Archive of SID

برنامه ریزی چندهدفه مسیر در یک شبکه چندطریقه با مسیرهای جایگزین

سیاوش تبریزیان (مسئول مکاتبات)، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

کورش عشقی، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

E-mail: s_tabrizian@ie.sharif.edu

دریافت: ۱۳۹٤/۰۵/۲٤ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۲۳

چکیده

با توجه به گسترش روز افزون ناوگان حمل و نقل شهری، همچنین پیچیدگی شبکه معابر ضرورت برنامه‌ریزی بهینه مسیر در شبکه‌های حمل و نقل بیش از پیش اهمیت یافته‌است. شبکه‌ی حمل و نقلی از مسیرها که طریقه‌های متنوعی از وسائل نقلیه در آن استفاده شود را شبکه چندطریقه می‌نامیم که در این نوع از شبکه‌ها غیر از مشخص کردن مسیر بهینه، ارائه یک توالی از طریقه‌های حمل و نقل نیز ضرورت دارد. همچنین، انتخاب کوتاه‌ترین مسیر در این شبکه‌ها با محدودیت‌هایی همراه است که مسیر به‌دست آمده را از دید کاربر قابل انتخاب می‌کند. در این مقاله یک مدل برای برنامه‌ریزی مسیر در شبکه‌های چندطریقه، که در آن دو هدف هزینه و زمان در کنار کمینه کردن تعداد دفعات تغییر طریقه برای برنامه‌ریزی بیان شده‌است. در کنار حل مدل ریاضی مسئله توسط نرم افزار یک الگوریتم تقریبی مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا نیز برای آن ارائه شده‌است، که نشان داده می‌شود که این الگوریتم در اکثر مسائل جواب دقیق را ارائه می‌کند و زمان بسیار کمتری برای حل نسبت به الگوریتم‌های مشابه مصرف کرده و به‌طور مستقیم می‌تواند مجموعه پارتو از جواب‌ها را ارائه نماید. در ادامه، نتایج آن با حل مدل ریاضی توسط نرم افزار و الگوریتم ژنتیک چندهدفه مقایسه گردیده‌است، و در نهایت یک مطالعه‌موردی با داده‌های واقعی برای بررسی کاربرد مسئله حل شده‌است.

واژه های کلیدی: شبکه چند طریقه، برنامه‌ریزی چند هدفه مسیر، الگوریتم برنامه ریزی پویا، الگوریتم ژنتیک چندهدفه

www.SID.ir

Archive of SID

۱. مقدمه

در ادبیات کلاسیک نظریه گراف مسئله کوتاه‌ترین مسیر یک مسئله معروف و شناخته شده‌است که الگوریتم‌های متعددی برای آن ارائه شده‌است. دو الگوریتم معروف این مسئله الگوریتم دایکسترا[۱] و الگوریتم بلمن–فورد[۲] هستند، که در آنها فرض بر این است که در گراف مورد نظر G(V,E) دور با وزن منفی وجودندارد. اگر |E| را تعداد یال‌ها و |V| را تعداد گره‌ها در نظر بگیریم، پیچیدگی زمانی الگوریتم دایکسترا $O(|V|^3)$ و الگوریتم بلمن–فورد $O(|V|^2|E|)$ هستند. هر دو الگوریتم از رده پیچیدگی چندجمله‌ای برخوردارند. الگوریتم دایکسترا ساده‌تر از الگوریتم بلمن–فورد انجام می‌پذیرد و در حالت کلی سریع‌تر از آن است. اما در گراف‌های با وزن منفی بدون دور کارآیی الگوریتم بلمن–فورد از دایکسترا بالاتر است.

باید توجه داشت اگر مسئله کوتاه‌ترین مسیر به مسئله کوتاه‌ترین مسیر با محدودیت، تبدیل شود در آن صورت این مسئله در رده پیچیدگی NP-hard قرار می‌گیرد. اثبات NP-hard بودن آن از طریق تقلیل مسئله کوله پشتی به مسئله کوتاه‌ترین مسیر با محدودیت امکان‌پذیر خواهدبود.

بعد از سال‌ها پژوهش توسط محققان در زمینه شبکه و گراف به دلیل نیازهای کاربردی در زمینه برنامه‌ریزی شهری و مسیریابی شهری با پیدایش شهرهای بزرگ، معضل ترافیک، دستگاه‌های هوشمند کنترل ترافیک و رونق گرفتن سیستم‌های خبره، مسئله مسیریابی چندطریقه‌ای در محدوده شهری جایگاه خود را به‌عنوان یک موضوع پیدا کرد. لوزانو و استورچی [Lozano and Storchi, 2001] از اولین افرادی بودند که به‌طور جامع به این مسئله پرداختند و روش‌های حل متعددی را با رویکرد علم بهینه‌سازی برای این مسئله ارائه کردند. الگوریتم‌های استفاده‌شده از طرف آنها برای حل این مسئله همان الگوریتم‌های سنتی نظریه گراف بود که با تغییراتی برای این مسئله استفاده‌گردیدند. در این پژوهش از یک الگوریتم اصلاح برچسب[۳]، برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر از یک مبدأ به یک مقصد، در یک شبکه چندطریقه[۴] استفاده شده‌است. این الگوریتم از اصلاح تک‌منظوره الگوریتم مرتب‌سازی برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر در شبکه چندطریقه بهره برده‌است. سپس در یک نمونه واقعی جواب با هر تعداد تغییر طریق آزمایش شده‌است، سپس با توجه به ترجیحات کاربر از نظر تعداد تغییر طریق اصلاح گردیده‌است.

لوزانو و استورچی[Lozano and Storchi, 202] که قبلاً سابقه بررسی این مسئله را داشتند، با مدل‌سازی جدیدی دوباره به این مسئله پرداختند. در این نوع مدل‌سازی مسئله در یک ابرگراف بررسی می‌گردد و مسیر به‌دست آمده از الگوریتم طراحی شده را یک ابرمسیر[۵] می‌نامیم. به این منظور از یک الگوریتم اصلاح برچسب، برای یافتن کوتاه‌ترین ابرمسیر از یک مبدأ به مقصد برای مقادیر مختلف بالاترین کران تغییر طریق استفاده شده‌است. این ابر مسیر یک مجموعه جواب‌های بهینه پارتو[۶] ایجاد می‌کند، که فرد می‌تواند بهترین ابرمسیر را با توجه به ترجیحات خود از نظر تعداد تغییر طریق و مقدار زمان مورد انتظار سفر به‌دست آورد. این الگویتم در یک مثال نیز بررسی شده‌است.

یکی از مشکلاتی که در این مسأله وجود دارد نحوه برخورد با توالی طریقه‌ها یا همان برچسب‌گذاری آنان است که یکی از اولین مقالاتی که با این مسأله به نحو مناسبی برخورد نمود و برای حل این مسائل الگوریتمی ارائه نمود مقاله شرالی و همکاران [Sherali et. al. 2003] است. در این پژوهش توضیح داده خواهد شد که برای برخورد با این مسأله نحوه تعریف شبکه و روش حل توأمان می‌توانند این معضل را حل نمایند.

واردل و زیلیاسکوپولوس [Ziliaskopoulos and Wardell, 2002]، با توجه به این مشخصه و با انگیزه دخیل کردن فاکتور زمان در برنامه‌ریزی مسیر، مدلی ارائه کردند که مبتنی بر زمان بوده و تأخیرات ناشی از تعویض طریقه حمل و نقل و هزینه ناشی از آن را درنظر می‌گیرد، همینطور در ادامه الگوریتمی کارا برای حل مسئله مورد بررسی ارائه دادند. پیچیدگی محاسباتی آن و شاخصه‌های کارآیی آن را نیز بررسی کردند، همچنین دقیق بودن این الگوریتم را نیز اثبات کردند.

بعد از بررسی این مسئله در محدوده شهری، برای به‌دست آوردن مسیر بهینه در یک سفر شخصی و درون‌شهری به مرور این مسئله

www.SID.ir

Archive of SID

جایگاه خود را در حوزه‌های دیگر حمل و نقل بازکرد. سؤالی که مطرح می‌شود این است که چگونه بهترین مسیر برای انتقال در یک شبکه چندطریقه بین المللی را می‌توان یافت. مقاله‌ی چانگ[Chang, 2008] یکی از مقالاتی بود که این مسئله را وارد ادبیات لجستیک کرد و پیرو آن نیز موج جدیدی از این مسئله برای برخورد با بحث لجستیک استفاده‌کردند، روش حل در این مقالات با توجه به درجه پیچیدگی مسئله که از رده NP-hard است، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری بوده‌است [Ayed et. al. 2011, Yamada et. al. 2009]. در یک شبکه چندطریقه بین المللی همزمان سه فاکتور حیاتی وجود دارد: ۱- چندهدفه بودن؛ ۲- زمانبندی طریقه‌های حمل و نقل با توجه به زمان انتقال و تقاضا؛ ۳- حمل و نقل از دیدگاه اقتصادی. این مسئله را می‌توان به‌صورت یک مدل ریاضیِ مسئله جریانِ چندهدفه چندطریقه با چندین کالا[۷] با پنجره زمانی و تابع هزینه مقعر مدلسازی کرد. در حقیقت در یک لجستیک برای انتقال کالا هم می‌توان از طریقه‌های متفاوتی از حمل و نقل استفاده‌نمود. بحث انتقال کالا بین کشورهای مختلف و لجستیک جهانی یکی از انگیزه‌هایی است که حمل و نقل چندطریقه‌ای را در لجستیک پراهمیت می‌کند. طراحی یک شبکه‌ی حمل و نقل چندطریقه برای انتقال کالا و خدمات می‌تواند کشورهای جهان را برای توسعه اقتصادی مجهز کند و کمک به کاهش تأثیرات مخرب زیست محیطی نماید.

یکی از مسائل موجود در حمل و نقل چندطریقه برنامه‌ریزی به‌صورت دوطرفه است. برنامه‌ریزی مسیر به صورت دوطرفه به‌این معناست که فرد، هم برای مسیر رفت خود و هم برای مسیر برگشت خود برنامه‌ریزی نماید. در این راه یکی از مشکلات پرداختن به مسئله این است، که اگر فرد از ماشین شخصی یا وسیله‌ای مانند دوچرخه در مسیر رفت استفاده نماید، در برگشت هم چون آن وسیله را با خود آورده باید از همان بهره‌برداری نماید. در حالتی دیگر اگر وسیله شخصی خود را در بین راه پارک نماید، در مسیر برگشت باید به همان محل پارک بازگردد. می‌توان الگوریتم‌های ابتکاری[۸] با توجه به جستجو در فضای حل طراحی نمود تا با توجه به محدودیت‌های موجود در این مسئله بخصوص جواب‌های نزدیک به بهینه تولید نمایند [Huguet et. al. 2012]. [Grabener et. al. 2010] یک مسئله‌ی چندطریقه‌ی مبتنی بر زمان را توسعه داده است. [Wang et. al. 2010] و [Horn 2010] نیز الگوریتمی برای کوتاه‌ترین مسیر شبکه‌های حمل و نقل عمومی ارائه داده است. همینطور، [Garaix et. al. 2010] نیز مسئله‌ی مسیریابی وسائل نقلیه‌ی چندطریقه را بررسی نموده است.

مسئله کوتاه‌ترین مسیر چندطریقه‌ای را می‌توان به‌صورت چندهدفه نیز مطالعه‌کرد. این مسئله یکی از مهم‌ترین مسائل در حمل و نقل شهری و انتقال کالاست. در این رویکرد نیز برای حل روش پیشنهادی لیو و همکاران [Liu et. al. 2014] همان روش‌های دقیق قدیمی‌است که با توجه به چند هدفه بودن مسئله بهبود داده-شده‌اند. الگوریتم اصلاح برچسب‌گذاری که پایه الگوریتم‌هایی مانند دایکسترا است را می‌توان برای مسئله کوتاه‌ترین مسیر در حالت چندهدفه نیز توسعه داد.

مارتینز[Martines, 1984] الگوریتم برچسب‌گذای را برای حالت چندین تابع هدف متفاوت بسط داده‌است، که البته در تمام این کارها فرض یکنوایی برقرار است. [Smith and Shier, 1989] و [Skiver and Andersen, 2000] مسئله‌ی کوتاه‌ترین مسیر را با دو هدف بررسی نموده اند.می‌توان تعداد بیشماری از توابع معیار متفاوت بر اساس دنیای واقعی را در نظرگرفت، که غیرجمع‌شونده باشند.رینهارت و پیسینگر[Reinhardt and Pisinger,2011] در پژوهش خود به این نوع اهداف در مسئله کوتاه‌ترین مسیر اما در یک شبکه یک‌طریقه پرداخته‌اند. آنها الگوریتمی توسعه داده‌اند که تمام جواب‌های بهینه پارتوی موجود را شناسایی می‌کند. همینطور یک روش غلبه برای انواع معیارهای متضاد غیرجمع‌شونده موجود ارائه می‌کنند و آن را با یکسری داده‌ی واقعی آزمایش می‌نمایند. ماهیت یافتن تمام جواب‌های بهینه پارتو شباهت زیادی به یک مسئله کوتاه‌ترین مسیر با چندین محدودیت دارد.

روش‌های متعددی برای برخورد با بهینه‌سازی چندهدفه ارائه گردیده‌است، اکثر آنها بر روی مدل ریاضی مسئله اعمال می‌شوند و نیاز به چندین بار حل آن برای رسیدن به جواب‌های پارتو است. معدود روش‌هایی وجود دارند که بتواند به‌طور مستقیم مجموعه پارتو از جواب‌ها را ارائه نماید [Carraway et. al. 1989].

www.SID.ir

Archive of SID

بررسی‌هایی که تا کنون انجام پذیرفته است، یک شبکه چندطریقه را با یکسری شبکه‌های موازی که با یال‌های موسوم به یال انتقال به یکدیگر وصل می‌شوند، نمایش می‌دهد، ولی ما در این پژوهش از رویکرد گراف چندگانه بهره می‌گیریم، که در این نوع مدل مسیر از مبدأ به مقصد می‌تواند طول‌های مختلفی از نظر تعداد یال موجود در آن داشته‌باشد. سازماندهی مقاله‌ی حاضر به‌این صورت است که در بخش۲ مدل ریاضی برای این مسأله در حالت چندهدفه ارائه می‌گردد، در بخش۳ الگوریتمی بر مبنای برنامه‌ریزی پویا که حساس به داده‌ی ورودی به مسأله بوده و مستقیم بهینه‌سازی چندهدفه را انجام می‌دهد ارائه می‌گردد، و با حل مدل ریاضی توسط نرم افزار مقایسه می‌گردد، و در نهایت در بخش٤ محاسبات مربوط به حل مدل ریاضی و مقایسه‌ی آن با الگوریتم طراحی شده مطرح می‌گردد. در بخش۵ الگوریتم طراحی شده را با الگوریتم ژنتیک چند هدفه مقایسه می‌نماییم. در بخش٦ نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی ارائه می‌گردد.

۲. شرح مدل ریاضی مسئله

با توجه به نوع نمایشی که تا بحال برای شبکه‌های چندطریقه در ادبیات در نظر گرفته شده لازم است مدل ریاضی مسئله را برای نمایش این شبکه‌ها به‌صورت گراف چندگانه، یعنی حالتی که از هر گره امکان تغییر طریقه از یک طریقه به طریقه دیگر موجود بوده و از هر گره امکان رفتن به هر گره دیگر موجود باشد، ارائه گردد. تغییر دیگری که در این مدل نسبت به مدل‌های قبلی این مسأله صورت پذیرفته‌است، اضافه کردن چند تابع هدف بجای یک تابع هدف است، که ماهیت سفر در یک شبکه چندطریقه را بیشتر نمایان می‌سازد. برای مسئله مورد بررسی می‌توان مدل ریاضی به‌صورت زیر ارائه داد، که در ادامه در جدول۱متغیرها و پارامترهای موجود در مدل معرفی می‌گردد.

در مدل مطرح شده دو تابع هدف در نظر گرفته شده‌است که با مدل کلاسیک موجود در ادبیات برای مسئله فوق متفاوت است و چند محدودیت جدید روی آن لحاظ شده‌است. لازم بذکر است، مدل زیر بر مبنای یک مدل گراف چندگانه از شبکه چندطریقه ارائه شده‌است و با مدل موجود در ادبیات هم از این نظر به‌طور کلی متفاوت است، زیرا که مسئله با چند شبکه مجزا و اضافه کردن یال‌های انتقال مدل نشده‌است.

جدول۱. معرفی متغیرها و پارامترهای مسئله

نام متغیر یا پارامتر	شرح
$t_{i,j}^{m}$	هزینه(زمان) برای رسیدن از گره**i**به**j** با استفاده از طریقه‌ی m
$x_{i,j}^{m}$	متغیر صفر و یک اگر یال از **i**به**j**با طریقه‌ی m انتخاب گردد ۱ می‌گردد
$s_{imm'}$	متغیر صفر و یک در صورت تغییر از گره i و از طریقه‌ی m به m` ۱ می‌گردد
U_m	نشان دهنده‌ی تعداد ورود به طریقه‌ی m که برای محاسبه‌ی هزینه‌ی ثابت استفاده می‌گردد
$x_{i,j}^{p}$	متغیر صفر و یک اگر یال از **i**به**j**با طریقه‌ی مربوط به معابر قابل عبور با خودروی شخصی (p)
$C_{i,j}^{m}$	هزینه‌ی مربوط به طول مسیر i به j با استفاده از طریقه‌ی m
C'_m	هزینه‌ی ثابت انتقال به طریقه‌ی m
td_m	زمان ثابت انتقال به طریقه‌ی m
Z_i	مقدار تابع هدف **i**ام

www.SID.ir

Archive of SID

$$\min \quad Z_1 = \sum_m \sum_{(i,j)\in A} t_{i,j}^m x_{i,j}^m + \sum_m td_m U_m \tag{۱}$$

$$\min \quad Z_2 = \sum_j \sum_m \sum_{m'} s_{jmm'} \tag{۲}$$

$$\min \quad Z_3 = \sum_m \sum_{(i,j)\in A} C_{i,j}^m x_{i,j}^m + \sum_m C'_m U_m \tag{۳}$$

s.t.

$$\sum_m \sum_{i\in N_j^-} x_{ij}^m - \sum_m \sum_{l\in N_j^+} x_{il}^m = \begin{cases} -1 \ if \ j = o \\ 0 \ if \ j \neq o,d \\ 1 \ if \quad j = d \end{cases} \tag{٤}$$

$$\sum_l x_{li}^p \geq x_{ij}^p, \qquad \forall (i,j) \in A_p, i \neq 0 \tag{٥}$$

$$x_{ij}^m + x_{jk}^{m'} \leq s_{jmm'} + 1, \ \ \forall (i,j) \in A_m, (j,k) \in A_{m'}, m \neq m' \tag{٦}$$

$$\sum_j \sum_{m\neq m'} s_{jmm'} = U_{m'} \quad \forall m' \tag{٧}$$

$$\sum_m \sum_{m'} s_{jmm'} \leq 1, \qquad \forall j \tag{٨}$$

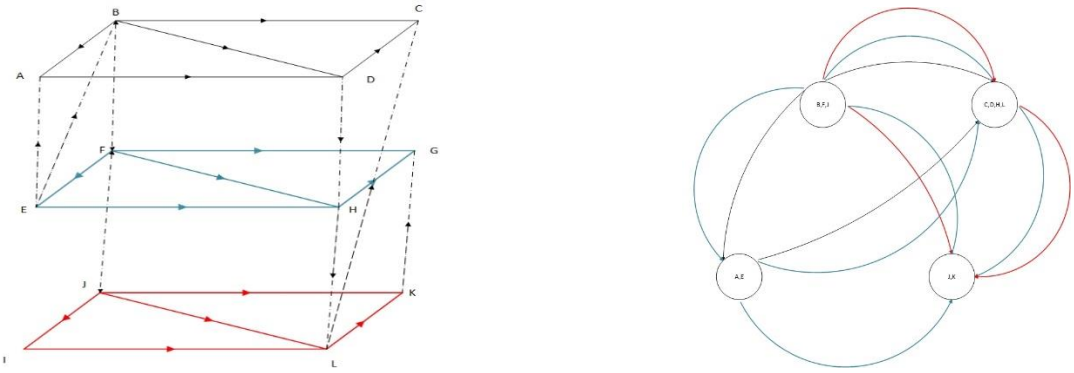
$$x_{ij}^p \geq 2 \sum_m s_{jPm}, \qquad j \notin J \tag{٩}$$

$$-x_{ij}^p \leq \sum_m s_{jPm}, \qquad j \in J' \tag{١٠}$$

$$x_{ij}^m \in \{0,1\}, \qquad \forall m, \forall i,j$$

$$s_{jmm'} \in \{0,1\}, \qquad \forall m, m', \forall j$$

$$U_{m'} \geq 0 \ Int \qquad \forall m'$$



شکل۱. نمایش شبکه چند طریقه در مدل‌های قدیمی(چپ) و نمایش به‌صورت گراف چندگانه (راست)

www.SID.ir

Archive of SID

محدودیت٤ تضمین می‌کند مسیر از مبدأ به مقصد انتقال یابد، محدودیت ٥ تضمین می‌نماید که طریقه وسیله نقلیه شخصی باید در ابتدا انتخاب شده باشد و نمی‌توان در یالی که قبلاً از طریقه‌ی دیگری استفاده نموده به طریقه خودروی شخصی انتقال یابیم، محدودیت ٦ تغییر طریقه را نشان می‌دهد، و متغیر $s_{jmm'}$ به منظور نمایش تغییر طریقه از طریقه m به m' در گره j تعریف می‌شود، محدودیت۷ برای تعریف هزینه ثابت انتقال به هر طریقه مشخص بیان شده‌است، محدودیت۸ نشان می‌دهد از هر طریقه تنها می‌توان به یک طریقه‌ی دیگر منتقل گشت، و در محدودیت‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده می‌شود که اگر در شبکه مربوط به خود شخصی حرکت کنیم، باید تا جایی ادامه دهیم که به یک پارکینگ برسیم، زیرا خودروی شخصی باید در محل‌هایی که قابلیت و ظرفیت پارک خودرو را دارند پارک شوند، و در اینجا مجموعه گره‌های پارکینگ با مجموعه‌ی J نمایش داده شده‌است.

حال برای تبدیل مسئله فوق به یک مسئله تک هدفه از روش محدودیت-ε [۹] استفاده کرده و توابع هدف دوم و سوم را به محدودیت انتقال می‌دهیم. دلیل استفاده از این روش آن است که در روش‌هایی مانند مجوع وزن‌دار الزاماً به راحتی کل مجموعه پارتو به‌دست نمی‌آید و یا در روشی مانند برنامه ریزی آرمانی نیز تعریف آرمان برای این اهداف به راحتی امکان پذیر نیست. از این رو دو محدودیت زیر به مدل ریاضی مسئله اضافه می‌شود و تابع هدف زمان تنها تابع هدف مسئله می‌گردد.

$$\sum_j \sum_m \sum_{m'} s_{jmm'} \leq \varepsilon_1 \qquad (۱۱)$$

$$\sum_m \sum_{(i,j)\in A} C_{i,j}^m x_{i,j}^m + \sum_m C_m U_m \leq \varepsilon_2 \qquad (۱۲)$$

محدودیت۱۱ نمایش دهنده سقف تغییر طریقه حمل و نقل در مدل مربوطه است، از آنجایی‌که این مقدار یک مقدار صحیح است می‌توان به ازای تمام حالت‌های قابل وقوع جواب بهینه مسئله را یافت و در نهایت مجموعه پارتو را تشکیل داد. اما، محدودیت۱۲ که بیانگر هزینه مسیر انتخاب شده است، در حقیقت تبدیل به محدودیت بودجه گردیده‌است، که مقادیر مورد اتخاذ آن با توجه به ماتریس هزینه مسئله محاسبه می‌شود، و نمی‌توان تمام حالت‌های آن را دقیقاً مورد بررسی قرار داد، اما می‌توان با به‌دست آوردن بازه قابل وقوع برای آن چند عدد در آن بازه را برای به‌دست آوردن مجموعه پارتو به‌عنوان بودجه درنظر گرفت.

با توجه به اینکه تعداد تغییر طریقه در طول یک مسیر یک عدد صحیح و در یک بازه محدود است، و اینکه عمدتاً در خود مدل بدلیل هزینه تغییر کمتر تغییر رخ می‌دهد در ادامه آن را به عنوان محدودیت در نظر می‌گیریم اما، کاربر می‌تواند بر اساس مطلوبیت خود این مقدار را تغییر داده تا جواب‌های پارتو مربوط به مقادیر مختلف تعداد تغییر طریقه را به‌دست آورد.

۳. الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله مورد بررسی

الگوریتمی که برای این مسئله پیشنهاد می‌شود برمبنای برنامه‌ریزی پویا[۱۰] عمل می‌کند، و یک الگوریتم تقریبی است، اما باید توجه داشت در بهینه‌سازی چندهدفه درباره‌ی لفظ دقیق بودن یا تقریبی بودن یک الگوریتم باید بیشتر دقت شود. پس، می‌توان گفت جواب دقیق مسئله به ازای پارامترهای مختلف از توابع هدف در بعضی شرایط توسط این الگوریتم قابل محاسبه است، و در شرایطی جواب به‌دست آمده تقریبی از جواب بهینه مسئله است.

این الگوریتم از تعمیم الگوریتم برنامه‌ریزی پویای موجود برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر است که بر مبنای متغیر حالت تعداد یال در طول مسیر و گره شروع به عمل می‌کند. در الگوریتم پیشنهادی علاوه بر اینکه انتخاب یال قبلی در مسیر برای رسیدن به مبدأ متغیر تصمیم فرض می‌شود بلکه انتخاب نوع طریقه انتقالی نیز خود یک متغیر تصمیم محسوب می‌گردد. در نتیجه، این الگوریتم یک الگوریتم برنامه‌ریزی پویای چند بعدی چه از نظر تعداد متغیر حالت و چه از نظر تعداد متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شود، و از آنجایی‌که افزایش تعداد بعد در الگوریتم‌های برنامه ریزی پویا پیچیدگی محاسباتی را افزایش داده و زمان اجرای آن را کند می‌کند، برای کاهش زمان حل بهبودی در عملیات مربوط به هر تکرار در نظر گرفته‌شده‌است. برای

www.SID.ir

Archive of SID

بهبود محاسبات در هر تکرار از عملگر بهبود کران مشابه با الگوریتم‌های شاخه و کران[11] استفاده شده‌است، و از تولید جواب‌های غیر موجه از نظر تعداد تغییر طریقه و استفاده از طریقه خودروی شخصی در هر مرحله جلوگیری می‌شود که تأثیر بسیار زیادی در زمان حل توسط الگوریتم برنامه ریزی پویا دارد، ولی در شرایطی جواب بهینه مسئله ممکن است قابل دستیابی نباشد. به این ترتیب، از آنجایی‌که به دنبال یافتن کوتاه‌ترین مسیر هستیم، پس اگر یالی به عنوان متغیر تصمیم، به مسیری که در همین تکرار از بهترین جواب ذخیره شده بدتر است اضافه گردد، مسیری را تولید می‌کند که دیگر نمی‌تواند بهینه باشد و در تکرارهای بعدی الگوریتم برنامه‌ریزی پویا نیز به همین ترتیب بهبود پیدا نخواهد کرد. به همین دلیل از تولید این گونه مسیرها در طول الگوریتم جلوگیری به عمل می‌آید که به طرز چشمگیری زمان حل را کاهش می‌دهد، اما الگوریتم را به دلیل حذف برخی از حالت‌ها تبدیل به الگوریتم برنامه‌ریزی پویای تقریبی می‌کند.

برای برخورد با بهینه‌سازی چندهدفه در این الگوریتم بر خلاف حل مدل ریاضی مجموعه پارتو به‌صورت خروجی از الگوریتم به‌دست می‌آید، و برای این منظور جواب‌هایی در هر تکرار که اکیداً در دو فاکتور هزینه و زمان بهتر هستند که قطعاً ذخیره می‌گردند[Carraway et. al. 1989]، و از طرفی جواب‌هایی که از نظر یکی از اهداف یعنی هزینه یا زمان بهتر هستند نیز ذخیره می‌گردند که البته این مقدار بهتر بودن می‌تواند از طرف کاربر با وزن‌هایی که به هر هدف می‌دهد تنظیم گردد. همانطور که در بخش قبل گفته‌شد، تعداد تغییر طریقه نیز به‌صورت یک محدودیت در مسأله اعمال می‌گردد.

این الگوریتم از دو زیر الگوریتم تشکیل گردیده‌است، در زیر الگوریتم اول تکرارهای اصلی برنامه‌ریزی پویا بر اساس متغیر حالت و مرحله که همان گره‌های شبکه هستند جلو می‌رود و در هر تکرار برای ذخیره جواب پارتو مربوط به آن مرحله و حالت، وارد زیر الگوریتم دوم می‌شویم که در آنجا جواب‌های مربوط به آن تکرار آزمایش می‌شوند، و جواب پارتو بهبود می‌یابد. سپس، در بازگشت به الگوریتم اول مقدار بهترین جواب به عنوان کران مسئله بروزرسانی می‌گردد. شبه کد دو زیر الگوریتم در ادامه ارائه شده‌است که زیر الگوریتم اول با DP و زیر الگوریتم دوم با creatfstar نام‌گذاری شده‌اند. ورودی به زیر الگوریتم اول همان مدل مسئله یعنی ماتریس هزینه و زمان است و ورودی به زیر الگوریتم دوم گره مبدأ در آن تکرار، گره مقصد در آن تکرار، جواب بهینه از گره مقصد به قبل و جواب بهینه فعلی که از گره مبدأ تا گره مقصد تکرارهای قبل متصل گردیده‌است

متغیرها و پارامترهای الگوریتم که مورد استفاده واقع شده‌اند در جدول۲ نمایش داده شده‌اند که در ادامه آورده شده‌است.

به‌طور کلی در زیر الگوریتم اول مراحل برنامه‌ریزی پویا پیش می‌رود و برای هر متغیر حالت به زیر الگوریتم دوم رفته تا محاسبات مربوط به توابع هدف و ذخیره سازی جواب‌های پارتو هر مرحله انجام گردد. همانطور که در زیر الگوریتم دوم مشاهده می‌گردد در خطوط ۸ الی ۱۱ که جواب به‌دست آمده از نظر دو تابع هدف اکیداً بهتر بوده با جواب فعلی جایگزین می‌گردد و در خطوط ۱۵ و ۱۹ که جواب در یکی از اهداف اکیداً بهتر بوده جواب به‌دست آمده به مجموعه قبلی اضافه می‌گردد و جوابی حذف نمی‌گردد.

٤. نتایج محاسباتی مربوط به حل مدل ریاضی

مدل حاصل شده را برای مسئله‌ای با ۱۰ گره و ۳ طریقه‌ی حمل و نقل که ماتریس‌های هزینه، زمان و گره‌های پارکینگ و باقی پارامترهای آن به‌طور تصادفی تولید شده‌است را با مقادیر مختلف ε_1 و ε_2 با نرم افزار CPLEX نسخه۱۲ حل می‌کنیم. نتایج به‌دست آمده در جدول٤ نمایش داده شده‌است. با توجه به تعداد طریقه‌های حمل و نقل و تعداد گره‌ها مقادیر ۱، ۲، ۳، و ٤ بار را برای تعداد تغییر طریقه‌های در نظر گرفته‌ایم، ماتریس زمان را با استفاده از توزیع یکنواخت بین ۱ تا ۱۰۰ ساخته‌ایم و با توجه به ماتریس زمان حاصل شده مقادیر ۱۰۰، ۱۵۰، و۲۰۰ را به‌عنوان بودجه برای قید بودجه‌ی حاصل شده در نظر گرفته‌ایم. در مابقی محاسبات انجام شده در این پژوهش نیز به همین ترتیب عمل شده‌است. محاسبات این پژوهش در رایانه‌ای باپردازنده دو هسته‌ای، حافظه کوتاه‌مدت چهار گیگابایت و سیستم عامل ویندوز نسخه ۷ صورت گرفته‌است.

www.SID.ir

Archive of SID


```
DP (TimeMatrix, CostMatrix)
1 for iter = 2 to n
2     for origin_node = 1 to n

3          for destination_node=1 to n
4               if destination_node~=origin_node

5                    fstar(iter,origin_node)=creatfstar(origin_node,destination_node,fstar(iter-
6                                                  1,destination_node),fstar(iter,origin_node));
7               end
8           end
9      end

10    if minimum(All fstar(iter,1).time) < Best_time
        Best_time = minimum(All fstar(iter,1).time);
11    end
12    if minimum(fstar(iter,1).cost) < Best_cost
        Best_cost = minimum(All fstar(iter,1).cost);
13    end
14 end
```

```
fstarc = creatfstar(origin_node,destination_node,fstarp,fstarc_origin_node)

1   for i=1 to mode_number
2       for j=1 to size_of_fstarp.cost

3           if fstarp.time(j) < Best_time || fstarp.cost(j) < Best_cost
4               for k=1 to size_of_fstarc_origin_node
5                  if [i fstarp.mode{j}] is feasible

6                      if (New_Path.time < fstarc_origin_node(k).time)
7                         and (New_Path.cost< fstarc_origin_node(k).cost)
8                          fstarc.time(k) =   New_Path.time;
9                          fstarc.cost(k) =   New_Path.cost;
10                         fstarc.path{k}  =   [origin_node fstarp.path{j}];
11                         fstarc.mode{k}  =   [i  fstarp.mode{j}];
12                     end

13                     if (New_Path.time < fstarc_origin_node(k).time)
14                       and (New_Path.cost> fstarc_origin_node(k).cost)

15                         {fstarc} = Merge{{fstarc}, { New_Path }};

16                     end

17                     if (New_Path.time> fstarc_origin_node(k).time)
18                       and (New_Path.cost< fstarc_origin_node(k).cost)

19                         {fstarc} = {fstarc} U { New_Path };

20                     end
21                 end
22             end
23         end
24     end
25 end
```


www.SID.ir

Archive of SID

جدول۲. شرح پارامترهای الگوریتم

پارامترها	شرح
length	تعداد یال‌های موجود در مسیر که متغیر حالت است.
Origin node	گره شروع هر مسیر که یک متغیر حالت است.
Destination node	گره انتهایی یک یال که مصادف با گره ابتدایی یک مسیر می‌گردد. در هر تکرار به ازای یک گره شروع یال مربوط به گره پایانی تصمیم گیری می‌گردد. که همان گره پایاین خود منجر به یک گره شروع مربوط به مسیری در مراحل قبل برنامه‌ریزی پویا می‌گردد.
fstar (legth,orgnode)	تابعی که در آن جواب‌های پارتو ذخیره می‌گردند که دارای دو ویژگی **time** و **cost** است.
fstarc	مجموعه‌ی پارتو حاصل از تکرار فعلی زیر الگوریتم اصلی
fstarp	مجموعه پارتو حاصل از تکرار قبلی الگوریتم اصلی که از گره مقصد تکرار فعلی آغاز گردیده‌است
fstarc_origin_node	مجموعه پارتو فعلی که از گره مبدأ موجود است
New_Path	مسیر جدیدی که از متصل شدن گره مبدأ تکرار فعلی به گره مقصد تکرار فعلی با طریقه مربوط به شمارنده **i** ایجاد گردیده‌است.
time	مربوط به زمان رسیدن در یک مسیر
cost	هزینه طی شده برای هر مسیر بخصوص
Best_time	بهترین زمان ممکن به‌دست آمده برای مسیر فارغ از اینکه هر جواب از چه طول مسیری برخوردار است.
Best_cost	بهترین هزینه ممکن به‌دست آمده برای مسیر فارغ از اینکه هر جواب از چه طول مسیری برخوردار است.

قبل از هر چیز در جدول۳ مقایسه شبکه‌ی جدید به‌صورت گراف چندگانه را با مدل پیشین ادبیات در چند اندازه انجام می‌دهیم تا صحت مدل را آزمون کنیم، به این منظور محدودیت‌های جدیدی که در مدل وارد نموده‌ایم، مانند در نظر گرفتن گره‌های پارکینگ، را موقتاً لحاظ نمی‌کنیم. در آن مشخص است که جواب مدل‌ها با یکدیگر یکسان است و شبکه جدید از نظر زمان حل کارآتر از شبکه پیشین عمل می‌کند.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود از جدول٤ متوجه می‌شویم بالا رفتن تعداد تغییر طریقه‌های حمل و نقل در جواب بهینه این مسئله خاص تأثیری نداشته، و تنها مقدار سمت راست محدودیت بودجه که مربوط به تابع هدف هزینه بود در بهبود جواب تأثیر گذار خواهد بود. پس در نتیجه، می‌توان گفت در این مسئله مجموعه پارتو به‌صورت {((۶۳،۱،۱۰۰) و (۲۰،۱،۲۰۰)} به‌دست می‌آید

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۳. زمان حل الگوریتم با مدل‌های با تعداد طریقه ۳

تعداد گره	٦	٧	٨	٩	١٠
فاصله توابع هدف	٠	٠	٠	٠	٠
زمان حل مدل حاصل از شبکه پیشین بر حسب ثانیه	٠/١٠٧	٠/١١٢	٠/١٤١	٠/١١٠	٠/١١١
زمان حل مدل حاصل از شبکه جدید بر حسب ثانیه	٠/١٠١	٠/١٠٦	٠/١٣٨	٠/٠٩٥	٠/٠٩٧

جدول٤. حل مدل ریاضی مسأله برای یک مثال

ε_1	١	١	١	٢	٢	٢	٣	٣	٣	٤	٤	٤
ε_2	١٠٠	١٥٠	٢٠٠	١٠٠	١٥٠	٢٠٠	١٠٠	١٥٠	٢٠٠	١٠٠	١٥٠	٢٠٠
مقدار تابع هدف زمان	٦٣	٦٣	٢٠	٦٣	٦٣	٢٠	٦٣	٦٣	٢٠	٦٣	٦٣	٢٠
زمان حل مسئله(ثانیه)	٠/٥٥	٠/٣٨٣	٠/٥٥	٠/٦١	٠/٥	٠/٥	٠/٥١	٠/٣٥	٠/٣٨٣	٠/٣٥	٠/٣٨٣	٠/٥٥

و برای رسیدن به این نتیجه مجموعاً در حدود ۵ ثانیه زمان صرف شد، و هنوز هم مقدار دقیقی برای توابع هدف به‌دست نیامد،زیرا می‌توان با مقادیری کمتر از ۱۰۰و۲۰۰ به ترتیب به مقادیر ٦٣و۲۰ برای تابع هدف زمان دست یافت که در این مسئله در نظر گرفته نشد. حال، می‌توان دریافت که در ابعاد بزرگ و ماتریسی که جواب بهینه ان پیچیده‌تر از مسئله فوق باشد، چقدر می‌تواند برای روش بالا مشکل‌ساز باشد. برای حل این مشکل الگوریتم طراحی شده در هر تکرار مجموعه پارتو را ذخیره می‌نماید و به‌طور مستقیم بهینه‌سازی چندهدفه را انجام می‌دهد.

برای بررسی کارآیی الگوریتم پیشنهادی چند مدل برای مسئله به‌طور تصادفی تولید شده‌است، تا توسط آن الگوریتم آزمایش شود. از ٦ تا ۱۰ گره به عنوان اندازه استاندارد و با ۳ و ٤ طریقه ممکن حمل و نقل آزمایش را روی الگوریتم از نظر جواب حل انجام می‌دهیم. در هر مدل به‌دست آمده جواب‌ها با حل ریاضی مقایسه گردیده و صحت کدنویسی الگوریتم بررسی گردیده‌است. در جدول۳ نتایج مربوط به ۳ طریقه و در جدول ٤ مدل‌های مربوط به ٤ طریقه ارائه شده‌اند. محدودیت تعداد تغییر طریقه ۵ بار در نظر گرفته شده‌است و بغیر از این محدودیت همان محدودیت در استفاده از وسیله نقلیه‌ی شخصی لحاظ شده‌است.

توجه شود در جدول ۵ و جدول ٦ برای آزمایش با مدل ریاضی هدف هزینه را نادیده گرفته و بهترین جواب زمان را در الگوریتم خوانده‌ایم در مدل ریاضی هم قید بودجه را طوری در نظر گرفته‌ایم که محدودیتی روی هزینه اعمال نشود و بهترین جواب از نظر زمان به‌دست آید که در تمام این مدل‌ها جواب الگوریتم و مدل ریاضی یکسان بود.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۵. زمان حل الگوریتم با مدل‌های با تعداد طریقه ۳

تعداد گره	٦	٧	٨	٩	١٠
زمان حل بر حسب ثانیه	٠/١٠١	٠/١٠٦	٠/١٣٨	٠/٠٩٥	٠/٠٩٧

جدول٦. زمان حل الگوریتم با مدل‌های با تعداد طریقه ٤

تعداد گره	٦	٧	٨	٩	١٠
زمان حل بر حسب ثانیه	٠/١١١	٠/٠٥٣	٠/٠٦٢	٠/٠٩٩	٠/١٢٥

در جداول ۵ و ٦ نقش اعمال کران برای توقف الگوریتم به چشم می‌خورد، مثلاً در جدول۵ در مدل‌های با ۱۰ گره و ۹ گره زمان حل به طور چشم‌گیری کاهش پیدا کرد به دلیل آنکه مثلاً در مدل ۱۰ گره‌ای مدلی که به تصادف تولید شده‌بود به نحوی بود که تمام مسیرهای ۲ یالی بدتر از یکی از مسیرهای دو یالی موجود به‌دست آمده بودند، پس هیچ مسیر ۳ یالی وجود ندارد که بتواند بهینه باشد، زیرا اکیداً اضافه شدن یک یال به هر کدام از مسیرهای دویالی موجود از گره‌های شبکه جواب بهتری از جواب موجود به ما نخواهد داد. هدف ما آزمایش و بهبود الگوریتم است و در اینجا داده‌ها به نحوی بود که جواب‌های با تعداد یال‌های بیشتر بهینه نبودند و الگوریتم سریعا خاتمه یافت که این یکی از نشانه‌های کارآیی بالای این الگوریتم است، زیرا به نوع مدل ورودی حساس است و با همه مدل‌هایی که به آن داده می‌شود یکسان برخورد نمی‌کند. در صورتیکه، ما در حل مدل ریاضی با امتحان طول مسیرهای مختلف متوجه شدیم نمی‌توانیم جواب بهتری به‌دست بیاوریم، و در حقیقت محاسبات بیشتری انجام دادیم و به تبع آن زمان حل ما بسیار بالا رفت.

برای انجام مقایسه برای صحت و زمان حل الگوریتم، بدلیل ضعف مدل ریاضی در برخورد با چند هدف به‌طور همزمان، با توجه به یک مقدار هزینه مشخص از طریق نرم افزار مدل را حل می‌نماییم، و سپس در حل حاصل از الگوریتم بهترین زمان مربوط به هزینه‌ی کمتر از مقدار داده شده که در الگوریتم با Besttime نمایش داده شده‌است را می‌خوانیم. پس، باید توجه داشت که الگوریتم به ما مجموعه‌ای از جواب‌ها می‌دهد در صورتیکه جواب مدل ریاضی یک جواب است. اندازه مسئله همان تعداد گره‌ها را نمایش می‌دهد.

همانطور که در جدول۷ ملاحظه می‌شود در تمام مسائلی که ایجاد شد الگوریتم مطرح شده جواب دقیقی از مسئله ارائه می‌دهد و دلیل آن این است که الگوریتم مطرح شده در تمام مسائلی که جواب بهینه سراسری مسأله همان جواب بهینه حاصل از مسئله آزاد شده از دو قید تعداد بیشینه طریقه و استفاده از خودروی شخصی باشد، جواب بهینه سراسری مسئله را ارائه می‌کند، زیرا الگوریتم طراحی شده تمام حالت‌ها در مسئله بدون محدودیت را از نظر توالی طریقه‌ها در روند برنامه‌ریزی پویا در نظر می‌گیرد و بهترین جواب با هر طول مسیر ذخیره می‌گردد. در حقیقت انحراف الگوریتم ارائه شده از جواب بهینه سراسری مسأله در مسائلی است که قیدهای مسأله در تولید جواب بهینه سراسری نقش ایفا کنند که در ابتدای بخش۳ توضیح داده شد. به‌طور مثال، در مسأله‌ای که استفاده از خودروی شخصی بهینه باشد، ممکن است الگوریتم ارائه شده دارای خطا باشد یا در مواردی که جواب بهینه حاصل از چندین بار تغییر در استفاده از طریقه حمل و نقل باشد. اما، باید به

www.SID.ir

Archive of SID

این نکته توجه داشت که همانطور که در مثال‌هایی که آورده شد می‌توان ملاحظه کرد، چارچوب این مسئله به نحوی است که عمدتاً استفاده از خودروی شخصی و تعداد تغییر طریقه زیاد نمی‌تواند جواب بهینه را بسازد، و در واقع ایدهی اصلی ساخت این الگوریتم نیز از همین جا ناشی شده‌است

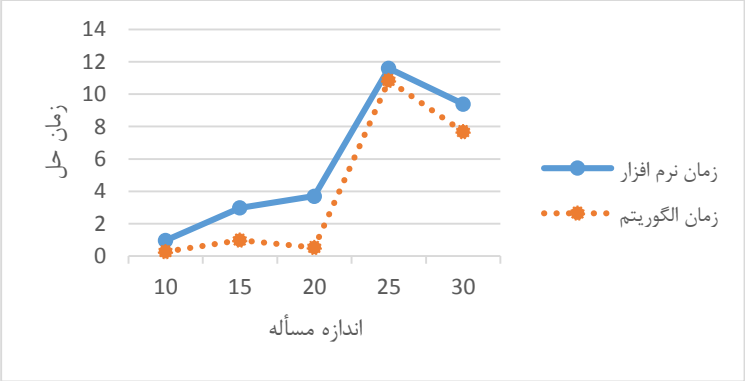
که بدلیل احتمال پایین وقوع چنین جواب‌هایی الگوریتم در هر تکرار اگر جواب موجه نباشد آن را حذف می‌کند و تا تکرارهای آخر خود را درگیر ساخت جواب‌هایی که ممکن است به‌دلیل ناموجه شدن یک جواب خوب، شانس قرار گرفتن در موقعیت جواب بهینه را داشته باشند، نمی‌کند و به همین دلیل کارآیی بالایی پیدا کرده و در عین حال در اکثر مسائل این رده جواب دقیق را ارائه می‌دهد. در شکل۲ می‌توان در نموداری با توجه به مدل‌های داده شده رشد زمانی دو روش استفاده شده بر حسب ثانیه یعنی روش حل توسط نرم افزار CPLEX نسخه‌ی ۱۲ و الگوریتم ارائه شده را مشاهده نمود.

۵. مقایسه الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم ژنتیک چندهدفه[۱۲]

در این بخش الگوریتم طراحی شده را با یک الگوریتم که بر مبنای حل مستقیم و ارائه مجموعه پارتو عمل می‌کند مقایسه می‌کنیم. یکی از بهترین الگوریتم‌هایی که به‌طور مستقیم بهینه سازی چندهدفه را در مسائل گسسته انجام می‌دهد، الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی غیرمغلوب است.

جدول۷. مقایسه حل الگوریتم و نرم افزار

اندازه	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰
جواب نرم افزار	۱۰	۲۳	۲۵	۱۰	۱۱
زمان حل نرم افزار برحسب ثانیه	۰/۹۶	۲/۹۸	۳/۷	۱۱/۶	۹/٤
جواب الگوریتم	۱۰	۲۳	۲۵	۱۰	۱۱
زمان حل الگوریتم بر حسب ثانیه	۰/۲۷	۰/۹۷۷	۱/۵۲۵	۱۰/۸۵۱	۷/٦۸۵
فاصله‌ی بین جواب‌ها	۰	۰	۰	۰	۰



شکل۲. نمایش نمودار زمان حل الگوریتم‌ها برای اندازه های مختلف مسأله

www.SID.ir

Archive of SID

رای پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک در این مسئله تمام موارد مانند الگوریتم ژنتیک چندهدفه کلاسیک (الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی غیر مغلوب نسخه۲) است، تعریف کروموزوم‌ها به‌این صورت است که در مسئله دو کروموزوم در نظر گرفته شده که در کروموزوم اول توالی گره‌ها برای مشخص کردن مسیر و در کروموزوم دوم توالی طریقه‌ها مشخص می‌گردد. تنها برای موجه نگه‌داشتن جواب‌ها از تکنیک اصلاح جواب‌ها استفاده می‌شود به این نحو که در هر تکرار جواب تولید شده توسط ژنتیک مورد آزمایش قرار می‌گیرد و اگر موجه نباشد مورد اصلاح قرار گرفته و جواب اصلاح یافته به جمعیت جواب‌ها اضافه می‌گردد. مکانیزم اصلاح جواب توسط زیر الگوریتم نمایش داده شده در شکل۳ صورت می‌گیرد که این زیر الگوریتم در هر تکرار الگوریتم ژنتیک وارد عمل شده و جواب مربوط به جمعیت تولیدی را اصلاح می-نماید.

برای تنظیم پارامترهای ژنتیک چندهدفه از روش استفاده شده در [Asefi et. al. 2014] بهره گرفته شد، و در نهایت مسئله مورد بحث توسط این الگوریتم پیاده سازی گردید. در دو مورد کیفیت جواب‌ها و زمان حل باید دو الگوریتم با یکدیگر مقایسه گردند، به‌این منظور مسئله را در اندازه‌های مختلف در هر دو الگوریتم پیاده سازی می‌کنیم و زمان حل و کیفیت جواب‌ها را مقایسه می-کنیم. اما، مشکل این است که هر دو الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه را به‌صورت تشکیل مجموعه پارتو انجام می‌دهند به همین دلیل به ازای یک مقدار هزینه مشخص به عنوان بودجه بهترین جواب مربوط به زمان سفر را در مورد دو الگوریتم مورد بررسی قرار می‌دهیم. برای یکسان سازی مقایسه الگوریتم ژنتیک را تا زمان الگوریتم طراحی شده اجرا کرده و بهترین جواب تا آن زمان را ذخیره می‌کنیم، یعنی زمان حل را ثابت گرفته و کیفیت جواب را مقایسه می‌کنیم که خود نشان دهنده زمان رسیدن به جواب بهینه هم است، زیرا الگوریتمی که در آن زمان جواب بدتری به‌دست آورد یعنی به زمان بیشتری برای رسیدن به جواب بهینه احتیاج خواهد داشت.

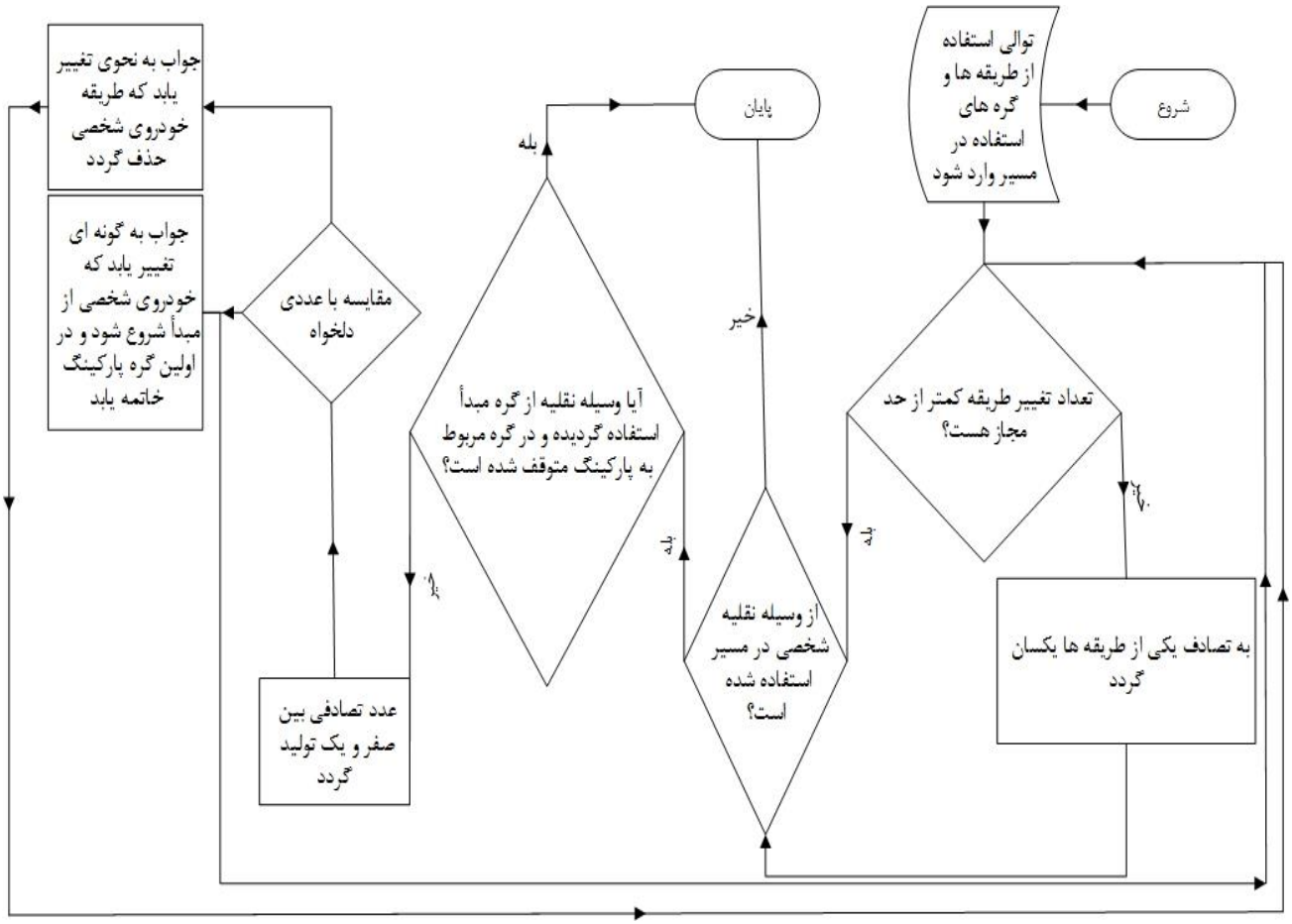
همانطور که در جدول۸ مشاهده می‌گردد، بدلیل ماهیت تصادفی در رفتار الگوریتم ژنتیک در اندازه ۳۰ برخلاف روند رو به کاهش فاصله بین جواب‌ها یک پرش ایجاد شده‌است، که البته یکی دیگر از دلایل آن سرعت الگوریتم طراحی شده در آن اندازه با توجه به مدل به‌دست آمده بود در کل می‌توان اظهار کرد در هر مدلی که طول مسیر بهینه کم باشد الگوریتمی که بر مبنای برنامه‌ریزی پویا طراحی شده‌است بسیار کارآتر از ژنتیک عمل می‌کند. در این مثال، در اندازه ۳۰ با وجود اینکه اندازه مسئله بزرگ است اما بدلیل آنکه طول مسیر جواب بهینه حدود ۳ یال در مسیر و استفاده تنها از یک طریقه است الگوریتم طراحی شده بدلیل حساسیت نسبت به مدل ورودی سریع‌تر به جواب می‌رسد، ولی الگوریتم ژنتیک در افزایش اندازه یک سیر یکسان را طی می‌کند، یعنی هر چه اندازه مسئله افزایش یابد به زمان بیشتری احتیاج می‌یابد که این دلیل عدم حساسیت این الگوریتم به مدل ورودی مسئله است. در شکل٤ می‌توان نمودار فاصله جواب‌ها بر حسب اندازه مدل ورودی را مشاهده نمود.

در شکل۵ دو سایز ۵۰ و ٦۰ از مسأله به‌طور تصادفی مانند آنچه در بخش ٤ توضیح داده شد تولید گردیده سپس در مدت خاتمه الگوریتم برنامه‌ریزی پویا، الگوریتم ژنتیک اجرا گردیده و مجموعه‌ای از جواب‌های پارتو در هر دو الگوریتم رسم شده‌اند، نمودارهای سمت راست مربوط به الگوریتم ژنتیک و نمودارهای سمت چپ مربوط به الگوریتم برنامه ریزی پویا است، محور افقی تابع هدف هزینه و محور عمودی تابع هدف زمان را نشان می‌دهد که کیفیت و جمعیت موجود در مرز پارتو در الگوریتم برنامه‌ریزی پویا همانطور که مشاهده می‌شود بیشتر از ژنتیک است، زیرا الگوریتم ژنتیک زمان بیشتری برای همگرا شدن نیاز دارد.

در این مرحله برای اندازه‌های ۳۰، ٤۰ و ۵۰ نمودار پیشرفت زمانی دو الگوریتم را رسم می‌نماییم. برای این منظور زمان همگرایی الگوریتم برنامه‌ریزی پویا را به دلیل کوتاه‌تر بودن ملاک قرار داده

www.SID.ir

Archive of SID



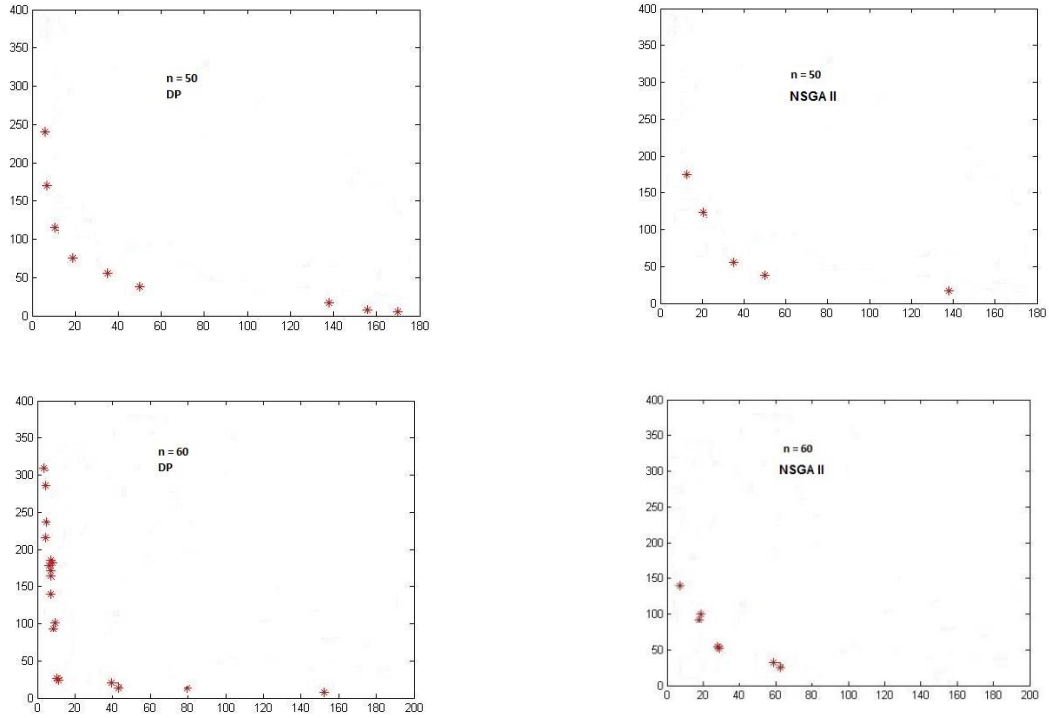
شکل۳. الگوریتم اصلاح جواب در ژنتیک چندهدفه

جدول۸. مقایسه حل الگوریتم و ژنتیک چند هدفه

اندازه	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰
جواب الگوریتم ژنتیک	٤٠	۳۲	۲۹	۱۳	۳٤
زمان حل ژنتیک برحسب ثانیه	۰/۲۷	۰/۹۷۷	۱/۵۲۵	۱۰/۸۵۱	۷/٦۸۵
جواب الگوریتم	۱۰	۲۳	۲۵	۱۰	۱۱
زمان حل الگوریتم بر حسب ثانیه	۰/۲۷	۰/۹۷۷	۱/۵۲۵	۱۰/۸۵۱	۷/٦۸۵
فاصله بین جواب‌ها	۳۰	۹	٤	۳	۲۳

www.SID.ir

Archive of SID



شکل۵. نمایش جواب‌های پارتو حاصل از الگوریتم برنامه‌ریزی پویا و الگوریتم ژنتیک

و به‌طور مثال برای سایز ۳۰ زمان ۸ ثانیه را برای کل اجرا در نظر می‌گیریم. سپس، بازه صفر تا ۸ ثانیه را به ٤ قسمت تقسیم کرده و در هر دو ثانیه دو الگوریتم را متوقف نموده و بهترین جواب هر کدام را از نظر زمان بدون در نظر گرفتن هزینه انتخاب نموده و در یک نمودار رسم می‌نماییم. به این ترتیب نحوه پیشرفت دو الگوریتم را نسبت به توابع هدف مختلف می‌توانیم مشاهده نماییم. این آزمون نشان دهنده سرعت بهبود جواب در الگوریتم است، از آنجاییکه الگوریتم ژنتیک در ابتدا به‌طور تصادفی جواب تولید می‌نماید شاید جواب بهتری نسبت به الگوریتم برنامه‌ریزی پویا داشته باشد. اما همانطور که ملاحظه می‌شود شیب کاهشی و سرعت بهبود در الگوریتم طراحی شده بهتر است، و این امکان را به کاربران می‌دهد که در اواسط اجرای الگوریتم آن را متوقف نمایند و با این حال جواب‌های نسبتاً خوبی نیز به‌دست آورند در صورتی‌که الگوریتم ژنتیک شاید مدتها در دام بهینه‌های محلی گرفتار شود و قادر به بهبود جو.اب نباشد، مانند اندازه ۵۰ که الگوریتم ژنتیک نتوانسته بهبودی حاصل کند. و این قابلیت الگوریتم همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش سایز مسئله بیشتر نمایان می‌گردد.

٦. مطالعه موردی

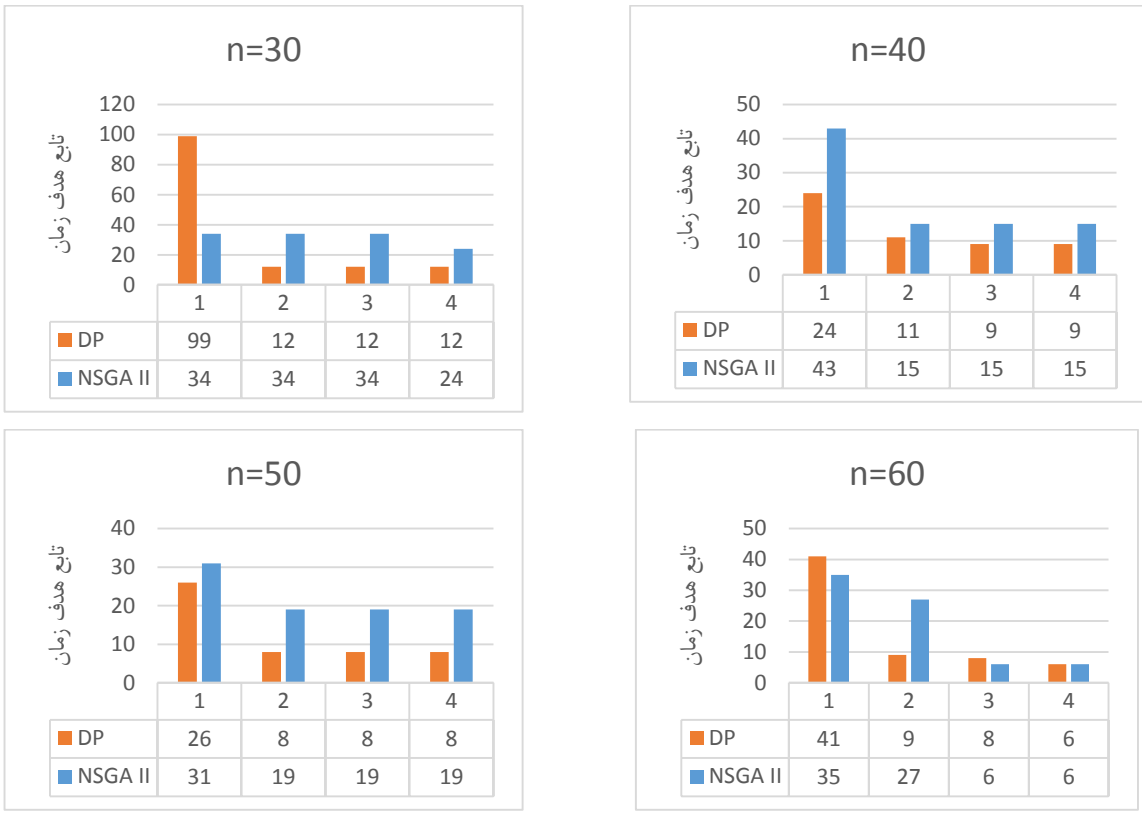
در این بخش سعی می‌شود یک نمونه کاربردی کوچک از مسأله ارائه شده در این پژوهش را مورد بررسی قرار دهیم. برای این منظور یک صورت سوال مطرح می‌کنیم به این نحو که فرض کنید می‌خواهید از منطقه تهران‌پارس به ورزشگاه آزادی برای تماشای یک مسابقه ورزشی بروید برای این منظور چگونه و از چه مسیری و از چه طریقه‌هایی برای طی کردن مسیر استفاده می‌کنید؟

جواب دادن به این سوال از چند نظر قابل توجه است:

۱ – این سوال می‌تواند یک مسأله شخصی برای یک طرفدار مسابقه‌ی ورزشی باشد و بدلیل مسیر طولانی شرق به غرب این مسافرت درون شهری و گستردگی طریقه‌های حمل و نقل موجود در این مسیر یک مسأله‌ی قابل تأمل برای هر فردی می‌تواند قرار گیرد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل٦. نمودار پیشرفت زمانی دو الگوریتم بر حسب تابع هدف زمان در چهار اندازه مختلف

۲ – از جانب استادیوم آزادی و برگزار کنندگان مسابقات برای فراهم آوردن وسائل راحتی تماشاگران مسابقه‌ی ورزشی این سوال می‌تواند قابل تأمل باشد مثلاً اگر قرار است اتوبوس یا وسیله‌ای بعد از بازی برای تماشاگران در نظر بگیرند برای چه مقاصدی این وسیله‌ها حرکت کنند اگر بیشتر تماشاگران به‌طور بهینه از نزدیکترین ایستگاه مترو استفاده می‌کنند بیشتر این وسائل به مقصد ایستگاه مترو حرکت کنند اگر تماشاگران از خط تندروی اتوبوس استفاده می‌کنند این وسائل آنها را تا آن ایستگاه‌ها برساند و برای مدیریت تماشاگران بعد از بازی می‌تواند مسئله مهمی قلمداد گردد. البته در این مورد صرفاً از مبدأ تهران پارس مسأله بررسی نمی‌گردد، بلکه برای سیاستگذاران مسأله باید از مبدأهای متفاوت بر طبق نواحی که طبق آمارگیری‌های قبلی بیشترین نواحی مبدأ برای افراد بوده‌است ، مورد بررسی قرارگیرد.

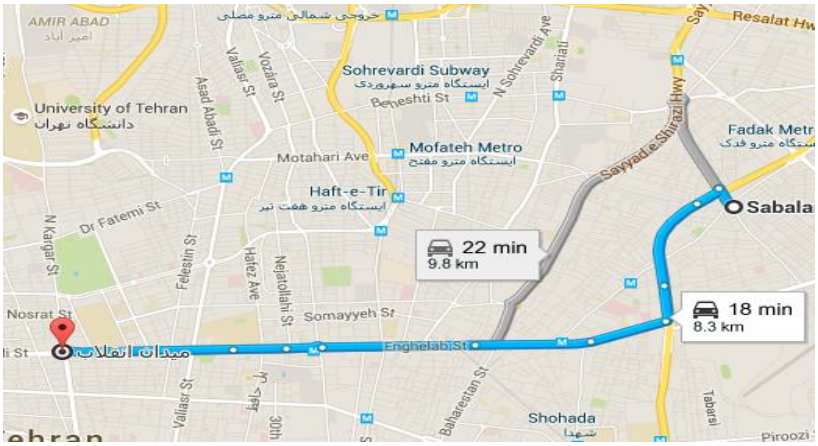
برای حل این سوال از مسئله مطرح شده در این پژوهش استفاده می‌کنیم تا به جواب‌های پارتوی ممکن برای سوال دست یابیم. چهار طریقه خودروی شخصی، پیاده، تاکسی، مترو و اتوبوس تندرو را در این پژوهش در نظر می‌گیریم. مترو خود به دو شبکه خطوط ۲ و٤، و اتوبوس تندرو صرفاً برای دوری از پیچیدگی مسئله خط ۱ و خطوط دیگری که ایستگاه‌های مترو را به هم وصل می‌کنند، مانند خطوط ۲ و ٤ اتوبوس تندرو لحاظ می‌کنیم. برای به‌دست آوردن ماتریس زمان در طریقه خودروی شخصی و ماتریس زمان برای طریقه پیاده از نرم افزار نقشه گوگل نسخه ۲۰۱۵ مانند شکل۷ بهره می‌بریم و ماتریس زمان اتوبوس تندرو و مترو از روی ساعت‌های ورود و خروج به ایستگاه‌ها که از سایت مربوط به شهرداری استخراج شده‌اند برداشت می‌شود، که البته کمی دست بالا بوده ودر آن زمان بالاتری نسبت به واقعیت در نظر

www.SID.ir

Archive of SID

گرفته شده، ولی برای بررسی کاربرد و ارائه یک مثال عملی بهترین راه برای به‌دست آوردن داده بوده‌است. ماتریس زمان تاکسی نیز مطابق ماتریس زمان خودروی شخصی در نظر گرفته شده و تنها در ماتریس هزینه تفاوت خواهند داشت. پارکینگ‌های موجود در سطح شهر تهران و در کل گره‌های لحاظ شده نیز در جدول ۹ نشان داده شده‌است. برای ماتریس هزینه از قیمت بلیط‌های مترو و اتوبوس به‌صورت ثابت و برای تاکسی به‌طور میانگین به ازای هر کیلومتر ۱۸۵ تومان در نظر گرفته شده برای خودروی شخصی قیمت بنزین و مصرف هر ۱۰۰ کیلومتر ۸ لیتر به‌طور میانگین در نظر گرفته شده‌است.

از حل مسئله دو جوابی که اکیداً از نظر تابع هدف زمان و هزینه بهتر هستند، به‌عنوان دم منحنی پارتو به ترتیب استفاده از خودروی شخصی از مبدأ به مقصد(به دلیل در نظر ن گرفتن اتلاف زمان ناشی از ترافیک) و پیاده رفتن که هزینه‌ای را در بر ندارد اما جواب-های میانی در جدول۱۰ نشان داده شده‌است. اگر نام‌گذاری طریقه-ها به‌صورت خودروی شخصی(۱) – پیاده(۲) – خط مترو ۲ (۳) – خط مترو٤(٤) – خط اتوبوس۱(۵)- خط اتوبوس٤(٦) – تاکسی (۷) باشد و گره‌ها به‌صورت جدول ۹ شماره گذاری می-شوند.



