

بهینه‌سازی چندهدفه تخصیص کاربری اراضی شهری به وسیله‌ی الگوریتم‌های فرا ابتکاری و شاخص‌های مکانی

رضا صفرزاده رامهرمی*^۱، محمد کریمی^۲، ساناز علایی مقدم^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی

خواجه‌نصیرالدین طوسی
reza.sz70@yahoo.com

^۲استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

mkarimi@kntu.ac.ir

^۳دانشجوی دکتری سیستم‌های اطلاعات مکانی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

s.alaei@mail.kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت بهمن ۱۳۹۵، تاریخ تصویب مهر ۱۳۹۶)

چکیده

امروزه مدیریت کاربری اراضی شهری یکی از نیازهای ضروری بسیاری از کشورهای در حال توسعه می‌باشد. تا کنون مدل‌های بسیاری جهت بهینه‌سازی چندهدفه تخصیص کاربری اراضی ارائه شده است. اما در اغلب این مدل‌ها برنامه‌ریزان با مجموعه‌ی زیادی از جواب‌هایی که اهداف عموماً متناقض اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را برآورده ساخته‌اند، مواجه می‌شوند که این مسئله تصمیم‌گیری را دشوار می‌سازد. مجموعه جواب‌های متعدد در مدلسازی تخصیص کاربری اراضی را می‌توان بر مبنای سازگاری آن‌ها با الگوی توسعه شهری اولویت بندی نمود. الگوی توسعه شهری به وسیله شاخص‌های مکانی متعدد تعریف شده است. از این رو، هدف اصلی این تحقیق مدلسازی تخصیص بهینه کاربری اراضی شهری به وسیله الگوریتم‌های فراابتکاری و رتبه‌بندی جواب‌ها بر مبنای یک شاخص مکانی تلفیقی که بیانگر الگوی توسعه شهری است، می‌باشد. در این تحقیق، ابتدا با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه NSGA_II و MOPSO و بر اساس چهار تابع هدف اصلی شامل سازگاری، مناسبت، دسترسی و هزینه تغییرات کاربری، تخصیص کاربری اراضی شهری انجام شد. سپس، با استفاده از تعریف شاخص مکانی تلفیقی و تعیین الگوی مکانی توسعه شهر، جواب‌های حاصل از دو الگوریتم در سناریوهای مختلف، مقایسه و رتبه‌بندی گردیدند. مدل پیشنهادی در شهر تهران و با استفاده از نقشه‌های کاربری دوره‌های زمانی ۱۳۸۰، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۰ در سه سناریو رشد شهری شامل ادامه‌ی روند موجود، رشد پراکنده و رشد متراکم پیاده‌سازی گردیده است. نتایج مدلسازی نشان می‌دهد شاخص‌های مکانی به خوبی از قابلیت محاسبه و پیش‌بینی ساختار و الگوی مکانی توسعه شهری برخوردار می‌باشند. همچنین با استفاده از شاخص‌های مکانی و رتبه‌بندی جواب‌های حاصل از الگوریتم‌ها، تصمیم‌گیرنده قادر خواهد بود تصمیم بهتر و قابل اطمینان‌تری با توجه به ساختار و الگوی مکانی توسعه شهر اتخاذ نماید.

واژگان کلیدی: برنامه‌ریزی کاربری اراضی شهری، شاخص‌های مکانی، NSGA_II، MOPSO، بهینه‌سازی مکانی چندهدفه، سیستم اطلاعات مکانی

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

امروزه با رشد روزافزون جمعیت شهری جایگاه توسعه پایدار شهری بیش از پیش پررنگ می‌گردد و از این رو، مطالعات مربوط به تخصیص کاربری‌ها و تأثیر تغییرات کاربری‌ها در این محیط پیچیده از اهمیت خاصی برخوردار است و برنامه‌ریزان شهری در تلاش هستند که رابطه‌ی میان محیط شهری و فعالیت‌های انسانی را به منظور بهره‌برداری بیشتر از فضاهای شهری به بهترین شکل ممکن برقرار سازند [۱، ۲].

برنامه‌ریزی کاربری اراضی شهری، سازمان‌دهی مکانی و فضایی فعالیت‌ها و عملکردهای شهری بر اساس خواست‌ها و نیازهای جامعه شهری است و هسته اصلی برنامه‌ریزی شهری را تشکیل می‌دهد و انواع استفاده از زمین را طبقه‌بندی و مکان‌یابی می‌کند [۳]. برنامه‌ریزی کاربری اراضی را می‌توان فرآیند تخصیص فعالیت‌ها و کاربری‌های مختلف به واحدهای مکانی مشخص در محدوده مورد نظر، تعریف کرد [۴]. تخصیص کاربری در واقع فرآیند تجزیه و تحلیل الگوهای احتمالی کاربری برای یک قطعه مشخص از زمین است تا به هدف نهایی که استفاده مطلوب از سرزمین است دست پیدا گردد. این فرآیند را می‌توان در یک نگاه کلی تعامل بین تناسب سرزمین (عرضه) و مساحت مورد نیاز کاربری‌ها (تقاضا) در شرایط حاکم بر منطقه مورد مطالعه عنوان کرد. میزان تناسب برای کاربری‌های مختلف عموماً از طریق مقایسه ویژگی‌های محیطی، اقتصادی و اجتماعی سرزمین تعیین می‌گردد. [۵]. فرآیند تخصیص کاربری اراضی به دلیل اینکه مستلزم در نظر گرفتن چندین هدف است که غالباً در تضاد با یکدیگر نیز هستند، به صورت یک مسئله‌ی چندهدفه تعریف می‌شود و افزایش دامنه‌ی اهداف در مدل منجر به مقادیر متفاوت در خروجی‌های مورد انتظار می‌باشد [۴]. با توجه به این موضوع در سال‌های اخیر روش‌ها و مدل‌های کامپیوتری مختلفی به منظور کمک به برنامه‌ریزان در امر تصمیم‌گیری توسعه داده شدند [۶].

مدل‌های برنامه‌ریزی خطی اولین بار در دهه ۱۹۶۰ به منظور حل معادلات خطی و درجه دوم در مسائل برنامه‌ریزی کاربری اراضی ارائه شدند [۷، ۸]. اما به دلیل ضعف این مدل‌ها در حل مسائل غیرخطی مانند تأثیرات مکانی بین کاربری‌های مختلف و همچنین وجود چندین

هدف متضاد با یکدیگر در مسئله، برای حل مسائل پیچیده‌ی برنامه‌ریزی شهری مناسب نمی‌باشند زیرا مدل‌های برنامه‌ریزی خطی زمانی بهترین کارایی را دارند که یک هدف مشخص در مسئله وجود داشته باشد [۴]. از طرفی الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه مانند ژنتیک چندهدفه نا مغلوب^۱ (NSGA_II)، ازدحام ذرات چندهدفه^۲ (MOPSO) که بر پایه‌ی الگوریتم‌های ساده‌تری مانند ژنتیک و ازدحام ذرات توسعه یافته‌اند، از جمله روش‌هایی هستند که می‌توانند برای بهینه‌سازی و تصمیم‌گیری در فضای پیچیده و وسیع مورد استفاده قرار گیرند. در واقع خاصیت هوشمند بودن، هدف‌گرایی، انعطاف‌پذیری و سازگاری در این روش‌ها قابلیت آن‌ها را در مدلسازی افزایش می‌دهد و موجب افزایش به کارگیری آنها در مطالعات آمایش سرزمین و تخصیص کاربری اراضی شده است [۲].

تحقیقات زیادی در زمینه تخصیص کاربری اراضی با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری صورت گرفته است به عنوان مثال؛ Cao و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده از الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب، در نظر گرفتن سه هدف کمینه‌سازی تغییر کاربری‌ها، بیشینه‌سازی دسترسی و کاربری‌های مجاور، اقدام به پیشنهاد سناریوهای چینی بهینه کاربری‌های اراضی شهری نمودند [۱]. معصومی و همکاران نیز در سال ۲۰۱۳ با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه و در فضای وکتور با در نظر گرفتن اهداف بیشینه‌سازی سازگاری، وابستگی کاربری‌های مجاور، تناسب زمین و همچنین فشردگی کاربری‌های همسایه، اقدام به بهینه‌سازی تخصیص کاربری اراضی در شهر تهران کردند [۹]. همچنین علائی و همکاران در سال ۱۳۹۴ در تحقیقی سناریوهای بهینه‌ی تخصیص کاربری اراضی شهر شیراز را با استفاده از الگوریتم ژنتیک نا مغلوب نقطه مرجع و با در نظر گرفتن اهدافی چون بیشینه‌سازی سازگاری، دسترسی و تناسب زمین و کمینه‌سازی تغییرات کاربری‌ها، ارائه کردند [۱۰].

