

چکیده

مدل‌سازی و ارائه رویکردهای حل جهت بهینه‌سازی اقتصادی و زمانی مسائل مختلف موجود در حوزه حمل و نقل شهری از مهمترین و پرچالش‌ترین مباحث موجود در فضای برنامه‌ریزی و مدیریت شهری است. طیف وسیعی از پژوهش‌های داخلی و خارجی، مسائلی از جمله حمل و نقل‌های عمومی و مدیریت ترافیک شهری، جمع‌آوری و مدیریت پسماند، امداد و نجات و حتی گردشگری شهری را در این حوزه مد نظر قرار می‌دهند و معتقدند ماحصل چنین پژوهش‌هایی کاهش چشمگیر هزینه‌ها، افزایش سرعت و تسهیل جابجایی‌ها در شهر، کاهش آلودگی‌ها و مضرات زیست‌محیطی و حرکت به سمت پایدارسازی شهرها می‌باشد. از این رو مقاله حاضر حالت خاصی از مسئله کلاسیک و مشهور جهت‌یابی را که از قابلیت تطبیق بالایی با مسائل حمل و نقل شهری برخوردار بوده و در آن افق زمانی متاثر از وقایع، اتفاقات و شرایط بوجود آمده حین بازدید هر یک از رؤس می‌باشد، مدل‌سازی نموده و با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری مبتنی بر مفاهیم حریصانه به حل آن پرداخته است. به منظور بررسی نحوه عملکرد الگوریتم، تعداد ۸۵ مسئله تصادفی در ۷ دسته تولید شده و الگوریتم پیشنهادی جهت حل این مسائل بکار گرفته شده‌اند.

کلید واژه:

مدیریت شهری، حمل و نقل شهری، مسئله جهت‌یابی، مسئله فروشنده دوره‌گرد انتخابی، مسئله مسیریابی.

مقدمه

مطابق با آمارهای موجود، در سال ۱۳۹۳ تنها در شهر تهران حدود ۱۸ میلیون سفر به صورت روزانه انجام شده است^۱. علاوه بر مباحث هزینه‌ای و اقتصادی، این حجم از سفرهای روزانه در شهر تهران، مشکلات و معضلات بسیاری از جمله افزایش انواع آلودگی‌ها و مضرات زیست‌محیطی، کاهش شدید سرعت عبور و مرور در شهر، افزایش ریسک‌ها در هنگام بروز بحران‌های شهری را به همراه داشته است. بدیهی است در چنین شرایطی استفاده از روش‌ها و مدل‌های مختلف به منظور بهینه‌سازی مسیرهای طی شده در هر سفر، تا چه میزان می‌تواند تبعات و آثار نامطلوب حاصله را کاهش دهد. با بررسی ادبیات مرتبط با این حوزه، این دست از مسائل مدیریت شهری اغلب با استفاده از ساختارها و چارچوب‌های مدل‌های حوزه حمل و نقل و مسیریابی^۲ ارائه و حل شده‌اند. از جمله این مدل‌های پایه‌ای، مدل‌های ارائه شده برای «مسئله جهت‌یابی^۳ (OP)» می‌باشد که در دهه‌های اخیر کاربردهای فراوانی در بخش‌های مختلف از جمله «مدیریت آمداد و پشتیبانی^۴»، «حوزه نظامی و پدافندی»، «امداد و نجات»، «گردشگری»، «حمل و نقل‌های عمومی شهری»، «مدیریت پسماند»، «مدیریت بحران‌های شهری» و «گردشگری شهری» برای آن ارائه شده است.

تفاوت عمده این مسئله با سایر مسائل مسیریابی را می‌توان محدود بودن افق زمانی^۵ (زمان در دسترس) دانست؛ بدین معنا که پیمایش کل مسیر انتخابی بایستی در یک افق زمانی مشخص، محدود و از قبل تعیین شده صورت پذیرد. بدیهی است

بهینه‌سازی مسائل حمل و نقل حوزه
مدیریت شهری با استفاده از مسئله
جهت‌یابی با افق زمانی وابسته

مهدی جعفریان

دانشجوی دکتری رشته مهندسی صنایع،

دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

jafarian@student.pnu.ac.ir

عزیزاله جعفری (نویسنده مسئول)

دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده

فنی و مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ،

تهران، ایران

jafari@usc.ac.ir

رامین صادقیان

دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه

پیام نور، تهران، ایران

sadeghian@pnu.ac.ir

در صورتی که مقدار این افق زمانی بیش از زمان مورد نیاز برای بازدید همه رؤس باشد؛ مسئله جهت‌یابی به «مسئله فروشنده دوره‌گرد^۶ (TSP)» تبدیل شده و امتیاز هر رأس تاثیری در توالی بازدید آن‌ها نخواهد داشت. اما در صورتی که بازه زمانی در دسترس به گونه‌ای باشد که کفایت بازدید همه رؤس را نکند طبیعتاً امتیاز رؤس در بازدید و یا عدم بازدید آن‌ها و همچنین در توالی

بازدید موثر خواهد بود. این ویژگی مسئله جهت‌یابی، در مقایسه با سایر مسائل پایه‌ای حوزه مسیریابی انطباق بیشتری با شرایط دنیای واقعی را فراهم می‌کند.

به صورت خلاصه در این مسئله تعدادی رأس با امتیاز مشخص موجود بوده و هدف یافتن یک مسیر در یک افق زمانی محدود (یا با طول محدود^۷) با گذر از برخی رئوس و حداکثر کردن مجموع امتیازات جمع‌آوری شده می‌باشد [۲، ۱]. در مسئله جهت‌یابی، «افق زمانی» مقداری مشخص و از قبل تعیین شده می‌باشد. در این خصوص ذکر چند نکته به شرح ذیل الزامی می‌باشد:

«افق زمانی» مفهومی متفاوت از «پنجره زمانی» جهت بازدید هر یک از رئوس (یا نقاط تقاضا یا اهداف) می‌باشد. از جمله توسعه‌های متواتر و بسیار حائز اهمیت در حوزه مسائل خانواده مسیریابی موضوع پنجره زمانی^۸ است. مقاله ارائه شده توسط کانتور و روزنواين در سال ۱۹۹۲ نخستین پژوهشی است که «مسئله OP با پنجره زمانی^۹ (OPTW)» را در نظر گرفته است [۳]. در سال‌های اخیر این مسئله بویژه در حالت تیمی توجه پژوهشگران زیادی را به خود جلب کرده است که از جمله پژوهش‌های اخیر مرتبط با این مسئله می‌توان به [۴-۶] اشاره نمود. در بیان تفاوت این مسئله با مسئله OPDTH بایستی به تفاوت ساختاری و مفهومی فیما بین دو واژه «افق زمانی» و «پنجره زمانی» اشاره نمود. «افق زمانی» مفهومی متفاوت از «پنجره زمانی» جهت بازدید هر یک از رئوس (یا نقاط تقاضا یا اهداف) می‌باشد؛ بدین صورت که «افق زمانی» کل زمان در دسترس جهت برنامه‌ریزی بوده و برای کل رئوس موجود در شبکه مشابه است. حال آنکه «پنجره زمانی» برای هر رأس می‌تواند متفاوت از دیگری باشد. برای مثال در یک شبکه خدمات پس از فروش، «افق زمانی» برنامه‌ریزی برای هر یک از نیروهای تعمیراتی و خدمات‌رسان روزانه می‌باشد؛ در حالی که هر یک از مشتریان در «پنجره‌های زمانی» متفاوت خدمت خود را دریافت می‌نمایند.

در برخی از پژوهش‌ها به منظور افزایش سطح پویایی مسائل به جای یک افق زمانی، چند افق زمانی^{۱۰} در نظر گرفته می‌شود. برای مثال در مورد یک شبکه جمع‌آوری پسماند در صورتی که برنامه‌ریزی برای هر وسیله نقلیه به صورت روزانه انجام شده اما برنامه آن برای چند روز متوالی مشخص شود، مسئله دارای چند افق زمانی می‌شود. این حالت عموماً در شرایطی که پارامترهای مسئله در هر افق زمانی دچار تغییر می‌شود کاربرد دارد. تریکوریه و همکارانش در سال ۲۰۱۰ نسخه‌ای چند دوره‌ای از TOP با پنجره‌های زمانی برای برنامه‌ریزی بازدید فروشندگان از مشتری‌ها ارائه داده است. در این مسئله، هر مشتری، پنجره‌های زمانی چندگانه‌ای دارد که می‌تواند برای روزهای مشخصی در هفته، متفاوت باشند [۷]. مقاله مذکور توسعه‌ای بر مقاله سال ۲۰۰۸ همین نویسندگان [۸] می‌باشد. از مقالات اخیر مرتبط با این مسئله می‌توان به [۹، ۱۰] اشاره نمود. در این مسئله چند افق زمانی کاملاً مشخص و ثابت وجود داشته و از این رو تفاوت آن با OPDTH روشن و شفاف می‌شود؛ چرا که در OPDTH برنامه‌ریزی تنها در یک افق زمانی متغیر (وابسته به بازدید هر رأس) انجام می‌شود.

