



## بهینه سازی تقویت کننده های فیبر نوری رامان پمپ شده به وسیله پمپ های گوسی

عباس قاسم پور اردکانی<sup>۱</sup>، علیرضا بهرام پور<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده فیزیک، تهران

چکیده: استفاده از پمپ های باند وسیع در طراحی تقویت کننده های فیبر نوری رامان اخیراً از اهمیت ویژه ای برخوردار شده است. از آنجا که لیزرهای نیمه هادی پر قدرت باند وسیع تقریباً دارای طیف گوسی هستند، در این مقاله برای کمینه سازی اعوجاج بهره از ترکیب چند پمپ باند وسیع استفاده می شود. توان و طول موج مرکزی هر کدام از پمپ های گوسی برای حالت بهینه بر اساس روش وردشی انتخاب می شوند. محاسبات برای بهینه سازی اعوجاج بهره یک تقویت کننده رامان به طول ۲۵ کیلومتر، پهنای باند ۵۰ nm و متوسط بهره ۴/۱ dB انجام شد و اعوجاج بهره ۰/۲۵ dB بدست آمد.

کلید واژه- بهینه سازی، پمپ گوسی، تقویت کننده فیبر رامان و روش وردشی  
 PACS-۰۶۰-۰۰۶۰-۰۶۰

### ۱- مقدمه

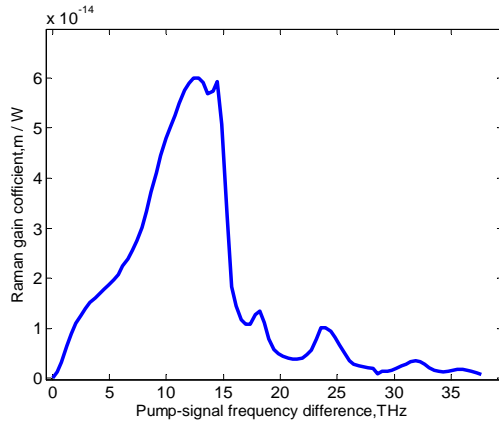
این روش هنوز به صورت واقعی و عملی مورد استفاده قرار نگرفته است.

روش های استفاده از چند پمپ و پمپ هایی با پهنای باند گسترده در تقویت کننده های رامان به روش استفاده از یک پمپ با طیف پیوسته پیشرفت کرد. بهترین تخت کردن تابع بهره را با استفاده از این روش می توان بدست آورد [۶] و [۷]. اما شکل پمپ بدست آمده در مرجع [۶] بسیار پیچیده بوده و بدست آوردن آن به صورت عملی مشکل است. بنابراین تلاش برای پیدا کردن شکل پمپ پیوسته ای که اعوجاج های طیف بهره را کمینه کند و از نظر عملی قابل دسترسی باشد، جالب به نظر می رسد. معمولاً از سه شیوه برای بهینه سازی استفاده می شود: ۱- ثابت نگهداشتن توان پمپ ها و تغییر طول موج ها، ۲- ثابت نگه داشتن طول موج ها و تغییر توان ها و ۳- تغییر طول موج ها و تغییر توان ها و بهینه کردن آن ها [۷]. از آنجا که لیزرهای نیمه هادی باند وسیع دارای طیف گوسی با پهنای باند در نیمه بیشینه ۱۰-۱۵ نانومتر هستند، در اینجا فرض می شود که توان اولیه پمپ به صورت ترکیبی از چند پمپ گوسی با پهنای باند ۱۰ نانومتر باشد. برای شبیه سازی پمپ پیوسته از تعداد زیادی پمپ تکفام (گسسته) استفاده می شود [۸]. در کارهای قبلی انجام شده ابتدا شکل منحنی پمپ پیوسته بدست می آمد و بعد با برازش گوسی روی منحنی مورد نظر، شکل پمپی که

تقویت کننده های رامان که بر اساس اثر رامان القائی کار می کنند در سیستم های مخابرات نوری بسیار مورد توجه هستند [۱]. مزیت این تقویت کننده ها نسبت به تقویت کننده های نیمه رسانا و آلاییده به اربیم این است که هر سیگنال با هر طول موجی را می توان به وسیله ی این تقویت کننده ها تقویت کرده و از خود فیبر به عنوان یک محیط بهره استفاده می شود. علاوه بر این تقویت کننده های رامان از نسبت سیگنال به نوفه بالایی برخوردار هستند و با استفاده از پمپ های مناسب می توان پهنای باند طیف بهره آن ها را گسترده کرد [۲].

