

شارژ باتریهای کوانتومی با استفاده از تکنیک استیرپ زنجیره‌ای

مقصود سعادت‌ی نیاری^{۱*}، افسانه کمالی علی بابالو^۱، ناصر شیرخانقاه^۲

۱. دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲. دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خلخال، خلخال، ایران

پست الکترونیکی: m.saadati@uma.ac.ir

چکیده

در این مقاله، یک طرحواره برای شارژ باتریهای کوانتومی با استفاده از تکنیک استیرپ زنجیره‌ای پیشنهاد شده است. برای این کار، ابتدا یک باتری کوانتومی پنج ترازی در نظر گرفته شده و از چهار پالس برای شارژ این باتری استفاده شده است. نشان داده شده است که با تنظیم مناسب شدت بیشینه و تاخیر زمانی بین پالسها، می‌توان شرایط تکنیک استیرپ زنجیره‌ای را برقرار کرد و باتری کوانتومی پنج ترازی را به صورت مناسب شارژ نمود، طوری که بیشینه مقدار ارگوتراپی حاصل شود. در این طرحواره تغییر اندک در پارامتر پالسها شامل تاخیر زمانی بین پالسها و بیشینه مقدار پالسها تأثیر چندانی بر ارگوتراپی نهایی سیستم ندارد. همچنین نشان داده شده است که روش پیشنهادی در این طرحواره می‌تواند برای شارژ باتریهای کوانتومی بیشتر از پنج تراز نیز تعمیم داده شود.

واژه‌های کلیدی: باتری کوانتومی، شارژ، ارگوتراپی، استیرپ زنجیره‌ای

۱. مقدمه

باتریهای کوانتومی بر پایه ترمودینامیک کوانتومی کار می‌کنند که در اساس متفاوت از باتری های الکتروشیمیایی هستند. در باتریهای کوانتومی، باید فرایندهای کوانتومی همانند همدوسی و یا در هم تنیدگی در نظر گرفته شوند [۱۳-۴]. ذخیره انرژی در سیستمهای کوانتومی می‌تواند در بسترهای مختلفی همانند اتم‌های مصنوعی ابررسانا، زنجیره‌های اسپینی و کاواکهای اپتیکی [۱۶-۱۴] انجام شود که براساس فناوریهای موجود و کنترل‌های مناسب در بستر هر سامانه، ممکن است استفاده از

باتریهای کوانتومی، سیستم‌های کوانتومی هستند که توانایی ذخیره انرژی را دارند و می‌توان انرژی ذخیره شده را به صورت کار مفید از آن استخراج نمود [۳-۱]. باتریهای متداول که در حال حاضر استفاده می‌شوند، باتریهای الکتروشیمیایی هستند که انرژی شیمیایی را تبدیل به انرژی الکتریکی می‌کنند. در سالهایتمادی، کوچکتر کردن قطعات الکترونیکی به منظور استفاده و حمل آسانتر این قطعات همواره مورد توجه بوده است.

یک سامانه نسبت به بقیه سامانه‌ها براساس شرایط، برتری داشته باشد.

در اکثر رهیافتهایی که برای ساخت باتریهای کوانتومی دو ترازی پیشنهاد شده است، ذخیره انرژی یا استخراج ارگوتراپی به صورت پایدار نمی‌باشد. در این باتریها، وقتی که باتری با استفاده از میدان خارجی به حالت شارژ منتقل می‌شود، به علت نوسان جمعیت بین ترازها، باتری به صورت خود به خودی دشارژ می‌شود. برای شارژ این باتریها باید بلافاصله پس از اینکه باتری به بیشترین مقدار انرژی خود رسید، میدان خارجی قطع شود تا باتری به حالت تخلیه منتقل نشود که انجام این کار در سیستمهای واقعی چالش برانگیز است. اخیراً تکنیک گذار بی‌دررو تحریکی رامان^۱ (استیرپ) [۲۰-۱۷]، که یکی از تکنیکهای اپتیک کوانتومی برای انتقال جمعیت می‌باشد، برای شارژ پایدار باتری کوانتومی سه تراز به کار گرفته شده است [۲۱]. در این طرحواره از میدانهای پالسی برای شارژ باتری کوانتومی استفاده می‌شود که همراه با روشن شدن پالس، باتری کوانتومی به تدریج شارژ شده و بر خلاف باتریهای کوانتومی دو تراز نوسان جمعیت بین ترازها اتفاق نمی‌افتد.

باتریهای کوانتومی سه تراز انرژی بیشتری را در مقایسه با باتریهای کوانتومی دو تراز می‌توانند در خود ذخیره کنند. در طرحواره پیشنهادی در مرجع [۲۱] یک سیستم سه تراز با دو میدان خارجی اندرکنش می‌کند و انرژی سیستم از پایینترین تراز انرژی به بالاترین تراز انرژی منتقل می‌شود. روش استیرپ بر اساس قضیه بی‌دررو در مکانیک کوانتومی می‌باشد که در آن شرایط اولیه و ترتیب زمانی پالسها طوری تنظیم می‌شوند که هامیلتونی سیستم از ابتدا تا انتهای تحول زمانی، تنها در یکی از ویژه حالت‌های خود که حالت تاریک نامیده می‌شود، باقی می‌ماند. حالت تاریک شامل تراز میانی که معمولاً دارای طول عمر کوتاهی است نمی‌شود و بنابراین تکنیک استیرپ نسبت به اثر گسیل خود به خودی غیر حساس است. در روش استیرپ از تقریب بی‌دررو برای محاسبه هامیلتونی در پایه‌های بی‌دررو استفاده می‌شود و بنابراین لازم نیست که پارامترهای مربوط به

پالسها دقیقاً برابر با یک مقدار خاص باشد و در نتیجه روش استیرپ، نسبت به تغییرات شدت میدان لیزری و همچنین واکوکی فرکانس لیزری چندان حساس نیست [۲۲]. برای به کار گیری تکنیک استیرپ باید مساحت زمانی پالسها به حد کافی بزرگ باشد که در برخی از کاربردهای آزمایشگاهی ایجاد چنین پالسهایی ممکن است با محدودیت مواجه شود. در مرجع [۲۳] از روش میانبر بر گذار بی‌دررو [۲۴ و ۲۵] برای شارژ باتری کوانتومی سه تراز استفاده شده است که یک روش بهینه سازی برای تکنیک استیرپ می‌باشد و در آن به جای دو میدان خارجی، از سه میدان خارجی با مساحت زمانی کمتر نسبت به استیرپ برای شارژ باتری کوانتومی سه تراز استفاده شده است.

