

مدلی برای تعیین توزیع بهینه اربوم در مغزی فیبرهای نوری اربومی تقویت کننده به منظور بالا بردن بهره تقویت کنندگی آنها

عزت الله ارضی^۱، علیرضا حسنی^{۱و۲} و فرامرز اسماعیلی سراجی^۳

۱. گروه فیزیک دانشگاه تهران- تهران، خیابان کارگر شمالی

e-mail: arzi@khayam.ut.ac.ir

۲. مرکز تحقیقات مخابرات ایران- تهران، خیابان کارگر شمالی

e-mail: hassani@khayam.ut.ac.ir

۳. کارخانه فیبر نوری شهید قندی- تهران، پونک

(دریافت مقاله: ۸۱/۱/۲۸ ؛ دریافت نسخه نهایی: ۸۱/۸/۱۸)

چکیده

این مقاله روشی را برای تعیین توزیع بهینه اربوم جهت افزایش بهره تقویت فیبرهای اربومی تقویت کننده ارائه می کند. توزیعهای بهینه اربوم به دست آمده در این مدل بر اساس نوع ساختار موجبری فیبر و میزان توان پمپ است. این توزیعهای بهینه را برای فیبرهای رایج تک مدی و فیبرهای با پاشندگی انتقال یافته به دست آورده ایم. توزیعهای بهینه اربوم به دست آمده به صورت شبه گاوسی هستند و شبیه سازی بهره تقویت برای این دو نوع فیبر نشان می دهد که توزیعهای به دست آمده برای فیبرهای رایج تک مدی بهره تقویت را به طور قابل ملاحظه ای افزایش می دهد. نتایج به دست آمده برای تقویت فیبرهای با پاشندگی انتقال یافته با نتایج گزارش شده سایر طراحیها مطابقت کامل دارد. روش ارائه شده در عین حال که برای اولین بار پیشنهاد می شود، کاملاً کلی است و برای هر نوع فیبر تقویت کننده یا موجبر فعال می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

واژه های کلیدی: فیبرهای نوری تقویت کننده، فیبر های اربومی، مخابرات نوری، بهینه سازی، تقویت کننده های نوری، فیبر نوری

۱. مقدمه

مخابراتی می شود و علاوه بر این برای هر کانال اپتیکی باید یک تقویت کننده مجزا در نظر گرفت. برای رفع این محدودیت، ایده تقویت اپتیکی پالسهای مخابراتی مطرح شد که منجر به ساخت فیبرهای اربومی تقویت کننده شد. در این نوع فیبر فعال، یونهای اربوم در داخل شبکه شیشه ای مغزی فیبر نشانده شده اند و با توجه به اینکه گسیل القایی یونهای اربوم در محدوده ۱/۵۵ میکرومتر صورت می گیرد، از این نوع فیبر آلاینده به اربوم برای تقویت پالسهای اپتیکی در پنجره مخابراتی ۱/۵۵ میکرومتر استفاده می شود. فرآیند تقویت بدین گونه است که یک دیود لیزری به عنوان پمپ، یونهای اربوم داخل مغزی فیبر را برانگیخته می کند و با ورود همزمان پالسهای مخابراتی تضعیف شده به همین فیبر، گسیل القایی یونهای اربوم صورت می گیرد و در نتیجه پالسها تقویت

شبه های مخابرات نوری به طور معمول از دو پنجره مخابراتی برای ارسال پالسهای نوری استفاده می کنند. در این دو پنجره مخابراتی که در محدوده طول موجهای ۱/۳۳ و ۱/۵۵ میکرومتر قرار دارد، تضعیف شدت پالس به وسیله فیبر در پایینترین مقدار خود است، به طوری که کمترین اتلاف فیبر در قسمت ۱/۵۵ میکرومتر به حدود ۰/۲ دسی بل در کیلومتر می رسد. با این حال پالسهای اپتیکی منتشر شده در این پنجره ها پس از چند ده کیلومتر احتیاج به تقویت دارند. برای تقویت این پالسها می توان آنها را به وسیله آشکار ساز، تبدیل به پالسهای الکترونیکی کرد و بعد از تقویت، آنها را دوباره به صورت اپتیکی در فیبر منتشر کرد. تقویت الکترونیکی پالسهای اپتیکی به این روش، باعث کاهش سرعت انتقال اطلاعات در شبکه

۲. قسمت کاهنده بهره پمپ در فیبر اریومی با توزیع پله‌ای اریوم

در این بخش یکی از مهمترین عواملی که در کم شدن بازدهی پمپ در یک فیبر اریومی با توزیع پله‌ای اریوم تاثیر گذار است به‌طور نظری مورد بررسی قرار گرفته است. برای نیل به این هدف ابتدا انتشار توان اپتیکی پمپ و پالسهای مخابراتی در فیبر تک مد مورد بررسی قرار گرفته است. شدت پالس اپتیکی منتشر شونده در فیبر نوری با مختصات استوانه‌ای (r, z, θ) با رابطه زیر مشخص می‌شود.

$$I_k(r, z, \theta) = p(z) \bar{\Psi}_k(r, \theta), \quad (1)$$

که در آن $\bar{\Psi}_k(r, \theta)$ پوش توان مد نرمالیزه است که به‌وسیله رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{\Psi}_k(r, \theta) = \frac{\Psi_k(r, \theta)}{\pi \omega^2}. \quad (2)$$

اگر Ψ_k پوش توان اولین مد منتشر شونده (LP_{01}) در فیبر باشد، شعاع مد (ω) با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۸]:

$$\omega = a \frac{VK_1(w_k)}{UK_0(w_k)} J_0(u_k), \quad (3)$$

که در آن J_0 ، K_0 و K_1 به ترتیب توابع بسل مرتبه صفر، بسل تعمیم یافته مرتبه صفر و مرتبه اول هستند. a شعاع فیبر و V ، U و W به ترتیب فرکانس نرمالیزه، مقدار ویژه مغزی و غلاف هستند. در حالت هدایت ضعیف، پوش توان مد اول با رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$\Psi_k(r) = \begin{cases} J_0^r(u_k r/a) & r \leq a \\ \frac{J_0^r(u_k)}{K_0^r(w_k)} K_0^r(w_k r/a) & r > a \end{cases} \quad (4)$$

در این رابطه w_k ، u_k ثابت انتشار عرضی مد LP_{01} در طول موج λ_k می‌باشند. اگر سیستم لیزری به‌صورت دو تراز در نظر گرفته شود، تحولات شدت مد اپتیکی منتشر شونده در محیط لیزری در راستای انتشار با رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$\frac{dI_k}{dz} = \rho (\sigma_e^k N_2 - \sigma_a^k N_1) I_k \quad k = s, p \quad (5)$$

که در آن s و p نشان‌دهنده سیگنال و پمپ، N_1 و N_2 جمعیت نرمالیزه ترازهای اول (تراز پایه) و دوم (تراز برانگیخته) و σ_e^k ، σ_a^k سطح مقطع گسیل و جذب محیط فعال در طول موج λ_k هستند. شرط تقویت کنندگی یک پالس اپتیکی با

می‌شوند. یکی از مهمترین پارامترهای طراحی فیبرهای اریومی مطالعه بهره تقویت سیگنال است و طراحی این نوع تقویت کننده باید به گونه‌ای باشد که در کمترین توان پمپ، بالاترین بهره تقویت به‌دست آید. روشهایی که برای رسیدن به این مقصود گزارش شده‌اند عبارتند از: انتخاب طول موج مناسب برای پمپ کردن فیبر اریومی [۱] و [۲]، بهینه سازی ساختار موجبری [۳ و ۴] و محدود کردن توزیع اریوم در مرکز مغزی فیبر [۵ و ۶]. با این وجود، مدلی که بتواند توزیع اریوم را با توجه به ساختار موجبری فیبر با هدف بالابردن بهره تقویت به‌دست آورد تا به‌حال گزارش نشده است.