در گسترش پهنای باند بهره تقویت کننده ها مهمترین مسئله تخت کردن و کاهش اعوجاج های طیف بهره است. برای انجام این امر معمولاً از تعداد زیادی پمپ استفاده می شود (تعداد ۴-۲۰ پمپ). البته از هر پمپ با طول موج و توان دلخواه نمی توان استفاده کرد و باید توان و طول موج پمپ ها را به گونه ای انتخاب کرد که اعوجاج های بهره کمینه شود [۳]. به منظور کم کردن تعداد پمپ ها و کاهش هزینه می توان از روش WDM یا پمپ هایی با پهنای باند گسترده استفاده کرد [۴]. راه دیگر برای تخت کردن تابع بهره رامان استفاده از پمپ هایی است که طول موج آن ها بر روی یک پهنای وسیع به سرعت قابل تنظیم باشد [۵]. با این وجود

از نظر عملی قابل دسترسی باشد، بدست می‌آید [۸] و [۹] و [۱۰]. بر اساس گزارشات قبلی، برای یک فیبر SMF-28 به طول ۱۰۰ کیلومتر، اعوجاج بهره بدست آمده برای دو شکل مختلف پمپ پیوسته ۰/۲ dB و ۰/۴dB است [۹]. در صورتی که اگر از چهار پمپ گسسته در طول موج‌های ۱۴۲۰، ۱۴۳۵، ۱۴۵۳ و ۱۴۸۰ نانومتر استفاده کنیم اعوجاج بهره ۰/۸ dB است [۹]. برای فیبر SMF-28 به طول ۲۵ کیلومتر اعوجاج بهره بدست آمده با ترکیب چهار پمپ گوسی ۰/۳dB با متوسط بهره بیشتر از صفر دسی بل است [۸]. اما در این مقاله از ابتدا فرض می‌شود که توان اولیه پمپ به صورت ترکیبی از چند پمپ گوسی با پهنای باند ۱۰ نانومتر باشد و بعد طول موج‌های مرکزی و دامنه این پمپ‌های گوسی را به گونه‌ای انتخاب می‌کنیم که طیف بهره دارای کمینه اعوجاج باشد. برای این منظور از روش وردشی و ضرایب نامعین لاگرانژ استفاده می‌شود.



شکل ۱: طیف ثابت بهره رامان در فرکانس پمپ ۲۰۰THz [۱۲]

در معادله (۱) جمله اول تضعیف سیگنال در طول فیبر، جمله دوم برهم کنش سیگنال-سیگنال و جمله سوم برهم کنش نمونه‌های پمپ و سیگنال را نشان می‌دهد. در معادله (۲) جمله اول تضعیف نمونه‌ای از پمپ در طول فیبر، جمله دوم برهم کنش سیگنال - نمونه‌ای از پمپ و جمله سوم برهم کنش نمونه‌ای از پمپ با نمونه‌ای دیگر از پمپ را نشان می‌دهد. همان گونه که در معادله (۲) دیده می‌شود فرض بر این است که عمل پمپ کردن در جهت معکوس<sup>۱</sup> انجام می‌شود. حال تابع هدف F را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$F = \sum_{k=1}^{N_s} (G_k - \bar{G})^2 \quad (4)$$

$$G_k = \frac{S_k(L)}{S_k(0)} \quad (5)$$

$$\bar{G} = \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} G_k \quad (6)$$

F نشان دهنده مجموع مربعات اختلاف بهره در هر فرکانس نسبت به متوسط بهره،  $G_k$  بهره مربوط به سیگنال kام،  $\bar{G}$  متوسط بهره تقویت کننده و L طول فیبر است. در واقع

