

# طراحی شبکه ارتباطات فیبر نوری در سه سطح با در نظر گرفتن محدودیت پهنای باند کاربران

مسعود ربانی<sup>۱\*</sup>، محمد روانبخش<sup>۲</sup>، مهیار طاهری<sup>۲</sup>

۱. استاد دانشکده مهندسی صنایع پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران
۲. کارشناس ارشد مهندسی صنایع پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۵/۱۶، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۹۷/۰۳/۰۸، تاریخ تصویب: ۹۷/۰۷/۰۳)

## چکیده

در این مقاله، مدل یکپارچه برای شبکه سه سطحی توزیع فیبر نوری با در نظر گرفتن هم‌زمان شبکه‌های ستون فقرات و دسترسی ارائه شده است که توپولوژی به کار رفته در سطوح آن به ترتیب حلقه، ستاره و ستاره است. هدف مدل نیز تعیین مکان‌های مرکزی و متمرکزکننده‌ها، چگونگی ارتباط میان‌هاب‌ها و اختصاص هر یک از کاربران به یکی از متمرکزکننده‌هاست؛ به نحوی که هزینه‌های ارتباطی فیبر و راه‌اندازی متمرکزکننده‌ها به حداقل برسد و پهنای باند مورد نیاز هر کاربر تأمین شود. با توجه به NP-Hard بودن، مسئله در سایز کوچک با نرم‌افزار GAMS اعتباردهی و سپس با استفاده از دو روش فراابتکاری تفاضل تکاملی و الگوریتم ژنتیک مدل در سایزهای بزرگ‌تر حل شده است. مقایسه نتایج محاسباتی بیانگر سرعت بیشتر الگوریتم تفاضل تکاملی و برتری این الگوریتم بر مدل با سایز کوچک و متوسط است، اما برای مدلی با ابعاد بزرگ‌تر الگوریتم ژنتیک توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم تفاضل تکاملی، الگوریتم ژنتیک، طراحی شبکه‌های سه سطحی، فیبر نوری، مکان‌یابی-اختصاص.

## مقدمه

به صورت مستقیم از OLT<sup>۱</sup> واقع در هاب مرکزی به ONU<sup>۲</sup> به عنوان نقطه پایانی متصل می‌شود، اما در توپولوژی PON پهنای باند می‌تواند به صورت اشتراکی استفاده شود که در آن فیبر نوری با عبور از اسپلیترها<sup>۳</sup> منشعب شده و امکان انتقال کابل‌های فیبر نوری چندمقصد در یک رشته سیم به وجود می‌آید. وجود متمرکزکننده<sup>۴</sup> در ساختار PON سبب کاهش مقدار فیبر مصرفی مانند تجهیزات مورد نیاز در هاب مرکزی در مقایسه با ساختار P2P است. امروزه اسپلیترها توانایی تبدیل رشته‌های ۱:۲، ۱:۴، ۱:۸، ۱:۱۶، ۱:۳۲ و ۱:۶۴ (۱:۲<sup>k</sup>) را دارند [۵، ۶]. مقوله مهم در بحث سرویس‌رسانی فیبر نوری پهنای باند دریافتی هر کاربر است. پهنای باند یا همان سرعت با واحد مگابایت بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شود. هر یک از مراکز توزیع، پهنای باند مشخصی دارند. با عبور سیگنال از اسپلیتر نوع k (۱:۲<sup>k</sup>)، پهنای باند هر یک از رشته‌های خروجی اسپلیتر ۲<sup>-k</sup> برابر رشته ورودی به آن خواهد بود. در این میان، می‌توان میان بالاترین لایه و لایه‌های پایین‌تر ساختار شبکه سلسله‌مراتبی تمایز قائل شد که شامل شبکه ستون فقرات<sup>۱</sup> (ارتباط میان هاب‌های مرکزی در بالاترین لایه) و شبکه دسترسی<sup>۱۱</sup> (ارتباط بین

در دهه‌های اخیر، شبکه‌های ارتباطی گسترش چشمگیری یافته‌اند [۱]. شبکه ارتباطی شامل مجموعه‌ای از گره‌هاست که پیغام یا اطلاعات را در قالب‌های گوناگون مانند داده، صدا و تصویر با استفاده از فیبر نوری، کابل‌های مسی، ارتباطات رادیویی یا ماهواره‌ای انتقال می‌دهد [۲]. امروزه فیبر نوری به دلیل پهنای باند<sup>۱</sup> بیشتر، میرایی<sup>۲</sup> کمتر و مقرون‌به‌صرفه بودن در مقایسه با دیگر فناوری‌ها، از مهم‌ترین ابزار انتقال اطلاعات محسوب می‌شود که انقلابی در صنعت ارتباطات از راه دور به وجود آورده است [۳]. شبکه‌های ارتباطی معمولاً بر پایه ساختار سلسله‌مراتبی در دو یا چندلایه تشکیل می‌شود. این ساختار هزینه‌های سیستم را کاهش و انعطاف‌پذیری آن را افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر، به جای ایجاد مسیر مستقیم میان هر جفت مبدأ-مقصد، با یکسان‌سازی بخشی از مسیر جریان‌ها با مبدأ یکسان و مقصدهای متفاوت، مقدار چشمگیری از هزینه کاهش می‌یابد [۴]. انتقال فیبر به کاربران به دو صورت P2P<sup>۳</sup> و PON<sup>۴</sup> صورت می‌گیرد. در توپولوژی P2P کاربران نهایی یک پهنای باند اختصاصی<sup>۵</sup> دارند و فیبر نوری

