

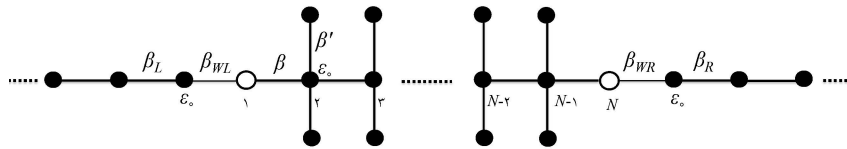
mohammad-m@sci.sku.ac.ir :

(دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۳/۳۰؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۰/۱۲/۷)

برای مطالعهٔ رسانش وابسته به اسپین هستند و نقش مهمی را در ذخیرهٔ اطلاعات مغناطیسی، فن‌آوری پردازش‌گرها و محاسبات کوانتومی ایفا می‌کنند [۴]. تا به امروز پژوهش‌های نظری [۵ و ۶] و تجربی [۷ و ۸] زیادی برای طراحی وسایل تعویض اسپینی و قطبش اسپینی انجام شده است. در برخی از این مطالعات، رسانندگی الکتریکی همدوس یک سیم کوانتومی مغناطیسی (غیرمغناطیسی) متصل به دو رسانای مغناطیسی (غیرمغناطیسی)، با استفاده از روش تابع گرین و ماتریس انتقال به صورت نظری و تحلیلی بررسی شده است [۹-۱۳]. با توجه به کوچک‌تر شدن اجزاء تشکیل دهندهٔ وسایل الکترونیکی، بررسی رسانش کوانتومی (وابسته به اسپین) دستگاه‌های نانومتری بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۴]. در این مقاله به بررسی رسانش الکترونی وابسته به اسپین در یک نانو ساختار مغناطیسی به شکل

در چند دههٔ اخیر، ترابرد الکترونی وابسته به اسپین در سامانه‌های کم بعد، به عنوان شاخه جدیدی به نام اسپینترونیک در فیزیک ماده چگال مطرح شده است [۱]. با کشف اثر مقاومت مغناطیسی قوی<sup>۱</sup> در چند لایه‌ای‌های مغناطیسی - غیر مغناطیسی و همچنین اثر تونل‌زنی الکترونی در چند ابرشبکهٔ مغناطیسی - عایق، نقش اسپین الکترون در ترابرد الکتریکی این مواد مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفت [۲]. واژه اسپینترونیک که همان الکترونیک اسپینی است، در واقع نقش اسپین حامل‌ها را به جای بار معرفی کرده و کنترل اسپین الکترون برای ذخیره‌سازی و عبور اطلاعات در الکترونیک را مورد بحث قرار می‌دهد [۳]. نقاط کوانتومی، نانوسیم‌ها و مولکول‌های مغناطیسی گزینه‌های خوبی

۱. Giant magneto - resistance



شکل ۱. طرح‌واره یک سامانه مغناطیسی استخوان ماهی متصل به دو رسانای یک بعدی غیرمغناطیسی نامحدود. دایره‌های سفید و سیاه به ترتیب اتم‌های مغناطیسی و غیرمغناطیسی را نشان می‌دهند.

که در آن  $c_n^\dagger$  و  $c_n$  به ترتیب معرف عملگرهای خلق و فنا بوده،  $\tilde{\epsilon}_0 = \epsilon_0 + 2\beta'^x / (\epsilon - \epsilon_0)$  و  $\beta$  به ترتیب انرژی جایگاهی بازبهنجارش شده اتم‌ها و انرژی پرش بین جایگاه‌های مجاور نانو سیم و  $\epsilon_0$ ، انرژی جایگاهی اتم منزوی،  $\beta'$  انرژی پرش بین اتم‌های شاخه‌ها با اتم‌های سیم مرکزی هستند (شکل ۱). همچنین  $\vec{h}_n \cdot \vec{\sigma}$  عملگر برهم‌کنش الکترون با اتم مغناطیسی در جایگاه  $n$  ام بوده و مسئول تعویض جهت اسپین الکترون در جایگاه‌های مغناطیسی است. از این رو به  $\vec{h}_n$  پارامتر تعویض اسپینی نسبت داده می‌شود.  $\sigma$  نشانگر ماتریس‌های پائولی است.

