فصلنامه آموزش مهندسی ایران، سال نوزدهم، شماره ۷۴، تابستان ۱۳۹۶، صص. ۳۱- ۲۳

مخابرات نوری: چشم‌انداز آینده، جایگاه و ضرورت آموزش در مهندسی برق

محمود فرهنگ[۱]

چکیده: مخابرات نوری زمینه‌ساز شگرف‌ترین تحولات در سیستم‌های مخابراتی در دو دهه اخیر بوده است؛ به گونه‌ای که دنیای کنونی ارتباطات بدون شبکه‌های فیبر نوری زیرساخت غیرقابل‌تصور است و جایگزینی فیبر نوری به‌جای سیم مسی در بخش دسترسی شبکه تا منازل نیز در کشورهای توسعه‌یافته در حال انجام است. به‌علاوه، افق پیش‌روی این حوزه بسیار فراتر از شبکه‌های مبتنی بر فیبر است و فناوری‌هایی نظیر مخابرات بی‌سیم نوری، ارسال داده در نور مرئی، شبکه‌های هوشمند نوری، و پردازشگرهای تمام‌نوری نقش پررنگ این گرایش از مهندسی مخابرات را در سال‌های آینده برجسته‌تر می‌سازد. بااین‌وجود، آموزش مخابرات نوری جایگاه قابل‌اعتنایی در برنامه آموزشی مهندسی برق کشور ندارد و عدم آشنایی عمیق متخصصان داخلی با مفاهیم پایه و نیز مبحث‌های پیشرفته این حوزه، راه را بر طراحی مناسب و پیاده‌سازی بومی هر یک از فناوری‌های فوق خواهد بست. همچنین، نه‌تنها باید نظاره‌گر ورود تمام فناوری از خارج از کشور بود، بلکه در زمینه بهره‌برداری مناسب، انطباق، توسعه و بهینه‌سازی نیز کشور را به یک واردکننده خدمات مبدل می‌سازد. ازاین‌رو، در این مقاله کوشش شده است طرحی برای آموزش مخابرات نوری در مهندسی برق ـ مخابرات، در دو سطح کارشناسی و تحصیلات تکمیلی، ارائه شود تا با پوشش مهمترین مفاهیم و اصول موردنیاز، توانایی مواجهه با فناوری‌های روز و پیش‌بینی و انطباق با فناوری‌های آینده را در متولیان آینده صنعت مخابرات کشور ایجاد کند.

واژه‌های کلیدی: آموزش مهندسی برق، مخابرات نوری

---

۱. استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. mfarhang@shirazu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۴/۲۳)
(پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱/۱۴)
DOI: 10.22047/ijee.2017.57625.1395

۱. مقدمه

صنعت ارتباطات و مخابرات از صنایع استراتژیک و کلیدی محسوب می‌شود که نقشی راهبردی در توسعهٔ پایدار کشورها دارد. این صنعت دارای سهم بزرگی از بازارهای ملی و بین‌المللی و با گردش مالی بسیار بالاست و رشد آن تمام حوزه‌های اجتماعی، اقتصادی، فرهنگی و سیاسی یک کشور را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. همچنین، به‌دلیل ویژگی‌هایی نظیر استفاده از فناوری‌های بسیار پیشرفته، بازگشت سریع سرمایه، کاربرد بسیار در صنعت‌های دیگر، عدم آلودگی زیست‌محیطی، ... اهمیت خاصی در بین صنایع دارد. ازاین‌رو، ایجاد و توسعه زیرساخت‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات به‌عنوان یکی از اولویت‌های توسعه‌ای در نظر گرفته می‌شود.

مخابرات نوری جایگاهی ویژه در فناوری ارتباطات دارد و علاوه بر آنکه بخش عمده زیرساخت مخابرات در اقصی نقاط جهان برمبنای آن پایه‌ریزی شده، رشد روزافزون فناوری اطلاعات و سرعت بالای افزایش حجم ترافیک شبکه‌های مخابراتی و اینترنت تکامل مداوم آن را می‌طلبد. مخابرات نوری، که تحولات آن با آخرین دستاوردهای علمی و پژوهشی گره خورده است، همچنین توانسته به‌دلیلِ مزایای بسیار خود علاوه بر شبکه زیرساخت، در بخش دسترسی شبکه نیز رقیبی قدرتمند و در برخی موارد بلامنازع برای سایر تکنیک‌های مخابراتی باشد.

