



## مطالعه رفتار اندرکنشی و کلیدزنی جفت سالیتون فازی

رضا خردمند<sup>۱\*</sup>، محمدمهدی شفیعی<sup>۱،۲</sup>، محمد قهرمانی<sup>۴</sup> و فرانکو پراتی<sup>۵</sup>

۱ دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز

۲ پردیس بین‌المللی دانشگاه تبریز، تبریز

۳ قطب فوتونیک، دانشگاه تبریز، تبریز

۴ پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز

۵ دانشکده علوم و فناوری، دانشگاه اینسوبریا، کومو، ایتالیا

پست الکترونیکی: r\_kheradmand@tabrizu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱/۲۸؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۰۴/۰۷)

### چکیده

سالیتون‌های کاواک (لکه روشن و یا تاریک نوری که با گذشت زمان هیچ تغییری در وضعیت‌شان رخ نمی‌دهد) به‌عنوان یکی از جذاب‌ترین ساختارهای جایگزیده، همواره مورد توجه قرار داشته‌اند. در داخل مشددها، با ایجاد تعادل بین اثرات خطی و غیرخطی و همچنین بین تلفات و تزریق نور، یک سالیتون فضایی-زمانی<sup>۱</sup> تشکیل می‌شود. در مطالعات قبلی سالیتون‌های کاواک، از بررسی زمانی و تحولات سالیتون در راستای انتشار (Z) صرف‌نظر شده بود. در این مقاله رفتار سالیتون‌ها با اعمال دینامیک زمانی و مطالعه رفتار آنها برای هر Z دلخواه بررسی شده است. با در نظر گرفتن این موضوع، در صورتی که سالیتون‌ها داخل مشدد فعال قرار گیرند نوع خاصی از سالیتون‌ها به نام سالیتون فازی تشکیل خواهد شد. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی، رفتار اندرکنشی سالیتون‌های فازی و نیز شرایط اندرکنش دو سالیتون برای کلیدزنی بررسی شده است. رفتار تک سالیتون موجود در مشدد بعد از اعمال سالیتون دوم با شرایط دست‌ساز مخالف مطالعه و با استفاده از این ایده، خاموش‌سازی هر دو سالیتون بررسی شده و مشخصات لازم برای این امر تعیین شده است.

واژه‌های کلیدی: اپتیک غیرخطی، سالیتون کاواک، سالیتون فازی، کلیدزنی نوری

### ۱. مقدمه

حوزه زمان نیز مورد توجه قرار گرفته است [۴]. سالیتون‌ها می‌توانند بارها و بارها در طول یک کاواک اپتیکی حرکت کنند و همچنین می‌توانند در موقعیت‌های دلخواه به صورت مستقل ایجاد و آدرس‌دهی شوند. سالیتون‌های کاواک در فیبرهای نوری حلقوی و همچنین در میکرومشددهای کِر مشاهده شده‌اند و توسط معادله لوجیاتو- لوفر مدل شده اند [۱].

سالیتون‌های کاواک به‌عنوان یکی از ساختارهای جایگزیده از اوایل سال ۱۹۹۰ به صورت تجربی و تئوری در حوزه اپتیک غیرخطی مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است [۵-۱]. سالیتون‌های کاواک به‌عنوان ساختارهای جایگزیده در حوزه مکان مورد بررسی قرار می‌گرفت ولی اخیراً این موضوع در

۱. Spatio-temporal

شدن آن توسط اتلاف موجود در سیستم خارج می‌شود. وجود شدت زمینه نیز توسط پرتو نگه‌دارنده توجیه می‌شود. در این مقاله در ادامه کارهای قبلی، نویسنده به دنبال بررسی کلید زدن کردن سالیتون‌های تولید شده در داخل کاواک حلقوی است [۶ و ۷]. در مطالعات قبلی شرایط تولید تک سالیتون و پایداری آنها همچنین سرعت و برهمکنش دو تک سالیتون بررسی شده‌اند [۱۳ و ۱۲]. همچنین مبانی نظری برای دینامیک فازی این سالیتون‌ها که با معادلات آدلر<sup>۵</sup> داده می‌شوند، قبلاً به صورت مبسوط بررسی شده است [۱۴ و ۱۵]. در این مطالعه، شرایط روشن و خاموش کردن سالیتون‌های فازی به طور کامل بررسی شده و نشان داده شده است که می‌توان بعد از تولید تک سالیتون فازی، آن را با تحریک یک سالیتون دیگر خاموش و یا کلید کرد. شرایط این پدیده با انجام دادن شبیه‌سازی‌های عددی بررسی شده است. همچنین در این مقاله، تأثیر شدت پالس ورودی در خاموش و روشن کردن سالیتون‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش اول این مقاله مدل تجربی مورد نظر ارائه و همچنین معادلات حاکم بر آن معرفی شده است. در بخش دوم شرایط کلیدزنی سالیتون فازی مورد مطالعه قرار گرفته و در بخش سوم شرایط خاموش کردن سالیتون‌های فازی بررسی شده است. در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای انجام آزمایش‌های تجربی آورده شده است.

## ۲. مدل و معادلات

برای مطالعه سالیتون فازی، یک مدل مناسب که امکان پیاده‌سازی تجربی نیز دارد، در نظر گرفته شده است. از این مدل در کارهای قبلی برای بررسی تشکیل تک سالیتون فازی و همچنین مطالعه پایداری آنها استفاده شده است [۱۳]. مدل مورد نظر که طرح نمادین آن مطابق شکل ۱ است، از یک مشدد حلقوی با طول نزدیک به یک متر تشکیل شده است. در داخل این مشدد یک ماده فعال<sup>۶</sup> نیمه‌رسانا برای ایجاد محیط مناسب برای ظهور پدیده غیرخطی به ضخامتی در حدود میلی‌متر قرار می‌گیرد. به داخل

در سال‌های اخیر نوع جدیدی از سالیتون‌های کاواک به نام سالیتون‌های فازی شناسایی شده است [۹-۶]. این سالیتون‌ها برخلاف سالیتون‌هایی که با معادله لوجیاتو-لوفر داده می‌شوند، خاصیت دست‌سانی<sup>۱</sup> دارند [۱۰]. دست‌سانی به این مفهوم است که اگر جهت چرخش در فضای فاز میدان الکتریکی تغییر کند یک جهش در نمایه بسته موج شدت دیده می‌شود. اگر چرخش در صفحه فاز در جهت خلاف حرکت عقربه‌های ساعت باشد سالیتون فازی دست‌سانی مثبت<sup>۲</sup> و در غیر این صورت سالیتون دست‌سانی منفی<sup>۳</sup> دارد [۹-۶]. جهش در نمایه شدت باعث می‌شود تقارن بسته موج به صورت دست‌سان عوض شود. این جهش به صورت یک نقص<sup>۴</sup> در ساختار شدت مشاهده می‌شود [۱۰ و ۱۱]. مطالعه این ساختارها در سایر زمینه‌ها مانند بررسی خواص رشته‌های DNA و بررسی گسترده دستگاه‌های غیرخطی می‌تواند مفید واقع شود [۸-۶].