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

$$\vec{h}_n \cdot \vec{\sigma} = h_n \begin{pmatrix} \cos \theta_n & \sin \theta_n e^{-i \varphi_n} \\ \sin \theta_n e^{i \varphi_n} & -\cos \theta_n \end{pmatrix}, \quad (3)$$

هامیلتونی الکترونها به صورت زیر توصیف می‌شود

$$H_{L(R)} = \epsilon_0 \sum_n c_n^\dagger c_n + \beta_{L(R)} \sum_n c_{n+1}^\dagger c_n + h.c., \quad (4)$$

که در آن  $\beta_{L(R)}$  و  $\epsilon_0$  به ترتیب انرژی‌های جایگاهی و پرش در الکتروند چپ (راست) هستند. در نهایت هامیلتونی‌های اتصال نیز به صورت زیر بیان می‌شود

$$H_{WL(R)} = \beta_{WL(R)} c_{(N)}^\dagger c_{(N+1)} + h.c., \quad (5)$$

که در آن  $\beta_{WL(R)}$  انرژی پرش اتصال بین نانو سیم و الکتروند چپ (راست) است. الکترونها را ایده‌آل و در رهیافت تنگابست زنجیره ساده در نظر می‌گیریم. تابع گرین تأخیری،  $G_W$ ، برای سامانه مورد بررسی به صورت زیر است [۱۴]

$$G_W = \frac{1}{(\epsilon + i\eta)I - H_W - \Sigma_L - \Sigma_R}, \quad (6)$$

که در آن  $\epsilon$  انرژی،  $I$  ماتریس یکه و  $\Sigma_{L(R)}$  خود انرژی سیم مغناطیسی به دلیل وجود الکتروند سمت چپ (راست) است که به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۴].

استخوان ماهی متصل به دو رسانای غیر مغناطیسی می‌پردازیم. برای این منظور ابتدا در بخش ۱ فرمول‌بندی مسئله را در رهیافت تنگابست و روش تابع گرین ارائه می‌کنیم. سپس در بخش ۲ نتایج محاسبات مربوط به رسانش الکترونی وابسته به اسپین نانو ساختار استخوان ماهی مغناطیسی مورد بحث قرار گرفته و در پایان نیز، در بخش ۳ نتیجه‌گیری این مطالعه آمده است.

شکل ۱ ساختار یک سامانه استخوان ماهی مغناطیسی محدود بین دو رسانای یک بعدی غیر مغناطیسی نامحدود را نشان می‌دهد. این ساختار مشابه به هیدروکربن‌های اشباع شده است که اتم‌های هیدروژن دو انتهای آن با اتم‌های مغناطیسی تعویض شده است. مکان اتم‌های سیم میانی را با  $n$  بر چسب می‌زنیم. جهت مغناطش در جایگاه  $n$  ام را می‌توان در مختصات کروی با دو زاویه  $\theta_n, \varphi_n$  مشخص نمود که  $\theta_n$  زاویه بین جهت مغناطش با محور  $z$  و  $\varphi_n$  زاویه افقی تصویر بردار مغناطش در صفحه  $x-y$  با محور  $x$  هستند.

هامیلتونی سامانه شامل نانو ساختار، الکترونها و اتصال‌های

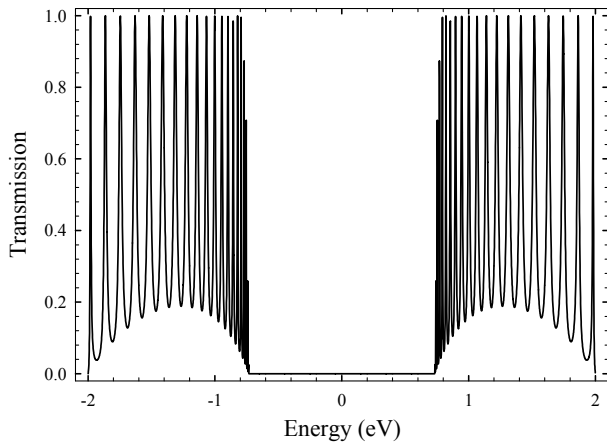
چپ و راست به صورت زیر است

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

که در آن  $L, W$  و  $R$  به ترتیب نشان‌گر الکتروند چپ، سیم مرکزی و راست هستند. هامیلتونی سیم مغناطیسی استخوان ماهی مرکزی در رهیافت تنگابست با فرض یکسان بودن تمام انرژی‌های جایگاهی و انرژی‌های پرش، به کمک روش حذفی و

