Document Type: Full length research Paper
Pages: 37-47

Design of Bend-Insensitive Holey Optical Fibers for Fiber-to-the-Home Networks

Fateme Asghari*

Department of Physics Education, Farhangian University,
P.O. Box 14665-889, Tehran, Iran

Received: 28.06.2025 Final revised: 30.06.2026 Accepted: 01.09.2026 Published On-Line: 05.09.2026

DOI: 10.22055/jrmbs.2026.20970

Abstract

Fiber-to-the-Home (FTTH) technology has significantly enhanced the capacity of optical communication systems by enabling high-speed and high-bandwidth data transmission directly to end users. In order to achieve this technology, fibers with the lowest bending and splice losses are required. In this paper, the losses of bending and splice joints in single mode optical fibers have been investigated with a variety of designs, such as holey fibers, nanoscale optical fibers, and micro structured optical fibers. By comparing the losses of these fibers, we chose the best fiber with the lowest losses in designing FTTH that is used for two purposes of reducing costs and improving optical network performances. These fibers have advantages such as low bending radius, wavelength and mode field diameter, which can be effective in minimizing bending losses.

Keywords: FTTH, Holey and micro structured optical fibers, nanoscale optical fibers, bending loss and radius, splice loss

* Corresponding Author: asghari@cfu.ac.ir

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

طراحی و شبیه‌سازی تارهای نوری حفره‌دار تک‌مُد غیرحساس به‌خمش جهت استفاده در سیستم تار نوری-تا-خانه

فاطمه اصغری*

گروه آموزش فیزیک، دانشگاه فرهنگیان، صندوق پستی ۸۸۹ -۱٤٦٦٥ تهران، ایران

دریافت: ۱٤۰٤/۰٤/۰۷ ویرایش نهائی: ۱٤۰۵/۰٤/۰۹ پذیرش: ۱٤۰۵/۰٦/۱۰ انتشار بر خط: ۱٤۰۵/۰٦/۱٤
DOI: 10.22055/jrmbs.2026.20970

چکیده

سیستم تار نوری-تا-خانه این امکان را برای ما فراهم می‌سازد تا با استفاده از این فناوری انتقال اطلاعات را به‌حداکثر برسانیم. برای به‌دست آوردن این فناوری نیاز به‌تارهای نوریی با کم‌ترین تلفات خمش و اتصال است. در این مقاله، میزان تلفات خمش و اتصال در تارهای نوری تک مد با طراحی‌های گوناگون اعم از تارهای نوری حفره‌دار، تارهای نوری نانومهندسی و تارهای نوری میکروساختار نوری با ۱۲ حفره بررسی شده است. با مقایسه تلفات این نوع تارهای نوری بهترین تار نوری با کم‌ترین تلفات را انتخاب کردیم تا بتوانیم هزینه‌های نصب را به‌حداقل برسانیم و کارایی سیستم را بهبود ببخشیم. قابل ذکر است این تارهای نوری علاوه بر مزایایی که دارند دارای پارامترهای وابسته‌ای هستند. این پارامترهای مهم وابسته شامل شعاع خمش مجاز (دارای بازهٔ معین)، طول موج و قطر میدان مد هستند که در به‌حداقل رساندن تلفات خمشی تأثیر بسیاری دارند.

کلیدواژگان: تارهای نوری حفره‌دار، تارهای نوری میکروساختار نوری با دوازده حفره، تارهای نوری نانومهندسی، تلفات خمش، تلفات اتصال، تار نوری-تا-خانه

مقدمه

تارهای نوری تک‌مد غیرحساس به‌خمش برای کاربرد در شبکه تار نوری-تا-خانه (FTTH[1]) مناسب هستند، زیرا می‌توانند هزینه‌های نصب را به‌حداقل برسانند [۱]. در سال‌های اخیر، افزایش ظرفیت انتقال داده، توسعه شبکه‌های دسترسی نوری و گسترش خدمات مبتنی بر اینترنت پرسرعت، طراحی تارهای نوری مقاوم در برابر خمش را به‌یکی از مهم‌ترین موضوعات پژوهشی تبدیل کرده است. در شبکه‌های تار نوری، مسیر سیم‌کشی معمولاً شامل خم‌های متعدد با شعاع کوچک در داخل جعبه‌های توزیع، ساختمان‌ها، و تجهیزات است. در چنین شرایطی، افزایش تلفات خمشی می‌تواند موجب افت توان دریافتی، کاهش کیفیت سیگنال و افزایش هزینه نگهداری شبکه شود. بنابراین طراحی تارهای نوری با کمترین حساسیت نسبت به خمش، علاوه بر افزایش عملکرد، موجب کاهش هزینه‌های اجرایی نیز خواهد شد. برای نصب و سیم‌کشی در خانه، تارهای نوری مورد استفاده باید دارای حداقل تلفات خمشی کم‌تر از ۰٫۱ dB/turn باشند [۲]. برای کاهش تلفات خمشی در تارهای نوری تک‌مد، طراحی تار نوری حفره‌دار پیشنهاد شده است [۳،٤].