یکی دیگر از تکنیکهای مهم اپتیک کوانتومی که برای انتقال جمعیت در سیستمهای کوانتومی بیشتر از سه تراز به کار گرفته می‌شود تکنیک استیرپ زنجیره‌ای [۲۶] می‌باشد که این تکنیک برای سیستمها با الگوی جفت شدگی زنجیره‌ای به صورت $|N\rangle \leftrightarrow \dots \leftrightarrow |2\rangle \leftrightarrow |1\rangle$ به کار گرفته می‌شود که در آن N بزرگتر از سه بوده و عددی فرد است. در استیرپ زنجیره‌ای شرایط پالسهای پمپ و استوکس و همچنین پالسهای میانی طوری تنظیم می‌شوند که جمعیت از حالت اولیه $|1\rangle$ در ابتدای تحول زمانی، به حالت نهایی $|N\rangle$ در انتهای تحول زمانی منتقل شود. همچنین در طول تحول زمانی ترازهای میانی جمعیت دار نمی‌شوند. اخیراً روش استیرپ زنجیره‌ای برای انتقال جمعیت حالت‌های هسته‌ای در اندرکنش لیزرهای اشعه ایکس با هسته شتابدار به کار گرفته شده است [۲۷].

در این مقاله، روش پیشنهادی در مرجع [۲۱] که برای شارژ باتریهای کوانتومی سه تراز استفاده شده است به سیستمهای بیشتر از سه تراز تعمیم داده خواهد شد و به جای تکنیک استیرپ، تکنیک استیرپ زنجیره‌ای برای شارژ پایدار باتریهای با انرژی بالا به کار گرفته خواهد شد. در این طرحواره ابتدا یک سیستم کوانتومی پنج تراز در نظر گرفته خواهد شد که با چهار میدان خارجی اندرکنش دارد. همچنین فرض خواهد شد که این سیستم ابتدا در کمترین حالت انرژی خود قرار داشته باشد. نشان خواهیم داد که اگر دامنه بیشینه و

^۱ Stimulated Raman adiabatic passage (STIRAP).

چهارم باتری که سه چهارم آن پر شده و ردیف آخر یک باتری کاملا پر را نمایش می‌دهد. همچنین ستون سمت راست نشان دهنده ترازهای باتری و پالسهای خارجی است که برای شارژ باتری کوانتومی استفاده می‌شوند. در ستون سمت راست تراز $|1\rangle$ کمترین مقدار انرژی و تراز $|5\rangle$ بیشترین مقدار انرژی را دارد.

الگوی جفت شدگی یک باتری کوانتومی پنج تراز به همراه پالسهایی که از آنها برای شارژ باتری استفاده می‌شود در شکل ۱ نمایش داده شده است. در شکل ۱، انرژی تراز $|i\rangle$ در باتری برابر با $\epsilon_i = \hbar\omega_i$ در نظر گرفته می‌شود و هامیلتونی خالص باتری کوانتومی پنج تراز بدون در نظر گرفتن پالسهایی که ترازها را بهم جفت میکنند با H نمایش داده می‌شود که به صورت زیر است:

$$H = \sum_{i=1}^5 \epsilon_i |i\rangle\langle i|, \quad \epsilon_1 < \epsilon_2 < \epsilon_3 < \epsilon_4 < \epsilon_5 \quad (1)$$

هامیلتونی (۱) یک ماتریس مربعی 5×5 می‌باشد که ϵ_i -ها نشان دهنده ویژه مقادیر هامیلتونی H و $|i\rangle$ ویژه حالت مربوط به ویژه مقدار ϵ_i می‌باشد. فرم ماتریس هامیلتونی خالص در زیر فضای $\{|1\rangle, |2\rangle, |3\rangle, |4\rangle, |5\rangle\}$ به صورت زیر خواهد بود.

$$H = \begin{pmatrix} \epsilon_1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \epsilon_2 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \epsilon_3 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \epsilon_4 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \epsilon_5 \end{pmatrix} \quad (2)$$

فرض می‌کنیم که باتری ابتدا در حالت تخلیه یعنی تراز $|1\rangle$ قرار داشته باشد و می‌خواهیم باتری را به حالت پر یعنی تراز $|5\rangle$ منتقل کنیم. برای این کار از پالسهای خارجی $\Omega_p, \Omega_s, \Omega_{23}, \Omega_{34}$ استفاده می‌کنیم و بنابراین هامیلتونی اندرکنش اتم با میدانهای تحریکی در تصویر بهم کنش و در زیر فضای $\{|1\rangle, |2\rangle, |3\rangle, |4\rangle, |5\rangle\}$ به صورت زیر خواهد بود.

