

## گذار اندرسون در شبکه DNA و اثرات محور DNA

### خلاصه

**مقدمه:** مولکول DNA به علت داشتن خواص منحصر به فرد و بدیع می تواند در زمینه های تحقیقاتی مختلفی از جمله نانو الکترونیک نوری<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار گیرد. امروزه، نانو ساختارهای مبتنی بر DNA با کیفیت تشخیص مولکولی توسعه فراوانی یافته است اما با این حال مفهوم نانو الکترونیک مولکولی مبتنی بر DNA موضوعی است که هنوز با چالش هایی روبه رو است و مطالعات فراوانی بر روی آن در حال شکل گیری است. با این توصیف، هدف از مطالعه حاضر بررسی خواص الکتریکی مولکول DNA است.

**روش بررسی:** مطالعه رفتار الکتریکی ساختارهای بلوری دارای نقص در قالب نظریه جایگزیدگی اندرسون ممکن است. در مطالعه حاضر نیز با اساس قرار دادن این نظریه از روش ماتریس انتقال و طول جایگزیدگی به منظور بررسی رفتار الکتریکی DNA بهره می گیریم.

**یافته ها:** در پژوهش حاضر، طول جایگزیدگی توابع موج الکترونی به ازای مقادیر متفاوت انرژی و در حضور اختلال هایی با شدت های متفاوت محاسبه شد. مطالعه حاضر که بر مبنای تعمیم مدل دوزنجیره ای DNA به مدل نزدیک به واقعیت سه زنجیره ای انجام گرفته است، نشان می دهد در حضور اختلال وارد شده، در گستره خاصی از انرژی می توانیم شاهد گذار عایق-رسانا در DNA باشیم و در نتیجه مولکول DNA همانند رساناها قابلیت انتقال الکترون را خواهد داشت.

**نتیجه گیری:** در پژوهش حاضر، مدل سه زنجیره ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می دهد در مقایسه با مدل دوزنجیره ای، مدل سه زنجیره ای شرایط مناسب تری را برای گذار عایق-رسانا فراهم می کند. نتایج این مقاله می تواند راهگشای توسعه ساخت نانو ابزارهای الکترونیک مولکولی باشد.

**واژه های کلیدی:** نانو الکترونیک مولکولی، مولکول DNA، نظریه جایگزیدگی اندرسون، گذار عایق - رسانا

سهراب بهنیا<sup>۱</sup>  
جاوید ضیائی<sup>۲</sup>  
حمید مولایی نسب<sup>۳</sup>  
مهدی خداوردی زاده<sup>۴</sup>

۱. دانشیار فیزیک، گروه فیزیک دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران
۲. دانشجوی دکتری فیزیک، گروه فیزیک دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران
۳. کارشناس ارشد، گروه فیزیک دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران
۴. مربی مهندسی اپتیک و لیزر، گروه مهندسی برق دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

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

## مقدمه

مطالعه قرار گرفته است که با توجه به قرابت تعریف آن در تئوری جایگزیدگی اندرسون، نمای لیپانوف کوانتومی که کمیتی برای بررسی وقوع آشوب در سیستم‌های کوانتومی است، تعریف می‌شود [۱۶].

نظریه جایگزیدگی، خواص رسانایی مواد را در حضور ناخالصی تحلیل می‌کند از این دیدگاه، سه رژیم انتقال وجود دارد: حالت فلزی، جایگزیده و بحرانی، در مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی، زمانی که بی‌نظمی تا آستانه یک مقدار بحرانی افزایش یابد، تمام حالت‌های الکترونی تبدیل به عایق می‌شوند بنابراین این سیستم‌ها می‌توانند با تغییر شدت بی‌نظمی تحت گذار عایق-رسانا قرار بگیرند [۱۷].