تبدیل به یک زنجیره ساده چنین نوشته می‌شود [۱۵]

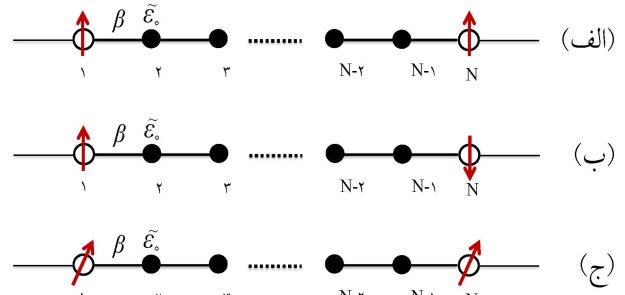
$$H_W = \sum_n (\tilde{\epsilon}_0 - \vec{h}_n \cdot \vec{\sigma}) c_n^\dagger c_n + \beta \sum_n c_{n+1}^\dagger c_n + h.c., \quad (2)$$



شکل ۳. نمودار ضریب عبور برحسب انرژی برای نانو ساختار استخوان ماهی غیرمغناطیسی. پارامترهای مورد استفاده به صورت  $\beta_{WL(R)} = 0.18 \text{ eV}$  و  $\beta = \beta' = 1 \text{ eV}$ ،  $h = 0$ ،  $N = 32$  هستند.

متفاوت از نانو ساختار استخوان ماهی مغناطیسی را مورد بررسی قرار می‌دهیم. این سه آرایش را با توجه به بازبهنجارش هامیلتونی نانو سیم استخوان ماهی به هامیلتونی سیم همگن در شکل ۲ رسم کرده‌ایم. برای سادگی  $\beta_{L(R)} = \beta = 1 \text{ eV}$  و تمامی انرژی‌های جایگاهی در کل سامانه صفر در نظر گرفته شده‌اند. قبل از هر چیز بهتر است حالت غیر مغناطیسی سامانه مورد نظر را بررسی نماییم. ضریب عبور این حالت در شکل ۳ برای نانوسیمی شامل ۳۲ اتم مرکزی و برای  $\beta_{WL(R)} = 0.18 \text{ eV}$  رسم شده است.

نمودار ضریب عبور برحسب انرژی برای اولین پیکربندی مغناطیسی نشان داده شده در شکل ۲(الف) - که گشتاورهای مغناطیسی اتم اول و  $N$ ام به صورت موازی با محور  $z$  قرار دارند- در شکل ۴ رسم شده است. در این نمودار نیز تعداد اتم‌های مرکزی ۳۲ و قدرت اتصال بین نانو سیم و الکترودها  $\beta_{WL(R)} = 0.18 \text{ eV}$  در نظر گرفته شده است. همچنین ضریب جفت‌شدگی اسپین- میدان برابر با  $h = 0.5 \text{ eV}$  است. در این آرایش  $T_{\downarrow\uparrow} = T_{\uparrow\downarrow} = 0$  که دلیل آن صفر شدن عناصر غیر قطری ماتریس رابطه (۳) است. همچنین منحنی  $T_{\downarrow\downarrow}$  نیز به صورت تصویر آینه‌ای منحنی  $T_{\uparrow\uparrow}$  نسبت به  $\varepsilon = 0$  به دست می‌آید که دلیل آن در مقدار انرژی‌های جایگاهی اتم‌های مغناطیسی نانو ساختار در این دو حالت نهفته است. در حالت



شکل ۲. سه پیکربندی مختلف برای نانو سیم بهنجار شده استخوان ماهی شامل دو اتم مغناطیسی در دو انتهای آن.

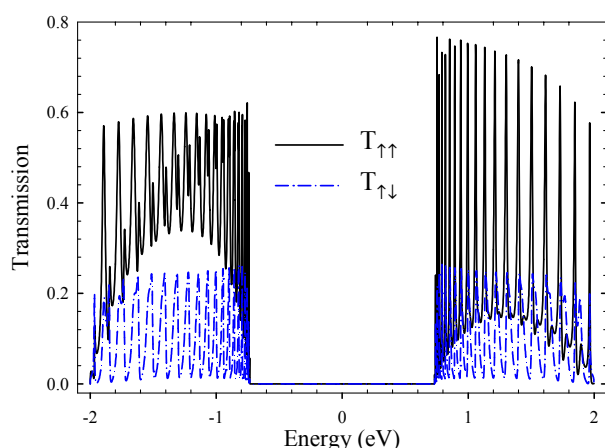
$$\Sigma_{L(R)} = \frac{\beta_{WL(R)}^y}{\beta_{L(R)}} \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\beta_{L(R)}} + \sqrt{\frac{(\varepsilon - \varepsilon_0)^2}{4\beta_{L(R)}^2} - 1} \right). \quad (V)$$

با توجه به اینکه میدان مغناطیسی فقط با اسپین الکترون عبوری برهم کنش می‌کند، چهار نوع رسانش الکتریکی وجود دارد که عبارتند از: الکترون با اسپین بالا وارد و با اسپین بالا خارج شود ( $T_{\uparrow\uparrow}$ )، الکترون با اسپین بالا وارد و با اسپین پایین خارج شود ( $T_{\uparrow\downarrow}$ )، الکترون با اسپین پایین وارد و با اسپین پایین خارج شود ( $T_{\downarrow\uparrow}$ ) و الکترون با اسپین پایین وارد و با اسپین بالا خارج شود ( $T_{\downarrow\downarrow}$ ). بنابراین ضریب عبور الکترونی وابسته به اسپین در تقریب نزدیکترین همسایه با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۰، ۱۱ و ۱۴]:

$$T_{ss'}(\varepsilon) = 4 \text{Im} \Sigma_L \text{Im} \Sigma_R \left| G_{\sqrt{N}}^{ss'} \right|^2, \quad (13)$$

که در آن  $G_{\sqrt{N}}^{ss'}$  درایه  $ss'$  مربوط به تلاقی نوار سطری اولی و نوار ستونی  $N$ ام در ماتریس تابع گرین ( $G_{\sqrt{N}}$ ) و  $N$  تعداد جایگاه‌ها یا تعداد اتم‌های مرکزی در نانو سیم است. همچنین  $s$  و  $s'$  به ترتیب بیانگر جهت اسپین الکترون وارد شده و خارج شده از نانو سیم مرکزی هستند. در دمای صفر مطلق و در رژیم پاسخ خطی (رهیافت لاندائور) جریان الکتریکی متناسب با اختلاف پتانسیل دو الکترودها سمت چپ و راست است. بنابراین هرگاه اختلاف پتانسیل بین الکترودها کوچک باشد، رسانش الکترونی وابسته به اسپین متناسب با ضریب عبور الکترونی است و ما این دو کمیت را معادل در نظر می‌گیریم.

در این بخش رسانش الکترونی وابسته به اسپین سه آرایش

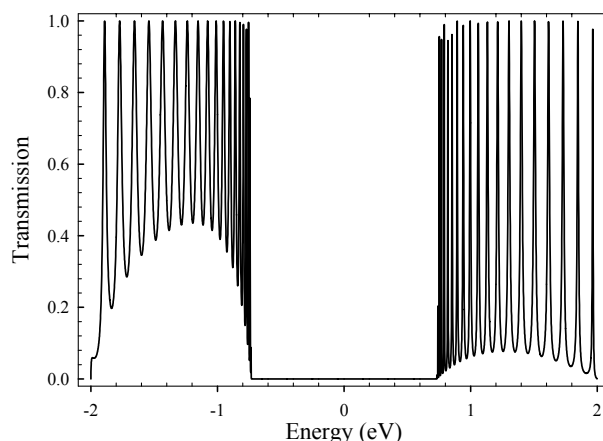


شکل ۵. نمودار ضریب عبور برحسب انرژی برای نانو ساختار استخوان ماهی مغناطیسی که در شکل ۲(ج) نشان داده شده است. پارامترهای مورد استفاده به صورت  $N=32$ ،  $\theta=\pi/3$ ،  $h=0.5\text{eV}$ ،  $\beta=\beta'=1\text{eV}$  و  $\beta_{WL(R)}=0.1\text{eV}$  هستند.

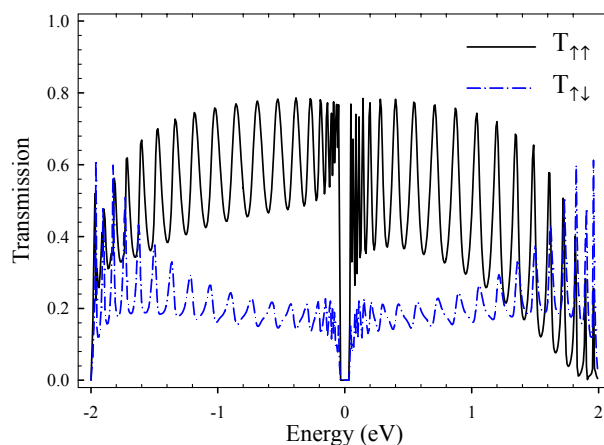
گشتاورهای یا جهت اسپین الکترون است [۱۵].

برای پیکربندی شکل ۲(ب) که جهت گشتاورهای مغناطیسی اتم اول و  $N$ ام به صورت هم جهت و در خلاف جهت با محور  $z$  قرار گرفته‌اند، ضریب عبور نسبت به پیکربندی ۲(الف) کاهش یافته و بر خلاف نمودار شکل ۴، در محدوده انرژی متقارن است. در مورد پیکربندی عمومی تر شکل ۲(ج) که جهت گشتاورهای مغناطیسی اتم اول و  $N$ ام، زاویه یکسانی با محور  $z$  می‌سازند، نمودارهای ضریب عبور برحسب انرژی برای  $N=32$ ، در شکل ۵ برای  $\theta=\pi/3$  رسم شده است. در این شکل پارامترهای مورد استفاده به صورت  $h=0.5\text{eV}$  و  $\beta_{WL(R)}=0.1\text{eV}$  هستند. مشاهده می‌شود دره‌ها و قله‌های متناظر با منحنی توپر  $(T_{↑↑})$  و خط-نقطه چین  $(T_{↑↓})$  روبروی هم قرار گرفته‌اند. همچنین همانند شکل قبلی نمودار  $T_{↑↑}$  نسبت به انرژی جایگاهی  $\epsilon$  نامتقارن و برای  $T_{↑↓}$  متقارن است.

در شکل ۶ نمودارهای ضریب عبور برای پیکربندی شکل ۲(ج) بر حسب انرژی برای مورد  $N=32$ ،  $\beta_{WL(R)}=0.1\text{eV}$  و  $\beta'=0.2\text{eV}$  رسم شده است. با کاهش انرژی پرش بین اتم‌های اصلی و فرعی، ضریب عبور افزایش و پنجره مجاز انرژی بزرگتر می‌شود (یا به طور معادل گاف انرژی کاهش

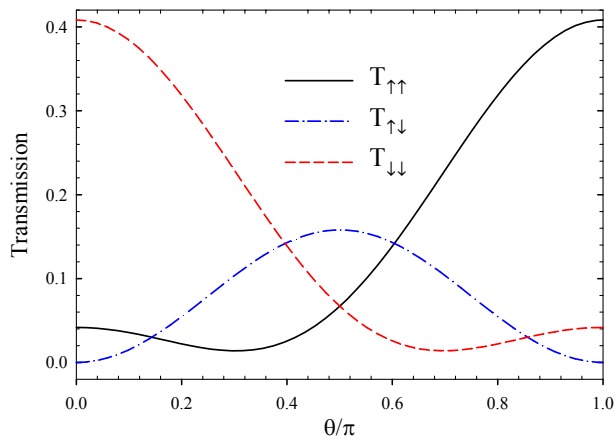


شکل ۴. نمودار ضریب عبور برحسب انرژی برای نانو ساختار استخوان ماهی مغناطیسی که در شکل ۲(الف) نشان داده شده است. پارامترهای مورد استفاده به صورت  $N=32$ ،  $h=0.5\text{eV}$ ،  $\beta=\beta'=1\text{eV}$  و  $\beta_{WL(R)}=0.1\text{eV}$  هستند.



شکل ۶. نمودار ضریب عبور برحسب انرژی برای نانو ساختار استخوان ماهی مغناطیسی که در شکل ۲(ج) نشان داده شده است. پارامترهای مورد استفاده به صورت  $N=32$ ،  $\theta=\pi/3$ ،  $h=0.5\text{eV}$ ،  $\beta=0.5\beta'=1\text{eV}$  و  $\beta_{WL(R)}=0.1\text{eV}$  هستند.

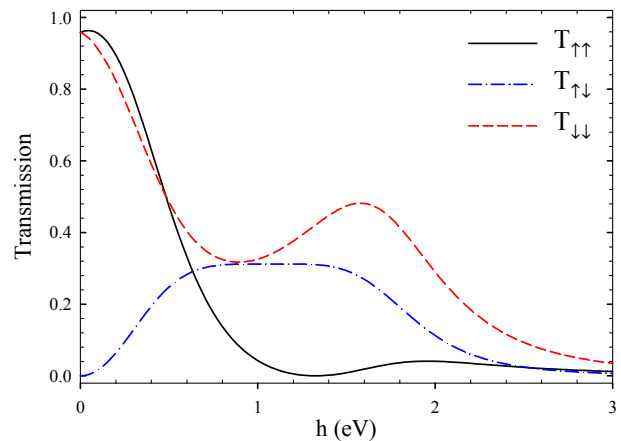
مغناطیسی نسبت به حالت غیرمغناطیسی محدوده مجاز انرژی تغییری نکرده است، ولی تقارن نمودار به هم خورده و دامنه نوسانات برای انرژی‌های مثبت افزایش و برای انرژی‌های منفی کاهش می‌یابد. در واقع منشأ این تغییرات را باید در شکل نوار انرژی نانو ساختار در حضور میدان مغناطیسی جستجو نمود. می‌توان گفت که منشأ اصلی گاف انرژی به ذات ساختار استخوان ماهی بر می‌گردد و مستقل از اندازه و جهت



شکل ۸. نمودار ضریب عبور برحسب  $\theta/\pi$  برای نانو ساختار استخوان ماهی مغناطیسی که در شکل ۲ (ج) نشان داده شده است. پارامترهای مورد استفاده به صورت  $N=16$ ،  $\beta_{WL(R)} = 0.8\text{eV}$  و  $\beta = \beta' = 1\text{eV}$ ،  $\varepsilon = 1.9\text{eV}$ ،  $h = 0.5$  هستند.

در این مقاله به مطالعه رسانش الکتریکی وابسته به اسپین گشتاورهای مغناطیسی با جهت‌گیری‌های متفاوت گشتاورهای مغناطیسی اتم‌های ابتدایی و انتهایی یک نانو سیم استخوان ماهی متصل به دو سیم فلزی غیر مغناطیسی نیمه نامحدود پرداخته‌ایم. نتایج نشان می‌دهد گاف انرژی نانو سیم با کاهش قدرت اتصال بین اتم‌های مرکزی و اتم‌های روی شاخه‌ها کاهش می‌یابد و این نتیجه مستقل از برهم‌کنش اسپین میدان بوده و به ذات ساختار استخوان ماهی بر می‌گردد. دیده می‌شود با تغییر اندازه و جهت میدان مغناطیسی، رسانش الکتریکی وابسته به اسپین تغییر می‌کند، که می‌توان از این خاصیت در طراحی یک کلید اسپینی بهره جست. نتایج عددی نشان می‌دهد که می‌توان با انتخاب پیکربندی‌های متفاوت شکل و تابع ضریب عبور وابسته به اسپین را نسبت به انرژی ورودی الکترون کنترل نمود. در این مقاله سعی کردیم با انتخاب سه پیکربندی خاص و با جاروب کردن پارامترهای قابل تغییر، این پارامترها را برای طراحی یک فیلتر اسپینی پیدا و یا بهینه کنیم.