در این مقاله مدلی نو ارائه شده است که می‌تواند توزیع بهینه اریوم را برای یک فیبر تقویت کننده اریومی به‌دست آورد. این مدل با استفاده از ساختار موجبری فیبر مورد نظر، توزیعی از اریوم را برای مغزی فیبر پیشنهاد می‌کند که بهره تقویت و ضریب بهره تقویت فیبر اریومی بهینه می‌شود. به عبارت دیگر پمپ کردن یونهای اریوم با راندمان مناسب انجام می‌شود که این عمل پمپاژ مؤثر نامیده می‌شود. توزیع بهینه اریوم برای دو نوع فیبر اریومی با ساختار موجبری شناخته شده فیبرهای رایج تک مدی مخابراتی (SMF) و فیبرهای با پاشندگی انتقال یافته (DSF) در دو طول موج پمپاژ ۰/۹۸ و ۱/۴۸ میکرومتر به‌وسیله این مدل به‌دست آمده است. ابتدا در بخش ۲، عواملی که باعث کاهش بازدهی پمپ در فیبرهای تقویت کننده با توزیع پله‌ای اریوم می‌شوند مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش ۳ برای حذف این عوامل، روشی ارائه می‌شود که با توجه به ساختار موجبری فیبر و پوش اولین مد منتشر شونده در فیبر، توزیع بهینه اریوم را به‌دست می‌دهد. در بخش ۴ مقایسه بین بهره تقویت و ضریب بهره تقویت فیبر اریومی با توزیع پله‌ای اریوم و توزیع بهینه اریوم انجام شده است. این مقایسه بر اساس مدل نظری متداول ارائه شده برای فیبر اریومی تقویت کننده صورت گرفته است [۷].

۱. Conventional Single Mode Fiber

۲. Dispersion Shifted Fiber

۳. Mode envelope

۴. Weakly guiding

شکل ۱ به طور شماتیک یک فیبر تقویت کننده با طول بهینه مشخص، نمایش داده شده است که آخرین مقطع آن دارای دو قسمت تقویت کننده و تضعیف کننده است، که با حروف a و b مشخص شده اند. همانطور که از شکل ۱ پیداست، یک قسمت از مغزی فیبر به صورت تضعیف کننده عمل می کند و عملکرد این قسمت باعث کم شدن راندمان پمپ و کاهش بهره تقویت می شود.

۳. تعیین چگالی بهینه اربوم برای بالا بردن بهره پمپ

در بخش قبلی قسمت تضعیف کننده در فیبر نوری مورد بررسی قرار گرفت، در این بخش راه کاری برای افزایش بهره تقویت به کمک افزایش بازدهی پمپ ارائه شده است. برای این کار ابتدا یک فیبر نوری اربومی با ساختار موجبری مشخص در نظر می گیریم. برای افزایش بازدهی پمپ، باید اثر مناطق تضعیف کننده در مغزی این فیبر کاهش پیدا کند. اگر جذب کلی این قسمت متناسب با تعداد یونهای جذب کننده موجود در حجم قسمت تضعیف کننده در نظر گرفته شود، برای افزایش بازدهی پمپ باید چگالی یونهای اربوم در حجم قسمت تضعیف کننده کاهش داده شود. بنابراین برای افزایش بازدهی پمپ در فیبر اربومی به یک آرایش خاص از یونهای اربوم که باعث کاهش اثر نواحی تضعیف کننده شود نیاز است و ما آن را توزیع بهینه اربوم نامگذاری می کنیم. برای به دست آوردن یک توزیع بهینه برای اربوم در داخل مغزی پیشنهاد می کنیم که تعداد یونهای اربوم در هر قسمت از مغزی فیبر متناسب با شدت پمپ در آن قسمت باشد. بنابراین در نواحی ای که شدت پمپ کمتر است، تعداد یونهای اربوم کمتری باید در شبکه شیشه ای جایگذاری شوند. با توجه به وابستگی شدت اپتیکی مد اول به شعاع فیبر و مشخصات استوانه ای متقارن فیبر، چگالی یونهای اربوم نیز باید تابعی از شعاع فیبر، r ، شود و نسبت به θ متقارن باشد.

برای به دست آوردن توزیع بهینه اربوم با استفاده از ایده ارائه شده در این مقاله روشی را به صورت زیر معرفی می کنیم. ابتدا پوش توان پمپ را به قسمتهایی که در آنها شدت تقریباً یکسان است تقسیم می کنیم. شدت در هر قسمت به وسیله $P_p(z)\Psi_p(r)$ مشخص می شود. شکل ۲ این تقسیم بندی را

طول موج λ_k با استفاده از معادله (۵) به این صورت به دست می آید.

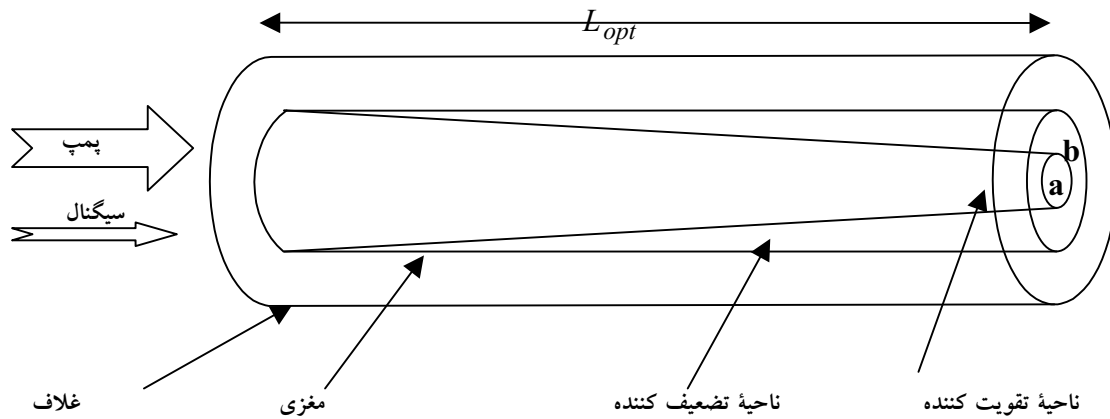
$$\frac{N_r}{N_1} > \frac{\sigma_a^k}{\sigma_e^k}. \quad (6)$$

برای اینکه تقویت سیگنال در محیط لیزری انجام شود، باید تعداد اتمهای تراز ۱ و ۲ در شرط تقویت کنندگی صدق کند. برای برقرار شدن این شرط باید شدت پمپ از شدت آستانه تقویت کنندگی (I_{th}) بیشتر باشد. I_{th} با استفاده از رابطه (۶) به صورت زیر به دست می آید:

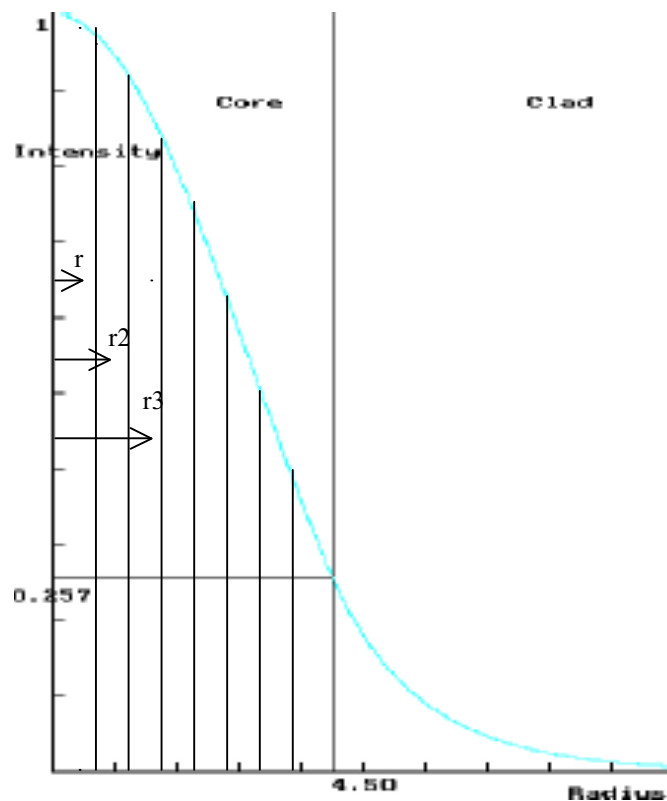
$$I_{th} = \frac{\sigma_a^k h\nu_k}{\sigma_e^k \sigma_a^p \tau}, \quad (7)$$

در این رابطه σ_a^p سطح مقطع جذب پمپ و τ طول عمر تراز است. پوش توان اپتیکی مد اول در فیبر نوری با استفاده از رابطه ۲ تعیین می شود که می توان آن را به خوبی به صورت گاوسی تقریب زد، بنابراین شدت مد اپتیکی با دور شدن از مرکز مغزی کاهش می یابد. درصد انرژی منتشر شده مد اول در مغزی فیبر برای دو طول موج 0.98 و $1/48$ میکرومتر برای دو نوع فیبر تک مدی رایج (SMF) و فیبر با پاشندگی انتقال یافته (DSF) در جدول ۱ آورده شده است.

انتشار پمپ در مغزی فیبر اربومی که دارای یونهای فعال است باعث جذب توان پمپ می شود. اگر شدت پمپ در همه نقاط مغزی یکسان می بود، بعد از اینکه مد اپتیکی مسافتی را در فیبر طی می کرد، با جذب توان پمپ به وسیله یونهای اربوم، شدت پمپ در تمام نقاط مغزی به طور همزمان به حد آستانه می رسید. ولی با توجه به اینکه توزیع شدت پمپ در فیبر اربومی تقریباً گاوسی است، با انتشار پمپ در داخل مغزی فیبر و پس از طی مسافتی، شدت پمپ در مرکز مغزی بیشتر از حد آستانه بوده و سیگنال تقویت می شود. در حالی که در نقاطی دورتر از مرکز مغزی، شدت از حد آستانه کمتر شده و سیگنال به وسیله یونهای اربوم جذب و تضعیف می شود. در نتیجه مطابق شکل ۱ با افزایش طول فیبر به تدریج از قسمت تقویت کننده کاسته و به قسمت تضعیف کننده افزوده می شود، تا سرانجام در مقطعی از فیبر، اثر قسمت تقویت کننده و تضعیف کننده بر روی سیگنال برابر می شود و از این مقطع به بعد سیگنال تضعیف می شود. این طول از فیبر که سیگنال ورودی را تقویت می کند، طول بهینه فیبر نامیده می شود. در



شکل ۱. مناطق تقویت کننده و جذب کننده در مغزی فیبر اریومی که به دلیل شکل توزیع شدت مد اول پمپ به وجود آمده‌اند.



شکل ۲. پوش توان مد LP_{01} پمپ در طول موج $1/48$ میکرومتر در فیبر رایج تک مدی (SMF) به قسمتهایی که شدت در آنها تقریباً ثابت است، تقسیم شده است.

که با $I_p(l, z)$ نمایش داده می‌شود و مقدار آن به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$I_p(l, z) = P_p(z) \psi(r_1) \quad (8)$$

قدم بعدی حل همزمان معادله (۵) برای پمپ و سیگنال در این قسمت است. با توجه به اینکه بیشترین شدت اپتیکی در این قسمت از پوش مد قرار دارد، پس در محاسبات بیشترین مقدار

برای پوش توان مد پمپ در طول موج $1/48$ میکرومتر برای فیبر رایج تک مدی (SMF) نشان می‌دهد. برای دقت بیشتر، پوش توان پمپ به ۱۰۰ قسمت تقسیم شده است. برای وضوح بیشتر، در شکل ۲ پهنای این تقسیم بندیها خیلی بزرگتر از حد معمول نشان داده شده است. شماره گذاری از مرکز فیبر شروع می‌شود. بیشترین مقدار شدت پمپ در قسمت ۱ ظاهر می‌شود

جدول ۱. درصد توان اپتیکی منتشر شده در مغزی فیبرهای رایج تک مدی و فیبرهای با پاشندگی انتقال یافته

درصد توان اپتیکی در مغزی	طول موج (میکرومتر)	نوع فیبر
٪ ۶۹/۵	۱/۵۳۱	فیبر تک مدی رایج (SMF)
٪ ۷۱/۹	۱/۴۸	شعاع مغزی: ۴/۵ میکرومتر
٪ ۸۸/۷	۰/۹۸	گشودگی عددی: ۰/۱
٪ ۷۶/۵	۱/۵۳۱	فیبر با پاشندگی انتقال یافته (DSF)
٪ ۷۸/۵	۱/۴۸	شعاع مغزی: ۳ میکرومتر
٪ ۹۱/۷	۰/۹۸	گشودگی عددی: ۰/۱۷

جدول ۲. ضرایب تابع چگالی اربوم برای پمپ با طول موج ۰/۹۸ میکرومتر.

c	b	a	توان پمپ (۰/۹۸ میکرومتر)
$6/2183090e+22$	$-8/1423788e+23$	$9/8640951e+24$	۱۰ میلی وات
$3/3140659e+22$	$-6/5315228e+23$	$1/0064174e+25$	۱۵ میلی وات
$-8/20811726e+21$	$-4/6709118e+23$	$1/0237792e+25$	۲۰ میلی وات
$-5/0535139e+22$	$-2/3171729e+23$	$1/0237953e+25$	۳۰ میلی وات

جدول ۳. ضرایب تابع چگالی اربوم برای پمپ با طول موج ۱/۴۸ میکرومتر.

c	b	a	توان پمپ (۱/۴۸ میکرومتر)
$4/0743001e+22$	$-7/4197082e+23$	$9/9106568e+24$	۱۰ میلی وات
$2/3476742e+22$	$-5/7261480e+23$	$9/9725571e+24$	۱۵ میلی وات
$-5/7408194e+20$	$-4/3094161e+23$	$1/0140894e+25$	۲۰ میلی وات
$-4/0246703e+22$	$-1/9306118e+23$	$1/0144491e+25$	۳۰ میلی وات

مسافت بیشتری به حد آستانه می‌رسد و به وسیله محاسبات عددی تا حدی مقدار چگالی اربوم را کاهش می‌دهیم تا طول بهینه قسمت دوم با طول بهینه قسمت اول برابر شود. به این طریق چگالی یونهای اربوم در قسمت دوم به دست می‌آید. چگالی در قسمت سوم و بقیه نواحی در مغزی فیبر با همین روش به دست می‌آیند [۹]. به این طریق برای هر نوع فیبر و برای هرتوان و هر طول موج پمپ مورد نظر، یک توزیع بهینه اربوم به دست می‌آید.