در برخی از پژوهش‌ها مسئله‌ای تحت عنوان «مسئله جهت‌یابی وابسته به زمان^{۱۱}» مطرح شده است. فومین و لینگاس در سال ۲۰۰۲ گونه‌ی دیگری از OP به نام «مسئله جهت‌یابی وابسته به زمان^{۱۲} (TDOP)» را مورد مطالعه قرار دادند که در آن مدت زمان سفر بین دو رأس به زمان شروع سفر بستگی دارد. این حالت از مسئله جهت‌یابی مورد استقبال وسیعی در بین پژوهشگران شده است و [۶، ۱۱-۱۳] از جمله پژوهش‌های اخیر این مسئله می‌باشند. مروری از این مسئله توسط گارناوان و همکارانش در سال ۲۰۱۴ در مقاله [۱۴] ارائه شده است. عمده تفاوت TDOP با OPDTH در نوع وابستگی زمانی است؛ بدین صورت که در TDOP زمان سفر بین دو نقطه به زمان شروع سفر وابسته بوده، حال آن که در OPDTH مفهوم وابستگی در افق زمانی لحاظ می‌شود. برای مثال در TDOP طی کردن مسافت بین دو نقطه از یک شهر اگر سفر در ساعات اوج ترافیک شروع شود نسبت به سایر حالت‌های دیگر، زمان بیشتری را نیاز خواهد داشت که این موضوع به روشنی با مسئله وابستگی که در این OPDTH مورد بحث قرار می‌گیرد، متفاوت است.

با توجه به ماهیت ابهامات و عدم قطعیت‌های موجود در مسائل دنیای واقعی، در پژوهش‌های این حوزه نیز، آشکال مختلفی از عدم قطعیت در مسئله جهت‌یابی بویژه در زمان سفر و زمان خدمت و یا تلفیق آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. در سال ۲۰۱۱ کمپبل و همکارانش مسئله جهت‌یابی را با زمان‌های سفر و خدمت‌دهی تصادفی در نظر گرفتند که در آن اگر مشتریان در طول مدت افق زمانی در دسترس بازدید نشوند و خدمت خود را دریافت نکنند جریمه‌ای منظور می‌شود [۱۵]. از مهمترین پژوهش‌های مرتبط با این مسئله که در سال‌های اخیر مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است می‌توان به [۱۶-۲۱] اشاره نمود. نکته حائز اهمیت در تبیین تفاوت این دسته از مسائل با OPDTH، عدم تاثیر حالت‌های زمان سفر تصادفی و زمان خدمت تصادفی بر مقدار افق زمانی است؛ بدین صورت که در این مسائل با وجود عدم قطعیت در مسئله، افق زمانی ثابت بوده و تحت تاثیر عدم قطعیت قرار نمی‌گیرد.

شرایطی در دنیای واقعی وجود دارد که «افق زمانی» تحت تاثیر برخی وقایع و رویدادها در هر یک از رؤس نیاز به تعدیل دارد. بدین معنا که «افق زمانی» شکلی غلتان به خود گرفته و متناسب با اتفاقات در طول طی مسیر کاهش یا افزایش می‌یابد. برای مثال در صورت بروز یک بحران سراسری در یک شهر، در حالی که تیم امدادی در یک افق زمانی سه ساعته برای رجوع و خدمت‌رسانی به ۵ نقطه طی یک مسیر مشخص تجهیز شده است، پس از رسیدن تیم به هر یک از رؤس (نقاط تقاضا)، متناسب با شرایط حادثه‌دیدگان، «افق زمانی» می‌تواند کاهش یا افزایش یابد.

با توجه به نکات فوق‌الذکر بویژه اهمیت نکته اخیر (متغیر بودن افق زمانی) و همچنین خلاء مطالعات در حوزه‌های مربوطه، مدل‌سازی و حل مسئله جهت‌یابی در حالتی که بین «افق زمانی (زمان در دسترس)» و «وقایع، اتفاقات و شرایط بوجود آمده حین بازدید هر یک از رؤس» وابستگی وجود داشته باشد در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است؛ تا از این رهگذر با افزایش پویایی مسئله، مسئله جهت‌یابی را واقعی‌تر نموده و آن را به شرایط دنیای واقعی نزدیک‌تر نمود.

این مقاله بدین صورت سازماندهی شده است که در بخش اول پیشینه تحقیقاتی مسئله جهت‌یابی ارائه شده و سپس در بخش دوم مدل ریاضیاتی «مسئله جهت‌یابی با افق زمانی وابسته (OPDTH)» توسعه یافته است. بخش سوم با استفاده از حل یک مثال عددی، الگوریتم حل ابتکاری مقاله حاضر را معرفی می‌نماید. در بخش چهارم، الگوریتم پیشنهادی به منظور حل ۸۵ مسئله تصادفی به کار گرفته شده و نتایج حاصله جهت بررسی عملکرد الگوریتم مذکور مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در نهایت بخش پنجم به بحث، جمع‌بندی و ارائه زمینه‌های توسعه آتی مسئله جهت‌یابی با افق زمانی وابسته اختصاص یافته است.

۱. پیشینه تحقیقاتی مسئله جهت‌یابی

ریشه اولین تلاش‌های صورت گرفته در خصوص مسئله‌ی جهت‌یابی (OP)، به پژوهش‌های ارائه شده توسط تیسلی‌گیریدس در سال ۱۹۸۴ [۲۲] و گلدن و همکارانش در سال ۱۹۸۷ [۲۳] باز می‌گردد؛ اما پیش از و همزمان با آن‌ها مسائل متعددی در پژوهش‌های مختلف از جمله [۲۴-۲۸] با ویژگی‌های مشابه مسئله جهت‌یابی («محدود بودن افق زمانی» و «امتیازدار بودن بازدیدها») مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. از آن زمان بعد، مسائل این خانواده مورد توجه پژوهشگران مختلف قرار گرفت تا آنجا که برخی از نشریات معتبر حوزه‌های بهبودسازی در سال‌های اخیر مقالات مروری و پر استنادی را در این زمینه منتشر نموده‌اند. جدول ۱ به بررسی برخی از مهمترین پژوهش‌های ارائه شده در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ در خصوص مسئله جهت‌یابی پرداخته است.

جدول ۱- مروری بر برخی مقالات منتشر شده در خلال سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ در ارتباط با مسئله جهت‌یابی

ردیف	سال	مقاله	خدمت‌دهنده		زمان خدمت/سفر		تابع هدف	پنجره زمانی	وابسته به زمان	افق برنامه‌ریزی			روش حل	سایر موارد
			تکی	تیمی	قطععی	غیرقطععی				تک مدله	چندمدله	ثابت		
۱	۲۰۱۷	[۲۹]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	سود هر رأس بر اساس توابع مستقل زمانی تغییر می‌کند
۲	۲۰۱۷	[۳۰]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
۳	۲۰۱۷	[۳۱]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	هر رأس می‌تواند به صورت همزمان توسط چند بازدیدکننده تا یک ظرفیت مشخص بازدید شود.
۴	۲۰۱۷	[۳۲]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	بازدید اجباری رؤس
۵	۲۰۱۷	[۳۳]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	بازدید اجباری رؤس
۶	۲۰۱۷	[۳۴]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	وجود چند سیستم (مد) حمل و نقل
۷	۲۰۱۷	[۳۵]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
۸	۲۰۱۷	[۱۳]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
۹	۲۰۱۷	[۱۲]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
۱۰	۲۰۱۷	[۹]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
۱۱	۲۰۱۷	[۱۶]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
۱۲	۲۰۱۷	[۳۶]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	هر رأس برای دیدن شدن با یک احتمال مشخص در دسترس است
۱۳	۲۰۱۷	[۳۷]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
۱۴	۲۰۱۷	[۳۸]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	برنامه‌ریزی محدودیت
۱۵	۲۰۱۷	[۲۹]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	خوشه‌بندی مشتریان و اختصاص امتیاز به خوشه اگر تمام مشتریان خوشه بازدید شود
۱۶	۲۰۱۸	[۴۰]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
۱۷	۲۰۱۸	[۴۱]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	خوشه‌بندی مشتریان و اختصاص امتیاز به خوشه اگر حداقل یک مشتری در خوشه بازدید شود
۱۸	۲۰۱۸	[۴۲]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	بازدید اجباری رؤس
۱۹	۲۰۱۸	[۴۳]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
۲۰	۲۰۱۸	[۴۴]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	سود تابعی غیرخطی از زمان خدمت
۲۱	۲۰۱۸	[۴۵]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	فازی بودن امتیازات و زمان سفر
۲۲	۲۰۱۸	[۴۶]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
۲۳	۲۰۱۸	[۴۷]	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	

سایر موارد	روش حل			افق برنامه‌ریزی			وابسته به زمان	پنجره زمانی	تابع هدف		زمان خدمت/سفر		خدمت‌دهنده		مقاله	سال	ردیف
	فرآیندکاری	ابتکاری	دقیق	متغیر وابسته	چنددوره‌ای	ثابت			تک هدفه	چندهدفه	غیرقطعی	قطعی	تیمی	تکی			
	°	°				°			°			°	°	[5]	۲۰۱۸	۲۴	
	°	°				°			°			°	°	[4]	۲۰۱۸	۲۵	
دارای محدودیت ظرفیت		°	°			°			°			°	°	[6]	۲۰۱۸	۲۶	
		°				°			°			°	°	[۱۰]	۲۰۱۸	۲۷	
سود متغیر، مشتری حضور احتمالی	°					°			°			°	°	[۲۱]	۲۰۱۸	۲۸	
	°					°			°			°	°	[۱۷]	۲۰۱۸	۲۹	
		°				°			°			°	°	[۱۸]	۲۰۱۸	۳۰	
		°				°			°			°	°	[۱۹]	۲۰۱۸	۳۱	
	°		°			°			°			°	°	[۲۸]	۲۰۱۸	۳۲	
		°				°			°			°	°	[۲۰]	۲۰۱۸	۳۳	

جدول ۱ حاوی نکات مهمی است که برخی از مهمترین آن‌ها به شرح ذیل می‌باشد:

- در مقالات متعددی به جهت ساده‌سازی حالت «تکی» مسئله مد نظر قرار گرفته فلذا چنین مقالاتی از پتانسیل مناسبی جهت توسعه در حالت «تیمی» برخوردارند.
- مدل‌سازی و حل این مسئله در حالتی که زمان سفر یا خدمت یا هر دوی آن‌ها به صورت غیرقطعی باشند از جذابیت تحقیقاتی بالایی برخوردارند.
- عمده مقالات موجود در ادبیات این حوزه مسئله را در حالت تک‌هدفه و با در نظر گرفتن هدف کلاسیک آن (حداکثرسازی امتیاز بدست آمده حاصل از بازدید رؤس) مدل‌سازی و حل نموده‌اند؛ در حالی که افزودن اهداف جدید به مسئله می‌تواند ارتقای قابلیت کاربردپذیری مدل‌ها را به همراه داشته باشد. شایان ذکر است معدود پژوهش‌های چندهدفه انجام شده نیز غالباً دو هدفه بوده و حداقل‌سازی هزینه را که قابل تلفیق با هدف کلاسیک می‌باشد، مد نظر قرار داده‌اند.
- پنجره زمانی و وابستگی به زمان دو عامل بسیار مهم در مسائل مسیریابی می‌باشد که چنین رویکردهایی هر چند پیچیدگی‌های مسئله جهت‌یابی را افزایش می‌دهند؛ اما مدل‌ها را به شرایط دنیای واقعی نزدیک‌تر می‌نمایند و از این رو زمینه بسیار مناسبی برای تحقیقات آتی در خصوص مسئله جهت‌یابی قلمداد می‌شوند.

۲. مدل‌سازی مسئله جهت‌یابی با افق زمانی وابسته

OPDTH شکل خاص و غلتانی از مسئله OP قلمداد می‌شود و مسئله ترکیبی از M مدل در نظر گرفته می‌شود که در هر بار حل مدل، هر چند یک مسیر تا مقصد نهایی (N) مشخص می‌گردد، اما حرکت به سمت یک رأس صرفاً معتبر است؛ بدین صورت که برخی پارامترها، مجموعه رؤس بازدید نشده و همچنین مبدأ در این مسئله پس از بازدید تغییر می‌نماید و مسئله جدید با مدلی مبتنی بر مدل مسئله پایه جهت‌یابی ($1, 2$)، اما با داده‌های جدید تولید می‌شود. به منظور مدل‌سازی OPDTH در مرحله m ، اختصارات زیر تعریف می‌شوند:

- V : مجموعه کلیه رؤس موجود ($V = 1, 2, \dots, N$)؛ رأس ۱، مبدأ حرکت و رأس N مقصد نهایی می‌باشد.
- S_i : امتیاز رأس i ام
- X_{ij} : متغیر تصمیم مسئله که به صورت صفر و یک تعریف شده و مقدار آن در حالتی که بازدید رأس j ام بلافاصله پس از بازدید رأس i ام صورت پذیرد، برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر می‌باشد.
- m : اندیس مربوط به مرحله بوده و یکی از مقادیر مجموعه $\{1, 2, \dots, M\}$ است.
- G^m : بیانگر گراف کامل بی‌جهتی است که از رؤس باقیمانده در مرحله m تشکیل می‌شود و $G^m = (V^m, A^m)$.
- V^m : بیانگر رؤس بازدید نشده در مرحله m ام است که شامل رأس مقصد (v_d^m) و همچنین رأس شروع (v_s^m) است و $V^m = \{v_1^m, v_2^m, \dots, v_n^m\}$.
- V^0 : بیانگر رؤس بازدید نشده در مرحله صفر است که شامل رأس مقصد (N) و همچنین رأس شروع (1) است و $V^0 = \{1, 2, \dots, N\}$.
- v_s^m : اولین رأس جهت بازدید در مسیر بهینه که در نتیجه حل مدل در مرحله $(m-1)$ ام مشخص شده است و به عنوان نقطه شروع در مدل مرحله (m) ام می‌باشد و $V^{m-1} - V^m = \{v_s^m\}$.

بنابراین مدل پیشنهادی برای OPDTH در مرحله m به شرح زیر می‌باشد:

$$Max \sum_{i \in V^m \setminus \{v_d^m\}} \sum_{j \in V^m \setminus \{v_s^m\}} S_i \times x_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{i \in V^m \setminus \{v_d^m\}} x_{i(v_d^m)} = \sum_{j \in V^m \setminus \{v_s^m\}} x_{(v_s^m)j} = 1, \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V^m \setminus \{v_d^m\}} x_{ik} = \sum_{j \in V^m \setminus \{v_s^m\}} x_{kj} \leq 1; \quad \forall k \in V^m \setminus \{v_d^m, v_s^m\}, \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V^m \setminus \{v_d^m\}} \sum_{j \in V^m \setminus \{v_s^m\}} t_{ij} \times x_{ij} \leq T_{max}^m, \quad \forall m = 1, 2, \dots, M, \quad (4)$$

$$2 \leq u_i \leq |V^m|; \quad \forall i \in V^m \setminus \{v_s^m\}, \quad (5)$$

$$u_i - u_j + 1 \leq (|V^m| - 1)(1 - x_{ij}); \quad \forall i, j \in V^m \setminus \{v_s^m\}, \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}; \quad \forall i \in V^m \setminus \{v_d^m\}, \quad \forall j \in V^m \setminus \{v_s^m\}. \quad (7)$$

در مدل ارائه شده $x_{ij} = 1$ در صورتی که بازدید رأس j پس از بازدید رأس i صورت پذیرد و در غیر اینصورت مقدار آن صفر است. همچنین u_i موقعیت ترتیبی رأس i در مسیر است. تابع هدف (رابطه شماره ۱) مربوط به حداکثر کردن مجموع امتیازات جمع‌آوری شده (حاصل از بازدیدها) در مرحله (m) ام بوده و محدودیت اول (رابطه شماره ۲) شروع مسیر از رأس آغازین در مرحله (m) ام (v_s^m) و اتمام آن در رأس پایانی در مرحله (m) ام (v_d^m) را تضمین می‌کند. محدودیت دوم (رابطه شماره ۳) به منظور اطمینان از متصل بودن مسیر و اطمینان از بازدید حداکثر یکبار هر رأس به مدل اضافه شده است. محدودیت سوم (رابطه شماره ۴) بیانگر محدودیت افق زمانی بوده و محدودیت چهارم و پنجم (روابط شماره ۵ و ۶) نیز مربوط به حذف زیرتور با استفاده از فرمول‌بندی «میلر-تاکر-زملین»^{۱۴} (MTZ) [۴۹] می‌باشد. رابطه شماره ۷ تضمین می‌کند متغیرهای x_{ij} تنها برابر با یکی از دو مقدار صفر یا یک باشد.

۳. الگوریتم حل پیشنهادی مسئله جهت‌یابی با افق زمانی وابسته

در این بخش به منظور پیشنهاد الگوریتم حل برای مسئله جهت‌یابی با افق زمانی وابسته، ابتدا یک مثال عددی ایجاد و به صورت شمارش کامل حل شده است. مثال مذکور هر چند در سایز کوچک حل شده، اما به جهت افزایش عمق شناخت نسبت به مسئله مورد بررسی، در خصوص ساختار کلی الگوریتم مورد نیاز جهت حل این مسئله نکاتی مهمی را در اختیار قرار داده است. مجموعه این درس‌آموخته‌ها، به منظور توسعه الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله جهت‌یابی با افق زمانی وابسته در این بخش بکار گرفته شده‌اند.

۳.۱. ارائه یک مثال برای مسئله جهت‌یابی با افق زمانی وابسته

به منظور توضیح بیشتر مسئله OPDTH، در این بخش مثالی ارائه شده است که در آن در یک گراف کامل و بی‌جهت با ۵ رأس (رأس یک، مبدأ و رأس ۵، مقصد)، با ماتریس متقارن زمان سفر $(t_{ji} = t_{ij} \mid j > i = 10 + (j - i - 1))$ ، با امتیازات بازدید به ترتیب ۰، ۴، ۸، ۱۰ و ۰ و ضرایب بازدید به ترتیب ۰٪، ۱۰٪، ۲۰٪، ۲۰٪ و ۰٪ مفروض است. آنگاه با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای افق زمانی (T_{max})، بهیگی مطابق با جدول ۲ تغییر می‌کند.

جدول ۲- مسیرهای بهینه به ازای مقادیر مختلف T_{max} در مثال عددی

No	T_{max}	Optimum Path	Optimum CS	Optimum. T_{max}
1	$16 \leq T_{max} < 24$	1-5	0	16
2	$24 \leq T_{max} < 32$	1-4-5	10	24
3	$32 \leq T_{max} < 36$	1-3-4-5	18	32
4	$36 \leq T_{max} < 40$	1-4-3-5	18	36
5	$40 \leq T_{max} < 44$	1-2-3-4-5	22	40
6	$44 \leq T_{max} < 48$	1-3-2-4-5	22	44
7	$48 \leq T_{max}$	1-3-4-2-5, 1-4-3-2-5, 1-4-2-3-5	22	48

تغییرات مسیرهای بهینه با در نظر گرفتن ضرایب افزایشی و کاهش‌ی بازدید به شرح جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳- بررسی تغییرات جواب‌های بهینه مثال عددی کوچک پس از اعمال ضرایب بازدید

No.	T_{max}^0	Optimal Tour	TT	Optimum CS	Track Changing in T_{max}				Feasibility
					16/16		16/0		
1	16	1-5	16	0	16/16		16/0		✓
2	24	1-4-5	24	10	24/24*		22/8**		×
3	32	1-3-4-5	32	18	32/32		33.2/11.2		✓
4	36	1-4-3-5	36	18	36/36		33.12/9.12		×
5	40	1-2-3-4-5	40	22	40/40		38.32/8.32		×
6	44	1-3-2-4-5	44	22	44/44		44.85/10.85		✓
7	48	1-3-4-2-5	48	22	48/48		47.10/13.10		×
		1-4-3-2-5	48	22	48/48		43.58/9.58		×
		1-4-2-3-5	48	22	48/48		40.42/4.42		×

در خصوص جدول ۳، نکات ذیل حائز اهمیت می‌باشند:

- پارامترهای مشخص شده با علامت ممیز (A/B) آخرین وضعیت T_{max} پس از اعمال ضرایب بازدید (A) و مقدار باقیمانده از آن (B) را نشان می‌دهد. برای مثال در مسیر ۱-۴-۵، در هنگام بازدید از رأس اول (نقطه شروع) با توجه به اینکه ضریب بازدید این رأس صفر در نظر گرفته شده است، فلذا T_{max} تغییری نکرده و $T_{max} = T_{max}^0 = 24$ و زمان باقیمانده از آن نیز ۲۴ واحد زمانی است. بنابراین پارامتر مربوطه در جدول به صورت ۲۴/۲۴ نشان داده شده است. در ادامه مسیر حدود ۱۴ واحد زمانی لازم است تا سفرکننده از رأس ۱ به رأس ۴ برسد. بنابراین حدود ۱۰ واحد زمانی از T_{max} باقی می‌ماند که به صورت پیش‌فرض برای سفر از رأس ۴ به رأس ۵ کفایت می‌نماید. اما با توجه به ضریب بازدید رأس ۴ که عدد «۰.۲۰-» است، بازدید این رأس ۲۰٪ از زمان باقی‌مانده T_{max} را کاهش خواهد داد. بنابراین به جای ۱۰ واحد زمانی، زمان باقی‌مانده به ۸ واحد زمانی کاهش یافته و متعاقباً T_{max} نیز از ۲۴ واحد به ۲۲ واحد تقلیل می‌یابد. فلذا در جدول به جای ۱۰/۲۴ مقدار ۸/۲۲ مشاهده می‌شود. با این توصیف ۸ واحد زمانی باقی‌مانده به منظور سفر از رأس ۴ تا ۵ کفایت نکرده و از این رو جواب نشدنی خواهد بود.
- با مقایسه مسیر ۱-۲-۳-۴-۵ و مسیر ۱-۳-۲-۴-۵ نکته بسیار مهمی قابل برداشت است. همانگونه که مشخص است تفاوت بین این دو مسیر در ضریب بازدید افزایشی رأس ۳ و ضریب بازدید کاهش‌ی رأس ۲ می‌باشد که منجر به نشدنی بودن مسیر اول و شدنی بودن مسیر دوم شده است. بنابراین توجه به ضرایب بازدید در هنگام تعیین مسیر به عنوان رکنی جدید در این تصمیم‌گیری حائز اهمیت می‌شود.
- بدیهی است اینگونه تصمیم‌گیری بر پیچیدگی مسئله افزوده و طبیعتاً یکی از روش‌های حل مسئله در این حالت می‌تواند حل مجدد آن با قرار دادن «رأس فعلی به عنوان مبدأ جدید» و «زمان باقی‌مانده به عنوان T_{max} جدید» و «کلیه رؤس بازدید نشده به عنوان رؤس قابل بازدید» باشد.

۳.۲. الگوریتم حل ابتکاری برای مسئله جهت‌یابی با افق زمانی وابسته

با توجه به پیچیدگی‌های موجود در مسئله مورد بحث و تحلیل‌ها و درس‌آموخته‌های حاصل از حل مثال کوچک عددی، در این مقاله توسعه یک الگوریتم حل ابتکاری مبتنی بر مفاهیم حریصانه مد نظر قرار گرفته است که طبیعتاً شروعی بر توسعه روش‌های ابتکاری و فراابتکاری و حتی دقیق در آینده می‌باشد. لازم به ذکر است دیدگاه علمی ذیل در خصوص الگوریتم حریصانه مورد پذیرش این پژوهش نیز بوده است:

«یک الگوریتم حریصانه ۱۵ یک پارادایم الگوریتمیک ۱۶ می‌باشد که معطوف به حل مسائل با استفاده ایجاد بهینگی محلی به صورت ابتکاری می‌باشد [۵۰]؛ با امید به یافتن یک بهینه سراسری. بدین معنا که الگوریتم حریصانه «یک رویکرد عمومی برای طراحی دسته‌ای از الگوریتم‌ها قلمداد می‌شود.» [۵۱]. هر چند در بسیاری از مسائل، حل بهینه سراسری توسط راهبرد حریصانه حاصل نمی‌شود، اما با این حال این روش ممکن است منجر به حل‌های بهینه محلی شود و این مقادیر تقریبی برای بهینه سراسری در یک زمان منطقی قلمداد می‌شوند [۵۰].»

گام‌های الگوریتم حریصانه پیشنهادی برای مسئله جهت‌یابی با افق زمانی وابسته (OPDHT) به شرح ذیل پیشنهاد و شمای کلی از مراحل عملیاتی آن در شکل ۱ ارائه داده شده است. این الگوریتم با استفاده از نرم‌افزار گمز (ویرایش ۲۴،۱،۲) کد شده است.

مرحله ۱: شروع

مرحله ۲: تعیین و بروزرسانی مجموعه رئوس باقیمانده در مرحله m ($C^m = S - A^m - B^m$)

مرحله ۳:

مرحله ۱-۳: در صورتی که شرط $C^m \neq \{N\}$ برقرار باشد، حل مدل پایه‌ای مسئله جهت‌یابی بر اساس مجموعه رئوس باقی‌مانده

مرحله ۲-۳: در صورتی که شرط $C^m = \{N\}$ برقرار باشد، با رفتن به رأس مقصد نهایی الگوریتم خاتمه می‌یابد.

انتخاب رأس بعدی برای حرکت از بین نقاط کاندید زیر:

۱- رأسی که در جواب بهینه حاصل از حل مدل قبل ایجاد شده است (v^m)

۲- مقصد نهایی (N)

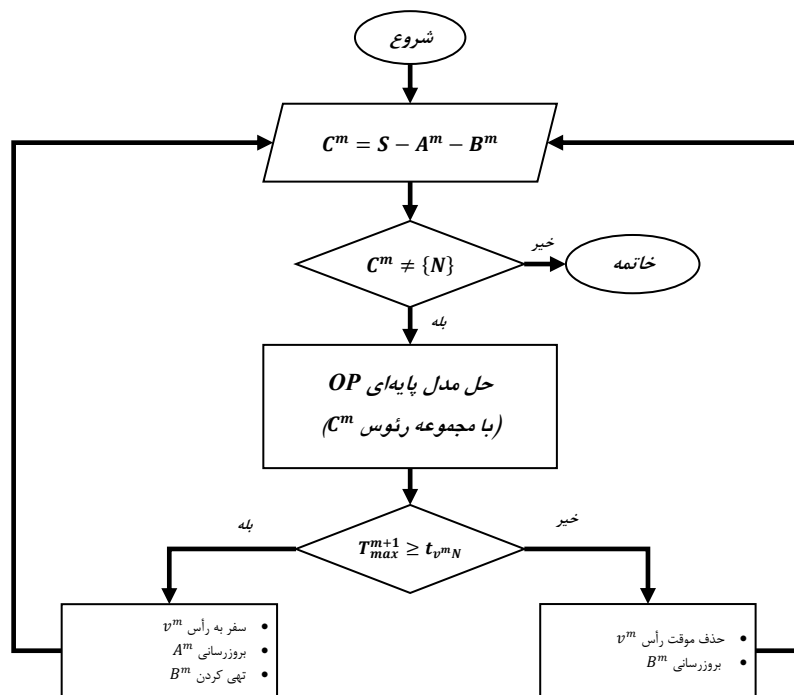
مرحله ۳-۳: انتخاب رأس v^m به عنوان رأس بعدی برای حرکت و بروزرسانی مجموعه رئوس A^m و تهی کردن B^m رفتن به

مرحله ۲: اگر با ورود به رأس v^m ، بر اساس ضریب بازدید، مقدار زمان باقی‌مانده در دسترس (T_{max}^{m+1}) بیشتر از مدت

زمان مورد نیاز جهت حرکت از رأس v^m تا مقصد نهایی باشد ($t_{v^m N}$) یعنی $T_{max}^{m+1} \geq t_{v^m N}$

مرحله ۳-۴: در غیر این صورت حذف موقت رأس v^m از مثال عددی و بروزرسانی مجموعه رئوس B^m و رفتن به مرحله ۲،

انتخاب مقصد نهایی به عنوان رأس بعدی (و طبیعتاً رأس نهایی) برای حرکت.



