Archive of SID

نشریه علمی "پدافند الکترونیکی و سایبری"
سال نهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰، ص ۱۵۶-۱۴۹

علمی – پژوهشی

ارائه مدل فنی– اقتصادی زیرساخت ارتباطی پایدار در شهر هوشمند با به‌کارگیری شبکه دسترسی فیبر نوری مبتنی بر فناوری WDM-PON

محمدرضا عسگری راد[۱]، منصور نجاتی جهرمی[۲*]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران
(دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۰۳، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۵)

چکیده

پیشرفت فناوری اطلاعات و ارتباطات باعث تحول در روش ارائه انواع خدمات شده است. با افزایش تراکم جمعیتی در نقاط شهری، تغییر و توسعه زیربناهای ارائه سرویس مورد نیاز می‌باشد. شبکه فیبر نوری، بستر پایدار ارتباطی در شهر هوشمند است و همه خدمات باند پهن و باریک را پشتیبانی می‌کند. در این مقاله، نقش فیبر نوری در ایجاد ساختمان هوشمند (با قابلیت باند پهن) و شبکه تلفن همراه (نسل پنجم) به‌عنوان دو بخش اصلی از یک شهر هوشمند ارزیابی‌شده و یک مدل فنی و اقتصادی ایجاد زیرساخت ارتباطات در شهر هوشمند با استفاده از یک شبکه فیبر نوری چندمنظوره با به‌کارگیری منابع مخابراتی موجود، به روش بهینه‌سازی خطی گسسته ترکیبی ارائه می‌گردد. تأمین ارتباطات اساسی در شهر هوشمند با مدل پیشنهادشده، علاوه بر برآوردن نیازهای فنی، کاهش هزینه ایجاد شبکه، کم شدن میزان آسیب‌پذیری در مقابل انواع تهدید و افزایش درصد قابلیت اطمینان و امنیت را در پی خواهد داشت.

کلیدواژه‌ها: شهر هوشمند، شبکه FTTx، نسل پنجم تلفن همراه، فناوری WDM-PON، کاهش هزینه، برنامه‌ریزی خطی گسسته ترکیبی

۱- مقدمه

شهر هوشمند شهری است نوآور با توسعه پایدار اقتصادی، زندگی باکیفیت و مجهز به زیرساخت‌های مدرن که در آن فرآیندهای خدماتی، اقتصادی، اجتماعی و حاکمیتی، به‌صورت دقیق، سریع و آسان انجام خواهند شد. مدیران شهرها عمدتاً با هدف مدرن‌سازی فرآیند ارائه خدمات، ایجاد فرصتهای تجاری و اقتصادی و ارتقاء سطح زندگی شهروندان، پیگیر هوشمندسازی هستند. در سال‌های اخیر در ارائه خدمات شهری تحولاتی صورت گرفته و کیفیت و درصد مکانیزاسیون خدمات ارتباطی، حمل و نقل، سلامت، انرژی و امنیت افزایش یافته است. در شهر هوشمند استفاده از فناوری اطلاعات در این ساختارها پررنگتر و ارتباط شبکه‌ای بین سامانه‌های خدمات مختلف برقرار خواهد شد. شبکه هوشمند توزیع برق نمونه‌ای از تحول ناشی از استفاده از فناوری ارتباطات در خدمات شهری است. [۱]

ساختمان یا خانه هوشمند نتیجه کاربردی پیاده‌سازی اینترنت اشیاء در محیط زندگی و کسب و کار است. تجهیزات با قابلیت اینترنت اشیاء، عمدتاً بی‌سیم و کم مصرف، به‌صورت خودکار، همدیگر را شناسایی می‌نمایند. به‌عنوان نمونه دستگاه‌های شناسگر رادیویی، حسگرها و سامانه‌های موقعیت‌یاب با پروتکل‌هایی مانند بلوتوث یا ارتباط رادیوِیی بسیار نزدیک، PLC[۲] ، وایفای، نسل‌های ۳ و ۴ و ۵ تلفن همراه و زیگبی ارتباط برقرار می‌نمایند. پیاده‌سازی در محدوده وسیع، امکان ذخیره و پردازش محدود اطلاعات، ایمنی و امنیت از ویژگی‌های اینترنت اشیاء با معماری نوین است. تجمیع و پردازش اطلاعات خروجی این سامانه‌ها، نتایجی را در اختیار خانواده‌ها، صاحبان کسب و کار و مدیران شهر قرار می‌دهد که به کنترل و مانیتورینگ پیوسته یک ساختمان حتی از نقاط دور دست در هر زمان می‌انجامد. این اطلاعات می‌تواند رخدادهای پیش‌رو را پیش‌بینی و از بروز برخی اتفاقات جلوگیری نماید.

فروش سرویس و بازگشت سرمایه در زمان مشخص، از دغدغه‌های اصلی در ایجاد شبکه‌های فیبر نوری به شمار می‌رود. بنابراین مدلی که بتواند با لحاظ عوامل فنی و اقتصادی، شرایط و میزان موفقیت در سرمایه‌گذاری را تعیین نماید، مفید خواهد بود. در این مقاله با استفاده از روش بهینه‌سازی خطی گسسته

*رایانامه نویسنده مسئول: nejati@aut.ac.ir

[2] Programmable Logic Controller

www.SID.ir

Archive of SID

ترکیبی[1]، یک مدل فنی اقتصادی جهت ایجاد شبکه واحد دسترسی فیبر نوری چندمنظوره برای تأمین نیازهای ارتباطی باند پهن ثابت (FTTx) و سیار (4G/5G) پیشنهاد شده است. این مدل حداقل پهنای باند مورد تقاضا در بخش ثابت و سیار در هر نقطه را برای اینکه شروط فنی و اقتصادی پروژه تحقق یابند، تعیین نموده و ظرفیت لینک‌های انتقال را پیشنهاد می‌دهد.

با افزایش هوشمندی، آسیب‌پذیری در برابر انواع تهدیدات بیشتر خواهد شد. راه‌کار ارائه‌شده، علاوه بر تأمین نیازهای فنی و اقتصادی، با اتخاذ تدابیر لازم در سامانه‌های انتقال در برابر تهدید الکترومغناطیس نیز ایمن است و نفوذ سایبری در آن حداقل خواهد بود.

تحول ناشی از به‌کارگیری فیبر نوری در شهر هوشمند در بخش دوم توضیح داده می‌شود. در بخش سوم مدل فنی اقتصادی زیرساخت ارتباطی شهر هوشمند با استفاده از شبکه دسترسی فیبر نوری FTTx چندمنظوره مبتنی بر فناوری WDM-PON ارائه می‌گردد. بخش چهارم به پیاده‌سازی مدل و بخش پنجم به نتیجه‌گیری و پیشنهاد اختصاص دارد.

۲- مبانی نظری تحقیق

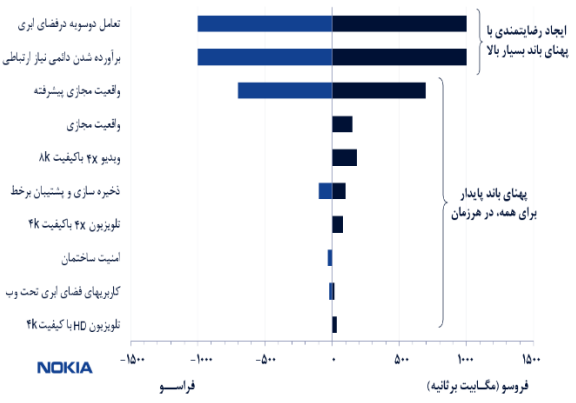
پدیده اینترنت اشیاء، ارتباط انسان با انسان و به‌ویژه انسان با ماشین و ماشین با ماشین را به‌صورت تصاعدی فزونی می‌بخشد. این ارتباطات، داده‌ها را افزایش داده و شهروندان ناخودآگاه به فضای اطلاعاتی جدیدی وارد خواهند شد. در شهر هوشمند در قالب سازوکار کلان‌داده، بر اساس نتایجی که حاصل پردازش حجم بزرگی از اطلاعات است، تصمیمات بهتری گرفته می‌شود. در جوامع آینده، داده‌ها بسیار ارزشمند و اطلاعات به‌دست‌آمده از پردازش داده‌ها ارزشمندتر هستند. روند افزایشی تولید اطلاعات تصاعدی و خیره‌کننده است. گردآوری اطلاعات سامانه‌های خدماتی نیز به‌صورت مستمر خواهد بود. برای نمونه در حمل و نقل عمومی، اطلاعات لحظه به لحظه، موقعیت و خدمات ارائه‌شده در خودروها، فضاهای پارک وسایل نقلیه، گلوگاه‌های ترافیکی و دیگر داده‌ها نظیر شرایط آب و هوایی، وضعیت آلودگی صوتی و مصرف انرژی اهمیت دارد. بنابراین دسترسی عمومی به حجم زیادی از اطلاعات، یکی از الزامات شهر هوشمند است و نیاز به لینک‌های ارتباطی پرظرفیت دارد.

پیشرفت فناوری سامانه‌های انتقال نشان می‌دهد که فیبر نوری تقریباً محدودیتی در تأمین پهنای باند ندارد. شبکه‌های فیبر نوری با بیشترین قابلیت اطمینان و ظرفیت، به شاخص‌های شهر سبز نزدیک‌ترند. چنانچه زیرساخت شهر هوشمند با فیبر نوری توسعه یابد، در بلندمدت هزینه‌های نگهداری کاهش یافته و درآمد بالاتری نسبت به شبکه‌های بی‌سیم و سیم مسی برای اپراتورها ایجاد می‌گردد. در مقابل هزینه کمتری برای کاربران دارد. ضمن اینکه امکان ارائه تعداد زیادی سرویس با مشارکت تأمین‌کنندگان محتوا و سرویس بر روی این بستر فراهم است. از سوی دیگر اتصال به شبکه فیبر نوری در سایر خدمات نظیر آب، برق، انرژی، پسماند، سلامت، ایمنی و امنیت نیز تحول اساسی ایجاد خواهد کرد.

هوشمندی در یک ساختمان که عمدتاً بر استفاده از فناوری‌های بی‌سیم تمرکز دارد با اتصال به پهنای باند بالا بر بستر فیبر نوری، جذابیت و کارآمدی بالاتری خواهد داشت. در اتصال یک مجموعه از اینترنت اشیاء به دنیای بیرون، هرچه پهنای باند بیشتری در دسترس باشد، کیفیت، سرعت و دقت خدمات بالاتر خواهد رفت. اتصال به فیبر نوری به‌عنوان یک خدمت نوین به خانواده‌ها و مدیران شرکت‌هاست.

دلیل اصلی سرمایه‌گذاری در توسعه شبکه‌های فیبر نوری، تأمین نیاز در بخش سرویس است. در مناطقی که دسترسی به فیبر نوری ایجاد می‌شود، تقاضا برای اتصال به شبکه خودبه‌خود رونق می‌گیرد. فیبر نوری کاربران را به استفاده از سرویس‌های جدید ترغیب می‌کند.

با توجه به توضیحات فوق، تنوع و تعداد سرویس‌های باند پهن و بررسی هدف‌گذاری سایر کشورها، ارائه حداقل ۱۰۰ مگابیت بر ثانیه با قیمت مناسب، با قابلیت دسترسی عمومی به‌ویژه در مناطق شهری در ایران اجتناب‌ناپذیر است. این نیاز در سال‌های آینده به مراتب افزایش خواهد یافت. در شکل (۱) رشد پهنای باند مورد نیاز در برخی سرویس‌ها قابل مشاهده است.



شکل (۱): پهنای باند مورد نیاز در سرویس‌های جدید [۱۵]

خدمات باند پهن بر بستر FTTH[2] شامل اینترنت فوق سریع، تلفن تصویری، آموزش الکترونیک، دورکاری، ذخیره‌سازی ابری،

[1] Mixed Integer Linear Programming (MILP)

[2] Fiber to the Home

www.SID.ir

Archive of SID

دورا پزشکی، تولید محتوا، راه‌اندازی مطمئن کسب و کار در خانه، انواع ویدئو با کیفیت HD[1] و ۴K و بالاتر نظیر تلویزیون بر بستر IP، ویدئو بر اساس درخواست، تلویزیون کابلی، واقعیت مجازی، واقعیت افزوده، ویدئو کنفرانس، بازی‌های گروهی تحت شبکه، بازی‌های برخط و ... به قابلیت‌های خانه هوشمند افزوده می‌شوند.

۲-۱- تهدیدات سایبری و الکترومغناطیسی

حفاظت از زیرساخت فناوری اطلاعات و ارتباطات، اولویت امنیت ملی کشورهاست. شرایط خاص کشور ما اهمیت اتخاذ تدابیر پیشگیرانه را برابر انواع تهدیدات، دوچندان می‌نماید. آسیب‌پذیری در لایه‌های مختلف شهر هوشمند، به‌دلیل ماهیت فناوری‌های مورد استفاده، قابل توجه است.

شهر هوشمند یک فضای سایبری متشکل از عناصر شبکه شده و به هم وابسته در محیط اطلاعاتی است. فضای رادیویی و اینترنت اشیاء از درگاه‌های نفوذ برای انجام حملات سایبری در آن به شمار می‌رود. مدل پیشنهادی، با استفاده حداکثری از فیبر نوری، ارتباطات رادیویی را به حداقل می‌رساند. بنابراین نفوذ جهت انجام حمله سایبری از طریق فضای رادیویی در زیرساخت ارتباطی شهر هوشمند کاهش می‌یابد.

مدل ارائه‌شده در برابر یکی دیگر از تهدیدات مخرب یعنی حملات الکترومغناطیس نیز، بیشترین تاب‌آوری را دارد. این حملات با ایجاد پرتو مایکروویو شدید و آنی، قادر به از کار انداختن انواع دستگاه‌های ارتباطی، الکتریکی و الکترونیکی خواهد بود. آسیب‌پذیری در برابر این تهدید می‌تواند یک شهر به‌ظاهر پیشرفته را به کلی از کنترل خارج نماید. به هنگام وقوع این حملات، لینک‌های انتقال از جنس رسانای الکتریکی، از عوامل تشدید اختلال هستند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که کابل فیبر نوری در برابر حملات الکترومغناطیس آسیب‌ناپذیر است [۱۲]. بنابراین، پایه‌گذاری شهر هوشمند با فیبر نوری، ارتباطات اساسی را در هنگام وقوع این تهدیدات به‌صورت پایدار حفظ خواهد کرد. در بخش سامانه‌های انتقال نیز باید تمهیدات لازم جهت محافظت در برابر حملات الکترومغناطیس در نظر گرفته شود. در [۱۳]، اتاقک با مقاومت کافی در برابر این حملات معرفی شده که برای تجهیزات شبکه انتقال منصوبه در بیرون از ساختمان مناسب است.

۲-۲- پیشینه پژوهش

فناوری نسل پنجم با کاربری‌های جدید نظیر اینترنت اشیاء نقش کلیدی در هوشمندسازی شهرها دارد. برداشت اولیه این است که با رونق نسل‌های پنجم و بالاتر نیازی به فیبر نوری نخواهد بود، درحالی‌که این دو کامل‌کننده یکدیگر هستند.

پیاده‌سازی نسل‌های جدید تلفن همراه که عمدتاً برای ارائه پهنای باند بالا به کاربر انتهایی معرفی می‌شود، نیازمند ایجاد تعداد بیشتری سایت سرویس‌دهنده در فواصل کمتر است. ضمن اینکه میزان مصرف پهنای باند هر سایت ده‌ها برابر نسل‌های قبلی است. با توجه به محدودیت ظرفیت لینک‌های رادیویی و حساسیت به فاصله و موانع، مخاطرات امنیتی، تجربه اپراتورها و مطالعات انجام‌شده، فیبر نوری بهترین گزینه برای بک‌هال در نسل‌های جدید شبکه‌های تلفن همراه است. اما ایجاد یک بستر فیبر نوری جدید و مستقل، بسیار پرهزینه و زمان‌بر است.

استفاده از شبکه فیبر نوری موسوم به FTTx بصورت مشترک برای ارائه خدمات ثابت و سیار، کاهش هزینه‌ها، هم‌افزایی در منابع، همگرایی دو شبکه و چابکی در ارائه سرویس را ایجاد خواهد نمود. این رویکرد در مقالات متعدد مورد بررسی قرار گرفته است. در[۸] سخت‌افزار و شبکه فیبر نوری اشتراکی پیشنهاد می‌شود. در [۲] با مقایسه هزینه‌ها، WR[2]-WDM-PON به‌عنوان راه‌حل مطرح شده است. نتایج پیاده‌سازی در [۹] تحلیل گردیده و به‌کارگیری فناوری NFV/SDN[3] توصیه شده است.

در [۳] بر اساس تحلیل قیمت، راه‌کار FWA[4] مبتنی بر CWDM[5]-XG-PON پیشنهاد می‌گردد. در [۱۰] با معیار رضایتمندی مشتری (QoE[6]) و مصرف انرژی راه‌کار کنترلی ViRCA ارائه‌شده است. در تحقیق [۴]، الگوریتم K-means برای استفاده اشتراکی از کابل و داکت موجود منطبق بر TWDM-PON معرفی می‌شود، الگوریتم مذکور به‌عنوان بخشی از مدل این مقاله است.

در[۵] با شاخص صرفه‌جویی در مصرف انرژی، مدل تعیین محل استقرار تجهیزات کنترلی نسل چهارم (BBU[7]) و سیستم انتقال (WDM) را مبتنی بر الگوریتم برنامه‌ریزی خطی (ILP) ارائه می‌کند. در [۱۱] طی پروژه COMBO[8]، مطالعه گسترده‌ای در زمینه استفاده اشتراکی از فیبر نوری برای پیاده‌سازی شبکه‌های نسل پنجم و FTTx در سطح اتحادیه اروپا انجام شده است.

راه‌کارهای مرتبط با بهینه‌سازی هزینه اجرایی و عملیاتی در شبکه‌های FTTH در مقالات مختلف، در[۶] معرفی شده است.

[1] High Definition

[2] Wavelength Routed
[3] Network Function Virtualization/Software Define etwork
[4] Fixed Wireless Access
[5] Coarse Wavelength Division Multiplexing
[6] Quality of Experience
[7] Baseband Unit
[8] Convergence of Fixed and Mobile Broadband Access/Aggregation Networks

www.SID.ir

Archive of SID

۳- مدل فنی- اقتصادی شهر هوشمند با استفاده از شبکه فیبر نوری چندمنظوره

حجم تقریبی ترافیک تولیدشده توسط کاربران در درون ساختمان هشتاد درصد و در بیرون از ساختمان معادل بیست درصد است [۱۴]. در دسته اول اولویت بر استفاده از خدمات ارتباطی خانه هوشمند است و در دسته دوم شبکه نسل پنجم، گزینه نخست می‌باشد. ارتباط بی‌سیم و سرویس اینترنت اشیاء در هر دو دسته قابل ارائه است. به همین دلیل ساختمان‌های هوشمند و شبکه تلفن همراه دو بخش اصلی تشکیل‌دهنده یک شهر هوشمند هستند و شبکه‌های دسترسی فیبر نوری با معماری FTTx و فناوری نسل پنجم، ابزار قدرتمند و موجود در ایجاد و توسعه این شهرها خواهد بود.

اپراتورهای ارتباطات ثابت با راهبردهای مختلف در حال توسعه شبکه دسترسی فیبر نوری با فناوری‌های نوین هستند تا با هزینه بهینه مسیر ارائه خدمات فراباندپهن را هموار نمایند. در برخی کشورها نسل جدید فناوری‌های GPON شامل XG-PON، XGS-PON و WDM-PON به‌کارگیری می‌شود. ضمناً منابع ارزشمندی در شبکه مخابراتی موجود نظیر مرکز تلفن، حوضچه، داکت، کابل فیبر نوری و... وجود دارد که طی سالیان متمادی ایجاد شده و می‌تواند در شبکه چندمنظوره فیبر نوری مورد استفاده قرار گیرد.

در این تحقیق، یک مدل پیاده‌سازی شبکه جامع فیبر نوری موسوم به FTTx با فناوری GPON به همراه تجهیزات سامانه‌های انتقال WDM، برای تأمین ارتباطات باند پهن ثابت و سیار در یک شهر هوشمند معرفی شده‌است. اجزای یک شهر هوشمند که از طریق این شبکه سرویس‌دهی می‌شوند، در گروه‌های زیر قرار می‌گیرند:

گروه اول، ساختمان‌های هوشمند با تجهیزات انتهایی ONT[1], ONU[3], MDU[2].

گروه دوم، ایستگاه‌های سرویس‌دهنده موسوم به RU[4] در شبکه تلفن همراه نسل پنجم و RRH[5] در نسل چهارم.

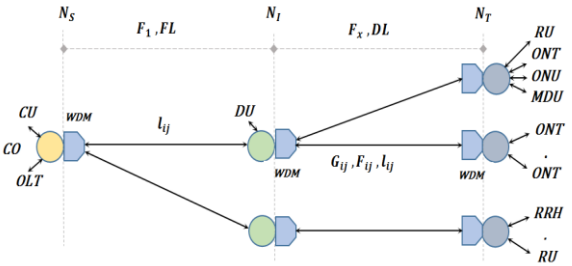
گروه سوم، نقاط اصلی در شهر هوشمند نظیر پایگاه داده‌ها، سرورهای سازمان‌ها و شرکت‌های خدماتی.

به‌دلیل اهمیت حیاتی نقاط اصلی در شهر هوشمند، ارتباط مورد نیاز در گروه سوم با فیبر نقطه به نقطه دارای مسیر پشتیبان انجام می‌گردد.

بیشترین هزینه مربوط به گروه‌های اول و دوم می‌باشد. به همین دلیل تمرکز این نوشتار بر ارائه مدل یک شبکه فیبر نوری مشترک برای این دو گروه می‌باشد که ضمن استفاده از زیرساخت‌های مخابراتی موجود و تأمین نیاز همه کاربران شهر هوشمند، دارای توجیه اقتصادی باشد.

۳-۱- معرفی مدل تحقیق

همان‌گونه که در بخش ۲ توضیح داده شد، فیبر نوری بهترین گزینه برای بک‌هال در نسل‌های جدید شبکه‌های تلفن همراه است. با توجه به اینکه ایجاد و توسعه شبکه‌های ارتباطات ثابت با محوریت فیبر نوری و فناوری FTTx در حال انجام است، چنانچه بتوان در اجرای این پروژه‌ها نیازهای شبکه‌های تلفن همراه را هم در نظر گرفت، علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه‌ها، هم‌افزایی در استفاده از منابع در راستای همگرایی ثابت و سیار و سرعت عمل در ارائه سرویس نیز ایجاد خواهد شد.



شکل (۲): مدل پیشنهادی شبکه دسترسی فیبر نوری دومنظوره

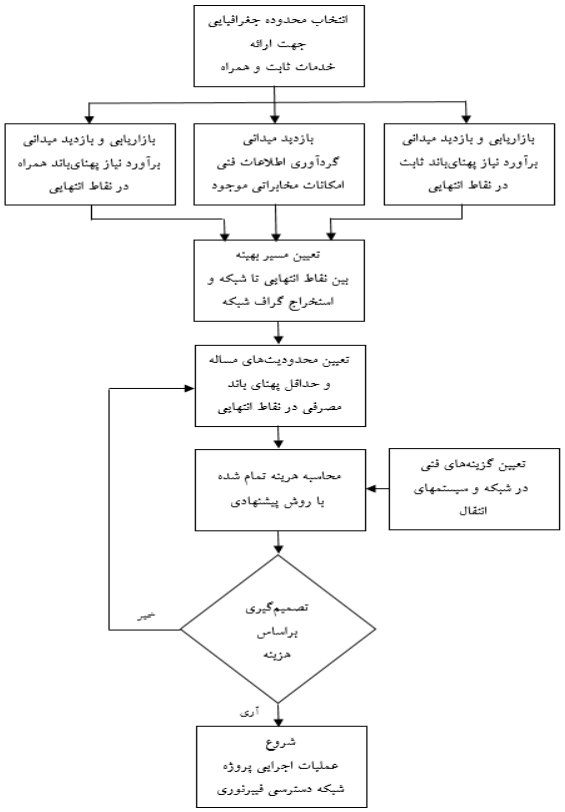
با توجه به شکل‌های (۲ و ۳)، مشخصات حل مساله به شرح زیر است:

- انتخاب یک محدوده جغرافیایی به محوریت مرکز مخابراتی و ثبت امکانات موجود نظیر حوضچه، داکت، کابل فیبر نوری، کابل مسی و کافو و ...
- بازاریابی و شناسایی محل حضور و تعداد متقاضیان خدمات ارتباطی باند پهن ثابت و همراه مبتنی بر فناوری‌های FTTx و نسل چهار و پنج.
- تعیین محل نصب تجهیزات انتهایی بر اساس اطلاعات آماری به‌دست‌آمده، تراکم جمعیت، گروه‌بندی مشتریان، میزان درخواست پهنای باند و امکانات مخابراتی موجود.
- در بخش انتقال شبکه دسترسی، از فناوری WDM-PON استفاده می‌شود و تجهیزات WDM به‌جای تجهیزات جداکننده غیرفعال به کار می‌رود. قابلیت WDM در اختصاص طول موج λ و تأمین پهنای باند، منجر به صرفه‌جویی در مصرف فیبر نوری خواهد شد.
- سناریوهای مختلف در مناطق شهری، حومه شهر و روستایی بررسی و هزینه تمام‌شده و حجم پهنای باند قابل ارائه در لایه انتهایی متناسب با ظرفیت طول موج λ در انواع تجهیزات انتقال WDM و قیمت آن مقایسه خواهد شد.

[1] Optical Network Terminal
[2] Multiple Dwelling Unit
[3] Optical Network Unit
[4] Remote Unit
[5] Remote Radio Head

www.SID.ir

Archive of SID



شکل (۳): مراحل عملیاتی مدل پیشنهادشده بهینه‌سازی هزینه‌ها

۳-۲- استخراج گراف شبکه

در گام اول، بسته به مکان حضور متقاضیان خدمات ثابت و سیار، تراکم جمعیت و شاخص‌های فنی پوشش و ترافیک، تعداد ترمینال سرویس‌دهنده همراه و ثابت یعنی RU و ONT تعیین می‌گردد. جمع‌آوری اطلاعات دقیق در مورد وضعیت موجود شبکه به‌منظور حداکثر استفاده از امکانات، اهمیت دارد.

انتخاب بهترین مسیر برای اتصال نقاط به همدیگر را می‌توان توسط الگوریتم خوشه‌بندی K-means انجام داد، این روش یک راهکار خوشه‌بندی اطلاعات است و در مدل پیشنهادی N_T نقطه‌ی انتهایی را در قالب N_I خوشه (نقطه‌ی میانی)، دسته‌بندی می‌کند. کارکرد این الگوریتم کمینه‌سازی فاصله‌ی متوسط نقاط با مرکزیت خوشه و برمبنای قاعده‌ی Euclidean است [۴]. با این روش، مسیر اتصال نقاط تعیین‌شده و یک نقطه در هر لایه به یک نقطه در لایه بالاتر وصل می‌شود.

به‌دلیل هزینه‌بر بودن اجرای فیبر نوری و به‌منظور استفاده حداکثری از امکانات ایجادشده از قبل، اولویت در استفاده از فیبر نوری موجود می‌باشد، حتی اگر مسیر جدید برای اجرای مسیر فیبر نوری، کوتاه‌تر باشد. به هر مکان با هر تعداد تجهیز، دو تار نوری متصل خواهد شد. موقعیت نقاط در سه لایه و مسیرهای اتصال بین آنها، گراف شبکه را شکل می‌دهند. در گراف به‌دست‌آمده اطلاعات اولیه مورد نیاز گام دوم شامل موقعیت نقاط، نزدیک‌ترین مسیر و طول آن و وجود فیبر نوری قرار دارد.

۳-۳- کمینه‌سازی هزینه

مدل فنی ـ اقتصادی ارائه‌شده، بر پایه بهینه‌سازی خطی گسسته ترکیبی است. بهینه‌سازی خطی مبتنی بر مدل‌سازی ریاضی است که برای تشریح مساله انجام می‌شود. همه روابط باید خطی باشند. این راه‌کار کلان‌نگر با لحاظ جزئیات، از جامعیت لازم در تحلیل مجموعه‌های بزرگ برخوردار است و در مقالات متعدد علوم مهندسی به‌کارگیری شده است. به‌عنوان نمونه در [۷]، برای بهینه‌سازی مصرف انرژی الکتریکی در خانه هوشمند دارای سیستم انرژی خورشیدی استفاده شده است. در ادامه، تعاریف مربوط به بهینه‌سازی خطی گسسته ترکیبی متناسب با موضوع مقاله ارائه می‌گردد:

الف- مجموعه‌ها

N موقعیت‌های موجود در محدوده یک مرکز تلفن با قابلیت نصب تجهیزات شبکه‌های نسل جدید تلفن همراه و FTTx

N_T ($N_T \subset N$) نقاط انتهایی برای نصب RU، ONT، MDU، ONU

N_I ($N_I \subset N$) نقاط میانی برای نصب DU[1] و DF[2]

N_S ($N_S \subset N$) نقاط ابتدایی برای نصب CU[3] و OLT[4]

ξ انواع تجهیزات مورد استفاده در شبکه

$$e \subset \xi = \xi_M \cup \xi_F$$

$$\xi_F = \{ OLT, DF, ONT, MDU, ONU \}$$

$$\xi_M = \{ CU, DU, RU, BBU, RRH \}$$

ب- داده‌های ورودی

P_e قیمت واحد تجهیز e

P_λ قیمت واحد طول موج λ برروی لینک WDM، جهت تأمین پهنای باند B_λ

B_λ پهنای باند قابل تأمین توسط طول موج λ

P_{Tre} هزینه یک متر حفاری و کابل گذاری فیبر نوری

$O(e)$ ظرفیت پهنای باند خروجی تجهیز e

$U(e)$ حداکثر تعداد مجاز تجهیز e

L_D حداکثر فاصله مجاز بین نقاط i و j با معیار تأخیر

e_i اگر از تجهیز e در نقطه i موجود باشد برابر ۱ است.

q_e^i تعداد منصوبه از تجهیز e در نقطه i

G_{ij} برابر ۱ است اگر مسیر بین نقطه i تا j در گراف شبکه

[1] Distribution Unit
[2] Distribution Frame
[3] Control Unit
[4] Optical Line Terminal

www.SID.ir

Archive of SID

موجود باشد.

F_{ij} چنانچه در مسیر بین نقطه i تا j فیبر نوری موجود باشد معادل ۱ است.

l_{ij} فاصله بین نقاط i و j برحسب متر

q_{λ}^{ij} تعداد طول موج (λ) ایجادشده بین نقاط i و j

k_e ضریب پروتکشن برای شبکه همراه معادل ۲ و برای ثابت برابر ۱ می‌باشد.

ج- متغیرهای تصمیم‌گیری

r_e^i حداقل پهنای باند در ورودی تجهیز e در نقطه i برای انطباق با شرایط مساله

$r_e^i = \{r_{CU}^i, r_{OLT}^i, r_{DU}^i, r_{RU}^i, r_{ONT}^i, r_{MDU}^i, r_{ONU}^i\}$

به عبارت دیگر، پاسخ مساله تصمیم‌گیری در مورد حداقل مصرف پهنای باند تجهیزات انتهایی است، برای اینکه ایجاد شبکه فیبر نوری دومنظوره در یک محدوده جغرافیایی مشخص دارای توجیه اقتصادی باشد.

د- تابع هزینه

هدف به حداقل رساندن هزینه کلی ایجاد شبکه دسترسی فیبر نوری است که برای ارائه هر دو سرویس همراه و ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تابع هزینه با رابطه (۱) سه قسمت را شامل می‌شود:

قسمت اول، هزینه تجهیزات نقاط انتهایی، میانی و ابتدایی.

قسمت دوم، هزینه تجهیزات انتقال در مسیرهایی که کابل فیبر نوری موجود می‌باشد.

قسمت سوم، هزینه اجرای فیبر و تجهیزات انتقال در مسیرهایی که فیبر نوری موجود نیست.

$$\text{هزینه ایجاد شبکه} = \sum_{i\epsilon N}\sum_{e\epsilon\xi} P_e \cdot q_e^i \cdot e_i + \sum_{i\epsilon N}\sum_{j\epsilon N} P_\lambda \cdot q_\lambda^{ij} \cdot F_{ij} \cdot G_{ij} + \sum_{i\epsilon N}\sum_{j\epsilon N} (P_\lambda \cdot q_\lambda^{ij} + P_{Tre} \cdot l_{ij}) \cdot \overline{F_{ij}} \cdot G_{ij}$$

$$= \sum_{i\epsilon N}\sum_{e\epsilon\xi} P_e \cdot q_e^i \cdot e_i + \sum_{i\epsilon N}\sum_{j\epsilon N} (P_\lambda \cdot q_\lambda^{ij} + P_{Tre} \cdot l_{ij} \cdot \overline{F_{ij}}) \cdot G_{ij} \quad (۱)$$

با توجه به اینکه

$$q_\lambda^{ij} = \frac{1}{B_\lambda} \sum_{e\epsilon\xi} k_e \cdot r_e^j \cdot q_e^j \cdot e_j \cdot G_{ij} \quad , \quad \forall i, j \epsilon N \ , i<j$$

بنابراین

هزینه ایجاد شبکه

$$= \sum_{j\epsilon N}\sum_{e\epsilon\xi} P_e \cdot q_e^j \cdot e_j + \sum_{i\epsilon N}\sum_{j\epsilon N} P_{Tre} \cdot l_{ij} \cdot \overline{F_{ij}} \cdot G_{ij} + \sum_{i\epsilon N}\sum_{j\epsilon N}\sum_{e\epsilon\xi} \frac{P_\lambda}{B_\lambda} \cdot k_e \cdot r_e^j \cdot q_e^j \cdot e_j \cdot G_{ij} \quad (۲)$$

ه- محدودیت‌ها

یک نود انتهایی فقط به یک نود میانی و هر نود میانی تنها به یک نقطه ابتدایی امکان اتصال دارد.

$$\sum_{i\epsilon N} G_{ij} = e_j \quad , \quad \forall j \epsilon N \quad (۳)$$

فاصله بین هر دو نقطه در گراف خروجی در گام اول نباید از L_D بیشتر باشد.

$$\sum_{i\epsilon N} l_{ij} \cdot G_{ij} \le L_D \quad , \quad \forall j \epsilon N \ , i<j \quad (۴)$$

مجموع پهنای باند درخواستی در یک نقطه در لایه دسترسی باید از یک حد تعریف شده بیشتر باشد، تا اجرای فیبر نوری را در یک نقطه انتهایی توجیه نماید.

$$\sum_{i\epsilon N_I}\sum_{e\epsilon\xi} q_e^j \cdot r_e^j \cdot e_j \cdot \overline{F_{ij}} \cdot G_{ij} \ge B_{min} \quad , \quad \forall j \epsilon N_T \quad (۵)$$

شبکه باید به‌گونه‌ای طراحی شود که تناسب بین حجم درخواست پهنای باند در هر لایه، با ظرفیت شبکه انتقال و همچنین ظرفیت سرویس‌دهی لایه بالاتر برقرار باشد.

$$\sum_{j\epsilon N_T}\sum_{e\epsilon\xi} q_e^j \cdot r_e^j \cdot e_j \cdot G_{ij} \le q_e^i \cdot e_i \cdot O(e), \quad \forall i \epsilon N_I \ , i<j \quad (۶)$$

تعداد کل تجهیز e نباید از $U(e)$ بالاتر باشد.

$$\sum_{i\epsilon N} q_e^i \cdot e_i \le U(e) \quad , \quad \forall e \epsilon \xi \quad (۷)$$

لینک‌های انتقال مورد نیاز در شبکه تلفن‌همراه، معمولا با ضریب اطمینان بالاتری تامین می‌شوند و کیفیت آن با فرآیند توافق‌نامه سطح سرویس (SLA[1]) توسط تامین‌کننده تضمین شده و برای موارد قطعی یا کاهش کیفیت جریمه تعیین می‌گردد. آماده‌سازی

[1] Service Level Agreement

www.SID.ir

Archive of SID

لینک انتقال با کیفیت بهتر، هزینه بیشتری را به شبکه دسترسی فیبرنوری تحمیل خواهدکرد. چنانچه کیفیت پهنای‌باند تامین‌شده برای تجهیزات تلفن‌همراه را α برابر بخش ثابت در نظر بگیریم، میانگین کیفیت در یک نقطه انتهایی که هر دو تجهیز ثابت و همراه در آن قرار می‌گیرد باید از مقدار آستانه α_T بیشتر باشد.

$$\frac{\alpha \cdot \sum_{e\epsilon\xi_M} q_e^j \cdot r_e^j \cdot e_j + \sum_{e\epsilon\xi_F} q_e^j \cdot r_e^j \cdot e_j}{\sum_{e\epsilon\xi_M} q_e^j \cdot r_e^j \cdot e_j + \sum_{e\epsilon\xi_F} q_e^j \cdot r_e^j \cdot e_j} \geq \alpha_T \quad , \quad \forall j \in N_T \qquad (۸)$$

بازگشت سرمایه در شبکه‌های تلفن همراه زودتر از بخش ثابت اتفاق می‌افتد و در یک شبکه دومنظوره نیز باید قابل دفاع باشد. اگر بازگشت سرمایه بر حسب سال را در بخش تلفن ثابت β برابر بخش همراه لحاظ شود، میانگین بازگشت سرمایه در یک نقطه باید از مقدار آستانه β_T کمتر باشد.

$$\frac{\sum_{e\epsilon\xi_M} q_e^j \cdot r_e^j \cdot e_j + \beta \cdot \sum_{e\epsilon\xi_F} q_e^j \cdot r_e^j \cdot e_j}{\sum_{e\epsilon\xi_M} q_e^j \cdot r_e^j \cdot e_j + \sum_{e\epsilon\xi_F} q_e^j \cdot r_e^j \cdot e_j} \leq \beta_T \, , \quad \forall j \in N_T \qquad (۹)$$

۴- پیاده‌سازی مدل پیشنهادی

تعریف مساله و مدل ریاضی حل آن طی روابط (۲) الی (۹)، ارائه شد. در این بخش تعیین مشخصات مطالعه موردی و نتایج مقایسه‌ای به‌دست‌آمده از پیاده‌سازی مدل با نرم‌افزار CPLEX ارزیابی شده است.

قیمت‌های مورد استفاده با بررسی بهای تجهیزات چند شرکت سازنده تجهیزات و هزینه‌های اجرایی فیبر نوری در شهر، حومه شهر و روستا در سال جاری استخراج شده است. فرض بر این‌است که در حدود ۸۰ درصد نقاط، هر دو تجهیز ارتباط ثابت و سیار نصب خواهد شد. در محاسبات و مقایسه‌های انجام‌شده بر محاسبه هزینه‌های اجرایی فیبر نوری، سامانه‌های انتقال و تجهیزات انتهایی تمرکز شده و سایر هزینه‌ها ثابت فرض می‌شود.

در انواع سیستم WDM، قیمت یک λ با ظرفیت مختلف در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): قیمت λ با ظرفیت مختلف

ظرفیت λ	۱ Gbps	۱۰ Gbps	۱۰۰ Gbps	۱۰۰۰ Gbps
قیمت	P_λ	$(۷)^۱ * P_\lambda$	$(۷)^۲ * P_\lambda$	$(۷)^۳ * P_\lambda$

قیمت انواع تجهیزات به‌کاررفته در شبکه‌های ثابت و همراه بر اساس تراکم جمعیتی مطابق جدول (۲) می‌باشد.

جدول (۲): بهای انواع تجهیزات در مناطق مختلف

نوع تجهیزات	شهری	حومه‌ی شهر	روستا	قیمت واحد (&)
دستگاه CU	۱	۱	۱	۴۲۰۰۰
پورت OLT	۸	۵	۳	۵۰۰
دستگاه DU	۳	۲	۱	۳۰۰۰۰
تعداد نقاط انتهایی	۱۶	۱۰	۵	-
دستگاه RU (۴ آنتن ۲۰۰ MHz)	۶۰	۴۰	۲۰	۱۵۰۰۰
دستگاه ONT	۱۲۵	۵۰	۲۵	۴۵
دستگاه MDU (۲۴ پورت)	۶	۴	۲	۱۱۰۰
دستگاه ONU (۲۰۰ پورت)	۳	۲	۱	۴۰۰۰
یک‌متر حفاری و کابلکشی	P_{Tre}	۰/۷۵ * P_{Tre}	۰/۵ * P_{Tre}	۱۰

۴-۱- نتایج پیاده‌سازی

در بخش ۳ توضیح داده شد که مدل ارائه‌شده حداقل مصرف پهنای باند تجهیزات انتهایی را برای تأمین شرایط فنی اقتصادی پروژه معین می‌کند. داده‌های خروجی حل مساله توسط نرم‌افزار CPLEX، می‌تواند در حالت‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

در حالت اول، هزینه کل پروژه در استفاده از انواع سیستم انتقال در نواحی شهری، حومه شهر و روستایی طبق شکل (۴) محاسبه شده است.

شکل (۴): قیمت تمام شده در انواع سیستم انتقال در نواحی مختلف

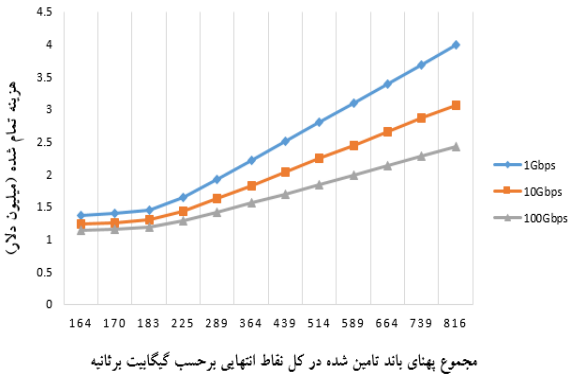
ظرفیت Gbps ۱ مناسب نیست، چون علاوه بر هزینه سنگین در پیاده سازی، در تامین نیازهای روبه رشد آینده شبکه نیز محدودیت دارد. لینک‌های Gbps ۱۰۰ برای تحقق شرایط مساله، بهترین انتخاب است. همان‌گونه که دیده می‌شود، هزینه تمام شده Gbps ۱۰۰۰، افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد که ناشی از گران بودن این فناوری و همچنین ظرفیت بلااستفاده این نوع لینک در لایه انتهایی می‌باشد.

در حالت دوم، قیمت تمام‌شده برمبنای مجموع پهنای باند

www.SID.ir

Archive of SID

قابل ارائه در کل نقاط انتهایی طبق شکل (۵) محاسبه شده است. این مقایسه در منطقه شهری انجام شده و همان‌گونه که دیده می‌شود WDM به ظرفیت ۱۰۰Gbps نیاز پهنای باند متقاضیان خدمات ثابت و سیار را با هزینه پایین‌تری تامین می‌نماید.



