

# بهینه‌سازی تقویت‌کننده‌های تار نوری آلاییده به یون اربیم در غلظت‌های بالا

فاطمه کاظمی زاده<sup>۱</sup>، فاطمه شهشهانی<sup>۲</sup>

**چکیده:** در این مقاله وابستگی بهره تقویت‌کننده‌های تار نوری آلاییده به یون اربیم (EDFA) به پارامترهای تار نوری از جمله طول و شعاع مغزی تار و همچنین غلظت و شکل توزیع شعاعی یون اربیم در محدوده غلظت‌های بالا به صورت نظری بررسی و بهینه‌سازی صورت گرفته است. ابتدا مقدار بهینه شعاع مغزی تار نوری، در توزیع پله ای یون ها در امتداد شعاع تار، از حل عددی معادلات نرخ جمعیت یون ها و معادلات موج سیگنال و دمش در شرایط سیگنال کوچک استخراج و بر اساس آن رابطه‌ای بین طول بهینه تار و غلظت بهینه یون اربیم ارائه شده است که به کمک آن می‌توان تقویت کننده EDFA با طول موردنظر و بیشینه بهره را طراحی نمود. سپس بهینه‌سازی روی تابع توزیع یون ها در مغزی تار نوری انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در توزیع گوسی غلظت یون اربیم در مغزی تار، علاوه بر افزایش بهره طول بهینه تقویت‌کننده نیز ثابت می‌ماند. همچنین مشاهده شده است که مدل مذکور در شرایط غلظت‌های بالا می‌تواند کاهش افت بهره در اثر تبدیل رو به بالا را جبران نماید و به این ترتیب قابلیت بکارگیری در مدارهای مجتمع نوری را فراهم می‌سازد. شبیه‌سازی به کمک حل عددی همزمان معادلات نرخ در حالت پایا و با در نظر گرفتن جمله اثر تبدیل رو به بالا انجام شده است.

**واژه های کلیدی:** اربیم، بهینه‌سازی، تبدیل رو به بالا، تقویت‌کننده تار نوری، غلظت های بالا.

## ۱. مقدمه

تقویت‌کننده‌های تار نوری آلاییده به اربیم (EDFA)<sup>۱</sup> به دلیل گسیل در ناحیه طول‌موج مخابراتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. از این رو مطالعات وسیعی بر روی افزایش بازده و بهینه‌سازی آنها انجام شده است. در این میان، غلظت یون اربیم تزریق شده به تار، یکی از پارامترهای مهم و مؤثر در عملکرد EDFA است. در سامانه های نوری غیرمجموعه که از EDFA استفاده می‌شود و طول تار به چند متر نیز می‌رسد، غلظت یون اربیم، تا کمتر از  $2 \times 10^{25}$  یون بر متر مکعب، بازده لازم را برای عملکرد تقویت‌کننده

تامین می‌کند. اما در قطعات مجتمع نوری، غلظت مواد آلاییده چندین برابر شده و از  $20 \times 10^{25}$  یون بر مترمکعب نیز تجاوز می‌کند [۱]. رفتار تقویت‌کننده‌های تار نوری در غلظت‌های بالا بسیار متفاوت از رفتار آنها در غلظت‌های پایین می‌باشد. در غلظت‌های بالا اندرکنش یون‌ها با یکدیگر، سبب ایجاد پدیده‌های مختلفی می‌گردد که اثرات نامطلوبی بر بهره تقویت‌کننده خواهد داشت. مهمترین این پدیده‌ها واهلش متقاطع<sup>۳</sup>، فروکش چگالی<sup>۴</sup> و تبدیل رو به بالا<sup>۵</sup> است. پدیده اخیر یعنی اثر تبدیل رو به بالا مهمترین عامل کاهش بهره در EDFA در طول موج مخابراتی ۱۵۳۰ نانومتر یا همان طول موج گسیل یون اربیم

(۱) دانش آموخته کارشناسی ارشد، باشگاه پژوهشگران جوان، دانشگاه

آزاد اسلامی واحد تهران شمال. [kazemyzadeh@yahoo.com](mailto:kazemyzadeh@yahoo.com)

(۲) استادیار، دانشکده علوم، دانشگاه الزهرا (س).

[f\\_shahshahani@alzahra.ac.ir](mailto:f_shahshahani@alzahra.ac.ir)

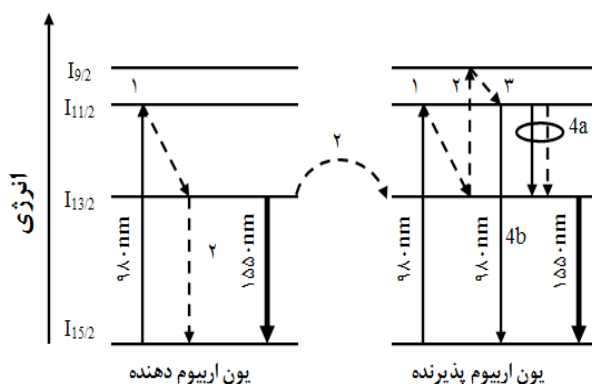
<sup>۳</sup> - Erbium doped fiber amplifier - Cross relaxation

