

Research Paper

# Design and Simulation of a 4:1 Multiplexer Using Quantum Rings<sup>1</sup>

Amir Taghavi Motlagh<sup>2</sup> and Hojjatollah Khajeh Salehani<sup>\*3</sup>

Received: 2021.09.02

Revised: 2021.11.12

Accepted: 2021.12.22

## Abstract

In this paper, a 4 to 1 multiplexer circuit is designed with four quantum rings where each ring is threaded by a constant magnetic flux  $\varphi_0/2$ . The quantum rings are connected to each other in series. They are attached symmetrically to two semi-infinite one-dimensional metallic electrodes, namely, source and drain, and four gate voltages are applied to the specific atomic sites of the quantum rings as four inputs of the multiplexer and also two other gate voltages are applied as the select lines. The Hamiltonian of the full system, i.e., the quantum rings, source and drain, are approximated by the tight-binding model, and the calculations are performed by using the Green's function formalism for the strong and weak coupling between the quantum rings and the source and drain electrodes. The drain output current is calculated by using the Landauer formula as a function of the applied bias voltage. The truth tables of the multiplexer are obtained by assigning the 0 and 1 values to zero and non-zero drain current for different values of the data inputs on the basis of the values of the selected lines. It is found that this quantum structure behaves as a binary 4 to 1 multiplexer.

**Keywords:** *Quantum Transport, Quantum ring, Multiplexer, Green Function.*

---

<sup>1</sup> DOI: 10.22051/ijap.2021.37410.1234

<sup>2</sup> M. Sc. Graduated, Department of Electrical Engineering, Damavand Branch, Islamic Azad University, Damavand, Iran. Renewable Energy Research Center, Damavand Branch, Islamic Azad University, Damavand, Iran. Email: Amir.taghavi24@gmail.com

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Damavand Branch, Islamic Azad University, Damavand, Iran. Renewable Energy Research Center, Damavand Branch, Islamic Azad University, Damavand, Iran. (Corresponding Author). Email: hksalehani@damavandiau.ac.ir



# طراحی و شبیه‌سازی مالتی پلکسر ۴ به ۱ با استفاده از حلقه‌های کوانتومی<sup>۱</sup>

امیر تقوی مطلق<sup>۲</sup> و حجت‌الله خواجه صالحانی<sup>۳\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۱

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک شیمی، دانشگاه الزهرا

سال یازدهم، پیاپی ۲۷، زمستان ۱۴۰۰

صص ۵۷-۷۶

## چکیده:

در این مقاله با استفاده از چهار حلقه کوانتومی که از هر یک حلقه‌ها شار مغناطیسی  $\varphi = \frac{\varphi_0}{2}$  عبور کرده است، یک مدار مالتی پلکسر ۴ به ۱ دودویی طراحی شده است. حلقه‌های کوانتومی به صورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند. این آرایش از دو طرف به طور متقارن به الکترودهای نیمه بی‌نهایت فلزی منبع و درآشامنده متصل شده‌اند و ولتاژهای دروازه نیز به عنوان ورودی‌ها به نقاط مشخصی از حلقه‌ها اعمال شده است. خطوط انتخاب داده نیز با استفاده از دو ولتاژ دروازه اعمالی به نقاط اتمی روی حلقه‌ها مشخص می‌شود. هامیلتونی دستگاه متشکل از حلقه‌های کوانتومی و الکترودها با استفاده از روش بستگی قوی تقریب زده شد و جریان عبوری از دستگاه تحت تأثیر ولتاژ اعمالی بین منبع و درآشامنده با استفاده از روش تابع گرین غیرتعادلی و به ازای مقادیر شدت جفت شدگی قوی و ضعیف بین حلقه‌ها و الکترودها محاسبه شده است. منحنی مشخصه جریان-ولتاژ به ازای مقادیر مختلف ولتاژهای دروازه اعمال شده محاسبه شده است. با نسبت دادن مقادیر ۰ و ۱ به ترتیب به شدت جریان‌های صفر و غیرصفر به عنوان خروجی دستگاه و همچنین ولتاژهای اعمالی صفر و غیرصفر دروازه به عنوان ورودی‌های دستگاه، جداول درستی مربوط به این مدار محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهند که این مدار کوانتومی همانند مدار یک مالتی پلکسر ۴ به ۱ دودویی رفتار می‌کند.

**واژگان کلیدی:** ترابرد کوانتومی، حلقه کوانتومی، مالتی پلکسر، تابع گرین.

<sup>۱</sup> DOI: 10.22051/ijap.2021.37410.1234

<sup>۲</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی برق، گروه مهندسی برق، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند، ایران. مرکز تحقیقات انرژی‌های

تجدیدپذیر، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند، ایران. Email: Amir.taghavi24@gmail.com

<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی برق، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند، ایران. مرکز تحقیقات انرژی‌های تجدیدپذیر، واحد دماوند، دانشگاه

آزاد اسلامی، دماوند، ایران. (نویسنده مسئول). Email: hksalehani@damavandiau.ac.ir

## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، با رشد فناوری دسترسی به ساختارهایی با ابعاد نانو امکان پذیر شده است. به واسطه امکان ایجاد شده، علاقه پژوهشگران به بررسی نظری و تجربی ترابرد کوانتومی این نانو ساختارها معطوف شده است [۱،۷]. مزیت استفاده از نانو ساختارها در طراحی مدارهای دیجیتال باعث کوچک شدن ابعاد آن‌ها در محدوده نانو متر و همچنین توان مصرفی کمتر آن‌ها می‌شود. از نخستین تحقیقات انجام شده در این حیطه، می‌توان به مطالعه آویرام و راتنر<sup>۱</sup> اشاره کرد [۸].

حلقه‌های کوانتومی<sup>۲</sup> از جمله نانو ساختارهایی هستند که اندازه‌ی آن‌ها از مرتبه طول فاز همدوسی<sup>۳</sup> الکترون‌ها می‌باشد و به واسطه ساختار هندسی منحصر به فردشان، پدیده‌های کوانتومی همچون نوسان آهارانوف-بوهم<sup>۴</sup> و جریان ماندگار<sup>۵</sup> را نمایش می‌دهند که این مزیت توان مصرفی پایین قطعات ساخته شده از این نانو ساختارها را به همراه خواهد داشت. بررسی ترابرد الکترونی و طراحی قطعات الکترونیکی کوانتومی یکی از موضوعات مورد توجه پژوهشگران در دهه‌ی اخیر می‌باشد. مدل‌های نظری مورد استفاده در مطالعه حلقه‌های کوانتومی عبارت است از مدل گسسته و مدل پیوسته. در مدل گسسته حلقه‌ها از  $M$  نقطه شبکه با  $N$  الکترون تشکیل شده است که الکترون‌ها می‌توانند از یک نقطه شبکه به نقطه دیگر جابه‌جا شوند.

