

فهرست مطالب

مقدمه	۹
فصل اول: بررسی منابع	۱۳
۱-۱ سالیتون	۱۳
۱-۱-۱ سالیتون های نوری زمانی	۱۴
۱-۱-۲ سالیتونهای نوری فضایی	۱۵
۲-۱ پدیده های غیرخطی نور	۱۹
۱-۲-۱ ضریب شکست وابسته به شدت و پدیدههای غیرخطی خودکانونی و خود واکانونی	۱۹
۲-۲-۱ ناپایداری مدولاسیون	۲۱
۳-۲-۱ طرحوارههای نوری	۲۳
۴-۲-۱ دوپایائی نوری	۲۵
۳-۱ سیستم نوری گسسته	۲۶
۱-۳-۱ آرایه های موجبری	۲۶
۲-۳-۱ پراش گسسته	۲۹
۳-۳-۱ خصوصیات غیر خطی و سالیتونهای گسسته	۳۱
۴-۳-۱ سالیتونهای تاریک گسسته	۳۵
۵-۳-۱ سالیتونهای متحرک گسسته	۳۶
۶-۳-۱ سالیتون کاواک گسسته	۳۷
فصل دوم: مواد و روشها	۴۱
۱-۲ جفت شدگی غیرخطی دو موجبر	۴۱
۲-۲ آرایه ای از موجبرهای جفت شده	۴۳

- ۴۵..... ۳-۲ آرایه ای از کاواکهای جفت شده با غیرخطیت کر
- ۴۸..... ۴-۲ جوابهای ایستای همگن و تحلیل پایداری خطی آنها
- ۵۰..... ۴-۲ جوابهای غیرهمگن و بررسی پایداری آنها
- ۵۱..... ۱-۴-۲ روش حل عددی نیوتن رافسون
- ۵۳..... ۲-۴-۲ حل معادلات جفت شده با استفاده از روش نیوتن-رافسون
- ۵۵..... ۳-۴-۲ تحلیل پایداری خطی جواب غیر همگن
- ۵۶..... ۵-۲ روش شبیه سازی دینامیکی
- ۵۶..... ۱-۵-۲ روش اویلر در حل معادلات دیفرانسیل
- ۵۷..... ۲-۵-۲ روش رانگ-کوتا
- ۶۰..... فصل سوم: بحث، نتیجه گیری و پیشنهادات
- ۶۰..... ۱-۳) بررسی دوپایائی و ناپایداری مدولاسیون جواب های همگن
- ۶۵..... ۲-۳) سالیتون های کاواک گسسته
- ۶۵..... ۱-۲-۳) غیرخطیت خودکانون
- ۷۱..... ۲-۲-۳) غیرخطیت خود واکانون
- ۷۴..... ۳-۲-۳) سالیتونهای متحرک
- ۷۴..... ۳-۳) کلیدزنی سالیتون کاواک گسسته با استفاده از گرادیان دامنه
- ۷۶..... ۱-۳-۳) کلید زنی نوری در سیستم با غیرخطیت خودکانون
- ۸۵..... ۲-۳-۳) غیرخطیت خود واکانون

فهرست شکلها

- شکل ۱-۱ کانال آب در اسکاتلند که اسکات راسل آزمایش خود را در آن انجام داد. ۱۴.....
- شکل ۲-۱ (الف) انتشار نور در محیط خطی، پرتو نور در حین انتشار دچار پراش شده است. (ب) سالیتون فضایی ۱۷.....
- شکل ۳-۱ طرح‌واره‌ای از اثر خودکانونی، پرتو در برخورد به محیطی که ضریب شکست آن در مرکز بیشتر از لبه هاست کانونی خواهد شد. ۲۱.....
- شکل ۴-۱ اثر خود واکانونی، پرتو در حین عبور از محیطی که ضریب شکست در مرکز کمتر از لبه هاست دچار واگرایی خواهد شد. ۲۱.....
- شکل ۵-۱ تأثیر اختلال در ایجاد ناپایداری مدولاسیون ۲۳.....
- شکل ۶-۱ نمونه ای از طرح‌های نوری (الف) طرح شش گوشه (ب) لانه زنبوری ۲۴.....
- شکل ۷-۱ رابطه هیستریزس خروجی- ورودی برای سیستم دو پایا ۲۵.....
- شکل ۸-۱ آریه ای از موجبرهای جفت شده ۲۷.....
- شکل ۹-۱ انتشار نور در سیستم خطی برای حالتی که فقط موجبر مرکزی برانگیخته شده است. شکل سمت چپ تغییرات شدت در موجبرها را نسبت به طول انتشار نشان می دهد و شکل سمت راست تغییرات توان در موجبر تحریک شده P_0 موجبر اول P_1 و موجبر دوم P_2 را نسبت به طول انتشار نشان می دهد ۲۸.....
- شکل ۱۰-۱ طرح پراشی گسسته مشاهده شده در خروجی نسبت به پهنای پرتو ورودی ۲۸.....
- شکل ۱۱-۱ رابطه پراش گسسته: تغییرات بردار موج طولی به ازای تغییرات اختلاف فاز عرضی بین دو موجبر متوالی $K = k_x d$ در ناحیه اول بریلون ۳۰.....
- شکل ۱۲-۱ شدت خروجی و نحوه ی انتشار نور به ازای زوایای مختلف پرتو ورودی ۳۱.....

