه‌ی اکثریت با نه سلول مقاوم در برابر خطای تک الکترون

نرخ خطا برابر با ۰.۲۵٪ خواهد بود که نسبت به دروازه‌ی اکثریت متداول ۰.۲۵٪ بهبود را نشان می‌دهد. اطلاعات تکمیلی درباره‌ی این شبیه‌سازی در جدول ۵-۳ آورده شده است. در این جدول نتایج مربوط به سه روش پالس‌دهی مختلف آورده شده است که در حالت سه پالس با ورودی متغیر خروجی دارای بیش‌ترین پایداری است.

جدول ۵-۳: مشخصات دروازه‌ی اکثریت با نه سلول با وجود خطای تک الکترون در سه رویکرد پالس‌دهی

مقدار مطلوب	$\Delta E$	سه پالس با ورودی متغیر	$\Delta E$	سه پالس با ورودی ثابت	$\Delta E$	بدون پالس	ورودی
۰	۱/۲۶	۰	۰/۸۱	۰	۰/۹۸	۰	۰۰۰
۰	۰/۸۹	۰	۰/۹۳	۰	۰/۱۷	۱	۰۰۱
۰	۱/۲۷	۰	۰/۷۶	۰	۰/۷۳	۰	۰۱۰
۱	۰/۸۹	۱	۰/۹۳	۱	۰/۱۷	۰	۰۱۱
۰	۱/۲۹	۱	۱/۲۶	۱	۰/۱۷	۱	۱۰۰
۱	۱/۲۷	۱	۰/۷۶	۱	۰/۷۳	۱	۱۰۱
۱	۱/۲۹	۰	۱/۲۶	۰	۰/۱۷	۰	۱۱۰
۱	۱/۲۶	۱	۰/۸۱	۱	۰/۹۸	۱	۱۱۱

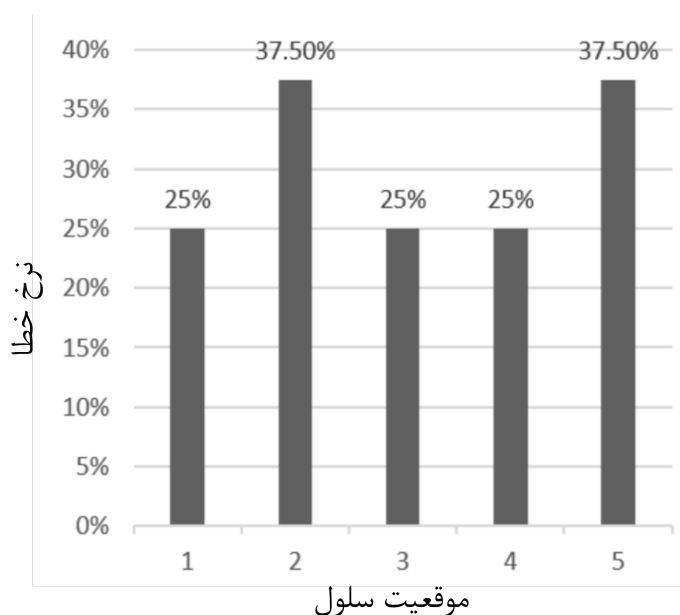
در جدول ۵-۳۱ نرخ خطا برای سه رویکرد مختلف پالس‌دهی نشان داده شده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت تغییر در نحوه‌ی پالس‌دهی می‌تواند باعث تغییر در نتیجه‌ی نهایی شود. همانطور که مشاهده می‌کنید در رویکرد بدون پالس نرخ خطای خروجی نسبت به دو رویکرد دیگر ۰.۲۵٪ افزایش داشته است.

همچنین این امکان وجود دارد که خطای تک الکترون در چهار سلول دیگر رخ دهد. با توجه به موقعیت سلول خطا، نرخ خطا برای این ساختار در نمودار ۵-۱۲ جمع‌آوری شده است.

با استفاده از رابطه‌ی ۵-۳ می‌توان در صورتی که فقط یک سلول دچار خطای تک الکترون شود نرخ خطای کل را محاسبه کرد. بنابراین، در دروازه‌ی اکثریت با نه سلول نرخ خطای

جدول ۵-۳۱: نرخ خطا در سه رویکرد پالس‌دهی برای دروازه‌ی اکثریت با نه سلول

رویکرد پالس‌دهی	نرخ خطا
بدون پالس	۵۰٪
سه پالس با ورودی ثابت	۲۵٪
سه پالس با ورودی متغیر	۲۵٪



شکل ۵-۱۲: نرخ خطا در دروازه‌ی اکثریت با نه سلول و یک سلول خطا

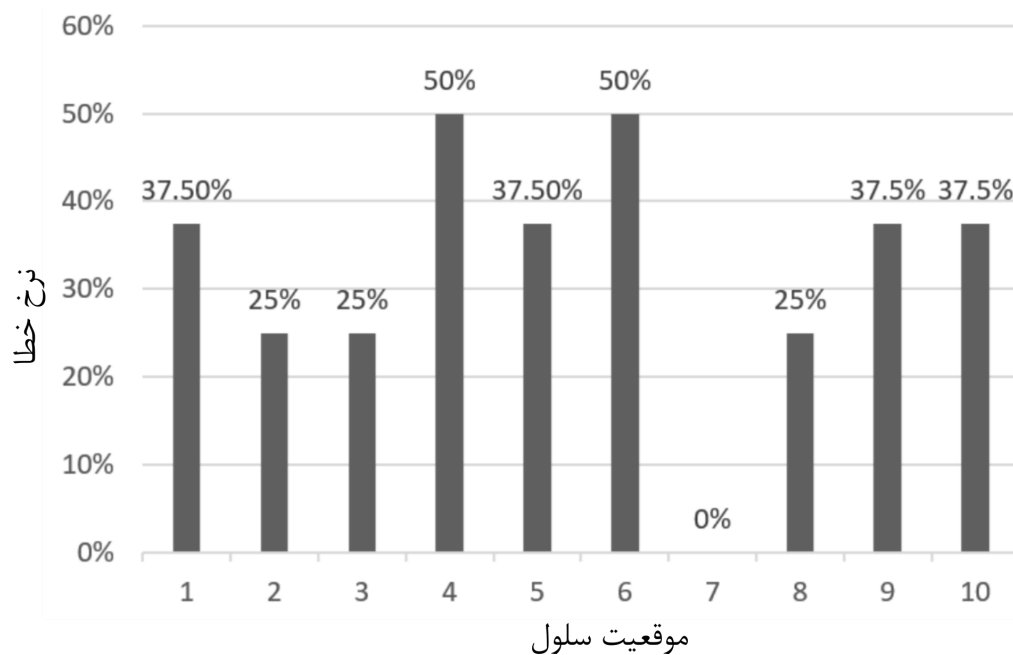
کل برابر با ۳۰٪ است. در ادامه حالتی بررسی می‌شود که خطای تک الکترون در دو سلول به صورت هم‌زمان رخ دهد. در این مورد ۱۰ حالت انتخاب مختلف برای سلول خطا وجود دارد. در نمودار ۵-۱۳ نرخ خطای تمامی این حالت‌ها آورده شده است. بنابراین، اگر در دروازه‌ی اکثریت با نه سلول دو سلول به صورت هم‌زمان دچار خطای تک الکترون شوند نرخ خطای کل برابر ۳۲/۵٪ می‌شود.

