



بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران  
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران  
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی



## تحلیل و بررسی اثر خمش در هم‌شنوایی بین هسته‌های فیبر چند هسته‌ای ناهمگن

علیرضا قانع‌زاده، محمدعلی منصورى بیرجندى

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

چکیده - فیبرهای چند هسته‌ای ناهمگن به‌عنوان یکی از موثرترین روش‌ها برای غلبه بر محدودیت غیرخطی در فیبرهای تک‌مد شناخته شده است. در این مقاله، با استفاده از تئوری تزویج مد و روش تحلیلی مبتنی بر تابع خودهمبستگی نمایی و روش عددی المان محدود به محاسبه هم‌شنوایی، ضریب نسبی چند هسته‌ای (RCMF)، قطر پوشش (CD) و شعاع آستانه خمش ( $R_{pk}$ ) فیبر چند هسته‌ای پرداخته می‌شود. همچنین اثر خمش بر هم‌شنوایی بین هسته‌ای، در چند طول همبستگی بررسی می‌شود. نتایج محاسبات و شبیه‌سازی نشان می‌دهد اختلاف بین ضریب شکست موثر و فاصله بین هسته‌ها بر شعاع خمش آستانه اثر قابل توجهی دارد.

کلید واژه - شعاع خمش، فیبر چند هسته‌ای، هم‌شنوایی

## Analysis and investigation the effect of bending in intercore crosstalk of heterogeneous multi-core fiber

Alireza Ghaneizadeh, Mohammad Ali Mansouri-Birjandi

Department of Electrical and Computer Engineering, University of Sistan and Baluchestan, zahedan

Abstract- The multi-core fiber is as one of the most effective methods to overcome the Nonlinear limitations single-mode fiber. In this paper, using the coupled mode theory and numerical analysis based on the finite element method and the exponential autocorrelation function to calculate crosstalk, the relative core multiplicity factor (RCMF), cladding diameter (CD) and threshold of bending radius ( $R_{pk}$ ) in multi-core fiber. investigate the effect of bending in different correlation lengths on the crosstalk. Calculation and simulation results show that the difference between the effective refractive index and core-to-core distance significant effect on the bending radius threshold.

Keywords: bending radius, crosstalk, multi-core fiber

## ۱- مقدمه

در شکل ۱، سطح مقطع چیدمان هسته‌های یک فیبر هفت هسته‌ای نشان داده می‌شود. اخیراً، تئوری تزویج مد و تزویج توان، برای ارزیابی هم‌شنوایی بین هسته‌ای در فیبر چند هسته‌ای معرفی شده است [۵]. در سال ۲۰۱۱، برای تحلیل و محاسبه ضریب تزویج توان سه روش مبتنی بر تابع خودهمبستگی نمایی، تابع خودهمبستگی گوسین و تابع خودهمبستگی مثلثی برای توصیف نقوص تصادفی در جهت فیبر ارائه شده است. خمش و پیچش فیبر چند هسته‌ای وابستگی زیادی به طول همبستگی توابع خودهمبستگی دارد [۶]. تغییر خمش و پیچش فیبر باعث تغییر اختلاف ثابت انتشار بین هسته‌های نامساوی فیبر چند هسته‌ای ناهمگن می‌شود. به شعاع خمشی که اختلاف ثابت انتشار بین هسته‌ای صفر می‌شود، شعاع خمش آستانه  $(R_{pk})$ ، گفته می‌شود. چنانچه شعاع خمش فیبر کمتر از مقدار شعاع خمش آستانه باشد، هم‌شنوایی به علت هم‌فازی بین هسته‌ای کاهش می‌یابد. از طرفی اگر در منطقه‌ای که شعاع خمش فیبر از شعاع خمش آستانه بزرگتر باشد هم‌شنوایی با خواص آماری بدست می‌آید. بنابراین در فیبر ناهمگن یک اختلاف ضریب شکست بین هسته‌ای زیاد برای انتقال شعاع خمش آستانه به مقادیر کوچکتر لازم است [۲]. برای فیبر چند هسته‌ای کم تلف، ضریب تزویج مد  $(k)$  باید متقارن باشد [۶]،  $k_{nm}=k_{mn}$ ، هسته‌های مجاور با پارامترهای  $m$  و  $n$  مشخص می‌شوند. البته برای هسته‌های نابرابر، ثابت انتشار هسته‌ها نامساوی هستند، بنابراین وقتی از معادلات تزویج مد مرسوم بدون جملات مرتبه بالاتر استفاده می‌شود، کل توان در آن حفظ نمی‌شود. برای حل این مشکل، از جمله‌ی تزویج توان  $C_{mn}=C_{nm}$ ، استفاده می‌شود. به منظور برقراری قانون بقای توان، در تعریف ضریب تزویج مد بازنگری شده و مقدار آن را با متغیر  $k_{mn}$  نشان داده می‌شود. ضریب تزویج توان  $k_{nm}$  با روابط زیر بیان می‌شود [۶،۷]. محاسبات هم‌شنوایی در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر انجام شده است.