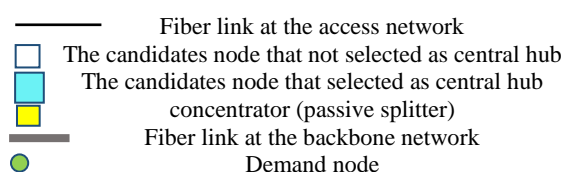
این پژوهش تلاش شده است تا ایستگاه‌های زمینی به نحوی به ایستگاه‌های ماهواره‌ای تخصیص داده شوند تا مجموع هزینه‌های ناشی از احداث هاب و اختصاص ایستگاه‌های زمینی به ماهواره‌ای حداقل سازی شود. آنان به‌منظور حل مدل ارائه‌شده از الگوریتم تابو بهره گرفتند و روش‌های نوینی به‌منظور کاهش زمان حل پیشنهاد کردند. تومادسن [۱۳] به حل مسئله طراحی شبکه‌های دوسطحی با استفاده از الگوریتم شاخه و قیمت<sup>۱۴</sup> پرداخته است. توپولوژی به‌کاررفته در هریک از سطوح، از نوع حلقه است. هدف مدل ارائه‌شده حداقل‌سازی هزینه ثابت لینک‌های ارتباطی و هزینه ظرفیت لینک‌هاست. از دیگر توپولوژی‌های به‌کاررفته در ادبیات موضوع در دو سطح می‌توان به درخت-ستاره [۱۴] و هاب خطی [۱۵] اشاره کرد.

در تمامی پژوهش‌هایی که تاکنون به آن‌ها اشاره شد، مسئله طراحی شبکه در یک یا دو لایه مطرح شده است. مراکی و یامان [۱۶] مدل مختلط عدد صحیح را برای شبکه‌های سه‌سطحی ارائه دادند که در بالاترین لایه از توپولوژی ارتباط کامل و در سطوح پایین‌تر از توپولوژی ستاره-ستاره استفاده شده است. در این مدل، تقاضای نامشخص به دو صورت مختلف در نظر گرفته شده است. در حالت اول، تنها حداکثر تقاضای جریان از کل گره‌های مجاور در دسترس است و در حالت دیگر، علاوه بر اطلاعات حالت اولیه، محدودیت‌های حداقل و حداکثر تقاضا در هریک از نقاط مشخص است. در این پژوهش هزینه مسیر با در نظر گرفتن محدودیت‌های زمانی و کیفیت سرویس حداقل‌سازی شد. همچنین الماستاس [۱۷] مدل سه‌سطحی طراحی شبکه ستاره-مش-ستاره را برای انتقال بار میان شهرهای استانبول و آنکارا با محدودیت زمان تحویل ارائه داد. هدف مدل ارائه‌شده حداقل‌سازی هزینه انتقال هوایی و زمینی بین همه نقاط مبدأ و مقصد است.

مکان‌یابی تجهیزات فیبر نوری نیز از جنبه‌های گوناگونی مطالعه شده است. یازار [۵] دو مبحث متفاوت پهنه سبز و طراحی مجدد را به‌صورت جداگانه بررسی کرده است. در قسمت پهنه سبز، هدف انتقال فیبر نوری از هاب مرکزی به نقاط تقاضا با در نظر گرفتن محدودیت افت توان سیگنال و هدف طراحی مجدد، بهبود سطح سرویس فعلی با افزودن فیبر نوری به شبکه‌های کابل مسی است.

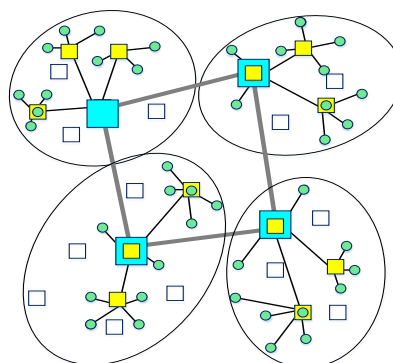
کاربر نهایی و شبکه ستون فقرات) می‌شود. اغلب به‌دلیل سبزی بالای مسائل کاربردی در دنیای واقعی، شبکه‌های دسترسی و شبکه ستون به‌صورت مستقل از یکدیگر در نظر گرفته می‌شوند. یازار و همکاران [۷] مدل یکپارچه برنامه‌ریزی خطی را با فرمول‌بندی مجزا و جداگانه برای شبکه‌های ستون فقرات و دسترسی با محدودیت بقا و مسیریابی در سطح شبکه ستون فقرات ارائه دادند. در این پژوهش، یکی از بزرگ‌ترین ارائه‌دهندگان خدمات اینترنت به‌عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده و تلاش شده است برای دو شرایط متفاوت، شامل منطقه بدون دسترسی به اینترنت و منطقه با دسترسی محدود به شبکه‌های مسی راهکارهایی بهینه ارائه شود. برخی پژوهش‌ها به حل مسئله طراحی شبکه دسترسی بدون در نظر گرفتن شبکه ستون فقرات پرداخته‌اند. گاویش و همکاران [۸] با استفاده از روشی ابتکاری، مسئله تک‌دوره‌ای طراحی شبکه دسترسی دوسطحی را با استفاده از توپولوژی درخت-حلقه با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت حل کردند. برخی پژوهش‌های دیگر نیز سطح ستون فقرات را به‌تنهایی در نظر گرفته‌اند؛ برای نمونه می‌توان به پژوهش هو و همکاران [۹] و بهشتی و همکاران [۱۰] اشاره کرد. با توجه به مرتبط بودن مسائل در سطوح مختلف، برای اطمینان از رسیدن به پاسخی بهینه باید لایه‌های دسترسی و ستون به‌صورت یکپارچه و هم‌زمان در نظر گرفته شوند. بریمبرگ و همکاران [۱۱] به ارائه مدل برنامه‌ریزی خطی برای مسئله دوسطحی ارتباط کامل-ستاره به‌منظور حداقل‌سازی مجموع هزینه‌های احداث هاب، اختصاص نقاط تقاضا به هاب و لینک‌های ارتباطی بین هاب‌ها پرداختند. همچنین مدل گسترش‌یافته مدل اصلی به تعیین پارامترهای محدودیت‌کننده را ارائه دادند. صبورایی و همکاران [۲] مدل ریاضی جدیدی برای شبکه ارتباطی دوسطحی از نوع ارتباط کامل در هریک از سطوح را با استفاده از دو الگوریتم TSVNS<sup>۱۲</sup> و SAVNS<sup>۱۳</sup> ارائه دادند. اساس کار الگوریتم‌های ارائه‌شده، اضافه کردن الگوریتم متغیر جست‌وجوی همسایگی به ساختار کلی الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه و تبرید شبیه است. ابیازی سانی و قنبری [۱۲] مدلی از برنامه‌ریزی خطی را برای شبکه ارتباطات ماهواره‌ای دوسطحی ستاره-ستاره ارائه دادند. در