* نویسندهٔ مسئول: asghari@cfu.ac.ir

[1] Fiber-to-the-home

باز نشر این مقاله با ذکر منبع آزاد است.
این مقاله تحت مجوز کریتیو کامنز تخصیص ٤.۰ بین‌المللی می‌باشد

یکی از تارهای نوری طراحی شده در این فناوری، تار نوری غیر حساس به‌خمش در ساختار نوری نانومتری است که در شعاع خمش ۵mm و طول‌موج ۱۵۵۰nm، تلفات خمشی را به کمتر از ۰٫۱ dB/turn می‌رساند [۵] و تار نوری دیگر طراحی شده، تارهای نوری کریستال فوتونی است [٦] که به‌تارهای نوری حفره‌دار یا تار نوری میکروساختار نوری نام‌گذاری شده‌اند. از این نوع تار نوری برای اتصال با تار نوری تک‌مد استفاده می‌شود. در این طراحی شعاع خمش ۵mm، قطر میدان مد ۹٫۳μm در طول‌موج ۱٫۵۵μm و طول موج قطع ۱٫۱μm اندازه‌گیری شده است که تلفات خمشی کم‌تر از ۰٫۰۱۱dB/turn به‌دست آمده است و برای شعاع خمش ۵mm و طول‌موج ۱٫۵۵μm، تلفات اتصال ۰٫۰۸dB به‌دست آمده است [۷]. نوع دیگر از تارهای نوری طراحی شده، تار نوری میکروساختار نوری با ۱۲ حفره است. تلفات خمشی تار نوری میکروساختار نوری با ۱۲ حفره در شعاع خمش۲٫۵mm کم‌تر از ۰٫۱dB اندازه‌گیری شده است [٤].

در این مقاله، به‌مقایسه این سه نوع تار نوری طراحی شده می‌پردازیم که در سیستم تار نوری-تا-خانه به‌کار می‌روند. طبق اندازه‌گیری‌های داده شده، حداقل تلفات خمشی برای هر تار نوری با وابستگی آنها به پارامترهای تار نوری از جمله شعاع خمش، قطر میدان مد و طول موج را گزارش داده‌ایم و سرانجام بهترین نوع طراحی تار نوری را برای به‌کارگیری در فناوری تار نوری-تا-خانه معرفی کردیم نوآوری اصلی این پژوهش در مقایسه کمّی و هم‌زمان سه رویکرد طراحی تار نوری تک‌مد غیرحساس به خمش-تار نوری حفره‌دار، تار نوری نانومهندسی و تار نوری میکروساختار نوری ۱۲ حفره-تحت شرایط یکسان شعاع خمش و طول موج است؛ این سه طراحی در مطالعات پیشین عموماً به‌صورت مجزا و با شرایط اندازه‌گیری متفاوت گزارش شده بودند [۱۲،۱۱،٦،٥،٤] و مقایسه مستقیم آنها در چارچوبی واحد، برای انتخاب گزینه بهینه در کاربرد مشخص شبکه تار نوری-تا-خانه، در این مقاله برای نخستین بار ارائه می‌شود. روش پژوهش، تحلیل مقایسه‌ای مبتنی بر داده‌های عددی و تجربی گزارش‌شده در منابع معتبر است [۱٤-٤]؛ محاسبه تلفات اتصال با استفاده از رابطهٔ ۱ به‌طور مستقل انجام شده، در حالی که مقادیر تلفات خمشی از نتایج شبیه‌سازی/آزمایش گزارش‌شده در منابع یادشده استخراج و در شرایط یکسان با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

بررسی طراحی تارهای نوری غیرحساس به‌خمش

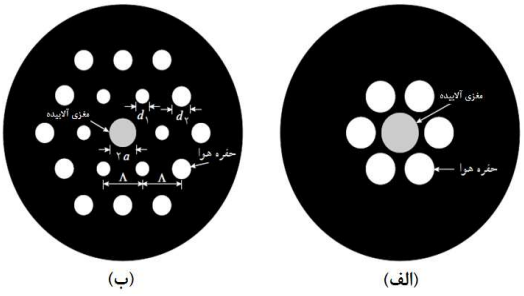
تقاضای روز افزون برای ظرفیت بالا و هزینه‌های پایین سیستم‌های مخابرات نوری، اهمیت سیم‌های نوری با حجم زیاد و انعطاف پذیری بالا را بیش از پیش افزایش داده است. این امر زمانی محقق می‌شود که تارهای نوری را بتوان با حداقل شعاع خمش به‌کار گرفت. در عین حال، تارهای نوری تک مد استاندارد دارای یک نارسایی است که حداقل شعاع خمشی که تار نوری بتواند عملکرد قابل قبولی داشته باشد ۵mm است. بنابراین، در استفاده از این نوع تارهای نوری، فضای زیادی مورد نیاز خواهد بود. از این دیدگاه، تارهای نوری نوری غیرحساس به‌خمش با حداقل شعاع خمش مورد توجه قرار گرفته است [٤،٨].