<sup>۴</sup> - Concentration quenching

<sup>۵</sup> - Cooperative upconversion

## ۲. تئوری و مدل فیزیکی

در شکل (۱) ترازهای انرژی مربوط به دو یون دهنده و پذیرنده در یک تار نوری آلاینده به یون اربوم با غلظت بالا نشان داده شده است. در پدیده تبدیل رو به بالای همگن فرض می‌شود تمام یون‌ها با فواصل یکسان از یکدیگر قرار گرفته‌اند ولی به دلیل غلظت بالا فاصله یونی کاهش یافته بطوریکه دو یون با یکدیگر اندرکنش می‌کنند.



شکل ۱. ترازهای انرژی مربوط به دو یون دهنده و پذیرنده در یک تار نوری آلاینده به یون اربوم با غلظت بالا. خط‌چین‌ها گذارهای غیرتابشی را نمایش می‌دهند و خطوط پر نشان‌دهنده گذارهای تابشینه است.

مطابق شکل (۱)، یونی که در تراز برانگیخته  $I_{13/2}$  قرار دارد با انتقال انرژی خود به یون کناری با گذار غیرتابشی به تراز پایه فروافت می‌کند و یون پذیرنده به تراز  $I_{9/2}$  خواهد رفت ولی به دلیل ناپایداری این تراز سریعاً به تراز  $I_{11/2}$  باز می‌گردد. بازگشت این اتم به ترازهای پایین‌تر با دو احتمال گذار تابشی به تراز پایه ( $I_{13/2}$ ) و گسیل فوتونی با طول‌موج ۹۸۰ نانومتر و دوم فروافت سریع به تراز  $I_{13/2}$  همراه است اما از هر ده‌هزار اتم تنها یکی به تراز پایه خواهد رفت [۵].

با در نظر گرفتن دیاگرام شکل (۱) و با صرف نظر از جمعیت تراز سوم به دلیل نرخ گسیل بالا، معادله نرخ ترازهای بالا و پایین تقویت‌کننده بصورت زیر نوشته می‌شود [۶-۵]:

است [۲]. دو سازوکار متمایز برای توضیح پدیده تبدیل رو به بالا وجود دارد: (۱) اثر جفت یون‌ها که فقط بر یون‌هایی که به صورت دوتایی، چندتایی و خوشه‌ای قرار می‌گیرند اعمال می‌شود<sup>۱</sup> (PIQ) یا همان اثر تبدیل رو به بالای ناهمگن<sup>۲</sup>. (۲) پدیده تبدیل رو به بالای همگن<sup>۳</sup> (HUC) که بر تمام یون‌ها با توزیع یکنواخت تأثیرگذار است [۳].

کاهش بازده در اثر پدیده PIQ در دمش‌های قوی، بسیار شدید است، اما در دمش‌های کمتر از ۱۰۰ میلی‌وات می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. از طرفی چون این پدیده ناشی از تشکیل خوشه‌های یونی است، با بکارگیری روش‌های ساخت دقیق و مناسب، می‌توان از ایجاد این خوشه‌ها در غلظت‌های بالا جلوگیری کرد. استفاده از مواد کمکی آلاینده مناسب مانند آلومینیوم و فسفر نیز در این امر کمک می‌کنند [۴]. اثرات مخرب پدیده رو به بالای همگن در هر صورت، در غلظت‌های بالا وجود دارند که تنها با طراحی دقیق موجب می‌توان تاحدی این اثرات منفی را جبران نمود [۳]. لذا در این مقاله تاثیر تبدیل رو به بالای همگن بر روی عملکرد تقویت‌کننده تار نوری آلاینده به یون اربوم در غلظت‌های مختلف بصورت تئوری مورد بررسی قرار گرفته است. اثر تبدیل رو به بالا با اضافه کردن جمله اصلاحی به معادلات نرخ اعمال شده و بر اساس آن، پارامترهای یک تقویت‌کننده تار نوری در غلظت‌های بالا بهینه‌سازی شده است.

در بخش ۲ مقاله، تئوری و مدل فیزیکی و معادلات حاکم بر تقویت‌کننده تار نوری آلاینده به یون اربوم و همچنین اثر تبدیل رو به بالای همگن توضیح داده شده است. بخش ۳ به بررسی نتایج و محاسبات عددی با در نظر گرفتن اثر تبدیل رو به بالا و ارائه مدلی به منظور بهینه‌سازی تقویت‌کننده اختصاص دارد. در بخش پایانی نیز نتیجه‌گیری کوتاهی ارائه شده است.