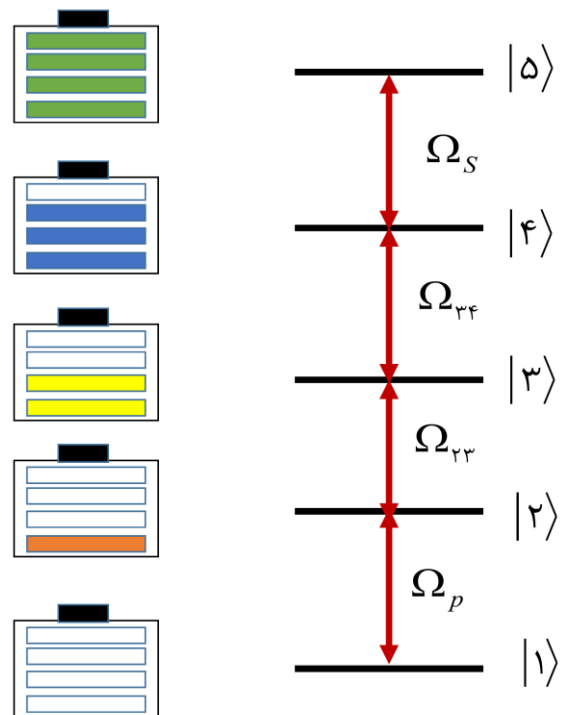
$$H_{\text{int}} = \hbar \begin{pmatrix} \cdot & \Omega_p & \cdot & \cdot & \cdot \\ \Omega_p & \cdot & \Omega_{23} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \Omega_{23} & \cdot & \Omega_{34} & \cdot \\ \cdot & \cdot & \Omega_{34} & \cdot & \Omega_s \\ \cdot & \cdot & \cdot & \Omega_s & \cdot \end{pmatrix} \quad (3)$$

ذکر این نکته ضروری است که در رابطه بالا

تاخیر زمانی پالسها مناسب باشد و در نتیجه شرایط استیرپ زنجیره‌ای برقرار شود، باتری کوانتومی پنج تراز با ارگوتراپی مناسبی شارژ خواهد شد. روش پیشنهادی در این طرحواره، یک رهیافت پایدار برای ذخیره انرژی و استخراج ارگوتراپی می‌باشد و لازم نیست که بلافاصله پس از شارژ باتری میدانهای خارجی قطع شوند. همچنین با مطالعه عددی نشان خواهیم داد که این طرحواره پیشنهادی نسبت به تغییرات کوچک پارامترهای مربوط به میدانهای خارجی حساس نیست. در ادامه رهیافت استیرپ زنجیره برای شارژ باتری کوانتومی در حضور محیط بررسی گردیده و اثر گسسل خود به خودی و وفازی بر ارگوتراپی نهایی و مقدار بیشینه توان شارژ مطالعه خواهد گردید. در نهایت توضیح خواهیم داد که طرحواره پیشنهادی در این مقاله می‌تواند برای شارژ باتریهای کوانتومی بیشتر از پنج تراز نیز به کار گرفته شود.

۲. الگوی جفت شدگی و هامیلتونی خالص و

شارژ در باتری کوانتومی پنج تراز



شکل ۱: الگوی جفت شدگی یک باتری کوانتومی پنج تراز که در این مطالعه به کار گرفته شده است. ستون سمت چپ شکل شماتیک باتریها را نمایش می‌دهد که ردیف اول باتری خالی، ردیف دوم باتری که یک چهارم آن پر شده، ردیف سوم باتری نیمه پر، ردیف

زمان لازم برای شارژ باتری باشد، توان متوسط شارژ باتری را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$P(\tau_C) = \frac{C(\tau_C)}{\tau_C} \quad (8)$$

۴. به کارگیری تکنیک استیرپ زنجیره‌ای برای

شارژ باتری کوانتومی پنج تراز

هامیلتونی رابطه (۳) دارای پنج ویژه مقدار است که یکی از ویژه مقادیر آن برابر صفر بوده و چهار ویژه مقدار دیگر آن غیر صفر است که با فرض اینکه $\Omega_p = \Omega_s = \Omega$ باشد، از رابطه زیر به دست می‌آیند:

$$\lambda = \pm \sqrt{\frac{1}{4}(\Omega_p^2 + \Omega_s^2) + \Omega^2} \pm \sqrt{\frac{1}{4}(\Omega_p^2 - \Omega_s^2) + \Omega^2} \quad (9)$$

ویژه حالت مربوط به ویژه مقدار صفر که حالت تاریک نامیده می‌شود از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$|D(t)\rangle = \chi \begin{pmatrix} \Omega_s(t)\Omega(t) \\ \cdot \\ -\Omega_p(t)\Omega_s(t) \\ \cdot \\ \Omega_p(t)\Omega(t) \end{pmatrix} \quad (10)$$

که در رابطه بالا χ ضریب نرمالیزاسیون می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\chi = \frac{1}{\sqrt{(\Omega_s\Omega)^2 + (\Omega_p\Omega_s)^2 + (\Omega_p\Omega)^2}} \quad (11)$$

در تکنیک استیرپ زنجیره‌ای شرایط اولیه و ترتیب پالسها طوری تنظیم می‌شوند که سیستم از ابتدای تا انتهای تحول زمانی تنها در حالت تاریک (۱۰) باقی بماند و بنابراین ویژه حالت‌های مربوط به ویژه مقادیر غیر صفر در رابطه (۹) اهمیت چندانی ندارند. سیستمهای زنجیره‌ای پنج تراز می‌توانند به صورت الگوی جفت شدگی نردبانی همانند شکل ۱ و یا به صورت الگوهای جفت شدگی زنجیره‌ای M - گونه شامل سه تراز زمینه و دو تراز تحریکی باشند. در حالت تاریک ترازهای تحریکی (۲) و (۴) وجود ندارند و بنابراین در به کارگیری روش استیرپ زنجیره‌ای در سیستمهای M - گونه اگر شرایط اولیه را طوری تنظیم کنیم که سیستم ابتدا تنها در حالت تاریک قرار داشته باشد و تحول زمانی سیستم را نیز تدریجی در نظر بگیریم، در طول تحول زمانی، سیستم در