در این مقاله ابتدا با مرور برخی حوزه‌های نوین در مخابرات نوری و بررسی اجمالی چشم‌انداز آینده آن، به لزوم گسترش دانش و فناوری بومی در راستای بهره‌برداری هرچه‌بیشتر از ظرفیت بالای این بخش مهم از مخابرات می‌پردازیم و طرحی برای آموزش پایه اصول و مفاهیم بنیادین این شاخه از مخابرات در سطح کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق ارائه می‌کنیم.

۲. جایگاه کنونی و چشم‌انداز آینده مخابراتِ نوری

درحال‌حاضر، بخش اعظم تبادل داده در شبکه زیرساخت مخابرات به‌کمکِ مخابراتِ نوری صورت می‌پذیرد و تصور دنیای کنونی ارتباطات بدون حضور میلیون‌ها کیلومتر فیبر نوری در سرتاسر جهان، اعم از آنچه در زیر آبها ارتباطات بین‌قاره‌ای را برقرار می‌سازد یا در درون هر کشور زیرساخت تلفن، موبایل و اینترنت را تشکیل می‌دهد، غیرممکن است. بااین‌وجود، علی‌رغم آنچه در دو دهه اخیر در جهت توسعه و افزایش پهنای باند شبکه مخابرات نوری انجام گرفته است، نیاز روزافزون به افزایش پهنای باند و نیز ظهور کاربردها و زمینه‌های جدید تحولات در حوزه مخابراتِ نوری را با شتاب بیشتری همراه کرده است. هم‌اکنون، عمده سرمایه‌گذاری‌های کلان در عرصه مخابراتِ نوری را می‌توان در سه شاخه زیر تقسیم‌بندی کرد:

الف. بالابردن کارایی طیفی و افزایش ظرفیت فیبرهای نوری

باوجودِ اینکه فیبرهای نوری ظرفیتی به‌مراتب بیشتر از کابل‌های مسی یا لینک‌های مایکروویو را در اختیار قرار می‌دهند، سرعت رشد ترافیک در شبکه به گونه‌ای است که پیش‌بینی می‌شود در آینده نزدیک این اقیانوس پهنای باند نیز کفاف ترافیک بالای داده را نخواهد داد.

برای روشن‌ترشدن مطلب کافی است توجه کنیم باوجودِ آنکه نرخ ارسال اطلاعات بر فیبرهای نوری طی سه دهه گذشته همواره روبه‌رشد بوده، در ۱۵ سال گذشته نرخ ترافیک داده هر پنج سال تقریباً ده‌برابر شده است و پیش‌بینی می‌شود طی دهه آتی ظرفیت موردنیاز ده‌برابر کمتر از حجم ترافیک موجود خواهد بود (Essiambre & Tkach, 2012).

ازاین‌رو، در سال‌های اخیر تحقیقات بسیاری در راستای افزایش کارایی طیفی (بالابردن تعداد بیت ارسالی به‌ازای هر یک‌هرتز از پهنای باند دردسترس) و استفاده بهینه از پهنای باند موجود فیبرهای نوری متمرکز شده است؛ مانند اقبال به سیستم‌های مخابراتی همدوس علی‌رغم پیچیدگی پیاده‌سازی بالا و استفاده از مدوله‌سازی‌های[۱] جدید مخابراتی. همچنین، در کنار روش‌های فوق، تلاش‌های بسیاری نیز در جهت افزایش ظرفیت فیبرهای نوری صورت گرفته است. طراحی و ساخت فیبرهای چندهسته‌ای و استفاده از تکنیک‌های همتافتگری[۲] پیشرفته اغلب پژوهش‌های جاری در این زمینه را شکل می‌دهند (همان).

ب. پروژه فیبر به منازل

هم‌اکنون در بسیاری از کشورها آخرین بخش دسترسی شبکه مخابراتی (از اداره مخابرات تا محل مشترکین) را سیم‌های مسی تشکیل می‌دهند و فیبر نوری تنها ارتباط بین مراکز مخابراتی شهری، بین‌شهری و بین‌المللی را برقرار می‌سازد. بااین‌حال، رشد نیاز پهنای باند کاربران به گونه‌ای است که در آینده نزدیک فراهم‌ساختن چنین پهنای باند عظیمی از توان فناوری‌های مبتنی بر سیم مسی و بی‌سیم رادیویی، حتی در متکامل‌ترین شکل، خارج است. ازاین‌رو، گسترش شبکهٔ فیبر نوری تا منازل[۳]، که اصطلاحاً FTTH خوانده می‌شود، پدیده گریزناپذیر سال‌های پیش‌رو خواهد بود. این پدیده، که در برخی کشورهای پیشرفته پیاده‌سازی شده است، در کشور ما نیز با صدور مجوز از «سازمان تنظیم مقررات و ارتباطات رادیویی» از سوی اپراتور چهارم در دست اقدام است.