به‌طور کلی مدل‌های متفاوتی برای DNA ارائه شده‌است که در ارتباط با جایگزیدگی اندرسون اغلب از مدل دوزنجیره‌ای و با صرف نظر کردن از حرکات پیچشی آن و با در نظر گرفتن برهمکنش با نزدیک‌ترین همسایه‌ها استفاده می‌شود (شکل ۱) که در این مدل، دو رشته DNA نسبت به یکدیگر موازی ولی قطبیت آن‌ها مخالف یکدیگر است همچنین بازها در میان دو رشته قرار گرفته و به‌وسیله پیوندهای هیدروژنی ضعیف به یکدیگر متصل‌اند. این زنجیره‌ها ساختاری نسبتاً منظم دارند به آن معنی که مولکول DNA دارای اسکلتی (زنجیره قند-فسفات) با یک الگوی منظم و تکرار شونده یک‌بعدی است که در فیزیک به‌عنوان کریستال-های تک‌بعدی شناخته می‌شوند. علاوه بر این اسکلت با تکرار متفاوت اتم‌ها، DNA دارای ساختار غیرمنظم نیز هست به‌طوری‌که بخش نامنظم (گروه‌های جانبی) به‌وسیله بازهای متصل به قند به‌وجود می‌آید و در طول زنجیره ایجاد توالی می‌کند که این توالی ساختار اولیه DNA را ایجاد می‌کند [۱۸]. بنابراین برای نزدیک شدن به مدل واقعی بایستی این ساختارهای غیرمنظم را نیز در نظر گرفت. محققان این بی‌نظمی را به‌عنوان یک اختلال کوچک در الگوی منظم اسکلت در نظر می‌گیرند و تئوری اختلال را برای بررسی هرچه بهتر DNA به‌کار می‌برند [۱۹].

از آنجایی که بررسی حالت‌های جایگزیده و خواص گذارها با یک اثر کوانتومی خالص توضیح داده می‌شود، در این مطالعه سعی می‌کنیم نتایج حاصل از گذار را برای یک سیستم یک‌بعدی جفت‌شده سه‌زنجیره ای DNA، شامل دوزنجیره منظم (گروه قند و فسفات، زنجیره اول و آخر) و یک زنجیره مختل‌شده (توالی جفت‌بازها، زنجیره وسط) با استفاده از روش ماتریس انتقال محاسبه کرده و گذار عایق-رسانا را به ازای ضرایب مختلف برهم‌کنش بین زنجیره‌ها بررسی کنیم و نتیجه را با مدل دوزنجیره‌ای مقایسه نماییم. لذا در قسمت اول، مدل به‌کاررفته در این مقاله را توضیح خواهیم داد سپس در قسمت دوم، نتایج حاصل از به‌کارگیری روش ماتریس انتقال را ارائه خواهیم کرد و در نهایت نتیجه‌گیری

ادغام فناوری نانو با علوم زیستی و مهندسی زیستی باعث ایجاد پیشرفت‌های بسیار زیادی در ساخت دستگاه‌های با فناوری نانو شده است، لذا از DNA با توجه به ابعاد مناسب آن به‌طور گسترده به‌شکل ساختارهای نانومقیاس استفاده شده است [۱]. هرچند تعداد زیادی از نانوساختارهای DNA ساخته شده‌است، اما تحقق نانوالکترونیک مولکولی مبتنی بر DNA هنوز هم به‌علت ناشناخته‌بودن برخی از خواص فیزیکی و شیمیایی DNA مورد چالش دانشمندان این شاخه از علم است [۲]. هدایت الکتریکی در DNA به‌دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آن به‌رغم مطالعات نظری و تجربی فراوان هنوز هم یکی از موضوع‌های جذاب و پرکاربرد برای محققان است [۳ و ۴]. داده‌های تجربی نشان می‌دهد وقتی یک پرتوی لیزر پالسی به نمونه‌ای مانند DNA تابیده شود، افزایش غیرخطی در اغتشاش جریان الکترونی به‌وجود خواهد آمد [۵]. اخیراً نظریه‌های متعددی در جهت اندازه‌گیری رسانندگی در DNA ارائه و بسط داده شده‌است که این اجازه را به محققان می‌دهد تا از DNA در ساخت نانوسیم‌ها برای به‌کارگیری در دستگاه‌های مولکولی استفاده کنند، در واقع توسعه‌های انجام‌شده محققان را قادر به محاسبه رسانندگی در DNA ساخته است [۶ و ۷]. اگرچه پدیده انتقال بار در DNA توسط الکترون‌ها و حفره‌ها امری مشخص است ولی هنوز دلیل طیف گسترده رسانندگی و عدم رسانندگی در DNAهای مختلف مشخص نشده است [۸]. در همین راستا مطالعات متعددی بر روی مولکول DNA انجام شده‌است که نشان می‌دهد خواص انتقال بار و انرژی وابسته به درجه و نوع اختلال وارد شده است [۹].