می‌باشند که فرکانس $\Omega_p, \Omega_s, \Omega_{ps}, \Omega_{pp}$ دارای بعد s^{-1} می‌باشند که فرکانس رابی نامیده می‌شوند و مقدار آنها با افزایش و کاهش دامنه میدانهای به کارگرفته شده برای شارژ باتری، افزایش یا کاهش می‌یابد. هرچند روش استیرپ زنجیره‌ای نسبت به شرط دقیق تشدید حساس نیست ولی در این مطالعه برای سادگی فرض شده است که فرکانس پالسهای به کار گرفته دقیقاً برابر با فرکانس گذار بین ترازها باشد تا شرط تشدید برقرار شود. یعنی اگر ω_p فرکانس پالس پمپ، ω_s فرکانس پالس استوکس، ω_{ps} فرکانس پالس اول و ω_{pp} فرکانس پالس میانی باشد داریم:

$$\omega_p = \omega_r - \omega_1, \quad (4-الف)$$

$$\omega_s = \omega_\delta - \omega_2, \quad (4-ب)$$

$$\omega_{ps} = \omega_r - \omega_3, \quad (4-ج)$$

$$\omega_{pp} = \omega_r - \omega_4. \quad (4-د)$$

۳. انرژی، ارگوتراپی و توان در شارژ باتری

کوانتومی پنج تراز

در این بخش می‌خواهیم کمیت‌های انرژی، ارگوتراپی^۱ و توان را در شارژ باتریهای کوانتومی پنج تراز معرفی کنیم [۲۱]. تحول زمانی هامیلتونی (۳) در معادله لیوویل به صورت زیر صدق می‌کند:

$$\dot{\rho}_{\text{int}}(t) = \frac{1}{i\hbar} [H_{\text{int}}(t), \rho_{\text{int}}(t)] \quad (5)$$

که در رابطه بالا ρ_{int} ماتریس چگالی مربوط به هامیلتونی اندرکنش می‌باشد. انرژی که در زمان t در باتری ذخیره می‌شود از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E(t) = \text{Tr}\{H, \rho_{\text{int}}(t)\} \quad (6)$$

همچنین اگر حالت اولیه باتری $|1\rangle$ در نظر گرفته شود، در این صورت ارگوتراپی سیستم در زمان t که نشان دهنده اختلاف انرژی بین حالت‌های اولیه و نهایی باتری در فرآیند شارژ باتری می‌باشد، به صورت زیر خواهد بود.

$$C(t) = \text{Tr}\{H, \rho_{\text{int}}(t)\} - \varepsilon_1 \quad (7)$$

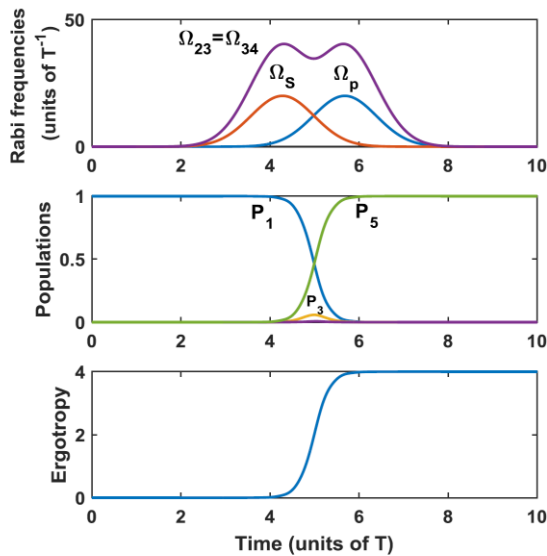
با توجه به رابطه بالا مقدار بیشینه برای ارگوتراپی در باتری پنج تراز $C_{\text{max}} = \hbar(\omega_\delta - \omega_1)$ خواهد بود. اگر τ_C

۱. Ergotropy

است، انتخاب شده است و یکی از مزایای مهم آن این است که پالسهای میانی دقیقا باهم برابرند و تاخیر زمانی نسبت به هم ندارند. با استفاده از معادلات (۷) و (۱۰) می توان یک عبارت صریح برای ارگوتراپی باتری کوانتومی پنج تراز به صورت زیر به دست آورد:

$$C(t) = \frac{\hbar \Omega_S^*(t)\Omega^*(t)\omega_1 + \Omega_p^*(t)\Omega_S^*(t)\omega_2 + \Omega_p^*(t)\Omega^*(t)\omega_3}{\Omega_S^*(t)\Omega^*(t) + \Omega_p^*(t)\Omega_S^*(t) + \Omega_p^*(t)\Omega^*(t)} - \hbar\omega_0 \quad (13)$$

در ادامه، با توجه به اینکه انرژی حالت $|i\rangle$ در باتری کوانتومی برابر با $\hbar\omega_i$ در نظر گرفته شده است بنابراین مقادیر ω_i را به صورت $\omega_0 = 4$ ، $\omega_1 = 1$ ، $\omega_2 = 2$ ، $\omega_3 = 3$ و $\omega_4 = 4$ در نظر می گیریم.



شکل ۲، بالا: تحول زمانی پالسها برای شارژ باتری کوانتومی پنج تراز که بر اساس روابط (۱۲) رسم شده است. وسط: تحول زمانی جمعیت ترازها، پایین: تحول زمانی ارگوتراپی (بر حسب \hbar) برای شارژ باتری کوانتومی پنج تراز. این شکل برای پارامترهای $T=1$ ، $\Omega = 20T^{-1}$ ، $\Omega'_p = 2$ و $\tau = 0.7T$ رسم شده است.

شکل ۲ تحول زمانی پالسها، جمعیت ترازها و همچنین ارگوتراپی را برای باتری کوانتومی پنج تراز نمایش می دهد که بر اساس پالسهای روابط (۱۲) رسم شده است و فرض شده است که باتری ابتدا در حالت تخلیه کامل یعنی تراز $|1\rangle$ قرار دارد. در این شکل مشاهده می شود که با انتخاب مناسب دامنه

حالت تاریک باقی خواهد ماند و ترازهای تحریکی جمعیت دار نخواهند شد و اثر گسیل خود به خود ناشی از جمعیت دار شدن ترازهای تحریکی از بین خواهد رفت. در الگوی جفت شدگی نردبانی مربوط به باتری کوانتومی پنج تراز که در شکل ۱ مشاهده می شود، تراز میانی $|3\rangle$ نیز تراز تحریکی می باشد و بنابراین علاوه بر شرایط گذار بی دررو برای سیستمهای M -گونه باید پالسها را طوری طراحی کنیم که تراز میانی $|3\rangle$ در طول تحول زمانی جمعیت دار نشود. برای برقراری تمامی شرایط بالا، پالسهای پمپ و استوکس را همانند تکنیک استیرپ سه تراز در نظر می گیریم. یعنی فرض می کنیم که ترتیب پالسها غیر شهودی باشد و ابتدا پالس استوکس روشن و پالس پمپ خاموش باشد و در ادامه به تدریج پالس استوکس خاموش و پالس پمپ روشن شود. همچنین پالسهای میانی را طوری طراحی می کنیم که از ابتدای تحول زمانی تا انتهای تحول زمانی روشن باشند و نسبت به پالسهای پمپ و استوکس شدت بسیار بیشتری داشته باشند طوری که شرط $\Omega_{p3}, \Omega_{p4} \gg \Omega_p, \Omega_S$ برقرار شود. با برقراری شرط فوق تراز $|3\rangle$ نیز در طول تحول زمانی جمعیت دار نخواهد شد.

