

mohammad-m@sci.sku.ac.ir :

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۶/۱۵ ؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۲/۲۵)

( )

( )

( )

:

اغلب مواقع برای مطالعه خواص تراپردی نانو ساختارهای کوانتومی، رسانش با تقریب لاندائور محاسبه می‌شود. تقریب لاندائور برای یک سامانه تک کاناله و در رژیم پاسخ خطی، رسانش الکتریکی وابسته به اسپین را توسط ضریب  $e^2/h$  به ضریب عبور در دمای صفر مربوط می‌سازد. نانو سیم‌های مغناطیسی معمولاً از طرفی به عنوان قطعات الکتریکی بر پایه اسپین الکترون در نظر گرفته می‌شود و از طرف دیگر پراکندگی وارونی اسپین نیز در آنها رخ می‌دهد. بنابراین کنترل جریان وابسته به اسپین در ادوات اسپینترونیک بسیار مهم است [۴-۶]. تا کنون مطالعاتی روی رسانش وابسته به اسپین در انواع سامانه‌های نانو از قبیل سامانه‌های غیرمغناطیسی متصل به هادی‌های مغناطیسی [۷-۱۰] و سامانه‌های مغناطیسی متصل به هادی‌های غیرمغناطیسی [۵-۱۲] صورت گرفته است. به

در عصر دانش و فن‌آوری نانو، تراپرد وابسته به اسپین شاخه جدیدی در فیزیک ماده چگال نظری و تجربی ایجاد کرده است که اسپینترونیک نام دارد. کلمه اسپینترونیک (تراپرد الکترونی وابسته به اسپین) در سال ۱۹۹۴ طی ظهور یک قطعه الکترونیکی جدید که بر اساس نقش اسپین حامل‌ها به جای بار آنها یا همراه با بار آنها ساخته شده بود، به وجود آمد. بهبود فن‌آوری تولید و ساخت نانو ساختارهای چندگانه ما را قادر می‌سازد تا تراپرد وابسته به اسپین در سامانه‌های با بعد کم مانند سیم کوانتومی، نقطه کوانتومی و آرایش نقطه‌های کوانتومی را در یک محیط کاملاً قابل کنترل بررسی کنیم [۱-۳].

ویژگی‌های تراپردی این ساختارها می‌تواند با اتصال آنها با هادی‌ها و عبور جریان از میان مجموعه اندازه‌گیری شود. در

همچنین  $c_i^\dagger$  و  $c_i$  عملگرهای خلق و فنا  $i$  امین اتم نانو سیم،  $\varepsilon_i$  انرژی جایگاهی اتم  $i$  ام و  $\beta$  انرژی پرش بین اتم‌های مجاور هستند.  $\vec{h}_i \cdot \vec{\sigma}$  عملگر برهم‌کنش الکترون با اتم مغناطیسی جایگاه  $i$  ام است. بردار پارامتر وارونگی اسپینی و  $\vec{\sigma}$  بیانگر بردار ماتریسی با مؤلفه‌های ماتریس‌های پاؤلی است.

شکل ماتریسی  $\vec{h}_i \cdot \vec{\sigma}$  به صورت زیر است

$$\vec{h}_i \cdot \vec{\sigma} = h_i \begin{pmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i e^{-i\phi_i} \\ \sin \theta_i e^{i\phi_i} & -\cos \theta_i \end{pmatrix}, \quad (4)$$

که در آن  $h_i$ ،  $\theta_i$  و  $\phi_i$  به ترتیب اندازه، زاویه قطبی و زاویه سمتی مربوط به بردار گشتاور مغناطیسی اتم  $i$  ام است.