- شکل ۱-۱۳ توزیع میدان بر روی موجبرها به ازای سه توان ورودی مختلف با افزایش توان ورودی از بالا به پایین شاهد تشکیل سالیتون خواهیم بود..... ۳۲
- شکل ۱-۱۴ تغییرات توان در موجبر تحریک شده نسبت به طول انتشار به ازای ۳ توان ورودی..... ۳۲
- شکل ۱-۱۵ توزیع عرضی میدان در موجبرها نسبت به توان ورودی..... ۳۳
- شکل ۱-۱۶ سالیتون تاریک و روشن گسسته در آرایه ای از موجبرهای جفت شده ۳۵
- شکل ۱-۱۷ نمونه ای از سالیتونهای زوج و فرد شطرنجی و غیر شطرنجی در سیستم گسسته ۳۵
- شکل ۱-۱۸ توزیع میدان سالیتون تاریک گسسته فرد (چپ) و زوج (راست). پراش از نوع غیرعادی و غیرخطیت از نوع خودکانون فرض شده است. ۳۶
- شکل ۱-۱۹ وابستگی پتانسیل پیرز- نابارو به توان ۳۷
- شکل ۱-۲۰ آرایه ای از موجبرهای کاواک جفت شده ۳۹
- شکل ۲-۱ نمایش شماتیک از انتشار نور در دو موجبر جفت شده در شدتهای پایین (رنگ سبز) و شدت بالا (رنگ قرمز) ۴۲
- شکل ۲-۲: نمودار سمت چپ: توان باقیمانده در موجبر اول نسبت به طولی که نور داخل موجبر طی می کند به ازای سه توان ورودی مختلف، نمودار رنگ سیاه مربوط به رژیم خطی، رنگ قرمز مربوط به توان بحرانی و رنگ سبز برای توانهای بالای توان بحرانی. نمودار سمت راست وابستگی میزان توان باقیمانده در موجبر تحریک شده به توان ورودی را نشان می دهد. ۴۴
- شکل ۲-۳ آرایه ای از موجبرهای جفت شده: خطوط سبز پراش گسسته به ازای توان کم را در آرایه ی موجبری از جنس آلومینیوم گالیم آرسناید را نشان می دهد و خطی که با رنگ قرمز مشخص شده مربوط به نور جایگزیده در موجبر برانگیخته به ازای توان بالا است ۴۴
- شکل ۲-۴ تفسیر شماتیکی فرمول بندی نیوتن- رافسون ۵۲
- شکل ۲-۵ نمونه ای که روش نیوتن- رافسون از جواب صحیح دور می شود ۵۳

شکل ۱-۳ منحنی دوپایائی جوابهای همگن سیستم برای دامنه موج تخت به ازای دامنه پرتو نگهدارنده

۶۱ $\Delta_{eff} = -3, C = 1, q = 0$

شکل ۲-۳ ناحیه ناپایداری مدولاسیون جوابهای هموزن در فضای پارامتری $|b| - q$ (حالت خود کانون)

۶۲ بقیه پارامترها: $\Delta_{eff} = -3, C = 1, \gamma = 1$

شکل ۳-۳ منحنی دوپایائی، نقاطی که با خط چین نشان داده شده است نواحی ناپایداری به ازای $q = 0$ را

۶۳ نشان می دهد

شکل ۴-۳ نواحی ناپایداری در فضای پارامتری $q - Q$ (الف) $|b| = 2$ (شاخه بالائی) (ب) $|b| = 1.05$ (شاخه

۶۳ پائینی) $\Delta_{eff} = -3, C = 1$

شکل ۵-۳ نواحی ناپایداری مدولاسیون جوابهای همگن در فضای پارامتری $|b| - q$ (غیرخطیت

۶۴ خودواکانون)، بقیه پارامترها: $\Delta_{eff} = 3, C = 0.25, \gamma = -1$

شکل ۶-۳ منحنی دوپایائی، نواحی ناپایداری مدولاسیون با خط چین مشخص شده است.

۶۴ $C = 0.25, \Delta_{eff} = 3, \gamma = -1$

شکل ۷-۳ نمایه مربوط به دامنه سالیتون در آرایه ای از کاواکهای جفت شده

شکل ۸-۳ منحنی دوپایائی مربوط به جوابهای همگن، خط چین ها مربوط به جوابهای ناپایدار به ازای q

های متفاوت هستند (بازه ی A تا B به ازای $q = 0$ ، بازه ی C تا D به ازای $q = \pi/2$ و بازه ی E تا F به ازای

$q = \pi$ ، ناپایدار هستند). منحنی بالایی که با علامت * نشان داده شده است، منحنی مربوط به شاخه ی

سالیتونی، در حالتی است که پرتو نگهدارنده به صورت عمود بر آرایه می تابد ($q = 0$). پارامترهای دیگر:

۶۶ $C = 1, \Delta_{eff} = -3, \gamma = 1$

شکل ۹-۳ سمت راست: تغییرات ماکزیمم دامنه سولیتون های کاواک گسسته بر حسب ثابت جفت شدگی

جوابهایی که ناپایدار بودن با خط چین نشان داده شده اند $E_0 = 2, \Delta_{eff} = -3, C = 1$ سمت چپ: تغییرات