با بررسی منابع و مطالعات انجام شده، مشاهده می‌شود با استفاده از اثر آهارانوف-بوهم در حلقه‌های کوانتومی، که از دو طرف به الکترودهای منبع<sup>۶</sup> و درآشامنده<sup>۷</sup> وصل شده و از هر حلقه شار مغناطیسی نیز عبور کرده‌اند، انواع مختلف دروازه‌های<sup>۸</sup> منطقی از جمله XOR، OR، AND، NOR، XNOR، NAND و NOT طراحی و شبیه‌سازی شده است [۹،۲۲]. در منابع [۹،۱۷]، جریان الکترونی در دستگاه‌هایی متشکل از یک یا چند حلقه کوانتومی که از مرکز هر حلقه ستون شار مغناطیسی ثابتی عبور کرده و از دو طرف به الکترودهای منبع و درآشامنده متصل شده‌اند مورد مطالعه قرار گرفته شده است. ولتاژهای دروازه اعمال شده به نقطه‌های مشخصی از حلقه‌ها به عنوان ورودی دستگاه در نظر گرفته شدند و انواع دروازه‌های منطقی کوانتومی طراحی شده است. مایتی<sup>۹</sup> با استفاده از دو حلقه کوانتومی که به صورت سری به یکدیگر متصل شدند، یک دروازه

<sup>1</sup> Aviram - Ratner

<sup>2</sup> Quantum Rings

<sup>3</sup> Coherence phase

<sup>4</sup> Aharonov - Bohm

<sup>5</sup> Persistent current

<sup>6</sup> Source

<sup>7</sup> Drain

<sup>8</sup> Gate

<sup>9</sup> Maiti



منطقی AND طراحی و شبیه‌سازی کرده است [۹]. در این حالت نیز از مرکز هر حلقه شار مغناطیسی  $\varphi = \varphi_0/2$  (که  $\varphi_0$  کوانتوم شار است) عبور می‌کند و حلقه‌ها از دو سمت به الکترودهای فلزی نیمه بی‌نهایت متصل شده و دو ولتاژ دروازه به بازوی زیرین حلقه‌ها اعمال می‌شود. این ولتاژهای اعمالی نقش ورودی‌های دروازه AND را بازی می‌کنند. با محاسبه نمودارهای رسانایی-انرژی و جریان-ولتاژ برای دو حالت جفت‌شدگی قوی<sup>۱</sup> و ضعیف نشان داده شد که طرح پیشنهادی با در نظر گرفتن ولتاژهای دروازه اعمالی به عنوان ورودی و جریان عبوری از حلقه به عنوان خروجی همانند یک دروازه AND رفتار می‌کند. او با تغییر تعداد حلقه‌ها، آرایش اتصال آن‌ها و هم چنین تغییر نقطه‌های اعمال ولتاژ دروازه، سایر دروازه‌های منطقی هم چون OR، XOR، XNOR، NAND، NOR و NOT را نیز طراحی نمود [۱۵، ۱۰].

در کارهای پیشین، خانزادی و خواجه صالحانی، با استفاده از سه حلقه کوانتومی که به صورت سری به یکدیگر متصل شدند و از هر حلقه شار مغناطیسی ثابت  $\varphi = \varphi_0/2$  عبور می‌کند، انواع دروازه‌های منطقی AND، OR، NOT، XOR، XNOR، NAND و NOR را طراحی و شبیه‌سازی کرده‌اند [۱۶]. در این مقاله نیز از مدل بستگی قوی<sup>۲</sup> و همچنین روش تابع گرین برای محاسبه ترابرد الکترون در دستگاه استفاده شده و ولتاژهای دروازه اعمالی به نقطه‌های مختلف به عنوان ورودی دروازه‌ها و جریان عبوری نیز به عنوان خروجی دروازه در نظر گرفته شد.

در منبع [۱۷] ترابرد الکترون در حلقه کوانتومی دوگانه هم مرکز مورد بررسی قرار گرفته شد. در این ساختار، حلقه بیرونی به الکترودها متصل است و ارتباط بین حلقه خارجی و داخلی از طریق تونل‌زنی ناشی از جفت‌شدگی بین آن‌ها می‌باشد. با اعمال شار مغناطیسی ثابت عبوری از حلقه و ولتاژ دروازه نامتقارن به نقاطی از حلقه بیرونی یک دروازه نانومقیاس XOR طراحی شد. با مطالعه ترابرد اسپینی در حلقه‌های کوانتومی و محاسبه قطبش اسپینی در حضور برهم کنش اسپین-مدار راشبا<sup>۳</sup> انواع دروازه‌های منطقی AND، OR، NOT و NAND طراحی شد [۱۹، ۱۸].

در مرجع [۲۰]، انتشار هماهنگ‌های بالا مربوط به حلقه کوانتومی که تحت تأثیر تابش دو پرتو لیزر در دو راستای عمود برهم X و Y قرار گرفته، بررسی شده است. با تغییر فاز لیزر قطبیده، شدت هماهنگ‌های گسیل شده کنترل می‌شود. با نسبت دادن مقادیر ۰ و ۱ به شدت پایین و بالای پالس‌های تولید شده، انواع دروازه‌های منطقی طراحی شد. قطبش اسپینی و انتشار زمانی هماهنگ‌های مربوط

<sup>1</sup> Strong coupling

<sup>2</sup> Tight binding model

<sup>3</sup> Rashba

به تابش انجام شده در حلقه‌ای که تحت تأثیر میدان مغناطیسی متغیر قرار دارد، مورد مطالعه قرار گرفته شده است [۲۱]. با در نظر گرفتن مقادیر ۰ و ۱ برای شدت بالا و پایین تابش‌های گسیل شده از حلقه کوانتومی به عنوان خروجی، یک دروازه منطقی NOT طراحی شد.

در مرجع [۲۲]، با استفاده از جریان اسپینی و استفاده از یک نانو حلقه کوانتومی مغناطیسی که به طور متقارن از دو طرف به الکترودهای منبع و درآشامنده وصل شده است، یک دروازه منطقی اسپینی که قابلیت استفاده به عنوان عملگرهای منطقی مختلف کلاسیک را دارد طراحی شده است. نقطه‌های روی حلقه کوانتومی دارای اندازه حرکت زاویه‌ای اسپینی خالصی در راستای محور  $Z$  هستند و یک اتم مغناطیسی با جهت اسپین دلخواه در مرکز حلقه کوانتومی قرار گرفته است. اسپین تعدادی از اتم‌های خاص به عنوان ورودی دروازه تعریف می‌شود و برای حالتی که اسپین رو به بالا باشد مقدار ۰ به آن نسبت داده می‌شود و در صورتی که اسپین رو به پایین باشد نیز مقدار ۱ برای آن در نظر گرفته شده است. شدت میدان مغناطیسی ایجاد شده ناشی از جریان عبوری از حلقه در مرکز به عنوان خروجی دروازه تعریف شده است. با استفاده از آرایش‌های سری یا موازی حلقه‌های کوانتومی و تغییر اسپین نقطه‌های مختلف به عنوان ورودی‌های مختلف، انواع دروازه منطقی OR، XOR، NAND و NOT طراحی شده است. در همه مطالعات انجام شده، ولتاژهای دروازه اعمال شده به نقطه‌های اتمی حلقه‌ها به عنوان مقادیر ورودی دروازه‌های منطقی در نظر گرفته شده‌اند. برای طراحی هر دروازه منطقی، با توجه به تعداد ورودی و نوع خروجی مورد نیاز، تعداد حلقه‌های کوانتومی، آرایش آن‌ها و هم چنین نقطه اعمال ولتاژ بر روی حلقه متفاوت در نظر گرفته شد. با محاسبه منحنی مشخصه جریان-ولتاژ و جدول درستی، درستی عملکرد ساختار پیشنهادی برای دروازه منطقی مورد نظر اثبات شد. هر چند با استفاده از حلقه‌های کوانتومی انواع دروازه‌های منطقی طراحی و شبیه‌سازی شده است، اما با توجه به بررسی‌های انجام شده، تاکنون مدار ترکیبی مالتی پلکسر با استفاده از نانو ساختارهای حلقه‌های کوانتومی طراحی و شبیه‌سازی نشده است.