۵. مطالعه عددی

به منظور مطالعه عددی، پالسهای پمپ، استوکس و همچنین پالسهای میانی را به صورت زیر در نظر می گیریم تا شرایط مربوط به استیرپ زنجیره ای را برآورده کنند.

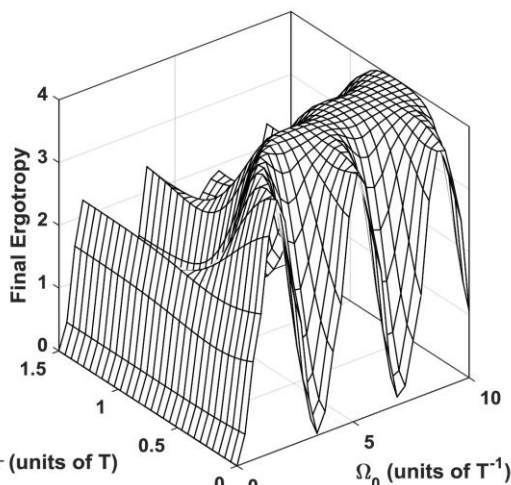
$$\Omega_p(t) = \Omega \exp\left[-\left(\frac{t-\tau}{T}\right)^2\right], \quad (12\text{-الف})$$

$$\Omega_S(t) = \Omega \exp\left[-\left(\frac{t+\tau}{T}\right)^2\right], \quad (12\text{-ب})$$

$$\Omega_{p3}(t) = \Omega_{p4}(t) = \Omega(t) = \Omega'_p \sqrt{\Omega_p^*(t) + \Omega_S^*(t)}, \quad (12\text{-ج})$$

که در روابط بالا T پهنای پالسهای پمپ و استوکس، Ω دامنه بیشینه پالسهای پمپ و استوکس و Ω'_p یک مقدار ثابت است که دامنه بیشینه پالسهای میانی را تنظیم می کند. همچنین 2τ تاخیر زمانی بین پالسهای پمپ و استوکس را نمایش می دهد. ذکر این نکته ضروری است که پالسهای رابطه (۱۲) از میان پالسهای زمانی مختلف که در مرجع [۲۵] پیشنهاد شده

عددی بررسی کنیم. شکل ۴ ارگوتراپی نهایی برای شارژ باتری کوانتومی پنج تراز را نسبت به مقادیر مختلف تاخیر زمانی و دامنه بیشینه پالسهای پمپ و استوکس نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود وقتی مقدار Ω_0 به $10T^{-1}$ می‌رسد و تاخیر زمانی در بازه زمانی حدود $0.8T < \tau < 0.5T$ قرار داشته باشد، مقدار ارگوتراپی نهایی تقریباً برابر با ۴ است. با توجه به رفتار شکل مشخص است که همراه با افزایش مقدار Ω_0 ، حساسیت مقدار نهایی ارگوتراپی نسبت به نوسانات تاخیر زمانی کمتر می‌شود.



شکل ۴: ارگوتراپی نهایی نسبت به مقادیر بیشینه دامنه و تاخیر زمانی پالسهای پمپ و استوکس. این شکل بر اساس پارامترهای شکل ۲ رسم شده است.

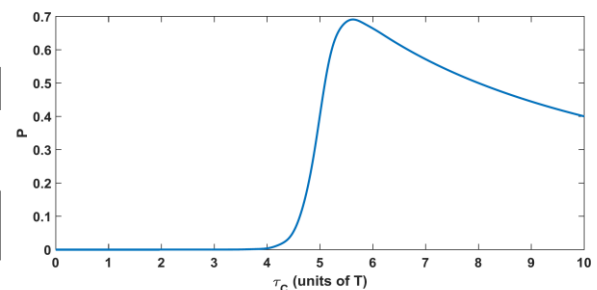
۷. بررسی اثر گسیل خود به خودی و وافازی بر

مقدار نهایی ارگوتراپی و توان شارژ باتری

در مطالعات عددی که در بخشهای قبل انجام شده است، عوامل اتلافی محیط خارجی در نظر گرفته نشده است. در این بخش می‌خواهیم رهیافت استیرپ زنجیره‌ای برای شارژ باتری کوانتومی را در حضور محیط بررسی کنیم و اثر گسیل خود به خودی و وافازی را بر مقدار نهایی ارگوتراپی و توان شارژ به صورت عددی مطالعه کنیم. با در نظر گرفتن اثر گسیل خود به خودی و وافازی، تحول زمانی عناصر ماتریس چگالی ρ_{int} به صورت زیر خواهد بود [۲۸].

$$\dot{\rho}_{int}(t) = \frac{1}{i\hbar} [H_{int}(t), \rho_{int}(t)] + L_{rel}[\rho_{int}] + L_{dep}[\rho_{int}], \quad (14)$$

بیشینه و تاخیر زمانی پالسها، شرایط استیرپ زنجیره‌ای برقرار می‌شود و جمعیت با بیشترین بازده از تراز $|1\rangle$ به تراز $|5\rangle$ که بیشترین مقدار انرژی را دارد، منتقل می‌شود و در انتهای تحول زمانی ارگوتراپی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. همچنین شکل ۳ توان شارژ باتری را نسبت به مقادیر مختلف زمان شارژ باتری τ_C نمایش می‌دهد. در شکل ۳ مشاهده می‌شود که همراه با افزایش زمان شارژ باتری، توان شارژ باتری به تدریج افزایش پیدا می‌کند طوری که برای $\tau_C = 5.62T$ توان شارژ باتری به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در ادامه وقتی که $\tau_C > 5.62T$ باشد توان شارژ باتری به تدریج کاهش می‌یابد و علت آن این است که وقتی که زمان شارژ باتری بزرگتر از $5.62T$ می‌شود، ارگوتراپی ثابت می‌ماند در حالیکه که زمان شارژ باتری افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه توان شارژ باتری به تدریج کاهش می‌یابد.