منظور از تار نوری غیرحساس به‌خمش، تار نوری بدون تلفات نیست، بلکه تاری است که در یک بازهٔ مشخص از شعاع خمشی افزایش تلفات آن نسبت به تارهای نوری متداول بسیار ناچیز باشد. بنابراین ویژگی «غیرحساس به خمش» برای تمامی شعاع‌های خمش صادق نیست و در محدوده‌ای از شعاع خمش که معمولاً کمتراز ۵mm و بیشتر یا مساوی ۲٫۵mm است

برقرار می‌باشد. در این پژوهش نیز مقایسه‌ها بر اساس شعاع‌های خمشی گزارش‌شده در مراجع (به‌ویژه حدود ۵ میلی‌متر) انجام شده است.

برای کاربردها در شبکه تار نوری–تا–خانه، تار نوری باید دارای تلفات خمشی کم، طول موج قطع کوتاه در مدهای بالاتر و قطر میدان مد منطبق با فیبرنوری استاندارد باشد. این ویژگی‌ها با فیبرهای HF به‌دست می‌آیند. از دیدگاه فیزیکی، کاهش تلفات خمشی زمانی امکان‌پذیر است که میدان الکترومغناطیسی مد هدایت‌شده تا حد امکان در ناحیهٔ مغزی باقی بماند و نفوذ آن به غلاف کاهش یابد. هرچه توزیع میدان در غلاف بیشتر باشد، هنگام خم شدن تار نوری بخشی از انرژی از مد هدایت‌شده خارج شده و به‌صورت تابش از دست می‌رود. ازاین‌رو طراحی هندسه غلاف و نحوه توزیع حفره‌های هوا نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش تلفات خمشی دارد.

اخیراً تارهای نوری بلور فوتونی، موسوم به تارهای نوری حفره‌دار یا تارهای ریزساختار نوری مورد توجه خاصی قرار گرفته‌اند. این نوع تارهای نوری دارای ویژگی‌های منحصر به‌فرد هستند که در تارهای نوری معمولی وجود ندارد. وجود حفره‌های هوا باعث ایجاد اختلاف ضریب شکست مؤثر بیشتری میان مغزی و غلاف می‌شود. این اختلاف ضریب شکست موجب افزایش محصورشدگی مد نوری در مغزی شده و حساسیت تار نوری نسبت به خم شدن را کاهش می‌دهد. در نتیجه حتی در شعاع‌های خمشی کوچک نیز بخش عمده توان نوری در داخل مغزی باقی می‌ماند. تار نوری حفره‌دار، با یک لایه از حفره‌های هوا دارای ساختار نوری ساده است. در این ساختار نوری همان‌گونه که در شکل۱ نشان داده شده است، یک مغزی آلاییده به ژرمانیوم با دو لایه حفره‌های هوا که در امتداد محور تار نوری احاطه شده است، که در آن a شعاع مغزی، d_1 و d_2 به‌ترتیب قطرهای لایه‌های درونی و بیرونی هستند و Λ گام حفره است. قابل ذکر است که d_1 و d_2 لزوماً برابر نیستند، ولی Λ در سطح مقطع فیبر یکنواخت است [۸].



شکل۱. الف: نمایش تار نوری حفره‌دار با یک لایه حفره هوا در غلاف ب: با دو لایه حفره هوا در غلاف [۸].

تعداد حلقه‌های حفره‌های هوا، قطر هر حفره و فاصله میان آنها از مهم‌ترین پارامترهای طراحی هستند که مستقیماً بر قطر میدان مد، طول موج قطع و تلفات خمشی اثر می‌گذارند. بنابراین انتخاب مناسب این پارامترها همواره به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی در طراحی تارهای نوری حفره‌دار مطرح است.

در این طراحی، طول موج قطع عددی معین است، که طول موج ۱٦۵ μmدر نظر گرفته می‌شود تا بتوان شعاع خمش مجاز را تعریف کرد، زیرا برای تارهای نوری حفره‌دار تلفات خمشی در طول موج‌های بلندتر، بیشتر است.

