

مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۱، شماره ۱، پیاپی ۲۰، بهار ۱۳۹۹

دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۱۲ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲۵

صص: ۷۱-۸۷

## مکان‌یابی هاب چنددوره‌ای با تخصیص تکی با در نظر گرفتن طول عمر و

### امکان بازسازی هاب‌ها

جعفر باقری نژاد<sup>۱\*</sup>، مهدی بشیری<sup>۲</sup>، زهرا عابدپور<sup>۳</sup>، الناز سلطانی<sup>۴</sup>

۱- دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران، jbagheri@alzahra.ac.ir

۲- دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران، bashiri@shahed.ac.ir

۳- کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران، zahra\_abedpour@yahoo.com

۴- کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران، elnaz68.soltani@gmail.com

**چکیده:** مسائل مکان‌یابی هاب در پی یافتن مکان بهینه تسهیلات هاب و تخصیص نقاط تقاضا به هاب‌ها برای پاسخگویی تقاضاها بین زوج مبدأ - مقصد است. افزایش روزافزون سرعت تغییرات در ساختار هزینه و تقاضا، خیلی اوقات سازمان‌ها را برای ایجاد دوباره شبکه مجبور می‌کند. مسئله این پژوهش «مکان‌یابی هاب چنددوره‌ای با تخصیص تکی و محدودیت ظرفیت (DCSAHLP)» نامیده و یک مدل برای آن پیشنهاد می‌شود. در مسئله بررسی شده، تصمیمات مرتبط با مکان‌یابی و تخصیص در یک شبکه هاب بررسی می‌شود. هم‌چنین این موضوع که برای بازکردن هاب پیمانکاران مختلف وجود دارد، یا اینکه هاب‌ها بعد از انتخاب پیمانکار دارای طول عمر مشخص هستند و در انتهای این طول عمر می‌توانند بسته یا بازسازی شوند، بررسی می‌شود که مسئله را پیچیده‌تر می‌کند؛ در عین حال مسئله را به مسائل دنیای واقعی نزدیک‌تر می‌کند. در این مسئله سطوح ظرفیت و بازسازی چندگانه نیز در نظر گرفته شده است. درانتها از مجموعه مثال‌های عددی تغییر یافته AP در اندازه‌های مختلف برای ارزیابی عملکرد مدل ارائه شده بهره گرفته شده است. نتایج حاصل از مقایسات نشان‌دهنده کارایی روش فراابتکاری ژنتیک است. هم‌چنین مدل ارائه شده در این پژوهش نسبت به مدل‌های پیشین ارائه شده برای این مسئله از نقطه نظر هماهنگی و منطبق بودن با شرایط دنیای واقعی کارایی بیشتری دارد.

**واژه‌های کلیدی:** مکان‌یابی هاب چنددوره‌ای، تقاضای پویا، ظرفیت چندگانه، طول عمر هاب، بازسازی

هاب، الگوریتم ژنتیک

\*نویسنده مسؤول

## مقدمه

یک راه‌کار اساسی برای کاهش هزینه در ترابری کالا و مسافر، طراحی صحیح شبکه‌های حمل و نقل و ترابری است. مسئله مکان‌یابی هاب<sup>۱</sup> یکی از مسائل مهم در ادبیات موضوع مکان‌یابی به شمار می‌آید. در این مسئله عموماً به دنبال پیدا کردن مکان هاب در شبکه و به دست آوردن حجم نقل و انتقالات بین نقاط تقاضا به گونه‌ای هستیم که مجموع هزینه‌ها به کمترین مقدار خود برسد.

مدل ارائه شده در این مقاله یک مدل چنددوره‌ای<sup>۲</sup> و دربرگیرنده کاربردهای زمان واقعی مسئله مکان‌یابی هاب است. در واقعیت، فقط برای یک دوره واحد تصمیم‌گیری نمی‌شود و برنامه‌ریزی برای یک افق زمانی با چندین دوره است؛ بنابراین ممکن است باتوجه به عوامل مختلف مانند تغییر در جریان‌ها و هزینه‌های هر دوره، پیکربندی اولیه شبکه تغییر یابد. در هر دوره از افق برنامه‌ریزی، پیکربندی دوره قبلی به روزرسانی می‌شود و این روند تا پایان افق زمانی ادامه می‌یابد.

ضرورت اجرای این پژوهش این است که تصمیم‌گیری در هر دوره باتوجه به هزینه‌ها و جریان‌ها همان دوره انجام می‌شود. در دنیای واقعی معمولاً تسهیلات بعد از زمان مشخصی مستهلک می‌شوند و باید بعد از اتمام طول عمرشان<sup>۳</sup> بسته یا در صورت امکان بازسازی شوند. در این پژوهش اجازه بازسازی<sup>۴</sup> به هاب داده شده است؛ یعنی می‌توان برای کاهش هزینه‌ها به جای راه‌اندازی، هاب را بازسازی کرد تا در یک طول عمر مشخص کار کند و تقاضاهای شبکه را پوشش دهد. همچنین برای راه‌اندازی هاب‌ها می‌توان از میان پیمانکاران<sup>۵</sup> مختلف انتخاب کرد. در این پژوهش چندین سطح ظرفیت<sup>۶</sup> برای راه‌اندازی وجود دارد تا باتوجه به تقاضای دوره مدنظر، ظرفیتی انتخاب شود که هم برای پاسخ‌دهی تقاضاها کافی باشد و هم هزینه کمتری داشته باشد.

به‌طور کلی در رویکرد برنامه‌ریزی چنددوره‌ای، شبکه دربرگیرنده کل افق برنامه‌ریزی خواهد بود و با بینشی کامل و باتوجه به شرایط تصمیمات اخذ می‌شود. این تغییرات در ساختار شبکه‌ها معمولاً تابعی از الگوهای تغییر حجم توزیع جریان‌ها، ظهور تکنولوژی‌ها، موضوعات اقتصادی و غیره هستند؛ بنابراین باتوجه به تغییرات در محیط‌های داخلی و خارجی، شرکت‌ها و صنایع در تصمیمات استراتژیک خود بازنگری می‌کنند.

