

جایگزیدگی و انتقال اسپین الکترون‌ها در توالی‌های دی‌ان‌ای در اثر تابش نور لیزر

خلاصه

مقدمه: اعمال شرایط محیطی مختلف به سامانه‌های زیستی جهت بررسی و ایجاد جریان‌های اسپینی از زمینه‌های مطالعاتی نوظهور در حال پیشرفت است. اخیراً بررسی جریان‌های اسپینی با اعمال دما به‌عنوان اثرات محیط توجه دانشمندان زیادی را به خود اختصاص داده است. از طرفی در علم اسپینترونیک از اسپین و جریان‌های اسپینی الکترون به‌منظور پردازش، حفظ و انتقال امن اطلاعات استفاده می‌شود. با توجه به کاربردهای گسترده لیزر در علوم پزشکی، در این مطالعه با به‌کارگیری لیزر مادون قرمز به‌منظور اعمال حرارت روی سلول به بررسی شرایط ایجاد و هدایت جریان‌های اسپینی ناشی از حرارت محیط پرداخته می‌شود.

روش بررسی: برای این منظور، توالی‌های مختلف مولکول DNA به‌عنوان مولکول مرکزی، تعبیه‌شده در حمام حرارتی جهت شبیه‌سازی اثرات محیطی (که در این مطالعه پرتو نور لیزر می‌باشد) را در نظر می‌گیریم و از دو انتها زنجیره مولکول را به الکترودهایی در ولتاژهای قابل کنترل متصل می‌کنیم. با تغییر ولتاژ الکترودها و فرکانس حمام در طول توالی‌های مختلف، شرایط ایجاد جریان‌های اسپینی بررسی می‌شود.

یافته‌ها: در تعداد جفت‌بازهای کمتر، سیستم، رفتار جایگزیده از خود نشان می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده با به‌کارگیری ابزارهای آشوب کوانتومی مشخص می‌کند که با افزایش طول توالی در زنجیره DNA تقارن‌های سیستم شکسته و تابع موج اسپینی سیستم از حالت جایگزیدگی خارج می‌شود و سیستم به سمت ایجاد جریان‌های اسپینی می‌رود.

بحث و نتیجه‌گیری: با استفاده از تغییرات ایجادشده در محیط سلولی ناشی از تابش لیزر می‌توان سیستمی برای ایجاد و هدایت جریان‌های اسپینی طراحی کرد به‌طوری‌که بتوان با به‌کارگیری جریان‌های اسپینی، ذخیره و انتقال اطلاعات در اسپینترونیک مولکولی را بهبود داد.

واژه‌های کلیدی: اسپینترونیک، دی‌ان‌ای، آشوب کوانتومی، لیزر، حمام حرارتی

سهراب بهنیا^۱
مصطفی سلیمی^۲
سمیرا فتحی‌زاده^۳

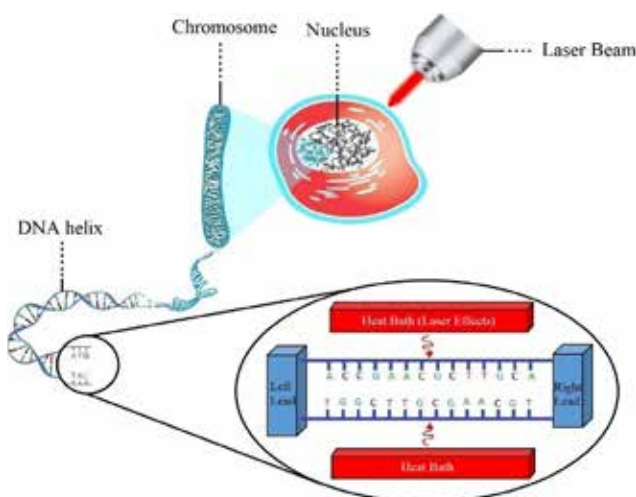
۱. استناد تمام، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران
۳. استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

نویسنده مسئول: سمیرا فتحی‌زاده، تلفن: ۰۹۱۴۳۹۱۳۴۹۳
پست الکترونیک: s.fathizadeh@sci.uut.ac.ir