در اغلب تحقیقات مذکور، تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان با مجموعه‌ی زیادی از جواب‌هایی که اهداف اقتصادی و اجتماعی و زیست‌محیطی مورد نظر را برآورده

1 Non Dominated Sorting Genetic Algorithm

2 Multi Objective Particle Swarm Optimization

نشده است. از این رو هدف اصلی این تحقیق ارائه‌ی روشی بر مبنای بهینه‌سازی چندهدفه برای مدلسازی تخصیص کاربری اراضی و استفاده از شاخص‌های مکانی و ساختار مکانی توسعه شهری به منظور کمک به تصمیم‌گیران در اولویت بندی جواب های نزدیک به الگوی مکانی توسعه شهری می‌باشد. بدین منظور در گام اول تحقیق، تخصیص بهینه‌ی کاربری اراضی شهری توسط الگوریتم‌های بهینه سازی چندهدفه NSGA-II و MOPSO و تعریف چهار تابع هدف اصلی بهینه سازی سازگاری، مناسبت سرزمین، دسترسی به راه‌ها و کمینه سازی هزینه‌ی تغییرات کاربری‌ها، مدلسازی شد. سپس به منظور رتبه بندی جواب‌های پارتو حاصل از الگوریتم‌ها و کمک به تصمیم‌گیران، در گام دوم با استفاده از تعریف شاخص‌های مکانی و مشخص کردن الگوی توسعه شهر تهران در سال- های ۱۳۸۰، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۰ و تعیین سه سناریو برای رشد آتی شهر، جواب‌های حاصل از الگوریتم‌ها با توجه به مقدار درصد تشابه هر یک به ساختار و الگوی مکانی شهر در هر سناریو مقایسه و رتبه بندی گردیدند. فلوچارت کلی تحقیق در شکل ۱ نمایش داده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

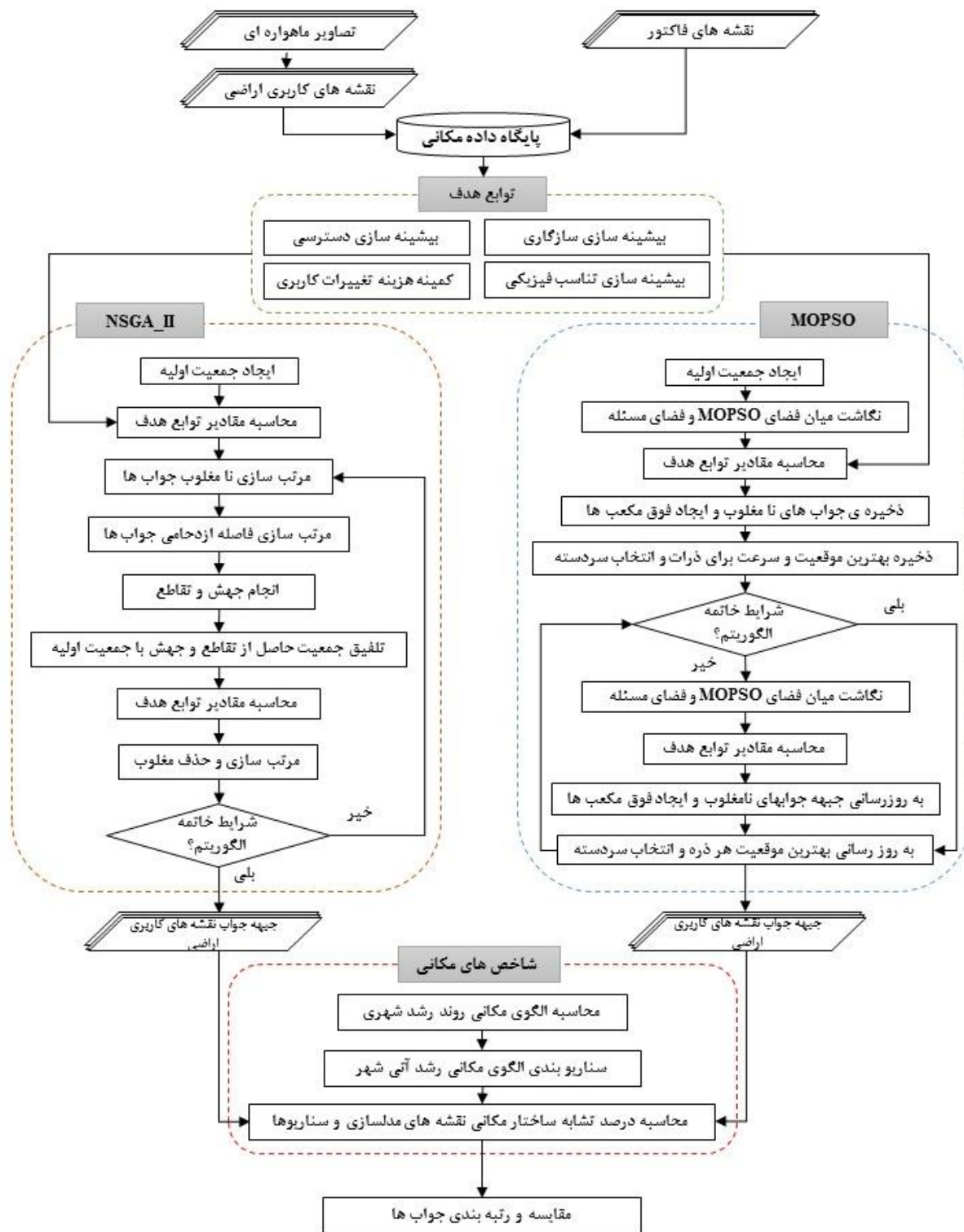
در این بخش مفاهیم تئوری مربوط به بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO و همچنین مفاهیم مربوط به شاخص‌های مکانی به طور اجمالی مرور خواهد شد.

ساخته‌اند مواجه می‌شوند. مسلماً ارائه روشهایی برای اولویت بندی جواب‌ها موثر می باشد. تحقیقات اخیر نشان می دهد که رشد شهری در دوره‌های زمانی مختلف، دستخوش الگوها و فرآیندهای مکانی گوناگونی می‌باشد. به عنوان مثال الگوی رشد پراکنده رویی یا هرزه‌روی^۱ یکی از انواع الگوی رشد شهری است که از جهت گوناگونی بررسی و مدلسازی گردیده است. بنابر این یک برنامه ریزی جامع شهری، نه تنها نیازمند در نظر گرفتن اهداف محلی مانند سازگاری کاربری‌های مجاور، دسترسی بهینه‌ی کاربری‌ها، مناسبت سرزمین و غیره است، بلکه در عین حال نیازمند مدیریت و برنامه‌ریزی در خصوص الگوها و ساختارهای مکانی رشد شهری در سال‌های آتی نیز می‌باشد.

تا کنون محققان بسیاری ساختار و الگوهای رشد شهری را با استفاده از شاخص‌های مکانی بررسی و تحلیل نموده‌اند. به عنوان مثال Herold و همکاران در سال ۲۰۰۵ به بررسی نقش شاخص‌های مکانی در تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی تغییر کاربری شهری سانتا باربارا پرداختند و از ترکیب سنجش از دور شاخص‌های مکانی مانند شاخص سرایت^۲، بعد فراکتال^۳، تعداد لکه‌ها^۴ و درصد سیمای سرزمین^۵ به عنوان رویکردی نوین و مناسب در مدلسازی توسعه شهری نام برده‌اند [۱۱]. همچنین در مطالعه‌ای که توسط Wu و همکاران در سال ۲۰۱۱ در مورد کمی سازی الگوی رشد شهری دو کلان‌شهر فینیکس و لاس‌وگاس آمریکا انجام شد، نشان داده که در اثر توسعه شهری، سیمای سرزمین ساختاری پراکنده و بسیار پیچیده به خود گرفته است. این مطالعه نشان داد که تجزیه و تحلیل شاخص‌های مکانی نه تنها برای کمی سازی الگوی توسعه شهری، بلکه برای ارزیابی مدل‌های مکانی شهری نیز مناسب می‌باشد [۱۲].

در هیچ یک از تحقیقات مذکور، از شاخص‌های مکانی و الگوی مکانی توسعه شهری به منظور استفاده در اولویت بندی مجموعه جواب‌های حاصل از مدلسازی بهینه کاربری اراضی شهری و کمک به تصمیم‌گیران در انتخاب جواب‌های سازگار با الگوی مکانی واقعیت موجود، استفاده

1 Sprawl
2 Contagion
3 Patch fractal dimension
4 Number of patches
5 Percentage of landscape



شکل ۱- مراحل انجام تحقیق

۱-۲- بهینه‌سازی چندهدفه

در حالت کلی روش‌های مواجهه با مسائل چندهدفه بهینه‌سازی به دو دسته‌ی اصلی وزن دهی قبل از حل و وزن دهی بعد از حل تقسیم می‌شوند [۱۳، ۱۴]. در روش‌های وزن دهی قبل از حل، تصمیم‌گیری در مورد

ترجیحات توابع هدف، قبل از جست‌وجوی فضای جواب ارائه می‌شود. در این حالت معمولاً وزن‌ها توسط کارشناسان این زمینه تعریف می‌شود. از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به مجموع وزن‌دار، روش‌های وزنی متریک، برنامه‌ریزی آرمانی و ... اشاره کرد. در این روش‌ها جواب خروجی وابسته به وزن‌های ورودی است [۱۴]. به

۲-۲- الگوریتم NSGA-II

این الگوریتم که نسخه‌ی بهبود یافته‌ی NSGA است، اولین بار در سال ۲۰۰۰ توسط دب و همکاران توسعه داده شده است [۱۵]. تعریف فاصله ازدحامی، استفاده از عملگر انتخاب و نخبه‌گرایی از ویژگی‌های عمده‌ی این الگوریتم می‌باشد [۱۰]. مراحل کاری و الگوریتم کلی روش NSGA-II به شرح زیر است [۱۴]:

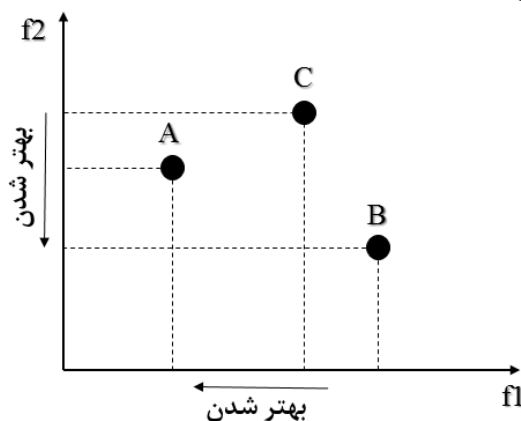
- ایجاد جمعیت اولیه: جمعیت اولیه به صورت تصادفی ایجاد می‌شود.
- محاسبه معیارهای برازندگی: مقادیر توابع هدف برای تمام اعضای جمعیت محاسبه می‌شود.
- مرتب کردن جمعیت: جمعیت بر اساس شرط‌های غلبه کردن مرتب‌سازی می‌شود.
- انتخاب: به محض مرتب شدن جمعیت اولیه بر اساس شرط غلبه کردن، مقدار فاصله‌ی ازدحامی محاسبه خواهد شد و انتخاب از میان جمعیت اولیه آغاز می‌شود، این انتخاب بر اساس دو المان صورت می‌گیرد؛
 - رتبه‌ی جمعیت: جمعیت‌ها در رتبه‌های پایین‌تر اتخاذ می‌شوند (جواب‌های بهتر در رتبه‌های پایین‌تر از نظر عددی قرار دارند).
 - محاسبه فاصله ازدحامی: با فرض اینکه p و q دو عضو یک رتبه باشند، عضو انتخاب می‌شود که فاصله ازدحامی بیشتری دارد. لازم به ذکر است، اولویت انتخاب ابتدا با رتبه و سپس بر اساس فاصله ازدحامی است.
- انجام تقاطع و جهش برای تولید فرزندان جدید: این کار معمولاً با استفاده از روش انتخاب دودویی انجام می‌گیرد.
- تلفیق: جمعیت اولیه و جمعیت به دست آمده از تقاطع و جهش با یکدیگر تلفیق می‌شوند.
- جایگزینی: در این مرحله جمعیت والدین با بهترین اعضای جمعیت تلفیق شده در مراحل قبل جایگزین می‌شوند. این فرآیند به طور خلاصه در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود جمعیت اولیه و جمعیت ناشی از تقاطع ابتدا دسته‌بندی و سپس قسمتی از آن‌ها که دارای رتبه بالاتر هستند حذف می‌شوند.

