

مطالعه نظری رسانش الکترونی در یک سامانه کوانتومی با الکترودهای دو زنجیری

کامیار قادری، فرهاد خوئینی*

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

چکیده

در این تحقیق، ویژگی‌های رسانش الکترونی یک سامانه کوانتومی متشکل از یک وسیله با شبکه مربعی متصل به دو الکتروده فلزی نیم نامتناهی را مطالعه می‌کنیم. رسانش الکترونی سامانه، بر اساس مدل تنگابست با تقریب نزدیک‌ترین همسایه‌ها و در رژیم جفت‌شدگی قوی بررسی می‌شود. همچنین رهیافت تابع گرین برگشتی برای محاسبات عددی رسانش مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که با تغییر پهناي سامانه و اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت می‌توان ویژگی‌های الکتریکی این سامانه را کنترل نمود. همچنین معرفی ساختار نقص‌دار سبب کاهش رسانش و ایجاد شکاف انرژی می‌شود. با کنترل پارامترهایی مانند اندازه سامانه، مقدار شار مغناطیسی ورودی و بی‌نظمی به صورت تهی‌جا، گذار فاز نیم‌فلز-فلز و نیم‌رسانا-فلز در سامانه رخ می‌دهد. نتایج این تحقیق می‌تواند در طراحی ادوات نانوالکترونیک کاربرد زیاد داشته باشد.

کلیدواژگان: شبکه مربعی، ترابرد کوانتومی، تابع گرین، مدل تنگابست

مقدمه

[۱۱-۱۳]. این بیوپلیمرها می‌توانند ویژگی‌های الکترونی متفاوتی داشته باشند. تاکنون مطالعه ترابرد الکترونی در این ساختارها با روش‌های گوناگون انجام گرفته است [۱۴-۱۸]. یکی از این روش‌ها، استفاده از رهیافت تابع گرین است. فرمول‌بندی تابع گرین، با در نظر گرفتن اصول ترابرد کوانتومی، ابزار لازم برای مطالعه نظری این نانوساختارها را فراهم می‌کند [۱۹-۲۰]. در مرجع [۲۰]، روش تابع گرین برای بررسی ویژگی‌های ترابرد الکترونی در این نانوساختارها ارائه شده است. ویژگی‌های ترابرد در دو زنجیره الیگمر (oligomer) موازی و بدون برهم‌کنش با اندازه و ساختار یکسان در مرجع [۲۱] مطالعه شده است. ویژگی‌های فیزیکی سامانه‌های با ساختار شبکه مربعی و مستطیلی، بسیار

نانوساختارها به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد و ابعاد بسیار کوچک، در حوزه نانوالکترونیک از اهمیت خاصی برخوردارند و می‌توانند کاربردهای بسیاری داشته باشند [۱-۴]. عمده‌ترین کاربرد این نانوساختارها در ترانزیستورها و حسگرها می‌باشد، به همین دلیل بررسی خواص ترابرد آنها قابل توجه است [۵]. دسته‌ای از این نانوساختارها، سامانه‌های یک بعدی و شبه یک بعدی، مانند زنجیره‌های اتمی هستند که در سال‌های اخیر، ویژگی‌های ترابرد آنها بسیار بررسی شده است [۶-۱۰]. توجه ویژه به این سامانه‌ها به دلیل کاربرد بیوپلیمرها در نانوقطعات الکترونیکی می‌باشد

تعداد اتم‌ها در راستای پهنای وسیله (راستای قائم) و M نشان دهنده تعداد اتم‌ها در راستای طول سامانه (راستای افق) است. همچنین در سامانه نقص‌دار (شکل اب)، V و W به ترتیب تعیین‌کننده فاصله اتمی ناحیه بی‌نظم (تهی جاها) از لبه بالا و پایین وسیله می‌باشد که در شکل ۱ برابر ۳ نمایش داده شده است. سامانه را در فضای حقیقی، با هامیلتونی تعمیم‌یافته زیر توصیف می‌کنیم [۱۹، ۲۹]:

$$H = H_L + H_{LS} + H_S + H_{SR} + H_R \quad ۱$$

در این رابطه H_L ، H_S و H_R به ترتیب هامیلتونی وسیله، الکتروود چپ و راست است. همچنین H_{LS} و H_{SR} به ترتیب هامیلتونی جفت‌شدگی وسیله به الکترودهای چپ و راست است. همه عناصر ماتریس هامیلتونی جفت‌شدگی، صفر هستند به جز عناصری که اتم‌های الکتروود را به وسیله متصل می‌کنند. هامیلتونی هر قسمت از سامانه رابطه ۱ را در تقریب نزدیکترین همسایه‌ها می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$H_j = \sum_n (\varepsilon_n |n\rangle\langle n| + t_{n,n+1} |n\rangle\langle n+1| + t_{n+1,n} |n+1\rangle\langle n|), \quad ۲$$

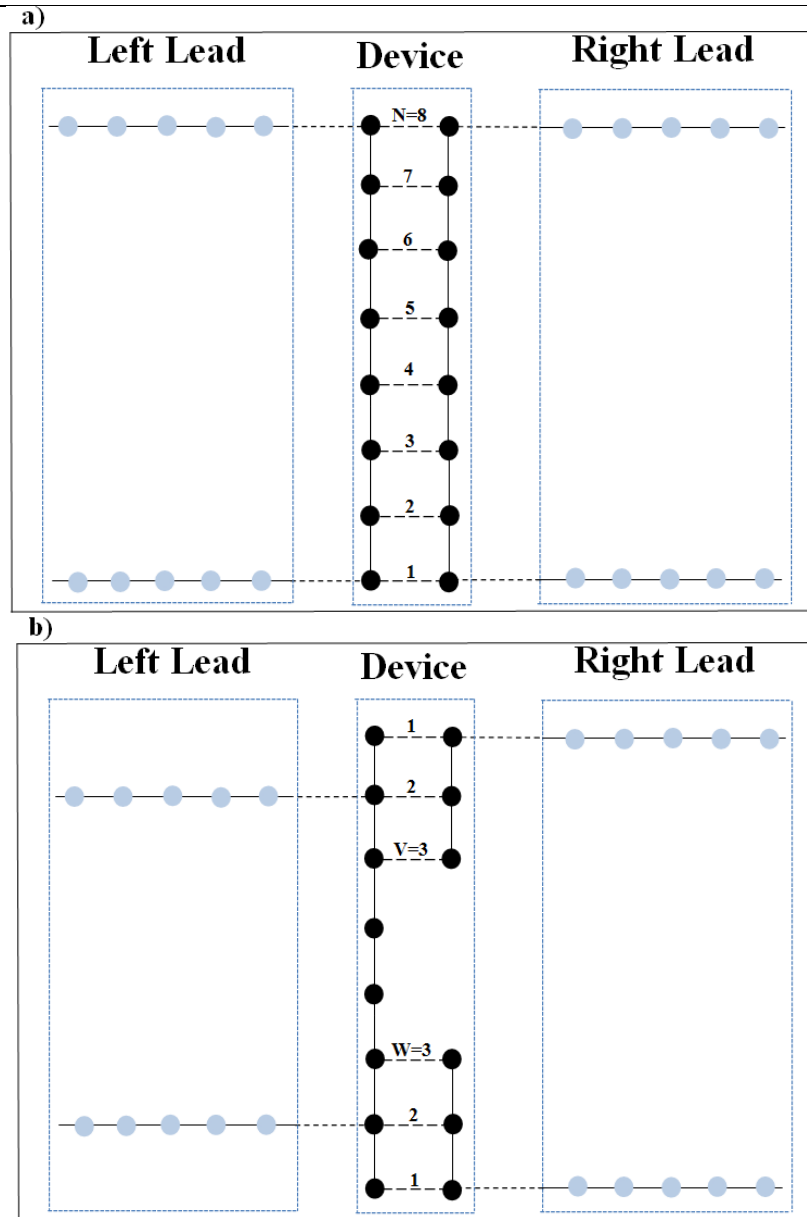
$t_{n,n+1}$ انرژی پرش بین جایگاه n و $n+1$ است. همچنین ε_n و $|n\rangle$ به ترتیب بیانگر انرژی و حالت الکترون در جایگاه n است.

مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۲-۲۶]. در این مقاله می‌خواهیم ترابرد کوانتومی را در یک سامانه کوانتومی متشکل از یک وسیله با ساختار شبکه مربعی متصل به الکترودهای فلزی را بررسی نمائیم. به عنوان نمونه، این مدل را می‌توان در سامانه‌های چندلایه مانند ابر شبکه‌ها و ترانزیستورهای اثر میدانی تونل‌زنی به کار برد.

در این کار با استفاده از مدل تنگابست و رهیافت تابع گرین به بررسی رسانش الکتریکی در سامانه خالص با اندازه‌های گوناگون می‌پردازیم. سپس اثر میدان مغناطیسی و بی‌نظمی بر رسانش سامانه را مطالعه می‌کنیم. در بخش دوم به توصیف سامانه‌ای با هامیلتونی تنگابست در تقریب نزدیکترین همسایه‌ها و ارایه فرمول‌بندی روش تابع گرین می‌پردازیم. در بخش سوم نتایج عددی مربوط به رسانش را مورد بحث و بررسی قرار می‌دهیم. در بخش آخر، با نتیجه‌گیری تحقیق خود را به پایان می‌رسانیم.

توصیف و فرمول‌بندی مدل

در این بخش، نخست مدل خود را معرفی نموده سپس روش محاسبات عددی مربوط به رسانش سامانه را توضیح خواهیم داد. شکل ۱ سامانه مورد نظر را در دو حالت خالص و نقص‌دار نشان می‌دهد. سامانه از یک شبکه اتمی مربعی که به الکترودهای چپ و راست متصل است، تشکیل شده است. در این شکل، N بیانگر



شکل ۱. سامانه کوانتومی مورد بررسی. الف) وسیله یک شبکه مربعی با N اتم در راستای پهنا است که به الکترودها متصل شده است. ب) وسیله با نقص ناشی از تهی جاها.

در پیمانه لاندائو $A = (-By, 0, 0)$ یک عامل فاز $e^{i\Phi_{ij}}$ در انرژی پرش و جفت‌شدگی افقی بین اتم‌ها ظاهر می‌شود یعنی

$$t_{n,n+1}(B) = t_{n,n+1}(B=0)e^{i\Phi_{ij}}$$

که می‌باشد [۲۷] و $\Phi_0 = \frac{\hbar}{e}$ شار مغناطیسی کوانتومی است.

در این رابطه $j=L, R, S, LS, RS$ بیانگر اندیس هر قسمت از هامیلتونی رابطه ۱ است. در این مقاله از برهم‌کنش الکترون-الکترون و الکترون-فونون صرف نظر می‌نمائیم و محاسبات خود را در رژیم جفت‌شدگی قوی انجام می‌دهیم. اگر یک میدان مغناطیسی یکنواخت عمود بر سطح وسیله اعمال کنیم

$$\tilde{T} = \tilde{t}_0 + t_0 \tilde{t}_1 + t_0 t_1 \tilde{t}_2 + \dots + t_0 t_1 t_2 \dots \tilde{t}_n, \quad ۸$$

t_i و \tilde{t}_i از روابط بازگشتی زیر به دست می آیند:

$$t_i = (I - t_{i-1} \tilde{t}_{i-1} - \tilde{t}_{i-1} t_{i-1})^{-1} t_{i-1}^2 \quad ۹$$

$$\tilde{t}_i = (I - t_{i-1} \tilde{t}_{i-1} - \tilde{t}_{i-1} t_{i-1})^{-1} \tilde{t}_{i-1}^2 \quad ۱۰$$

که

$$t_0 = [(E + i\eta)I - H_{\text{unit}}]^{-1} H_{\text{coupl}}^\dagger \quad ۱۱$$

$$\tilde{t}_0 = [(E + i\eta)I - H_{\text{unit}}]^{-1} H_{\text{coupl}} \quad ۱۲$$

این فرآیند تا زمانی که t_i و \tilde{t}_i از یک عدد دلخواه کوچکتر باشند، ادامه پیدا خواهد کرد [۲۹].

حال می توان با استفاده از ماتریس جفت شدگی الکتروند چپ (راست) به وسیله، خود-انرژی الکتروند چپ (راست) را به دست آورد.

$$\Sigma_L = H_{DL}^\dagger g_L H_{DL} \quad ۱۳$$

$$\Sigma_R = H_{DL} g_L H_{DL}^\dagger \quad ۱۴$$

اثر الکتروندهای نیم نامتناهی به وسیله خود-انرژی ها در محاسبات تابع گرین ظاهر می شود.

با استفاده از تابع گرین ضریب عبور الکترون را می توان محاسبه کرد [۱۹]:

$$T(E) = \text{Tr} \left(\Gamma_L G(E)^\dagger \Gamma_R G(E) \right) \quad ۱۵$$

$\Gamma_{L(R)}$ عملگر وابسته به خود-انرژی الکتروندهای چپ و راست است که حاوی تمام اطلاعات جفت شدگی بین وسیله و الکتروندها است.

$$\Gamma_{L(R)} = i \left[\Sigma_{L(R)}^\dagger - \Sigma_{L(R)} \right] \quad ۱۶$$

سلول واحد الکتروندها از دو اتم بدون برهم کنش با انرژی جایگاهی $\epsilon_{L(R)}$ تشکیل شده است که هامیلتونی آنرا به صورت زیر تعریف می نماییم:

$$H_{\text{unit}} = \begin{bmatrix} \epsilon_{L(R)} & 0 \\ 0 & \epsilon_{L(R)} \end{bmatrix} \quad ۳$$

همچنین تابع گرین مؤثر سامانه به صورت زیر قابل محاسبه است [۲۸]:

$$G(E) = ((E + i\eta)I - H_S - \Sigma_L - \Sigma_R)^{-1} \quad ۴$$

که در این رابطه، I ماتریس واحد و η یک عدد دلخواه بسیار کوچک است که برای همگرایی و وارون پذیری ماتریس گرین لازم است. اثر الکتروندها را به وسیله خود-انرژی الکتروند چپ (راست)، $\Sigma_{L(R)}$ وارد تابع گرین می نماییم. برای به دست آوردن تابع گرین سامانه باید خود-انرژی مربوط به الکتروندهای چپ و راست را به دست آوریم. برای این کار از روش سانچو استفاده می کنیم [۲۹]. این روش نسبت به روش های دیگر از سرعت همگرایی بالایی برخوردار است. در این روش تابع گرین سطحی الکتروندهای چپ و راست به صورت زیر محاسبه می شود:

$$g_L = [(E + i\eta)I - H_{\text{unit}} - H_{\text{coupl}}^\dagger \tilde{T}]^{-1} \quad ۵$$

$$g_R = [(E + i\eta)I - H_{\text{unit}} - H_{\text{coupl}} T]^{-1} \quad ۶$$

در اینجا H_{coupl} و H_{unit} به ترتیب هامیلتونی سلول واحد الکتروند و جفت شدگی بین دو سلول واحد در الکتروند است. T و \tilde{T} در یک فرآیند تکرار شونده به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$T = t_0 + \tilde{t}_0 t_1 + \tilde{t}_0 \tilde{t}_1 t_2 + \dots + \tilde{t}_0 \tilde{t}_1 \tilde{t}_2 \dots t_n, \quad ۷$$

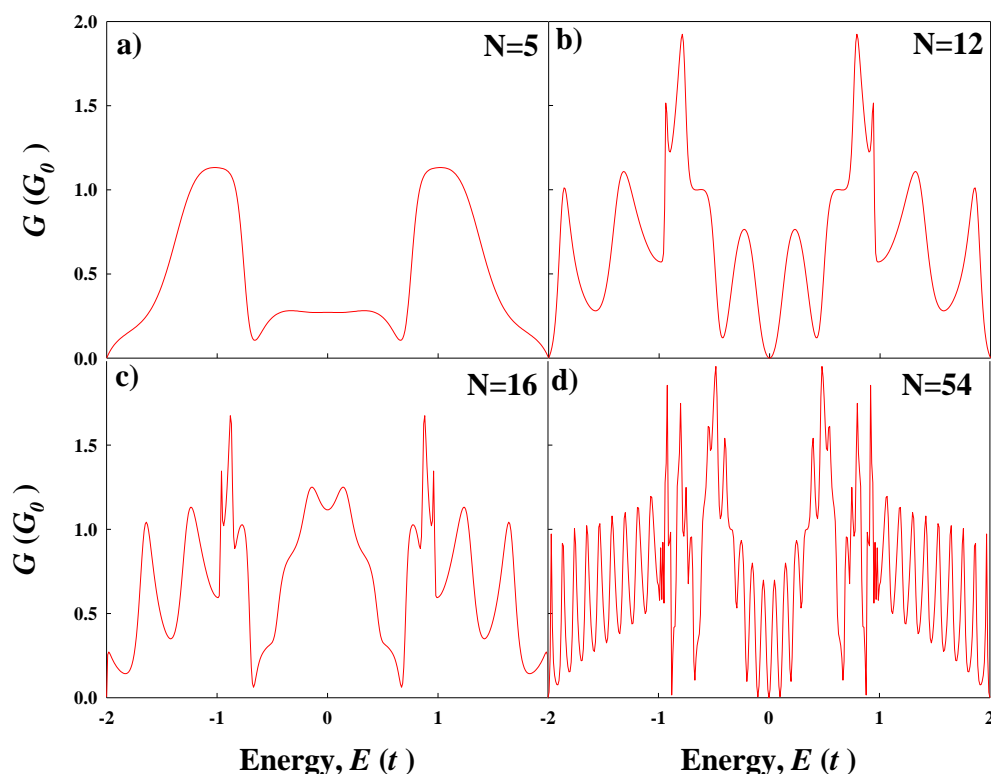
نخست اثر تغییر پهنای وسیله (طول در راستای قائم، N) بر رسانش سامانه را بررسی می‌نمائیم. نمودارهای شکل ۲الف تا ۲د رفتار رسانش برحسب انرژی الکترون ورودی را برای چهار پهنای مختلف وسیله (۵۴، ۱۶، ۱۲، ۵) نشان می‌دهند. با تغییر پهنای وسیله، رسانش سامانه تغییر می‌کند. در واقع با تغییر تعداد اتم‌ها، رسانش حول انرژی فرمی از صفر تا $2G_0$ تغییر می‌کند زیرا سامانه دارای دو کانال است و ضریب عبور حداکثر برابر دو می‌باشد. این رفتار با افزایش تعداد اتم‌ها به صورت نوسانی تکرار می‌شود. قله‌های تشدیدی در نمودار رسانش، در انرژی‌های تشدید رخ می‌دهد این انرژی‌ها همان ویژه‌مقایر مربوط به هامیلتونی وسیله است [۳۰]. در حالت‌هایی که N ضریبی از ۶ باشد سامانه تقریباً نیم‌فلز ($N=12, 54$) است زیرا در انرژی فرمی، یک شکاف انرژی صفر وجود دارد که بیانگر ویژگی نیم‌فلزی است. سامانه در حالت‌های دیگر ($N=5, 16$) یک فلز محسوب می‌شود زیرا در انرژی فرمی مقدار رسانش یک مقدار محدود دارد. با افزایش تعداد اتم‌ها در وسیله تعداد این قله‌های تشدید افزایش می‌یابد. وابسته به اندازه وسیله، مقدار و تعداد این قله‌ها تغییر می‌کند. به دلیل وجود تقارن در هندسه سامانه و در انرژی‌های جفت‌شدگی وسیله به الکترودها، نمودارهای رسانش در طیف انرژی منفی و مثبت از تقارن لازم برخوردار هستند.

همچنین رسانش الکتریکی سامانه به صورت زیر به دست می‌آید:

$$G = \frac{2e^2}{h} T \quad 17$$

بحث و بررسی نتایج عددی

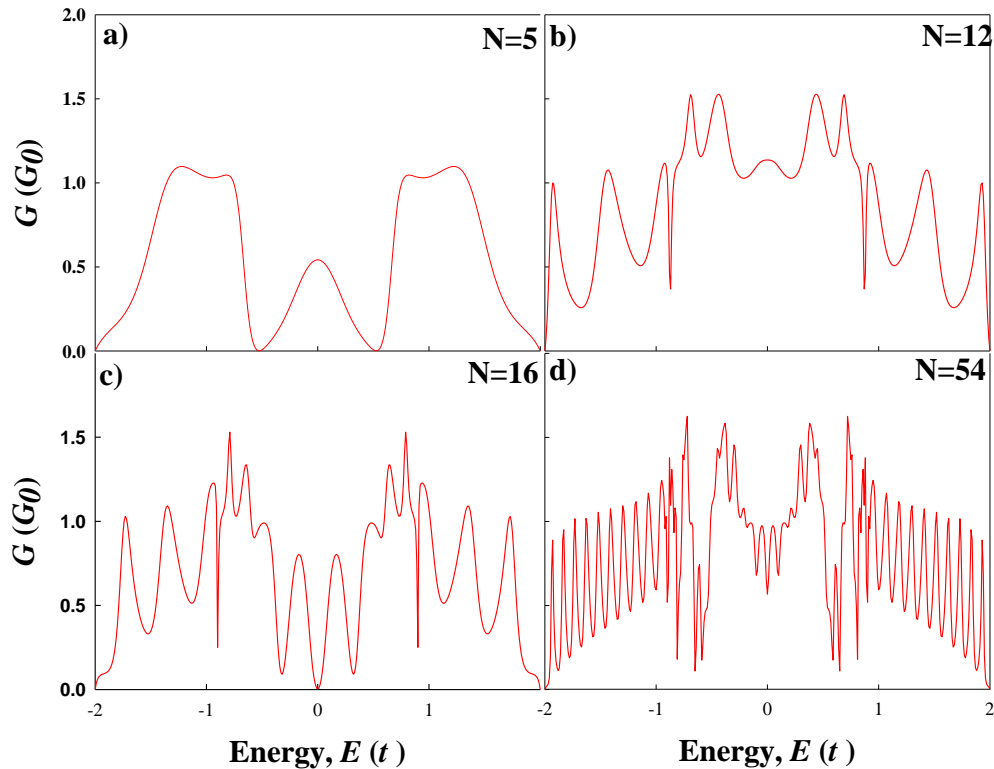
با استفاده از فرمول بندی بخش قبل، به بررسی رسانش الکترونی در سامانه مورد نظر می‌پردازیم. ابتدا مقادیر عددی پارامترهای به کار رفته در محاسبات عددی را معرفی می‌نمائیم. انرژی جایگاهی اتم‌های وسیله و الکترودها را برابر صفر فرض می‌کنیم. همچنین همه انرژی‌های پرش مربوط به نزدیکترین همسایه‌ها را در غیاب میدان مغناطیسی، برابر $t = -3 \text{ eV}$ در نظر می‌گیریم. در این مقاله از برهم‌کنش الکترون-الکترون و الکترون-فونون صرف نظر می‌نمائیم و محاسبات خود را در رژیم جفت‌شدگی قوی انجام می‌دهیم. در این رژیم، انرژی پرش بین وسیله کوانتومی و الکترودها را مقدار $t_{LS(SR)} = 0.75t$ انتخاب می‌نمائیم. در جفت‌شدگی کامل $t_{LS(SR)} = t$ است. اما در جفت‌شدگی ضعیف می‌توان $t_{LS(SR)} = 0.5t$ در نظر گرفت. انرژی فرمی سامانه را نیز برابر صفر در نظر می‌گیریم. در محاسبات خود، تمام انرژی‌ها را برحسب انرژی پرش الکترودها در نظر می‌گیریم. در تمام محاسبات، طول افقی وسیله را برابر $M=2$ فرض می‌نمائیم. وسیله را در دو حالت کامل و نقص‌دار در نظر می‌گیریم. ابتدا به بررسی ترابرد الکترون در سامانه کامل می‌پردازیم.



شکل ۲. نمودار رسانش الکترونی برحسب انرژی الکترون برای پهناهای مختلف وسیله و در غیاب میدان مغناطیسی.

رسانش کاهش یافته و گذار فاز فلز-نیم فلز رخ می دهد. این گذار فاز به دلیل اثر تداخل کوانتومی توابع موج عبوری از پیوندهای بین اتمی در وسیله است. در مرجع [۳۰] سامانه شبه یک بعدی است و اثر تداخل کوانتومی توابع موج عبوری از بازوی بالایی با پایینی یک حلقه سبب تقویت کامل (تداخل سازنده و در نتیجه افزایش رسانش) و تضعیف کامل (تداخل ویرانگر و در نتیجه کاهش رسانش به مقدار صفر) می شود اما در این سامانه که دوبعدی است، کانالهای متفاوتی برای عبور الکترون وجود دارد و به همین علت در برخی حالتها حضور میدان مغناطیسی سبب کاهش رسانش و در بعضی موارد سبب افزایش آن می شود.

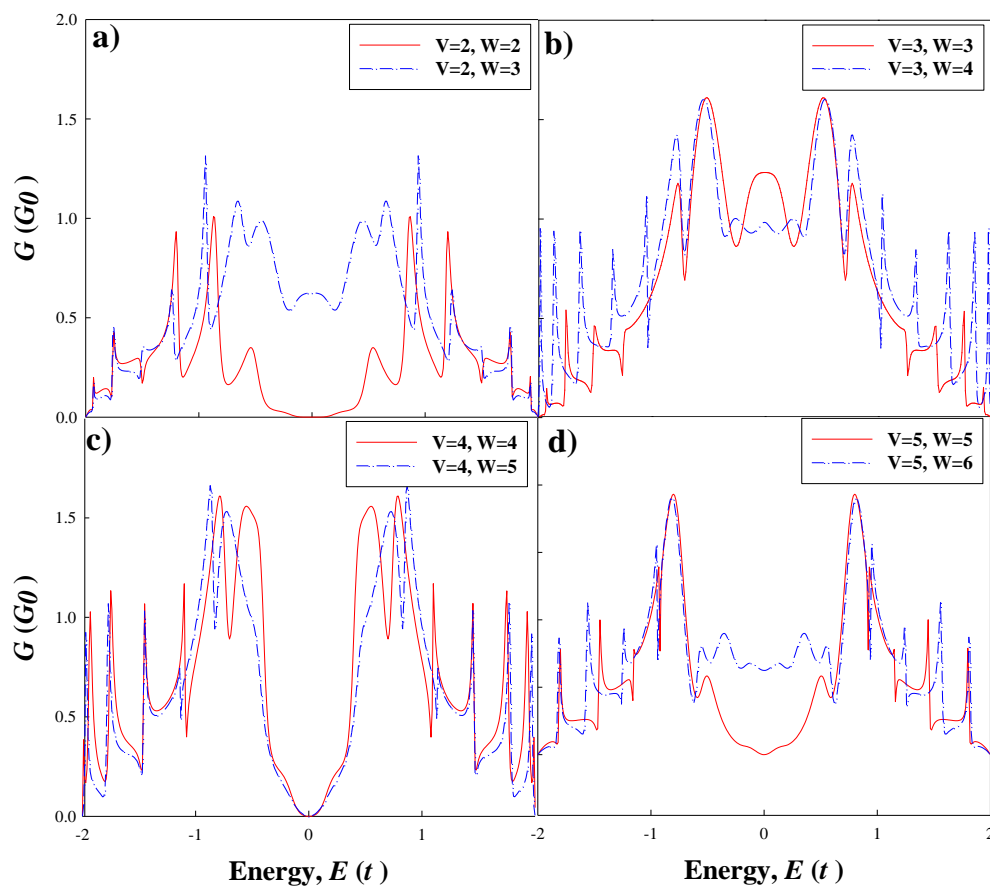
حال یک میدان مغناطیسی یکنواخت عمود بر سطح وسیله کوانتومی اعمال می کنیم. اعمال میدان سبب تغییر انرژی پرش بین اتمهای وسیله می شود. شکل ۳ رسانش سامانه را برحسب انرژی الکترون برای اندازههای متفاوت وسیله، N ، و در حضور شار مغناطیسی نشان می دهد. نمودارها نشان می دهند که رسانش الکتریکی سامانه به اندازه وسیله و شار مغناطیسی فرودی بستگی دارد. در سامانه ای با اندازه وسیله $N=12$ شاهد خواص نیم فلزی بودیم اما با اعمال میدان مغناطیسی رسانش افزایش یافته و گذار فاز نیم فلز- فلز رخ می دهد. اما در سامانه با پهنا $N=16$ در غیاب میدان شاهد خواص فلزی بودیم که با اعمال میدان مغناطیسی



شکل ۳. نمودار رسانش الکترونی برحسب انرژی الکترون برای وسیله‌ای با پهناهای مختلف و در حضور شارمغناطیسی ۰.۵.

فرمی بالاتر از صفر است یعنی سامانه یک فلز می‌باشد. شکل ۴ ب سامانه‌هایی با $V=3$ و $W=3/4$ را نشان می‌دهد. در هر دو حالت $W=3, V=3$ و $W=4, V=3$ خواص فلزی مشاهده می‌شود. از مقایسه حالت $V=W=4$ با $V=W=5$ نتیجه می‌گیریم که سامانه‌های با $V=W$ زوج، نیم‌رسانا هستند اما سامانه‌های با $V=W$ فرد فلز می‌باشند. همچنین در این حالت با افزایش بی‌نظمی (تعداد تهی‌جاها) مقدار شکاف انرژی کاهش می‌یابد. در حالت‌هایی که $V \neq W$ باشد سامانه فلز است. در واقع با تغییر تعداد تهی‌جاها یک گذار فاز نیم‌رسانا فلز رخ می‌دهد.

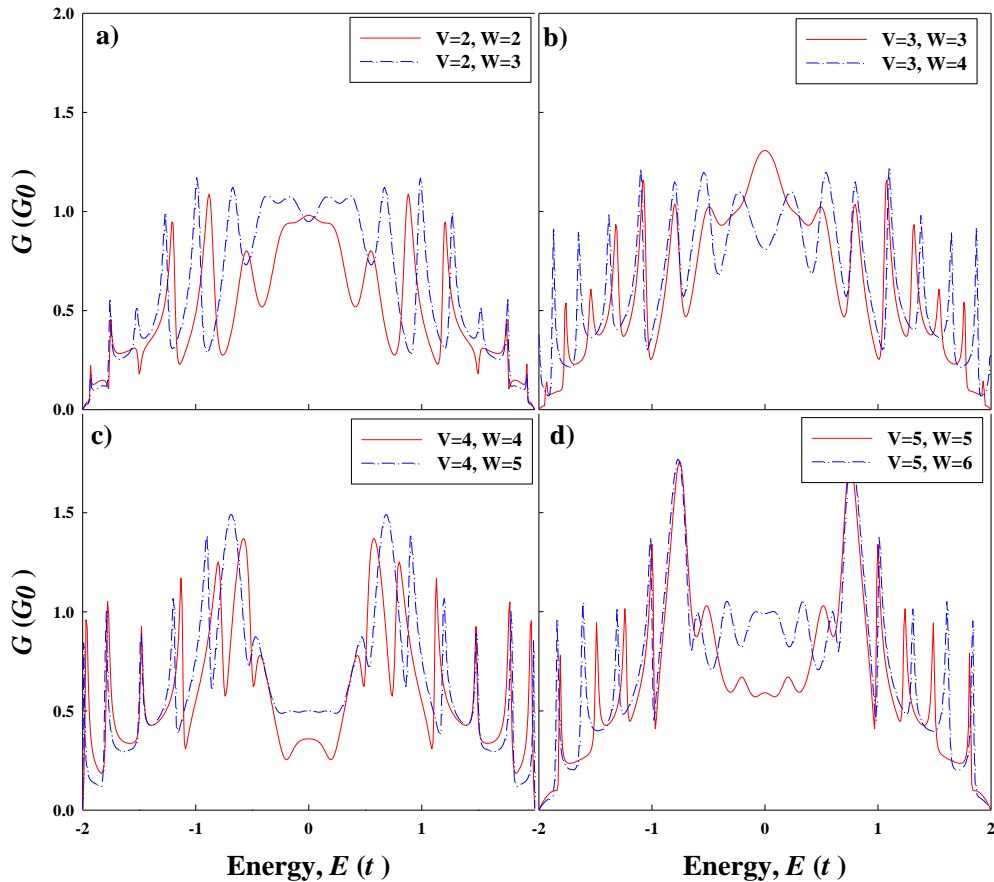
در ادامه رسانش را برای سامانه نقص‌دار بررسی می‌کنیم. برای اینکه یک تهی‌جا در وسیله داشته باشیم باید پیوند آن‌را با اتم‌های همسایه قطع نماییم این کار را با صفر نمودن مقدار انرژی پرش و یا بی‌نهایت در نظر گرفتن مقدار انرژی جایگاهی انجام می‌دهیم. در اینجا مقدار انرژی جایگاهی اتم‌های حذف شده را بی‌نهایت در نظر می‌گیریم. در شکل ۴ رسانش الکترونی برای سامانه‌هایی با V و W متفاوت و $N=16$ نشان داده شده است. شکل ۴ الف، سامانه‌هایی با $V=2$ و $W=2/3$ را نشان می‌دهد. در سامانه‌ای با $V=W=2$ رفتار نیم‌رسانایی با شکاف انرژی $0.5eV$ مشاهده می‌شود. اما در سامانه‌ای با $V=2$ و $W=3$ ، رسانش حول انرژی



شکل ۴. رسانش برحسب انرژی الکترون در سامانه نقص دار با پهنای $N=16$ اتم و V و W متفاوت و شار عبوری صفر.

در شکل ۵ نتایج مربوط به اثر میدان مغناطیسی بر رسانش الکتریکی در سامانه نقص دار را نشان داده ایم. مقادیر همه پارامترهای استفاده شده در اینجا با پارامترهای نمودارهای شکل ۴ یکسان است. در شکل ۵ الف رفتار سامانه در حضور شار مغناطیسی ۰٫۵ و با $V=2$ و $W=3$ نشان داده شده است. در حضور میدان مغناطیسی، رسانش الکتریکی در همه انرژی‌ها افزایش می‌یابد. علت این افزایش برهم‌نهی سازنده دو سامانه‌ای با $V=W$ زوج، یک گذار فاز نیم‌رسانا-فلز رخ می‌دهد.

موج عبوری از پیوند شماره ۱ و ۲ وسیله است. در شکل ۵ ب، رفتار سامانه در حضور میدان با $V=3$ و $W=4$ نشان داده شده است. مطابق این شکل، رسانش الکتریکی سامانه در همه انرژی‌های مجاز بالاتر از صفر است و این بیانگر یک سامانه فلزی است. به طور کلی می‌توان گفت در اثر اعمال شار مغناطیسی ۰٫۵ به سامانه‌ای با $V=W$ زوج، یک گذار فاز نیم‌رسانا-فلز رخ می‌دهد.



شکل ۵. رسانش برحسب انرژی الکترون در سامانه نقص‌دار با پهنای $N=16$ اتم و V و W متفاوت و شار عبوری ۰.۵.

نتیجه‌گیری

با استفاده از مدل تنگابست و رهیافت تابع گرین، رسانش الکترونی را در یک سامانه کوانتومی با شبکه مربعی بررسی نمودیم. با افزایش پهنای سامانه، رسانش الکتریکی حول انرژی فرمی به صورت نوسانی (از صفر تا $2G_0$) تغییر می‌کند. علت این امر، وجود دو کانال عبور الکترونی می‌باشد. نتایج عددی نشان می‌دهند که با اعمال شار مغناطیسی یک گذار فاز نیم‌فلز-فلز و فلز-نیم‌فلز (باتوجه به پهنای وسیله) در سامانه مشاهده می‌شود. علاوه بر این، معرفی ساختار نقص‌دار، به صورت تهی‌جاها، سبب کاهش رسانش سامانه می‌شود. وابسته به تعداد تهی‌جاها در وسیله، سامانه یک نیم‌رسانا و یا یک فلز خواهد بود. همچنین در اثر اعمال

میدان مغناطیسی به این سامانه نقص‌دار در حالت $V=W$ زوج، یک گذار فاز نیم‌رسانا-فلز مشاهده می‌شود. این گذار فاز به دلیل تداخل کوانتومی توابع موج عبوری از سامانه می‌باشد. به طور کلی با تغییر پارامترهایی مانند پهنای وسیله، مقدار شار فرودی و ایجاد نقص در وسیله، می‌توان خواص الکتریکی سامانه را کنترل نمود. نتایج این تحقیق می‌تواند در طراحی ادوات نانو الکترونیک کاربردهای زیادی داشته باشد. به عنوان نمونه، مدل معرفی شده در این مقاله در سامانه‌های چندلایه مانند ابر شبکه‌ها و ترانزیستورهای اثر میدانی تونل‌زنی می‌تواند کاربرد داشته باشد.

