

مطالعه‌ی وابستگی امواج خروشان در لیزر نیمه هادی تزریق نوری به نوفه‌های محیط

معصومه زکی^۱ و سید مهدی حسینی^۲

چکیده: در این مقاله دینامیک امواج خروشان در یک لیزر نیمه هادی تزریق نوری در حضور نوفه محیطی با دو تابع توزیع گاوسی و یکنواخت مطالعه شده است. بدین منظور معادلات آهنگ لیزر به صورت عددی حل و شدت دامنه‌ی میدان بر حسب زمان محاسبه شده است. همچنین برای این توابع توزیع، نمودار تعداد امواج خروشان بر حسب دامنه‌ی نوفه در مقادیر مختلف جریان و بسامد عدم تطبیق محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دامنه تا میزان مشخص (دامنه نوفه مشخصه) تعداد امواج را افزایش می‌دهد و پس از آن تعداد امواج ثابت می‌ماند و یا حتی کاهش می‌یابد، میزان دامنه نوفه مشخصه در هر حالت به بسامد عدم تطبیق و جریان بایاس بستگی دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در جریان‌های بالاتر و بسامد عدم تطبیق بیشتر دامنه نوفه مشخصه افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: امواج خروشان، لیزر نیمه‌هادی.

۱-مقدمه

استفاده قرار گرفت [۴-۵]. هر چند در مورد تعریف دقیق و مشخص برای این پدیده کماکان بحث وجود دارد، اما دو دانشمند به نام‌های احمدیف^۱ و پلینوفسکی^۲ شش مشخصه برای امواج خروشان پیشنهاد دادند که مهمترین‌شان عبارتند از ۱- دامنه‌ی بلند (حداقل دو مرتبه بلندتر از مقدار میانگین ارتفاع موج‌ها) ۲- خاصیت غیرقابل پیش‌بینی بودن این امواج (تصادفی بودن) ۳- داشتن شکل بخصوص برای تابع توزیع احتمال^۳ دامنه‌های موج - برای مثال L گونه بودن در مقیاس نیمه‌لگاریتمی - [۴،۵]. محققان در حوزه‌ی اپتیک، این امواج مشابه با امواج خروشان اقیانوس را در فیبرهای بلور فوتونی^۴ [۴،۶] و همچنین در لیزرهای نیمه‌رسانای تزریق نوری مشاهده کردند [۴،۷]. در مورد

اتفاقی ظاهر شدن دیواره‌ای از آب که از آن با عنوان امواج خروشان یاد می‌شود پدیده‌ای فاجعه‌آمیز در اقیانوس است که خرابی‌های زیادی را به بار می‌آورد و تلفات مالی و جانی بسیاری را موجب می‌شود. این امواج علاوه بر اینکه پدیده‌ای نادر هستند، عمر بسیار کوتاهی دارند و به سرعت ناپدید می‌شوند [۱-۳]. واژه‌ی امواج خروشان برای اولین بار در مورد امواج گول‌پیکر که به طور غیر منتظره‌ای در سطوح آرام اقیانوس اتفاق می‌افتد، مورد استفاده قرار گرفت. بعد از آن این واژه تعمیم یافت و در سایر رشته‌ها از جمله اقتصاد، فیزیک، فوتونیک و... برای توصیف تپ‌های نادر و فوق بلند مورد

۱ دانشجوی، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز.

M.zaki@sutech.ac.ir

۲ استادیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز.