مقدمه

به‌عنوان مولکول آلی استفاده می‌شود [۶]. جریان‌های اسپینی، جریان‌های حساسی هستند که می‌توانند با استفاده از حرارت نور لیزر تابشی هدایت شوند. با استفاده از حساسیت و هوشمندی جریان‌های اسپینی می‌توان جریان اسپینی را در حسگرها و مانیتورهای در ابعاد نانو که قابل پوشیدن هم هستند و یا آشکارسازهای پزشکی استفاده کرد. مولکول دورشته‌ای DNA به دلیل ساختار اولیه و ثانویه آن یک مولکول کایرال می‌باشد به این معنی که دارای عدم تقارن آینه‌ای است. از ویژگی‌های مولکول DNA، هزینه پایین در سنتز، قابلیت برنامه‌ریزی، انعطاف‌پذیری و سازگاری با محیط‌های زیستی است که در تولید ساختارهای مولکولی و الکترونی-مولکولی مانند ترانزیستورها، سیم‌های نانو و دیودها کاربرد دارد [۷]. در این مطالعه، با به‌کارگیری لیزر مادون قرمز، اثرات گرمایی ناشی از این پرتو را در قالب حمام گرمایی شبیه‌سازی می‌کنیم [۸]. با توجه به شکل ۱ در بخش اول با مدل‌سازی ریاضی، با به‌کارگیری زنجیره DNA به‌عنوان مولکول مرکزی، تعبیه‌شده در حمام حرارتی و متصل به الکترودها سیستم را شبیه‌سازی می‌کنیم. در بخش دوم با به‌کارگیری ابزارهای آشوب کوانتومی به تحلیل سیستم می‌پردازیم و جایگزیدگی اسپینی را در طول توالی‌های مختلف بررسی می‌کنیم.

در این مطالعه زنجیره مولکول DNA دورشته‌ای به‌عنوان مولکول مرکزی با N سایت در نظر گرفته شده است که از دو انتها به دو الکترودها با k سایت متصل و از بالا و پایین با حمام‌های حرارتی در ارتباط است. مطابق شکل ۲ ماتریس هامیلتونی توصیف‌کننده چنین سیستمی، یک ماتریس $(6N + 8k) \times (6N + 8k)$ عضو می‌باشد. با توجه به مقادیر مختلف از پارامترهای N و k برای تحلیل و دستیابی به خواص طیفی ویژه بردارها و ویژه مقادیر چنین سیستمی از نرم‌افزار متلب^۵ استفاده شده است.



شکل ۱: تصویری از سیستم مورد مطالعه: مولکول DNA متصل به الکترودهای چپ و راست و غوطه‌ور در حمام حرارتی مدل‌سازی و ابزار