ستون فقرات که ارتباط میان هاب‌های مرکزی را نشان می‌دهد، از توپولوژی حلقه استفاده شده است؛ زیرا این توپولوژی از سویی مقرون به صرفه‌تر از توپولوژی‌هایی از جمله مش و ارتباط کامل است و از سوی دیگر، این ساختار قابلیت اطمینان بالایی دارد. در شبکه‌های دسترسی نیز از توپولوژی PON استفاده شده است. شمای کلی مسئله در شکل ۱ قابل مشاهده است.



برخی دیگر از مقالات به جنبه مکان‌یابی تقویت‌کننده‌ها<sup>۱۵</sup> در شبکه فیبر نوری برای جبران افت سیگنال در طول مسیر توزیع پرداخته‌اند؛ از قبیل چن و همکاران [۱۸] و دورته و همکاران [۱۹].

در این پژوهش طراحی شبکه ارتباطی فیبر نوری در سه لایه مطالعه شد. ناحیه مورد مطالعه از چند بخش<sup>۱۶</sup> تشکیل و دسته‌بندی گره‌ها از پیش تعیین شد. در شبکه



شکل ۱. نمونه‌ای از شبکه سه سطحی حلقه- ستاره- ستاره با ۴ بخش از پیش تعیین شده

- برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم هریک از هاب‌های مرکزی به دو هاب مرکزی دیگر متصل است (هاب‌های مرکزی به همراه یال‌های ارتباطی میان آن‌ها تشکیل حلقه می‌دهند؛ به صورتی که زیرحلقه<sup>۱۷</sup> تشکیل نشود).
- در هر بخش، یک یا چند گره به‌عنوان متمرکزکننده انتخاب می‌شوند (هریک از نقاط تقاضا و نقاط کاندید برای هاب مرکزی، نقطه بالقوه برای انتخاب به‌عنوان متمرکز است).
- پهنای باند هاب مرکزی و میزان تقاضای پهنای باند هریک از کاربران نهایی مشخص و ثابت است.
- هریک از کاربران نهایی به یکی از متمرکزکننده‌ها که در همان بخش است اختصاص می‌یابد و از آن تغذیه می‌شود.
- هریک از متمرکزکننده‌ها مستقیم به هاب مرکزی بخش خود متصل می‌شود.
- هزینه احداث هر متمرکز و هر نوع اسپلیتر به‌کاررفته در آن، همچنین هزینه انتقال هر متر فیبر در هریک از سطوح مشخص است.

هدف مدل تعیین مکان‌های هاب مرکزی و متمرکزکننده‌ها، اختصاص گره‌های تقاضا به یکی از متمرکزکننده‌ها، تعیین نوع اسپلیتر به‌کاررفته در متمرکزکننده‌ها و تعیین چگونگی اتصال میان هاب‌های مرکزی است؛ به صورتی که مجموع هزینه‌های نصب و راه‌اندازی کابینت‌های توزیع و لینک‌های ارتباطی فیبر به حداقل برسد و حداقل پهنای باند موردنیاز هر کاربر تأمین شود.

### تعریف مسئله و مدل ریاضی

در این بخش، فرضیات و فرمول‌بندی مدل پیشنهادی طراحی شبکه فیبر با در نظر گرفتن شرایط دنیای واقعی ارائه می‌شود.

### فرضیات مسئله

- ناحیه مورد مطالعه از چندین بخش تشکیل شده است و هریک از کاربران متعلق به یکی از این بخش‌ها هستند.
- هر بخش دو یا چند گره کاندید برای هاب مرکزی است و در نهایت یک گره به‌عنوان هاب مرکزی انتخاب می‌شود.

این صورت مقدار صفر می‌گیرد.  
 $F_k$  تعداد پرت‌های<sup>۱۸</sup> اسپلیتر نوع  $k$ ؛  
 $COB$  پهنای باند در هر یک از هاب‌های مرکزی؛  
 $MM$  عدد بزرگ؛  
 $Cps_k$  هزینه به‌کارگیری اسپلیتر نوع  $k$  در متمرکزکننده‌ها؛

$C_1$  هزینه انتقال بین نقاط تقاضا و متمرکزکننده‌ها؛  
 $C_2$  هزینه انتقال بین متمرکزکننده‌ها و هاب‌های مرکزی؛  
 $C_3$  هزینه انتقال بین هاب‌های مرکزی؛  
 $C_4$  هزینه ثابت احداث متمرکزکننده‌ها.

#### متغیرهای تصمیم

$X_{pq}$  اگر لینک ارتباطی میان بخش‌های  $p$  و  $q$  وجود داشته باشد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

$S_{ik}$  اگر در گره  $i$  از اسپلیتر نوع  $k$  استفاده شود، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

$A_{ij}$  اگر نقطه تقاضای  $i$  به متمرکزکننده  $j$  اختصاص یابد مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

$W_{ip}$  اگر گره  $i$  به‌عنوان هاب مرکزی در بخش  $p$  انتخاب شده باشد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

$M_i$  سرعت در گره  $i$

• پس از عبور از اسپلیتر نوع  $K$ ، رشته<sup>۲۰</sup> خروجی خواهیم داشت که پهنای باند هر یک از رشته‌های خروجی<sup>۲۱</sup> برابر رشته ورودی است.

#### نمادهای مدل

##### اندیس‌ها

$i$  شمارنده گره‌ها؛  
 $k$  شمارنده نوع اسپلیتر؛  
 $p$  شمارنده بخش‌ها.

