لیزر در پزشکی ۱۴۰۰/ دوره ۱۸ / شماره (۲) / صفحات ۴۳-۳۶.

مقاله پژوهشی

تأثیر دمای ناشی از تابش نور لیزر بر شار انرژی عبوری از یک زنجیره پروتئینی

نرمین سفیدکار عبدالعلی‌زاده[۱]
سمیرا فتحی‌زاده[۲]*
فاطمه نعمتی[۳]

۱- کارشناسی ارشد، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران
۲- *استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران
۳-دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

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

چکیده

مقدمه: پروتئین به‌عنوان بزرگترین درشت مولکول موجود در بدن از جمله مهم‌ترین اجزای ارگانیسم‌های زنده است که نقش بسیار اساسی و مهمی را در این سیستم‌ها دارد. این مواد از توالی زنجیره‌های آمینواسیدی تشکیل شده‌اند که براساس نوع پروتئین، تعداد این آمینواسیدها می‌تواند تا چند هزار نیز برسد. انتقال انرژی زیستی در مولکول‌های پروتئین یکی از مباحث مهم در بیولوژی می باشد که در فرایندهای بسیاری همچون انقباض عضلات، تکثیر DNA، انتقال پالس نوروالکتریک بر روی نورولما، کار با پمپ کلسیم و سدیم و غیره حیاتی است.

روش بررسی: در این کار، انتقال انرژی زیستی در مولکول‌های پروتئین مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا با در نظر گرفتن تابش لیزر، تاثیر دمای اعمال شده روی سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. با بکارگیری نظریه سیستم‌های غیرخطی، معادلات تحول سیستم و شار انرژی به‌دست‌آمده و اثر دمای اعمال شده و نیز اختلاف دمای بین دو انتهای سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است.

یافته‌ها: شارانرژی در بازه‌های زمانی مختلف شامل پیک‌هایی می‌باشد. به‌طوری‌که توالی با طول ۲۰ سایت، پیک‌های بالاتری را نسبت به دو توالی دیگر با طول‌های ۱۵۰ و ۳۰۰ نشان می‌دهد. شار انرژی نسبت به دما نیز یک‌سری نوسانات از خود نشان می‌دهد. با ثابت نگه‌داشتن دمای منبع سرد و تغییر دادن دمای منبع گرم، شاهد تغییرات شار انرژی نسبت به اختلاف دمای منبع گرم و سرد بودیم. از طرفی با تغییر همزمان و هم‌اندازه دمای منبع سرد و گرم، تغییرات شار انرژی نسبت به دمای منبع گرم را بررسی کردیم.

نتیجه‌گیری: تغییرات شارانرژی نسبت به زمان رفتار کاملا آشوبناک از خود نشان می‌دهد و با کاهش طول توالی مقدار شار انرژی افزایش می‌یابد. همچنین در این مطالعه، شاهد تاثیرات دما ناشی از تابش نور لیزر بر روی شار انرژی بودیم به‌طوری‌که مشاهده کردیم شار انرژی عبوری از سیستم در دمای ۳۴۵ کلوین به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. با اعمال گرادیان دمای متغیر، نتیجه گرفتیم که از اختلاف دمای ۱۰ درجه کلوین به بالا با کاهش طول توالی، مقدار شار انرژی افزایش می‌یابد. با اعمال گرادیان ثابت دما مشاهده کردیم که وقتی دمای منبع گرم به ۳۴۵ کلوین می‌رسد، مقدار شار انرژی به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: انتقال انرژی زیستی، تابش لیزر، مدل اصلاح شده دیویدوف، مولکول‌های پروتئین، حمام حرارتی