بر اساس این راهکار، یک برنامه کامپیوتری نوشته شده و به کمک آن کاوشی به منظور یافتن توزیع بهینه اربوم برای دو نوع فیبر اربومی تقویت کننده با ساختارهای موجبری، فیبرهای رایج تک مدی (SMF) و فیبرهای با پاشندگی انتقال یافته (DSF) با دو طول موج پمپ ۰/۹۸ و ۱/۴۸ میکرومتر صورت گرفت. به کمک یک برنامه کامپیوتری دیگر درصد توان اپتیکی منتشر شده در مغزی این دو نوع فیبر محاسبه شده است که

مجاز چگالی اربوم را برای این قسمت در نظر می‌گیریم. بنابراین با شرط $\rho = \rho_{max}$ معادلات پمپ و سیگنال را حل می‌کنیم و از این طریق طولی را که در آن شدت پمپ به حد آستانه می‌رسد برای قسمت ۱ به دست می‌آوریم و آن را L_{opt1} نامگذاری می‌کنیم. اگر برای قسمت ۲، همین محاسبات با شرطهای $I(r, z) = P_p(z)\psi(r_r)$ و $\rho = \rho_{max}$ انجام شود، پیدا است که طول بهینه به دست آمده برای قسمت ۲ از قسمت ۱ کمتر می‌شود ($L_{opt1} > L_{opt2}$). دلیل آن این است که قسمت ۲ شدت اپتیکی کمتری نسبت به قسمت ۱ دارد و بنابراین شدت پمپ در منطقه ۲ با طی مسافت کمتری به حد آستانه می‌رسد. با توجه به اینکه چگالی به عنوان ضریبی در معادله (۳) عمل می‌کند، آن را در قسمت ۲ به اندازه‌ای کاهش می‌دهیم که طول بهینه قسمت ۲ برابر طول بهینه قسمت ۱ شود. به عبارت دیگر با کم کردن چگالی یونهای اربوم در قسمت دوم، مقدار جذب پمپ به وسیله این یونها کمتر می‌شود و شدت پمپ با طی

ضریب b منفی است و این نشان می‌دهد که مقدار تابع با افزایش شعاع، کاهش می‌یابد. برای اجتناب از تأثیر متقابل بین یونهای اربوم که باعث کاهش راندمان تقویت‌کنندگی فیبر می‌شود، حداکثر مقدار چگالی اربوم $\frac{10^{25} \text{ ion}}{\text{m}^3}$ در نظر گرفته شده است. این انتخاب اثری بر کلی بودن نتایج نمی‌گذارد. بنابراین در حالت کلی می‌توان یک چگالی نرمالیزه را به این صورت معین کرد.

$$\rho_{\text{normalized}} = \frac{\rho(r)}{\rho_{\text{max}}} \quad (10)$$

۴. بهره‌ تقویت و ضریب بهره‌ تقویت فیبرهای اربومی با توزیع بهینه

در این بخش بهره‌ تقویت فیبرهای با توزیع یکنواخت اربوم و توزیع بهینه اربوم در طول موج $1/0.531$ میکرومتر را شبیه‌سازی می‌کنیم تا بتوانیم مقایسه‌ای بین بهره‌ تقویت این دو توزیع در فیبر اربومی داشته باشیم. توزیع پله‌ای اربوم را برای فیبر به این صورت در نظر می‌گیریم:

$$\rho(r) = \begin{cases} \rho_{\text{max}} & r \leq a \\ 0 & r > a \end{cases}$$

و توزیع بهینه محاسبه شده اربوم به این شکل نمایش داده می‌شود:

$$\rho(r) = \begin{cases} a + br^2 + c(e^r + e^{-r}) & r \leq a \\ 0 & r > a \end{cases}$$

برای شبیه‌سازی بهره‌ تقویت فیبرهای اربومی از مدل‌هایی که برای این هدف پیشنهاد شده و بر اساس سیستم لیزر سه تراز یونهای اربوم بنا شده است کمک می‌گیریم. نتایج حاصله از شبیه‌سازی با این مدلها تطابق خوبی با نتایج تجربی داشته است [۷]. در اینجا برای محاسبه بهره‌ تقویت فیبر، از روشی که در مرجع [۷] آمده است بهره می‌گیریم. مطابق با این روش، معادلات آهنگ برای سیگنال و پمپ به این صورت نوشته می‌شود.

$$\frac{dI_{s,p}}{dz} = g_{s,p} I_{s,p} \quad (11)$$

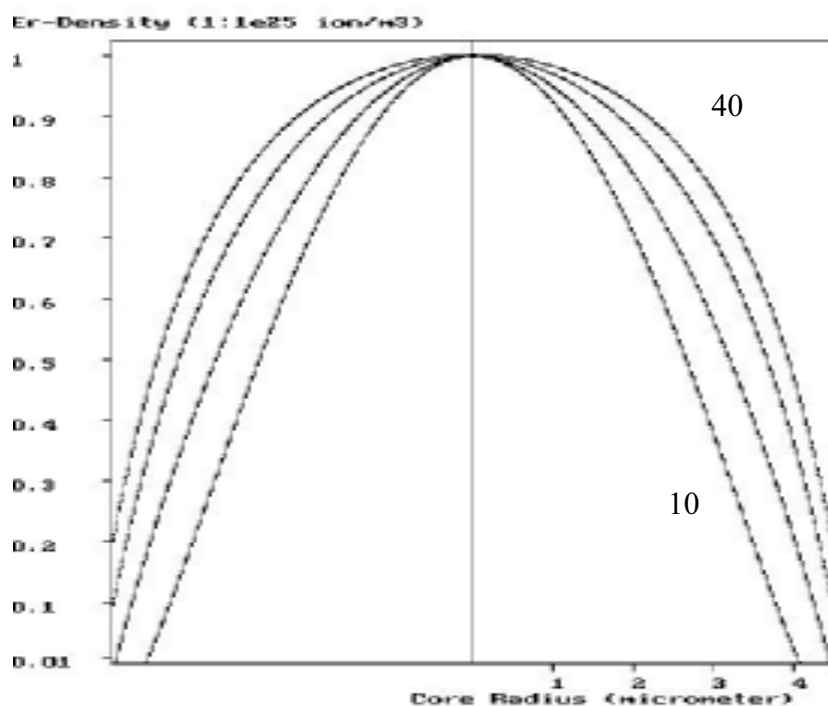
که در آن I_s توان نرمالیزه سیگنال نسبت به توان اشباع است و I_p توان نرمالیزه پمپ نسبت به توان آستانه است. ضریب جذب g_p و ضریب تقویت g_s به وسیله مرجع [۷] داده شده است.