از نظر عملی قابل دسترسی باشد، بدست می‌آید [۸] و [۹] و [۱۰]. بر اساس گزارشات قبلی، برای یک فیبر SMF-28 به طول ۱۰۰ کیلومتر، اعوجاج بهره بدست آمده برای دو شکل مختلف پمپ پیوسته ۰/۲ dB و ۰/۴dB است [۹]. در صورتی که اگر از چهار پمپ گسسته در طول موج‌های ۱۴۲۰، ۱۴۳۵، ۱۴۵۳ و ۱۴۸۰ نانومتر استفاده کنیم اعوجاج بهره ۰/۸ dB است [۹]. برای فیبر SMF-28 به طول ۲۵ کیلومتر اعوجاج بهره بدست آمده با ترکیب چهار پمپ گوسی ۰/۳dB با متوسط بهره بیشتر از صفر دسی بل است [۸]. اما در این مقاله از ابتدا فرض می‌شود که توان اولیه پمپ به صورت ترکیبی از چند پمپ گوسی با پهنای باند ۱۰ نانومتر باشد و بعد طول موج‌های مرکزی و دامنه این پمپ‌های گوسی را به گونه‌ای انتخاب می‌کنیم که طیف بهره دارای کمینه اعوجاج باشد. برای این منظور از روش وردشی و ضرایب نامعین لاگرانژ استفاده می‌شود.

## ۲- معادله‌های حاکم

معادله‌های مربوط به انتشار توان پمپ و سیگنال با در نظر گرفتن اثر رامان به صورت زیر است [۱۱]:

$$\frac{dS_i(z)}{dz} = S_i(z) \left( -\alpha(v_i) + \sum_{j=1}^{N_s} g(v_i, v_j) S_j(z) + \sum_{j=1}^{N_m} g(v_i, \bar{v}_j) Q_j^2(z) \right); i=1, 2, \dots, N_s \quad (1)$$

$$\frac{dP_i(z)}{dz} = P_i(z) \left( \alpha(\bar{v}_i) - \sum_{j=1}^{N_s} g(\bar{v}_i, v_j) S_j(z) - \sum_{j=1}^{N_m} g(\bar{v}_i, \bar{v}_j) P_j(z) \right); i=1, 2, \dots, N_m \quad (2)$$

در معادله‌های بالا  $S_i(z)$  توان سیگنال iام،  $P_i(z)$  توان نمونه iام پمپ،  $v_i$  فرکانس سیگنال iام،  $\bar{v}_i$  فرکانس نمونه iام،  $\alpha$  ضریب اتلاف در محیط فیبر،  $N_s$  تعداد سیگنال‌ها،  $N_m$  تعداد نمونه‌ها و g ثابت بهره رامان است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۲]:

$$g(v_i, v_j) = \begin{cases} -\frac{v_i^2}{v_j v_{ref}} \frac{g_{ref}(v_i - v_j)}{\Gamma A_{eff}} & ; v_i > v_j \\ 0 & ; v_i = v_j \\ \frac{v_j}{v_{ref}} \frac{g_{ref}(v_j - v_i)}{\Gamma A_{eff}} & ; v_i < v_j \end{cases} \quad (3)$$

<sup>1</sup> backward

حال از  $J$  نسبت به متغیرهای موجود وردش گرفته و آن را مساوی با صفر قرار می‌دهیم. در اینجا به جای  $\delta Q_i(L)$  از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$\delta Q_i(L) = \sum_{k=1}^{N_p} \left[ \frac{\delta E_k}{Q_i(L)} \exp(-\alpha(\lambda_i - \lambda_k)^2) - \alpha \delta \lambda_k \frac{E_k^2}{Q_i(L)} (\lambda_i - \lambda_k) \exp(-\alpha(\lambda_i - \lambda_k)^2) \right]; \quad (12)$$

$i = 1, 2, \dots, N_m$

با مساوی صفر قرار دادن  $\delta J$  معادله‌های حاکم بر ضرایب نامعین لاگرانژ و شرایط مرزی مربوطه بدست می‌آید [۱۳].

$$-\frac{d\gamma_i(z)}{dz} + \gamma_i(z) \left( \alpha(v_i) - \sum_{j=1}^{N_s} g(v_i, v_j) S_j(z) - \sum_{j=1}^{N_m} g(v_i, \bar{v}_j) Q_j^2(z) \right) - \sum_{j=1}^{N_s} g(v_j, v_i) S_j(z) \gamma_j(z) \quad (13)$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N_m} g(\bar{v}_j, v_i) Q_j(z) \beta_j(z) = 0; i = 1, 2, \dots, N_s$$

$$-\frac{d\beta_i(z)}{dz} + \frac{\beta_i(z)}{2} \left( -\alpha(\bar{v}_i) + \sum_{j=1}^{N_m} g(\bar{v}_i, \bar{v}_j) Q_j^2(z) + \sum_{j=1}^{N_s} g(\bar{v}_i, v_j) S_j(z) \right) + Q_i(z) \left( \sum_{j=1}^{N_m} g(\bar{v}_j, v_i) \beta_j(z) Q_j(z) \right) \quad (14)$$

$$- 2 \sum_{j=1}^{N_s} g(v_j, \bar{v}_i) S_j(z) \gamma_j(z) = 0; i = 1, 2, \dots, N_m$$

$$\gamma_i(L) = \frac{-2G_i}{S_i(0)} + \frac{2}{N_s S_i(0)} \sum_{j=1}^{N_s} G_j = -\frac{2}{S_i(0)} (G_i - \bar{G}); \quad (15)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_s$$

$$\beta_i(0) = 0; i = 1, 2, \dots, N_m \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^{N_m} E_k \frac{\beta_i(L)}{Q_i(L)} \exp(-\alpha(\lambda_i - \lambda_k)^2) = 0; \quad (17)$$

$$k = 1, 2, \dots, N_p$$

$$\sum_{i=1}^{N_m} \frac{\beta_i(L)}{Q_i(L)} E_k^2 (\lambda_i - \lambda_k) \exp(-\alpha(\lambda_i - \lambda_k)^2) = 0; \quad (18)$$

$$k = 1, 2, \dots, N_p$$

از آنجا که مقدار اولیه سیگنال‌ها مشخص است (یعنی  $\delta S_i(0) = 0$ ) هیچ شرط مرزی خاصی برای  $\gamma_i(0)$

هدف ما کمینه سازی  $F$  با توجه به قیدهای موجود است. از آنجا که توان پمپ‌ها و نمونه‌هایی از آن که انتخاب می‌کنیم کمیتی مثبت هستند برای جلوگیری از بدست آمدن جواب منفی برای نمونه‌های پمپ، تغییر متغیر  $P_k(z) = Q_k^2(z)$  را انجام می‌دهیم که  $Q_k(z)$  یک تابع حقیقی است. معادله‌های مربوطه بر حسب  $Q_k(z)$  باز نویسی می‌شود. در انتها  $Q_k^2(z)$  را به عنوان نمونه‌ای از توان پمپ معرفی کرده و برای اینکه از صحیح بودن جواب اطمینان حاصل شود آن را در معادله (۱) و (۲) گذاشته و منحنی بهره مربوطه رسم می‌شود. پس معادله‌های (۱) و (۲) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{dS_i(z)}{dz} = S_i(z) \left( -\alpha(v_i) + \sum_{j=1}^{N_s} g(v_i, v_j) S_j(z) + \sum_{j=1}^{N_m} g(v_i, \bar{v}_j) Q_j^2(z) \right); i = 1, 2, \dots, N_s \quad (7)$$

$$\frac{dQ_i(z)}{dz} = \frac{Q_i(z)}{2} \left( \alpha(\bar{v}_i) - \sum_{j=1}^{N_s} g(\bar{v}_i, v_j) S_j(z) - \sum_{j=1}^{N_m} g(\bar{v}_i, \bar{v}_j) Q_j^2(z) \right); i = 1, 2, \dots, N_m \quad (8)$$

$$S_i(0) = S_{i0}; i = 1, 2, \dots, N_s \quad (9)$$

$$Q_i^2(L) = \sum_{k=1}^{N_p} E_k^2 \exp(-\alpha(\lambda_i - \lambda_k)^2); i = 1, 2, \dots, N_m \quad (10)$$

$$S_i(0) = S_{i0}; i = 1, 2, \dots, N_s$$

$$Q_i^2(L) = \sum_{k=1}^{N_p} E_k^2 \exp(-\alpha(\lambda_i - \lambda_k)^2); i = 1, 2, \dots, N_m \quad (10)$$

رابطه (۱۰) نشاندهنده این است که از ابتدا فرض شده طیف توان پمپ ورودی به صورت ترکیبی از  $N_p$  پمپ گوسی باشد در صورتی در مرجع [۱۰] از ابتدا چنین قیدی بر مسئله اعمال نمی‌شود. برای معادله‌های (۷) و (۸) به ترتیب ضرایب نامعین لاگرانژ  $\beta_k, \gamma_k$  در نظر گرفته و تابع هدف تعمیم یافته را به صورت حاصل جمع تابع هدف حاصل ضرب ضرایب نامعین لاگرانژ در معادله‌های (۷) و (۸) تعریف می‌کنیم [۱۳]:

$$J = F + \sum_{i=1}^{N_s} \int_0^L \gamma_i(z) \left[ \frac{dS_i(z)}{dz} + S_i(z) \left( \alpha(v_i) - \sum_{j=1}^{N_s} g(v_i, v_j) S_j(z) - \sum_{j=1}^{N_m} g(v_i, \bar{v}_j) Q_j^2(z) \right) \right] dz \quad (11)$$

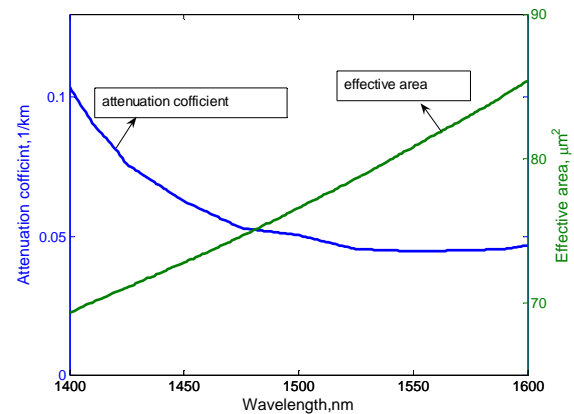
$$+ \sum_{i=1}^{N_m} \int_0^L \beta_i(z) \left[ \frac{dQ_i(z)}{dz} + \frac{1}{2} Q_i(z) \left( \alpha(\bar{v}_i) - \sum_{j=1}^{N_s} g(\bar{v}_i, v_j) S_j(z) + \sum_{j=1}^{N_m} g(\bar{v}_i, \bar{v}_j) Q_j^2(z) \right) \right] dz$$

بدست نمی‌آید و مقدار آن با حل معادله‌های مربوطه بدست می‌آید. تعداد معادله‌های دیفرانسیل بدست آمده برابر با  $2(N_m + N_s)$  است. تعداد شرایط مرزی  $2N_p$  مجهول داریم و تعداد معادله‌های جبری (۱۷) و (۱۸) برابر با  $2N_p$  است بنابراین این دستگاه معادله قابل حل است.

بنابراین تعداد معادله‌های دیفرانسیل و شرایط مرزی برابر بوده و معادله‌های دیفرانسیل مربوطه قابل حل است. از آنجا که بعضی از معادله‌ها دارای مقدار اولیه، بعضی دارای مقدار نهایی و بعضی دیگر هم دارای شرط مرزی مرتبط با شرایط مرزی معادله‌های دیگر هستند برای حل این دستگاه معادله دیفرانسیل از روش تفاضل محدود استفاده می‌شود.

تعداد معادله‌های (۱۷) و (۱۸) برابر با  $2N_p$  است. این معادله‌ها به صورت یک دستگاه معادلات غیر خطی جبری هستند. بعد از حل معادله‌های دیفرانسیل از الگوریتم نیوتن رافسون استفاده می‌شود و با توجه به مقادیر بدست آمده برای  $\beta_i(L)$ ، می‌توان مقادیر طول موج‌های مرکزی و دامنه پمپ‌های گوسی را برای گام دوم بدست آورد. با این مقادیر بدست آمده دستگاه معادله دیفرانسیل را دوباره حل می‌کنیم. آن قدر این کار را ادامه می‌دهیم تا  $\beta_i(L)$ ،  $E_k$ ،  $\lambda_k$  ها و  $Q_i(L)$  های بدست آمده از حل معادله‌های دیفرانسیل در روابط (۱۷) و (۱۸) صدق کنند.

۳- محاسبات عددی  
برای انجام محاسبات از یک فیبر  $SMF-28$  به طول ۲۵ کیلومتر استفاده می‌شود که منحنی سطح مقطع و ضریب اتلاف آن در شکل ۲ نشان داده شده است [۸].

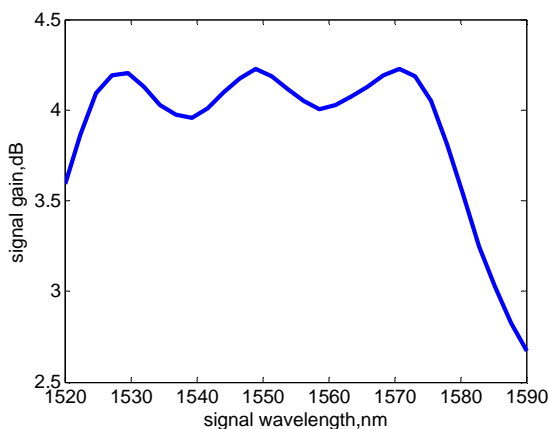


شکل ۲: منحنی سطح مقطع و ضریب تضعیف برای  $SMF-28$  بر حسب طول موج [۸]

در انجام محاسبات تعداد سیگنال‌ها را ۴۰، تعداد نمونه‌های پمپ را ۶۰ ( $N_m = 60$ )، تعداد پمپ‌های گوسی را ۴ پمپ ( $N_p = 4$ ) و پهنای باند سیگنال‌ها را از  $1575\text{ nm}$  -  $1525\text{ nm}$  انتخاب می‌کنیم. مقدار پهنای پمپ‌های گوسی در نیمه بیشینه با هم مساوی بوده و برابر با  $10\text{ nm}$  است.

در انجام محاسبات فرض می‌شود که همه سیگنال‌ها دارای توان اولیه مساوی هستند و مقدار آن برابر با  $0.1\text{ mW}$  است یعنی:  $S_k(0) = 0.1\text{ mW} = -10\text{ dBm}$ .

در شکل ۳ طیف بهره بدست آمده بعد از بهینه سازی، نشان داده شده است در این شکل متوسط بهره بدست آمده  $4/1\text{ dB}$  و اعوجاج بهره برابر با  $0/25\text{ dB}$  است.



شکل ۳: طیف بهره سیگنال بدست آمده بر حسب طول موج

معادله‌هایی که با آنها سر و کار داریم یک دستگاه معادله‌های دیفرانسیل و جبری غیر خطی به هم جفت شده هستند. برای حل این معادله‌ها به صورت زیر عمل می‌کنیم:

در مرحله اول برای طول موج مرکزی و دامنه پمپ‌های گوسی یک حدس می‌زنیم بنابراین با توجه به معادله (۱۰) ما شرط مرزی را برای مقادیر نهایی  $Q_i(L)$  خواهیم داشت. مجموع تعداد معادله‌های (۹) و (۱۰) و (۱۵) و (۱۶) که در واقع شرایط مرزی مسئله هستند برابر با  $2(N_s + N_m)$  است. تعداد معادله‌های دیفرانسیل موجود هم برابر با

بر خلاف روش‌های قبلی، از ابتدا فرض می‌شود که شکل پمپ گوسی باشد ولی فرکانس‌های مرکزی و توان پمپ‌ها به منظور کمینه سازی اعوجاج بهره بر اساس روش وردشی تعیین می‌شود و در اینجا از هیچ گونه برازش گوسی استفاده نمی‌شود. اشکال برازش گوسی این است که ممکن است پهنا در نیمه بیشینه پمپ‌های گوسی بدست آمده از مقدار آن در لیزرهای نیمه هادی معمولی کمتر باشد [۱۰]. همچنین در این روش می‌توان قیده‌های مختلفی روی توان پمپ‌ها، مجموع توان پمپ‌ها و بهره متوسط تقویت کننده اعمال کرد.

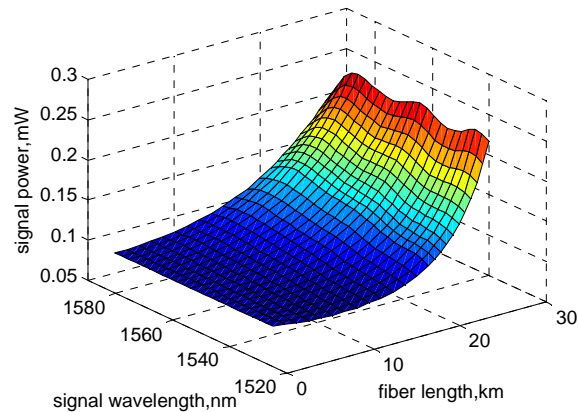
#### ۴- نتیجه گیری

وردش روشی دقیق و کارآمد در بهینه سازی تقویت کننده‌های رامان با هرگونه قید است. در این مقاله نشان داده شد که از این روش می‌توان برای پیدا کردن شکل و مشخصه‌ی پمپ‌های گوسی لازم برای کمینه کردن اعوجاج بهره استفاده کرد. نه تنها برای پیدا کردن شکل پمپ‌های گوسی بلکه برای پیدا کردن پمپ‌هایی با هرگونه شکل دلخواه می‌توان از این روش استفاده نمود. در این روش هیچ گونه محدودیتی برای اعمال هر گونه قید دلخواه بر روی مجموع توان پمپ‌ها و متوسط بهره تقویت کننده وجود ندارد.

#### مراجع

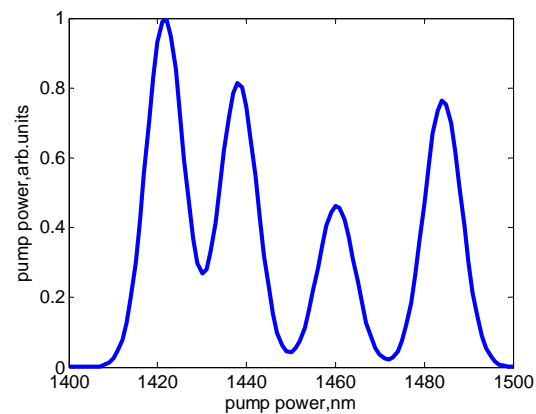
- [1] Dianov E. *J. Light Wave Tech.*, 20, 1457, 2003.  
 [2] Namiki S., Emory Y. *Sel. Top. Quantum Electron.*, 7, 3, 2001.  
 [3] Perlin V., Whnful H. *J. light wave Tech.*, 20, 250, 2002.  
 [4] Elingham T., Glesson L., Doran N. *Tech. Dig. ECOC 2002*, 4.1.3, 2002.  
 [5] Mollenauer L. F., Grant A. R., Mamyshev P. V. *Opt. Lett.*, 27, 592, 2002.  
 [6] Grant A.R. *IEEE J. Quantum Electron.*, 38, 1503, 2002.  
 [7] Kobtseve S., pustovskikh A. *CLEO/Europe 2003, Europhysics Conference Abstracts*, 27E, CL6-FRI, 2003.  
 [8] Kobtseve S., pustovskikh A., *J. Quantum Electronics* 34(6), pp. 575-578, 2004.  
 [9] M. Kobstev, A. A. Pustovskikh. *Laser Physics*, 14, 12, 1488-1491, 2004.  
 [۱۰]- عباس قاسم‌پور اردکانی، علیرضا بهرام‌پور، امیر فیض‌پور، بهینه سازی تقویت کننده‌های فیبر نوری رامان پمپ پیوسته با استفاده از روش وردشی، کنفرانس سالانه فیزیک ۸۶.  
 [11] X. Lu, *Chinese Phys. Lett.*, 21, 9, Sep. 2004, pp. 1756-1758.  
 [12] Agrawal G., *Nonlinear fiber optics*, Elsevier, 2001, ch.8.  
 [13] Bahrapour A.R., Ghasempour A., Rahimi L., "Optimization of fiber Raman amplifier based on variation method," accepted to publish in *J. Optics Communications*.

در شکل ۴ منحنی تغییر توان سیگنال‌ها در طول فیبر نشان داده شده است. در این شکل تقویت سیگنال‌ها و در جهت عکس بودن پمپ‌ها به وضوح قابل مشاهده است.



شکل ۴: تغییر توان سیگنال‌ها بر حسب طول فیبر

در شکل ۵ طیف توان ورودی پمپ بهینه شده نشان داده شده است. طول موج مرکزی پمپ‌های گوسی برابر با ۱۴۲۱/۶، ۱۴۳۸/۲، ۱۴۶۰/۲ و ۱۴۸۴/۳ نانومتر است.



شکل ۵: طیف توان پمپ ورودی

در شکل ۵ توان کل پمپ ورودی برابر  $656 \text{ mW}$  است. روش وردشی در کارهای قبلی برای بهینه سازی تقویت کننده‌های رامان پمپ شده به وسیله پمپ‌های تکفام [۱۳] و پمپ‌های پیوسته با برازش گوسی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰]. همان گونه که در این مقاله نشان داده شد برای بهینه سازی تقویت کننده‌های رامان پمپ شده به وسیله پمپ‌های گوسی نیز می‌توان از این روش استفاده کرد ولی