سنجش از دور و GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران سال هفتم، شماره یکم، بهار ۱۳۹۴
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.7, No. 1, Spring 2015

۱-۲۰

# مکان‌یابی مراکز خرید در شرایط رقابتی با استفاده از روش جست‌وجوی تابو

سعید رشیدی*[۱]، محمد طالعی[۲]، احید نعیمی[۳]

۱ و ۳. دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم اطلاعات مکانی، دانشکدهٔ مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲. استادیار گروه سیستم اطلاعات مکانی و پژوهشکده سنجش از دور، دانشکدهٔ مهندسی نقشه‌برداری (قطب علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی)، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱۱/۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۴/۱

## چکیده

مکان فعالیت‌های تجاری ازجمله مراکز خرید، نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت یا عدم‌موفقیت هر فعالیت دارد. در مکان‌یابی مراکز خرید می‌بایست به معیارها و اهداف متنوعی توجه داشت. در پژوهش حاضر دو هدف حداکثرسازی جذب تقاضای موجود و حداکثرسازی دسترسی به مراکز خرید در نظر گرفته شد. هرکدام از این اهداف، معیارهای مختلفی مانند جمعیت، شرایط رقابتی بین مراکز خرید، دسترسی به معابر اصلی، ایستگاه‌های حمل‌ونقل و پارکینگ‌های عمومی، پارک‌ها و مکان‌های تفریحی را دربرمی‌گیرند. در این پژوهش، روش تصمیم‌گیری چندهدفه برای حل مسئله به‌کار گرفته شد. روش‌های گوناگونی برای حل مسئله‌های چندهدفه ارائه شده است که به دو گروه کلی روش‌های سنتی و تکاملی تقسیم می‌شوند. روش‌های سنتی عموماً در حل مسئله‌هایی از این دست، نقصان‌هایی دارند که پژوهشگران را به‌سوی استفاده از روش‌های تکاملی سوق داده‌اند. در پژوهش حاضر از میان روش‌های تکاملی، الگوریتم جست‌وجوی تابوی چندهدفه به‌کار گرفته شد. در این مدل، ابتدا با توجه به کاربری اراضی، مکان‌های نامناسب از فضای مسئله حذف شدند و سپس الگوریتم جست‌وجوی تابو برای دستیابی به توازن اهداف در محیط رقابتی به‌کار گرفته شد. به‌منظور ارزیابی موقعیت‌های پیشنهادشده در مدل تابو، مراکز پیشنهادی با نتایج حاصل از هم‌پوشانی نقشه‌های معیار اولیه مطابقت داده شدند.

**کلیدواژه‌ها**: مراکز خرید، مکان‌یابی در شرایط رقابتی، بهینه‌سازی چندهدفه، جست‌وجوی تابو.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولیعصر (عج)، تقاطع میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکدهٔ نقشه‌برداری. تلفن: ۰۹۱۲۶۳۹۶۲۵۵
Email: Saeed.rashidi@gmail.com

## ۱- مقدمه

مکان یابی مسئله‌ای مهم در همهٔ فعالیت‌های تجاری اعم از فعالیت های خدماتی یا تولیدی است. انتخاب مکان مناسب مؤلفه‌ای حیاتی در موفقیت یا شکست مراکز خرید به‌شمار می‌آید و می‌تواند ابزاری برای بهبود و رشد بازار و افزایش سودآوری باشد. مفهوم مکان‌یابی فراتر از انتخاب مکانی با چشم انداز و دسترسی مناسب است و توجه به پارامترهایی از قبیل شرایط رقابتی بازار، جمعیت و تقاضای بازار را نیز دربر می‌گیرد. برای احداث یا بازمکان یابی تسهیلاتی جدید می‌بایست معیارهای مکانی مختلفی را در نظر گرفت. یکی از مهم‌ترین تسهیلات در زمینهٔ خدمات‌دهی، ایجاد مراکز تجاری فروش کالا (فروشگاه‌های بزرگ و زنجیره ای) است که حجم عظیمی از مشتری های بالقوه را فراهم می کند. به‌دلیل ضرورت شیوهٔ زندگی مدرن، مغازه‌های خرده‌فروشی یا مراکز فروش کوچک به مراکز خرید بزرگ در حال تغییرند (Onut et al., 2009).

## ۲- مرور تحقیقات گذشته

در مکان‌یابی تسهیلات و به‌ویژه مراکز خرید، معیارها و اهداف مختلفی مطرح می گردد، ازاین‌رو در بیشتر مطالعات از روش‌های چندهدفه برای حل مسئلهٔ مکان یابی استفاده می‌شود. پژوهشگران علوم مکانی تحقیقات زیادی در زمینهٔ ارائهٔ مدل‌های ریاضی به‌منظور مکان‌یابی تسهیلات انجام داده‌اند و توابع هدف بسیاری را متناسب با هر یک از مدل‌ها فرمول‌بندی کرده‌اند. ازجمله این تحقیقات، می توان مواردی را که در پی می‌آیند نام برد.

چنگ و همکارانش سامانهٔ اطلاعات مکانی[1] (GIS) را برای تعیین موقعیت مراکز خرید به‌کار گرفتند. مسئله به روش تصمیم‌گیری چندمشخصه طرح شد و برای هر هدف، نقشه‌های معیار موردنظر با یکدیگر هم‌پوشانی داده شدند، درنهایت تصمیم‌گیرنده می‌بایست خروجی های مختلف را با یکدیگر مقایسه و تصمیم نهایی را اخذ می‌کرد (Cheng et al., 2005).

بیلال فرهان و آلان موری، بهینه سازی چندهدفه را برای مکان‌یابی پارک‌سوارها به‌کار گرفتند. مکان‌یابی با تعریف سه هدف بیشینه کردن پوشش متقاضیان، کمینه‌کردن زمان کل سفر شهروندان از محل پارک‌سوار تا معابر اصلی، و انتخاب حداکثری از پارک‌سوارهای موجود برای کاهش هزینه‌های ساخت‌وساز دوباره صورت گرفت. مسئلهٔ مکان یابی با ایجاد ترکیب خطی از اهداف با وزن‌دهی به اهداف و تبدیل آن به مسئلهٔ تک‌هدفه دنبال شد (Farhan et al., 2006).

ویلگاس و همکارانش از سه الگوریتم مختلف ـ نظیر الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب[2] ـ به‌منظور حل مسئلهٔ مکان‌یابی انبارهای نگهداری قهوه با ظرفیت نامحدود استفاده کردند. مسئله به‌صورت دوهدفه به‌منظور پوشش حداکثری و کمینه‌سازی هزینه ها تعریف شد. اما ازآنجاکه در بررسی مسئله در مقیاس بزرگ، نقاط تقاضا بسیار محدود است و امکان حل مسئله از روش‌های سنتی نیز وجود دارد، قابلیت روش ابتکاری برای جست‌وجوی مناسب فضای جواب آشکار نمی‌شود (Villegas et al., 2006).

هالدون آیتوگ و همکارش، کارایی الگوریتم های ژنتیک را برای مسئلهٔ حداکثر پوشش با برخی روش های دیگر مقایسه کردند. ابتکار آنان در ترکیب الگوریتم ژنتیک با روش جست‌وجوی محلی است که توانایی رسیدن به جواب بهینه را در همسایگی نقطهٔ تحت بررسی آسان‌تر می‌کند؛ اما درنهایت مسئله به‌صورت تک‌هدفه حل شد (Aytug et al., 2001).

با مطالعهٔ منابع مختلف می‌توان پی برد که روش‌های سنتی همهٔ جواب‌های بهینهٔ پاره‌تو را به‌دست نمی‌دهند و برای رسیدن به هدف واحد، وزن‌دهی اهداف ناگزیر است. البته باید در نظر داشت که با وزن‌دهی به اهداف، دیدگاه‌های کارشناسی پیش از حل

1. Geographical Information System
2. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)

مسئله وارد آن می‌شوند و کارکرد مناسبی نیز برای حل مسائل چندهدفه نشان نمی دهد. در برخی موارد نیز روش حل بسیار پیچیده و هزینه‌بر می‌شود. بنابراین در تحقیقات اخیر ترجیح بر کاربرد روش‌های فراابتکاری بوده است. روش‌های ابتکاری مختلفی پیاده‌سازی شده و در مسائل مختلف به‌کار رفته‌اند، که ازجمله می‌توان به اینها اشاره کرد: الگوریتم ژنتیک[1] (GA)، تبرید شبیه‌سازی‌شده[2] (SA) و جست‌وجوی تابو[3] (TS). پیاده سازی‌های مختلفی با الگوریتم ژنتیک برای مسائل چندهدفه صورت گرفته و تبرید شبیه‌سازی‌شدهٔ چندهدفه نیز به‌وفور موجود است.

با وجود محبوبیت و کارایی جست‌وجوی تابو در مسائل بهینه سازی تک‌هدفه به‌دلیل سادگی پیاده‌سازی و سرعت همگرایی آن، که با اعمال روش های مختلف مقایسهٔ نتایج ـ ازجمله زمان محدودشده، جواب محدودشده و اجرای بدون محدودیت ـ نشان داده شده است (Marvin et al., 2005) کارهای بسیار کمی در زمینهٔ پیاده سازی حالت چندهدفهٔ جست‌وجوی تابو و خصوصاً برای مکان یابیِ رقابتی انجام شده است. در ادامه نمونه‌هایی از کاربردهای جست‌وجوی تابو در مسائل مکانی ذکر شده است.

گندرون و همکارش از جست‌وجوی تابو برای مکان یابی تسهیلات چندخدمتی با ظرفیت محدود استفاده کردند. مسئله در فضای گسسته بررسی شد و همانند بسیاری از کارهای ارائه‌شده در زمینهٔ جست‌وجوی تابو به‌صورت تک‌هدفه بود (Gendron et al., 2003).

آیفر باسار و همکارانش، جست‌وجوی تابو را برای تعیین مکان ایستگاه‌های خدمات اورژانس به‌کار بردند. مسئله فقط با هدف بیشینه‌کردن خدمات دهی به مردم تعریف شد و هدف دیگری در آن مورد توجه قرار نگرفت (Basar et al., 2009).

دمینگ لی و همکارش از جست‌وجوی تابو در حل مسئلهٔ چندمعیاره استفاده کردند و با تعریف دو تابع هدف، به حل مسئله به‌روش جست‌وجوی تابو در شرایط چندهدفه و ارائهٔ راه‌حل‌های بهینهٔ پاره‌تو پرداختند. با اینکه مسئلهٔ آنان ماهیت مکانی نداشت، اما نتایج قابلیت های جست‌وجوی تابو در حل مسائل چندهدفه درمقایسه با الگوریتم ژنتیک را نشان می داد (Lei et al., 2005).