در ارتباط با پدیده انتقال بار در DNA، پورس<sup>۱</sup> و همکاران مشخصه جریان-ولتاژ غیر تعادلی جفت باز (C-G) را با متصل کردن آن به پلاتین در دمای اتاق محاسبه کردند [۱۰] از طرفی کانیریتی<sup>۲</sup> و همکاران رفتار شبه‌رسانایی DNA را با جفت‌شدگی بازها با زنجیره‌های پشتیبان قند-فسفات مشاهده کردند [۱۱]. ایگوچی<sup>۴</sup> رفتار شبه‌رسانایی DNA را با استفاده از مدل دوزنجیره‌ای نردبانی DNA نتیجه گرفت [۱۲] همچنین زنک<sup>۵</sup> و همکاران با به‌کار بردن نظریه جایگزیدگی اندرسون و در نظر گرفتن مدل دوزنجیره‌ای DNA با محاسبه طول جایگزیدگی DNA رفتار الکتریکی آن را مورد بررسی قرار دادند [۱۳]. اخیراً از آشوب کوانتومی به‌عنوان یک نظریه نوپا و جایگزین در تحلیل سیستم‌های در مقیاس نانو برای به‌دست‌آوردن نقاط بحرانی و تحلیل رفتار سیستم استفاده می‌شود [۱۴ و ۱۵]. آشوب کوانتومی به روش‌های متفاوتی مورد

1. Deoxyribonucleic acid

2. Porth

3. Cuniberti

4. Iguchi

5. Zhang

مربوطه را خواهیم داشت.

(۲)

$$H = H_1 + H_2 + H_3 + H_{1,2} + H_{2,1} + H_{2,3} + H_{3,2} = \sum_j [\epsilon_{1,j} c_{1,j}^+ c_{1,j} + (c_{1,j}^+ c_{1,j+1} + c_{1,j+1}^+ c_{1,j})] + \sum_j [\epsilon_{2,j} c_{2,j}^+ c_{2,j} + (c_{2,j}^+ c_{2,j+1} + c_{2,j+1}^+ c_{2,j})] + \sum_j [\epsilon_{3,j} c_{3,j}^+ c_{3,j} + (c_{3,j}^+ c_{3,j+1} + c_{3,j+1}^+ c_{3,j})] + \sum_j V_1 c_{2,j}^+ c_{1,j} + \sum_j V_1 c_{1,j}^+ c_{2,j} + \sum_j V_2 c_{3,j}^+ c_{2,j} + \sum_j V_2 c_{2,j}^+ c_{3,j}$$

### توصیف مدل دو و سه زنجیره‌ای DNA

در این مدل، DNA را به صورت دوزنجیره که یکی زنجیره مربوط به قند-فسفات (منظم) و زنجیره دیگر مربوط به جفت بازها (مختل شده) خواهد بود در نظر می‌گیرند (شکل ۱). همچنین به دلیل برهم کنش‌های متفاوت زنجیره‌ها در مولکول DNA در اینجا ضرایب برهم کنش در هر زنجیره و ضریب برهم کنش بین دوزنجیره متفاوت اختیار می‌شود.

تحول تابع موج یک سیستم تنگ‌بست دوزنجیره‌ای جفت‌شده با هامیلتونی زیر [۱۰] توصیف می‌شود.

(۱)

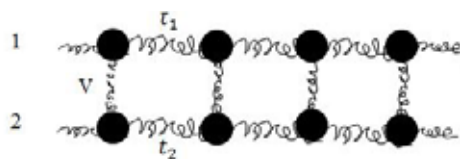
$$H = H_1 + H_2 + H_{2,1} + H_{1,2} = \sum_j [\epsilon_{1,j} c_{1,j}^+ c_{1,j} + t_1 (c_{1,j}^+ c_{1,j+1} + c_{1,j+1}^+ c_{1,j})] + \sum_j [\epsilon_{2,j} c_{2,j}^+ c_{2,j} + t_2 (c_{2,j}^+ c_{2,j+1} + c_{2,j+1}^+ c_{2,j})] + \sum_j V c_{2,j}^+ c_{1,j} + \sum_j V c_{1,j}^+ c_{2,j}$$