۶۷ قسمت حقیقی ویژه مقدار اختلال با افزایش پارامتر جفت شدگی

- شکل ۳-۱۰ تحولات زمانی سالیتون ناپایدار $\Delta' = -3, C = 5, E_0 = 1.8, q = 0, \gamma = 1$ ۶۷
- شکل ۳-۱۱ شبیه سازی دینامیکی سالیتون پایدار $E_0 = 2, C = 1, \Delta_{eff} = -3, q = 0$ ۶۸
- شکل ۳-۱۲ نمایه دامنه سالیتونهای کاواک گسسته مختلف به ازای جفت شدگی های مختلف (a) حالتی را نشان می دهد که ماکزیمم دامنه در موجبر وسطی متمرکز شده، (b) ماکزیمم دامنه در دو موجبر وسطی متمرکز شده، (c) ماکزیمم دامنه در شش موجبر وسطی متمرکز شده است $E_0 = 2, \Delta_{eff} = -3, q = 0$ ۶۸
- شکل ۳-۱۳ سالیتونهای کاواک گسسته مرتبه بالا برای $E_0 = 2, \Delta_{eff} = -3$ خط چین ها مربوط به جوابهای ناپایدار هستند. ۶۹
- شکل ۳-۱۴ نمونه ای از طرحواره مشاهده شده در سیستم خودکانون ۶۹
- شکل ۳-۱۵ شاخه سالیتونی تاریک به همراه شاخه مربوط به طرحواره ۷۰
- شکل ۳-۱۶ سالیتون کاواک گسسته تاریک و فاز مربوط به آن ۷۱
- شکل ۳-۱۷ منحنی شدت بر حسب E_0 برای سولیتون های چند قللهای پایدار، از بالا به پائین سولیتونهای هفت، شش، پنج، چهار، سه، یک قللهای را نشان می دهد. ۷۲
- شکل ۳-۱۸ منحنی شدت بر حسب C برای $E_0 = 1.8$ برای سولیتون های چند قله ای پایدار از بالا به پائین سولیتونهای مرتبه اول تا مرتبه هفت $\gamma = -1, E_0 = 1.8, \Delta_{eff} = 3$ ۷۲
- شکل ۳-۱۹ منحنی سه بعدی سالیتون تک قله ای به ازای $\alpha = -1, \Delta_{eff} = 3$ ۷۳
- شکل ۳-۲۰ همزیستی سالیتون تاریک و روشن $C = 0.1$ ۷۳
- شکل ۳-۲۱ آرایه ای از کاواکهای جفت شده که تحت تابش پرتو گوسی قرار گرفته است ۷۶
- شکل ۳-۲۲ تحولات زمانی میدان خروجی در حین اعمال پرتو گوسی (رنگ قرمز) برای نوشتن سالیتون و بعد از حذف پرتو گوسی (رنگ آبی) $\gamma = 1, \Delta_{eff} = -3, C = 1, E_1 = 1, w = 1, E_0 = 2$ ۷۷
- شکل ۳-۲۳ وابستگی زمان اعمال پرتو گوسی به دامنه پرتو برای دو پهنا مختلف $\gamma = 1, \Delta_{eff} = -3, C = 1, E_0 = 2$ ۷۸

شکل ۳-۲۴ تحولات زمانی میدان خروجی در حین اعمال پرتو گوسی (رنگ قرمز) برای پاک کردن

سالیتون و بعد از حذف پرتو گوسی (رنگ آبی) $\gamma=1, \Delta_{eff}=-3, C=1, E_1=1, w=1, E_0=2$ ۷۹

شکل ۳-۲۵ وابستگی زمان اعمال پرتو گوسی به دامنه پرتو برای دو پهنا مختلف برای عمل پاک کردن

سالیتون $\gamma=1, \Delta_{eff}=-3, C=1, E_0=2$ ۸۰

شکل ۳-۲۶ نوشتن و پاک کردن متوالی با استفاده از پرتو گوسی: تغییرات دامنه نسبت به زمان بعد از هر

مرحله از فرآیند نوشتن یا پاک کردن سیستم به حالت آزاد رها می شود تا به حالت ایستا برسد و سپس

مرحله بعدی آغاز خواهد شد. اولین مرحله با استفاده از یک پرتو گوسی هم فاز با زمینه آغاز می شود.

پس از نوشتن سالیتون و رسیدن سیستم به حالت ایستا پرتو گوسی دیگر که در فاز مخالف زمینه قرار

دارد بر سیستم اعمال میشود که منجر به پاک شدن سالیتون مرحله قبل میشود این دو مرحله پس از

رسیدن سیستم به حالت ایستا تکرار شده است. ۸۱

شکل ۳-۲۷ نوشتن و پاک کردن سالیتونهای مستقل از هم $\gamma=1, \Delta_{eff}=-3, C=1, E_0=2$ ۸۲

شکل ۳-۲۸ تحولات زمانی مربوط به نوشتن سالیتون تاریک

۸۳ $q=0, E_1=3, w=1, E_0=9.4, C=1, \gamma=1, \Delta_{eff}=-3, \varphi=\pi$

شکل ۳-۲۹ سالیتون تاریک مرتبه دوم $q=0, E_1=4, W=2, E_0=9.4, C=1, \gamma=1, \Delta_{eff}=-3, \varphi=\pi$ ۸۳