hosseini@sutech.ac.ir

1 Akhmediev

2 Pelinovsky

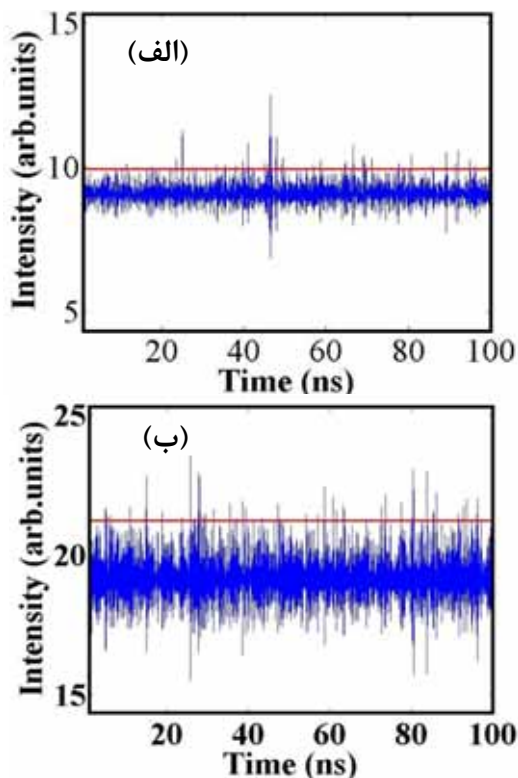
3 Probability distribution function (PDF)

4 Photonic crystal fibers

می باشد [۱۲-۱۳]. امواج خروشان در مقایسه با متوسط ارتفاع کل تپها باید ارتفاع بیشتری داشته باشند، از این رو راه مشخص کردن آنها تعریف مقدار آستانه است که تابعی از مقدار متوسط شدت و انحراف از میانگین است. در این مدل سازی از رابطه $\tau = \langle I \rangle + 2\sigma$ استفاده شده است.

۳- بحث و نتایج

در این کار برای کنترل امواج خروشان تأثیر نوفه محیط روی این امواج بررسی شد. در اینجا برای بررسی امواج خروشان در لیزر ذکر شده معادلات جفت شده ۱ و ۲ با مقادیر ثابت داده شده برای دو تابع توزیع رندوم مختلف (تابع توزیع گاوسی و یکنواخت) و مقادیر مختلف دامنه‌ی نوفه و بسامد عدم تطبیق به صورت عددی حل شده است و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است. نمودار شدت جریان بر حسب زمان برای چند مقدار مشخص و متفاوت از پارامترهای لیزر در شکل ۱ رسم شده است.



وقوع امواج خروشان در لیزرهای تزریقی نوری هم می توان گفت که تحقیقات فراوانی روی آنها انجام شده است که از بین آنها می توان به کارهای زامورا^۱ و همکارانش اشاره کرد [۱۰-۱۲]. آنها تأثیر نوفه روی وقوع این امواج و همچنین تأثیر جریان مدوله شده‌ی سینوسی را بررسی کردند و دریافتند که به ازای یک مقدار مشخص از دامنه‌ی بسامد مدولاسیون، می توان تعداد امواج خروشان را کاهش داد یا به طور کلی سرکوب کرد. در اینجا نیز هدف اصلی تولید و کنترل امواج خروشان در لیزر نیمه رسانای تزریق نوری با استفاده از دو تابع توزیع مختلف، تابع رندوم یکنواخت و گاوسی و مقایسه‌ی نتایج این توابع است. در همین راستا به حل عددی معادلات نرخ لیزر پرداخته می شود و با استفاده از نرم افزار متلب، دینامیک این امواج مطالعه می شود.

۲- مدل سازی

معادلات نرخ لیزر برای یک لیزر نیمه رسانا به این صورت است: [۱۲-۱۳]

(۱)

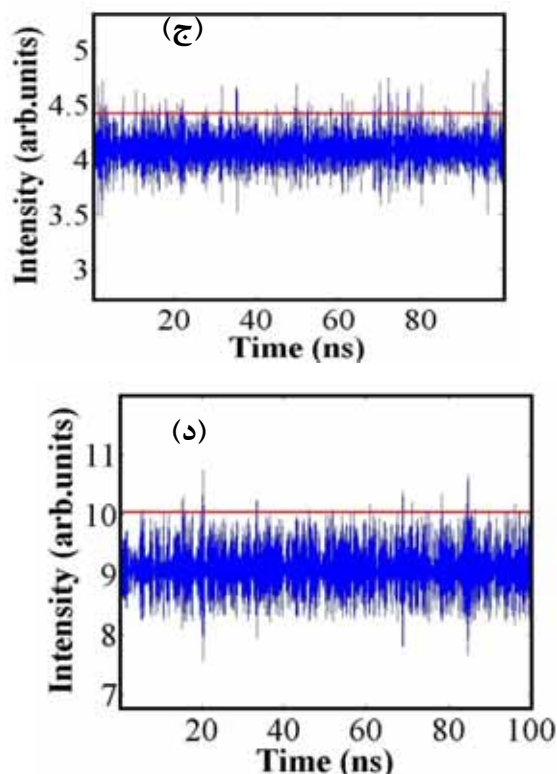
$$\frac{dE}{dt} = \kappa(1+i\alpha)(N-1)E + i\Delta\omega E + \sqrt{P_{inj}} + \sqrt{D}\xi$$