5. Matlab

در سال‌های اخیر، واژه "زیست" تبدیل به پیشوندی قدرتمند در بسیاری از زمینه‌های مطالعاتی در حال رشد شده است [۱]. در علوم زیست‌فناوری، زیست‌نانوفناوری، زیست‌شیمی و زیست‌فیزیک، با به‌کارگیری ابزارهای مختلف علوم به شناسایی مؤلفه‌ها و فرآیندهایی می‌پردازد که در مواد خود-سامان نقش کلیدی ایفا می‌کنند. مطالعه فرآیندهای زیستی به دلیل تراکم بالای سامانه‌های مورد نظر در قلمرو فیزیک ماده چگال قرار می‌گیرد. سامانه‌های زیستی شامل موادی می‌شود که به راحتی تحت تنش‌ها یا افت و خیزهای گرمایی و حرارتی تغییر شکل می‌دهند. در واقع، فیزیک ماده چگال نرم بیشتر به بررسی فازهای غیرجامد مانند شاره‌های پیچیده، پلیمرها، کلوئیدها، فوم‌ها، کریستال‌های مایع، مواد دانه‌ای، غشاها و شیشه‌های اسپینی و نیز سیستم‌های زیستی می‌پردازد. از طرفی نور لیزر به علت دارا بودن خواص منحصر به فرد مانند تک‌رنگ بودن، تکفام بودن و درخشندگی در واحد زاویه فضایی، با شدت‌های متفاوت به‌طور گسترده‌ای در علوم پزشکی و زیستی به‌کار برده می‌شود [۲ و ۳]. در واقع، پرتوی لیزر باریکه‌ای از نور می‌باشد که واگرایی آن به‌طور نسبی کم و تراکم انرژی در واحد سطح آن زیاد است. کاربردهای لیزر در پزشکی در سه راستا در حال توسعه است: جراحی لیزر^۱، لیزر درمان^۲ و تشخیص لیزر^۳. در بسیاری از مطالعات انجام‌شده مشخص شده است که پرتوی لیزر به علت دارا بودن انرژی قابل مقایسه با پیوندهای مولکولی و بین مولکولی، موجب تغییرات بیوشیمیایی و فیزیولوژیک بسیاری در اجزاء سلولی می‌شود به‌طوری‌که تابش پرتوی لیزر با پدیده‌هایی مانند برهمکنش‌های فوتوشیمیایی، گرمایی، یونیزاسیون و قطبیدگی در اسپین، بسیاری از عملکردهای سلولی را متأثر می‌کند. از طرفی مولکول DNA به‌عنوان یک سامانه زیستی دارای رفتار هوشمندانه است یعنی نسبت به محرک‌های محیط به گونه‌ای پاسخ می‌دهد که بیشترین منفعت را برای بقاء داشته باشد. به‌منظور شبیه‌سازی اثرات گرمایی لیزر روی سلول، از ارتباط زنجیره مولکول DNA به‌عنوان حامل اطلاعات سلولی و ژنتیکی با حمام‌های حرارتی بهره می‌گیریم و برای بررسی جریان اسپینی در طول توالی از اتصال آن به دو الکترودها بهره می‌بریم. بررسی شرایط ایجاد و هدایت جریان‌های اسپینی در علم اسپینترونیک^۴ از اهمیت زیادی برخوردار است. در مطالعات اسپینترونیک که دانش ترکیب اسپین الکترون با الکترونیک است، از خاصیت اسپینی و درجه آزادی اسپین الکترون به جای بار الکترون به‌عنوان حامل‌های اطلاعات استفاده می‌شود که منجر به ساخت نسل جدیدی از ابزارها برای ذخیره اطلاعات می‌گردد [۵]. در مطالعات اسپینترونیک آلی از مولکول

1. Laser Surgery
2. Laser Therapy
3. Laser Diagnostics
4. Spintronics

$$H_{DNA-Lead} = \sum_{j=1,2k,\sigma=\uparrow\downarrow} \sum (t_L a_{L,j,k}^{+\sigma} c_{i,j}^{\sigma} + t_R a_{R,j,k}^{+\sigma} c_{j,N}^{\sigma} + H.c) \quad (5)$$

که t_b عناصر ماتریس تونل‌زنی از سایت k -ام الکترون β به زنجیره DNA می‌باشد. هامیلتونی جمله مربوط به برهم‌کنش حمام با مولکول DNA نیز با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$H_{DNA-Bath} = \sum_{i=1}^N \sum_{\sigma=\uparrow\downarrow} \sum_{j=1,2} t_i b_i^+ c_{i,j}^{\sigma} + H.c. \quad (6)$$

که t_i نیز عناصر ماتریس تونل‌زنی بین حمام و مولکول DNA می‌باشد. خواص آماری و تحلیل رفتار چنین سیستم‌هایی مطابق با نظریه ماتریس‌های تصادفی است [۱۲]. نوسانات طیفی، خواص انتقال و جایگزینی سیستم مورد مطالعه بر اساس این نظریه بررسی می‌شود. آشوب کلاسیکی بر تحلیل مسیرها در فضای فاز تکیه دارد. از آنجایی که مسیر در دانش کوانتوم با اصل عدم قطعیت هایزنبرگ رد می‌شود، تحلیل دینامیکی ترازهای انرژی و توابع موج می‌تواند اطلاعاتی درباره نحوه عملکرد سیستم کوانتومی در اختیار بگذارد. یکی از ابزارهای پرکاربرد در نظریه آشوب کوانتومی تحلیل چندفردکتالی توابع است که در بسیاری از زمینه‌های علمی مانند پزشکی، فیزیک، ژئوفیزیک، جغرافیا و اقتصاد کاربرد دارد [۱۳].