هامیلتونی هادی چپ (راست) نیز به صورت زیر است

$$H_{L(R)} = \sum_i (\hat{\varepsilon}_{\circ L(R)} - \vec{h}_i \cdot \vec{\sigma}) \hat{c}_i^\dagger \hat{c}_i + \hat{\beta}_{L(R)} \sum_i \hat{c}_{i+1}^\dagger \hat{c}_i + h.c., \quad (5)$$

که در آن  $\hat{\varepsilon}_{\circ L(R)}$  و  $\hat{\beta}_{L(R)}$  به ترتیب عملگرهای مربوط به انرژی‌های جایگاهی و پرش در هادی چپ (راست) و  $h$  پارامتر وارونگی اسپینی در هادی‌ها است. همچنین هامیلتونی اتصال نانو سیم مرکزی به هادی چپ (راست) به صورت زیر بیان می‌شود [۱۴]

$$H_{L(R)W} = \hat{\beta}_{L(R)W} c_{\circ(n+1)}^\dagger c_{\backslash(n)} + h.c., \quad (6)$$

که در آن  $\hat{\beta}_{L(R)W}$  ماتریس پرش اتصال بین سیم مرکزی و هادی چپ (راست) است.

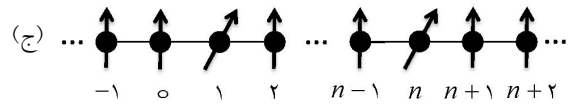
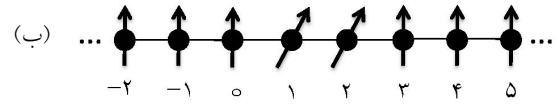
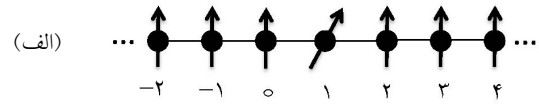
تابع گرین نانوسیم متصل به دو نیم سیم به صورت زیر خواهد بود [۱۵]

$$G_W = [\varepsilon I - H_W - \Sigma_L - \Sigma_R]^{-1}, \quad (7)$$

که در آن  $I$  ماتریس واحد و  $\Sigma_{L(R)}$  خود انرژی نانوسیم مغناطیسی به علت وجود هادی مغناطیسی چپ (راست) است و به شکل زیر بیان می‌شود

$$\Sigma_{L(R)} = \begin{pmatrix} \Sigma_{L(R)}^\uparrow & \circ \\ \circ & \Sigma_{L(R)}^\downarrow \end{pmatrix}, \quad (8)$$

که در آن  $\Sigma_{L(R)}^{\uparrow(\downarrow)} = \beta \exp(i\theta_{L(R)}^{\uparrow(\downarrow)})$  و برای هادی‌های فرومغناطیسی در تقریب نزدیکترین همسایه داریم:  $\cos \theta_{L(R)}^{\uparrow(\downarrow)} = (\varepsilon - \varepsilon_{\circ L(R)} + (-)h) / (\sqrt{\beta} \beta_{L(R)})$  میدان مغناطیسی فقط با اسپین الکترون عبوری برهم‌کنش



شکل ۱. طرح‌واره یک زنجیره فرو مغناطیس نامتناهی در حضور: (الف) یک نقص، (ب) دو نقص متوالی، (ج) دو نقص با فاصله ۵ اتم.

طور مثال نشان داده شده است که رسانش الکتریکی یک نانو سیم مغناطیسی متصل به هادی‌های غیرمغناطیسی قویاً به آرایش گشتاورهای مغناطیسی در یکایاخته نانو سیم وابسته است [۱۲]. در این تحقیق به بررسی رسانش وابسته به اسپین در یک نانو سیم فرو مغناطیس در حضور یک یا دو نقص می‌پردازیم و اثر چرخش گشتاور اسپینی آنها را بر رسانش سامانه مورد توجه قرار می‌دهیم.