مالتی پلکسر عبارت است از یک کلید که توسط آن می‌توان یک سیگنال خروجی را از بین چند سیگنال ورودی انتخاب کرد. مدارهای مالتی پلکسر از اساسی‌ترین مدارها در ساخت سخت افزارهای پیچیده به شمار می‌رود. طراحی مدارهای مالتی پلکسر با ابعاد کوچک و توان مصرفی پایین یکی از مواردی است که به تازگی توجه محققان را به خود جلب کرده است. در منابع [۲۳، ۲۷]، طراحی مدارهای ترکیبی مالتی پلکسر با استفاده از نانو ساختارهایی هم چون نقطه‌های کوانتومی مورد بررسی قرار گرفته شده است. با مقایسه روش‌های مختلف ساخت مالتی پلکسر ۲ به



۱ مبتنی بر اتوماتای سلولی نقطه‌های کوانتومی<sup>۱</sup>، نشان داده شد که نمونه فلزی مالتی پلکسر برای دماهای معمولی مناسب نیست. با مقایسه پارامترهای نمونه طراحی شده با مالتی پلکسرهای موجود، نشان داده شد که مالتی پلکسر طراحی شده از کیفیت بهتری برخوردار است [۲۳، ۲۴]. همچنین در منبع [۲۷] دو مالتی پلکسر با ساختار مختلف مبتنی بر اتوماتای سلولی نقطه‌های کوانتومی طراحی شده است که با کاهش مصرف برق تا ۲۶ و ۳۵ درصد، عملکرد بهتری نسبت به بهترین طرح‌های موجود دارند. در این مقاله با استفاده از چهار حلقه کوانتومی در آرایش سری که از دو طرف به الکترودهای منبع و درآشمانده وصل شده‌اند و از هر حلقه شارمغناطیسی  $\varphi = \frac{\varphi_0}{2}$  نیز عبور کرده است، یک مالتی پلکسر ۴ به ۱ دودویی طراحی و شبیه‌سازی شده است. هم چنین ولتاژهای دروازه اعمالی  $V_a, V_b, V_c, V_d$  و نقش ورودی‌های دستگاه را دارند.  $V_{S0}$  و  $V_{S1}$  نیز به عنوان بیت‌های وضعیت مالتی پلکسر در نظر گرفته می‌شوند. برای مدل‌سازی از مدل بستگی قوی و برای انجام محاسبات از روش تابع گرین<sup>۲</sup> استفاده شده است. با محاسبه منحنی مشخصه جریان-ولتاژ و جدول درستی، نشان داده می‌شود که ساختار پیشنهادی به عنوان یک مالتی پلکسر رفتار می‌کند. البته در این مقاله موضوع بهبود یا بهینه‌سازی ساختار مالتی پلکسر پیشنهادی نسبت به سایر حالت‌های ممکن بررسی نشده است و فقط با انتخاب آرایش مناسب برای حلقه‌ها و اعمال ولتاژهای دروازه به نقطه-های اتمی مناسب به عنوان داده‌های ورودی و انتخابی یک مالتی پلکسر ۴ به ۱ دودویی شبیه‌سازی شده است.

## ۲. مدل نظری

شکل ۱ طرحی از یک مالتی پلکسر ۴ به ۱ دودویی طراحی شده با استفاده از حلقه‌های کوانتومی را نشان می‌دهد. طبق روابط بولی [۲۸] برای این نوع مالتی پلکسر خواهیم داشت:

$$MUX = [(V_a \overline{V_{S0}} \overline{V_{S1}}) + (V_b V_{S0} \overline{V_{S1}}) + (V_c \overline{V_{S0}} V_{S1}) + (V_d V_{S0} V_{S1})] \quad (۱)$$

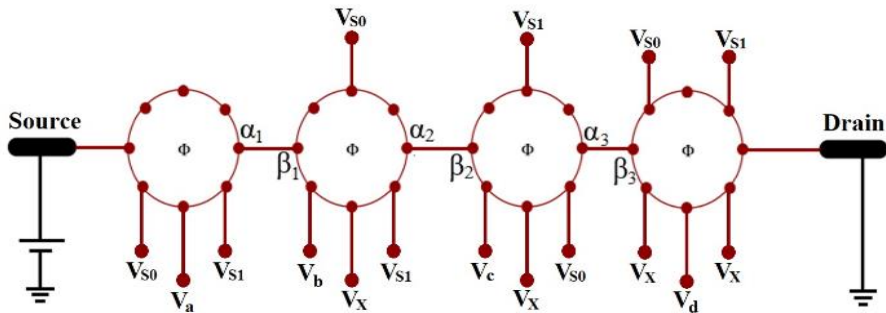
$$\overline{MUX} = [(\overline{V_a} + V_{S0} + V_{S1}) (\overline{V_b} + \overline{V_{S0}} + V_{S1}) (\overline{V_c} + V_{S0} + \overline{V_{S1}}) (\overline{V_d} + \overline{V_{S0}} + \overline{V_{S1}})] \quad (۲)$$

رابطه ۱ معادله بولی برای یک مالتی پلکسر را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، این رابطه از چهار دروازه AND تشکیل شده که با یکدیگر جمع شده‌اند. برای به دست آوردن

<sup>1</sup> Quantum Dot Cellular Automata

<sup>2</sup> Green function

ساختاری مناسب و با پیچیدگی کمتر، رابطه ۲ با در نظر گرفتن حالت NOT رابطه ۱ شکل گرفته است. در واقع هر یک از عباراتی که با خط قرمز مشخص شده‌اند، بیان گر یکی از حلقه‌های کوانتومی در شکل ۱ است که به صورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند و همانند یک دروازه AND رفتار می‌کنند [۹]. وجود ولتاژهای ورودی بر روی نقطه‌های مختلف شبکه، وجه تمایز این حلقه‌ها از همدیگر هستند و روابط مورد نظر را پیاده سازی می‌کنند.



شکل ۱ مدار یک مالتی پلکسر ۴ به ۱ متشکل از چهار حلقه کوانتومی که به صورت سری به هم متصل شده‌اند. هر بخش به صورت متقارن به دو الکترود نیمه بی‌نهایت (منبع - درآشامنده) متصل شده است. ولتاژهای متغیر  $V_a$ ،  $V_b$ ،  $V_c$  و  $V_d$  ورودی‌های دستگاه است و بر نقاط معینی از شبکه اعمال شده‌اند.  $V_{S1}$  و  $V_{S0}$  همان بیت‌های وضعیت مالتی پلکسر هستند و هم‌چنین  $V_x$  ولتاژ ثابت می‌باشد و نقش NOT منطقی را ایفا می‌کند.

برای محاسبه رسانایی الکتریکی ( $g$ ) در حلقه‌های کوانتومی از فرمول رسانایی لانداور<sup>۱</sup> [۲۹] استفاده شده که در دمای پایین و ولتاژ سوگیری<sup>۲</sup> به صورت زیر خواهد بود:

$$g = \frac{2e^2}{h} T \quad (3)$$

که در این جا  $T$  احتمال انتقال الکترون در کل دستگاه،  $e$  بار الکترون و  $h$  بیان گر ثابت پلانک است. براساس تابع گرین حلقه‌های کوانتومی و الکترودهای متصل به آن‌ها، احتمال انتقال الکترونی برابر است با [۲۹]:

$$T = \text{Tr} [\Gamma_S G_R^\dagger \Gamma_D G_R^a] \quad (4)$$

<sup>1</sup> Landauer

<sup>2</sup> Bias



که  $G_R^a$  و  $G_R^f$  به ترتیب تابع گرین تأخیری و پیشرفته حلقه‌ها است و تحت تأثیر جفت‌شدگی منبع و درآشامنده می‌باشد. هم‌چنین  $\Gamma_D$  و  $\Gamma_S$ ، توابع انتشار هستند و به ترتیب شناسه جفت‌شدگی دستگاه با منبع و درآشامنده هستند. برای یک دستگاه کامل شامل حلقه‌های کوانتومی، منبع و درآشامنده تابع گرین به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G = (E - H)^{-1} \quad (5)$$