فرض می‌کنیم که $|\psi_i|^2$ مقدار تابع موج در سایت i -ام یک شبکه d بعدی با حجم L^d می‌باشد. در صورتی که بتوان سیستم مورد نظر را با تعداد N_i جعبه به طول اضلاع مساوی l پوشش داد، در این حالت احتمال یافتن الکترون در k -امین جعبه برابر خواهد بود با $\mu_k(l) = \sum_i |\psi_i|^2$ که در آن $k = 1, 2, 3, \dots, N_i$ و احتمال کل حاصل جمع این احتمالات خواهد بود:

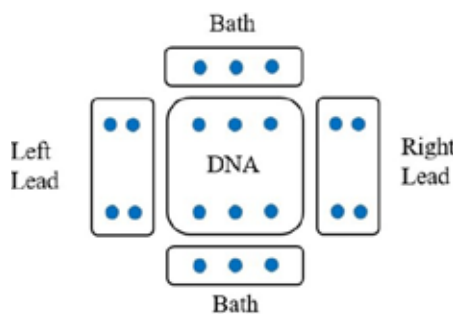
$$p_q(l) = \sum_{k=1}^{N_i} \mu_k^q(l)$$

اگر محدوده مشخص و معینی از $\lambda = l/L$ را در نظر بگیریم در این صورت $P_q(\lambda) \propto \lambda^{\tau(q)}$ خواهد بود که $\tau(q) = D_q(q-1)$ رابطه نمای وزنی می‌باشد. با به کارگیری تبدیل لژاندر برای طیف تکنیکی تابع $f(\alpha)$ داریم:

$$\alpha(q) = \frac{d\tau(q)}{dq} \quad q = f'(\alpha)$$

بنابراین داریم:

$$f(\alpha_q) = \alpha_q q - \tau(q) \quad (7)$$



شکل ۲: زنجیره مولکول DNA با سایت تعبیه شده در حمام حرارتی و متصل به الکترودها با k سایت

هامیلتونی کل با رابطه زیر بیان می‌شود [۹]:

$$H_{SYS} = H_{DNA} + H_{Lead} + H_{Bath} + H_{DNA-Lead} + H_{DNA-Bath} \quad (1)$$

در رابطه (۱) جمله اول مربوط به هامیلتونی DNA است که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$H_{DNA} = \sum_{i,j=1,2} \sum_{\sigma=\uparrow\downarrow} \epsilon_{i,j} c_{i,j}^{+\sigma} c_{i,j}^{\sigma} + V_{i,i+1,j} c_{i+1,j}^{+\sigma} c_{i,j}^{\sigma} + \sum_{i,\sigma} \lambda_i c_{i,i}^{+\sigma} c_{i,i}^{\sigma} + \sum_{i,j} 2t_{i,j} \cos \theta (c_{i,j}^{+\uparrow} c_{i+1,j}^{\uparrow} - c_{i,j}^{+\downarrow} c_{i+1,j}^{\downarrow}) - c_{i,j}^{+\uparrow} c_{i+1,j}^{\downarrow} + c_{i,j}^{+\downarrow} c_{i+1,j}^{\uparrow} + D_{i,i+1} c_{i,j}^{+\uparrow} c_{i+1,j}^{\downarrow} - D_{i,i+1}^+ c_{i,j}^{+\downarrow} c_{i+1,j}^{\uparrow} + D_{i-1,i}^- c_{i,j}^{+\downarrow} c_{i-1,j}^{\uparrow} - D_{i-1,i} c_{i,j}^{+\uparrow} c_{i-1,j}^{\downarrow}) + H.c.$$