که در رابطه بالا  $H_1, H_2$  به ترتیب هامیلتونی زنجیره‌های ۱، ۲ و جملات بعدی جفت‌شدگی بین این زنجیره‌ها را نشان می‌دهند. به طوری که  $\epsilon_{i,j}$  انرژی پتانسیل مربوط به زنجیره  $i$  ام و موقعیت  $j$  ام است که در زنجیره دوم به صورت تصادفی و به صورت یکنواخت در بازه  $[-W/2, W/2]$  که  $W$  مقدار اختلال وارد شده است، انتخاب می‌شود و برای زنجیره دیگر این مقدار غیر تصادفی و ثابت در نظر گرفته می‌شود. همچنین  $t_1, t_2$  ضرایب برهم کنش نزدیک‌ترین همسایه‌ها در هر زنجیره خواهد بود و  $V_1$  نیز ضرایب برهم کنش بین زنجیره‌های ۱، ۲ و  $c_j^+$  و  $c_j$  نیز عملگرهای خلق و فنا الکترون در موقعیت  $j$  ام هستند. تعمیم مدل دوزنجیره به مدل سه‌زنجیره‌ای DNA (شکل ۲) با استفاده از هامیلتونی (۲) مشخص می‌گردد.

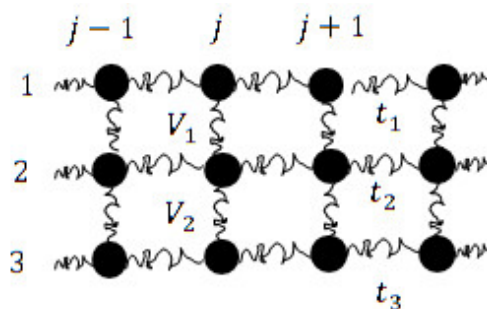
که  $H_3$  هامیلتونی زنجیره سوم و  $V_1, V_2$  به ترتیب برهم‌کنش بین زنجیره‌های (۱-۲) و (۲-۳) هستند و بقیه کمیات به‌مانند رابطه ۱ تعریف می‌شوند.

### روش بررسی

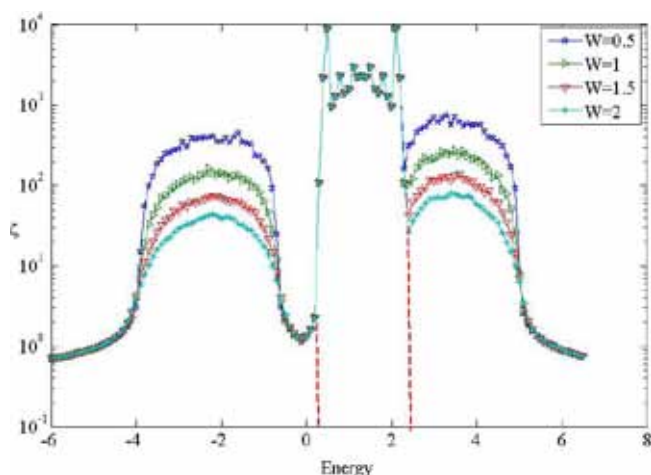
در این قسمت نتایج حاصل از به‌کارگیری روش ماتریس انتقال را در محاسبه طول جایگزیدگی شبکه DNA ارائه می‌دهیم. حالت‌های جایگزیده و گسترده با مشخصه کوانتومی پخش یک الکترون بیان می‌شوند. مطابق قضیه بلوخ تابع موج الکترون در یک شبکه کریستالی کاملاً منظم به صورت گسترده در سیستم پخش می‌شود که این باعث می‌شود سیستم یک رفتار فلزی از خود نشان دهد، اما طبق نظریه جایگزیدگی اندرسون زمانی که اختلال القاشده به شبکه بلوری به قدر کافی مؤثر باشد، تابع موج الکترون از ناخالصی‌هایی که به صورت تصادفی توزیع شده‌اند، پراکنده می‌شود و برخوردهای دوطرفه بین مؤلفه‌های پراکنده‌شده تابع موج را در فاصله‌های دور از بین برده و حالت‌های جایگزیده ایجاد می‌کند. این نوع جایگزیدگی موجب خلق عایق می‌شود و در نتیجه سیستم می‌تواند گذار رسانا-عایق را تجربه کند [۲۰]. یکی از روش‌های محاسبه طول جایگزیدگی روش ماتریس انتقال است. ماتریس انتقال روشی عددی است که برای بررسی محیط‌های بی‌نظم،



