بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۱۱-۹ بهمن ۱۳۹۷

بهره‌گیری از سامانه‌های اپتومکانیکی در طرح‌واره‌های تکرارگر کوانتومی

مهناز قاسمی و محمّدکاظم توسلی

گروه اتمی و مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد

mktavassoly@yazd.ac.ir

m.ghasemi@stu.yazd.ac.ir

چکیده – در این مقاله به ایجاد درهم‌تنیدگی بین دو اتم سه‌ترازی دور از هم به منظور فراهم کردن یک تکرارگر کوانتومی می‌پردازیم. در این پروتکل، فاصله بین دو اتم هدف را با واردکردن سه گره کوانتومی (قرار دادن شش اتم) بین آن‌ها به چهار قسمت تقسیم می‌کنیم. اتم‌ها با اعداد (۱، ۲،...، ۸) نام‌گذاری شده‌اند و جفت‌های (۱، ۲)، (۳، ۴)، (۵، ۶) و (۷، ۸) در حالت‌های درهم‌تنیده آماده‌سازی شده‌اند. ابتدا، با فراهم‌کردن برهم‌کنش بین اتم‌های (۲، ۳) و (۶، ۷) در حضور سامانه‌های اپتومکانیکی، درهم‌تنیدگی بین اتم‌های (۱، ۴) و (۵، ۸) ایجاد می شود. سپس، با فراهم سازی برهم‌کنش بین اتم‌های (۴، ۵) در یک کاواک اپتیکی به حالت‌های درهم‌تنیده بین اتم‌های (۱، ۸) دست می‌یابیم. درهم‌تنیدگی با سنجه آنتروپی بررسی می شود. میزان شدت جفت شدگی مُد اپتومکانیکی با مُد میدان، تأثیری بر آنتروپی اتم‌های (۱، ۸) ندارد، امّا افزایش آن موجب کاهش دوره تناوب آنتروپی اتم‌های (۱، ۴) و (۵، ۸) می‌شود. افزایش بسامد مُد اپتومکانیکی در تمامی مراحل فرآیند موجب افزایش دوره تناوب درهم‌تنیدگی بین اتم‌های (۱، ۴)، (۵، ۸) و (۱، ۸) می‌شود.

کلید واژه- تبادل درهم‌تنیدگی، تکرارگر کوانتومی، سامانه‌های اپتومکانیکی، مدل تاویز- کامینگز.

Using the optomechanical systems in the quantum repeater schemes

Mahnaz Ghasemi and Mohammad Kazem Tavassoly

Atomic and Molecular Group, Faculty of Physics, Yazd University, Yazd

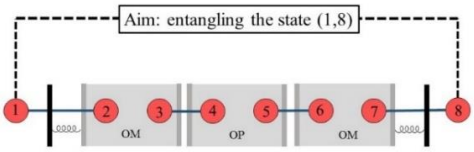
Abstract- In this paper, we produce entanglement between two distant three-level atoms in order to prepare a quantum repeater. In this protocol, the distance between two target atoms is divided to four parts by inserting three quantum nodes (inserting six atoms) between them. The atoms have been labeled by (1, 2, … 8) and the pairs (1, 2), (3, 4), (5, 6) and (7, 8) have been prepared in entangled states. At first, by performing interaction between atoms (2, 3) and (6, 7) in the presence of optomechanical systems, entanglement is generated between atoms (1, 4) and (5, 8). Finally, we achieve the entangled states between atoms (1, 8) by performing interaction between atoms (4, 5) in an optical cavity. The entanglement is evaluated via entropy. The optomechanical coupling strength to the field mode has no effect on entropy of atoms (1, 8), but the time periods of entropy of atoms (1, 4) and (5, 8) are decreased by increasing this coupling strength. Increasing the frequency of optomechanical mode leads to an increase in the time periods of entanglement between atoms (1, 4), (5, 8) and (1, 8) in all stages of the process.
Keywords: Entanglement Swapping, Quantum Repeater, Optomechanical Systems, Tavis-Cummings Model.

