

بررسی رسانش الکترونی یک نانونوار با ساختار مربعی شامل چند ناخالصی

مرضیه جمشیدی فارسانی، حسن ربانی و محمد مردانی

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

پست الکترونیکی: rabani-h@sku.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۰۶؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۷/۰۷/۱۳)

چکیده

در این مقاله با بهره‌گیری از روش تابع گرین و در رهیافت تنگابست، تأثیر حضور و چگونگی توزیع ناخالصی‌های الکتریکی را بر روی رسانش الکترونی یک نانونوار با ساختار مربعی مطالعه می‌کنیم. بدین منظور با به کار بردن یک تبدیل یکانی مناسب، مدهای رسانش را در قسمت‌های ایده‌آل جدا نموده و خود انرژی‌های مربوطه را به صورت تحلیلی به دست می‌آوریم. سپس با به کارگیری رابطه فیشرلی رسانش سامانه را به صورت الگوریتمی که سریعاً توسط رایانه قابل محاسبه است، ارائه می‌کنیم. نتایج عددی نشان می‌دهد که توزیع ناخالصی‌های الکتریکی با انرژی‌های جایگاهی متفاوت، منجر به مقادیر متفاوتی از رسانش الکترونی در سامانه شده و به طور کلی باعث کاهش رسانش الکتریکی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: رسانش الکترونی، نانونوار، ناخالصی الکتریکی، تابع گرین

۱. مقدمه

نانوبلورها، ایرشبه‌که‌ها و ساختارهای نانومقیاس به دلیل دارا بودن ویژگی‌های منحصر به فرد الکترونیکی، نوری و شیمیایی که به اندازه ساختار وابسته است، در قطعات الکترونیکی و ذخیره‌سازی اطلاعات، کاربردهای فراوان دارند [۱-۶]؛ از این رو در بسیاری از کاربردها رسانندگی الکتریکی یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های آنها است [۷ و ۸]. اضافه کردن و یا جایگزینی ناخالصی‌های الکتریکی یکی از عواملی است که تأثیر به سزایی بر روی رسانش الکتریکی نانوساختارها دارد. همچنین با آرایش نانو ساختارها به ویژه ساختارهای دوبعدی توسط ناخالصی‌های

الکتریکی و تغییر مکان آنها می‌توان رسانش الکتریکی را کنترل نمود [۹-۱۲].

در این مقاله با بهره‌گیری از روش تابع گرین در رهیافت تنگابست، تأثیر حضور و چگونگی توزیع ناخالصی‌های الکتریکی را بر روی مقدار رسانش الکتریکی یک نانونوار با ساختار مربعی مطالعه می‌کنیم. لازم به ذکر است که بر اساس رهیافت لاندائور ضریب عبور الکتریکی نانوساختار مورد نظر را هم‌ارز رسانش الکتریکی در نظر می‌گیریم [۱۳]. همچنین چگالی حالت‌های موضعی را روی محل توزیع ناخالصی‌های الکتریکی بررسی می‌کنیم. برای این منظور در بخش بعد به

در رهیافت تنگابست به صورت زیر نوشته می شود

$$H_W = \sum_i \mathbf{c}_i^\dagger \varepsilon_i \mathbf{c}_i + \sum_{\langle ij \rangle} \beta_W (\mathbf{c}_i^\dagger \mathbf{c}_j + \mathbf{c}_j^\dagger \mathbf{c}_i), \quad (2)$$

که در آن $i(j)$ شماره یاخته، ε_i ماتریس مربوط به انرژی های جایگاهی اتم ها در یاخته i ام و $\mathbf{c}_i^\dagger (\mathbf{c}_i)$ عملگر خلق (نابودی) الکترون است. فرض بر این است که تعدادی ناخالصی الکتریکی مثبت و منفی با انرژی های جایگاهی $\pm \varepsilon_{imp}$ در سامانه مرکزی وجود دارد و سایر اتم های این قسمت دارای انرژی های جایگاهی یکسان ε_W هستند. شکل هامیلتونی هادی ها دقیقاً همانند رابطه (۲) است، با این تفاوت که انرژی های جایگاهی و پرش آنها ثابت فرض شده و به ترتیب با نمادهای $\beta_{L(R)}$ و $\varepsilon_{L(R)}$ معرفی می شوند. می توان با استفاده از یک تبدیل یکانی در راستای طول سامانه، هامیلتونی هادی ها را به هامیلتونی N_y زنجیره مستقل تبدیل کرد [۱۴] که چنین می شود

$$H_{L(R)} = \sum_{n,i} \varepsilon_{n,L(R)} d_{n,i}^\dagger d_{n,i} + \sum_{n,\langle ij \rangle} \beta_{L(R)} (d_{n,i}^\dagger d_{n,j} + d_{n,j}^\dagger d_{n,i}), \quad (3)$$

