لیزر در پزشکی؛ ۱۳۹۶، دورهٔ ۱٤، شمارهٔ ٤، صفحات: ۱۷-۱۲.

مقاله پژوهشی

ترابرد اسپینی در زنجیره‌های DNA: رهیافتی به اسپین کالریترونیک با استفاده از لیزر

سهراب بهنیا [۱]
فاطمهٔ نعمتی [۲]
سمیرا فتحی‌زاده [۳]
مهدی خداویردی‌زاده [٤]

۱. *دانشیار فیزیک، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران*

۲. *دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران*

۳. *دکترای فیزیک، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران*

۴. *مربی، مهندسی اپتیک و لیزر، گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران*

نویسندهٔ مسئول: سهراب بهنیا، تلفن: ۰۹۱۴۱۴۶۸۵۱۵
پست الکترونیک: s.behnia@sci.uut.ac.ir

خلاصه

مقدمه: ایجاد جریان‌های اسپینی به‌وسیلهٔ اعمال گرادیان دما توجه دانشمندان زیادی را به خود جلب‌کرده است. زمینهٔ اسپینترونیک از اسپین‌الکترون برای ذخیره و پردازش اطلاعات استفاده می‌کند و اسپین‌کالریترونیک، جریان‌های اسپینی را به حرارت مرتبط می‌سازد. ما از DNA به‌عنوان مولکولی آلی برای بررسی پدیدهٔ اسپین‌کالریترونیک استفاده کرده‌ایم. در مطالعهٔ حاضر به‌منظور ایجاد گرادیان دما از لیزر مادون قرمز استفاده شد. در این کار، ما توانستیم محدوده‌ای از میدان‌های خارجی را که در آن بیشترین جریان اسپینی تولید می‌شود، به‌دست آوریم. بدین‌ترتیب می‌توانیم از زنجیره‌های DNA به‌عنوان یک ابزار اسپینترونیک برای انتقال اطلاعات امن در محیط‌های بیولوژیکی استفاده کنیم.

روش بررسی: با درنظرگرفتن مدل PBH تصحیح‌یافته نسبت‌به درجهٔ آزادی اسپین، به بررسی ترابرد اسپینی مولکول DNA در حضور گرادیان دما و عوامل خارجی دیگر ازجمله میدان الکتریکی و مغناطیسی پرداخته شد. گرادیان دما ازطریق لیزر مادون قرمز به سیستم اعمال شد. برای تحلیل سیستم از رهیافت آشوب استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج حاصل‌از انجام پژوهش حاکی‌از آن است که جریان‌های پلاریزهٔ اسپینی درحضور گرادیان دما خلق می‌شود. همچنین با اعمال میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی خارجی، بهترین محدودهٔ میدان برای بیشترین شارش جریان اسپینی مشخص شد.

نتیجه‌گیری: با مشخص شدن محدودهٔ مناسبی از میدان‌های خارجی درحضور گرادیان دما، که در آن به سیستم بیولوژیک آسیب وارد نمی‌شود، می‌توان بیان کرد که انتقال امن اطلاعات در این محیط‌ها را شاهد هستیم.

واژه‌های کلیدی: اسپین‌کالریترونیک، DNA، گرادیان دما، پلاریزاسیون اسپینی، لیزر

[Downloaded from icml.ir on 2026-11-25]