نتایج آن در جدول ۱ برای سه طول موج مختلف 0.98 ، $1/48$ و $1/531$ میکرومتر آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود، چون فیبرهای با پاشندگی انتقال یافته دارای قطر مغزی کمتر و گشودگی عددی بیشتر هستند، پس در یک طول موج مشخص، انرژی انتقال یافته در مغزی آنها نسبت به فیبرهای رایج تک مدی بیشتر می‌باشد، از این رو موجهای قویتری هستند. پس می‌توانیم تأثیر توزیع بهینه اربوم را بر فیبرهای اربومی با دو ساختار موجبری قوی و ضعیف بررسی کنیم. این توزیع اربوم برای فیبرهای اربومی طراحی شده برای پمپهایی با توان 10 ، 20 ، 30 و 40 میلی وات محاسبه شده است. شکل‌های ۳ و ۴ توزیع بهینه اربوم را برای فیبر رایج تک مدی، SMF، با دو طول موج پمپ 0.98 و $1/48$ میکرومتر نشان می‌دهد. شکل‌های ۵ و ۶ توزیع بهینه اربوم را برای فیبر با پاشندگی انتقال یافته، DSF، با همان دو طول موج نشان می‌دهد. نمودارهای توزیع اربوم به دست آمده، شبه گاوسی هستند. به‌طور کلی، برای هر طول موج و هر توان پمپ یکسان، پهنای توزیع اربوم به دست آمده برای فیبرهای SMF به‌طور نسبی کمتر از DSF است، ضمن اینکه توزیعهای به دست آمده در پمپهای با توان پایتتر دارای پهنای کمتری هستند. در نتیجه برای فیبرهای رایج تک مدی، باید تجمع یونهای اربوم در نواحی اطراف مرکز مغزی بیشتر باشد. به‌طور کلی با توجه به تفاوت پوش توان مد در این دو طول موج و نوع فیبر، توزیع اربوم برای این دو نوع فیبر متفاوت است.

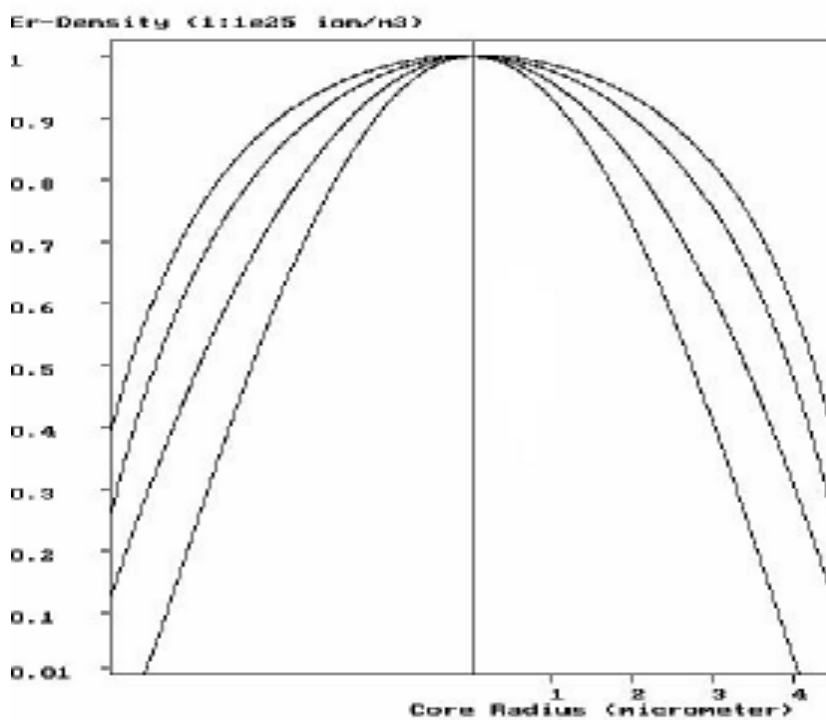
نمودارهای توزیع اربوم، برای دونوع فیبر با دو طول موج پمپ 0.98 و $1/48$ میکرومتر برای توانهای خروجی 10 تا 50 میلی وات با گام 5 میلی وات، به وسیله روش ذکر شده تعیین شده است و برای پیدا کردن توزیع اربوم به صورت تابعی از شعاع مغزی فیبر، با روشهای درون یابی عددی، تابع منحصر به فرد زیر که با دقت بیشتر از $99/5\%$ بر تمام این توزیعها منطبق است، به دست آمده است [۱۰]:

$$\rho(r) = a + br^2 + c(e^r + e^{-r}) \quad (9)$$

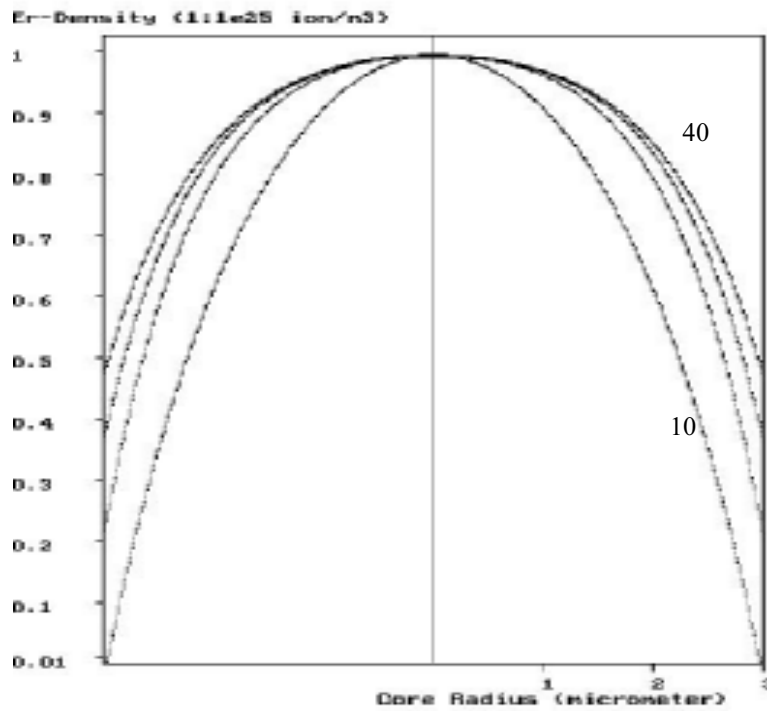
ضرایب a ، b و c با توجه به طول موج پمپ و مشخصات موجبری فیبر و توان پمپ به دست می‌آیند و r شعاع مغزی فیبر است. جدول ۲ و ۳ این ضرایب را برای فیبر SMF به ترتیب با پمپهای به طول موج 0.98 و $1/48$ میکرومتر و توانهای 10 ، 15 ، 20 و 30 میلی وات نشان می‌دهد. مقدار