که j تعداد رشته‌ها و i ، تعداد سایت‌ها در هر رشته می‌باشند. $c_{j,i}^{\pm}$ عملگر خلق (فنا) یک الکترون در سایت (j, i) ، $\epsilon_{j,i}$ انرژی روی سایت الکترون، $t_{j,i}$ انتگرال پرش در یک رشته، λ_i اندرکنش بین زنجیره‌های، θ زاویه ماریچ و

$$D_{n,n+1} = t_{i,j} \sin \theta \{ \sin[n\Delta\phi] + \sin[(n+1)\Delta\phi] + i \cos[n\Delta\phi] + i \cos[(n+1)\Delta\phi] \}$$

می‌باشد که ϕ زاویه پیچش است. جمله دوم در رابطه (۱) بیان‌کننده هامیلتونی الکترودها است [۱۰]:

$$H_{Lead} = \sum_{j=1,2} \sum_{k,\sigma} (\epsilon_{L,j,k} + \frac{\beta}{2}) a_{L,j,k}^{+\sigma} a_{L,j,k}^{\sigma} + \sum_{j=1,2} \sum_{k,\sigma} (\epsilon_{R,j,k} - \frac{\beta}{2}) a_{R,j,k}^{+\sigma} a_{R,j,k}^{\sigma}$$

که $a_{\beta,j,k}^{\pm}$ با $\beta = L, R$ عملگر خلق (فنا) الکترون در الکترون β ، $\epsilon_{\beta,j,k}$ انرژی روی سایت الکترودها و ولتاژ بایاس می‌باشد. هامیلتونی حمام حرارتی با رابطه زیر بیان می‌شود [۱۱]:

$$H_{Bath} = \sum_{i=1}^N \hbar \omega_i b_i^+ b_i + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \hbar \Omega_i (b_i^+ b_{i+1} + b_{i+1}^+ b_i) + H.c. \quad (4)$$

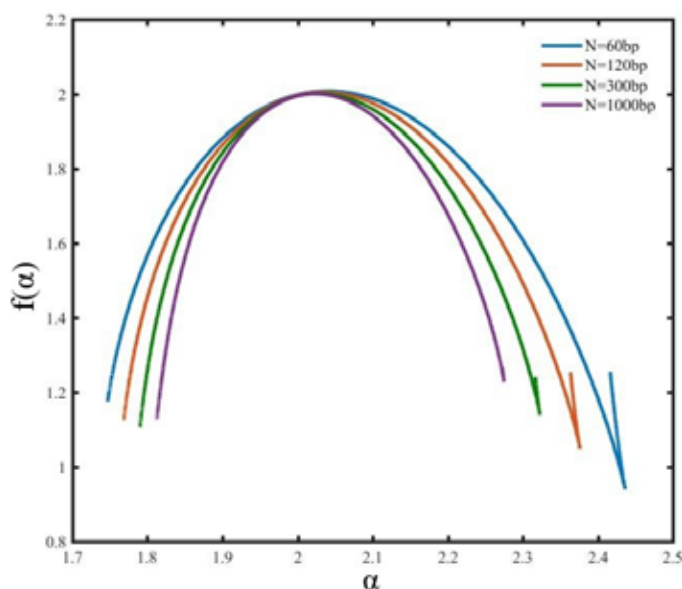
که در رابطه (۴) b_i^{\pm} عملگر خلق نوسان در i -امین نوسانگر و ω و Ω فرکانس نوسانگر و ثابت جفت‌شدگی متقابل است. هامیلتونی مربوط به برهم‌کنش مولکول DNA با الکترودها با رابطه زیر بیان می‌شود:

جایگزینی بیشتر و بسته شدن عرض نمودار نشان دهنده حالت پخشی بیشتر در تابع موج سیستم است. در شکل ۳ به وضوح دیده می شود که با افزایش تعداد جفت بازها و طول توالی، از جایگزینی سیستم کاسته می شود و سیستم به سمت ایجاد جریان های اسپینی پیش می رود. جریان اسپینی کل که با رابطه $S_f = S^{\uparrow} + S^{\downarrow}$ محاسبه می شود، با افزایش طول توالی افزایش می یابد.

