Downloaded from ijpr-old.iut.ac.ir at 11:00 IRST on Sunday January 10th 2021

مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ٤، شمارهٔ ١، زمستان ١٣٨٢

مدلی برای تعیین توزیع بهینه اربیوم در مغزی فیبرهای نوری اربیومی تقویت‌کننده به منظور بالا بردن بهرهٔ تقویت‌کنندگی آنها

عزت‌الله ارضی[1]، علیرضا حسنی[1و2] و فرامرز اسماعیلی سراجی[3]

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 اربیوم جهت افزایش بهره تقویت فیبرهای اربیومی تقویت‌کننده ارائه می‌کند. توزیعهای بهینه اربیوم به‌دست 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 آورده‌ایم. توزیعهای بهینه اربیوم به‌دست آمده به صورت شبه گاوسی هستند و شبیه‌سازی بهره تقویت برای این دو نوع فیبر نشان می‌دهد که توزیعهای به‌دست آمده برای فیبرهای رایج تک مدی بهره تقویت را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. نتایج به‌دست 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 می‌شود، کاملا کلی است و برای هر نوع فیبر تقویت‌کننده یا موجبر فعال می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: فیبرهای نوری تقویت‌کننده، فیبر های اربیومی، مخابرات نوری، بهینه‌سازی، تقویت‌کننده‌های نوری، فیبر نوری

۱. مقدمه

شبکه‌های مخابرات نوری به‌طور معمول از دو پنجرهٔ مخابراتی برای ارسال پالسهای نوری استفاده می‌کنند. در این دو پنجرهٔ 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، به‌طوری که کمترین اتلاف فیبر در قسمت ۱/۵۵ میکرو متر به حدود ۰/۲ دسی‌بل در کیلومتر می‌رسد. با این حال پالسهای اپتیکی منتشر شده در این پنجره‌ها پس از چند ده کیلومتر احتیاج به تقویت دارند. برای تقویت این پالسها می‌توان 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 مخابراتی می‌شود و علاوه بر این برای هر کانال اپتیکی باید یک تقویت کنندهٔ مجزا در نظر گرفت. برای رفع این محدودیت، ایده تقویت اپتیکی پالسهای مخابراتی مطرح شد که منجر به ساخت فیبرهای اربیومی تقویت کننده شد. در این نوع فیبر فعال، یونهای اربیوم در داخل شبکهٔ شیشه‌ای مغزی فیبر نشانده شده‌اند و با توجه به اینکه گسیل القایی یونهای اربیوم در محدودهٔ ۱/۵۵ میکرومتر صورت می‌گیرد، از این نوع فیبر آلاییده به اربیوم برای تقویت پالسهای اپتیکی در پنجره مخابراتی ۱/۵۵ میکرومتر استفاده می‌شود. فرآیند تقویت بدین گونه است که یک دیود لیزری به عنوان پمپ، یونهای اربیوم داخل مغزی فیبر را برانگیخته می‌کند و با ورود همزمان پالسهای مخابراتی تضعیف شده به همین فیبر، گسیل القایی یونهای اربیوم صورت می گیرد و در نتیجه پالسها تقویت

Downloaded from ijpr-old.iut.ac.ir at 11:00 IRST on Sunday January 10th 2021

می‌شوند. یکی از مهمترین پارامترهای طراحی فیبرهای اربیومی مطالعهٔ 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 اربیومی [۱ و ۲]، بهینه سازی ساختار موجبری [۳ و ۴] ومحدود کردن توزیع اربیوم در مرکز مغزی فیبر [۵ و ۶]. با این وجود، مدلی که بتواند توزیع اربیوم را با توجه به ساختارموجبری فیبر با هدف بالابردن بهره تقویت به‌دست آورد تا به‌حال گزارش نشده است.

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

۲. قسمت کاهندهٔ بهرهٔ پمپ در فیبر اربیومی با توزیع پله‌ای اربیوم

در این بخش یکی از مهمترین عواملی که در کم شدن بازدهی پمپ در یک فیبر اربیومی با توزیع پله‌ای اربیوم 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 رابطهٔ زیر مشخص می شود .

$$I_k(r,z,\theta)=p(z)\,\overline{\psi}_k(r,\theta), \qquad (۱)$$

که در آن $\overline{\psi}_k(r,\theta)$ پوش توان مد نرمالیزه است که به‌وسیله رابطهٔ زیر تعریف می‌شود :

$$\overline{\psi}_k(r,\theta)=\frac{\psi_k(r,\theta)}{\pi\omega^2}. \qquad (۲)$$

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

$$\omega=a\frac{VK_1(w_k)}{UK_0(w_k)}J_0(u_k), \qquad (۳)$$

که در آن J_0، K_0 و K_1 به ترتیب توابع بسل مرتبهٔ صفر، بسل تعمیم یافتهٔ مرتبهٔ صفر و مرتبهٔ اول هستند. a شعاع فیبر و V، U و W به ترتیب فرکانس نرمالیزه، مقدار ویژه مغزی وغلاف هستند. در حالت هدایت ضعیف[۴]، پوش توان مد اول با رابطهٔ زیر تعیین می‌شود.

$$\psi_k(r)=\begin{cases}J_0^2(u_k\,r/a) & r\le a\\ \dfrac{J_0^2(u_k)}{K_0^2(w_k)}K_0^2(w_k\,r/a) & r>a\end{cases} \qquad (٤)$$

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

$$\frac{dI_k}{dz}=\rho\left(\sigma_e^k N_2-\sigma_a^k N_1\right)I_k \qquad k=s,p \qquad (۵)$$

که در آن s و p نشان‌دهندهٔ سیگنال وپمپ، 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

۱.Conventional Single Mode Fiber

۲. Dispersion Shifted Fiber

۳.Mode envelope

٤.Weakly guiding

Downloaded from ijpr-old.iut.ac.ir at 11:00 IRST on Sunday January 10th 2021

طـول موج λ_k با استفاده از معادله (۵) به این صورت به‌دست می‌آید.

