بررسی عملکرد الگوریتم تپه‌نوردی در طراحی خطوط همگانی در شبکه شطرنجی با ماتریس‌های تقاضای تصادفی

هانیه ملوک‌زاده[۱]، امیرعلی زرین‌مهر[۲*]

[۱] دانشجوی کارشناسی مهندسی‌عمران، دانشگاه مازندران، بابلسر؛ haniemoloukzadeh@gmail.com

[۲*] استادیار گروه مهندسی‌عمران، دانشگاه مازندران، بابلسر؛ azarinmehr@umz.ac.ir

چکیده

مسئله‌ی طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی یکی از مهمترین مسائلی است که همزمان با توسعه پایدار شهری در نظر گرفته می‌شود. هدف آن است خطوط همگانی به گونه‌ای طراحی شوند که ضمن حفظ محدودیت بودجه بیشترین پوشش تقاضا در سطح شبکه حاصل گردد. تاکنون روش‌های ابتکاری زیادی برای حل مسئله طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی ارائه شد که جواب‌های نزدیک به بهینه جهانی را در مدت زمان کوتاهی می یابند، اما تمرکز بر روی شبکه های حمل‌ونقلی خاص در این حوزه اندک بوده‌است. هدف از این پژوهش ارزیابی عملکرد الگوریتم تپه نوردی در حل مسئله طراحی شبکه خطوط برای شبکه‌های شهری با الگوی شطرنجی است. در این راستا مطابق با ادبیات موضوع یک الگوریتم جستجوی محلی از نوع تپه‌نوردی، معرفی می شود، سپس جهت دستیابی به جواب با کیفیت بالاتر و کاهش احتمال توقف در جواب های بهینه محلی با کیفیت پایین، الگوریتم مزبور در ۲۰ تکرار با جواب اولیه متفاوت اجرا می‌شود. مقایسه مقدار متوسط پوشش حاصله از این الگوریتم در یک شبکه شطرنجی ۱۰×۶ (دارای ۶۰ گره) برای ۳۰ ماتریس تقاضای سفر تصادفی، در مقابل جواب دقیق بدست آمده از روش شمارش جواب‌های غالب این امکان را می‌دهد کیفیت پاسخ الگوریتم تپه نوردی ارزیابی شود. این نتایج نشان می‌دهد، در مقایسه با حل دقیق مسئله با شمارش جواب‌های غالب در مدت زمان تقریبا ۴ ساعت پردازش، الگوریتم تپه نوردی می‌تواند تنها در مدت ۱۸ دقیقه و۴۵ ثانیه به جواب‌هایی با اختلاف زیر ٪۴ نسبت به جواب‌های دقیق مسئله دست پیدا کند.

واژه های کلیدی

طراحی شبکه خطوط همگانی، شبکه شهری شطرنجی، پوشش، الگوریتم تپه‌نوردی، شمارش

مقدمه

افزایش روزافزون جمعیت و سفرهای درون شهری در راستای توسعه شهرها موجب شده که شهرها با مشکلاتی نظیر آلودگی هوا، افزایش مصرف انرژی، ازدحام ترافیکی و اتلاف وقت شهروندان روبه‌رو شوند. در نتیجه ایجاد و توسعه سیستم حمل‌ونقل همگانی و برنامه‌ریزی در جهت عملکرد بهینه آن از اولویت‌های مدیریت شهری می‌باشد.

به دلیل ابعاد گسترده مسائل برنامه‌ریزی حمل‌ونقل همگانی، این مسائل معمولا در چند سطح طبقه‌بندی می‌شوند و با هر مسئله به‌طور مستقل برخورد می‌کنند [۱]. در این میان، مساله طراحیِ خطوط جزء سطوح اولیه و استراتژیک محسوب می‌گردد که بر سایر سطوح برنامه‌ریزی نظیر تنظیم فرکانس، زمان‌بندی وسایل نقلیه و... اثر می‌گذارد [۲].