اتصال تار نوری تک مد به تار نوری حفره‌دار

ساختار نوری تار نوری حفره‌دار با دو حلقه از حفره‌های هوا که مراکز همه حفره‌های هوا در یک شبکه مثلثی با ارتفاع Λ به‌طور منظم ردیف شده‌اند. تراکم ژرمانیوم درون مغزی ٪۳۷ فرض شده است. در این قسمت می‌خواهیم نشان دهیم که می‌توان با حداقل تلفات تار نوری HF را به تار نوری SMF متصل کرد. تار نوری حفره‌دار به‌این دلیل برای اتصال منتخب شده

است، چون قطر میدان مد هر دو تار نوری برهم منطبق می‌شود و تلفات کم‌تری در نصب خواهیم داشت.

کاهش تلفات خمش با کاهش قطر میدان مد (MFD) همراه است. علت این رفتار آن است که با کاهش قطر میدان مد، بخش بزرگ‌تری از انرژی نوری در ناحیه مغزی متمرکز می‌شود و نفوذ میدان به غلاف کاهش می‌یابد. در نتیجه هنگام خم شدن تار نوری، میزان جفت‌شدگی مد هدایت‌شده به مدهای نشتی کمتر شده و افت خمشی کاهش پیدا می‌کند.همچنان‌که مقدار d_1 افزایش پیدا می‌کند، طول موج قطع هم افزایش پیدا می‌کند. با ثابت در نظر گرفتن d_1 و Λ و تنها متغیر بودن مقدار d_2، می‌توان طول موج قطع و تلفات خمش را بدون تغییر اندازه MFD کنترل کرد.

در اتصال SMF معمولی با تار نوری دیگری، تار نوری HF بهترین گزینه است، زیرا دارای طول موج قطع کوتاه و قطر میدان مد منطبق با SMF است. زمانی‌که فیبر HF با فیبر SMF متصل می‌شود، محل اتصال تلفاتی به‌همراه دارد. برای به‌حداقل رساندن تلفات خمشی و تلفات اتصال، اندازه‌های پارامترهای مربوطه را بیان کرده‌ایم.

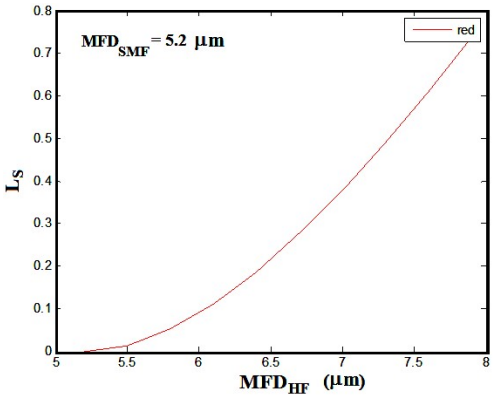
برای این اتصال طول موج معینی به‌اندازهٔ ۱٫۶۵ میکرومتر در نظر گرفته‌ایم. اگر تلفات خمشی برای هر ۱۰ دور پیچش کم‌تر از ۰٫۵ دسی‌بل در طول موج ۱٫۶۵ میکرومتر باشد، آنگاه تلفات خمشی برای هر دور تعیین می‌شود و با کمینه کردن قطر میدان مد تلفات اتصال کل کم‌تر از ۰٫۳ دسی‌بل در طول موج ۱٫۶۵ میکرومتر خواهد بود.

طبق محاسبات انجام شده از با رابطه زیر:

$$L_s = -20\log_{10}\frac{2w_{SMF}w_{HF}}{w_{SMF}^2 + w_{HF}^2} \qquad ۱$$

رابطهٔ۱ نشان می‌دهد که هرچه اختلاف قطر میدان مد میان دو تار نوری کمتر باشد، میزان تلفات اتصال نیز کاهش می‌یابد. به‌همین دلیل در طراحی تارهای مورد استفاده در شبکه‌های تار نوری-تا-خانه، علاوه بر کاهش تلفات خمشی، انطباق قطر میدان مد با فیبر تک‌مد استاندارد نیز اهمیت ویژه‌ای دارد.

که در آن WSMF قطر میدان مد تار نوری SMF، WHF قطر میدان مد تار نوری HF است. در شکل۲، تلفات اتصال تار نوری حفره‌دار برحسب قطر میدان مد محاسبه و ترسیم شده که در آن قطر میدان مد تار نوری SMF برابر با ۵٫۲ میکرومتر در نظر گرفته شده است. قطر میدان مدتار نوری HF را از ۵ تا ۸ میکرومتر متغیر در نظر گرفته‌ایم و با قرار دادن مقدار ثابت قطر میدان مد SMF و مقدارهای متغیر HF در رابطهٔ بالا، مقادیر تلفات اتصال را به‌دست آورده‌ایم [۸].



شکل۲. نمودار تلفات اتصال برحسب قطر میدان مد تار نوری حفره‌دار [۸].