##### پارامترهای ورودی

$I$  تعداد گره‌های تقاضا؛  
 $K$  تعداد اسپلیترهای مختلف؛  
 $p$  تعداد بخش‌ها.

$Y_{ip}$  اگر گره  $i$  متعلق به بخش  $p$  باشد، مقدار ۱ می‌گیرد. در غیر این صورت مقدار آن صفر است.

$Ca_{ip}$  اگر گره  $i$  به‌عنوان کاندید به‌عنوان هاب مرکزی در بخش  $p$  باشد مقدار ۱ می‌گیرد. در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

$D_{ij}$  کوتاه‌ترین فاصله بین گره‌های  $i$  و  $j$ ؛

$de_i$  پهنای درخواستی گره تقاضای  $i$ .

$O_i$  اگر گره  $i$  تقاضا داشته باشد مقدار ۱ و در غیر

#### مدل ریاضی

$$\text{Min}Z = \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I X_{pq} W_{ip} W_{jq} D_{ij} C_3 + \sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I S_{ik} Y_{ip} W_{jp} D_{ij} C_2 \quad (1)$$

$$+ \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I S_{ik} (Csp_k + C_4) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I A_{ij} D_{ij} C_1$$

$$\sum_{i=1}^I W_{ip} = 1 \quad \forall p \quad \text{S.t.} \quad (2)$$

$$\forall i, p \quad W_{ip} \leq Ca_{ip} \quad (3)$$

$$\forall p \quad \sum_{q=1, q \neq p}^P X_{pq} = 1 \quad (4)$$

$$\forall q \quad \sum_{p=1, p \neq q}^P X_{pq} = 1 \quad (5)$$

$$\forall q, p; 2 \leq p \neq q \leq P \quad U_p - U_q + P.X_{pq} \leq P - 1 \quad (6)$$

$$\forall i \quad \sum_{j=1}^I A_{ij} = O_i \quad (7)$$

$$\forall i, j \quad A_{ij} \leq \sum_{k=1}^K S_{jk} \quad (8)$$

$$\forall i, j, p \quad |Y_{ip} - Y_{jp}| \leq MM(1 - A_{ij}) \quad (9)$$

$$\forall j \quad \sum_{i=1}^I A_{ij} \leq \sum_{k=1}^K S_{j,k} 2^{F_k} \quad (10)$$

$$\forall i \quad \sum_{k=1}^K S_{ik} \leq 1 \quad (11)$$

$$\forall i \quad M_i \leq COB \quad (12)$$

$$\forall i, j, k \quad M_i \leq \frac{COB}{2^{F_k}} + COB(1 - A_{ij}) + COB(1 - S_{jk}) \quad (13)$$

$$\forall i \quad M_i \geq de_i \quad (14)$$

$$W_{ip}, X_{pq}, A_{ij}, S_{jk} \in \{0,1\}, M_i \geq 0, U_p \geq 0 \text{ Integer} \quad (15)$$

رشته‌های خروجی از اسپلیتر در هر متمرکزکننده از تعداد نقاط تقاضا که از آن تغذیه می‌شوند کمتر نباشد. در محدودیت ۱۱ مشخص می‌شود که در هر متمرکزکننده بیش از یک نوع اسپلیتر استفاده نشود. محدودیت ۱۲ نشان می‌دهد سرعت در هر یک از گره‌ها نمی‌تواند بیشتر از پهنای باند هاب مرکزی باشد. محدودیت ۱۳ حداکثر سرعت در هر یک از نقاط تقاضا را با توجه به نوع اسپلیتر به کاررفته در منبع تغذیه آن‌ها محاسبه می‌کند. محدودیت ۱۴ برای اطمینان از این است که سرعت هر گره تقاضا از پهنای باند درخواستی آن کمتر نشود.

### خطی‌سازی مدل ارائه شده

در این بخش به خطی‌سازی مدل ارائه شده می‌پردازیم. در گزاره‌های یک و دو مربوط به تابع هدف ۱، ضرب متغیرهای باینری در یکدیگر وجود دارد. برای خطی‌سازی این گزاره‌ها با تعریف متغیرهای کمکی باینری  $L1_{ij}$  و  $L2_{ij}$ ، محدودیت‌های ۱۷ تا ۱۹ را به مسئله اضافه و تابع هدف ۱۶ را جایگزین تابع هدف ۱ می‌کنیم.

$$\text{Min}Z = \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I L1_{ij} D_{ij} C_3 + \sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I L2_{ij} D_{ij} C_2 \quad (16)$$

$$+ \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I S_{ik} (Csp_k + C_4) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I A_{ij} D_{ij} C_1$$

$$\forall i, j, p, q \quad X_{pq} + W_{ip} + W_{jp} \leq L1_{ij} + 2 \quad (17)$$

$$\forall i, j, p, k \quad S_{ik} + W_{jp} + Y_{ip} \leq L2_{ij} + 2 \quad (18)$$

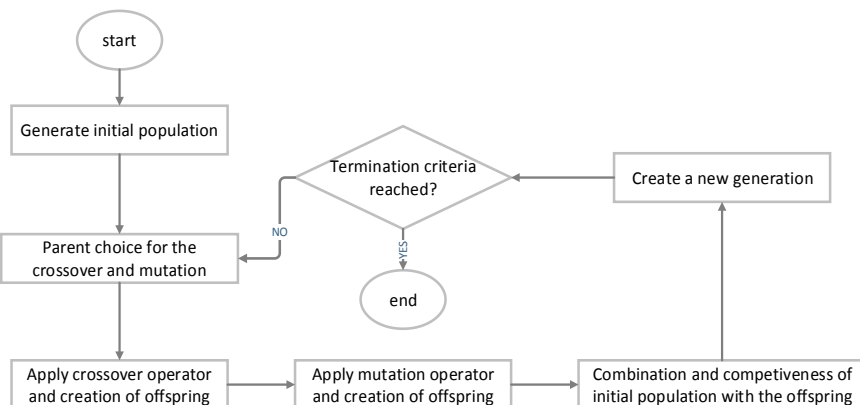
$$L1_{ij}, L2_{ij} \in \{0,1\} \quad (19)$$