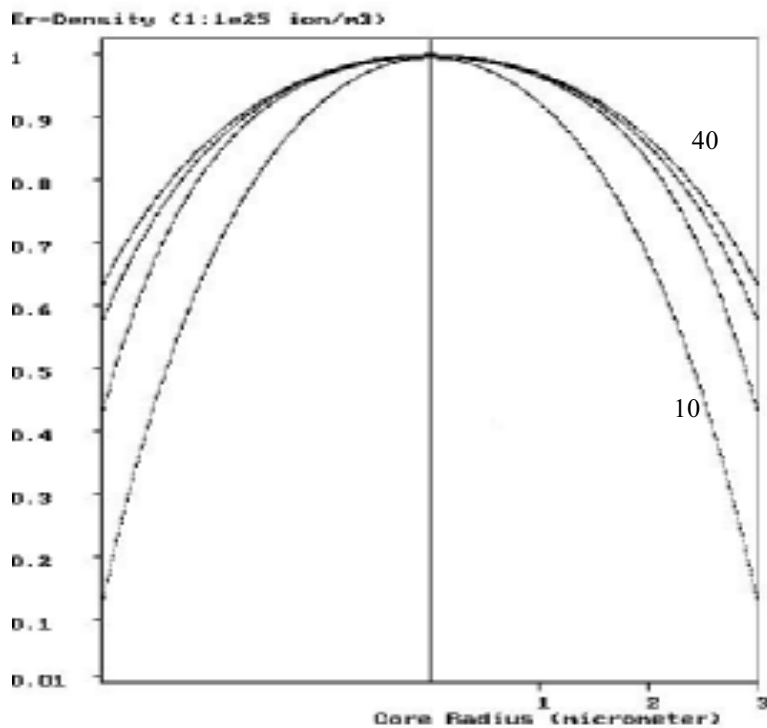
شکل ۳. پروفایل بهینه اربوم برای فیبر رایج تک مدی برای طول موج ۰/۹۸ میکرومتر در ۴ طول بهینه مربوط به توانهای پمپ ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی وات.



شکل ۴. پروفایل بهینه اربوم برای فیبر رایج تک مدی برای طول موج ۱/۴۸ میکرومتر در ۴ طول بهینه مربوط به توانهای پمپ ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی وات.



شکل ۵. پروفایل بهینه آریوم برای فیبر با پاشندگی انتقال یافته برای طول موج ۰/۹۸ میکرومتر در ۴ طول بهینه مربوط به توانهای پمپ ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی وات.



شکل ۶. پروفایل بهینه آریوم برای فیبر با پاشندگی انتقال یافته برای طول موج ۱/۴۸ میکرومتر در ۴ طول بهینه مربوط به توانهای پمپ ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی وات.

۱/۲۵ و ۱/۲ است. نکته قابل توجه افزایش تقریباً یکسان ضریب بهره تقویت برای دو طول موج پمپ است.

جدولهای ۴ و ۵، طول بهینه فیبر اربومی SMF با توزیعهای اربوم پله‌ای، بهینه و محدوده شده در ۰/۲۵ مغزی را به ترتیب برای پمپ های ۰/۹۸ و ۱/۴۸ میکرومتر و توانهای ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ میلی وات نشان می‌دهد. با مقایسه طولهای بهینه مشاهده می‌شود که با انتخاب توزیع بهینه اربوم، طول بهینه فیبر نسبت به حالت پله‌ای برای هر پمپ مشخص تقریباً به دو تا سه برابر افزایش پیدا می‌کند. در حالی که با انتخاب توزیع اربوم محدود شده در ۰/۲۵ مغزی [۶] طول بهینه به بیشتر از ۱۰ برابر توزیع پله‌ای افزایش پیدا کرده است که مطلوب نیست. بنابراین با استفاده از این توزیع بهینه علاوه بر افزایش بهره تقویت، از افزایش بیش از حد طول بهینه فیبر که با توزیع محدود شده در ۰/۲۵ مغزی به وجود می‌آید، نیز جلوگیری می‌شود.

شکلهای ۹ و ۱۰ منحنیهای بهره تقویت فیبر اربومی DSF را برای توزیعهای اربوم پله‌ای و بهینه در دو طول موج پمپ ۰/۹۸ و ۱/۴۸ میکرومتر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توزیع بهینه اربوم تأثیر چندانی بر بهره تقویت این نوع فیبر ایجاد نکرده است که با نتایج توزیع اربوم محدود شده در ۰/۲۵ مغزی مطابقت دارد [۶]. این موجبر دارای قطر کمتر و گشودگی عددی بیشتری نسبت به موجبر SMF است و با توجه به اینکه درصد بیشتری از توان پمپ در مغزی موجبر منتشر می‌شود، در نتیجه مناطق تضعیف کننده کمتری در این موجبر تشکیل می‌شود. توزیع بهینه به دست آمده در بخش قبل برای این فیبر خیلی نزدیک به حالت پله‌ای است، پس می‌توان توزیع پله‌ای را به صورت یک توزیع مناسب برای این موجبر در نظر گرفت.

۵. نتیجه گیری

نمودارهای توزیع بهینه اربوم به دست آمده شبه گاوسی هستند که به ازای هر طول موج خاص و هر توان پمپ، پهنای توزیع گاوسی اربوم به دست آمده تغییر می‌کند و هر چه توان پمپ بیشتر شود منحنی توزیع بهتر می‌شود. منحنیهای به دست آمده برای فیبر رایج تک مدی، افزایش قابل توجهی را در بهره تقویت این فیبر برای هر دو طول موج پمپ نشان می‌دهد. اما

$$g_p = -\gamma \pi \sigma_a^p \int_0^\infty \rho(r) \psi_p(r) N_1(r, z) dr, \quad (12)$$

$$g_s = \gamma \pi \sigma_e^s \int_0^\infty \rho(r) \psi_s(r) [N_1(r, z) - \frac{\sigma_a^s}{\sigma_e^s} N_1(r, z)] r dr. \quad (13)$$

N_1 و N_2 جمعیت نرمالیزه یونها در تراز پایه و تراز برانگیخته می‌باشند. با جاگذاری N_1 و N_2 در معادلات (۱۲) و (۱۳) و حل همزمان معادله (۱۱) برای پمپ و سیگنال می‌توان بهره تقویت را برحسب توان پمپ به دست آورد. مقایسه بین بهره تقویت فیبرهای اربومی با توزیع پله‌ای اربوم و توزیع پله‌ای محدود شده اربوم در ۰/۲۵ مغزی برای دو نوع فیبر رایج تک مدی و فیبر با پاشندگی انتقال یافته در مرجع [۶] آمده است. بنابراین برای مقایسه بهتر نتایج به دست آمده در این بخش مقادیر سطح مقطع جذب و گسیل پمپ و سیگنال به دست آمده در مرجع [۶] را در محاسبات به کار گرفته‌ایم.