نتیجه محاسبه تلفات اتصال برحسب قطر میدان مد برای تار نوری تک مد یا تار نوری حفره‌دار نشان می‌دهد که قطر میدان مد با تلفات اتصال رابطهٔ مستقیم

دارد. پس می‌توانیم برای اتصال تار نوری تک مد با تار نوری حفره‌دار با در نظر گرفتن یک محدوده مناسب برای قطر میدان مد، تلفات اتصال این دو نوعع فیبر را به‌حداقل برسانیم.

تارهای نوری حفره‌دار می‌توانند پاسخ‌گوی نیاز شبکه‌های تار نوری تا خانه باشند. این تارهای نوری دارای یک مغزی با آلاییده به ژرمانیوم و ۲ لایه به‌دور آن از حفره‌های هوا دارند. تارهای نوری حفره‌دار گزینه خوبی برای اتصال با SMF است و دارای کلیه پارامترهای مهم هستند که برای رسیدن به‌حداقل تلفات خمشی و تلفات اتصال لازم هستند. این پارامترها در جدول۱ آورده شده‌اند [۸].

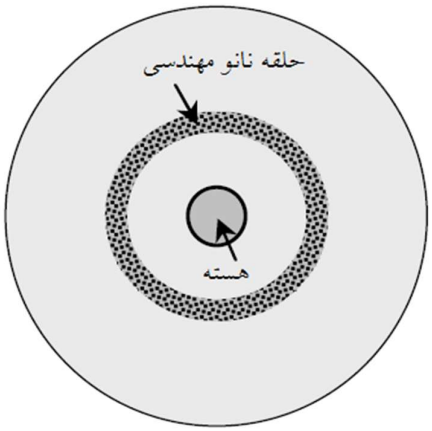
جدول۱. پارامترهای مربوط به اتصال تار نوری تک مد با تار نوری حفره‌دار. [۸].

تلفات اتصال mm	۰٫۰۸
تلفات خمشی dB/turn	۰٫۰۱۱
شعاع خمش mm	۵
طول موج قطع µm	۱٫۱
طول موج کار µm	۱٫۵۵
قطر میدان مد µm	۹٫۳

دلیل انتخاب تار نوری حفره‌دار برای اتصال با تار نوری تک مد این است که تار نوری برای رسیدن به‌حداقل تلفات خمشی و تلفات اتصال باید دارای طول موج قطع کوتاه و قطر مد منطبق با فیبر SMF باشد. این ویژگی در فیبر HF وجود دارد.

بررسی طراحی تار نوری نانومهندسی

این یک فناوری جدید است که به‌فضای طراحی تار نوری مرسوم اضافه شده است. این تار نوری شامل مغزی ژرمانیوم آلاییده و یک حلقهٔ نانومهندسی در غلاف است. حلقه شامل شده از اندازه‌های نانومتری خط‌های هوا در امتداد تار نوری که در شیشه به دور تار نوری پردازش شده، یکی شده است. این حلقه‌های هوا دارای قطرهای چندین صد نانومتری هستند که همان‌طور که در شکل۳ دیده می‌شود با تکه‌های هوا پر شده طراحی شده است [۵].



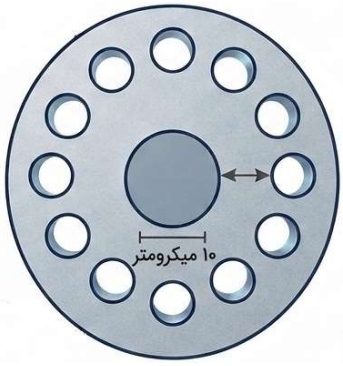
شکل۳. نمودار تار نوری غیرحساس به‌خمش با یک حلقه نانومهندسی [٦].

بررسی طراحی تار نوری میکرو ساختار نوری با ۱۲ حفره

تار نوری میکروساختار نوری با ویژگی‌های جدید و اجزای اپتیکی برجسته می‌تواند مشخصات مربوط به خمش غیرحساس را به‌دست دهد. طبق گزارش‌های داده شده تلفات خمشی تار نوری میکروساختار نوری در شعاع خمش ۲٫۵mm می‌تواند کم‌تراز ۰٫۱dB باشد. ولی تار نوری میکروساختار نوری دارای مشکلاتی است که مربوط به‌ساخت آن می‌شود، مثل چگونه باید

ایجاد حفره‌های هوا را کنترل کرد تا مشخصه پاشندگی مد قطبشی مطلوبی به‌دست آید؛ در مقایسه با تارهای نوری معمولی، تار نوری میکروساختار نوری دارای تلفات اتصال نسبتاً بزرگی است. این مشکلات باعث می‌شود رسیدن به کم‌ترین هزینه در تولید به‌سختی انجام شود، زیرا فرایند تولید تار نوری میکروساختار نوری نسبت به تار نوری معمولی، پیچیده‌تر است.