شکل (۵): مقایسه هزینه تامین پهنای باند در کل نقاط انتهایی

۵- نتیجه‌گیری

نمودار شکل‌های (۴ و ۵) نشان می‌دهد برای تأمین نیاز پهنای باند در شبکه نسل پنجم که حداقل ۴۰Gbps در نظر گرفته شده است، سیستم انتقال با لامبدا برابر ۱۰۰ Gbps در میان گزینه‌های ۱/۱۰/۱۰۰/۱۰۰۰ Gbps انتخاب بهینه می‌باشد.

هزینه ایجاد بک‌هال شبکه نسل پنجم با مدل پیشنهادی به‌دلیل انطباق با شبکه FTTH با فناوری WDM-PON، از نظر آینده‌نگری و انعطاف‌پذیری توجیه‌پذیر است. ضمن این‌که روند رشد پهنای باند قابل تحویل با اضافه شدن قابلیت‌های WDM به شبکه فیبر نوری مبتنی بر GPON ، نیاز روزافزون پهنای باند در لایه انتهایی را برآورده می‌سازد.

در مدل ارائه‌شده، هزینه مربوط به یک شبکه فیبر نوری با دو کاربری FTTH و نسل پنجم تحلیل شده است. امکان استفاده از این مدل برای نصب تجهیزات نسل چهارم، ONU و MDU نیز وجود دارد.

اجرای پایلوت شهر هوشمند با طرح ارائه‌شده در مقاله در یکی از شهرهای کشور و بررسی تاب‌آوری در برابر تهدید الکترومغناطیسی پیشنهاد می‌گردد. با توجه به هزینه و پیچیدگی در اجرای شهر هوشمند، انجام مطالعات گسترده و دقیق برای تهیه طرح جامع و تدوین مدل فنی و تجاری با لحاظ ابعاد مختلف پروژه مفید خواهد بود.

۶- مراجع

[1] M. Ghazvini and A. Rezaei, "Enhance Media Access Control in IEEE 802.15.4 Based Smart Grids using Swarm Intelligence Algorithms," Electronic and Cyber Defense, vol. 7, no. 3, 2019. (In Persian)

[2] C. Behrens, S. Krauß, E. Weis, and D. Breuer, "Technologies for Convergence of Fixed and Mobile Access: An Operator's Perspective," J. Opt. Commun. Netw., vol. 10, no. 1, pp. 37-42, 2018.

[3] B. Skubic, M. Fiorani, S. Tombaz, A. Furuskär, et.al, "Optical Transport Solutions for 5G Fixed Wireless Access," J. Opt. Commun. Netw., vol. 9, no. 9, pp. 10-18, 2017.

[4] H. Chen, Y. Li, S. K. Bose, W. Shao, L. Xiang, et.al, "Cost-Minimized Design for Twdm-Pon-Based 5G Mobile Backhaul Networks," J. Opt. Commun. Netw., vol. 8, no. 11, pp. B1-B11, 2016.

[5] N. Carapellese, M. Tornatore, and A. Pattavina, "Energy-Efficient Baseband Unit Placement in a Fixed/Mobile Converged WDM Aggregation Network," IEEE J. On Selected Areas in Communications, vol. 32, no. 8, pp. 1542-1551, 2014.

[6] M. Asgarirad and M. Nejati Jahromi, "A Taxonomy-based Comparison of FTTH Network Implementation Costs," Majlesi Journal of Electrical Engineering, vol. 14, no. 2, 2020.

[7] M. Alizadeh, M. Jaafari, Y. S., "Smart Home Optimized Energy Management Considering Energy Storage, Solar Cell, Electric Vehicle and Load Response," Journal of Modeling in Engineering, 17, 57, 2019 (In Persian)

[8] FTTH Coincil Europe, "Fixed-Mobile Network Convergence, the Key Role of Fibre," 2019.

[9] R. Martínez, R. Vilalta, M. Requena, R. Casellas, et. al, "Experimental SDN Control Solutions for Automatic Operations and Management of 5G Services in a Fixed Mobile Converged Packet-Optical Network," Ondm, 2018.

[10] L. S. Ramon Aparicio-Pardo, "A Green Video Control Plane with Fixed-Mobile Convergence and Cloud-RAN," 29th International Teletraffic Congress (ITC), 2017.

[11] "Framework reference for fixed and mobile convergence," Combo Project, 2014.

[12] F. Lu, Wan, Y. X. Li, L. H. Shi, Y. H. Zhou, and B. H. Zhou, "Effect of Optical Transmitter on EMP Plane Wave Distribution," 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, 2008.

[13] L. Nguyen, "Hybrid Conductive Concrete Structures for EMP Protection of Critical Infrastructure Facilities," IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications, vol. 1, no. 1, 2019.

[14] Cisco, "Indoor Small Cells: A Guide to Mission-Critical Communication," https://www.cisco.com, 2015.

[15] E. Festraets, "Finnet-Nokia-Speed-and-Convergence," http://www.finnet.fi, 2016.

www.SID.ir

Archive of SID

Journal of Electronical & Cyber Defence
Vol. 9, No. 1, 2021, Serial No. 33

A Techno-Economic Model of Sustainable Communication Infrastructure in the Smart City; using WDM-PON FTTx

M. R. Asgarirad, M. Nejati Jahromi*

*Department of Electrical Engineering, Shahid Sattary Aeronautical University of Science and Technology

(Received: 23/06/2020, Accepted: 26/10/2020)

ABSTRACT

ICT development has caused evolution in service delivery methods. With the increase in population density in urban areas, it is necessary to change and develop the infrastructures. Fiber optic network is a sustainable communication platform in the smart city and supports all broadband and narrowband services. In this paper, the role of fiber optics in the smart home (with broadband capability) and mobile network (5G) are considered as the two main parts of a smart city. A techno-economic model of communication infrastructure in the smart city (using multi-purpose fiber optic network with existing resources consideration) is stated by mixed integer linear programming (MILP) method. In this literature, whilst providing fundamental communication in the smart city, decreasing the vulnerability to threats and increasing the percentage of security and reliability, technical requirements are met and the Capital Expenditure (CAPEX) of network is reduced, as well.

Keywords: Smart City, FTTx, 5G Technology, MILP, Cost Optimization, WDM-PON

* Corresponding Author Email: nejati@aut.ac.ir

www.SID.ir