$$\frac{N_2}{N_1} > \frac{\sigma_a^k}{\sigma_e^k}. \qquad (۶)$$

برای اینکه تقویت سیگنال در محیط لیزری انجام شود، باید تعداد اتمهای تراز ۱ و۲ در شرط تقویت کنندگی صدق کند . برای برقرار شدن این شرط باید شدت پمپ از شدت آستانهٔ تقویت کنندگی (I_{th}) بیشتر باشد. I_{th} با استفاده از رابطهٔ (٦) به صورت زیربه‌دست می آید:

$$I_{th} = \frac{\sigma_a^k}{\sigma_e^k}\frac{h\nu_k}{\sigma_a^p \tau}, \qquad (۷)$$

در این رابطه σ_a^pسطح مقطع جذب پمپ و τطول عمر تراز است. پوش توان اپتیکی مد اول در فیبر نوری با استفاده از رابطهٔ ۲ تعیین می‌شود که می‌توان آن را به‌خوبی به‌صورت گاوسی تقریب زد، بنابراین شدت مد اپتیکی با دور شدن از مرکز مغزی کاهش می‌یابد. درصد انرژی منتشر شدهٔ مد اول در مغزی فیبر برای دو طول موج ۰/۹۸ و ۱/٤۸ میکرومتر برای دو نوع فیبر تک مدی رایج (SMF) و فیبر با پاشندگی انتقال یافته (DSF) در جدول ۱ آورده شده است.

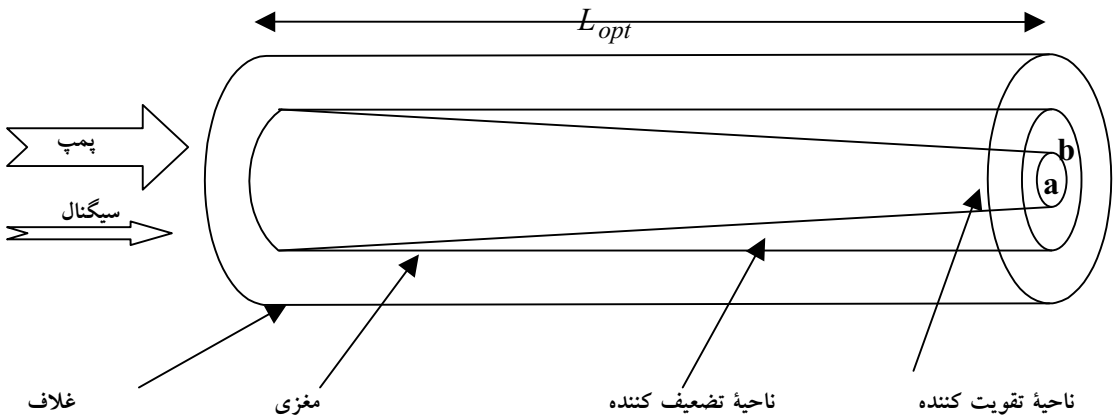
انتشار پمپ در مغزی فیبر اربیومی که دارای یونهای فعال است باعث جذب توان پمپ می شود. اگر شدت پمپ در همهٔ نقاط مغزی یکسان می بود، بعد از اینکه مد اپتیکی مسافتی را در فیبر طی می کرد، با جذب توان پمپ به وسیله یونهای اربیوم، شدت پمپ درتمام نقاط مغزی به طور همزمان به حد آستانه می‌رسید. ولی با توجه به اینکه توزیع شدت پمپ در فیبر اربیومی تقریبا" 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 می‌شود. در حالی که در نقاطی دورتراز مرکز مغزی، شدت از حد آستانه کمتر شده و سیگنال به‌وسیله یونهای اربیوم 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 می‌شود، تا سرانجام در مقطعی از فیبر، اثر قسمت تقویت کننده و تضعیف کننده بر روی سیگنال برابر می‌شود و از این مقطع به بعد سیگنال تضعیف می‌شود. این طول از فیبر که سیگنال ورودی را تقویت می کند، طول بهینه فیبر نامیده می‌شود. در شکل ۱ به‌طور شماتیک یک فیبر تقویت کننده با طول بهینه مشخص، نمایش داده شده است که آخرین مقطع آن دارای دو قسمت تقویت‌کننده و تضعیف کننده است، که با حروف a و b مشخص شده‌اند. همانطور که از شکل ۱ پیداست، یک قسمت از مغزی فیبر به‌صورت تضعیف کننده عمل می‌کند و عملکرد این قسمت باعث کم شدن راندمان پمپ و کاهش بهره تقویت می‌شود.