در جدول ۱ مقادیر مختلف از نسبت مشارکت معکوس IPR برای تعداد جفت بازهای مختلف نشان داده شده است. بیشترین مقدار ممکن برای تابع $IPR = 1$ برای حالتی با جایگزینی کامل می باشد. با توجه به کاهش مقادیر، متناسب با افزایش طول زنجیره DNA با این تحلیل نیز می توان نشان داد که افزایش طول توالی باعث شکسته شدن برخی تقارن های سیستم می شود و تابع موج توصیف کننده به سمت حالت های ناجایگزیده و ایجاد جریان اسپینی کل می رود.

نتیجه گیری

شناخت و کنترل سیستم های زیستی، از برهم کنش مولکولی گرفته تا رفتار کارکردی آنها، یکی از اهداف مهمی است که در علوم پزشکی، مهندسی زیست، فیزیک و شیمی با به کارگیری ابزارهای موجود به آن پرداخته می شود. این شاخه از تحقیقات توجه خود را به توسعه تکنیک های مناسب در یک محیط واقعی و پیچیده (محیط مولکولی) متمرکز کرده است [۱۹]. در سال های اخیر، مولکول های آلی از جمله DNA برای استفاده در مدارهای الکترونیکی به عنوان هدایت کننده های مولکولی و نانوسیم ها پیشنهاد شده است. این مواد، جایگزین های جذاب و به صرفه برای نیمه هادی های معدنی در انواع دستگاه های اپتوالکترونیک،



شکل ۳: تابع چندفراکتالی $f(\alpha)$ برای توالی های مختلف از جفت بازهای CG

چند فرکتال بودن ویژه توابع با طیف یکتایی وابسته $f(\alpha_q)$ بررسی می شود که با رابطه (۷) بیان می شود. در این رابطه تابع $f(\alpha)$ به صورت تابع محدبی از α می باشد که بیشترین مقدار آن برای مقدار α_0 به دست می آید یعنی $f(\alpha_0) = d$ که بعد سیستم مورد مطالعه است. باریک شدن عرضی نمودار این تابع متناسب است با پخش شدگی تابع موج و برعکس [۱۴].

در سیستم های کوانتومی، $|\psi(r)\rangle$ ، به عنوان یک معیار از بهنجار بودن IPR (نسبت مشارکت معکوس) معیاری برای تشخیص حالت های اشغال شده جایگزیده انتخاب می شود. با به کارگیری نسبت مشارکت معکوس می توان خواص جایگزینی سیستم را مطالعه کرد. نسبت مشارکت معکوس برای یک ویژه حالت خاص مانند $|\psi^n\rangle = \sum_i c_i^n |\phi_i\rangle$ با رابطه زیر تعریف می شود [۱۵]:

$$IPR_q^n(E_n) = \sum_i |c_i^n|^{2q} \quad (8)$$

که اطلاعاتی را درباره ساختار ویژه حالتی که بر پایه $|\phi_i\rangle$ نوشته شده و در انرژی E_i قرار دارد فراهم می کند. بیشترین مقدار برای این سنجه $IPR = 1$ متناسب است با حالت های کاملاً جایگزیده و $IPR = 1/\dim(H)$ بر حالت های کاملاً پخش شده دلالت دارد.