یک سیم فرومغناطیس نامتناهی شامل یک یا دو نقص را می‌توان به صورت یک نانو سیم فرو مغناطیس متناهی متصل به دو نیم سیم فرومغناطیس چپ و راست به صورت شکل ۱ در نظر گرفت. هامیلتونی این سامانه به صورت زیر توصیف می‌شود

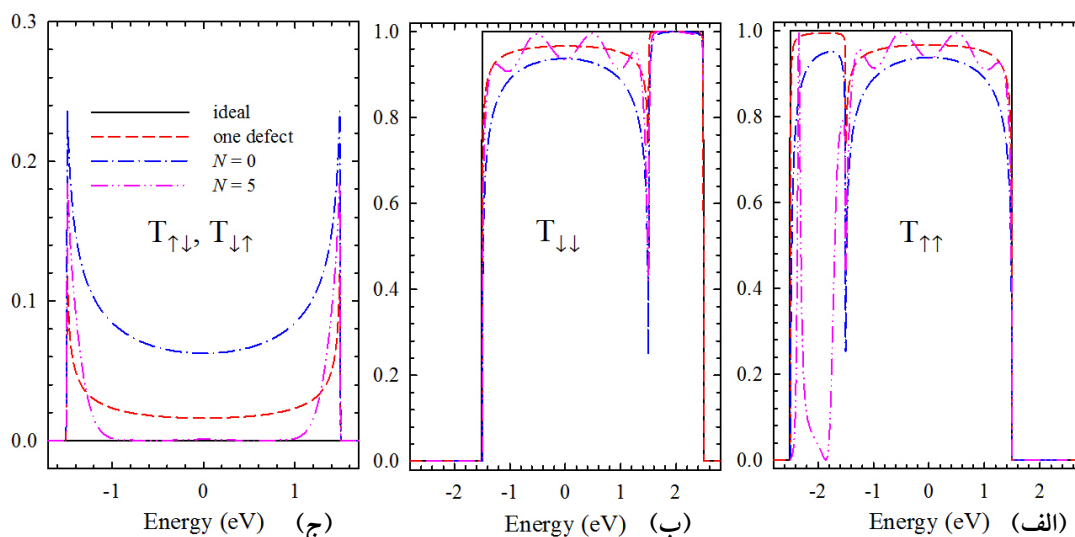
$$H = H_L + H_{LW} + H_W + H_{RW} + H_R, \quad (1)$$

که در آن  $H_L$ ،  $H_{LW}$ ،  $H_W$ ،  $H_{RW}$  و  $H_R$  به ترتیب هامیلتونی هادی چپ، اتصال نانوسیم به هادی چپ، نانوسیم، اتصال نانوسیم به هادی راست و هادی راست هستند. هامیلتونی نانو سیم مرکزی به صورت زیر است [۱۳]

$$H_W = \sum_i^n (\hat{\varepsilon}_i - \vec{h}_i \cdot \vec{\sigma}) \hat{c}_i^\dagger \hat{c}_i + \hat{\beta}_W \sum_i (\hat{c}_{i+1}^\dagger \hat{c}_i + h.c.), \quad (2)$$

که در آن  $n$  تعداد اتم‌های سامانه مرکزی است و

$$\hat{\varepsilon}_i = \begin{pmatrix} \varepsilon_i & \circ \\ \circ & \varepsilon_i \end{pmatrix}; \quad \hat{\beta}_W = \begin{pmatrix} \beta & \circ \\ \circ & \beta \end{pmatrix}; \quad \hat{c}_i^\dagger = (c_{i\uparrow}^\dagger, c_{i\downarrow}^\dagger), \quad (3)$$



شکل ۲. نمودار ضریب عبور بر حسب انرژی (الف)  $T_{\uparrow\uparrow}$ ، (ب)  $T_{\downarrow\downarrow}$  و (ج)  $T_{\uparrow\downarrow}$  که بر  $T_{\downarrow\uparrow}$  منطبق است. در اینجا تمام انرژی‌های جایگاهی و پرش در سامانه به ترتیب برابر با صفر و ۱eV در نظر گرفته شده است. همچنین  $h = 0.5\text{eV}$  و  $\theta = \pi/6$  انتخاب شده‌اند.