مقدمه

از نظر بیولوژیک فعالیت زندگی صرفاً فرایندهای تغییر، هماهنگی و ترکیب مواد بیولوژیکی، بیوانرژی یا انرژی زیستی و اطلاعات زیستی است[۱]. اطلاعات زیستی مهم‌ترین فعالیت زندگی است که تغییرات و انتقال اطلاعات زیستی همیشه همراه با انتقال انرژی زیستی در سیستم‌های زنده است. در نتیجه انتقال انرژی زیستی، یک مکانیسم اساسی برای فعالیت زندگی به حساب می‌آید[۲]. در این کار سعی می شود که تاثیر پارامترهای مختلف روی انتقال انرژی زیستی در زنجیره پروتئین مورد بررسی قرار گیرد. هدف از این کار، استفاده از پروتئین‌ها به‌عنوان یک زنجیره خودانرژی در طراحی نانوموتورهای زیستی می‌باشد. در حقیقت از دیدگاه مهندسی، پروتئین‌ها در فناوری نانو بسیار مناسب، ایده‌آل و پرکاربرد خواهند بود. نانو ابزارها می‌توانند از موتورهای پروتئینی برای حرکت‌های خطی، دورانی و حتی حرکت‌های پیچیده‌تر سه‌بعدی استفاده کنند. بیشتر موتورهای پروتئینی ملکولی کارهای مکانیکی واقعی را با انتقال فعال و یا با حرکت ملکول‌ها در سیستم سلولی انجام می‌دهند. مثالی از این پروتئین، پروتئین کینزین است که با راه‌رفتن در ریل‌های توبولین اندامك‌هایی را در مسیر سلولی انتقال می‌دهد، یا به طور مشابه، اعضای ویژه‌های از خانواده میوزین محموله‌هایی را با استفاده فیلامنت‌های اکتین به عنوان نشانه منتقل می کنند.

انرژی‌های زیستی عمدتاً از طریق انرژی آزادشده در هیدرولیز آدنوزین تری‌فسفات (ATP) در سیستم‌های زنده تامین می‌شوند[۳]. مکانیسم اساسی این انرژی آزاد شده بر مبنای مولکولی قابل درک نیست. با این حال به‌خوبی قابل درک است که این انرژی زیستی باید از جایی به جای دیگر یا از یک مکان به مکان دیگر در مولکول‌های پروتئین برای انجام فرایندهای بیولوژیکی منتقل شود[٤-٥]. بسیاری از فرایندهای بیولوژیکی سیستم‌های زنده مانند انقباض عضله، تکثیر DNA، انتقال پالس نوروالکتریک برروی نورولما، کار با پمپ‌های کلسیم و پمپ‌های سدیم و... با انتقال انرژی زیستی از طریق مولکول‌های پروتئین در ارتباط هستند[٦]. با اینکه ماهیت پروتئین‌ها توسط رومی‌ها از اسم آلبومین به‌علت پروتئین یافت شده در سفیده تخم‌مرغ گرفته شده است، اما تنها در اواخر قرن هجدهم بود که اولین درک از معنای واقعی آنها قابل تشخیص شد[۷]. پروتئین اولین بار توسط شیمیدان هلندی جراردوس جوهانز مولدر توصیف و توسط شیمیدان سوئدی جونز جاکوب برزلیوس در سال ۱۸۳۸ نامگذاری شد[۸]. مولکول پروتئین یک سیستم پیچیده است که توسط یک سطح انرژی بالقوه ناهموار و پویایی بسیار ناهماهنگ توصیف می‌شود[۹]. ساختار آنها به‌گونه‌ای است که از بیش از ۲۰ نوع بلوک ساختمانی جداگانه به نام اسید آمینه‌ها ساخته شده‌اند[۱۰]. هر اسید آمینه دوباره توسط یک گروه آمینو (NH_2)، یک گروه کربوکسیل (COOH) و یک گروه جانبی ساخته می‌شود. اسیدآمینه‌ها برای شکل‌گرفتن در طول زنجیره‌های باقی‌مانده که یک مولکول پروتئین را تشکیل می‌دهند، پلیمری می‌شوند. وقتی دو آمینواسید به هم متصل می‌شوند یک مولکول آب و یک پیوند پپتیدی را آزاد می‌کنند. وقتی که زنجیره پلی‌پپتیدی شکل می‌گیرد می‌تواند با ترکیبات سه‌بعدی پیچیده مختلف ادغام شود. پروتئین‌ها را می‌توان به‌طورکلی در چهار سطح ساختاری زیر تعریف کرد:

۱) ساختار اولیه، توالی پروتئین را که به صورت رشته‌ای از اسیدآمینه‌ها می‌باشد، توصیف می‌کند. این پروتئین‌ها پلیمرهایی خطی از اسیدآمینه‌ها هستند که با پیوند پپتیدی به هم متصل شده‌اند.