---

۱. معادل مصوب فرهنگستان زبان و ادب فارسی برای واژه «مدولاسیون»

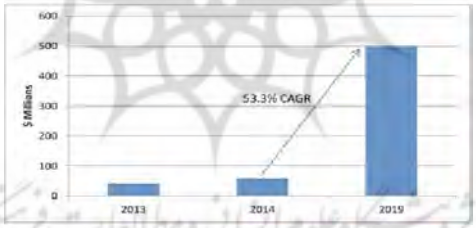
۲ . معادل مصوب فرهنگستان زبان و ادب فارسی برای واژه «مالتی پلکسینگ»

3. Fiber to the Home

ج. مخابرات بی‌سیم نورمرئی[1]

در کنار بحث افزایش ظرفیت شبکه فیبر نوری، که عمدتاً به شبکه زیرساخت مربوط می‌شود، و پروژه FTTH، که به مسئله آوردن فیبر نوری تا منازل مشترکین می‌پردازد، موضوعی که در چند سال اخیر یکی از زمینه‌های بسیار داغ تحقیقاتی را شکل داده است، مبحث مخابرات نوری بی‌سیم، به‌ویژه مخابرات بی‌سیم نورمرئی است (Grobe et al., 2013; Ghassemlooy, 2017).

با وجود اینکه مخابرات نوری بی‌سیم از سال‌ها پیش در برخی کاربردهای ارسال داده مورداستفاده قرار می‌گرفت، با ابداع دیودهای نور گسیل[2] سفید، بحث VLC از جهات مختلف موردتوجه ویژه است. از جمله اینکه با استفاده از لامپ‌های موجود در محیط هم به‌عنوان روشنایی و هم به‌عنوان منبع ارسال دادهٔ دیجیتال می‌توان به‌سادگی و با مصرف توان کم لینکی برای تبادل داده ایجاد کرد که ویژگی‌های مهمی همچون امنیت بیشتر، عدم تداخل الکترومغناطیسی با سایر سیستم‌های رادیویی موجود در محیط و نیاز نداشتن به کسب مجوز از رگولاتوری، سازگاری با محیط‌زیست (بی‌نیازی به منبع انرژی مجزا برای ارسال داده) و ... است. همانگونه که در شکل ۱ دیده می‌شود، پیش‌بینی‌ها حاکی از افزایش بسیار زیاد تقاضا، سرمایه‌گذاری گسترده و بازاری قابل‌توجه برای VLC در سال‌های آتی است (BCC Reaserch, 2015).



شکل ۱: بازار جهانی فناوری مخابرات نوری بی‌سیم (BCC Reaserch, 2015)

علاوه بر موارد فوق، مخابرات نوری در حوزه‌های متنوع دیگری همچون ارتباطات فضایی و ماهواره‌ای، پزشکی، صنعت نفت، ... کاربردهای فراوان دارد که پرداختن به تمام آنها در این مختصر نمی‌گنجد.

---

1. Visible Light Communications: VLC
2. Light Emitting Diodes(LED)

۳. جایگاه فناوری مخابرات نوری در کشور

همانگونه که در بخش قبل اشاره شد، حوزه‌های کاربرد وسیع و متنوع مخابرات نوری همگی بیانگر نقش راهبردی آن در توسعه پایدار کشور و ظرفیت بالای آن در تولید ثروت و ایجاد اشتغال است. با این وجود، کشور ما تاکنون عمدتاً به‌عنوان یک واردکننده تجهیزات و خدمات در این زمینه عمل کرده است و دانش و فناوری بومی خاصی در این زمینه وجود ندارد.

