بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

معرفی مدل نظری لیزر سالیتون کاواک گسسته با در نظرگیری تحول جمعیت و تحلیل پایداری خروجی همگن نوری آن

مطهری نیا، احمد[۱]؛ محمود اقدمی، کیوان[۲]؛ خردمند، رضا[۱]
[۱] پژوهشکده فیزیک کاربردی دانشگاه تبریز، گروه فوتونیک مخابرات
[۲] گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور تهران

چکیده – با معرفی مدل نظری برای تحلیل لیزر سالیتونهای کاواک در تشدیدگرهای نوری گسسته، که دینامیک جمعیت در آن لحاظ شده است، شرایط تشکیل دوپایایی برای حالت خروجی همگن نوری که در آن دامنه میدان الکتریکی در هریک از کاواک ها با هم برابر است در این سیستم جامع بررسی می‌شود. از آنجا که حالت همگن پایدار به عنوان زمینه‌ای برای ظهور سالیتونهای نوری ضروری است، لذا با استفاده از تحلیل خطی پایداری، نواحی ناپایدار در وضعیت خروجی همگن سیستم مشخص شده و تأثیر هر یک از پارامترها بر وضعیت سیستم مشخص شد.

کلید واژه- پایداری، دوپایایی، لیزر سالیتون.

Modeling of Discrete Cavity Soliton laser with population Dynamics and Stability Analysis of Its Homogeneous Optical Output

Motahharynia, Ahmad[1]; Mahmoud Aghdami, Keivan[2]; Kheradmand, Reza[1]

[1]Photonics Group, Research Institute for Applied Physics and Astronomy, University of Tabriz, Tabriz,
[2] Departments of Physics, Payame Noor University of Tehran

Abstract- A model will introduce for analyzing cavity soliton lasers in discrete optical resonators, where population dynamics is considered therein. Here in this more comprehensive system, for same electric field amplitudes in whole cavities, different conditions in bistability regime for homogeneous optical output are investigated. Since the stable homogeneous state background is essential to emerge optical solitons on it, unstable domain in homogeneous state by employing linear stability analysis, beside the effect of other parameters are studied.

Keywords: stability, bistability, soliton laser.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-16]

۱- مقدمه

سالیتونهای گسسته در سیستمهای نوری اتلافی[1] توجهات زیادی را به سوی خود معطوف داشته‌اند چرا که قابلیتهای متعدد منحصر به فرد و جدیدی را با ایجاد تعادل بین تلفات و بهره خطی/غیر خطی از خود بروز داده‌اند. در آرایه‌هایی از کاواکهای نوری که جفت شدگی ضعیفی به هم دارند و یک میدان نوری از بیرون به این آرایه می‌تابد، سالیتونهای کاواک گسسته شکل می‌گیرد (DCSs). به طور کلی این نوع سالیتون در انواع محیطهای گسستهٔ غیرخطی - از قبیل کر- قابلیت تشکیل دارد [۱].

در تحقیقات پیشین، انتشار پرتوی نوری که از خارج به انتهای آرایه‌ای از کاواکهای جفت شده (شکل ۱) با غیرخطی کر فرود می‌آیند، مورد تحلیل و بررسی جامعی واقع شده بود. در این حالت پرتو فرودی که به پرتوی نگه دارنده معروف است، تامین کننده انرژی نوری در محیط است. در عمده پژوهشهایی که در این حوزه انجام شده است، محیط انتشار کاواکهایی پر شده از ماده غیرفعال در نظر گرفته شده بودند [۴-۲]. در این پژوهش در حالی که محیط به صورت آرایه‌ای از موجبرهای نوری دارای ویژگیهای غیر خطی در نظر گرفته شده، وجود یونهای آلایندهٔ فعال درون موجبر نیز لحاظ شده و بررسی تحول جمعیت آنها نیز بررسی خواهد شد.

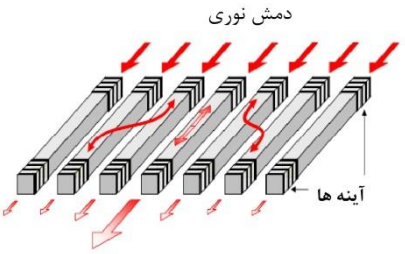
۲- معرفی مدل نظری

در سالیتونهای کاواک گسسته، با فرض آنکه بسامد ω نزدیک به بسامد تشدید کاواکهای یکسان با ظرافت بالا باشد و تشدیدگرها نیز مجهز به محیط غیر خطی کانونی کنندهٔ کر باشند، معادلهٔ زیر برای پوشهای کند تغییر در تقریب میدان نزدیک تخمین زده می‌شوند [1] :

$$i\frac{\partial u_n}{\partial T}+C(u_{n+1}+u_{n-1}-2u_n)+(i+\Delta)u_n+|u_n|^2u_n=E_0e^{iqn}$$

در این معادله همهٔ کمیتها بدون بعد هستند؛ به طوری که زمان تخمینی با $t=T\tau_{ph}$، نامیزانی بسامد از بسامد تشدید ω_0 با $\Delta=\tau_{ph}(\omega-\omega_0)$ و ثابت جفت شدگی به نزدیکترین همسایه $c=C\tau_{ph}$ است که همگی با طول عمر فوتون بدون بعد شده‌اند.

در کاواکهای متشکل از محیط غیر فعال نوری، نقش ماده پرکنندهٔ کاواک صرفا به عنوان محیطی با ضریب شکست غیرخطی بوده که سبب بروز اثرات غیرخطی از قبیل دوپایایی نوری می‌شود. اما در این کاواکها هیچگونه تقویتی رخ نمی‌دهد و تنها تأثیری که پرتو از محیط می‌پذیرد، به صورت تلفات ظاهر می‌شود.



شکل (۱). آرایه‌ای یک بعدی از موجبرهای فعال جفت شده که ضریب جفت شدگی بین موجبرهای مجاور به صورت یکسان C در نظر گرفته شده است.

از طرف دیگر سالیتونهای کاواک در لیزرهای نشر کننده در کاواکهای عمودی (VCSEL) نیز در بالای آستانه لیزرزایی در یک محیط بهره و در یک کاواک عریض با لحاظ کردن تحول جمعیت قبلا مورد مطالعه قرار گرفته است [۵].

تلفیق این دو حوزه، مبحث جدیدی را ایجاد خواهد کرد که به لیزر سالیتون کاواک گسسته معروف است. این موضوع پیش از این به ندرت مطرح شده و برای اولین بار یولین و همکارانش در سال ۲۰۱۲ محیطهای غیر خطی فعال را در کاواک‌ها در نظر گرفته و معادلهٔ حاکم بر محیط را با بهره نوری اشباع پذیر به صورت زیر پیشنهاد دادند [۴]:

$$\left(i\frac{d}{dt}+\Delta+i\delta+\alpha|E_n|^2-\frac{ig}{1+|E_n|^2}\right)E_n+C(E_{n-1}+E_{n-1}-2E_n)=Pe^{ikn} \qquad (۳)$$

C ضریب جفت شدگی، $\tilde{\Delta}=\Delta-2C$ واکوکی بسامد دمش از بسامد تشدید، δ بیانگر تلفات خطی در کاواک، $P\geq 0$ دامنهٔ پرتوی نگهدارنده تزریق شده از بیرون، α ضریب متناسب با عامل غیرخطی کر و $g>0$ بهرهٔ لیزر است. نقص معادلهٔ فوق در این است که بهرهٔ لیزر به صورت ضریبی ثابت در نظر گرفته شده است و دینامیک جمعیت حاملین در نظر گرفته نشده است و به اصطلاح از تقریب آدیاباتیک تحولات جمعیت استفاده شده است.

[1] dissipative optical systems

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-16]

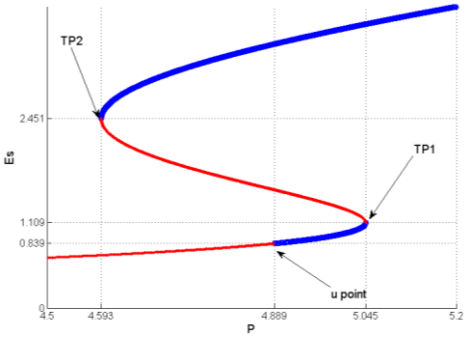
در مقاله حاضر با اصلاح و تکمیل مدل برای آنکه بتوان نقش حاملها را نیز در نظر گرفت، معادلات جفت شدهٔ زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\begin{cases} \dfrac{dE_n}{dt} = -(1-i\Delta)E_n + (1-i\alpha)D_nE_n + iC(E_{n-1}+E_{n+1}-2E_n) - iPe^{iqn} \\ \dfrac{dD_n}{dt} = \gamma[\mu - D_n(1+|E_n|^2)] \end{cases} \quad (۴)$$

E_n میدان و D_n چگالی جمعیت در موجبر n-اُم است. Δ نامیزانی بسامد کاواک با پرتو دمش. α : ضریب رشد پهنای خط[۲]؛ P: دامنهٔ پرتوی نگهدارنده؛ γ: ثابت واهلش جمعیت حاملین است که به طول عمر فوتون در کاواک نرمالیزه شده است و μ : آهنگ دمش حاملها است.

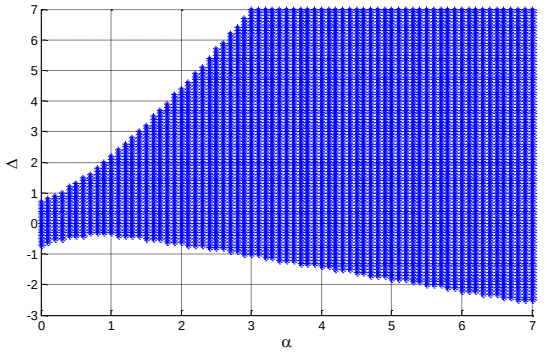
۳- وضعیت همگن سیستم و پایداری آن

بررسی وضعیت همگن سیستم که در آن میدان الکتریکی نوری در کلیهٔ کاواکها با هم برابر است $(E_n = E_s)$ و سپس جستجوی وضعیت دوپایای آن به عنوان زمینه‌ای برای وقوع جوابهای سالیتونی، همواره در اولویت قرار دارد. در حالت پایا، که وابستگی زمانی روابط از بین می‌رود، نمودار دوپایای S شکل برای میدان بر حسب پرتوی نگهدارنده، به صورت شکل (۲) برای این سیستم حاصل گردید که در محدودهٔ نقاط بازگشتی اول (TP1) و دوم (TP2) دوپایا است.



شکل (۲). نمودار دو پایایی سیستم برای وضعیت خروجی همگن (E_s) نسبت به دامنهٔ پرتوی نگهدارنده تزریق شده از بیرون (P) به ازای $\alpha = 3$، $\Delta = -0/5$، $\gamma = 1/7$ و $\mu = 3$. منحنی آبی رنگ (ضخیم) ناحیهٔ پایدار و قرمز (نازک) ناپایداریهای سیستم را نشان می‌دهند.

وضعیت دوپایایی سیستم به پارامترهای فیزیکی α, Δ, μ وابسته است که به عنوان نمونه محدودهٔ آن برای $\mu = 3$ در ناحیهٔ هاشور زدهٔ شکل (۳) به ازای مقادیر مختلف α, Δ رسم شده است.



شکل (۳). ناحیه پارامتری وقوع دوپایایی برای شرایط مختلف نامیزانی بسامد کاواک با پرتو دمش (Δ) نسبت به ضریب رشد پهنای خط (α) در مقدار ثابت $(\mu = 3)$.

اما سوال مهمی که مطرح می‌شود نواحی پایدار و ناپایدار سیستم است چرا که در محیطهای غیر خطی الزامی نیست تمام شاخه پایین و بالا پایدار باشند.

برای تعیین نواحی پایداری، از تحلیل خطی پایداری استفاده می‌کنیم [۶،۷]. در این روش با وارد کردن اختلالی با شناسهٔ اختلال λ در میدان، همیوغ مختلط آن و همچنین جمعیت، رفتار سیستم بررسی می‌شود.

$$\begin{pmatrix} E_n(t) \\ E_n^*(t) \\ D_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_H \\ E_H^* \\ D_H \end{pmatrix} + e^{\lambda t}e^{iQn}\begin{pmatrix} a \\ a^* \\ b \end{pmatrix} \quad (۵)$$

با جاگذاری در روابط (۴) و نیز روابط مشابه برای همیوغ میدان، به یک معادله ویژه مقداری خواهیم رسید:

$$A\begin{pmatrix} a \\ a^* \\ b \end{pmatrix} = \lambda\begin{pmatrix} a \\ a^* \\ b \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \quad (۶)$$

که در آن درایه‌ها به صورت ذیل حاصل شده اند:

$$\begin{cases} a_{11} = -(1-i\Delta) + (1-i\alpha)D_H + 2iC[\cos(Q+q)-1] \\ a_{13} = (1-i\alpha)E_H \\ a_{22} = -(1+i\Delta) + (1+i\alpha)D_H - 2iC[\cos(Q-q)-1] \\ a_{23} = (1+i\alpha)E_H^* \\ a_{31} = -\gamma D_H E_H^* \\ a_{32} = -\gamma D_H E_H \\ a_{33} = -\gamma(1+|E_H|^2) \end{cases}$$

بر اساس جواب دترمینان $\det(A-\lambda I)=0$، مقادیری برای آهنگ اختلال λ به دست خواهد آمد. در مواردی که مقدار

[2] Linewidth enhancement factor

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-16]

حقیقی آهنگ اختلال مثبت است، نقاط ناپایدار و هر جا که مقدار حقیقی λ منفی به دست آید پایدار هستند. در نمودار شکل (۲) دوپایایی سیستم ترسیم شده که در آن، نقاط پایدار با رنگ آبی (ضخیم) و ناپایداریها با قرمز (نازکتر) تفکیک شده‌اند.