بنابراین، لازم است یک ساختار نوری جدید طراحی شود همان‌طور که در شکل ٤ نشان داده شده است، که در ساخت دارای فرایند آسانی باشد و کم‌تر تحت تأثیر تغییرات پارامترهای تولید قرار گیرد تا بتوان کاربرد مطلوبی برای این نوع فیبر در صنعت تار نوری تاخانه به‌دست آورد [٤].



شکل٤. ساختار نوری تار نوری ۱۲ حفره‌ای [٤].

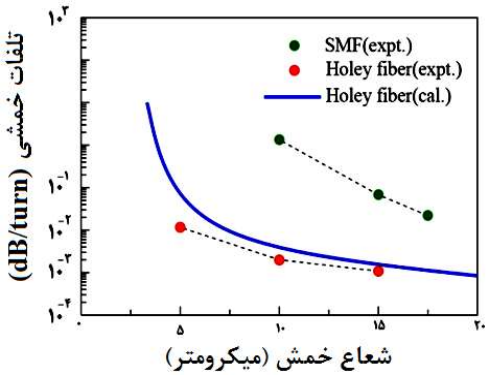
تار نوری میکروساختار نوری با ۱۲ حفره می‌تواند تلفات خمشی را به‌حداقل مقدار برساند. در جدول۲، در شعاع‌های متفاوت با دورهای متفاوت پیچش در طول موج معین تلفات خمشی آورده شده است.

جدول۲. پارامترهای مربوط به تلفات خمشی تار نوری میکروساختار نوری با ۱۲ حفره [٤].

تلفات خمشی (dB)	طول موج (nm)	پیچش	شعاع خمش (mm)
۰٫۸۹	۱۵۵۰	۱ دور	۲
۰٫۸٦	١٦٢٥		
۰٫۷۳	۱۵۵۰	۱۰ دور	۳
۰٫۰٤٤	١٦٢٥		
۰٫۰٤۹	۱۵۵۰	۱ دور	۵
۰٫۰٤۷	١٦٢٥		

بحث و بررسی

شکل۵ به‌طور آزمایشی و نظری ویژگی‌های تلفات خمشی تار نوری HF که تابعی از شعاع خمش در طول موج ۱٫۵۵ میکرومتر را نشان می‌دهد. مشاهد می‌شود تلفات خمشی تار نوری HF خیلی کم‌تر از تار نوری SMF است به‌خصوص برای شعاع خمش کوچک۵ میلی‌متر در ۱٫۵۵میکرومتر که مقدار آن dB / turn ۰٫۰۱۱ است.



شکل۵. ویژگی تلفات خمشی تابعی از شعاع خمش تارهای نوری HF و SMF در طول موج ۱٫۵۵ میکرومتر [۹].

قطر میدان مد تار نوری HF، ۹٫۳ میکرومتر در طول موج ۱٫۵۵ میکرومتر است. این مقدار MFD تار نوری HF کوچک‌تر از قطر میدان مد تار نوری SMF است.

این باید در اتصال تار نوری SMF با تار نوری HF، باعث حداقل تلفات ممکن شود، زیرا تار نوری HF با حفره‌های هوا رمبیده شده است و تقریباً با تار نوری SMF، MFD یکسانی دارد.

این پیشنهاد یک نوع جدید از تارهای نوری مبتنی بر حفره تک مد با خمش غیرحساس را معرفی می‌کند که با دلیل هم اثبات شده است. این تارهای نوری حفره‌دار با مغزی آلاییده و ۲ حلقه حفره با قطرهای متفاوت حفره‌های هوا طراحی شده است.

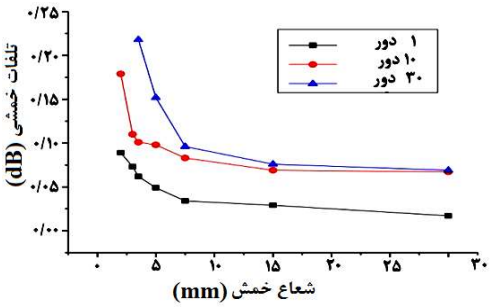
مشاهده می‌شود که تلفات خمشی تار نوری HF خیلی کوچک‌تر از تار نوری SMF است، به‌ویژه برای شعاع خمش کوچک و ۰٫۰۱۱dB/turn برای شعاع خمش ۵mm در طول موج ۱٫۵۵میکرومتر. نتایج محاسبه شده با نتایج تجربی در توافق مطلوبی هستند که نشانگر این است که رویه طراحی نظری ارائه شده معتبر است. مقدار MFD تار نوری HF در طول موج ۱٫۵۵ میکرومتر، ۹٫۳ میکرومتر به‌دست آمده است [۹،۱۰].