در بحث سرمایه‌گذاری داخلی و تولید، تولید تجهیزات مخابرات نوری در ایران محدود به برخی ادوات پسیو نظیر فیبر نوری و برخی رابط‌ها و اتصال دهنده‌هاست که تنها بخش بسیار کوچکی از گستره وسیع ابزار و تجهیزات موردنیاز را شکل می‌دهد و سایر بخش‌ها به دلیل نیاز به دانش بالا و فناوری روز و فقدان آن در کشور همچنان مغفول مانده‌اند.

باتوجه‌به نقش پررنگ‌تر مخابراتِ نوری در آینده صنعت ارتباطات، تعریف پروژه‌های ملی و سرمایه‌گذاری‌های کلان در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد. با نظر به چشم‌انداز موجود از آینده این صنعت و فقدان شرکت‌ها و تولیدکننده‌های بزرگ در کشور و منطقه، بخش خصوصی نیز با سرمایه‌گذاری جدی در این حوزه ـ و البته با حمایت دولتی از تولید ملی ـ می‌تواند با تولید محصولات باکیفیت بازگشت سریع سرمایه و سودآوری بالایی را امید داشته باشد.

۴. ضرورت آموزش مخابرات نوری

بدیهی است که پایه‌ریزی هر فناوری در کشور مبتنی بر کسب دانش مرتبط و درک مفاهیم بنیادین آن و پیشرفت در آن زمینه مستلزم انجام تحقیقات بنیادی و پژوهش در کلاس بین‌المللی است. ازاین‌رو، در کنار سرمایه‌گذاری در حوزه فناوری مخابرات نوری در جهت رفع نیاز گسترده داخلی در آینده نزدیک و نیز صادرات، نقش آموزش در راستای تربیت نیروی متخصص و پژوهشگران برجسته انکارناشدنی است. همچنین درصورتی‌که به‌خاطر محدودیت‌های مالی یا هر دلیل دیگر سرمایه‌گذاری در جهت ایجاد فناوری بومی مقدور نباشد و ناگزیر از واردات گسترده تجهیزات باشیم، آشنایی با دانش روز و قدرت تحلیل وضعیت فعلی و پیش‌بینی آینده صنعت مخابرات نوری برای انتخاب فناوری مطلوب از میان ارائه‌کنندگان مختلف آن در سطح جهان و تطبیق آن با شرایط متنوع داخلی الزامی است. به‌علاوه، درصورت غنای دانش نظری در داخل کشور و برخورداربودن از صاحب‌نظران برجسته و متخصصان توانمند، حتی در صورت تولید نشدن ادوات و قطعات و نیاز به واردات آن، طراحی شبکه و نگهداری آن در سطوح مختلف و کاربردهای گوناگون ـ که در برخی مواقع از نظر امنیت ملی و پدافند غیرعامل از حساسیت بالایی برخوردار است ـ می‌تواند کاملاً، به‌صورت بومی و بی‌نیاز از بیگانگان صورت پذیرد.

بادرنظرگرفتن موارد ذکرشده، نقش گنجاندن آموزش مخابرات نوری در سطوح پایه و پیشرفته در دوره‌های کارشناسی و تحصیلات تکمیلی مهندسی برق در پرورش کارشناسان خبره و پژوهشگران تراز اول در این حوزه بیش‌ازپیش اهمیت می‌یابد.

با این وجود، تدریس مخابرات نوری در دانشگاه‌های کشور عمدتاً یا منحصر به بررسی انتشار نور در فیبر از دیدگاه مخابرات میدان یا بررسی قطعات الکترواپتیک از دیدگاه الکترونیک است، یا یک معرفی و بررسی کاربردی (آن‌گونه‌که در برخی مراکز علمی-کاربردی انجام می‌گیرد و محدود به معرفی سطحی برخی مفاهیم و استانداردهای موردنیاز یک فن‌ورز[1] است). این در حالی است که مباحثی چون طراحی کلان سیستمی، بهینه‌سازی و مدیریت یکپارچه شبکه‌های مخابرات نوری نیازمند دیدی جامع نسبت به اجزای مختلف سیستم است که به‌وضوح خارج از تخصص حتی دانش‌آموختگان گرایش‌های دیگر مهندسی برق است که در زیرشاخه‌ای خاص از این حوزه نظیر مباحث مربوط به انتشار نور در موج‌برهای نوری (گرایش مخابرات میدان) و لیزر، ادوات نیمه‌هادی و مدارهای مجتمع نوری (گرایش الکترونیک نوری) تحصیل و پژوهش کرده‌اند. همچنین، در سرفصل مصوب دوره‌های کارشناسی حوزه‌های مرتبط با اپتیک، نظیر دوره کارشناسی «مهندسی اپتیک و لیزر (مصوب ۱۳۷۹/۱۱/۱۶)» نیز هیچ درس مخابراتی وجود ندارد. لذا، به‌جز در تعداد بسیار معدودی از دانشگاه‌های برتر، تلاشی در جهت آشنایی با زمینه‌های تحقیقاتی روز دنیا و ایجاد سهمی در تولید دانش در این حوزه پیشرفته از مخابرات صورت نمی‌پذیرد.