(۲)

$$\frac{dN}{dt} = \gamma_N [\mu - N - N|E|^2]$$

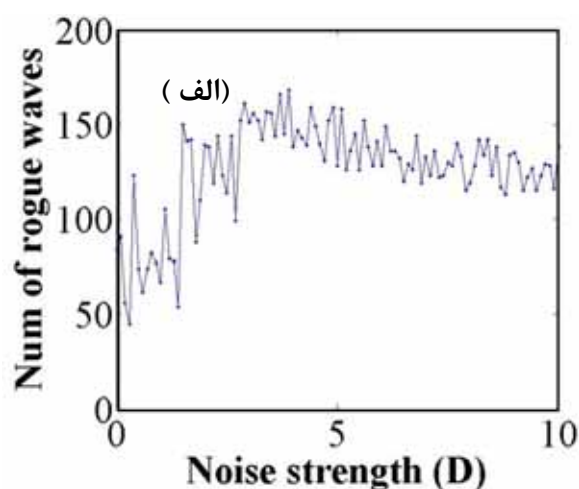
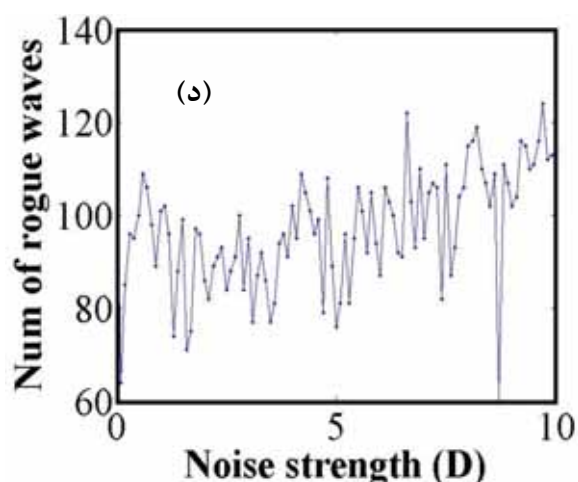
که در آن E و N به ترتیب دامنه‌ی بهنجار شده مختلط میدان و چگالی حاملها، ξ تابع توزیع رندوم (در این جا تابع توزیع یکنواخت، گاوسی و پواسون در نظر گرفته شده است)، D دامنه اختلال و μ شدت جریان تزریقی بهنجار شده است. سایر متغیرها نیز به این صورت است: $\gamma_N = 1\text{ns}^{-1}$ ، $\kappa = 300\text{ns}^{-1}$ آهنگ تابش میدان، $\alpha = 3$ آهنگ تابش حاملها، $P_{inj} = 60\text{ns}^{-2}$ شدت دامنه‌ی پمپاژ و بسامد عدم تطبیق بین لیزرها به صورت $\Delta\nu = \Delta\omega / 2\pi$

است و حدود ۱۱۰ موج خروشان مشاهده شد. در شکل ۱-ج تابع توزیع، تابع توزیع گاوسی می‌باشد با بسامد عدم تطبیق ۲GHz، جریان بهنجار ۵ و دامنه‌ی نوفه $6/6^2 \text{ ns}^-2$. برای این حالت حدود ۹۰ موج خروشان مشاهده شد. در آخر نیز شکل ۱-د با تابع توزیع گاوسی، بسامد عدم تطبیق $0/5 \text{ GHz}$ ، جریان بهنجار ۱۰ و دامنه‌ی نوفه $0/1 \text{ ns}^-2$ در اینجا نیز حدود ۳۰ موج خروشان مشاهده شد. برای بررسی دقیق‌تر وابستگی امواج خروشان به تابع توزیع محیط و دامنه‌ی نوفه، شکل ۲ تعداد امواج خروشان بر حسب شدت نوفه را برای جریان بهنجار ۵ و دو بسامد عدم تطبیق مختلف نشان می‌دهد. در شکل ۲-الف و ۲-ب تابع توزیع، یکنواخت و بسامد عدم تطبیق به ترتیب $0/5 \text{ GHz}$ و 2 GHz است. همانطور که مشخص است با افزایش بسامد عدم تطبیق تعداد امواج خروشان مشاهده شده کاهش یافته است، همچنین افت وخیز در نمودار نیز با افزایش بسامد عدم تطبیق افزایش یافته است. در شکل ۲-ج و ۲-د تابع توزیع، تابع توزیع گاوسی است و بسامد عدم تطبیق به ترتیب $0/5 \text{ GHz}$ و 2 GHz است. در اینجا نیز همانند دو نمودار اول، افزایش بسامد عدم تطبیق منجر به کاهش در تعداد امواج خروشان و افزایش افت وخیز شده است. در شکل ۲-الف و ۲-ج مشاهده می‌شود که امواج خروشان ابتدا روند افزایشی داشته‌اند تا تقریباً $D=4$ (دامنه‌ی مشخصه نوفه) و سپس کاهش یافته‌اند و از یک جایی به بعد تقریباً تغییرات یکنواخت می‌شود که با توجه به شکل ۲-ب و ۲-د این دامنه‌ی مشخصه نسبت به شکل ۲-الف و ۲-ج افزایش یافته است. همچنین از مقایسه دو نمودار اول با دو نمودار دوم مشاهده می‌شود که تغییر تابع توزیع تغییر زیادی چه در روند نمودار و چه در تعداد امواج خروشان ایجاد نمی‌کند، تنها تغییر مختصری را در افت وخیز نمودار می‌توان مشاهده کرد.

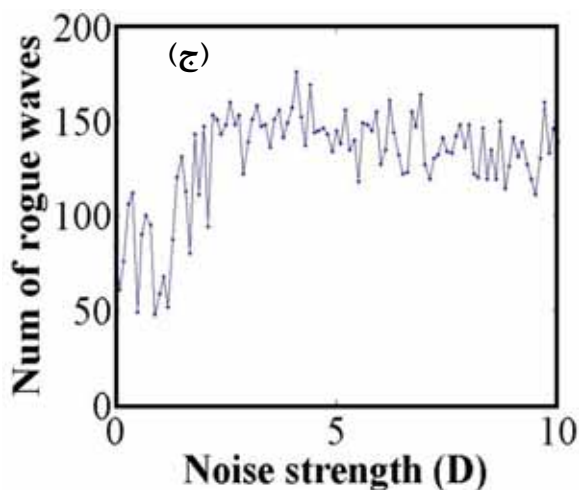
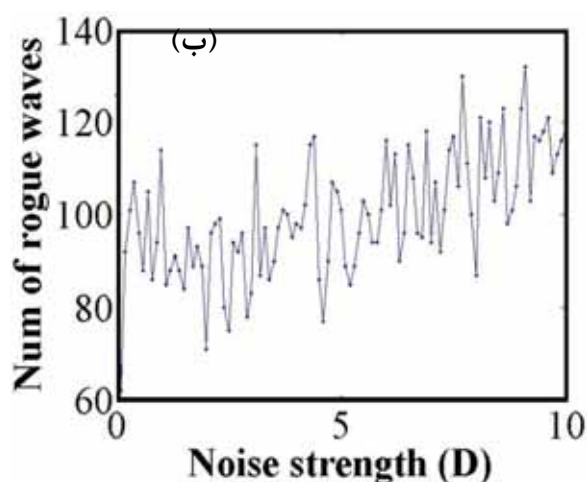