که در آن  $E$  انرژی الکترون‌های تزریق شده از منبع است. در واقع برای محاسبه تابع گرین نیاز به وارون ماتریس بی‌نهایت کل دستگاه، شامل حلقه‌های کوانتومی و دو الکتروود نیمه بی‌نهایت (منبع و درآشامنده) است. اما برای این که بتوان دستگاه را به صورت محدود مورد بررسی قرار داد، برای هر قسمت یک زیر-ماتریس متناسب با ویژگی‌های آن بخش در نظر گرفته شده است. از این رو تابع گرین برای دستگاه شامل حلقه‌های کوانتومی که به الکتروودهای منبع و درآشامنده متصل است به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۹]:

$$G_R = (E - H_R - \Sigma_S - \Sigma_D)^{-1} \quad (6)$$

که پارامترهای  $\Sigma_S$  و  $\Sigma_D$  نشان دهنده ماتریس خود انرژی<sup>۱</sup> هستند و ناشی از جفت‌شدگی حلقه‌ها و منبع و درآشامنده می‌باشند و تمامی اطلاعات مربوط به جفت‌شدگی در آن‌ها وجود دارد. ماتریس خود انرژی مربوط به جفت‌شدگی حلقه با الکتروودهای منبع و درآشامنده عبارت است از [۲۹]:

$$\Sigma_S = \tau_S G_S \tau_S^+ \quad (7)$$

$$\Sigma_D = \tau_D G_D \tau_D^+, \quad (8)$$

که در این رابطه  $\tau_S$  و  $\tau_D$  به ترتیب ماتریس جفت‌شدگی الکتروودهای منبع و درآشامنده با حلقه کوانتومی هستند و  $G_D$  و  $G_S$  نیز به ترتیب تابع گرین مربوط به الکتروودهای منبع و درآشامنده می‌باشند. برای انجام محاسبات، الکتروودهای منبع و درآشامنده همانند یک سیم یک بعدی نیمه بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود و تابع گرین مربوط به الکتروودها نیز تابع گرین مربوط به سیم یک

<sup>1</sup> Self Energy



بعدی می باشد که در منبع [۲۹] روش محاسبه آن توضیح داده شده است.  $H_R$  هامیلتونی حلقه‌ها در غیاب برهم کنش الکترون‌هاست و در مدل بستگی قوی به صورت زیر تقریب زده می شود [۹]:

$$H_R = \sum_i (\epsilon_i + V_a \delta_{ia} + V_b \delta_{ib} + V_c \delta_{ic} + V_d \delta_{id} + V_{s0} \delta_{is0} + V_{s1} \delta_{is1} + V_x \delta_{ix}) c_i^\dagger c_i + \sum_{ij} t (c_i^\dagger c_j e^{i\theta} + c_j^\dagger c_i e^{-i\theta}) \quad (9)$$

در این رابطه،  $\epsilon_i$  انرژی نقطه‌های شبکه است و در نقطه‌های  $a, b, c, d, s_0, s_1$  و نیز ولتاژهای دروازه اعمال شده است.  $c_i$  و  $c_i^\dagger$  به ترتیب عملگر نابودی و عملگر خلق یک الکترون در نقطه  $i$ ، و  $t$  شدت جهش بین دو نقطه همسایه در یک حلقه می باشد. هم چنین برای سادگی در محاسبات، شدت جهش بین حلقه‌ها در نقاط  $\alpha_1 - \beta_1, \alpha_2 - \beta_2$  و  $\alpha_3 - \beta_3$  نشان داده شده در شکل ۱ هم برابر با مقدار  $t$  در نظر گرفته شده است.  $\theta = \frac{2\pi\phi}{N\phi_0}$  نشان دهنده فاز تابع موج است که به شار عبوری از حلقه ( $\phi$ ) و تعداد کل نقطه‌های اتمی روی حلقه  $N$  بستگی دارد. به طور مشابه هامیلتونی الکترودهای نیمه بی نهایت (منبع-درآشامنده) در تقریب مدل بستگی قوی نیز با انرژی نقاط  $l'$  و ضریب جهش بین نزدیک ترین همسایه های  $l'$  در نظر گرفته می شود. ضریب جهش مابین حلقه‌ها و منبع با  $\tau_S$  و مابین حلقه‌ها و درآشامنده با  $\tau_D$  نشان داده می شود. برای محاسبه جریان عبوری از کل دستگاه بر حسب ولتاژ از رابطه زیر استفاده می شود [۹]. برای انجام شبیه سازی از نرم افزار متلب<sup>۱</sup> استفاده شده است.

$$I(V) = \frac{e}{\pi \hbar} \int_{E_f - \frac{eV}{2}}^{E_f + \frac{eV}{2}} T(E, V) dE \quad (10)$$

که  $E_f$  انرژی فرمی در حالت تعادل و  $V$  ولتاژ سوگیری اعمال شده به دستگاه است. با توجه به این که با افزایش دما طول فاز همدوسی به طور چشمگیری کاهش پیدا می کند، تمامی ویژگی های فوق در دمای بالا از بین می رود. به این ترتیب تمامی محاسبات در این مقاله در دمای صفر درجه کلوین فرض شده است. ( نتایج و محاسبات در دماهای پایین و نزدیک به صفر نیز معتبر می باشد). لازم به ذکر است برای سادگی در محاسبات مقادیر  $c = e = \hbar = 1$  در نظر گرفته شده است.

<sup>1</sup> Matlab



### ۳. بحث و بررسی نتایج

در این بخش نتایج مربوط به شبیه‌سازی انجام شده برای محاسبه جریان خروجی بر حسب مقادیر ولتاژهای ورودی و بیت‌های وضعیت مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. برای سادگی در محاسبات انرژی نقطه‌های شبکه حلقه کوانتومی برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر  $\epsilon_i = 0$  ولی در نقطه‌های  $a, b, c, d, s_0, s_1$  و  $x$  به ترتیب ولتاژهای دروازه  $V_a, V_b, V_c, V_d, V_{s_0}, V_{s_1}$  و  $V_x$  اعمال شده است. طبق مبنای دودویی، ورودی‌ها می‌تواند برابر با مقدار کم ارزش (۰) یا مقدار پر ارزش (۱) باشند. در محاسبات، ورودی‌های دستگاه و بیت‌های وضعیت برابر با ۲ ولت (مقدار پر ارزش یا یک منطقی) یا صفر ولت (مقدار کم ارزش یا صفر منطقی) در نظر گرفته می‌شود.  $V_x$  بطور ثابت برابر با ۲ ولت است. شدت جهش بین نزدیک‌ترین همسایه‌ها در حلقه‌های کوانتومی ( $t$ ) برابر با ۳ و در الکترودها ( $\epsilon'$ ) و ( $t'$ ) به ترتیب برابر با ۰ و ۴ و هم‌چنین انرژی فرمی ( $E_f$ ) مساوی ۰ در نظر گرفته می‌شود. به صورت کلی نتایج حاصل از این مقاله بر اساس اندازه شدت جفت‌شدگی بین حلقه‌ها و الکترودها به دو حالت جفت‌شدگی ضعیف و قوی تقسیم می‌شود. در حالت جفت‌شدگی ضعیف، مقادیر  $\tau_D$  و  $\tau_S$  در مقایسه با  $t=3$ ، برابر مقدار ( $\tau_S = \tau_D = 0.5$ ) بوده که بسیار کوچک‌تر هستند. در حالت جفت‌شدگی قوی، شدت جفت‌شدگی  $\tau_S$  و  $\tau_D$  در حدود اندازه  $t$  ( $\tau_S = \tau_D = 2/5$ ) می‌باشد. مقدار شار عبوری از حلقه برابر با  $\varphi = \frac{\varphi_0}{2}$  می‌باشد.

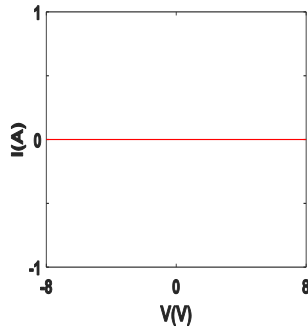
ترابرد الکترونی در دستگاه به این گونه است که دامنه احتمال عبور الکترون از منبع به درآشامنده، به اثر ترکیبی تداخل کوانتومی امواج الکترونی در دو بازوی بالایی و پایینی حلقه بستگی دارد. با توجه به اینکه طول دو بازوی بالایی و پایینی حلقه کوانتومی با یکدیگر برابرند، اگر حلقه‌ها به صورت متقارن به منبع و درآشامنده متصل شده باشند و تحت شار مغناطیسی  $\varphi$  قرار بگیرند و هیچ ولتاژی به نقطه‌های شبکه اعمال نگردد، دامنه احتمال عبور الکترون از حلقه‌ها برابر صفر خواهد بود ( $T=0$ ). چرا که تداخل کوانتومی امواج الکترونی در بازوی بالایی و پایینی حلقه کوانتومی ویرانگر هستند. بنابراین هنگامی که ورودی‌های دستگاه مورد نظر برابر صفر باشند، انتقال الکترون امکان پذیر نیست و در نتیجه جریانی در درآشامنده پدید نخواهد آمد. از سوی دیگر وجود ولتاژ ثابت  $V_x$  در بعضی از حلقه‌ها موجب شکل‌گیری حالت NOT منطقی برای ورودی متناظر با آن در بازوی مقابل است [۱۰]. به صورت کلی می‌توان نتیجه گرفت، در صورتی که ولتاژ عملی دروازه به نقطه-های اتمی بازوی بالایی و پایینی حلقه متقارن باشد و همچنین به تعداد نقطه‌های یکسانی از بازوی بالایی و پایینی حلقه ولتاژ دروازه اعمال شود، انتقال الکترون صورت نمی‌گیرد و هرگاه این تقارن

از بین بروید انتقال الکترون امکان پذیر است. همچنین احتمال انتقال الکترون از منبع به درآشامنده موقعی برقرار می شود که این نبود تقارن در هر چهار حلقه ای که به صورت سری با یکدیگر جفت شده اند، وجود داشته باشد. هر کدام از ولتاژهای ورودی تنها به یکی از حلقه ها اعمال شده است. بنابراین اگر قرار باشد ورودی خاصی خروجی را کنترل کند، سایر بیت ها در حالت غیرتعدالی قرار گرفته و مقادیر ورودی آن ها بی اثر خواهد بود. این عمل با مقدار دهی به بیت های وضعیت امکان پذیر می شود. در جدول ۱، جریان خروجی مالتی پلکسر به ازای ولتاژ سوگیری ۶ ولت و مقادیر مختلف ولتاژهای دروازه به عنوان ورودی های دستگاه و برای حالتی که ولتاژهای دروازه مربوط به بیت های وضعیت برابر  $V_{S0} = V_{S1} = 0V$  باشند نشان داده شده است. مشاهده می شود در این حالت تنها در مواقعی که ولتاژ دروازه ورودی  $a$  برابر ۲ ولت باشد، در خروجی جریان غیرصفر وجود دارد و مقادیر مختلف ولتاژ دروازه در سایر ورودی ها هیچ تأثیری در جریان خروجی ندارد. همچنین مشاهده می شود که جریان های خروجی دستگاه تحت تأثیر میزان شدت جفت شدگی حلقه و الکترودهای نیمه بی نهایت قرار دارد. در تمامی جدول ها مشاهده می شود که جریان های خروجی در حالت شدت جفت شدگی قوی بین حلقه کوانتومی و الکترودها دارای مقادیر بزرگ-تری نسبت به حالت شدت جفت شدگی ضعیف است. چرا که در این حالت احتمال انتقال الکترون بیشتر خواهد بود. از این ویژگی می توان برای کنترل دامنه جریان خروجی دستگاه استفاده نمود. نمودارهای جریان-ولتاژ مالتی پلکسر ۴ به ۱ دودویی طراحی شده به ازای مقادیر مختلف ولتاژ ورودی نشان داده شده در جدول ۱ در شکل های ۲ تا ۴ نشان داده شده است. بیت های وضعیت  $V_{S0}$  و  $V_{S1}$  برابر صفر و شدت جفت شدگی بین حلقه و الکترودها نیز قوی در نظر گرفته شده است.

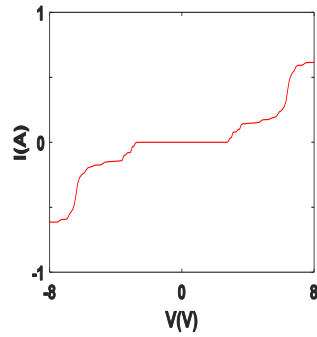


**جدول ۱** جدول درستی مالتی پلکسر ۴ به ۱ دودویی طراحی شده با حلقه‌های کوانتومی در ولتاژ سوگیری ۶ ولت. در این حالت ولتاژ دروازه بیت‌های وضعیت برابر  $V_{S0}=V_{S1}=0V$  است و داده‌های ورودی a در خروجی دستگاه انتقال می‌یابد.

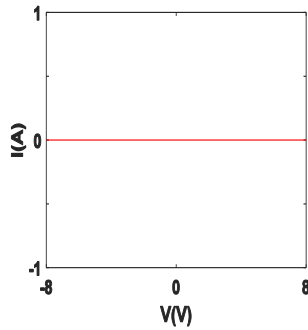
ولتاژهای دروازه به عنوان بیت‌های وضعیت (بر حسب ولت)		ولتاژهای دروازه به عنوان داده‌های ورودی (بر حسب ولت)				جریان خروجی مالتی پلکسر (بر حسب آمپر)	
$V_{S1}$	$V_{S0}$	$V_d$	$V_c$	$V_b$	$V_a$	$I_{out}$	
						شدت جفت‌شدگی قوی	شدت جفت‌شدگی ضعیف
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰٫۲۵	۰٫۰۳
۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۲	۲	۰٫۳۰	۰٫۰۳
۰	۰	۰	۲	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۲	۰	۲	۰٫۲۰	۰٫۰۱
۰	۰	۰	۲	۲	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۲	۲	۲	۰٫۲۵	۰٫۰۲
۰	۰	۲	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۲	۰	۰	۲	۰٫۸۲	۰٫۰۴
۰	۰	۲	۰	۲	۰	۰	۰
۰	۰	۲	۰	۲	۲	۰٫۷۱	۰٫۰۴
۰	۰	۲	۲	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۲	۲	۰	۲	۰٫۳۸	۰٫۰۳
۰	۰	۲	۲	۲	۰	۰	۰
۰	۰	۲	۲	۲	۲	۰٫۴۶	۰٫۰۴



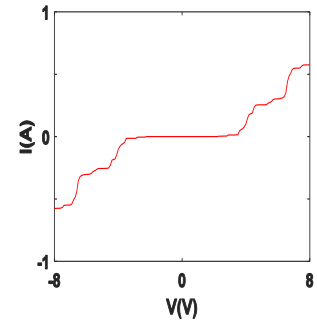
$$V_A = 0, V_B = 0, \\ V_C = 0, V_D = 0$$