۳. تعیین چگالی بهینهٔ اربیوم برای بالا بردن بهرهٔ پمپ

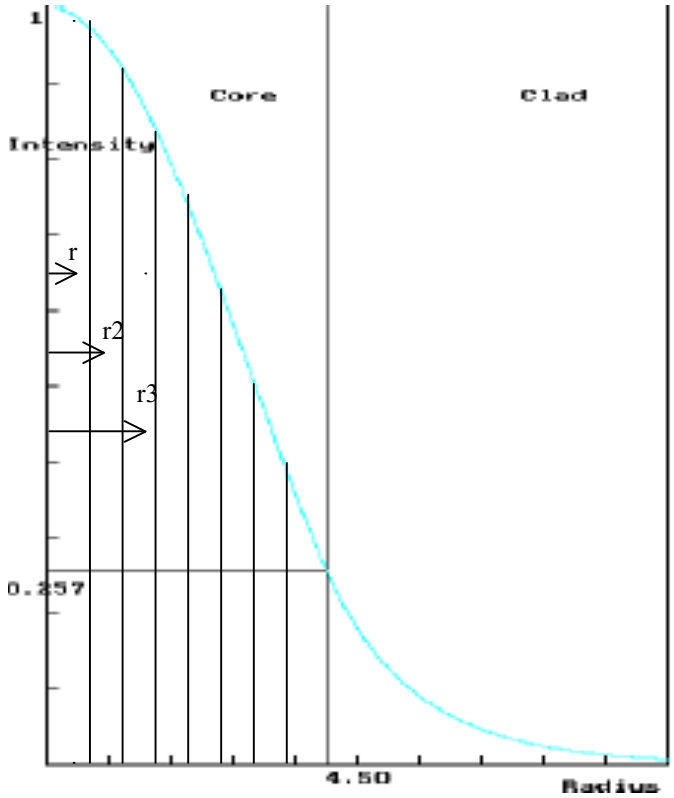
در بخش قبلی قسمت تضعیف کننده در فیبر نوری مورد بررسی قرار گرفت، در این بخش راه کاری برای افزایش بهرهٔ تقویت به کمک افزایش بازدهی پمپ ارائه شده است. برای این کار ابتدا یک فیبر نوری اربیومی با ساختار موجبری مشخص در نظر می گیریم. برای افزایش بازدهی پمپ، باید اثر مناطق تضعیف کننده در مغزی این فیبر کاهش پیدا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

برای به دست آوردن توزیع بهینه اربیوم با استفاده از ایدهٔ ارائه شده در این مقاله روشی را به‌صورت زیر معرفی می‌کنیم. ابتدا پوش توان پمپ را به قسمتهایی که در آنها شدت تقریبا" یکسان است تقسیم می‌کنیم. شدت در هر قسمت به‌وسیله $P_p(z)\psi_p(r)$ مشخص می‌شود. شکل ۲ این تقسیم بندی را

Downloaded from ijpr-old.iut.ac.ir at 11:00 IRST on Sunday January 10th 2021



شکل۱. مناطق تقویت‌کننده و جذب کننده در مغزی فیبر اربیومی که به دلیل شکل توزیع شدت مد اول پمپ به وجود آمده‌اند.



شکل۲. پوش توان مد LP_{01} پمپ در طول موج ۱/۴۸ میکرومتر در فیبر رایج تک مدی *(SMF)* به قسمتهایی که شدت در آنها تقریبا ثابت است، تقسیم شده است.

برای پوش توان مد پمپ در طول موج ۱/۴۸ میکرومتر برای فیبر رایج تک مدی(SMF) نشان می‌دهد. برای دقت بیشتر، پوش توان پمپ به ۱۰۰ قسمت تقسیم شده است. برای وضوح بیشتر، درشکل 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 می شود که با $I_p(1,z)$ نمایش داده می‌شود و مقدار آن به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$I_p(1,z) = P_p(z)\psi(r_1)\ . \qquad (۸)$$

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

Downloaded from ijpr-old.iut.ac.ir at 11:00 IRST on Sunday January 10th 2021

جدول۱. درصد توان اپتیکی منتشر شده در مغزی فیبرهای رایج تک مدی و فیبرهای با پاشندگی انتقال یافته

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

جدول۲. ضرایب تابع چگالی اربیوم برای پمپ با طول موج ۰/۹۸ میکرومتر.

توان پمپ (۰/۹۸ میکرمتر)	a	b	c
۱۰ میلی وات	۹/۸٦٤۰۹٥۱e+۲٤	−۸/۱٤۲۳٦۸۸e+۲۳	٦/۲۱۸۳۰۹۰e+۲۲
۱۵ میلی وات	۱/۰۰٦٤۱۷٤e+۲٥	−٦/٥۳۱٥۲۲۸e+۲۳	۳/۳۱٤۰٦٥۹e+۲۲
۲۰ میلی وات	۱/۰۲۳۷۷۹۲e+۲٥	−٤/٦۷۰۹۱۱۸e+۲۳	−۸/۲۰۸۱۷۲٦e+۲۱
۳۰ میلی وات	۱/۰۲۳۷۹٥۳e+۲٥	−۲/۳۱۷۱۷۲۹e+۲۳	−٥/۰٥۳٥۱۳۹e+۲۲

جدول۳. ضرایب تابع چگالی اربیوم برای پمپ با طول موج ۱/٤۸ میکرومتر

توان پمپ (۱/۴۸ میکرومتر)	a	b	c
۱۰ میلی وات	۹/۹۱۰٦٥٦۸e+۲٤	−۷/٤۱۹۷۰۸۲e+۲۳	٤/۰۷٤۳۰۰۱e+۲۲
۱۵ میلی وات	۹/۹۷۲٥٥۷۱e+۲٤	−٥/۷۲٦۱٤۸۰e+۲۳	۲/۳٤۷٦۷٤۲e+۲۲
۲۰ میلی وات	۱/۰۱٤۰۸۹٤e+۲٥	−٤/۳۰۹٤۱٦۱e+۲۳	−٥/۷٤۰۸۱۹٤e+۲۰
۳۰ میلی وات	۱/۰۱٤٤٤۹۱e+۲٥	−۱/۹۳۰٦۱۱۸e+۲۳	−٤/۰۲٤٦۷۰۳e+۲۲

مجاز چگالی اربیوم 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 می رسد برای قسمت ۱ به‌دست 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، پیداست که طول بهینه به‌دست 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 معادلهٔ (۳) عمل می‌کند، آن را در قسمت ۲ به اندازه‌ای کاهش می‌دهیم که طول بهینهٔ قسمت ۲ برابر طول بهینهٔ قسمت ۱ شود. به عبارت دیگر با کم کردن چگالی یونهای اربیوم در قسمت دوم، مقدار جذب پمپ به‌وسیله این یونها کمتر می‌شود و شدت پمپ با طی مسافت بیشتری به حد آستانه می‌رسد و به‌وسیله محاسبات عددی تا حدی مقدار چگالی اربیوم را کاهش می‌دهیم تا طول بهینه قسمت دوم با طول بهینه قسمت اول برابر شود. به این طریق چگالی یونهای اربیوم در قسمت دوم به‌دست می‌آید. چگالی در قسمت سوم و بقیه نواحی در مغزی فیبر با همین روش به‌دست می‌آیند [۹]. به این طریق برای هر نوع فیبر و برای هرتوان وهر طول موج پمپ مورد نظر، یک توزیع بهینه اربیوم به‌دست می‌آید.