### ۵-۶-۳ بررسی ساختار جدید با شش سلول

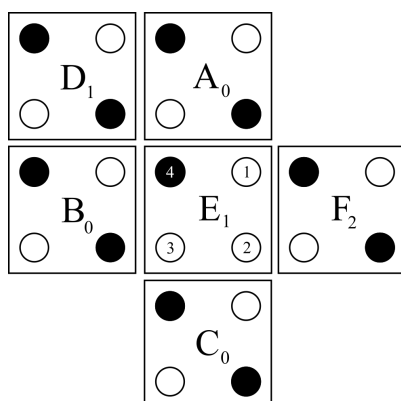
یک ساختار جدید دیگر که برای تحمل‌پذیری خطای تک الکترون برای دروازه‌ی اکثریت طراحی شده در شکل ۵-۱۴ نشان داده شده است. این ساختار دارای ۶ سلول بوده و فقط با یک سلول اضافی در بالا نتایج بهتری را نسبت به دروازه‌ی اکثریت متداول ارائه می‌دهد. در این ساختار خطای تک الکترون در سلول E اتفاق افتاده است. با استفاده از نرم‌افزار نوشته شده شبیه‌سازی مربوط به این ساختار انجام شده است که نتایج آن در جدول ۵-۳۲ گردآوری شده است.

با توجه به جدول در حالت سه پالس با ورودی ثابت خروجی دارای بیش‌ترین پایداری و در





شکل ۵-۱۳: نرخ خطا در دروازه‌ی اکثریت با نه سلول و دو سلول خطا



شکل ۵-۱۴: ساختار جدید دروازه‌ی اکثریت با شش سلول حالت اول مقاوم در برابر خطای تک الکترون

حالت بدون پالس کم‌ترین پایداری را شاهد هستیم.

در جدول ۵-۳۳ نرخ خطا برای سه رویکرد مختلف پالس‌دهی نشان داده شده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت تغییر در نحوه‌ی پالس‌دهی می‌تواند باعث تغییر در نتیجه‌ی نهایی شود. همانطور که مشاهده می‌کنید در رویکرد بدون پالس نرخ خطای خروجی نسبت به دو رویکرد دیگر ۱۲/۵٪ افزایش داشته است. همچنین ۳۷/۵٪ بهبود خطا در رویکرد پالس‌دهی بدون پالس و ۲۵٪ در دیگر روش‌های پالس‌دهی نسبت به دروازه‌ی اکثریت متداول شاهد هستیم.

لازم به ذکر است که اگر خطای تک الکترون در سلول D رخ دهد نرخ خطا ۰٪ بوده؛ بنابراین به ازای تمامی حالت‌های ورودی، خروجی صحیحی نمایش داده می‌شود. همچنین

جدول ۵-۳۲: مشخصات دروازه‌ی اکثریت با شش سلول حالت اول با وجود خطا در یک سلول در سه رویکرد پالس‌دهی

ورودی	بدون پالس	$\Delta E$	سه پالس با ورودی ثابت	$\Delta E$	سه پالس با ورودی متغیر	$\Delta E$	مقدار مطلوب
۰۰۰	۰	۰/۶۶	۰	۰/۶۶	۰	۱/۱۲	۰
۰۰۱	۰	۰/۳۱	۰	۱/۱۷	۰	۱/۱۳	۰
۰۱۰	۰	۰/۶۱	۰	۰/۶۱	۰	۱/۱۳	۰
۰۱۱	۰	۰/۶۲	۰	۱/۱۰	۰	۱/۱۳	۱
۱۰۰	۰	۰/۴۰	۰	۱/۱۵	۰	۱/۱۲	۰
۱۰۱	۱	۰/۲۸	۱	۰/۹۰	۱	۱/۴۲	۱
۱۱۰	۰	۰/۰۱	۰	۱/۱۰	۰	۱/۱۳	۱
۱۱۱	۰	۰/۵۰	۱	۰/۹۶	۱	۱/۴۲	۱

جدول ۵-۳۳: نرخ خطای تک الکترون در یک سلول برای دروازه‌ی اکثریت با شش سلول حالت اول

رویکرد پالس‌دهی	نرخ خطا
بدون پالس	٪۳۷/۵
سه پالس با ورودی ثابت	٪۲۵
سه پالس با ورودی متغیر	٪۲۵

نرخ خطای کل برای این ساختار برابر ۱۲/۵٪ است. در ادامه اگر خطای تک الکترون در دو سلول D و E به صورت همزمان رخ دهد در سه رویکرد پالس‌دهی مختلف نتایج متفاوتی دارد که در جدول ۵-۳۴ گردآوری شده است.

جدول ۵-۳۴: مشخصات دروازه‌ی اکثریت با شش سلول حالت اول با وجود خطا در یک سلول در سه رویکرد پالس‌دهی

ورودی	بدون پالس	$\Delta E$	سه پالس با ورودی ثابت	$\Delta E$	سه پالس با ورودی متغیر	$\Delta E$	مقدار مطلوب
۰۰۰	۱	۰/۰۶	۰	۰/۷۷	۰	۱/۲۲	۰
۰۰۱	۰	۰/۰۱	۰	۱/۲۶	۰	۱/۲۲	۰
۰۱۰	۰	۰/۷۱	۰	۰/۷۱	۰	۱/۲۲	۰
۰۱۱	۰	۰/۳۲	۰	۱/۱۹	۰	۱/۲۲	۱
۱۰۰	۱	۰/۲۰	۰	۱/۲۶	۰	۱/۲۲	۰
۱۰۱	۱	۰/۵۸	۱	۰/۸۱	۱	۱/۳۲	۱
۱۱۰	۰	۰/۱۰	۰	۱/۱۹	۰	۱/۲۲	۱
۱۱۱	۰	۰/۵۹	۱	۰/۸۷	۱	۱/۳۲	۱

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که روش سه پالس با ورودی ثابت دارای

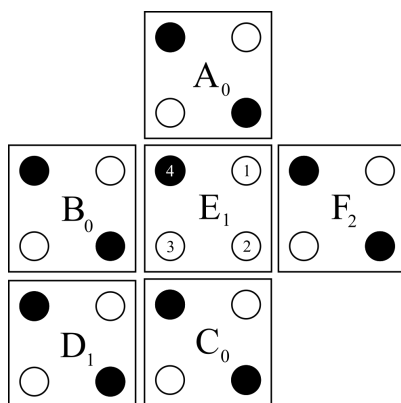
بیش‌ترین پایداری و روش بدون پالس دارای کم‌ترین پایداری خروجی است. در جدول ۵-۳۵ نرخ خطا برای سه رویکرد مختلف پالس‌دهی نشان داده شده است.

جدول ۵-۳۵: نرخ خطای تک الکترون در دو سلول برای دروازه‌ی اکثریت با شش سلول حالت اول

نرخ خطا	رویکرد پالس‌دهی
۶۲/۵٪	بدون پالس
۲۵٪	سه پالس با ورودی ثابت
۲۵٪	سه پالس با ورودی متغیر

بنابراین، تغییر در نحوه‌ی پالس‌دهی می‌تواند باعث تغییر در نتیجه‌ی نهایی شود. همانطور که مشاهده می‌کنید در رویکرد بدون پالس نرخ خطای خروجی نسبت به دو رویکرد دیگر ۳۷/۵٪ افزایش داشته است.

ساختار دیگری که فقط با یک سلول اضافی باعث می‌شود دروازه‌ی اکثریت در برابر خطای تک الکترون از خود مقاومت بیشتری نشان دهد در شکل ۵-۱۵ نشان داده شده است. به‌طور



شکل ۵-۱۵: ساختار جدید دروازه‌ی اکثریت با شش سلول حالت دوم مقاوم در برابر خطای تک الکترون

مشابه اگر در این ساختار سلول تصمیم‌گیر دچار خطای تک الکترون شود خروجی به ازای بعضی از ورودی‌ها مقدار صحیحی نمایش نمی‌دهد. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده برای این ساختار در جدول ۵-۳۶ جمع‌آوری شده است.

با توجه به جدول در حالت سه پالس با ورودی ثابت خروجی دارای بیش‌ترین پایداری و در حالت بدون پالس کم‌ترین پایداری را شاهد هستیم.

در این حالت نرخ خطا برای سه رویکرد مختلف پالس‌دهی مانند جدول ۵-۳۳ است.