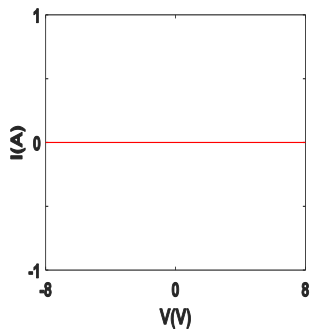
$$V_A = 2, V_B = 0, \\ V_C = 0, V_D = 0$$



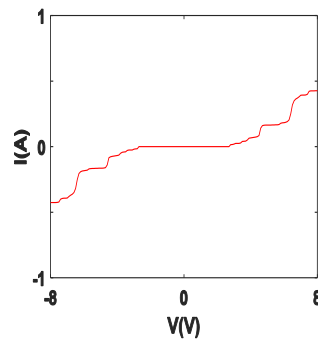
$$V_A = 0, V_B = 2, \\ V_C = 0, V_D = 0$$



$$V_A = 2, V_B = 2, \\ V_C = 0, V_D = 0$$



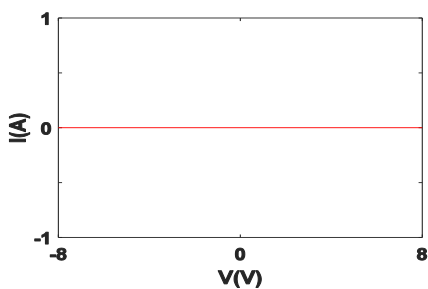
$$V_A = 0, V_B = 0, V_C = 2, \\ V_D = 0$$



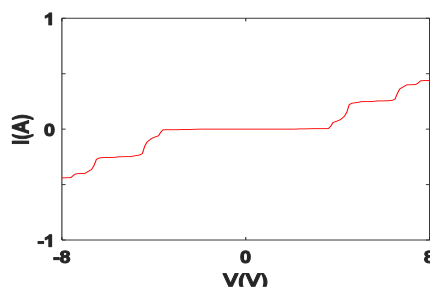
$$V_A = 2, V_B = 0, V_C = 2, \\ V_D = 0$$

شکل ۲ نمودارهای جریان-ولتاژ مالتی پلکسر ۴ به ۱ طراحی شده با چهار حلقه کوانتومی به ازای مقادیر مختلف ولتاژ ورودی و  $V_{S0} = V_{S1} = 0V$  مربوط به ردیف‌های ۱ تا ۶ جدول ۱.

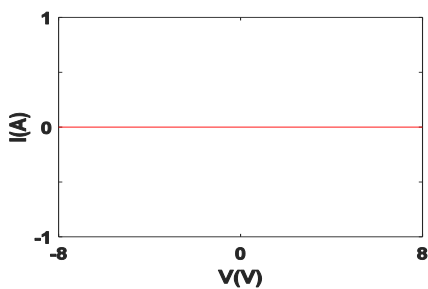




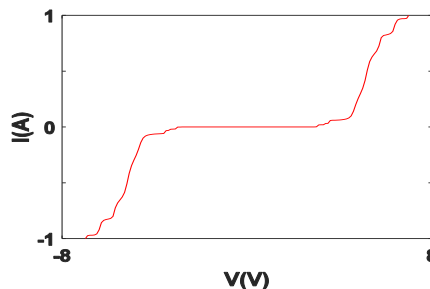
$$V_A = 0, V_B = 2, V_C = 2, \\ V_D = 0$$



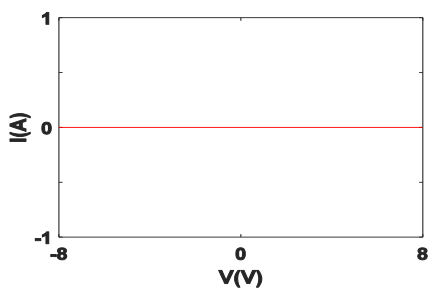
$$V_A = 2, V_B = 2, V_C = 2, \\ V_D = 0$$



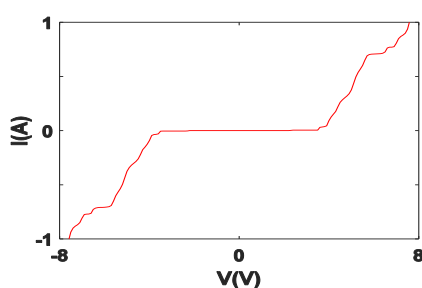
$$V_A = 0, V_B = 0, V_C = 0, \\ V_D = 2$$



$$V_A = 2, V_B = 0, V_C = 0, \\ V_D = 2$$



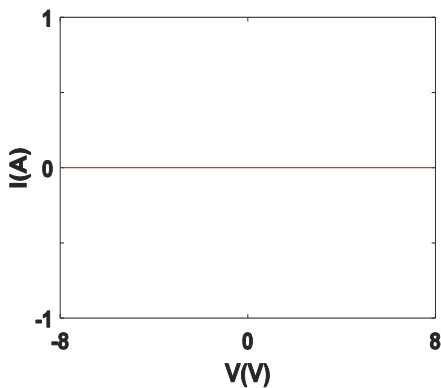
$$V_A = 0, V_B = 2, V_C = 0, \\ V_D = 2$$



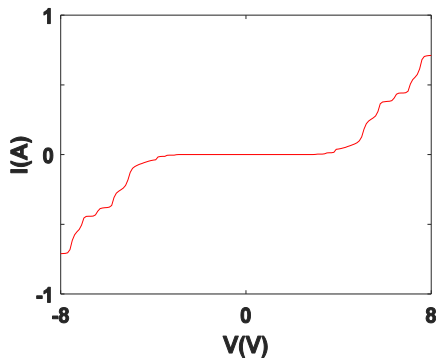
$$V_A = 2, V_B = 2, V_C = 0, \\ V_D = 2$$

**شکل ۳:** نمودارهای جریان-ولتاژ مالتی پلکسر ۴ به ۱ طراحی شده با چهار حلقه کوانتومی به ازای مقادیر

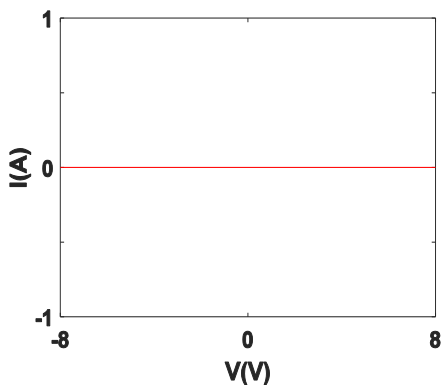
مختلف ولتاژ ورودی و  $V_{S0} = V_{S1} = 0V$  مربوط به ردیف‌های ۷ تا ۱۲ جدول ۱



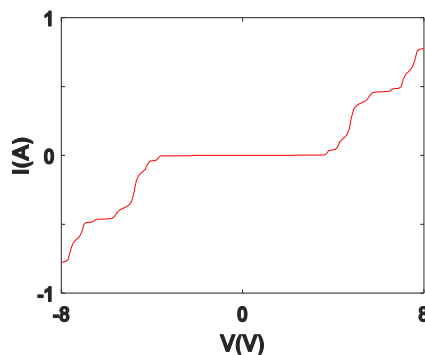
$$V_A=0, V_B=0, V_C=2, V_D=2$$



$$V_A=2, V_B=0, V_C=2, V_D=2$$



$$V_A=0, V_B=2, V_C=2, V_D=2$$



$$V_A=2, V_B=2, V_C=2, V_D=2$$

**شکل ۴** نمودارهای جریان-ولتاژ مالتی پلکسر ۴ به ۱ طراحی شده با چهار حلقه کوانتومی به ازای مقادیر مختلف ولتاژ ورودی و  $V_{S0} = V_{S1} = 0V$  مربوط به ردیف‌های ۱۳ تا ۱۶ جدول ۱.