بر اساس این راهکار، یک برنامهٔ کامپیوتری نوشته شده و به کمک آن کاوشی به منظور یافتن توزیع بهینه اربیوم برای دو نوع فیبر اربیومی 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 ۱/٤۸ میکرومتر صورت گرفت. به کمک یک برنامهٔ کامپیوتری دیگر درصد توان اپتیکی منتشر شده در مغزی این دو نوع فیبر محاسبه شده است که

Downloaded from ijpr-old.iut.ac.ir at 11:00 IRST on Sunday January 10th 2021

نتایج آن در جدول ۱ برای سه طول موج مختلف ۰/۹۸، ۱/٤۸ و ۱/۵۳۱ 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 می باشد، از این رو موجبرهای قویتری هستند. پس می توانیم تأثیر توزیع بهینه اربیوم را بر فیبرهای اربیومی با دو ساختار موجبری قوی و ضعیف بررسی کنیم. این توزیع اربیوم برای فیبرهای اربیومی طراحی شده برای پمپهایی با توان ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ٤۰ میلی وات محاسبه شده است .شکلهای ۳ و ٤ توزیع بهینه اربیوم را برای فیبر رایج تک مدی،SMF ، با دو طول موج پمپ ۰/۹۸ و ۱/٤۸ میکرومتر نشان می دهد. شکلهای ۵ و ٦ توزیع بهینه اربیوم را برای فیبر با پاشندگی انتقال یافته، DSF، با همان دو طول موج نشان می‌دهد. نمودارهای توزیع اربیوم به‌دست آمده، شبه گاوسی هستند. به‌طور کلی، برای هر طول موج و هر توان پمپ یکسان، پهنای توزیع اربیوم به دست آمده برای فیبرهایSMF به طور نسبی کمتر از DSF است، ضمن اینکه توزیعهای به‌دست آمده در پمپهای با توان پایینتر دارای پهنای کمتری هستند. در نتیجه برای فیبرهای رایج تک مدی، باید تجمع یونهای اربیوم 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 اربیوم برای این دو نوع فیبر متفاوت است.

نمودارهای توزیع اربیوم، برای دونوع فیبر با دو طول موج پمپ ۰/۹۸ و ۱/٤۸ میکرومتر برای توانهای خروجی ۱۰ تا ۵۰ میلی وات با گام ۵ میلی وات، به وسیله روش ذکر شده تعیین شده است و برای پیدا کردن توزیع اربیوم به صورت تابعی از شعاع مغزی فیبر، با روشهای درون یابی عددی، تابع منحصر به فرد زیر که با دقت بیشتر از ۹۹/۵٪ بر تمام این توزیعها منطبق است، به دست آمده است[۱۰]:

$$\rho(r) = a + br^2 + c(e^r + e^{-r}) \,. \qquad (۹)$$

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 ۰/۹۸ و ۱/٤۸ میکرومتر و توانهای ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ میلی وات نشان می‌دهد. مقدار ضریب b منفی است و این نشان می‌دهد که مقدار تابع با افزایش شعاع، کاهش می یابد. برای اجتناب از تأثیر متقابل بین یونهای اربیوم که باعث کاهش راندمان تقویت کنندگی فیبر می‌شود، حداکثر مقدار چگالی اربیوم $۱۰^{۲۵}\ \frac{\text{ion}}{\text{m}^۳}$ در نظر گرفته شده است. این انتخاب اثری برکلی بودن نتایج نمی‌گذارد.
بنابراین در حالت کلی می‌توان یک چگالی نرمالیزه را به این صورت معین کرد.

$$\rho_{normalized} = \frac{\rho(r)}{\rho_{\max}} \qquad (۱۰)$$

۴. بهرهٔ تقویت و ضریب بهرهٔ تقویت فیبرهای اربیومی با توزیع بهینه

در این بخش بهرهٔ تقویت فیبرهای با توزیع یکنواخت اربیوم و توزیع بهینهٔ اربیوم در طول موج ۱/۵۳۱ میکرومتر را شبیه سازی می کنیم تا بتوانیم مقایسه‌ای بین بهرهٔ تقویت این دو توزیع در فیبر اربیومی داشته باشیم. توزیع پله ای اربیوم را برای فیبر به این صورت در نظر می گیریم:

$$\rho(r) = \begin{cases} \rho_{max} & r \le a \\ . & r > a \end{cases}$$

و توزیع بهینه محاسبه شدهٔ اربیوم به این شکل نمایش داده می‌شود:

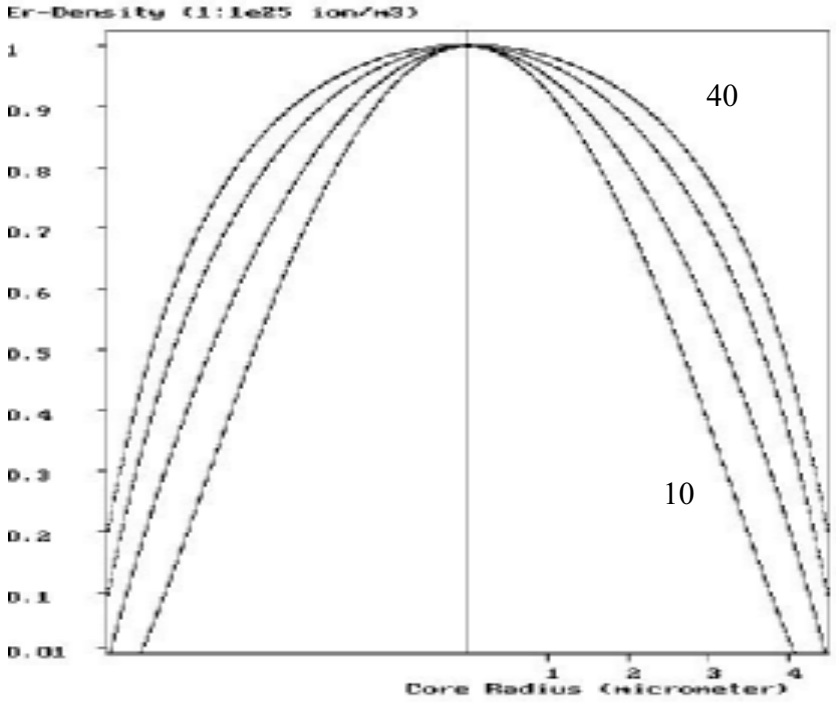
$$\rho(r) = \begin{cases} a + br^۲ + c(e^r + e^{-r}) & r \le a \\ . & r > a \end{cases}$$

برای شبیه‌سازی بهرهٔ تقویت فیبرهای اربیومی از مدلهایی که برای این هدف پیشنهاد شده وبر اساس سیستم لیزر سه ترازی یونهای اربیوم بنا شده است کمک می‌گیریم. نتایج حاصله از شبیه‌سازی با این مدلها تطابق خوبی با نتایج تجربی داشته است [۷]. در اینجا برای محاسبه بهرهٔ 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.

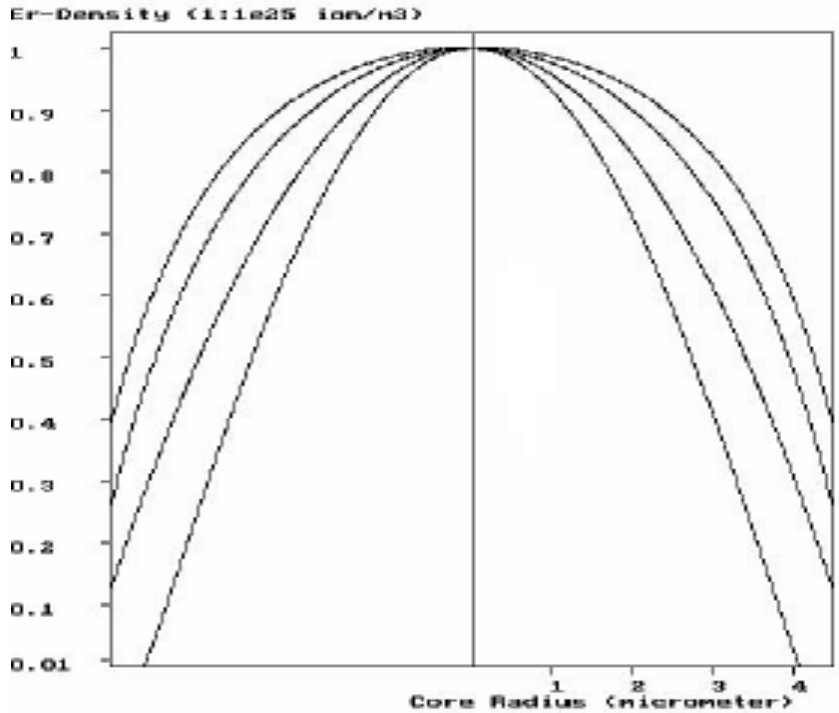
$$\frac{dI_{s,p}}{dz} = g_{s,p} I_{s,p} \,, \qquad (۱۱)$$

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

Downloaded from ijpr-old.iut.ac.ir at 11:00 IRST on Sunday January 10th 2021

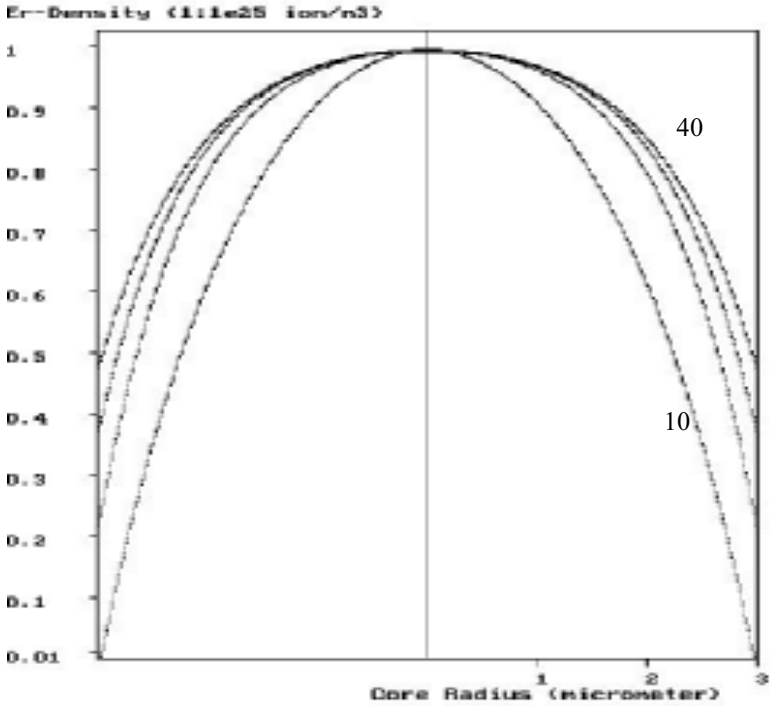


شکل۳. پروفایل بهینهٔ اربیوم برای فیبر رایج تک مدی برای طول موج ۰/۹۸ میکرومتر در ٤ طول بهینهٔ مربوط به توانهای پمپ ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ٤۰ میلی وات.

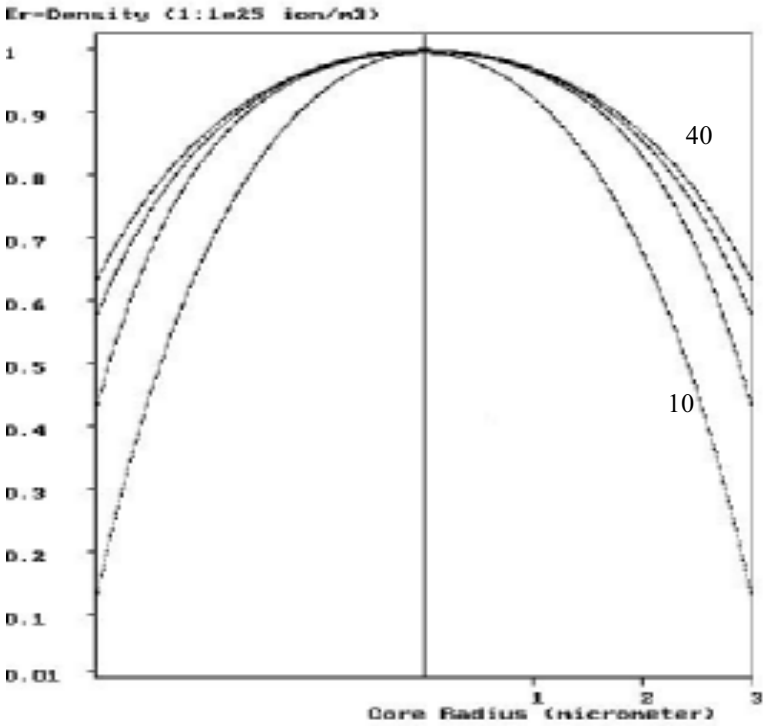


شکل٤. پروفایل بهینهٔ اربیوم برای فیبر رایج تک مدی برای طول موج ۱/٤۸ میکرومتر در ٤ طول بهینهٔ مربوط به توانهای پمپ ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ٤۰ میلی وات.

Downloaded from ijpr-old.iut.ac.ir at 11:00 IRST on Sunday January 10th 2021



شکل۵. پروفایل بهینهٔ اربیوم برای فیبر با پاشندگی انتقال یافته برای طول موج ۰/۹۸ میکرومتر در ٤ طول بهینهٔ مربوط به توانهای پمپ ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ٤۰ میلی وات.



شکل٦. پروفایل بهینهٔ اربیوم برای فیبر با پاشندگی انتقال یافته برای طول موج ۱/٤۸ میکرومتر در ۴ طول بهینهٔ مربوط به توانهای پمپ ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی وات.

Downloaded from ijpr-old.iut.ac.ir at 11:00 IRST on Sunday January 10th 2021

$$g_p = -2\pi\sigma_a^p \int_0^\infty \rho(r)\,\psi_p(r)\,N_1(r,z)\,dr, \qquad (12)$$

$$g_s = 2\pi\sigma_e^s \int_0^\infty \rho(r)\,\psi_s(r)\,[N_2(r,z) - \frac{\sigma_a^s}{\sigma_e^s} N_1(r,z)]\,rdr\,. \qquad (13)$$

N_1 و N_2 جمعیت نرمالیزهٔ یونها در تراز پایه و تراز برانگیخته می باشند. با جاگذاری N_1 و N_2 در معادلات (۱۲) و (۱۳) و حل همزمان معادلهٔ (۱۱) برای پمپ و سیگنال می‌توان بهرهٔ تقویت را برحسب توان پمپ به‌دست آورد. مقایسهٔ بین بهرهٔ تقویت فیبرهای اربیومی با توزیع پله‌ای اربیوم و توزیع پله‌ای محدود شده[1] اربیوم 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 به‌دست آمده در این بخش مقادیر سطح مقطع جذب و گسیل پمپ و سیگنال به‌دست آمده در مرجع [۶] را در محاسبات به کار گرفته‌ایم.

شکلهای ۷، ۸ ، ۹ و ۱۰، منحنی بهرهٔ 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 اربیوم پله‌ای (خط پر) و توزیع بهینه اربیوم به‌دست 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 به‌دست آمده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود با توزیع بهینه، بهرهٔ تقویت افزایش قابل توجهی مخصوصاً در حالت پمپاژ پایین نشان می‌دهد و نشاندهندهٔ 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 مشاهدهٔ دقیقتر بازدهی پمپ، ضریب بهرهٔ تقویت که عبارت است از حداکثر نسبت بهرهٔ تقویت به توان پمپ خورانده شده، محاسبه شده است. ضریب بهرهٔ تقویت برای توزیع بهینه اربیوم و طولهای بهینهٔ 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 پله ای، افزایش یافته است که این نسبت برای طول موج پمپ ۱/۴۸ میکرومتر به‌ترتیب ۱/۹ ، ۱/۳ ، ۱/۲۵ و ۱/۲ است. نکتهٔ قابل توجه افزایش تقریباً یکسان ضریب بهرهٔ تقویت برای دو طول موج پمپ است.

جدولهای ۴ و ۵، طول بهینهٔ فیبر اربیومی SMF با توزیعهای اربیوم 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 مقایسهٔ طولهای بهینه مشاهده می‌شود که با انتخاب توزیع بهینهٔ اربیوم، طول بهینهٔ فیبر نسبت به حالت پله‌ای برای هر پمپ مشخص تقریبا به دو تا سه برابر افزایش پیدا می‌کند. در حالی که با انتخاب توزیع اربیوم 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 بهرهٔ تقویت، از افزایش بیش از حد طول بهینهٔ فیبر که با توزیع محدود شده در ۰/۲۵ مغزی به‌وجود می‌آید، نیز جلوگیری می‌شود.

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

۵. نتیجه‌گیری

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

---

۱. Confined erbium density

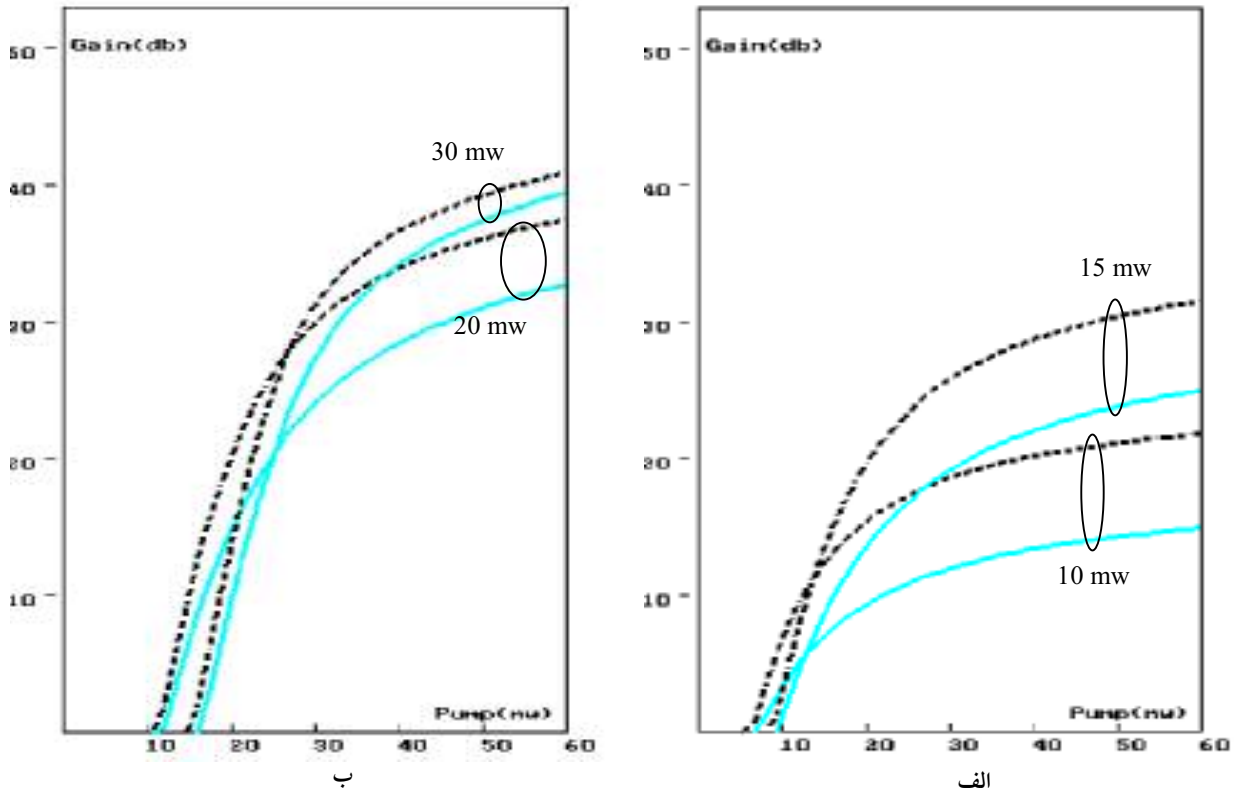
Downloaded from ijpr-old.iut.ac.ir at 11:00 IRST on Sunday January 10th 2021

جدول ۴. طول بهینهٔ فیبر اربیومی SMF برای سه توزیع اربیوم با پمپ ۰/۹۸ میکرومتری بر حسب متر

توزیع اربیوم 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 ۲۵٪ مغزی	۲۶	۳۴	۴۹	۵۸

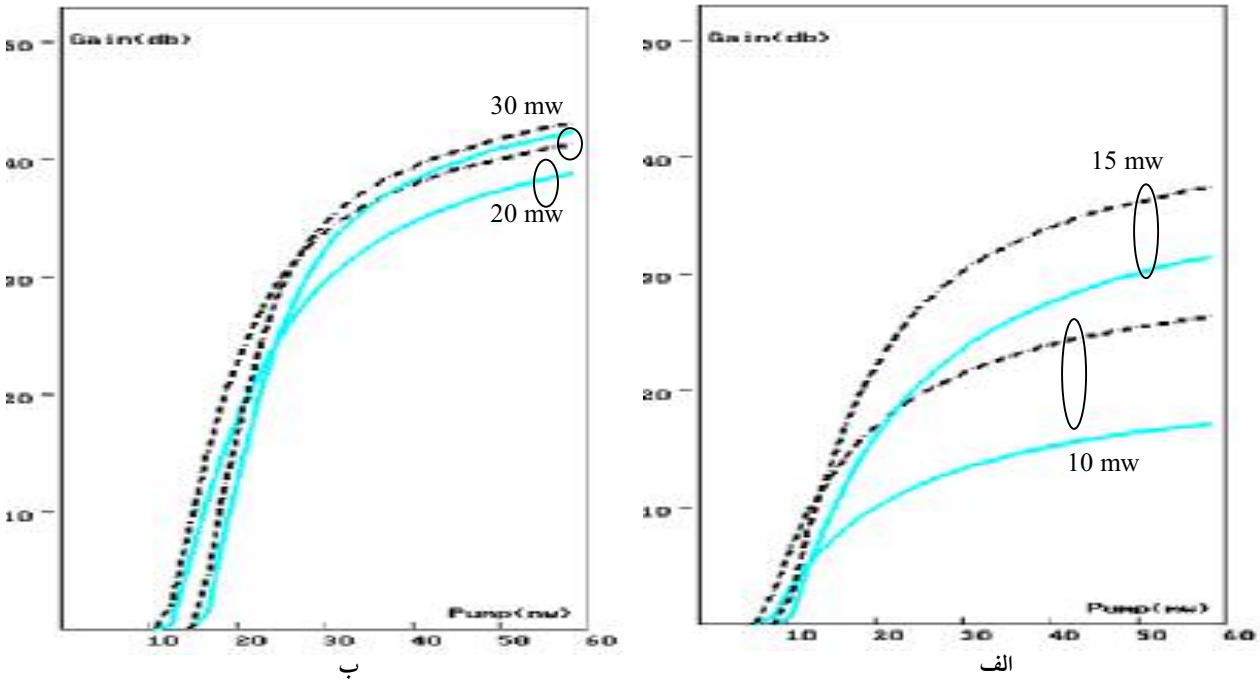
جدول ۵. طول بهینه فیبر اربیومی SMF برای سه توزیع اربیوم با پمپ ۱/۴۸ میکرومتری بر حسب متر