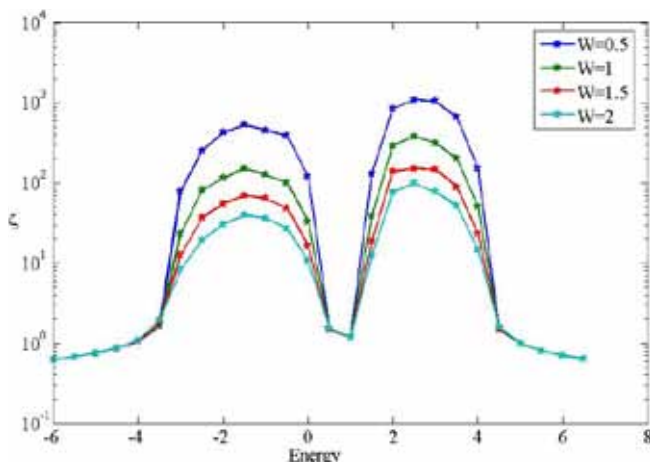
شکل ۱: نمایش DNA دوزنجیره‌ای



شکل ۲: نمایش DNA سه‌زنجیره‌ای



شکل ۳: محاسبه طول جایگزیدگی برحسب انرژی برای مولکول سه‌زنجیره‌ای DNA برای مقادیر مختلف مقدار قدرت اختلال تصادفی زنجیره دوم



شکل ۴: محاسبه طول جایگزیدی بر حسب انرژی برای مولکول دوزنجیره‌ای DNA برای مقادیر مختلف مقدار قدرت اختلال تصادفی زنجیره دوم

زنجیره اول در نظر گرفته شده است. همچنین ضرایب برهم کنش بین زنجیره‌ها به دلیل تشابه ساختاری برابر با  $V_1 = V_2 = 2$  در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که از شکل (۳) پیداست هرچه مقدار قدرت اختلال تصادفی زنجیره دوم کاهش می‌یابد این کاهش مانع پدیده جایگزیدی تابع موج در DNA می‌گردد و باعث می‌شود که تابع موج الکترون در کل سیستم پخش شود و DNA بتواند گذار عایق رسانا را در مقادیر انرژی مختلفی تجربه کند.

همچنین محاسبات برای مولکول دوزنجیره‌ای DNA برای تمام مقادیر شکل (۳) انجام شده است که طول جایگزیدی بر حسب انرژی برای مقادیر مختلف قدرت اختلال تصادفی زنجیره دوم در شکل (۴) را نشان می‌دهد [۱۳]. با توجه به شکل (۴) در اینجا نیز طول جایگزیدی به‌ازای مقادیر کم قدرت اختلال بیشتر شده در نتیجه می‌تواند در مقادیر انرژی خاصی گذار عایق-رسانا را تجربه کند.

تفاوت عمده در مقایسه نمودارهای (۳ و ۴)، علاوه بر افزایش در مقادیر طول جایگزیدی به‌ازای انرژی‌های مختلف، مستقل شدن طول جایگزیدی شبکه DNA سه‌زنجیره‌ای از مقادیر اختلال وارد شده در بازه انرژی مشخص (خطوط منقطع) است (شکل ۳). نتایج به‌دست آمده بیانگر این است که دی‌ان‌آی واقعی شرایط مناسب‌تری برای گذار عایق-رسانا از خود نشان می‌دهد بدین معنی-که هرچه طول جایگزیدی بیشتر باشد (کاهش مقدار نمای لیاپانوف)، سیستم آشوبناک‌تر می‌گردد در نتیجه تابع موج الکترون در کل سیستم پخش می‌شود که این خود گویای انتقال بار در کل سیستم خواهد بود.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق خواص انتقال بار DNA سه‌زنجیره‌ای با به‌کارگیری تقریب تنگ‌بست در مدل اندرسون و با استفاده از روش عددی ماتریس