بنابراین، می‌توان نتیجه‌ی گرفت تغییر در نحوه‌ی پالس‌دهی می‌تواند باعث تغییر در نتیجه‌ی نهایی شود. همانطور که مشاهده می‌کنید در رویکرد بدون پالس نرخ خطای خروجی نسبت به دو رویکرد دیگر ۱۲/۵٪ افزایش داشته است. همچنین ۳۷/۵٪ بهبود خطا در رویکرد پالس‌دهی

جدول ۵-۳۶: مشخصات دروازه‌ی اکثریت با شش سلول حالت دوم با وجود خطا در یک سلول در سه رویکرد پالس‌دهی

ورودی	بدون پالس	$\Delta E$	سه پالس با ورودی ثابت	$\Delta E$	سه پالس با ورودی متغیر	$\Delta E$	مقدار مطلوب
۰۰۰	۱	۰/۵۰	۰	۰/۹۶	۰	۱/۴۲	۰
۰۰۱	۱	۰/۶۲	۱	۱/۱۰	۱	۱/۱۳	۰
۰۱۰	۰	۰/۲۸	۰	۰/۹۰	۰	۱/۴۲	۰
۰۱۱	۱	۰/۳۱	۱	۱/۱۷	۱	۱/۱۳	۱
۱۰۰	۱	۰/۰۱	۱	۱/۱۰	۱	۱/۱۳	۰
۱۰۱	۱	۰/۶۱	۱	۰/۶۱	۱	۱/۱۳	۱
۱۱۰	۱	۰/۴۰	۱	۱/۱۵	۱	۱/۱۲	۱
۱۱۱	۱	۰/۶۶	۱	۰/۶۶	۱	۱/۱۲	۱

بدون پالس و ۲۵٪ در دیگر روش‌های پالس‌دهی نسبت به دروازه‌ی اکثریت متداول شاهد هستیم.

لازم به ذکر است که اگر خطای تک الکترون در سلول D رخ دهد نرخ خطا ۰٪ بوده؛ بنابراین به ازای تمامی حالت‌های ورودی، خروجی صحیحی نمایش داده می‌شود. همچنین نرخ خطای کل برای این ساختار برابر ۱۲/۵٪ است. در ادامه اگر خطای تک الکترون در دو سلول D و E به صورت همزمان رخ دهد در سه رویکرد پالس‌دهی مختلف نتایج متفاوتی دارد که در جدول ۵-۳۷ گردآوری شده است.

جدول ۵-۳۷: مشخصات دروازه‌ی اکثریت با شش سلول حالت دوم با وجود خطا در دو سلول در سه رویکرد پالس‌دهی

ورودی	بدون پالس	$\Delta E$	سه پالس با ورودی ثابت	$\Delta E$	سه پالس با ورودی متغیر	$\Delta E$	مقدار مطلوب
۰۰۰	۱	۰/۵۹	۰	۰/۸۷	۰	۱/۳۲	۰
۰۰۱	۱	۰/۳۲	۱	۱/۱۹	۱	۱/۲۲	۰
۰۱۰	۰	۰/۵۸	۰	۰/۸۱	۰	۱/۳۲	۰
۰۱۱	۱	۰/۰۱	۱	۱/۲۶	۱	۱/۲۲	۱
۱۰۰	۱	۰/۱۰	۱	۱/۱۹	۱	۱/۲۲	۰
۱۰۱	۱	۰/۷۱	۱	۰/۷۱	۱	۱/۲۲	۱
۱۱۰	۰	۰/۲۰	۱	۱/۲۶	۱	۱/۲۲	۱
۱۱۱	۰	۰/۰۶	۱	۰/۷۷	۱	۱/۲۲	۱

با توجه به نتایج به دست آمده در روش سه پالس با ورودی ثابت دارای بیش‌ترین پایداری و روش بدون پالس دارای کم‌ترین پایداری خروجی است.

در این حالت نرخ خطا برای سه رویکرد مختلف پالس‌دهی مانند جدول ۵-۳۵ است. بنابراین، تغییر در نحوه‌ی پالس‌دهی می‌تواند باعث تغییر در نتیجه‌ی نهایی شود. همانطور که مشاهده می‌کنید در رویکرد بدون پالس نرخ خطای خروجی نسبت به دو رویکرد دیگر ۳۷/۵٪ افزایش داشته است.

## ۷-۵ جمع‌بندی نتایج دروازه‌های تحمل‌پذیر

در انتهای این فصل یک جمع‌بندی از نتایج به‌دست آمده برای دروازه‌های اکثریت مقاوم در برابر خطا ارائه شده است. برای هر دروازه‌ی اکثریت خطا در سلول تصمیم‌گیری، احتمال خطای کل با یک سلول خطا و احتمال خطای کل با دو سلول خطا بررسی و با هم مقایسه شده است.

### ۱-۷-۵ خطا در سلول تصمیم‌گیر

در جدول ۵-۳۸ مقایسه‌ای بین تمامی دروازه‌های اکثریت مقاوم در برابر خطا ارائه شده است که خطا فقط در سلول تصمیم‌گیر اتفاق افتاده است.

جدول ۵-۳۸: نرخ خطا در دروازه‌های اکثریت تحمل‌پذیر با خطا در سلول تصمیم‌گیر

دروازه اکثریت متداول	شش سلول حالت دوم	شش سلول حالت اول	نه سلول	سیزده سلول	روش پالس‌دهی
۷۵٪	۳۷/۵٪	۳۷/۵٪	۵۰٪	۵۰٪	بدون پالس
۵۰٪	۲۵٪	۲۵٪	۲۵٪	۲۵٪	سه پالس با ورودی ثابت
۵۰٪	۲۵٪	۲۵٪	۲۵٪	۲۵٪	سه پالس با ورودی متغیر

با توجه به جدول و مقایسه‌ی انجام شده نتایج زیر به‌دست آمده است:

- ۱- در روش بدون پالس دروازه‌ی بهبودیافته با ۶ سلول دارای کم‌ترین میزان نرخ خطا است و ۳۷.۵ درصد بهبود خطا را نسبت به دروازه‌ی اکثریت متداول شاهد هستیم.
- ۲- در روش بدون پالس دروازه‌ی بهبودیافته با ۹ و ۱۳ سلول ۲۵ درصد بهبود خطا را نسبت به دروازه‌ی اکثریت متداول داریم.
- ۳- در روش‌های پالس‌دهی ورودی ثابت و متغیر، تغییر روش پالس‌دهی تغییری در نرخ خطای خروجی ندارد و در تمامی دروازه‌ها ۲۵ درصد بهبود خطا را نسبت به دروازه‌ی اکثریت داریم.

۴- در روش پالس‌دهی سه پالس با ورودی متغیر و دروازه‌ی اکثریت با نُه سلول، خروجی دارای بیش‌ترین پایداری نسبت به دروازه‌های اکثریت دیگر است.

### ۵-۷-۲ احتمال خطای کل با یک سلول خطا

در جدول ۵-۳۹ مقایسه‌ای بین تمامی دروازه‌های اکثریت مقاوم در برابر خطا ارائه شده است. در این حالت احتمال خطای کل زمانی که فقط یک سلول دچار خطا شده باشد گزارش شده است.

جدول ۵-۳۹: نرخ خطای کل در دروازه‌های اکثریت تحمل‌پذیر با یک سلول خطا

دروازه اکثریت متداول	شش سلول حالت دوم	شش سلول حالت اول	نُه سلول	سیزده سلول	روش پالس‌دهی
%۵۰	%۱۲/۵	%۱۲/۵	%۳۰	%۱۹/۵	سه پالس با ورودی ثابت

با توجه به جدول و مقایسه‌ی انجام شده نتیجه‌ی زیر به‌دست آمده است:

۱- در روش سه پالس با ورودی ثابت دروازه‌ی بهبودیافته با ۶ سلول دارای کم‌ترین میزان نرخ خطا است و ۳۷.۵ درصد بهبود خطا را نسبت به دروازه‌ی اکثریت متداول شاهد هستیم.