مسئله طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل همگانی، یکی از مهمترین مسائل در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل است که در آن خطوط همگانی به گونه ای طراحی می‌شود که ضمن حفظ محدودیت بودجه، رضایت استفاده‌کنندگان سیستم را فراهم کند. رضایت استفاده‌کنندگان یک مساله چندبعدی است، که اهداف و محدودیت‌های متعددی را به‌طور همزمان در برمی‌گیرد. بیشینه سازی پوشش تقاضا در طراحی شبکه حمل‌ونقل عمومی یکی از مهمترین اهدافی است که از دیدگاه کاربر و ارائه دهنده سیستم، به مسئله می‌نگرد و بیانگر هدف اصلی ارائه سیستم حمل ونقل عمومی است. در یک تعریف کلی، منظور از "پوشش" تعداد یا درصد افرادی است که امکان استفاده از سیستم حمل‌ونقل همگانی برای انجام سفر دارند.

این مساله به لحاظ محاسباتی اصطلاحا در رده مسائل پیچیده محاسباتی قرار می‌گیرد و یافتن پاسخ دقیق آن زمان و حافظه‌ی زیادی می‌طلبد [۳]. به‌طوری که برای حل تقریبی آن‌ها، از روش‌های جستجوی ابتکاری استفاده شده‌است.

الگوریتم‌های ابتکاری متعددی در ادبیات پژوهش وجود دارد که از نظر ساختار، پیچیدگی، زمان اجرا و سایر خصوصیات باهم متفاوت

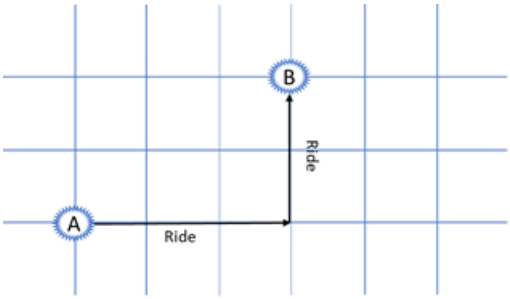
می‌باشند. ایده اصلی این الگوریتم‌ها تهاتر بین سرعت حل الگوریتم و کیفیت جواب‌های حاصله از آن است.

مقاله پیش‌رو، به طور خاص، بر مساله طراحی شبکه خطوط همگانی در شبکه‌های شطرنجی تمرکز می‌کند و در ادامه، به بیان مسئله، فرضیات و نوع شبکه شطرنجی می‌پردازد. سپس الگوریتم پیشنهادی را معرفی، نتایج را برای یک شبکه شطرنجی ۶۰ گره‌ای ارائه و عملکرد الگوریتم را از طریق مقایسه با حل دقیق مسئله ارزیابی می‌کند.

بیان مساله

در این پژوهش فرض می‌کنیم، یک شبکه شهری از نوع شطرنجی در اختیار داریم که به دلیل سیاست‌های برنامه‌ریزی، خطوط همگانی به صورت افقی یا عمودی است و در آن گره‌ها بیانگر ایستگاه‌ها و خطوط نمایانگر خیابان‌هایی است که ایستگاه‌ها را متصل می‌کند.

در این نوع شبکه به دلیل وجود تعداد بالای گره در مسیرهای متقاطع، افراد پوشش‌داده‌شده توسط سیستم همگانی می‌توانند بدون انتقال، یا حداکثر با یک انتقال همچون سفر از نقطه A به نقطه B در شکل ۱ به صورت L-شکل سفر کنند [۴].



شکل ۱: انجام سفر همگانی با یک انتقال در شبکه‌های شهری شطرنجی

در یک چنین شبکه‌ای تعریف می‌کنیم:

R: مجموعه K خط همگانی کاندیدا به منظور احداث در شبکه،

b_k: متغیر صفر و یکی، به منظور تصمیم به عدم احداث یا احداث خط همگانی k ام، $1 \le K \le k$،