- [13] Y.W. Kwon, C.H. Lee, D.H. Choi, J. Jin, Materials science of DNA, *Journal of Materials Chemistry* 19 (2009) 1353-1380.
- [14] N. Kobayashi, M. Brandbyge, M. Tsukada, First-principles study of electron transport through monatomic Al and Na wires, *Physical Review B* 62 (2000) 8430-8437.
- [15] X. Qian, J. Li, S. Yip, Calculating Phase Coherent Quantum Transport in Nanoelectronics with ab initio Quasiatomic Orbital Basis Set, *Physical Review B* 82 (2010) 195442-195460.
- [16] T. Ando, Quantum point contacts in magnetic fields, *Physical Review B* 44 (1991) 8017-8027.
- [17] P. Harrison, Quantum wells, Wires and Dots, John Wiley, New York, (2000).
- [18] D.S. Fisher, P.A. Lee, Relation between conductivity and transmission matrix, *Physical Review B* 23 (1981) 6851-6854.
- [19] S. Datta, Electronic Transport in Mesoscopic Systems, Cambridge University Press, (1997).
- [20] S. Datta, Nanoscale device modeling: the Green's function method, *Superlattices and Microstructures* 28 (2000) 253-278.
- [21] Z.G. Yu, D.L. Smith, A. Saxena, A.R. Bishop, Electronic transmission in conjugated-oligomer tunnel structures: effects of lattice fluctuations, *Journal of Physics: Condensed Matter* 10 (1998) 617-638.
- [22] S. Saha, R. Mandal, S. Barman, D. Kumar, B. Rana, Y. Fukuma, S. Sugimoto, Y.C. Otani, A. Barman, Tunable Magnonic Spectra in Two-Dimensional Magnonic Crystals with Variable Lattice Symmetry, *Advanced Functional Materials* 23 (2013) 2378-2386.
- [23] J. Li, Z.Y. Li, D.Z. Zhang, Nonlinear frequency conversion in two-dimensional nonlinear photonic crystals solved by a plane-wave-based transfer-matrix method, *Physical Review B* 77 (2008) 195127-195132.
- [24] C. Tournier-Colletta, L. Moreschini, G. Audebert, S. Moser, A. Crepaldi, H. Berger, A.L. Walter, K.S. Kim, A. Bostwick, P. Monceau, E. Rotenberg, O.V. Yazyev, M. Grioni, Electronic Instability in a Zero-Gap Semiconductor: The
- مراجع
- [1] D.K. Ferry, S.M. Goodnick, Transport in Nanostructures, Cambridge University Press, (1997).
- [2] N.D. Lang, Ph. Avouris, Oscillatory conductance of Carbon-Atom Wires, *Physical Review Letters* 81 (1998) 3515-3518.
- [3] D. Vasileska, S.M. Goodnick, Nano-Electronic Devices, Springer (2011).
- [4] J.S. Wang, J. Wang, J.T. Lu, Quantum thermal transport in nanostructures, *The European Physical Journal B* 62 (2008) 381-404.
- [5] Y. Wada, M. Tsukada, M. Fujihira, K. Matsushige, T. Ogawa, M. Haga, S. Tanaka, Prospects and Problems of Single Molecule Information Devices, *Japanese Journal of Applied Physics* 39 (2000) 3835-3849.
- [6] C.C. Wan, J.L. Mozos, G. Taraschi, J. Wang, H. Guo, Quantum transport through atomic wires, *Applied Physics Letters* 71 (1997) 419-421.
- [7] M.P. Anantram, M.S. Lundstrom, D.E. Nikonov, Modelling of nanoscale devices, *Proceedings of the IEEE* 96 (2008) 1511-1550.
- [8] M. Mardaani, K. Esfarjani, Analytical results on ballistic transport in a periodic molecular wire, *Chemical Physics* 317 (2005) 43-48.
- [9] M. Mardaani, K. Esfarjani, Some analytical results in phase coherent transport in quantum wire, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* 25 (2004) 119-130.
- [10] G.P. Zhang, X.W. Fang, Y.X. Yao, C.Z. Wang, Z.J. Ding, K.M. Ho, Electronic structure and transport of a carbon chain between graphene nanoribbon leads, *Journal of Physics: Condensed Matter* 23 (2011) 025302-025306.
- [11] S.R. Forrest, The path to ubiquitous and low-cost organic electronic appliances on plastic, *Nature* 428 (2004) 911-918.
- [12] S. Malakooti, E.R. Hedin, Y.D. Kim, Y.S. Joe, Enhancement of charge transport in DNA molecules induced by the next nearest-neighbor effects, *Journal of Applied Physics* 112 (2012) 094703-094709.

- [29] M.P.L. Sancho, J.M.L. Sancho, J. Rubio, highly convergent schemes for the calculation of bulk and surface Green functions, *Journal of Physics F* 15 (1985), 851-858.; F. Khoeini, A. A. Shokri, F. Khoeini, Electronic transport through superlattice-graphene nanoribbons, *The European Physical Journal B* 75 (2010) 505–509.
- [30] Farzad Khoeini, Farhad Khoeini, Analytical and numerical study of quantum transport in an array of nanorings: A case study with double rings, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* 47 (2013) 297-302.
- Charge-Density Wave in $(\text{TaSe}_4)_2\text{I}$, *Physical Review Letters* 110 (2013) 236401-236406.
- [25] D. Girardi, N.S. Branco, Influence of aperiodic modulations on first-order transitions: Numerical study of the two-dimensional Potts model, *Physical Review E* 83 (2011) 061127-061136.
- [26] V.O. Cheranovskii, O. Esenturk, H.O. Pamuk, Magnetic properties of multiband $U=\infty$ Hubbard model on anisotropic triangular and rectangular lattice strips, *Physical Review B* 58 (1998) 12260-12266.
- [27] H. Hatami, N. Abedpour, A. Qaiumzadeh, R. Asgari, Conductance of bilayer graphene in the presence of a magnetic field: Effects of disorder, *Physical Review B* 83 (2011) 125433-125440.
- [28] S. Datta, *Quantum Transport: Atom to Transistor*, Cambridge University Press, (2005).