### ۵-۷-۳ احتمال خطای کل با دو سلول خطا

در جدول ۵-۴۰ مقایسه‌ای بین تمامی دروازه‌های اکثریت مقاوم در برابر خطا ارائه شده است. در این حالت احتمال خطای کل زمانی که فقط دو سلول دچار خطا شده باشد گزارش شده است.

جدول ۵-۴۰: نرخ خطای کل در دروازه‌های اکثریت تحمل‌پذیر با دو سلول خطا

دروازه اکثریت متداول	شش سلول حالت دوم	شش سلول حالت اول	نُه سلول	سیزده سلول	روش پالس‌دهی
-	%۶۲/۵	%۶۲/۵	-	-	بدون پالس
-	%۲۵	%۲۵	%۳۲/۵	%۳۲/۷	سه پالس با ورودی ثابت
-	%۲۵	%۲۵	-	-	سه پالس با ورودی متغیر

با توجه به جدول و مقایسه‌ی انجام شده نتیجه‌ی زیر به‌دست آمده است:

۱- دروازه‌ی اکثریت با ۶ سلول دارای کم‌ترین نرخ خطا نسبت به دروازه‌ها اکثریت دیگر است.





## فصل ۶

# نتیجه‌گیری و کارهای پیشنهادی در آینده

### ۶-۱ نتیجه‌گیری

محاسبات کوانتومی یک روش جدید برای پردازش اطلاعات است که بر اساس مکانیک کوانتومی بنا شده است. این نوع از محاسبات نتیجه‌ی ترکیب مکانیک کوانتومی و نظریه اطلاعات کلاسیک است که باعث رخدادهای جالب و قدرتمندی در حوزه‌ی کوانتوم می‌شود. مبحث کوانتوم کاربردهای زیادی دارد که می‌توان از فن‌آوری اتوماتای سلولی کوانتومی (QCA) نام برد که فن‌آوری در حال ظهوری است که رویکرد انقلابی را برای محاسبات در سطح نانو ارائه می‌دهد.

با وجود اینکه QCA قابلیت‌های فراوانی برای ساخت مدارها دارد، مشکلاتی نیز در بعضی بخش‌های آن وجود دارد. یکی از این مشکلات، امکان خطا در این مدارها است. ماهیت نانومتری مدارهای QCA امکان بسیار زیادی برای ایجاد خطاها را فراهم می‌کند. حتی کوچک‌ترین نقص در هنگام ساخت ممکن است باعث به‌وجود آمدن خطا در این مدارها شود. انواع مختلف خطاها وجود دارد که در هنگام ساخت مدارهای QCA رخ می‌دهد. در این رساله، خطای تک الکترون در اتوماتای سلولی کوانتومی بررسی و نتایج گزارش شده است. دروازه‌های مختلفی در این گزارش مورد بررسی قرار گرفته‌اند که عبارت‌اند از: دروازه‌ی اکثریت،

دروازه‌ی NNI و دروازه‌ی AOI که جزو دروازه‌های اساسی فن‌آوری QCA هستند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد وجود خطای تک الکترون در این دروازه‌ها عمدتاً باعث می‌شود خروجی دروازه مقدار منطقی صحیح نداشته باشد. همچنین به بررسی خطای تک الکترون در سیم دودویی پرداختیم که با رویکردی جدید همراه بود و در دو سلول به‌صورت هم‌زمان خطا رخ داده بود. نتیجه به‌دست آمده در سیم دودویی نشان می‌داد که وجود هم‌زمان دو سلول خطا خروجی منطقی سیم را تغییر نداده و مقدار صحیح را حاصل می‌شود. در ادامه ساختارهای جدیدی برای دروازه‌ی اکثریت طراحی کردیم که نسبت به خطای تک الکترون مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دادند.

## ۲-۶ کارهای پیشنهادی در آینده

کارهای پیشنهادی که می‌توان در ادامه‌ی این پایان‌نامه انجام داد عبارت‌اند از:

- ۱- بررسی خطای تک الکترون در ساختارهای دیگر مانند دروازه‌ی XOR و تمام جمع‌کننده
- ۲- بررسی خطای تک الکترون که در بیش از ۲ سلول به‌صورت هم‌زمان رخ داده است
- ۳- بررسی خطای تک الکترون در مدارهای QCA
- ۴- طراحی ساختارهای جدید که در برابر خطای تک الکترون مقاومت بیشتری دارند

# پیوست الف

## بسته‌ی نرم‌افزاری SEFA

### الف-۱ فلوجارت و الگوریتم برنامه‌ی متلب

در این بخش فلوجارت و الگوریتم برنامه‌ی متلب نوشته شده آورده شده است. در الگوریتم و فلوجارت اول نمای کلی برنامه نشان داده شده و در قسمت‌های بعدی به تفکیک هر تابع نوشته شده توضیح داده شده است.

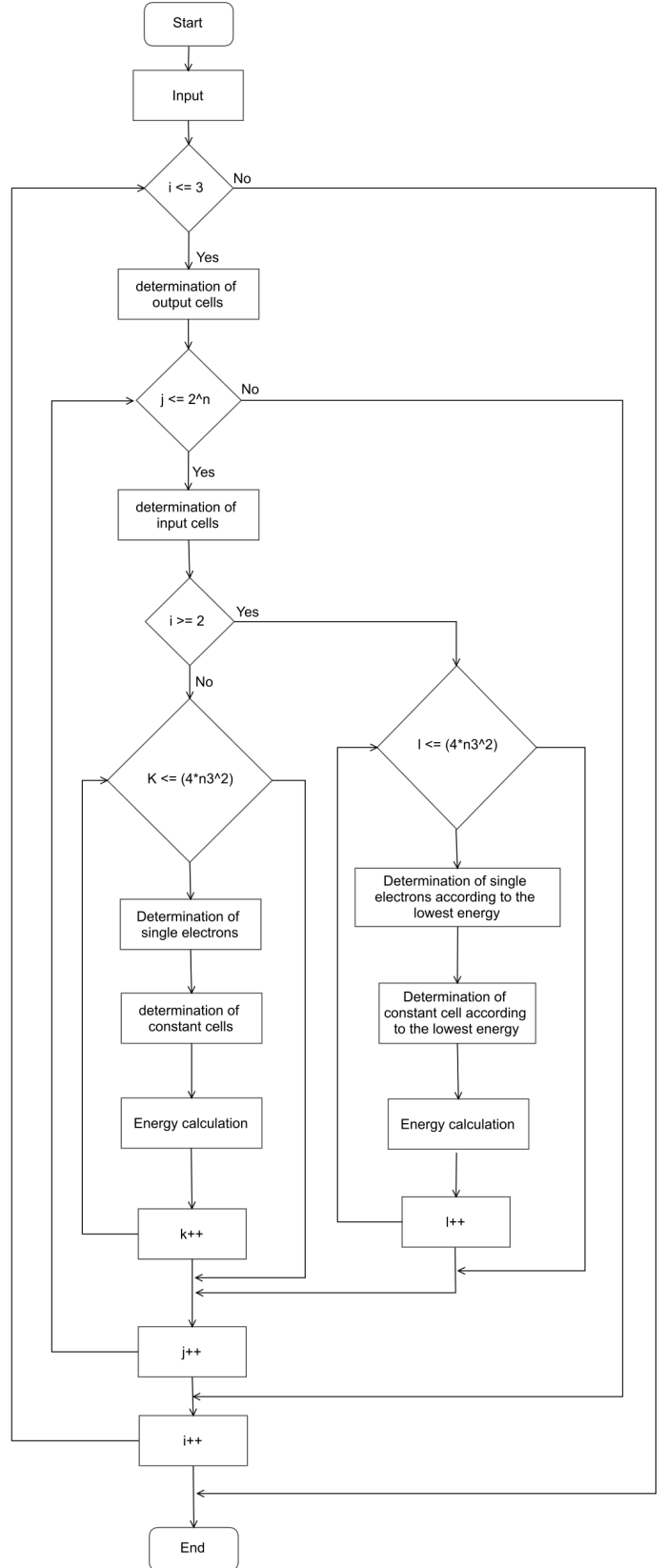
**input** : Input function  
**output**: Electrostatic energy and truth table

```

while true do
  for i <= 3 do
    determination of output cells
    for j <= 2^n do
      determination of input cells
      if i >= 2 then
        for l <= (4 * n^3^2) do
          Determination of single
            electrons according to the
              lowest energy
          Determination of constant cell
            according to the lowest energy
          Energy calculation
        end
      else
        for K <= (4 * n^3^2) do
          Determination of single
            electrons
          determination of constant cells
          Energy calculation
        end
      end
    end
  end
end
end