شکل ۳-۳۰ سالیتون تاریک مرتبه سوم $q=0, E_1=3, W=3, E_0=9.4, \varphi=\pi$ ۸۴

شکل ۳-۳۱ تحولات زمانی برای پاک کردن سالیتون تاریک

۸۴ $q=0, E_1=3, w=1, E_0=9.4, C=1, \gamma=1, \Delta_{eff}=-3, \varphi=0$

شکل ۳-۳۲ منحنی دوپایانی و شاخه های سالیتونی با مرتبه های مختلف انواع مختلف سالیتون در سمت

راست منحنی نشان داده شده است پارامترها طوری انتخاب شده اند که انواع مختلف سالیتونها به طور

همزمان وجود داشته باشند. $|E_0|^2 = 3.25, C = 0.1, \Delta_{eff} = 3, q = 0$ ۸۶

شکل ۳-۳۳ تحولات زمانی برای نوشتن سالیتون مرتبه اول با استفاده از پرتو گوسی

۸۷..... $q=0, E_1=0.4, w=0.5, E_0=1.8, C=0.1, \gamma=-1, \varphi=0$

شکل ۳-۳۴ کلیدزنی سالیتون مرتبه اول به سالیتون مرتبه پنجم با استفاده از پرتو گوسی، پرتو گوسی در

شکل نشان داده شده است. $|E_0|^2=3.25, C=0.1, \Delta_{eff}=3, q=0, w=3, E_1=0.5, \varphi=0$

شکل ۳-۳۵ پاک کردن سالیتون مرتبه دوم $q=0, E_1=0.5, w=1, E_0=1.8, C=0.1, \gamma=-1, \varphi=\pi$

شکل ۳-۳۶ کلیدزنی سالیتون مرتبه پنج به مرتبه اول $q=0, E_1=0.5, w=1.7, E_0=1.8, \varphi=\pi$

شکل ۳-۳۷ کلیدزنی سالیتون پهن به دو سالیتون با پهنای کمتر پرتو گوسی اعمالی در شکل نشان داده

شده است. $q=0, E_1=0.5, w=1, E_0=1.8, C=0.1, \gamma=\pi$

شکل ۳-۳۸ نوشتن سالیتون تاریک $E_1=0.5, w=1.7, E_0=1.8, C=0.25, \varphi=\pi$

شکل ۳-۳۹ پاک کردن سالیتون تاریک با استفاده از پرتو گوسی $E_1=0.5, w=1.7, E_0=1.8, C=0.25, \varphi=0$

شکل ۳-۴۰ تبدیل سالیتون تاریک مرتبه اول به سالیتون مرتبه دوم $E_1=2, w=1, E_0=1.8, C=0.25, \varphi=\pi$

شکل ۳-۴۱ کلیدزنی سالیتون روشن و تاریک کنار هم $C=0.25, E_0=1.8$

مقدمه

پرتو نوری، امواج آب و غالب پدیده‌های موجی، به طور طبیعی در حین انتشار تمایل به پهن شدگی در فضا و زمان دارند، که عامل آن به ترتیب پراش^۱ و پاشندگی^۲ می‌باشد، ولی حالت‌هایی در طبیعت وجود دارد، که امواج در حین انتشار شکل اولیه خود را حفظ می‌کنند، که به آنها امواج سالیتمونی اتلاق می‌شوند. این نوع انتشار در سیال‌ها [۱]، امواج پلاسمائی [۲]، امواج صوتی [۳]، سیگنال‌های الکتریکی، خطوط تلگراف، فیزیک ذرات و حتی فیزیک نجوم قابل مشاهده هست.

به طور کلی سالیتمونها یا امواج سالیتمونی، امواج جایگزیده‌ای هستند که تحت شرایط خاصی در مواد غیر خطی ایجاد شده و بدون تغییر شکل در محیط منتشر می‌شوند.

بحث سالیتمون در بیشتر شاخه‌های فیزیک، مخصوصاً در مبحث نور شناخت مطرح است، که به آنها سالیتمونهای نوری اتلاق می‌شود و اولین بار توسط م.هرچر در سال ۱۹۶۴ که پدیده خودکانونی پرتو لیزر را مشاهده کرد پیش بینی شدند.

سالیتمونها بسته به اینکه موج در حین انتشار در فضا یا زمان محصور شود، به دو نوع فضایی و زمانی تقسیم‌بندی می‌شود. عامل اصلی در ایجاد هر دو نوع سالیتمون تغییرات غیرخطی محیط بر اثر شدت میدان الکتریکی است که توسط پدیده‌هایی مانند غیرخطیت کر، غیرخطیت درجه دو، جاذب اشباع‌پذیر و ... انجام می‌گیرد.

اگرچه میدان الکترومغناطیسی تابع پیوسته‌ای از فضا و زمان است. با این حال می‌توان شرایطی را در محیط به وجود آورد که تحولات میدان نوری به صورت یک مسئله گسسته فضایی مطرح شود. این امکان در صورتی فراهم می‌شود که بتوان میدان نوری را در مدهای گسسته‌ای تقریب زد. آرایه‌ای از موجبرهای تک مد که به صورت ضعیف به هم جفت شده‌اند، به عنوان ساده‌ترین و در عین حال مهمترین سیستمی

¹ Diffraction

² Dispersion

هستند که می‌توان برای این هدف مورد استفاده قرار داد. مسئله انتشار نور در آرایه‌های خطی^۱ اولین بار به صورت تئوری توسط جونز در سال ۱۹۶۵ [۴] و بعدها توسط یاریو و همکارانش [۵] در آرایه ای از گالیم آرسناید مطالعه شد. اولین بررسی تئوریک سالیته‌های گسسته در سال ۱۹۸۸ توسط کریستودولاید و جوزف [۶] انجام شد. سپس آیزنبرگ [۷] در آرایه ای از آلومینیوم گالیم آرسناید آنها را به صورت تجربی مشاهده کرد.