که در آن

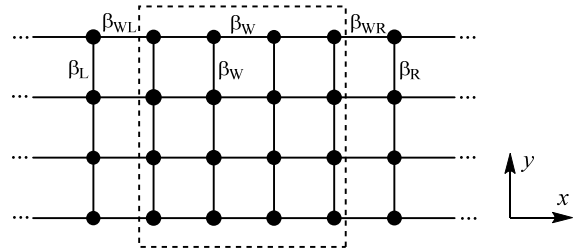
$$\varepsilon_{n,L(R)} = \varepsilon_{L(R)} + 2\beta_{L(R)} \cos(n\pi / (N_y + 1)), \quad (4)$$

و $d_{n,i}^\dagger (d_{n,i})$ عملگر خلق (فنا) الکترونی در یاخته i ام و در مد n ام است. در این رابطه جمع زنی روی n از مقدار یک تا N_y است که همان تعداد اتم های هر یاخته است. حال به ارائه شکل ماتریس خود انرژی چپ (راست)، $\sigma_{L(R)}$ بر می گردیم. این ماتریس بعد از اعمال تبدیل متعامد به صورت ماتریس قطری $\tilde{\sigma}_{L(R)}$ با عناصر $\tilde{\sigma}_{L(R)}^{(1)}, \dots, \tilde{\sigma}_{L(R)}^{(N_y)}$ به دست می آید که این عناصر با استفاده از تابع گرین سطحی مربوط به هر مد به صورت زیر نوشته می شود

$$\tilde{\sigma}_{L(R)}^{(n)} = \frac{\beta_{WL(R)}^\dagger}{2\beta_W \beta_{L(R)}^\dagger} \left(\varepsilon - \varepsilon_{n,L(R)} - \sqrt{(\varepsilon - \varepsilon_{n,L(R)})^2 - 4\beta_{L(R)}^2} \right), \quad (5)$$

$$n = 1, \dots, N_y$$

که در آن $\beta_{WL(R)}$ انرژی پرش الکترون مربوط به پیوندهای



شکل ۱. یک نانونوار نامتناهی با ساختار مربعی که قسمت کوچکی از آن (ساختار واقع در مستطیل خط چین) می تواند شامل یک یا چند ناخالصی باشد. این قسمت را به عنوان سامانه مرکزی در نظر گرفته که از طرفین به هادی های مشابه متصل است.

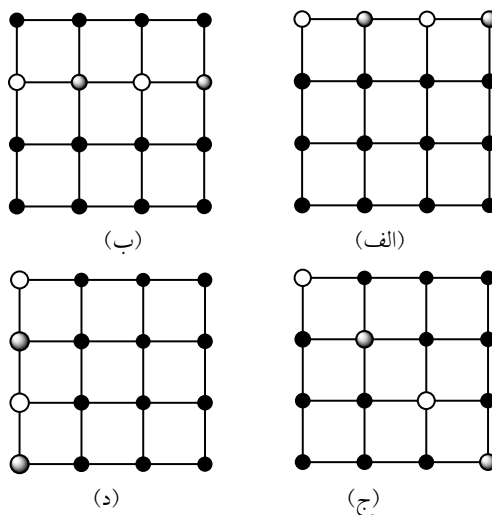
معرفی چارچوب نظری و فرمول بندی مقاله می پردازیم. سپس در بخش نتایج و بحث، برای چهار توزیع متفاوت از ناخالصی های الکتریکی به صورت دو دوقطبی و یا یک چهارقطبی در سطح مقطعی از نانونوار، رسانش الکتریکی را بر حسب انرژی محاسبه می کنیم. سرانجام در بخش پایانی نیز به جمع بندی نتایج و ارائه خلاصه مقاله می پردازیم.

۲. فرمول بندی

یک سامانه دوبعدی با ساختار شبکه ای مربعی را در نظر بگیرد که عرض آن محدود ولی دارای طول بی نهایت است. فرض کنید که قسمتی از این نانونوار با قسمت های دیگر متفاوت بوده و شامل یک یا چند ناخالصی الکتریکی است. مطابق با شکل ۱ سامانه مورد نظر را می توان به سه بخش تقسیم کرد؛ بخش مرکزی شامل تعداد $N_x N_y$ اتم که از سمت های چپ و راست به دو بخش دیگر که هادی های مشابه هستند، متصل شده است. وارون ماتریس تابع گرین سامانه مرکزی در حضور هادی ها از رابطه زیر پیروی می کند

$$G_W^{-1} = \varepsilon I - H_W - \beta_W (\sigma_L + \sigma_R), \quad (1)$$

که در آن ε انرژی الکترون، I ماتریس یکه و β_W انرژی پرش الکترون بین نزدیک ترین اتم های سامانه مرکزی است. $\sigma_{L(R)}$ معرف ماتریس خودانرژی (بدون بعد) سامانه مرکزی در حضور هادی چپ (راست) است. شکل صریح این تابع بعداً ارائه خواهد شد. همچنین H_W هامیلتونی سامانه مرکزی است که



شکل ۲. حضور ناخالصی‌های الکترونیکی با انرژی‌های جایگاهی متفاوت در یاخته‌های متفاوت از سامانه مرکزی: (الف) یاخته اول در راستای محور x ، (ب) یاخته دوم در راستای محور x ، (ج) قطر سامانه مرکزی، (د) یاخته اول در راستای محور y .

نانونوار یا همان هادی‌ها متصل شده‌اند. هدف بررسی رسانش الکترونیکی این سامانه در چند پیکربندی خاص با توزیع تعداد مشخصی (۴ عدد) ناخالصی در قسمت مرکزی است. در واقع با این کار می‌توان ارتباط بین چگونگی توزیع ناخالصی‌ها با رسانش الکترونی سامانه را فهمید. انرژی جایگاهی دو تا از چهار ناخالصی را ϵ_{imp} و دوتای دیگر را $-\epsilon_{imp}$ نشان می‌دهیم. ابتدا توزیع ناخالصی‌ها را بصورت خطی یکی در راستای طول نانونوار (شکل‌های ۲ (الف) و ۲ (ب))، یکی در راستای قطر مرکزی (شکل ۲ (ج)) و دیگری در راستای عرض نانونوار (شکل ۲ (د)) در نظر می‌گیریم. شکل‌های ۳ (الف) و ۳ (ب) ضریب عبور الکترونی چهار پیکربندی شکل ۲ را بر حسب انرژی الکترون به ترتیب برای $\epsilon_{imp} = 1\text{eV}$ و 3eV نشان می‌دهند. برای مقایسه، در شکل ۳ (الف) نمودار ضریب عبور الکترونی سامانه ایده‌آل که به شکل پله‌ای است، رسم شده است. این نمودار بر این واقعیت تأکید می‌کند که رسانش کل سامانه از مجموع سهم‌های چهار کانال رسانشی حاصل می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود نوار انرژی این کانال‌ها با هم دیگر همپوشانی داشته و ضریب عبور را به مقدار چهار نیز رسانده است. با وارد کردن ناخالصی‌ها نمودار از حالت پله‌ای خارج شده و رسانش الکترونی کاهش می‌یابد. مطابق با شکل ۳

بین اتم‌های هادی چپ (راست) و سامانه مرکزی است (شکل ۱). سرانجام می‌توان ضریب عبور الکترونی سامانه مرکزی را از

رابطه زیر به دست آورد [۱۵]

$$T(\epsilon) = \text{tr}(\tilde{\Gamma}_L \tilde{G}_W \tilde{\Gamma}_R \tilde{G}_W^\dagger), \quad (6)$$

که در آن \tilde{G}_W تبدیل یافته ماتریس تابع گرین در رابطه (۱) بعد از اعمال تبدیل یکانی است و تابع $\tilde{\Gamma}_{L(R)}$ برای هادی چپ (راست)

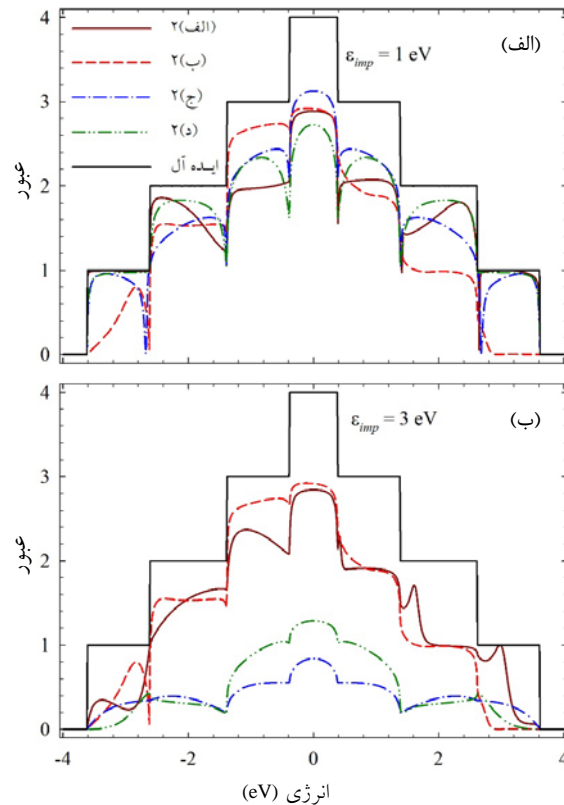
بر حسب ماتریس خود انرژی تبدیل یافته مربوطه چنین است

$$\tilde{\Gamma}_{L(R)} = -2\text{Im} \tilde{\sigma}_{L(R)}. \quad (7)$$

بنابراین می‌توان به کمک رابطه (۶) به بررسی رسانش الکترونی نانوساختار مورد نظر در حضور ناخالصی‌های الکترونیکی پرداخت که در بخش بعدی به این موضوع می‌پردازیم.

۳. نتایج و بحث

در اینجا به عنوان یک مثال به ارائه محاسبات عددی برای رسانش الکترونیکی یک نانونوار با ساختار مربعی به عرض ۴ اتم و طول بی‌نهایت که قسمتی از آن شامل ۱۶ اتم، شامل چهار ناخالصی الکترونیکی است، می‌پردازیم. مطابق با شکل ۲، قسمت ۱۶ اتمی از نانوساختار مورد نظر که شامل چهار یاخته چهار اتمی است، به عنوان سامانه مرکزی شناخته شده که از طرفین با پیوندهایی به عنوان اتصال، به قسمت‌های چپ و راست

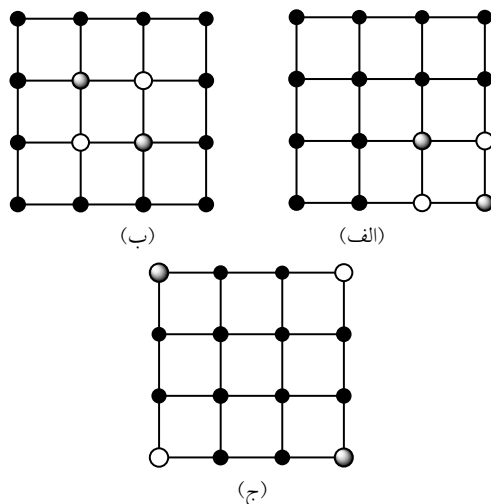


شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار ضریب عبور الکترونی بر حسب انرژی برای چهار مورد متفاوت از توزیع ناخالصی‌های الکترونیکی در شکل ۲، برای انرژی جایگاهی ناخالصی‌های الکترونیکی (الف) $\pm 1\text{ eV}$ و (ب) $\pm 3\text{ eV}$.

اینجا به آن اشاره کرد این است که تغییرات رسانش در نیمه راست بیشتر از نیمه چپ است. این امر به دلیل انتخاب ترتیب قرار گرفتن بارهای مثبت و منفی است. اگر جای مثبت و منفی عوض شود، تغییرات در قسمت نیمه چپ بیشتر خواهد بود. لازم به ذکر است که بررسی‌های قبلی ما نشان می‌دهد که برای یک تک ناخالصی با بار مثبت، تغییر اصلی در قسمت چپ رخ خواهد داد و برعکس. با این حال موضوع برای چند ناخالصی به این سادگی نیست و این که تغییر اصلی در سمت چپ باشد یا راست، توسط چگالی حالت‌های سامانه مرکزی در حضور ناخالصی تعیین می‌شود.

لازم به ذکر است در مواردی که اربیتال‌های s گونه به عنوان توابع پایه اتمی برای به دست آوردن پارامترهای تنگابست استفاده می‌شود، به ازای هر اتم یک الکترون شبه آزاد در سامانه وجود دارد. با این فرض سامانه خاصیت فلزی خواهد داشت و

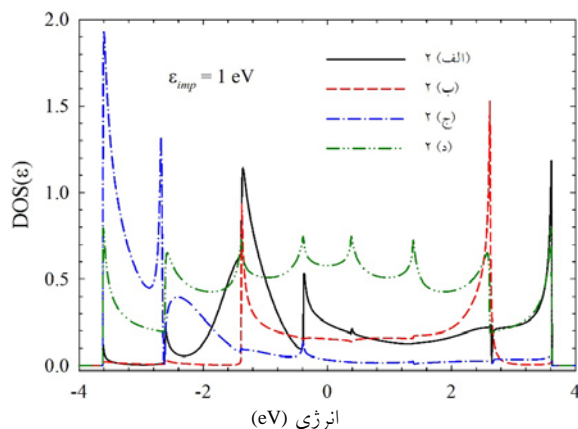
(الف)، برای توزیع‌های نشان داده شده در شکل‌های ۲ (الف) و ۲ (ب)، نمودارهای ضریب عبور الکترونی نسبت به مرکز نوار انرژی نامتقارن هستند در حالی که برای موارد نشان داده شده در شکل‌های ۲ (ج) و ۲ (د) منحنی‌های رسانش تقارن دارند. این بدان معنی است که برای ناخالصی‌های با انرژی‌های جایگاهی یک در میان مثبت و منفی، اگر در راستای طول نانونوار توزیع شده باشند، نمودار رسانش نسبت به انرژی حول انرژی جایگاهی اتم‌های میزبان (در اینجا صفر) نامتقارن می‌شود. دره‌هایی در مرزهای همپوشانی کانال‌ها در منحنی رسانش دیده می‌شود. دلیل این امر از تداخل‌های ویرانگر توابع موج الکترونی از مسیرهای مختلف فیزیکی است که از وجود ناخالصی (ها) به وجود می‌آیند. لازم به ذکر است این اثر در یک زنجیره بدون شاخه و شامل ناخالصی دیده نمی‌شود که علت آن وجود فقط و فقط یک مسیر برای الکترون در آن است. نکته قابل تأمل دیگری که می‌توان در



شکل ۴. حضور چهار قطبی در جایگاه‌های مختلف از سامانه مرکزی.

مطابق شکل ۳ (ب)، وقتی انرژی جایگاهی ناخالصی‌های الکتریکی $\pm 3 \text{ eV}$ است، برای پیکربندی‌های شکل ۲ (الف) و ۲ (ب)، رسانش الکترونی در مرکز نوار انرژی نسبت به حالتی که انرژی ناخالصی‌ها $\pm 1 \text{ eV}$ باشد (شکل ۳ (ب))، به مقدار ناچیزی کاهش می‌یابد. نتیجه دیگری که شکل ۳ به ما می‌دهد، این است که ضریب عبور موردهای نشان داده شده در شکل‌های ۲ (الف) و ۲ (ب) در اکثر انرژی‌ها نسبت به موارد شکل‌های ۲ (ج) و ۲ (د) برای وقتی که مقدار ϵ_{imp} زیاد است، مقدار بیشتری دارند. بنابراین افزایش انرژی ناخالصی‌های الکتریکی تأثیر به‌سزایی بر روی رسانش الکترونی این پیکربندی‌ها دارد. به گونه‌ای که رسانش الکترونی سامانه وقتی که چینش ناخالصی‌ها در راستای طول نانونوار است، نسبت به عرض آن، تأثیر کمتری می‌پذیرد. دلیل این امر پراکندگی کمتر تابع موج الکترونی برای چینش طولی نسبت به چینش عرضی است. تأثیرپذیری رسانش از توزیع ناخالصی‌ها در عرض نسبت به طول آنقدر زیاد است که دیده می‌شود برای مورد $\epsilon_{\text{imp}} = \pm 3 \text{ eV}$ ، پیکربندی شکل ۲ (ج) کمترین مقدار رسانش را در انرژی فرمی اختیار می‌کند در حالی که برای مورد $\epsilon_{\text{imp}} = \pm 1 \text{ eV}$ ، پیکربندی شکل ۲ (د) کمترین مقدار را داراست. حال با توجه به شکل ۴، مواردی را بررسی می‌کنیم که چهار ناخالصی الکتریکی با چینش یک در میان (مانند یک چهارقطبی) در مرکز، گوشه و یا لبه‌های سامانه مرکزی قرار گرفته