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



شکل ۷. نمودار ضریب عبور برحسب پارامتر تعویض اسپینی برای نانو ساختار استخوان ماهی مغناطیسی که در شکل ۲ (ج) نشان داده شده است. پارامترهای مورد استفاده به صورت  $N=32$ ،  $\beta_{WL(R)} = 0.8\text{eV}$  و  $\beta = \beta' = 1\text{eV}$ ،  $\varepsilon = 1\text{eV}$ ،  $\theta = \pi/2$  هستند.

می‌یابد). در واقع با ضعیف کردن انرژی پرش شاخه‌ها گاف انرژی باریک‌تر می‌شود و در نهایت برای یک ساختار بدون شاخه (با اتم‌های یکسان) گاف انرژی از بین می‌رود [۱۵].

در شکل ۷ نمودارهای ضریب عبور برای پیکربندی شکل ۲ (ج) در انرژی یک الکترون ولت بر حسب پارامتر تعویض برای مورد  $N=32$ ،  $\beta_{WL(R)} = 0.8\text{eV}$  و  $\beta' = 1\text{eV}$  رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که با تغییر میدان مغناطیسی ( $h$ )، می‌توان جریان‌های الکتریکی وابسته به اسپین را کنترل نمود. به این معنی که می‌توان از سامانه به عنوان یک فیلتر اسپینی بهره جست. به طور مثال در محدوده  $h \in [1.2, 1.4]\text{eV}$  هر الکترونی که با اسپین بالا وارد شود، حتماً با اسپین پایین خارج می‌شود.

در شکل ۸ نمودارهای ضریب عبور برای پیکربندی شکل ۲ (ج) بر حسب  $\theta$  برای مورد  $N=16$ ،  $\beta_{WL(R)} = 0.8\text{eV}$  و  $\beta' = 1\text{eV}$  در انرژی ثابت  $\varepsilon = 1.9\text{eV}$  رسم شده است. این پارامترها را طوری انتخاب کرده‌ایم که اثر تعویض اسپین بهتر قابل مشاهده باشد. دیده می‌شود که رسانش در حالت تعویض اسپینی  $T_{\uparrow\downarrow}$  و  $T_{\downarrow\uparrow}$ ، برای زوایای صفر و  $\pi$  دقیقاً صفر است و به ازای زاویه  $\pi/2$  بیشینه است. همچنین در مقابل رسانش برای حالت‌های  $T_{\uparrow\uparrow}$  و  $T_{\downarrow\downarrow}$  به ترتیب به ازای زوایای  $\pi$  و صفر بیشینه است.

- (2005) 43.
10. M Mardaani, and A A Shokri, *Chem. Phys.* **324** (2006) 541.
  11. A A Shokri, and M Mardaani, *Solid State Commun.* **137** (2006) 53.
  12. S K Maiti, *Phys. Lett. A* **374** (2010) 1522.
  13. A A Shokri, and A Daemi, *Eur. Phys. J. B* **69** (2009) 245.
  14. S Datta, “*Quantum Transport in Mesoscopic Systems*”, Cambridge University Press (2005).
  15. M Mardaani, H Rabani, and A Esmaeili, *Solid State Commun.* **151** (2011) 928.
  1. P Ball, *Nature* **404** (2000) 918.
  2. S Maekawa, and T Shinjo, “*Spin Dependent Transport in Magnetic Nanostructures*”, CRC Press (2002).
  3. M N Baibich *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **61** (1998) 2472.
  4. J Stohr *et al.*, *Magnetism-From Fundamental to Nanoscale Dynamics*, Springer (2006).
  5. M W Wu *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **6** (2004) 85.
  6. J H Ojeda *et al.*, *Nanotechnology* **20** (2009) 434013.
  7. L P Rokhinson *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 146601.
  8. D Jin *et al.*, *J. Appl. Phys.* **99** (2004) 08T304.
  9. M Mardaani, and K Esfarjani, *Chem. Phys.* **317**