تابع هدف ۱ نشان‌دهنده جهت حداقل‌سازی مجموعه هزینه‌های شبکه سه‌سطحی است که به ترتیب گزاره اول هزینه‌های ارتباط میان هاب‌های مرکزی، گزاره دوم هزینه‌های ارتباط میان هاب مرکزی و متمرکزکننده‌ها، گزاره سوم هزینه‌های احداث متمرکزکننده‌ها و اسپلیترهای به کاررفته در آن‌ها و گزاره چهارم هزینه‌های مرتبط با انتقال فیبر از متمرکزکننده‌ها به نقاط تقاضا را محاسبه می‌کنند. محدودیت‌های ۲ و ۳ سبب می‌شود در هر یک از بخش‌ها یکی از گره‌های کاندید به عنوان هاب مرکزی انتخاب شود. محدودیت‌های ۴ و ۵ تعیین می‌کنند که هر یک از هاب‌های مرکزی با کدام دو هاب مرکزی دیگر ارتباط دارند (شرط‌هایی برای ایجاد حلقه) محدودیت ۶ از شکل‌گیری زیرحلقه جلوگیری می‌کند. محدودیت‌های ۷ و ۸ تعیین می‌کنند که هر یک از گره‌ها در صورت داشتن تقاضا از کدام متمرکزکننده تغذیه می‌شوند. محدودیت ۹ سبب می‌شود هر نقاط تقاضا به یکی از متمرکزکننده‌های متعلق به بخش خود اختصاص یابد. محدودیت ۱۰ برای اطمینان از این است که تعداد

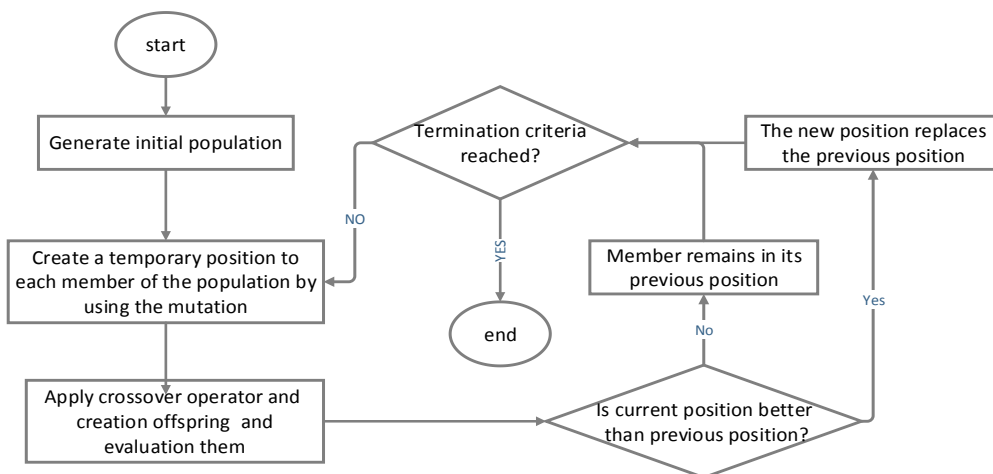
ژنتیک را برای مسائل مشابه به کار می‌برند [۲۰-۲۱]. در این مقاله، به دنبال مقایسه عملکرد الگوریتم تفاضل تکاملی (الگوریتمی که در ادبیات موضوع سایر پژوهشگران استفاده نشده است) با الگوریتم ژنتیک هستیم و نحوه عملکرد هر یک از الگوریتم‌ها را به صورت جداگانه شرح می‌دهیم.

### الگوریتم ژنتیک

ژنتیک الگوریتم (GA) روش جست‌وجوی همسایگی است که به صورت گسترده در مسائل بهینه‌سازی استفاده می‌شود. این الگوریتم عملکردی شبیه ژن دارد. هر کروموزوم رشته‌ای از اعداد است که در اصطلاح ژن نامیده می‌شوند. در هر تکرار الگوریتم با استفاده از عملگرهای جهش<sup>۲۲</sup> و تقاطع<sup>۲۳</sup> کروموزوم‌های جدیدی ایجاد می‌شود که در اصطلاح به آن‌ها فرزند<sup>۲۴</sup> می‌گویند. سپس فرزندان ارزیابی می‌شوند و به کمک عملگر انتخاب کروموزوم‌های واجد شرایط به نسل بعد انتقال می‌یابند. در شکل ۲، ساختار اصلی GA آمده است.



شکل ۲. فلوچارت GA



شکل ۳. فلوچارت الگوریتم DE

در محدودیت ۹ از قدر مطلق استفاده می‌شود. برای خطی‌سازی این محدودیت، متغیر کمکی  $E1_{ij}$  را به صورت زیر تعریف و محدودیت ۹ را با محدودیت‌های ۲۰ تا ۲۳ جایگذاری می‌کنیم.

$$Y_{ip} - Y_{jp} \leq E1_{ij} \quad \forall i, j, p \quad (20)$$

$$Y_{jp} - Y_{ip} \leq E1_{ij} \quad \forall i, j, p \quad (21)$$

$$E1_{ij} \leq MM (1 - A_{ij}) \quad \forall i, j \quad (22)$$

$$E1_{ij} \in \{0, 1\} \quad (23)$$

### روش حل

با توجه به NP-hard<sup>۱۹</sup> بودن مدل برای اعتباردهی به آن، مسائل در سایز کوچک و متوسط را به وسیله نرم‌افزار GAMS رفع و برای حل مسائل در سایز بزرگ از دو روش فراابتکاری ژنتیک الگوریتم<sup>۲۰</sup> و تکامل تفاضلی<sup>۲۱</sup> استفاده می‌کنیم. باید توجه داشت که برخی پژوهشگران الگوریتم

