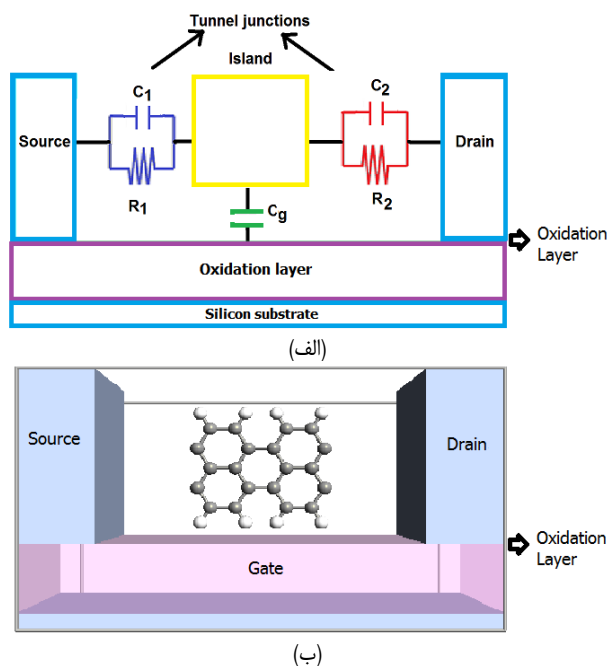


# بررسی تأثیر تعداد اتم‌های کربن موجود در عرض نوار نانومتری گرافنی بر جریان ترانزیستور تک‌الکترونی گرافنی

وحیده خادم حسینی و داریوش دیدبان



شکل ۱: (الف) مدار معادل ترانزیستور تک‌الکترونی و (ب) ساختار ترانزیستور تک‌الکترونی.

بار توسط C. Gorter مورد بحث و بررسی قرار گرفت [۳]. نتایج تحقیقاتش نشان داد که به علت پدیده انسداد کولنی، عبور جریان در بایاس پایین متوقف می‌شود. این پدیده با استفاده از تونل‌زنی تک‌الکترون به صورت تئوری Orthodox توسط D. Averin و K. Likharev در سال ۱۹۸۵ توضیح داده شد [۴]. بعد از توضیح تئوری Orthodox، آزمایش‌ها در مورد قطعات تک‌الکترونی افزایش یافت و منجر به ساخت اولین ترانزیستور تک‌الکترونی فلزی توسط Dolan و Fulton در سال ۱۹۸۷ شد [۵]. ترانزیستور ساخته شده در دمای ۱/۸ تا ۴/۲ درجه کلوین کار می‌کرد که این مورد محدودیت عملکرد ترانزیستور در دمای ۳۰۰ درجه کلوین را مشخص می‌کرد. این محدودیت عملکرد با استفاده از جزیره‌های سیلیکونی در ترانزیستور تک‌الکترونی در سال ۱۹۹۷ کاهش یافت که اهمیت و تأثیر مستقیم جنس جزیره روی عملکرد ترانزیستور تک‌الکترونی را مشخص کرد [۶]. ساختار ترانزیستور تک‌الکترونی شامل الکترودهای گیت، سورس و درین است که یک جزیره در بین آنها قرار دارد که در شکل ۱ نشان داده شده است [۷] و [۸].

این ترانزیستور بر اساس تونل‌زنی تک‌الکترون کار می‌کند که در این فرایند یک الکترون به وسیله سد‌های تونلی از الکتروده سورس به نقطه کوانتومی و سپس به الکتروده درین تونل می‌زند. لازم به ذکر است که از تونل‌زنی تک‌الکترون بر اثر پدیده انسداد کولنی، جلوگیری و شارش

چکیده: ترانزیستور تک‌الکترونی یک قطعه الکترونیکی در ابعاد نانومتر است که شامل سه الکتروده فلزی و یک جزیره یا نقطه کوانتومی می‌باشد. جزیره می‌تواند از نانو مواد کربنی مانند نوار نانومتری گرافنی انتخاب شود. تعداد اتم‌های کربن موجود در نوار نانومتری گرافنی بر سرعت عملکرد ترانزیستور و ناحیه انسداد کولنی تأثیر می‌گذارد. در این تحقیق، جریان ترانزیستور تک‌الکترونی با جزیره‌ای از نوار نانومتری گرافنی مدل‌سازی شده است. تأثیر عواملی از جمله تعداد اتم‌های کربن موجود در عرض نوار نانومتری گرافنی، طول نوار نانومتری گرافنی و ولتاژ اعمالی بر گیت روی جریان ترانزیستور بررسی شده است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش تعداد اتم‌ها در عرض نوار نانومتری گرافنی، ناحیه انسداد کولنی در نمودارهای پایداری بار ترانزیستور کاهش می‌یابد. همچنین کاهش طول نوار نانومتری گرافنی و افزایش ولتاژ اعمالی بر گیت باعث کاهش ناحیه جریان صفر ترانزیستور می‌شود. افزایش تعداد اتم‌ها در عرض سه جزیره باعث افزایش ناحیه تونل‌زنی تک‌الکترون و بهبود عملکرد ترانزیستور می‌شود.

کلیدواژه: ترانزیستور تک‌الکترونی، تونل‌زنی، نقطه کوانتومی، نوار نانومتری گرافنی.

## ۱- مقدمه

امروزه کاهش ابعاد ترانزیستورهای سیلیکونی در ابعاد نانومتر با مشکلاتی مواجه است. همچنین نقشه بین‌المللی راه برای نیمه‌رسانا (ITRS) اندازه کانال را در سال ۲۰۲۰ حدود چند نانومتر پیش‌بینی کرده است و ترانزیستورهای ۷ نانومتری خانواده MOS هم‌اکنون توسط شرکت‌های بزرگی مانند Intel و IBM تولید انبوه شده‌اند. یکی از گزینه‌های قابل قبول برای این محدوده و حتی کاهش بیشتر ابعاد، استفاده از ترانزیستورهای تک‌الکترونی است که با استفاده از این ترانزیستورها می‌توان محدودیت کاهش ابعاد در ترانزیستورهای امروزی را برطرف کرد [۱].

ترانزیستور تک‌الکترونی به عنوان یک قطعه مهم در زمینه نانو الکترونیک است که دارای ویژگی‌های منحصر به فردی از جمله تلفات توان پایین، ابعاد کوچک و سرعت عملکرد بالا است [۲]. ترانزیستور تک‌الکترونی بر اساس تأثیرات پدیده انسداد کولنی کار می‌کند که اولین

این مقاله در تاریخ ۷ بهمن ماه ۱۳۹۸ دریافت و در تاریخ ۶ شهریور ماه ۱۳۹۹ بازنگری شد.

وحیده خادم حسینی، پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، (email: V\_Khademhosseini@grad.kashanu.ac.ir)

داریوش دیدبان (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، (email: dideban@kashanu.ac.ir)

ترانزیستور به عنوان چاه پتانسیل در نظر گرفته می‌شود که در شکل ۲ نشان داده شده است.

معادلات شرودینگر برای نواحی مختلف ترانزیستور نوشته می‌شود و با توجه به نواحی ترانزیستور تک‌الکترونی حل می‌شود. سپس ضریب انتقال ترانزیستور تک‌الکترونی گرافنی می‌تواند به صورت زیر بیان شود [۲۱]

$$T = \frac{1}{1 + \frac{(h^2 + ta'm)E - h^2 E_g}{2\sqrt{ta'hmE(E - E_g)}} \sinh^2(k_\tau L)} \quad (۱)$$

در معادله بالا  $L$  طول نوار نانومتری گرافنی،  $k_\tau = \sqrt{2mE}/h$ ،  $E$  سطح انرژی الکترون،  $m$  جرم مؤثر الکترون،  $h$  ثابت پلانک،  $a_{c-c} = 1.42 \text{ \AA}$ ،  $a' = 3a_{c-c}$ ، فاصله بین اتم‌های کربن همسایه در گرافن،  $E_g$  باند گپ نوار نانومتری گرافنی و  $t = 2.7eV$  است. جریان ترانزیستور تک‌الکترونی نوار نانومتری گرافنی با استفاده از فرمولاسیون لندائور مدل می‌شود

$$I = \int_{\eta} T(E) \cdot F(E) dE \quad (۲)$$

$$F(E) = \left[ \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right) + 1} \right] \quad (۳)$$

در معادله بالا  $T(E)$  ضریب انتقال و  $F(E)$  تابع احتمال فرمی است. شکاف انرژی یا باند گپ نوار نانومتری گرافنی برای خانواده آرچیبر  $3p+1$  به تعداد اتم‌های کربن در عرض نوار گرافنی نانومتری بستگی دارد که در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین این پارامتر تأثیر مستقیمی روی عرض نوار نانومتری گرافنی آرچیبر از خانواده  $3p+1$  دارد که به صورت زیر است [۲۴] و [۲۵]

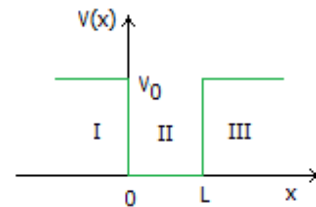
$$w(nm) = \frac{0.246}{2} (N_{width} - 1) \quad (۴)$$

بنابراین جریان ترانزیستور تک‌الکترونی با جزیره‌ای از نوار نانومتری گرافنی بر اساس تعداد اتم‌های کربن در عرض نوار نانومتری به صورت (۵) مدل‌سازی می‌شود که  $N_{width}$  تعداد اتم‌های کربن در عرض نوار نانومتری گرافنی،  $m$  جرم مؤثر و پارامتر  $h$  برابر ثابت پلانک است. همچنین  $t$  انرژی هم‌پوشانی اتصال پایدار برای نزدیک‌ترین فاصله دو اتم کربن و برابر  $2.7eV$  است.  $E_F$  برابر سطح انرژی فرمی نوار نانومتری گرافنی،  $E_g$  برابر شکاف باند،  $k_B$  ثابت بولتزمن و  $L$  برابر طول نوار نانومتری گرافنی است. همچنین  $\eta = (E_F - E_g)/k_B T$  و  $x = (E - E_g)/k_B T$  است.

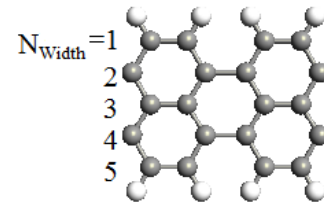
مدل پیشنهادی جریان بر اساس تعداد اتم‌های کربن موجود در عرض نوار نانومتری گرافنی در کد Matlab پیاده‌سازی شده است. بر این اساس، جریان بر حسب ولتاژ بایاس به ازای مقادیر متفاوت تعداد اتم‌های کربن

$$I = \int_{\eta} \left[ \frac{6.934m \cdot k_B T x (k_B T x (N_{width} - 1) + 1.455) + 4.622m \cdot k_B T x}{6.934m \cdot k_B T x (k_B T x (N_{width} - 1) + 1.455) + (2.601m \cdot ta_{c-c} (k_B T x (N_{width} - 1) + 1.455) + \frac{4.622m \cdot k_B T x}{ta_{c-c}})} \right] \cdot \frac{dx}{e^{x-\eta} + 1} \quad (۵)$$

$$\left[ \frac{1}{\left( \frac{2.601m}{h(N_{width} - 1)^2} (k_B T x (N_{width} - 1) + 1.455)L^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \left( \frac{4.622m \cdot (k_B T x (N_{width} - 1) + 1.455)L^2}{h^{\frac{2}{3}} (N_{width} - 1)^2} \right)^{\frac{1}{2}}} \right] \cdot \frac{dx}{e^{x-\eta} + 1}$$



شکل ۲: انرژی ترانزیستور تک‌الکترونی بر اساس طول کانال.



شکل ۳: نوار نانومتری گرافنی با پنج اتم کربن عرض نوار نانومتری ( $N_{width} = 5$ ).

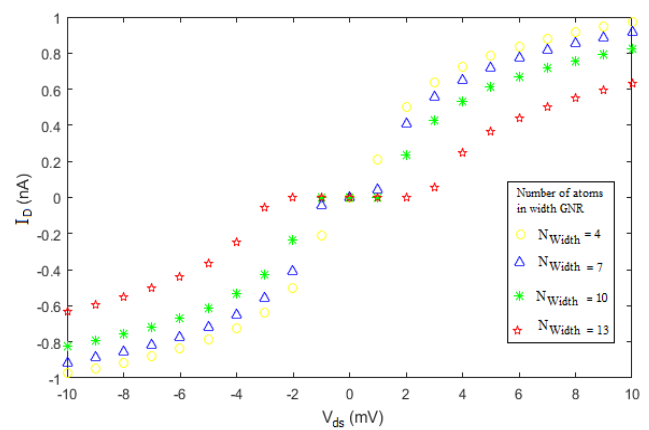
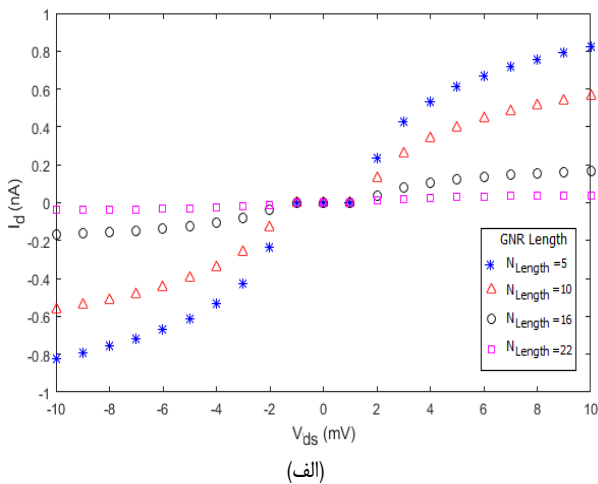
جریان متوقف می‌شود [۹]. شرایط انسداد کولنی زمانی ایجاد می‌شود که انرژی حرارتی الکترون کمتر از انرژی ذخیره‌شده در خازن سد تونلی باشد یا مقدار مقاومت سد تونلی از مقاومت کوانتومی بیشتر باشد. از طرف دیگر پدیده انسداد کولنی و مقدار جریان صفر تحت تأثیر مستقیم جنس و اندازه جزیره ترانزیستور تک‌الکترونی قرار دارد [۱۰]. کربن آلوترپ‌های مختلفی مانند نانونوارهای کربنی [۱۱] تا [۱۵]، نانولوله‌های کربنی [۱۶]، فولرن [۱۷] تا [۱۹] و نانواسکرول [۲۰] دارد. از ویژگی‌های منحصر به فرد این مواد می‌توان به قابلیت تحرک بالای الکترون‌ها و انتقال سریع حامل‌ها اشاره کرد. استفاده از این مواد به عنوان جزیره ترانزیستور تک‌الکترونی باعث سرعت عملکرد بالای ترانزیستور خواهد شد [۲۱]. همچنین در ساختار لانه زنبوری گرافن هر اتم کربن می‌تواند با مواد دیگری جایگزین شود و ماده جدیدی مانند گرافن سفید تولید شود [۲۲].

همچنین افزایش تعداد جزیره در ترانزیستور تک‌الکترونی مقدار محدوده انسداد کولنی را کاهش می‌دهد [۱]، [۱۱]، [۱۸] و [۱۹]. این مورد برای تعداد جزایر مختلف با استفاده از نرم‌افزار AtomistixToolKit (ATK) بررسی شده است [۱]، [۸] تا [۱۱]، [۱۶]، [۲۰] و [۲۳].

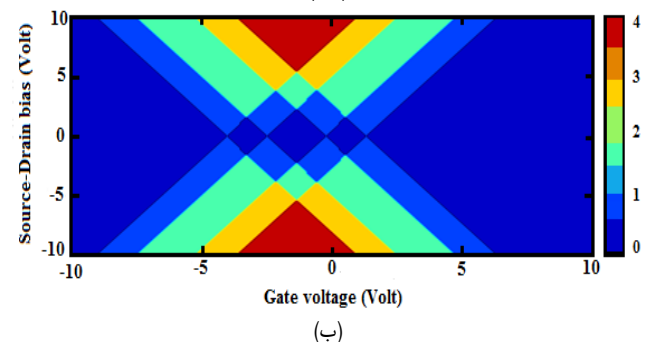
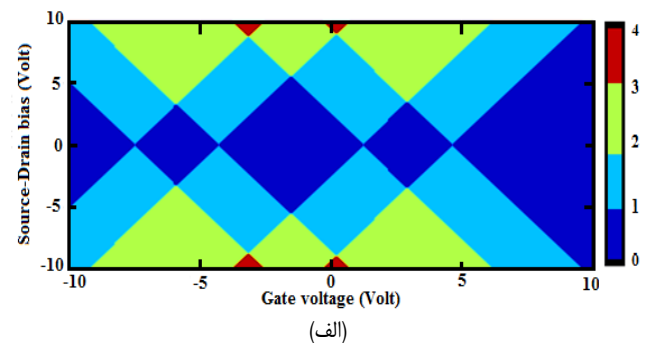
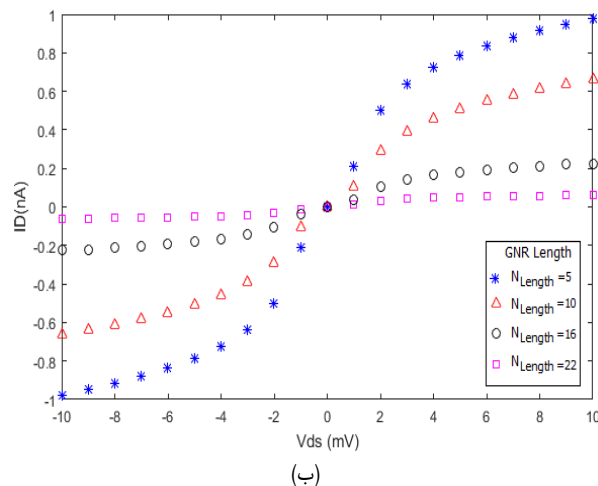
در این تحقیق، گرافن تک‌لایه به عنوان جزیره ترانزیستور تک‌الکترونی انتخاب شده است. مدل ریاضی برای جریان ترانزیستور تک‌الکترونی گرافنی استخراج و پیشنهاد شده است. تأثیر تعداد اتم‌های کربن موجود در عرض نوار نانومتری گرافنی و نیز اثر طول لایه گرافن و ولتاژ اعمالی گیت روی جریان ترانزیستور بررسی شده است. همچنین ترانزیستورهای تک‌الکترونی با جزایر گرافنی با تعداد اتم‌های عرضی مختلف، شبیه‌سازی و ترانزیستور با عملکرد بهینه مشخص شده است.

## ۲- مدل‌سازی و بحث

ترانزیستور تک‌الکترونی شامل الکترودهای سورس، درین، گیت و جزیره است. این نواحی می‌توانند با استفاده از شرایط مکانیک کوانتومی و معادلات شرودینگر مدل‌سازی شوند. در این مدل‌سازی جزیره گرافنی



شکل ۴: نمودارهای جریان بر حسب ولتاژ بایاس به ازای تعداد اتم‌های کربن متفاوت در عرض نوار نانومتری گرافنی (ولتاژ گیت برابر ۱ میلی‌ولت و طول نوار نانومتری برابر ۰/۴۹۲ نانومتر است).



شکل ۶: نمودارهای جریان بر حسب ولتاژ درین برای تعداد مختلف اتم در طول نوار نانومتری گرافنی ( $N_{width}$ ، (الف) نوار نانومتری دارای ۷ اتم کربن در عرض ( $N_{width} = 7$ ) و (ب) نوار نانومتری دارای ۱۳ اتم در عرض ( $N_{width} = 13$ ) است (ولتاژ گیت برای هر دو آنالیز مساوی یک میلی‌ولت می‌باشد).

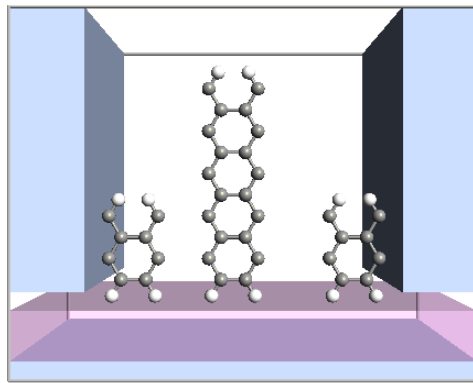
شکل ۵: نمودارهای پایداری برای ترانزیستور تک‌الکترونی با جزیره‌ای از جنس نوار نانومتری گرافنی آرمچیر که (الف) دارای ۴ اتم در عرض و (ب) دارای ۱۳ اتم در عرض می‌باشد (نمودار راهنمای رنگ‌ها در شکل نشان‌دهنده حالت‌های بار در نمودار پایداری است).

مقایسه نمودارهای شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد اتم‌ها در عرض نوار نانومتری گرافنی مساحت لوزی‌های کولنی و نیز مقدار ناحیه انسداد کولنی کاهش می‌یابد که نتایج حاصل از بررسی مدل پیشنهادی در شکل ۴ را تأیید می‌کند. همچنین دیگر عامل مؤثر روی جریان ترانزیستور، طول نوار نانومتری گرافنی است که در شکل ۶ تعداد اتم‌ها در طول نوار گرافنی ( $N_{Length}$ ) بررسی شده است.

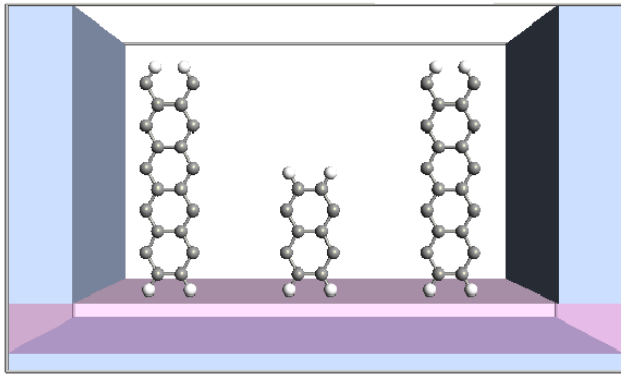
در هر دو شکل ۶-الف و ۶-ب مشاهده می‌شود که کاهش طول نوار نانومتری باعث افزایش جریان در خارج از ناحیه انسداد کولنی شده است ولی محدوده انسداد را تغییر نمی‌دهد زیرا محدوده انسداد کولنی تابعی از باند گپ ماده است. باند گپ ماده نیز تابعی از عرض نوار نانومتری می‌باشد. افزایش جریان ترانزیستور در خارج از محدوده انسداد کولنی در اثر کاهش طول نوار نانومتری است که می‌تواند به علت کاهش ضخامت چاه پتانسیل شکل ۲ و افزایش ضریب انتقال بر اساس (۱) باشد. افزایش ضریب انتقال نیز باعث افزایش مقدار جریان در محدوده خارج از ناحیه انسداد کولنی خواهد شد. مقایسه نمودارهای شکل ۶-الف و ۶-ب نشان می‌دهد که جریان در ترانزیستور تک‌الکترونی با جزیره‌ای از نوار نانومتری گرافنی با تعداد ۱۳ اتم کربن در عرض نسبت به ترانزیستور مشابه با تعداد ۷ اتم کربن در عرض بیشتر است. زیرا ناحیه انسداد کولنی آن کوچک‌تر و ناحیه تونل‌زنی بزرگ‌تر است.

تأثیر ولتاژ گیت بر جریان عبوری ترانزیستور تک‌الکترونی با توجه به مدل پیشنهادی انجام شده و نتیجه آن در شکل ۷ آمده است.

در عرض نانونوار در شکل ۴ نشان داده شده است. بررسی نمودارهای شکل ۴ نشان می‌دهد که افزایش تعداد اتم‌ها در عرض نوار نانومتری گرافنی تأثیر مستقیمی روی محدوده ناحیه انسداد کولنی و مقدار جریان دارد. نمودارهای شکل ۴ نشان می‌دهد که ناحیه انسداد کولنی در نوار نانومتری گرافنی با عرض ۴ اتم دارای بیشترین مقدار می‌باشد. نوار نانومتری گرافنی با عرض ۱۳ اتم دارای ناحیه انسداد کولنی با عرض بسیار کمتر را نشان می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد کاهش تعداد اتم‌ها در عرض نوار نانومتری گرافنی باعث کاهش ناحیه انسداد کولنی از حدود ۴ mV به صفر می‌شود. ترانزیستور تک‌الکترونی با جزیره‌ای از نوار نانومتری گرافنی و تعداد مختلف اتم‌ها در عرض نوار نانومتری توسط نرم‌افزار Atomistix ToolKit (ATK) [۸] شبیه‌سازی شده است. نمودارهای پایداری از نرم‌افزار استخراج گردیده و در شکل ۵ نشان داده شده است. لوزی‌های کولنی در نمودار پایداری نشان‌دهنده ناحیه تونل‌زنی الکترون و ناحیه انسداد کولنی می‌باشد.



(الف)



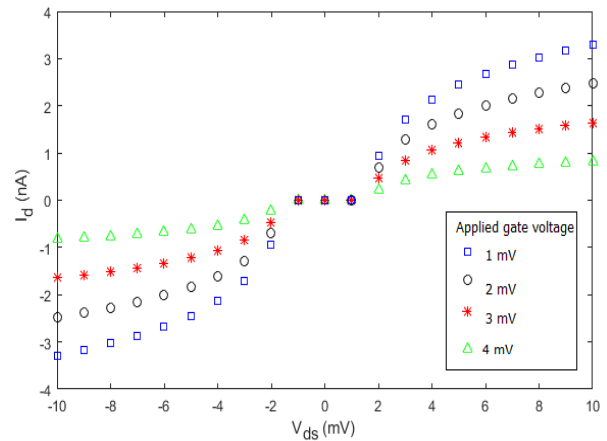
(ب)

شکل ۸: (الف) ترانزیستور تک‌الکترونی با سه جزیره از نوار نانومتري گرافنی به ترتیب با تعداد (۴ و ۱۰ و ۴) اتم کربن و (ب) ترانزیستور تک‌الکترونی با سه جزیره از نوار نانومتري گرافنی با تعداد (۱۰ و ۴ و ۱۰) اتم کربن.

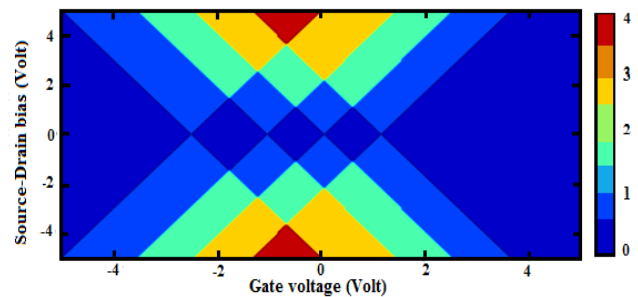
نانومتري گرافنی باعث کاهش ناحیه انسداد کولنی و محدوده جریان صفر می‌شود و نیز عملکرد ترانزیستور بهبود می‌یابد. به عبارتی دیگر، ترانزیستور سه‌جزیره‌ای با (۱۰ و ۴ و ۱۰) اتم دارای محدوده انسداد کوچک‌تری نسبت به ترانزیستوری با جزیره (۴ و ۱۰ و ۴) می‌باشد. زیرا سطح کل جزیره و سرعت انتقال الکترون‌ها افزایش یافته است. در نتیجه عملکرد و سرعت پردازش ترانزیستور تک‌الکترونی با سه جزیره گرافنی بهبود می‌یابد.

### ۳- نتیجه‌گیری

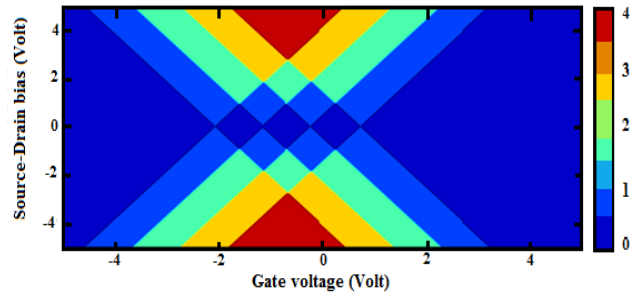
ترانزیستور تک‌الکترونی با عملکرد سریع و ابعاد نانومتري جهت افزایش سرعت در قطعات الکترونیکی استفاده می‌شود. استفاده از مواد با ویژگی‌های منحصر به فرد برای جزیره ترانزیستور باعث بهبود عملکرد ترانزیستور می‌شود. انتقال سریع الکترون‌ها در جزیره و تونل‌زنی در جزیره باعث کاهش محدوده جریان صفر و ناحیه انسداد کولنی می‌شود. در این تحقیق، گرافن به عنوان ماده جزیره ترانزیستور تک‌الکترونی انتخاب شده است. همچنین تأثیر تعداد اتم‌های کربن در عرض و طول نوار نانومتري گرافنی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد اتم‌ها در عرض نوار نانومتري گرافنی، محدوده انسداد کولنی و جریان صفر کاهش می‌یابد. همچنین افزایش ولتاژ اعمالی به این ترانزیستور باعث کاهش جریان می‌شود. علاوه بر این تأثیر عرض نوار نانومتري گرافنی بر عملکرد ترانزیستور تک‌الکترونی با سه جزیره بررسی و شبیه‌سازی شده است. در این ترانزیستور با افزایش تعداد اتم کربن در عرض نوار نانومتري گرافنی، ناحیه انسداد کولنی و نیز محدوده جریان صفر کاهش می‌یابد. در نتیجه ترانزیستور تک‌الکترونی عملکرد بهتری دارد.



شکل ۷: نمودار جریان بر حسب ولتاژ بایاس به ازای ولتاژهای گیت متفاوت (عرض نوار نانومتري گرافنی برابر ۷ اتم ( $N_{width} = 7$ ) و طول نوار نانومتري برابر ۰.۴۹۵ نانومتري انتخاب شده است).



(الف)



(ب)

شکل ۹: نمودارهای پایداری ترانزیستور تک‌الکترونی با سه جزیره از نوار نانومتري گرافنی و تعداد اتم‌های عرض هر نوار نانومتري گرافنی برابر است با (الف) (۴ و ۱۰ و ۴) اتم کربن و (ب) (۱۰ و ۴ و ۱۰) اتم کربن.

همان گونه که انتظار می‌رود، تغییر ولتاژ گیت هیچ تأثیری بر محدوده انسداد کولنی نداشته است زیرا باعث تغییر شکاف باند نمی‌شود. کاهش ولتاژ گیت باعث افزایش جریان عبوری از ترانزیستور در نواحی خارج از انسداد می‌گردد زیرا الکترون‌ها می‌توانند سریع‌تر به جزیره تونل بزنند. نهایتاً تأثیر عرض جزیره در عملکرد ترانزیستور تک‌الکترونی چندجزیره‌ای نیز با استفاده از شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار ATK بررسی شده است. ابتدا دو ترانزیستور تک‌الکترونی با سه جزیره از نانونوار گرافنی طراحی شده است. ترانزیستورها به ترتیب دارای جزیره‌هایی با تعداد کربن عرضی (۴ و ۱۰ و ۴) و (۱۰ و ۴ و ۱۰) هستند که در شکل ۸ نشان داده شده است.

نمودارهای پایداری این دو ترانزیستور تک‌الکترونی در شکل ۹ نشان داده شده است.

مقایسه نمودارهای پایداری در ترانزیستور تک‌الکترونی با سه جزیره گرافنی در شکل ۹ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد اتم‌ها در عرض نوار