اپتیک گسسته در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است و مطالعات زیادی روی سیستم‌های متنوع گسسته از جمله آرایه‌های موجبری گسسته و در چند سال گذشته بر روی آرایه‌ای از کاواک‌های نوری جفت شده انجام گرفته است.

در پایاننامه حاضر انتشار نور در آرایه‌ای از کاواک‌های نوری جفت شده با غیرخطیت کر مورد مطالعه قرار می‌گیرد و امکان کلید زنی سالیته‌های کاواک گسسته در وضعیت‌های خودکانون و خودواکانون با استفاده از گرادیان دامنه بررسی می‌شود.

به دلیل بازتاب‌های متوالی نور از آینه‌های مرزی که کاواک را تشکیل می‌دهند، اندرکنش نور با ماده غیر خطی داخل کاواک به طور مؤثر افزایش می‌یابد. در نتیجه سالیته‌ها در توان ورودی کمتری نسبت به سالیته‌های معمولی ایجاد خواهند شد. پرتو نگهدارنده به عنوان تأمین کننده انرژی سیستم و مرجع فاز میدان الکتریکی نوری، فرآیند خلق، نابودی و تحولات سالیته‌ها کاواک گسسته را کنترل می‌کند.

ابتدا با شروع از جوابهای همگن و بررسی وضعیت دوپایایی آنها شرایط پارامتری که سبب ناپایداری آنها می‌شود بررسی می‌گردد و اثرات اختلاف فاز بین میدان الکتریکی موجبرها که به سبب کجی در تابش پرتو نگهدارنده به وجود می‌آید، بر روی این پارامترها مطالعه می‌شود. بعد از مشخص شدن نواحی ناپایداری، انواع مختلف سالیته‌های کاواک گسسته و پایداری آنها در دو وضعیت خودکانون و خودواکانون به ازای تغییرات پارامتر جفت شدگی و دامنه پرتو نگهدارنده مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس امکان

¹ Linear arrays

کلیدزنی این سالیتهونها توسط گرادیان دامنه مطالعه می‌شود و در نهایت همزیستی سالیتهون کاواک گسسته تاریک و روشن مورد بحث قرار می‌گیرد.

فصل اول

بررسی منابع

(مفاهیم اساسی و پیشینه پژوهش)

۱ فصل اول: بررسی منابع

۱-۱ سالیتون^۱

سالیتون برای اولین بار در سال ۱۸۳۴ توسط اسکات راسل^۲ در کانال آبی در اسکاتلند مشاهده شد [۱] (شکل (۱-۱))، او مشاهده کرد که قله موج آبی در این کانال، بدون تغییر شکل چندین کیلومتر را در امتداد کانال طی می‌کند. چنین امواجی بعدها امواج سالیتوری نامیده شد. واژه سالیتون که برگرفته از زبان یونانی به معنای ذره می‌باشد در سال ۱۹۶۵ به علت خاصیت ذره‌ای بودن این امواج در حین برخورد با یکدیگر به آنها اطلاق شد.

بسته به اینکه موج در حین انتشار در فضا یا زمان محصور شود، سالیتون به دو نوع فضایی و زمانی تقسیم خواهد شد. هر دو نوع سالیتون به علت پدیده غیرخطی تغییر ضریب شکست بر اثر شدت میدان الکتریکی بوجود می‌آیند. این وابستگی عامل ایجاد غیرخطیت خودکانونی (خودواکانونی) و مدولاسیون خودفازی است که به ترتیب عوامل اساسی در تشکیل سالیتونهای نوری فضایی و زمانی هستند. سالیتون فضایی وقتی تشکیل می‌شود که اثر خودکانونی با پراش ذاتی در ماده اپتیکی، که عامل پهن شدگی پرتو نوری است، برابری نماید و سالیتون زمانی از برابری اثر غیرخطی مدولاسیون خودفازی و پاشندگی طبیعی ماده اپتیکی، که عامل پهن شدگی پالس نوری است، تولید می‌شود. در این حالت پرتو نوری بدون تغییر شکل در ماده منتشر می‌شود و امواج خود جایگزیده^۳ یا خود بدام افتاده تولید می‌کند. در ادامه این دو نوع سالیتون به تفصیل بررسی خواهند شد.

¹ Soliton

² John Scott Russel

³ Self localized



شکل ۱-۱ کانال آب در اسکاتلند که اسکات راسل آزمایش خود را در آن انجام داد [۱].

۱-۱-۱-۱ سالیتون های نوری زمانی

در واقع سالیتونهای زمانی، معرف پالس‌های نوری هستند که در طول انتشار شکل خود را حفظ می‌کنند. از آنجا که هر پالس نوری از مؤلفه‌های فرکانسی مختلفی تشکیل شده و هر مؤلفه با سرعت فاز متفاوت حرکت می‌کند، پالس نوری در حین انتشار بر اثر پاشندگی محیط پهن خواهد شد. اگر پاشندگی توسط عوامل غیر خطی مانند مدولاسیون خود فازی حذف شود، پالس نوری بدون تغییر شکل منتشر خواهد شد. در چنین حالتی یک سالیتون زمانی ایجاد می‌شود. پاشندگی پدیده‌ای است که در منشور باعث تجزیه نور سفید می‌شود. به سبب مدولاسیون خود فازی، فاز پالس نوری به دلیل غیرخطیت ضریب شکست تغییر می‌کند. این تغییر فاز را می‌توان به تغییرات فرکانس مربوط کرد و اگر ضریب شکست ماده مثبت باشد، قسمت جلوی پالس به سمت فرکانس‌های کوتاه تغییر مکان می‌دهد و عقب موج به سمت فرکانس‌های بالا حرکت می‌کند و پاشندگی نور جبران خواهد شد.