بررسی و تحلیل

به منظور شبیه سازی اثرات حرارتی ناشی از نور لیزر، توالی های مختلف از مولکول DNA را در ارتباط با حمام حرارتی قرار و توالی را از دو انتها به الکترودهایی در ولتاژ $V_b = 3.0V$ قرار می دهیم. توالی های مختلف از این مولکول می توانند خواص انتقال متفاوت از جمله عایق و یا رسانا بودن را از خود نشان دهند. پارامترهای مختلفی روی خواص پخش و جایگزینی اسپینی در مولکول DNA تأثیر می گذارد. در این مطالعه با تغییر طول های مختلف از توالی DNA در فرکانس حمام $\omega/\omega_c = 5$ شرایط ایجاد جریان های اسپینی بررسی می شود. برای این منظور مقادیر $\epsilon_{j,i}$ به صورت $\epsilon_A = 8.5, \epsilon_C = 8.9, \epsilon_G = 8.3, \epsilon_T = 9 eV$ انتخاب می شوند. t_{ij} بین بازهای ناهمنام با رابطه $t_{XY} = \frac{t_{XY} + t_{YX}}{2}$ محاسبه می شود. ثابت های تونل زنی بین بازهای هم نام نیز به صورت $t_{AA} = 0.22, t_{TT} = -0.14, t_{CC} = -0.05, t_{GG} = 0.11, \lambda_i = -0.3 eV$ خواهند بود. برای پارامترهای الکتروده داریم: $\epsilon_{\beta,i} = 7.75 eV$ و $t_{\beta} = 0.42 eV$ [۱۶-۱۸]. در شکل ۳ تابع چندفراکتالی $f(\alpha)$ برای توالی های مختلف از جفت بازهای CG به کمک نرم افزار متلب رسم شده است. میزان باز شدگی عرضی تابع $f(\alpha)$ خواص جایگزینی سیستم را نشان می دهد به این معنی که باز شدگی بیشتر تابع متناسب است با

7. Associated singularity spectrum

8. Inverse participation ratio (IPR)

جدول ۱: مقادیر نسبت مشارکت معکوس برای توالی های مختلف از جفت بازهای CG

Length of sequences	60bp	120bp	300bp	1000bp
<i>IPR</i>	0.209569	0.13861	0.0813528	0.0661902

DNA در توالی های مختلف، متصل به الکترودهایی از دو انتها با ولتاژ مشخص و قابل کنترل قرار داده شد و قطبیدگی اسپین، جایگزینی و شکست تقارن بررسی گردید. نتایج به دست آمده از روش های آشوب کوانتومی نشان دهنده گسترش تابع موج و ایجاد جریان های اسپینی کل $(S_y = S^{\uparrow} + S^{\downarrow})$ متناسب با افزایش طول توالی می باشد [۲۰ و ۲۱]. در فعالیت های آتی، باتوجه به ایجاد شرایط مناسب برای خلق و هدایت جریان های اسپینی، می توان با به کارگیری جریان ایجاد شده برای انتقال امن و ذخیره اطلاعات در طول یک مولکول زیستی اقدام کرد. همچنین می توان با استفاده از حساسیت و هوشمندی جریان های اسپینی، می توان جریان اسپینی را در حسگرها و مانیتورهای در ابعاد نانو که قابل پوشیدن هم هستند و یا آشکارسازهای پزشکی استفاده کرد [۲۲].

فتوولتائیک و اسپینترونیک هستند. طول عمر طولانی اسپین در این مواد آن ها را برای برنامه های کاربردی در اسپینترونیک مطلوب می کند. اسپینترونیک یا الکترونیک بر پایه اسپین، شامل مطالعه، ایجاد و کنترل جریان های اسپین به منظور انتقال اطاعات در سیستم های حالت جامد است. سامانه های زیستی به دلیل دارا بودن خواص بی نظیرشان بیشترین توجه را در این زمینه به خود اختصاص داده اند. قابلیت بیولوژیکی منحصر به فرد مولکول های DNA در انتقال اطلاعات ژنتیکی می تواند برای بیواسپینترونیک استفاده شود. در واقع، اسپینترونیک مولکولی به دنبال بهره برداری از تنوع ساختاری الکترونیکی مولکول ها است تا با به کارگیری روش های محاسباتی جدید و برنامه های ذخیره سازی اطلاعات، اسپین الکترون را کنترل کند. در این مطالعه با در نظر گرفتن اثرات ناشی از تابش لیزر در قالب حمام حرارتی، زنجیره ای از مولکول های دورشته ای

References:

- Müh S, Beyer B. Bio-organic electronics—overview and prospects for the future. *Electronics*, 2014; 3(3): 444-61.
- Teixeira GR, da Silva Marciano R, da Silva Sergio LP, Polignano GAC, Guimaraes OR, Geller M, da Fonseca ADS. Infrared laser effects at fluences used for treatment of dentin hypersensitivity on DNA repair in *Escherichia coli* and plasmids. *Optics & Laser Technology*, 2014; 64: 46-52.
- Barnes FS. Applications of lasers to biology and medicine. *Proceedings of the IEEE*, 1975; 63(9): 1269-78.
- Abramov PI, Kuznetsov EV, Skvortsov LA, Skvortsova MI. Quantum-Cascade Lasers in Medicine and Biology. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2019; 86(1): 1-26.
- Raman KV, Kamerbeek AM, Mukherjee A, Atodiresei N, Sen TK, Lazić P, Blügel S. Interface-engineered templates for molecular spin memory devices. *Nature*, 2013; 493(7433): 509.
- Behnia S, Fathizadeh S, Akhshani A. DNA spintronics: Charge and spin dynamics in DNA wires. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2016; 120(5): 2973-83.
- Liu S, Wang WM, Briseno AL, Mannsfeld SC, Bao Z. Controlled deposition of crystalline organic semiconductors for field-effect-transistor applications. *Advanced Materials*, 2009; 21(12): 1217-32.
- Ichikawa M, Ichikawa H, Yoshikawa K, Kimura Y. Extension of a DNA molecule by local heating with a laser. *Physical review letters*, 2007; 99(14): 148104.
- Fathizadeh S, Behnia S, Ziaei J. Engineering DNA Molecule Bridge between Metal Electrodes for High-Performance Molecular Transistor: An Environmental Dependent Approach. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2018; 122(9): 2487-94.
- Chen ZZ, Lü R, Zhu BF. Effects of electron-phonon interaction on nonequilibrium transport through a single-molecule transistor. *Physical Review B*, 2005; 71(16): 165324.
- Nicacio F, Ferraro A, Imparato A, Paternostro M, Semião FL. Thermal transport in out-of-equilibrium quantum harmonic chains. *Physical Review E*, 2015; 91(4): 042116.
- Guhr T, Müller-Groeling A, Weidenmüller HA. Random-matrix theories in quantum physics: common concepts. *Physics Reports*, 1998; 299(4-6): 189-425.
- Lopes R, Betrouni N. Fractal and multifractal analysis: a review. *Medical image analysis*, 2009; 13(4): 634-49.
- Anderson PW. Absence of diffusion in certain random lattices. *Physical review*, 1958; 109(5): 1492.
- Vasquez LJ, Rodriguez A, Römer RA. Multifractal analysis of the metal-insulator transition in the three-dimensional Anderson model. II. Symmetry relation under typical averaging. *Physical Review B*, 2008; 78(19): 195106.
- Senthilkumar K, Grozema FC, Guerra CF, Bickelhaupt FM, Lewis FD, Berlin YA, Siebbeles LD. Absolute rates of hole transfer in DNA. *Journal of the American Chemical Society*, 2005; 127(42): 14894-903.
- Apalkov V, Berashevich J, Chakraborty T. Unique magnetic signatures of mismatched base pairs in DNA. *The Journal of chemical physics*, 2010; 132(8): 02B613.
- Malakooti S, Hedin ER, Kim YD, Joe YS. Enhancement of charge transport in DNA molecules induced by the next nearest-neighbor effects. *Journal of Applied Physics*, 2012; 112(9): 094703.
- Lanfranco R, Mognetti BM, Bruylants G. Achieving Selective Targeting Using Engineered Nanomaterials. In *Thermodynamics and Biophysics of Biomedical Nanosystems 2019*: 147-82. Springer, Singapore.
- Behnia S, Fathizadeh S, Akhshani A. DNA spintronics: Charge and spin dynamics in DNA wires. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2016; 120(5): 2973-83.
- Fathizadeh S, Behnia S, Ziaei J. Engineering DNA Molecule Bridge between Metal Electrodes for High-Performance Molecular Transistor: An Environmental Dependent Approach. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2018; 122(9): 2487-94.
- Horton M, Khan A, Maddison S. Delivering nanotechnology to the healthcare, IT and environmental sectors—a perspective from the ‘London Centre for Nanotechnology’. *BT technology journal*, 2006; 24(3): 175-83.