## مراجع

- [18] V. Khademhosseini, M. T. Ahmadi, and R. Ismail, "Analysis and modeling of fullerene single electron transistor based on quantum dot arrays at room temperature," *J. of Electronic Materials*, vol. 47, no. 8, pp. 4799-4806, May 2018.
- [19] V. Khademhosseini, D. Dideban, M. T. Ahmadi, and R. Ismail, "Analysis of co-tunneling current in fullerene single-electron transistor," *Brazilian J. of Physics*, vol. 48, no. 4, pp. 406-410, May 2018.
- [20] V. Khademhosseini, D. Dideban, and M. T. Ahmadi, "An analytical approach for current modeling in a single electron transistor (SET) utilizing graphene nanoscroll (GNS) as the island," *ECS J. of Solid State Science and Technology*, vol. 9, no. 7, Article No.: 071001, 5 pp., Aug. 2020.
- [21] V. Khademhosseini, M. T. Ahmadi, S. Afrang, and R. Ismail, "Current analysis and modelling on fullerene single electron transistor at room temperature," *J. of Electronic Materials*, vol. 46, no. 7, pp. 4294-4298, Feb. 2017.
- [22] K. Golmohammadi, V. Khademhosseini, M. T. Ahmadi, D. Dideban, and R. Ismail, "Analysis and modeling of white graphene physical properties for sensor applications," in *Proc. of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, vol. 90, no. 3, pp. 475-479, Jan. 2019.
- [23] S. J. Ray, "First-principles study of MoS<sub>2</sub>, phosphorene and graphene based single electron transistor for gas sensing applications," *Sens. Actuator B*, vol. 222, pp. 492-498, Jan. 2016.
- [24] C. N. Bondja, Z. Geng, R. Granzner, J. Pezoldt, and F. Schwierz, "Simulation of 50-nm gate graphene nanoribbon transistors," *Electronics*, vol. 5(1), no. 3, pp. 1-17, Jan. 2016.
- [25] H. Raza and E. C. Kan, "Armchair graphene nanoribbons: electronic structure and electric-field modulation," *Physical Review B*, vol. 77, no. 24, Article No.: 245434, 5 pp., Jun. 2008.
- وحیده خادم حسینی** متولد کاشان می‌باشد. وی مدرک کارشناسی مهندسی برق الکترونیک را در سال ۱۳۸۵، مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق-الکترونیک را در سال ۱۳۹۲ و مدرک دکتری تخصصی مهندسی برق-الکترونیک را در سال ۱۳۹۶ از دانشگاه ارومیه دریافت کرد. وی محقق پسا دکتری دانشگاه کاشان است. زمینه تخصصی تحقیقاتی وی ترانزیستورهای تک الکترونی با استفاده از گرافن و مواد دو بعدی می‌باشد. وی مقالات متعددی را در مجلات نمایه شده به چاپ رسانیده است.
- داریوش دیدبان** در سال ۱۳۷۷ مدرک کارشناسی مهندسی الکترونیک را از دانشگاه صنعتی اصفهان و در سال ۱۳۷۹ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک را از دانشگاه صنعتی شریف دریافت نمود. وی از سال ۱۳۸۰ به عنوان عضو هیات علمی دانشگاه کاشان مشغول تدریس و پژوهش گردید. ایشان پس از موفقیت در اخذ بورس تحصیلی، مقطع دکترای مهندسی برق-الکترونیک را در سال ۱۳۹۱ در دانشگاه گلاسگو بریتانیا با موفقیت به پایان رسانید و هم اکنون با داشتن مرتبه علمی دانشجویی در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه کاشان مشغول ب فعالیت است. استاد راهنمای ۲۰ تز کارشناسی ارشد و ۸ رساله دکترا و یک محقق پسا دکترا، تالیف بیش از ۷۰ مقاله در مجلات معتبر بین المللی و انجام ۵ طرح پژوهشی کاربردی و تالیف ۲ عنوان کتاب از فعالیت‌های شاخص علمی ایشان در حوزه‌های تخصصی مرتبط با مهندسی نانو الکترونیک می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی و پژوهشی ایشان عبارتند از: مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی ادوات نیمه هادی و نانو الکترونیک، مدل‌سازی تأثیر تغییرات آماری در حوزه مدارهای مجتمع دیجیتال، و محاسبات مشخصه‌های الکترونیکی و کاربرد مواد دو بعدی در صنعت نیمه‌هادی.
- [1] V. Khademhosseini, D. Dideban, M. T. Ahmadi, R. Ismail, and H. Heidari, "Single electron transistor scheme based on multiple quantum dot islands: carbon nanotube and fullerene," *ECS J. of Solid State Science and Technology*, vol. 7, no. 10, pp. 145-152, Jan. 2018.
- [2] T. Ihn, J. Guttinger, F. Molitor, S. Schnez, E. Schurtenberger, A. Jacobsen, S. Hellmuller, T. Frey, S. Droscher, C. Stampfer, and K. Ensslin, "Graphene single-electron transistors," *Material Today*, vol. 13, no. 3, pp. 44-50, Mar. 2010.
- [3] C. J. Gorter, "A possible explanation of increases in electrical resistance of thin metal films at low temperature and low electric field strength," *Physical*, vol. 17, no. 8, pp. 777-780, Aug. 1951.
- [4] D. Averin and K. Likharev, "Mesoscopic Phenomena in Solids," North-Holland, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, 1991.
- [5] T. A. Fulton and G. J. Dolan, "Observation of single-electron charging effects in small tunnel junctions," *Physical Review Letters*, vol. 59, no. 1, pp. 109-112, Jul. 1987.
- [6] L. Zhung, L. Guo, and S. Y. Chou, "Silicon single-electron quantum-dot transistor switch operating at room temperature," *Applied Physics Letters*, vol. 72, no. 10, pp. 1205-1207, Jun. 1998.
- [7] V. V. Shorokhov, D. E. Presnov, S. V. Amitonov, Y. A. Pashkin, and V. A. Krupenin, "Single-electron tunneling through an individual arsenic dopant in silicon," *Nanoscale*, vol. 9, no. 2, pp. 613-620, Nov. 2017.
- [8] Atomistic Toolkit is a licensed software available from <https://www.synopsys.com/silicon/quantumatk.html>
- [9] V. Khademhosseini, D. Dideban, M. T. Ahmadi, and R. Ismail, "Impact of the vacancy defects on the performance of a single electron transistor with a carbon nanotube island," *J. of Computational Electronics*, vol. 18, no. 2, pp. 428-435, Dec. 2019.
- [10] V. Khademhosseini, D. Dideban, M. T. Ahmadi, and R. Ismail, "An analytical approach to model capacitance and resistance of capped carbon nanotube single electron transistor," *AEU-International J. of Electronics and Communications*, vol. 90, pp. 97-102, Jun. 2018.
- [11] V. Khademhosseini, D. Dideban, M. T. Ahmadi, and R. Ismail, "Current analysis of single electron transistor based on graphene double quantum dots," *ECS J. of Solid State Science and Technology*, vol. 9, no. 2, Article No.: 0210035, 5 pp., Jan. 2020.
- [12] V. Khademhosseini, A. K. Jameil, and M. T. Ahmadi, "Analysis of temperature limitation of graphene single electron transistor," in *Proc. 2nd Engineering Scientific Conf. College of Engineering-University of Diyala*, pp. 568-573, Dec. 2015.
- [13] M. Zoghi, A. Yazdanpanah Goharrizi, and M. Saremi, "Band gap tuning of armchair graphene nanoribbons by using antidotes," *J. of Electronic Materials*, vol. 46, no. 1, pp. 340-346, Sept. 2017.
- [14] A. Yazdanpanah Goharrizi, M. Zoghi, and M. Saremi, "Armchair graphene nanoribbon resonant tunneling diodes using antidote and BN doping," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 63, no. 9, pp. 3761-3768, Jul. 2016.
- [15] M. Saremi, M. Saremi, H. Niazi, and A. Yazdan Panah Goharrizi, "Modeling of lightly doped drain and source graphene nanoribbon field effect transistors," *Superlattices and Microstructures*, vol. 60, pp. 67-72, Aug. 2013.
- [16] V. Khademhosseini, D. Dideban, M. T. Ahmadi, and R. Ismail, "Impact of chiral indices on the performance of single electron transistor utilizing carbon nanotube island," *ECS J. of Solid State Science and Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 26-29, Mar. 2019.
- [17] V. Khademhosseini, M. T. Ahmadi, S. Afrang, and R. Ismail, "Analysis of coulomb blockade in fullerene single electron transistor at room temperature," *J. of Nanoanalysis*, vol. 4, no. 2, pp. 120-125, Aug. 2017.