<sup>۱</sup> - Pair Induced Quenching

<sup>۲</sup> - Inhomogeneous UpConversion

<sup>۳</sup> - Homogenous UpConversion

$$\begin{cases} I_p(r, \phi, z) = P_p(0)\rho_n(r, \phi)P(z) \\ I_s(r, \phi, z) = P_s(0)s_0(r, \phi)S(z) \end{cases} \quad (۶)$$

که در آن  $P_p(0)$  و  $P_s(0)$  به ترتیب توان دمش و سیگنال در ابتدای تار ( $z=0$ )،  $P(z)$  و  $S(z)$  تغییرات توان نرمالیزه دمش و سیگنال در طول تار،  $\rho_n(r, \phi)$  و  $s_0(r, \phi)$  چگالی انرژی مربوط به دمش و سیگنال می‌باشند. زیرنویس  $n$  نشان‌دهنده شماره مد عرضی است. توابع  $\rho_n(r, \phi)$  و  $s_0(r, \phi)$  از حل معادله موج الکترومغناطیس در یک موجبر استوانه‌ای بدست می‌آیند. چون مد اصلی بیشترین سهم را در بیشینه کردن بهره دارد [۲]، در معادلات فقط مد اصلی در نظر گرفته می‌شود. بهره تقویت کننده بر حسب توان سیگنال از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$g = 10 \log S(z) \quad (۷)$$

شدت موج دمش و سیگنال از حل معادلات دیفرانسیل زیر بدست می‌آیند [۲]:

$$\frac{dI_p(z)}{dz} = -(\sigma_p N_1 + \sigma'_p N_2)I_p \quad (۸)$$

$$\frac{dI_s(z)}{dz} = (\sigma_e N_1 - \sigma_a N_2)I_s \quad (۹)$$

با حل معادله (۸)، در شرایط پایدار ( $\frac{d}{dt} = 0$ ) و سیگنال کوچک، مقادیر  $N_1$  و  $N_2$  بر حسب شدت موج دمش و سیگنال به دست می‌آیند. با جاگذاری این مقادیر در معادلات (۸) و (۹) به دو معادله دیفرانسیل کوپل شده دست می‌یابیم که در حالت کلی حل دقیق تحلیلی برای آنها وجود ندارد و باید به کمک روش‌های عددی محاسبه شوند. به منظور اعمال تغییرات در امتداد  $Z$  طول تار را به ۱۰۰ قسمت مساوی تقسیم و کمیت‌های وابسته به  $Z$  در هر قطعه ثابت فرض می‌شود. تغییر ضریب شکست در اثر تغییر غلظت ناچیز است و می‌توان ضریب شکست مغزی و غلاف و گشودگی عددی را ثابت فرض کرد [۸]. مقادیر کمیت‌هایی ثابت بکار رفته در محاسبات در جدول (۱) درج گردیده است.

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= -\frac{dN_2}{dt} \\ &= \frac{1}{\tau} N_2 - R_{13} N_1 + w_e N_2 - w_a N_1 + CN_2^2 \end{aligned} \quad (۱)$$

در این معادله  $N_1$  و  $N_2$  به ترتیب غلظت جمعیت ترازهای بالا و پایین،  $\tau$  طول عمر تراز برانگیخته تقویت‌کننده،  $w_a$  و  $w_e$  به ترتیب نرخ گذار جذب و گسیل تراز پایین و بالای تقویت‌کننده و  $R_{13}$  نرخ جذب القایی توان موج دمش است. از جمعیت تراز دمش به دلیل نرخ فروافت غیرتابشی بالا صرف‌نظر شده است. جمله آخر در سمت راست معادله (۱) اثر تبدیل روبه-بالای همگن (HUC) را نشان می‌دهد.

اندازه ضریب  $C$  که به ضریب HUC موسوم به غلظت یون‌های آلاییده بستگی دارد. با استفاده از تطابق محاسبات عددی با آزمایشات تجربی دو مقدار برای این ضریب گزارش شده است [۹]، که با فرض خطی بودن تغییر این ضریب با غلظت می‌توان معادله‌ای به شکل زیر برای آن بدست آورد [۱۰]:

$$\begin{aligned} C_{up} &= 3.5 \times 10^{-24} \\ &+ 2.41 \times 10^{-49} \times (N_0 - 4.4 \times 10^{25}) \end{aligned} \quad (۲)$$

$N_0$  غلظت یون آلاییده و برابر با مجموع چگالی یون‌ها در تراز پایه و تراز برانگیخته می‌باشد:

$$N_0 = N_1 + N_2 \quad (۳)$$

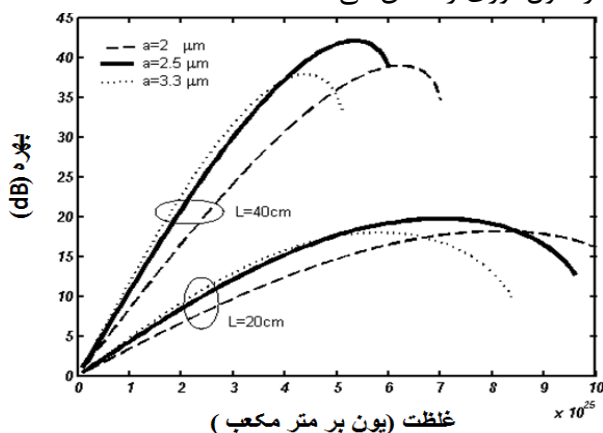
و  $w_e, w_a$  و  $R_{13}$  از روابط زیر بدست می‌آیند [۲]:

$$w_{a(e)} = \frac{\sigma_{a(e)} I_s(r, \phi, z)}{h \nu_s} \quad (۴)$$

$$R_{13} = \frac{\sigma_p I_p(r, \phi, z)}{h \nu_p} \quad (۵)$$

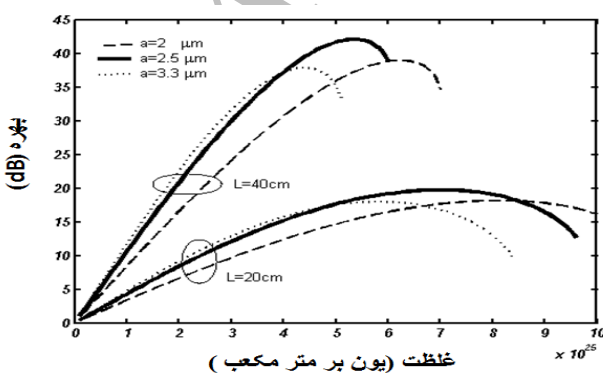
در روابط ۴ و ۵،  $\sigma_a$ ،  $\sigma_p$  و  $\sigma_e$  به ترتیب سطح مقطع مؤثر جذب حالت پایه موج سیگنال، موج دمش و سطح مقطع مؤثر گسیل،  $\nu_p$  فرکانس موج دمش،  $\nu_s$  فرکانس موج سیگنال و  $h$  ثابت پلانک است.  $I_s(r, \phi, z)$  و  $I_p(r, \phi, z)$  به ترتیب نشان‌دهنده شدت موج سیگنال و موج دمش می‌باشند که در حالت کلی به مختصات  $r$  و  $\phi$  و  $z$  بستگی دارند و با جداسازی متغیرها به صورت زیر نوشته می‌شوند [۲]:

در شکل (۳) تغییرات بهره بر حسب غلظت و با در نظر گرفتن اثر HUC برای شعاع‌های مختلف مغزی تار نوری رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که به ازای هر شعاع، مقدار بهینه‌ای برای غلظت مواد آلاینده وجود دارد. بعلاوه بهره به ازای مقدار خاصی از شعاع بیشینه می‌شود که با توجه به شکل (۳) این مقدار بهینه برابر ۲/۵ میکرومتر بدست می‌آید (منحنی خط پر). در این شکل تغییرات بهره به ازای دو طول مختلف رسم شده و مستقل بودن مقدار بهینه شعاع مغزی از تار طول نوری را نشان می‌دهد.



شکل ۳. وابستگی بهره به غلظت به ازای شعاع‌های مختلف مغزی تار نوری، با در نظر گرفتن اثر تبدیل رو به بالای همگن و برای دو طول مختلف.

در گام بعد به منظور بهینه سازی طول تار نوری، با انتخاب تاری با شعاع مغزی ۲/۵ میکرومتر، تغییرات بهره بر حسب غلظت را برای طول‌های مختلف تار نوری محاسبه می‌کنیم.



شکل ۴. وابستگی بهره به غلظت به ازای طول‌های مختلف تار نوری در غلظت‌های بالا و با در نظر گرفتن اثر تبدیل رو به بالای همگن.

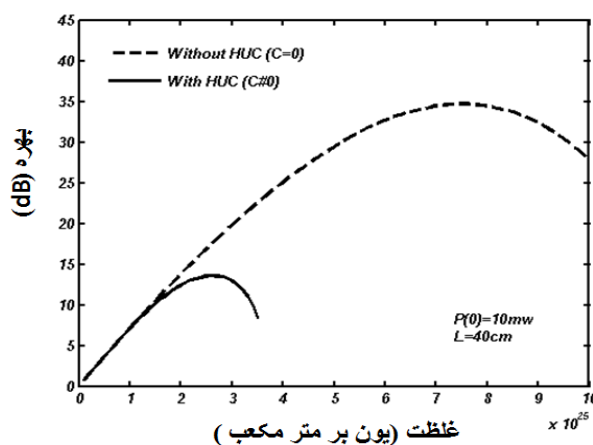
جدول ۱. مقادیر کمیت‌های ثابت بکار رفته در محاسبات [۲].

مقدار کمیت	نام کمیت و علامت
۹۸۰ (nm)	طول موج دمش، $\lambda_p$
۱۵۳۰ (nm)	طول موج سیگنال، $\lambda_s$
$(m^2)^{-25}$	سطح مقطع گسیل، $\sigma_e$
$(m^2)^{-25}$	سطح مقطع جذب سیگنال، $\sigma_a$
$7/5 \times 10^{-25} (m^2)$	سطح مقطع جذب دمش، $\sigma_p$
۱۰ (ms)	طول عمر تراز بالای
۰/۲۰	گشودگی عددی تار
۲/۵ ( $\mu m$ )	شعاع مغزی تار

### ۳. بررسی نتایج و محاسبات عددی

#### ۳-۱. بهینه‌سازی شعاع مغزی و طول تار

شکل (۲) وابستگی بهره تقویت کننده تار نوری به غلظت یون اربوم در شرایطی که ضریب تبدیل رو به بالا (C) در معادله (۱) صفر و غیر صفر در نظر گرفته شده است را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در غلظت‌های پایین می‌توان از اثر HUC صرف نظر نمود. اما در غلظت‌های بالا اهمیت وارد کردن جمله اصلاحی اثر HUC به خوبی آشکار است. از این شکل همچنین می‌توان حد بحرانی غلظت، (تقریباً کمتر از  $1 \times 10^{25}$  یون بر متر مکعب را تخمین زد که به ازای بالاتر از آن، اثر تبدیل رو به بالا اهمیت پیدا می‌کند.

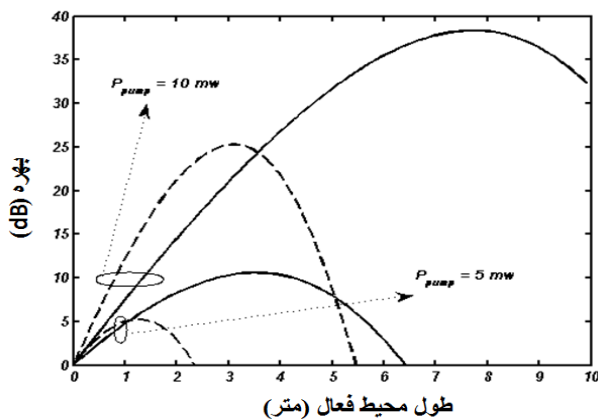


شکل ۲. وابستگی بهره EDFA به غلظت یون اربوم با و بدون در نظر گرفتن پدیده تبدیل رو به بالا.

و برای توزیع گوسی وابسته به شعاع مغزی است و با رابطه زیر داده می‌شود:

$$N_0(r) = 1 \times 10^{25} \exp\left(-\frac{r^2}{r_p^2}\right) \quad (11)$$

در این رابطه  $r_p$  پهنای مربوط به موج دمشی است. همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود با افزایش یون در قسمت مرکزی مغزی و کاهش آن در اطراف مغزی، از افت سیگنال در طول تار کاسته شده و بدین ترتیب طول بهینه افزایش یافته و بهره بیشتری حاصل می‌شود. نتایج این شبیه‌سازی با نتایج گزارشات [۱۴-۱۱] مطابقت دارد. نتیجه قابل توجه دیگر آن است که با استفاده از توزیع گوسی یونها در توان پمپاژ ۵ میلی‌وات تا ۲ برابر افزایش یافته و طول بهینه تار، که در آن بهره بیشینه اتفاق می‌افتد، از ۱ متر به ۳/۵ متر رسیده است. در توان پمپاژ ۱۰ میلی‌وات نیز نتایج مشابهی مشاهده می‌شود. در این شرایط، بهره تا ۱/۵ برابر نمایه پله‌ای و طول بهینه تار از ۳ متر به ۷/۸ متر افزایش یافته است.



شکل ۵. تغییرات بهره در طول تقویت‌کننده در غلظت‌های پایین. منحنی‌های مربوط به نمایه گوسی و منحنی‌های خط‌چین مربوط به نمایه پله‌ای است. پمپاژ در دو توان ۵ و ۱۰ میلی‌وات انجام شده است.

در شکل (۶) تغییرات بهره در طول تقویت‌کننده در غلظت بالا برای دو نمایه پله‌ای و گوسی توزیع یونها در مغزی تار نمایش داده شده است. همانطور که انتظار می‌رود، در غلظت‌های بالا، مقدار بهینه طول تقویت‌کننده در طول‌های کوتاه‌تری بدست می‌آید. در اینجا مقدار غلظت در نمایه

نتایج محاسبه در شکل (۴) نشان می‌دهد که برای هر مقدار از غلظت طول بهینه‌ای وجود دارد که به ازای آن بهره بیشینه است و رابطه خطی زیر بین غلظت یونها و طول تار نوری در شرایط فوق، برای نقاط با بهره بیشینه، قابل استنتاج است:

$$L_{opt} = -1.9 \times 10^{-26} N_0 + 1.5 \quad (10)$$

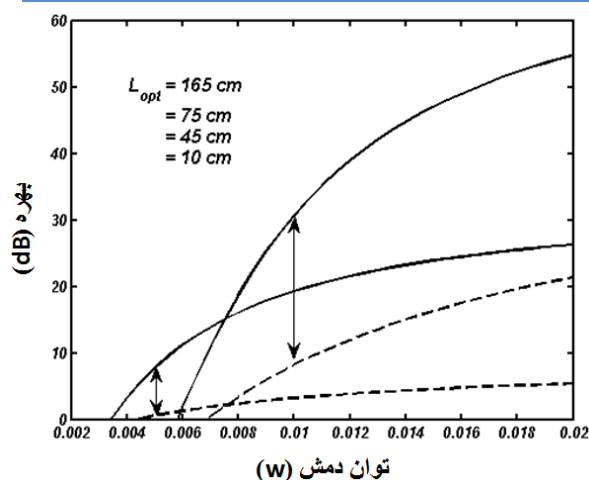
از این رابطه می‌توان در طراحی غلظت و طول تار به منظور دستیابی به بهره بیشینه استفاده کرد. بطور مثال غلظت بهینه برای یک تقویت‌کننده تار نوری به طول ۳۵ سانتی‌متر از رابطه (۱۰) در حدود  $6 \times 10^{25}$  یون بر متر مکعب بدست می‌آید. قابل ذکر است که شیب و عرض از مبدأ رابطه خطی مذکور به مشخصات ساختاری تار نوری بستگی دارد. نتیجه می‌شود که در طراحی تقویت‌کننده با بهره بیشینه و در غلظت‌های بالاتر از حد بحرانی، لازم است مقادیر بهینه طول و شعاع مغزی تار و غلظت، به عنوان پارامترهای مستقلی مورد توجه قرار گیرند.

### ۳-۲. بهینه‌سازی نمایه توزیع یونها در

#### مغزی تار

تغییرات بهره با دو نمایه مختلف پله‌ای و گوسی در حد غلظت‌های پایین به ازای دو توان پمپ مختلف در شکل (۵) نشان داده شده است. پهنای نمایه گوسی در این محاسبات با پهنای موج پمپاژ در طول تار یکسان انتخاب شده است تا بهترین هم‌پوشانی را با موج دمشی داشته باشد. می‌توان این پهنای را با استفاده از روش‌های عددی به ازای توان‌های مختلف پمپاژ بهینه‌سازی کرد [۱۱]. در اینجا بیشینه غلظت در محور تار برابر با غلظت بحرانی، و  $1 \times 10^{25}$  یون بر متر مکعب در نظر گرفته شده است که اثرات واکنش یونها در آن قابل چشم‌پوشی است [۱۲]. در این مدل ارتفاع پله با بیشینه نمایه گوسی برابر بوده و شکل نمایه توزیع یونها در مغزی تار برای توزیع پله‌ای به صورت جمله ثابت:

$$N_0 = 1 \times 10^{25} \quad (10)$$



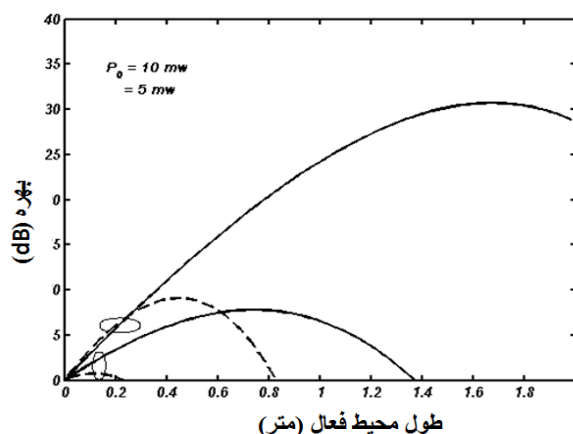
شکل ۷. تغییرات بهره بر حسب توان دمش به ازای طول‌های بهینه. منحنی‌های پر مربوط است به نمایه گوسی توزیع یونها و منحنی خط چین معرف نمایه پله‌ای است.

همانطور که مشاهده می‌شود میزان بهره در تقویت-کننده با نمایه گوسی، به ازای همه مقادیر توان پمپاژ و در شرایط یکسان غلظت، نسبت به نمایه توزیع پله‌ای بیشتر است. در توانهای بالا افزایش بهره بسیار قابل توجه است. نتایج ارائه شده در شکل‌های (۷-۵) برتری استفاده از توزیع گوسی را به جای نمایه پله‌ای بیان می‌کند.

### ۳-۳. بهبود مدل نمایه گوسی

همانطور که مشاهده شد تحدید یون‌ها در نواحی مرکزی مغزی باعث ارتقاء در میزان بهره می‌شود اما سبب افزایش قابل توجهی در اندازه طول بهینه می‌شود. این افزایش طول، مخصوصاً در مدارهای مجتمع نوری که کوچک بودن قطعه اهمیت بالایی دارد مطلوب نیست. ولی همچنان که در بخش‌های قبل بررسی شد، افزایش طول بهینه برای هر دو غلظت‌های بالا و پایین وجود دارد. در این قسمت به منظور کاهش طول بهینه، و بهینه‌سازی نمایه، میزان غلظت بیشینه نمایه گوسی را از مقدار بحرانی تا  $3 \times 10^{25}$  یون بر متر مکعب افزایش می‌دهیم.