مقدمه

امروزه، نور لیزر به‌علت دارا بودن خواص منحصربه‌فردش با شدت‌های متفاوت به‌طور گسترده‌ای در علوم پزشکی و زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرد[۱]. به‌هنگام پرتودهی نور لیزر بر بافت بیولوژیک، سازوکارهای متفاوتی نظیر برهمکنش گرمایی روی می‌دهد[۲]. برهمکنش گرمایی به کلیهٔ آثاری اطلاق می‌شود که افزایش دمای موضعی پارامترهای متغیر در آن باشد. این آثار گرمایی می‌توانند به‌وسیلهٔ لیزرهای پالسی یا موج پیوسته ایجاد شوند[۳]. اسپین کالریترونیک تأثیر گرادیان دما در دینامیک اسپین را مطالعه می‌کند[۴]. بعداز فرمول‌بندی مکانیک کوانتوم گشتاور ذاتی ذرات بنیادی یا اسپین مطرح شد که اسپین دارای دو حالت بالا و پایین می‌باشد. اسپین الکترون یک درجهٔ آزادی داخلی است که در سال ۱۹۹۲ توسط آزمایش اشترن-گرلاخ اثبات شد[۵]. اثرات مختلفی منجربه پدیدهٔ اسپین‌کالریترونیک می‌شوند که از آن‌جمله می‌توان اثر هال اسپین، اثر هال‌اسپینی معکوس، اثر هال غیر عادی، اثر سی‌بک‌اسپین و اثر هال‌کوانتومی را نام برد[۶]. افزایش امنیت و سرعت انتقال اطلاعات یکی‌از عمده‌ترین چالش‌ها در نظریهٔ اطلاعات می‌باشد. در پدیدهٔ اسپینترونیک که علم ترکیب اسپین‌الکترون با الکترونیک می‌باشد، از اسپین‌الکترون به جای بار الکترون به‌عنوان حامل اطلاعات استفاده‌شده‌است[۷]. دراصل هدف اسپینترونیک، استفاده از درجهٔ آزادی اسپین‌الکترون برای خلق نوع جدیدی از ابزارهای منطقی برای ذخیرهٔ اطلاعات می‌باشد[۸]. در پدیدهٔ اسپینترونک آلی از DNA به‌عنوان مولکولی آلی استفاده‌شده است[۹]. در این مقاله از دی‌اکسی‌ریبونوکلئیک‌اسید (DNA) به‌عنوان یک بیومولکول با قابلیت سازگاری با سیستم‌های بیولوژیک و به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای مطالعهٔ پدیدهٔ اسپین‌کالریترونیک استفاده شده است[۱۰]. مولکول DNA از یک مارپیچ دورشته‌ای تشکیل‌شده‌است که هر رشته شامل یک مجموعهٔ پلیمری از نوکلئوتیدها است و هر نوکلئوتید از سه قسمت قند، بازهای آلی و گروه فسفات تشکیل شده است[۱۱]. مارپیچ دوگانهٔ DNA در سال ۱۹۵۳ توسط واتسون-کریک به‌وسیلهٔ تصاویر کریستالوگراف کشف شد و بعداز آن با کشف رسانایی الکتریکی در طول زنجیرهٔ DNA، دینامیک ساختاری و اندرکنش آن با محیط به موضوع مورد علاقهٔ محققان بدل شد[۱۲]. مولکول دورشته‌ای DNA به‌دلیل ساختار اولیه و ثانویهٔ آن یک مولکول کایرال می‌باشد. مولکول کایرال به موکلولی اطلاق می‌شود که دارای عدم تقارن آینه‌ای است[۱۳]. فتوالکترون‌هایی که از یک سطح پوشیده‌شده با یک لایه مولکول دو رشته‌ای DNA خارج می‌شوند، مستقل از نوع قطبش نور تابیده‌شده، قطبیده هستند. با اندازه‌گیری اسپین الکترون‌های عبورکرده با قطبش سنج مات، قطبش اسپینی بالای ۶۰ درصد در دمای اتاق مشاهده‌شده است. این مشاهدات زمینه‌ساز استفاده از دو رشتهٔ DNA یا هر مولکول کایرال دیگر را به‌عنوان یک فیلتراسپینی فراهم می‌کند[۱۴]. در این پژوهش از لیزر مادون قرمز به‌عنوان یک منبع گرمایی نقطه‌ای برای DNA جهت ایجاد گرادیان دمایی مورد استفاده قرار می‌گیرد[۱۵]. در بخش اول با درنظرگرفتن مدل PBH تصحیح‌یافته نسبت‌به درجهٔ آزادی اسپین، به توصیف این مدل پرداخته شد و همچنین معادلات مربوط به برهمکنش اسپین-مدار و معادلات مربوط به میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی خارجی توصیف شد. در ادامهٔ هامیلتونی مدل نوشته‌شده و معادلات حرکت سیستم استخراج شده‌اند. ما تمام معادلات حرکت را به معادلات دیفرانسیل مرتبهٔ اول تبدیل کرده و با استفاده از روش‌های رهیافت آشوب به تحلیل سیستم پرداخته‌ایم. در بخش دوم سعی شد به بررسی ترابرد اسپینی مولکول DNA درحضور گرادیان دما و عوامل خارجی دیگر ازجمله میدان الکتریکی و مغناطیسی پرداخته شود و محدودهٔ مناسب برای عوامل خارجی مؤثر بر گزینش اسپین از داخل مولکول DNA به‌دست‌آورده‌شود.

مدل‌سازی انتقال اسپین

مدل‌های متفاوتی در سال‌های متمادی برای مطالعهٔ ساختار DNA و بررسی خواص الکتریکی آن ارائه شده است. در سال ۱۹۹۳ پیارد، بیشاپ و داکسیوس مدل یک‌بعدیPB [۱۶] مربوط‌به دینامیک غیر خطی ذوب DNA را با جملهٔ غیر خطی اندرکنش بازها در یک رشته تصحیح کردند و مدلPBD را ارائه نمودند. مدل PBH که اندرکنش متقابل بار الکتریکی و نوسانات شبکهٔ DNA را دربرمی‌گیرد، می‌تواند برای توصیف مکانیسم انتقال بار و اسپین در DNA به‌کار برده‌شود[۹]. مدل PBH علاوه‌بر اندرکنش بین جفت بازها در DNA، ساختار پیوند هیدروژنی را نیز در مطالعات وارد می‌کند. دراینجا، ما از مدل PBH برای توصیف ترابرد اسپین از DNA استفاده می‌کنیم. در این مدل جفت‌شدگی بار با درجهٔ آزادی کشش بازها درراستای پیوند هیدروژنی درنظر گرفته می‌شود. این مدل، مارپیچ دوگانهٔ DNA را به یک شبکهٔ یک‌بعدی می‌نگارد. هامیلتونین مدل PBH را می‌توان به‌حالت نیمه‌کلاسیک نوشت[۱۷]، درنتیجه هامیلتونین کلی به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$H = H_{PBH} + H_{so} + H_{fields} \quad (۱)$$

که در آن H_{PBH} هامیلتونی مربوط‌به مدل PBH به‌انضمام اسپین، H_{so} هامیلتونین مربوط‌به برهمکنش اسپین-مدار و H_{fields}، هامیلتونی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی خارجی می‌باشد. هامیلتونی H_{PBH} نیز شامل جملات زیر است[۹]:

$$H_{lat} = \sum_n \frac{1}{2} m\dot{y}^2 + V(y_n) + W(y_n, y_{n+1}) \quad (۲)$$

که $V(y_n)$، پتانسیل مورس می‌باشد که به‌فرم $V(y_n) = D_n(e^{a_n y_n} - 1)$ است. انرژی توده‌ای بین جفت‌بازهای مجاور هم به‌صورت زیر معرفی می‌شود[۹]:

$$W(y_n, y_{n+1}) = \frac{k}{2}(1 + \rho e^{-\alpha(y_n + y_{n+1})})(y_{n+1} - y_n)^2 \quad (۳)$$

[Downloaded from icml.ir on 2026-11-25]

هامیلتونی حامل‌های بار الکتریکی در تقریب نزدیک‌ترین همسایگی به انضمام اسپین به‌صورت زیر بیان می‌شود[۹]:

$$H_{Car} = \sum_n \left[\varepsilon C_n^{\dagger} C_n - V_{n,n+1}\left(C_n^{\dagger} C_{n+1} + C_{n+1}^{\dagger} C_n\right)\right] \quad (۴)$$

که در آن C_n و $C_n^{\dagger}$ عملگرهای نابودی و خلق الکترون در سایت n-ام هستند. ε انرژی الکترون در سایت‌ها و $V_{n,n+1}$ انرژی جهش الکترون بین نزدیک‌ترین همسایگی می‌باشد. برهم‌کنش الکترون-شبکه هم به‌صورت زیر بیان می‌شود[۹]:

$$H_{int} = x \sum_n y_n C_n^{\dagger} C_n \quad (۵)$$

به‌طوری‌که χ ثابت جفت‌شدگی الکترون-شبکه‌گونه می‌باشد. عبارت مربوطبه اندرکنش اسپین-مدار هم به‌صورت زیر بیان می‌شود[۱۵]:

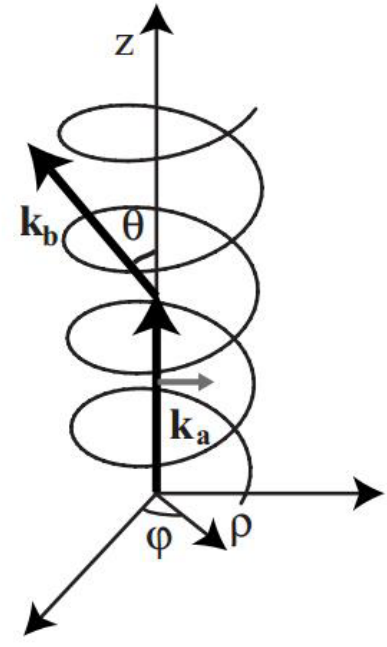
$$H_{SO} = \sum_n \left[2it_{so}\cos\theta\left(C_n^{\dagger\uparrow} C_{n+1}^{\uparrow} - C_n^{\dagger\uparrow} C_{n-1}^{\uparrow} - C_n^{\dagger\downarrow} C_{n+1}^{\downarrow} + C_n^{\dagger\downarrow} C_{n-1}^{\downarrow}\right) + D_{n,n+1} C_n^{\dagger\uparrow} C_{n+1}^{\downarrow} - D_{n,n+1}^{*} C_n^{\dagger\downarrow} C_{n+1}^{\uparrow} + D_{n-1,n}^{*} C_n^{\dagger\downarrow} C_{n-1}^{\uparrow} - D_{n-1,n} C_n^{\dagger\uparrow} C_{n-1}^{\downarrow}\right] \quad (۶)$$

به‌طوری‌که رابطهٔ زیر برقرار است:

$$D_{n,n+1} = it_{so}\sin\theta\{\sin[n\Delta\varphi] + \sin[(n+1)\Delta\varphi] + i\cos[n\Delta\varphi] + i\cos[(n+1)\Delta\varphi]\}$$

tso همان ثابت برهمکنش اسپین-مدار و θ زاویهٔ پیچ مارپیچ می‌باشد. $\phi = n\Delta\phi$ زاویه در مختصات استوانه‌ای است(شکل ۱).

H_{fields} مربوط به میدان الکتریکی و مغناطیسی خارجی می‌باشد که به



شکل۱: تصویر شماتیک مارپیچDNA

صورت زیر بیان می‌شوند[۹]:

$$H_{fields} = H_E + H_B \quad (۷)$$

در معادلهٔ فوق H_E و H_B به‌ترتیب هاملتونی مربوطبه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هستند که به‌صورت زیر تعریف می‌شوند[۹]:

$$H_E = -e\sum_{n,\sigma} Ed\cos[(n-1)\Delta\varphi] C_n^{\sigma\dagger} C_n^{\sigma} \quad (۸)$$

$$H_B = \sum_n \left(-\mu_B B C_n^{\uparrow\dagger} C_n^{\uparrow} + \mu_B B C_n^{\downarrow\dagger} C_n^{\downarrow}\right) \quad (۹)$$

در مطالعهٔ کنونی، بیشتر جملات هامیلتونی غیر خطی هستند و به شرایط اولیه حساسیت بالایی دارند. ازطرفی تحلیل سری زمانی حاصل از معادلات تحول DNA نشان می‌دهد که تحول فضایی این مولکول همانند تحول سیستم‌های آشوبناک است. معادلات حاکم بر قسمت الکترونیکی با استفاده از رابطهٔ هایزنبرگ که به‌صورت زیر تعریف می‌شود، استخراج می‌شوند[۹]:

$$\dot{C}_n^{\sigma} = -\frac{i}{\hbar}[C_n^{\sigma}, H] \quad (۱۰)$$

که در آن $\sigma = \uparrow, \downarrow$ می‌باشد. برای استفاده از نظریهٔ آشوب، کافی است معادلات درجه اول داشته باشیم، بدین‌ترتیب معادلات دیفرانسیل مرتبهٔ دوم را به مرتبهٔ اول تبدیل می‌کنیم.

بحث و بررسی

برای مطالعهٔ انتقال اطلاعات با جریان خالص اسپینی باید جریان‌های الکتریکی متناظر با اسپین بالا و پایین را به‌دست آوریم. جریان‌ها می‌توانند از معادلات حرکت و یا معادلهٔ پیوستگی بار- جریان استخراج شوند[۱۲]، به‌طوری‌که $I_i^{\sigma} - I_{i-1}^{\sigma} = e\frac{dn_i^{\sigma}}{dt}$ و در آن I_i^{σ} عملگر جریان موضعی متناظر با اسپینσ و $n_i^{\sigma} = c_i^{\sigma\dagger} c_i^{\sigma}$ می‌باشد. درنتیجه عملگرهای کل جریان الکتریکی پایای سیستم به فرم $I^{\sigma} = \sum_{i,\sigma} I_i^{\sigma}$ به‌صورت زیر بیان می‌شوند[۹]:

$$I^{\uparrow}(t) = \frac{-ie}{\hbar}\sum_n \{W_{n,n+1} C_n^{\dagger\uparrow} C_{n+1}^{\uparrow} + W_{n-1,n}^{*} C_{n-1}^{\dagger\uparrow} C_n^{\uparrow} + D_{n,n+1} C_n^{\downarrow\dagger} C_{n+1}^{\downarrow} - D_{n-1,n} C_{n-1}^{\dagger\downarrow} C_n^{\downarrow}\} \quad (۱۱)$$

$$I^{\downarrow}(t) = \frac{-ie}{\hbar}\sum_n \{W_{n,n+1}^{*} C_n^{\dagger\downarrow} C_{n+1}^{\downarrow} + W_{n-1,n} C_{n-1}^{\dagger\downarrow} C_n^{\downarrow} - D_{n,n+1}^{*} C_n^{\uparrow\dagger} C_{n+1}^{\uparrow} + D_{n-1,n}^{*} C_{n-1}^{\dagger\uparrow} C_n^{\uparrow}\} \quad (۱۲)$$

با استفاده از معادلهٔ جریان، سعی در بررسی تأثیر فاکتورهای متفاوتی ازجمله میدان الکتریکی و مغناطیسی خارجی و گرادیان دما برروی شار جریان اسپینی از داخل DNA را داریم. با تعریف جریان بار خالص cI و

[Downloaded from icml.ir on 2026-11-25]

و جریان اسپینی خالص sI به‌صورت زیر تعریف می‌شوند[۹]:

$$I_c = I^{\uparrow} + I^{\downarrow} \qquad (۱۳)$$

$$I_s = I^{\uparrow} - I^{\downarrow}$$

جریان وابسته به اسپین را در DNA بررسی کردیم و همچنین کمیت دیگری را برای مقایسهٔ جریان خالص اسپینی و جریان خالص بار تعریف می‌کنیم.

به‌منظور خلق جریان‌های اسپینی، گرادیان دما و میدان الکتریکی و مغناطیسی خارجی به سیستم اعمال شدند. درابتدا، سعی شد که خاصیت فیلترینگ اسپینی درحضور گرادیان دما به اثبات برسد و درادامه با اعمال میدان مغناطیسی و الکتریکی خارجی سعی در خلق جریان اسپینی خالص‌تری داشتیم.

اثر گرادیان دما

شکل۲، سری زمانی جریان اسپین در گرادیان دمایی ۳۰ درجهٔ کلوین را نشان می‌دهد. واضح است که اسپین بالا و پایین باتوجه به گرادیان دما رفتار جداگانه‌ای را نشان می‌دهند. این نتیجه بیانگر خاصیت فیلترینگ اسپین توسط DNA می‌باشد.

اثر میدان الکتریکی

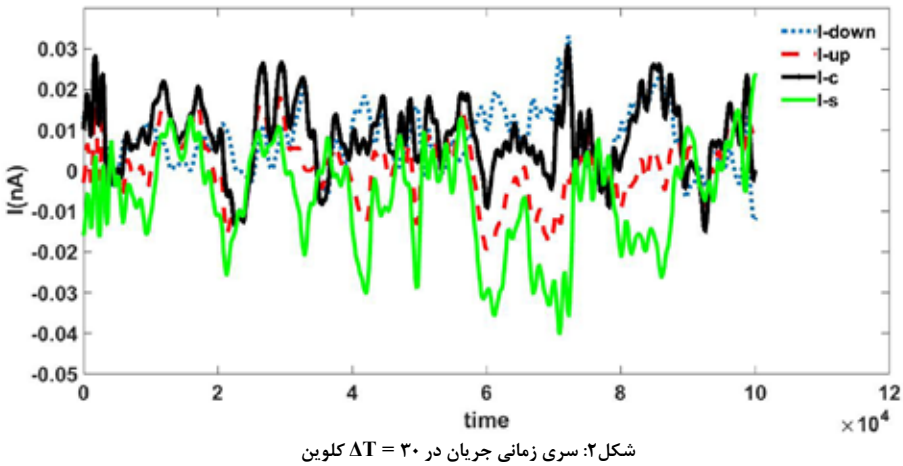
در کنار نتیجهٔ فوق، گیت ولتاژ هم بر انتقال اسپین از داخل مولکول DNA تأثیر می‌گذارد. ما سعی در بررسی تونل‌زنی اسپین‌های گزینش شده از داخل DNA درحضور میدان الکتریکی خارجی داریم. در شکل۳، نشان‌داده‌شده‌است که میدان الکتریکی قادر به تولید جریان‌های پلاریزه است. شکل۳ بیانگر این است که در E=0.004 و E=0.006 و E=0.008 شاهد گزینش مناسب اسپین هستیم.

اثر میدان مغناطیسی

ازسوی‌دیگر، میدان مغناطیسی اثر بالقوه‌ای در انتقال بارهایی با اسپین های پلاریزه از داخل DNA دارد[۱۹]. در مطالعهٔ حاضر، ما اثر میدان مغناطیسی را بر جریان‌های اسپینی در DNA درحضور گرادیان دما بررسی می‌کنیم. شکل۴ نشان می‌دهد که در میدان B=350 و B=550 شاهد ماکزیمم جریان اسپین می‌باشیم. بنابراین مطالعهٔ فوق جریان اسپینی وابسته‌به گرادیان دما را نشان می‌دهد.

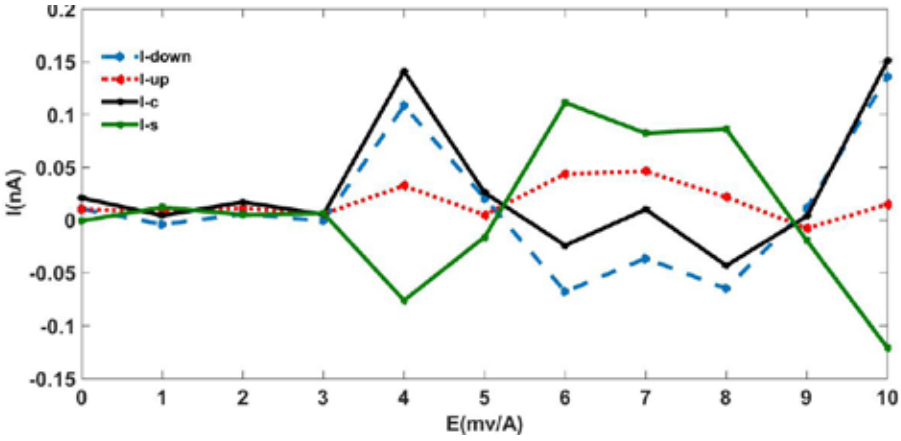
نتیجه‌گیری

اسپین کالریترونیک یک پدیدهٔ نوظهور در مرز بین پدیدهٔ انتقال حرارت و فیزیک اسپین می‌باشد. بیشتر پیشرفت‌ها در این زمینه برروی مواد غیرآلی می‌باشد. الکترونیک آلی جایگاه ویژه‌ای برای خود در تکنولوژی دستگاه‌های نانوالکتریک به‌دست آورده است. در مطالعهٔ فوق، به بررسی تولید جریان‌های اسپینی با اعمال میدان الکتریکی و مغناطیسی خارجی و اعمال گرادیان دما پرداختیم. در این مطالعه گرادیان دما به دو انتهای زنجیره اعمال می‌شود و درنتیجهٔ آن می‌توان خلق جریان پلاریزهٔ اسپینی را مشاهده کرد. با اعمال میدان‌های خارجی نیز می‌توان بهترین محدوده از میدان‌ها را که در آن بیشترین جریان اسپینی شارش پیدا می‌کند، به دست‌آورد. این محدوده درحدی است که به محیط بیولوژیکی آسیبی وارد نکند و درنتیجه برای انتقال اطلاعات امن در این محیط‌ها به‌کار برده‌شود.

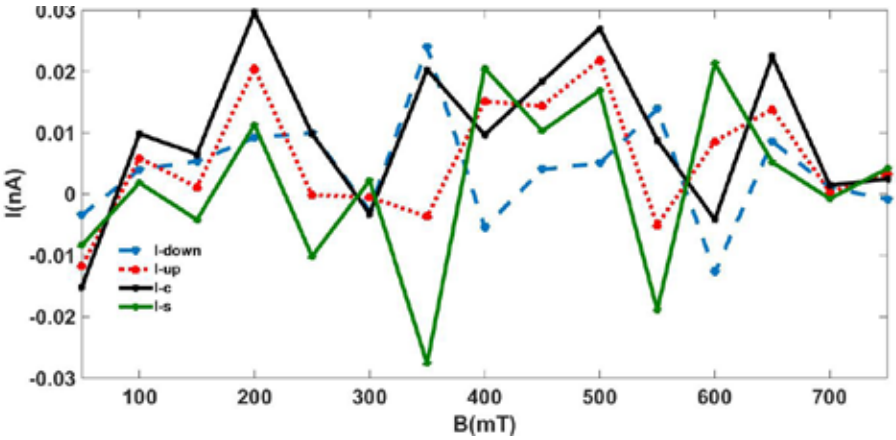


شکل۲: سری زمانی جریان در ΔT = ۳۰ کلوین

[Downloaded from icml.ir on 2026-11-25]



شکل۳: جریان اسپینی برمبنای میدان الکتریکی



شکل۴: جریان اسپینی برمبنای میدان مغناطیسی

[Downloaded from icml.ir on 2026-11-25]

References:

1. Teixeira GR, Marciano RS, Silva Sergio LP, Polignano GAC, Guimaraes OR, Geller M, Paoli F, Fonseca AS. Infrared laser effects at fluences used for treatment of detain hypersensitivity on DNA repair in Escherichia coli and plasmids. Opt.Laser Technol. 2014; 64: 46-52.

2. Braun D, Libchaber A. Trapping of DNA by thermophoretic depletion and convection.Phys. Rev. Lett. 2002; 89: 188103-1.

3. Keiser G. Biophotonics: Concepts to Applications. Boston: Springer; 2016.

4. Yu H, Brechet SD, Ansermet JP. Spin caloritronics, origin and outlook.Physics Letters A, 2017; 381: 825-37.

5. Palmer MC, Takahashi. M, Westman HF. WKB analysis of relativistic Stern–Gerlach measurements. Annals of Physics. 2013; 505-16.

6. Boona SR, Myers RC, Heremans JP. Spin caloritronics. Energy & Environmental Science, 2014; 885-910.

7. Raman KV, Kamerbeek AM, Mukherjee A, Atodiresei N, Sen T, Lazić, P, Blügel S. Interface-engineered templates for molecular spin memory devices. Nature. 2013, 509-13.

8. Verdaguer M. Molecular electronics emerges from molecular magnetism. Science.1996; 698.

9. Behnia S, Fathizadeh S, Akhshani A. DNA Spintronics: Charge and Spin Dynamics in DNA Wires. The Journal of Physical Chemistry C. 2016; 2973-83.

10. Blackburn GM, Gait MJ, Loakes D, Williams DM. Nucleic acids in chemistry and biology. Royal Society of Chemistry, Oxford, UK. 2006.

11. Brown TA, Brown T. Gene cloning and DNA analysis: an introduction. John Wiley son. 2016.

12. Watson JD, Crick FH. Molecular structure of nucleic acids. Nature, 1953; 171: 737-8.

13. Naaman R, Waldeck DH .Spintronics and chirality: spin selectivity in electron transport through chiral molecules. Annual review of physical chemistry. 2015; 66: 263-81.

14. Göhler B, Hamelbeck V, Markus TZ, Kettner M, Hanne GF, Vager Z, Zacharias H. Spin selectivity in electron transmission through self-assembled monolayers of double-stranded DNA. Science. 2011; 331: 894-7.

15. Ichikawa M, Ichikawa H, Yoshikawa K, and Kimura Y. Extension of a DNA molecule by local heating with laser. Phys. Rev. Lett. 2007; 99: 148104.

16. Peyrard M, Bishop AR. Statistical mechanics of a nonlinear model for DNA denaturation. Physical review letters. 1989; 62: 2755.

17. Dauxois T, Peyrard M, Bishop A.R. Dynamics and thermodynamics of a nonlinear model for DNA denaturation.Physical Review E. 1993; 47: 684.

18. Kalosakas G, Aubry S, Tsironis GP. Polaron solutions and normal-mode analysis in the semiclassical Holstein model. Physical Review B. 1998; 58: 3094.

19. Rai D, Galperin M. Electrically driven spin currents in DNA. The Journal of Physical Chemistry C. 2013; 117: 13730-7.

[Downloaded from icml.ir on 2026-11-25]