



## مقایسه دوپایداری نوری در دو سامانه اپتومکانیکی ترکیبی متفاوت: اثر مولکول‌های نقطه کوانتومی

نادر دانش‌فر و حمیدرضا فروغی\*

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه رازی، کرمانشاه

پست الکترونیکی: hamidrezaforoughi477@gmail.com

[ndaneshfar@razi.ac.ir](mailto:ndaneshfar@razi.ac.ir)

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۰۷؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۳/۰۳/۲۶)

### چکیده

در این مقاله، دوپایداری نوری در سامانه‌های اپتومکانیکی ترکیبی شامل دو کاواک (اپتومکانیکی و معمولی) که به همدیگر جفت شده‌اند و شامل مولکول‌های نقطه کوانتومی (QDMs) است، مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. برای این منظور، دو پیکربندی متفاوت مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در پیکربندی اول، مولکول‌های نقطه کوانتومی (QDMs) درون کاواک اپتومکانیک و در پیکربندی دوم، مولکول‌های نقطه کوانتومی درون کاواک معمولی قرار دارند. برای محاسبه دینامیک عملگرهای سامانه از رهیافت هایزنبرگ - لانژوین تحت تقریب میدان میانگین استفاده می‌شود. برای دستیابی به پدیده دوپایداری نوری، که در کلیدهای نوری و حافظه‌های نوری کاربرد دارد، معادلات دینامیکی سامانه در حالت پایا حل می‌شوند. اثر پارامترهای فیزیکی سامانه از جمله نامیزانی، تعداد مولکول‌های نقطه کوانتومی و شدت تونل‌زنی میدان خارجی روی پدیده دوپایداری نوری مطالعه می‌شود. علاوه بر این، آستانه کلیدزنی و پهنای ناحیه دوپایداری نوری در دو پیکربندی مختلف با هم مقایسه می‌شود. با توجه به این که پدیده دوپایداری نوری می‌تواند کاربردهای بالقوه‌ای در کلیدهای تمام نوری، ترانزیستورهای نوری، محاسبات کوانتومی و ارتباطات کوانتومی داشته باشد نتایج به دست آمده می‌تواند برای کاربردهای ذکر شده و بهینه‌سازی سامانه مفید باشد.

**واژه‌های کلیدی:** کاواک اپتومکانیک ترکیبی، دوپایداری نوری، مولکول نقطه کوانتومی

### ۱. مقدمه

یک غشای بسیار سبک با قابلیت نوسان، درون یک کاواک فابری - پرو با آینه‌های ثابت و جفت‌شدگی بین میدان درون کاواک و غشای نوسان‌کننده سامانه اپتومکانیک ایجاد کرد. گروه والتر اولین بار تأثیرات فشار تابشی ناشی از میدان درون کاواک بر آینه ماکروسکوپی را مشاهده و بررسی کرد [۳].

در سامانه‌های اپتومکانیک، یکی از آینه‌های انتهایی می‌تواند آزادانه در محدوده معینی حرکت نوسانی انجام دهد و مد مکانیکی ایجاد کند. این مد مکانیکی می‌تواند با مد میدان درون

سامانه‌های اپتومکانیک از جمله ساختارهای بسیار با اهمیت در اپتیک کوانتومی به‌شمار می‌آیند که در آنها مد میدان درون کاواک با مد نوسانگر مکانیکی از طریق فشار تابشی جفت‌شدگی ایجاد می‌کند [۱ و ۲]. سامانه اپتومکانیک از یک کاواک فابری - پرو با یک آینه انتهایی ثابت و یک آینه دیگر با قابلیت نوسان تشکیل می‌شود. همچنین می‌توان با قرار دادن

ما به بررسی دو سامانه اپتومکانیکی می‌پردازیم که در اولی کاواک اپتومکانیکی حاوی مجموعه‌ای از مولکول‌های نقطه کوانتومی (دو یا چند نقطه کوانتومی که توسط تونل زنی جفت شده‌اند، مولکول‌های نقطه کوانتومی را تشکیل می‌دهند که خواص اپتیکی و فیزیکی منحصر به فردی دارند [۱۶]) است که با یک کاواک اپتیکی با هم جفت شده‌اند. در دومی کاواک اپتومکانیکی و کاواک اپتیکی حاوی مجموعه‌ای مولکول‌های نقطه کوانتومی است. نقاط کوانتومی به دلیل قابلیت تنظیم‌پذیری در ترازهای انرژی و ضریب غیرخطی بالا در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه بوده‌اند. چون مولکول‌های نقطه کوانتومی از کنار هم قرار گرفتن دو یا چند نقطه کوانتومی ایجاد می‌شوند، با اعمال ولتاژ و تونل‌زنی بین نقاط کوانتومی، آنها خواص نوری غیرخطی بالایی داشته و این ویژگی آنها را در ایجاد پدیده‌های غیرخطی از جمله دوپایداری نوری مورد استفاده قرار داده‌ایم [۱۷]. در سامانه مورد نظر ما که شامل مولکول‌های نقطه کوانتومی است، پدیده دوپایداری نوری را مورد بررسی قرار داده و با هم مقایسه می‌کنیم. در این سامانه، اثر پارامترهای فیزیکی مختلف در رفتار و ویژگی‌های دوپایداری نوری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲. مدل فیزیکی سامانه و معادلات

مطابق شکل ۱، یک سامانه اپتومکانیکی متشکل از دو کاواک A و C را که با هم جفت شده‌اند در نظر می‌گیریم. درون این سامانه‌ها، N مولکول نقطه کوانتومی با ساختار انرژی نشان داده شده در شکل ۱. ب قرار می‌گیرد که از دو نقطه کوانتم با اندازه‌های مختلف تشکیل شده‌اند. برای بررسی تحولات دینامیکی عملگرهای سامانه مورد نظر، در رژیم اتلافی از رهیافت هایزنبرگ-لانژوین استفاده می‌کنیم. ابتدا هامیلتونی سامانه را نوشته که این هامیلتونی شامل تمام اجزای مؤثر در این سامانه است. بنابراین هامیلتونی سامانه به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$H = H_0 + H_{I1} + H_{I2}, \quad (1)$$

در رابطه (۱)، جمله اول بیانگر خود انرژی‌های سامانه است که به صورت زیر است:

کاواکی به وسیله فشار تابشی جفت شود. این نوع از برهم کنش بین نور و ماده (آینه ماکروسکوپیکی) را که در آن فشار تابشی ناشی از میدان درون کاواکی توانایی جابه‌جا کردن یک جسم ماکروسکوپیکی را دارد، جفت‌شدگی اپتومکانیکی می‌نامند. سامانه‌ای را که این پدیده در آن ایجاد می‌شود سامانه اپتومکانیکی می‌گویند.

در سال‌های اخیر، سامانه‌های اپتومکانیکی کاربردهای بسیار وسیعی در فیزیک تجربی و نظری داشته‌اند و توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده‌اند. کاربردهای این سامانه‌ها آنچنان قابل ملاحظه بوده است که می‌توان از آنها در حوزه‌های متنوعی از پژوهش‌های مرتبط با اپتیک کوانتومی از قابلیت‌ها و ویژگی‌های این سامانه‌ها استفاده کرد. با استفاده از سامانه‌های اپتومکانیکی می‌توان اصول مهمی از مکانیک کوانتومی را به صورت تجربی مورد آزمایش قرار داد [۴]. همچنین در زمینه‌های مربوط به پردازش اطلاعات کوانتومی و سردسازی نوسانگرهای مکانیکی تا نزدیک حالت پایه [۵]، مسدودسازی فوتون [۶]، سردسازی اجسام بزرگ مقیاس، آشکارسازی امواج گرانشی [۷]، ایجاد پدیده دوپایداری نوری [۸ و ۹]، تولید مخلوط چهار موج [۱۰]، ایجاد شفافیت القایی اپتومکانیکی [۱۱-۱۳] و همچنین فراهم کردن یک رهیافت برای انجام مطالعات بنیادی در زمینه گذار از مکانیک کلاسیک به مکانیک کوانتومی [۱۴ و ۱۵] را می‌توان نام برد.

در سامانه‌های اپتومکانیکی، برهم کنش بین میدان تابشی و آینه متحرک می‌تواند منجر به رفتار غیرخطی شود. این رفتار غیرخطی موجب بروز پدیده‌های متنوعی از جمله دوپایداری نوری در این سامانه‌ها می‌شود. هرگاه ساختار مورد بررسی برای هر شدت ورودی دو شدت خروجی پایدار داشته باشد، این پدیده را دوپایداری نوری می‌نامند که از آن می‌توان در ساخت کلیدهای تمام نوری استفاده کرد.

در بررسی سامانه‌های اپتومکانیکی، به دلیل این که ارتباط این سامانه‌ها با محیط اطرافشان اجتناب ناپذیر است، پس در نظر گرفتن و اعمال اتلاف‌ها در بررسی این سامانه‌ها امری بسیار مهم است. یکی از رهیافت‌های مهم برای بررسی اثرات اتلاف در سامانه‌های اپتومکانیکی رهیافت هایزنبرگ - لانژوین است.

$$\begin{aligned}
 H_{Ia} &= \hbar T_e \sum_{i=1}^N (\sigma_{11}^i + \sigma_{21}^i) + \hbar g_1 \hat{c}^+ \hat{c} X + \\
 & J(c^+ a + a^+ c) + \\
 & i\hbar E_p \sum_{i=1}^N (\hat{c} e^{-i\omega t} - \hat{c}^+ e^{i\omega t}),
 \end{aligned} \tag{۳}$$

نوشته می‌شود. قسمت اول اندرکنش میدان خارجی و مولکول‌های نقطه کوانتومی، قسمت دوم جفت‌شدگی اپتومکانیکی و قسمت سوم برهمکنش میدان فرودی بر کاواک اپتومکانیک است.  $T_e, g_1, J, E_p$  و  $\omega L$  به ترتیب قدرت تونل‌زنی، ثابت جفت‌شدگی اپتومکانیک، ضریب جفت‌شدگی بین کاواک‌ها و بسامد لیزر تابشی است. جمله سوم در معادله (۱)، مربوط به انرژی اندرکنشی برای دو ساختار نشان داده شده در شکل ۱ است و شامل دو جمله است. هامیلتونی برهمکنشی مربوط به ساختار (الف) شکل ۱ به صورت:

$$H_{Iva} = \hbar g_2 \sum_{i=1}^N (c \sigma_{11}^i - c^+ \sigma_{22}^i), \tag{۴}$$

هامیلتونی برهمکنشی مربوط به ساختار شکل (ب) به صورت زیر است:

$$H_{Ivb} = \hbar g_2 \sum_{i=1}^N (a \sigma_{11}^i - a^+ \sigma_{22}^i), \tag{۵}$$

در رابطه‌های بالا،  $g_2 = g\sqrt{N}$  که در آن  $N$  تعداد مولکول‌های نقطه کوانتومی،  $g$  قدرت جفت‌شدگی میدان کاواک و مولکول‌های نقطه کوانتومی هستند.

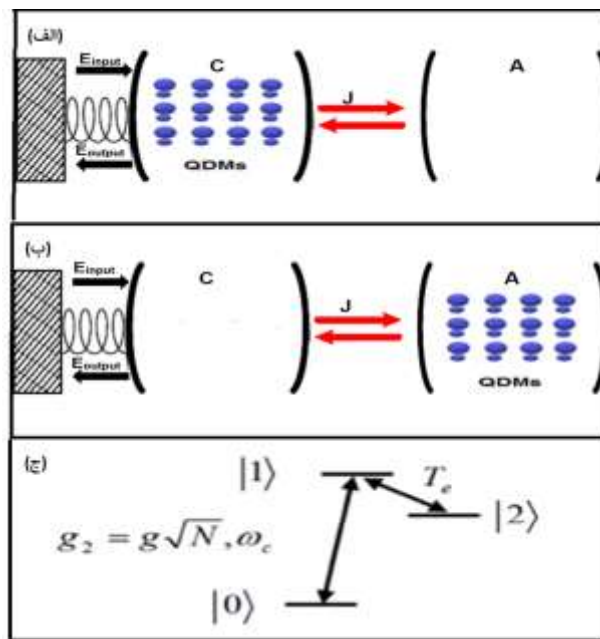
اکنون با استفاده از تبدیل هولشتاین - پریماکف عملگرهای  $F$  و  $G$  را به صورت زیر تعریف می‌کنیم [۱۸]:

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^N \sigma_{11}^i, \\
 G &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^N \sigma_{22}^i,
 \end{aligned} \tag{۶}$$

دینامیک عملگرهای سامانه در رهیافت هایزنبرگ - لانژوین به صورت زیر است:

$$\begin{aligned}
 \frac{dX}{dt} &= \omega_m P, \\
 \frac{dP}{dt} &= -\gamma P - \omega_m X - i g_1 c^+ c, \\
 \frac{dB}{dt} &= -(\gamma_2 - i\Delta_2) G - i T_e F,
 \end{aligned} \tag{۷}$$

در معادله‌های بالا،  $\gamma, \gamma_1$  و  $\gamma_2$  به ترتیب واهلش ترازهای



شکل ۱. (الف) و (ب) طرحواره سامانه اپتومکانیک ترکیبی متشکل از دو کاواک جفت‌شده که کاواک C کاواک اپتومکانیک و کاواک A کاواک معمولی است، (ج) ساختار انرژی مولکول نقطه کوانتومی.

$$\begin{aligned}
 H_o &= \hbar \omega_a \hat{a}^+ \hat{a} + \hbar \omega_c \hat{c}^+ \hat{c} + \\
 & \hbar \sum_{i=1}^N (\omega_{1o} \sigma_{11}^i + \omega_{2o} \sigma_{22}^i) \\
 & + \frac{1}{2} \hbar \omega_m (X^2 + P^2),
 \end{aligned} \tag{۲}$$

که جمله اول و دوم خود انرژی دو کاواک هستند که در آن  $\omega_c, c$  و  $c^+$ ، به ترتیب بسامد کاواک (C) و عملگرهای خلق و فنا در این کاواک و  $\omega_a, a^+$ ، به ترتیب بسامد کاواک (A) و عملگرهای خلق و فنا در این کاواک هستند. جمله سوم هامیلتونی مربوط به مولکول‌های نقطه کوانتوم است که  $\sigma_{jj}^i, \omega_{jo}, j=1,2, i=1-N$  به ترتیب بسامد مربوط به اختلاف انرژی دو تراز و جمعیت ترازها هستند. جمله چهارم مربوط به نوسانگر هماهنگ (آینه متحرک کاواک (C)) که در آن  $X, P, \omega_m$  به ترتیب بسامد نوسانگر، عملگر تکانه بدون بعد و عملگر مکان بدون بعد است. همچنین جمله دوم معادله (۱)، انرژی اندرکنشی مشترک در هر دو ساختار است که هامیلتونی مربوط به برهم‌کنش موجود در سامانه که در هر دو ساختار مشترک است به صورت:

ساختار (ب) شکل ۱ به صورت زیر است:

$$n = |c_s|^2 = \frac{E_p^2}{(\kappa_c + A_5) + (\Delta + A_6)},$$

$$A_5 = \frac{J^2 (A_1 A_3 + A_2 A_4)}{A_3^2 + A_4^2},$$

$$A_6 = \frac{J^2 (A_1 A_3 - A_2 A_4)}{A_3^2 + A_4^2},$$

$$A_3 = \kappa_a A_1 + \Delta_a A_2 + g_2 \gamma_2,$$

$$A_4 = \kappa_a A_2 + \Delta_a A_1 + g_2 \Delta_2, \quad (11)$$

$$A_1 = \gamma_1 \gamma_2 + T_e^2 - \Delta_1 \Delta_2,$$

$$A_2 = \gamma_1 \Delta_2 + \gamma_2 \Delta_1.$$

با توجه به وجود پارامترهای مختلف که در ایجاد دوپایداری نوری در این سامانه مؤثر هستند، به بررسی تأثیر این پارامترها در ویژگی‌های دوپایداری نوری سامانه می‌پردازیم. از جمله این ویژگی‌ها که موارد بسیار مهمی‌اند ایجاد دوپایداری نوری، آستانه دوپایداری و دامنه دوپایداری هستند.

### ۳. نتایج عددی و بحث

در این بخش، نتایج عددی اثر پارامترهای فیزیکی بر رفتار دو پایداری نوری را برای سامانه‌های اپتومکانیکی ترکیبی پیشنهادی بررسی می‌کنیم. برای این منظور، پارامترهای در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی و محاسبات عددی عبارت‌اند از [۸]:

$$L = (1-25) \times 10^{-3} m, m = 5-145 ng, \omega_m = 1 MHz$$

$$\Delta_1 = \omega_m, \Delta_2 = 5 \omega_m, \Delta_c = 1/48 \omega_m, 1/58 \omega_m, \Delta_a = \omega_m$$

$$\gamma_1 = 0/9 \omega_m, \gamma_2 = 1/2 \omega_m, \gamma = 1/4 \times 10^{-3} \omega_m$$

$$\kappa_a = 0/5 \omega_m, \kappa_c = 0/5 \omega_m, 0/5 \omega_m, \kappa_a = 0/05 \omega_m,$$

$$T_e = 10 \omega_m, g_1 = 0/009 \omega_m$$

$$g_2 = 2 \omega_m, J = 0/47 \omega_m$$

#### ۳.۱. مقایسه دو سامانه اپتومکانیک

با توجه به شکل ۲ که در آن دوپایداری نوری در هر دو سامانه اپتومکانیکی ترکیبی به طور همزمان رسم شده است، در حالتی که مولکول‌های نقطه کوانتومی درون کاواک اپتومکانیکی قرار داشته باشند دوپایداری نوری دامنه دوپایداری بزرگ‌تری دارد و برای استفاده‌های کاربردی این حالت مناسب‌تر است.

البته در حالتی که مولکول‌های نقطه کوانتومی درون کاواک معمولی قرار دارند ما باز در سامانه دوپایداری نوری داریم؛ با این تفاوت که دامنه دوپایداری کمتر است. چون ما دوپایداری نوری را درون سامانه اپتومکانیکی بررسی می‌کنیم این اختلاف ناشی از وجود مولکول‌های نقطه کوانتومی درون کاواک

مولکول نقطه کوانتوم و ضریب میرایی نوسانگر مکانیکی هستند.  $\Delta_1$  و  $\Delta_2$  به ترتیب نامیزانی بین بسامد لیزر تابشی و اختلاف انرژی ترازهای ۱ و ۲ مولکول نقطه کوانتومی و تراز پایه هستند. برای ساختار (الف) شکل ۱ داریم:

$$\frac{da}{dt} = -(\kappa_a - i\Delta_a)a - iJc + \sqrt{\kappa_a} a_{in}(t),$$

$$\frac{dF}{dt} = -(\gamma_1 - i\Delta_1)F - iT_e G - ig_2 c, \quad (8)$$

$$\frac{dc}{dt} = -(\kappa_c - i\Delta_c)c - iJa + ig_2 cX - ig_2 F + E_p + \sqrt{\kappa_c} c_{in}(t),$$

برای ساختار (ب) شکل ۱ داریم:

$$\frac{da}{dt} = -(\kappa_a - i\Delta_a)a - iJc - ig_2 F + \sqrt{\kappa_a} a_{in}(t),$$

$$\frac{dF}{dt} = -(\gamma_1 - i\Delta_1)F - iT_e G - ig_2 a, \quad (9)$$

$$\frac{dc}{dt} = -(\kappa_c - i\Delta_c)c - iJa + ig_2 cX + E_p + \sqrt{\kappa_c} c_{in}(t),$$

در معادلات بالا،  $(\kappa_a, \kappa_c, \Delta_a, \Delta_c, a_{in}(t), c_{in}(t))$  به ترتیب افت‌وخیزهای محیط برای کاواک‌های (C) و (A)، نامیزانی بسامد لیزر تابشی و بسامدهای کاواک‌های (C) و (A)، و اهلس کاواک‌های (C) و (A) هستند. برای بررسی دوپایداری نوری در یک سامانه اپتومکانیکی شامل دو کاواک جفت‌شده که یکی از آنها کاواک معمولی و کاواک دیگر اپتومکانیکی شامل مجموعه‌ای از مولکول‌های نقطه کوانتومی است، معادلات سامانه را در حالت پایا مورد مطالعه قرار می‌دهیم. برای این کار تغییرات زمانی عملگرها را مساوی صفر قرار داده و سپس این معادلات را با استفاده از تقریب میدان میانگین، متوسط عملگرها محاسبه می‌کنیم. رابطه مربوط به تعداد فوتون‌های درون کاواک اپتومکانیکی برای ساختار (الف) شکل ۱ به صورت زیر هستند:

$$n = |c_s|^2 = \frac{E_p^2}{(\kappa_c + A_3) + (\Delta + A_4)},$$

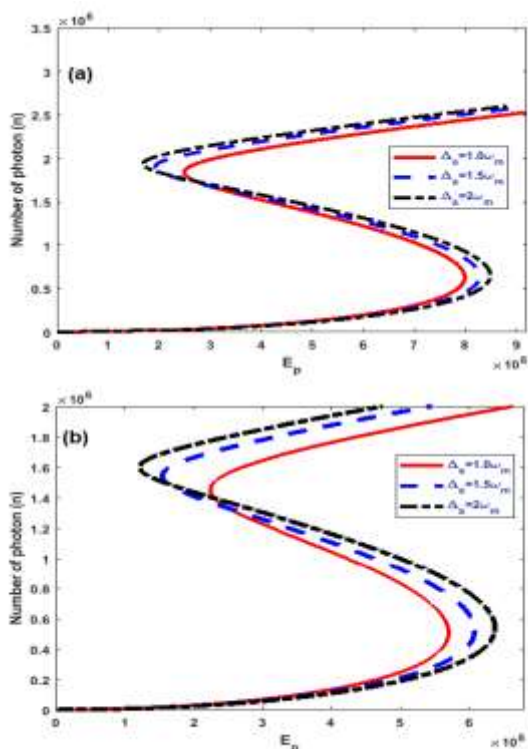
$$A_3 = \frac{g_2^2 (A_1 \gamma_2 + A_2 \Delta_2)}{A_3^2 + A_4^2} + \frac{J^2 \kappa_a}{\kappa_a^2 + \Delta_a^2},$$

$$A_4 = \frac{g_2^2 (-A_2 \gamma_2 + A_1 \Delta_2)}{A_3^2 + A_4^2} - \frac{J^2 \Delta_a}{\kappa_a^2 + \Delta_a^2}, \quad (10)$$

$$A_1 = \gamma_1 \gamma_2 + T_e^2 - \Delta_1 \Delta_2,$$

$$A_2 = \gamma_1 \Delta_2 + \gamma_2 \Delta_1,$$

رابطه مربوط به تعداد فوتون‌های درون کاواک اپتومکانیکی برای



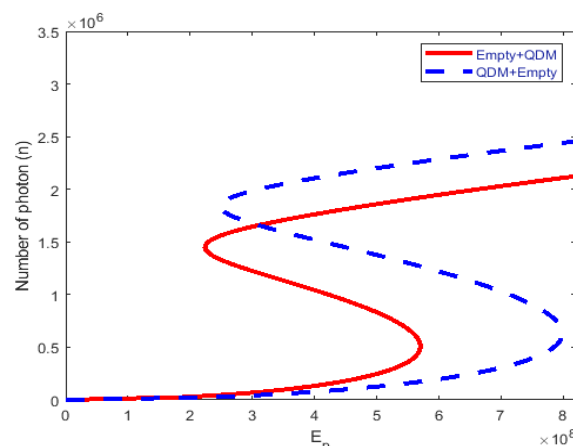
شکل ۴. اثر نامیزانی بسامد کاواک (A) و بسامد تابش فرودی ( $\Delta_a$ ) روی دوپایداری نوری.

کاواک (C) و بسامد تابش فرودی ( $\Delta_c$ ) در ایجاد پدیده دوپایداری نوری در دو ساختار (الف) و (ب) شکل ۱ بررسی شده است. با افزایش نامیزانی، دامنه دوپایداری و آستانه ایجاد دوپایداری افزایش می‌یابد.

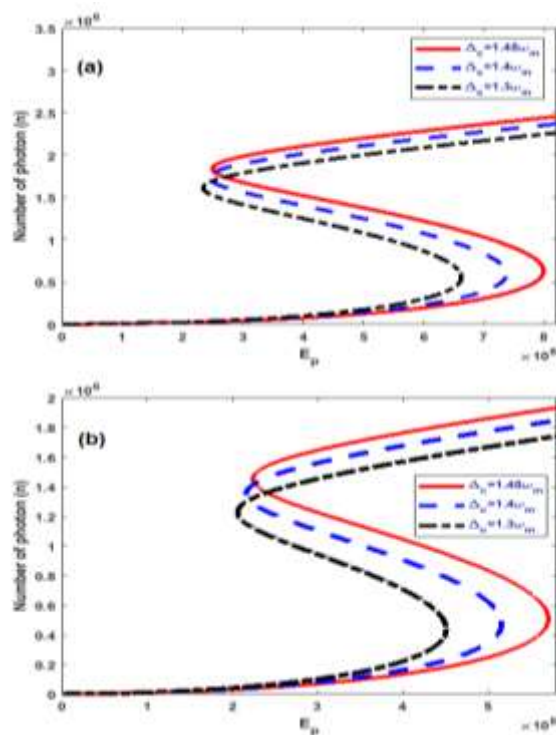
با مقایسه دو پیکربندی متفاوت مشاهده می‌شود که در حالتی که مولکول‌های نقطه کوانتومی درون کاواک (C) قرار دارند دامنه دوپایداری نوری بزرگ‌تری ایجاد می‌شود. چون ما دوپایداری نوری را برای کاواک (C) محاسبه می‌کنیم وجود مولکول‌های نقطه کوانتومی درون این کاواک و اندرکنش میدان با مولکول‌های نقطه کوانتومی باعث تقویت غیرخطیت سامانه می‌شود و بر روی دوپایداری نوری اثر می‌گذارد که این یک مزیت برای این پیکربندی است.

### ۳.۳. اثر نامیزانی بسامد کاواک (A) و بسامد تابش فرودی

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود تأثیر نامیزانی بسامد



شکل ۲. مقایسه ایجاد دوپایداری نوری در دو ساختار مختلف اپتومکانیک.

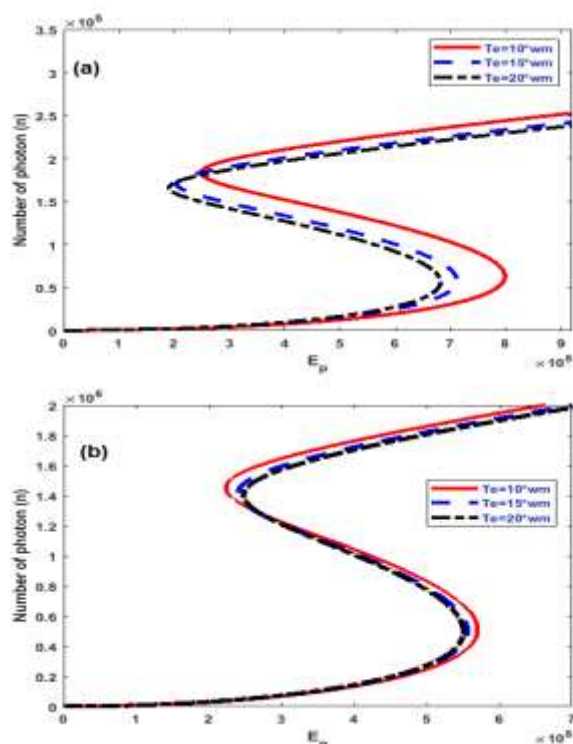


شکل ۳. اثر نامیزانی بسامد تابش فرودی و بسامد کاواک (C) ( $\Delta_c$ ).

اپتومکانیکی است که باعث تقویت غیرخطیت در این سامانه می‌شود.

### ۳.۲. اثر نامیزانی بسامد کاواک (C) و تابش فرودی ( $\Delta_c$ )

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود تأثیر نامیزانی بسامد

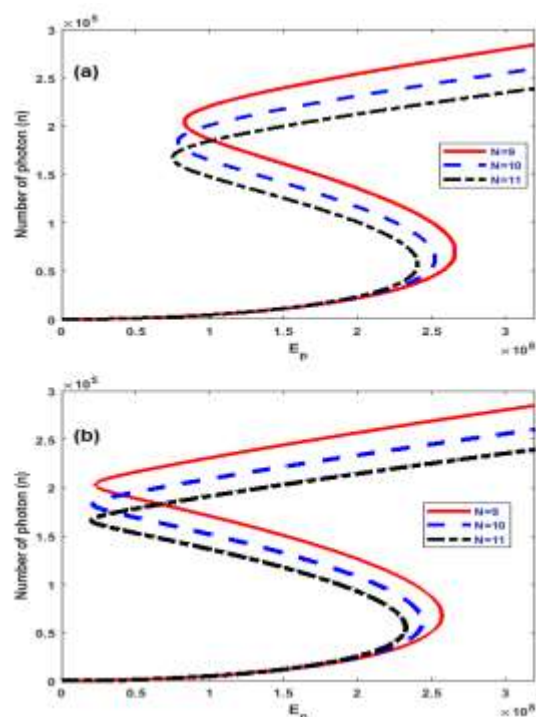


شکل ۶. اثر شدت میدان خارجی ( $T_e$ ) روی دوپایایی نوری.

مطابق شکل ۵، با افزایش تعداد مولکول‌های نقطه کوانتومی درون کاواک (A)، آستانه کلیدزنی به بالا کاهش می‌یابد و آستانه کلیدزنی به پایین تقریباً ثابت می‌ماند. در نتیجه افزایش تعداد مولکول‌های نقطه کوانتومی در دو پیکربندی مختلف تأثیرات تقریباً یکسان در ایجاد پدیده دوپایداری نوری، دامنه دوپایداری نوری و آستانه‌های کلیدزنی به بالا و کلیدزنی به پایین دوپایداری نوری مربوط به سامانه ترکیبی دارد. علت این موضوع این است که با افزایش تعداد مولکول‌های نقطه کوانتومی غیرخطیت درون کاواک افزایش می‌یابد و این افزایش غیرخطیت باعث کاهش آستانه کلیدزنی به پایین دوپایداری سامانه می‌شود.

### ۳. ۵. اثر شدت تونل زنی میدان خارجی ( $T_e$ )

هنگامی که مولکول‌های نقطه کوانتومی درون کاواک اپتومکانیکی قرار دارند با افزایش قدرت تونل‌زنی میدان خارجی چنان که در شکل ۶ مشاهده می‌شود آستانه‌های کلیدزنی به بالا و به پایین کاهش می‌یابند و در شدت‌های ورودی کمتری ایجاد می‌شوند. با این وجود، دامنه دوپایداری



شکل ۵. اثر تعداد مولکول‌های نقطه کوانتومی روی دوپایایی نوری.

کاواک (A) و بسامد تابش فرودی ( $\Delta_a$ ) در ایجاد پدیده دوپایداری نوری در دو ساختار (الف) و (ب) شکل ۱ بررسی شده است. همچنان که مشاهده می‌شود با افزایش نامیزانی، دامنه دوپایداری افزایش می‌یابد ولی در عوض آستانه ایجاد دوپایداری افزایش می‌یابد. با افزایش مقدار نامیزانی بین بسامد تابش فرودی و بسامد تشدید کاواک (A)، آستانه کلید زنی به بالا و کلیدزنی به پایین دوپایداری نوری مربوط به سامانه تغییر می‌کند. دامنه دوپایداری در سامانه نیز افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در این حالت باز پیکربندی (الف) دامنه دوپایداری بزرگ‌تری ایجاد می‌کند. با توجه به این ویژگی‌ها، در ایجاد حالت بهینه دوپایداری نوری می‌توان از این پارامتر قابل کنترل استفاده کرد.

### ۳. ۴. اثر تعداد مولکول‌های نقطه کوانتومی

با توجه به شکل ۵، اثر تعداد مولکول‌های نقطه کوانتومی (N) در ایجاد دوپایداری نوری مورد بررسی قرار گرفته است که با توجه به شکل می‌بینیم که با افزایش تعداد مولکول‌های نقطه کوانتومی آستانه کلید زنی به بالا کاهش می‌یابد ولی آستانه کلیدزنی به پایین تقریباً ثابت می‌ماند و تغییر خیلی کمی دارد.

است در دو حالت مختلف بررسی کرده‌ایم. برای این منظور، با نوشتن هامیلتونی مسئله و استفاده از معادلات هایزنبرگ-لاژوین و پس از حل معادلات در حالت پایا به محاسبه دو پایداری نوری در دو سامانه پرداخته‌ایم. با توجه به نتایج سامانه ترکیبی که در آن کاواک اپتومکانیکی حاوی مولکول‌های نقطه کوانتومی به کاواک معمولی جفت شده است دوپایداری نوری بهتری با دامنه دوپایداری مناسب در شدت‌های کمتر مشاهده می‌شود. سامانه ترکیبی که در آن کاواک اپتومکانیک به کاواک معمولی حاوی کوانتوم نقطه مولکول‌ها متصل است دامنه دوپایداری بزرگ‌تر است. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف در آستانه‌های کلیدزنی به پایین و به بالا و همچنین دامنه دوپایداری بررسی شد. در نتیجه، ما می‌توانیم با انتخاب پارامترهای مناسب، حالت دوپایداری نوری با آستانه‌های کلید زنی به بالا و به پایین و همچنین دامنه دوپایداری سامانه را بهینه‌سازی کنیم. با توجه به ویژگی‌های این دو سامانه، می‌توان از آنها برای ساخت کلیدهای تمام نوری، ترانزیستورهای نوری، حسگرهای خیلی حساس، در محاسبات، ارتباطات نوری و کامپیوترهای کوانتومی استفاده کرد.

سامانه تقریباً ثابت می‌ماند و این تأثیر قدرت تونل زنی میدان خارجی به علت افزایش غیرخطیت سامانه و تأثیر آن در ایجاد پدیده دوپایداری نوری برای ایجاد حالت بهیه دوپایداری نوری را نشان می‌دهد. در حالتی که مولکول‌های نقطه کوانتومی درون کاواک معمولی هستند همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، افزایش قدرت تونل زنی میدان خارجی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در آستانه‌های کلیدزنی به بالا و به پایین و همچنین دامنه دوپایداری سامانه ندارد. در مقایسه با حالتی که مولکول‌های نقطه کوانتومی درون کاواک اپتومکانیکی قرار دارند برای ایجاد حالت بهینه دوپایداری نوری، پیکربندی که مولکول‌های نقطه کوانتومی درون کاواک (C) قرار دارند مناسب‌تر است. این موضوع به علت افزایش غیرخطیت در سامانه است در حالتی که مولکول‌های نقطه کوانتومی درون کاواک (C) قرار دارند تأثیر این غیرخطیت در دوپایداری نوری واضح‌تر است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، ایجاد پدیده دوپایداری نوری در سامانه ترکیبی اپتومکانیکی دوکاواکی را که شامل مولکول‌های نقطه کوانتومی

#### مراجع

1. M Aspelmeyer, T J Kippenberg, and F Marquardt, *Rev. Modern Phys* **86** (2014) 1391.
2. B Chen, et al., *Superlattices Microstruct.* **113** (2018) 301.
3. J D Mc Cullen, P Meystre, and E M Wright, *Opt. Lett.* **9** (1984) 193.
4. V B Braginsky, S E Strigin, and S P Vyatchanin, *Phys. Lett. A* **287** (2001) 331.
5. S M Huang and A X Chen, *Phys. Rev. A* **98** (2018) 063818.
6. H Xei, et al., *Phys. Rev. A* **96** (2017) 013861.
7. V B Braginsky, F Y Khalili, and K S Thorne, “*Quantum Measurement*”, Cambridge University Press (1995).
8. H Foroughi and N Daneshfar, *Eur. Phys. J. D* **77** (2023) 118.
9. S Ding, et al., *JOAM*, **23** (2021) 463.
10. K Ullah. *Chin. Phys. B* **28** (2019) 114209.
11. H Xiong and Y Wu, *Appl. Phys. Rev.* **5** (2018) 031305.
12. C Yu, et al., *Opt. Quant. Electron.* **52** (2020) 267.
13. M A Khan, et al., *Int. J. Quantum Chem.* **122** (2022) 26955.
14. J Millen, et al., *Phys. Rev. Lett.* **114** (2015) 123602.
15. R W Peterson, et al., *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) 063601.
16. J Wu and Z M Wang, “*Quantum Dot Molecules*”, Springer (2014).
17. M Veisi, S H Kazemi, and M Mahmoudi, *Sci. Rep.* **10** (2020) 16304.
18. T Holstein and H Primakoff, *Phys. Rev.* **58** (1940) 1098.