در جدول ۲ جریان‌های خروجی مربوط به مالتی پلکسر ۴ به ۱ به ازای مقادیر مختلف ولتاژهای دروازه و به ازای ولتاژهای دروازه  $V_{S0} = 2V$  و  $V_{S1} = 0V$  نشان داده شده است. مشاهده می‌شود جریان غیرصفر در خروجی مربوط به حالت‌هایی هست که ولتاژ دروازه مربوط به ورودی  $b$  ۲ ولت



(یک منطقی) باشد. همچنین مشاهده می‌شود که مقادیر سایر ورودی‌ها هیچ تأثیری بر اندازه جریان خروجی ندارد.

**جدول ۲** جدول درستی مالتی پلکسر ۴ به ۱ دودویی طراحی شده با حلقه‌های کوانتومی در ولتاژ سوگیری ۶ ولت. در این حالت ولتاژهای دروازه بیت‌های وضعیت برابر  $V_{S0}=2V$  و  $V_{S1}=0V$  است و داده‌های ورودی  $b$  در خروجی دستگاه انتقال می‌یابد.

ولتاژهای دروازه به عنوان بیت‌های وضعیت (بر حسب ولت)		ولتاژهای دروازه به عنوان داده‌های ورودی (بر حسب ولت)				جریان خروجی مالتی پلکسر (بر حسب آمپر)	
$V_{S1}$	$V_{S0}$	$V_d$	$V_c$	$V_b$	$V_a$	$I_{out}$	
						شدت جفت شدگی قوی	شدت جفت شدگی ضعیف
۰	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۲	۰	۰	۰	۲	۰	۰
۰	۲	۰	۰	۲	۰	۰٫۴۳	۰٫۰۳
۰	۲	۰	۰	۲	۲	۰٫۳۳	۰٫۰۲
۰	۲	۰	۲	۰	۰	۰	۰
۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۰
۰	۲	۰	۲	۲	۰	۰٫۴۰	۰٫۰۲
۰	۲	۰	۲	۲	۲	۰٫۳۰	۰٫۰۲
۰	۲	۲	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۲	۲	۰	۰	۲	۰	۰
۰	۲	۲	۰	۲	۰	۰٫۳۱	۰٫۰۵
۰	۲	۲	۰	۲	۲	۰٫۲۲	۰٫۰۲
۰	۲	۲	۲	۰	۰	۰	۰
۰	۲	۲	۲	۰	۲	۰	۰
۰	۲	۲	۲	۲	۰	۰٫۳۰	۰٫۰۳
۰	۲	۲	۲	۲	۲	۰٫۲۲	۰٫۰۴

در جداول ۳ و ۴ جریان خروجی به ترتیب مطابق با مقادیر ولتاژ دروازه (مقدار ورودی)  $c$  و  $d$  است. در حقیقت، هنگامی که ولتاژهای دروازه بیت‌های وضعیت برابر  $V_{S1}=2V$  و  $V_{S0}=0V$  باشد جریان بزرگتر از صفر درآشامنده متناظر با مقادیر غیر صفر ورودی  $c$  خواهد بود. در حالت  $V_{S0}=V_{S1}=2V$ ، جریان خروجی با مقادیر ورودی  $d$  متناظر است.



**جدول ۳** جدول درستی مالتی پلکسر ۴ به ۱ دودویی طراحی شده با حلقه‌های کوانتومی در ولتاژ سوگیری ۶ ولت. در این حالت ولتاژهای دروازه بیت‌های وضعیت برابر  $V_{S0}=0V$  و  $V_{S1}=2V$  است و داده‌های ورودی C در خروجی دستگاه انتقال می‌یابد.

ولتاژهای دروازه به عنوان بیت‌های وضعیت (بر حسب ولت)		ولتاژهای دروازه به عنوان داده‌های ورودی (بر حسب ولت)				جریان خروجی مالتی پلکسر (بر حسب آمپر)	
$V_{S1}$	$V_{S0}$	$V_d$	$V_c$	$V_b$	$V_a$	$I_{out}$	
						شدت جفت‌شدگی قوی	شدت جفت‌شدگی ضعیف
۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰
۲	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۰
۲	۰	۰	۰	۲	۲	۰	۰
۲	۰	۰	۲	۰	۰	۰٫۱۰	۰٫۰۱
۲	۰	۰	۲	۰	۲	۰٫۱۴	۰٫۰۱
۲	۰	۰	۲	۲	۰	۰٫۲۹	۰٫۰۳
۲	۰	۰	۲	۲	۲	۰٫۱۹	۰٫۰۱
۲	۰	۲	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۰	۲	۰	۰	۲	۰	۰
۲	۰	۲	۰	۲	۰	۰	۰
۲	۰	۲	۰	۲	۲	۰	۰
۲	۰	۲	۲	۰	۰	۰٫۱۶	۰٫۰۱
۲	۰	۲	۲	۰	۲	۰٫۱۷	۰٫۰۲
۲	۰	۲	۲	۲	۰	۰٫۳۱	۰٫۰۵
۲	۰	۲	۲	۲	۲	۰٫۲۲	۰٫۰۲



**جدول ۴** جدول درستی مالتی پلکسر ۴ به ۱ دودویی طراحی شده با حلقه‌های کوانتومی در ولتاژ سوگیری ۶ ولت. در این حالت ولتاژهای دروازه بیت‌های وضعیت برابر  $V_{S0}=V_{S1}=2V$  است و داده‌های ورودی  $d$  در خروجی دستگاه انتقال می‌یابد.

ولتاژهای دروازه به عنوان بیت‌های وضعیت (بر حسب ولت)		ولتاژهای دروازه به عنوان داده‌های ورودی (بر حسب ولت)				جریان خروجی مالتی پلکسر (بر حسب آمپر)	
$V_{S1}$	$V_{S0}$	$V_d$	$V_c$	$V_b$	$V_a$	$I_{out}$	
						شدت جفت‌شدگی قوی	شدت جفت‌شدگی ضعیف
۲	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۲	۰	۰	۰	۲	۰	۰
۲	۲	۰	۰	۲	۰	۰	۰
۲	۲	۰	۰	۲	۲	۰	۰
۲	۲	۰	۲	۰	۰	۰	۰
۲	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۰
۲	۲	۰	۲	۲	۰	۰	۰
۲	۲	۰	۲	۲	۲	۰	۰
۲	۲	۲	۰	۰	۰	۰,۵۳	۰,۰۴
۲	۲	۲	۰	۰	۲	۰,۴۱	۰,۰۳
۲	۲	۲	۰	۲	۰	۰,۶۴	۰,۰۵
۲	۲	۲	۰	۲	۲	۰,۵۹	۰,۰۴
۲	۲	۲	۲	۰	۰	۰,۴۹	۰,۰۷
۲	۲	۲	۲	۰	۲	۰,۴۲	۰,۰۳
۲	۲	۲	۲	۲	۰	۰,۶۸	۰,۱۰
۲	۲	۲	۲	۲	۲	۰,۸۴	۰,۰۷

با بررسی جدول درستی مربوط به مالتی پلکسر ۴ به ۱ دودویی طراحی شده، مشاهده می‌شود به ازای مقادیر مختلف ورودی و انتخاب حالت، جدول درستی دستگاه همانند یک مالتی پلکسر ۴ ورودی دودویی است.