۲) ساختار ثانویه، به نظم‌های موضعی گفته می‌شود که پروتئین درحین تاشدگی به خود می‌گیرد و به دو دسته ورقه‌های مارپیچ آلفا و صفحات چین‌دار بتا تقسیم می‌شود.

۳) ساختار سوم، به حالت سه‌بعدی که پروتئین بعد از پیچش به خود می‌گیرد، گفته می‌شود که در آن با تاخوردگی بیشتر، صفحات و مارپیچ‌های ساختار دوم به صورت کروی در می‌آیند.

٤) ساختار چهارم، فقط برای برخی پروتئین‌ها قابل استفاده است، هم‌چنین برهم‌کنش زیرواحدهای پروتئینی جداگانه برای تشکیل یک واحد عملکردی است[۱۱].

روش بررسی

تحریک ارتعاشی و تغییرشکل شبکه اسیدآمینه یک سالیتون را تشکیل می‌دهد که یک شبه‌ذره است که می‌تواند در طول مسافت‌های ماکروسکوپی در امتداد زنجیره‌های مولکولی با حفظ شکل، انرژی، حرکت و سایر خصوصیات شبه‌ذره‌اش حرکت کند. این نظریه دیویدوف از انتقال انرژی زیستی در مولکول‌های پروتئین می‌باشد که

اولین بار توسط دیویدوف در سال ۱۹۷۰ پیشنهاد شد[۱۲]. مدل دیویدوف با مشکلاتی نیز همراه بود. مشکلات مربوط به مدل دیویدوف از جمله پایه و صحت نظریه، خصوصیات کلاسیکی و کوانتومی، ثبات حرارتی و طول‌عمر سالیتون دیویدوف، توسط دانشمندان زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است[۱۳]. این بدان معناست که باید یک عبارت برهم‌کنش جدید به هامیلتونی دیویدوف اضافه شود. هامیلتونی مولکول‌های پروتئین در مدل اصلاح‌شده که به مدل پنگ معروف است، به‌صورت زیر نشان داده می‌شود [۱۴]:

$$H = H_{ex} + H_{ph} + H_I \qquad (۱)$$

که در آن H_{ex} نشانگر این است که یک اکسایتون فرانکل از نوع بوزون با استفاده از انرژی آزادشده در هیدرولیز ATP در مولکول‌های پروتئین برانگیخته می‌شوند[۱۴و۱۵]:

$$H_{ex} = \sum_n [\varepsilon_0 B_n^\dagger B_n - J(B_n^\dagger B_n + B_n B_n^\dagger)] \qquad (۲)$$

H_{ph} نشانگر ویژگی‌های هارمونیک اسیدآمینه‌های باقی‌مانده است [۱۴].

$$H_{ph} = \sum_n [\frac{P_n^2}{2M} + \frac{1}{2} W (u_n - u_{n-1})^2] \qquad (۳)$$

H_I نشانگر تعامل بین دو حالت حرکت است[۱۴].

$$H_I = \sum_n [\chi_1 (u_{n+1} - u_{n-1}) B_n^\dagger B_n + \chi_2 (u_{n+1} - u_n)(B_{n+1}^\dagger B_n + B_n^\dagger B_{n+1})] \qquad (٤)$$

که پارامترهای مورد استفاده در این روابط در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱: پارامترهای مورد استفاده [۱۵]

پارامتر	واحد	مقدار
ε_0	eV	0.2035
χ_1	N	6.2×10^{-11}
χ_2	N	$(10\text{-}18)\times10^{-12}$
M	Amu	115
W	$\frac{N}{m}$	13
J	eV	9.68×10^{-4}

در روابط بالا B_n و $B_n^\dagger$ عملگرهای خلق و نابودی برای اکسایتون هستند. u_n و p_n به‌ترتیب عملگرهای جابه‌جایی و حرکت آمینواسیدهای باقی‌مانده در سایت n هستند. ε_0 انرژی اکسایتون است. χ_1 و χ_2 ثابت‌های غیرخطی جفت‌شدگی هستند. M جرم اسیدآمینه و W ثابت الاستیک، J انرژی برهم‌کنش دوقطبی دوقطبی مابین اسیدآمینه‌های همسایه است [۱۵].

