

# مروری بر روش‌های افزایش امنیت ارتباطات چهت طراحی مدارات مبتنی بر آتماتاتی سلولی کوانتومی

سعید سیدی<sup>۱</sup> و نیما جعفری نویمی پور<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> باشگاه پژوهش گران جوان و نخبگان، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران  
Stu.SaeidSeyedi@iaut.ac.ir

<sup>۲</sup> گروه مهندسی کامپیوتر، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران  
Jafari@iaut.ac.ir

## چکیده

فناوری اکسید فلز نیمه‌هادی مکمل یک روش محبوب و فراگیر در طراحی مدارات الکترونیکی و دیجیتالی است؛ ولی در این فناوری، کاهش در سطح زیر میکرون بهسادگی امکان‌پذیر نیست؛ بدین‌دلیل فناوری آتماتاتی سلولی کوانتومی نقطه‌ای در سطح نانو بهعنوان یک فناوری پیشناز در زمینه نانو و روشنی جدید جهت طراحی مدارات دیجیتال و کاهش توان مصرفی معروفی شد. آتماتاتی سلولی کوانتومی نقطه‌ای در سطح نانو یک روش جدید برای انجام محاسبات با انتقال اطلاعات از طریق اندرکنش سلول‌های کوانتومی را بیان می‌کند. ابعاد کوچک، سرعت بالا، توان مصرفی پایین و تأخیر کم از ویژگی‌های اصلی این فناوری است. طراحی مدارات با امنیت بالا در فناوری آتماتاتی سلولی کوانتومی نقطه‌ای در سطح نانو با درنظرگرفتن ارتباطات بین سلولی و مصرف توان کم، فضای مصرفی بهینه، برای طراحان امری بسیار مهم و حائز اهمیت است؛ لذا، در این مقاله ابتدا آتماتاتی سلولی کوانتومی نقطه‌ای در سطح نانو شرح داده و سپس سلول‌های کوانتومی، ساختارهای مهم در این فناوری، مبحث زمان‌بندی و نکات مهم در مدارات آتماتاتی سلولی کوانتومی نقطه‌ای در سطح نانو مطرح شده و درنهایت موری بر پژوهش‌های ارائه شده در زمینه امنیت نظری مدار رمزگاری در ارتباط بین مدارات در فناوری آتماتاتی سلولی کوانتومی نقطه‌ای در سطح نانو صورت گرفته و درنهایت ساختارها، مدارات و صحت عملکرد آن‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که می‌توان با روش‌هایی همچون استفاده از منطق برگشت‌پذیر در دروازه فینمن، کلید برگشت‌پذیر با مدار فردکین و پیاده‌سازی فرآیند رمز گزاری رمزگشایی، امنیت و قابلیت اطمینان را در ارتباطات نانو بر اساس آتماتاتی سلولی کوانتومی نقطه‌ای افزایش داد.

وازگان کلیدی: امنیت، آتماتاتی سلولی کوانتومی نقطه‌ای، نانو فناوری، ارتباطات بر اساس نانو

جاگزین انجام داده‌اند که یکی از دست‌یافته‌های مهم در این زمینه فناوری آتماتاتی سلولی کوانتومی نقطه‌ای در سطح نانو<sup>۳</sup> است.<sup>[۴, ۵]</sup>

آتماتاتی سلولی کوانتومی نقطه‌ای در سطح نانو یکی از فناوری‌های نوظهور در مقیاس نانو برای ساخت مدارهای دیجیتال است.<sup>[۶]</sup> این فناوری به‌دلیل چگالی، سرعت بالا و توان مصرفی پایین در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته<sup>[۷]</sup> و از سوی دیگر ارتباطات امن بر اساس نانو در فناوری آتماتاتی سلولی کوانتومی نقطه‌ای به‌دلیل حساسیت بالایی که در طراحی و پیاده‌سازی مدارات دارد از اهمیت بالایی برخوردار است. ارتباطات امن می‌تواند برای کاربردهای

## ۱- مقدمه

فناوری اکسید فلز نیمه‌هادی مکمل<sup>۱</sup> بهعنوان یک فناوری محبوب، برخلاف مشکلات فراوان و اساسی همچون محدودیت فیزیکی، طی چندین دهه اخیر توانسته است پیش‌بینی گوردن مور<sup>۲</sup> «بهطور تقریبی در هر هیجده ماه تعداد ترانزیستورها در واحد سطح دو برابر می‌شوند» را به حقیقتی عملی تبدیل کند.<sup>[۱, ۲]</sup> با کاهش اندازه ترانزیستورها در حد نانو، توسعه مدارات نانو با مشکلاتی همچون نویه‌پذیری بالا، نشتی جربان، توان بالا، کاهش بسیار محسوس دقت مدار که ناشی از دمای بالای تراشه است رویه‌رو خواهد شد.<sup>[۳]</sup> بدین دلیل پژوهش گران مطالعات زیادی را برای یافتن فناوری

<sup>۱</sup> CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)

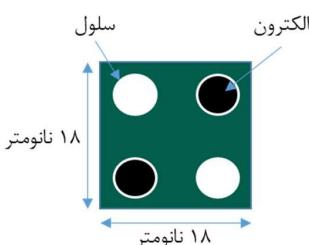
<sup>۲</sup> Gordon Moore

<sup>۳</sup> QCΔ (quantum-dot cellular automata)

فناوری آتماتای سلولی کوانتوسی نقطه‌ای در سطح نانو انجام داده‌اند. امروزه اطلاعات دودویی در رایانه‌ها بر پایه دو وضعیت روشن و خاموش که بهتر ترتیب به صورت بیت‌های صفر و یک نشان داده می‌شوند، بیان می‌شود [۱۱، ۱۲]. اطلاعات دودویی در رایانه‌ها بر پایه دو وضعیت روشن و خاموش که بهتر ترتیب به صورت بیت‌های صفر و یک نشان داده می‌شوند، بیان می‌شود [۱۲]. آتماتای سلولی کوانتوسی نقطه‌ای در سطح نانو روش جدیدی برای استفاده از جریان الکتریکی برای نمایش صفر و یک منطقی با چگونگی آرایش الکترون‌ها در سلول‌های کوانتوسی ارائه داده است [۱۲]. درواقع در آتماتای سلولی کوانتوسی نقطه‌ای در سطح نانو اطلاعاتی که به صورت دودویی هستند با بهره‌گیری از پیکربندی بارها در داخل یک سلول مشخص و رمزگاری می‌شوند [۱۰]. در آتماتای سلولی کوانتوسی نقطه‌ای در سطح نانو عملیات جاری و پردازش اطلاعات توسط تراکنش کولمبی<sup>۳</sup> میان سلول‌های مشابه صورت می‌پذیرد؛ بدین دلیل برای ایجاد اتصال مابین سلول‌ها از هیچ‌گونه سیم استفاده نمی‌شود [۱۲]. در این بخش ابتدا واحد اصلی و اساسی یعنی سلول در آتماتای سلولی کوانتوسی مورد بحث قرار می‌گیرد و سپس به ترتیب سیم‌های ارتباطی، دروازه معکوس‌کننده، دروازه‌های پایه و درنهایت ساعتزنی در آتماتای سلولی کوانتوسی نقطه‌ای در سطح نانو مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۱-۲- سلول در آتماتای سلولی کوانتوسی

سلول<sup>۴</sup> کوچک‌ترین واحد در فناوری آتماتای سلولی کوانتوسی نقطه‌ای در سطح نانو است. یک سلول کوانتوسی ساده همانند شکل (۱) دارای ساختاری مربعی شکل است که از چهار نقطه کوانتوسی<sup>۵</sup> برای نگهداری بار<sup>۶</sup> در گوش‌های از آن‌ها استفاده می‌کند. در یک سلول کوانتوسی دو الکترون آزاد موجود است که این الکترون‌ها می‌توانند به صورت آزادانه بین نقطه‌های کوانتوسی بین آن‌ها حرکت کنند.