۴- نتیجه گیری

اولاً مدل ارائه شده با توجه به نتایج و نمودارهای حاصل، به دلیل تطابق با موارد مورد انتظار از سیستمهای مشابه، قابل اعتماد است [۴]. داده‌های شکل (۳) نشان می‌دهد که وضعیت دوپایایی شدیدا به مقادیر پارامترهای ضریب رشد پهنای خط α و نامیزانی بسامد کاواک Δ با پرتوی دمش وابسته است. هر چه بسامد کاواک با بسامد پرتوی فرودی از شرایط تشدید دورتر باشند و بین آنها اختلاف بیشتری وجود داشته باشد، آثار غیرخطی بروز بیشتری پیدا می‌کنند و نقاط بازگشتی از همدیگر دورتر می‌شوند. همچنین هر چه ضریب رشد پهنای خط بیشتر می‌شود، نتایج مشابهی به دست خواهد آمد.

با توجه به شکل (۲) همانگونه که از سیستم‌های لیزرزا انتظار می‌رود، بخش عمده‌ای از شاخه پایینی ناپایدار است لذا فقط در این بازهٔ باریکی که از محل مشخص شده با u ($P = 4/759$) شروع شده و منتهی به نقطهٔ بازگشتی TP1 ($P = 5/045$) است، امکان نوشتن سالیتون روشن بر روی زمینه‌ای خاکستری فراهم خواهد شد. ناحیهٔ پایدار شاخه پایین بستگی شدیدی به مقادیر پارامترهای γ و C خواهد داشت که لازم است با محاسبات دقیقتر جایگشتهای مختلف، ایده‌آل‌ترین حالت را پیدا کرد.

در ناحیه با شیب منفی، طبیعتاً هیچ نقطه پایداری وجود نخواهد داشت و نقاط پایدار مجدداً از نقطه بازگشتی دوم آغاز می‌شوند. طبق نمودار شکل (۲)، تمام شاخه بالایی پایدار خواهد بود. از مقدار P=۴/۵۹۳ تا P=۴/۷۵۹ یعنی بین نقطه بازگشتی دوم تا نقطه u چون فقط در شاخه بالایی نقاط پایدار وجود دارند، فقط سالیتون تاریک مورد انتظار است. بین نقطه u و نقطه بازگشتی اول، چون هم در شاخه بالایی و هم در شاخه پایینی سیستم پایدار است، احتمالا بتوان به طور همزمان سالیتون روشن و تاریک نوشت. مشاهده شد که با تغییر مقدار پارامتر جفت‌شدگی C تنها محل شروع ناپایداری u تغییر پیدا می‌کند.

به طور خلاصه، پارامترهای α، Δ و μ تعیین کنندهٔ شکل نمودار دو پایایی و حتی شاخص رخداد یا عدم وقوع دو پایایی هستند اما این پارامترهای γ و C هستند که تعیین می‌کنند بازه پایداری سیستم چقدر است. نسبت طول عمر فوتون/حاملهای انرژی (γ) ناحیهٔ پایدار یا ناپایدار شاخه بالا را مشخص می‌نماید و با انتخاب مناسب آن می‌توان بازهٔ پایدار سیستم را جابجا کرد. از طرف دیگر پارامتر C روی بازهٔ پایدار شاخه پایینی نمودار اثر گذار است و محدوده پایدار آن را مشخص می‌نماید. نکته جذاب و جالب توجه این است که این دو پارامتر هیچ اثری روی شکل نمودار دو پایایی ندارند و فقط روی پایداری سیستم خودنمایی می‌کنند.

۵- مراجع

[1] O. A. Egorov, F. Lederer, "Spontaneously walking discrete cavity solitons," *OPTICS LETTERS*, 2013.

[2] K. M. Aghdami, M. Golshani, and R. Kheradmand, "Two-Dimensional Discrete Cavity Solitons: Switching and All-Optical Gates," *IEEE Photonics Journal*, vol. 4, p. 1147–1154, 2012.

[3] Sergej Flach , Andrey V. Gorbach, "Discrete breathers — Advances in theory and applications," *Physics Reports*, vol. 467, p. 1–116, 2008.

[4] Jaroslaw E. Prilepsky, Alexey V. Yulin, et.al, "Discrete solitons in coupled active lasing cavities," *Optics Letters*, vol. 37, pp. 4600-4602, 2012.

[5] m. bache, f. prati, g. tissoni, r. kheradmand, l.a. lugiato, i. protsenko, m. brambilla, "Cavity soliton laser based on VCSEL with saturable absorber," *Appl. Phys*, vol. B 81, p. 913–920, 2005.

[6] A.V. Yulin, D.V. Skryabin, A.G. Vladimirov, "Modulational instability of discrete solitons in coupled waveguides with group velocity dispersion," *Optical Society of America*, Vols. Vol. 14, No. 25, p. 12347, 2006.

[7] O. Egorov, U. Peschel, and F. Lederer, "Discrete quadratic cavity solitons," *The American Physical Society*, vol. PHYSICAL REVIEW E 71, 2005.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-16]