علاوه در این روش‌ها برای به دست آوردن مجموعه‌ای از جواب‌ها لازم است الگوریتم به دفعات حل شود و در هر بار اجرا بایستی جواب‌های جدید به دست بیاید [۱۵].

در مقابل، در روش‌های بعد از حل ابتدا جست و جو در فضای جواب صورت گرفته و سپس در مورد اولویت‌ها تصمیم‌گیری می‌شود. در روش‌های تکاملی در حقیقت مسئله کاملاً به صورت چندهدفه حل شده و دیگر تنها یک جواب بهینه وجود ندارد بلکه جواب، مجموعه‌ای از نقاط است که می‌تواند یک سطح، منحنی و غیره باشد که منحنی جواب‌های بده بستان و یا جواب‌های مؤثر نامیده می‌شود [۱۱]. جواب مؤثر یا جواب غالب (نا مغلوب) یکی از مفاهیم پایه‌ای در مسائل چندهدفه است. که با فرض M تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۶]: جواب x_1 بر جواب x_2 غالب است اگر دو شرط زیر برقرار باشد:

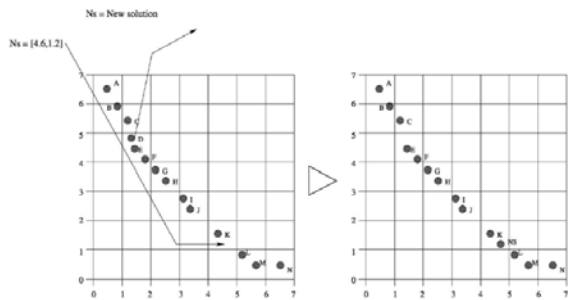
- جواب x_1 در هیچ یک از اهداف بدتر از x_2 نباشد.
- جواب x_1 دست کم در یک هدف اکیداً بهتر از جواب x_2 باشد.

شکل ۲ حالتی را نشان می‌دهد که مسئله‌ی بهینه‌سازی شامل دو هدف برای کمینه‌سازی است. در این شکل پاسخ A بر پاسخ C غالب است. زیار به ازای هر دو تابع هدف مقدار کمتری بدست آورده است. اما در مورد پاسخ‌های A و B می‌توان گفت هیچ یک بر دیگری غالب نیست. پاسخ‌های B و C میز بدون حضور پاسخ A می‌توانند نا مغلوب باشند.

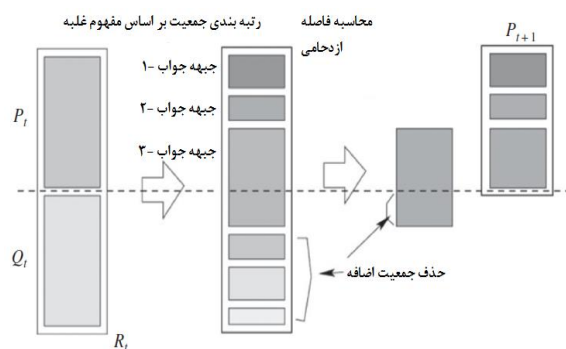


شکل ۲- نمونه‌ای از پاسخ‌های مغلوب و نامغلوب

در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، روش‌ها و الگوریتم‌های متفاوتی ارائه شده‌اند. در صورتی که فضای جست و جو فضای بزرگی باشد و یا حجم محاسبات بالا رود، الگوریتم‌های فرا ابتکاری جواب‌های قابل قبولی پیدا می‌کنند [۱۷].



شکل ۴- مثال گرافیکی نمایش اعضا در فوق مکعبها [۱۴]



شکل ۳- نحوه‌ی مرتب کردن جمعیت در الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی با مغلوب [۱۳]

• تعریف و ذخیره بهترین تجربه برای هر ذره (این تجربه برای هر ذره به عنوان راهنما در جست و جوی فضا عمل خواهد کرد، بهترین تجربه در Rep نیز ذخیره خواهد شد).

• حلقه اصلی الگوریتم (شرط توقف تعداد تکرار مشخص)

- محاسبه سرعت جدید ذرات با استفاده از رابطه ۱ که در این رابطه w ضریب اینرسی است و بر روی همگرایی الگوریتم تأثیر مستقیم دارد، $r1$ و $r2$ اعداد اتفاقی هستند که معمولاً بین بازه‌ی (۰،۱) در نظر گرفته می‌شوند و به منظور برقراری حرکت اتفاقی ذرات می‌باشند. همچنین $c1$ و $c2$ فاکتورهای وزنی هستند که در واقع اثرات مشابه موقعیت و سرعت $Pbest$ و $Rep(h)$ را کنترل می‌کنند. $Rep(h)$ مقداری است که از آرشیو و با روش احتمالی چرخ گردان گرفته می‌شود.

$$v^{new} = w.v^{old} + c_1.r_1(Pbest-x) + c_2.r_2(Rep(h)-x) \quad (1)$$

○ محاسبه موقعیت جدید ذرات با اضافه کردن سرعت جدید به موقعیت قبلی هر ذره از طریق رابطه ۲.

$$x^{new} = x^{old} + v^{new} \quad (2)$$

که در آن x^{old} موقعیت قبلی ذره و همچنین x^{new} موقعیت جدید ذره می‌باشند.

○ انجام جهش

○ اصلاح موقعیت نقاطی که خارج از محدوده هستند. هنگامی که یک ذره از محدوده خارج می‌شود سرعت آن ذره در عدد (-۱) ضرب می‌شود تا در جست و جوی بعدی در خلاف جهت حرکت کند و در داخل محدوده قرار گیرد.

○ ارزیابی جمعیت جدید (Pop)

همان‌طور که اشاره شد الگوریتم NSGA-II از مزایایی نظیر کنترل ازدحام جبهه‌ی جواب بهینه با استفاده از فاصله ازدحامی و سهولت نسبی پیاده‌سازی برخوردار است [۱۴]. از طرفی مسئله بهینه‌سازی این تحقیق در بخش اول تشریح شد یک مسئله‌ی ذاتاً گسسته می‌باشد و NSGA-II نیز دارای ماهیت گسسته است. بنابراین با توجه به این موارد در این تحقیق NSGA-II به عنوان یکی از الگوریتم‌های منتخب برای اجرای مدل انتخاب شد.

۲-۳- الگوریتم MOPSO

جیمز کندی^۱ و راسل ابرهارت^۲ صاحبان اصلی ایده‌ی الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات می‌باشند [۱۸]. از آنجائی که PSO از نظر اجرا ساده و کارآمد است، می‌توان آن را در مسائل چندهدفه به کار برد [۹]. روش‌های مختلفی به این منظور به کار رفته است که در اینجا روش پیشنهادی [۱۴] به دلیل سادگی و همگرایی سریع‌تر بررسی و به نحوه‌ی کار آن پرداخته خواهد شد.

- ایجاد جمعیت اولیه (Pop)
- ایجاد سرعت اولیه برای هر ذره ($Vel_i = 0$)
- ارزیابی جمعیت اولیه
- ذخیره‌ی جواب‌های غیرمغلوب (موقعیت و توابع هزینه جواب‌ها) در یک آرشیو خارجی تحت عنوان Rep
- تقسیم‌بندی فضای توابع هدف به فوق مکعب‌ها و تنظیم ازدحام جبهه‌ی جواب. در شکل ۴ نمونه‌ای از فضای جست‌وجوی دوبعدی و نحوه تقسیم آن‌ها به فوق مکعب‌ها آورده شده است. در فضای جست‌وجوی دوبعدی فوق مکعب‌ها به مربع تبدیل می‌شوند.

1 James Kennedy
2 Russel C. Eberhart

شاخص‌های مربوط به لکه زمین، درون لکه‌های موجود در محدوده‌ی مورد مطالعه محاسبه می‌گردند، شاخص‌های مربوط به کلاس برای تمامی کلاس‌های کاربری موجود در محدوده مورد مطالعه و شاخص‌های سیمای سرزمین کل محدوده مورد مطالعه را بدون در نظر گرفتن نوع کلاس کاربری و نوع لکه‌ها در نظر می‌گیرد [۲۴].

شاخص‌های متعددی تاکنون جهت مشخص کردن الگوهای نقشه‌های طبقه‌بندی در تحقیقات گذشته ارائه شده است [۲۵]. علیرغم اینکه در کاربردهای گوناگون تعداد زیادی از این شاخص‌ها ارائه شده است، به طور کلی شاخص‌های مکانی را می‌توان به دو دسته‌ی شاخص‌های معین کننده‌ی ترکیب^۴ و شاخص‌های معین کننده‌ی آرایش فضایی^۵ سیمای شهری تقسیم کرد [۲۶، ۲۷]. محاسبات مربوط به شاخص‌های ترکیبی ساده‌تر و معین کننده‌ی ویژگی‌های لکه‌ها از نظر پیچیدگی شکل ظاهر، اندازه، تنوع و تراکم لکه‌های کاربری موجود در محدوده می‌باشند، اما این شاخص‌ها ویژگی‌های مکانی لکه‌ها یا موقعیت و نحوه‌ی قرارگیری آن‌ها کنار یکدیگر درون محدوده را مورد بررسی قرار نمی‌دهند. در سوی دیگر، محاسبات مربوط به کمی-ساز شاخص‌های مربوط به آرایش فضایی کمی سخت‌تر صورت می‌پذیرد و این شاخص‌ها به طور کلی معین کننده‌ی ویژگی‌ها و موقعیت کاربری‌ها درون لکه‌ها و یا موقعیت لکه‌ها در کل محدوده‌ی سیمای سرزمین می‌باشند [۲۸].