(شکل-۱): پیاده‌سازی یک سلول با نقطه‌های کوانتوسی [۱۰، ۱۲]

<sup>۳</sup> Coulombic interaction

<sup>۴</sup> Cell

<sup>۵</sup> Quantum Dot

<sup>۶</sup> Charge containers

بسیار ساده اما در عین حال سریع، دقیق و مؤثر استفاده شود و آتماتای سلولی کوانتوسی نقطه‌ای در سطح نانو فناوری جدیدی است که با توجهی خاص به نانو فناوری پا به دنیای رایانه و امنیت آن نهاده و قادر است، امنیت اطلاعات و ارتباطات را افزایش دهد. با ظهور این فناوری دنیای امنیت ناچار است که دیر یا زود استفاده از روش‌های سنتی و نرم‌افزارهای پیچیده و حجمی را فراموش کرده و روند ایجاد پیچیدگی‌های غیرضروری و فربه کردن نرم‌افزارهای امنیتی را متوقف سازد و هر چه بیشتر از قبل به امنیت اطلاعات در سطح سخت‌افزاری اعتماد کند [۸، ۱۰].

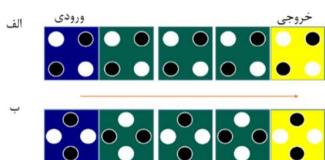
از سال ۱۹۹۳ که فناوری آتماتای سلولی کوانتوسی نقطه‌ای در سطح نانو مطرح شد [۱۰]، تاکنون مطالعات بسیاری برای طراحی، پیاده‌سازی، تحلیل مدارهای گوناگون و افزایش امنیت در ارتباطات بر اساس فناوری نانو انجام شده است. امنیت در بیشتر دستگاه‌ها و ارتباطات بین مدارات بر اساس امنیت در نانو، یک امر بسیار مهم و حائز اهمیت است. امنیت در ارتباطات یکی از بخش‌های مهم در بالابردن امنیت و قابلیت اطمینان مدارات است [۹]. لذا در این مقاله مداراتی که دارای امنیت بالا هستند و با قابلیت اطمینان طراحی و پیاده‌سازی شده‌اند، بررسی و مقایسه و همچنین مزایا و معایب هر یک از طراحی‌ها مطرح شده است. به دلیل اهمیت بالای این موضوع، تاکنون طرح‌های مختلفی برای بالابردن امنیت و قابلیت اطمینان در ارتباطات بر اساس نانو در فناوری آتماتای سلولی کوانتوسی ارائه شده است که در این مقاله مهم‌ترین طرح‌ها بررسی و تحلیل شده است.

آشنایی کلی با آتماتای سلولی کوانتوسی و اجزای اصلی آن در بخش دوم انجام می‌پذیرد و سپس کارهای انجام گرفته در زمینه مورد بحث در بخش سوم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش چهارم مقایسه‌ای بین روش‌های بررسی شده انجام و در بخش پنجم پیشنهاد کارهای آینده مطرح می‌شود و در بخش آخر نتیجه‌گیری و محدودیت‌های پژوهش ارائه شده است.

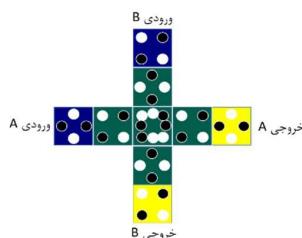
## ۲- آشنایی با فناوری آتماتای سلولی کوانتوسی نقطه‌ای در سطح نانو

آتماتای سلولی کوانتوسی برای نخستین بار در سال ۱۹۹۳ توسط Lent<sup>۱</sup> و Tago<sup>۲</sup> معرفی شد [۱۰]. پژوهش‌گران مطالعات فراوانی را از نظر آزمایشی و از نظر نئوری بر اساس

سلولی کوانتومی نقطه‌ای در سطح نانو به کاربرده می‌شود، روش نخست که استاندارد سیم‌کشی در آتوماتای سلولی کوانتومی است از کنار هم قراردادن سلول‌های استاندارد به وجود می‌آید که در شکل (۳-الف) مشاهده می‌شود. روش دیگری نیز وجود دارد که در این روش سلول‌های مورداستفاده در سیم‌کشی سلول‌های ۴۵ درجه هستند. با این که سلول‌ها در این روش سیم‌بندی با قطبش  $+1$  و  $-1$  یکدربینان کنار هم قرار می‌گیرند (شکل ۳-ب)، ولی سیم‌بندی با استفاده از این سلول‌ها ایجاد می‌شود و توسط این سیم می‌توان سیگنال را انتقال داد. برتری ای که این روش سیم‌بندی دارد، امکان استفاده از مقدار خود سیگنال و معکوس آن در طول سیم است که بهترتیب در سلول‌های فرد و زوج انتشار می‌یابد.



(شکل ۳-الف): سیم‌بندی با استفاده از سلول‌های ۹۰ درجه. (ب) سیم‌بندی با استفاده از سلول‌های ۴۵ درجه [۱۵]



(شکل ۳-ب): سیم‌کشی هم‌سطح و عبور دو سیگنال از روی یکدیگر بدون اثر مخرب بر روی یکدیگر [۱۵]

عبور دو سیم از روی همدیگر را سیم‌کشی هم‌صفحه<sup>۳</sup> می‌گویند که در آن از دو سیم ۴۵ و ۹۰ درجه استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود یک سیم با استفاده از روش سیم‌کشی سلولی ۹۰ درجه و دیگری با استفاده از سلول‌های ۴۵ درجه تشکیل یافته است و با عبور این سیم‌ها از روی همدیگر کوچک‌ترین اثری بر روی هم نگذاشته و بدون هیچ تداخلی سیگنال را منتقل می‌کنند [۱، ۱۵].

### ۲-۳- دروازه معکوس‌کننده<sup>۴</sup>

یکی از دروازه‌های پرکاربرد در مدارات منطقی دروازه

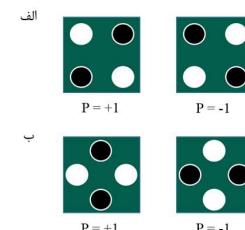
<sup>۳</sup> Coplanar wired crossing

<sup>۴</sup> Invertor

الکترون‌ها نمی‌توانند عمل تونل‌زنی را خارج از سلول انجام دهند. محل قرارگیری الکترون‌ها در یک سلول را قطبش سلول<sup>۱</sup> مشخص می‌کند. قطبش در سلول به صورت رابطه (۱) تعیین می‌شود [۱۶].

$$p_i = \frac{(P_1 + P_3) - (P_2 + P_4)}{P_1 + P_2 + P_3 + P_4} \quad (1)$$

در این رابطه  $P_i$  نشان‌دهنده چگالی بار الکتریکی موجود در هر یک از نقطه‌های کوانتومی است. رقم‌های دودویی در آتوماتای سلولی کوانتومی با آرایش الکترون‌ها در درون نقطه سلول‌ها مشخص می‌شود. بدلیل دافعه الکترواستاتیکی<sup>۲</sup> در بین الکترون‌ها آن‌ها تمایل به جهت‌گیری قطری در درون نقطه‌های سلول‌ها دارند. به‌گونه‌ای که یکی از دو آرایش موجود با قطبش  $-1 = P$  به عنوان صفر منطقی و دیگری با قطبش  $+1 = P$  به عنوان یک منطقی در نظر گرفته می‌شود. این مفهوم در شکل (۲) نشان داده شده است [۱۶]. این مفاهیم در مورد سلول‌های ۴۵ درجه چرخش یافته در آتوماتای سلولی کوانتومی نیز صدق می‌کند. شکل (۲-الف) ساختار استاندارد ۹۰ درجه سلول آتوماتای سلولی کوانتومی با قطبش‌های ممکن را نشان می‌دهد و شکل (۲-ب) ساختار ۴۵ درجه سلول آتوماتای سلولی کوانتومی با قطبش‌های موجود را نشان می‌دهد.



(شکل ۲-الف): ساختار استاندارد ۹۰ درجه سلول آتوماتای سلولی کوانتومی با قطبش‌های ممکن. (ب) ساختار ۴۵ درجه سلول آتوماتای سلولی کوانتومی با قطبش‌های موجود [۱۶]

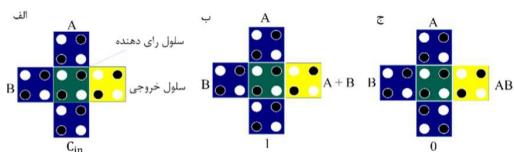
## ۲-۲- سیم‌های ارتباطی در آتوماتای سلولی کوانتومی نقطه‌ای در سطح نانو

سلول‌ها در فناوری آتوماتای سلولی کوانتومی نقطه‌ای در سطح نانو نقش سیم را ایفا می‌کنند و از آن‌ها برای انتقال داده و ارتباطات استفاده می‌شود. با در کنار هم قراردادن سلول‌های پایه، سیم ایجاد می‌شود.

در حالت کلی دو روش برای سیم‌کشی در آتوماتای

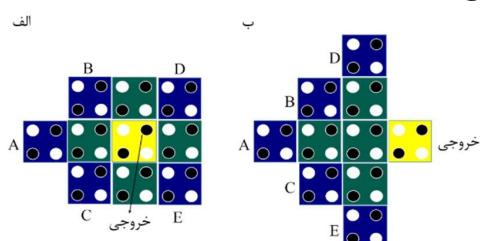
۱ Cell polarization

۲ Electrostatic



(شکل ۶-الف): ساختار دروازه اکثریت سه ورودی (ب) دروازه AND دو ورودی (ج) دروازه OR دو ورودی [۱۴]

همان طور که اشاره شد دروازه های منطقی دیگر را می توان با دروازه اکثریت سه ورودی<sup>۲</sup> پیاده سازی کرد، به این ترتیب که یک سلول ورودی این دروازه ثابت در نظر گرفته می شود و مقادیر دلخواه به ورودی های دیگر اعمال می شود؛ به این شکل که اگر یکی از ورودی ها را ثابت و مقدار ۱-در نظر گرفته شود و به دو ورودی دیگر مقادیر دلخواه داده شود، در خروجی مقدار AND ورودی ها به دست می آید (شکل ۶-ب). به همین ترتیب، با فرض سلول با مقدار ثابت ۱+، مقدار OR ورودی ها در سلول خروجی به دست خواهد آمد (شکل ۶-ج). جدول (۱) هشت حالت ممکن ورودی و خروجی به دست آمده را برای یک دروازه اکثریت سه ورودی نمایش می دهد.



(شکل ۷): دروازه های اکثریت پنج ورودی [۱۶]

جدول-۱): جدول درستی دروازه اکثریت سه ورودی

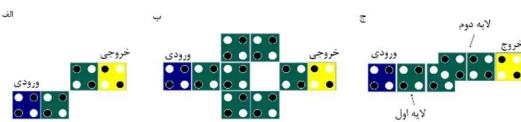
A	B	C	Maj (A,B,C)
.	.	.	.
.	.	۱	.
.	۱	.	.
۰	۱	۱	۱
۱	.	.	.
۱	.	۱	۱
۱	۱	۰	۱
۱	۱	۱	۱

علاوه بر دروازه اکثریت سه ورودی دروازه اکثریت پنج ورودی<sup>۳</sup> نیز ارائه شده که تاکنون طرح های متفاوتی نیز از این دروازه طراحی شده که دو نمونه از آن در شکل (۷) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در دروازه اکثریت

<sup>2</sup> Three input majority gate

<sup>3</sup> Five input majority gate

معکوس کننده است و فناوری آtomاتی سلولی کوانتموی نقطه های در سطح نانو از این امر مستثنی نیست. در فناوری آtomاتی سلولی کوانتموی نقطه های در سطح نانو برای معکوس سازی یک سیگنال به راحتی می توان سلول ها را مانند شکل (۵-الف) به صورت اریب در بالا و پایین سلول موردنظر قرارداد و بدین ترتیب معکوس ورودی را در خروجی تولید کرد. این روش در هنگام تولید خروجی با نویه همراه است و برای از بین این نویه از روش دیگری استفاده می شود، بدین صورت که مطابق شکل (۵-ب) در این وارون اگر به جای یک معکوس کننده از دو معکوس کننده ساده استفاده می شود که باعث بوجود آمدن یک معکوس کننده قوی و بدون نویه در خروجی می شود [۱۰]. روش سومی که برای ساخت معکوس کننده از آن استفاده می شود، روش لایه ای است که در این روش عمل معکوس کردن سیگنال در لایه ها صورت می گیرد. بر اساس دافعه کولمبی در سلول ها، دو لایه روی یک دیگر قطبش معکوس ایجاد می کنند [۱۴].



(شکل ۵-الف): معکوس کننده ساده (ب) معکوس کننده با دو سلول اثرگذار (ج) معکوس کننده دو لایه [۳]

## ۴-۲-۴- دروازه های پایه در آtomاتی سلولی کوانتموی نقطه های در سطح نانو

یکی از دروازه های پر کاربرد در آtomاتی سلولی کوانتموی نقطه های در سطح نانو دروازه اکثریت است و برخی از دروازه ها همچون دروازه های AND و OR نیز توسط این دروازه ساخته می شوند. دروازه اکثریت شامل سه ورودی و یک خروجی و یک سلول رأی دهنده است که در وسط دروازه قرار می گیرد و قطبش آن توسط قطبش سلول های ورودی کنترل می شود و متغیر است؛ یعنی اگر بیشتر ورودی ها دارای قطبش ۱- باشند، قطبش خروجی نیز ۱- و به همین ترتیب اگر ورودی ها ببیشترشان دارای قطبش ۰- باشند، قطبش سلول خروجی نیز برابر ۰+ خواهد بود [۱۴]. دروازه اکثریت سه ورودی در شکل (۶-الف) قابل مشاهده است. رابطه منطقی دروازه اکثریت سه ورودی در رابطه (۲) نشان داده شده است.

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

<sup>1</sup> Majority gate

نرمافزار QCADesigner نسخه ۲۰.۳ به دست می‌آید [۲۰]. در حال حاضر از این نرمافزار برای شبیه‌سازی مدارات تمام جمع‌کننده و شیفت‌ریجیسترها و واحد پردازش و محاسبه و منطق و حافظه باقابیلت دسترسی تصادفی استفاده می‌شود. نرمافزار QCADesigner همچنان در جهت ارائه خدمات دقیق و سریع برای طراحی مدارات آتوماتای سلولی کوانتومی در حال پیشرفت است. این نرمافزار قادر به شبیه‌سازی تمامی مدارات طراحی شده در آتوماتای سلولی کوانتومی نقطه‌ای در سطح نانو و با استفاده از سیستم‌عامل‌های استاندارد است؛ همچنین، نرمافزار QCAPro ابزاری برای ارزیابی خطأ و برآورده میزان انرژی مصرفی و اتلاف انرژی در مدارات طراحی شده در فناوری آتوماتای سلولی کوانتومی نقطه‌ای در سطح نانو است [۲۱]. این ابزار از یک روش تشخیص سریع بر اساس برآورد اشتباہ سلول‌ها استفاده می‌کند. QCAPro همچنین میزان انرژی ازدست‌رفته در مدارات در هر سیکل ساعت و در هر انتقال را برآورده کرده و میزان انرژی صرف شده در هر سلول را محاسبه می‌کند و به صورت نمودار نشان می‌دهد. از این ابزار می‌توان برای برآورده کمینه و بیشینه اتلاف انرژی در طول تعویض یک ورودی استفاده کرد. این کار بستر مناسبی را برای پژوهش‌گران برای بررسی مسائل مربوط به خطأ در قطبش و اتلاف انرژی مصرفی را فراهم می‌کند. این ابزار از فایل طراحی و تولیدشده توسط QCADesigner به عنوان ورودی استفاده می‌کند. QCAPro میزان تلفات توان در تغییر قطبش در هر مدار بر اساس آتوماتای سلولی کوانتومی نقطه‌ای در سطح نانو را بر حسب متوسط، بیشیه و کمینه تخمین می‌زند و خروجی را در دو حالت متن و فرمتهای گرافیکی (عکس) تولید می‌کند.

### ۳- مروری بر روش‌های موجود

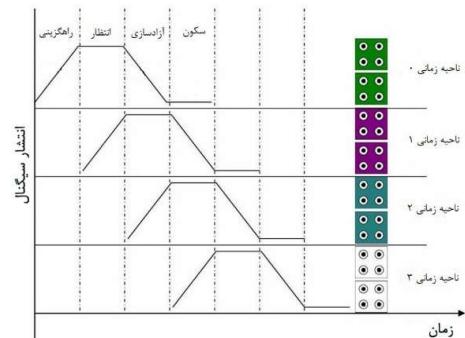
در این بخش مروری بر روش‌ها و مقالات انجام‌شده برای افزایش امنیت ارتباطات مدارات در فناوری نانو بر اساس آتوماتای سلولی کوانتومی صورت می‌گیرد. مقالات انتخاب شده در شکل (۹) نشان داده شده است.

در [۲۲] توسط دس و همکاران مدار دروازه دیکودر<sup>۲</sup> باقابیلت برگشت‌پذیری برای افزایش امنیت در ارتباطات بر اساس نانو ارائه شده است. مدار دروازه دیکودر از یک دروازه اصلی به نام QCA1 تشکیل که توسط دس و همکاران طراحی شده است و قابليت برگشت‌پذيری را دارد. درواقع این دروازه از سه دروازه اکثریت سه ورودی تشکیل و در سه لایه فعال

پنج ورودی شکل (۷-الف) خروجی توسط سلول‌های ورودی محاصره شده است؛ اما در شکل (۷-ب) خروجی محصور نیست. دروازه اکثریت پنج ورودی شامل پنج ورودی و یک خروجی است [۱۶]. می‌توان همانند دروازه اکثریت سه ورودی با ۱ و ۱- کردن دو ورودی از پنج ورودی دروازه اکثریت آن راه بهتری به دروازه AND و OR سه ورودی تبدیل کرد [۱۷، ۱۶].

### ۴-۵- ساعت زنی<sup>۱</sup> در آتوماتای سلولی کوانتومی نقطه‌ای در سطح نانو

در فناوری آتوماتای سلولی کوانتومی نقطه‌ای در سطح نانو، منطق دودویی بر دو مشخصه آتوماتای سلولی و مکانیک کوانتومی استوار است و این موضوع ناشی از اطلاعات دودویی است که در آرایش بارها در داخل سلول‌های کوانتومی قرار می‌گیرند و سلول‌ها به جز برای ساعت‌های (کلک) آتوماتا به توان خارجی نیاز ندارد. ساعت زنی در آتوماتای سلولی کوانتومی با کاهش و افزایش انرژی در داخل حفره‌هایی که الکترون‌ها در آن قرار دارند امکان‌پذیر است. با استفاده از ساعت زنی، سلول‌ها در داخل یک منطقه ساعت زنی با قطبش مشخص نگاه داشته می‌شوند.

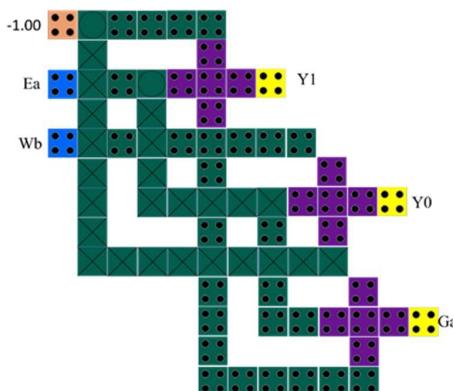


(شکل-۸): نمایش چهار مرحله در مدارهای آتوماتای سلولی کوانتومی و تغییرات مرزهای پتانسیل سلول نسبت به زمان [۱۹، ۱۸]

### ۶- نرم‌افزارهای شبیه‌سازی

طراحان مدارات آتوماتای سلولی کوانتومی نقطه‌ای در سطح نانو به یک ابزار سریع و دقیق برای تحلیل مدارات و بررسی صحت طراحی‌ها و تعیین قابلیت مدارات نیاز دارند. QCADesigner به طراحان این اجرازه را می‌دهد که سریع و با دقت بالا به طراحی و بررسی مدارت پردازند و نتایج حاصل را به راحتی تحلیل و بررسی کنند. این نتایج با استفاده از

<sup>۱</sup> Clocking

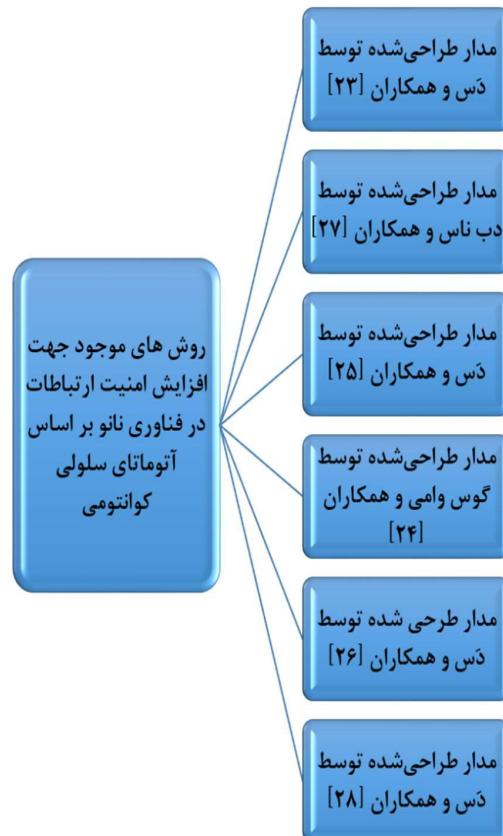


(شکل-۱۰): مدار دیکودر برگشت‌پذیر طراحی شده توسط دس و همکاران [۲۲]

با رشد روزافزون مدارات بر اساس فناوری آtomاتای سلولی کوانتومی نقطه‌ای در سطح نانو و نیاز به قابل اطمینان بودن این مدارات و امنیت در آن‌ها و ارتباطات بر اساس نانو سبب افزایش مطالعات در این زمینه شد [۲۳]. گوس وامی و همکاران در [۲۴] طرح جدیدی ارائه داده‌اند که توجه ویژه‌ای به امر قابلیت اطمینان مدار، امنیت و بحث آزمودن‌پذیری مدارات دارد. الگوهای خرابی برای آزمودن مدار همچون جابه‌جایی سلول و پیچش سلول و عدم وجود سلول در مدار موردنرسی قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین ویژگی که این مدار دارد، آزمون کردن کل مدار با استفاده از سه بردار آزمون است. تجزیه و تحلیل‌های جامعی با استفاده از نرم‌افزار QCAPro برای بررسی مصرف انرژی و اتلاف توان در مدار پیشنهادی صورت گرفته است که نشان می‌دهد مدار پیشنهادی علاوه بر قابلیت اطمینان و امنیت بالا در انتقال اطلاعات، از مصرف توان کمی نسبت به مدارات دیگر برخوردار است. اصلی‌ترین مزیت مدار طراحی شده، قابلیت آزمون ۹۸٪ مدار توسط خودمدار برای خطاهای تکی است که نخستین بار در فناوری آtomاتای سلولی کوانتومی مطرح شده است. مدار طراحی شده توسط گوس وامی و همکاران در شکل (۱۱) نشان داده شده است. قابلیت اطمینان با امنیت بالا و توان مصرفی کم مدار ارائه شده باعث شده است گزینه مناسبی برای طراحی بخش محاسبه و منطق<sup>۱</sup> و انجام توابع منطقی (۱۰ تابع منطقی مهم) در این بخش باشد. طراحی مدار در نرم‌افزار QCADesigner صورت گرفته و تلفات توان مدار توسط نرم‌افزار شبیه‌ساز QCAPro ارائه شده است.

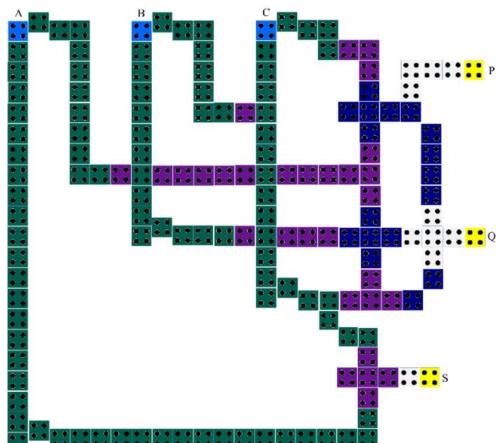
<sup>۱</sup> ALU

پیاده‌سازی شده که دارای سه ورودی و سه خروجی است. دروازه طراحی شده مقیاس فضای استفاده شده کمتری نسبت به طرح‌های دیگر دارد. اتفاق توان در این مقاله موردنرسی قرار گرفته است که در این مقاله توان مصرفی بسیار کمتر از مدار جایگزین در فناوری اکسید فلز نیمه‌هادی مکمل است. همچنین با استفاده از این دروازه می‌توان دروازه‌های پایه AND و OR را پیاده‌سازی و اجرا کرد. مدار ارائه شده می‌تواند برای طراحی‌های برگشت‌پذیر که امنیت مدار موردنظر است استفاده شود. این مقاله نخستین مقاله ارائه شده در زمینه برگشت‌پذیری و افزایش امنیت در مدار دیکودر بر اساس فناوری آtomاتای سلولی کوانتومی نقطه‌ای در سطح نانو است. شبیه‌سازی این مدار در محیط QCADesigner صورت گرفته است. مدار دروازه دیکودر برگشت‌پذیر با امنیت بالا در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در مقایسه مدار طراحی شده با مدارات قبلی، مدار طراحی شده توسط دس و همکاران از سرعت بیشتر، مصرف توان کمتر و امنیت در ارتباطات بر اساس نانو و انتقال داده نسبتاً به طرح‌های قبلی برخوردار است و نیز از این مدار می‌توان در مدار برگشت‌پذیر دیگر استفاده کرد.



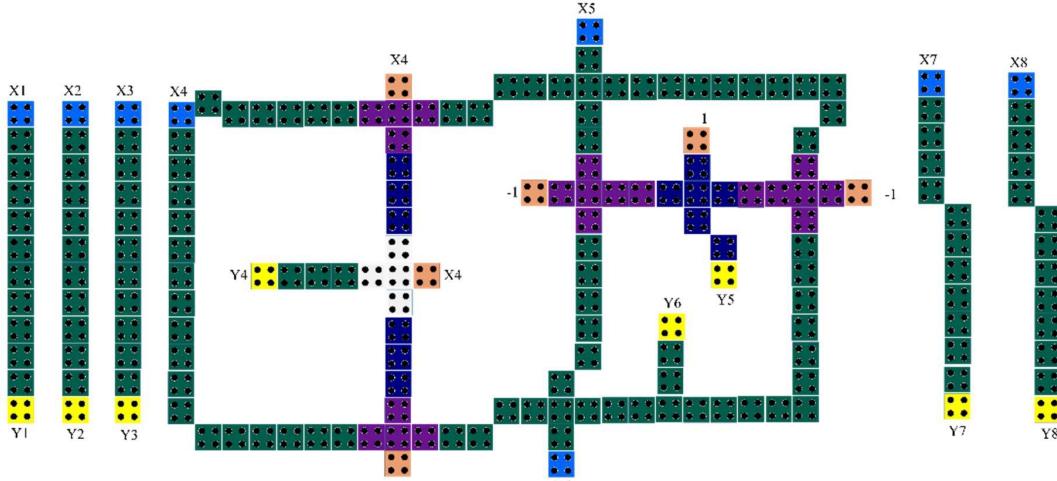
(شکل-۹): مقالات انتخاب شده جهت مرور

طراحی، مداری با دروازه Atbash در فناوری آtomاتای سلولی کوانتمومی برای رمزگذاری ارتباطات نانویی است. طرح پیشنهادی برای پیاده‌سازی به فضا و مساحت کم، شش دروازه اکثربت سه ورودی، نه معکوس کننده و چهار ناحیه ساعتزنی نیاز دارد. مدار پیشنهادی دارای مصرف توان پایین است به همین دلیل می‌تواند در مقابل حملات توان در ارتباطات بر اساس نانو مقاومت لازم را داشته باشد. مدار طراحی شده در شکل (۱۲) نشان داده شده و توسط نرم‌افزار QCADesigner پیاده‌سازی شده و تحلیل مصرف انرژی آن نیز توسط نرم‌افزار QCAPro انجام شده است. در طراحی این مدار مسائل زیادی همچون تراکم مدار و ناسازگاری در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی مدار دنباله هشت‌بیتی از داده‌ها به عنوان مثال، جریان یک بایت از داده‌ها از یک متن ساده در یک‌زمان به عنوان یک ورودی به مدار پیشنهادی داده می‌شود و صحت عملکرد مدار مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده بهره‌وری کاربردی مدار طراحی شده است.



(شکل-۱۱): مدار پیشنهادی توسط گوس وامی [۲۳]

معماری قطعات سختافزاری با لحاظ کردن مسئله‌های امنیت، اتلاف توان کم، قابلیت اطمینان بالای مدار، رمزگذاری و بازگشایی رمز در ارتباطات بر اساس نانو امر بسیار مهم و اثرگذاری است [۲۴]. رمزگاری می‌تواند مسیری امیدبخش در فناوری آtomاتای سلولی کوانتمومی باشد. در [۲۴]، مداری توسط دس و همکاران طراحی شده که این

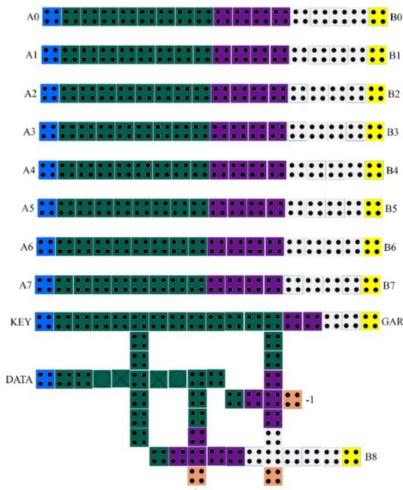


(شکل-۱۲): مدار انکوڈر و دیکوڈر پیشنهادی توسط دس و همکاران [۲۴]

کوانتمومی برای تولید متن رمزشده و این مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت دروازه رمزگار و رمزگشای امن طراحی شده است. با توجه به تولید حملات زیاد بر روی مدارات سختافزاری با استفاده از دروازه رمزگار و رمزگشایی تا حد بسیار زیادی می‌توان از وقوع این حملات جلوگیری کرد. مدار ارائه شده مدار بهینه‌ای از لحاظ ایمنی و مقاومت در مقابل حملات مختلف است و در شرایط نامن بهتر از مدارات سنتی بر اساس آtomاتای سلولی کوانتمومی در مقیاس نانو عمل می‌کند و دارای توان مصرفی کمتر و منطقه زمانی کمتر

فناوری آtomاتای سلولی کوانتمومی نقطه‌ای در سطح نانو با استفاده از ارتباطات بین سلولی می‌تواند در بحث رمز و امنیت داده بسیار مهم واقع شود و نقش عمدہ‌ای را بازی کند. در [۲۵]، مدار جدیدی توسط دس و همکارانش در سال ۲۰۱۲ ارائه و هر دو فرایند رمزگاری و رمزگشایی با استفاده از دروازه‌های پایه در فناوری آtomاتای سلولی کوانتمومی نقطه‌ای در سطح نانو پیاده‌سازی شده است [۲۵]. این دروازه در شکل (۱۳) نشان داده شده است. در این مقاله راههای اساسی برای ارتباطات بین سلولی در فناوری آtomاتای سلولی

نتایج حاصل مدار رمزگذار و رمزگشای ارائه شده اتلاف انرژی کم نسبت به مدارات دیگر را نشان می دهدن. تجزیه و تحلیل نقص ها مبتنی بر سلول اضافی و گم شدنگی نیز در این مطالعه موردنبررسی قرار گرفته و درصد امنیت و قابلیت اطمینان مدار نسبت به دمای های گوناگون متفاوت است.



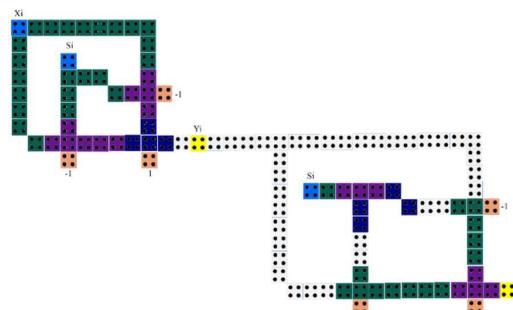
(شکل-۱۴): مدار ارائه شده توسط دب ناس و همکاران [۲۶]

باید توجه داشت، ارتباطات بر اساس نانو فناوری امری بسیار مهم و حائز اهمیت است. ارتباطات بر اساس نانو، تنها به کاربران، اجازه دسترسی به داده ها را می دهد. اتلاف انرژی بالا در مدارات برگشت ناپذیر سنتی بر اساس فناوری آتماتای سلولی کوانتمی نقطه ای در سطح نانو، بسیار مهم و به آن توجهی نشده است. منطق برگشت پذیر یک جایگزین مناسب برای مدارات سنتی است. منطق برگشت پذیر دارای کمینه مصرف انرژی و در حالت کلی مصرف انرژی صفر است. در سال ۲۰۱۶، در [۲۷] مدار بهینه شده مدار فردکین<sup>۵</sup> طراحی شده است. مدار ارائه شده نسبت به مدار فردکین از لحاظ مساحت مورداستفاده، تعداد سلول و تأخیر بسیار بهینه است و کلید برگشت پذیر با مدار فردکین طراحی و پیاده سازی و در واقع برای ارتباطات بر اساس نانو و محافظت از اطلاعات یک کاربر از مدارات برگشت پذیر و کلید تأیید شده استفاده که این روش با استفاده از دروازه فردکین طراحی شده است و گفتنی است برای نخستین بار، روش احرار هویت مبتنی بر فناوری آتماتای سلولی کوانتمی نقطه ای در سطح نانو در این مقاله بررسی شده است. مدار طراحی شده در شکل (۱۵) نشان داده شده است. مدار در محیط شبیه سازی

<sup>۵</sup> Matlab

<sup>۶</sup> Fredkin

نسبت به مدارات سنتی است. رمزگذاری و رمزگشایی در این مدار در پیام هفت بیتی صورت می گیرد و کلید نیز هفت بیتی است اما می تواند هر مقدار داده را رمزگاری و رمزگشایی کند و کلید نیز قابل تغییر است. با این دروازه می توان رمزگاری سامانه های ارتباطی امن مبتنی بر نانو در فناوری آتماتای سلولی کوانتمی نقطه ای در سطح نانو را انجام داد. پیاده سازی و آزمون نتایج با استفاده از نرم افزار QCADesigner صورت گرفته و نتایج حاصل نشان دهنده صحت عملکرد مدار در رمزگذاری و رمزگشایی است.



(شکل-۱۵): مدار ارائه شده توسط دب ناس و همکاران [۲۵]

همچنین، دب ناس و همکاران در [۲۶] به ارائه روش جدیدی برای پنهان نگاری و رمزگاری عکس و افزایش امنیت با استفاده از منطق برگشت پذیر در فناوری آتماتای سلولی کوانتمی نقطه ای در سطح نانو پرداخته اند [۲۶]. در این مدار از دروازه Feynman<sup>۱</sup> برای رمزگذاری و رمزگشایی تصویر استفاده شده است. در شکل (۱۴) ارتباطات بر اساس نانو و مدار طراحی شده نشان داده است. مدار پیشنهادی ارائه شده از مصرف توان انرژی کمتر، مصرف سلول کم و مصرف مساحت مورداستفاده کمتری بربور دارد است که نشان دهنده اثربخشی بالای این طرح در سایر طراحی ها بر پایه این مدار است. این مدار برای رمزگاری و پنهان نگاری تصویر از فناوری<sup>2</sup> USB استفاده می کند. همچنین نسبت سیگنال به نویه<sup>۳</sup> و اوج نسبت سیگنال به نویه محاسبه می شود و میانگین مجدد خطاهای<sup>۴</sup> نیز محاسبه می گردد. مدار ارائه شده برای مدارات برگشت پذیر بسیار مناسب است. در مرحله آزمون مدار، از نرم افزار متلب<sup>۵</sup> برای تولید ورودی به مدار استفاده و مدار در نرم افزار شبیه ساز QCADesigner پیاده سازی و صحت مدار در این نرم افزار تأیید شده است.

<sup>۱</sup> Feynman gate

<sup>۲</sup> Least significant bit

<sup>۳</sup> Signal to noise ratio

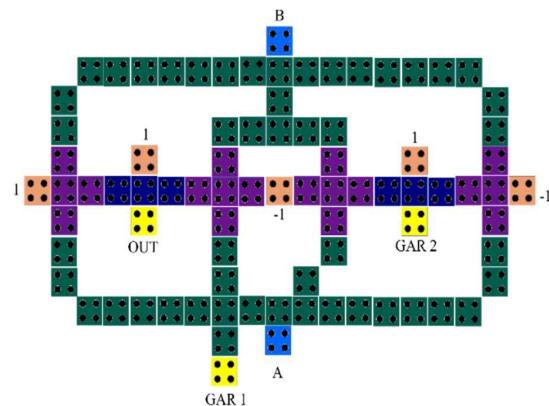
<sup>۴</sup> Mean squared error

طراحی نوین و سازگار در ارتباطات بر اساس نانو با فناوری آتوماتای سلولی کوانتومی است.

## ۵- پیشنهاد کارهای آینده

با توجه به مطالعات و پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه افزایش امنیت در ارتباطات بر اساس نانو، اهمیت این موضوع مشخص می‌شود؛ از این‌رو می‌توان پیشنهادهایی را برای افزایش امنیت ارتباطات بر اساس نانو ارائه کرد. بدین‌منظور می‌توان به استفاده از روش‌های مقالات مورود شده در طراحی سایر مدارات و طراحی مدارت جدید با امنیت بالا، استفاده از مدارات طراحی‌شده در مدارات دیگر، بالابردن ضربی اطمینان و امنیت آن‌ها، پایین‌آوردن تعداد سلول مصرفی، مساحت مورداستفاده، کمکردن مصرف توان در طراحی مدارات با امنیت بالای جدید، تحلیل انرژی مصرفی مدارات امن با ضربی اطمینان بالا و مطالعات مربوط به پیاده‌سازی مدارات اشاره کرد.

QCADesigner پیاده‌سازی شده و صحت درستی مدار مورد آزمایش قرار گرفته است و نسبت به مدارات قبلی پیشرفته قابل توجهی از لحاظ افزایش امنیت، افزایش سرعت، کاهش سطح مصرفی و ناحیه زمانی کمتر را دارد.



(شکل-۱۵): مدار ارائه‌شده توسط دس و همکاران [۲۷]

## ۴- روش‌های بررسی شده

در این بخش مقایسه جامع میان طرح‌ها و پیاده‌سازی‌های مداراتی که در بخش قبل برای بالابردن امنیت مدارات در ارتباطات بر اساس نانو در فناوری آتوماتای سلولی کوانتومی نقطه‌ای در سطح نانو معرفی شد انجام و تعداد سلول، تعداد لایه، روش امنیت و هدف هر کدام بررسی و مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، ساختارهای ارائه‌شده، با هدف بالابردن امنیت در ارتباطات بر اساس نانو از جنبه‌های مختلف مقایسه شده‌اند.

ستون نخست در جدول (۲) طراحی‌های ارائه‌شده برای بالابردن امنیت را مشخص می‌کند. ستون دوم لایه، ستون سوم تعداد سلول، ستون چهارم و پنجم به ترتیب روش امنیت و هدف طراحی‌های ارائه‌شده را نمایش می‌دهند.

در زمینه مدارات طراحی‌شده با ارتباطات بر اساس نانو در فناوری آتوماتای سلولی کوانتومی نقطه‌ای برای بالا بردن امنیت، با توجه به مقایسه‌های انجام‌گرفته، مشاهده شد که پژوهش‌گران همواره ارتباطات بر اساس نانو ایمنی و امنیت بالا را مدنظر قرار داده‌اند و برای رسیدن به هدفی بهینه در این زمینه تلاش کرده و همواره تلاش کرده‌اند از ملزمات سخت‌افزاری مدارات امن بکاهند و هم‌زمان سرعت آن را افزایش داده و باعث کاهش مصرف انرژی گردند. همواره دست‌یابی به مدارهایی با امنیت بالا در سطح نانو نیازمند ارائه

## ۶- نتیجه‌گیری و محدودیت‌های پژوهش

مسئله موردمطالعه در این مقاله طراحی مدارت امن در ارتباطات بر اساس نانو با استفاده از فناوری آتوماتای سلولی کوانتومی بود. مدارات در آتوماتای سلولی کوانتومی بسیار حساس به نویه و حملات هستند و امنیت در ارتباطات بر اساس نانو نیز امری بسیار مهم در این فناوری جدید به شمار می‌رود؛ از این‌رو بحث امنیت به مسئله مهم و اساسی بین پژوهش‌گران در این زمینه تبدیل شده است. هرچه امنیت در مدارات بر اساس فناوری آتوماتای سلولی کوانتومی نقطه‌ای در سطح نانو افزایش یابد، قابلیت اطمینان مدارات افزایش می‌یابد و مدار قابلیت اطمینان و امنیت بالایی نسبت به سایر مدارات نظیر خود دارد، می‌تواند در دیگر مدارات استفاده شود و امنیت و قابلیت اطمینان در آن مدار را نیز افزایش دهد. هدف نهایی این پژوهش‌ها طراحی مدارات پریازده و امن با قابلیت اطمینان بالا است که با استفاده از آن‌ها رایانه‌های کوانتومی آینده را پیاده‌سازی کرد؛ درواقع هدف اصلی از بالابردن امنیت در مدارت و ارتباطات بر اساس نانو بالابردن قابلیت ساخت مدارات و قابلیت اطمینان است. نتایج حاصل از بررسی مقالات موجود در این زمینه نشان می‌دهد که بحث امنیت در ارتباطات مبتنی بر پایه فناوری نانو امری بسیار مهم و اساسی است و باید توجه گسترده‌ای به این هدف صورت گیرد. باید پژوهش‌گران امنیت را در تمام بخش‌های

استفاده از منابع غیر لاتین است که خود مشکلات دیگری همچون محدودیت زمان، ترجمه صحیح متون و یکدست کردن آنها را به همراه دارد. همچنین نبود کار مشابه در این زمینه که به طور مستقیم به این موضوع پرداخته باشد، و عدم وجود امکانات لازم برای پیاده سازی عملی این مدارات و بررسی نتایج حاصل از دیگر محدودیت های پژوهش است.

فناوری آtomاتای سلولی کوانتمی نقطه ای در سطح نانو گسترش دهنده.

کافی نبودن منابع علمی در دسترس برای جمع بندی یا کمبود و یا فقدان منابع علمی قابل دسترس و استفاده و منابع علمی بسیار کم و محدود (دست کم به صورت فارسی) در این زمینه موجود است که به طور مستقیم به موضوع مورد مطالعه و پژوهش مربوط باشد؛ به همین دلیل نیازمند

(جدول-۲): مقایسه مدارات طراحی شده

هدف	روش امنیت	سلول	لایه	طرح
افزایش امنیت در ارتباطات بر اساس نانو	ارائه دروازه دیکودر جدید با قابلیت برگشت پذیری	۹۶	۳	مدار طراحی شده توسط دس و همکاران [۲۲]
قابلیت اطمینان مدار و امنیت و نیز بحث آزمون پذیری مدارات	ارائه مدار adder با قابلیت آزمون و منجش امنیت	۱۷۵	۱	مدار طراحی شده توسط گوس وامی و همکاران [۱۷]
رمزگذاری ارتباطات نانویی	طراحی مداری با دروازه Atbash در فناوری آtomاتای سلولی کوانتمی	۱۸۶	۱	مدار طراحی شده توسط دس و همکاران [۲۴]
تولید متن رمز شده و ایمن و مدار بهینه ای از لحاظ ایمنی و مقاوم در مقابل حملات مختلف	پیاده سازی فرایند رمز نگاری و رمزگشایی با استفاده از دروازه های پایه در فناوری آtomاتای سلولی کوانتمی	۱۰۹	۱	مدار طراحی شده توسط دس و همکاران [۲۵]
روش جدیدی برای پنهان نگاری و رمز نگاری عکس و افزایش امنیت	استفاده از منطق برگشت پذیر مدار از دروازه فینیم برای رمزگذاری و رمزگشایی تصویر	۱۸۱	۳	مدار طراحی شده توسط دب ناس و همکاران [۲۶]
کاهش مساحت مورداستفاده، تعداد سلول و تأثیر	ارائه مدار بهینه شده مدار فردکین و کلید برگشت پذیر با مدار فردکین	۸۸	۱	مدار طراحی شده توسط دس و همکاران [۲۷]

## -۷- مراجع

- [7] A. Orlov, I. Amlani, G. Bernstein, C. Lent, and G. Snider, "Realization of a functional cell for quantum-dot cellular automata ",*Science*, vol. 277, no. 5328, pp. 928-930, 1997.
- [8] S. Seyedi and N. J. Navimipour, "Design and evaluation of a new structure for fault-tolerance full-adder based on quantum-dot cellular automata," *Nano communication networks*, vol. 16, pp. 1-9, 2018.
- [9] S. Sayedsalehi, M. H. Moaiyeri, and K. Navi, "Novel efficient adder circuits for quantum-dot cellular automata," *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, vol. 8, no. 9, pp. 1769-1775, 2011.
- [10] P. D. Tougaw and C. S. Lent, "Logical devices implemented using quantum cellular automata," *Journal of Applied physics*, vol. 75, no. 3, pp. 1818-1825, 1994.
- [11] S. Seyedi and N. J. Navimipour, "An Optimized Three-Level Design of Decoder Based on Nanoscale Quantum-Dot Cellular Automata," *International Journal of Theoretical Physics*, pp. 1-12, 2018.
- [1] C. S. Lent, P. D. Tougaw, W. Porod, and G. H. Bernstein, "Quantum cellular automata," *Nanotechnology*, vol. 4, no. 1, p. 49, 1993.
- [2] G. Moore, "Moore's law," *Electronics Magazine*, vol. 38, no. 8, 1965.
- [3] P. E. Allen and D. R. Holberg, *CMOS analog circuit design*. Oxford Univ. Press, 2002.
- [4] S. Afroz and N. J. Navimipour, "Memory designing using quantum-dot cellular automata: systematic literature review, classification and current trends," *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 26, no. 12, p. 1730004, 2017.
- [5] S. Afroz and N. J. Navimipour, "Fault-Tolerant Design of a Shift Register at the Nanoscale Based on Quantum-dot Cellular Automata," *International Journal of Theoretical Physics*, pp. 1-17, 2018.
- [6] S. Seyedi and N. J. Navimipour ,An optimized design of full adder based on nanoscale quantum-dot cellular automata," *Optik*, vol. 158, pp. 243-256, 2018.

- [24] J. C. Das and D. De, "Atbash Cipher Design for Secure Nanocommunication Using QCA," *Nanomaterials and Energy*, pp. 1-42, 2017.
- [25] J. C. Das and D. De, "Quantum Dot-Cellular Automata based cipher text design for nano-communication," in *Radar, Communication and Computing (ICRCC), 2012 International Conference on*, 2012, pp. 224-229: IEEE.
- [26] B. Debnath, J. C. Das, and D. De, "Reversible logic-based image steganography using quantum dot cellular automata for secure nano-communication," *IET Circuits, Devices & Systems*, 2016.
- [27] J. C. Das and D. De, "User authentication based on quantum-dot cellular automata using reversible logic for secure nanocommunication," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 41, no. 3, pp. 773-784, 2016.

**سعید سیدی** تحصیلات خود در مقطع کارشناسی مهندسی رایانه (سخت افزار) را سال ۱۳۹۳ در دانشگاه جهاد دانشگاهی تبریز به پایان رساند و مدرک کارشناسی ارشد مهندسی رایانه (معماری کامپیوتر) را در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز اخذ کرد. زمینه‌های پژوهشی ایشان در حوزه فناوری نانو، آtomاتاتی سلولی کوانتوسی، VLSI، شبکه بر روی تراشه و سخت-افزارهای تحمل پذیر خطا است.



**نیما جعفری نوبیمی پور** تحصیلات خود در مقطع کارشناسی مهندسی رایانه (نرم افزار) را سال ۱۳۸۶ در دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز و کارشناسی ارشد مهندسی رایانه (معماری کامپیوتر) را سال ۱۳۸۸ در همان دانشگاه به پایان رساند؛ سپس مدرک دکترای خود را سال ۱۳۹۳ در رشته مهندسی کامپیوتر (معماری کامپیوتر) از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران اخذ کرد. ایشان هم‌اکنون عضو هیأت علمی گروه مهندسی رایانه دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز بوده و تا کنون بیشتر از ۱۰۰ مقاله در مجلات و کنفرانس‌های بین‌المللی معتبر به چاپ رسانده است. زمینه پژوهشی ایشان آtomاتاتی کوانتوسی سلولی، اینترنت اشیا، رایانش ابری، نرم‌افزارهای تحمل پذیر خطا، هوش محاسباتی و شبکه بر روی تراشه است.



- [12] A. Vetteth, K. Walus, V. S. Dimitrov, and G. A. Jullien, "Quantum-dot cellular automata of flip-flops," *ATIPS Laboratory*, vol. 2500, 2003.
- [13] M. R. Azghadi, O. Kavchic, and K. Navi, "A novel design for quantum-dot cellular automata cells and full adders," *arXiv preprint arXiv:1204.2048*, 2012.
- [14] K. Kim, K. Wu, and R. Karri, "Towards designing robust QCA architectures in the presence of sneak noise paths," in *Proceedings of the conference on Design, Automation and Test in Europe - Volume 2*, 2005, pp. 1214-1219: IEEE Computer Society.
- [15] W. K. Kim K., and R. Karri, "Fundam. Electron. Commun. Comput. Sci," *1607*, 2006.
- [16] S. Sayedsalchi, M. R. Azghadi, S. Angizi, and K. Navi, "Restoring and non-restoring array divider designs in quantum-dot cellular automata," *Information sciences*, vol. 311, pp. 86-101, 2015.
- [17] K. Navi, A. Roohi, and S. Sayedsalehi, "Designing reconfigurable quantum-dot cellular automata logic circuits," *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, vol. 10, no. 5, pp. 1137-1146, 2013.
- [18] S. Sheikhfaal, S. Angizi, S. Sarmadi, M. H. Moaiyeri, and S. Sayedsalchi, "Designing efficient QCA logical circuits with power dissipation analysis," *Microelectronics Journal*, vol. 46, no. 6, pp. 462-471, 2015.
- [19] M. T. Niemier, "Designing digital systems in quantum cellular automata," University of Notre Dame, 2004.
- [20] 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 transactions on Nanotechnology*, vol. 3, no. 1, pp. 26-31, 2004.
- [21] S. Srivastava, A. Asthana, S. Bhanja, and S. Sarkar, "QCAPro-an error-power estimation tool for QCA circuit design," in *2011 IEEE International Symposium of Circuits and Systems (ISCAS)*, 2011, pp. 2377-2380: IEEE.
- [22] J. C. Das, D. De, and T. Sadhu, "A novel low power nanoscale reversible decoder using quantum-dot cellular automata for nano-communication," in *Devices, Circuits and Systems (ICDCS), 2016<sup>th</sup> International Conference on*, 2016, pp. 220-224: IEEE.
- [23] M. Goswami, B. Sen, R. Mukherjee, and B. K. Sikdar, "Design of Testable Adder in Quantum-dot Cellular Automata with Fault Secure Logic," *Microelectronics Journal*, vol. 60, pp. 1-12, 2017.