پله‌ای و همچنین در بیشینه نمایه گوسی  $4 \times 10^{25}$  یون بر متر مکعب انتخاب شده است که بالاتر از غلظت بحرانی بوده و اثر تبدیل رو به بالا و تاثیر ضریب C، موجب افت بهره می‌شود.



شکل ۸. تغییرات بهره در طول تقویت‌کننده در غلظت‌های بالا. منحنی پر مربوط به نمایه گوسی است و منحنی خط چین معرف نمایه پله‌ای می‌باشد. توان موج پمپاژ برای دو منحنی پایین ۵ و برای دو منحنی بالا ۱۰ میلی‌وات می‌باشد.

همانطور که مشاهده می‌شود در این محدوده نیز انتخاب نمایه گوسی موجب ارتقاء بهره و افزایش آن تا ۴ برابر مقدار مربوط به نمایه پله‌ای می‌شود. در این حالت افزایش نسبی بیشتری برای بهره نسبت به شرایط قبل که غلظت زیر مقدار بحرانی در نظر گرفته شده بود بدست می‌آید. علت بهبود عملکرد تقویت‌کننده با نمایه گوسی در غلظت‌های بالا نسبت به نمایه پله‌ای، کاهش غلظت در کناره‌های مغزی و در نتیجه کاهش اثرات مخرب پدیده تبدیل رو به بالاست که در نتیجه افزایش بهره را به دنبال دارد. در این شرایط نیز مانند حالت غلظت‌های پایین، اندازه طول بهینه با افزایش توان پمپاژ افزایش می‌یابد. طول بهینه در این غلظت برای توان پمپ ۵ میلی‌وات از ۱۰ سانتی‌متر به ۷۵ سانتی‌متر و برای توان پمپ ۱۰ میلی‌وات از ۴۵ سانتی‌متر به ۱۶۵ سانتی‌متر تغییر یافته است.

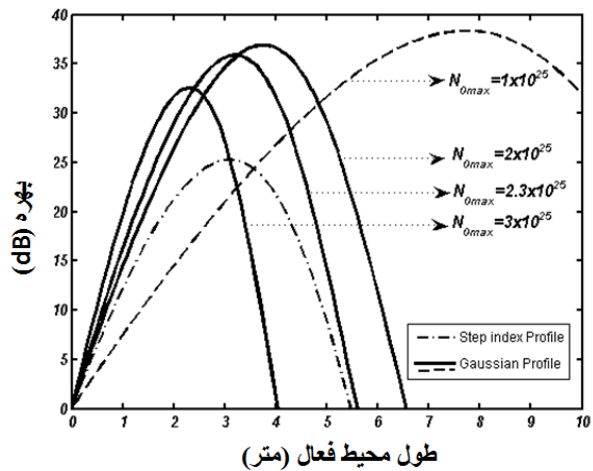
در شکل (۷) تغییرات بهره بر حسب توان پمپاژ به ازای طول‌های بهینه‌ای که از شکل‌های (۱) و (۲) استخراج شده‌اند نشان داده شده است.

#### ۴- نتیجه گیری

بهره تقویت کننده تار نوری آلاییده به یون اربیم در غلظت بالا و با در نظر گرفتن اثر تبدیل رو به بالا مورد بررسی و آنالیز قرار گرفت و مشاهده شد که مقدار بهینه‌ای برای شعاع وجود دارد که بیشینه بهره به ازای آن حاصل می‌شود. با بررسی نمودارها، این نتیجه حاصل شد که مقدار بهینه شعاع تار، در عین حال که به پارامترهای مختلفی مانند نوع و غلظت مواد آلاییده بستگی دارد از طول تار نوری مستقل است. همچنین نشان داده شد که یک رابطه خطی بین طول و غلظت بهینه برقرار است. از طرف دیگر نتایج حاصل از محاسبات عددی نشان داد که انتخاب نمایه گوسی نسبت به نمایه پله‌ای به دلیل افزایش بهره برتری دارد. اما مشاهده شد که با انتخاب توزیع گوسی، طول بهینه تار نوری نیز افزایش می‌یابد. افزایش طول محیط فعال مطلوب نمی‌باشد زیرا موجب محدود شدن کاربرد وسیله در مدارهای مجتمع می‌شود. این عیب با انتخاب مناسب غلظت بیشینه در نمایه گوسی توزیع یون‌ها، برطرف گردید و با بهینه‌سازی نمایه توزیع یون‌ها، تقویت‌کننده تار نوری با بهره بالاتر و طول کوتاه‌تر در محدوده غلظت بالا طرحی شد.

#### مراجع

- [1] Myslinski Piotr, Nguyen Dung, Chrostowski Jacek, "Effects of concentration on the performance of erbium-doped fibre amplifiers", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol.15, No.1, 1997, pp.112-120.
- [2] Dignonnet Michci, Rare earth doped fibre lasers and amplifiers, 1993.
- [3] Myslinski Piotr, Szubert Czeslaw, J. Bruce Allan, J. DiGiovanni David, Palsdottir Bera, "Performance of High-Concentration Erbium-Doped Fiber Amplifier"s, IEEE Photonics Technology Letters, Vol.11, No.8, 1999, pp.973-975.