در این مطالعه، ۹ شاخص مکانی بر اساس آنچه در تحقیقات پیشین در حوزه‌ی مدلسازی تغییرات الگوی شهری آمده و همچنین ویژگی‌های منطقه مورد نظر انتخاب شده است [۱۱، ۲۳، ۲۹]. شاخص‌های انتخاب شده به ترتیب؛ مساحت کلاس کاربری (CA)^۶، تعداد لکه‌ها (NP)^۷، تراکم لکه‌ها (PD)^۸، شاخص بزرگترین لکه (LPI)^۹، تراکم حاشیه‌ها (ED)^{۱۰}، بعد فراکتال (AWMPFD)^{۱۱}، شاخص تراکم (AI)^{۱۲}، فاصله اقلیدسی نزدیک‌ترین همسایه (ENN)^{۱۳} و میانگین اندازه لکه‌ها (MPS)^{۱۴} می‌باشند. این

○ به‌روزرسانی Rep: جواب‌هایی که توسط جواب‌های جدید مغلوب می‌شوند حذف و جواب‌های جدید جایگزین آن‌ها می‌شوند.
○ به‌روزرسانی Rep(h) و Pbest (هنگامی که موقعیت جدید ذره بهتر از تجربه‌ی ذخیره شده‌ی ذره باشد، موقعیت جدید جایگزین بهترین تجربه‌ی ذره خواهد شد).

با توجه به آنچه گفته شد، در این تحقیق به دلیل استفاده از مزایای هوش تجمعی در بهینه سازی مانند سرعت بالاتر، جست و جوی بهتر و تعاملی تر، کنترل جبهه جواب بهینه از نظر تعداد جواب‌ها و ازدحام آنها [۹، ۱۴، ۱۹، ۲۰] از الگوریتم MOPSO و با استفاده از نگاشتی جهت سازگاری فضای مسئله با الگوریتم و تبدیل فضای گسسته مسئله به فضای پیوسته الگوریتم، در مدلسازی مسئله بهینه سازی چندهدفه استفاده شده است.

۲-۴- شاخص‌های مکانی

برای درک بهتر پیچیدگی‌های سیستم‌های شهری و ابعاد زمانی و مکانی آن، تحلیل‌های مربوط به توسعه شهری و مدل‌های پیش‌بینی تغییرات کاربری‌ها باید دائماً با یکدیگر تعامل داشته باشند. از این رو شاهد توجه روزافزون محققان به استفاده از تکنیک‌های شاخص‌های مکانی در مباحث توسعه شهری هستیم [۲۱]. شاخص‌های مکانی ابزار بسیار مفیدی در کمی سازی و تفسیر ساختار و الگوی سیمای شهری با استفاده از داده‌های جغرافیایی می‌باشند [۲۲].

تعاریف مختلفی تاکنون برای شاخص‌های مکانی ارائه شده است از جمله‌ی آن‌ها «نمایه‌های عددی جهت مشخص کردن ساختارها و الگوهای سیمای سرزمین». همچنین شاخص‌های مکانی را می‌توان به عنوان «محاسبات کمی و تجمعی حاصل از آنالیزهای رقومی بر روی نقشه‌های موضوعی طبقه‌بندی شده که مشخص کننده‌ی ناهمگونی‌های مکانی در مقیاس‌ها و دقت‌های مشخص می‌باشند» نیز تعریف کرد [۲۳، ۲۴]، همان‌طور که مشخص است هر دو تعریف بر کمی بودن مقادیر این شاخص‌ها تأکید دارند. شاخص‌های مکانی مقادیر عددی مشخص کننده‌ی ساختار مکانی شهری را در سه سطح لکه^۱، کلاس کاربری^۲ و یا کل سیمای سرزمین^۳ ارائه می‌کنند [۲۳].

1 Patch Metrics
2 Class Metrics

3 Landscape Metrics
4 composition
5 Spatial Configuration
6 Class Area
7 Number of Patches
8 Patch Density
9 Largest Patch Index
10 Edge Density
11 Area Weighted Mean Patches Fractal Dimension
12 Aggregation Index
13 Euclidean Nearest Neighborhood
14 Mean Patch Size

اندازه‌گیری‌های مربوط به نحوه‌ی قرارگیری و پراکندگی یا فشردگی لکه‌ها در محدوده را بررسی خواهند کرد. این شاخص‌ها برای هر سه سال نقشه‌های پوشش کاربری محاسبه گردیدند و جهت مشخص سازی روند تغییرات الگوی مکانی توسعه شهری در بعد زمانی در سطح کلاس کاربری مقایسه گردیدند. توضیحات مربوط به هر یک از شاخص‌ها به اختصار در جدول ۱ آمده است.

شاخص‌ها جنبه‌های مختلف الگوی سیمای شهری را محاسبه می‌کنند. به عنوان مثال؛ CA مساحت دقیق هر کلاس کاربری در محدوده مورد مطالعه، NP تعداد لکه‌های موجود از هر کلاس کاربری و کل تعداد لکه‌های موجود را در محدوده مورد مطالعه، PD نسبت تعداد لکه‌های کلاس‌های کاربری به مساحت، LPI بزرگترین لکه از هر کلاس کاربری، ED و AWMPFD اندازه‌گیری‌های مربوط به پیچیدگی‌های شکل و قالب لکه‌ها، AI و ENN

جدول ۱- شاخص‌های مکانی انتخاب شده در تحقیق

شاخص	علامت اختصاری	توضیحات	رابطه
متوسط اندازه لکه‌ها	AREA_MN	مجموع مساحت کل لکه‌های مربوط به کلاس کاربری مشخص، تقسیم بر تعداد لکه‌های موجود از همان کلاس کاربری	$AREA_MN = \frac{\sum_{i=1}^n a_{ij}}{n_i}$
تعداد لکه‌ها	NP	عبارت است از تعداد لکه‌های موجود از کلاس کاربری مورد نظر	$NP = n_i$
بعد فراکتال	FRAC_AM	نسبت لگاریتم محیط لکه به مساحت لکه را در نظر می‌گیرد و مربوط به مشخص کردن پیچیدگی شکل لکه‌ها می‌باشد	$FRAC = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{2 \ln(0.25 p_{ij})}{\ln a_{ij}} \right) \left(\frac{a_{ij}}{A} \right) \right]$
میانگین فاصله از نزدیک‌ترین همسایه	ENN_MN	میانگین فاصله‌ی لکه‌های کلاس کاربری مورد نظر از نزدیک‌ترین لکه‌ی مجاور از نوع همان کلاس کاربری	$ENN_{MN} = \frac{\sum_{j=1}^n h_{ij}}{n_i}$
شاخص بزرگترین لکه	LPI	مساحت بزرگترین لکه‌ی موجود در منطقه مورد مطالعه تقسیم بر مساحت کل محدوده مورد مطالعه به درصد	$LPI = \frac{\max(a_{ij})}{A} \times 100$
شاخص تراکم	AI	مقدار مرز مشترک لکه‌های مجاور از یک نوع کلاس کاربری تقسیم بر بزرگترین مقدار طول مرز مشترک بین دو لکه از همان کلاس کاربری	$AI = \left \frac{g_{ii}}{\max \rightarrow g_{ii}} \right \times 100$
مساحت کلاس	CA	مساحت کل تحت پوشش کلاس کاربری مشخص بر حسب هکتار	$CA = \left(\frac{1}{10000} \right) \sum_{j=1}^n a_{ij}$
تراکم لکه	PD	تعداد لکه‌های موجود از کلاس کاربری مشخص تقسیم بر مساحت کل محدوده مورد مطالعه بر حسب واحد هکتار	$PD = \frac{N}{A} \times 10000$
تراکم حاشیه	ED	مجموع طول حاشیه تمام لکه‌های موجود از کلاس کاربری مشخص تقسیم بر مساحت کل محدوده بر حسب هکتار	$ED = \frac{E}{A} \times 10000$

معمولاً به طور کلی در مسائل تخصیص کاربری، از منظر پایداری اجتماعی یک شهر ایده آل را شهری با دسترسی، فشردگی (تراکم) و سازگاری مناسب میان کاربری‌ها تعریف می‌کنند. [۴، ۶، ۱۶، ۳۰-۳۴]. همچنین علاوه بر اهداف اجتماعی مذکور، عوامل دیگری در تخصیص بهینه کاربری اراضی چون تناسب قطعه زمین با کاربری تخصیص یافته و هزینه‌ای که در ازای تغییر کاربری قطعات زمین ایجاد می‌شود، نیز از اهمیت بسیار زیادی برخوردار هستند [۱۰].

بنا بر این اهداف در نظر گرفته شده در این تحقیق شامل چهار هدف بیشینه‌سازی سازگاری، بیشینه‌سازی تناسب فیزیکی زمین، بیشینه‌سازی دسترسی به راه‌ها و کمینه‌سازی هزینه تغییرات کاربری‌ها، به منظور برنامه‌ریزی کاربری‌ها در نظر گرفته شده است. در ادامه هر یک از اهداف و تعریف ریاضی آن‌ها بیان می‌گردد.

۳- توسعه مدل بهینه سازی چندهدفه

در این بخش محدوده مورد مطالعه، نحوه تعریف توابع هدف، محدودیت‌ها و روش انجام مدلسازی تخصیص کاربری اراضی و رتبه‌بندی جواب‌ها با استفاده از شاخص‌های مکانی ارائه خواهد شد.