شکل۷. نقشه گوگل برای برداشت ماتریس زمان(بدون لحاظ ترافیک)

جدول۹. گره‌هایی که در مسئله در نظر گرفته شده‌اند

شماره گره	شرح	آدرس
۱	مترو تهرانپارس	تهرانپارس اتوبان رسالت
۲	پارکینگ کاوه	آزادی نرسیده به میدان انقلاب
۳	پارکینگ بهار	طالقانی خیابان بهار ایستگاه مترو طالقانی
٤	پارکینگ قرنی	تقاطع خیابان قرنی و طالقانی
۵	پارکینگ حافظ	خیابان حافظ بالاتر از خیابان طالقانی
٦	پارکینگ ولیعصر	بالاتر از میدان ولیعصر
۷	پارکینگ لاله	تقاطع کارگر و بلوار کشاورز
۸	پارکینگ صادقیه	میدان صادقیه
۹	مترو فدک	تقاطع بزرگراه امام علی و خیابان گلشن
۱۰	مترو سبلان	تقاطع خیابان سبلان و بزرگراه امام علی
۱۱	مترو امام حسین	میدان امام حسین

www.SID.ir

Archive of SID

۱۲	مترو دروازه شمیران	دروازه شمیران
۱۳	مترو دروازه دولت	تقاطع خیابان سعدی و خیابان انقلاب
١٤	مترو امام خمینی	میدان امام خمینی
١٥	مترو فردوسی	میدان فردوسی
١٦	مترو ولیعصر	چهارراه ولیعصر
١٧	مترو انقلاب	میدان انقلاب
١٨	مترو توحید	تقاطع بزرگراه چمران و خیابان انقلاب
١٩	مترو نواب	بزرگراه نواب
٢٠	مترو آزادی	انتهای خیابان شادمان
٢١	مترو استاد معین	خیابان استاد معین
٢٢	مترو حبیب اله	تقاطع خیابن حبیب اله و آزادی
٢٣	مترو دانشگاه شریف	درب شمالی دانشگاه شریف
٢٤	مترو میدان آزادی	میدان آزادی
٢٥	مترو اکباتان	اکباتان
٢٦	ایستگاه اتوبوس تهرانپارس	تهرانپارس خیابان دماوند
٢٧	ایستگاه اتوبوس آیت	تقاطع خیابان آیت و دماوند
٢٨	ایستگاه اتوبوس سبلان	تقاطع خیابان سبلان و دماوند
٢٩	ایستگاه اتوبوس طالقانی	خیابان ولیعصر تقاطع با خیابان طالقانی
٣٠	ایستگاه اتوبوس میدان ولیعصر	میدان ولیعصر
٣١	ایستگاه اتوبوس امام خمینی	خیابان امام خمینی جلوتر از میدان امام خمینی
٣٢	ایستگاه اتوبوس شریف	خیابان آزادی درب جنوبی دانشگاه شریف
٣٣	مجموعه ورزشی آزادی	

جدول۱۰. جواب‌های میانی مسئله

توالی گره‌ها	[۱،۳۳]	[۱،...،۲۲،۳۳]	[۱،۹،۱۰،۱۱،...،۲۵،۳۳]	[۱،...،۱۲،...،۲۰،...،۳۳]	[۱،...،۲۵،۳۳]
توالی طریقه‌ها	[۷]	[۳،...،۳،۷]	[۳،۳،۳،...،۳،۷]	[۳،...،٤،...،٤،...،۳]	[۵،...،۵،۲]
تابع هدف زمان(دقیقه)	۲۸	۵۵	۷٦	۷۸	۱۰۸
تابع هدف هزینه(تومان)	٤۹۹۵	۲۳٦۰	۱۱۰۰	٦۰۰	۵۰۰

۷. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آینده

در این پژوهش مسئله مسیریابی روی شبکه‌های چندطریقه مورد مطالعه قرار گرفت، و در این مسیر برای تعریف مدل ریاضی مسئله در ابتدا سه تابع هدف هزینه، زمان و تعداد تغییر طریقه را برای مدلسازی در نظر گرفتیم. سپس، در ادامه تابع هدف تعداد طریقه را به محدودیت تبدیل نمودیم، بدلیل آنکه مقادیر مشخص صحیح اتخاذ می‌کند و هر کاربر تعداد دقیق آن را می‌تواند برای خود

www.SID.ir

Archive of SID

مشخص نماید. برای حل این مسأله یک الگوریتم تقریبی بر مبنای برنامه‌ریزی پویا ارائه گردید که نسبت به داده‌های ورودی حساس بوده و در اکثر مدل‌ها یعنی مدل‌هایی که جواب بهینه آزاد شده آنها احتیاج به تعداد تغییر طریقه بیشتر از حد مجاز در مسأله نداشته باشد و از خودروی شخصی در مسیر استفاده نشده‌باشد، همواره جواب دقیق ارائه می‌کند، و در عین حال مسأله بهینه‌سازی چندهدفه را یکجا و مستقیم حل نموده در نهایت مجموعه جواب-های پارتو را به‌عنوان خروجی ارائه می‌کند. در ادامه الگوریتم طراحی شده را با حل توسط نسخه ۱۲ نرم افزار CPLEX و الگوریتم ژنتیک چندهدفه مقایسه نمودیم..

برای مقایسه با نرم افزار به ازای یک مقدار مشخص هزینه بهترین جواب از نظر تابع هدف زمان را از نظر زمان حل و کیفیت جواب به‌دست آمده مقایسه کردیم، که در همه موارد الگوریتم طراحی شده جواب دقیق را برای مسأله در زمانی بسیار کمتر از نرم افزار به‌دست آورد. در ادامه، برای مقایسه با الگوریتم ژنتیک بدلیل آنکه هر دو الگوریتم به‌طور مستقیم مسأله چندهدفه را حل می‌نمایند در ابتدا کیفیت یک تابع هدف را به ازای یک مقدار مشخص از دیگری مقایسه نمودیم که در همه‌ی اندازه‌ها کیفیت جواب به‌دست آمده از الگوریتم اکیداً بهتر بود، و در نهایت با رسم نمودار پیشرفت زمانی دو الگوریتم برای هر دو تابع هدف مقایسه خود را پایان دادیم.

به‌عنوان پیشنهاد آتی برای این مسأله می‌توان به بررسی بیشتر این الگوریتم و مقایسه آن با الگوریتم‌های چندهدفه فراابتکاری جدیدتری که در سال‌های اخیر ارائه شده‌اند اشاره نمود که از این طریق و با الهام از خواص آن الگوریتم‌ها می‌توان الگوریتم موجود را بهبود داد تا زمان حل کمتری را از خود نشان دهد. در راستای رسیدن به یک الگوریتم کارآ تر برای اندازه‌های خیلی بزرگ این مسأله هنوز الگوریتم ارائه شده جای بهبود دارد، و افزودن تکنیک-های جستجوی تصادفی در فضای حل و انواع تکنیک‌های مطرح در طراحی الگوریتم‌های تقریبی آن را برای اندازه‌های خیلی بزرگ بهبود دارد. همینطور، این مسأله می‌تواند بسط یابد و با مسائل معرفی مانند مسیریابی وسائل نقلیه و یا مسیریابی–مکان‌یابی ترکیب گردد، و در آن مسائل هم می‌توان از ایده‌ی موجود در الگوریتم اراده شده برای این مسأله بهره گرفت. مکان‌یابی ایستگاه‌های وسایل نقلیه‌ی عمومی، پارکینگ‌ها و ... می‌تواند مواردی باشد که در ترکیب با این مسئله آن را در آینده بهبود می‌دهد.

۸. پی نوشت‌ها

۱ Multi-Modal Network
۲ Dijkstra
۳ Bellman-Ford Algorithm
٤ Label Correcting
٥ Hyper-Path
٦ Pareto optimal set
۷ Multi-commodity
۸ Heuristic Algorithm
۹ ε-constraint
۱۰ Dynamic Programming(DP)
۱۱ Branch and Bound Algorithm
۱۲ NSGA II(Non-dominate Sorting Genetic Algorithm)

۹. مراجع

-Ambrosino, D. and Sciomachen, A. (2014) "An algorithmic framework for computing shortest routes in urban multimodal networks with different criteria", Procedia-Social and Behavioral Sciences, pp. 139-152.

-Asefi, H., Jolai, F., Rabiee, M. and Tayebi, M. E. (2014) "A hybrid NSGA-II and VNS for solving bi-objective no-wait flexible flowship scheduling problem" Int J. Adv Manuf. Technol.

-Ayed, H., Fernandez, C. and Habbas and Z. Khadraoui (2011) "solving time-dependent multimodal transport problems using a transfer graph model", Computers and Industrial Engineering, Vol. 61, pp. 391-401.

-Carraway R., Morin, T. L. and Moskowitz H. (1989) "Generalized dynamic programming for multicriteria optimization", European Journal of Operational Research, pp. 216-224,

-Chang, T. (2008) "Best routes selection in international intermodal networks", Computers and Operations Research, Vol. 35, pp. 2877-2891.

www.SID.ir

Archive of SID

-Garaix, Th., Atigues, Ch., Feillet, D. and Josselin, D. (2010) "Vehicle routing problems with alternative paths: An application to on-demand transportation", European Journal of Operational Research, Vol. 204, pp. 62-75.

-Grabener T., Berro, A. and Duthen Y. (2010) "Time dependent multi-objective best path for multimodal urban routing", Electronic Notes in Discrete Mathematics, Vol. 36.

-Horn, M. E. T. (2003) "An extended model and procedural framework for planning multimodal passenger journey", transportation Research Part B, Vol. 37, pp. 641-660.

-Huguet, M., Kirchler, D., Parent, P. and Calvo, R. W. (2012) "Efficient algorithms for the 2-way multimodal shortest path", Electronic Notes in Discrete Mathematics, Vol. 41, pp. 431-437.

-Liu, L., Yang, J. and Mu, H. (2014) "Exact algorithms for multi-criteria multi-modal shortest path with transfer delaying and arriving time-window in urban transit network", Applied Mathematical Modeling, Vol. 35, pp. 401-422.

-Lozano, A. and Storchi, G. (2001) "Shortest viable path algorithm in multimodal networks", Transportation Research Part A, Vol. 35, pp. 225-241.

-Lozano, A. and Storchi, G. (2002) "Shortest viable hyper path in multimodal networks", Transportation Research Part A, Vol. 36, pp. 853-874.

-Reinhardt, L. B. and Pisinger, D. (2011) "Multi-objective and multi-constrained non-additive shortest path problems", Computers and Operations Research, Vol. 38, pp. 605-616.

-Sherali, Hanif, Antoine, G. and Kangwalkai, S. (2003) "Time-dependent, label-constrained shortest path problems with applications" Transportation Science, Vol. 37, pp. 278-293

-Smith J. and Shier D. (1989) "An empirical investigation of some bi criterion shortest path algorithms", European Journal of Operational Research, Vol. 43, pp. 216-224.

-Skiver S. and Andersen K, (2000) "A label correcting approach for solving criterion shortest path problems", Computers and Operations Research, Vol. 27, pp. 507-524.

-Yamada, T., Russ, B. F., Castro, J. and Taniguchi E. (2009) "Designing multimodal freight transport networks: A heuristic approach and application", Transportation Science, Vol. 43, pp. 129-143.

-Wang, H., Hu, M. and Xiano, W. (2010) "A new public transportation data model and shortest path algorithms", 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Wuhan.

-Zhang, Mo., Wiegmans, B. and Tavaszy, L. (2013) "Optimization of multimodal networks including environment costs: A model and findings for transport policy", Computers in Industry, pp. 136-145.

-Ziliaskopoulos, A. and Wardell, W. (2002) "An intermodal optimum path algorithm for multimodal networks with dynamic arc travel times and switching delays", European Journal of Operational Research, Vol. 125, pp. 486-502.

www.SID.ir