توزیع اربیوم 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 ۲۵٪ مغزی	۳۶	۵۳	۷۱	۸۸

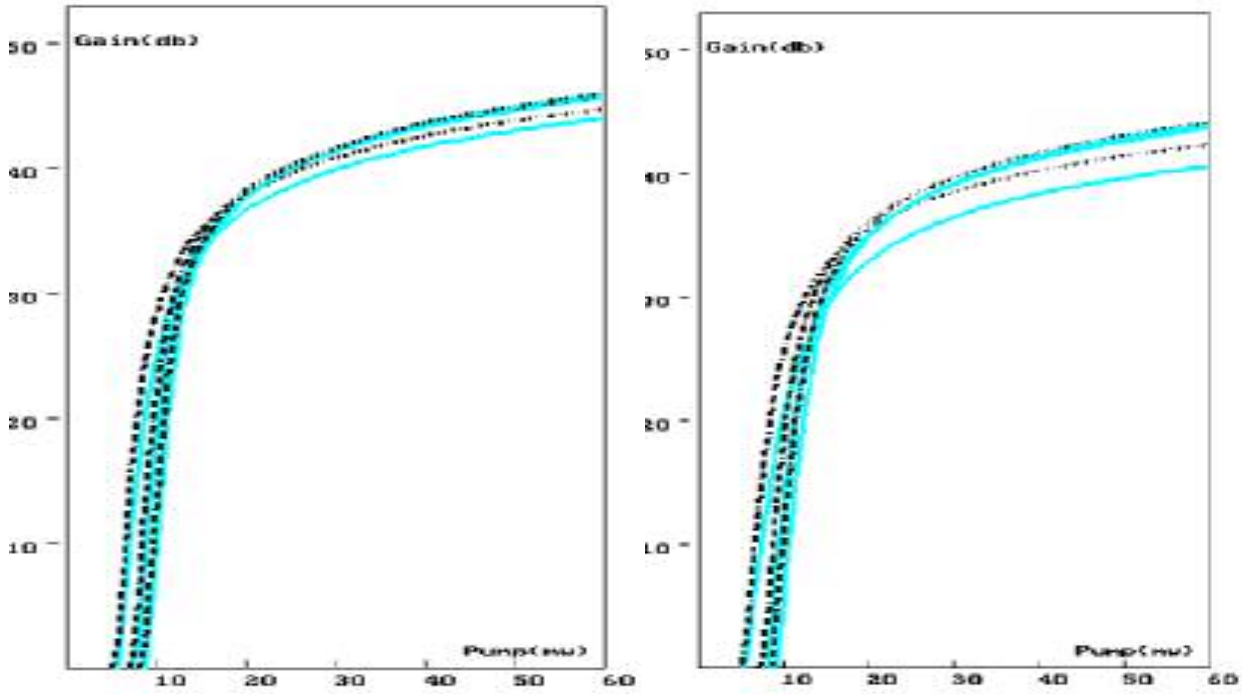


شکل۷. منحنی بهرهٔ تقویت برحسب توان پمپ برای فیبر رایج تک مدی در طول موج پمپ ۰/۹۸میکرومتر، شکل (الف): برای طولهای بهینه در توانهای پمپ ۱۰ و ۱۵ میلی‌وات. شکل (ب): برای طولهای بهینه در توانهای پمپ ۲۰ و ۳۰ میلی‌وات.

Downloaded from ijpr-old.iut.ac.ir at 11:00 IRST on Sunday January 10th 2021



شکل۸ . منحنی بهرهٔ 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 میلی‌وات و شکل(ب): بتوانهای پمپ ۲۰ و ۳۰ میلی وات.



شکل۹. منحنی بهرهٔ 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 میلی‌وات.

شکل۱۰. منحنی بهرهٔ 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 میلی‌وات.

Downloaded from ijpr-old.iut.ac.ir at 11:00 IRST on Sunday January 10th 2021

بـرای فیبـر با پاشندگی انتقال یافته، افزایش چشمگیری در بهرهٔ تقویت در توانهای زیاد پمپ مشاهده نمی‌شود که نتایج به‌دست آمـده بـه نـوبه خـود بـا نتایج گزارش شده در مرجع [۶] تطابق کامـل دارد. همچنین، طول بهینه فیبر اربیومی با توزیع بهینه ۵ تا ۸ برابر کمتر از طول بهینهٔ محاسبه شده برای فیبرهای اربیومی با توزیـع محـدود در ۰/۲۵ مغـزی است که مزیتی دیگر محسوب مـی‌شـود. بـر ایـن بـاوریم کـه هـر موجبـر، یـک توزیـع بهینهٔ مخصـوص به خود دارد که با روش ارائه شده در این مقاله قابل محاسـبه اسـت. در ضمن، این روش می‌تواند برای هر نوع فیبر تقـویت 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.

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.
۹. علیرضـا حسـنی، پایـان نامـهٔ کارشناسـی ارشـد فیـزیک کاربردی،گروه فیزیک دانشگاه تهران، تیرماه ۱۳۷۹.
10. E Arzi, A Hassani and F E Seraji, CLEO/Pacific Rim 2001 Conference, Japan, (2001).