۳-۱- تعریف توابع هدف

یکی از مهم‌ترین جنبه‌های برنامه ریزی شهری پایدار در نظر گرفتن رفاه جامعه می‌باشد. چنین سیستمی به نحوه خدمات رسانی و عدالت اجتماعی که در واقع بر روی برآورده ساختن نیازها و درخواست‌های گروه‌ها و اقشار مختلف جامعه تمرکز دارد، توجه ویژه‌ای باید داشته باشد. از آنجائیکه برشمردن تمامی المان‌های عدالت اجتماعی امری دشوار است،

۳-۱-۱- سازگاری کاربری‌های مجاور

جدول ۲- ماتریس سازگاری میان کاربری‌ها

کاربری کاربری	کاربری کاربری	صنعتی	بایر	مسکونی	آبی	پارک و فضای سبز	سایر
صنعتی	۱	۰,۷۴	۰,۴۱	۰,۴۷	۰,۶۸	۰,۷۴	۰,۷۴
بایر		۱	۰,۴۷	۰,۴۱	۰,۷۴	۰,۷۴	۰,۷۴
مسکونی			۱	۰,۸۸	۰,۸۸	۰,۴۷	۰,۴۷
آب				۱	۰,۸۸	۰,۷۴	۰,۷۴
پارک و فضای سبز					۱	۰,۷۴	۰,۷۴
سایر							۱

۳-۱-۲- تناسب فیزیکی زمین

یکی دیگر از عوامل مؤثر در تخصیص کاربری، تناسب زمین از نظر فاکتورهایی مانند ارتفاع، جنس خاک، شیب، مساحت، آب و هوا برای کاربری مورد نظر است. در مباحث شهری معمولاً غالب فاکتورها مانند جنس خاک و آب و هوا که در محیط شهری یکسان است لحاظ نمی‌شوند و نقشه شیب که بیشترین تغییر را در محیط شهری دارد، به عنوان نقشه تناسب محیطی لحاظ می‌گردد. [۵]. در این تحقیق فاکتور شیب، همانند شکل ۵ (الف)، به منظور تعیین تناسب زمین برای کاربری در نظر گرفته شده است و مساحت زمین نیز به صورت محدودیت در کاربری‌ها اعمال شده است. به منظور تعریف ماتریس تناسب فیزیکی زمین برای کاربری‌های مختلف همانند جدول سازگاری از تحقیقات پیشین و نظر کارشناسان کمک گرفته شده است و نتایج در جدول ۳ قرار گرفته است [۱۰]. هدف بیشینه‌سازی تناسب فیزیکی سرزمین مطابق رابطه ۴ زیر محاسبه می‌گردد:

$$F2 = \text{maximize} \left(\frac{1}{nm} \sum_{ij} Suit_{ij} \right) + \text{min} Suit_{ij} \quad (4)$$

در این رابطه $F2$ مقدار تابع هدف بیشینه تناسب فیزیکی سرزمین $Suit_{ij}$ از مقادیر جدول تناسب زمین استخراج می‌گردد و n و m نیز ابعاد نقشه می‌باشند.

جدول ۳- ماتریس ضرایب مناسبت زمین برای کاربری‌ها

شیب (درصد)	کاربری کاربری	۳-۰	۳-۸	۸-۱۵	۱۵-۳۰	به بالا
صنعتی	۱	۰,۹	۰,۵	۰,۱	۰	۰
بایر	۰	۰	۰,۱	۰,۷	۱	۱
مسکونی	۱	۰,۸	۰,۳	۰	۰	۰
آبی	۰,۸	۰,۹	۰,۷	۰,۴	۰,۱	۰,۱
پارک و فضای سبز	۰,۸	۱	۰,۸	۰,۵	۰,۲	۰,۲

2 Physical Suitability

در زمینه های مختلف برنامه ریزی کاربری اراضی، میزان فشردگی و پیوستگی قطعات به دلیل تاثیر بر کاهش مصرف انرژی و نیز ارتقای دسترسی و عدالت اجتماعی مورد نظر است [۱]. هر کاربری دارای سطحی از کاربری با همسایگان خود می‌باشد. در واقع سازگاری به معنی نداشتن اثر منفی کاربری‌های مجاور بر روی یکدیگر است. معمولاً سازگاری توسط ماتریسی بین کاربری‌ها تعریف می‌شود، ماتریس سازگاری در این تحقیق با استفاده از ضرایب تعیین شده در تحقیقات قبلی و نظر کارشناسان تعیین شده است و در جدول ۲ آورده شده است [۱، ۱۰، ۳۲، ۳۴، ۳۵]. تابع هدف بیشینه‌سازی سازگاری یک نقشه کاربری اراضی از رابطه ۳ زیر محاسبه می‌گردد [۱، ۲، ۱۰، ۳۵]:

$$F1 = \text{maximize} \left(\frac{1}{nm} \sum_{ij} \sum_{kl} C_{ij,kl} \right) + \text{min} C_{ij,kl} \quad (3)$$

که $C_{ij,kl}$ بیانگر سازگاری کاربری پیکسل i, j با کاربری پیکسل k, l می‌باشد که از مقادیر موجود در جدول سازگاری استخراج می‌گردد و n و m تعداد سطر و ستون نقشه می‌باشند. همچنین جمله‌ی دوم تابع هدف به این دلیل در نظر گرفته شده است که در مواردی در یک چینش با اینکه میانگین سازگاری‌ها در حد قابل قبولی بالا باشد ولی در این میانگین، بخشی از سازگارهای بسیار ضعیف توسط سازگاری‌های بسیار بالا جبران شده باشند. یعنی در یک چینش، الگوریتم با جمع یک سازگاری بالا و یک سازگاری پایین به یک میانگین سازگاری متوسط و مطلوب دست پیدا کند. برای جلوگیری از این حالت، لازم است جمله‌ی دیگری نیز به تابع هدف سازگاری اضافه شود. با استفاده از این جمله، الگوریتم کمترین مقدار سازگاری را نیز بیشینه خواهد کرد. یا به عبارتی دیگر حتی الامکان جواب‌هایی که دارای مقادیر سازگاری بسیار کمی هستند حذف می‌شوند. به این ترتیب حالت جبرانی در مجموع سازگاری‌ها تا حد قابل قبولی برطرف خواهد شد. محدوده‌ی شعاع تاثیر نیز ۸۰۰ متر (۸ پیکسل) در نظر گرفته شده است.

1 Compatibility

۳-۱-۳- دسترسی پذیری Accessibility

یکی دیگر از اهداف مهم در بهینه‌سازی کاربری اراضی، در نظر گرفتن دسترسی کاربری‌های مختلف به معابر می‌باشد، هم به این دلیل که بر عملکرد کلی شهر تأثیر مثبت خواهد گذاشت و هم به دلیل اینکه بسیاری از مشکلات شهری مانند ترافیک و آلودگی‌ها با برقراری دسترسی متناسب برای کاربری‌های مختلف می‌تواند کاهش چشمگیری داشته باشد [۱]. بدین منظور در این تحقیق نقشه‌ی راه‌های درجه ۱ و درجه ۲ شهر تهران مطابق آنچه در شکل ۵ (پ) و (ت) مشاهده می‌شود استخراج شد و با کمک گرفتن از نظر کارشناسان و

تحقیقات پیشین وزن‌های مربوط به نزدیکی هر یک کاربری‌ها به راه‌ها مشخص گردید که در جدول ۳ و ۴ قابل مشاهده می‌باشد [۹، ۱۰، ۳۶]. در نهایت تابع هدف دسترسی از رابطه ۵ محاسبه می‌گردد:

$$F3 = maximize \left(\frac{1}{nm} \sum_{ij} A_{ij} \right) + min A_{ij} \quad (5)$$

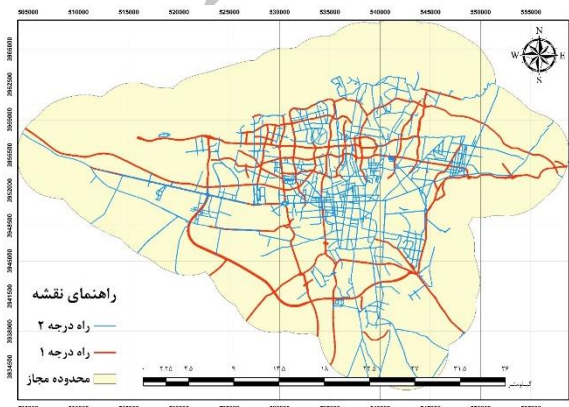
که مقدار تابع هدف بیشینه دسترسی پذیری و A_{ij} مقدار دسترسی محاسبه شده برای هر پیکسل با توجه به مقادیر وزن‌های موجود در جدول ۴ و ۵ و n و m تعداد سطرها و ستون‌های نقشه می‌باشند.