اولین سالیتون زمانی در سال ۱۹۷۳ ضمن کار بر روی فیبرهای نوری پیش‌بینی شد [۸] و در سال ۱۹۸۰ این امواج سالیتونی به صورت تجربی مشاهده شد. تا به حال مطالعات وسیعی بر روی سالیتونهای فیبر و کاربرد آنها در مخابرات فیبر نوری انجام شده است و با ارسال اطلاعات نوری به شکل سالیتونی سرعت انتقال اطلاعات در فیبرهای سالیتونی تا حد زیادی افزایش یافته است.

۱-۱-۲ سالیتونهای نوری فضایی

همانطور که در بخش قبلی گفته شد، سالیتون پرتو خود-جایگزیده‌ای است که بدون اینکه اندازه و شکل آن تغییر کند، منتشر می‌شود. سؤالی که مطرح است این است که چطور می‌توان پرتویی ایجاد کرد که اندازه و شکل آن در حین انتشار ثابت بماند؟

تمایل به واگرایی در حین انتشار خاصیت ذاتی نور است که بخاطر پدیده‌ی پراش اتفاق می‌افتد. پدیده پراش در غیاب روزنه را می‌توان بصورت زیر توجیه کرد. باریکه نوری را می‌توان بصورت برهم‌نهی از چندین موج تخت با شدتها و فازهای متفاوت در نظر گرفت که در راستای بسیار نزدیک به هم منتشر می‌شوند، بطوریکه تداخل آنها در محل باریکه سازنده و در اطراف ویرانگر است. این امواج در حین انتشار دچار اختلاف راه و در نتیجه اختلاف فاز خواهند شد، زیرا امواج تختی که نزدیک به محور انتشار بودند نسبت به امواجی که مایل‌تر هستند، سرعت رو به جلوی بیشتری خواهد داشت در نتیجه از میزان تداخل سازنده در مرکز باریکه کاسته خواهد شد، در حالی که تداخل ویرانگر در نقاط دور از محور ضعیف می‌شود. در واقع با انتشار نور در یک محیط خطی انرژی نور تمایل به واگرایی به سمت کناره‌ها دارد.

برای جبران این پدیده می‌توان از عوامل غیرخطی در ضریب شکست استفاده کرد. اگر غیرخطیت طوری باشد که ضریب شکست در مرکز باریکه بیشتر از بقیه نقاط باشد، موج تختی که بر روی محور باریکه حرکت می‌کند ضریب شکست بزرگتری را درک خواهد کرد و در نتیجه کندتر از موجهای خارج از محور حرکت می‌کند. برعکس مؤلفه‌هایی که از محور باریکه دورترند ضریب شکست کوچکتر را کسب کرده و سریعتر حرکت خواهند کرد. بدین ترتیب اختلاف فازی که بین امواج وجود داشت جبران شده و در نتیجه

تمایل ذاتی به پراش خنثی می‌شود. چنین ساختاری مانند موجبر نوری^۱ عمل کرده و نور را به منطقه‌ای با ضریب شکست بیشتر محدود می‌کند. اگر شدت پرتو ورودی برای تولید موجبر خودالقا، حاصل از تغییر ضریب شکست کافی باشد، سالیتون فضایی تشکیل می‌شود. شکل ۱-۲ الف و ب) به ترتیب انتشار نور در محیط خطی و غیرخطی را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است پراش در محیط غیرخطی کنترل شده و پرتو شکل اولیه خود را حفظ کرده است. واضح است که شرط ایجاد چنین وضعیتی، بالا بودن شدت باریکه است، بطوری که پدیده‌های غیرخطی بروز کند.

سالیتونها را می‌توان به دو دسته تاریک^۲ و روشن^۳ نیز تقسیم بندی کرد. سالیتون روشن یک قله شدت در یک زمینه تاریک‌تر است که غالباً در حضور غیرخطیت خودکانونی در محیط قابل مشاهده است. در حالی که سالیتون تاریک یک گودال جایگزیده در زمینه با شدت ثابت بیشتر است و معمولاً در محیط‌های خودواکانون مشاهده می‌شود.

اولین کار بر روی سالیتونهای فضایی به سال ۱۹۶۴ برمی‌گردد که چیائو و همکارانش اثر خود بدام افتادگی^۴ پرتو پیوسته در محیط غیرخطی را ملاحظه کردند [۹]. البته این پرتو خود محصور شده به خاطر طبیعت ناپایدارش به نام سالیتون شناخته نشد. سالیتون فضایی پایدار در سال ۱۹۸۰ با محدود کردن پراش در یک بعد در مواد غیرخطی با استفاده از لیزر مشاهده شد [۱۰]. در دهه ۹۰ انواع مختلف سالیتونهای فضایی مثل سالیتون کاواک^۵، سالیتون براگ^۶ و غیره کشف و بررسی شده‌اند که در ادامه به معرفی چند نمونه از این سالیتونها خواهیم پرداخت.

¹ Optical waveguide

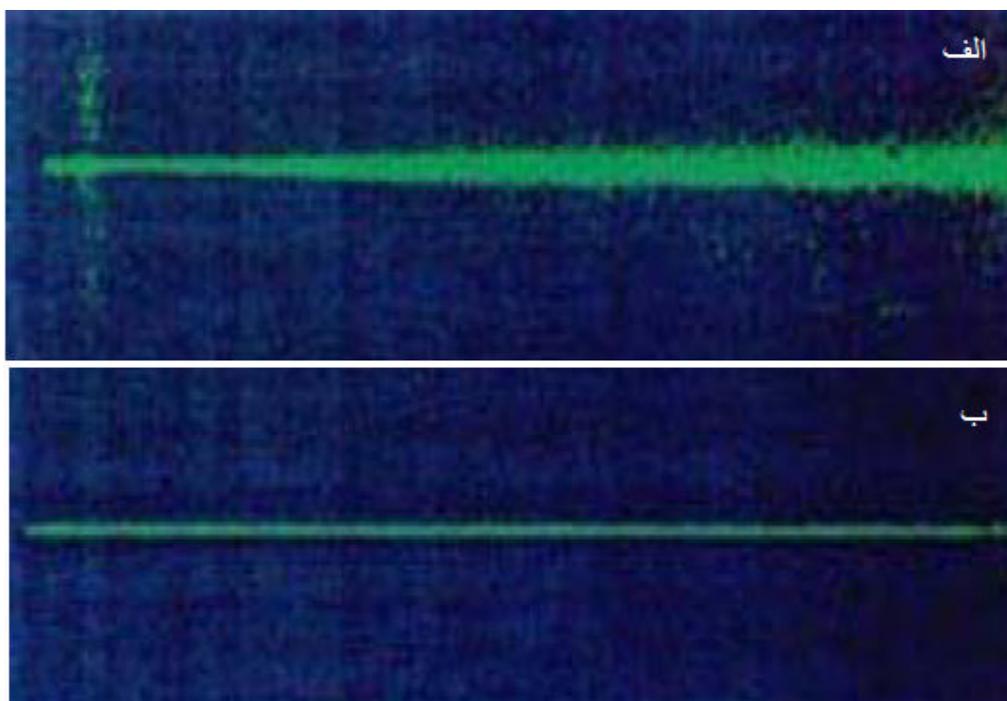
² Dark soliton

³ Bright soliton

⁴ Self trapping

⁵ Cavity soliton

⁶ Bragg soliton



شکل ۱-۲ (الف) انتشار نور در محیط خطی: پرتو نور در حین انتشار دچار پراش شده است. (ب) سالیتون فضایی

۱-۲-۱-۱ سالیتون کاواک

سالیتون کاواک را می‌توان یک لکه روشن یا تاریک نوری در نظر گرفت که بین یک یا چند سطح بازتابنده و در صفحه عمود بر راستای انتشار میدان الکتریکی، در داخل کاواک به تله افتاده است و با گذشت زمان هیچ تغییری در وضعیتش رخ نمی‌دهد. اگرچه این سالیتونها خصوصیات مشترک زیادی با سالیتونهای معمولی دارند ولی بازخورد نوری خصوصیات جدیدی را به آنها اضافه کرده است. چون سالیتونها در داخل کاواک تشکیل می‌شوند و در داخل کاواک همیشه اتلافاتی نظیر عبور از آینه‌ها وجود دارد، این سالیتونها در گروه سالیتونهای اتلافی^۱ فضایی دسته بندی می‌شوند. این اتلافات توسط پرتو نوری که از بیرون بر سیستم می‌تابد و به پرتو نگهدارنده معروف است، جبران خواهد شد. اولین نمونه سالیتونهای کاواک در اوایل دهه ۱۹۹۰ مشاهده شد که در آن از کریستال‌های مایع به عنوان محیط

¹ Dissipative soliton

غیرخطی استفاده شد [۱۱]. این نوع سالیتونها اخیراً در میکرو کاواک‌های نیم رسانا بطور تجربی شده‌اند و امکان تولید و پاک کردن آنها بررسی شده است [۱۲].

۱-۱-۲-۲ سالیتون گاف^۱

در مواد غیرخطی‌ای که ضریب شکست در امتداد طول به صورت تناوبی تغییر می‌کند، نوع جدیدی از سالیتونها قابل مشاهده است که آنها را سالیتون گاف یا سالیتون براگ می‌نامند. این مواد در گروه بلورهای نوری قرار می‌گیرند، البته در بلورهای نوری ضریب شکست خطی می‌تواند در سه بعد فضائی به صورت متناوب تغییر کند ولی در این مورد به حالتی متمرکز می‌شوند که ضریب شکست در یک بعد متناوب است و تناوبی بودن ضریب شکست را به جهتی که نور منتشر می‌شود محدود می‌کنند. سالیتونهای براگ در سال ۱۹۸۱ کشف شدند و در سال ۱۹۸۷ به خاطر اینکه فقط در باند ممنوعه مشاهده می‌شوند به سالیتون گاف مشهور شدند [۱۳].