تارهای نوری نانو–مهندسی با اندازه‌های نانومتری ساخته شده است. نتایج به‌دست آمده با فرآیند OVD سازگار است. مشخصه‌های اپتیکی این نوع تار نوری در جدول۳ نشان داده شده است. ویژگی‌های این تار نوری در طول موج‌های ۱۳۱۰ و ۱۵۵۰ نانومتر بررسی شده است. مزیت تار نوری نانو–مهندسی در به حداقل رساندن تلفات خمشی و تلفات اتصال است؛ این ویژگی است که برای شبکه‌های FTTH حایز اهمیت است.

جدول۳. مشخصه‌های اپتیکی تار نوری نانو–مهندسی [۱۲].

شیب پاشندگی (ps/nm².km)	۰٫۰۹	۰٫۰۹
طول موج صفر پاشندگی (nm)	۱۳۱۵	۱۳۱۵
طول موج قطع کابل(nm)	۱۲۲۵	۱۲۲۵
ضریب تضعیف (dB/km)	۰٫۳٤	۰٫۲۰
پاشندگی (ps/nm.km)	-	۱۷٫٦
MFD (μm)	۸٫۷	۹٫۷
طول‌موج(nm)	۱۳۱۰	۱۵۵۰

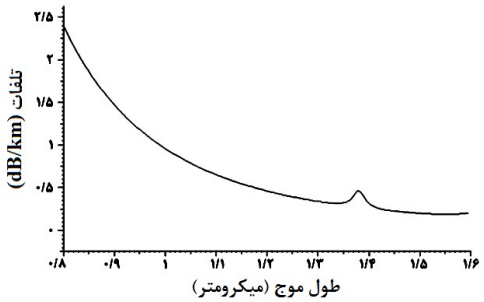
یک نوع جدید از تار نوری میکروساختار نوری را با ۱۲ حفره در غلاف به‌صورت یک شکل ۱۲ضلعی که مغزی آن از ژرمانیوم آلاییده شده بود، معرفی کردیم. که تلفات خمشی این تار نوری میکروساختار نوری در شعاع خمش ۲٫۵میلی‌متر کم‌تر از ۰٫۱ dB است. و این دستاورد خوبی برای جلوگیری از تلفات خمشی است. تلفات خمشی تار نوری میکروساختار نوری را برحسب شعاع خمش در ۱، ۱۰، ۳۰ دور محاسبه شده–است، و در شکل٦ نشان داده شده است [۱۱].



شکل٦. تلفات خمشی برحسب شعاع خمش برای حلقه‌های مختلف در طول موج ۱٫۵۵ میکرومتر [۱۱].

در شکل دیگری تضعیف تار نوری میکروساختار نوری در طول موج‌های ۱۳۱۰ و ۱۵۵۰ نانومتر برحسب طول

موج محاسبه شده و در شکل۷ نشان داده شده است [۱۲].



s

شکل۷. تضعیف طیفی تارهای نوری نوری میکروساختار نوری [۱۲].

سه تار نوری انتخابی را که در مورد ساختار نوری، مزایا و کاربردها در شبکه‌های تار نوری–تا–خانه بررسی کردیم، و تلفات خمشی آن‌ها را نسبت به‌هم در طول موج وشعاع خمش یکسان مقایسه کرده‌ایم. خلاصه تحلیل مقایسه‌ای در جدول٤ ارائه شده است [٤،٥،٧].

جدول٤. مقایسه تارهای نوری نانوساختار نوری و حفره دار و۱۲ حفره [٥،٧،٨].

نوع فیبر	شعاع خمش (mm)	طول موج (nm)	تلفات خمشی (dB)
فیبر نانوساختار نوری	٥	۱٥٥۰	۰٫۱~ ۰٫۳
فیبر حفره‌دار	٥	۱٥٥۰	۰٫۰۱۱
فیبر ۱۲ حفره‌ای	٥	۱٥٥۰	۰٫۰٤۹

نتیجه‌گیری

نتیجه‌گیری کارهای انجام شده در رابطه با تحلیل تارهای نوری تک مد که برای نصب در شبکه FTTH کم‌ترین تلفات خمشی را دارند، می‌پردازیم. سه تار نوری انتخابی را که در مورد ساختار نوری، مزایا و کاربردها در شبکه‌های تار نوری–تا–خانه بررسی کردیم،و تلفات خمشی آن‌ها را نسبت به‌هم در طول موج وشعاع خمش یکسان مقایسه کرده‌ایم.

با توجه و تحلیل بررسی‌های انجام شده در این پژوهش و مقایسه با نتایج قبلی مشاهده شد که هر سه نوع تار نوری در شعاع خمش ٥mm و طول‌موج۱٥٥۰nm دارای تلفات خمشی متفاوتی هستند، تار نوری ۱۲حفره‌ای با تلفات خمشی۰٫۰٤۹ dB نسبت به دو تار نوری دیگر تلفات خمشی کم‌تری در طول موج و شعاع خمش معین دارد. بنابراین، برای کاربرد در شبکه‌های تار نوری–تا–خانه می‌تواند مناسب‌ترین گزینه باشد.