B: بردار متغیرهای تصمیم مساله به طول K،

R_B: زیرمجموعه خطوط همگانی انتخاب شده برمبنای بردار تصمیمB،

l_k: طول خط همگانی کاندیدای k ام، $1 \le K \le k$ ،

l: مجموعه همه خطوط شبکه،

L: حداکثر طول قابل احداث برای خطوط همگانی جدید، با حفظ محدودیت بودجه،

$N(R_B) = N_B$: شبکه حاصل از احداث خطوط همگانی R_B،

$\mathrm{Cov}(N_B)$: پوشش حاصله از خطوط همگانی در شبکه N_B ،

به منظور محاسبه سطح پوشش $\mathrm{Cov}(N_B)$ در شبکه، ابتدا مقدار پوشش تقاضا بین یک مبدا-مقصد را تعریف کرده، سپس پوشش در شبکه را از مجموع مقادیر پوشش روی مبدا-مقصدها محاسبه می‌کنیم. برای محاسبه پوشش تقاضای همگانی بین یک مبدا-مقصد، ابتدا جریمه ۵ دقیقه‌ای انتقال بین خطوط همگانی به همه مسیرهای همگانی موجود اعمال می‌گردد، و سپس، کوتاه‌ترین مسیر همگانی از مبدا به مقصد تعیین می‌شود. اگر کوتاه‌ترین مسیر حاصله شامل ۰، ۱، ۲، یا بیش از ۲ انتقال بین خطوط باشد، به‌ترتیب، فرض می‌شود که تقاضای آن مبدا-مقصد به میزان ۱۰۰، ۷۰، ۵۰، یا صفر درصد پوشش داده‌شده‌است. در نهایت، پوشش تقاضا در سطح کل شبکه از مجموع مقادیر پوشش روی همه مبدا-مقصدها محاسبه می‌گردد.

با تعاریف یادشده، اکنون می‌توان مساله این مقاله را به صورت کلی زیر تعریف کرد.

$$\max_{\mathbf{B}} \quad \mathrm{Cov}(N_{\mathbf{B}}) \qquad (۱)$$

$$s.t. \quad \sum_{k=1}^{K} b_k l_k \le L \qquad (۲)$$

هدف مساله یافتن بردار تصمیم B است، به گونه‌ای که مطابق سطر ۱ این تصمیم منجر به ایجاد حداکثر پوشش در سطح شبکه گردد. به‌علاوه، محدودیت ذکر شده در سطر ۲ حداکثر طول خطوط همگانی را به مقدار L محدود می‌کند.

الگوریتم تپه‌نوردی

یکی از ویژگی های الگوریتم های ابتکاری، توانایی آن ها در یافتن پاسخ‌های نزدیک به بهینه سراسری، در مدت زمان معقول برای مسائل NP-Hard است. هدف از این پژوهش مقایسه کارایی الگوریتم تپه نوردی (Hill Climbing)، جهت حل مسئله طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی است.

ایده الگوریتم تپه نوردی، بدین صورت است که، ابتدا یک جواب اولیه تصادفی تولید می‌شود. سپس در یک حلقه جواب فعلی هر بار به بهترین جواب در همسایگی خود حرکت می‌کند. این حرکت تا زمانی ادامه می‌یابد. که در همسایگی جواب فعلی هیچ جواب بهتری وجود نداشته باشد. در پایان الگوریتم در یک جواب ماکزیمم محلی متوقف می‌شود[۵].

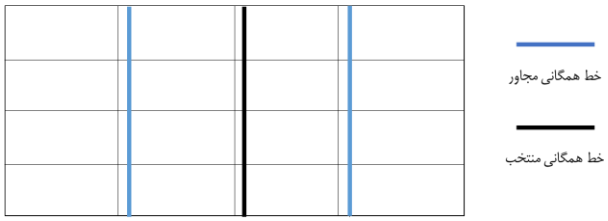
در ادامه لازم است، به مفاهیمی همچون جواب تصادفی اولیه و نیز همسایگی در این مطالعه بپردازیم.

جواب تصادفی اولیه

به منظور دستیابی به جواب اولیه تصادفی در این مطالعه، فرض می‌شود ابتدا تمام خطوط همگانی شبکه احداث شده است. واضح است که در شرایط محدودیت بودجه این جواب امکان ناپذیر است. در نتیجه جهت یافتن ترکیب خطوطی از شبکه که در محدودیت بودجه بگنجد، هربار یک خط همگانی به طور تصادفی انتخاب و از مجموعه خطوط حذف می‌شود. این فرایند آن‌قدر ادامه پیدا می‌کند تا به جوابی دست یابد که در محدودیت بودجه امکان‌پذیر باشد.