رهیافت مورداستفاده در این مقاله به‌منظور مطالعه تئوری سیستم آشوب می‌باشد. در این صورت معادلات تحول سیستم به‌فرم زیر استخراج می‌شود و به معادلات دیفرانسیل مرتبه اول تقلیل داده می‌شود تا معادلات ode داشته باشیم.

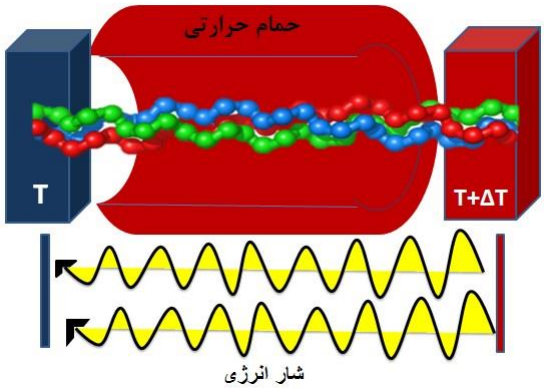
$$\ddot{u}_n = \sum_n [\frac{W}{M}(u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}) + \frac{\chi_1}{M}(B_{n+1}^\dagger B_{n+1} - B_{n-1}^\dagger B_{n-1}) + \frac{\chi_2}{M}(B_{n+1}^\dagger B_n + B_n^\dagger B_{n+1} - B_n^\dagger B_{n-1} - B_{n-1}^\dagger B_n)] \qquad (۵)$$

$$\dot{B}_n = -\frac{i}{\hbar}\sum_n \{-J(B_{n-1} + B_{n+1}) + \varepsilon_0 B_n + \chi_1(u_{n+1} - u_{n-1})B_n + \chi_2[(u_n - u_{n-1})B_{n-1} + (u_{n+1} - u_n)B_{n+1}]\} \qquad (۶)$$

در واقع ممکن است با استفاده از یک هامیلتونی پیشرفته‌تر بتوانیم یک سالیتون با پایداری حرارتی مناسب و طول عمر مناسب به‌دست آوریم[۱۶]. بنابراین این سالیتون یک حامل احتمالی برای انتقال انرژی زیستی در مولکولهای پروتئین است[۱۷]. دما یکی از فاکتورهای مهم در فعالیت‌های بیولوژیکی سیستم‌های زنده است. در

این کار سعی شده است که با تابش نور لیزر بر سیستم پروتئینی، تاثیر دما روی سیستم بررسی شود. لیزرهای مورد استفاده در پدیده‌های فوتوبیولوژیک، اغلب لیزرهای کم‌توان با طول موج‌های در محدوده نور مرئی هستند. عامل کلیدی در اثر فوتوبیولوژیك لیزرهای کم‌توان، فعال‌شدن آنزیم‌ها است که منجر به قویترشدن فرایندهای بیوسنتیك و بیوانرژتیك در سلول می‌گردد.

اثر اعمال دمای ناشی از تابش لیزر در قالب یک حمام گرمایی به سیستم مشخص می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱) قابل مشاهده است، دو انتهای پروتئین در اتصال با حمام گرمایی قرار گرفته است. حمام گرمایی اختلاف دما بین دو انتها ایجاد کرده است. یک طرف با منبع سرد و یک طرف با منبع گرم در تماس است لذا شار انرژی از ناحیه‌ای با دمای بیولوژیکی بالا به ناحیه‌ای با دمای بیولوژیکی پایین انتقال یافته است، تا هر دو ناحیه هم‌دما شود و سالیتون برانگیخته شده در امتداد زنجیره پروتئینی به حالت پایدار رسیده است.