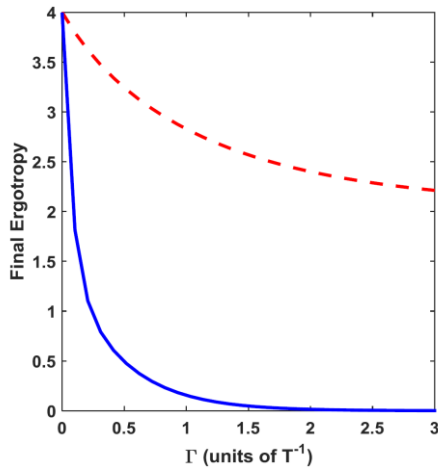


شکل ۳: مقادیر نهایی توان شارژ باتری کوانتومی پنج تراز به ازای مقادیر مختلف زمان شارژ. این شکل بر اساس پارامترهای شکل ۲ رسم شده است.

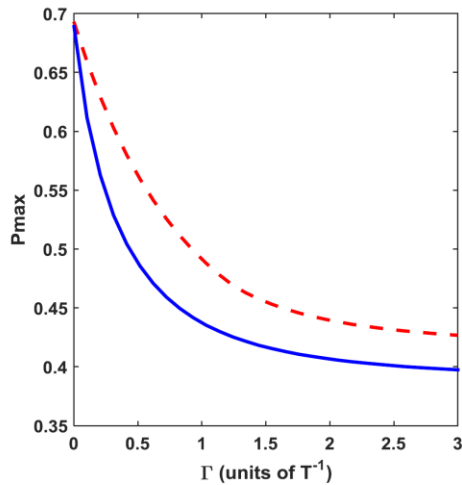
۶. بررسی عددی تاثیر تغییرات دامنه بیشینه و تاخیر

زمانی پالسها بر ارگوتراپی نهایی

در بخش قبل مشاهده شد که با تنظیم مناسب مقادیر دامنه بیشینه تمامی پالسها و تاخیر زمانی بین پالسهای پمپ و استوکس، باتری کوانتومی پنج تراز با بالاترین مقدار ارگوتراپی شارژ می‌شود. از لحاظ آزمایشگاهی تنظیم دقیق پارامترهای مربوط به پالسها روی یک مقدار خاص چالش برانگیز است. بنابراین در این بخش می‌خواهیم تاثیر تغییرات تاخیر زمانی بین پالسهای پمپ و استوکس و دامنه بیشینه پالسهای پمپ و استوکس را بر ارگوتراپی نهایی به صورت



شکل ۵: مقدار نهایی ارگوتراپی نسبت به نرخهای مختلف گسیل خود به خودی و وافازی. در منحنی خط کامل اثر وافازی نادیده گرفته شده و نرخهای گسیل خود به خودی به صورت $\Gamma_{11} = \Gamma$ ، $\Gamma_{22} = 2\Gamma$ ، $\Gamma_{33} = 3\Gamma$ ، $\Gamma_{44} = 4\Gamma$ می‌باشند. در منحنی خط چین اثر گسیل خودی به خودی نادیده گرفته شده و نرخهای وافازی به صورت $\gamma_5 = 4\Gamma$ و $\gamma_4 = 3\Gamma$ ، $\gamma_3 = 2\Gamma$ ، $\gamma_2 = \Gamma$ گرفته شده‌اند. این شکل بر اساس پارامترهای شکل ۲ رسم شده است.



شکل ۶: مقدار توان بیشینه شارژ باتری نسبت به نرخهای مختلف گسیل خود به خودی و وافازی. در منحنی خط کامل اثر وافازی نادیده گرفته شده و نرخهای گسیل خود به خودی به صورت $\Gamma_{11} = \Gamma$ ، $\Gamma_{22} = 2\Gamma$ ، $\Gamma_{33} = 3\Gamma$ ، $\Gamma_{44} = 4\Gamma$ می‌باشند. در منحنی خط چین اثر گسیل خودی به خودی نادیده گرفته شده و نرخهای وافازی به صورت $\gamma_4 = 3\Gamma$ ، $\gamma_3 = 2\Gamma$ ، $\gamma_2 = \Gamma$ و $\gamma_5 = 4\Gamma$ در نظر گرفته شده‌اند. این شکل بر اساس پارامترهای

که در رابطه بالا $L_{rel}[\rho_{int}]$ و $L_{dep}[\rho_{int}]$ به ترتیب پدیده-های گسیل خود به خودی و وافازی را توصیف می‌کنند. با در نظر گرفتن اینکه در سیستمهای فیزیکی واقعی همانند اتمهای مصنوعی ابررسانا، نرخ گسیل خود به خودی بین ترازهای غیرمتوالی در مقایسه با ترازهای متوالی بسیار کمتر می‌باشد، بنابراین تنها اثر گسیل خود به خودی بین ترازهای متوالی در نظر گرفته خواهد شد [۲۱] و بنابراین جملات مربوط به پدیده‌های گسیل خود به خودی و وافازی به صورت زیر خواهند بود:

$$L_{rel}[\rho_{int}] = \Gamma_{54} \sigma_{55} \rho_{int} \sigma_{54} - \frac{\Gamma_{54}}{2} [\sigma_{55} \rho_{int} + \rho_{int} \sigma_{55}] + \Gamma_{44} \sigma_{44} \rho_{int} \sigma_{44} - \frac{\Gamma_{44}}{2} [\sigma_{44} \rho_{int} + \rho_{int} \sigma_{44}] \quad (15)$$

$$+ \Gamma_{33} \sigma_{33} \rho_{int} \sigma_{33} - \frac{\Gamma_{33}}{2} [\sigma_{33} \rho_{int} + \rho_{int} \sigma_{33}] + \Gamma_{22} \sigma_{22} \rho_{int} \sigma_{22} - \frac{\Gamma_{22}}{2} [\sigma_{22} \rho_{int} + \rho_{int} \sigma_{22}],$$

$$L_{dep}[\rho_{int}] = \sum_{j=1}^5 \gamma_j [\sigma_{jj} \rho_{int} \sigma_{jj} - \frac{1}{2} (\sigma_{jj} \rho_{int} + \rho_{int} \sigma_{jj})], \quad (16)$$