سین‌سی‌هو از جست‌وجوی تابو برای حل مسئلهٔ مکان یابی امکانات با ظرفیت محدود استفاده کرد. تابع هدف تعریف‌شده به‌صورت کمینه‌سازی هزینهٔ احداث تعداد محدودی از امکانات بود که بتواند پاسخ‌گوی نیاز مشتریان باشد. نوآوری این روش در به‌کارگیری اپراتورهایی است که از توقف الگوریتم در نقاط کمینهٔ محلی جلوگیری می‌کنند (Sin C. Ho, 2015).

یون یانگ و همکاران از جست‌وجوی تابو در حل مسئلهٔ بهینه سازی چندهدفه برای سیستم بازسازی دفع آب‌های سطحی استفاده کردند. توابع هدف به‌صورت کمینه‌سازی هزینهٔ بازسازی و میزان آلاینده های باقی‌مانده در آبخوان تعریف شد. استراتژی انتخاب niche به‌منظور جلوگیری از توقف در نقاط بهینهٔ محلی به‌کار رفت (Yun et al., 2013).

جونز با بررسی مقالات مختلفی که روش های فراابتکاری چندهدفه در آنها به‌کار رفته بودند، دریافت که فقط در حدود شش درصد از ۱۲۴ مقالهٔ بررسی‌شده از جست‌وجوی تابو استفاده کرده‌اند (Jones et al., 2002). این در حالی است که تحقیقاتی مانند مقالهٔ ماروین[4] و همکاران (۲۰۰۵) کارایی مناسب جست‌وجوی تابو را درمقایسه با روش هایی مانند GA و SA برای انواع مختلف مسائل مکان‌یابی تسهیلات نشان می دهد. بنابراین ازآنجاکه کارهای اندکی درخصوص به‌کارگیری جست‌وجوی تابو برای مکان‌یابی و به‌ویژه مکان یابی مراکز خرید به‌صورت چندهدفه صورت گرفته است و به‌دلیل کارایی مناسب روش مذکور در یافتن

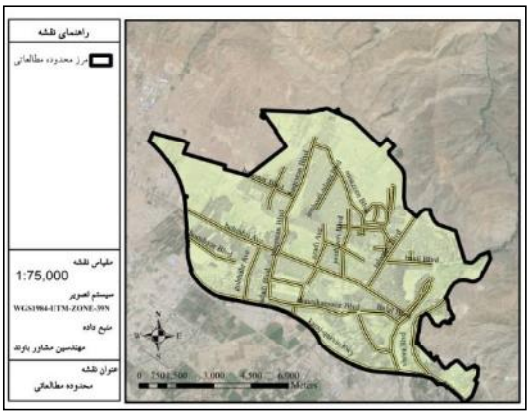
1. Genetic Algorithm (GA)
2. Simulated Annealing (SA)
3. Tabu Search (TS)
4. Marvin

جواب‌های بهینه ـ به‌استناد منـابع ـ در پـژوهش حاضـر روش فراابتکاری جست‌وجـوی تـابو بـرای حـل مسـئلهٔ مکان یابی مراکز خرید با اعمال شـرایط رقـابتی بـه‌کـار گرفته شد. منظور از شرایط رقـابتی، رقابـت در فضـای مسئله برای جـذب تقاضـای مشـتریان اسـت. بـه‌علـت محـدودیت تقاضـا، تـراکم مراکـز خریـد موجـود و پیشنهادی در یک ناحیه به‌ناچار باعث تقسیم تقاضا بین مراکز خواهد شد. چنین شرایطی مـی‌بایسـت در مـدل مکانی درنظر گرفته شود تا توزیع مناسب‌تر مراکز خرید پیشنهادی را در فضای جواب به‌دست دهد.

## ۳- مواد و روش‌ها

### ۳-۱- محدودهٔ مطالعاتی

محدودهٔ مطالعـاتی در پـژوهش حاضـر بخشـی از شـهر کرج، شامل مناطق شمالی آزادراه کرج- قزوین انتخـاب شد. جمعیت شهر کرج طبـق سرشـماری سـال ۱۳۸۵، برابر با ۱۳۷۷۴۵۰ نفر بود کـه پـس از تهـران، مشـهد، اصفهان و تبریز، پنجمین شهر پرجمعیت ایران به‌شـمار می‌آید. این شهر با ۲۴۵۲ کیلومترمربع وسـعت، در ۴۵ کیلومتری غرب تهران قرار دارد.




شکل ۱. محدودهٔ مطالعاتی

با توجه به جمعیـت و وسـعت شـهر کـرج، توانـایی عرضهٔ خدمات مطلوب به شهروندان اهمیت زیادی پیدا می‌کند. با اینکه اطلاعات درخصوص کل محدودهٔ شـهر موجود بود، ولی برای کاهش زمان محاسـبات برخـی از مناطق شهرداری کرج درنظر گرفته نشـدند. در نهایـت، محدودهٔ مطالعاتی شامل منـاطق شـمالی محـور آزادراه کـرج- قـزوین انتخـاب شـد کـه در شـکل ۱ مشـاهده می‌شود.

### ۳-۲- مکان‌یابی مراکز خرید در شرایط رقابتی

ازجمله مدل‌های سنتی کـه در مکـان‌یـابی تسـهیلاتی ماننـد مراکـز خریـد مطـرح مـی‌شـوند، مـی‌تـوان بـه مکانی یابی مراکز خرید با هزینهٔ ثابت[1]، مکان‌یابی مراکز بدون ظرفیت و مکان‌یابی با ظرفیت محدود اشاره کـرد. مکانی‌یابی تسهیلات با هزینهٔ ثابـت، اسـاس بسـیاری از مدل‌های مکان‌یابی را شکل می‌دهد. در این نوع مسائل مجموعه‌ای از متقاضیان با موقعیت و تقاضای مشخص و مکان‌هایی منتخب، بـرای احـداث مراکـز خریـد وجـود دارند. با انتخاب هریک از مکـان‌هـای مـورد نظـر بـرای ساخت، هزینهٔ ساخت ثابت و مشخصی تعیین می‌شـود. هزینهٔ جابه‌جایی مشخصی نیز بین هر مکانِ کاندیدشده و موقعیت مشـتری وجـود دارد. هـدف مسـئله، یـافتن مکان‌هایی برای مراکز خرید و الگـوی جابـه‌جـایی بـین مشتری‌ها و مراکز برای کمینه‌سـازی ترکیـب موقعیـت آنها و هزینه‌های جابه‌جایی است. در این مسـئله فـرض می‌شود که ظرفیت تسهیلات نامحدود است، هرچند که ضرورت دارد پیاده‌سازی مسئله با ظرفیت محدود بـرای برخی تسهیلات نیز در نظر گرفته شود. افزون بر اینهـا، شرایط دیگری مانند شرایط چندکالایی یا چنـددوره‌ای نیز در مدل‌های سـنتی مطـرح‌انـد. امـا عـاملی کـه در مدل‌های سنتی نادیده گرفته می‌شـود، شـرایط رقـابتی بین تسهیلات موجود و جدید و رقابت تسهیلات جدیـد با یکدیگر است. اعمال این قیود در مسئله باعث اجـرای واقعی‌تـر مکـان‌یـابی مـی‌شـود (Daskin et al., 2005, Farahani et al., 2009).

1. fixed charge

به‌علت محدودیت تقاضا، تراکم مراکز خرید در یک ناحیه باعث تقسیم تقاضا بین مراکز می‌شود. چنین شرایطی در مدل مکانی نیز باید درنظر گرفته شود تا توزیع مراکز خرید پیشنهادی را در فضای جواب بهبود بخشد. مدل‌های رقابتی در سه گروه کلی مدل‌های استاتیک، با پیش‌بینی، و پویا تقسیم‌بندی می‌شوند. در مدل‌های استاتیک خصوصیات و ویژگی‌های رقابت در بازار به‌طور کامل شناخته شده و ثابت فرض می‌شوند. در این مدل‌ها فرض می‌شود که زمان و هزینهٔ صرف‌شده برای رقابت به‌طور مؤثر به‌خاطر محصولاتی است که مهم‌ترین سود مراکز خرید جدید از آنهاست. دو مدل دیگر بیشتر برای شرایط رقابتی پیچیده‌تر و محیط های پویا استفاده می‌شوند. با توجه به اینکه هدف پژوهش حاضر صرفاً اعمال آثار رقابتی بین مراکز خرید در مکان‌یابی بهینهٔ آنهاست، در آن از مدل استاتیک استفاده می‌شود، که خود دو دستهٔ قطعی و احتمالاتی را دربر می‌گیرد. در هر دو حالت مکان‌یابی استاتیک، رقابت‌های موجود بین مراکز خرید، مشخص و ثابت در نظر گرفته می‌شوند؛ با این تفاوت که در شرایط قطعی مشتری با تمام تقاضایش از مرکز با بیشترین میزان جاذبه خرید می‌کند، اما در حالت احتمالاتی مشتری ممکن است از چندین مرکز خرید استفاده کند و تقاضا بین مراکز تقسیم می‌شود. در مسئلهٔ مورد بررسی در پژوهش حاضر، از روش احتمالاتی استفاده می‌شود، بدین صورت که در صورت پوشش تقاضا ازسوی چند مرکز خرید، تقاضا بین مراکز خدمات‌ده تقسیم می‌شود (Plastria et al., 2000).