شکل ۱- شمای الگوریتم حریصانه پیشنهادی برای حل مسئله جهت‌یابی با افق زمانی وابسته

۴. بررسی و تحلیل نتایج حاصل از حل مثال‌های تصادفی با الگوریتم حل پیشنهادی

این بخش سعی در بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی بر اساس نتایج حاصل از حل تعدادی مسئله تصادفی برای مسئله OPDTH دارد. این بررسی‌ها بر عملکرد الگوریتم پیشنهادی در شرایط ذیل متمرکز شده است:

۱. بررسی تغییرات ایجاد شده در مقادیر «بهینه تابع هدف» پس از اعمال ضرایب بازدید: با توجه به اینکه برای حل این مسائل در هر دو حالت بدون و با ضرایب بازدید از نرم‌افزار اکسل استفاده شده است؛ لذا این مقایسه در سطح بهینگی است.
۲. بررسی فاصله مقادیر «بهینه تابع هدف» در حالت بدون ضرایب بازدید با مقادیر «تابع هدف^{۱۸}» در حالت با ضرایب بازدید
۳. بررسی فاصله مقادیر «بهینه تابع هدف^{۱۹}» با مقادیر «تابع هدف^{۲۰}» در حالت با ضرایب بازدید

۴. در خصوص مسیره‌های بهینه و مقادیر بهینه تابع هدف و همچنین نحوه بدست آوردن آن‌ها، ذکر نکاتی به شرح ذیل حائز اهمیت می‌باشد:
- با استفاده از نرم‌افزار متلب کلیه مسیره‌های ممکن به همراه مقادیر کلیدی آن‌ها (شامل طول مسیر و مجموع امتیاز مسیر)، تولید شده و خروجی جهت یافتن جواب‌های بهینه در نرم‌افزار اکسل مورد استفاده قرار گرفته است.
۵. فایل اکسل هر دسته از مسائل تولید شده، با در نظر گرفتن ضرایب بازدید برای هر یک از رئوس، جهت محاسبه مقادیر اصلاح شده T_{max} پس از بازدید هر رأس و مقدار باقیمانده از T_{max} پس از بازدید کلیه رئوس، فرمول‌بندی شده است.
۶. با وارد نمودن مقادیر T_{max} در فایل اکسل مربوطه و انجام فیلترهای مناسب در نرم‌افزار اکسل، جواب بهینه کلی^{۱۱} (به جهت اینکه از روش شمارش کامل استفاده می‌شود) مشخص شده است.

۱. ۴. بررسی تغییرات ایجاد شده در مقادیر «بهینه تابع هدف» پس از اعمال ضرایب بازدید در مسائل کوچک تصادفی

جدول ۴ به بررسی تغییرات ایجاد شده در مقادیر «بهینه تابع هدف» پس از اعمال ضرایب بازدید در مسائل تصادفی اختصاص دارد.

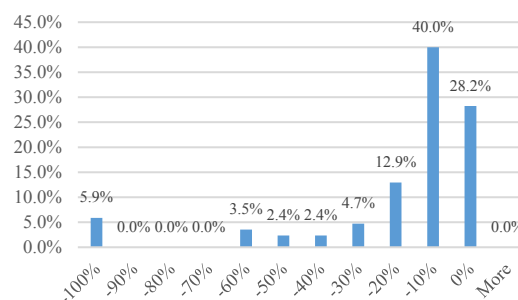
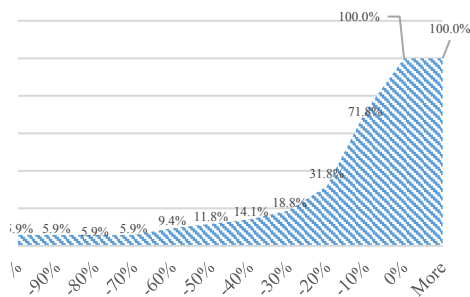
جدول ۴- تغییرات ایجاد شده در مقادیر تابع هدف پس از اعمال ضرایب بازدید

Series No.	NO	Tmax	Score			Score Changing (%)			
			A	B	C	A vs. B	A vs. C	B vs. C	
Series 1	1	4.77	66	0	0	-100.0%	-100.0%	0.0%	
	2	21.53	110	66	66	-40%	-40.0%	0.0%	
	3	21.91	176	66	66	-62.5%	-62.5%	0.0%	
	4	27.42	220	176	176	-20%	-20.0%	0.0%	
Series 2	1	8.638	195	195	195	0.0%	0.0%	0.0%	
	2	8.925	221	195	195	-11.8%	-11.8%	0.0%	
	3	8.983	416	195	195	-53.1%	-53.1%	0.0%	
	4	11.368	572	416	416	-27.3%	-27.3%	0.0%	
	5	16.243	689	572	572	-17.0%	-17.0%	0.0%	
Series 3	1	17.979	42	0	0	-100.0%	-100.0%	0.0%	
	2	20.199	84	42	42	-50.0%	-50.0%	0.0%	
	3	25.068	126	84	42	-33.3%	-66.7%	-50.0%	
	4	29.523	154	126	70	-18.2%	-54.5%	-44.4%	
	5	39.041	182	154	70	-15.4%	-61.5%	-54.5%	
	6	43.497	210	182	154	-13.3%	-26.7%	-15.4%	
	7	48.387	217	203	175	-6.5%	-19.4%	-13.8%	
	8	50.965	231	203	154	-12.1%	-33.3%	-24.1%	
	9	53.858	245	210	154	-14.3%	-37.1%	-26.7%	
	10	58.314	273	245	147	-10.3%	-46.2%	-40.0%	
Series 4	1	6.583	144	0	0	-100.0%	-100.0%	0.0%	
	2	7.649	204	144	60	-29.4%	-70.6%	-58.3%	
	3	10.609	252	204	144	-19.0%	-42.9%	-29.4%	
	4	11.675	312	252	204	-19.2%	-34.6%	-19.0%	
	5	14.314	336	312	312	-7.1%	-7.1%	0.0%	
	6	16.504	384	336	276	-12.5%	-28.1%	-17.9%	
	7	17.343	396	336	336	-15.2%	-15.2%	0.0%	
	8	17.628	420	336	336	-20.0%	-20.0%	0.0%	
	9	18.34	444	384	336	-13.5%	-24.3%	-12.5%	
	10	22.006	468	444	336	-5.1%	-28.2%	-24.3%	
	11	23.072	528	444	444	-15.9%	-15.9%	0.0%	
	12	28.569	576	528	528	-8.3%	-8.3%	0.0%	
Series 5	1	3.823	60	60	60	0.0%	0.0%	0.0%	
	2	5.382	96	60	60	-37.5%	-37.5%	0.0%	
	3	5.422	156	60	60	-61.5%	-61.5%	0.0%	
	4	8.998	162	156	156	-3.7%	-3.7%	0.0%	
	5	9.037	222	156	156	-29.7%	-29.7%	0.0%	
	6	13.174	258	222	222	-14.0%	-14.0%	0.0%	
	7	15.953	270	258	252	-4.4%	-6.7%	-2.3%	
	8	16.049	330	258	252	-21.8%	-23.6%	-2.3%	
	9	17.136	348	330	258	-5.2%	-25.9%	-21.8%	
	10	19.851	366	348	348	-4.9%	-4.9%	0.0%	
	11	19.947	426	348	348	-18.3%	-18.3%	0.0%	
	12	23.247	432	426	426	-1.4%	-1.4%	0.0%	
Series 5	13	23.343	492	426	348	-13.4%	-29.3%	-18.3%	
	14	26.502	546	492	492	-9.9%	-9.9%	0.0%	
	Series 6	1	3.991	126	0	0	-100.0%	-100.0%	0.0%
		2	5.338	135	135	135	0.0%	0.0%	0.0%
		3	5.799	144	135	135	-6.3%	-6.3%	0.0%
		4	5.831	270	144	126	-46.7%	-53.3%	-12.5%
		5	6.414	273	270	129	-1.1%	-52.7%	-52.2%
		6	6.753	399	273	270	-31.6%	-32.3%	-1.1%
		7	7.088	405	273	261	-32.6%	-35.6%	-4.4%
		8	7.766	408	405	390	-0.7%	-4.4%	-3.7%
		9	8.001	513	405	399	-21.1%	-22.2%	-1.5%
		10	8.052	531	405	399	-23.7%	-24.9%	-1.5%
		11	8.862	534	513	408	-3.9%	-23.6%	-20.5%
		12	9.224	633	531	522	-16.1%	-17.5%	-1.7%
		13	9.300	645	531	531	-17.7%	-17.7%	0.0%
		14	9.784	663	534	534	-19.5%	-19.5%	0.0%
		15	10.59	666	645	519	-3.2%	-22.1%	-19.5%
		16	10.733	759	645	534	-15.0%	-29.6%	-17.2%
		17	11.032	777	663	663	-14.7%	-14.7%	0.0%
		18	11.083	795	663	663	-16.6%	-16.6%	0.0%
19		12.331	909	762	651	-16.2%	-28.4%	-14.6%	
20		14.446	1020	1020	795	0.0%	-22.1%	-22.1%	
Series 7	1	9.869	10	0	0	-100.0%	-100.0%	0.0%	
	2	13.584	30	10	10	-66.7%	-66.7%	0.0%	
	3	15.765	40	30	30	-25.0%	-25.0%	0.0%	
	4	23.256	50	40	30	-20.0%	-40.0%	-25.0%	
	5	25.437	60	50	50	-16.7%	-16.7%	0.0%	
	6	26.609	70	60	40	-14.3%	-42.9%	-33.3%	
	7	33.777	80	70	50	-12.5%	-37.5%	-28.6%	
	8	34.63	90	80	70	-11.1%	-22.2%	-12.5%	
	9	42.124	100	90	70	-10.0%	-30.0%	-22.2%	
	10	44.228	110	100	90	-9.1%	-18.2%	-10.0%	
	11	47.836	120	110	90	-8.3%	-25.0%	-18.2%	
	12	55.51	130	120	120	-7.7%	-7.7%	0.0%	
	13	55.514	140	120	120	-14.3%	-14.3%	0.0%	
	14	63.428	150	140	140	-14.3%	-6.7%	0.0%	
	15	63.461	160	140	140	-6.7%	-12.5%	0.0%	
	16	78.332	170	160	160	-12.5%	-5.9%	0.0%	
	17	78.688	180	160	140	-5.9%	-22.2%	-12.5%	
	18	78.721	190	160	140	-11.1%	-26.3%	-12.5%	
	19	86.366	200	160	160	-15.8%	-20.0%	-12.5%	
	20	86.399	210	160	160	-20.0%	-23.8%	-12.5%	

A: Without Visiting Coefficient (Excel 2013), B: With Visiting Coefficient (Excel 2013), C: With Visiting Coefficient GAMS(Proposed Algorithm)

در خصوص جدول ۴، نکاتی به شرح ذیل دارای اهمیت می‌باشند:

- هر چند تصادفاً مقادیر ستون آخر صفر یا کوچک‌تر از صفر می‌باشند، اما این موضوع کاملاً اتفاقی بوده و در شرایط مسائل تصادفی رخ داده است. برای مثال در صورتی که ترتیب بازدید رئوس به گونه‌ای باشد که چگالی رئوس با ضرایب بازدید مثبت بر چگالی رئوس با ضرایب بازدید منفی، غلبه نموده و از این بابت سبب افزایش مقدار افق زمانی در دسترس شود، در این صورت امکان بازدید از رئوس بیشتری وجود داشته که متعاقباً می‌تواند افزایش در مقدار امتیاز را به همراه داشته باشد. لیکن با توجه به اینکه ضرایب بازدید به صورت ریسک حاصل از بازدید قابل ترجمه و تفسیر نیز می‌باشد؛ مقادیر کاهشی برای امتیاز بدست آمده از قابلیت تفسیر بهتری در دنیای واقعی برخوردار خواهد بود.
- از آنجایی که مسیرهای ایجاد شده در هر دو حالت، مسیرهای بهینه می‌باشند؛ فلذا وجود مقدار غیرصفر (مثبت یا منفی) در ستون‌های آخر به معنای آن است که ضرایب بازدید (به عنوان عاملی که مسائل را به شرایط دنیای واقعی نزدیک‌تر می‌نماید) جواب‌هایی که در مسائل کلاسیک بدست می‌آیند را تا چه میزان تحت تاثیر افزایشی یا کاهشی قرار داده و عملاً سبب بی‌اعتبار شدن جواب‌های منتج از مسائل کلاسیک می‌شوند. بازه تغییرات امتیازات بدست آمده در شرایط جدید مسائل می‌تواند از ۱۰۰٪- تا ۱۰۰٪+ باشد.
- خلاصه‌ای تصویری به منظور درک بهتر فواصل موجود در جدول ۴ در شکل ۲ و شکل ۳ ارائه شده است. مطابق با اشکال مذکور، در شرایط تصادفی مسائل تولید شده، در حدود ۶۸،۲٪ از مسائل کمتر از ده درصد کاهش و در حدود ۸۱،۱٪ از مسائل کمتر از بیست درصد کاهش در مقادیر امتیازات کسب شده نسبت به حالت بهینه بدون ضرایب بازدید وجود داشته است.



شکل ۲- نمودار فراوانی (درصدی) میزان تغییرات ایجاد شده در مقادیر «بهینه» تابع هدف» پس از اعمال ضرایب بازدید در مسائل کوچک تصادفی
شکل ۳- نمودار فراوانی (درصدی) میزان تغییرات ایجاد شده در مقادیر «بهینه» تابع هدف» پس از اعمال ضرایب بازدید در مسائل کوچک تصادفی

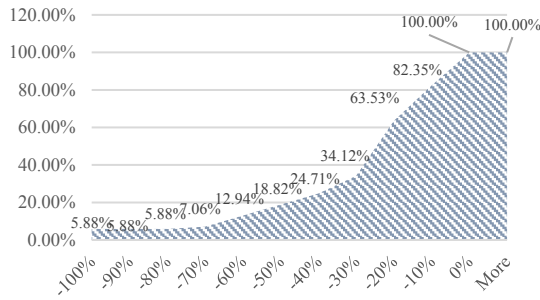
۲.۴. بررسی فاصله مقادیر «بهینه تابع هدف» در حالت بدون ضرایب بازدید با مقادیر «تابع هدف» در حالت با ضرایب

بازدید

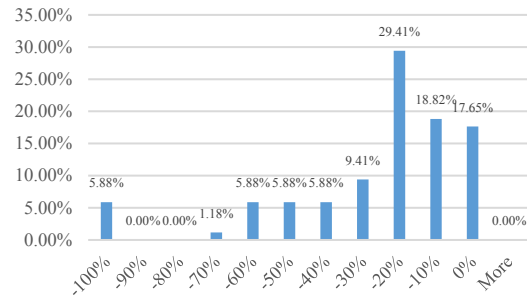
در این بخش فاصله بین مقادیر «بهینه تابع هدف» در حالت بدون ضرایب بازدید با مقادیر «تابع هدف» در حالت با ضرایب بازدید مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند. این مقایسه از این جهت حائز اهمیت است که در مسائل با سایز کمی بزرگ‌تر عملاً مقدار بهینه تابع هدف در حالت با ضرایب بازدید در دسترس نبوده و صرفاً مقدار تابع هدف پس از حل مسئله با ضرایب بازدید (در این مقاله نتایج حاصل از بکارگیری الگوریتم پیشنهادی) موجود است. فلذا این مقایسه می‌تواند تحلیل و تخمینی در چنین شرایط در اختیار قرار دهد. در خصوص مقایسه نتایج (ارائه شده در جدول ۴)، نکاتی به شرح ذیل حائز اهمیت می‌باشند:

همانند توضیحات ارائه شده در بخش (۰):

- ۱.۱. صفر یا کوچک‌تر از صفر بودن مقادیر ستون آخر تصادفی بوده و امکان مثبت شدن این مقادیر بنابر شرایط مسئله امکان‌پذیر است.
- ۱.۲. وجود مقدار غیرصفر (مثبت یا منفی) در ستون‌های آخر میزان تاثیر افزایشی یا کاهشی ضرایب بازدید را در جواب‌های مسائل کلاسیک نشان می‌دهد. بازه تغییرات امتیازات بدست آمده در شرایط جدید مسائل می‌تواند از ۱۰۰٪- تا ۱۰۰٪+ باشد.
۲. خلاصه‌ای تصویری به منظور درک بهتر فواصل موجود در جدول ۴ در شکل ۳ و شکل ۵ ارائه شده است. مطابق با اشکال مذکور، در شرایط تصادفی مسائل تولید شده، در حدود ۳۶،۵٪ از مسائل کمتر از ده درصد کاهش و در حدود ۶۵،۹٪ از مسائل کمتر از بیست درصد کاهش در مقادیر امتیازات کسب شده نسبت به حالت بهینه بدون ضرایب بازدید وجود داشته است که کاهش این مقادیر نسبت به حالت ارائه شده در بخش (۰) به جهت ماهیت الگوریتم پیشنهادی که به نوعی رفتار حریصانه از خود نشان می‌دهد، طبیعی بوده و قابل پیش‌بینی می‌باشد.



شکل ۵- نمودار فراوانی (درصدی تجمعی) میزان فاصله مقادیر «بهبهینه تابع هدف» در حالت بدون ضرایب بازدید با مقادیر «تابع هدف» در حالت با ضرایب بازدید

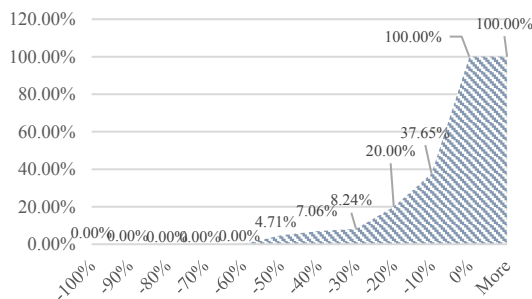


شکل ۴- نمودار فراوانی (درصدی) میزان فاصله مقادیر «بهبهینه تابع هدف» در حالت بدون ضرایب بازدید با مقادیر «تابع هدف» در حالت با ضرایب بازدید

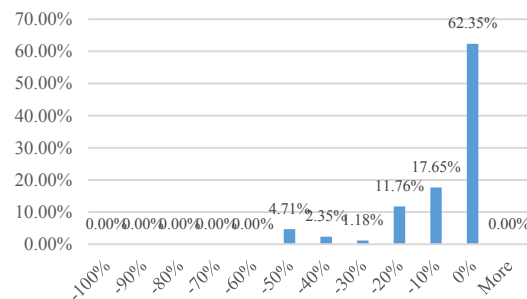
۳.۴. بررسی فاصله مقادیر «بهبهینه تابع هدف» با مقادیر «تابع هدف» در حالت با ضرایب بازدید

این بررسی صرفاً در خصوص مسائلی که با داده‌های تصادفی در این رساله تولید شده است، قابل انجام می‌باشد؛ چرا که به لحاظ محاسباتی و با توجه به پیچیدگی مسئله جهت‌یابی، امکان یافتن مقادیر بهینه تابع هدف در حالتی که ضرایب بازدید در مسئله لحاظ شده‌اند، امکان‌پذیر نمی‌باشد؛ لذا این بخش از جهت نمایش میزان تطابق و ایجاد یک تخمین کلی در داده‌های مسائلی تصادفی تولید شده، تدوین شده است. در ادامه مقایسه‌ای مابین مقادیر «بهبهینه تابع هدف» در حالت با ضرایب بازدید با مقادیر «تابع هدف» حاصل از اجرای الگوریتم برای مسائلی تصادفی تولید شده ارائه می‌شود. در خصوص مقایسه نتایج (ارائه شده در جدول ۴، پیوست ۳)، نکاتی به شرح ذیل حائز اهمیت می‌باشند:

- با توجه به اینکه در جدول ۴، مقایسه خروجی‌های یک الگوریتم حریصانه با یک حالت بهینه صورت گرفته است؛ لذا در بهترین حالت، مقادیر فاصله (مقادیر ستون آخر) برابر صفر خواهند بود؛ بدین معنا که جواب حاصل از الگوریتم با جواب بهینه تطابق کامل دارد.
- یکسان بودن مقادیر تابع هدف در هر دو حالت (فاصله ۰٪) صرفاً بیانگر برابر توابع هدف در دو حالت بوده و لزومی به یکسان بودن مسیرهای حاصله نخواهد بود.
- خلاصه‌ای تصویری به منظور درک بهتر فواصل موجود جدول ۴ در شکل ۶ و شکل ۷ ارائه شده است. مطابق با اشکال مذکور، در شرایط تصادفی مسائلی تولید شده، در حدود ۶۲٫۴٪ از مسائل هیچ فاصله‌ای با جواب بهینه نداشته‌اند. همچنین در ۸۰٪ از مسائل کمتر از ده درصد کاهش و در حدود ۹۱٫۸٪ از مسائل کمتر از بیست درصد کاهش در مقادیر امتیازات کسب شده نسبت به حالت بهینه با ضرایب بازدید وجود داشته است. که این مقادیر در مجموع نشان‌دهنده عملکرد خوب و قابل قبول الگوریتم پیشنهادی حریصانه در خصوص داده‌های مسائلی تصادفی می‌باشد.



شکل ۷- نمودار فراوانی (درصدی تجمعی) میزان فاصله مقادیر «بهبهینه تابع هدف» با مقادیر «تابع هدف» در حالت با ضرایب بازدید



شکل ۶- نمودار فراوانی (درصدی) میزان فاصله مقادیر «بهبهینه تابع هدف» با مقادیر «تابع هدف» در حالت با ضرایب بازدید

نتیجه‌گیری

از آنجایی که موضوع قابلیت کاربردپذیری مدل‌های بهینه‌سازی و روش‌های حل آن‌ها، هم در بین مجریان و هم در بین پژوهشگران این از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است؛ در این مقاله سعی گردید با لحاظ نمودن «ریسک بازدید» برای هر یک از رئوس در مدل پایه مسئله جهت‌یابی، قدمی موثر در این راستا برداشته شود. بدین صورت که به منظور کاهش تبعات و آثار نامطلوب حاصل از سفرهای شهری از طریق بهینه‌سازی اقتصادی و زمانی مسائل مختلف موجود در حوزه حمل و نقل شهری، نوع جدیدی از مسئله جهت‌یابی تحت عنوان مسئله جهت‌یابی با افق زمانی وابسته (OPDTH) ارائه گردید که در آن افق زمانی، به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای مسئله، پس از هر مرحله از بازدید، متناسب با ضریب بازدید مفروض برای هر یک از رئوس دچار تغییرات شده و از این رو نیاز به حل یک زیرمسئله با ساختار مشابه مسئله اولیه و منشعب از آن می‌باشد. با عنایت به پیچیدگی‌های مسئله و حالت تکرار شونده‌ی آن و ناکافی بودن روش‌های کلاسیک در حل مسئله مذکور، در این مقاله الگوریتمی مبتنی بر مفاهیم حریم‌های پیشنهاد گردید. رویکرد حل پیشنهادی در این مقاله در واقع یک سیستم پشتیبان تصمیم (DSS) اولیه برای مسئله در چنین شرایطی قلمداد می‌شود و از این رو می‌تواند زمینه‌ساز مناسبی جهت ایجاد DSS‌های پیشرفته‌تری در این خصوص باشد. این بحث در حوزه‌های نظامی، امداد و نجات و گردشگری از اهمیت بسزایی برخوردار است. برای مثال در حوزه گردشگری توسعه DSS‌های پیشنهاددهنده مسیر گردشگری در بستر گوشی‌های هوشمند از نظر کاربردی و تحقیقاتی مورد توجه بسیار می‌باشد و مروری از این سیستم‌ها در [۵۲، ۵۳] در دسترس است.

بررسی‌های انجام شده بر روی نتایج حاصل از بکارگیری الگوریتم جهت حل ۸۵ مسئله کوچک تصادفی تولید شده در این پژوهش، حاکی از آن است که در حدود ۶۲٫۴٪ از مسائل جواب‌های حاصل شده کاملاً منطبق بر جواب‌های بهینه بوده است. مضافاً اینکه این الگوریتم در ۸۰٪ از مسائل کمتر از ده درصد و در حدود ۹۱٫۸٪ از مسائل کمتر از بیست درصد تغییر در مقادیر تابع هدف نسبت به حالت بهینه ایجاد نموده است. با عنایت به این موضوع و همچنین توجه به شرایط تصادفی در تولید مسائل نمونه می‌توان عملکرد الگوریتم پیشنهادی را بعد کیفیت جواب‌های خروجی مطلوب ارزیابی نمود.

در این مقاله حل مسئله در ابعاد کوچک مد نظر قرار گرفته است. این موضوع از منظر کاربردی دارای مصادیق متعددی در دنیای واقعی می‌باشد؛ برای مثال در شرایط بحرانی بروز آتش‌سوزی در یک منطقه جنگلی، مناطق امداد رسانی به نواحی کوچک‌تری تقسیم شده و تمرکز امداد رسانی به همان نواحی کوچک‌تر محدود می‌شود. این کار عموماً با امداد رسانی‌های متعدد که یک یا چند مورد آن‌ها به هر ناحیه اختصاص می‌یابد انجام می‌شود. بدیهی است پتانسیل‌های امداد رسانی (نقاط آسیب‌دیده) در هر ناحیه یک مسئله در ابعاد کوچک را تشکیل داده و حل مسئله اصلی به حل چندین مسئله در ابعاد کوچک محدود می‌شود. یا در مثال دیگری در حوزه نظامی، نقاط استراتژیک دشمن جهت شناسایی توسط پهبادهای شناسایی که از یک سو در برد پهبادها به لحاظ سوخت و زمان قرار داشته باشند و از سوی دیگر ارزش استراتژیک جهت انجام عملیات شناسایی را داشته باشند، تعداد محدودی بوده و حل یک مسئله در ابعاد کوچک را ایجاد می‌نماید. با وجود عملکرد مطلوب الگوریتم در ابعاد کوچک آن، با توجه به زمان‌بر بودن حل مسائل در ابعاد بزرگ‌تر با استفاده از این الگوریتم (به جهت مبتنی بر حل دقیق بودن الگوریتم)، توسعه الگوریتم مذکور با استفاده از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری برای حل مسائل در ابعاد بزرگ‌تر زمینه مناسبی برای تحقیقات آتی قلمداد می‌گردد. بدین معنا که با طراحی نمونه‌های آزمایشی مناسب و انجام تست‌های آماری مختلف، قواعد دقیق‌تری را برای کشف و شناسایی میزان انطباق جواب‌های حاصل از الگوریتم با حالت بهینه بکار گرفت. همچنین با توجه به اینکه در الگوریتم پیشنهادی این مقاله در گام تعیین رأس آتی جهت بازدید، موقتاً از ضرایب بازدید صرف نظر می‌شود؛ ارائه الگوریتم‌ها و روش‌های حلی که بتواند در هر مرحله به گونه‌ای تصمیم‌گیری نماید که در آن به Tradeoff بین ریسک بازدید (ضرایب بازدید) و امتیاز قابل کسب از هر رأس توجه شود، می‌تواند جواب‌های ارزشمندتر و نزدیک‌تر به دنیای واقعی را برای مسئله OPDTH فراهم نماید.

منابع

- [1] Vansteenwegen, P., W. Souffriau, and D. VanOudheusden, *The orienteering problem: A survey*. *European Journal of Operational Research*, 2011. 209(1): p. 1-10.
- [2] Gunawan, A., H.C. Lau, and P. Vansteenwegen, *Orienteering problem: A survey of recent variants, solution approaches and applications*. *European Journal of Operational Research*, 2016. 255(2): p. 315-332.
- [3] Kantor, M.G. and M.B. Rosenwein, *The orienteering problem with time windows*. *Journal of the Operational Research Society*, 1992: p. 629-635.
- [4] Ghobber, I., T. Tlili, and S. Krichen. *Partition Crossover Evolutionary Algorithm for the Team Orienteering Problem with Time Windows*. in *International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems*. 2018. p. 200-211, Springer, Cham.