سالیتون‌های فازی به صورت تجربی با تزریق یک پرتو لیزر به داخل یک کاواک حلقوی به طول تقریبی یک متر که در داخل آن یک ماده فعال قرار داده شده است، تولید می‌شوند. مطابق مراجع [۶، ۷ و ۸] به دلیل داشتن خاصیت اتلافی در سیستم مورد مطالعه، پرتو نگه‌دارنده جهت تأمین انرژی سیستم استفاده می‌شود. ایجاد سالیتون فازی در سیستم مورد نظر با تزریق یک پرتو نویسنده رخ می‌دهد. همان‌طور که در مقاله نیز ذکر شده است بعد از تزریق پرتو نویسنده، سالیتون در سیستم ظاهر و باقی می‌ماند. حال برای کلیدزنی و یا خاموشی سالیتون، پرتو نویسنده دیگری با شرایط مشخص شده در این مقاله به سیستم تزریق می‌شود. تزریق سالیتون دوم شرایط را طوری عوض می‌کند که سالیتون اول از بین رفته و سالیتون دوم ظاهر و پایدار شود و یا این که تزریق سالیتون دوم باعث از بین رفتن هر دو سالیتون شود. بدیهی است به دلیل اتلافی بودن سیستم (اتلاف در آینه کاواک حلقه‌ای) انرژی‌های تجمعی در قسمت مشخص فضا (سالیتون) بعد از ناپدید شدن سالیتون و خاموش

۱. Chirality

۲. Positively charged solitons

۳. Negatively charged solitons

۴. Defect

۵. Adler

۶. Active Media

این مشدد با یک سیستم تزریق مناسب پرتو لیزر تزریق می‌شود. نور در حلقه مشدد بین آینه‌ها گردش می‌کند. هر گردش در حلقه، گردش - دور<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. با استفاده از تقسیم کننده پرتو<sup>۲</sup> (BS) می‌توان شرایط تزریق نور به داخل مشدد و همچنین خروج نور از آن را ایجاد کرد.

برای مطالعه برهم‌کنش نور با ماده فعال از معادلات ماکسول-بلاخ جهت توصیف دینامیک یک سیستم کوانتومی دو حالته که با نور برهم‌کنش می‌کند، استفاده می‌شود. این معادلات برای مدل تجربی پیشنهادی به صورت معادلات (۱) الی (۳) نوشته می‌شود. در این معادلات برای توصیف حرکت سالیون در راستای عمود به محورهای عرضی مؤلفه (z) نیز به معادلات استاندارد ماکسول-بلاخ افزوده شده است [۶ و ۷].

این مشدد با یک سیستم تزریق مناسب پرتو لیزر تزریق می‌شود. نور در حلقه مشدد بین آینه‌ها گردش می‌کند. هر گردش در حلقه، گردش - دور<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. با استفاده از تقسیم کننده پرتو<sup>۲</sup> (BS) می‌توان شرایط تزریق نور به داخل مشدد و همچنین خروج نور از آن را ایجاد کرد.

برای مطالعه برهم‌کنش نور با ماده فعال از معادلات ماکسول-بلاخ جهت توصیف دینامیک یک سیستم کوانتومی دو حالته که با نور برهم‌کنش می‌کند، استفاده می‌شود. این معادلات برای مدل تجربی پیشنهادی به صورت معادلات (۱) الی (۳) نوشته می‌شود. در این معادلات برای توصیف حرکت سالیون در راستای عمود به محورهای عرضی مؤلفه (z) نیز به معادلات استاندارد ماکسول-بلاخ افزوده شده است [۶ و ۷].

$$\frac{ic}{\Lambda} \partial_z E + \partial_t E = \frac{cT}{\Lambda} [y - (1 + i\theta)E + P], \quad (1)$$

$$\partial_t P = \xi(D) [(1 - i\alpha)DE - P], \quad (2)$$

$$\partial_t D = \tau_e^{-1} [\mu - D - \frac{1}{\gamma} (E^*P + EP^*)], \quad (3)$$

در این معادلات P و E به ترتیب میدان قطبش ماکروسکوپی و میدان الکتریکی پرتو است (ستاره به مفهوم مزدوج مختلط میدان است).  $\xi(D)$  نشان دهنده تابع مختلطی است که بیانگر وابستگی پهنای بهره به بسامد است [۶]. با توجه به این که تغییرات موج جلو رونده بسیار آهسته‌تر از طول موج صورت می‌گیرد برای این دو کمیت از تقریب میدان آهسته تغییر<sup>۳</sup> استفاده شده است. در این معادله، D نشان دهنده نسبت جمعیت حاملین به جمعیت حاملین در حالت شفافیت است (جمعیت حاملین در حالت شفافیت زمانی است که بهره، دقیقاً صفر است [۶])، c سرعت نور در خلأ، y دامنه شدت نور تزریقی به داخل مشدد،  $\Lambda$  طول حفره فعال، l طول ماده فعال، T میزان تلفات کاواک،  $\theta$  عدم تطابق بسامدی سیستم با پرتو تزریقی،  $\alpha$  ضریب پهنای خط و  $\tau_e$  طول عمر حاملین است.  $\mu$  معرف پارامتر پمپ است. به عنوان مثال به ازای