## الگوریتم تفاضل تکاملی

تکامل تفاضلی (DE) نوعی الگوریتم تکاملی و مبتنی بر جمعیت است که براساس تکنیک جست و جوی هندسی شکل گرفته است. وجه تمایز این الگوریتم با دیگر الگوریتم‌های تکاملی، ایجاد بردارهای پارامتر آزمایشی است که بقا یا حذف آن در نسل بعد از سوی عملگر انتخاب تعیین می‌شود. در این الگوریتم، عضو جدید به کمک افزودن بردار تفاوت وزن میان دو عضو جمعیت به عضو سوم ایجاد می‌شود. اگر مقدار تابع هدف عضو ایجاد شده کمتر از یک عضو جمعیت از پیش تعیین شده باشد، جایگزین آن می‌شود. در شکل ۳، ساختار اصلی DE آمده است.

## آزمایش‌های عددی

دو الگوریتم به کمک نرم افزار MATLAB R2013a روی

رایانه شخصی با مشخصات ASUS Core i7، پردازشگر 2.2 GHz و حافظه موقت 4GB کدنویسی شده است. برای بررسی صحت عملکرد مدل، شانزده مسئله به صورت تصادفی طراحی شده است که نیمی از آن‌ها در سایز کوچک و متوسط و نیمی دیگر در ابعاد بزرگ هستند. پارامترهای مسئله‌های طرح شده در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است.

## مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری

در این بخش به حل مسائل طرح شده با استفاده از دو الگوریتم GA و DE و مقایسه آن با پاسخ دقیق می‌پردازیم. سپس نتایج آزمایش براساس معیار زمان و مقدار تابع هدف را ارزیابی می‌کنیم. هریک از مسائل پنج بار اجرا شده و میانگین زمان پردازش و مقدار تابع هدف در سایزهای کوچک و متوسط و سایزهای بزرگ به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ آمده است.

جدول ۱. اطلاعات مسئله‌های طرح شده

| Parameter | Value | Parameter | Value     |
|-----------|-------|-----------|-----------|
| $C_1$     | 2\$   | COB       | 2000      |
| $C_2$     | 3\$   | de        | U(80,120) |
| $C_3$     | 10\$  | $Cps_k$   | 5k \$     |
| $C_4$     | 50\$  | -         | -         |

جدول ۲. مجموعه مسائل طرح شده در سایزهای گوناگون

| Small and medium size |                |                   |  | Large size   |                |                   |  |
|-----------------------|----------------|-------------------|--|--------------|----------------|-------------------|--|
| Test problem          | Number of node | Number of section | Number of candidate node in each section | Test problem | Number of node | Number of section | Number of candidate node in each section |
| ۱                     | ۱۲             | ۲                 | ۲  | ۹            | ۸۰             | ۳                 | ۲  |
| ۲                     | ۲۰             | ۲                 | ۲  | ۱۰           | ۱۰۰            | ۴                 | ۳  |
| ۳                     | ۲۵             | ۳                 | ۲  | ۱۱           | ۱۳۰            | ۴                 | ۴  |
| ۴                     | ۳۰             | ۳                 | ۳  | ۱۲           | ۲۰۰            | ۴                 | ۴  |
| ۵                     | ۴۰             | ۳                 | ۳  | ۱۳           | ۳۰۰            | ۶                 | ۵  |
| ۶                     | ۶۰             | ۲                 | ۲  | ۱۴           | ۴۵۰            | ۶                 | ۵  |
| ۷                     | ۶۰             | ۳                 | ۳  | ۱۵           | ۶۰۰            | ۴                 | ۶  |
| ۸                     | ۷۰             | ۴                 | ۳  | ۱۶           | ۸۰۰            | ۴                 | ۶  |

جدول ۳. مقایسه اجراهای GAMS، DE و GA برای سایزهای کوچک و متوسط

| Test problem | GAMS       |          | DE         |          |        | GA         |          |        |
|--------------|------------|----------|------------|----------|--------|------------|----------|--------|
|              | $Z^{best}$ | CPU Time | $Z^{mean}$ | CPU Time | GAP    | $Z^{mean}$ | CPU Time | GAP    |
| ۱            | ۷۱۰۶۱      | ۰۰:۰۰:۰۱ | ۷۱۰۷۱      | ۰۰:۰۰:۰۲ | ۰۰۰۱۴  | ۷۱۰۸۵      | ۰۰:۰۰:۰۳ | ۰۰۰۳۳  |
| ۲            | ۴۵۴۲۵      | ۰۰:۰۰:۰۲ | ۴۵۴۲۶      | ۰۰:۰۰:۰۴ | ۰۰۰۰۲  | ۴۵۴۲۸      | ۰۰:۰۰:۰۶ | ۰۰۰۰۶  |
| ۳            | ۱۱۳۷۵۱     | ۰۰:۰۰:۰۳ | ۱۱۳۷۸۱     | ۰۰:۰۰:۰۵ | ۰۰۰۲۶  | ۱۱۳۸۱۴     | ۰۰:۰۰:۰۸ | ۰۰۰۵۵  |
| ۴            | ۱۰۷۰۱۹     | ۰۰:۰۰:۱۷ | ۱۰۷۳۶۵     | ۰۰:۰۰:۰۷ | ۰۰۰۳۲۳ | ۱۰۷۳۱۶     | ۰۰:۰۰:۱۱ | ۰۰۰۲۷۷ |
| ۵            | ۱۵۱۹۵۹     | ۰۰:۰۰:۲۳ | ۱۵۲۱۴۷     | ۰۰:۰۰:۱۰ | ۰۰۰۱۲۳ | ۱۵۲۳۸۱     | ۰۰:۰۰:۱۴ | ۰۰۰۲۷۷ |
| ۶            | ۸۷۱۷۷      | ۰۰:۱۰:۳۳ | ۸۸۲۴۰      | ۰۰:۰۰:۱۷ | ۰۰۱۲۱۹ | ۸۹۴۸۳      | ۰۰:۰۰:۲۵ | ۰۰۲۵۹۳ |
| ۷            | ۱۴۱۷۱۷     | ۰۰:۱۵:۲۱ | ۱۴۳۸۴۱     | ۰۰:۰۰:۲۰ | ۰۰۱۴۹۸ | ۱۴۲۸۸۲     | ۰۰:۰۰:۲۸ | ۰۰۰۸۲۲ |
| ۸            | ۱۳۲۹۲۳     | ۰۰:۲۰:۵۱ | ۱۳۳۹۰۸     | ۰۰:۰۰:۲۴ | ۰۰۱۱۴۵ | ۱۳۴۵۲۱     | ۰۰:۰۰:۳۳ | ۰۰۱۲۰۲ |

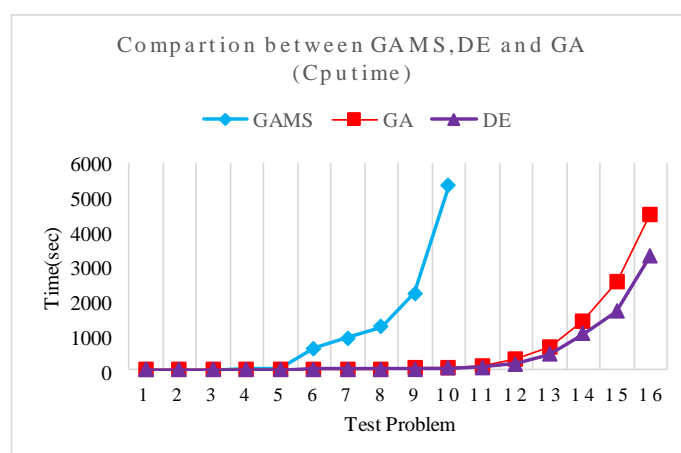
جدول ۴. مقایسه اجرای GAMS، DE و GA برای سایزهای بزرگ

| Test problem | GAMS       |          | DE         |          |        | GA         |          |        |
|--------------|------------|----------|------------|----------|--------|------------|----------|--------|
|              | $Z^{best}$ | CPU Time | $Z^{mean}$ | CPU Time | GAP    | $Z^{mean}$ | CPU Time | GAP    |
| ۹            | ۱۷۲۱۵۵     | ۰۰:۳۷:۰۳ | ۱۷۵۷۹۳     | ۰۰:۰۰:۳۱ | ۰.۲۱۱۳ | ۱۷۴۶۱۳     | ۰۰:۰۰:۴۶ | ۰.۱۴۲۷ |
| ۱۰           | ۱۸۱۶۲۸     | ۰۱:۲۸:۵۱ | ۱۸۶۲۶۶     | ۰۰:۰۰:۴۷ | ۰.۲۵۵۳ | ۱۸۳۵۷۲     | ۰۰:۰۱:۱۲ | ۰.۱۰۷۰ |
| ۱۱           | N/A        | N/A      | ۱۶۵۰۵۵     | ۰۰:۰۱:۲۳ | N/A    | ۱۶۳۰۸۱     | ۰۰:۰۱:۵۶ | N/A    |
| ۱۲           | N/A        | N/A      | ۲۲۲۷۰۵     | ۰۰:۰۳:۰۱ | N/A    | ۲۱۲۴۶۰     | ۰۰:۰۴:۵۱ | N/A    |
| ۱۳           | N/A        | N/A      | ۳۶۰۴۳۵     | ۰۰:۰۷:۴۰ | N/A    | ۳۵۹۸۳۱     | ۰۰:۱۱:۲۳ | N/A    |
| ۱۴           | N/A        | N/A      | ۴۶۶۵۹۰     | ۰۰:۱۷:۲۹ | N/A    | ۴۵۳۵۶۲     | ۰۰:۲۳:۳۱ | N/A    |
| ۱۵           | N/A        | N/A      | ۴۶۵۶۷۲     | ۰۰:۲۸:۲۳ | N/A    | ۴۶۰۹۷۱     | ۰۰:۴۲:۵۷ | N/A    |
| ۱۶           | N/A        | N/A      | ۵۹۲۷۴۵     | ۰۰:۵۵:۰۹ | N/A    | ۵۷۷۸۴۴     | ۰۱:۱۵:۱۲ | N/A    |

## نتیجه‌گیری

امروزه استفاده از فیبر نوری به دلیل سرعت و ظرفیت بالاتر و همچنین صرفه اقتصادی، از دیگر ابزار انتقال اطلاعات افزایش یافته است. در این پژوهش کاربردی، مدل ریاضی خطی برای انتقال فیبر نوری با در نظر گرفتن شبکه‌های ستون فقرات و دسترسی به صورت هم‌زمان در سه سطح ارائه شد که توپولوژی به کاررفته در سطوح آن به ترتیب حلقه-ستاره-ستاره است. هدف مدل ارائه شده تعیین مکان هاب‌های مرکزی و متمرکزکننده‌ها، اختصاص هریک از نقاط تقاضا به یکی از متمرکزکننده‌ها و تعیین نحوه ارتباط مراکز توزیع است؛ به نحوی که هزینه‌های لینک‌های ارتباطی فیبر و احداث متمرکزکننده‌ها به حداقل برسد و پهنای باند مورد نیاز هریک از کاربران نهایی تأمین شود. با توجه به NP-Hard بودن، اعتباردهی مسئله در سایزهای کوچک و متوسط با نرم‌افزار GAMS صورت گرفت و دو الگوریتم فراابتکاری DE و GA برای حل

مسئله در سایزهای بزرگ معرفی شد. برای بررسی صحت عملکرد مدل، شانزده مسئله در ابعاد کوچک و بزرگ به صورت تصادفی ایجاد شد و سپس مقایسه دو الگوریتم از نظر مقدار تابع هدف و زمان پردازش صورت گرفت. براساس نتیجه مقایسه الگوریتم DE در سایزهای کوچک و متوسط به صورت میانگین، مقدار تابع هدف از الگوریتم GA بهتر است، اما در سایزهای بزرگ الگوریتم GA عملکرد بهتری دارد و زمان حل الگوریتم DE کمتر از الگوریتم GA است. برای پژوهش‌های آتی در نظر گرفتن توپولوژی‌های دیگر مانند محدودیت افت سیگنال، مکان‌یابی تقویت‌کننده‌ها به مدل حلقه و ارتباط کامل به ترتیب در سطوح دسترسی و ستون فقرات برای ایجاد قابلیت اطمینان بیشتر در شبکه، گسترش مسئله برای مدل‌های چنددوره‌ای و پویا، اضافه‌سازی پیشنهادی و حل مدل با دیگر روش‌های ابتکاری و فراابتکاری توصیه می‌شود.