که در روابط بالا $\sigma_{ij} = |i\rangle\langle j|$ به تراز $|j\rangle$ و γ_j نرخ وافازی را نشان می‌دهد. شکل ۵ مقدار نهایی ارگوتراپی را نسبت به نرخهای مختلف گسیل خود به خودی و وافازی نمایش می‌دهد. در منحنی خط کامل اثر وافازی نادیده گرفته شده و تنها اثر گسیل خود به خودی بین ترازهای متوالی در نظر گرفته شده است و بر عکس در منحنی خط چین اثر گسیل خود به خودی نادیده گرفته شده و ارگوتراپی نهایی در حضور اثر وافازی رسم شده است. همانطور که انتظار داریم همراه با افزایش نرخ گسیل خود به خودی و وافازی، ارگوتراپی نهایی از مقدار ماکسیمم خود کمتر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار نهایی ارگوتراپی نسبت به اثر گسیل خود به خودی حساستر از اثر وافازی است و برای تقریباً $\Gamma > 2T^{-1}$ مقدار نهایی ارگوتراپی برابر با صفر می‌شود.

شکل ۲ رسم شده است.

$$|D(t)\rangle = \chi \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{pmatrix}, \quad (19)$$

که در رابطه بالا χ ضریب نرمالیزاسیون می باشد و عناصر ماتریس ستونی (۱۹) به صورت زیر به دست می آید:

$$v_1 = \Omega_{\pi_1} \Omega_{\pi_2} \Omega_{\pi_3} \dots \Omega_{\pi_N} \quad (20)$$

$$v_{\tau k+1} = (-1)^k \Omega_p \Omega_{\pi_1} \dots \Omega_{\tau k-1, \tau k} \quad (21)$$

$$\times \Omega_{\tau k+2, \tau k+3} \Omega_{\tau k+4, \tau k+5} \dots \Omega_{\pi_N}, \quad k=1, 2, \dots \quad (22)$$

می خواهیم باتری کوانتومی را از حالت تخلیه $|1\rangle$ به حالت پر شده $|N\rangle$ منتقل کنیم. دوباره همانند سیستم پنج تراز می-خواهیم از قضیه بی درو استفاده کنیم و شرایط اولیه و ترتیب زمانی پالسها را باید طوری تنظیم کنیم که در ابتدای تحول زمانی، سیستم در حالت (۱۹) قرار داشته باشد. همچنین می-خواهیم در طول تحول زمانی سیستم در حالت (۱۹) باقی بماند و ترازهای میانی در طول تحول زمانی جمعیت دار نشوند. برای این کار باید دوباره پالس استوکس مقدم بر پالس پمپ باشد و پالسهای میانی نسبت به پالسهای پمپ و استوکس به حد کافی بزرگ باشند. برای طراحی پالسها، پالسهای پمپ و استوکس را می توانیم همانند روابط (۱۲-الف) و (۱۲-ب) در نظر بگیریم و پالسهای میانی را به صورت زیر در نظر بگیریم:

$$\Omega_{k, k+1} = \xi_{k, k+1} \sqrt{\Omega_p^2(t) + \Omega_S^2(t)}, \quad (23)$$

که در رابطه بالا $\xi_{k, k+1}$ یک ضریب ثابت است که مقدار آن طوری تعیین می شود که شرایط تکنیک استیرپ زنجیره ای برقرار شود.

۹. نتیجه گیری

در این مقاله یک طرحواره برای شارژ باتریهای کوانتومی N -ترازی با انرژی بالا با استفاده از تکنیک استیرپ زنجیره ای ارائه گردید. نشان داده شد که با تنظیم مناسب دامنه بیشینه و تاخیر زمانی پالسها می توان باتریهای کوانتومی N -ترازی را با بالاترین مقدار ارگوتراپی شارژ کرد. همچنین به صورت عددی نشان داده شد که این طرحواره نسبت به نوسانات اندک پارامترهای مربوط به پالسها شامل دامنه بیشینه و تاخیر زمانی،

همچنین شکل ۶ مقدار توان بیشینه را نسبت به نرخهای مختلف گسیل خود به خودی و وافازی نمایش می دهد که دوباره در منحنی خط کامل اثر وافازی نادیده گرفته شده و در منحنی خط چین اثر گسیل خود به خودی نادیده گرفته شده است. در اینجا نیز مشاهده می شود که همراه با افزایش نرخ گسیل خود به خودی و وافازی مقدار بیشینه توان شارژ کاهش می یابد و مقدار بیشینه توان شارژ نسبت به اثر گسیل خود به خودی حساستر از وافازی می باشد. در ادامه به این نکته اشاره می کنیم که هر چند در این طرحواره ترازهای میانی در طول تحول زمانی جمعیت دار نمی شوند ولی با توجه به اینکه تراز هدف $|5\rangle$ برخلاف سیستمهای M -گونه یک تراز تحریکی است، بنابراین اثر گسیل خود به خودی باعث کاهش ارگوتراپی و بیشینه توان شارژ می شود.