یک و دو نقص در شکل ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که بازه مجاز انرژی  $T_{\uparrow\uparrow}$ ، همان بازه انرژی سیم غیرمغناطیسی منهای مقدار  $h$  یعنی  $[-2.5\text{eV}, 1.5\text{eV}]$ ، بازه مجاز انرژی  $T_{\downarrow\downarrow}$ ، همان بازه انرژی سیم غیرمغناطیسی به علاوه مقدار  $h$  یعنی  $[-1.5\text{eV}, 2.5\text{eV}]$  است. در واقع ناحیه مجاز انرژی نسبت به حالت غیرمغناطیسی با مقدار ثابت به اندازه  $h$  جابه‌جا می‌شود. بنابراین ناحیه مشترک دو بازه مجاز انرژی،  $[-1.5\text{eV}, 1.5\text{eV}]$  می‌شود که در این ناحیه مشترک مقدار  $T_{\uparrow\downarrow}$  و  $T_{\downarrow\uparrow}$  غیر صفر است. همان طور که در نمودار شکل ۲ دیده می‌شود در نقاط مرزی ناحیه انرژی مشترک که مستقل از وجود یا عدم وجود نقص است، در نمودارهای  $T_{\uparrow\uparrow}$  و  $T_{\downarrow\downarrow}$  دره‌های ضد تشدید و در نمودارهای  $T_{\uparrow\downarrow}$  و  $T_{\downarrow\uparrow}$  قله‌های تشدید رخ می‌دهد. می‌توان گفت برای الکترونی با این دو مقدار انرژی احتمال وارونی اسپین بیشتر است. اندازه محدوده یاد شده به مقدار  $h$  بستگی دارد و با افزایش  $h$  محدوده کوچکتر می‌شود.

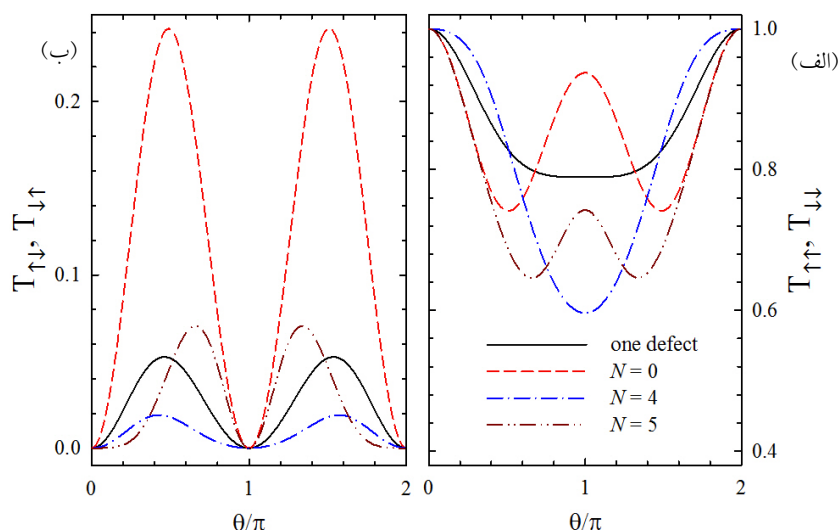
برای سیم بدون نقص، مانند تمام ساختارهای ایده‌ال، رسانش شکل پله‌ای دارد. چنانچه در نمودار شکل ۲ (الف) و (ب) دیده می‌شود با ایجاد نقص در ساختار سیم مغناطیسی ایده‌ال ضریب عبور از حالت پله‌ای خارج شده و مقادیر  $T_{\uparrow\uparrow}$

می‌کند ضریب عبور الکترونی از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$T_{SS'}(\varepsilon) = 4 \text{Im} \sum_L^S \text{Im} \sum_R^{S'} |G_{i,j}|^2, \quad (9)$$