شکل ۴. مقایسه زمان حل روش‌های GAMS، DE و GA: سایزهای کوچک و متوسط (جدول ۷) و سایزهای بزرگ (جدول ۸)



## منابع

1. Brimberg, J. et al. (2017). "General Variable Neighborhood Search for the Uncapacitated Single Allocation P-Hub Center Problem", *Optimization Letters*, Vol. 11, No. 2, PP. 377-388.
2. Saboury, A. et al. (2013). "Applying Two Efficient Hybrid Heuristics for Hub Location Problem with Fully Interconnected Backbone and Access Networks", *Computers and Operations Research*, Vol. 40, No.10, PP. 2493-2507.
3. Jadhav, R. A., and Shitole, D. S. (2013). "Fiber Optics Communication and Application. "International Journal of Innovative Research in Engineering an Science, Vol. 2. No. 4, PP. 2319-5665.
4. Ortiz-Garcia, E. G. et al. (2009). "A Parallel Evolutionary Algorithm for the Hub Location Problem with Fully Inter Connected Backbone and Access Networks", *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Vol. CEC, PP. 1501-1506.
5. Yazar, B. (2013). Fiber Optical Network Design Problem: Case for Turkey, M. Sc. Thesis, Industrial Engineering of Bilkent University.
6. Kumar, V., and Jangra, K. D. (2014). "A Survey of Passive Optical Networks", *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*, Vol. 2. No. 8, PP. 2321-7782.
7. Yazar, B. et al. (2016). "Fiber Optical Network Design Problems: A Case For Turkey", *Omega*, Vol. ???, No. 63, PP. 23-40.
8. Gavish, B., Li, C., and Simchi-Levi, D. (1992). "Analysis of Heuristics for the Design of Tree Networks", *Annals of Operations Research*, Vol. 36. No. 1, PP. 77-86.
9. Ho, K. S., Zhou, M., and Cheung, K. (2006). "A New Approach for Designing the Next Generation Survivable Backbone Network", In:12th *International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium*, IEEE, PP. 1-6.
10. Beheshti, Z., Shamsuddin, S. M., and Yuhaniz, S. S. (2013). "Binary Accelerated Particle Swarm Algorithm (BAPSA) for Discrete Optimization Problems", *Journal of Global Optimization*, Vol. 57, No. 2, PP. 549-573.
11. Brimberg, J. et al. (2017). "A Basic Variable Neighborhood Search Heuristic for the Uncapacitated Multiple Allocation P-Hub Center Problem", *Optimization Letters*, Vol. 11, No. 2, PP. 313-327.
12. Abyazi-Sani, R., and Ghanbari, R. (2016). "An Efficient Tabu Search for Solving the Uncapacitated Single Allocation Hub Location Problem", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 93, No. 93, PP. 99-109.
13. Thomadsen, T., and Stidsen, T. (2005). "Hierarchical Ring Network Design Using Branch-And-Price", *Telecommunication Systems*, Vol. 29. No. 1, PP. 61-76.
14. Contreras, I., Tanash, M., and Vidyarthi, N. (2017). "Exact and Heuristic Approaches for the Cycle Hub Location Problem", *Annals of Operations Research*, Vol. 2, No. 258, PP. 655-677.
15. Martinsde S. E. et al. (2015). "The Hub Line Location Problem", *Transportation Science*, Vol.49,NO.3,PP.500-518.
16. Merakli, M., & Yaman, H. (2016). Robust Intermodal Hub Location Under Polyhedral Demand Uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 86, 66-85.
17. Elmastas, S. (2006). Hub Location Problem for Air-Ground Transportation Systems with Time Restrictions, M.S. Thesis, Industrial Engineering of Bilkent University.
18. Chen, S., Ljubic, I., and Raghavan, S. (2010) "The Regenerator Location Problem", *Networks*, Vol. 55, No. 3, PP. 205-220.
19. Duarte, A. et al. (2014). "Improved Heuristics for the Regenerator Location Problem", *International Transactions in Operational Research*, Vol. 21. No. 4, PP. 541-558.
20. Topcuoglua, H. et al. (2005). "Solving the Uncapacitated Hub Location Problem Using Genetic Algorithms", *Computers and Operations Research*, Vol. 32, No. 4 , PP. 967-984.
21. Rabbani, M. et al. (2017). "A New Mathematical Model in Cell Formation Problem with Consideration of Inventory and Backorder: Genetic and Particle Swarm Optimization Algorithms", *Iranian Journal of Management Studies*, Vol. 10, No. 4, PP. 819-852.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Bandwidth
2. Attenuation
3. Point to Point
4. Passive Optical Network
5. Dedicated
6. Optical Line Terminal
7. Optical Network Unit
8. Splitters
9. Concentrators
10. Backbone Network
11. Access Network
12. Tabu Search Variable Neighborhood Search
13. Simulated Annealing Variable Neighborhood Search
14. Branch and Price
15. Regenerators
16. Sector
17. Sub-Tour
18. Port
19. Non-Deterministic Polynomial-Time Hard
20. Genetic Algorithm
21. Different Evolution
22. Mutation
23. Crossover
24. Offspring