مفهوم همسایگی برای یک جواب

در یک شبکه شطرنجی، یک جواب برای مساله شامل تعدادی خطوط همگانی افقی یا عمودی است. در مجاورت هر خط افقی یا عمودی، یک یا دو خط همگانی کاندیدای دیگر نیز وجود دارد که ممکن است در جواب فعلی انتخاب نشده باشند. به عنوان مثال، شکل ۲، یک خط همگانی عمودی را در کنار دو خط مجاور آن در یک شبکه شطرنجی فرضی نمایش می‌دهد.



شکل ۲: یک خط همگانی انتخاب شده در کنار دو خط کاندیدای مجاور آن در یک شبکه شطرنجی

در این الگوریتم فرض می‌شود در جواب فعلی تعداد n خط همگانی کاندیدا به منظور احداث انتخاب شده باشند. و در آن جوابِ همسایه جوابی است که در آن تنها برای یک خط از n خط موجود، خط همگانی به خط مجاور خود تغییر کند، و تعدد n-1 خط همگانی دیگر در آن بی تغییر باقی می‌ماند.

بیان الگوریتم تپه‌نوردی

شکل۳ جزئیات الگوریتم حل پیشنهادی این مطالعه را نمایش می‌دهد. مطابق شکل۳، الگوریتم پیشنهادی پس از مقدمات (گام۱)، در گام ۲ با ساخت یک جواب اولیه تصادفی به عنوان جواب فعلی آغاز می شود. سپس در گام‌های ۳و ۴، الگوریتم در یک حلقه، همسایگان جواب فعلی را می‌سازد و برای هر همسایه میزان پوشش را محاسبه می‌کند. اگر میزان پوشش تقاضا در بهترین همسایه از میزان پوشش تقاضای جواب فعلی بیشتر باشد، جواب فعلی به بهترین همسایه تغییر پیدا می‌کند. در غیر این صورت، جواب فعلی تحت عنوان بهترین جواب الگوریتم تپه نوردی گزارش می‌شود.

باید توجه داشت در الگوریتم تپه‌نوردی بهترین همسایه جواب فعلی به‌عنوان جواب بهینه‌تر برگزیده می‌شود در نتیجه ممکن است در انتهای این فرایند در یک جواب بهینه محلی با کیفیت پایین متوقف شود.

جهت بهبود عملکرد الگوریتم تپه‌نوردی و کاهش احتمال توقف در جواب‌های بهینه محلی با کیفیت پایین، الگوریتم در تعداد تکرارهای بالاتر با جواب های تصادفی اولیه متفاوت اجرا می‌شود سپس بهترین جواب را به عنوان جواب الگوریتم تپه نوردی گزارش می‌شود.

حل دقیق مسئله

در روش شمارش کامل به‌منظور حل دقیق مساله، اگر بخواهیم تمام جواب‌های امکان‌پذیر مسئله را شمارش نموده و برای هریک از آن‌ها پوشش تقاضا را محاسبه نماییم، یک مسئله نمایی از مرتبه ۲^k

گام۱- اطلاعات مورد نیاز (شبکه، ماتریس تقاضا، مقادیر بودجه و...) را از ورودی بخوانید.
گام۲- یک جواب تصادفی اولیه، باتوجه به محدودیت بودجه، برای مسئله تولید کن و این جواب را جواب فعلی نامگذاری کنید.
گام۳- برای جواب فعلی، مجموعه همه همسایگان را در نظر گرفته، مقدار پوشش را برای همه ی آن ها محاسبه کنید، و همسایه ی دارای بیشترین پوشش را بهترین همسایه بنامید.
گام۴- آیا مقدار پوشش بهترین همسایه از جواب فعلی بیشتر است؟
اگر بله: جواب فعلی را به بهترین همسایه تغییر داده و به گام ۳ بازگردید.
در غیر این صورت: جواب فعلی را به عنوان بهترین جواب در خروجی چاپ کن.
گام۵- پایان.

شکل ۳: الگوریتم تپه‌نوردی

خواهیم داشت که عملا یافتن پاسخ آن در ابعاد بزرگ امکان‌ناپذیر است (K معادل تعداد خطوط همگانی).

با در نظر گرفتن این نکته که شاخص حاشیه‌ای پوشش تقاضا برای هر خط همگانی در هر ترکیب خطوط مقداری نامنفی است، جهت کاهش حجم عملیات جستجو، به جای همه جواب های امکان‌پذیر، شمارش فقط بر روی جواب‌های اصطلاحا غالب صورت می‌گیرد. منظور از جواب‌های غالب جواب‌هایی هستند که با توجه به محدودیت بودجه، نتوان خط همگانی جدیدی به آن‌ها اضافه کرد. خواننده می‌تواند جهت کسب اطلاعات بیشتر به مرجع [۶] رجوع کند.

نتایج استفاده از الگوریتم

برای درک بهتر از کارایی الگوریتم تپه‌نوردی در حل مسئله‌ی طراحی شبکه، الگوریتم بر روی یک شبکه ساختگی شطرنجی اجرا شد. شبکه مورد استفاده یک شبکه ۱۰×۶ (یعنی دارای ۶۰ گره) است، که طول ضلع افقی و عمودی هر بلاک آن به ترتیب ۲/۲ و ۲ کیلومتر درنظرگرفته شده‌است و تعداد ۱۶ خط پیشنهادی همگانی به عنوان کاندیدای احداث در آن وجود دارد.

ارزیابی کارایی الگوریتم تپه نوردی

جهت بررسی کارایی الگوریتم تپه نوردی، این الگوریتم در محیط برنامه‌ریزی python کد نویسی شد. اجراها در وضعیت safe mode بر روی یک لپتاپ دارای پردازنده سری Core i7 دارای سرعت 1.80GHz 1.99GHz و حافظه 8.00GB و دارای سیستم عامل از نوع Windows10 انجام گردید. جدول ۱ نتایج حاصل از اجرای الگوریتم پیشنهادی را برای ۳۰ ماتریس تقاضای سفر تصادفی در شبکه ۶۰گره‌ای مورد نظر نشان می‌دهد.

با توجه به ماهیت تصادفی الگوریتم تپه نوردی (به دلیل جواب تصادفی اولیه) نتایج مربوط به این الگوریتم از متوسط‌گیری بر روی ۳۰ اجرای مستقل الگوریتم (هر اجرا با ۲۰ تکرار) حاصل شده است. بنابراین آنچه در این جدول برای الگوریتم تپه نوردی مشاهده می‌شود مقدار متوسط پوشش حاصله از این الگوریتم در کنار انحراف استاندارد نتایج به دست آمده است.

مطابق جدول ۱ می‌توان ملاحظه‌کرد به طور متوسط روش شمارش جواب‌های غالب می تواند در مدت زمان ۳ ساعت و ۵۷ دقیقه و ۱۰ ثانیه پاسخ دقیق مسئله را بیابید. این در حالی است که

جدول ۱: نتایج عملکرد الگوریتم تپه‌نوردی و شمارش جواب‌های غالب در شبکه ۶×۱۰

شماره‌ماتریس تقاضای سفر تصادفی	کل تقاضا در شبکه (سفر)	شمارش جواب‌های غالب				الگوریتم پیشنهادی تپه‌نوردی				اختلاف مقدار پوشش (درصد)
		پوشش (سفر)	پوشش (درصد)	بودجه مورد نیاز (کیلومتر)	زمان اجرا (ثانیه:دقیقه:ساعت)	پوشش (سفر)	پوشش (درصد)	بودجه مورد نیاز (کیلومتر)	زمان اجرا (ثانیه:دقیقه)	
۱	۳۳۳۰۱۸	۱۴۵۶۵۵	۴۳.۷۴	۹۹.۸	۰۴:۲۷:۲۵	۱۳۱۸۰۴ ± ۷۴۹۴	۳۹.۵۸	۹۹.۶	۱۶:۴۱.۰	۴.۱۶
۲	۳۳۷۹۵۴	۱۵۰۰۴۱	۴۴.۴۰	۹۹.۸	۳:۳۰:۰۰.۸۴	۱۳۶۹۳۴ ± ۸۳۰۶	۴۰.۵۲	۹۹.۷	۱۸:۴۴.۳	۳.۸۸
۳	۳۲۵۹۸۰	۱۴۴۸۴۴	۴۴.۴۳	۹۹.۸	۴:۲۲:۲۶.۸۶	۱۳۳۴۷۳ ± ۸۱۹۴	۴۰.۹۵	۹۹.۷	۲۰:۳۰.۲	۳.۴۹
۴	۳۳۴۳۵۸	۱۴۸۰۳۷	۴۴.۲۷	۹۹.۸	۴:۲۶:۱۹.۹۱	۱۳۴۸۲۰ ± ۸۰۴۱	۴۰.۳۲	۹۹.۷	۲۱:۰۷.۶	۳.۹۵
۵	۳۲۶۷۸۶	۱۴۵۳۱۲	۴۴.۴۷	۹۹.۸	۴:۲۱:۳۵.۰۳	۱۳۲۷۴۸ ± ۸۳۵۸	۴۰.۶۲	۹۹.۷	۲۰:۲۴.۴	۳.۸۴
۶	۳۲۶۱۹۲	۱۴۳۹۰۳	۴۴.۱۲	۹۹.۸	۳:۲۸:۲۷.۷۰	۱۳۳۵۷۴ ± ۸۷۶۰	۴۰.۹۵	۹۹.۷	۱۵:۴۴.۴	۳.۱۷
۷	۳۳۳۶۱۶	۱۴۷۶۷۵	۴۴.۲۷	۹۹.۸	۳:۲۷:۰۸.۰۸	۱۳۵۸۹۹ ± ۸۵۹۷	۴۰.۷۴	۹۹.۷	۱۵:۵۶.۴	۳.۵۳
۸	۳۳۶۳۴۰	۱۴۹۱۰۷	۴۴.۳۳	۹۹.۸	۳:۲۸:۲۴.۰۷	۱۳۵۱۷۸ ± ۷۹۳۵	۴۰.۱۹	۹۹.۷	۲۰:۳۹.۳	۴.۱۴
۹	۳۴۳۴۴۸	۱۵۲۹۰۳	۴۴.۵۲	۹۹.۸	۳:۲۶:۵۱.۲۴	۱۴۰۸۶۸ ± ۹۲۲۸	۴۱.۰۲	۹۹.۷	۱۶:۰۵.۹	۳.۵۰
۱۰	۳۳۹۵۶۸	۱۵۰۰۰۶	۴۴.۱۸	۹۹.۸	۳:۲۷:۴۱.۹۸	۱۴۰۷۸۴ ± ۹۰۱۰	۴۱.۴۶	۹۹.۷	۱۶:۴۷.۱	۲.۷۲
۱۱	۳۳۴۴۰۰	۱۴۹۲۳۰	۴۴.۶۳	۹۹.۸	۳:۲۹:۱۴.۸۶	۱۳۷۲۱۸ ± ۹۲۳۵	۴۱.۰۳	۹۹.۷	۱۶:۴۹.۶	۳.۵۹
۱۲	۳۳۱۱۲۸	۱۴۷۸۳۲	۴۴.۶۴	۹۹.۸	۳:۲۶:۵۷.۴۵	۱۳۷۵۴۱ ± ۸۱۹۷	۴۱.۵۴	۹۹.۷	۱۷:۲۰.۴	۳.۱۱
۱۳	۳۲۹۶۷۲	۱۴۷۲۷۸	۴۴.۶۷	۹۹.۸	۳:۲۷:۱۹.۸۰	۱۳۴۳۵۱ ± ۸۳۹۶	۴۰.۷۵	۹۹.۷	۱۷:۵۶.۴	۳.۹۲
۱۴	۳۲۷۴۹۲	۱۴۵۵۵۰	۴۴.۴۴	۹۹.۸	۳:۲۹:۴۶.۶۷	۱۳۲۱۳۷ ± ۷۸۵۸	۴۰.۳۵	۹۹.۷	۱۷:۱۸.۰	۴.۱۰
۱۵	۳۳۶۱۱۲	۱۴۹۴۶۱	۴۴.۴۷	۹۹.۸	۴:۲۴:۱۹.۵۴	۱۳۸۲۰۲ ± ۹۱۱۱	۴۱.۱۲	۹۹.۷	۱۷:۲۱.۶	۳.۳۵
۱۶	۳۳۴۶۳۴	۱۴۸۸۳۵	۴۴.۴۸	۹۹.۸	۳:۲۸:۵۰.۴۵	۱۳۵۸۰۳ ± ۷۸۳۴	۴۰.۵۸	۹۹.۷	۲۳:۳۶.۶	۳.۸۹
۱۷	۳۳۳۶۲۶	۱۴۷۹۱۷	۴۴.۳۴	۹۹.۸	۳:۲۹:۳۱.۳۹	۱۳۵۳۵۸ ± ۹۱۱۸	۴۰.۵۷	۹۹.۷	۱۹:۳۵.۵	۳.۷۶
۱۸	۳۳۰۴۲۲	۱۴۶۸۰۵	۴۴.۴۳	۹۹.۸	۴:۲۲:۳۴.۲۶	۱۳۳۴۸۰ ± ۷۶۵۷	۴۰.۴۰	۹۹.۷	۲۱:۱۵.۳	۴.۰۳
۱۹	۳۳۵۱۸۸	۱۴۸۵۵۷	۴۴.۳۲	۹۹.۸	۳:۲۴:۵۱.۸۲	۱۳۵۱۵۹ ± ۸۴۴۸	۴۰.۳۲	۹۹.۷	۱۵:۳۴.۱	۴.۰۰
۲۰	۳۳۵۰۹۶	۱۴۹۰۸۵	۴۴.۴۹	۹۹.۸	۳:۲۷:۱۱.۵۶	۱۳۳۳۰۸ ± ۷۵۲۸	۳۹.۷۸	۹۹.۶	۱۸:۲۷.۶	۴.۷۱
۲۱	۳۳۳۴۳۲	۱۴۷۸۳۳	۴۴.۳۴	۹۹.۸	۴:۲۲:۰۰.۵۲	۱۳۷۷۹۲ ± ۹۱۵۱	۴۱.۳۳	۹۹.۷	۱۶:۴۸.۰	۳.۰۱
۲۲	۳۳۵۴۵۸	۱۴۶۹۵۵	۴۳.۸۱	۹۹.۸	۴:۲۵:۳۱.۹۳	۱۳۵۶۷۷ ± ۸۷۴۳	۴۰.۴۵	۹۹.۷	۲۱:۴۸.۸	۳.۳۶
۲۳	۳۳۲۷۴۲	۱۴۶۶۵۴	۴۴.۰۷	۹۹.۸	۴:۳۰:۳۴.۰۳	۱۳۵۳۸۴ ± ۹۰۲۶	۴۰.۶۹	۹۹.۷	۱۹:۳۱.۸	۳.۳۹
۲۴	۳۳۱۵۹۸	۱۴۵۸۳۷	۴۳.۹۸	۹۹.۸	۴:۲۵:۴۸.۱۰	۱۳۴۰۱۸ ± ۸۵۷۶	۴۰.۴۲	۹۹.۷	۲۲:۱۱.۱	۳.۵۶
۲۵	۳۳۲۷۵۴	۱۴۸۲۷۵	۴۴.۵۶	۹۹.۸	۳:۲۸:۵۶.۴۵	۱۳۱۹۶۶ ± ۶۶۷۷	۳۹.۶۶	۹۹.۶	۲۲:۱۷.۱	۴.۹۰
۲۶	۳۳۳۷۳۸	۱۴۸۳۵۴	۴۴.۴۵	۹۹.۸	۴:۲۲:۳۵.۵۴	۱۳۴۹۰۷ ± ۸۱۹۹	۴۰.۴۲	۹۹.۷	۲۱:۱۱.۰	۴.۰۳
۲۷	۳۳۳۹۵۰	۱۴۷۷۸۴	۴۴.۲۵	۹۹.۸	۴:۴۰:۳۳.۹۹	۱۳۵۴۹۴ ± ۸۹۰۷	۴۰.۵۷	۹۹.۷	۱۶:۳۶.۷	۳.۶۸
۲۸	۳۳۴۳۰۰	۱۴۸۵۸۸	۴۴.۴۵	۹۹.۸	۴:۳۳:۵۸.۵۲	۱۳۵۱۸۹ ± ۸۳۱۸	۴۰.۴۴	۹۹.۷	۱۷:۳۶.۰	۴.۰۱
۲۹	۳۲۶۶۵۶	۱۴۳۵۷۴	۴۳.۹۵	۹۹.۸	۴:۲۵:۰۵.۰۷	۱۳۱۷۶۵ ± ۸۱۶۸	۴۰.۳۴	۹۹.۷	۱۶:۳۸.۴	۳.۶۲
۳۰	۳۳۵۷۵۴	۱۴۹۱۹۱	۴۴.۴۳	۹۹.۸	۴:۲۳:۱۸.۷۲	۱۳۶۰۰۴ ± ۸۹۵۱	۴۰.۵۱	۹۹.۷	۱۹:۵۷.۶	۳.۹۳

الگوریتم تپه نوردی در مدت ۱۸دقیقه و۴۵ ثانیه به جوابی با اختلاف زیر ۴ درصد از جواب‌بهینه دست پیدامی‌کند، که نشان میدهد الگوریتم پیشنهادی در زمان‌اجرای قابل‌قبولی می‌تواند به جواب‌هایی با کیفیت نسبتا بالا دست پیدا کند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در طی چند دهه گذشـــته، الگوریتم های ابتکاری متعددی جهت طراحی بهینه شبکه حمل‌ونقلی ارائه شد که از نظر ساختار، پیچیدگی، زمان اجرا و سایر خصوصیات باهم متفاوت است. در این پژوهش، به کارایی الگوریتم تپه نوردی در بهینه سازی یک شبکه حمل‌ونقلی از نوع شطرنجی پرداخته شد.

هدف پژوهش، یافتن بهترین ترکیب خطوط حمل و نقل همگانی بود به شکلی که با حفظ محدودیت بودجه، به حداکثر پوشش تقاضای سفر در سطح شبکه دست یابد.

مقایســه بهترین جواب‌های حاصـل از الگوریتم تپه نوردی در ۲۰ تکرار، در مقابل جواب دقیق بد ست آمده از روش شمارش جواب‌های غالب نشان داد که الگوریتم تپه نوردی می‌تواند با سرعت بسیاربالایی به جواب‌هایی با کیفیت نزدیک به جواب دقیق دست پیداکند.

مراجع و منابع

[1] Kepaptsoglou, K., & Karlaftis, M. (2009). Transit route network design problem. Journal of transportation engineering, 135(8), 491-505.

[2] Zarrinmehr, A., Saffarzadeh, M., Seyedabrishami, S., & Nie, Y. M. (2016). A path-based greedy algorithm for multi-objective transit routes design with elastic demand. Public Transport, 8(2), 261-293.

[۳] ملوک‌زاده، هانیه و زرین مهر، امیرعلی، ۱۳۹۹، موقعیت یابی خطوط حملونقل همگانی شهری در شبکه های شطرنجی از طریق شمارش جوابهای غالب، هفتمین همایش علمی پژوهشی توسعه و ترویج علوم معماری و شهرسازی ایران، تهران.

[4] Walker, J. (2020) "Why do so many public transport networks use grid systems?" https://www.citymetric.com/transport/why-do-so-many-public-transport-networks-use-grid-systems-955.

[۵] زرین مهر، امیرعلی و ملوک‌زاده، هانیه، ۱۳۹۹، طراحی شبکه خطوط حمل ونقل همگانی با هدف بیشینه سازی پوشش در شبکه های شهری شطرنجی، ششمین کنفرانس بین المللی عمران، معماری و شهرسازی، تهران.

[6] Zarrinmehr, A., & Shafahi, Y. (2014). Enumeration of Dominant Solutions: An Application in Transport Network Design. International Journal of Transportation Engineering, 1(4), 335-348.