نقاط بحرانی و ناهای بحرانی از آن استفاده می‌شود. با استفاده از روش ماتریس انتقال، نمای لیاپانوف کوانتومی محاسبه می‌شود که یک معیار برای مقدار آشوبناک بودن سیستم‌های کوانتومی است. بدین‌صورت که هرچه مقدار نمای لیاپانوف کمتر باشد، سیستم به‌سمت یک سیستم آشوبناک میل می‌کند. با استفاده از رابطه (۱) می‌توان رابطه بازگشتی شرودینگر را برای دامنه تابع موج در موقعیت‌های مختلف نوشت:

$$\Psi_{i,j+1} = \frac{E - \varepsilon_{i,j}}{t_i} \Psi_{i,j} - \frac{V_i}{t_i} \Psi_{i+1,j} - \Psi_{i,j-1} \quad (3)$$

که ماتریس انتقال این معادله بازگشتی به‌صورت رابطه زیر است.

$$T_i = \begin{pmatrix} \frac{E - \varepsilon_{i,1}}{t_1} & -\frac{V_1}{t_1} & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -\frac{V_1}{t_2} & \frac{E - \varepsilon_{i,2}}{t_2} & -\frac{V_2}{t_2} & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -\frac{V_2}{t_3} & \frac{E - \varepsilon_{i,3}}{t_3} & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

که در اینجا  $\Gamma_L = T_L T_{L-1} T_{L-2} \dots T_2 T_1$  ماتریس انتقال کل سیستم خواهد بود. طبق قضیه اسلیدک [۲۱]، ماتریس انتقال  $\Gamma_L$  دارای تقارنی در ویژه مقادیر خود خواهد بود. براین‌اساس، زمانی که طول سیستم به سمت مقادیر بزرگ میل می‌کند ( $L \rightarrow \infty$ ) ویژه مقادیر ماتریس  $\Gamma = \left( \Gamma_L^+ \Gamma_L \right)^{\frac{1}{2L}}$  به‌سمت ویژه متقارن به‌صورت  $\exp(\pm \gamma)$  میل می‌کند که  $\gamma$ ها نشان‌دهنده ناهای لیاپانوف هستند که افزایش یا کاهش نمایی تابع موج را در سیستم نشان می‌دهند. معکوس کوچک‌ترین نمای لیاپانوف، بزرگ‌ترین طول جایگزیدی  $\xi$  تابع موج را در سیستم مشخص می‌کند [۲۲ و ۲۳].

نتایج حاصل از مطالعه خواص انتقال بار مولکول DNA سه‌زنجیره‌ای در شکل (۳) نشان داده شده است. در این محاسبه طول جایگزیدی بر حسب انرژی برای مقادیر مختلف قدرت اختلال زنجیره دوم محاسبه شده است. طول هر زنجیره ۱۰۲۴، مقدار ضریب برهم‌کنش بین نقاط شبکه زنجیره اول  $t_1 = 0.5$  و مقدار قدرت اختلال این زنجیره به‌دلیل منظم بودن ساختار آن، ثابت و برابر  $\varepsilon_1 = 0.5$  انتخاب شده است [۱۳].

برای زنجیره دوم مقدار ضریب برهم‌کنش بین نقاط شبکه  $t_2 = 1$  و مقدار قدرت اختلال تصادفی در بازه  $\varepsilon_2 \in \left[ \frac{-W}{2}, \frac{W}{2} \right]$  انتخاب می‌شود. مقادیر زنجیره سوم نیز به‌دلیل ساختاری متشابه با زنجیره اول به‌مانند

انتقال مورد بررسی قرار گرفت. هدف محاسبه طول جایگزیدگی و بررسی گذار عایق-سانا در این سیستم بود. در این مطالعه با در نظر گرفتن زنجیره مختل شده مربوط به جفت‌بازها، طول جایگزیدگی بر حسب مقادیر مختلف قدرت اختلال محاسبه شد. نتیجه حاصله نشان می‌دهد که طول جایگزیدگی با کاهش مقدار قدرت اختلال افزایش پیدا می‌کند همچنین در مدل سه‌زنجیره‌ای DNA این طول جایگزیدگی در انرژی‌های خاصی مستقل از اختلال وارد شده به شبکه DNA می‌شود و در این مقادیر انرژی، طول جایگزیدگی بیشترین مقدار را خواهد داشت. نتیجه اینکه در مدل سه‌زنجیره‌ای DNA که به مدل واقعی نزدیک‌تر است، مقادیر طول جایگزیدگی به مراتب مقادیر بیشتری نسبت به مدل دوزنجیره‌ای نشان می‌دهد و DNA راحت‌تر می‌تواند گذار عایق-سانا را تجربه کند که این خود برتری این مدل را نسبت به مدل دوزنجیره‌ای نشان می‌دهد.