شکل ۸. تغییرات بهره در طول تقویت‌کننده. منحنی‌های پر معرف نمایه گوسی با بیشینه  $2 \times 10^{25}$ ،  $2.3 \times 10^{25}$  و  $3 \times 10^{25}$  یون بر متر مکعب را نمایش می‌دهند. دو منحنی رسم شده در شکل ۱ با توان پمپاژ ۱۰ میلی‌وات برای مقایسه با منحنی‌های خط چین رسم شده‌اند.

شکل (۸) تغییرات بهره به ازای سه مقدار مختلف غلظت در بیشینه نمایه توزیع یونها را نمایش می‌دهد. توان موج پمپاژ در این حالت ۱۰ میلی‌وات در نظر گرفته شده است. از این شکل نتیجه می‌شود که با افزایش  $N_0$  از مقدار بحرانی، بهره ماکزیمم و همچنین طول بهینه تا حدودی کاهش می‌یابند. به منظور مقایسه و مشاهده بهبود طول بهینه، در این شکل تغییرات بهره بر حسب طول تار تقویت‌کننده برای نمایه پله‌ای و گوسی در غلظت بحرانی و با توان پمپاژ ۱۰ میلی‌وات بترتیب با نمودارهای خط نقطه و خط چین رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، طول بهینه برای نمایه گوسی و با بیشینه غلظت  $2.3 \times 10^{25}$  یون بر متر مکعب، با طول بهینه نمایه پله‌ای یکسان بدست می‌آید. بنابراین علاوه بر افزایش بهره، طول بهینه نیز ثابت باقی می‌ماند. با وجود افزایش غلظت در این نمایه، از حد غلظت بحرانی، و اهمیت پدیده‌های مخرب واکنش یون‌ها، بهره حاصل نسبت به نمایه گوسی با بیشینه  $1 \times 10^{25}$  کاهش قابل ملاحظه‌ای نداشته و سودمندی نمایه گوسی بر کاهش بهره در اثر پدیده تبدیل رو به بالا غلبه دارد.

- [9] Pasquale Fabrizio, Federighi Marco, "Modelling of Uniform and Pair-Induced Upconversion Mechanisms in High-Concentration Erbium-Doped Silica Waveguides", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 13, No. 9, 1995, pp. 1858-1864.
- [10] Kar'asek Mirek, "Optimum Design of  $Er^{+3}$  - $Yb^{+3}$  Codoped Fibers for Large-Signal High-Pump-Power Applications", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 33, No. 10, 1997, pp. 1699-1705.
- [11] Hassani Alireza, Arzi Ezatollah, Seraji Faramarz, "Intensity based erbium distribution for erbium doped fibre amplifiers", Opt.Quant Electron, Vol.39, No. 1, 2007, pp. 35-50.
- [12] Desurvire Emmanul, Zyskind John, Giles Rondy, "Design optimization for efficient erbium-doped fibre amplifiers", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 8, No. 11, 1990, pp. 1730-1741.
- [13] Ohashi Masaharu, "Design consideration for an  $Er^{+3}$  doped fibre amplifier", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 9, No. 9, 1991, pp. 1099-1104.
- [14] Armitge Jonatha, "Three-level fibre amplifier; a theoretical model", Applied Optics, Vol. 27, No. 23, 1988, pp. 4831-4836.
- [4] Pasquale Fabrizio, Federighi Marco, "Modelling of Uniform and Pair-Induced Upconversion Mechanisms in High-Concentration Erbium-Doped Silica Waveguides", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol.13, No.9, 1995, pp. 1858-1864.
- [5] Blixt P., Nilsson J., Carlnas T., Jaskorzynska B., "Concentration-Dependent Upconversion in  $Er^{+3}$ -Doped Fiber Amplifiers: Experiments and Modeling", IEEE Transactions Photonics Technology Letters, Vol.3, No.11, 1991, pp. 43-45.
- [6] Kheptyarl D., Sergeyerl S., "Homogenous Upconversion in Er-doped Fibers Under Steady State Excitation: analytical model and its mont carlo verification", JOSA B, vol.22, 2005, pp. 582-590.
- [7] Pasquale Fabrizio, Zoboli Maurizio, Federighi Marco, Massarek Ilana, "Finite-Element Modeling of Silica Waveguide Amplifiers with High Erbium Concentration", IEEE Journal of Quantum Electronic, Vol. 30, No. 5, 1994, pp. 1277-1282.
- [8] Vermelho M. V. D., Peschel Ulf, Aitchison J. Stewart, "Simple and Accurate Procedure for Modeling Erbium-Doped Waveguide Amplifiers with High Concentration", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 18, No. 3, 2000, pp. 401- 408.