جدول ۴- ماتریس ضرایب دسترسی کاربری‌ها به راه‌های درجه ۱

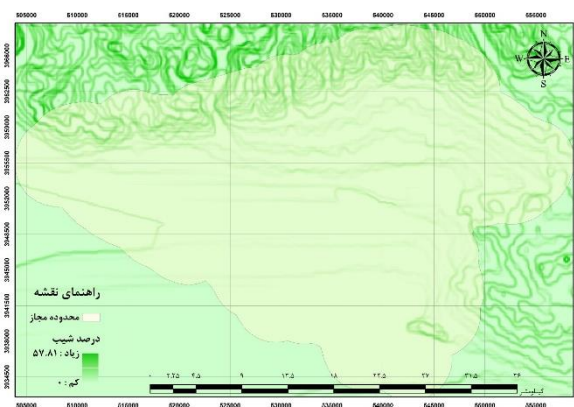
فاصله (متر) / کاربری	۲۰۰-۰	۵۰۰-۲۰۰	۱۰۰۰-۵۰۰	۲۰۰۰-۱۰۰۰	۴۰۰۰-۲۰۰۰	به بالا
صنعتی	۰,۸	۱	۰,۸	۰,۵	۰,۲	۰
بایر	۰	۰	۰	۰,۳	۰,۸	۱
مسکونی	۱	۰,۸	۰,۵	۰,۲	۰	۰
آبی	۰,۷	۰,۹	۰,۱	۰,۷	۰,۵	۰,۱
پارک و فضای سبز	۰,۸	۱	۱	۰,۸	۰,۴	۰

جدول ۵- ماتریس ضرایب دسترسی کاربری‌ها به راه‌های درجه ۲

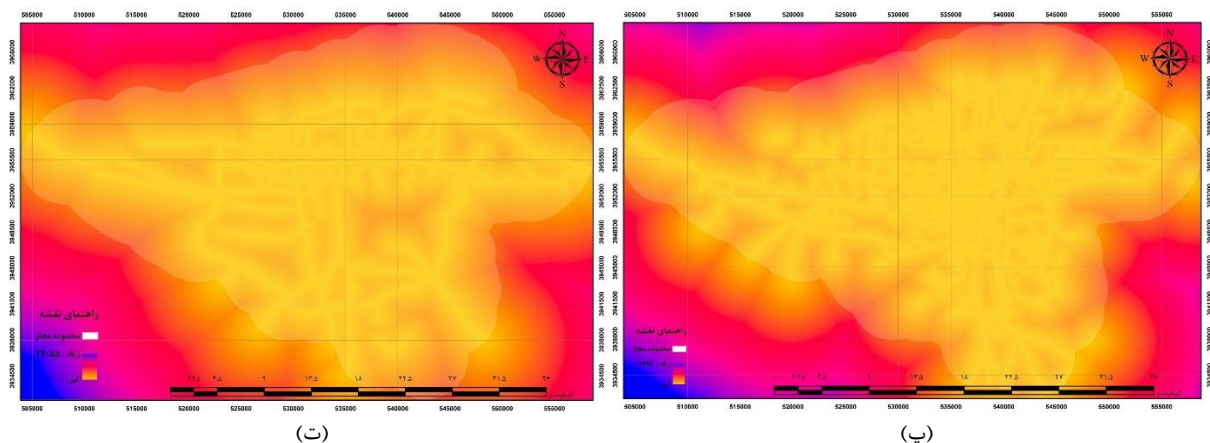
فاصله (متر) / کاربری	۲۰۰-۰	۴۰۰-۲۰۰	۸۰۰-۴۰۰	۸۰۰-۱۲۰۰	به بالا
صنعتی	۰,۸	۱	۰,۸	۰,۲	۰
بایر	۰	۰	۰,۱	۰,۸	۱
مسکونی	۱	۰,۸	۰,۵	۰	۰
آبی	۰,۸	۱	۱	۰,۴	۰
پارک و فضای سبز	۰,۷	۰,۹	۱	۰,۴	۰



(ب)



(الف)



شکل ۵- نقشه‌های فاکتور شهر تهران (الف) شیب، (ب) راه‌ها، (پ) فاصله از راه‌های درجه ۲ و (ت) فاصله از راه‌های درجه ۱

منظور جلوگیری از به وجود آمدن حالت جبرانی در مجموع مناسب‌ها، جمله‌ی دوم به تابع هدف اضافه شد.

جدول ۶- ماتریس هزینه‌ی تغییرات کاربری‌ها

کاربری قدیم \ کاربری جدید	صنعتی	بایر	مسکونی	آبی	پارک و فضای سبز	سایر
صنعتی	۰	۱	۰,۳	۱	۱	۱
بایر	۰	۰	۰	۰	۰	۰
مسکونی	۱	۱	۰	۱	۱	۱
آبی	۰,۹	۱	۰,۷	۰	۰,۹	۱
پارک و فضای سبز	۰,۷	۱	۰,۵	۰,۹	۰	۱
سایر	۱	۱	۱	۱	۱	۰

۳-۲- شرایط و محدودیت‌ها

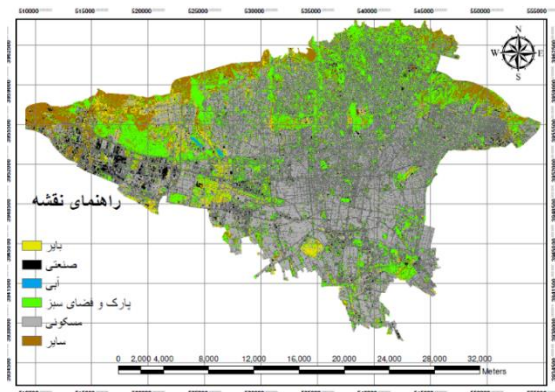
در مسائل تخصیص کاربری اراضی شهری محدودیت‌ها و شرایطی نیز وجود دارد که باید در نظر گرفته شود، محدودیت‌هایی چون مناطقی که تغییر در آن‌ها ممنوع است مانند مناطق حفاظت شده و کاربری‌های آبی موجود در سطح شهر و یا در نظر گرفتن مقدار افزایش تقاضا که متناسب با داده‌های افزایش جمعیتی از سال‌های قبل به دست می‌آید [۱]. در این تحقیق برای محاسبه‌ی تقاضا از نسبت بین تعداد پیکسل‌های هر کاربری به کل پیکسل‌های محدوده در سال‌های ۱۳۸۰، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۰ استفاده شده است. با در نظر گرفتن محدوده شهر در سال ۱۳۹۰ میزان تقاضای هر کاربری در سال افق، با نرخ به دست آمده از سال‌های قبل با استفاده از رگرسیون ساده خطی محاسبه می‌گردد. میزان تقاضا به عنوان یک قید وارد الگوریتم می‌گردد و جمعیت اولیه با توجه به میزان تقاضا شکل می‌گیرد، همچنین در مراحل اجرای الگوریتم

۳-۱-۴- مقاومت در برابر تغییر کاربری

کمینه‌سازی تغییرات کاربری‌های مهم مانند کاربری شهری و صنعتی موجب کاهش هزینه‌های مربوط به تخریب این اماکن و در نتیجه فواید اقتصادی را برای پایتخت در پیش خواهد داشت [۱]. از سوی دیگر به منظور حفاظت از محیط‌زیست نیز لازم است تا برخی کاربری‌ها مانند فضای سبز و دریاچه‌ها تا حد امکان دست نخورده باقی بمانند. به منظور برقراری تعادل میان این اهداف لازم است تا هزینه‌ی تغییرات میان کاربری‌ها نیز با توجه به نظر کارشناسان مدنظر قرار گیرد و در مسئله وارد شود. نتایج وزن دهی به هزینه‌ی تغییر هر یک از کاربری‌ها در جدول ۶ مشاهده می‌شود [۱، ۱۰، ۳۰، ۳۷]. تابع هدف هزینه‌ی تغییرات کاربری نیز از رابطه ۶ محاسبه می‌گردد:

$$F4 = \text{minimize} \left(\frac{1}{nm} \sum_{ij} Cost_{ij} \right) + \max Cost_{ij} \quad (6)$$

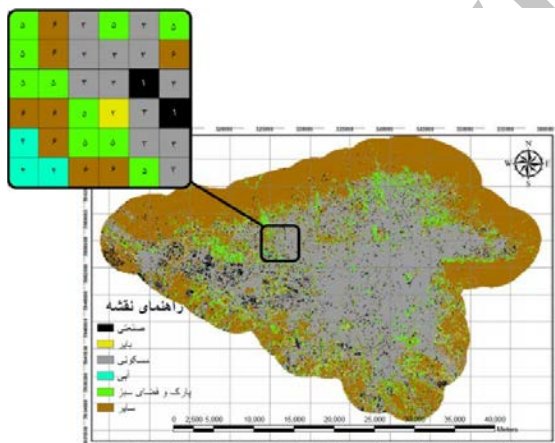
که در این رابطه، $F4$ مقدار تابع هدف کمینه تغییرات کاربری‌ها و $Cost_{ij}$ مقدار تابع هزینه برای هر پیکسل می‌باشد و نحوه محاسبه‌ی آن بدین صورت است که کاربری پیکسل مورد نظر در نقشه مدلسازی حاصل از الگوریتم با کاربری همان پیکسل در نقشه‌ی وضع موجود (سال ۱۳۹۰) مقایسه می‌گردد و به عنوان مثال در سال ۹۰ کاربری بایر بوده است و در نقشه‌ی مدلسازی جدید به کاربری مسکونی تغییر پیدا کرده، مقدار تابع هزینه‌ی تبدیل کاربری بایر به کاربری مسکونی از جدول شماره ۶ بدست آمده و این عدد به آن پیکسل تعلق می‌گیرد. n و m نیز تعداد سطرها و ستون‌های نقشه می‌باشند. همانطور که در رابطه‌ی ۶ ملاحظه می‌شود، در این تابع هدف نیز به



شکل ۷- محدوده مورد مطالعه (شهر تهران)

۴-۳- سازگاری مسئله با NSGA-II

کدگذاری ارائه شده در این تحقیق به صورت گسسته بوده و هر کروموزوم معرف یک نقشه کاربری می‌باشد. در واقع ژن‌ها اعداد ۱ تا ۶ هستند که هر عدد معرف یک کاربری می‌باشد؛ بنابراین یک کروموزوم متشکل از یک فضای دوبعدی از ژن‌ها می‌باشد که موقعیت هر ژن نشان‌دهنده یک واحد مکانی از منطقه است و ارزش آن بیانگر کاربری تخصیص یافته به آن واحد می‌باشد. شکل ۸ نحوه کدگذاری کروموزوم‌ها در الگوریتم NSGA-II را نمایش می‌دهد. در نتیجه جمعیت اولیه و جبهه جواب خروجی در این تحقیق مجموعه‌ای از نقشه‌های کاربری شهر تهران می‌باشد.