## ۳-۳- بهینه‌سازی چندهدفه و راه‌حل‌های بهینهٔ پاره‌تو

تصمیم‌گیری، فرایند انتخاب زیرمجموعه‌ای از راه‌حل‌ها از میان همهٔ راه‌حل‌های موجود است. در فرایند تصمیم‌گیری معمولاً از یکی از دو گروه روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[1] استفاده می‌شود، که شامل تصمیم‌گیری چندهدفه[2] و تصمیم‌گیری چندمشخصه[3] هستند. تصمیم‌گیری چندمشخصه به انتخاب از میان تعدادی راه حل طبق معیارهای معمولاً متناقض اشاره دارد؛ اما در مسائل تصمیم‌گیری چندهدفه، تعداد راه‌حل‌ها بی‌نهایت است و بررسی اثر متقابل میان معیار های طراحی معمولاً به‌وسیلهٔ توابع پیوسته صورت می‌گیرد. روش چندهدفه چارچوب ریاضی‌ای را برای طراحی مجموعه‌ای از راه‌حل‌های تصمیم‌گیری ایجاد می‌کند و برای هر راه‌حل تولیدی، میزان دستیابی به هدف یا هدف‌های چندگانه بررسی می‌شود (Kulturel-Konak et al., 2004; Kahraman, 2008). مسائل بهینه سازی چندهدفه بیش از یک تابع هدف دارند. اغلب مسائلی که تصمیم‌گیرندگان در جهان واقعی با آن روبه‌رو هستند، اهداف و معیارهای چندگانه دارند. دو روش برای حل مسائل بهینه سازی چندهدفه وجود دارد. روش نخست با تولید تابع هدف ترکیبی، چند هدف را به یک هدف کاهش می‌دهد. این تابع می‌تواند با استفاده از بهینه‌کننده‌های تک‌هدفهٔ موجود، بهینه شود. وزن‌ها باید از قبل مشخص شوند (اعمال تصور و ادراک قبلی طراح بر مسئله). راه‌حل منتج از این مسئله، برداری از متغیر های طراحی خواهد بود، به‌جای اینکه کل مجموعهٔ بهینهٔ پاره‌تو را شامل شود. روش دوم برای حل مسائل چندهدفه، جست‌وجوی مستقیم برای کل مجموعهٔ بهینهٔ پاره‌تو است. این روش می‌تواند به‌شیوه‌های مختلف به‌دست آید و نیازمند اصلاحاتی در الگوریتم های تک‌هدفهٔ موجود است (Ehrgott et al., 2004). بهینه‌سازی چندهدفه به‌صورت ریاضی به‌شکل رابطه (۱) توصیف می‌شود:

رابطه (۱)

$$\min_{x\in S}[f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]$$

و

$$S = \{x \in R^m : h(x) = 0\ , g(x) \geq 0\}$$

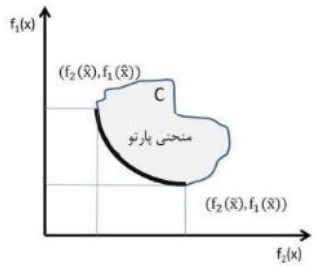
1. Multi Criteria Decision Making (MCDM)
2. Multi Objective Decision Making (MODM)
3. Multi Attribute Decision Making (MADM)

که در آن $n > 1$، توابع h و g قیود مسئله و S مجموعهٔ قیود است. فضایی که بردار هدف به آن تعلق دارد، «فضای هدف»[1] نامیده می‌شود و مجموعهٔ مورد قبول حاصل از نگاشت تحت تابع هدف، «مجموعهٔ حاصل»[2] نامیده می‌شود که با نام C در رابطه (۲) تعریف شده است:

$$C = \{y \in R^n : y = f(x), x \in S\} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این روش، مفهوم بهینگی[3] پاره‌تو تعریف می‌شود. بردار $x^* \in S$ بهینهٔ پاره‌تو برای مسئلهٔ چندهدفه نام دارد اگر همهٔ بردارهای $x \in S$ دست‌کم برای یکی از توابع هدف $f_i$ $(i = 1,2, \dots, n)$ مقدار بیشتری داشته باشند یا مقادیر یکسانی برای تمامی توابع هدف به‌دست دهند (Guan et al., 2003).

نگاشت راه‌حل‌های مؤثر، جبهه، منحنی یا سطح پاره‌تو نامیده می‌شود. شکل سطح پاره‌تو تعامل بین توابع هدف مختلف را تعیین می‌کند. مثالی از منحنی پاره‌تو در شکل ۲ نمایش داده شده است که در آن، همهٔ نقاط بین $(f_2(\hat{x}), f_1(\hat{x}))$ و $(f_2(\tilde{x}), f_1(\tilde{x}))$ جبههٔ پاره‌تو را تعریف می‌کنند (Burke et al., 2012).




شکل ۲. منحنی پاره‌تو برای مسئلهٔ بهینه‌سازی با دو هدف

### ۳-۴- مفاهیم پایه در جست‌وجوی تابو

مهم‌ترین اصل جست‌وجوی تابو امکان جابه‌جایی‌های بدون بهبود[4] برای دستیابی به جواب بهینهٔ محلی است. با استفاده از حافظه‌ای به نام لیست تابو[5]، از ایجاد حلقهٔ بازگشت به راه‌حل‌های قبلی جلوگیری می‌شود. جالب توجه است که هانسِن در سال ۱۹۸۶، روشی شبیه جست‌وجوی تابو پیشنهاد کرده بود (Dawson et al., 2007).

دو مؤلفهٔ اصلی اولیه برای هر جست‌وجوی تابو، تعریف فضای جست‌وجو و ساختار همسایگی است. فضای جست‌وجو به‌شکل ساده فضای همهٔ راه‌حل‌های ممکن است که در طول فرایند جست‌وجو می‌توان آنها را در نظر گرفت. اما محدودکردن فضای جست‌وجو به راه‌حل‌های ممکن همیشه ایدهٔ خوبی نیست، چراکه در بسیاری از موارد، حرکت به‌سمت راه‌حل‌های غیرممکن، مطلوب و در برخی موارد ضروری است. موضوعی بسیار مرتبط با تعریف فضای جست‌وجو، ساختار همسایگی است. در هر تکرار جست‌وجوی تابو، جابه‌جایی محلی که می‌توان آن را برای راه‌حل کنونی به‌کار برد با S نمایش داده می‌شود. مجموعه‌ای از راه‌حل‌های همسایه در فضای جست‌وجو تعریف و با N(S) (همسایگی S) نشان داده می‌شود. N(S) درعمل، زیرمجموعه‌ای از فضای جست‌وجو است و راه‌حل‌های به‌دست‌آمده از طریق اجرای جابه‌جایی محلی برای S را شامل می‌شود (Duarte et al., 2006).

از دیگر مفاهیم پایه‌ای در جست‌وجوی تابو، تابوها[6] هستند. تابوها برای جلوگیری از ایجاد حلقه به‌کار گرفته می‌شوند، تا از نقاط بهینهٔ محلی حاصل از جابه‌جایی‌های بدون بهبود دوری شود. بدین منظور به ابزاری نیاز است تا از جست‌وجوی منجر به گام‌های قبلی جلوگیری کند. این امر از طریق ممنوعیت برخی اعمال دست‌یافتنی است. تابوها در حافظهٔ کوتاه‌مدت[7] (فهرست تابوها) ذخیره و معمولاً تعداد ثابت و نسبتاً محدودی از اطلاعات در آنها ثبت می‌شوند. از تابوهای بسیار متداول، ثبت چند جابه‌جایی اخیر صورت‌گرفته روی راه‌حل حاضر و ممنوعیت جابه‌جایی‌های برعکس (بازگشت به حالت قبل) را می‌توان نام برد (Dawson et al., 2007).

1. Objective Space
2. Attained Set
3. Optimality
4. Non-improving
5. Tabu List
6. Tabus
7. Short term memory (STM)

بررسی دقیق روش جست‌وجوی تابو نشان می‌دهد که گاه تابوها بسیار محدودکننده هستند، به‌طوری که حتی ممکن است زمانی‌که خطر حلقه وجود ندارد از جابه‌جایی مناسب جلوگیری کنند یا باعث ایستایی کامل فرایند جست‌وجو شوند. بنابراین ضروری است از ابزارهایی استفاده شود که امکان حذف تابوها را از فهرست بدهند. این ابزارها معیار آزادسازی[1] نامیده می‌شوند. ساده‌ترین و متداول‌ترین معیار آزادسازی، اجازه به جابه‌جایی تابو به‌شرطی است که در یکی از راه‌حل‌ها مقداری بهینه‌تر از بهترین راه‌حل کنونی حاصل شود. قانون اصلی درخصوص معیار مذکور این است که اگر حلقه اتفاق نیفتد، می‌توان تابوها را نادیده گرفت (Duarte et al., 2006).

جست‌وجوی تابو دو ابزار کارآمد دیگر به نام تشدید[2] و تنوع‌بخشی[3] نیز در اختیار می‌گذارد. همان‌طورکه انسان هوشمند می‌تواند جست‌وجوی کاملی انجام دهد، در اینجا نیز باید به‌طور کامل بخش های مختلف فضای جست‌وجو کاوش شود. به‌طور کلی تشدید براساس برخی حافظه‌های میانی[4] صورت می‌گیرد. روش معمولی برای تشدید، شروع دوبارهٔ جست‌وجو از بهترین راه‌حل شناخته‌شدهٔ اخیر است. تکنیک دیگری که اغلب استفاده می‌شود، تغییر ساختار همسایگی به‌صورتی است که امکان جابه‌جایی‌های با قدرت و تنوع بیشتر را فراهم می‌کند (Dawson et al., 2007).

یکی از مشکلات اساسی همهٔ روش‌های برپایهٔ جست‌وجوی محلی، که شامل جست‌وجوی تابو نیز می‌شود، تمایل به جست‌وجوی محلی است. نتیجهٔ منفی این پدیده، احتمال کاوش‌نکردن بیشتر بخش‌های جالب توجه از فضای جست‌وجو است، که در آن‌صورت جست‌وجو با راه‌حل‌هایی که هنوز از جواب‌های بهینه فاصلهٔ بسیاری دارند به‌پایان می‌رسد. تنوع‌بخشی سازوکاری است که با جست‌وجو در نواحی کاوش‌نشدهٔ فضای جست‌وجو سعی دارد این مشکل را برطرف کند. این کار از طریق برخی از اشکال حافظهٔ بلندمدت[5] صورت می‌گیرد؛ مانند حافظهٔ فرکانس (تکرار) که در آن تعداد کل تکرارهای اجزای راه‌حل‌های مختلف ثبت می‌شود. باید تأکید کرد که اطمینان از تنوع‌بخشی درست جست‌وجو، مهم‌ترین موضوع در طراحی روش ابتکاری جست‌وجوی تابو است (Duarte et al., 2006).

### ۳-۵- پارامتر های مکان یابی و تحلیل ویژگی پارامترها

برای تعیین معیارهای انتخاب می‌بایست تعدادی از فاکتورهای کیفی و کمی که فرایند مکان‌یابی مراکز خرید را تحت تأثیر قرار می‌دهند، مدنظر قرار گیرند. البته در پژوهش حاضر به‌علت کمبود داده‌های دردسترس، از برخی معیارها صرف‌نظر گردید. شاخص‌هایی که در مکان‌یابی مراکز خرید در نظر گرفته شدند شامل اینها هستند: خصوصیات جمعیتی به‌معنی جذب حداکثری تقاضا، شرایط رقابتی میان مراکز خرید، دسترسی به پارکینگ‌های عمومی، معابر شریانی و اصلی، و ایستگاه حمل‌ونقل عمومی؛ و نیز معیار انعطاف‌پذیری به‌معنی توانایی اعمال تغییرات و توسعه‌های آتی و معیار جذابیت به‌مفهوم نزدیکی به مراکز تفریحی و سرگرمی.

برای تعیین فواصل معیارهای مورد توجه در هدف دسترسی تا مراکز خرید پیشنهادی، دو روش فاصلهٔ اقلیدسی و فاصلهٔ تحت شبکه متداول است. فرایند بهینه‌سازی، فرایندی تکراری است و انجام تحلیل شبکه برای یافتن مسیر بهینه بین تعداد زیادی مبدأ و مقصد، تحلیلی زمان‌بر است. ازآنجاکه هدف پژوهش حاضر ارائهٔ روش تصمیم‌گیری چندهدفه مبتنی بر روش جست‌وجوی تابو برای مکان‌یابی در شرایط رقابتی است، به‌منظور ساده‌ترشدن مسئله و اجتناب از پیچیدگی غیرضروری، از فاصلهٔ اقلیدسی به‌جای فاصلهٔ تحت شبکه

1. Aspiration
2. intensification
3. diversification
4. intermediate-term
5. Long Term Memory (LTM)

استفاده شد. در این فرایند یکی از معیارها، دسترسی است که به‌صورت شاخص فاصله سنجیده می‌شود. با توجه به تکراری‌بودن فرایند حل مسئلهٔ چندهدفه، در این مقاله به‌منظور تسریع و ساده‌کردن مدل‌سازی، به‌جای فاصلهٔ تحت شبکه از فاصلهٔ اقلیدسی استفاده شد.

هدف از حل مسئلهٔ مکان یابی مراکز خرید در شرایط رقابتی، یافتن بهترین توزیع n مرکز در سطح محدودهٔ مطالعاتی با توجه به شرایط و قیودی است که برای مسئله تعریف می‌شود. با درنظرگرفتن معیارهای مذکور و هدف از ایجاد این‌گونه مراکز، می‌توان دو هدف کلی برای مسئله در نظر گرفت که شامل اهداف جذب تقاضا و دسترسی می‌شود. با تعریف توابع هدف، یکی از راهکارها تعریف تابع هدف ترکیبی با وزن دهی به اهداف و تبدیل مسئله به‌حالت تک‌هدفه است. ازآنجاکه این وزن دهی برای کل فضای مسئله یکسان است و بایستی پیش از حل مسئله با نظر کارشناسی تعیین شود، از این روش حل صرف‌نظر شد. راهکار دوم، استفاده از روش حل چندهدفه و دستیابی به جواب‌های بهینهٔ پاره‌تو است که در مقالهٔ حاضر نیز از آن استفاده شد. مزیت روش مذکور این است که میزان اولویت توابع هدف پس از حل مسئله تعیین می‌شود و می‌تواند در شرایط مختلف متفاوت باشد. به‌عنوان مثال، زمانی‌که قرار است تعدادی مرکز خرید به مراکز موجود اضافه شود، ممکن است در برخی مناطق شهری یکی از اهداف بر دیگری اولویت داشته و برای هر مرکز خرید متفاوت باشد. جواب های بهینهٔ پاره‌تو این امکان را به تصمیم‌گیرندگان می‌دهند که از بین جواب‌های بهینه با توجه به شرایط متفاوت جواب مناسب را انتخاب کنند. این توابع در جدول ۱ تعریف شده‌اند. برای اعمال معیار رقابتی‌بودن مراکز خرید در پیاده‌سازی این مسئله، در صورت هم‌پوشانی محدودهٔ خدمات‌دهی مراکز، تقاضا بین مراکز تقسیم می شود. این معیار با درنظرگرفتن شعاع خدمات دهی مراکز در وضع موجود و همچنین برای مراکز پیشنهادی اعمال شد. به‌منظور تعریف پارامتر شرایط رقابتی، از لایهٔ مراکز خرید در وضع موجود استفاده گردید. لایهٔ محدودهٔ تحت پوشش مراکز خرید تولید شد، به‌طوری‌که با فاصله‌گرفتن از مراکز خرید میزان جذب تقاضای مشتریان به‌طور خطی کاهش یابد و در لایهٔ جمعیتی تولیدی اعمال شود. بدین‌ترتیب اگر فروشگاه دیگری در محدودهٔ تحت پوشش آنها قرار بگیرد، هر مرکز صرفاً بخشی از تقاضای موجود را می‌تواند کسب کند. برای استخراج زمین‌های پتانسیل دار به‌منظور احداث مراکز، زمین‌های با کاربری بایر، مخروبه و متروک شناسایی شدند. معیار انعطاف پذیری نیز با اعمال شرط مساحت اولیهٔ مناسب برای زمین‌های پتانسیل‌دار تا حدود زیادی برآورد شد و این معیار نیز در اهداف بهینه‌سازی وارد نشد. در نهایت اهداف به‌صورت روابط (۳) و (۴) تعریف شدند. در جدول ۱ این اهداف با معیارها ارائه شده‌اند.

رابطه (۳)

$$Demand\ Cap\ Obj \approx \max(pop\ density \times competitive\ condition)$$

که مؤلفه‌های آن چنین است:

$Demand\ Cap\ Obj$ = هدف جذب تقاضا

$pop\ density$ = تراکم جمعیت در هر پیکسل

$competitive\ condition$ = پارامتر اعمال شرایط رقابتی میان مراکز خرید در وضع موجود.

رابطه (۴)

$$Accessibility\ Obj \approx \max(\sum \frac{1}{d_prkg} + \frac{1}{d_pubtrns} + \frac{1}{d_prk} + \frac{1}{d_int} + \frac{1}{d_rd})$$

که مؤلفه‌های آن چنین است:

$Accessibility\ Obj$ = هدف دسترسی؛

$d_prkg$ = فاصلهٔ اقلیدسی هر پیکسل (گزینهٔ تصمیم‌گیری) از پارکینگ‌های عمومی موجود؛

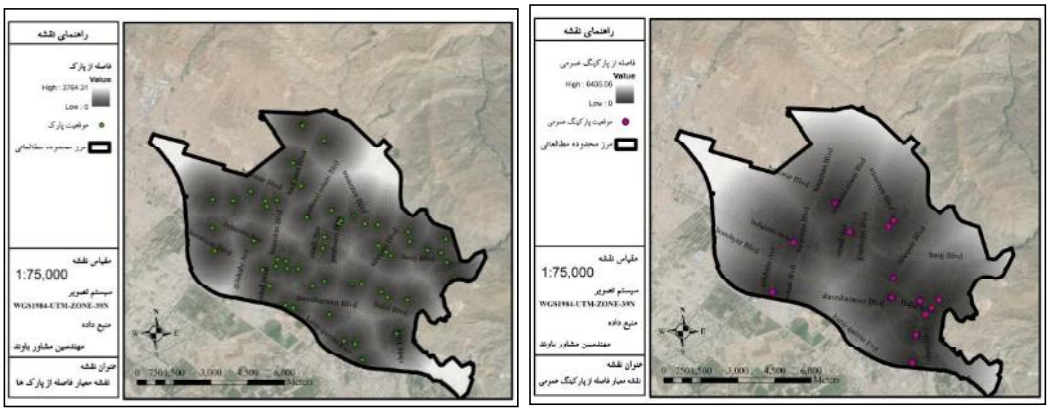
$d_pubtrns$ = فاصلهٔ اقلیدسی هر پیکسل از ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی؛

$dis_prk$ و $d_int$ = فاصلهٔ اقلیدسی هر پیکسل از پارک‌ها و مکان‌های تفریحی؛ و

$d_rd$ = فاصلهٔ اقلیدسی هر پیکسل از معابر شریانی و اصلی.

جدول ۱. تعریف اهداف و معیارها برای مسئلهٔ مکان‌یابی مراکز خرید

| عنوان هدف | معیار ارزیابی |
|---|---|
| جذب تقاضا | بیشینه‌سازی جمعیت تحت پوشش مراکز خرید با اعمال شرایط رقابتی |
| دسترسی | بیشینه‌سازی دسترسی به/از مراکز خرید براساس معیار عکس فاصله از پارکینگ‌های عمومی، ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی، پارک‌ها، مکان‌های تفریحی و سرگرمی و همچنین معابر شریانی و اصلی |



شکل ۳. نمونه‌هایی از لایه‌های رستری تولیدی، نقشهٔ فاصله از پارک و فضای سبز (راست)؛ نقشهٔ فاصله از پارکینگ‌های عمومی (چپ)

### ۳-۶- جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها

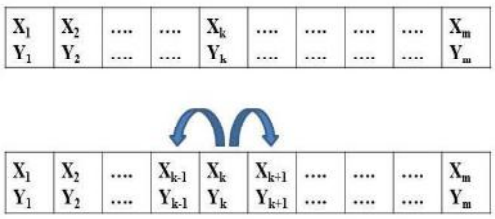
برای معیارهای جمعیتی از اطلاعات جمعیتی سرشماری سال ۱۳۸۵ مرکز آمار ایران استفاده شد. برای سایر لایه‌های اطلاعاتی نیز داده‌های پایگاه دادهٔ مهندسین مشاور باوند، مشاور پروژهٔ بازنگری طرح تفصیلی شهر کرج به‌کار رفت. به‌منظور آماده‌سازی داده ها، روش های معمول پردازش داده در GIS به‌کار گرفته شد. پس از تولید لایه‌های مختلف مربوط به معیار های موردنظر برای حل مسئله و اعمال تغییرات و اصلاحات، از این لایه‌ها به‌عنوان ورودی الگوریتم مکان یابی با به‌کارگیری روش جست‌وجوی تابو استفاده شد. نمونه‌ای از لایه‌های تولیدشده در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

### ۳-۷- پیاده‌سازی مدل مکان‌یابی مراکز خرید

در این تحقیق از الگوریتمی مشابه الگوریتم کونور و تایلی برای پیاده سازی جست‌وجوی تابوی چندهدفه استفاده شد. این الگوریتم جست‌وجوی محلی هوک و جیوز (H&J)[1] را به‌کار می‌گیرد. الگوریتم از حافظه های میان‌مدت[2]، کوتاه‌مدت و بلندمدت برای پیاده سازی تشدید و تنوع‌بخشی جست‌وجو تشکیل یافته است (Jaeggi et al., 2005). جست‌وجوی تابو به‌صورت متوالی و تکراری اجرا می‌شود: جست‌وجو از نقطهٔ شروع با انتخاب تصادفی n مکان از میان مکان‌های

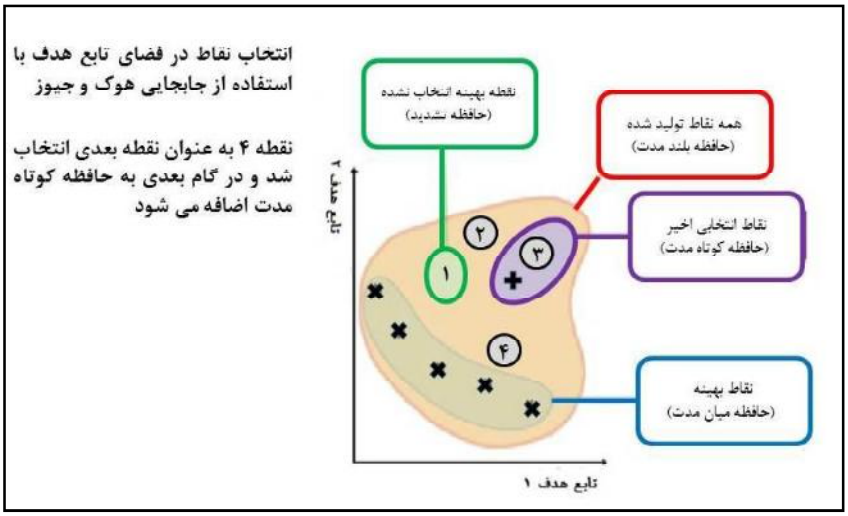
1. Hook & Jeeves
2. Medium Term Memory (MTM)

پتانسیل‌دار آغاز می‌شود و نقطهٔ جدید را در فضای جست‌وجو به‌عنوان نقطهٔ بعدی انتخاب می‌کند. برای دستیابی به نقطهٔ جدید در هر تکرار از جابه‌جایی H&J استفاده می‌شود. در جابه‌جایی H&J با افزایش و کاهش شمارهٔ مکان احداث مرکز خرید در ماتریس مکان‌های پتانسیل‌دار، 2n جابه‌جایی ممکن شناسایی می‌شود. به این شرط که نقطهٔ جدید تابو نباشد (یعنی عضوی از حافظهٔ کوتاه‌مدت نباشد) و هیچ قیدی را نقض نکند، توابع هدف برای آن نقطه ارزیابی می شود و به‌عنوان کاندیدا برای نقطهٔ بعدی در جست‌وجو در نظر گرفته می شود. در هر تکرار در مسئلهٔ تحت بررسی، با انتخاب زمین های بایر، متروک یا مخروبه با مساحت بیش از ۱۰۰۰ مترمربع، فضای جواب به حدود ۱۰۰۰ مکان پتانسیل‌دار برای احداث مراکز خرید محدود گردید. از نقاط پتانسیل‌دار به‌صورت رشته‌ای که مختصات این مکان‌ها را شامل می‌شود، به‌عنوان یکی از ورودی‌های الگوریتم استفاده شد. در این حالت جابه‌جایی های ممکن برای هر مکان شامل انتخاب یکی از همسایگی هاست. این جابه‌جایی برای تمامی n نقطه انجام می‌شود (شکل ۴).



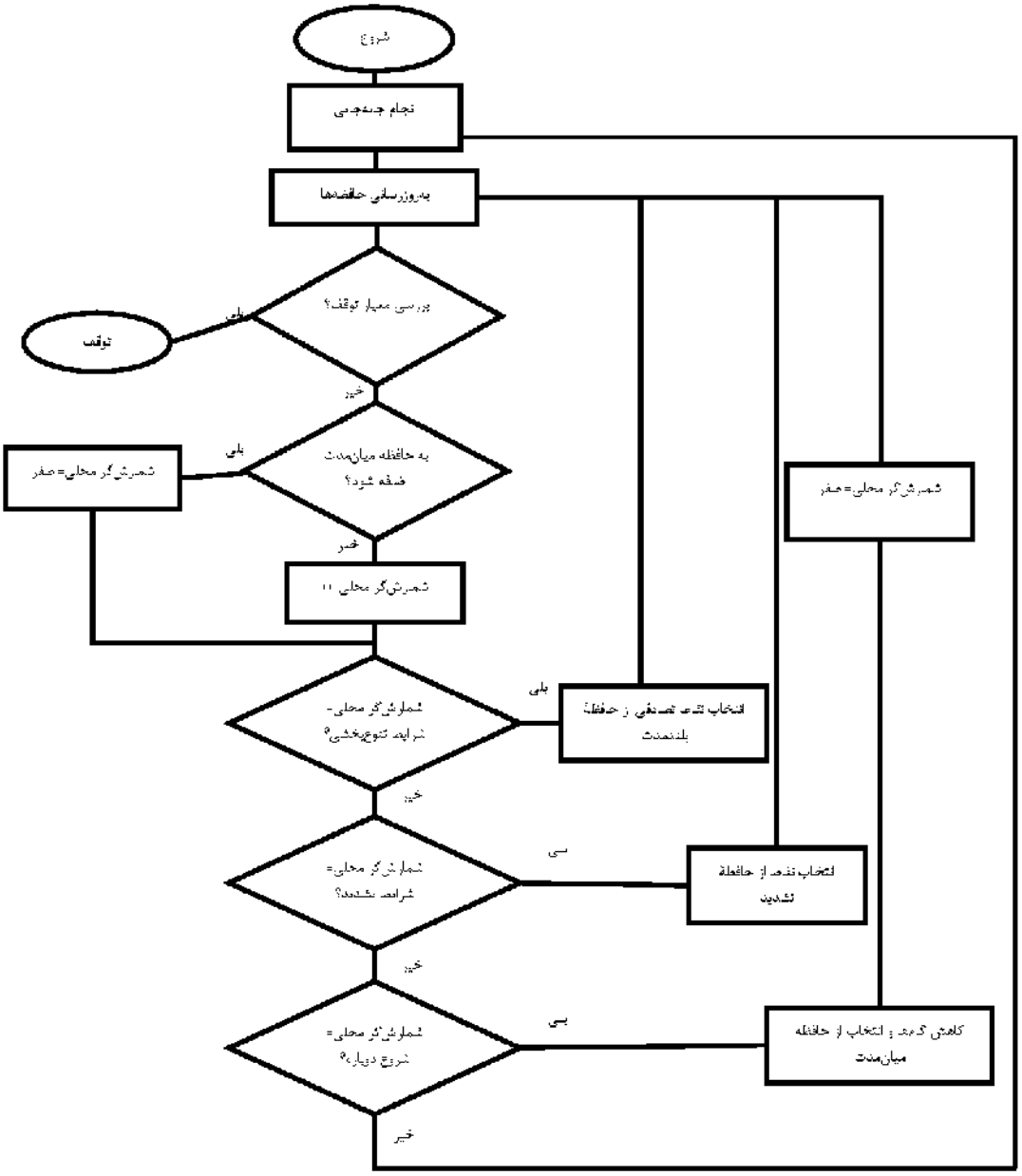

شکل ۴. جابه‌جایی تعریف‌شده برای هر مکان پتانسیل‌دار

در الگوریتم جست‌وجوی تابوی تک‌هدفه، کاندیداها مرتب می‌شوند و نقطهٔ دارای بهترین مقدار برای تابع هدف به‌عنوان نقطهٔ بعدی انتخاب می‌شود. در مورد مسئلهٔ چندهدفه نیز منطق مشابهی اجرا می‌گردد، اما مکان نقاط هم‌ارز پاره‌تو[1] به‌عنوان بهینه در نظر گرفته می شود. نقطهٔ بعدی، بهترین نقطه (یا یکی از بهترین نقاط PE) است که از راه‌حل‌های کاندیدا انتخاب می‌شود. برای شرح بیشتر، این منطق در شکل ۵ آمده است (Jaeggi et al., 2005, 2006).




شکل ۵. انتخاب نقطه برای جابه‌جایی H&J و حافظه‌های جست‌وجوی تابو
با اقتباس از Jaeggi et al., 2005

1. Pareto equivalent (PE)




شکل ۶. روندنمای الگوریتم جست‌وجوی تابوی چندهدفه

با اقتباس از Tan et al., 2003

نقاط جست‌وجوی منتخب اخیر در حافظهٔ کوتاه‌مدت ذخیره شده‌اند و تابو هستند. این فهرست شامل انتخاب‌های ۵۰ تا ۱۰۰ تکرار است که nتایی‌های انتخابی را ذخیره می‌کند. نقاط بهینه یا نزدیک بهینه در حافظهٔ میان‌مدت ذخیره می‌شوند و برای تشدید، از تمرکز جست‌وجو روی نواحی از فضای جست‌وجو با

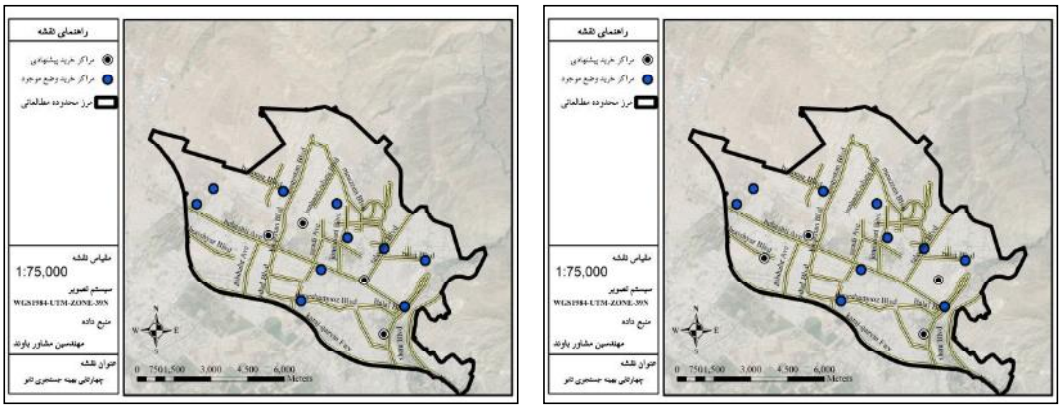
مقادیر تابع هدف مناسب استفاده می‌شود. برای حافظهٔ میان‌مدت از ماتریسی استفاده شد که مکان‌های انتخابی و توابع هزینه را نگهداری می‌کند. حافظهٔ بلندمدت، مناطقی از فضای جست‌وجو را که کاوش شده است، ذخیره می‌کند و برای تنوع‌بخشی به‌کار می‌رود. به‌منظور پیاده سازی حافظهٔ بلندمدت، ماتریسی مشابه با ماتریس مکان‌های پتانسیل‌دار به‌کار گرفته شد، با این تفاوت که به‌جای مختصات رستری، تعداد انتخاب‌ها برای هر مکان در آن ذخیره می‌شود (Jaeggi et al., 2005, 2006). با استفاده از شمارشگر محلی، به‌محض اضافه‌شدن موفق به حافظهٔ میان‌مدت، الگوریتم از نو شروع می‌شود. وقتی شمارشگر محلی به مقادیر تعریف‌شده ازسوی کاربر می رسد، الگوریتم جست‌وجو را تشدید یا متنوع می‌کند تا تعداد گام های جست‌وجو کاهش یابند و جست‌وجو از بهترین راه‌حل حاصل دوباره شروع شود. بنابراین جست‌وجوی تابو، جست‌وجوی محلی کامل و سیستماتیک را با المان اتفاقی و پوشش هوشمندانهٔ کل فضای جست‌وجو ترکیب می‌کند. شکل ۶ روندنمای الگوریتم جست‌وجوی تابوی به‌کار گرفته‌شده را نشان می‌دهد (Jaeggi et al., 2005).

## ۴- نتایج

در بخش‌های پیشین، چگونگی حل مسئله با روش جست‌وجوی تابو توضیح داده شد. این الگوریتم به‌منظور یافتن بهترین توزیع برای n مرکز خرید طراحی شده است. الگوریتم تابو با توجه به مفاهیم و ابزارهایی که جست‌وجوی تابو در اختیار می‌گذارد، ساختار روشن و واضحی را برای حل مسائل مکانی و به‌ویژه برای مکان یابی فراهم می‌کند. الگوریتم در محیط MATLAB پیاده سازی شده است. به‌عنوان نمونه با هدف احداث چهار مرکز خرید جدید، تعدادی از جواب‌های بهینه برای انتخاب ترکیب ۴تایی در جدول ۲ ارائه شده است. این جدول شامل شمارهٔ ستون نقاط منتخب در ماتریس نقاط پتانسیل‌دار ـ که در آن، مختصات رستری نقاط ذخیره شده ـ و مقادیر توابع هزینه است. نمونه‌ای از ۴تایی‌های منتخب در شکل ۷ آمده است.

جدول ۲. برخی جواب‌های بهینهٔ حاصل از جست‌وجوی تابو برای ترکیب ۴تایی مراکز خرید

| تابع دسترسی | تابع جذب تقاضا | مکان ۴ | مکان ۳ | مکان ۲ | مکان ۱ |
|---|---|---|---|---|---|
| ۶۰/۶۰ | ۱۵/۹۵ | ۷۳۴ | ۲۱۱ | ۷۰۶ | ۷۴۳ |
| ۵۷/۵۸ | ۱۶/۶۲ | ۸۲۰ | ۷۰۷ | ۷۳۴ | ۱۸۸ |
| ۵۴/۷۷ | ۱۷/۴۸ | ۳۷۹ | ۱۱۰ | ۷۰۷ | ۷۴۳ |
| ۵۴/۵۴ | ۱۷/۰۹ | ۸۱۱ | ۷۰۷ | ۷۴۳ | ۲۲۷ |
| ۵۴/۰۵ | ۱۷/۱۴ | ۷۰۷ | ۱۷۴ | ۷۴۳ | ۲۱۱ |
| ۵۲/۷۴ | ۱۷/۹۴ | ۱۸۸ | ۶۳۱ | ۷۰۷ | ۷۳۳ |
| ۵۲/۶۱ | ۱۸/۱۹ | ۵۴ | ۱۶۷ | ۷۰۷ | ۷۴۴ |
| ۵۲/۶۱ | ۱۸/۴۱ | ۳۲۰ | ۷۰۷ | ۷۳۴ | ۱۸۹ |
| ۵۰/۲۵ | ۱۹/۵۱ | ۲۲۶ | ۷۲۰ | ۷۰۷ | ۷۰۴ |
| ۴۹/۸۶ | ۱۹/۰۵ | ۲۹۸ | ۱۸۹ | ۷۰۷ | ۷۳۳ |
| ۴۸/۲۹ | ۱۹/۴۸ | ۷۷۱ | ۷۰۷ | ۲۶۳ | ۵۷۱ |
| ۴۵/۷۹ | ۲۱/۴۸ | ۲۱۰ | ۷۷۱ | ۴۳ | ۷۴۳ |
| ۴۲/۹۳ | ۲۲/۰۱ | ۷۳۴ | ۲۲۶ | ۳۵ | ۷۷۲ |
| ۴۰/۷۹ | ۲۴/۰۸ | ۷۹ | ۲۶۴ | ۷۴۴ | ۷۰۶ |
| ۳۸/۲۴ | ۲۵/۴۵ | ۶۴۹ | ۹۹ | ۷۴۴ | ۲۱۰ |
| ۳۶/۸۹ | ۵۲/۲۲ | ۲۴۶ | ۱۲۱ | ۶۱۴ | ۷۴۴ |
| ۳۶/۱۸ | ۲۶/۶۷ | ۲۴۸ | ۷۹ | ۷۴۲ | ۷۰۷ |

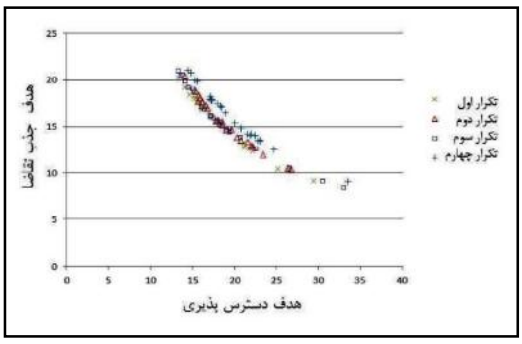



شکل ۷. نمونه‌ای از ۴تایی‌های بهینهٔ حاصل از الگوریتم جست‌وجوی تابو (نقاط دایره، مراکز موجود و نقاط مربع، مراکز پیشنهادی)

## ۴-۱- بررسی نتایج روش جست‌وجوی تابو

### ۴-۱-۱- تست تکرارپذیری

ازآنجاکه الگوریتم های تکاملی ساختار نسبتاً تصادفی دارند، ممکن است تکرار در اجرای الگوریتم به نتایج متفاوتی بینجامد. برای نشان‌دادن ثبات روش تکاملی پیاده‌سازی‌شده درمقایسه با معیار تکرارپذیری، الگوریتم جست‌وجوی تابو به‌منظور انتخاب مکان های پیشنهادی برای ۴ مرکز خرید با فهرست تابوی به‌طول ۱۰۰ برای تعداد تکرار ۱۰۰، چهار مرتبه اجرا شد. همان گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، تفاوت معناداری در نتایج حاصل از تکرارهای متوالی دیده نمی شود. بنابراین الگوریتم پیاده سازی‌شده قابلیت تکرارپذیری دارد و استحکام آن مناسب است.




شکل ۸. نتایج چهار مرتبه اجرای الگوریتم جست‌وجوی تابو با تعداد تکرار ۱۰۰

### ۴-۱-۲- تست افزایش تعداد تکرارها و افزایش تعداد مراکز خرید

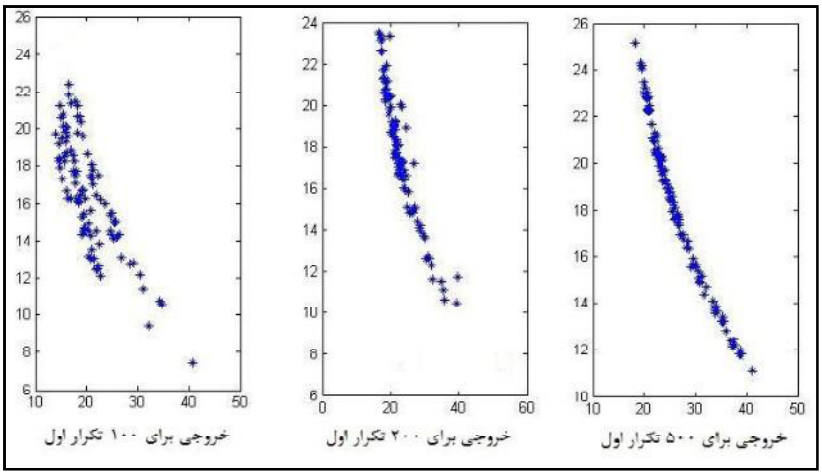
جدول ۳ بهبود الگوریتم را با افزایش تعداد تکرارها و افزایش مقادیر توابع هدف با افزایش تعداد مراکز خرید نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، حداقلِ اهداف حاصل از اجرای الگوریتم جست‌وجوی تابو با افزایش تعداد تکرارها افزایش می‌یابد. همچنین به‌دلیل اینکه مقدار توابع هدف، با مجموع توابع برای هر مرکز خرید منتخب برابر است، با افزایش تعداد مراکز پیشنهادی، مقدار حداقل توابع هدف نیز افزایش می‌یابد.

در شکل ۹ نمودار پاره‌توی حاصل از اجرای برنامهٔ جست‌وجوی تابو برای انتخاب چهار مرکز خرید در سطح شهر نشان داده شده است. در این شکل نیز ـهمانند جدول ۳ــ آشکارا مشاهده می‌شود که بر حداقلِ توابع هدف با افزایش تعداد تکرارها افزوده شده، اما به‌دلیل پایین‌بودن تعداد تکرارها، نمودارهای پاره‌توی حاصل هنوز به سطح پاره‌توی نهایی نرسیده است.

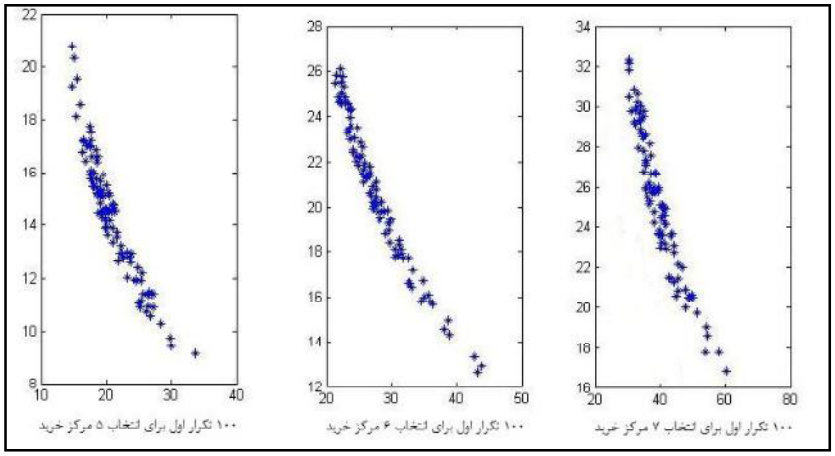
همین رابطه درخصوص افزایش تعداد مراکز خرید نیز برقرار است. شکل ۱۰ این موضوع را برای ۵، ۶ و ۷ مرکز با تعداد تکرار ۱۰۰ نشان می‌دهد.

جدول ۳. نتایج جست‌وجوی تابو برای افزایش در تعداد تکرارها و مراکز خرید

| هدف جذب تقاضا | هدف دسترسی | تعداد تکرارها | تعداد مراکز خرید |
|---|---|---|---|
| ۷/۳۱ | ۱۳/۰۴ | ۱۰۰ | ۴ |
| ۱۰/۴۵ | ۱۶/۴۵ | ۲۰۰ | ۴ |
| ۱۱/۲۲ | ۱۸/۲۶ | ۵۰۰ | ۴ |
| ۹/۱۴ | ۱۴/۷۵ | ۱۰۰ | ۵ |
| ۱۲/۹۵ | ۲۲/۲۵ | ۱۰۰ | ۶ |
| ۱۶/۸۲ | ۳۰/۶۴ | ۱۰۰ | ۷ |



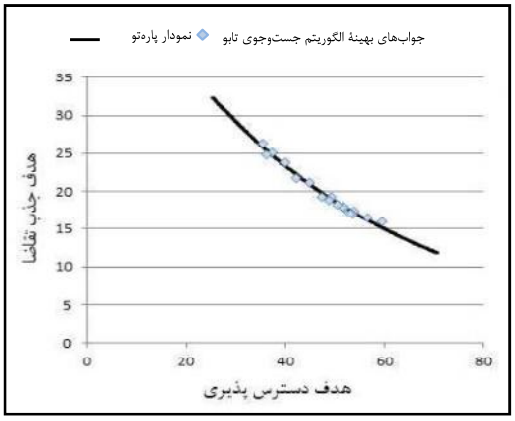

شکل ۹. پاره‌توی ناشی از اجرای برنامهٔ جست‌وجوی تابو در تکرارهای مختلف برای ترکیب ۴تایی مراکز خرید




شکل ۱۰. نمودار پاره‌توی حاصل از اجرای برنامهٔ جست‌وجوی تابو برای انتخاب ۵، ۶، و ۷ مرکز خرید پس از ۱۰۰ تکرار

### ۴-۱-۳- تست انطباق‌پذیری با نمودار پاره‌تو

به‌منظور تعیین انطباق پذیری نتایج اجرای الگوریتم جست‌وجوی تابو با نمودار پاره‌تو، مقدار اهداف برای تمامی نقاط پتانسیل‌دار محاسبه شد و پس از مرتب‌سازی و تعیین نقاط نامغلوب، نمودار پاره‌تو ترسیم گردید. این نمودار با نتایج حاصل از اجرای الگوریتم پس از ۲۰۰۰ تکرار مقایسه شد. شکل ۱۱ این مقایسه را نمایش می‌دهد و ملاحظه می‌شود که جواب‌های حاصل از اجرای الگوریتم، انطباق خوبی با نمودار پاره‌توی حاصل از تمامی پیکسل‌ها دارند.

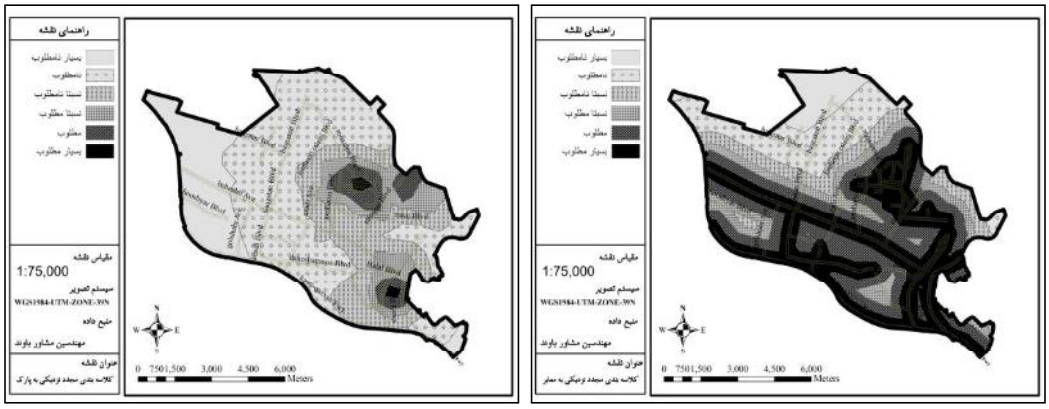



شکل ۱۱. انطباق‌پذیری جواب حاصل از جست‌وجوی تابو با نمودار بهینهٔ پاره‌تو

### ۴-۲- ارزیابی نتایج

در مسائل بهینه‌سازی اعتبارسنجی نتایج پس از پیاده‌سازی الگوریتم، می‌بایست مقایسهٔ نتایج با جواب های بهینهٔ موجود صورت گیرد. با توجه به دراختیارنبودن نمونه‌های واقعی برای اعتبارسنجی مدل، به‌منظور ارزیابی شرایط انطباق مکان‌های منتخب با معیارهای اولیهٔ مطرح در مکان‌یابی مراکز خرید، نتایج با خروجی‌های حاصل از هم‌پوشانی نقشه‌های معیار مقایسه شدند. این بررسی نشان داد که مکان‌های منتخب، کلیهٔ شرایط اولیه را دارند و درعین‌حال اهداف مکان‌یابی را نیز بهینه می‌کنند.

در روش هم‌پوشانی شاخص، از نقشه‌های فاصله برای معیار های مختلف مربوط به هدف دسترسی و نقشهٔ مربوط به هدف جذب تقاضا که در آن شرایط رقابتی بین مراکز خرید موجود اعمال شده است، استفاده گردید. معیارهای بررسی‌شده شامل اینها هستند: نزدیکی به پارک‌ها و مکان‌های تفریحی، نزدیکی به پارکینگ‌های عمومی، نزدیکی به ایستگاه های حمل‌ونقل عمومی، نزدیکی به معابر شریانی- اصلی، و نقشهٔ هدف جذب تقاضا. نقشه‌ها برای هدف دسترسی براساس میزان فاصله و برای هدف جذب تقاضا برحسب تراکم جمعیت، کلاسه‌بندی مجدد شدند و در شش کلاس قرار گرفتند. با توجه به مطلوبیت هر کلاس برای مسئلهٔ درحال بررسی، اعداد ۱ تا ۶ به آنها نسبت داده شد. نمونه‌هایی از نقشه‌های مربوط به معیارهای هدف دسترسی با کلاسه‌بندی مجدد در شکل ۱۲ آمده‌اند.




شکل ۱۲. نقشهٔ کلاسه‌بندی مجدد معیار نزدیکی به معابر شریانی و اصلی (راست)، و نزدیکی به پارک و مکان‌های تفریحی (چپ)

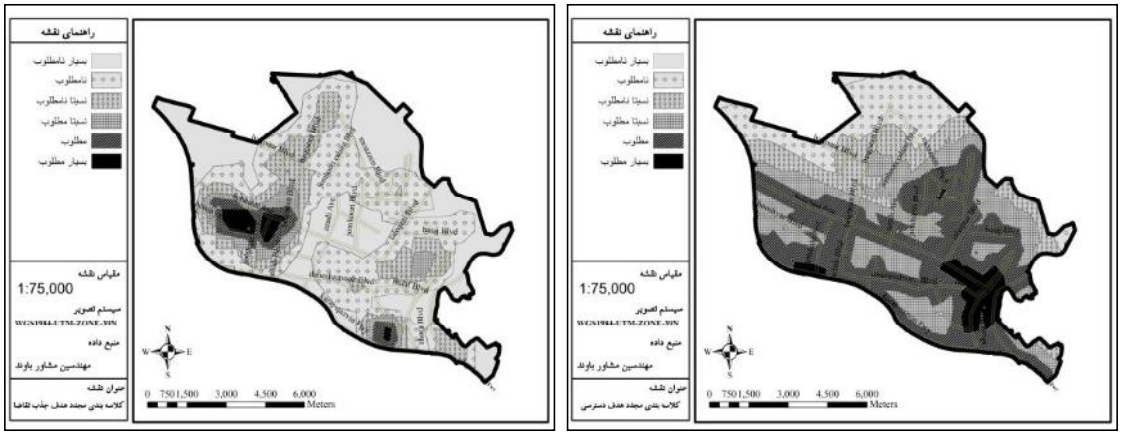
به‌دلیل اینکه در روش تکاملی، توازن میان توابع هدف مدنظر بود و وزن‌دهی به اهداف صورت نگرفت، در روش هم‌پوشانی نیز برای اینکه وزن‌دهی به اهداف، خروجی‌ها را تحت تأثیر خود قرار ندهد، اهمیت هردو هدف یکسان درنظر گرفته شد. اکنون فقط کافی است که وزن‌های مربوط به معیارهای هدف دسترسی تعیین شوند. برای وزن‌دهی به این معیارها از روش تحلیل سلسله‌مراتبی[1] استفاده شد. جدول ۴ مقایسهٔ دودویی معیارها و وزن‌های نهایی نسبت داده‌شده به این معیارها را براساس دیدگاه‌های کارشناسی نشان می‌دهد.

شکل ۱۳ نقشه‌های نهایی مربوط به هریک از اهداف را نمایش می‌دهد و مشاهده می‌شود که در نواحی جنوب و جنوب‌شرقی محدوده، زمین‌های با دسترسی مناسب و مستعد برای احداث مراکز خرید، تراکم بیشتری دارند. نواحی با تقاضای بالا عمدتاً در بخش جنوب‌غربی مشاهده می‌شوند.

نقشهٔ نهایی حاصل از هم‌پوشانی اهداف در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با توجه به اهداف مدنظر، نواحی‌ای که با رنگ و هاشور تیره نمایش داده شده‌اند، برای احداث مراکز خرید مطلوب‌ترند و نواحی با رنگ و هاشور روشن، مطلوبیت پایینی دارند.

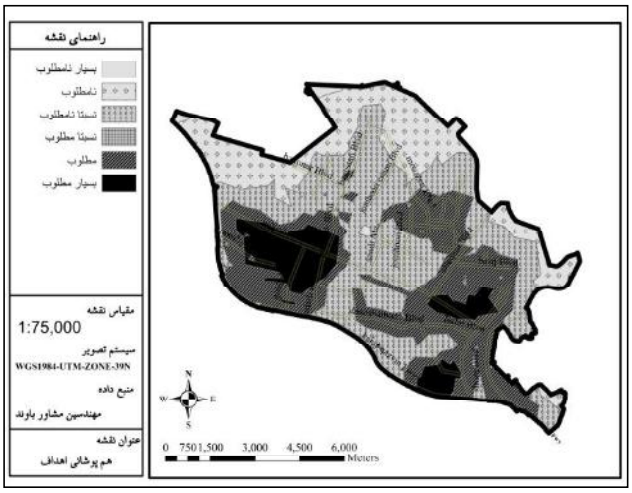
جدول ۴. مقایسهٔ دودویی و وزن معیارهای مربوط به هدف بیشینه‌کردن دسترسی[1]

| معیارهای دسترسی | پارکینگ عمومی | پارک و فضای تفریحی | ایستگاه حمل‌ونقل عمومی | معابر شریانی و اصلی | وزن نهایی معیارها |
|---|---|---|---|---|---|
| پارکینگ عمومی | ۱ | ۴ | ۰/۲۵ | ۰/۱۶۶۷ | ۰/۶۰۸۷ |
| پارک و فضای تفریحی | ۰/۲۵ | ۱ | ۰/۱۶۶۷ | ۰/۱۱۱۱ | ۰/۲۴۸۵ |
| ایستگاه حمل‌ونقل عمومی | ۴ | ۶ | ۱ | ۰/۲۵ | ۰/۱۰۱۴ |
| معابر شریانی و اصلی | ۶ | ۹ | ۴ | ۱ | ۰/۰۴۱۴ |

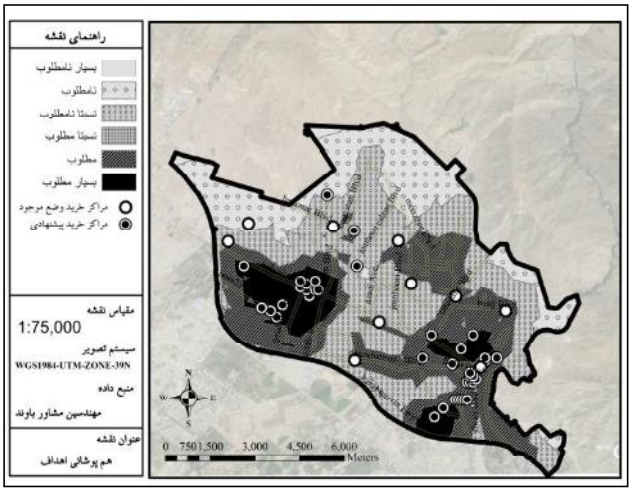



شکل ۱۳. کلاسه‌بندی مجدد هدف دسترسی (راست)، و هدف جذب تقاضا (چپ)

1. Analytic Hierarchy Process (AHP)




شکل ۱۴. نمایش مطلوبیت مکان‌های احداث مراکز خرید، حاصل از روش هم‌پوشانی شاخص




شکل ۱۵. نمایش هم‌زمان ترکیب‌های ۴تایی مراکز خرید پیشنهادی به‌وسیلهٔ جست‌وجوی تابو و مقایسهٔ آن با نتایج روش هم‌پوشانی شاخص

جدول ۵. میزان مطابقت نتایج بهینهٔ جست‌وجوی تابو و نتایج روش هم‌پوشانی شاخص

| کلاس میزان مطلوبیت | درصد مطابقت نتایج بهینهٔ جست‌وجوی تابو با روش شاخص هم‌پوشانی |
|---|---|
| بسیار مطلوب | ۳۸/۵ |
| مطلوب | ۵۳/۸ |
| نسبتاً مطلوب | ۰ |
| نسبتاً نامطلوب | ۵/۱ |
| نامطلوب | ۲/۶ |
| بسیار نامطلوب | ۰ |
| جمع کل | ۱۰۰ |

مقایسهٔ نتایج حاصل از روش هم‌پوشانی شاخص و خروجی روش جست‌وجوی تابو نشان می‌دهد که نقاط انتخابی الگوریتم جست‌وجوی تابو اغلب در کلاس‌های با مطلوبیت بالا در روش هم‌پوشانی شاخص واقع شده‌اند. شکل ۱۵ به‌وضوح این موضوع را نشان می‌دهد و در جدول ۵ نیز درصد نقاط بهینهٔ حاصل از روش تکاملی در هر کلاس درج شده است.

دلیل عدم مطابقت کامل نتایج این است که در روش هم پوشانی شاخص، بدون توجه به تناقض اهداف، لایه‌های مربوط به آنها با یکدیگر جمع می‌شوند و درنتیجهٔ این کار، یک سری از جواب‌های بهینه از دست می‌روند.

## ۵- بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، دو هدف اصلی بیشینه‌سازی جذب تقاضا و دسترسی، همراه با درنظر گرفتن شرایط رقابتی در توسعهٔ مدل پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم جست‌وجوی تابو دنبال شد. بررسی‌های تحقیق منجر به پیشنهاد احداث مراکز خرید جدید در نقاطی از محدودهٔ مطالعه‌شده گردید که با خلأ مراکز خرید مواجه‌اند و در آن محدوده جمعیت زیاد (تقاضای بالا) یا زمین‌هایی با دسترسی مناسب وجود دارد. در نواحی شمالی محدودهٔ مطالعه‌شده دسترسی‌های مناسب، تقاضای پایین و وجود زمین‌هایی با کاربری‌های نامناسب منجر به پیشنهاد مراکز کمتری شده است. جست‌وجوی تابو امکان جست‌وجوی مناسب در همهٔ فضای تصمیم‌گیری را فراهم می‌سازد.

به‌دلیل فقدان برخی لایه‌های اطلاعاتی از قبیل آلودگی هوا و قیمت زمین، بعضی از معیارها در این تحقیق در نظر گرفته نشدند، درحالی‌که با دردست‌داشتن این لایه‌ها می‌توان مدل‌سازی را تقویت کرد. در ادامه، پیشنهادهایی برای تکمیل این مطالعات مطرح می‌شوند.

- ازآنجاکه در ساخت مراکز خرید لازم است به جمعیت و تقاضای مربوط به سال‌های آتی بیشتر توجه شود، با در دست داشتن میزان نرخ رشد جمعیت هر محله یا ناحیه از محدودهٔ مطالعاتی و پیش‌بینی جمعیت آتی می‌توان توزیع دقیق‌تری از تقاضا را اعمال کرد.
- روش‌های تکاملی دیگری مانند الگوریتم ژنتیک، تبرید شبیه‌سازی‌شده، و الگوریتم کلونی مورچه نیز در زمینهٔ مکان‌یابی مطرح هستند. می‌توان مسئلهٔ مطرح در پژوهش حاضر را با سایر روش‌ها نیز به‌اجرا درآورد و نتایج و کارایی روش‌های تکاملی را مقایسه کرد.
- برخی مطالعات، تلفیق جست‌وجوی تابو را با سایر روش‌های تکاملی بررسی کرده‌اند. برای حل مسائل مکانی و از جمله مکان‌یابی مراکز خرید نیز می‌توان این تلفیق را در نظر گرفت.

## ۶- منابع


Arostegui M.A., Kadipasaoglu S.N. & Khumawala, B.M., 2005, **An Empirical Comparison of Tabu Search, Simulated Annealing and Genetic Algorithms for Facilities Location Problems**, Int. J. Production Economics, 103, PP. 742-754.

Aytug H., Saydam C., 2001, **Solving Large-scale Maximum Expected Covering Location Problems by Genetic Alghorithms: A Comparative Study**, European Journal of Operational Research, 141, PP. 480-494.

Başar, A., Çatay B. & Ünlüyurt, T., 2009, **A New Model and Tabu Search Approach for Planning the Emergency Service Stations**, Operation Research Proceedings.

Burke E.K., Li J.P. & Qu R., 2012, **A Pareto-based Search Methodology for Multi-objective nurse Scheduling**, Annals of Operations Research, 196 (1), PP. 91-109.

Cheng E., Li H. & Yu L., 2005, **A GIS Approach to Shopping Mall Location Selection**, Building and Enviroment, 42, PP. 884-892.

Daskin M.S., Snyder L.V. & Berger R.T., 2005, **Facility Location in Supply Chain Design**, Design and operation, Springer, PP. 36-66.

Dawson P., Parks G., Jaeggi D., Molina-cristobal A. & Clarkson P.J., 2007, **The Development of a Multi-threaded Multi-Objective Tabu Search Algorithm**, EMO 2007, LNCS 4403, PP. 242-256.

Duarte H.M., Goldberg E.F.G. & Goldberg M.C., 2006, **A Tabu Search Algorithm for Optimization of Gas Distribution Networks**, EvoCOP 2006, LNCS 3906, PP. 37-48.

Ehrgott M. & Wiecek M., 2004, **Multi Objective Programming**, New Zealand, Chapter 17, PP. 667.

Farahani R.Z. & Hekmatfar M., 2009, **Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies**, Contributions to Management Science, Published by Physica.

Farhan B. & Murray A.T., 2006, **Siting Park-and-ride Facilities Using a Multi-objective Spatial Optimization Model**, Computers & Operations Research, 35, PP. 445-456.

Gendron B. & Povin Jean-Yves, 2003, **A Tabu Search with Slop Scaling for the Multicommodity Capacitated Location Problem with Balancing Requirments**, Annals of Operations Research, 122, PP. 193-217.

Guan J. & Lin G., 2003, **On Min-norm and Min-max Methods of Multi-objective Optimization**, Math Program Ser A, 103, PP. 1-33.

Ho S.C., 2014, **An Iterated Tabu Search Heuristic for the Single Source Capacitated Facility Location Problem**, Applied Soft Computing, 27, PP. 169-178.

Jaeggi D., Parks G., Kipouros T. & Clarkson J., 2005, **A Multi-objective Tabu Search Algorithm for Constrained Optimisation Problems**, EMO 2005, LNCS 3410, PP. 490-504.

Jaeggi D., Parks Geoff, Kipouros T., Clarkson J., 2006, **The Development of a Multi-Objective Tabu Search Algorithm for Continuous Optimisation Problems**, European Journal of Operational Research, 185, PP. 1192-1212.

Jones D., Mirrazavi S. & Tamiz M., 2002, **Multi-objective Meta-heauristics: An Overview of the Current State-of-the-art**, European Journal of Operational Research, P. 137.

Kahraman Cengiz, 2008, **Multi-Criteria Decision Making Methods and Fuzzy Sets**, Springer Science, Business Media.

Kulturel-Konak S., Smith Alice E. & Norman Bryan, A., 2004, **Multi-objective Tabu Search Using a Multinomial Probability Mass Function**, European Journal of Operational Research, 169, PP. 918-931.

Lei D. & Wu Zh., 2005, **Tabu Search for Multiple-Criteria Manufacturing Cell Design**, Int J. Adv Manuf Technol, 28, PP. 950-956.

Plastria F., 2000, **Static Competitive Facility Location: An Overview of Optimisation Approaches**, European Journal of Operational Research, 129, PP. 461-470.

Semih O., Tugba E. & Soner K.S., 2009, **A Combined Fuzzy MCDM Approach for Selecting Shopping Center site: An Example from Istanbul, Turkey**, Expert Systems with Applications, 37, PP. 1973-1980.

Tan K.C., Khor E.F., Lee T.H. & Yang Y.J., 2003, **A Tabu-based Exploratory Evolutionary Algorithm for Multi Objective Optimization**, Artificial Intelligence Review, 19, PP. 231-260.

Villegas J., Palacios F. & Medaglia A., 2006, **Solution Methods for the Biobjective (cost-coverage) Unconstrained Facility Location Problem with an Illustrative Example**, Annals of Operations Research, 147, PP. 109-141.

Yun Y., Jianfeng W., Xiaomin S., Jichun W. & Chunmiao Zh., 2013, **A Niched Pareto Tabu Search for Multi-Objective Optimal Design of Groundwater Remediation Systems**, Journal of Hydrology, 490, PP. 56-73.