۸. شارژ باتری کوانتومی N تراز با استفاده

از تکنیک استیرپ زنجیره ای

روشی که تاکنون برای شارژ باتری کوانتومی پنج تراز شرح داده شد، می تواند برای شارژ باتری کوانتومی N -ترازی وقتی که N عددی فرد باشد، نیز به کار گرفته شود. هامیلتونی خالص باتری کوانتومی N -ترازی به صورت زیر خواهد بود.

$$H_i = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i |i\rangle\langle i|, \quad \varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \dots < \varepsilon_{N-1} < \varepsilon_N \quad (17)$$

همچنین می توان هامیلتونی شارژ و تخلیه باتری کوانتومی را در تصویر اندرکنش به فرم ماتریسی زیر نوشت.

$$H_{\text{int}} = \hbar \begin{pmatrix} 0 & \Omega_p & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \Omega_p & 0 & \Omega_{\pi_1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \Omega_{\pi_1} & 0 & \Omega_{\pi_2} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Omega_{\pi_2} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \Omega_S \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \Omega_S & 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

هامیلتونی رابطه (۱۸) دارای یک ویژه مقدار صفر است که ویژه حالت مربوط به این ویژه مقدار به صورت زیر خواهد بود.

غیر حساس است. روش پیشنهادی در این مقاله می‌تواند در سیستم‌های مختلف فیزیکی برای ساخت باتری کوانتومی همانند سیستم یون-تله و باتریهای ابرسانا به کار گرفته شود [۳۱]-[۲۹]. اخیراً روش پیشنهادی در مرجع [۲۱] به صورت آزمایشگاهی برای شارژ باتری کوانتومی سه ترازی ابرسانا به کار گرفته شده [۳۲] و نشان داده شده است که با استفاده از تکنیک استیرپ می‌توان این باتریها را با ارگوترایی بالا شارژ کرد. بنابراین روش پیشنهادی در این مقاله پتانسیل بسیار خوبی برای به کارگیری در باتریهای بیشتر از سه تراز را دارد که این باتریهای می‌توانند انرژی بیشتری را در مقایسه با باتریهای دو تراز و سه تراز در خود ذخیره کنند.

مراجع

1. F Binder, L A Correa, C Gogolin, J Anders, and G Adesso, *Fundamental Theories of Physics* **195** (2018) 1-2.
2. S Bhattacharjee, and A Dutta, *The European Physical Journal B* **94** (2021) 1.
3. J Q Quach, and W J Munro, *Phys. Rev. Applied* **14** (2020) 024092.
4. F H Kamin, F T Tabesh, S Salimi, and A C Santos, *Phys. Rev. E* **102** (2020) 052109.
5. K Sen, and U Sen, *Phys. Rev. A* **104** (2021) L030402.
6. F Pirmoradian, and K Mølmer, *Phys. Rev. A* **100** (2019), 043833.
7. F Barra, *Phys. Rev. Lett* **122** (2019) 210601.
8. M Carrega, A Crescente, D Ferraro, and M Sassetti, *New Journal of Physics* **22** (2020) 083085.
9. L P García-Pintos, A Hamma, and A Del Campo, *Phys. Rev. Lett* **125** (2020) 040601.
10. F Campaioli, F A Pollock, F C Binder, L Céleri, J Goold, S Vinjanampathy, and K. Modi, *Phys. Rev. Lett* **118** (2017) 150601.
11. F T Tabesh, F H Kamin, and S Salimi, *Phys. Rev. A* **102** (2020) 052223.
12. K V Hovhannisyan, M Perarnau-Llobet, M Huber, and A Acín, *Phys. Rev. Lett* **111** (2013) 240401.
13. R Alicki, and M Fannes, *Phys. Rev. E* **87** (2013) 042123.
14. D Ferraro, M Campisi, G M Andolina, V Pellegrini, and M Polini, *Phys. Rev. Lett* **120** (2018) 1177.
15. G M Andolina, M Keck, A Mari, M Campisi, V Giovannetti, and M Polini, *Phys. Rev. Lett* **122** (2019) 047702.
16. S Zakavati, F T Tabesh, and S Salimi, *Phys. Rev. E* **104** (2021) 054117.
17. U Gaubatz, P Rudecki, S Schiemann, and K Bergmann, *The Journal of Chemical Physics* **92** (1990) 5363.
18. K Bergmann, N V Vitanov, and B W. Shore, *The Journal of chemical physics* **142** (2015) 170901.
19. B W Shore, *Advances in Optics and Photonics* **9** (2017) 563.
20. K Bergmann *et al*, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* **52** (2019) 202001.
21. A C Santos, B Çakmak, S Campbell, and N T Zinner, *Phys. Rev. E* **100** (2019) 032107.
22. N V Vitanov, K A Suominen, and B W. Shore, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* **32** (1999) 4535.
23. F Q Dou, Y J Wang, and J A Sun, *Frontiers of Physics.* **17** (2022) 1.
24. X Chen, I Lizuain, A Ruschhaupt, D Guéry-Odelin, and J G Muga, *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010) 123003.
25. D Guéry-Odelin, A Ruschhaupt, A Kiely, E Torrontegui, S Martínez-Garaot, and J G Muga, *Rev. Mod. Phys.* **91** (2019) 045001.
26. N V Vitanov, *Phys. Rev. A*, **58** (1998) 2295.
27. M Amiri, and M. Saadati-Niari, *Physica Scripta.* **98** (2023) 085303.
28. G Lindblad, *Commun. Math. Phys.* **48**, (1976) 119.
29. J Li, G S Paraoanu, K Cicak, F Altomare, J I Park, R W Simmonds, M A Sillanpää, and P J Hakonen, *Phys. Rev. B* **84**, (2011) 104527.

30. J M Martinis, S Nam, J Aumentado, K M Lang, and C. Urbina, *Phys. Rev. B* **67**, (2003) 094510.
31. M J Peterer, S J Bader, X Jin, F Yan, A Kamal, T J Gudmundsen, P J Leek, T P Orlando, W D Oliver, and S Gustavsson, *Phys. Rev. Lett.* **114**, (2015) 010501.
32. Y Ge *et al*, *Applied Physics Letters*. **123** (2023) 154002.

نسخه پیش از انتشار