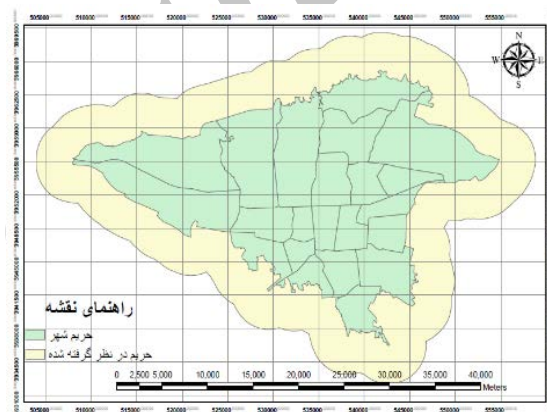
شکل ۸- نمونه‌ای از کدگذاری کروموزوم‌ها در الگوریتم NSGA-II

۴-۳-۱- جمعیت اولیه

جهت تشکیل هر کروموزوم از جمعیت اولیه، ابتدا کلیه پیکسل‌ها شناسایی و سپس به طور تصادفی کاربری‌های جدید به آن‌ها تعلق می‌گیرد که تقاضای مورد نیاز را برآورده سازد. در این تحقیق ۴۰ درصد از جمعیت اولیه از وضعیت موجود با تعریف عملگری برای معاوضه ژنی با دلیل حفظ شکل منطقه

فیلتری در نظر گرفته شده است که اگر جواب تولید شده میزان حداقل‌های تقاضا را دارا نباشد از میان جواب‌ها حذف شده و عملیات تکرار گردد.

محدوده شهر تهران به عنوان محدوده مجاز، از تصاویر ماهواره‌ای این شهر در سال ۱۳۹۰ استخراج گردیده و در شکل ۶ نمایش داده شده است و محدوده مجاز تخصیص در این تحقیق با توجه به در نظر گرفتن روند رشد شهری بافتری به طول ۴ کیلومتر از نقشه‌ی حریم شهر تهران در سال ۱۳۹۰ مطابق شکل ۶ در نظر گرفته شده است. نواحی خارج از این محدوده وارد فرآیند تخصیص کاربری نمی‌شود. در هنگام اجرای الگوریتم نیز در نظر گرفته شده اولاً به هر پیکسل تنها یک مقدار اختصاص داده شود و ثانیاً به پیکسل‌های با شیب بیشتر از ۴۰ درصد تخصیص صورت نگیرد.



شکل ۶- محدوده مجاز جهت انجام تخصیص کاربری

۳-۳- محدوده مورد مطالعه

شهر تهران، بزرگترین شهر کشور ایران و مرکز استان تهران است. مساحت این شهر ۷۳۰ کیلومترمربع است و ارتفاع کنونی آن از سطح دریا در حدود ۹۰۰ تا ۱۸۰۰ متر است. بر اساس آخرین سرشماری عمومی نفوس و مسکن در سال ۱۳۹۰ جمعیت شهر تهران برابر با ۱۲,۱۸۳,۳۹۱ نفر می‌باشد که در مقایسه با سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۸۵ متوسط رشد سالانه جمعیت معادل ۱/۴۴ درصد بوده است. در این تحقیق محدوده‌ی شهر تهران مطابق شکل ۷ به منظور اجرای مدل در نظر گرفته شده است. تمامی لایه‌های اطلاعاتی به داده‌های رستری با ابعاد ۱۰۰ متر تبدیل شدند که با توجه به مساحت منطقه مورد مطالعه قابل قبول است و کاربری‌ها در ۶ کلاس صنعتی، مسکونی، پارک و فضای سبز، آبی، بایر و سایر کاربری‌ها در نظر گرفته شده اند.

۳-۵- سازگاری مسئله با MOPSO

در این الگوریتم نیز مانند الگوریتم NSGA-II، اعداد نشان دهنده‌ی کاربری‌ها می‌باشند. هر ذره در مدل به صورت n خانه تعریف شده است که محتویات خانه‌ها، کاربری متناظر با زمین است و n تعداد کل پیکسل‌های موجود در منطقه‌ی مطالعاتی است؛ بنابراین ساختار پاسخ به شکل یک ذره خواهد بود که هر خانه‌ی آن نشان دهنده‌ی یک پیکسل است و پاسخ کلاس کاربری نسبت داده شده به خانه است. فضای مسئله یک فضای گسسته می‌باشد و الگوریتم ازدحام ذرات ذاتاً قابلیت کار با فضاهای پیوسته را دارد و با اعداد حقیقی (معمولاً بین ۰ و ۱) کار می‌کند. برای تبدیل فضای مسئله به فضای الگوریتم لازم است تبدیلاتی میان دو فضا انجام شود که در این تحقیق به منظور راحتی کار تبدیل خطی ساده به صورت نگاشت زیر در نظر گرفته شده است [۹].

$$C_i = \min([nx_i + 1], n) \quad (7)$$

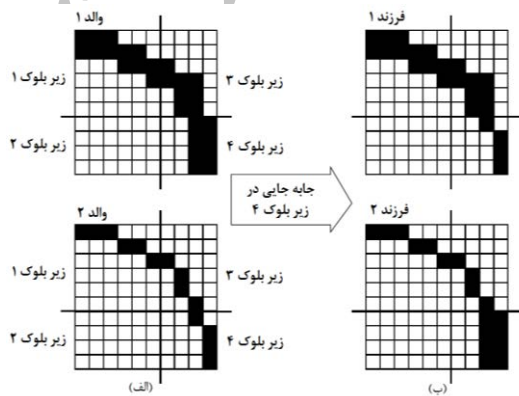
که در این رابطه x_i عدد حقیقی اختصاص داده شده به خانه i درون الگوریتم، n تعداد کاربری‌ها و C_i کاربری نهایی اختصاص داده شده به خانه i می‌باشد و با استفاده از رابطه ۷، فضای حقیقی میان ۰ و ۱ در الگوریتم MOPSO به فضای گسسته مربوط به کد کاربری‌ها تبدیل شده است. برای گویا تر شدن مطلب در شکل ۱۱ نحوه‌ی تصویر این دو فضا در یکدیگر به نمایش در آمده است. گفتنی است این پروسه در مواردی که نیاز به انجام محاسبات بر روی توابع هدف باشد انجام می‌شود. بنابراین همواره ارتباطی دو طرفه میان این دو فضا وجود دارد، یعنی مشخص است هر چینش مربوط به کدام ذره در فضای ۰ و ۱ می‌باشد.

همچنین از آنجا که روش MOPSO بر اساس احتمالات کار می‌کند، تغییر پارامترها در مسئله بر روی نتایج تأثیرگذار است. در این نوع مسائل تعیین پارامترهای اولیه متناسب با مسئله در دو مرحله‌ی قبل و در حین اجرا به صورت سعی و خطا صورت می‌گیرد [۲]. در این تحقیق نیز با امتحان مقادیر مختلف و به صورت آزمایشی پس از بررسی نتایج پارامترهای مناسب و پایدار به صورت $C_1 = 2.05$ و $C_2 = 0.9$ و w در نظر گرفته شدند.

موجود و ۶۰ درصد جمعیت اولیه نیز به طور تصادفی جهت گستردگی فضای جست و جو تولید گردیده است.

۳-۴-۲- عملگر تقاطع

داتا و همکاران در سال ۲۰۰۶ عملگری دو بعدی جهت انجام عمل تقاطع در فضای دو بعدی ارائه کردند که نتایج مطلوبی نیز در بر داشت [۳۸]. در این تحقیق نیز از این روش استفاده شده به این ترتیب که ابتدا دو عدد به صورت تصادفی در دامنه (۰، تعداد سطر نقشه) و (۰، تعداد ستون نقشه) تولید می‌گردد. این دو عدد، هر بلوک نقشه را به چهار زیر بلوک آماده‌ی معاوضه تقسیم می‌کند. سپس یک عدد تصادفی میان (۰، ۴) به منظور انتخاب یکی از چهار زیر بلوک تولید شده جهت معاوضه، تولید می‌گردد و عمل تقاطع مطابق آنچه در شکل ۹ نمایش داده شده، صورت می‌گیرد. نرخ انجام تقاطع ۰،۸ در نظر گرفته شده است.



شکل ۹- نمایش معاوضه ژنی به صورت چهار زیر بلوک از کروموزوم‌های انتخاب شده

۳-۴-۳- عملگر جهش

عملگر جهش کلاس کاربری اراضی را به امید یافتن الگویی بهتر از کاربری اراضی تغییر می‌دهد. برای ایجاد عملگر جهش شرط عدم همسانی در بلوک‌های انتخاب شده اعمال گردید. دو بلوک هم اندازه مطابق شکل ۱۰ در نقشه انتخاب می‌گردد و معاوضه ژنی میان این دو بلوک صورت می‌پذیرد. نرخ انجام جهش ۰،۰۸ در نظر گرفته شده است.