ضرورت پرداختن به آموزش مباحث مخابرات نوری از سالها پیش توسط برخی استادان برجسته داخلی فعال در این حوزه به‌درستی تشخیص داده شد و پس از برگزاری جلسات مشترک و رایزنی‌های بسیار، آیین‌نامه برگزاری دوره کارشناسی ارشد مخابرات نوری تدوین شد و در سال ۱۳۸۷ وزارت علوم رسماً آن را ابلاغ کرد. علی‌رغم این موضوع، تاکنون ایجاد چنین دوره‌هایی عملاً مغفول مانده و دانشجویی در این گرایش مخابرات فارغ‌التحصیل نشده است (به‌جز پذیرش دانشجو در یکی از دانشگاه‌ها که ـ آنگونه که از برنامه دروس ارائه‌شده آن دانشگاه برمی‌آید ـ به‌صورت بسیار ناقص اجرا شده است). لازم به ذکر است که در آخرین آیین‌نامه مصوب برای دوره تحصیلات تکمیلی مهندسی برق (۱۳۹۲/۴/۱۶) نیز گرایش مخابرات نوری به مجموعه گرایش‌های ارشد افزوده شده است ولی متأسفانه بررسی دروس مصوب بیانگر آن است که انتخاب دروس را تنها استادان گرایش مخابرات میدان انجام داده‌اند و کاملاً ناهمبسته با آیین‌نامه بسیار کامل و جامع سابق است. به‌عنوان مثال،

---

۱. معادل مصوب فرهنگستان زبان و ادب فارسی برای واژه «تکنسین»

درس «سیستم‌های مخابرات نوری» درسی اختیاری برای گرایشی در نظر گرفته شده است که عنوان «مخابرات نوری» را یدک می‌کشد!! (صفحهٔ ۲۶ آیین‌نامه)

به نظر می‌رسد دلیل اصلی این خلاء، نبودن استادان مجرب در حوزه مخابرات نوری به اندازه کافی است، امری که به‌راحتی و با بررسی زمینه‌های کاری اعضای هیئت‌علمی دانشگاه‌های مطرح قابل ارزیابی و تصدیق است.

بنابراین پیشنهاد می‌شود که پیش از برگزاری دوره‌های پیشرفته و تخصصی ارشد و دکتری در این زمینه، با ارائه یک یا دو درس پایه در جهت آشنایی با مخابراتِ نوری، علاوه بر آماده‌سازی و ایجاد پشتوانه علمی لازم در دانشجویان علاقه‌مند به فعالیت به‌عنوان کارشناس در این حوزه، در راستای ایجاد انگیزه و جهت‌دهی به مسیر پژوهش دانشجویان مستعد در دوره تحصیلات تکمیلی گامی مؤثر برداشته شود تا از این طریق نسلی جدید از استادان این حوزه شکل گیرد.

۵. ارائه طرح درس

با وجودی که در آیین‌نامه سال ۱۳۸۷ دروس متنوعی در جهت پوشش بخش عمده‌ای از مباحث مطرح پایه در مخابرات نوری پیش‌بینی شده است، در اینجا طرح دو درس که دربردارنده مفاهیم اساسی لازم برای درک عملکرد و تحلیل و طراحی سیستم‌های مخابراتی نوری ساده است به اجمال بیان می‌شود. در «مبانی فوتونیک» که درسی مناسب دانشجویان سال آخر کارشناسی مهندسی برق (گرایش الکترونیک و مخابرات) است، اصول فیزیکی حاکم بر رفتار ادوات نوری و مدل ریاضی آنها به‌طور ساده بیان می‌شود. «(مبانی) سیستم‌های مخابرات نوری»، که بازنگری و اصلاح‌شده درسی با همین نام در آیین‌نامه مورداشاره است، درسی مناسب سال آخر کارشناسی و سال اول کارشناسی ارشد مخابرات و الکترونیک است و دانشجویان پس از گذراندن این درس دید جامعی نسبت به اصول عملکرد اجزای مختلف سیستم‌های مخابرات نوری و تحلیل عملکرد آنها کسب می‌کنند و چگونگی طراحی یک لینک ساده و تعیین پارامترهای اساسی آن را می‌آموزند. لازم به ذکر است که مطالب درس اول پیش‌نیاز این درس است و درصورتی‌که «مبانی فوتونیک» به هر دلیل گذرانده نشده باشد، می‌توان مفاهیم اصولی موردنیاز را به هنگام تدریس «سیستم‌های مخابرات نوری» در محل مناسب به‌طور خلاصه بیان کرد:

الف. مبانی فوتونیک

- اپتیک هندسی: اصل فرما، مدل ماتریسی رفتار المان‌های اپتیکی

- اپتیک موجی: معادلات ماکسول، موج‌برها، محیط‌های غیرهمگن و غیرهمسانگرد، پاشندگی، متامتریال
- اپتیک کوانتومی: رفتار موجی ـ ذره‌ای نور و آزمایش‌های مؤید آن، تصادفی‌بودن رفتار نور
- منابع نور: نور گرمایی، اصول لیزر، انواع لیزر
- انواع آشکارسازهای نور
- مبانی الکترواپتیک
- آشنایی با مخابرات نوری

مراجع پیشنهادی:(Saleh & Teich, 2009; Hecht, 2017)

ب. (مبانی) سیستم‌های مخابرات نوری

(قسمتهایی که با علامت * مشخص شده‌اند را می‌توان در صورت رعایت پیش‌نیازی درس قبل حذف کرد)

- *مروری بر اپتیک و مدل‌های بررسی رفتار نور
- *موج برهای نوری
- فیبر نوری و انواع پاشندگی
- فرستنده‌های نوری، LED و لیزر نیمه‌هادی، مدوله سازی
- گیرنده‌های نوری، فوتودیود، انواع نویز و تحلیل عملکرد گیرنده
- سیستم‌های مخابراتی نوری آنالوگ، انتقال رادیویی بر فیبر
- سیستم‌های مخابراتی دیجیتال/ رقمی
- تکنیک تسهیم کانال (همتافتگری) نوری، WDM, TDM, CDM, SDM
- تقویت‌کننده‌های نوری
- آشنایی با شبکه‌های مخابرات نوری
- آشنایی با مخابرات نوری بی‌سیم

مراجع پیشنهادی:(Keiser, 2011; Mynbaev & Scheiner, 2001; Ghassemlooy, 2017)

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله با تبیین نقش بسزای مخابرات نوری در آینده صنعت مخابرات، به ضرورت پرداختن بیش‌ازپیش به موضوع آموزش مخابرات نوری در برنامه درسی مهندسی برق پرداختیم و نقش آن را

در آینده فناوری مخابرات کشور بیان کردیم. در انتها به اختصار سرفصل دو درس برای آشنایی دانشجویان سال‌های آخر کارشناسی و اول ارشد مهندسی برق با اصول و مفاهیم مخابرات نوری پیشنهاد شد.

مراجع

Essiambre, R. J. and Tkach, R. W. (2012). Capacity trends and limits of optical communication networks. *Proceedings of the IEEE*, 100(5), 1035-1055.

Grobe, L.; Paraskevopoulos, A.; Hilt, J.; Schulz, D.; Lassak, F.; Hartlieb, F.; Kottke, C.; Jungnickel, V. and Dieter Langer, K. (2013). High-speed visible light communication systems. *IEEE Communications Magazine*, 51(12), 60-66.

BCC Reaserch Company. (2015). *Free-space optical communications technology: Global markets*, Report PHO018A.

Saleh, B. E. and Teich, M. C. (2009). *Fundamentals of photonics*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.

Hecht, E. (2017). *Optics*. Boston: Pearson.

Keiser, G. (2011). *Optical fiber communication:* Mc-Graw Hill.

Mynbaev, D. K. and Scheiner, L. (2001). *Fiber-optic communication technology*: Pearson.

Ghassemlooy, Z. (2017). *Optical wireless communications: System and channel modeling with Matlab*. London: CRC Press.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی