

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

دانشگاه سیلا
دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

(فتونیک)

پایان نامه کارشناسی ارشد

مطالعه و شبیه سازی کامپیوتری انتشار سالیتون های اپتیکی در رشته های نوری

اداره اساتید ارشد
فصل ۱۳۸۷

از:

الهام براتی

اساتید راهنما:

دکتر سعید باطبی

دکتر حمید رحیم پور سلیمانی

۱۳۸۷ / ۲ / ۲۶

(شهریور ماه ۸۶)



۱۰۲۳۶۶

تقدیم به مادر صبور و مهربان

و

پدر عزیزم

۱۳۸۷ / ۲ / ۲۷

با سپاس از یگانه خالق هستی، همان قادر مطلق که با استعانت از لطف بیکران او توفیق انجام این پایان نامه را یافتیم.

سپاس ویژه نثار اساتید گرامی جناب آقای دکتر سعید باطبی و جناب آقای دکتر حمید رحیم پور که با راهنمایی های گرانقدرشان، مرا در انجام این پروژه یاری کردند.

با تشکر از داوران محترم جناب آقای دکتر حمید رضا مشایخی و جناب آقای دکتر حسین فرج الهی که نظرات مؤثری ارائه نمودند . همچنین از جناب آقای دکتر صابر فرجامی که به عنوان نماینده تحصیلات تکمیلی در جلسه حضور داشتند، تشکر می نمایم.

از خانواده عزیز و دوستان مهربانم که صمیمانه یاریگرم بودند و حضور گرمشان نقشبند خاطرات ماندگار زندگی ام می باشد، تقدیر می نمایم.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ح	چکیده فارسی
خ	چکیده انگلیسی
۱	مقدمه
۴	فصل اول : مروری بر تاریخچه سالیتون ها
۵	مقدمه
۵	۱-۱- سالیتون ها تاریخچه و تعریف
۷	۱-۲- انواع سالیتون ها
۷	۱-۲-۱- معادله کورتوگک - دی وریز
۱۵	۱-۲-۲- معادله شرودینگر غیر خطی
۱۸	۱-۲-۳- معادله سین-گوردون
۲۱	فصل دوم : سالیتون های نوری
۲۲	مقدمه
۲۲	۱-۲- معادله شرودینگر غیر خطی
۲۲	۱-۱-۲- محیط های غیر خطی
۲۴	۱-۱-۱-۲- مدولاسیون خود به خود فاز (SPM)
۲۴	۲-۱-۱-۲- مدولاسیون متقابل فاز (XPM)
۲۵	۳-۱-۱-۲- ترکیب چهار موج (FWM)
۲۵	۲-۱-۲- انتشار امواج الکترومغناطیسی در فیبر نوری
۲۷	۱-۲-۱-۲- انتشار در محیط خطی
۲۸	۲-۲-۱-۲- انتشار در محیط غیر خطی
۳۲	۳-۱-۲- اثرات غیر خطی مرتبه بالاتر
۳۵	۴-۱-۲- پاشندگی و بسته های موج
۳۸	۵-۱-۲- تعادل بین SPM و GVD
۴۰	۲-۲- جواب های سالیتونی معادله NLS
۴۰	۱-۲-۲- حل تحلیلی
۴۳	۲-۲-۲- حل تقریبی
۵۱	۳-۲-۲- شبیه سازی عددی
۵۲	۱-۳-۲-۲- جواب تک سالیتونی معادله شرودینگر غیر خطی
۵۳	۲-۳-۲-۲- برخورد دو سالیتون

۵۵	..... فصل سوم : برخورد های سالیتمونی در سیستم WDM
۵۶	..... مقدمه
۵۶	..... ۳-۱- برخورد های الاستیک
۶۲	..... ۳-۲- برخورد های غیر الاستیک
۶۳	..... ۳-۲-۱- اثر پاشندگی مرتبه سه روی یک سالیتمون منفرد
۶۴	..... ۳-۲-۲- جواب تک سالیتمونی پایای معادله غیر خطی شرودینگر با طرف دوم
۶۸	..... ۳-۲-۳- برخورد دو سالیتمون با احتساب پاشندگی مرتبه سه
۶۸	..... ۳-۲-۱- فرمول کلی روش اختلال
۷۱	..... ۳-۲-۲- تئوری اختلال مرتبه اول
۷۳	..... ۳-۲-۳- تئوری اختلال مرتبه دوم
۷۶	..... ۳-۲-۴- تئوری اختلال مرتبه سوم
۸۳	..... ۳-۳- برخورد های غیر الاستیک چند گانه
۸۵	..... ۳-۱- تئوری اختلال مرتبه اول
۸۷	..... ۳-۲- تئوری اختلال مرتبه دوم
۸۹	..... ۳-۳- تئوری اختلال مرتبه سوم
۹۴	..... ۳-۴- بررسی عددی برخورد دو سالیتمونی
۹۹	..... فصل چهارم: نتیجه گیری و پیشنهاد برای ادامه کار
۱۰۰	..... ۴-۱- نتیجه گیری
۱۰۳	..... ۴-۲- پیشنهاد برای ادامه کار
۱۰۴	..... مراجع
۱۰۷	..... پیوست ها
۱۰۸	..... پیوست (الف)
۱۱۶	..... پیوست (ب)
۱۲۰	..... پیوست (ج)
۱۲۴	..... پیوست (د)
۱۳۱	..... پیوست (ه)

فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۸	شکل (۱-۱) پهن شدن موج در حین انتشار
۹	شکل (۲-۱) شکسته شدن موج ناشی از اثر غیرخطی
۱۰	شکل (۳-۱) تعادل بین دو اثر پاشندگی و غیرخطی بودن را به صورت تشکیل امواج سالیتری نشان می دهد.....
۱۴	شکل (۴-۱) نمای سه بعدی انتشار سالیتون KdV با $x_0 = 0, k = 0.5$
۲۰	شکل (۵-۱) جواب سالیتونی معادله سین-گوردون به صورت جواب گره (خطوط پر) و جواب پاد گره (خط نقطه) ..
۲۵	شکل (۱-۲) الف) انتشار دو فرکانس ω_1, ω_2 را درون رشته نشان می دهد. ب) ترکیب چهار موج حاصل از این دو فرکانس را نمایش می دهد.....
۳۷	شکل (۲-۲) پهن شدگی پالس گاوسی درون یک فیبر ناشی از پاشندگی در $z = 2L_D, 4L_D$. منحنی خط چین پالس ورودی را در $z = 0$ نشان می دهد.....
۳۹	شکل (۳-۲) تغییرات زمانی در یک پالس نوری باریک که در معرض غیر خطی بودن کر در یک محیط پاشنده با GVD مثبت قرار گرفته است.....
۳۹	شکل (۴-۲) تغییرات زمانی در یک پالس نوری باریک در یک محیط پاشنده غیر خطی با GVD منفی را نشان می دهد. پاشندگی منجر به پهن شدن پالس و اثر غیرخطی کر منجر به فشرده شدن پالس می شود، در نتیجه یک سالیتون نوری تشکیل می شود.....
۴۲	شکل (۵-۲) پتانسیل مؤثر غیرخطی $V(\rho)$
۵۳	شکل (۶-۲) نمایش سه بعدی انتشار سالیتون مرتبه یک درون رشته.....
۵۴	شکل (۷-۲) انتشار دو سالیتون مرتبه یک را قبل، در حال و بعد از برخورد با یکدیگر برای معادله NLS همگن نشان می دهد الف) شمای سه بعدی ب) نمای از بالا.....
۵۷	شکل (۱-۳) الف) مالتی پلکس کننده تقسیم طول موج ب) دی مالتی پلکس کننده تقسیم طول موج.....
۵۸	شکل (۲-۳) دو مرحله یک برخورد. به دلیل پاشندگی سرعت گروه غیرعادی، سالیتون با طول موج کو تاهتر (λ_2) به تدریج به سالیتون با طول موج بلندتر (λ_1) می رسد و از آن عبور می کند.....
۶۱	شکل (۳-۳) شتاب $(dv_g^{-1}/d\xi)$ ، جابه جایی سرعت $(\delta v_g^{-1} = -\delta\beta)$ و جابه جایی زمانی $(\delta\tau)$ پالس کندتر را در طی برخورد سالیتون-سالیتون در یک فیبر بدون اتلاف نشان می دهد (برای پالس سریعتر، این نمودار معکوس می شود). ماکسیمم جابه جایی و ارون سرعت گروه $(\delta v_g^{-1})_{max} = 2/(3\beta)$ و $\delta\tau_{max} = \beta^{-2}$ هستند.....
۶۳	شکل (۴-۳) طرحواره توصیف برخورد بین دو سالیتون از کانال های فرکانسی مختلف. پیکانهای درست نشان دهنده سرعت گروه سالیتونها و پیکانهای معکوس نشان دهنده تشعشع گسیل شده به وسیله هر یک از دو سالیتون در کانال فرکانسی خودشان است.....
۶۷	شکل (۵-۳) جواب سالیتون ایده آل ($d_3 = 0$) در کانال $\beta = 0$، $|u_{00}| = \tilde{u}_{00}$ (خطوط پر) و قسمت اصلی اولین مرتبه تصحیح (در d_3)، $ u_{01}|/d_3 = -i\tilde{u}_{01}/d_3$ (خطوط خط. نقطه)، به صورت تابعی از τ نشان داده شده اند.....
۸۱	شکل (۶-۳) قدر مطلق نیم رخ تابع تابش بهنجار شده با B ، $ v_{03}|/B = |\tilde{v}_{03}|/B$ ، به صورت تابعی از τ برای چهار مقدار $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ ، $\xi_1 = \xi_0 + 1$ ، $\xi_2 = \xi_0 + 3$ ، $\xi_3 = \xi_0 + 7$ و $\xi_4 = \xi_0 + 11$ (مطابق راهنمای شکل) نشان داده شده است.....
۸۱	شکل (۷-۳) قدر مطلق نیم رخ تابع تابش بهنجار شده با B ، $ v_{03}|/B = |\tilde{v}_{03}|/B$ ، به صورت تابعی از τ برای چهار

- مقدار ξ ، $\xi = \xi_0 + 10$ (خطوط پر)، $\xi = \xi_0 + 13$ (خطوط خط چین)، $\xi = \xi_0 + 15$ (خطوط خط نقطه) و $\xi = \xi_0 + 17$ (خطوط نقطه چین) نشان داده شده است. ۸۲
- شکل (۸-۳) برخورد غیر همزمان سه سالیون $\eta_0 = \eta_1 = \eta_2 = 1$ به ترتیب معادل با $\beta_0 = 0$ ، $\beta_1 = -10$ ، $\beta_2 = 10$ و $y_2 = 0$ ، $y_1 = 0$ ، $y_0 = 10$ ۸۳
- شکل (۹-۳) قدر مطلق نیم رخ تابع تابش بهنجار شده با B ، $|V_{03}|/B = |\tilde{V}_{03}|/B$ ، به صورت تابعی از τ برای چهار مقدار ξ : $\xi = \xi_1$ (خطوط پر)، $\xi = \xi_1 + 1$ (خطوط خط نقطه)، $\xi = \xi_1 + 3$ (خطوط خط چین) و $\xi = \xi_1 + 7$ (خطوط نقطه چین) نشان داده شده است. ۹۲
- شکل (۱۰-۳) شکل سمت راست نمای سه بعدی سالیون مرتبه اول بدون اتلاف و شکل سمت چپ فاز آن را در بخشی از بازه زمانی نشان می دهد. ۹۶
- شکل (۱۱-۳) شکل سمت راست نمای سه بعدی سالیون مرتبه اول در حضور اتلاف و شکل سمت چپ فاز آن را در بخشی از بازه زمانی نشان می دهد. ۹۶
- شکل (۱۲-۳) (الف) نمای سه بعدی برخورد دو سالیونی در حالت $\beta_3 = 0$ (ب) شکل سمت چپ فاز برخورد در کل محدوده زمانی و شکل سمت راست این فاز را برای محدوده $\xi \in [-1, 1]$ نشان می دهد. ۹۷
- شکل (۱۳-۳) (الف) نمای سه بعدی برخورد دو سالیونی در حالت $\beta_3 = 0.1 ps^3 / km$ (ب) شکل سمت چپ فاز برخورد در کل محدوده زمانی و شکل سمت راست این فاز را برای محدوده $\xi \in [-1, 1]$ نشان می دهد. ۹۸

مطالعه و شبیه سازی کامپیوتری انتشار سالیون های اپتیکی در رشته های نوری

الهام براتی

در سال های اخیر، ثابت شده است که مالتی پلکس کردن تقسیم طول موج (WDM^1)، روش موثقی برای افزایش ظرفیت انتقال سیستم های رشته نوری است. محدودیت عمده در کار اجرایی سیستم های WDM از طریق بر همکنش غیر خطی بین کانالی داده های سیگنال از کانال های مختلف ایجاد می شود. در این پایان نامه از سالیون های نوری معمولی برای مطالعه این پدیده استفاده می کنیم. در این حالت سالیون ها با طول موج های مختلف در ورودی رشته ارسال می شوند و به دلیل سرعت متفاوت این سالیون ها در کانال های مختلف، به طور اجتناب ناپذیر با یکدیگر برخورد می کنند. در حالت ایده آل، الگوی ذره ای سالیون از کانال های مختلف به دلیل ماهیت الاستیک بر همکنش سالیون-سالیون، تغییر شکل نمی دهد. از این رو از پدیده هایی مانند پاشندگی مرتبه سوم برای از بین بردن ماهیت الاستیک بر همکنش بین کانالی استفاده می کنیم. به این دلیل، برخورد سالیون ها از کانال های فرکانسی مختلف (برخورد بین کانالی) در حضور پاشندگی مرتبه سوم مورد مطالعه قرار می گیرد.

همچنین، از تئوری اختلال مضاعف با دو پارامتر کوچک، ضریب پاشندگی مرتبه سوم d_3 و معکوس اختلاف فرکانسی بین کانالی $1/\beta$ ، استفاده می کنیم. تغییرات ایجاد شده در پارامتر های پالس تا مرتبه سوم تئوری اختلال، جابه جایی فاز مرتبه $1/\beta$ و جابه جایی موقعیت مرتبه $1/\beta^2$ بدست می آید اما دامنه و سرعت فاز سالیون تا این مرتبه تئوری تغییر نمی کنند. دامنه تابش گسیل شده متناسب با d_3/β^2 بدست می آید. سپس برخورد غیرهمزمان سه سالیون را در حضور پاشندگی مرتبه سوم در سیستم های WDM مورد مطالعه قراردادده و اثرات ناشی از برخورد مجدد سالیون مختل شده را با یک سالیون ایده آل از کانال فرکانسی متفاوت محاسبه می کنیم. مشاهده می کنیم که میزان گسیل انرژی پس از هر برخورد ثابت است. در نهایت با روش عددی برخورد الاستیک و غیرالاستیک را مطالعه می کنیم.

کلید واژه: رشته نوری، امواج غیر خطی، انتشار سالیون اپتیکی، پاشندگی مرتبه سوم، برخورد غیر الاستیک.

¹ Wavelength-Division Multiplexing (ارسال چندین سیگنال با طول موجهای مختلف)

Abstract

The study and computer simulation of optical solitons propagation in optical fiber

Elham Barati

In recent years, it has been proven that wavelength-division multiplexing (WDM) can be a successful method to increase the transmission capacity of optical fiber system. However, there are some limitations on the performance of these systems. One of the major ones is due to the nonlinear interchannel interaction of data signals from different channels. In this thesis, we investigate this phenomenon using the conventional optical soliton. In WDM system, solitons of different wavelengths are injected into the fiber input and due to different velocities in different channels, the collisions among them is inevitable. In an ideal case soliton bit patterns from different channels would not experience any distortion due to the elastic characteristics of soliton-soliton interaction. However, there exist other phenomenons such as third order dispersion that are able to break the elastic nature of the interchannel interaction. For this reason, we studied collisions between solitons from different frequency channels in the presence of the third-order dispersion. Also, we develop a perturbation theory with two parameters: the third order dispersion coefficient d_3 , and the reciprocal of the interchannel frequency difference, $1/\beta$. We found that the pulse parameters changes up to the third order of that of perturbation theory, the $O(1/\beta)$ phase shift and the $O(1/\beta^2)$ position shift, however the soliton phase velocity and amplitude did not change. We found that the amplitude of the leading contribution to radiation emitted during the collision is proportional to d_3/β^2 . We have also studied a nonsimultaneous three soliton collision in the presence of third-order dispersion in WDM systems and calculated the effect of the perturbative soliton from the original channel in order to observe its second collision with stationary soliton from the other channel. It has been shown that after each collision the rate of emitted energy is the same. Finally, we have studied elastic and inelastic collision numerically.

Key word : fiber optic, nonlinear waves, optical soliton propagation, third order dispersion, inelastic collision.

مقدمه

مقدمه

شبکه های مدرن امروزی مخابرات نوری، قادر به مخابره صدا، تصویر و داده های کامپیوتر با سرعت صد ها بار بیشتر از شبکه های مخابراتی با کابل های مسی هستند که برای مدت بیش از یک قرن در عرصه مخابرات مورد استفاده بوده اند. به منظور بهره گیری از پتانسیل های موجود در فن آوری رشته نوری، تنها جایگزینی آن با شبکه سیمهای تلفنی امروزی کافی نیست. فن آوری انتقال نوری اطلاعات در واقع باید از محدودیت های تحمیل شده توسط فن آوری الکترونیک فراتر رود. در سیستم های سنتی مخابرات نوری، هر گاه یک پالس نوری را تقویت و یا سوئیچ کنیم، جهت انجام پردازش روی سیگنالها، باید مجدداً به جریانی از الکترون ها تبدیل نمائیم تا با استفاده از فن آوری پردازش الکترونیک، مورد استفاده قرار گیرند. در چنان شرایطی هر چقدر عرض پالس های نوری کمتر شود، نیاز به مدارهای الکترونیک پیچیده تر و گران قیمت تر افزایش می یابد. به عبارت دیگر، امکان انتقال دهها میلیارد بیت اطلاعات دیجیتال در هر ثانیه فراهم می آید. اما انتقال اطلاعات به این شیوه، روشی مشکل و پرهزینه خواهد بود. شاید یک راه حل ساده تر، سریعتر و اقتصادی تر، آن باشد که علائم نوری را از یک نقطه از شبکه مخابراتی به هر نقطه دیگر، به طریق کاملاً نوری انتقال دهیم، آن هم با استفاده از خواص نوری محیط های ویژه انتقال (از جمله رشته های نوری). زمانی آنها را مجدد به علائم الکتریکی تبدیل می کنیم که بخواهیم در مقصد تحویل مدارات الکترونیک دهیم که طبعاً در سرعت های به مراتب پایین تر قادر به پردازش سیگنال ها با علائم الکترونیک خواهند بود.

اما، انتقال کانال های نوری چندگانه روی یک رشته، روش ساده ای را برای توسعه ظرفیت سیستم تا بیش از $\frac{Tb}{s}$ فراهم کرده است. عمل تسهیم و یا مالتی پلکس کردن نوری، اجازه می دهد تا بتوان از یک رشته نوری به فرم اقتصادی تری بهره گرفت. در این پایان نامه برخورد بین کانالی سالیتون های نوری در حضور پاشندگی مرتبه سوم مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت پیوستگی مفاهیم اصلی از آوردن محاسبات طولانی در متن صرف نظر کرده و در عین حال برای جامع بودن مطالب محاسبات را در پیوست مطرح کردیم. ترتیب مطالب به این صورت است که در فصل اول تاریخچه ای از سالیتون ها را بیان کرده و در فصل دوم مفاهیم پایه برای سالیتون های نوری مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین جواب های سالیتونی معادله شرودینگر غیر خطی (NLSE¹) به صورت حل تحلیلی، حل تقریبی و شبیه سازی عددی بیان شده است. حل تقریبی که همان تئوری اختلال کاپ برای سالیتون ها در رشته های نوری است به عنوان پایه برای مطالب ارائه شده در فصل سوم محسوب می شود. در فصل سوم ابتدا برخورد الاستیک دو

¹ Nonlinear Schrodinger Equation

سالیتون را بررسی می کنیم سپس برخورد بین کانالی سالیتون های نوری را در حضور پاشندگی مرتبه سوم درسیستم WDM مورد بحث قرار می دهیم. در این فصل محاسبات خود را بر این فرض قرار دادیم که اگر پالس اولیه که درون رشته نوری فرستاده می شود پایا نباشد، آنگاه جواب پایا پس از وقفه ای بدست می آید. اثرات ناشی از این برخورد غیرالاستیک را تا مرتبه سوم تئوری اختلال بررسی می کنیم. همچنین، برخورد مجدد سالیتون مختل شده با سالیتون ایده آل از کانال متفاوت (برخورد غیرهمزمان سه سالیتون) در این فصل مورد مطالعه قرار می گیرد. بررسی عددی برخورد الاستیک و غیرالاستیک دو سالیTONی آخرین مبحثی است که در این فصل به آن می پردازیم. درنهایت در فصل چهارم جمع بندی و نتایج حاصل را ارائه نموده و پیشنهاد هایی جهت ادامه کار مطرح می کنیم.

فصل اول

مروری بر تاریخچه سالیتون ها

واژه سالیتون به انواع خاص بسته های موج که بدون تغییر شکل در فواصل طولانی منتشر می شوند، نسبت داده می شود که در اثر تعادل بین اثرات غیر خطی و پاشنده در محیط ایجاد می شوند. سالیتون ها تاریخچه ای جالب و آینده ای روشن و امید بخش دارند. حقیقتاً کشف "تبدیل پراکندگی وارون"^۱ توسط کروسکال^۲ و همکارانش [۱]، به عنوان روشی برای حل برخی معادلات دیفرانسیل جزئی غیر خطی، یکی از بزرگترین کارهای ریاضیات قرن بیستم و عنوانی مهم برای تئوری سالیتون است. سالیتون ها در شاخه های متعدد فیزیک کشف شده اند و کاربرد دارند [۲-۶]. به همین منظور، در ابتدای این فصل، تاریخچه مختصری از سالیتون ها بیان می شود. سپس سه نوع معادله دیفرانسیل جزئی غیر خطی که معرف، سه نوع متفاوت سالیتون هستند، معرفی و به اختصار شرح داده می شوند.

۱-۱- سالیتون ها، تاریخچه و تعریف

در سال ۱۸۳۴، اسکات راسل^۳ دانشمند اسکاتلندی، برای اولین بار سالیتون ها را در امواج آب، مشاهده کرد. او یک برآمدگی آب را دید که بدون تغییر شکل حرکت می کرد. بعد ها مشاهدات خود را این چنین بیان کرد [۷]:

"من در حال مشاهده یک قایق بودم که در امتداد یک کانال باریک به وسیله یک جفت اسب به سرعت کشیده می شد، وقتی قایق ناگهان توقف کرد، آب با سرعت زیاد به جلو غلتید و به شکل یک برآمدگی منفرد بزرگ، در آمد که به همان نحو بدون تغییر شکل یا تقلیل به سرعت خود ادامه داد."

بعدها او توانست این امواج را در آزمایشگاه تولید کند و رابطه بین سرعت امواج با دامنه آنها را بدست آورد. این رابطه عبارت بود از:

$$c^2 = g(h + a) \quad (1-1)$$

که در این رابطه c سرعت موج، a دامنه موج، h عمق آب و g شتاب گرانش است. این رابطه نشان می دهد که امواج بلندتر، سریعتر حرکت می کنند. به دلیل اینکه، این امواج به صورت برآمدگی منفرد بودند راسل آنها را موج منفرد^۴ نامید. وقتی راسل

¹ Inverse Scattering Transform

² Kruskal

³ Scot Russel

⁴ Solitary Wave

یافته های خود را منتشر کرد، بسیاری از دانشمندان آن زمان به آن به دیده تردید نگریستند. سؤال این بود که چگونه می شود موجی فواصل طولانی را بی هیچ اتلاف و تغییر شکلی، طی کند؟ اما در سال ۱۸۴۹، استوکس^۱ نشان داد که موج منفرد می تواند از ترکیب امواج تناوبی تشکیل شود و این تأییدی بر اظهارات راسل شد [۸].

سال ۱۸۹۵، کورتوگ^۲ فیزیکدان هلندی و شاگردش دی وریز^۳ معادله ای بدست آوردند که بر وجود امواج منفرد تأکید داشت [۹]. انتشار سالیتون ها تنها مختص به حرکت امواج بر روی سطح آب نیست، بلکه در بسیاری از محیط های غیر خطی که انتشار امواج در آنها ممکن است، سالیتون ها تشکیل و منتشر می شوند. اولین گزارش منتشر شده در باره مشاهده سالیتونهای نوری به رفتار خود کانونی^۴ پالس در محیط غیر خطی مربوط می شود [۱۰]، این مقاله مشاهده ی تجربی تغییر نیافتن شکل بسته موج های باریک نوری را در حین انتشار طی یک مسافت معین گزارش می کند.

واژه سالیتون، در سال ۱۹۶۵، برای توضیح خصوصیت شبه ذره ای پوش پالس هایی که تحت شرایط خاص در حین انتشار در یک محیط غیر خطی تغییر شکل نمی دادند، به کار برده شد.

هاسگاوا^۵ در سال ۱۹۷۳، برای اولین بار حضور سالیتون ها را در رشته های نوری به واسطه تعادل بین مدولاسیون خود به خود فاز و پاشندگی غیر عادی، گزارش کرد [۵]. سال ۱۹۸۰، انتشار سالیتون ها از محیط محاسباتی به محیط آزمایشگاه تحولی شگرف به وجود آورد [۱۱].

سال ۱۹۸۸، مولنار^۶ و همکارانش، پالس های سالیتونی را با استفاده از اثر رامان تا 4000 kml انتقال دادند [۱۲]. در سال ۱۹۹۱، یک تیم تحقیقاتی آزمایشگاه بل، سالیتونهای خطای آزاد در 2.5 گیگا بیتی را، با استفاده از تقویت کننده های رشته نوری با ناخالصی اریوم بیش از 14000 کیلومتر منتقل کردند. پمپ لیزری به تقویت کننده های اریوم فعال وصل می شد که نور پالس را تقویت می کرد [۱۳].

سال ۱۹۹۸، جورج^۷ و همکارانش، با ترکیب سالیتون های نوری طول موج های مختلف (WDM)، انتقال داده یک ترابیتی را در ثانیه نشان دادند (10^{12} واحد اطلاعات بر ثانیه) [۱۳].

¹ Stocs

² D.Y.Korteweg

³ G.de Vorise

⁴ Self-Focusing

⁵ Hasegawa

⁶ Mollenauer

⁷ Georges

سال ۲۰۰۱ تلکام^۱ در اروپا، سالیتون ها را به صورت عملی با گسترش تجهیزات ارتباط از دور زیر دریایی به وسیله حمل اطلاعات با استفاده از موج سالیتوری راسل، تولید کرد [۱۳].

سالیتون ها امواج یا تپهای منفردی هستند که در اثر تعادلی که بین اثرات غیر خطی و پاشندگی در محیط ایجاد می شود، هویت خود را به طور نامحدودی حفظ می کنند، به عبارت دیگر، در نتیجه خستگی شدن آثار خطی محیط در انتشار موج توسط آثار غیر خطی شکل می گیرند.

۱-۲- انواع سالیتون ها

از جمله معادلات دیفرانسیل جزئی غیر خطی که به طور دقیق قابل حل هستند و فقط جواب سالیتونی دارند می توان به معادله کورتوگ - دی وریز^۲ (KdV)، معادله شرودینگر غیر خطی (NLSE)، و معادله سین-گوردن^۳ (SG) اشاره کرد. در این بخش، سه مدل مذکور به اختصار شرح داده می شوند.

۱-۲-۱- معادله کورتوگ - دی وریز

حرکت موجی یکی از مباحث متعارف فیزیک است. امواج در محیط های گوناگون همچون امواج صوت، امواج آب، امواج الکترومغناطیسی و بسیاری از انواع دیگر، جملگی از قوانین حرکت بنیادی واحدی پیروی می کنند.

ساده ترین مدل برای حرکت یک بعدی موج عبارت است از [۴]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (2-1)$$

که در آن $u(x,t)$ دامنه موج و c یک ثابت مثبت است. جواب عمومی این معادله به صورت

$$u(x,t) = f(x-ct) + g(x+ct) \quad (3-1)$$

می باشد، که یک موج متحرک به طرف راست و یک موج متحرک به سمت چپ را نشان می دهد. حال معادله ساده موج

$$u_t + cu_x = 0 \quad (4-1)$$

را در نظر می گیریم. اندیس های x و t به ترتیب معرف مشتق نسبت به فضا و زمان هستند. جواب عمومی این معادله به صورت

$f(x-ct)$ می باشد، که موجی را نشان می دهد که با سرعت ثابت c به سمت مثبت محور x ها حرکت می کند. به عنوان یک

¹ Telecom

² Korteweg-de Vorise

³ Sine-Gordon

حالت خاص، می توان یک جمله پاشندگی، اتلافی یا غیرخطی را نیز وارد معادله موج کرد. مثلاً اگر معادله فقط شامل جمله پاشندگی به صورت زیر باشد

$$u_t + u_x + u_{xxx} = 0. \quad (5-1)$$

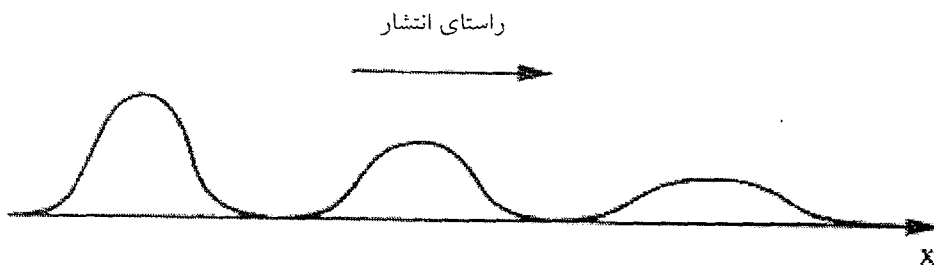
جواب هارمونیک این موج به صورت

$$u(x,t) = e^{i(kx - \omega t)} \quad (6-1)$$

است. با قراردادن ω درون معادله موج، سرعت گروه برابر با

$$v_g = \frac{\omega}{k} = k^2 \quad (7-1)$$

می شود. ملاحظه می شود که سرعت تابع k (عدد موج) است. پس امواج با فرکانس های مختلف از هم جدا می شوند. اثر جمله u_{xxx} که به معادله اضافه شد این است که موج در حین حرکت تغییر شکل می دهد. به عبارت دیگر مؤلفه های فرکانسی مختلف با سرعت های متفاوتی حرکت می کنند و بنابراین موج پاشیده می شود. شکل ۱-۱ پهن شدن موج را در حین انتشار، در اثر پدیده پاشندگی نشان می دهد.



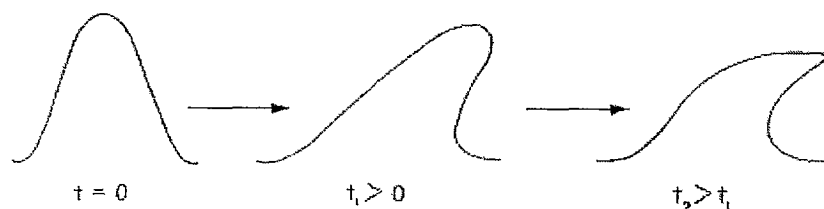
شکل ۱-۱: پهن شدن موج در حین انتشار.

اگر معادله فقط شامل جمله غیرخطی به صورت زیر باشد

$$u_t + (1+u)u_x = 0, \quad (8-1)$$

جواب این معادله به صورت $u(x,t) = f(x-ct)$ است، که f تابعی دلخواه است [۴]. در این حالت، با گذشت زمان جواب موج چند مقداری خواهد شد و اصل بر هم نهی صادق نیست. سرعت انتشار موج به ارتفاع موج وابسته است، یعنی قسمت هایی از موج که ارتفاع بیشتری دارند مانند قله موج، سریعتر از بقیه قسمت های موج حرکت می کنند. در نتیجه شکل موج در حین انتشار تغییر میکند. به عنوان مثال، وقتی امواج به ساحل نزدیک می شوند شکل موج به طور تدریجی از سینوسی به مثلثی تغییر می کند. شکل

۲-۱ این پدیده را به وضوح نشان می دهد. در اثر نزدیک شدن موج به ساحل، اثر غیرخطی افزایش می یابد، در نتیجه موج نزدیک ساحل از بین می رود.



شکل ۲-۱: شکسته شدن موج ناشی از اثر غیرخطی.

حال اگر دو اثر غیرخطی و پاشندگی را با هم در یک معادله داشته باشیم، این معادله، معادله KdV است که به صورت زیر می باشد [۴]:

$$u_t + (1+u)u_x + u_{xxx} = 0 \quad (9-1)$$

معادله کورتوگک - دی وریز (KdV) تحول امواج بلند را در امتداد کانالی با سطح مقطع مستطیلی توصیف می کند. فرم کلی معادله KdV به صورت زیر است [۴]:

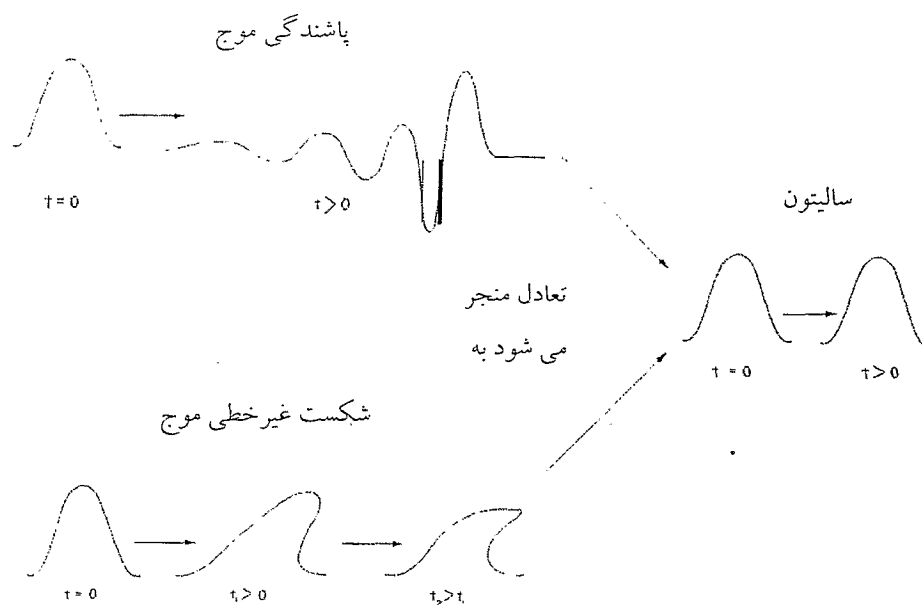
$$u_t + \frac{\alpha\beta}{\gamma} uu_x + \frac{\beta}{\gamma^3} u_{xxx} = 0. \quad (10-1)$$

α, β, γ ثابت های حقیقی غیر صفر هستند. اغلب از فرم مناسب معادله دیفرانسیل جزئی مرتبه سوم زیر استفاده می کنیم

$$u_t + 6uu_x + u_{xxx} = 0. \quad (11-1)$$

دامنه موج یا ارتفاع آب از سطح تعادل است. در این معادله جمله $6uu_x$ ، بیانگر غیر خطی بودن و u_{xxx} ، بیانگر پاشندگی است. البته حضور دو جمله پاشندگی و غیر خطی لازمه ایجاد امواج منفرد است (امواجی که در فواصل طولانی بدون تغییر شکل به حرکت خود ادامه دهند).

همانطور که قبلاً بیان کردیم، با نزدیک شدن موج به ساحل، شکل آن به تدریج مثلی مانند می شود در این حالت پاشندگی در موج مثلی شکل اثر می گذارد به طوریکه امواج در فواصل طولانی بدون تغییر شکل به حرکت خود ادامه می دهند (شکل ۳-۱)



شکل ۱-۳: تعادل بین دو اثر پاشندگی و غیرخطی بودن را به صورت تشکیل امواج سالیتری نشان می دهد.

سال ها دانشمندان در پی حل این معادله بودند، تا اینکه کامپیوتر های با سرعت بالا به خدمت دانشمندان آمد و آنها توانستند به روش عددی جواب این معادله را به دست آورند. از جمله پیشگامان این کار در سال ۱۹۶۵ زابوسکی^۱ و کروسکال بودند [۱۴]. چشمگیرترین یافته های زابوسکی و کروسکال وقتی حاصل شد که دو موج منفرد در حال برهمکنش را بررسی کردند و حیرت زده مشاهده کردند که این دو موج باهم برخورد می کنند، آنگاه بی آنکه شکل، سرعت و ابعادشان تغییر کند از هم جدا می شوند. زابوسکی و کروسکال به دلیل این رفتار ذره مانند آنها را سالیتون نام نهادند.

معادله KdV با استفاده از روش های تحلیلی گوناگون، قابل حل است [۱۵-۱۷]. از جمله این روش ها می توان به روش قدرتمند و کارآمد پراکندگی معکوس^۲ (IST) اشاره کرد. این روش در سال ۱۹۶۷ توسط گاردنر، گرین، کروسکال و میورا^۳ در آزمایشگاه فیزیک پلاسما ضمن تحقیق درباره معادله KdV کشف شد. ایده اساسی در تبدیل پراکندگی معکوس، مشابه همان چیزی است که در هر روش تبدیلی به کار می رود، یک تبدیل از مسئله اصلی در فضای توابع تعریف می شود که در آن وابستگی زمانی ساده تر است، سپس اطلاعات تبدیل شده را تحول زمانی می دهیم و در زمان دلخواه محاسبه می کنیم و بالاخره با یک تبدیل معکوس، جواب را بدست می آوریم. در حقیقت در لحظه $t=0$ اطلاعات اولیه را به وسیله مسئله پراکندگی مستقیم S به فضای پراکندگی می

^۱ Zubusky

^۲ Inverse Scattering Transform

^۳ Gardener, Green, Kruskal, Miura