که در آن  $G_{i,j}$  درایه سطر  $i$ ام و ستون  $j$ ام ماتریس تابع گرین است و  $s$  و  $s'$  به ترتیب بیانگر اسپین الکترون وارد و خارج شده از نانو سیم هستند. بنابراین برای حالتی که تعداد اتم‌های نانو سیم مرکزی برابر  $n$  است، چهار نوع رسانش الکتریکی  $T_{\uparrow\uparrow}$ ،  $T_{\downarrow\downarrow}$ ،  $T_{\uparrow\downarrow}$  و  $T_{\downarrow\uparrow}$  وجود دارد، که به ترتیب توسط چهار عنصر  $G_{\uparrow,2n}$ ،  $G_{\downarrow,2n-1}$ ،  $G_{\uparrow,2n}$ ،  $G_{\downarrow,2n-1}$  مشخص می‌شوند. لازم به ذکر است که در این مقاله  $N = n - 2$  نمایانگر فاصله (یا همان تعداد اتم‌های) بین دو نقص است.

در این قسمت ابتدا ضریب عبور الکترونی یک سیم فرومغناطیس ایده‌ال را به دست آورده، سپس به ترتیب با ایجاد یک نقص، دو نقص متوالی و دو نقص با فاصله چند اتم، به بررسی ضریب عبور سامانه می‌پردازیم. برای این منظور در کل سامانه همه انرژی‌های جایگاهی اتم‌ها را برابر با صفر، انرژی‌های پرش بین اتم‌ها را ۱eV و پارامتر وارونگی اسپینی را  $h_i = h = 0.5\text{eV}$  انتخاب می‌کنیم. نمودار ضریب عبور الکترونی بر حسب انرژی برای سیم فرومغناطیس شامل



شکل ۳. نمودار ضریب عبور الکترونی بر حسب زاویه گشتاور مغناطیسی نقص در انرژی صفر، (الف)  $T_{\uparrow\uparrow}$  که بر  $T_{\downarrow\downarrow}$  منطبق است. (ب)  $T_{\downarrow\downarrow}$  که بر  $T_{\uparrow\uparrow}$  منطبق است. در اینجا تمام انرژی‌های جایگاهی و پرش در سامانه به ترتیب برابر با صفر و ۱eV در نظر گرفته شده است. همچنین  $h = 0.5eV$  انتخاب شده است.

افزایش یافته و با ایجاد فاصله بین نقص‌ها تغییرات دامنه نوسان بیشتر می‌شود. در طیف ضریب عبورهای  $T_{\uparrow\downarrow}$  با  $T_{\downarrow\uparrow}$  افزایش تعداد نقص‌ها به دو، مکان نقاط کمینه و بیشینه و تعداد نوسانات ثابت بوده، ولی دامنه نوسانات ضریب عبور افزایش یافته است. بنابراین می‌توان گفت در مورد وجود دو نقص وابستگی ضریب عبور به مقدار زاویه گشتاور مغناطیسی نقص‌ها قوی‌تر است.

در ادامه به بررسی تأثیر تغییر فاصله بین دو نقص روی ضریب عبور می‌پردازیم. در شکل ۴ نمودار  $T_{\uparrow\uparrow}$  برای یک سیم مغناطیسی شامل دو نقص با فاصله‌های متفاوت ۵، ۱۰ و ۲۰ اتم رسم شده است. مشاهده می‌شود با افزایش فاصله بین دو نقص، نوسان‌های نمودار ضریب عبور افزایش می‌یابد. این نتیجه برای تمام سامانه‌های مزوسکوپی که شامل یک سامانه مرکزی متصل به دو هادی هستند، صادق است [۱۶]. به عبارت دیگر با افزایش تعداد اتم‌های سامانه مرکزی، تعداد شبه انرژی‌های آن متناسب با تعداد اتم‌ها افزایش یافته که منجر به افزایش تعداد قله‌های تشدیدی در منحنی ضریب عبور می‌شود.