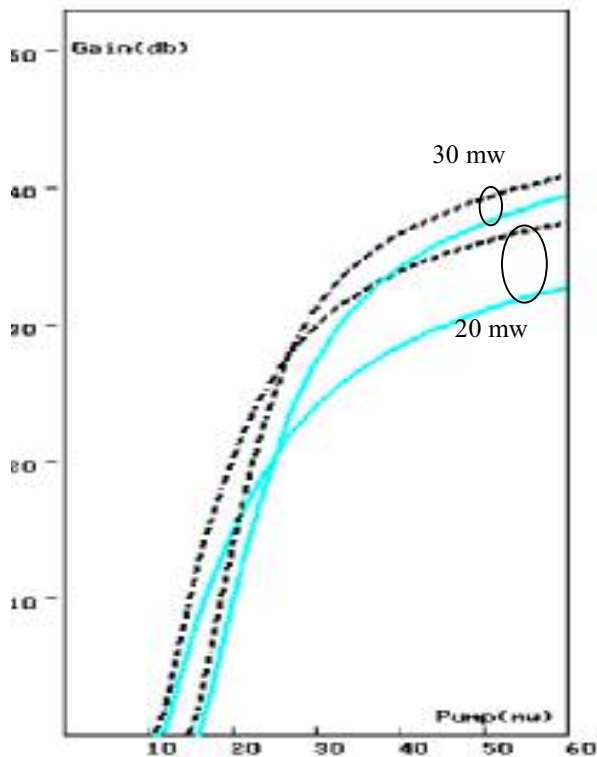
شکلهای ۷، ۸، ۹ و ۱۰، منحنی بهره تقویت دو نوع فیبر را بر حسب توان پمپ برای سیگنال ۱/۵۳۱ میکرومتری و دو پمپ ۰/۹۸ و ۱/۴۸ میکرومتری نشان می‌دهد. این منحنیها برای دو توزیع اربوم پله‌ای (خط پر) و توزیع بهینه اربوم به دست آمده در این مقاله (خط چین) و برای ۴ طول بهینه مختلف که به ترتیب متناظرند با توانهای پمپ ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ میلی وات محاسبه شده‌اند. منحنیهای شکلهای ۷ و ۸ برای فیبر SMF به دست آمده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود با توزیع بهینه، بهره تقویت افزایش قابل توجهی مخصوصاً در حالت پمپاژ پایین نشان می‌دهد و نشاندهنده آن است که مناطق تضعیف کننده در این حالت به‌طور قابل توجهی کاهش یافته‌اند و به پمپاژ مؤثرتری نسبت به حالت پله‌ای دست یافته‌ایم. برای مشاهده دقیقتر بازدهی پمپ، ضریب بهره تقویت که عبارت است از حداکثر نسبت بهره تقویت به توان پمپ خورنده شده، محاسبه شده است. ضریب بهره تقویت برای توزیع بهینه اربوم و طولهای بهینه متناظر با پمپهای ۱۰ تا ۳۰ میلی وات در طول موج پمپ ۰/۹۸ میکرومتر به ترتیب ۱/۹، ۱/۳۳، ۱/۲۶ و ۱/۲ برابر نسبت به توزیع پله‌ای، افزایش یافته است که این نسبت برای طول موج پمپ ۱/۴۸ میکرومتر به ترتیب ۱/۹، ۱/۳،

جدول ۴. طول بهینه فیبر اریبومی SMF برای سه توزیع اریبوم با پمپ ۰/۹۸ میکرومتری بر حسب متر

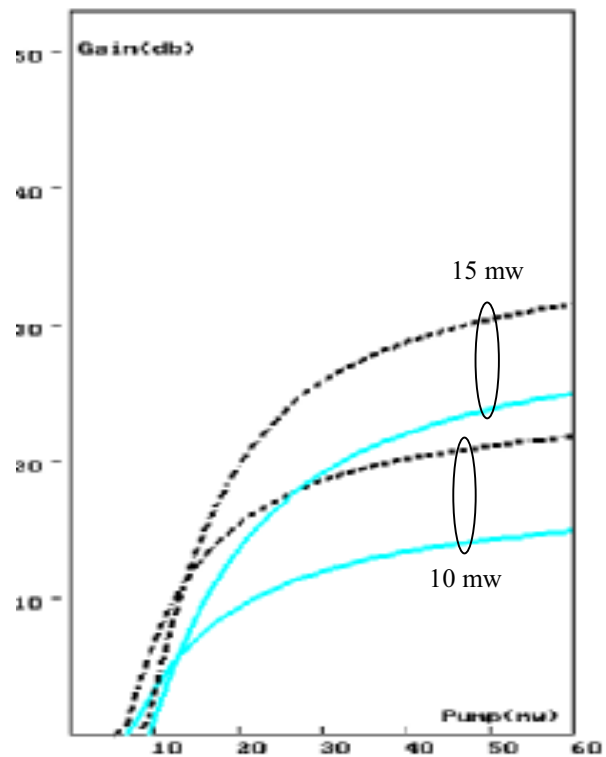
توزیع اریبوم در مغزی فیبر (پمپ ۰/۹۸ میکرومتری)	طول بهینه برای توان ۱۰ میلی وات (متر)	طول بهینه برای توان ۱۵ میلی وات (متر)	طول بهینه برای توان ۲۰ میلی وات (متر)	طول بهینه برای توان ۳۰ میلی وات (متر)
پله ای	۱/۷	۳	۴	۵/۷
توزیع بهینه	۵	۶/۴	۷/۸	۸/۹
محدود شده در ۰.۲۵٪ مغزی	۲۶	۳۴	۴۹	۵۸

جدول ۵. طول بهینه فیبر اریبومی SMF برای سه توزیع اریبوم با پمپ ۱/۴۸ میکرومتری بر حسب متر

توزیع اریبوم در مغزی فیبر (پمپ ۱/۴۸ میکرومتری)	طول بهینه برای توان ۱۰ میلی وات (متر)	طول بهینه برای توان ۱۵ میلی وات (متر)	طول بهینه برای توان ۲۰ میلی وات (متر)	طول بهینه برای توان ۳۰ میلی وات (متر)
پله ای	۲	۴	۵/۶	۸
توزیع بهینه	۶/۱	۸/۲	۹/۸	۱۱/۹
محدود شده در ۰.۲۵٪ مغزی	۳۶	۵۳	۷۱	۸۸