$$k_{mn} = \frac{\omega \epsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (N^2 - N_n^2) E_m^* \cdot E_n dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u_z \cdot (E_n^* \times H_n + E_n \times H_n^*) dx dy} \quad (1)$$

$$k_{nm} = k_{mn} - C_{mn} \Delta \beta_{mn} \quad (2)$$

$$K_{mn} \equiv k_{mn} - C_{mn} \frac{\Delta \beta_{mn}}{2} \quad (3)$$

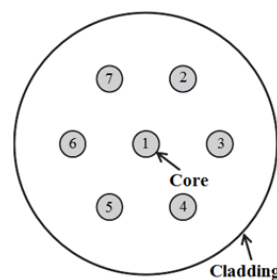
افزایش ترافیک اینترنت در سال‌های اخیر، منجر به افزایش ظرفیت انتقال داده برای تأمین حجم بالای ترافیک انتقال داده در سال‌های آینده شده است. با توجه به محدودیت فیزیکی ظرفیت انتقال داده در فیبر تک‌مد [۲،۱]، حداکثر ظرفیت انتقال داده به  $100 \text{ Tbit/s}$  رسیده است. برای برطرف کردن این محدودیت، تکنولوژی جدید مدولاسیون فضایی مبتنی بر فیبرهای چند هسته‌ای یک گزینه ساده است، زیرا در سمت گیرنده نیاز به یک پردازشگر قوی سیگنال چند ورودی و چند خروجی ندارد. اخیراً، فیبرهای چند هسته‌ای با حداکثر مقدار  $1 \text{ Pbit/s}$  ساخته شده‌اند [۴،۳]. موضوع اساسی برای انتقال داده با ظرفیت بالا در فیبرهای چند هسته‌ای، با در نظر گرفتن هم‌شنوایی پایین بین هسته‌ای، افزایش تعداد هسته‌ها می‌باشد تا هر هسته به عنوان یک کانال مستقل عمل کند [۳].

در این مقاله، ابتدا با کمک تئوری تزویج توان به تحلیل فیبر چند هسته‌ای ناهمگن پرداخته شده است. سپس با استفاده از روش عددی المان محدود و حل معادلات تئوری تزویج مد، ضریب تزویج بازتعریف شده و شعاع خمش آستانه محاسبه شده است. در انتها هم‌شنوایی در شعاع خمش مختلف و طول‌های همبستگی متفاوت در فیبرهای چند هسته‌ای ناهمگن بررسی شده است.

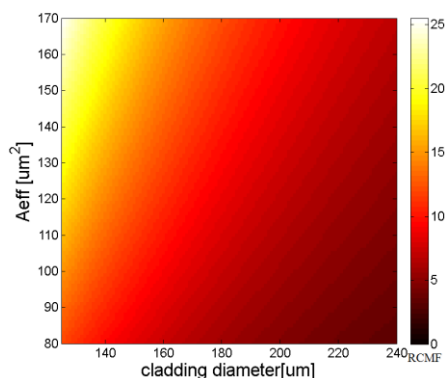
## ۲- مبانی تئوری و تحلیل فیبر چند هسته‌ای

### ناهمگن

مهمترین مسئله در فیبرهای چند هسته‌ای کاهش هم‌شنوایی بین هسته‌ای است. یک بیان تحلیلی از ضریب تزویج توان متوسط مبتنی بر تابع خود همبستگی نمایی برای محاسبه‌ی هم‌شنوایی بین هسته‌ای در فیبر چند هسته‌ای ارائه شده است.

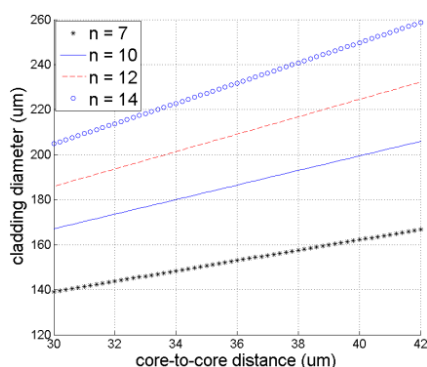


شکل ۱: سطح مقطع فیبر هفت هسته‌ای



شکل ۲: مقدار RCMF برای Aeff و قطر پوشش مختلف در فیبر ۱۲ هسته‌ای

در شکل ۳، با توجه محدوده استاندارد، محاسبات برای فیبر با مقدار OCT برابر  $35\mu m$  انجام گرفته است.



شکل ۳: اثر قطر پوشش فیبر بر روی فاصله بین هسته‌ای

### ۳- تحلیل اثر شعاع خمش فیبر چند هسته‌ای ناهمگن در هم‌شنوایی

در این بخش، فیبر چند هسته‌ای ناهمگن با هسته‌هایی متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. ابتدا در شکل ۴، وابستگی شعاع آستانه خمش به فاصله بین هسته‌ها برای چند مدل فیبر با اختلاف ضریب شکست موثر بین هسته‌ای متفاوت ( $\Delta n_{eff}$ ) محاسبه شده است. همانطور که در شکل ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، نتایج محاسبات برای ساختار فیبر هفت هسته‌ای ناهمگن به طول  $50m$ ، فاصله بین هسته‌ها  $35\mu m$ ، برای اختلاف ضریب شکست موثر بین هسته مرکزی و سایر هسته‌ها  $0.367$  درصد انجام شده است و وابستگی هم‌شنوایی به شعاع خمش از هسته مرکزی به هسته‌های بیرونی محاسبه گردیده است.

$$K_{nm} \equiv k_{nm} - C_{nm} \frac{\Delta\beta_{nm}}{2} = k_{nm} + C_{mn} \frac{\Delta\beta_{mn}}{2} \quad (4)$$

$$K_{mn} = \frac{k_{mn} + k_{nm}}{2} = K_{nm} \quad (5)$$

$$h_{nm} = K_{nm}^2 S(\Delta\beta) \quad (6)$$

در معادله (۱)، بردار واحد در راستای انتشار، ضریب شکست هسته‌ای  $n$ ، ضریب شکست کل موجبر، ضریب گذردهی الکتریکی در خلاء و فرکانس زاویه‌ای به ترتیب با پارامترهای  $\omega$ ،  $\epsilon$ ،  $N$ ،  $N_n$ ،  $u_z$  و  $H$  و  $E$  به ترتیب میدان مغناطیسی و الکتریکی است. در معادله (۶)،  $\Delta\beta$  اختلاف ثابت انتشار بین هسته‌های مجاور و  $S(\Delta\beta)$  چگالی طیف توان که تبدیل فوریه از تابع خودهمبستگی است.

شعاع آستانه‌ی خمش با معادله‌ی  $R_{pk} = n_{eff} \Lambda / \Delta n_{eff}$  محاسبه می‌شود که  $n_{eff}$  و  $\Delta n_{eff}$  به ترتیب ضریب شکست موثر هسته و اختلاف ضریب شکست موثر بین هسته‌های نابرابر و  $\Lambda$  فاصله بین هسته‌ای است. ضریب چند هسته‌ای یا CMF (core multiplicity factor) برای محاسبه تعداد هسته‌ها و مقایسه آنها در فیبر چند هسته‌ای به صورت زیر تعریف می‌شود [۸].

$$CMF = \frac{n A_{eff}}{\pi[(\Lambda/\sin(\frac{\pi}{n})) + 2OCT]/2]^2} \quad (7)$$

$n$  تعداد هسته‌ها با سطح مقطع موثر  $A_{eff}$  و فاصله لبه پوشش فیبر تا مرکز هسته‌ی لایه بیرونی فیبر با OCT (outer cladding thickness) مشخص می‌شود. نسبت پارامتر CMF یک فیبر چند هسته‌ای به فیبر تک هسته‌ای استاندارد با سطح مقطع موثر  $80\mu m^2$  و قطر پوشش فیبر  $125\mu m$  را با پارامتر نسبی RCMF (Relative CMF) محاسبه می‌شود [۹].

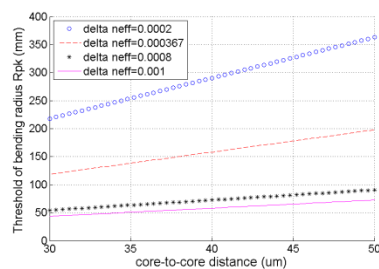
در شکل ۲، نتایج محاسبه RCMF برای فیبر ۱۲ هسته‌ای با تغییر قطر پوشش از  $125\sim 240\mu m$  و سطح مقطع موثر  $A_{eff}$  برای مقادیر  $80\sim 170\mu m^2$  نشان داده شده است. به منظور تضمین قابلیت مکانیکی و کاهش احتمال خطای فیبر، قطر پوشش فیبر حدود از  $225\mu m$  بیشتر باشد [۱۰]. با کاهش فاصله بین هسته‌ای، هم‌شنوایی افزایش و قطر پوشش فیبر کاهش می‌یابد که اثر تغییرات فاصله بین هسته‌ای از  $30\sim 42\mu m$  روی قطر پوشش فیبر برای تعداد مختلف هسته فیبر در شکل ۳ مشخص شده است.

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله، پارامترهای مهم فیبر نوری چند هسته‌ای از جمله سطح مقطع موثر، قطر پوشش، فاصله بین هسته‌ای بررسی شد. نتایج محاسبات نشان می‌دهد هم‌شنوایی فیبر چند هسته‌ای ناهمگن به طول ۵۰ متر و طول موج ۱۵۵۰ نانومتر، شدیداً به اختلاف ضریب شکست موثر بین هسته‌ها و طول همبستگی وابسته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد، اگر شعاع خمش کمتر از شعاع آستانه خمش باشد، به طول همبستگی غیر وابسته است و در منطقه غیر همفاز که شعاع خمش بیشتر از شعاع آستانه است، هم‌شنوایی از خواص آماری و با افزایش طول همبستگی کاهش می‌یابد.

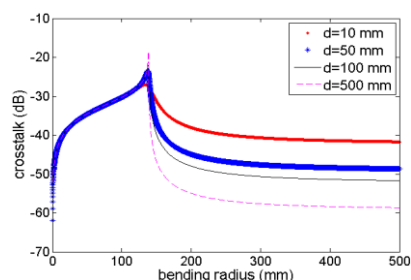
#### مراجع

- [1] R.J. Essiambre, R.W. Trach, "Capacity trends and limits of optical communication networks", **Proceedings of the IEEE**, Vol. 100, Issue. 5, pp. 1035-1055, 2012.
- [2] K. Saitoh, M. Koshihba, K. Takenaga, S. Matsuo, "Homogeneous and Heterogeneous Multi-core Fibers" **IEEE Photonics Society Conference**, Seattle .pp. 210-211, 2012.
- [3] F. Ye, J. Tu, K. Saitoh, T. Morioka, "Simple analytical expression for crosstalk estimation in homogeneous trench-assisted multi-core fibers", **Optics Express**, Vol. 22, No. 19, pp. 23007-23018, 2014.
- [4] I. Morita, K. Igarashi, T. Tsuritani, "1Exabit/s-km Transmission with Multi-core Fiber and Spectral Efficient Modulation Format" **IEEE Opto-Electronics and Communications Conference**, pp. 316-318, Melbourne, 2014.
- [5] M. Koshihba, K. Saitoh, K. Takenaga, S. Matsuo, "Analytical Expression of Average Power-Coupling Coefficients for Estimating Intercore Crosstalk in Multicore Fibers" , **IEEE Photonics Journal**, Vol. 4, No.5, pp. 1987-1995, 2012.
- [6] M. Koshihba, K. Saitoh, K. Takenaga, S. Matsuo, "Multi-core fiber design and analysis: coupled-mode theory and coupled-power theory", **Optics Express**, Vol. 19, No. 26, pp. B102-B111, 2011.
- [7] M. Koshihba, K. Saitoh, K. Takenaga, S. Matsuo, "Recent progress in multi-core fiber design and analysis", **IEEE Opto-Electronics and Communications Conference**, Korea, pp. 557-558, 2012.
- [8] J. Tu, K. Saitoh, M. Koshihba, K. Takenaga, S. Matsuo, "Optimized Design Method for Bend-Insensitive Heterogeneous Trench-Assisted Multi-Core Fiber With Ultra-Low Crosstalk and High Core Density", **Lightwave Technology**, Vol. 31, No. 15, pp.2590-2598, 2013.
- [9] J. Tu, K. Saitoh, M. Koshihba, K. Takenaga, S. Matsuo, "Design and analysis of large-effective-area heterogeneous trench-assisted multi-core fiber", **Optics Express**, Vol. 20, No. 14, pp. 15157-15170, 2012.
- [10] S. Matsuo, K. Takenaga, Y. Arakawa, Y. Sasaki, S. Tanigawa, K. Saitoh, and M. Koshihba, "Large-effective-area ten-core fiber with cladding diameter of about 200 $\mu$ m," **Optic Letter**, Vol. 36, No. 23, pp. 4626-4628, 2011.



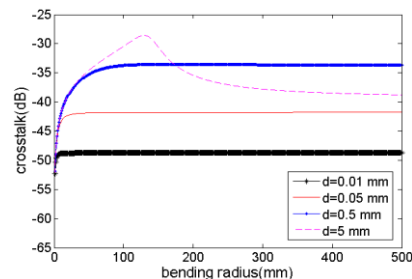
شکل ۴: شعاع خمش آستانه بر حسب فاصله بین هسته‌ای در مقادیر اختلاف ضریب شکست موثر بین هسته‌ای متفاوت

هم‌شنوایی جهت مقایسه‌ی طول همبستگی متفاوت از ۱/۰ mm تا ۵۰۰ mm در مسافت ۵۰ m محاسبه گردید.



شکل ۵: هم‌شنوایی فیبر هفت هسته ناهمگن با طول همبستگی (d). بر حسب تغییرات شعاع خمش با شرایط ذکر شده در شکل

نتایج نشان می‌دهد در منطقه هم‌فازی که شعاع خمش کمتر از شعاع آستانه است، طول همبستگی در هم‌شنوایی تأثیر نداشته و با کاهش شعاع خمش، هم‌شنوایی کاهش می‌یابد. ولی در منطقه‌ی غیرهمفاز که شعاع خمش بیش از شعاع آستانه می‌شود، طول همبستگی در هم‌شنوایی تأثیر زیادی می‌گذارد و هم‌شنوایی از خواص آماری و با افزایش طول همبستگی کاهش می‌یابد. چنانچه طول همبستگی از حد مجاز کمتر شود، شعاع خمش آستانه در هم‌شنوایی تأثیر ندارد.



شکل ۶: هم‌شنوایی فیبر هفت هسته ناهمگن با طول همبستگی (d). بر حسب تغییرات شعاع خمش با شرایط ذکر شده در شکل