```

Algorithm 1: Overview

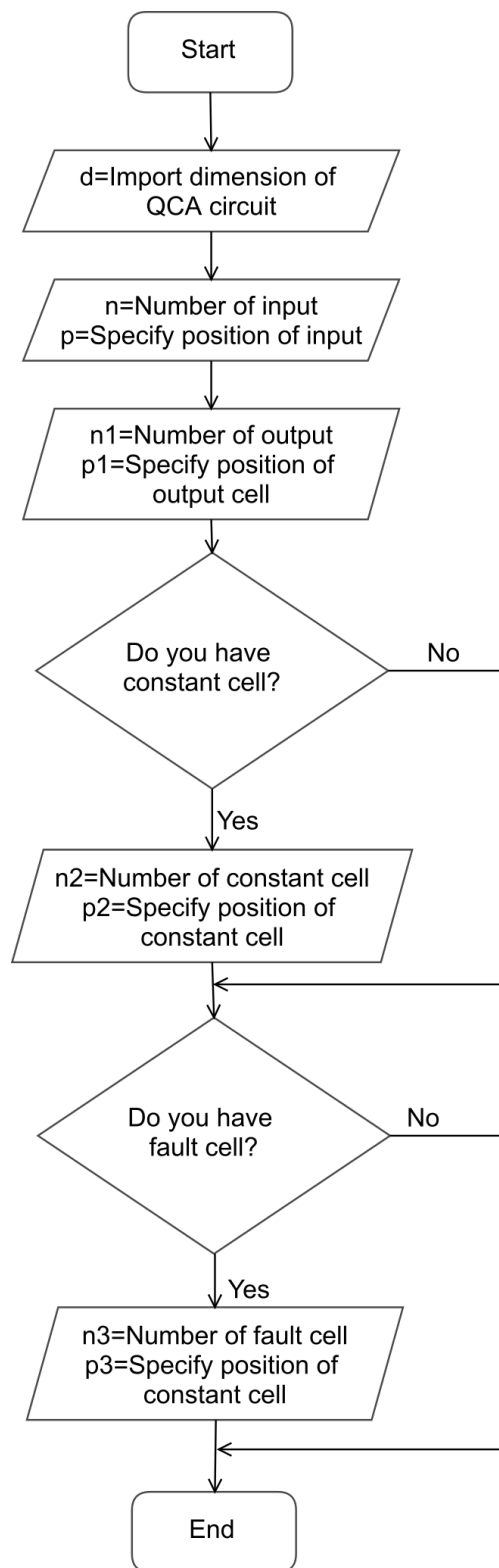


Flowchart 1: Overview

```

Function Input is
  d=Import dimension of QCA circuit
  n=Number of input
  p=Specify position of input
  n1=Number of output
  p1=Specify position of output cell
  if Do you have constant cell? then
    | n2=Number of constant cell
    | p2=Specify position of constant cell
  end
  if Do you have fault cell? then
    | n3=Number of fault cell
    | p3=Specify position of constant cell
  end
end
    
```

Algorithm 2: Input



Flowchart 2: input

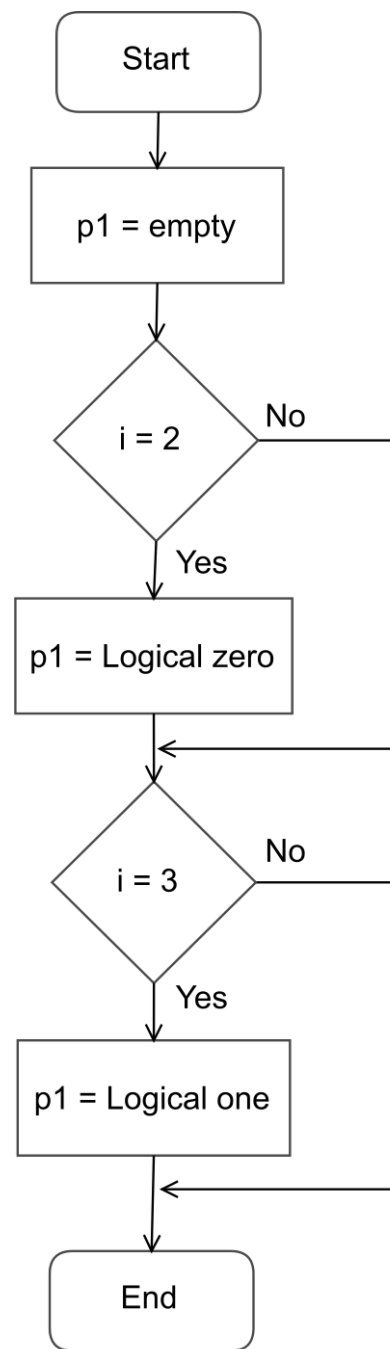
**Function** *Determine output cell is*

```

p1=empty;
if  $i=2$  then
|   p1=Logical zero;
end
if  $i = 3$  then
|   p1=Logical one;
end
end

```

Algorithm 3: Determine output cell



Flowchart 3: Determine output cell

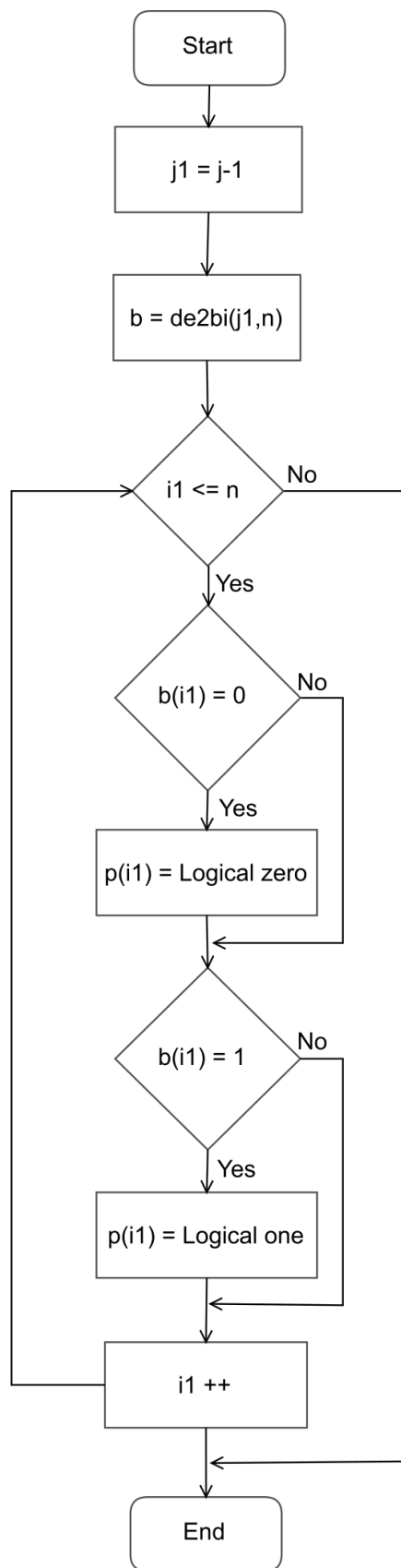
**Function** *Determine input cell is*

```

j1=j-1;
b=de2bi(j1,n);
for i1 <= n do
    if b(i1)=0 then
        | p(i1)=Logical zero;
    end
    if b(i1)=1 then
        | p(i1)=Logical one;
    end
end
end
end

```

Algorithm 4: Determine input cell



Flowchart 4: Determine input cell

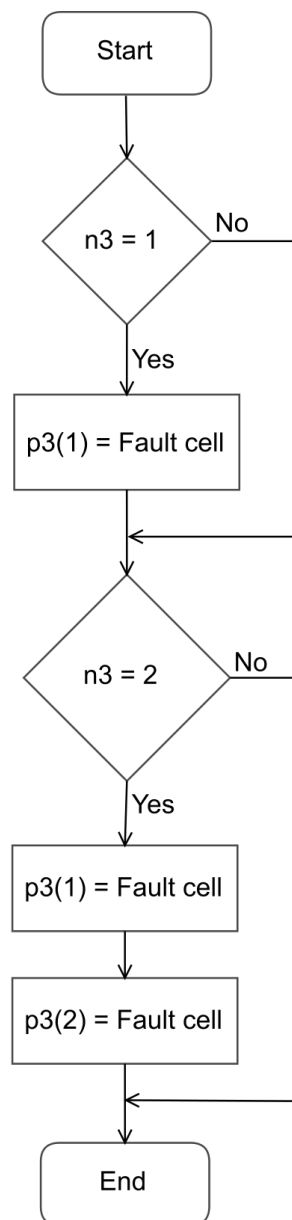
**Function** *Determination of single electrons is*

```

if  $n3=1$  then
  | p3(1)=Fault cell;
end
if  $n3=2$  then
  | p3(1)=Fault cell;
  | p3(2)=Fault cell;
end
end

```

Algorithm 5: Determination of single electrons



Flowchart 5: Determination of single electrons



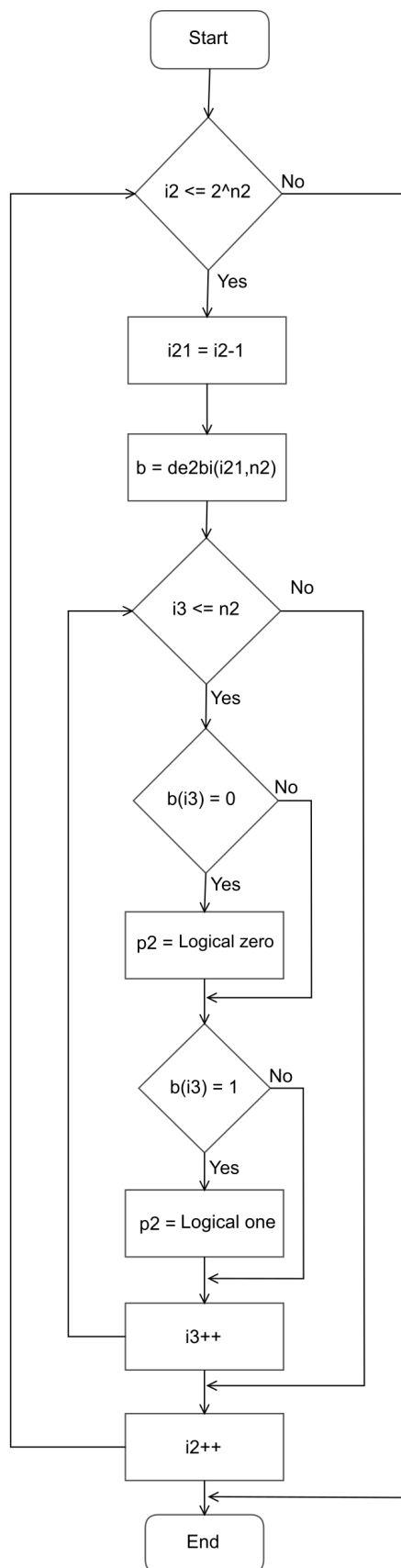
**Function** *Determination of constant cells is*

```

for i2 <= 2^n2 do
    i21=i2-1;
    b=de2bi(i21,n2);
    for i3 <= n2 do
        if b(i3)=0 then
            | p2=Logical zero;
        end
        if b(i3)=1 then
            | p2=Logical one;
        end
    end
end
end
end

```

Algorithm 6: Determination of constant cells



Flowchart 6: Determination of constant cells

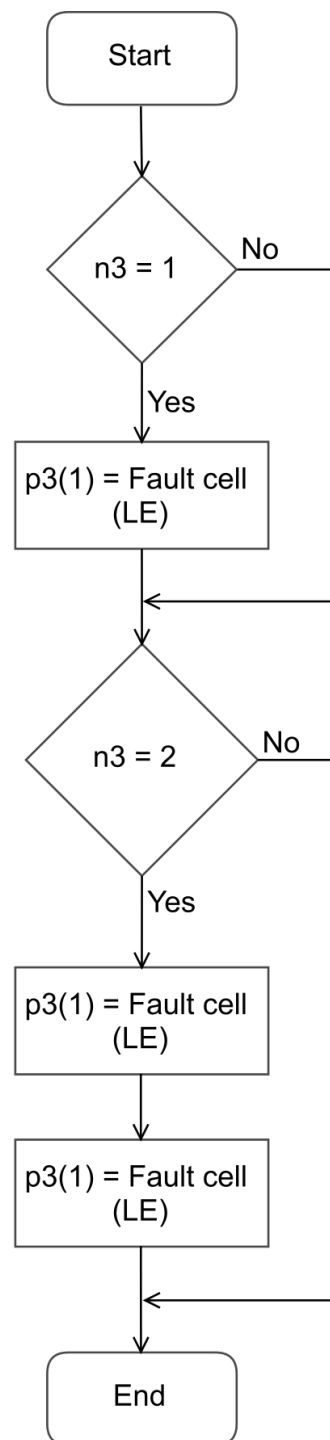
**Function** *Determination of single electrons according to the lowest energy is*

```

if  $n3=1$  then
  | p3(1)=Fault cell(LE);
end
if  $n3=2$  then
  | p3(1)=Fault cell(LE);
  | p3(2)=Fault cell(LE);
end
end

```

Algorithm 7: Determination of single electrons according to the lowest energy



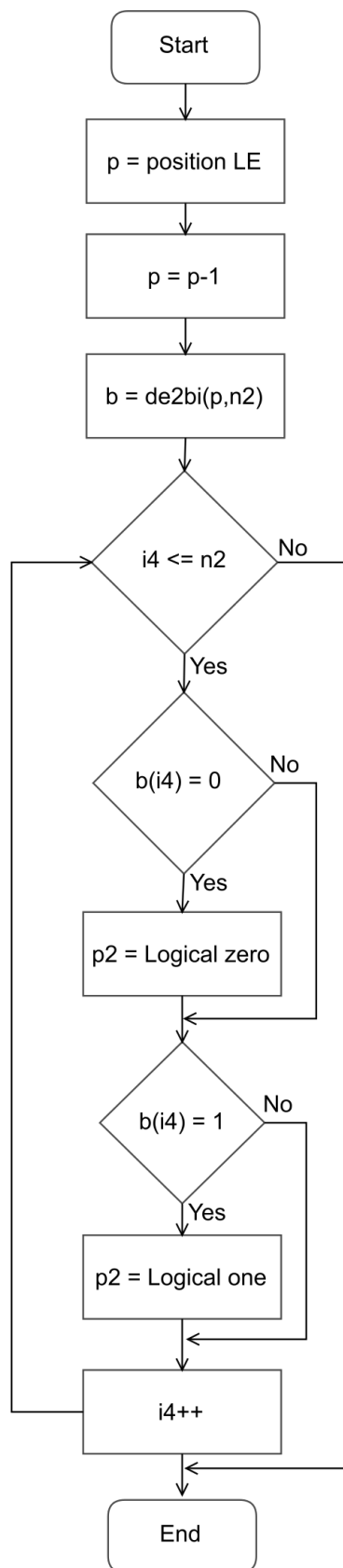
Flowchart 7: Determination of single electrons according to the lowest energy

**Function** *Determination of constant cell according to the lowest energy is*

```

p=position LE;
p=p-1;
b=de2bi(p,n2);
for i4 <= n2 do
    if b(i4)=0 then
        | p2=Logical zero;
    end
    if b(i4)=1 then
        | p2=Logical one;
    end
end
end
end
    
```

Algorithm 8: Determination of constant cell according to the lowest energy



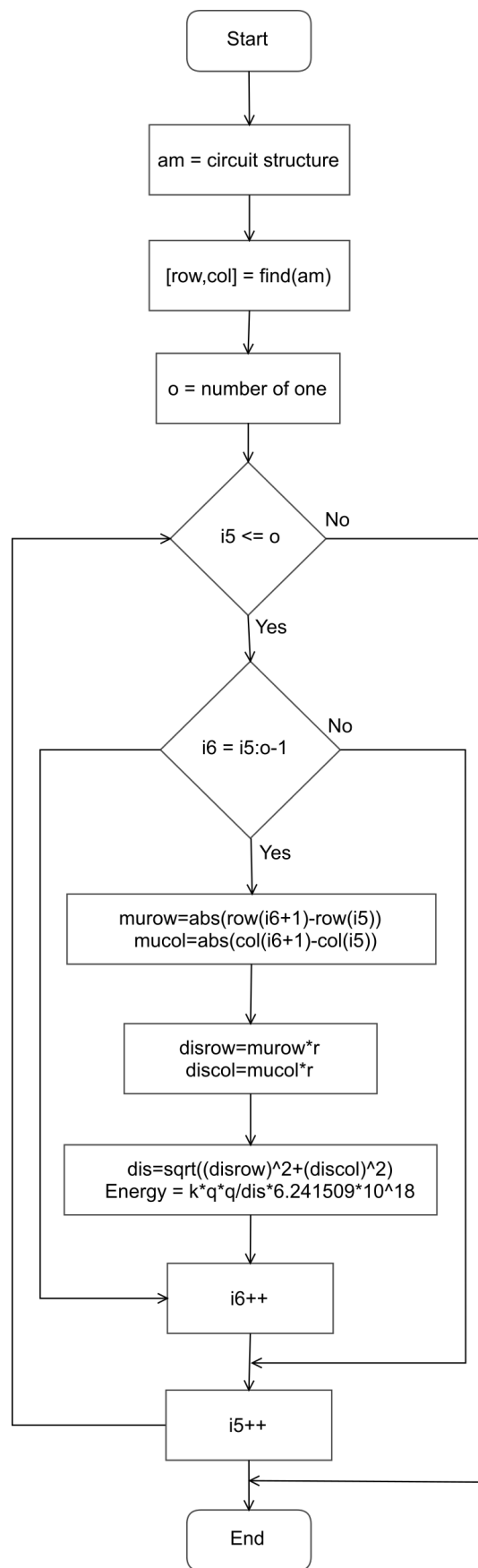
Flowchart 8: Determination of constant cell according to the lowest energy

```

Function Energy calculation is
am=circuit structure;
[row,col]=find(am);
o=number of one;
for i5 <= o do
    for i6 = i5 : o - 1 do
        murow=abs(row(i6+1)-row(i5));
        mucol=abs(col(i6+1)-col(i5));

        disrow=murow*r;
        discol=mucol*r;
        dis=sqrt((disrow)2 + (discol)2);
        Energy=k * q * q/dis * 6.241509 * 1018;
    end
end
end
    
```

Algorithm 9: Energy calculation



Flowchart 9: Energy calculation

## مراجع

- [1] E. Rahimi and S. M. Nejad, "Quasi-classical modeling of molecular quantum-dot cellular automata multidriver gates," *Nanoscale Res. Lett.*, vol.7, no.1, p.274, 2012.
- [2] M. Ottavi, V. Vankamamidi, F. Lombardi, and S. Pontarelli, "Novel memory designs for qca implementation," in *5th IEEE Conference on Nanotechnology, 2005.*, pp.545–548, IEEE, 2005.
- [3] W. Porod, C. S. Lent, and G. H. Bernstein, "Quantum cellular automata," *J. Nanotechnol.*, vol.4, no.1, p.49, 1993.
- [4] R. Zhang, K. Walus, W. Wang, and G. A. Jullien, "A method of majority logic reduction for quantum cellular automata," *IEEE Trans Nanotechnol*, vol.3, no.4, pp.443–450, 2004.
- [5] R. Tang, F. Zhang, and Y.-B. Kim, "Qca-based nano circuits design [adder design example]," in *2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, pp.2527–2530, IEEE, 2005.
- [6] J. Timler and C. S. Lent, "Power gain and dissipation in quantum-dot cellular automata," *J. App. Phys.*, vol.91, no.2, pp.823–831, 2002.
- [7] P. D. Tougaw, C. S. Lent, and W. Porod, "Bistable saturation in coupled quantum-dot cells," *J. App. Phys.*, vol.74, no.5, pp.3558–3566, 1993.
- [8] P. D. Tougaw and C. S. Lent, "Dynamic behavior of quantum cellular automata," *J. App. Phys.*, vol.80, no.8, pp.4722–4736, 1996.
- [9] M. B. Tahoori, M. Momenzadeh, J. Huang, and F. Lombardi, "Defects and faults in quantum cellular automata at nano scale," in *22nd IEEE VLSI Test Symposium, 2004. Proceedings.*, pp.291–296, IEEE, 2004.
- [10] M. Momenzadeh, M. Ottavi, and F. Lombardi, "Modeling qca defects at molecular-level in combinational circuits," in *20th IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems (DFT'05)*, pp.208–216, IEEE, 2005.

- [11] X. Yang, L. Cai, S. Wang, Z. Wang, and C. Feng, "Reliability and performance evaluation of qca devices with rotation cell defect," *IEEE Trans Nanotechnol*, vol.11, no.5, pp.1009–1018, 2012.
- [12] M. Mahdavi, S. Mirzakuchaki, M. Moghaddasi, and M. Amiri, "Single electron fault modelling in quantum binary wire," *Micro & Nano Letters*, vol.6, no.2, pp.75–77, 2011.
- [13] M. Born, "Physical aspects of quantum mechanics," 1927.
- [14] D. Sen, "The uncertainty relations in quantum mechanics," *Curr. Sci*, vol.107, pp.203–218, 2014.
- [15] D. J. Griffiths and D. F. Schroeter. *Introduction to quantum mechanics*. Cambridge University Press, 2018.
- [16] S. Suraprapapich, S. Panyakeow, and C. W. Tu, "Effect of arsenic species on the formation of (ga) inas nanostructures after partial capping and regrowth," *Appl. Phys. Lett.*, vol.90, no.18, pp.183–112, 2007.
- [17] C. SINGLE, R. AUGKE, F. E. PRINS, D. A. WHARAM, and D. P. KERN, "Towards quantum cellular automata operation in silicon: transport properties of silicon multiple dot structures," *Superlattices Microstruct.*, vol.28, no.5-6, pp.429–434, 2000.
- [18] R. P. Cowburn and M. E. Welland, "Room temperature magnetic quantum cellular automata," *Science*, vol.287, no.5457, pp.1466–1468, 2000.
- [19] A. Imre, L. Zhou, A. Orlov, G. Csaba, G. Bernstein, W. Prood, and V. Metlushko, "Application of mesoscopic magnetic rings for logic devices," in *4th IEEE Conference on Nanotechnology, 2004.*, pp.137–139, IEEE, 2004.
- [20] A. O. Orlov, I. Amlani, G. H. Bernstein, C. S. Lent, and G. L. Snider, "Realization of a functional cell for quantum-dot cellular automata," *Science*, vol.277, no.5328, pp.928–930, 1997.
- [21] I. Amlani, A. O. Orlov, G. Toth, G. H. Bernstein, C. S. Lent, and G. L. Snider, "Digital logic gate using quantum-dot cellular automata," *Science*, vol.284, no.5412, pp.289–291, 1999.
- [22] J. Jiao, G. J. Long, F. Grandjean, A. M. Beatty, and T. P. Fehlner, "Building blocks for the molecular expression of quantum cellular automata. isolation and characterization of a

- covalently bonded square array of two ferrocenium and two ferrocene complexes,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol.125, no.25, pp.7522–7523, 2003.
- [23] A. O. Orlov, I. Amlani, G. Toth, C. S. Lent, G. H. Bernstein, and G. L. Snider, “Experimental demonstration of a binary wire for quantum-dot cellular automata,” *Appl. Phys. Lett.*, vol.74, no.19, pp.2875–2877, 1999.
- [24] M. T. Niemier, *Designing digital systems in quantum cellular automata*. Ph.D. thesis, University of Notre Dame, 2000.
- [25] M. Mahdavi, M. A. Amiri, S. Mirzakuchaki, and M. N. Moghaddasi, “Single electron fault modelling in qca inverter gate,” *Can J Elect Comput E*, vol.1, no.1, pp.20–24, 2010.
- [26] P. D. Tougaw and C. S. Lent, “Logical devices implemented using quantum cellular automata,” *J. App. Phys.*, vol.75, no.3, pp.1818–1825, 1994.
- [27] K. Navi, R. Farazkish, S. Sayedsalehi, and M. R. Azghadi, “A new quantum-dot cellular automata full-adder,” *Microelectron J*, vol.41, no.12, pp.820–826, 2010.
- [28] P. K. Bhattacharjee, “Digital combinational circuits design by qca gates,” *Int. J. Comput. Electr. Eng*, vol.2, no.1, p.67, 2010.
- [29] M. Momenzadeh, J. Huang, M. B. Tahoori, and F. Lombardi, “Characterization, test, and logic synthesis of and-or-inverter (aoi) gate design for qca implementation,” *Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.*, vol.24, no.12, pp.1881–1893, 2005.
- [30] J. Huang, M. Momenzadeh, M. B. Tahoori, and F. Lombardi, “Design and characterization of an and-or-inverter (aoi) gate for qca implementation,” in *Proceedings of the 14th ACM Great Lakes symposium on VLSI*, pp.426–429, ACM, 2004.
- [31] M. Kianpour and R. Sabbaghi-Nadooshan, “A novel design and successful simulation of qca-based multiplexer,” in *2012 16th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, pp.183–186, IEEE, 2012.
- [32] S. Bhanja, M. Ottavi, F. Lombardi, and S. Pontarelli, “Novel designs for thermally robust coplanar crossing in qca,” in *Proceedings of the conference on Design, automation and test in Europe: Proceedings*, pp.786–791, European Design and Automation Association, 2006.

- [33] M. Taghizadeh, M. Askari, and K. Fardad, "Bcd computing structures in quantum-dot cellular automata," in *2008 International Conference on Computer and Communication Engineering*, pp.1042–1045, IEEE, 2008.
- [34] S. lakshmi and G.Athisha, "Efficient design of logical structures and functions using nanotechnology based quantum dot cellular automata design," *Int. J. Comput. Appl.*, vol.3, no.5, p.0975–8887, 2010.
- [35] K. Walus, T. J. Dysart, G. A. Jullien, and R. A. Budiman, "Qcadesigner: A rapid design and simulation tool for quantum-dot cellular automata," *IEEE Trans Nanotechnol*, vol.3, no.1, pp.26–31, 2004.
- [36] M. Qanbari and R. Sabbaghi-Nadooshan, "Two novel quantum-dot cellular automata full adders," *J. Eng.*, vol.2013, p.6, 2013.
- [37] V. Vankamamidi, M. Ottavi, and F. Lombardi, "Clocking and cell placement for qca," in *2006 Sixth IEEE Conference on Nanotechnology*, vol.1, pp.343–346, IEEE, 2006.
- [38] C. G. Smith, "Computation without current," *Science*, vol.284, no.5412, pp.274–274, 1999.
- [39] Z. Beiki and A. Shahidinejad, "An introduction to quantum cellular automata technology and its defects," *Rev. Theor. Sci.*, vol.2, no.4, pp.334–342, 2014.
- [40] C. S. Lent and P. D. Tougaw, "A device architecture for computing with quantum dots," *Proc. IEEE*, vol.85, no.4, pp.541–557, 1997.
- [41] R. Mukherjee, S. Tripathi, S. Sen, and B. Sen, "Characterization and analysis of single electron fault of qca primitives," in *2016 International Conference on Microelectronics, Computing and Communications (MicroCom)*, pp.1–6, IEEE, 2016.
- [42] X. Ma and F. Lombardi, "Fault tolerant schemes for qca systems," in *2008 IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance of VLSI Systems*, pp.236–244, IEEE, 2008.
- [43] A. Fijany and B. N. Toomarian, "New design for quantum dots cellular automata to obtain fault tolerant logic gates," *J. Nanoparticle Res*, vol.3, no.1, pp.27–37, 2001.
- [44] M. J. Beard, *Design and simulation of fault-tolerant quantum-dot cellular automata (QCA) NOT gates*. Ph.D. thesis, Wichita State University, 2006.



- [45] W. Wang, K. Walus, and G. A. Jullien, "Quantum-dot cellular automata adders," in *2003 Third IEEE Conference on Nanotechnology, 2003. IEEE-NANO 2003.*, vol.1, pp.461–464, IEEE, 2003.
- [46] M. R. Azghadi, O. Kavehei, and K. Navi, "A novel design for quantum-dot cellular automata cells and full adders," *J. Appl. Sci*, vol.7, no.22, pp.3460–3468, 2007.
- [47] A. Roohi, R. F. DeMara, and N. Khoshavi, "Design and evaluation of an ultra-area-efficient fault-tolerant qca full adder," *Microelectron J*, vol.46, no.6, pp.531–542, 2015.
- [48] K. Navi<sup>1</sup>, A. M. Chabi, and S. Sayedsalehi, "A novel seven input majority gate in quantum-dot cellular automata," *International Journal of Computer Science Issues*, vol.9, no.1, p.84, 2012.



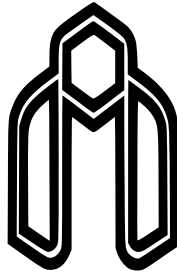
## **Abstract**

Quantum cellular automata (QCA) represents an emerging technology at the nanotechnology level. There are various faults that may occur in QCA cells. One of these faults is a single electron fault that can occur in the process of producing or the operation of QCA circuits. The behaviour of the single electron fault in QCA devices is not similar to either previously investigated faults or conventional CMOS logic. The results show that single electron fault in the majority gate for some inputs is defective and the output obtained is not desirable. The fault rate for the majority gate is %50, Hence half of the inputs do not have the correct output. For other gates, including the NNI and AOI gates, electrostatic energy calculations for different inputs and different positions for single electron in a fault cell were performed. The results show that for some inputs, the output is not correct and the output has a defect. The fault rate for the NNI gate is equal to %0 and for the AOI gate there is a different value depending on the fault cell position.

There is also a single electron fault with a new approach to quantum wire. In this case, the single electron fault occurs simultaneously in two adjacent and non-adjacent cells. The results indicate that if this fault occurs, the output of the wire has not changed and fault rate is equal to %0.

In the following, new structures are designed from the majority gate that have thirteen cells, nine cells and six cell. These structures have more tolerant of single electron fault and in different pulse approaches the results are reported.

**Keywords:** *Single Electron Fault, Fault-tolerant, Quantum-dot cellular automata*



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Electrical Engineering and Robotic**

**MSc Thesis in: Micro and nanoelectronic devices Engineering**

**Simulation of Single Electron Fault in  
Quantum Cellular Automata Technology**

**By: Hamid Sheibani**

**Supervisor**

**Dr. Ehsan Rahimi**

**December 2019**