- [5] Karimi, A. and M. Bashiri, *The bi-team orienteering problem with time window*. *International Journal of Services and Operations Management*, 2018. 30(2): p. 203-225.
- [6] Sun, P., et al., *The time-dependent capacitated profitable tour problem with time windows and precedence constraints*. *European Journal of Operational Research*, 2018. 264(3): p. 1058-1073.
- [7] Tricoire, F., et al., *Heuristics for the multi-period orienteering problem with multiple time windows*. *Computers & Operations Research*, 2010. 37(2): p. 351-367.
- [8] Tricoire, F., et al. *Algorithms for the multi-period orienteering problem with multiple time windows*. in *EU/MEeting 2008: Workshop on Metaheuristics for Logistics and Vehicle Routing*, paper. 2008, (Vol.23).
- [9] Kotiloglu, S., et al., *Personalized multi-period tour recommendations*. *Tourism Management*, 2017. 62: p. 76-88.
- [10] Karbowska-Chilinska, J. and K. Chociej. *Optimization of Multistage Tourist Route for Electric Vehicle*. in *Computer Science On-line Conference*. 2018. p. 186-196, Springer, Cham.
- [11] Mei, Y., F.D. Salim, and X. Li, *Efficient meta-heuristics for the multi-objective time-dependent orienteering problem*. *European Journal of Operational Research*, 2016. 254(2): p. 443-457.
- [12] Ostrowski, K. *Evolutionary algorithm for the time-dependent orienteering problem*. in *IFIP International Conference on Computer Information Systems and Industrial Management*. 2017. p. 50-62, Springer, Cham.
- [13] Verbeeck, C., P. Vansteenwegen, and E.-H. Aghezzaf, *The time-dependent orienteering problem with time windows: a fast ant colony system*. *Annals of Operations Research*, 2017. 254(1-2): p. 481-505.
- [14] Gunawan, A., Z. Yuan, and H.C. Lau, *A Mathematical Model and Metaheuristics for Time Dependent Orienteering Problem*. 2014. PATAT.
- [15] Campbell, A.M., M. Gendreau, and B.W. Thomas, *The orienteering problem with stochastic travel and service times*. *Annals of Operations Research*, 2011. 186(1): p. 61-81.
- [16] Jiang, Y. *Constant Approximation for Stochastic Orienteering Problem with $(1+\epsilon)$ -Budget Relaxation*. in *International Computing and Combinatorics Conference*. 2017. p. 297-308, Springer, Cham.
- [17] Bian, Z. and X. Liu, *A real-time adjustment strategy for the operational level stochastic orienteering problem: A simulation-aided optimization approach*. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2018. 115: p. 246-266.
- [18] Dolinskaya, I., Z.E. Shi, and K. Smilowitz, *Adaptive orienteering problem with stochastic travel times*. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2018. 109: p. 1-19.
- [19] Liao, Z. and W. Zheng, *Using a heuristic algorithm to design a personalized day tour route in a time-dependent stochastic environment*. *Tourism Management*, 2018. 68: p. 284-300.
- [20] Varakantham, P., et al., *Risk-sensitive stochastic orienteering problems for trip optimization in urban environments*. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)*, 2018. 9(3): p. 24.
- [21] Zhang, M., et al., *Traveling salesman problems with profits and stochastic customers*. *International Transactions on Operational Research*, 2018. 25(4): p. 1297-1313.
- [22] Tsiligirides, T., *Heuristic methods applied to orienteering*. *Journal of the Operational Research Society*, 1984: p. 797-809.
- [23] Golden, B.L., L. Levy, and R. Vohra, *The orienteering problem*. *Naval research logistics*, 1987. 34(3): p. 307-318.
- [24] Bovet, J. *The selective traveling salesman problem*. in *EURO VI Conference*, Vienna. 1983.
- [25] Fischetti, M. and P. Toth, *An additive approach for the optimal solution of the prize collecting traveling salesman problem*. *Vehicle Routing: Methods and Studies*, 1988: p. 319-343.
- [26] Kataoka, S. and S. Morito, *An algorithm for single constraint maximum collection problem*. *Journal of the Operations Research Society of Japan*. 1988. 31(4): p. 515-530.
- [27] Balas, E., *The prize collecting traveling salesman problem*. *Networks*, 1989. 19(6): p. 621-636.
- [28] Hayes, M. and J. Norman, *Dynamic programming in orienteering: route choice and the siting of controls*. *Journal of the Operational Research Society*, 1984: p. 791-796.
- [29] Ma, Z., et al. *A spatio-temporal representation for the orienteering problem with time-varying profits*. in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2017 IEEE/RSJ International Conference on*. 2017. IEEE.
- [30] Schmid, V. and J.F. Ehmke. *An Effective Large Neighborhood Search for the Team Orienteering Problem with Time Windows*. in *International Conference on Computational Logistics*. 2017. p. 3-18, Springer, Cham.
- [31] Wang, W., H.C. Lau, and S.-F. Cheng. *Exact and heuristic approaches for the multi-agent orienteering problem with capacity constraints*. in *Computational Intelligence (SSCI), 2017 IEEE Symposium Series on*. 2017. IEEE.

- [32] Palomo-Martínez, P.J., et al., *A hybrid variable neighborhood search for the Orienteering Problem with mandatory visits and exclusionary constraints*. *Computers & Operations Research*, 2017. 78: p. 408-419.
- [33] Lin, S.-W. and F.Y. Vincent, *Solving the team orienteering problem with time windows and mandatory visits by multi-start simulated annealing*. *Computers & Industrial Engineering*, 2017. 114: p. 195-205.
- [34] Vincent, F.Y., et al., *Two-level particle swarm optimization for the multi-modal team orienteering problem with time windows*. *Applied Soft Computing*, 2017. 61: p. 1022-1040.
- [35] Bederina, H. and M. Hifi. *A hybrid multi-objective evolutionary algorithm for the team orienteering problem*. in *Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 2017 4th International Conference on*. 2017. IEEE.
- [36] Angelelli, E., et al., *The probabilistic orienteering problem*. *Computers & Operations Research*, 2017. 81: p. 269-281.
- [37] Ostrowski, K., et al., *Evolution-inspired local improvement algorithm solving orienteering problem*. *Annals of Operations Research*, 2017. 253(1): p. 519-543.
- [38] Gedik, R., et al., *A constraint programming approach for the team orienteering problem with time windows*. *Computers & Industrial Engineering*, 2017. 107: p. 178-195.
- [39] Yahiaoui, A.-E., A. Moukrim, and M. Serairi. *Hybrid Heuristic for the Clustered Orienteering Problem*. in *International Conference on Computational Logistics*. 2017. p. 19-33, Springer, Cham.
- [40] Kobeaga, G., M. Merino, and J.A. Lozano, *An efficient evolutionary algorithm for the orienteering problem*. *Computers & Operations Research*, 2018. 90: p. 42-59.
- [41] Archetti, C., F. Carrabs, and R. Cerulli, *The Set Orienteering Problem*. *European Journal of Operational Research*, 2018. 267(1): p. 264-272.
- [42] Lu, Y., U. Benlic, and Q. Wu, *A memetic algorithm for the orienteering problem with mandatory visits and exclusionary constraints*. *European Journal of Operational Research*, 2018. 268(1): p. 54-69.
- [43] Martín-Moreno, R. and M.A. Vega-Rodríguez, *Multi-Objective Artificial Bee Colony algorithm applied to the bi-objective orienteering problem*. *Knowledge-Based Systems*, 2018. 154: p. 93-101.
- [44] Yu, Q., et al., *A metaheuristic approach to the orienteering problem with service time dependent profits*. *European Journal of Operational Research*, 2018. (In Press)
- [45] Ni, Y., et al., *Models and Algorithm for the Orienteering Problem in a Fuzzy Environment*. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2018. 20(3): p. 861-876.
- [46] Bianchessi, N., R. Mansini, and M.G. Speranza, *A branch- and- cut algorithm for the Team Orienteering Problem*. *International Transactions in Operational Research*, 2018. 25(2): p. 627-635.
- [47] Freeman, N.K., B.B. Keskin, and İ. Çapar, *Attractive orienteering problem with proximity and timing interactions*. *European Journal of Operational Research*, 2018. 266(1): p. 354-370.
- [48] Kirschstein, T. and C. Bierwirth, *The selective Traveling Salesman Problem with emission allocation rules*. *OR Spectrum*, 2018. 40(1): p. 97-124.

پی‌نوشت:

۱- گزیده آمار و اطلاعات حمل و نقل شهری تهران، معاونت و سازمان حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران (۱۳۹۳)

۲- Routing Problem

۲- Orienteering Problems (OP)

۴- Logistics Management

۵- Time Horizon

۶- Travelling Salesman (or Salesperson) Problem (TSP)

۷- در تعاریف موجود در تولیدات علمی این حوزه، اکثراً محدودیت افق زمانی را مورد بحث قرار داده‌اند و تعداد کمی از فعالیت‌ها محدودیت طول مسیر در مسئله جهت‌یابی را لحاظ کرده‌اند. در صورتی که مبنای مدل‌سازی مسافت طی شده باشد طبیعتاً می‌توان محدودیت طول مسیر را اعمال نمود. به هر حال این دو گونه مدل‌سازی به سادگی قابل تبدیل به یکدیگر هستند.

۸- Time Window

۹- Orienteering Problem with Time Window (OPTW)

۱۰- Multi Periods

۱۱- Time Dependent Orienteering Problem

۱۲- Time-Dependent Orienteering Problem

۱۳- Orienteering Problem with Dependent Time Horizon (OPDTH)

۱۴- Miller-Tucker-Zemlin (MTZ)**۱۵- Greedy****۱۶- Algorithmic Paradigm**

۱۷- اگر رأسی که در مرحله m در آن قرار گرفته‌ایم را v^{m-1} نامیده و ضرایب بازدید این رأس را با $\alpha_{v^{m-1}}$ نشان دهیم، می‌توان نوشت:

$$T_{max}^{m+1} = (T_{max}^m - t_{(v^{m-1})(v^m)}) \times (1 + \alpha_{v^{m-1}})$$

۱۸- این مقادیر ضرورتاً بهینه نبوده و خروجی حاصل از حل مسائل با استفاده از نرم‌افزار گمز در حالتی که ضرایب بازدید در آن‌ها لحاظ شده‌اند، می‌باشد.

۱۹- مقادیر حاصل از حل مسائل با در نظر گرفتن ضرایب بازدید با استفاده از نرم‌افزار اکسل (بهینه)

۲۰- مقادیر حاصل از حل مسائل با در نظر گرفتن ضرایب بازدید با استفاده از نرم‌افزار گمز

۲۱- General Optimum Solution