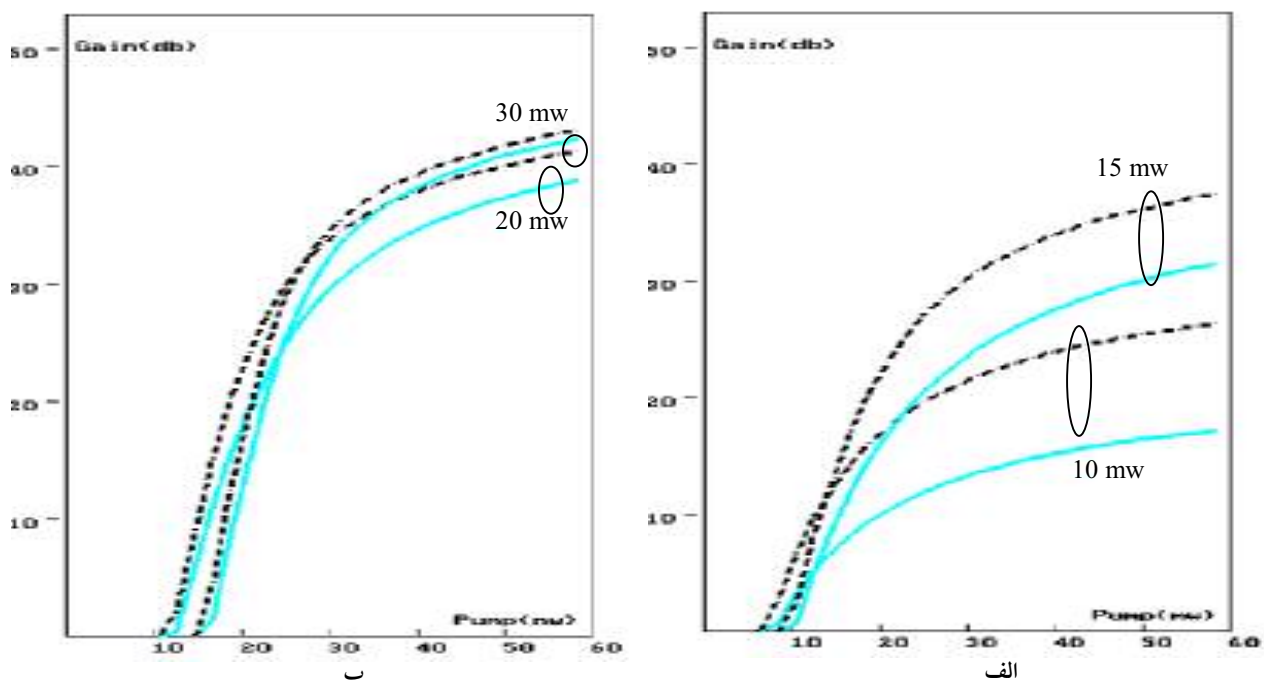


ب

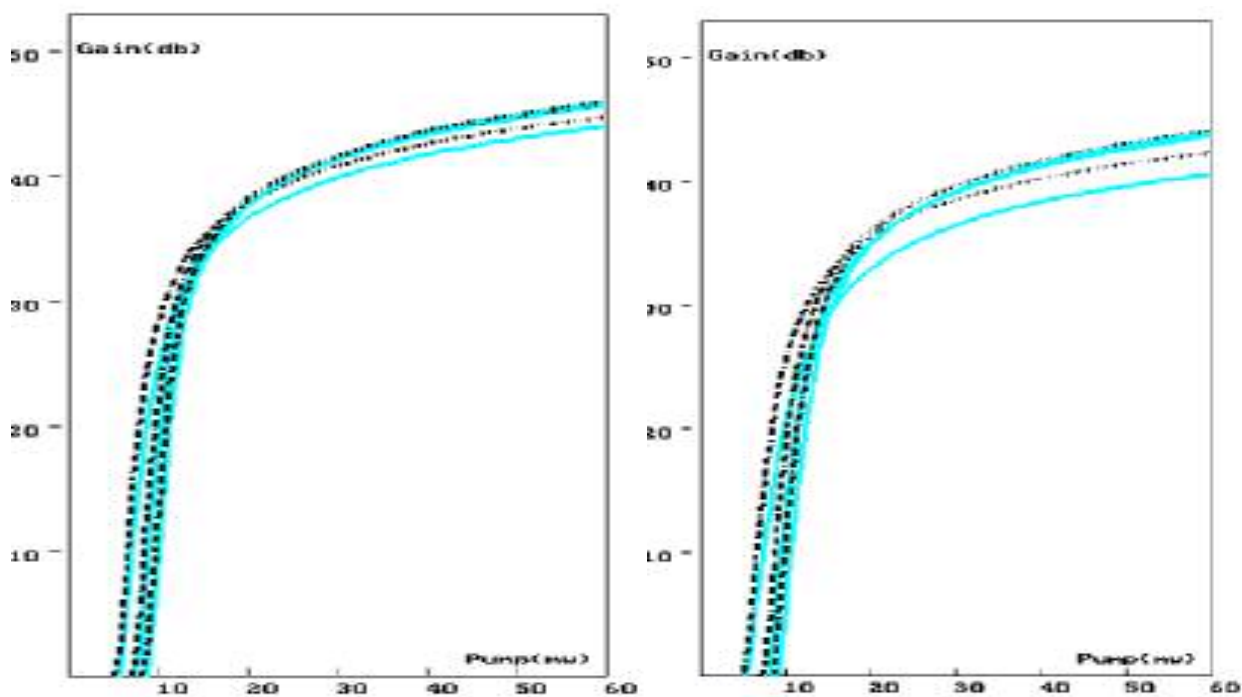


الف

شکل ۷. منحنی بهره تقویت برحسب توان پمپ برای فیبر رایج تک مدی در طول موج پمپ ۰/۹۸ میکرومتر، شکل (الف): برای طولهای بهینه در توانهای پمپ ۱۰ و ۱۵ میلی وات. شکل (ب): برای طولهای بهینه در توانهای پمپ ۲۰ و ۳۰ میلی وات.



شکل ۸. منحنی بهره تقویت برحسب توان پمپ برای فیبر رایج تک مدی در طول موج پمپ ۱/۴۸ میکرومتر. شکل (الف): برای طولهای بهینه در توانهای پمپ ۱۰ و ۱۵ میلی وات و شکل (ب): بتوانهای پمپ ۲۰ و ۳۰ میلی وات.



شکل ۹. منحنی بهره تقویت به توان پمپ برای فیبر با پاشندگی انتقال یافته در طول موج پمپ ۰/۹۸ میکرومتر و طولهای بهینه در توانهای پمپ ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی وات.

شکل ۱۰. منحنی بهره تقویت به توان پمپ برای فیبر با پاشندگی انتقال یافته در طول موج پمپ ۱/۴۸ میکرومتر و طولهای بهینه در توانهای پمپ ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی وات.

محاسبه است. در ضمن، این روش می‌تواند برای هر نوع فیبر تقویت کننده یا موجبر فعال با هر نوع یونهای فعال کننده مورد استفاده قرار گیرد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران که امکان انجام این پژوهش را فراهم آورده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

برای فیبر با پاشندگی انتقال یافته، افزایش چشمگیری در بهره تقویت در توانهای زیاد پمپ مشاهده نمی‌شود که نتایج به دست آمده به نوبه خود با نتایج گزارش شده در مرجع [۶] تطابق کامل دارد. همچنین، طول بهینه فیبر اریومی با توزیع بهینه ۵ تا ۸ برابر کمتر از طول بهینه محاسبه شده برای فیبرهای اریومی با توزیع محدود در ۰/۲۵ مغزی است که مزیتی دیگر محسوب می‌شود. بر این باوریم که هر موجبر، یک توزیع بهینه مخصوص به خود دارد که با روش ارائه شده در این مقاله قابل

مراجع

1. E Desurvire, *IEEE Photonic Technol. Lett.*, **1**, (1989) 293-296.
2. M Nakazawa et al., *Appl. Phys. Lett.*, **54** (1989) 295-297.
3. M J F Digonnet, *IEEE J. Quantum Electron.*, **26** (1990) 1788-1796.
4. B Pederson et al., *J Lightwave Technol.*, **9** (1991) 1105-1112.
5. M Ohashi, *J Lightwave Technol.*, **9** (1991) 1099-1104.
6. E Desurvire, J L Zyskind and CR Giles, *J. Lightwave Technol.*, **8** (1990) 1730-1741.
7. E Desurvire, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers, Principles and Applications*, John Wiley&Sons, 1994.
8. F F Ruhl, *Electron. Lett.*, **28** 3 (1992) 312.
9. علیرضا حسینی، پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک کاربردی، گروه فیزیک دانشگاه تهران، تیرماه ۱۳۷۹.
10. E Arzi, A Hassani and F E Seraji, CLEO/Pacific Rim 2001 Conference, Japan, (2001).