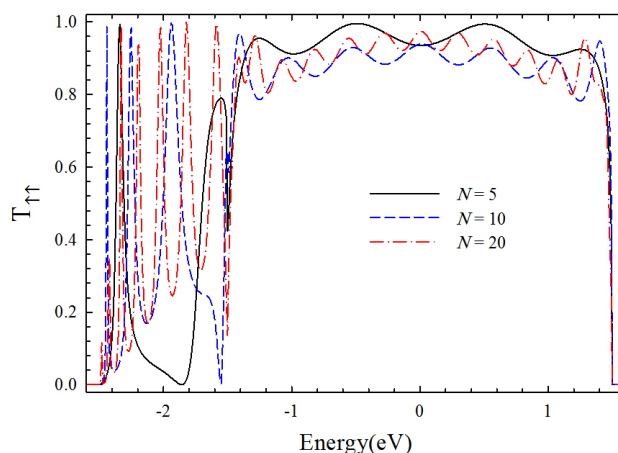
لازم به ذکر است که بسته به نوع سامانه مرکزی امکان بروز تداخل‌های سازنده و ویرانگر در طیف رسانش وجود دارد. این

$T_{\downarrow\downarrow}$  نسبت به ضریب عبور سیم ایده‌آل کمتر است و با افزایش تعداد نقص‌ها این کاهش ادامه پیدا می‌کند. با ایجاد فاصله بین نقص‌ها در طیف ضریب عبور نوساناتی ایجاد می‌شود. همچنین در نمودار شکل ۲ (ج) می‌بینیم که با ایجاد یک نقص و دو نقص متوالی، مقادیر  $T_{\uparrow\downarrow}$  و  $T_{\downarrow\uparrow}$  افزایش کمی پیدا می‌کنند ولی با ایجاد فاصله بین نقص‌ها مقدار آن‌ها به صفر می‌رسد. برای الکترون ورودی که انرژی آن در ناحیه مشترک بازه‌های مجاز انرژی است ضریب عبور بدون وارونگی اسپین ( $T_{\uparrow\uparrow}$  و  $T_{\downarrow\downarrow}$ ) کاهش و ضریب عبور با وارونگی اسپین ( $T_{\downarrow\uparrow}$  و  $T_{\uparrow\downarrow}$ ) افزایش می‌یابد که با ایجاد فاصله بین نقص‌ها این مقدار کمتر شده و در واقع پراکندگی اسپینی به خصوص در ناحیه  $[-1eV, 1eV]$  باعث کاهش مقدار ضریب عبور مربوط به وارونگی اسپین می‌گردد.

شکل ۳ نمودار ضریب عبور الکترونی بر حسب تغییرات زاویه گشتاور مغناطیسی نقص (ها) نسبت به گشتاور مغناطیسی سایر اتم‌ها در انرژی صفر نشان می‌دهد. نمودار  $T_{\uparrow\downarrow}$  بر  $T_{\downarrow\uparrow}$  و نمودار  $T_{\uparrow\uparrow}$  بر  $T_{\downarrow\downarrow}$  کاملاً منطبق‌اند که این امر از تقارن‌های هندسی و فیزیک مسئله ناشی می‌شود. در نمودار شکل ۳ مشاهده می‌شود که در طیف نمودارهای  $T_{\uparrow\uparrow}$  و  $T_{\downarrow\downarrow}$ ، با افزایش تعداد نقص‌ها تعداد قله‌ها و دامنه نوسانات

وابسته به اسپین یک نانو سیم فرومغناطیس در غیاب یا حضور یک یا دو نقص پرداخته‌ایم. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار پارامتر وارونگی اسپینی اتم‌ها، ناحیه مشترک بازه‌های انرژی مجاز مربوط به اسپین‌های بالا و پایین کوچکتر می‌شود. ولی در مقابل پراکندگی اسپینی در این ناحیه بیشتر می‌شود. همچنین ضریب عبور سیم مغناطیسی شامل یک یا دو نقص نسبت به سیم مغناطیسی ایده‌آل نامتناهی، از حالت پله‌ای خارج شده و بسته به انرژی الکترون ورودی به طور متفاوت تغییر می‌کند. به طور کلی می‌توان گفت با ایجاد نقص و افزایش تعداد آن در یک سیم مغناطیسی، رسانش الکترونی بدون وارونی اسپین، کاهش یافته و رسانش الکترونی همراه با وارونی اسپین، افزایش می‌یابد؛ که با ایجاد فاصله بین نقص‌ها این مقدار آن را بیشتر کاهش می‌دهد. همچنین ایجاد فاصله بین نقص‌ها نوساناتی در منحنی ضریب عبور ایجاد می‌کند که با افزایش فاصله این نوسانات افزایش می‌یابند. با تغییر زاویه گشتاور مغناطیسی نقص، ضریب عبور شدیداً نوسان می‌کند و با افزایش تعداد نقص‌ها دامنه این نوسانات افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش تعداد نقص، بستگی ضریب عبور به زاویه نقص گشتاور مغناطیسی بیشتر می‌شود.