شکل ۲: رفتار سالیتون‌های برانگیخته شده در امتداد زنجیره پروتئینی در داخل حمام گرمایی

یافتـــه‌ها

برای مطالعه انتقال انرژی در مولکول‌های زیستی باید شار انرژی را محاسبه کنیم. شار انرژی با استفاده از معادله پیوستگی به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$I = -\frac{i}{\hbar}\sum_n[-J\left(B_n^{\dagger}B_{n-1} - B_{n-1}^{\dagger}B_n + B_n^{\dagger}B_{n+1} - B_{n+1}^{\dagger}B_n\right) - \chi_2(u_n - u_{n-1})B_{n-1}^{\dagger}B_n + \chi_2(u_{n+1} - u_n)\left(B_n^{\dagger}B_{n+1} - B_{n+1}^{\dagger}B_n\right)] \quad (۷)$$

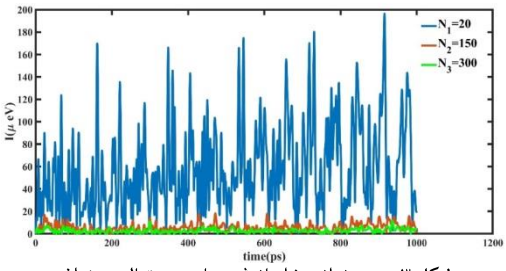
در این کار، طول توالی زنجیره پروتئینی N=150 [۱۸] در نظر گرفته شده است و تاثیر پارامترهای مختلف از جمله دما و گرادیان دما بر روی سیستم بررسی می‌شود. همچنین از ترموستات نوزهوور برای شبیه سازی اعمال دما بر روی سیستم استفاده می‌شود که معادله حاکم بر آن به‌صورت زیر است:

$$\dot{\xi} = \frac{1}{M}\left(\sum_n m\dot{y}^2 - N\,K_B T_0\right) \quad (۸)$$

که در آن ξ یک ضریب اصطکاک ترمودینامیکی را توصیف می‌کند، T_0 دمای سیستم و K_B ثابت بولتزمن و M برابر ۱۰۰۰، ثابت ترموستات است [۱۹].

سری زمانی

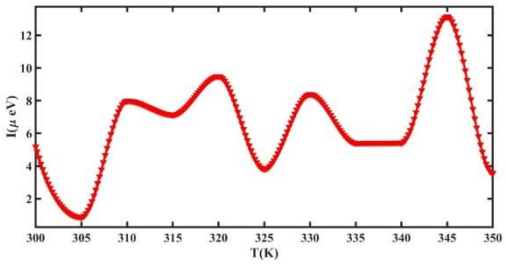
در شکل ۲، سری زمانی شار انرژی برای سه توالی با طول‌های N1=20 و N2=150 و N3=300 رسم شده است. تغییرات شار انرژی نسبت به زمان رفتار کاملا آشوبناک از خود نشان می‌دهد. این نمودار شامل پیک‌هایی است که ماکزیمم شار عبوری در زمان‌های مختلف را مشخص می‌کند. این پیک‌ها کاملاً به صورت غیرمتناوب و نامنظم نسبت به زمان ظاهر می‌شوند. در این نمودار مشاهده می‌شود که در توالی با طول کوچکتر یعنی N1=20 مقدار شار انرژی بیشتر است. به‌عنوان مثال شار انرژی در زمان 900 پیکو ثانیه، برای N1=20، 100 میکرو الکترون ولت، برای N2=150، 20 میکرو الکترون ولت و برای N3=300، حدودا 5 میکروالکترون ولت است. این نشان‌دهنده این است که در بازه‌های زمانی مختلف مقدار شار انرژی با افزایش طول توالی، کاهش می‌یابد