در ادامه این کار تحقیقاتی، در راستای کاهش تلفات خمشی تارهای نوری تک مد مورد استفاده در شبکه‌های فیبر–تا–خانه، می‌توان کاهشMFD، غلاف فشرده، کاهش ضریب شکاف، طراحی‌های جدید تار نوری حفره‌دار مورد تحقیق و بررسی قرار گیرد.

همچنین طراحی‌های نوین دیگر تارهای بلور فوتونی، از جمله فیبرهای دایره‌ای پشتیبان مدهای تکانه زاویه‌ای مداری مرتبهٔ بالا [۱۳] و حسگرهای فیبر حلقه‌ای مبتنی بر تشدید پلاسمون سطحی برای تشخیص گاز با تفکیک‌پذیری بالا [١٤]، نیز می‌توانند در پژوهش‌های آتی برای بهبود عملکرد و گسترش کاربرد شبکه‌های تار نوری–تا–خانه مورد بررسی قرار گیرند

مرجع‌ها

[1] R. Li, C. Deng, Y. Huang, Z. Chen, X. Zhang and T. Wang, A novel trench-assisted optical fiber with ultra-low micro bending loss for full-ocean-depth communication. IEEE Photonics Journal. 2023;15(6):1–9.
DOI: 10.1109/JPHOT.2023.3319493

[2] Y. Huang, H. Huang, H. Chen, Y. Song, N. K. Fontaine, R. Ryf, and M. Wang, SNR-enhanced coherent-lite transmission using an intensity-noise-suppressed ASE source. In: Proceedings of the 2022 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO); 2022 May. p. 1–2. IEEE.
https://doi.org/10.1364/CLEO_SI.2022.SF3M.5

[3] T.Yang et al. Design of 18-mode hole-assisted elliptical-core polarization-maintaining few-mode fiber. Optics Communications. 2022; 507:127647.
DOI: 10.1016/j.optcom.2021.127647

[4] Y.S. Lee, et al. THz-fiber waveguide composed of a biocompatible Vaseline core and Teflon holey cladding enabling a centimeter bending radius. Photonics Research. 2025;13(8):2306–2315.
https://doi.org/10.1364/PRJ.545598

[5] F.E Seraji, A comparative selection of the low-loss optical fibers designed for FTTH networks. In: Advances in Optoelectronic Technology and Industry Development. Boca Raton: CRC Press; 2019. p. 100–108.
DOI:10.1201/9780429283628-14

[6] M.Pisco , et.al, Fast and slow light in optical fibers through tilted fiber Bragg gratings, Opt. Express 17, 23502-23510 (2009)
https://doi.org/10.1364/OE.17.023502

[7] M. Cai, et.al, Design and theoretical analysis of broadband bend-resistant low-loss hollow-core anti-resonant fiber. Applied Optics. 2024;63(21):5692–5698.
https://doi.org/10.1364/AO.522374

8] F.E. Seraji, et.al. A review on the designed low-loss single-mode optical fiber used in fiber-to-the-home networks. Phys Astron Int J. 2018;2(3):250-254.
DOI: 10.15406/paij.2018.02.00094.

[9] F. Poletti, Nested antiresonant nodeless hollow core fiber, Opt. Express 22, 23807-23828 (2014)
DOI: 10.1109/JLT.2021.3081505

[10] C. Wang, R. Yu, C. Xiong, J.Zhu, and L.Xiao, Ultralow-loss fusion splicing between antiresonant hollow-core fibers and antireflection-coated single-mode fibers with low return loss. Optics Letters. 2023;48(5):1120–1123.
DOI:10.1364/OL.481190

[11] S. Matsuo et al. 1,728-fiber cable with 12-fiber ribbons comprising 160-µm-coating fiber with 80-µm cladding. Journal of Lightwave Technology. 2022;40(5):1552–1559.
DOI: 10.1109/JLT.2021.3127871

[12] X. Zehua, et al. Ultralow bending-loss micro-structured fiber with large-mode-area. Optik. 2022;251:168440.
https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.168440

[13] S. Mirzaee, M. Bahadoran, and M. Pakarzadeh, Designing of a Circular Photonic Crystal Fiber to Support Higher-Order Orbital Angular Momentum Modes for Telecommunication Applications. *Iran J Sci* **50**, 921–928 (2026). [In Persian]
https://doi.org/10.1007/s40995-025-01878-y.

[14] M. Keshavarzi, M.H. Zandi, V. Sharif, and H. Pakarzadeh, Surface plasmon resonance-based ring-core fiber sensor for ultra-low refractive index (gas detection) with high resolution, Appl. Opt. **65**, 581-586 (2026)
https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-65-2-581