بدین وسیله از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهرکرد قدردانی می‌شود.



شکل ۴. نمودار ضریب عبور  $T_{\uparrow\uparrow}$  بر حسب انرژی برای یک سیم مغناطیسی شامل دو نقص به فاصله‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ اتم. در اینجا تمام انرژی‌های جایگاهی و پرش در سامانه به ترتیب برابر با صفر و ۱eV در نظر گرفته شده است. همچنین  $h = 0.5\text{eV}$ ،  $\theta = \pi/6$  انتخاب شده‌اند.

امر معمولاً به سه پدیده منجر می‌شود: تشدید، ضد تشدید و یا تشدید-ضد تشدید. مورد آخر تشدید فانو نام دارد که وقوع آن به وجود مسیرهای حلقوی شکل در سامانه‌های شامل ناخالصی بستگی دارد [۱۷ و ۱۸]. می‌توان نشان داد که این مسیرهای حلقوی با تبدیل هامیلتونی زنجیره مغناطیسی شامل تعدادی نقص متوالی به هامیلتونی یک سامانه غیر مغناطیسی نردبانی پدیدار می‌شوند. از این رو در سامانه‌های شامل چند نقص متوالی با انرژی‌های متفاوت جایگاهی، انتظار وقوع تشدید فانو وجود دارد.

در این مقاله با استفاده از روش تابع گرین به بررسی رسانش

27 (2005) 325.  
 7. B Hiltcher, M Governale, and J König, *Phys. Rev. B* **82** (2010) 165452.  
 8. B Zhou *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter* **23** (2011) 135304.  
 9. S Koller, L Mayrhofer, and M Grifoni, *New J. Phys.* **12** (2010) 033038.  
 10. M Wilczynski *et al.*, *J Magn. Magn. Mater.* **290** (2005) 209.  
 11. A A Shokri and A Daemi, *Eur. Phys. J. B* **69** (2009) 245.

1. S Maekawa and T Shinjo, “*Spin Dependent Transport in Magnetic Nanostructures*”, CRC Press (2002).  
 2. S K Maiti, *Solid State Commun.* **149** (2009) 1684.  
 3. L Gravier *et al.*, *J Magn. Magn. Mater.* **271** (2004) 153.  
 4. M Mardaani and A A Shokri, *Chem. Phys.* **324** (2006) 541.  
 5. M Dey, S K Maiti, and S N Karmakar, *Phys. Lett. A* **374** (2010) 1522.  
 6. A A Shokri, M Mardaani, and K Esfarjani, *Physica E*

- Systems*”; Cambridge University Press, Cambridge, (1997).
۱۶. م مردانی، ح ربانی و آ مظلوم شهرکی، *مجله پژوهش فیزیک ایران*، ۱۲، ۲ (۱۳۹۱) ۱۰۳.
۱۳. A A Shokri and M Mardaani, *Solid State Commun.* **137** (2006) 53.
۱۴. M Mardaani, K Esfarjani, *Chem. Phys.* **317** (2005) 43.
۱۵. S Datta, “*Electronic Transport in Mesoscopic*
17. U Fano, *Phys. Rev.* **124** (1961) 1866.
18. A A Shokri, Z H Ebrahimirjad, and S F Masoudi, *Physica E* **43** (2011) 1579.