برای نخستین کار در زمینه مکان‌یابی هاب چنددوره‌ای می‌توان به مدل کمپبل<sup>۷</sup> (۱۹۹۰) اشاره کرده که مدل تقریب پیوسته یک کشتی حامل عمومی که یک منطقه ثابت را با تراکم افزایشی تقاضا تحت پوشش قرار می‌داد. پس از آن، گلاره<sup>۸</sup> (۲۰۰۸) مسئله مکان‌یابی هاب چنددوره‌ای برای حمل و نقل عمومی را در نظر گرفت که در آن وضعیت‌های مکان‌های هاب می‌تواند در مدت افق برنامه‌ریزی تغییر کند. تیموریان و همکاران (۲۰۱۱) و تقی پوریان و همکاران (۲۰۱۲) مسائل مکان‌یابی هاب پویا را در زمینه برنامه‌ریزی اورژانسی برای صنعت هوایی بررسی کردند. برخی یا همه ظرفیت یک فرودگاه می‌تواند به دلیل شرایط هوایی غیرقابل دسترس شود. پروازها ممکن است به هاب‌های مجازی مسیردهی شوند که در مواقع اضطراری فعال می‌شوند. مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط<sup>۹</sup> و برنامه‌ریزی عدد صحیح فازی<sup>۱۰</sup> برای تعیین مکان هاب‌های مجازی و مسیر بین جفت مبدا-مقصد در مدت افق برنامه‌ریزی توسعه داده شده است. کنتراس و همکاران<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۱) مسئله مکان‌یابی هاب دینامیک بدون محدودیت ظرفیت را در نظر گرفتند. آنها مورد تخصیص چندگانه<sup>۱۲</sup> را با استفاده از رویکرد شاخه و کران<sup>۱۳</sup> بررسی کردند که از آزادسازی لاگرانژ<sup>۱۴</sup> برای حل مسائل بالای ۱۰۰ گره استفاده می‌کند. در هورهامر<sup>۱۵</sup> (۲۰۱۴) مسئله

مکان‌یابی هاب چنددوره‌ای با تخصیص تکی<sup>۱۶</sup> و ظرفیت چندگانه بررسی شده است. در این مقاله چندین فرمول برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط پیشنهاد شد و در نهایت این مدل‌ها با هم مقایسه شدند. گلاره و همکاران (۲۰۱۵) مدل ریاضی مسئله مکان‌یابی هاب چنددوره‌ای را با تخصیص چندگانه و با ظرفیت نامحدود ولی ظرفیت بودجه ارائه دادند. مدل پیشنهادی ویژگی‌های زیادی از آنچه در عمل در حمل و نقل دریایی و زمینی وجود دارد را شامل می‌شد. در این مقاله همچنین الگوریتم فرا ابتکاری پیشنهاد شد که حل‌های با کیفیت بالا در مدت زمان منطقی و معمول ارائه می‌داد.

مسائلی و همکاران (۲۰۱۸) تصمیمات مربوط به برنامه ریزی حمل و نقل را در مکان‌یابی هاب وارد کردند. آنها سه مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را برای حالت‌های مختلف این مسئله، بسته به اینکه هزینه نگهداری وجود داشته باشد یا اینکه وسایل نقلیه‌های مختلفی داشته باشیم، پیشنهاد دادند. آنها تأثیر برنامه‌ریزی حمل و نقل و هزینه نگهداری را در شبکه هاب، تصمیمات مسیریابی و هزینه کل شبکه هاب بررسی کرده‌اند. کوریا و همکاران (۲۰۱۸) مدل مکان‌یابی هاب چنددوره‌ای تصادفی را با تخصیص چندگانه و محدودیت ظرفیت بررسی کردند. در این مقاله برای تقاضا عدم قطعیت در نظر گرفته شده است. عدم قطعیت را می‌توانند به وسیله مجموعه‌ی محدودی از سناریوها که هر کدام با احتمالات برآورد شده‌ای رخ می‌دهند به دست آورند و شکل گسترده معادله قطعی را استخراج کنند.

در ادامه، مدل ارائه شده در این مقاله بررسی می‌شود. در مدل پیشنهادی این مسئله، برای هاب‌ها با توجه به پیمانکار انتخابی طول عمر در نظر گرفته شده است و درانتهای طول عمر درباره بازسازی یا بسته‌شدن هاب تصمیم‌گیری می‌شود؛ بنابراین تفاوت مدل هورهامر و مدل پیشنهادی، اضافه‌شدن محدودیت‌های مربوط به طول عمر، بازسازی و انتخاب بین پیمانکاران و سطوح مختلف بازسازی است. در مدل هورهامر امکان تغییر سطح ظرفیت برای هاب‌ها وجود دارد. در صورتی که در این پژوهش از این مورد صرف‌نظر شده است. پس از تشریح مدل، پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل با استفاده از مجموعه اطلاعات پست استرالیا (AP) بررسی می‌شود و مسائل با استفاده از نرم‌افزار GAMS به روش دقیق و بار دیگر به وسیله الگوریتم فراابتکاری ژنتیک حل شده‌اند. در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای پژوهش‌های آتی ارائه شده است.

#### مدل‌سازی مسئله

مدل به کاررفته در این مسئله، مکان‌یابی هاب پویا با تخصیص تکی و همراه با محدودیت ظرفیت است و شامل تغییرات پویای جریان و هزینه‌ها در دوره‌های گوناگون زمانی است. هاب‌ها طول عمر مشخص دارند و طول عمرشان بستگی به انتخاب پیمانکار دارد، هاب‌ها در پایان این طول عمر می‌توانند بازسازی یا بسته شوند و همچنین سطوح ظرفیت هر هاب و بازسازی، چندگانه در نظر گرفته شده‌اند. فرض بر این است که  $G=(N,E)$  یک گراف کامل است.

پارامترها و متغیرهای تصمیم مسئله در ادامه آورده شده است:

پارامترها:

$N$	مجموعه گره‌ها $i = \{1, 2, \dots, n\}$
$T$	مجموعه دوره‌های زمانی در افق زمانی در نظر گرفته شده $t = \{1, 2, \dots, e\}$
$V_p$	طول عمر هر هاب بعد از استفاده از پیمانکار $p$ برای راه‌اندازی
$P$	مجموعه پیمانکار $p = \{1, 2, \dots, p_n\}$
$T_2$	مجموعه دوره‌های زمانی تداوم عملکرد در طول عمر هاب $t_2 = \{1, 2, \dots, v_p - 1\}$
$S$	مجموعه سطوح بازسازی $s = \{1, 2, \dots, d\}$
$L_s$	طول عمر هاب پس از بازسازی در بازسازی سطح $s$
$T_3$	مجموعه دوره‌های زمانی تداوم بازسازی پس از بازسازی $t_3 = \{1, 2, \dots, L_s - 1\}$
$C_k$	مجموعه سطوح ظرفیت برای هاب $k$
$\Gamma_{kc}$	ظرفیت هاب $k$ در ظرفیت سطح $c$
$f_{kcp}^{ot}$	هزینه بازکردن هاب $k$ در ظرفیت سطح $c$ توسط پیمانکار $p$ در دوره $t$
$f_{kcs}^{rt}$	هزینه بازسازی هاب $k$ در ظرفیت سطح $c$ و بازسازی سطح $s$ در دوره $t$
$f_{kc}^t$	هزینه عملیات برای هاب $k$ و ظرفیت سطح $c$ در دوره $t$
$f_{kc}^{ct}$	هزینه بستن هاب $k$ در ظرفیت سطح $c$ در دوره $t$
$d_{ij}$	فاصله بین گره $i$ و گره $j$
$W_{ij}^t$	جریان از گره $i$ به گره $j$ در دوره $t$
$O_i^t$	کل جریان صادر شده از گره $i$ در دوره زمانی $t$ $\sum_j W_{ij}^t = O_i^t$
$D_i^t$	کل جریان وارد شده به گره $i$ در دوره $t$ $\sum_j W_{ji}^t = D_i^t$
$\chi$	ضریب تخفیف اقتصادی ناشی از جمع آوری محصول (غیرهاب به هاب)
$\alpha$	ضریب تخفیف اقتصادی ناشی از انتقال محصول (هاب به هاب)
$\Delta$	ضریب تخفیف اقتصادی ناشی از توزیع محصول (هاب به غیر هاب)

قبل از بیان مدل مسئله ما متغیرهای تصمیم را معرفی می‌کنیم:

$Z_{ik}^t$	برابر یک است اگر گره $i$ به هاب $k$ در دوره $t$ تخصیص یابد، در غیر این صورت صفر است
$x_{kcp}^t$	برابر یک است اگر هاب $k$ در ظرفیت سطح $c$ در دوره $t$ به وسیله پیمانکار $p$ باز شود، در غیر این صورت صفر است.
$y_{kl}^{it}$	مقدار جریان از گره $i$ که از هاب $k$ و $l$ در دوره $t$ استفاده می‌کند.
$r_{kcs}^t$	برابر یک است اگر هاب $k$ با ظرفیت سطح $c$ در دوره $t$ در سطح $s$ بازسازی شود، در غیر این صورت برابر با صفر است.
$xx_{kct2p}^t$	برابر یک است اگر هاب $k$ در ظرفیت سطح $c$ در دوره $t$ تداوم عملکرد داشته باشد، در غیر این صورت صفر است.
$rr_{kct3}^t$	برابر یک است اگر هاب $k$ با ظرفیت سطح $c$ در دوره $t$ در سطح $s$ تداوم بازسازی داشته باشد، در غیر

این صورت برابر با صفر است.

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} d_{ik} Z_{ik}^t (\chi O_i^t + \delta D_i^t) + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} \sum_{l \in N} \alpha d_{kl} y_{kl}^t \quad (1) \\
 & + \sum_{t \in T} \sum_{k \in N} \sum_{c \in C_k} \sum_{p \in P} f_{kcp}^{ot} x_{kcp}^t + \sum_{t \in T} \sum_{k \in N} \sum_{c \in C_k} \sum_{p \in P} f_{kc}^t x_{kcp}^t \\
 & + \sum_{t \in T} \sum_{k \in N} \sum_{t_2 \in T_2} \sum_{c \in C_k} \sum_{p \in P} f_{kc}^t x x_{kct_2p}^t + \sum_{t \in T} \sum_{k \in N} \sum_{c \in C_k} \sum_{s \in S} f_{kc}^t r_{kcs}^t \\
 & + \sum_{t \in T} \sum_{k \in N} \sum_{t_3 \in T_3} \sum_{c \in C_k} \sum_{s \in S} f_{kc}^t r r_{kcs t_3}^t + \sum_{t \in T} \sum_{k \in N} \sum_{c \in C_k} \sum_{s \in S} r_{kcs}^t f_{kcs}^t \\
 & - \sum_{t \in T} \sum_{k \in N} \sum_{c \in C_k} \sum_{p \in P} f_{kc}^{ct} x_{kcp}^{t-vp} \left(1 - \sum_{s \in S} r_{kcs}^t\right) \\
 & - \sum_{t \in T} \sum_{k \in N} \sum_{c \in C_k} \sum_{s \in S} f_{kc}^{ct} r_{kcs}^{t-L_s}
 \end{aligned}$$

s.t.

$$\sum_{k \in N} Z_{ik}^t = 1 \quad \forall i \in N, t \in T \quad (2)$$

$$Z_{ik}^t \leq Z_{kk}^t \quad \forall i, k \in N, t \in T \quad (3)$$

$$Z_{kk}^t = \sum_{c \in C_k} \sum_{p \in P} x_{kcp}^t \quad \forall k \in N, t \in T \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{t_2 \in T_2} \sum_{c \in C_k} \sum_{p \in P} x x_{kct_2p}^t + \sum_{c \in C_k} \sum_{s \in S} r_{kcs}^t \\
 & \sum_{t_3 \in T_3} \sum_{c \in C_k} \sum_{s \in S} r r_{kcs t_3}^t
 \end{aligned}$$

$$\sum_{i \in N} O_i^t Z_{ik}^t \quad \forall k \in N, t \in T \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 & \leq \sum_{c \in C_k} \sum_{p \in P} x_{kcp}^t \Gamma_{kc} + \\
 & \sum_{t_2 \in T_2} \sum_{c \in C_k} \sum_{p \in P} x x_{kct_2p}^t \Gamma_{kc} \\
 & + \sum_{t_3 \in T_3} \sum_{c \in C_k} \sum_{s \in S} r r_{kcs t_3}^t \Gamma_{kc} \\
 & + \sum_{c \in C_k} \sum_{s \in S} r_{kcs}^t \Gamma_{kc}
 \end{aligned}$$

$$\sum_{c \in C_k} \sum_{p \in P} x_{kcp}^t + \sum_{t_2 \in T_2} \sum_{c \in C_k} \sum_{p \in P} x x_{kct_2p}^t \quad \forall k \in N, t \in T \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{c \in C_k} \sum_{s \in S} r_{kcs}^t + \sum_{t_3 \in T_3} \sum_{c \in C_k} \sum_{s \in S} r r_{kcs t_3}^t \\
 & \leq 1
 \end{aligned}$$

$$r_{kcs}^{t+vp} \leq x_{kcp}^t \quad \forall k \in N, t \in T, c \in C_k, s \in S, p \in P \quad (7)$$

$$x_{kcp}^t + \sum_{p \in P} \sum_{c \in C_k} x_{kcp}^{t+vp} \leq 1 \quad \forall k \in N, t \in T, c \in C_k, p \in P \quad (8)$$

$$x_{kcp}^{t+1} + \sum_{t_3 \in T_3} \sum_{c \in C_k} \sum_{s \in S} rr_{kcs}^t \leq 1 \quad \forall k \in N, t \in T, c \in C_k, p \in P \quad (9)$$

$$x_{kcp}^{t+1} + \sum_{c \in C_k} \sum_{s \in S} r_{kcs}^t \leq 1 \quad \forall k \in N, t \in T, c \in C_k, p \in P \quad (10)$$

$$\sum_{t_2 \in T_2} xx_{kct_2p}^{t+t_2} = (v_p - 1) * x_{kcp}^t \quad \forall k \in N, t \in T, c \in C_k, p \in P \quad (11)$$

$$\sum_{t_3 \in T_3} rr_{kcs}^{t+t_3} = (L_s - 1) * r_{kcs}^t \quad \forall k \in N, t \in T, c \in C_k, s \in S \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i \in N} O_i^t &\leq \sum_{k \in N} \sum_{c \in C_k} \sum_{p \in P} x_{kcp}^t \Gamma_{kc} \\ &+ \sum_{k \in N} \sum_{t_2 \in T_2} \sum_{c \in C_k} \sum_{p \in P} xx_{kct_2p}^t \Gamma_{kc} \\ &+ \sum_{k \in N} \sum_{c \in C_k} \sum_{s \in S} r_{kcs}^t \Gamma_{kc} \\ &+ \sum_{k \in N} \sum_{t_3 \in T_3} \sum_{c \in C_k} \sum_{s \in S} rr_{kcs}^t \Gamma_{kc} \end{aligned} \quad \forall t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{l \in N} y_{kl}^{it} - \sum_{l \in N} y_{lk}^{it} = O_i^t Z_{ik}^t - \sum_{j \in N} W_{ij}^t Z_{jk}^t \quad \forall i, k \in N, t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{l \in N} y_{kl}^{it} \leq O_i^t Z_{ik}^t \quad \forall i, k \in N, t \in T \quad (15)$$

$$y_{kl}^{it} \geq 0 \quad \forall i, k, l \in N, t \in T \quad (16)$$

$$Z_{ik}^t \in \{0,1\} \quad \forall i, k \in N, t \in T \quad (17)$$

$$x_{kcp}^t \in \{0,1\} \quad \forall k \in N, t \in T, c \in C_k, p \in P \quad (18)$$

$$xx_{kct_2p}^t \in \{0,1\} \quad \forall k \in N, t \in T, c \in C_k, t_2 \in T_2, p \in P \quad (19)$$

$$r_{kcs}^t \in \{0,1\} \quad \forall k \in N, t \in T, c \in C_k, s \in S \quad (20)$$

$$rr_{kcs}^t \in \{0,1\} \quad \forall k \in N, t \in T, c \in C_k, s \in S, t_3 \in T_3 \quad (21)$$

تابع هدف، هزینه کل را در افق زمانی کمینه می‌کند. هزینه‌ها شامل هزینه‌های جمع‌آوری، انتقال، توزیع، بازکردن، عملیات، بستن و بازسازی است. نخستین عبارت هزینه‌های جمع‌آوری و توزیع را نشان می‌دهد. در دومین عبارت هزینه انتقال بین هابی نشان شده است. فرض می‌شود که فاکتور تخفیف  $\alpha$  برای منعکس کردن اقتصادی بودن مقیاس است. سومین عبارت هزینه‌های راه‌اندازی را زمانی که یک هاب در ابتدای دوره  $t$  نصب می‌شود، نشان می‌دهد. در قسمت چهارم و پنجم، ششم و هفتم هزینه عملیات، عبارت هشتم هزینه بازسازی و دو عبارت آخر هزینه بستن را نشان می‌دهد. زمانی یک هاب می‌تواند بسته شود که در دوره‌های پیشین باز شده باشد و در دوره حاضر تصمیم به بازسازی آن گرفته نشود.

محدودیت‌های مسئله مکان‌یابی هاب مشابه با مسئله ایستا است. همه محدودیت‌ها باید در هر دوره  $t$  برقرار شود. محدودیت (۲) این موضوع را که هر هاب باید در هر دوره فقط به یک هاب تخصیص یابد را نشان می‌دهد. محدودیت (۳) فقط به گره‌های غیر هاب اجازه تخصیص به گره‌های هاب را می‌دهد و اینکه هر گره هاب به خودش تخصیص پیدا می‌کند. محدودیت (۴) تصمیم تخصیص با مکان‌یابی هاب را با هم ترکیب می‌کند. یک گره به خودش تخصیص می‌یابد اگر آن هاب باشد، یک گره هاب است اگر برخی از ظرفیت‌های هاب در آن نصب شود یا بازسازی داشته باشد و یا اینکه در دوره‌ی تداوم عملکرد یا بازسازی خود باشد. محدودیت (۵) اطمینان می‌دهد که ظرفیت نصب شده در گره هاب  $k$  کافی برای به انجام رساندن جریان‌ات ورودی از گره‌های تخصیص داده شده را دارد. محدودیت (۶) بیان‌کننده این امر است که در یک دوره و برای هر هاب فقط یکی از موارد باز کردن، تداوم عملکرد، بازسازی و یا تداوم بازسازی را خواهیم داشت. این موضوع که بعد از طول عمر یک هاب تصمیم بر بازسازی گرفته می‌شود یا خیر در محدودیت (۷) عنوان می‌شود. محدودیت (۸) نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که بعد از پایان طول عمر هاب به فاصله یک دوره‌ی زمانی ما اجازه راه‌اندازی مجدد آن هاب را نخواهیم داشت. در محدودیت (۹) و (۱۰) نشان داده می‌شود که بلافاصله بعد از بازسازی و تداوم بازسازی یک هاب نمی‌توانیم آن را راه‌اندازی مجدد کنیم. محدودیت (۱۱) و (۱۲) عملکرد هاب را در طی طول عمر و یا بازسازی آن بیان می‌کند،  $s$  و  $p$  به ترتیب مجموعه سطوح بازسازی و مجموعه پیمانکاران برای هاب‌ها هستند. به عبارت دیگر برای راه‌اندازی یک هاب، چندین پیمانکار وجود دارد که باتوجه‌به نیاز مسئله و مدل، از پیمانکار بهینه برای راه‌اندازی هاب استفاده می‌شود. برای بازسازی هاب نیز چندین سطح وجود دارد که سطوح مختلف برای بازسازی، طول عمر متفاوت برای هاب‌ها را در بر خواهد داشت. در محدودیت (۱۳) ظرفیت‌های تجمیع شده عنوان می‌شود. این برای اطمینان مسئله مورد استفاده قرار می‌گیرد و اغلب در مسائل مکان‌یابی تسهیلات یافت می‌شود. این محدودیت اطمینان می‌دهد که همه ظرفیت‌های نصب‌شده برای همه جریان‌ات ورودی کفایت می‌کند. محدودیت (۱۴) حفاظت جریان از آغاز جریان در گره  $i$  تا هاب  $k$  را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۵) اطمینان می‌دهد که جریان از مقصد  $i$  تا هاب‌های  $k$  و  $l$  زمانی نامنفی است که گره  $i$  به هاب  $k$  تخصیص یافته باشد. محدودیت‌های (۱۶)، (۱۷)، (۱۸)، (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) وضعیت متغیرها را مشخص می‌کند. در بخش‌های بعدی به‌روش حل فراابتکاری ژنتیک پرداخته می‌شود و برای اعتبارسنجی و نشان‌دادن کارایی مدل تحلیل حساسیت انجام می‌شود. همچنین برای نمایش کارایی روش فراابتکاری پیشنهادشده از مثال عددی موجود در ادبیات استفاده می‌شود.

### مثال عددی

یکی از مجموعه اطلاعاتی که به‌طور معمول استفاده می‌شود، مجموعه اطلاعات پست استرالیا (AP) است. مجموعه اطلاعات AP بر پایه یک تحویل پستی در سیدنی و شامل ۲۰۰ گره نشان‌دهنده نواحی پستی است. این داده‌ها شامل فاصله اقلیدسی بین ۲۰۰ شهر استرالیا و مقادیر جریان‌های پستی بین جفت شهرهاست. در ادبیات این مجموعه داده‌ها برای تعداد نواحی ۱۰، ۲۰، ۲۵، ۴۰ و ۵۰ تایی به‌طور وسیعی استفاده می‌شود. داده‌های موجود در مجموعه اطلاعات AP قابل استفاده در مدل تک دوره‌ای می‌باشند. بنابراین نمونه ثابت از مجموعه داده AP گرفته می‌شود و به‌صورت ذیل به نمونه پویا (چند دوره‌ای) تبدیل می‌شود.

در این تحقیق برای هر جفت گره مبدأ و مقصد مقدار جریان در هر دوره با احتمال ۰.۹، ۳۰٪ افزایش می‌یابد در غیر این صورت ۲۵٪ کاهش می‌یابد. هزینه بازکردن مقدار ۰.۹-۱۲۰٪ هزینه راه‌اندازی مربوط به نمونه ثابت را به خود می‌گیرد. هزینه‌های عملیاتی در دوره‌های مختلف بین ۰.۱-۱۵٪، هزینه‌های بستن هاب بین ۰.۴-۶۰٪ و هزینه‌های بازسازی بین ۳۰-۶۰٪ هزینه‌های بازکردن هاب متغیر خواهند بود. در ذیل نحوه محاسبه هزینه‌ها نشان داده شده است:

$$f_{k|C_k}^{ot} = f_k(1 + \rho) \quad \rho \sim U(-0.1, 0.2) \quad (22)$$

$$f_{k|C_k|p}^{ot} = (1 + \rho(p - 1)) f_{k|C_k}^{ot} \quad \rho = 0.2 \quad (23)$$

$$f_{k|C_k}^{ct} = f_{k|C_k}^{ot} v \quad v \sim U(0.4, 0.6) \quad (24)$$

$$f_{k|C_k}^t = f_{k|C_k}^{ct} \psi \quad \psi \sim U(0.1, 0.15) \quad (25)$$

$$f_{k|C_k}^{rt} = f_{k|C_k}^t \varphi \quad \varphi \sim U(0.3, 0.6) \quad (26)$$

درباره سطوح ظرفیت نیز باید گفت بیشترین سطح ظرفیت از داده عددی AP گرفته می‌شود و سطوح دیگر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Gamma_{kc} = \lambda \quad \Gamma_{k(c+1)} \quad \lambda = 0.7 \quad (27)$$

همچنین مقادیر هزینه (بازکردن، بستن و ...) برای سطوح دیگر ظرفیت به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$F_{kc}^t = \sigma F_{k(c+1)}^t \quad \sigma = 0.9 \quad (28)$$

هزینه بازسازی برای سطوح مختلف به صورت زیر به دست می‌آید:

$$f_{kc(s+1)}^{rt} = f_{ks}^{rt} \omega \quad \omega = 1.2 \quad (29)$$

شایان ذکر است که این روش تولید داده برای دوره‌های چندگانه برگرفته از روشی است که کنتراس و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهش خود برای تولید داده‌های دوره‌های متوالی انجام دادند. در ادامه نتایج محاسبات عددی ارائه خواهد شد. در این بخش مدل مکان‌یابی هاب تک‌دوره‌ای با تخصیص تکی و سطوح ظرفیت چندگانه با مدل پیشنهادی در این پژوهش مقایسه و دو مدل از لحاظ تعداد هاب‌های باز شده و سطوح ظرفیتشان بررسی می‌شود. نتایج دو مدل برای ۱۰ گره و ۸ دوره زمانی در جدول ۱ آمده است.

جدول (۱): مقایسه مدل چنددوره‌ای و تک‌دوره‌ای

هاب‌های باز شده و سطح ظرفیتشان								دوره زمانی	
				۴			۱	k	۱
				۲			۱	c	
	۹			۴				k	استاتیک
	۱			۱				c	
۱۰		۸		۴		۲	۱	k	۲
۱		۱		۲		۱	۱	c	
	۹			۴				k	استاتیک
	۲			۱				c	
۱۰		۸	۷	۵	۴	۲	۱	k	۳
۱		۱	۱	۱	۲	۱	۱	c	



ادامه جدول (۱): مقایسه مدل چنددوره‌ای و تک‌دوره‌ای

هاب‌های باز شده و سطح ظرفیتشان										دوره زمانی	
	۹					۳				k	استاتیک
	۱					۲				c	
۱۰		۸	۷	۵	۴		۲	۱		k	۴
۱		۱	۱	۱	۲		۱	۱		c	
			۷			۳				k	استاتیک
			۲			۲				c	
۱۰		۸	۷	۵		۳	۲	۱		k	۵
۱		۱	۱	۱		۱	۱	۱		c	
	۹					۳				k	استاتیک
	۲					۱				c	

در مقایسه مدل‌ها می‌توان گفت که در حالت چند دوره‌ای هاب‌های بیشتری نسبت به تک دوره‌ای باز شده است و دلیل این موضوع این است که مدل پویا نسبت به مدل تک دوره‌ای بهترین تصمیم در بازه‌ی زمانی مدنظر را اتخاذ می‌کند. در صورتی که در مدل تک دوره‌ای یک بار تصمیم‌گیری برای کل دوره‌ها اجرا می‌گردد، واضح است که این تصمیم بهینه نخواهد بود، زیرا پارامترها و شرایط حاکم بر مسئله طی دوره‌های متوالی یکسان نیست، بنابراین جواب حاصل جواب بهینه کلی نخواهد بود. مزیت دیگر آن این موضوع است که مدل تک دوره‌ای هزینه مربوط به دوره‌ها را به‌طور جداگانه بهینه می‌نماید و ارتباط بین ساختار شبکه گره‌ها در دوره‌های مختلف را در نظر نمی‌گیرد؛ بنابراین مدل چنددوره‌ای مطابقت بیشتری با دنیای واقعی دارد. در مقایسه با مدل هورهامر (۲۰۱۴) می‌توان گفت که چون در این پژوهش امکان بازسازی و همچنین انتخاب پیمانکار برای هاب‌ها وجود دارد می‌توان با هزینه کمتری به تقاضاها پاسخ داد به این دلیل که با توجه به مدل می‌توان طول عمر هاب را به گونه‌ای در طول دوره‌های زمانی انتخاب کرد که هم پاسخگوی تقاضاها باشد و هم هزینه کمتری داشته باشد. مورد دیگر این است که به‌جای بازکردن هاب که هزینه به‌مراتب بیشتری برای ما دارد می‌توان هاب‌ها را بازسازی کرد. در این پژوهش بستن هاب به این دلیل که می‌توان از تسهیلات هاب‌های بسته‌شده برای بازکردن هاب دیگر استفاده نمود، برای ما منفعت خواهد داشت.

### الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک الگوریتم تکاملی است که در سال ۱۹۷۵ توسط جان هلند در دهه ۱۹۸۰ بسیار شایان توجه قرار گرفت. الگوریتم ژنتیک روش فراابتکاری است که با استفاده از روش‌های الهام گرفته‌شده از طبیعت به جوابهای مطلوب می‌رسد. این الگوریتم با راه‌حلهایی تصادفی به نام «جمعیت» متشکل از کروموزوم‌ها شروع شده و این عمل براساس عملگر تابع تناسب انجام می‌شود؛ به اینصورت که احتمال انتخاب برای فرزندان دارای تابع تناسب بالاتر، بیشتر است.

### نحوه نمایش جواب

نخستین گام در الگوریتم پیشنهادی، کد کردن متغیرهای مسأله در غالب بردارها یا کروموزومهای حامل جواب و به عبارت بهتر «نحوه نمایش جوابها» است. به طور نمونه کروموزوم بهینه مسأله چهار دوره ای با ده گره در شکل زیر نشان داده شده است.

ظرفیت سطح ۲	ظرفیت سطح ۲	ظرفیت سطح ۳	ظرفیت سطح ۲	ظرفیت سطح ۱
پیمانکار ۲	پیمانکار ۲	پیمانکار ۳	پیمانکار ۲	پیمانکار ۱

ردیف‌های یک تا چهار نحوه تخصیص گره‌ها را به ترتیب در چهار دوره زمانی نشان می‌دهد، ردیف پنجم تا هشت مشخص می‌نماید که هاب بازسازی می‌شود و یا خیر و در صورت بازسازی، در کدام دوره بازسازی می‌شود. دو ردیف آخر مشخص می‌کند که از چه ظرفیت و یا پیمانکاری برای راه‌اندازی یا بازسازی هاب‌ها استفاده شده است. ترتیب در هر ردیف به ترتیب افزایش شماره هاب و در صورت مساوی بودن شماره هاب به ترتیب افزایش دوره مرتب شده اند.

۲	۲	۵	۲	۵	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۲	۲	۴	۴	۴	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۲	۲	۵	۲	۵	۵	۵	۵	۵	۵
۲	۲	۵	۲	۵	۵	۵	۵	۵	۵
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

شکل ۱- کروموزوم بهینه مسئله چهار دوره ای با ده گره

### عملگر تقاطع

این عملگر بر روی یک جفت از کروموزوم‌ها عمل می‌کند و می‌تواند به صورت تک نقطه‌ای، چندنقطه‌ای و یکنواخت باشد. در این پژوهش از ترکیب یک نقطه ای استفاده شده است. عملگر تقاطعی تک نقطه‌ای، دو کروموزوم را به طور تصادفی از یک نقطه شکسته و بخش‌های شکسته دو کروموزوم را جابجا می‌کند.

۱	۱	۳	۳	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۱	۱	۳	۳	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۳	۳	۳	۳	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۳	۳	۳	۳	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

والد ۱:

ظرفیت سطح ۳	ظرفیت سطح ۲	ظرفیت سطح ۱
پیمانکار ۱	پیمانکار ۱	پیمانکار ۲

۱	۲	۱	۱	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۱	۲	۱	۱	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۲	۲	۲	۲	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۱	۲	۱	۱	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

والد۲:

ظرفیت سطح ۱	ظرفیت سطح ۲	ظرفیت سطح ۳	ظرفیت سطح ۱
پیمانکار ۲	پیمانکار ۳	پیمانکار ۱	پیمانکار ۱

۱	۲	۱	۳	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۱	۲	۱	۳	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۲	۲	۲	۳	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۱	۲	۱	۳	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰



فرزند۱:

ظرفیت سطح ۱	ظرفیت سطح ۲	ظرفیت سطح ۳
پیمانکار ۲	پیمانکار ۱	پیمانکار ۱

۱	۱	۳	۱	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۱	۱	۳	۱	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۳	۳	۳	۲	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۳	۳	۳	۱	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

فرزند۲:

ظرفیت سطح ۱	ظرفیت سطح ۲	ظرفیت سطح ۳	ظرفیت سطح ۱
پیمانکار ۲	پیمانکار ۱	پیمانکار ۱	پیمانکار ۱

شکل ۲- نمونه عملکرد تقاطع

## عملگر جهشی

این عملگر به این صورت است که به ازای هر بیت از کروموزوم، یک عدد تصادفی تولید می‌کند. اگر مقدار این عدد تصادفی از مقدار  $P_m$  (احتمال انجام جهش) کمتر باشد، در آن بیت عمل جهش انجام می‌شود و در غیر این صورت، در آن بیت عمل جهش انجام نمی‌گیرد. عمل جهش در هر بیت با تولید تصادفی عدد ۰ یا ۱ و جایگزینی آن بجای بیت مورد جهش انجام می‌گیرد. اگر عملیات جهش صورت نگیرد، فرزندان بدون تغییر دیگری وارد نسل جدید می‌شوند. اما اگر عملیات جهش صورت بگیرد قسمت‌هایی از کروموزوم تغییر می‌کند.

۱	۱	۳	۳	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۱	۱	۳	۳	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۳	۳	۳	۳	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۳	۳	۳	۳	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

والد:

ظرفیت سطح ۳	ظرفیت سطح ۲	ظرفیت سطح ۱
پیمانکار ۱	پیمانکار ۱	پیمانکار ۲

۱	۱	۴	۳	۱۰	۶	۶	۶	۱۰	۱۰
۱	۱	۴	۳	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۳	۳	۴	۳	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۳	۳	۴	۳	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

فرزند:

ظرفیت سطح ۳	ظرفیت سطح ۱	ظرفیت سطح ۱
پیمانکار ۱	پیمانکار ۱	پیمانکار ۲

شکل ۳- نمونه عملکرد جهش

## اجرای الگوریتم ژنتیک

ابتدا با توجه به صورت مسئله، متغیرهایی که باید تعیین شوند، مشخص می‌شوند. سپس این متغیرها به نحو مناسبی کدگذاری شده و به شکل کروموزوم نمایش داده می‌شوند. بر اساس تابع هدف، یک تابع برازندگی برای کروموزوم‌ها تعریف می‌گردد و یک جمعیت اولیه دلخواه نیز به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود. به دنبال آن، میزان تابع برازندگی برای هر کروموزوم جمعیت اولیه حساب می‌شود. کروموزوم‌های جدید به مجموعه جمعیت قبلی اضافه شده و در ادامه از مجموعه کنونی بر اساس مقادیر تابع برازش، بهترین‌ها به اندازه تعداد جمعیت اولیه انتخاب می‌گردد و یک نسل جدید تولید می‌شود.

جدول ۲، نشان دهنده‌ی نتایج به دست آمده از حل این مسئله در اندازه‌های ۱۰-۲۰-۲۵-۴۰ و ۵۰ توسط مدل ارائه شده است. هرکدام از مسائل یک‌بار به روش دقیق و توسط نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS و بار دیگر به‌وسیله الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک حل شده‌اند و علاوه بر تابع هدف، زمان‌های حل کامپیوتری آن‌ها نیز در جدول گزارش شده است.

تمامی نتایج این پژوهش با استفاده از رایانه‌ای با سیستم عامل ویندوز ۶۴ بیتی با قدرت پردازش ۲/۶۰ گیگا هرتز، و حافظه ۴ گیگا بایت با استفاده از نرم‌افزار GAMS 24.1.2 و MATLAB R2014a به دست آمده است. حداکثر زمان مجاز برای اجرای برنامه‌ها ۳۰ ساعت در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): مقایسه نتایج روش دقیق و فراابتکاری

تعداد گره	تعداد دوره زمانی	تابع هدف روش دقیق	زمان روش دقیق	تابع هدف روش فراابتکاری	زمان روش فرا ابتکاری	درصد فاصله از تابع هدف
۱۰	۴	۱۶۷۰۱۹/۶۴۸	۴/۳۸۱	۱۶۷۰۱۹/۶۴۸	۴/۴۵۰	۰
	۵	۱۷۹۷۳۱/۷۳۲	۲۹/۳۵۰	۱۷۹۷۳۱/۷۳۲	۲۰/۲۳۱	۰
	۶	۲۰۸۲۸۳/۵۰۸	۲۰۴/۲۰۶	۲۱۴۵۳۲/۰۱۳	۶۰/۳۴۰	۰/۰۳
۲۰	۴	۳۴۵۴۰۹/۸۵۲	۶۲/۳۴۴	۳۷۳۰۴۲/۶۴۰	۵۰	۰/۰۸
	۵	۳۶۶۸۱۷/۹۸۰	۷۳۹/۰۵۶	۴۰۳۴۹۹/۷۷۸	۱۲۰/۱۲۱	۰/۱
	۶	۴۳۱۱۰۵/۵۲۰	۱۰۰۵/۹۰۴	۴۸۲۸۳۸/۱۸۲	۱۴۵/۰۰۸	۰/۱۲
۲۵	۴	-	-	۵۲۳۶۹۱/۳۲۹	۲۰۰/۱۲۰	
	۵	-	-	۵۴۰۰۹۷/۲۳۰	۳۲۰/۵۹	
	۶	-	-	۵۸۲۶۱۱/۴۳۶	۵۸۹/۲۰۳	
۴۰	۴	-	-	۶۵۵۹۸۰/۱۲۰	۶۶۹/۳۵۰	
	۵	-	-	۶۷۸۹۲۲/۲۰۱	۷۰۰/۳	
	۶	-	-	۷۰۵۹۸۷/۲۵۶	۷۶۹/۲۶۷	
۵۰	۴	-	-	۷۶۱۲۳۶/۰۰۹	۸۹۰/۳۴۰	
	۵	-	-	۷۸۶۹۰۱/۳۴۵	۹۹۰/۵۶۸	
	۶	-	-	۸۰۹۷۱۱/۷۸۵	۱۲۳۲/۶۴۵	

همان‌طور که از جدول ۲ مشخص است مدل به دلیل داشتن متغیرها و محدودیت‌های زیاد فقط قابل حل به وسیله نرم‌افزار گمز تا اندازه ۲۰ می‌باشد. از طرف دیگر روش فرا ابتکاری ارائه شده نشان می‌دهد که قابلیت حل مسائل و رسیدن به پاسخ‌های بهینه را در اندازه‌های بزرگ‌تر دارد. با در نظر گرفتن مسائل با بیش از ۲۰ گره روش حل دقیق کارایی خود را از دست داده است و روش فرا ابتکاری قادر است پاسخ‌های خوبی را در زمان حل منطقی تولید کند.

### تحلیل حساسیت

از آنجایی که تغییر در ارزش پارامترها سبب تغییر نتایج به دست آمده از حل مسئله می‌شود، بنابراین تحلیل حساسیت می‌تواند به فرایند تصمیم‌گیری بهتر در مسائل دنیای واقعی کمک کند. به عبارت دیگر در این بخش نشان داده خواهد شد که چگونه نتایج به دست آمده از حل مسئله به وسیله تغییر در یک پارامتر خاص تغییر می‌یابد و این در حالی است که سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده‌اند. تحلیل حساسیت‌های انجام شده در این پژوهش بیشتر برای نشان دادن نحوه عملکرد مدل‌سازی و همچنین کارایی آن در هنگام تغییر ارزش پارامترهایی از قبیل تعداد سطوح بازسازی، تعداد پیمانکاران و هزینه بازسازی است.

### تحلیل حساسیت روی سطوح بازسازی

برای انجام این امر از یک مثال شبیه‌سازی شده با در نظر گرفتن ۱۰ گره، ۸ دوره زمانی، ۲ سطح ظرفیت و ۲ پیمانکار استفاده شده است. نتایج حاصل از این تحلیل در جدول ۳ نشان داده شده است. طبق این جدول با افزایش سطوح بازسازی، مقدار تابع هدف ابتدا روند کاهشی دارد و سپس ثابت می‌شود. همچنین زمان حل افزایش می‌یابد. کم‌تر بودن هزینه بازسازی نسبت به هزینه بازکردن هاب دلیل کاهش در تابع هدف است. با افزایش سطوح بازسازی تعداد دوره‌های زمانی تحت پوشش توسط هاب بازسازی شده بیشتر و نیاز به راه‌اندازی هاب جدید کمتر می‌شود. دلیل متوقف شدن روند کاهشی تابع هزینه نیز این است که سطوح بالاتر بازسازی هزینه بیشتری داشته و انتخاب آن‌ها برای مسئله بهینه نخواهد بود. این در حالی است که سایر پارامترهای استفاده شده در مدل‌سازی در طول انجام این آزمایش ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

جدول (۳): تحلیل حساسیت روی سطوح بازسازی

تعداد سطوح بازسازی	تابع هدف	زمان حل
۱	۲۱۴۵۴۹/۶۲۰	۶۹/۷۹۷
۲	۲۱۱۱۹۳/۲۹۲	۵۸۰/۴۵۹
۳	۱۹۸۹۵۰/۳۶۰	۷۰۰/۵۴۰
۴	۱۹۲۱۹۰/۹۰۸	۱۰۰۰/۳۰۰
۵	۱۹۲۱۹۰/۹۰۸	۱۰۱۰/۷۸
۶	۱۹۲۱۹۰/۹۰۸	۱۱۰۲/۵۰

### تحلیل حساسیت روی تعداد پیمانکاران

در این قسمت به بررسی نحوه‌ی تغییر در پاسخ‌ها با تغییر در تعداد پیمانکاران می‌پردازیم. همان‌طور که در جدول ۴ مشخص است با افزایش تعداد پیمانکاران، تابع هدف کاهش و زمان حل افزایش می‌یابد. دلیل کاهش تابع هدف این است که با افزایش پیمانکاران، برای بازکردن هاب‌ها گزینه‌های بیشتری وجود دارد که می‌توان در بازکردن هاب علاوه بر پوشش‌دهی تقاضاها، کمینه‌کردن هزینه‌ها را در نظر گرفت. دلیل افزایش زمان حل نیز پیچیده‌تر شدن مدل است.

جدول (۴): تحلیل حساسیت روی تعداد پیمانکاران

تعداد پیمانکاران	تابع هدف	زمان
۱	۲۳۱۱۹۳/۲۹۲	۳۴۹/۴۱۰
۲	۲۱۱۱۹۳/۲۹۲	۵۰۷/۹۷۸
۳	۲۰۱۲۳۶/۳۲	۱۰۵۶/۳۶۹
۴	۱۸۹۶۸۳/۶۹	۱۱۷۹/۳۲۰
۵	۱۸۹۶۸۳/۶۹	۱۲۸۰/۷۸۶

### تحلیل حساسیت روی هزینه بازسازی

در جدول ۵ مقدار تابع هدف و تعداد هاب‌های راه‌اندازی شده برای مقادیر مختلف هزینه بازسازی نشان داده شده است. از جدول ۵ مشخص است که با افزایش هزینه بازسازی تعداد هاب‌های راه‌اندازی شده و تابع هدف افزایش می‌یابد و کاهش هزینه بازسازی نیز باعث کاهش تابع هدف و تعداد هاب‌های راه‌اندازی شده می‌شود.

جدول (۵): تحلیل حساسیت روی هزینه بازسازی

هزینه بازسازی	تعداد هاب‌های راه‌اندازی شده	تعداد هاب‌های بازسازی شده	تابع هدف
۰/۲	۵	۳	۱۹۵۳۸۴/۶۷۶
۰/۵	۷	۲	۲۰۱۱۹۳/۲۹۲
۱	۸	۱	۲۰۸۸۱۹/۱۲۹
۱/۳	۸	۱	۲۱۳۲۰۶/۴۳۵
۱/۵	۸	۰	۲۱۵۶۲۳/۸۳۶
۱/۶	۸	۰	۲۱۵۶۲۳/۸۳۶

### نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

مدل مدنظر این مقاله بر اساس بسط مدل *DCSAHLP* می‌باشد که در آن اجازه‌ی انتخاب پیمانکار و بازسازی هاب‌ها داده شده است. بررسی ادبیات موضوع در این حوزه نشان می‌دهد در هیچ‌یک از مطالعات انجام‌شده طول عمر برای هاب‌ها در نظر گرفته نشده و امکان بازسازی در هاب‌ها لحاظ نشده است. این در حالی است که هر تسهیل بعد از زمان مشخصی مستهلک شده و باید بعد از اتمام طول عمرشان بسته یا در صورت امکان بازسازی شوند. در این تحقیق اجازه بازسازی به هاب داده شده است یعنی می‌توان برای کاهش هزینه‌ها به‌جای راه‌اندازی،

هاب را بازسازی کرد تا در یک طول عمر مشخص کار کند و تقاضاهای شبکه را پوشش دهد. پس از ارائه‌ی مدل‌سازی مسئله، به‌منظور حل و ارزیابی عملکرد مدل از روش فرا ابتکاری ژنتیک استفاده شده است. بررسی‌ها نشان داده است، مدل ارائه‌شده در این پژوهش نسبت به مدل‌های پیشین ارائه‌شده برای این مسئله از نقطه‌نظر هماهنگی و منطبق‌بودن با شرایط دنیای واقعی کارایی زیادی دارد. همچنین حل مثال‌های عددی متنوع به‌وسیله‌ی روش فرا ابتکاری ژنتیک و مقایسه‌ی آن‌ها با روش دقیق حاکی از عملکرد قابل قبول روش فرا ابتکاری می‌باشد.

### پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی

برای پژوهش‌های آتی و بهبود مدل ارائه‌شده موارد ذیل پیشنهاد می‌شود:

- در نظر گرفتن سطوح ظرفیت مختلف برای گره‌ها به‌طوری‌که ظرفیت هر گره در دوره‌های مختلف باتوجه‌به شرایط حاکم بر مسئله، قابلیت تغییر داشته باشد.
- وارد کردن اینکه هاب‌ها قبل از اتمام طول عمر خود باتوجه‌به شرایط مسئله امکان بسته‌شدن داشته باشند.
- انجام مطالعه موردی در صنایع مختلف و توسعه‌ی مدل با شرایطی بسیار نزدیک‌تر به شرایط واقعی؛ برای مثال درزمینه‌ی حمل و نقل شهری، محصولات فسادپذیر، خدمات اورژانسی و غیره.
- استفاده از انواع برنامه‌ریزی غیرقطعی مانند برنامه‌ریزی احتمالی و فازی برای پیش‌بینی و برنامه‌ریزی مدل و پارامترهای آن در دوره‌های متوالی
- مطالعه روی روش‌های حل ارائه‌شده برای افزایش کارایی آنها و در نتیجه حل ابعاد بزرگ‌تر مسئله در زمان‌های مناسب‌تر؛ برای مثال ارائه‌ی روش‌های ابتکاری که باعث کاهش پیچیدگی مسئله و در نتیجه حل نمونه‌های بزرگ‌تر در زمان‌های کوتاه‌تر شود.

### References

- Campbel, J. (1990). "Locating transportation terminals to serve an expanding demand". *Transportation Research Part B: Methodological*, 24(3), 173-192
- Contreras, I., Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2011). "The dynamic uncapacitated hub location problem". *Transportation Science*, 45, 18–32.
- Correia, I., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2018). "A stochastic multi-period capacitated multiple allocation hub location problem: Formulation and inequalities". *Omega*, 74, 122-134.
- Costa, M. G., Captivo, M. E., & Climaco, J. (2008). "Capacitated single allocation hub location problem – A bi-criteria approach". *Computers and Operations Research*, 35(11), 3671–3695.
- Gelareh, Sh., & Nickel, S. (2008). "A Benders Decomposition for Hub Location Problems Arising in Public Transport". *Operations Research Proceedings*, 129-134.
- Gelareh, Sh., Neamatian Monemi, R., & Nickel, S. (2015). " Multi-period hub location problems in transportation". *Transportation Research Part E*, 75, 67-94.
- Hörhammer, A.M.C. (2014). "Dynamic Hub Location Problems with Single Allocation and Multiple Capacity Levels". *System Sciences*, 994 – 1003.
- Labbe, M., Yaman, H., & Gourdin, E. (2005). "A branch and cut algorithm for hub location problems with single assignment". *Mathematical Programming*, 102(2), 371–405.
- Masaeli, M., Alumur, S. A., & Bookbinder, J. H. (2018). " Shipment scheduling in hub location problems". *Transportation Research Part B: Methodological*, 115, 126-142.



- Rodriguez, V., Alvarez, M. J., & Barcos, L. (2007). "Hub location under capacity Constraints". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43, 495–505
- Silva, M. R., & Cunha, C. B. (2009). "New simple and efficient heuristics for the uncapacitated single allocation hub location problem". *Computers and Operations Research*, 36, 3152–3165.
- Taghipourian, F., Mahdavi, I., Mahdavi-Amiri, N. & Makui, A. (2012). "A fuzzy programming approach for dynamic virtual hub location problem". *Applied Mathematical Modelling*, 36(7), 3257–3270.
- Teymourian, E., Sadeghi, A., & Taghipourian, F. (2011). "A dynamic virtual hub location problem in airline networks - formulation and metaheuristic solution approaches". *Technology Management Conference*, 1061–1068.
- Topcuoglu, H., Corut, F., Ermis, M., & Yilmaz, G. (2005). "Solving the uncapacitated hub location using genetic algorithms". *Computers and Operational Research*, 32, 467–984.
- Zanjirani Farahani, R., Hekmatfar, M., Boloori Arabani, A., & Nikbakhsh, E. (2013). "Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications". *Computers & Industrial Engineering*, 64(4), 1096–1109.

---

<sup>1</sup>- Hub

<sup>2</sup>- Dynamic

<sup>3</sup>- Life Cycle

<sup>4</sup>- Reconstruct

<sup>5</sup>- Contractor

<sup>6</sup>- Capacity

<sup>7</sup>- Campbell

<sup>8</sup>- Gelareh

<sup>9</sup>- Mixed Integer

<sup>10</sup>- Fuzzy Integer Programming

<sup>11</sup>- Contreras

<sup>12</sup>- Multiple Allocation

<sup>13</sup>- Branch & Bound

<sup>14</sup>- Lagrangean Relaxation

<sup>15</sup>- Hörhammer

<sup>16</sup>- Single Allocation