۱. Roundtrip

۲. Beam Splitter

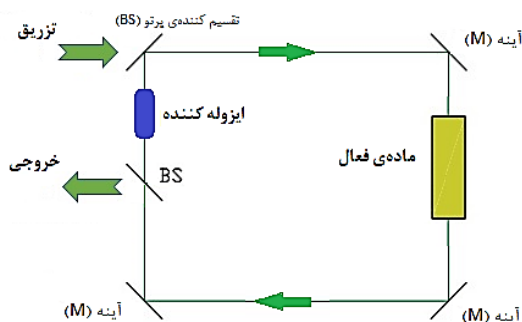
۳. Slowly varying envelope approximation

$$\frac{c\tau_d}{\Lambda} \partial_\eta E + \partial_\tau E = \sigma [y - (1 + i\theta)E + (1 - i\alpha)DE], \quad (4)$$

$$\partial_\tau D = b[\mu - D(1 + |E|^2)], \quad (5)$$

روش محاسبات عددی به کار برده شده در این مطالعه، روش گام مجزا است. معادلات دیفرانسیل با استفاده از روش رانگ-کوتای مرتبه چهارم به کد نرم افزاری متلب تبدیل شده و با اعمال شرایط اولیه به ورودی کدها، رفتار سالیون فازی بررسی شده است. در این مطالعه، شرایط اولیه برای تشکیل و پایداری سالیون فازی از مطالعات قبلی استنتاج می‌شود [۱۳]. جهت استخراج شرایط مناسب تولید و پایداری سالیون، جواب‌های همگن و پایای سیستم به دست آمده و تحلیل ناپایداری انجام شد. با در دست داشتن جواب‌های پایا و همگن و با به دست آمدن نواحی پایدار و ناپایدار با کمک این نواحی، شبیه سازی تولید سالیون‌های فازی و مطالعه اندرکنش آنها انجام گرفت.

۴. Adiabatic



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طرح نمادین مدل تجربی برای ایجاد سالیتون فازی.

اگر این شرایط برای این سالیتون مهیا شود گفته می‌شود که سالیتون خاموش شده است. از این رهیافت برای کلیدزنی در سالیتون استفاده خواهد شد.

با در نظر گرفتن این رهیافت کلیدزنی روی سالیتون فاز بررسی شد. در شبیه‌سازی عددی جهت ایجاد سالیتون فاز از روش اضافه کردن شکل موج کینک<sup>۱</sup> جهت تحریک سالیتون استفاده می‌شود [۱۱و۶]. دو نوع شکل موج برای کینک وجود دارد. شکل موج کینک روشن و شکل موج کینک خاموش<sup>۲</sup> که در شکل ۴ نمایش داده شده است.

با در نظر گرفتن این موضوع، کلیدزنی در سالیتون فاز مطالعه شد. برای این کار ابتدا سالیتون فاز با تحریک کینک روشن در داخل مشدد خلق شد. به سالیتون اول فرصت داده شد تا بعد از تولید در داخل مشدد به حالت پایدار برسد. بعد از رسیدن سالیتون به حالت پایدار (ثابت ماندن مساحت شکل در فضای فاز) سالیتون دوم با تحریک کینک روشن در دور ۱۵۰ به داخل مشدد تزریق شد. مطابق شکل ۵ مشاهده شد که سالیتون اول به سالیتون دوم کلیدزنی شده و به حالت پایدار رسید.

جهت بررسی بیشتر، تغییرات نمودار فاز نیز بررسی شده است برای این منظور شکل نمودار فاز را در هر گام پشت سر هم ترسیم کرده و سرعت کاهش سطح داخل منحنی بررسی شد. مطابق شکل ۶ مشاهده شد که سطح نمودار فاز سالیتون اول بعد از تزریق سالیتون دوم با کینک روشن کاهش یافته و در نهایت از بین می‌رود.

در نهایت با استفاده از این شبیه‌سازی پدیده کلیدزنی و همچنین خاموشی سالیتون فازی بررسی شد.

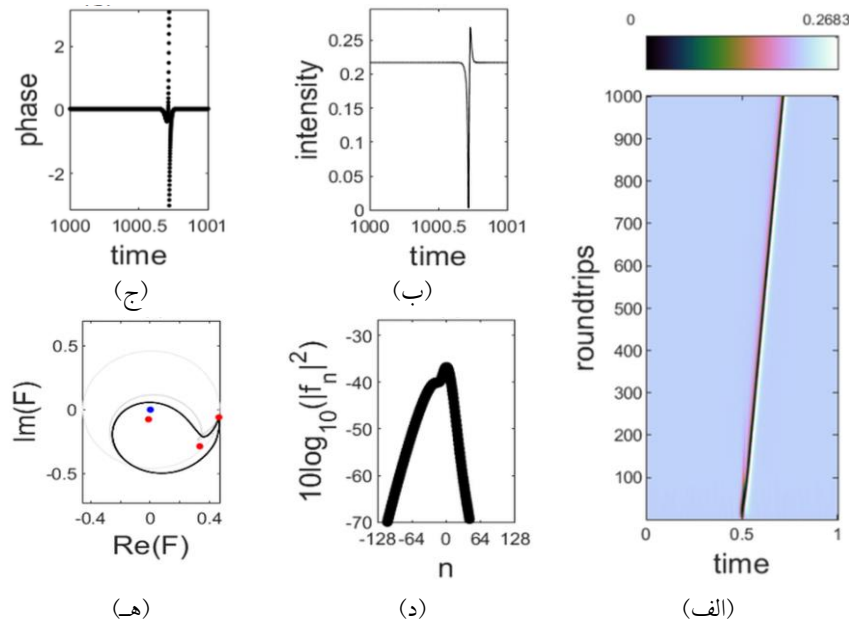
### ۳. کلیدزنی سالیتون فازی

یکی از مهم‌ترین اهداف این مطالعه بررسی کلیدزنی سالیتون‌های فاز است. همان‌طور که در بالا نیز اشاره شد برای تولید تک سالیتون ابتدا شرایط پایداری باید بررسی شود. برای این کار از حل معادلات پایا و همگن استفاده شد. با استفاده از این روش مقادیر مناسب برای ضریب پهنای خط  $(\alpha)$ ، مقدار عدم تطابق بسامدی سیستم با پرتو تزریقی  $(\theta)$ ، ضریب پمپ  $(\mu)$  و همچنین دامنه موج نور تزریقی به داخل مشدد  $(y)$ ، مشخص شد. در این مطالعه برای ایجاد شرایط مناسب، مقادیر فوق در محدوده پایداری و ناپایداری اعمال شده و نتایج به دست آمده برای ناحیه پایدار مطابق شکل ۲ به دست آمد.

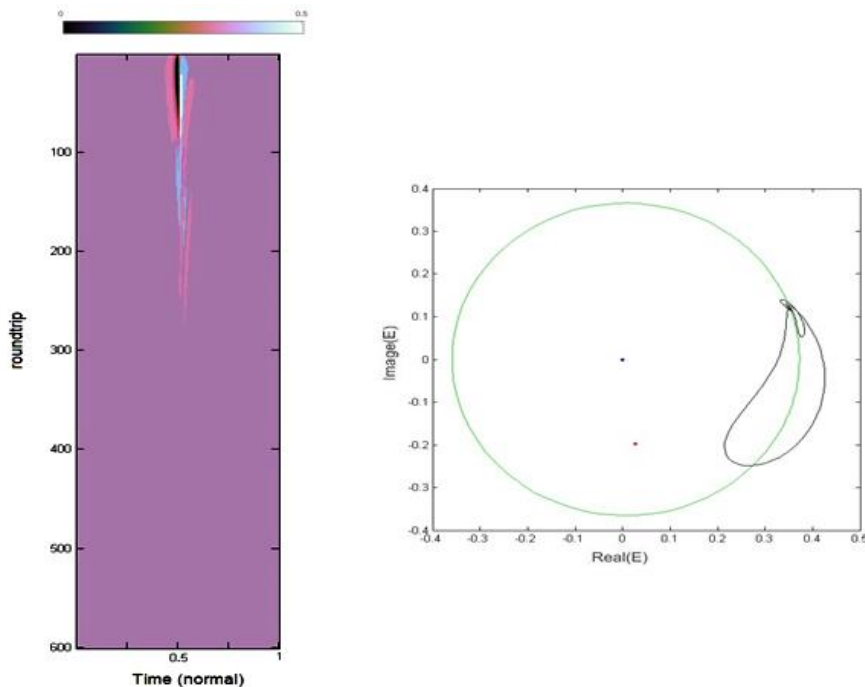
مقادیر به دست آمده از تحلیل ناپایداری به عنوان مقادیر مورد نیاز برای تولید تک سالیتون به کد شبیه‌سازی اعمال شد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود به ازای مقادیر مناسب از پارامترهای سیستم، سالیتون فازی تشکیل می‌شود. اگر پارامترهای خارج از منطقه پایداری را به کد شبیه‌سازی اعمال کنیم مطابق شکل ۳ مشاهده می‌شود که سالیتون تحریک شده پایدار نبوده و شدت نگار از بین رفتن سالیتون را نمایش می‌دهد. همچنین مطابق شکل ۳ مشاهده می‌شود نمودار فاز با گذشت زمان به سمت یکی از نقاط ثابت کاهش سطح می‌دهد. کاهیده شدن سطح به سمت صفر در سالیتون‌ها معرف زوال سالیتون است که

۱. Kink phase profile

۲. Antikink phase

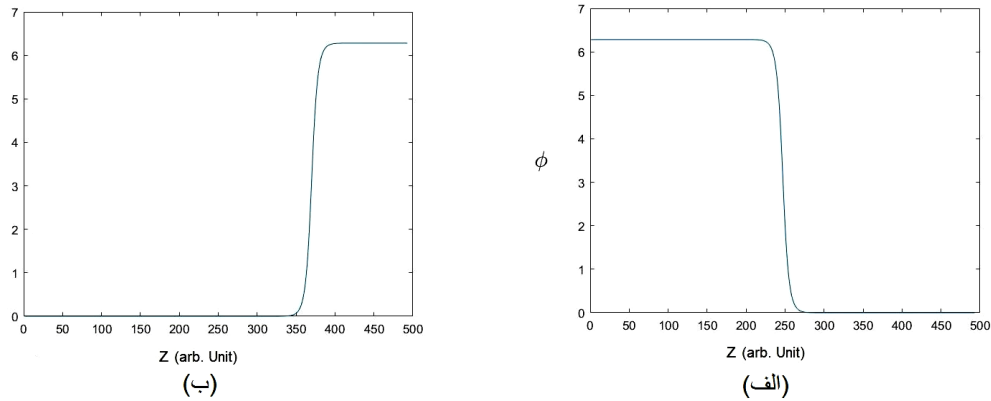


شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تشکیل یک سالیتون فازی برای مقادیر  $\mu = 1/1, \alpha = 3, \theta = -2/7, T = 0/3, y = 0/045$ . نمودار (الف) شدت نگار تک سالیتون است. این نمودار رفتار تک سالیتون در ۱۰۰۱ دور از گردش در داخل مشدد (گردش - دور) را نشان می‌دهد. محور افقی زمان نرمال است (مدت زمان چرخش در مشدد با در نظر گرفتن سرعت نور در مسیر یک متری در حدود ۳/۳ ns خواهد بود)، نمودار (ب) شدت تک سالیتون در دور آخر را نمایش می‌دهد. نمودارهای (ج)، (د) و (ه) به ترتیب رفتار فاز سالیتون در دور آخر، تحلیل طیفی برحسب مدهای طولی و نمودار فضای فاز سالیتون را نشان می‌دهد. نقاط رنگی نشان داده شده در این شکل معرف نقاط ثابت در نمودار فضای فاز است که در آن نقطه آبی مرکز<sup>۱</sup> و سه نقطه قرمز جواب معادلات همگن و پایا هستند.

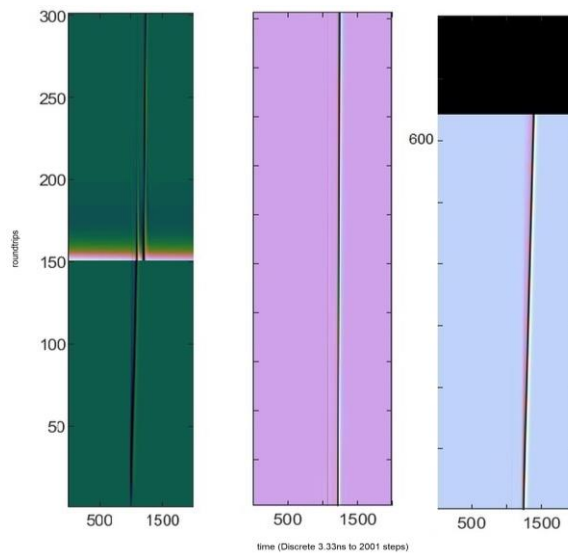


شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) خاموشی تک سالیتون فازی با اعمال پارامترهای  $\mu = 1/1, \alpha = 3, \theta = -2/7, T = 0/3, y = 0/069$  چپ: شدت نگار تک سالیتون، راست: فضای فاز میدان.

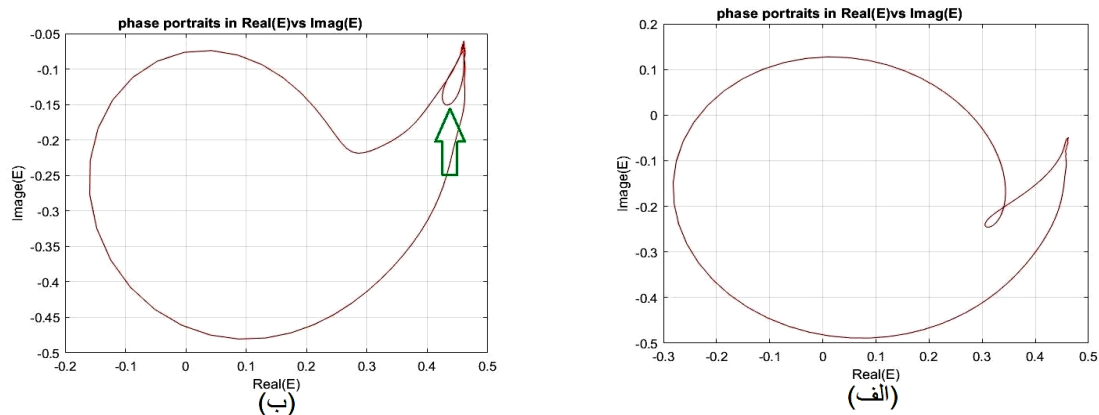
۱. Origin



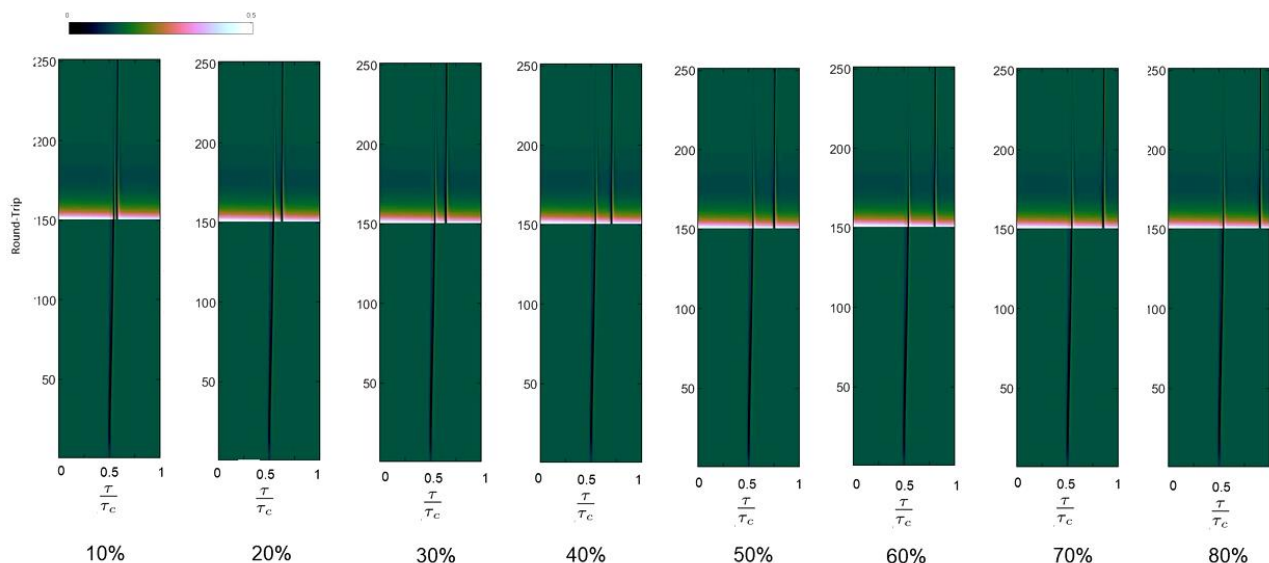
شکل ۴. شکل موج جهت تحریک سالیتون در شبیه‌سازی (الف) کینک خاموش (ب) کینک روشن ( $\phi_{\max} = 2\pi$ ).



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) کلیدزنی سالیتون فاز بعد از تزریق سالیتون دوم در دور ۱۵۰، مشاهده می‌شود سالیتون اول به‌مرور از بین رفته و سالیتون دوم در دور ۶۰۰ به پایداری می‌رسد. نمودارها از چپ به راست هستند (محور عمودی تعداد گردش نور در مشدد و محور افقی زمان یک دور گردش در مشدد برابر 3/3ns است که به ۲۰۰۱ گام گسسته شده است).



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار فاز سالیتون در کلیدزنی (الف) سالیتون اول در شروع، (ب) سالیتون اول بعد از ۴۰۰ دور (نمودار نشان داده شده با پیکان که در حال کاهش سطح است) و سالیتون دوم بعد از ۴۰۰ دور (نمودار بزرگ).



شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تحریک سالیتون دوم در دور  $150^\circ$  به فاصله زمانی  $10^\circ$  الی  $80^\circ$  به ترتیب از چپ به راست. (محور عمودی دور گردش و محور افقی زمان نرمال شده در داخل مشدد است.  $\tau$  زمان گردش و  $\tau_c$  زمان گردش کامل نور در مشدد است).

تحریکی در مشدد حذف شد. بنابراین نتیجه می شود برای کلیدزنی سالیتون فازی باید شدت سالیتون فازی تحریکی در لحظه تزریق از مقدار شدت سالیتون اول بالاتر باشد.

در نهایت میزان چگالی حاملین نیم رسانا در زمان تزریق سالیتون مورد بررسی قرار گرفت. مطابق شکل ۹ نمودار چگالی حاملین پس از تزریق بعد از تجربه یک شرایط ناپایدار گذرا به حالت پایدار رسیده است.

یکی از مشخصات فیزیکی و برجسته کلیدزنی زمان کلیدزنی است که با استفاده از نتایج شبیه سازی این زمان محاسبه شده است. برای محاسبه زمان مورد نیاز برای کلیدزنی، مدت زمان رسیدن شدت به  $63\%$  شدت اولیه بررسی شد. مطابق شکل ۱۰ مشاهده شد بعد از  $23$  دور شدت سالیتون به  $63\%$  شدت اولیه می رسد. این مقدار معادل  $75/9$  نانو ثانیه برآورد شد.

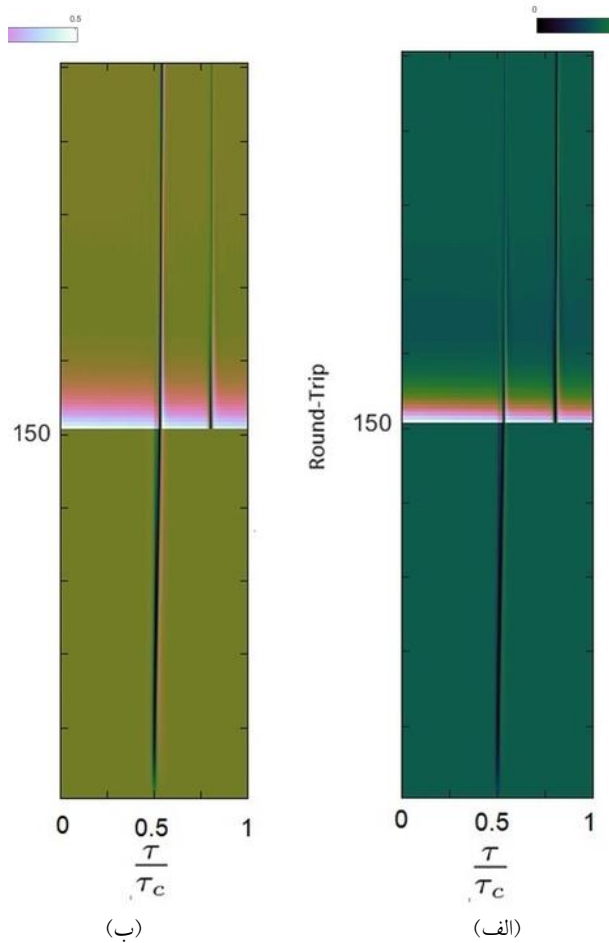
#### ۴. خاموش کردن سالیتون فازی

یکی از خواص بسیار مهم سالیتون ها آن است که اگر شرایط تأمین انرژی در سیستم برقرار باشد سالیتون تولید شده به عنوان یک ساختار جایگزیده خلق و همواره زنده خواهد ماند. یکی از موضوعات مهم در مطالعه این ساختارها آن است که نحوه پاک

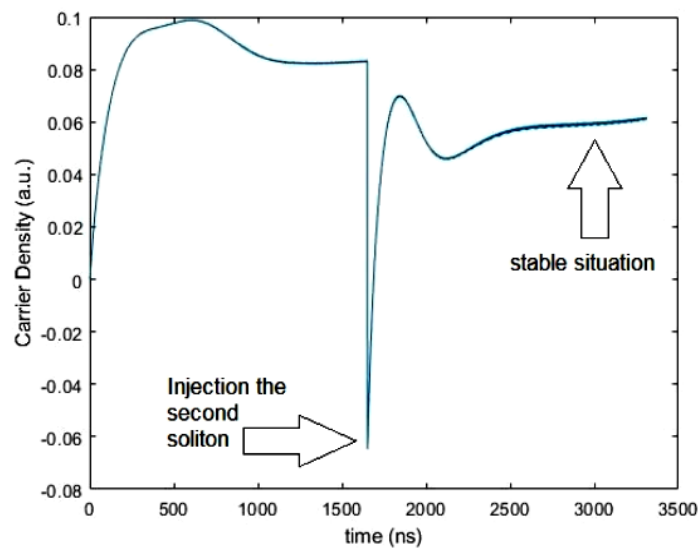
برای بررسی بیشتر، تأثیر دو پارامتر زمان تحریک سالیتون دوم و مقدار آستانه شدت سالیتون دوم روی فرایند کلیدزنی مطالعه شد. در این راستا سالیتون دوم را در زمان های مختلف به داخل مشدد تزریق کردیم. این زمان ها را برحسب درصد نشان داده ایم. اگر سالیتون دوم را دقیقاً بر روی سالیتون اول تزریق کنیم فاصله زمانی صفر درصد خواهد بود به همین ترتیب با افزایش درصد، مقدار فاصله زمانی از سالیتون اول افزایش می یابد. این فاصله را برای  $10^\circ$  الی  $80^\circ$  با گام  $10^\circ$  در سیستم اعمال کردیم. مطابق شکل ۷ مشاهده شد برای کلیدزنی فاصله زمانی بین سالیتون اول و سالیتون تحریک شده دوم تأثیری در زمان کلیدزنی ندارد.

در ادامه تأثیر شدت سالیتون فازی کلیدزن بررسی شد. در این بررسی میزان آستانه شدت سالیتون دوم به عمد کاهش داده شد. مطابق شکل ۸ مشاهده شد با تحریک سالیتون دوم با شدتی کمتر از شدت سالیتون اول در دور  $150^\circ$  امکان کلیدزنی ایجاد نشده و سالیتون دوم بعد از تزریق نمی تواند پدیده کلیدزنی را انجام دهد. مشاهده شد سالیتون اول بعد از تحریک سالیتون دوم ناپایدار شده ولی دوباره زنده شده<sup>۱</sup> و سالیتون

۱. Survive

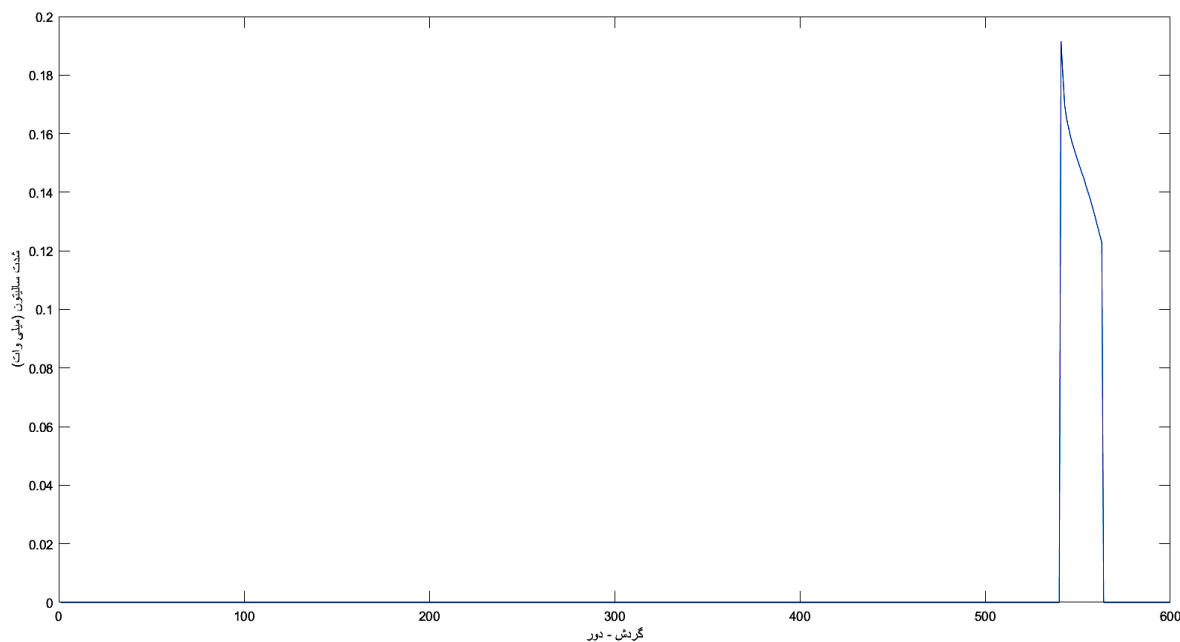


شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تزریق سالیتون دوم در دور ۱۵<sup>o</sup> به فاصله زمانی ۶۰٪؛ شدت نگار (الف) نمایش تحریک سالیتون با شدتی برابر شدت سالیتون اول، شدت نگار (ب) نمایشی از تحریک سالیتون دوم با ۲۰٪ کمتر از شدت سالیتون اول.



شکل ۹. (رنگی در نسخه الکترونیکی) رفتار چگالی حاملین در قبل و بعد از کلیدزنی.





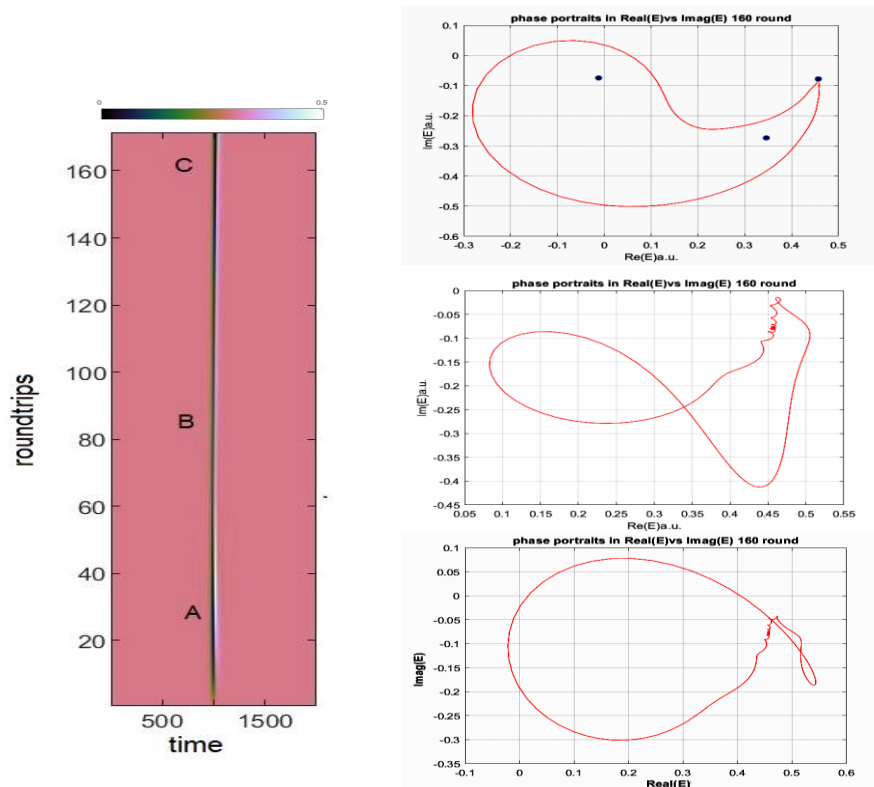
شکل ۱۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار زمان کلیدزنی دور ۵۴۰ برای خاموش سازی سالیتون. مقدار شدت کمتر از ۰.۰۶۳٪ شدت بیشینه بعد از کلید زنی برابر صفر قرار داده شده است. عرض پالس (مشخص شده با پیکان) زمان کلیدزنی را (برحسب دور) نمایش می‌دهد.

فازی تزریق شده با کینک خاموش ناپایدار است ولی این ناپایداری به صورت چرخش دست‌سانی به حالت پایدار می‌رسد. برای بررسی این موضوع در ابتدا، سیستم را با کینک خاموش تحریک کرده و رفتار شدت سالیتون بررسی شد.

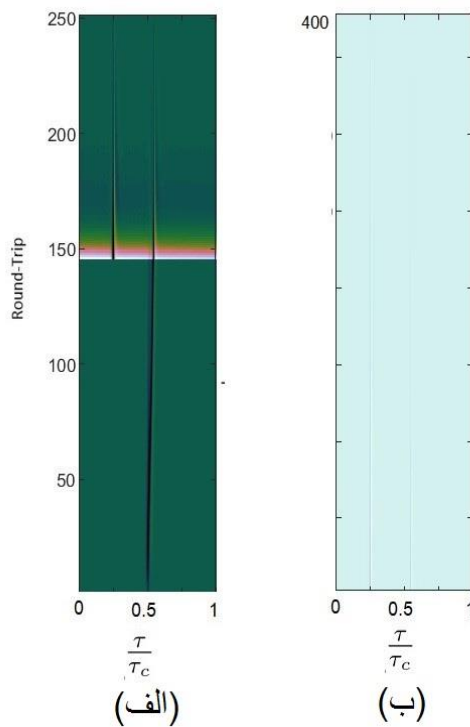
شکل ۱۱ نشان می‌دهد بعد تحریک سالیتون با کینک خاموش دست‌سانی منفی در شدت نگار ظاهر می‌شود. (ناحیه A در شدت نگار) ولی نمی‌تواند در این حالت پایدار بماند و بعد از عبور از یک ناحیه گذار (ناحیه B در شدت نگار) خود را به سالیٹونی با دست‌سانی مثبت می‌رساند (ناحیه C در شدت نگار). رخداد دست‌سانی کاملاً با استفاده از نمودارهای فضای فاز قابل مشاهده است (نمودارهای راست از شکل ۱۱). در دست‌سانی منفی شکل نمودار فضای فاز (نمودار پایین از راست در شکل ۱۱) به صورت برعکس دست‌سانی مثبت است. (نمودار بالا از راست در شکل ۱۱). ناحیه گذرا نیز مابین این دو فرایند مشاهده می‌شود. برای بررسی بیشتر، نمودار فضای فاز به

کردن سالیٹون‌ها نیز بررسی شود. پاک کردن و حذف سالیٹون فازی خلق شده در سیستم را خاموش کردن سالیٹون فازی خواهیم نامید. شرط خاموش کردن، آن است که بعد حذف سالیٹون موجود، توزیع شدت زمینه باید به حالت یکنواخت برسد. این موضوع برای مقاصد کاربردی اهمیت بسیاری دارد. روش‌های مختلفی برای این کار مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. در تمام این روش‌ها شدت زمینه بعد از فرایند خاموش کردن به حالت یکنواخت نرسیده و توزیع شدت نهایی با به هم ریختگی شدیدی مواجه می‌شد.