شکل ۱: نمودار شدت بر حسب زمان برای (الف): تابع توزیع یکنواخت و $D = 4, \mu = 10, \Delta\nu = 2 \text{ GHz}$ با ۷۰ موج خروشان، (ب): تابع توزیع یکنواخت و $D = 8.6, \mu = 20, \Delta\nu = 0.5 \text{ GHz}$ با ۱۱۰ موج خروشان، (ج): تابع توزیع گاوسی با $D = 6.6, \mu = 5, \Delta\nu = 2 \text{ GHz}$ با ۹۰ موج خروشان، (د): تابع توزیع گاوسی و $D = 0.1, \mu = 10, \Delta\nu = 0.5 \text{ GHz}$ با ۳۰ موج خروشان.

در اینجا امواجی که شدت آن‌ها بیشتر از مقدار آستانه (که در شکل با خط قرمز نشان داده شده است) است، به عنوان موج خروشان در نظر گرفته می‌شوند. در شکل ۱-الف تابع توزیع مورد نظر همان تابع توزیع یکنواخت است با بسامد عدم تطبیق ۲GHz، جریان بهنجار ۱۰ و دامنه‌ی نوفه 4 ns^-2 . میانگین شدت مقداری مشخص است که نوسانات حول آن می‌باشد و با احتساب شرط موج خروشان بودن حدود ۷۰ موج خروشان مشاهده شد. در شکل ۱-ب تابع توزیع دوباره همان تابع توزیع یکنواخت در نظر گرفته می‌شود، بسامد عدم تطبیق $0/5 \text{ GHz}$ ، جریان بهنجار ۲۰ و دامنه‌ی نوفه $8/6 \text{ ns}^-2$

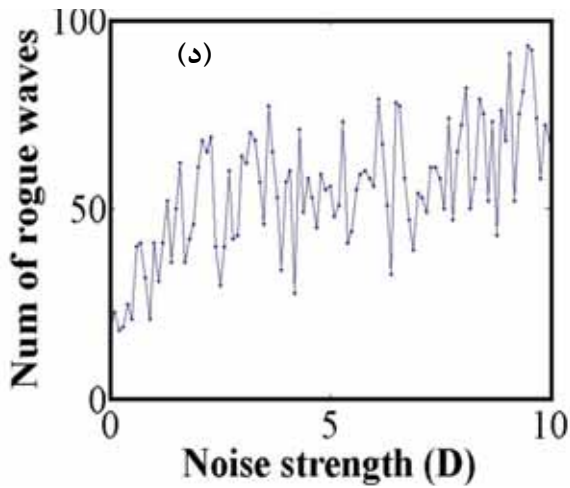


شکل ۲. نمودار تعداد امواج خروشان بر حسب شدت نوفه در جریان $\mu = 5$ برای (الف) و (ب) با تابع توزیع رندوم معمولی و بسامد عدم تطبیق به ترتیب $\Delta\nu = 0.5\text{GHz}$ و $\Delta\nu = 2\text{GHz}$ و (ج) و (د) تابع توزیع گاوسی و بسامد عدم تطبیق به ترتیب $\Delta\nu = 0.5\text{GHz}$ و $\Delta\nu = 2\text{GHz}$.