ترازهای انرژی تا انرژی صفر (انرژی فرمی) پر خواهند شد. توجه به این نکته در ادامه، بحث خود را بیشتر معطوف به رفتار رسانندگی در انرژی صفر خواهیم کرد. با نگاهی دقیق‌تر به مقدار رسانش در انرژی صفر، متوجه خواهیم شد که این پارامتر با جابه‌جا شدن اتم‌ها از روی لبه به داخل نانونوار (از شکل ۲ (الف) به ۲ (ب))، افزایش می‌یابد. مشابه این امر برای موردهای شکل ۲ (ج) و ۲ (د) نیز برقرار است. یعنی هر چه ناخالصی‌ها به سمت مرکز نانونوار بروند، رسانندگی در انرژی فرمی بهتر می‌شود. از آنجایی که رسانش در این انرژی با توجه به نمودار مربوط به مورد ایده‌آل از سهم‌های هر چهار کانال ایجاد می‌شود، بنابراین می‌توان گفت که رسانش این کانال‌ها در انرژی فرمی به انرژی جایگاهی اتم‌های سطحی (لبه‌ای) سامانه مرکزی حساسیت داشته و با قرار گرفتن ناخالصی در لبه مقدارشان کاهش می‌یابد. برای پیکربندی (ج) در شکل ۲، مطابق با نمودار شکل ۳ (الف)، رسانش الکترونی سامانه در مرکز نوار انرژی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. چون توزیع ناخالصی‌ها در این مورد باعث کاهش پراکندگی الکترون‌ها و افزایش همپوشانی کانال‌های رسانشی حول انرژی صفر، نسبت به موردهای دیگر می‌شود. همچنین دیده می‌شود که در انرژی صفر، پیکربندی شکل ۲ (د)، نسبت به سه توزیع دیگر نمایش داده شده در شکل ۲، منجر به کمترین مقدار رسانش در نانونوار می‌شود.

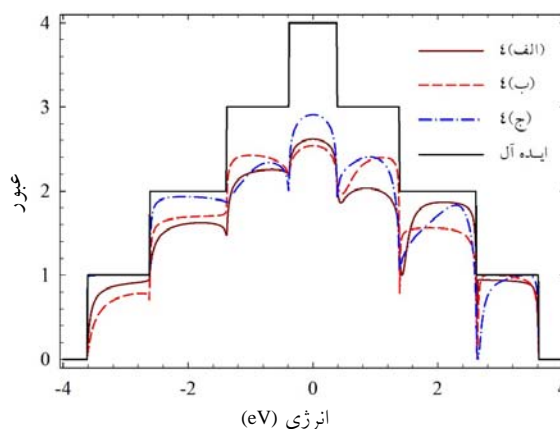


شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مجموع چگالی حالت‌های موضعی روی جایگاه‌های شامل ناخالصی بر حسب انرژی برای پیکربندی‌های نشان داده شده در شکل ۲ که در واحد اختیاری ترسیم شده است.

(ج)، حالت‌های انرژی در انرژی‌های بالاتر کمتر از حالت‌ها در انرژی‌های پایین‌تر است و یا در نمودار مربوط به شکل ۲ (الف) تقریباً این مورد برعکس است. در واقع وجود ناخالصی‌ها دلیل انحراف چگالی حالت‌ها از حالت ایده‌آل است که منجر به افزایش پراکندگی الکترون ورودی می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش تابع گرین و در رهیافت تنگابست به بررسی تحلیلی رسانش الکتریکی یک نانونوار با ساختار مربعی در حضور چند ناخالصی الکتریکی پرداختیم. ابتدا برای یک مورد نانونوار به عرض چهار اتم، توزیع ناخالصی‌ها (چهار عدد) را در سامانه به صورت خطی در طول، عرض و یا قطر سامانه در نظر گرفتیم و نشان دادیم که در مقادیر بالای انرژی جایگاهی ناخالصی‌ها، رسانش الکترونی در انرژی فرمی سامانه، برای موردی که توزیع در طول نانونوار باشد، بهتر از سایر توزیع‌ها است. همچنین مواردی که در آنها توزیع ناخالصی به صورت مربعی هستند نیز در سه پیکربندی یکی در مرکز، یکی در گوشه و دیگری با حداکثر فاصله از یکدیگر بررسی شد. نتایج مربوط به رسانش این موارد نشان داد که مورد آخر بهترین رسانش را در انرژی صفر از خود نشان می‌دهد. همچنین حضور ناخالصی الکتریکی باعث می‌شود که



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار ضریب عبور الکترونی بر حسب انرژی برای سه پیکربندی نشان داده شده در شکل ۴، وقتی که انرژی جایگاهی ناخالصی‌های الکتریکی $\pm 1\text{eV}$ است.