#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله مدار یک مالتی پلکسر ۴ به ۱ دودویی با استفاده از چهار حلقه کوانتومی طراحی و شبیه سازی شده است که هر حلقه تحت تأثیر شار مغناطیسی ( $\varphi = \varphi_0/2$ ) قرار دارد. حلقه های کوانتومی به صورت سری به یکدیگر متصل شده اند و به صورت متقارن به دو الکترون (منبع-درآشامنده) متصل می شوند. با اعمال ولتاژهای دروازه به چهار نقطه ی حلقه کوانتومی به عنوان ورودی ها و اعمال دو ولتاژ دروازه به عنوان بیت های وضعیت، یک مالتی پلکسر طراحی شده است. مدل سازی دستگاه براساس مدل بستگی قوی انجام گرفته و محاسبات عددی با استفاده از روش تابع گرین انجام شده است. برای شبیه سازی از نرم افزار متلب استفاده شده است. نتایج به دست آمده براساس مقادیر جریان درآشامنده تشریح شده و در دو حالت شدت جفت شدگی قوی و ضعیف بین حلقه و الکترونها بررسی شده است. هم چنین منحنی مشخصه جریان-ولتاژ مربوط به مدار مالتی پلکسر نیز به دست آورده شد. مطابق نتایج به دست آمده در جداول درستی ۱ تا ۴، هر یک از ورودی ها با توجه به مقادیر بیت های وضعیت  $V_{S0}$  و  $V_{S1}$  در خروجی اثر گذار هستند و نتیجه می شود دستگاه شامل چهار حلقه کوانتومی متصل به الکترونها که تحت تأثیر ولتاژهای دروازه به عنوان ورودی و بیت های وضعیت هستند همانند یک مالتی پلکسر ۴ به ۱ عمل می کنند. بنابراین با استفاده از نانو حلقه های کوانتومی امکان طراحی یک مالتی پلکسر با اندازه کوچک و توان مصرفی پایین وجود دارد.

#### منابع

- [1] Alba, Vincenzo., "Entanglement and quantum transport in integrable systems." *Physical Review B* 97.24, 245135, 2018.
- [2] Thoss, Michael, and Ferdinand Evers., "Perspective: Theory of quantum transport in molecular junctions." *The Journal of chemical physics* 148.3, 030901, 2018.
- [3] Shedbalkar, Akshay, and Bernd Witzigmann., "Non equilibrium Green's function quantum transport for green multi-quantum well nitride light emitting diodes." *Optical and Quantum Electronics* 50.2, 1-10, 2018.
- [4] Ho, Nathan, and Clive Emary., "Counting statistics of dark-state transport through a carbon nanotube quantum dot." *Physical Review B* 100.24, 245414, 2019.
- [5] Zhang, Hao, et al., "Next steps of quantum transport in Majorana nanowire devices." *Nature communications* 10.1, 1-7, 2019.
- [6] Darehdor, Mahvash Arabi, Mahmood Rezaee Roknabadi, and Nasser Shahtahmassebi., "Effects of phonon scattering on the electron transport and photocurrent of graphene quantum dot structures." *The European Physical Journal B* 92.1, 1-8, 2019.
- [7] Donarini, Andrea, et al., "Coherent population trapping by dark state formation in a carbon nanotube quantum dot." *Nature communications* 10.1, 1-8, 2019.
- [8] Aviram, Arieh, and Mark A. Ratner., "Molecular rectifiers.," *Chemical physics letters* 29.2, 277-283, 1974.



- [9] Maiti, Santanu K., "Electron transport in a double quantum ring: Evidence of an AND gate.," *Physics Letters A* 373.48, 4470-4474, 2009.
- [10] Maiti, Santanu K., "NOR gate response in a double quantum ring: An exact result.," *Solid state communications* 149.47-48, 2146-2150, 2009.
- [11] Maiti, Santanu K., "Quantum transport in a mesoscopic ring: Evidence of an OR gate." *Solid state communications* 149.39-40, 1684-1688, 2009.
- [12] Maiti, Santanu K., "XOR gate response in a mesoscopic ring with embedded quantum dots." *Solid state communications* 149.39-40, 1623-1627, 2009.
- [13] Maiti, Santanu K., "A mesoscopic ring as a XNOR gate: An exact result." *Journal of the Physical Society of Japan* 78.11, 114602-114602, 2009.
- [14] Maiti, Santanu K., "NAND gate response in a mesoscopic ring: an exact result." *Physica Scripta* 80.5, 055704, 2009.
- [15] Maiti, Santanu K., "A mesoscopic ring as a NOT gate: An exact result." *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* 7.3, 594-599, 2010.
- [16] Khanzadi, H., and H. K. Salehani., "Design of basic logic gates by triple quantum rings." *Journal of Nanoscience and Technology* ,119-121, 2016.
- [17] Al-Badry, Lafy F., "The electronic properties of concentric double quantum ring and possibility designing XOR gate." *Solid State Communications* 254, 15-20, 2017.
- [18] Eslami, Leila, and Mahdi Esmaeilzadeh., "Spin-polarization and spin-dependent logic gates in a double quantum ring based on Rashba spin-orbit effect: Non-equilibrium Green's function approach." *Journal of Applied Physics* 115.8, 084307, 2014.
- [19] Dehghan, E., D. Sanavi Khoshnoud, and A. S. Naeimi., "NAND/AND/NOT logic gates response in series of mesoscopic quantum rings." *Modern Physics Letters B* 33.34, 1950431, 2019.
- [20] Cricchio, Dario, and Emilio Fiordilino., "Laser driven quantum rings: one byte logic gate implementation." *RSC advances* 8.7, 3493-3498, 2018.
- [21] Cricchio, Dario, and Emilio Fiordilino., "Quantum ring in a magnetic field: High harmonic generation and not logic gate." *Advanced Theory and Simulations* 3.7, 2000070, 2020.
- [22] Patra, Moumita, Alok Shukla, and Santanu K. Maiti., "Non-volatile reconfigurable spin logic device: parallel operations." *Journal of Physics D: Applied Physics* 54.9, 095001, 2020.
- [23] Khan, Angshuman, et al., "Efficient multiplexer design and analysis using quantum dot cellular automata." *2016 IEEE Distributed Computing, VLSI, Electrical Circuits and Robotics (DISCOVER)*. IEEE, 2016.
- [24] Khan, Angshuman, and Sikta Mandal., "Robust multiplexer design and analysis using quantum dot cellular automata." *International Journal of Theoretical Physics* 58.3, 719-733, 2019.
- [25] Das, Biplab, Tapatosh Sadhu, and Debashis De., "Design of Multiplexer Using Actin Quantum Cellular Automata." *2020 IEEE VLSI DEVICE CIRCUIT AND SYSTEM (VLSI DCS)*. IEEE, 2020.
- [26] Rahmani, Yaser, Saeed Rasouli Heikalabad, and Mohammad Mosleh., "Design of a New Multiplexer Structure Based on a New Fault-Tolerant Majority Gate in Quantum-Dot Cellular Automata." (2021).
- [27] Almatrood, Amjad, Aby K. George, and Harpreet Singh., "Low-Power Multiplexer Structures Targeting Efficient QCA Nanotechnology Circuit Designs." *Electronics* 10.16, 1885, 2021.
- [28] Mano, M. Morris, and Michael Ciletti. *Digital design: with an introduction to the Verilog HDL*. Pearson, 2013.
- [29] Datta, Supriyo. *Quantum transport: atom to transistor*. Cambridge university press, 2005.

© 2020 Alzahra University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