یکی از رهیافت‌های استفاده شده در این مطالعه برای خاموش کردن سالیٹون‌های فازی استفاده از تحریک کینک خاموش در زمان تزریق سالیٹون دوم است. قبل از بررسی فرایند خاموشی سالیٹون فازی، ابتدا تزریق با تحریک کینک خاموش بررسی شد. همان‌طور که در مقدمه نیز اشاره شد تحریک سالیٹون فازی با کینک خاموش باعث ایجاد دست‌سانی منفی در نمایه شدت می‌شود. نکته مهم آن است که سالیٹون



شکل ۱۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تحریک سالیتون با کینک خاموش و تحول فاز به سمت سالیتون پایدار بعد از ۱۵۰ دور. چپ: شدت نگار سالیتون و تحول شدت در نواحی A تا C و راست: تحول شکل نمودار فاز در فضای فاز میدان الکتریکی.



شکل ۱۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) شدت نگار برای خاموشی سالیتون (الف) تحریک سالیتون دوم در دور ۱۵۰ و (ب) خاموشی هر دو سالیتون بعد از ۴۰۰ دور و رسیدن به شدت زمینه یکنواخت.

است تا خاموشی سالیتون اول انجام گیرد و با شدت کمتر از آستانه سالیتون فازی دوم، خاموشی سالیتون اول امکان پذیر نیست. چنانچه در مطالعات قبلی نیز به اثبات رسیده است، با اعمال کینک مثبت، سالیتون با دست سانی مثبت و بالعکس تولید می شود، ولی نکته قابل توجه این است که تحریک با کینک منفی ناپایدار بوده و سیستم خودبه خود به دست سانی مثبت تغییر می یابد. یکی از نتایج این پژوهش که نتایج شبیه سازی آنها را تأیید می کند، استفاده از همین موضوع جهت کلیدزنی خاموش سالیتون هاست؛ بدون این که اثری از پرتو کلیدزن کننده باقی بماند. این پژوهش کلیدزنی در سالیتون فازی را بررسی کرده و نشان داده است که می توان سالیتون فازی را خاموش و کنترل کرد. موارد مطرح در کلیدزنی مانند، آستانه کلیدزنی و سرعت کلیدزنی در این پژوهش بررسی شد. استفاده از نتایج این مطالعه می تواند راه را برای بهره گیری از سالیتون های فازی در زمینه های کاربردی مانند انتقال سریع و امن اطلاعات و همچنین پردازش نوری را فراهم کند. برای نیل به این هدف به ایجاد بستر تجربی مناسب جهت آزمودن تجربی این فرایند برای مطالعات بعدی پیشنهاد می شود.

صورت پویانمایی نیز شبیه سازی شد و چرخش نمودار فضای فاز عینی تر شد.

با توجه به این حقیقت برای خاموش کردن سالیتون فاز مطابق شکل ۱۲، سالیتون اول طبق معمول با کینک روشن تحریک شده و اجازه دادیم تا تک سالیتون فازی تا گردش - دور ۱۵۰ به حیات خود ادامه دهد. در دور ۱۵۰ سالیتون دوم را با کینک خاموش تحریک کردیم. مشاهده شد با تحریک سالیتون با کینک خاموش هر دو سالیتون خاموش شده و شدت نگار نشان می دهد بعد از فرایند خاموش کردن شدت زمینه به حالت یکنواخت برسد. با توجه به این که شدت زمینه بعد از فرایند تزریق به حالت یکنواخت رسیده می توان نتیجه گرفت که فرایند خاموش کردن سالیتون به وقوع پیوسته است.

## ۵. نتیجه گیری

در این مقاله رفتار اندرکنش جفت سالیتون فازی در فاصله های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. با بهره گیری از رفتار اندرکنشی این سالیتون ها روشی برای نوشتن (روشن کردن) و پاک کردن (خاموش کردن) این سالیتون ها ارائه شد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد زمان تزریق سالیتون دوم تأثیری در زمان خاموشی سالیتون اول ندارد ولی شدت آستانه ای لازم

## مراجع

1. L A Lugiato and R Lefever, *Phys. Rev. Lett.* **58** (1987) 2209.
2. S Fauve and O Thual, *Phys. Rev. Lett.* **64** (1990) 282.
3. P Couillet, C Riera, and C Tresser, *Phys. Rev. Lett. (PRL)*, **84** (2000) 3069.
4. F Leo, S Coen, P Kockaert, S Gorza, P Emplit, and M Haelterman, *Nat. Photon* **4** (2010) 471.
5. P Grelu, and N Akhmediev, *Nat. Photon.* **6** (2012) 84.
6. F Gustave, C Rimoldi, P Walczak, L Columbo, M Brambilla, F Prati, G Tissoni, and S Barland, *Eur. Phys. J. D (EPJ)* **71** (2017) 154
7. F Gustave, L Columbo, G Tissoni, M Brambilla, F Prati, and S Barland, *Phys. Rev. A (PRA)* **93** (2016) 063824.
8. F Gustave, L Columbo, G Tissoni, M Brambilla, F Prati, B Kelleher, B Tykalewicz, and S Barland, *Phys. Rev. Lett. (PRL)* **115** (2015) 043902.
9. S Anbardan, R Kheradmand, and F Prati, *JNP*, **13** (2018) 012502.
10. C Rimoldi, F Gustave, L Columbo, M Brambilla, S Barland, F Prati, and G Tissoni, *OSA* **25** (2017) 22018.
11. H Chat, A Pikovsky, O Rudzick, *Physica D* **131** (1999), 17
12. M Eslami and R Kheradmand, *Optical Review* **19** (2012) 242.
13. G H Shakarab, R Kheradmand, M A Bolorizadeh, and F Prati, *Applied Sciences* **9** (2019) 4351.
14. S Yanchuk, S Ruschel, J Sieber, and M Wolfrum, *Phys. Rev. Lett. (PRL)* **23** (2019) 053901.
15. L Munsberg, J Javaloyes, and S V Gurevich, *AIP Chaos* **30** (2020) 063137.