شکل ۳: سری زمانی شار انرژی برای سه توالی مختلف

اثر دما

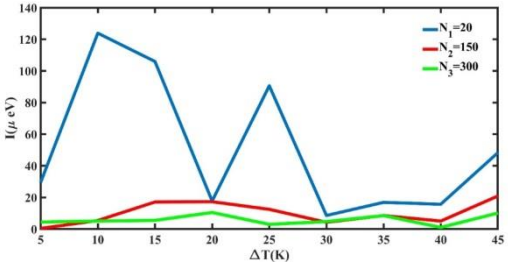
یکی از پارامترهای موثر روی ترابرد انرژی در سیستم پروتئینی، اثر دما است. شکل ۳، تغییرات شار انرژی عبوری از سیستم پروتئینی را نسبت به دمای منبع نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است شار انرژی نسبت به دما یک سری نوسانات از خود نشان می‌دهد، به‌طوری که بیشترین شار عبوری در دمای حدود 345 کلوین و کمترین شار عبوری در دمای حدود 305 کلوین است و در بازه دمایی بین (340- 335) کلوین، مقدار شار انرژی ثابت و برابر 6 میکروالکترون ولت است.



شکل۳: تغییرات شار انرژی نسبت به دما برای توالی با طول ۱۵۰

اثر گرادیان متغیر دما

چون ممکن است بین دو انتهای سیستم زیستی یک اختلاف دمایی برقرار شود، پس اثر اختلاف دما بین دو نقطه را در نظر می‌گیریم. این کار را از طریق اعمال گرادیان دما روی سیستم مشخص می‌کنیم. جهت اعمال گرادیان دما روی سیستم، ۵ سایت اول سیستم را به یک منبع سرد و ۵ سایت آخر به یک منبع گرم متصل شده است. دمای منبع سرد را در مقدار ۳۰۵ درجه کلوین ثابت نگه می‌داریم و دمای منبع گرم را از ۳۱۰ درجه کلوین تا ۳۵۰ درجه کلوین تغییر می‌دهیم.

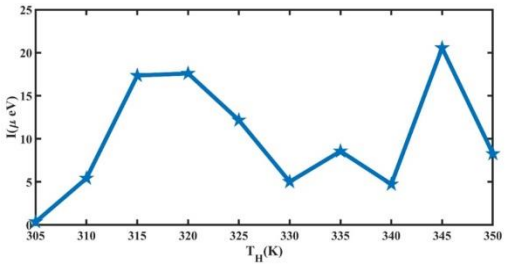


شکل ٤: تغییرات شار انرژی نسبت به اختلاف دمای دو منبع برای سه توالی مختلف

در شکل ۴، تغییرات شار انرژی نسبت به اختلاف دمای منبع گرم و سرد، را برای سه توالی با طول‌های N1=20 و N2=150 و N3=300 رسم کردیم. مشاهده شد که برای توالی با طول N1=20، به‌ازای اختلاف دمای ۱۰ درجه کلوین بیشترین مقدار شار انرژی و به‌ازای اختلاف دمای ۳۰ درجه کلوین، کمترین مقدار شار انرژی وجود دارد. برای توالی با طول N2=150، به‌ازای اختلاف دمای ۴۵ درجه کلوین، بیشترین شار انرژی که مقدار آن برابر ۲ میکرو الکترون ولت است، مشاهده شد و به‌ازای اختلاف دمای ۵ درجه کلوین کمترین شار انرژی که مقدار آن برابر صفر است، مشاهده شد. برای توالی با طول N3=300، بیشترین مقدار شار انرژی به‌ازای اختلاف دماهای ۲۰ و ۳۵ و ۴۵ درجه کلوین و کمترین مقدار شار انرژی به‌ازای اختلاف دماهای ۴۰ و ۲۵ درجه کلوین وجود دارد. هم‌چنین مشاهده شد که به‌ازای اختلاف دماهای ۳۰ تا ۳۵ درجه کلوین مقدار شار انرژی برای دو توالی با طول N2=150 و N3=300 به طور یکسان تغییر می‌کند. به‌طور کلی بیشترین مقدار شار انرژی مربوط به توالی با طول N1=20 و کمترین مقدار شار انرژی مربوط به توالی با طول N3=300 است. بنابراین به این نتیجه می‌رسیم که از اختلاف دمای۱۰ درجه کلوین به بالا، با افزایش طول توالی مقدار شار انرژی کاهش می‌یابد. مثلاً به‌ازای اختلاف دمای ۱۵درجه کلوین، برای توالی با طول N1=20 مقدار شار انرژی برابر ۱۱۰، برای توالی با طول N2=150 مقدار شار انرژی نزدیک به ۲۰ و برای توالی با طول N3=300 مقدار شار انرژی ۵ میکروالکترون ولت است.

اثر گرادیان ثابت دما

در ادامه نتایج با ثابت نگه‌داشتن گرادیان دما یعنی افزایش هم‌زمان و هم‌اندازه دمای منبع گرم و سرد شاهد تغییرات شار انرژی عبوری از سیستم هستیم. همان‌طور که در شکل (۵) قابل مشاهده است، در بازه دمایی ۳۱۵ تا ۳۲۰ درجه کلوین مقدار شار انرژی یکسان و تقریبا برابر با ۱۷ میکروالکترون ولت است. در ۳۴۵ درجه کلوین بیشترین مقدار شار انرژی و در ۳۱۰ و ۳۳۰ و ۳۴۰ درجه کلوین کمترین مقدار شار انرژی وجود دارد.



شکل ۵: تغییرات شار انرژی نسبت به دمای منبع گرم (N=150)

بحث و نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تغییرات شار انرژی در یک سیستم پروتئینی پرداختیم. قبلاً، تاثیر تابش نور لیزرهای کم‌توان روی سیستم‌های زیستی مورد بررسی قرار گرفته است[21-20]. در این کار، اثر تابش نور لیزر در غالب تغییر دما روی سیست پروتئینی بررسی می‌شود. دما یکی از فاکتورهای کلیدی است که روی عملکرد پروتئین تاثیر بسزایی دارد[22]. وابستگی دمایی آمینواسیدها مستقیماً از ساختار پروتئین قابل درک بوده است[23]. شار انرژی عبوری از یک سیستم پروتئینی نسبت به زمان شامل پیک‌هایی است به‌طوری که توالی با طول کوچکتر پیک‌های بالاتری نسبت به توالی‌های بزرگتر نشان می‌دهد. دما بعنوان یک فاکتور کلیدی می تواند تاثیر به‌سزایی روی عملکرد سیستم‌های زیستی داشته باشد. در این کار با تابش نور لیزر به سیستم، می‌توان دمای سیستم را تغییر داد و یا حتی در دو انتهای سیستم گرادیان دما ایجاد کرد. تاثیر دمای ناشی از تابش نور لیزر را می‌توان با اعمال یک ترموستات شبیه‌سازی کرد. تغییرات شار انرژی نسبت به دما می تواند تاثیر پارامتر دما بر روی شار انرژی عبوری از سیستم را نشان دهد. در دمای ۳۴۵ درجه کلوین مقدار شار انرژی بیشینه و در دمای ۳۰۵ درجه کلوین مقدار شار انرژی کمینه است. با بررسی تغییرات شار انرژی برحسب گرادیان دما و با فرض اینکه دمای منبع سرد $T_C = 305(K)$ و دمای منبع گرم $T_H = [310 - 350](K)$ است، مشاهده کردیم که در دمای ۳۳۵ درجه کلوین کمترین شار عبوری و در دماهای ۳۲۰ تا ۳۲۵ درجه کلوین بیشترین شار عبوری وجود دارد. بنابراین می توان محدوده ای از دماها که در آن بیشترین و کمترین شار انرژی از سیستم پروتئینی عبور می‌کند را به‌دست آورد که در فرایندهای بیولوژیکی و یا حتی بیومکانیکی کاربرد زیادی دارد. یکبار دیگر دمای منبع گرم و سرد را همزمان با هم تغییر دادیم و تغییرات شار انرژی نسبت به دمای منبع گرم را بررسی کردیم. مشاهده کردیم که در دمای ۳۴۵ درجه کلوین مقدار شار انرژی بیشینه است. در حالت کلی از تغییر دمای سیستم پروتئینی به‌واسطه تابش نور لیزر می‌توان در فرایندهای بیولوژیکی بسیاری از جمله انقباض عضلات، تکثیر DNA، کار با پمپ‌های کلسیم و سدیم، انتقال پالس نوروالکتریک بر روی نورولما و... استفاده کرد.

References:

1. Pang XF. The theory of bio-energy transport in the protein molecules and its properties. Physics of Life Reviews, 2011; 8(3):264-86.

2. Xiao-Feng P. The bio-energy transport in the protein molecules and its experimental validations of correctness. 2018.

3. Pang XF, Yu JF, Liu MJ. Changes of properties of the soliton with temperature under influences of structure disorder in the α-helix protein molecules with three channels. Molecular Physics, 2010; 108(10):1297-315.

4. Daniel M, Deepamala K. Davydov soliton in alpha helical proteins: higher order and discreteness effects. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 1995; 221(1-3):241-55.

5. Čevizović D, Galović S, Ivić Z. Nature of the vibron self-trapped states in hydrogen-bonded macromolecular chains. Physical Review E, 2011; 84(1):011920.

6. Pang XF. Theory of bio-energy transport in protein molecules and its experimental evidences as well as applications (I). Frontiers of Physics in China, 2007; 2(4):469-93

7. Behnia S, Fathizadeh S, Akhshani A. DNA Spintronics: Charge and Spin Dynamics in DNA Wires. The Journal of Physical Chemistry C, 2016; 120 (5): 2973-2983.

8. Hartley H. Origin of the word 'protein'. Nature, 1951; 168(4267):244-.

9. Moritsugu K, Miyashita O, Kidera A. Vibrational energy transfer in a protein molecule. Physical Review Letters, 2000; 85(18):3970.

10. Pang XF. The mechanism and properties of bio-photon emission and absorption in protein molecules in living systems. Journal of Applied Physics, 2012; 111(9):093519.

11. Xiao-Feng P, Xiang-Rong C. Distribution of vibrational energy levels of protein molecular chains. Communications in Theoretical Physics, 2001; 35(3):323.

12. Xiao-Feng P, Yu-Hui L. Stabilization of the soliton transported bio-energy in protein molecules in the improved model. Communications in Theoretical Physics, 2004; 41(3):470.

13. Xiao-Feng P, Mei-Jie L. Features of Motion of Soliton Transported Bio-energy in Aperiodic α-Helix Protein Molecules with Three Channels. Communications in Theoretical Physics, 2009; 51(1):170.

14. Pang XF, Liu MJ. The Influences of Temperature and Chain–Chain Interaction on Features of Solitons Excited in A-Helix Protein Molecules with Three Channels. International Journal of Modern Physics B, 2009; 23(10):2303-22.

15. Pang XF, Liu MJ. The effects of damping and temperature of medium on the soliton excited in α-helix protein molecules with three channels. Modern Physics Letters B, 2009; 23(01):71-88.

16. Xiao-Feng P, Mei-Jie L. Properties of soliton-transported bio-energy in α-helix protein molecules with three channels. Communications in Theoretical Physics, 2007; 48(2):369.

17. Pang XF, Zhang HW, Luo YH. The influence of the heat bath and structural disorder in protein molecules on soliton transported bio-energy in an improved model. Journal of Physics: Condensed Matter, 2005; 18(2):613.

18. Warner JR, Knopf PM, Rich A. A multiple ribosomal structure in protein synthesis. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1963; 49(1):122.

19. Peyrard M, Bishop AR. Statistical mechanics of a nonlinear model for DNA denaturation. Physical Review Letters, 1989; 62(23):2755.

20. Marques MM, Pereira AN, Fujihara NA, Nogueira FN, Eduardo CP. Effect of low-power laser irradiation on protein synthesis and ultrastructure of human gingival fibroblasts. Lasers in Surgery and Medicine, 2004;34(3):260-265.

21. Lou Z, Zhang C, Gong T, Xue C, Scholp A, Jiang JJ. Wound-healing effects of 635-nm low-level laser therapy on primary human vocal fold epithelial cells: an in vitro study. Lasers in Surgery and Medicine, 2019;34(3):547-554.

22. Vanga SK, Singh A, Raghavan V. Effect of thermal and electric field treatment on the conformation of Ara h 6 peanut protein allergen. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2015;30:79-88.

23. VanDijk E, Hoogeveen A, Abeln S. The hydrophobic temperature dependence of amino acids directly calculated from protein structures. PLoS computational biology. 2015;11(5):e1004277.

.