## References:

1. Osakada Y, Kawai K, Fujitsuka M, Majima T. Charge transfer through DNA nanoscaled assembly programmable with DNA building blocks. *PNAS* 2006; 103: 18072–6.
2. Rawtani D, Kuntmal B, Agrawal Y. Charge transfer in DNA and its diverse modelling approaches. *Front. Life Sci.* 2016; 9: 214-25.
3. Xiang L, Palma JL, Bruot C, Mujica V, Ratner MA, Tao N. Intermediate tunnelling–hopping regime in DNA charge transport. *Nat. Chem.* 2015; 7: 221-6.
4. Wang L, Qin ZJ. Isolate extended state in the DNA molecular transistor with surface interaction. *Physica B* 2016; 482: 1-7.
5. Pal PP, Jiang N, Sonntag MD, Chiang N, Foley FE, Hersam MC, Van Duyne RP, Seideman T. Plasmon-Mediated Electron Transport in Tip-Enhanced Raman Spectroscopic Junctions. *J. Phys. Chem. Lett.* 2015; 6 (21): 4210–8.
6. Zhong J, Stocks GM. Localization/quasi-delocalization transitions and quasi-mobility-edges in shell-doped nanowires. *Nano Lett.* 2006; 6(1): 128-32.
7. Behnia S, Fathizadeh S. Modeling the electrical conduction in DNA nanowires: Charge transfer and lattice fluctuation theories. *Phys. Rev. E* 2015; 91(2): 022719.
8. Bagei VMK, Krokhin AA. Metal–insulator transition in DNA molecules induced by long-range correlations in the sequence of nucleotides. *Chaos, Solitons Fractals* 2007; 34(1): 104-11.
9. Carpena P, Bernaola-Galván P, Ivanov PC, Stanley HE. Metal–insulator transition in chains with correlated disorder. *Nature* 2002; 418(6901): 955-9.
10. Porath D, Bezryadin A, De Vries S, Dekker C. Direct measurement of electrical transport through DNA molecules. *Nature* 2000; 403(6770): 635-8.
11. Cuniberti G, Craco L, Porath D, Dekker C. Backbone-induced semiconducting behavior in short DNA wires. *Phys. Rev. B* 2002; 65(24): 241314.
12. Iguchi K. Semiconductivity and band gap of a double strand of DNA. *J. Phys. Soc. Jpn.* 2001; 70(2): 593-7.
13. Zhang W, Yang R, Zhao Y, Duan S, Zhang P, Ulloa SE. Interchain coupling induced localization/delocalization in coupled one-dimensional ordered and disordered chains. *Phys. Rev. B* 2010; 81(21): 214202.
14. Comtet A, Texier C, Tourigny Y. Lyapunov exponents, one-dimensional Anderson localization and products of random matrices. *J. Phys. A: Math. Theor.* 2013; 46(25): 254003.
15. Eilmes A. Transfer-matrix method study of charge localization lengths in tetracene crystals with chemical impurities. *Synth. Met.* 2013; 180: 16-24.
16. Haake F. Quantum signatures of chaos. USA: Springer Science & Business Media; 2013.
17. Hill A, Ziegler K. Anderson localization in a two-dimensional random gap model. *Physica E* 2014; 56: 172-6.
18. Yakushevich LV. Nonlinear physics of DNA. USA: John Wiley & Sons; 2006.
19. Zhao Y, Duan S, Zhang W. (De) localization and the mobility edges in a disordered double chain with long-range intrachain correlation and short-range interchain correlation. *J. Phys.: Condens. Matter* 2012; 24(24): 245502.
20. Anderson PW. Absence of diffusion in certain random lattices. *Phys. Rev.* 1958; 109(5): 1492.
21. Deng CS, Xu H. Delocalization to localization transition in one-dimensional systems with long-range correlated off-diagonal disorder. *Physica E* 2012; 44(7): 1473-7.
22. Sales MO, de Moura FABF. Numerical study of the one-electron dynamics in one-dimensional systems with short-range correlated disorder. *Physica E* 2012; 45: 97-102.
23. Djeraba A, Senouci K, Zekri N. Localization–delocalization transition in two-dimensional system with correlated disorder. *Physica B* 2010; 405(6): 1558-61.