مقدمه: در انتقال حالت‌های درهم‌تنیده به مسافت‌های طولانی، به منظور جلوگیری از تضعیف درهم‌تنیدگی از پروتکل تکرارگر کوانتومی استفاده می‌شود [۱]. در این روش، فاصله بین مبداء و مقصد به بخش‌های کوچک تقسیم می‌شود و با استفاده از روش‌های تبادل درهم‌تنیدگی، این

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

ویژگی بین بخش‌های دور از هم ایجاد می‌شود. درهم‌تنیدگی می‌تواند با ایجاد برهم‌کنش [۲] بین بخش‌های غیردرهم‌تنیده منتقل شود. این برهم‌کنش‌ها شامل برهم‌کنش بین اتم و میدان کوانتومی است که می‌تواند در یک کاواک اپتیکی یا اپتومکانیکی آماده‌سازی شود. کاواک اپتومکانیکی شامل یک آینه متحرک است که در آن فشار تابشی داخل کاواک می‌تواند منجر به حرکت آینه از موضع تعادل شود [۳].



مدل و روابط پایه: هدف ما ایجاد درهم‌تنیدگی بین دو اتم سه‌ترازی دور از هم است که از اهداف معرفی پروتکل

شکل۱: مدل تکرارگر کوانتومی: همه گره‌ها شامل دو اتم سه‌ترازی در برهم‌کنش با دو مُد میدان هستند، برهم‌کنش‌ها در دو گره ابتدایی و انتهایی در کاواک‌های اپتومکانیکی OM و در گره میانی در کاواک اپتیکی OP انجام می‌شود.

تکرارگر کوانتومی است. با واردکردن سه گره کوانتومی (هر گره شامل دو اتم در حال برهم‌کنش با میدان کوانتومی است) بین دو اتم هدف (شکل ۱)، فاصله بین این دو اتم را به چهار قسمت تقسیم می‌کنیم. اکنون سامانه کلی شامل هشت اتم سه‌ترازی ۱ تا ۸ نوع $\mathbf{V}$ با ترازهای $|\tilde{i}\,(i=1,2,3)\rangle$ است به‌نحوی‌که جفت‌های (۱، ۲) و (۳، ۴) در حالت‌های درهم‌تنیده زیر آماده‌سازی شده‌اند:

$$|\psi(0)\rangle_{(j,j+1)}=\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\tilde{1},\tilde{3}\rangle+|\tilde{3},\tilde{1}\rangle\right),\quad j=1,3. \tag{۱}$$

اتم‌های سه‌ترازی (۲، ۳) با عملگرهای گذار اتمی $\hat{\sigma}^{k}_{lm}=|\tilde{l}\rangle_{k}\langle\tilde{m}|$ ($l,m=1,2,3$ و $k=2,3$) در یک کاواک به ترتیب با بسامدهای گذار $(\tilde{\omega}'_i,\tilde{\omega}_i)$، در حضور دو مُد اپتیکی (دو مُد اپتومکانیکی) $(\hat{b}_2,\hat{b}_1)\hat{a}_2,\hat{a}_1$ با بسامدهای $(\omega_2,\omega_1)\Omega_2,\Omega_1$ با هامیلتونی تاویز-کامینگز زیر برهم‌کنش می‌کنند [۴]:

$$\begin{aligned}\hat{H}_{(2,3)}&=\sum_{i=1}^{3}\tilde{\omega}_i\hat{\sigma}^{2}_{ii}+\sum_{i=1}^{3}\tilde{\omega}'_i\hat{\sigma}^{3}_{ii}+\sum_{i=1}^{2}\Omega_i\hat{a}_i^{\dagger}\hat{a}_i\\&+\sum_{j=1}^{2}\omega_j\hat{b}_j^{\dagger}\hat{b}_j+\lambda_1(\hat{a}_1\hat{\sigma}^{2}_{13}+h.c.)\\&+\lambda_2(\hat{a}_2\hat{\sigma}^{2}_{23}+h.c.)+\lambda'_1(\hat{a}_1\hat{\sigma}^{3}_{13}+h.c.)\\&+\lambda'_2(\hat{a}_2\hat{\sigma}^{3}_{23}+h.c.)-G\hat{a}_1^{\dagger}\hat{a}_1(\hat{b}_1+\hat{b}_1^{+})\\&-G'\hat{a}_2^{\dagger}\hat{a}_2(\hat{b}_2+\hat{b}_2^{+}).\end{aligned} \tag{۲}$$

در هامیلتونی (۲) $(G',G)\,\lambda'_i,\lambda_i$ ثابت‌های جفت‌شدگی بین اتم‌ها (مُدهای اپتومکانیکی) با میدان‌های اپتیکی هستند. با استفاده از رهیافت مرجع [۵] و با اعمال فرض‌های $\lambda_1=\lambda'_1$ ، $\lambda_2=\lambda'_2$ ، $G=G'$ ، $\tilde{\omega}_i=\tilde{\omega}'_i$ ، $\omega_1=\omega_2=\omega_M$ و $\tilde{\omega}_1-\tilde{\omega}_3-\Omega_1=\omega_M=\tilde{\omega}_2-\tilde{\omega}_3-\Omega_2$ پس از محاسباتی طولانی هامیلتونی مؤثر به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned}\hat{H}^{eff}_{(2,3)}&=\frac{\lambda_1^2}{\omega_M}\sum_{i=2}^{3}\left[\hat{\sigma}^{i}_{11}+\hat{a}_1^{\dagger}\hat{a}_1\left(\hat{\sigma}^{i}_{11}-\hat{\sigma}^{i}_{33}\right)\right]\\&+\frac{\lambda_2^2}{\omega_M}\sum_{i=2}^{3}\left[\hat{\sigma}^{i}_{22}+\hat{a}_2^{\dagger}\hat{a}_2\left(\hat{\sigma}^{i}_{22}-\hat{\sigma}^{i}_{33}\right)\right]\\&+\frac{\lambda_1^2}{\omega_M}\left(\hat{\sigma}^{2}_{13}\hat{\sigma}^{3}_{31}+h.c.\right)+\frac{\lambda_2^2}{\omega_M}\left(\hat{\sigma}^{2}_{23}\hat{\sigma}^{3}_{32}+h.c.\right)\\&-\frac{G^2}{\omega_M}\left[\left(\hat{a}_1^{\dagger}\hat{a}_1\right)^2+\left(\hat{a}_2^{\dagger}\hat{a}_2\right)^2\right]+\frac{\lambda_1\lambda_2}{\omega_M}\left(\sum_{i=2}^{3}\hat{a}_1\hat{a}_2^{\dagger}\hat{\sigma}^{i}_{12}+h.c.\right)\\&-\frac{G\lambda_1}{\omega_M}\left(\sum_{i=2}^{3}\hat{a}_1\hat{b}_1\hat{\sigma}^{i}_{13}+h.c.\right)-\frac{G\lambda_2}{\omega_M}\left(\sum_{i=2}^{3}\hat{a}_2\hat{b}_2\hat{\sigma}^{i}_{23}+h.c.\right).\end{aligned} \tag{۳}$$

با در نظر گرفتن حالت اولیه اتم‌های سه‌ترازی ۱ تا ۴ (حالت اولیه برای مُدهای $|a_1,a_2;b_1,b_2\rangle$ به صورت $|\psi(0)\rangle_{(1,2)}\otimes|\psi(0)\rangle_{(3,4)}$ ($|0,0;0,0\rangle$)، هامیلتونی مؤثر (۳) و حل معادله شرودینگر $i\frac{\partial}{\partial t}|\psi(t)\rangle=\hat{H}^{eff}_{(2,3)}|\psi(t)\rangle$، حالت کلی سامانه را به صورت زیر معرفی می‌کنیم:

$$\begin{aligned}|\psi(t)\rangle&=A_1(t)\left|0,0;0,0;\tilde{1},\tilde{3};\tilde{3},\tilde{1}\right\rangle+A_2(t)\left|0,0;0,0;\tilde{1},\tilde{3};\tilde{1},\tilde{3}\right\rangle\\&+A_3(t)\left|0,0;0,0;\tilde{1},\tilde{1};\tilde{3},\tilde{3}\right\rangle+A_4(t)\left|1,0;1,0;\tilde{1},\tilde{3};\tilde{3},\tilde{3}\right\rangle\\&+A_5(t)\left|0,0;0,0;\tilde{3},\tilde{1};\tilde{1},\tilde{3}\right\rangle+A_6(t)\left|1,0;1,0;\tilde{3},\tilde{3};\tilde{1},\tilde{3}\right\rangle\\&+A_7(t)\left|1,0;1,0;\tilde{3},\tilde{1};\tilde{3},\tilde{3}\right\rangle+A_8(t)\left|2,0;2,0;\tilde{3},\tilde{3};\tilde{3},\tilde{3}\right\rangle\\&+A_9(t)\left|0,0;0,0;\tilde{3},\tilde{1};\tilde{3},\tilde{1}\right\rangle+A_{10}(t)\left|0,0;0,0;\tilde{3},\tilde{3};\tilde{1},\tilde{1}\right\rangle\\&+A_{11}(t)\left|1,0;1,0;\tilde{3},\tilde{3};\tilde{3},\tilde{1}\right\rangle.\end{aligned} \tag{۴}$$

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

حال با اندازه‌گیری حالت $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0;0\rangle+|2;2\rangle)|\tilde{3};\tilde{3}\rangle$ (مربوط به جفت اتم (۲، ۳) و مُدهای (a_1,b_1)) روی حالت (۴) حالت زیر برای اتم‌های (۱، ۴) به دست می‌آید:

$$|\psi(t)\rangle_{(1,4)}=\frac{1}{\sqrt{|A_1(t)|^2+|A_8(t)|^2}}\left(A_1(t)|\tilde{1},\tilde{1}\rangle+A_8(t)|\tilde{3},\tilde{3}\rangle\right), \quad (۵)$$

$$A_1(t)=\frac{1}{2},$$
$$A_8(t)=\text{Inverse Laplace Transform}\left[-\left((\frac{G\lambda_1}{\omega_M})^{-2}s^3+6s\right)^{-1},s,t\right]e^{i\frac{4(G^2+\lambda_1^2)}{\omega_M}t}. \quad (۶)$$

نهایتاً، درهم‌تنیدگی بین اتم‌های (۱، ۴) برای حالت (۵) (با معیار آنتروپی) برابر با مقدار زیر به دست می‌آید:

$$E_{1,4}(t)=1-\frac{|A_1(t)|^4+|A_8(t)|^4}{\left(|A_1(t)|^2+|A_8(t)|^2\right)^2}. \quad (۷)$$

باید در نظر داشت که با انتخاب مقدار صفر برای G به‌دلیل صفرشدن ضریب $A_8(t)$، درهم‌تنیدگی بین اتم‌های (۱، ۴) کاملاً نابود می‌شود.

تمام عملیات قبل برای اتم‌های (۵، ۶، ۷، ۸) تکرار می‌شود و در نهایت حالتی مشابه با حالت اتم‌های (۱، ۴) برای اتم‌های (۵، ۸) به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$|\psi(t)\rangle_{(5,8)}=\frac{1}{\sqrt{|A_1(t)|^2+|A_8(t)|^2}}\left(A_1(t)|\tilde{1},\tilde{1}\rangle+A_8(t)|\tilde{3},\tilde{3}\rangle\right). \quad (۸)$$

اکنون جفت اتم‌های سه‌ترازی (۴، ۵) با حالت اولیه $|\psi(t)\rangle_{(1,4)}\otimes|\psi(t)\rangle_{(5,8)}$ را وارد برهم‌کنش دیگری در غیاب مُدهای اپتومکانیکی به صورت زیر می‌کنیم:

$$\begin{aligned}\hat{H}_{(4,5)}&=\sum_{i=1}^{3}\tilde{\omega}_i\hat{\sigma}_{ii}^4+\sum_{i=1}^{3}\tilde{\omega}_i'\hat{\sigma}_{ii}^5+\sum_{i=1}^{2}\Omega_i\hat{a}_i^\dagger\hat{a}_i\\&+\lambda_1(\hat{a}_1\hat{\sigma}_{13}^4+h.c.)+\lambda_2(\hat{a}_2\hat{\sigma}_{23}^4+h.c.)\\&+\lambda_1'(\hat{a}_1\hat{\sigma}_{13}^5+h.c.)+\lambda_2'(\hat{a}_2\hat{\sigma}_{23}^5+h.c.),\end{aligned} \quad (۹)$$

که این‌بار هامیلتونی مؤثر با اعمال فرض $\tilde{\omega}_1-\tilde{\omega}_3-\Omega_1=\omega_M=\tilde{\omega}_2-\tilde{\omega}_3-\Omega_2$ و با در نظر گرفتن حالت خلاء برای میدان‌ها (که منجر به حذف جملاتی مانند $\hat{a}_i^\dagger\hat{a}_i$ می‌شود)، به صورت زیر حاصل می‌شود [۵]:

$$\begin{aligned}\hat{H}_{(4,5)}^{eff}&=\frac{\lambda_1^2}{\omega_M}[\sum_{i=4}^{5}\hat{\sigma}_{11}^i+(\hat{\sigma}_{13}^4\hat{\sigma}_{31}^5+h.c.)]\\&+\frac{\lambda_2^2}{\omega_M}[\sum_{i=4}^{5}\hat{\sigma}_{22}^i+(\hat{\sigma}_{23}^4\hat{\sigma}_{32}^5+h.c.)].\end{aligned} \quad (۱۰)$$

حالت سامانه شامل چهار اتم (۱، ۴، ۵، ۸) بعد از برهم‌کنش توصیف شده با هامیلتونی (۱۰) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}|\psi(\tau)\rangle_{(1,4,5,8)}&=B_1(\tau)|\tilde{1},\tilde{1};\tilde{1},\tilde{1}\rangle+B_2(\tau)|\tilde{1},\tilde{1};\tilde{3},\tilde{3}\rangle\\&+B_3(\tau)|\tilde{1},\tilde{3};\tilde{1},\tilde{3}\rangle+B_4(\tau)|\tilde{3},\tilde{3};\tilde{1},\tilde{1}\rangle\\&+B_5(\tau)|\tilde{3},\tilde{1};\tilde{3},\tilde{1}\rangle+B_6(\tau)|\tilde{3},\tilde{3};\tilde{3},\tilde{3}\rangle,\end{aligned} \quad (۱۱)$$

که ضرایب آن در زیر تعریف شده است:

$$\begin{aligned}&B_1(\tau)=\frac{A_1^2(t)}{N(t)}e^{-i\frac{2\lambda_1^2}{\omega_M}(\tau-t)},\ B_2(\tau)=B_4(\tau)=\frac{A_1(t)A_8(t)}{2N(t)}\left(1+e^{-i\frac{2\lambda_1^2}{\omega_M}(\tau-t)}\right),\\&B_3(\tau)=B_5(\tau)=-\frac{A_1(t)A_8(t)}{2N(t)}\left(1-e^{-i\frac{2\lambda_1^2}{\omega_M}(\tau-t)}\right),\ B_6(\tau)=\frac{A_8^2(t)}{N(t)},\\&N(t)=|A_1(t)|^2+|A_8(t)|^2.\end{aligned} \quad (۱۲)$$

حال با اندازه‌گیری حالت‌های $|\tilde{1};\tilde{3}\rangle$ و $|\tilde{3};\tilde{1}\rangle$ مربوط به اتم‌های (۴، ۵) روی حالت (۱۱)، اتم‌های (۱، ۸) به ترتیب به حالت‌های درهم‌تنیده زیر

$$|\psi(\tau)\rangle_{(1,8)}=\frac{1}{\sqrt{|B_2(\tau)|^2+|B_5(\tau)|^2}}\left(B_2(\tau)|\tilde{1},\tilde{3}\rangle+B_5(\tau)|\tilde{3},\tilde{1}\rangle\right), \quad (۱۳)$$

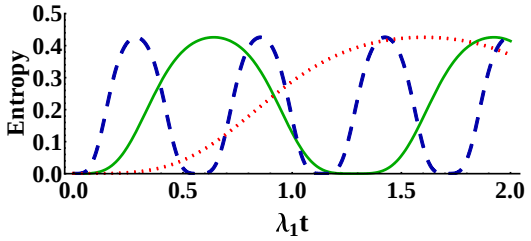
$$|\psi'(\tau)\rangle_{(1,8)}=\frac{1}{\sqrt{|B_3(\tau)|^2+|B_4(\tau)|^2}}\left(B_3(\tau)|\tilde{1},\tilde{3}\rangle+B_4(\tau)|\tilde{3},\tilde{1}\rangle\right), \quad (۱۴)$$

با آنتروپی یکسان $E_{1,8}(\tau)=1-\frac{|B_3(\tau)|^4+|B_4(\tau)|^4}{\left(|B_3(\tau)|^2+|B_4(\tau)|^2\right)^2}$ منتقل می‌شوند. با درنظرگرفتن $G=0$ ضریب $A_8(t)$ در رابطه (۶) و به دنبال آن درهم‌تنیدگی بین اتم‌های (۱، ۴) و (۵، ۸) صفر می‌شود و نمی‌توان درهم‌تنیدگی را بین دو اتم هدف ایجاد کرد، بنابراین در تمامی مراحل نمی‌توان G را برابر با صفر در نظر گرفت.

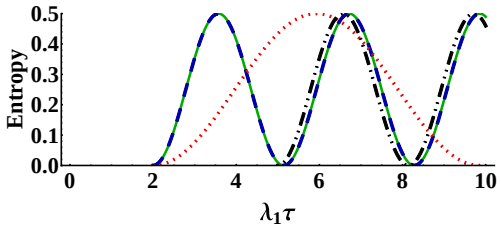
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

بررسی درهم‌تنیدگی: در این قسمت به بررسی تأثیر شدت جفت‌شدگی مُد اپتومکانیکی با مُد میدان (G)، بسامد مُد اپتومکانیکی (ω_M) و زمان برهم‌کنش اوّلیه $(\lambda_1 t)$ بر میزان درهم‌تنیدگی (آنتروپی) می‌پردازیم.



شکل۲: نمودار آنتروپی برای اتم‌های (۱، ۴) و (۵، ۸) بر حسب زمان مقیاس‌بندی شده $\lambda_1 t$ برای $G/\lambda_1 = 4$، $\omega_M/\lambda_1 = 2$ (پیوسته سبز)، $G/\lambda_1 = 9$، $\omega_M/\lambda_1 = 2$ (خط‌چین آبی) و $G/\lambda_1 = 4$، $\omega_M/\lambda_1 = 5$ (نقطه چین قرمز).



شکل۳: نمودار آنتروپی برای اتم‌های (۱، ۸) بر حسب زمان مقیاس بندی شده $\lambda_1 \tau$ برای $G/\lambda_1 = 4$، $\omega_M/\lambda_1 = 2$ و $\lambda_1 t = 2$ (پیوسته سبز)، $G/\lambda_1 = 9$، $\omega_M/\lambda_1 = 2$ و $\lambda_1 t = 2$ (خط‌چین آبی)، $G/\lambda_1 = 4$، $\omega_M/\lambda_1 = 5$ و $\lambda_1 t = 2$ (نقطه چین قرمز)، $G/\lambda_1 = 4$، $\omega_M/\lambda_1 = 2$ و $\lambda_1 t = 5$ (خط-نقطه مشکی).

در شکل ۲ تأثیر پارامترهای ω_M (بسامد مُد اپتومکانیکی) و G (شدت جفت‌شدگی مُد اپتومکانیکی با مُد میدان) را بر میزان درهم‌تنیدگی بین اتم‌های (۱، ۴) یا (۵، ۸) (یعنی آنتروپی در مراحل میانی) مورد بررسی قرار داده‌ایم. منحنی‌های موجود در این شکل با خط پیوسته سبزرنگ مقایسه می‌شوند. نمودار خط‌چین آبی تأثیر G را بر میزان درهم‌تنیدگی نشان می‌دهد، که با افزایش این پارامتر، دوره تناوب کاهش یافته است. نقطه‌چین قرمزرنگ تأثیر ω_M را بر میزان درهم‌تنیدگی اتم‌های (۱، ۴) یا (۵، ۸) نشان می‌دهد که با افزایش آن دوره تناوب افزایش یافته است. در شکل ۳ تأثیر پارامترهای G، ω_M و زمان برهم‌کنش اولیه $\lambda_1 t$ را بر میزان درهم‌تنیدگی بین اتم‌های هدف (۱، ۸) مورد بررسی قرار داده‌ایم. در این شکل نیز سایر منحنی‌ها با خط پیوسته سبزرنگ مورد مقایسه قرار می‌گیرند. خط‌چین آبی‌رنگ تأثیر شدت جفت‌شدگی مُد اپتومکانیکی با مُد میدان را بر میزان آنتروپی نشان می‌دهد. انطباق این منحنی بر خط سبزرنگ مشهود است و حاکی از عدم تأثیر این پارامتر بر میزان درهم‌تنیدگی نهایی است. نقطه‌چین قرمز رنگ، تأثیر بسامد مُد اپتومکانیکی را بر آنتروپی نشان می‌دهد که با افزایش آن، دوره تناوب درهم‌تنیدگی مانند قبل (شکل ۲) افزایش یافته است. خط-نقطه مشکی، تأثیر زمان برهم‌کنش اوّلیه $(\lambda_1 t)$ را بر میزان درهم‌تنیدگی نشان می‌دهد که در اینجا دوره تناوب آنتروپی تفاوتی نکرده است. به طور کلی، رفتار آنتروپی در تمام شرایط نوسانی و منظّم است.

نتیجه‌گیری: تغییر شدت جفت‌شدگی مُد اپتومکانیکی با مُد میدان تأثیری بر نتیجه نهایی (آنتروپی اتم‌های هدف (۱، ۸)) ندارد امّا افزایش آن در مراحل میانی (آنتروپی اتم‌های (۱، ۴) و (۵، ۸)) موجب کاهش دوره تناوب درهم‌تنیدگی می‌شود. افزایش بسامد مُد اپتومکانیکی در تمامی مراحل (میانی و نهایی) موجب افزایش دوره تناوب درهم‌تنیدگی می‌شود. در مرحله میانی صفرشدن G موجب تخریب کامل درهم‌تنیدگی بین اتم‌های (۱، ۴) و (۵، ۸) می‌شود و نمی‌توان به حالت درهم‌تنیده بین اتم‌های (۱، ۸) دست یافت. هم‌چنین، رفتار منظّم و نوسانی آنتروپی در تمامی مراحل و در همه شرایط بررسی شده حفظ می‌شود. احتمال موفقیت حالت‌های درهم‌تنیده اتم‌های (۱، ۸) نیز با مقادیر قابل قبول به دست آمد که به‌دلیل کمبود فضا از نوشتن آن‌ها صرف‌نظر کردیم.

مرجع‌ها

[1] N. Sangouard, C. Simon, H. De Riedmatten and N. Gisin, *Rev. Mod. Phys.* **83**, 1, 2011.
[2] R. Pakniat, M. K. Tavassoly and M. H. Zandi, *Opt. Commun.* **382**, 381, 2017.
[3] M. Aspelmeyer, T. J. Kippenberg and F. Marquardt, *Rev. Mod. Phys.* **86**, 4, 2014.
[4] M. Tavis and F. W. Cummings, *Phys. Rev.* **170**, 379, 1968.
[5] D. F. James and J. Jonathan, *Can. J. Phys.* **85**, 625, 2007.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]