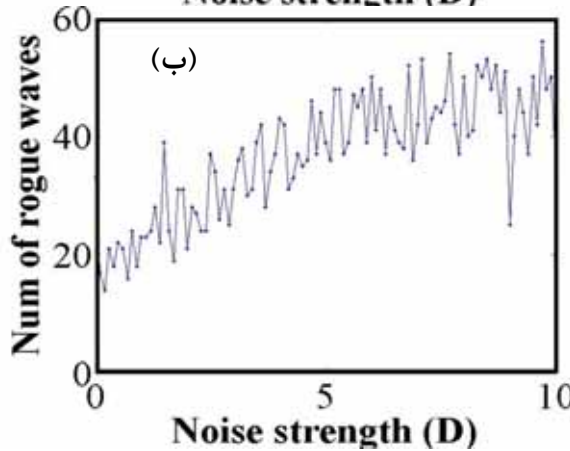
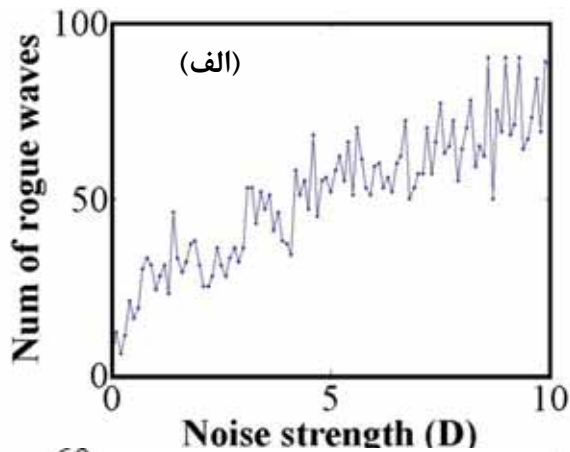
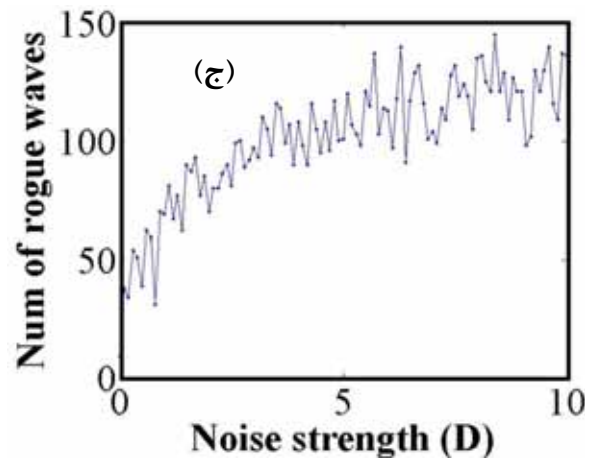
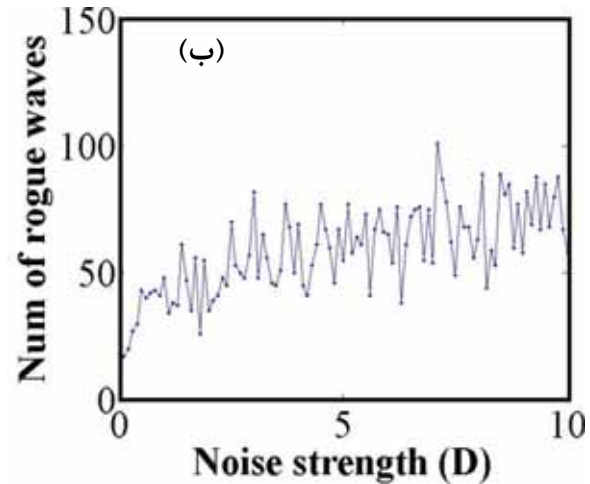
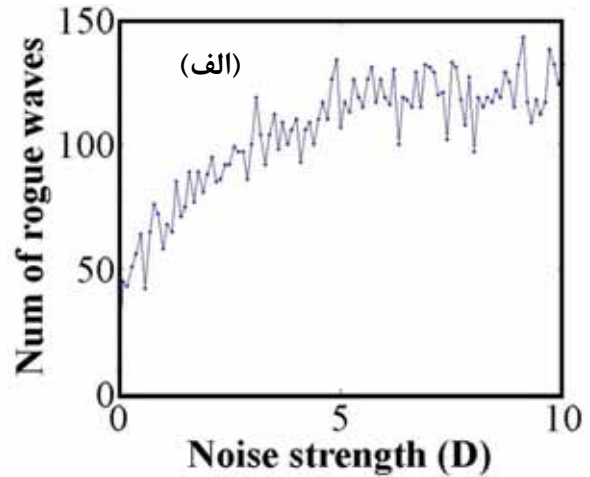
در شکل ۳ نمودار تعداد امواج خروشان بر حسب شدت نوفه برای جریان بهنجار ۱۰ آورده شده است. از مقایسه دو شکل ۳-الف و ۳-ج و همچنین ۳-ب و ۳-د می‌توان دریافت که نوع تابع توزیع در روند تغییرات امواج خروشان، تفاوتی ایجاد نمی‌کند (همانند شکل ۲) و تنها افزایش بسامد عدم تطبیق منجر به کاهش در تعداد امواج خروشان می‌شود. همچنین در شکل ۳-الف و ۳-ج روند افزایشی-کاهشی آن‌چنانکه در شکل ۲ مشاهده شد، دیده نمی‌شود و نمودار با افزایش دامنه‌ی نوفه تقریباً سیر صعودی دارد و دامنه‌ی مشخصه‌ی نوفه که در آن ماکزیمم تعداد امواج خروشان مشاهده شده رخ می‌دهد، افزایش می‌یابد. علاوه بر آن از مقایسه شکل ۲ و ۳ این نتیجه به دست می‌آید که افزایش جریان در شکل ۳ باعث شده است که تعداد امواج خروشان نسبت به شکل ۲ کمتر شود (کاهش در مقادیر محور عمودی).

شکل ۴ نیز تغییرات امواج خروشان بر حسب دامنه‌ی نوفه را برای جریان بهنجار ۲۰ نشان می‌دهد. در اینجا نیز همانند دو شکل قبل افزایش بسامد عدم تطبیق تعداد امواج خروشان را کاهش می‌دهد، تغییر تابع توزیع،



شکل ۳. نمودار تعداد امواج خروشان بر حسب شدت نوفه در جریان $\mu = 10$ برای (الف) و (ب) با تابع توزیع رندوم معمولی و بسامد عدم تطبیق به ترتیب $\Delta\nu = 0.5\text{GHz}$ و $\Delta\nu = 2\text{GHz}$ و (ج) و (د) تابع توزیع گاوسی و بسامد عدم تطبیق به ترتیب $\Delta\nu = 0.5\text{GHz}$ و $\Delta\nu = 2\text{GHz}$.

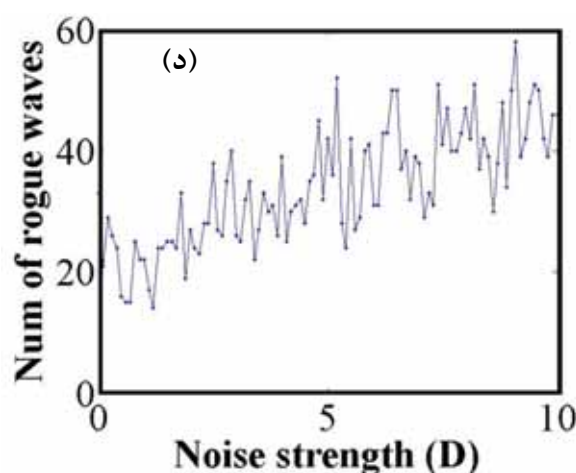
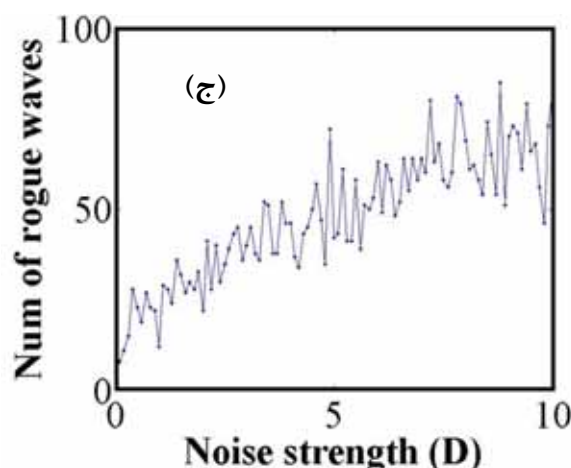
تفاوتی در روند تغییر امواج خروشان ایجاد نمی‌کند و همچنین افزایش جریان بهنجار در اینجا نیز تعداد امواج خروشان را نسبت به شکل ۳ و ۲ که جریان کمتری دارند، کاهش داده است.



همچنین با افزایش دامنه نوفه تا یک دامنه مشخصه تعداد امواج خروشان افزایش می‌یابد و پس از آن ثابت باقی می‌ماند و یا حتی کاهش می‌یابد؛ که این میزان با افزایش جریان و بسامد عدم تطبیق افزایش می‌یابد. همچنین مدل توزیع نوفه تاثیر اندکی در تعداد امواج خروشان دارد.

مرجع‌ها

- [1] Zaviyalov A., Egorov O., Iliev R. and Lederer F.; “*Rogue waves in mode-locked fiber lasers*”; physical review A 85, No.1, 2003, pp. 013828.
- [2] Akhmediev N. and Pelinovsky E. ; “*Rogue Waves–Towards a Unifying Concept, Special Issue of Eur*”; Phys. J. Special Topics 185, 2010.
- [3] Christian K., and Pelinovsky E.; “*Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon*”; European Journal of Mechanics-B/Fluids 22, No. 6, 2003, pp. 603-634.
- [4] Pisarchik A. N., Jaimes-Reátegui R., Sevilla-Escoboza R., Huerta-Cuellar G., and Taki M.; “*Rogue waves in a multistable system*”; Physical review letters 107, No. 27, 2011, pp. 274101.
- [5] Akhmediev N., and Pelinovsky E.; “*Editorial–Introductory remarks on “Discussion & Debate: Rogue Waves–Towards a Unifying Concept?”*” The European Physical Journal Special Topics 185, No. 1, 2010, pp. 1-4.
- [6] Solli D. R., Ropers C., Koonath P., and Jalali B.; “*Optical rogue waves*”; Nature 450, No. 7172, 2007, pp. 1054-1057.
- [7] Bonatto C., Feyereisen M., Barland S., Giudici M., Masoller C., Rios Leite J. R. and Tredicce J. R.; “*Deterministic optical rogue waves*”; Physical review letters 107, No. 5, 2011, pp. 053901.



شکل ۴. نمودار تعداد امواج خروشان بر حسب شدت نوفه در جریان $\mu = 20$ برای (الف) و (ب) با تابع توزیع رندوم معمولی و بسامد عدم تطبیق به ترتیب $\Delta\nu = 0.5\text{GHz}$ و $\Delta\nu = 2\text{GHz}$ (ج) و (د) تابع توزیع گاوسی و بسامد عدم تطبیق به ترتیب $\Delta\nu = 2\text{GHz}$ و $\Delta\nu = 0.5\text{GHz}$.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله وقوع امواج خروشان در یک لیزر نیمه هادی تزریق نوری با توابع توزیع رندوم یکنواخت و گاوسی بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش بسامد عدم تطبیق تعداد امواج خروشان مشاهده شده را کاهش می‌دهد و همچنین باعث افزایش در افت وخیز نمودار می‌شود. علاوه بر آن جریان عامل دیگری است که افزایش آن منجر به کاهش امواج خروشان می‌شود.

- [8] Janssen P. A. E. M.; “*Nonlinear four-wave interactions and freak waves*”; Journal of Physical Oceanography 33, No. 4, 2003, pp. 863-884.
- [9] White B. S. and Fornberg B.; “*On the chance of freak waves at sea*”; Journal of fluid mechanics 355, 1998, pp. 113-138.
- [10] Müller P., Garrett C. and Osborne A.; “*Rogue waves*”; Oceanography 18, No. 3, 2005, pp. 66.
- [11] Zamora-Munt J., Garbin B., Barland S., Giudici M., Leite J. R. R., Masoller C., and Tredicce J. R.; “*Rogue waves in optically injected lasers: Origin, predictability, and suppression*”; Phys. Rev. A 87, No. 3, 2013, pp. 035802.
- [12] Perrone S., Vilaseca R., Zamora-Munt J., and Masoller C.; “*Controlling the likelihood of rogue waves in an optically injected semiconductor laser via direct current modulation*”; Phys. Rev. A 89, No. 3, 2014, pp. 033804.