۱-۱-۲-۳ سالیتونهای گسسته

در آرایه‌های متناوب از موجبرهای نوری، نوع جدیدی از سالیتونها قابل مشاهده است که به سالیتون گسسته معروف شده‌اند. خصوصیات مدهای جایگزیده فضایی در چنین سیستمی توسط مجموعه‌ای از معادلات جفت شده بیان می‌شود. هر معادله مربوط به دامنه سالیتون در یک موجبر خاصی است که به موجبرهای کناری جفت شده است. این معادله به معادله شرودینگر غیرخطی گسسته مشهور است. همانند موارد قبلی سالیتون گسسته از برابری پراش (در این حالت پراش گسسته) و اثرات غیرخطی حاصل می‌شود. از آنجائی که موضوع اصلی این پایان نامه بررسی سالیتونهای کاواک گسسته است. بنابراین در بخش‌های بعدی به تفصیل در مورد سالیتونهای گسسته و سپس در مورد سالیتونهای کاواک گسسته بحث خواهد شد.

¹ Gap soliton

۲-۱ پدیده های غیرخطی نور

۱-۲-۱ ضریب شکست وابسته به شدت و پدیده های غیرخطی خودکانونی و خود واکانونی

لازمه ی تشکیل سالیتونهای فضائی، حذف پراش توسط عوامل غیرخطی است. محققان به این نتیجه رسیده اند که می توان با تغییر محلی ضریب شکست توسط پدیده های غیر خطی بر پدیده پراش غلبه کرد. ضریب شکست بسیاری از مواد نوری به شدت نوری که در ماده منتشر می شود بستگی دارد که می توان توسط رابطه زیر این وابستگی را نشان داد [۱۴].

$$n = n_0 + n_2 \langle \tilde{E}^2 \rangle \quad (1-1)$$

که n_0 ضریب شکست عادی میدان ضعیف و n_2 کمیت جدیدی است که آهنگ افزایش ضریب شکست با افزایش شدت نور را نشان می دهد. براکت های اطراف \tilde{E}^2 بیانگر میانگین زمانی است. بنابراین اگر میدان

نوری به شکل

$$\tilde{E}(t) = E(\omega) e^{-i\omega t} + c.c. \quad (2-1)$$

باشد. بطوری که

$$\langle \tilde{E}(t)^2 \rangle = 2E(\omega)E(\omega)^* = 2|E(\omega)|^2 \quad (3-1)$$

در آن صورت، می توان ضریب شکست وابسته به شدت را به شکل زیر نوشت:

$$n = n_0 + 2n_2 |E(\omega)|^2 \quad (4-1)$$

این وابستگی ضریب شکست به شدت میدان اعمال شده به اثر کر نوری معروف است. در ادامه ضریب n_2 که به ضریب کر معروف است بدست می آید.

برهمکنش باریکه نور با یک محیط غیرخطی را می‌توان برحسب قطبش غیرخطی توصیف کرد. قطبش کل، مجموع قطبش خطی و قطبش غیرخطی می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$P^{tot}(\omega) = P^L + P^{NL} = \chi^{(1)} E(\omega) + \chi^{(3)} |E(\omega)|^2 E(\omega) \quad (5-1)$$

$\chi^{(2)}$ پذیرفتاری غیرخطی مرتبه دوم است. چنانچه می‌دانیم، برهم‌کنش‌های نوری غیرخطی مرتبه دوم فقط در بلورهایی که مرکز تقارن ندارند اتفاق می‌افتد. به دلیل آنکه مایعات، گازها، و بسیاری از بلورها دارای تقارن هستند $\chi^{(2)}$ برای آنها قابل صرف‌نظر کردن است. به همین دلیل غیرخطیت مرتبه دوم در این رابطه ذکر نشده است. از طرف دیگر، برهمکنش‌های غیرخطی مرتبه سوم که با $\chi^{(3)}$ توصیف می‌شوند، هم در محیط‌هایی که دارای مرکز تقارن هستند و هم در محیط‌های بدون مرکز تقارن ایجاد می‌شوند.

با معرفی پذیرفتاری مؤثر به صورت $\chi_{eff} = \chi^{(1)} + 3\chi^{(3)} |E(\omega)|^2$ ، پذیرفتاری کل به صورت $P^{tot} = \chi_{eff} E(\omega)$ در می‌آید. برای ارتباط دادن پذیرفتاری غیرخطی $\chi^{(3)}$ به ضریب شکست غیرخطی n_2 ، فرض می‌کنیم رابطه زیر برقرار باشد.

$$n^2 = 1 + 4\pi \chi_{eff} \quad (6-1)$$

با وارد کردن n ، χ_{eff} در دو طرف تساوی ضریب شکست خطی و غیرخطی با روابط

$$n_0 = (1 + 4\pi \chi^{(1)})^{1/2} \quad (7-1)$$

$$n_2 = \frac{3\pi \chi^{(3)}}{n_0}$$

به پذیرفتاری‌های خطی و غیرخطی مرتبط می‌شوند.

خود کانونی نور، فرآیندی است که در آن پرتو پرشدت نور، حین عبور از داخل ماده، ضریب شکست آن را طوری تغییر می‌دهد که باعث کانونی شدن نور توسط خود پرتو می‌شود. در واقع غیرخطیت مانند یک عدسی همگراکننده عمل خواهد کرد (شکل ۱-۳). حالت عکس فوق حالتی است که محیط غیر خطی همانند عدسی واگرا عمل کرده و موجب واگرایی بیشتر پرتو اولیه می‌شود (شکل ۱-۴).