باشند. شکل ۵ ضریب عبور الکترونی را برای موارد (الف) تا (ج) در شکل ۴، برای وقتی که انرژی جایگاهی ناخالصی‌ها $\pm 1\text{eV}$ است، نشان می‌دهد. دیده می‌شود که رسانش الکتریکی در انرژی صفر برای موردی که چهار قطبی در گوشه سامانه مرکزی قرار دارد (شکل ۴ (الف))، نسبت به موردی که ناخالصی‌ها در مرکز قرار گرفته‌اند (شکل ۴ (ب))، مقدار بیشتری دارد. همچنین برای موردی که در آن ناخالصی‌ها در چهار گوشه سامانه قرار دارد (شکل ۴ (ج))، مقدار رسانش در انرژی فرمی بیشترین مقدار را اختیار می‌کند.

به عنوان نمونه، در شکل ۶، نمودار مجموع چگالی حالت‌های موضعی روی جایگاه‌های شامل ناخالصی در پیکربندی‌های نشان داده شده در شکل ۲ برای وقتی که انرژی جایگاهی ناخالصی‌ها $\pm 1\text{eV}$ است، رسم شده است. همان طور که می‌دانیم نمودار چگالی حالت‌های یک سامانه ایده‌آل از مجموع نمودارهای U شکل که از مدهای رسانش نشأت می‌گیرد، به دست می‌آید. از این رو در شکل ۶، در بیشتر نمودارها شکل U بین قله‌ها مشاهده می‌شود و در بعضی موارد این شکل بین پله‌های رسانش حفظ نمی‌شود. به طور کلی می‌توان گفت که وقتی انرژی جایگاهی ناخالصی‌ها با انرژی جایگاهی سایر اتم‌های میزبان متفاوت است، حالت‌های الکترونی روی جایگاه‌های شامل ناخالصی از حالت ایده‌آل فاصله می‌گیرد. به طور مثال در نمودار مربوط به شکل ۲

مقدار چگالی حالت‌های کل در اکثر انرژی‌های الکترون ورودی، الکترون در آن انرژی‌ها گردد. از مقدار ایده‌آل خود دور شده و باعث افزایش پراکندگی

مراجع

8. A Shabaev, A L Efros, and A L Efros *Nano Lett.* **13** (2013) 5454.
9. A Sahu *et al.*, *Nano Lett.* **12** (2012) 2587.
10. M Mardaani and H Rabani, *Superlattices and Microstructures* **59** (2013) 155.
11. M Mardaani and H Mardaani, *Physica E* **33** (2006) 147.
۱۲. م. مردانی، ح. ربانی و ف. آقابابایی، مجله پژوهش فیزیک ایران، ۱۳، ۳ (۱۳۹۲) ۳۰۳.
12. M Mardaani, H Rabani, and F Aghababaei, *Iranian Journal of Physics Research* **13**, 3 (2013) 303.
13. R Landauer, *IBM J. Res. Dev.* **1** (1957) 223.
14. M Mardaani and K Esfarjani, *Physica E* **25** (2004) 119.
15. S Datta, “*Electronic Transport in Mesoscopic Systems*”, Cambridge University Press, Cambridge (1997).
1. V I Klimov, “*Semiconductor and Metal Nanocrystals Synthesis and Electronic and Optical Properties*”, CRC Press (2003).
2. H Fan, A Wright, J Gabaldon, A Rodriguez, C J Brinke, and Y B Jiang, *Adv. Funct. Mater* **16** (2006) 891.
3. S Coh, S G Louie, and M L Cohen, *Phys. Rev. B* **88** (2013) 045424.
4. M V Kovalenko *et al.*, *American Chemical Society Nano* **9**, 2 (2015) 1012.
5. M G Panthani and B A Korgel, *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.* **3** (2012) 287.
6. T Chen, K V Reich, N J Kramer, H F U R Kortshagen, and B I Shklovskii, *Nature Materials* **15** (2016) 299.
7. I Kriegel and F Scotognella *Thin Solid Films* **612** (2016) 327.