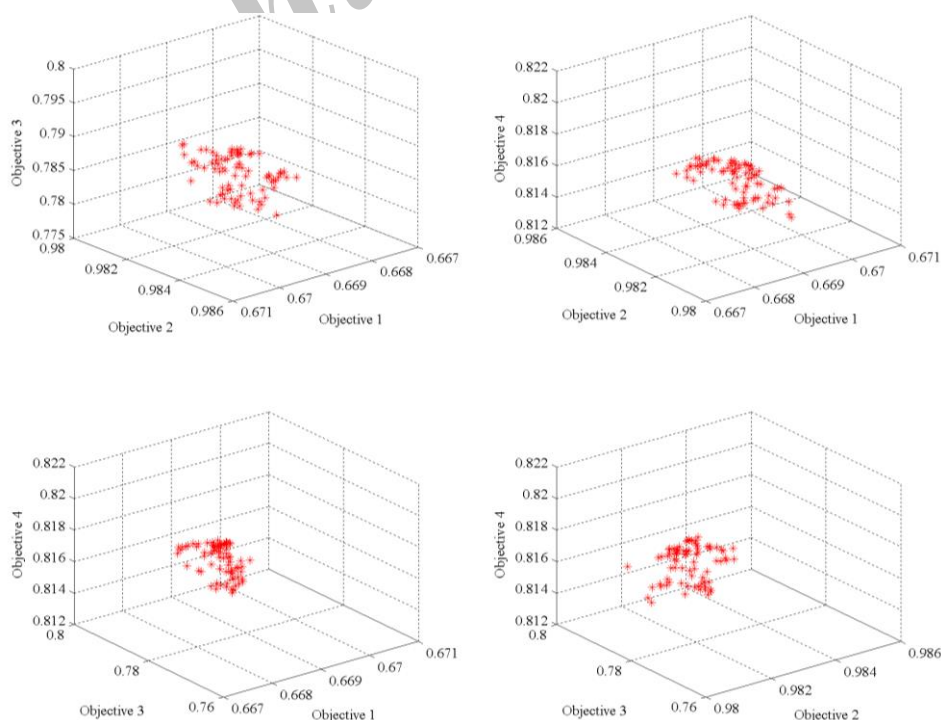


شکل ۱۰- عملگر جهش به صورت معاوضه ژنی دو بعدی

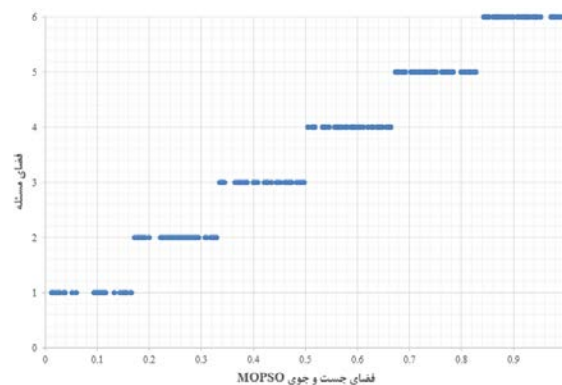
آبی، بایر و سایر کاربری‌ها در نظر گرفته شد. شاخص‌های مکانی گفته شده در سطح کلاس‌های کاربری برای سه دوره‌ی زمانی ۱۳۸۰ و ۱۳۸۵ و ۱۳۹۰ برای شهر تهران محاسبه گردید و برای پیش‌بینی الگوی توسعه شهر در سال ۱۳۹۵ سه سناریو به ترتیب ادامه‌ی روند موجود، رشد پراکنده شهر و رشد فشرده شهر با کمک نظر کارشناسان و انجام رگرسیون ساده خطی در نظر گرفته شد.

۴-۱- نتایج مدلسازی با استفاده از الگوریتم‌های MOPSO و NSGA-II

چینش بهینه‌ی کاربری‌های محدوده مورد مطالعه با تأکید بر تعیین کاربری برای زمین‌های بایر در منطقه با استفاده از الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO به دست آمد. شکل ۱۲ و ۱۳ به ترتیب جبهه جواب‌های سه‌بعدی متناظر با توابع هدف را با استفاده از مدل‌های NSGA-II و با تعداد جمعیت اولیه ۸۰ و تکرار ۱۰۰۰ و MOPSO با تعداد جمعیت اولیه ۸۰ و تکرار ۷۰۰ نشان می‌دهد. به دلیل آنکه که مدل دارای چهار تابع هدف است بنابراین جبهه جواب کلی مسئله نیز چهار بعدی است. از آنجائی که نمایش جبهه جواب چهار بعدی بسیار مشکل است، این فضای چهار بعدی به فضای سه‌بعدی تصویر شده و نتایج نمایش داده شده‌اند.



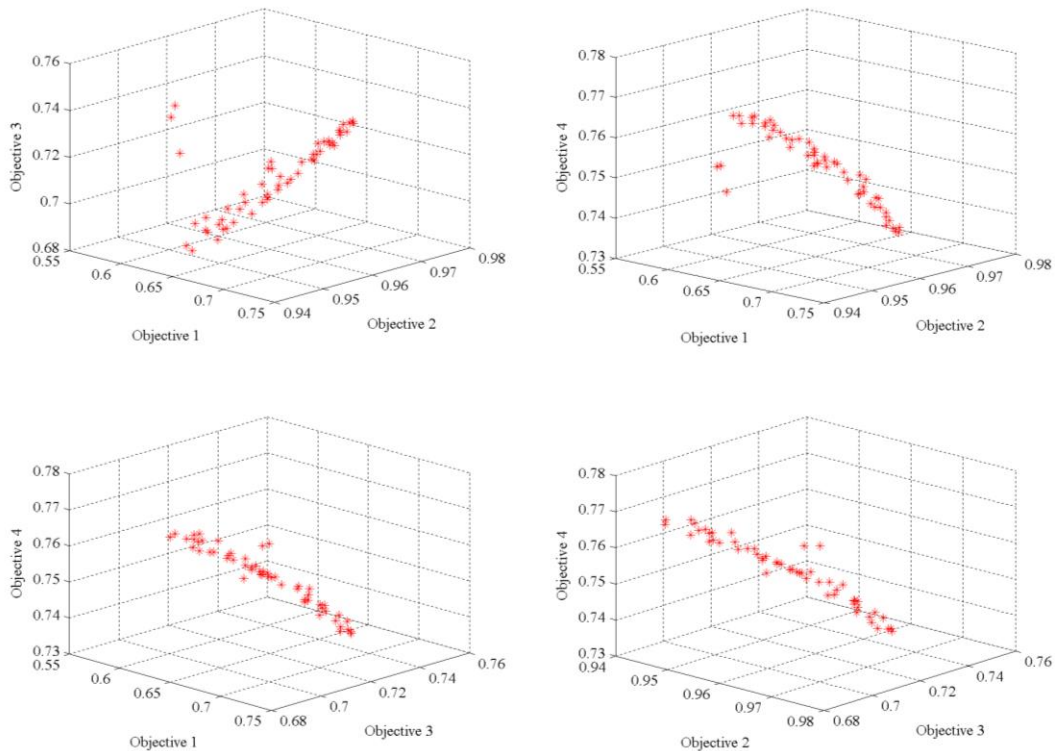
شکل ۱۲- تصویر فضای جواب چهاربعدی جبهه جواب بهینه‌ی بدست آمده از الگوریتم NSGA-II بر فضاهای سه‌بعدی (نقاط نمایش داده شده پاسخ‌های مسئله هستند)



شکل ۱۱- نحوه تصویر فضای پیوسته MOPSO به فضای مسئله توسط تابع نگاشت

۴- نتایج پیاده‌سازی و ارزیابی

در این بخش نتایج حاصل از اجرای مدل که روند اجرای آن در بخش قبل ارائه گردید، در منطقه‌ی مطالعات انتخاب شده، تشریح می‌گردد. گفتنی است مدل در نرم‌افزار Matlab پیاده‌سازی گردید و محاسبات مربوط به شاخص‌های مکانی و تحلیل نتایج در نرم‌افزار FragStats و همچنین اعمال مربوط به پردازش و نمایش سناریوها در نرم‌افزار ArcGIS انجام شده است. نتایج به دست آمده پس از ارزیابی آزمون‌های متداول الگوریتم‌های مدرن از منظر شاخص‌های مکانی نیز مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در این تحقیق، واحد زمین پیکسل‌های به ابعاد ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است و کاربری‌ها در ۶ کلاس صنعتی، مسکونی، پارک و فضای سبز،



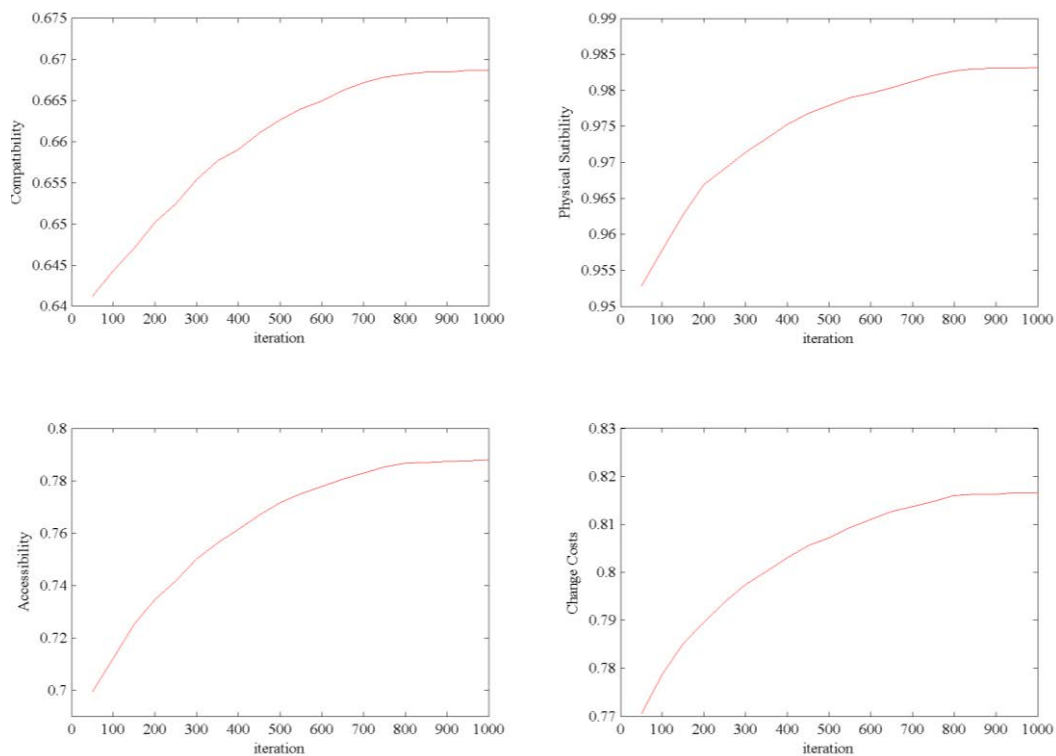
شکل ۱۳- تصویر فضای جواب چهاربعدی جبهه جواب بهینه بدست آمده از الگوریتم MOPSO بر فضاهای سه بعدی (نقاط نمایش داده شده پاسخهای مسئله هستند)

جبهه‌ی اول (Rep) در این روش است. در این تحقیق این تعداد ۶۰ جواب در نظر گرفته شد. تعداد اعضاء این جبهه می‌تواند از ۶۰ کمتر باشد و بیشتر از ۶۰ جواب ممکن نیست. این مطلب در بخش دوم تشریح شده است. همچنین همانطور که در شکل‌ها ملاحظه می‌شود، محدوده‌ی بزرگتری در فضای جست‌وجو توسط MOPSO نسبت به الگوریتم NSGA-II کشف شده است. این امر می‌تواند به دلیل مکانیزم عمل MOPSO و استفاده از مزایای هوش تجمعی و جهش در وادار کردن این الگوریتم در کشف فضاهای جدیدتر باشد.

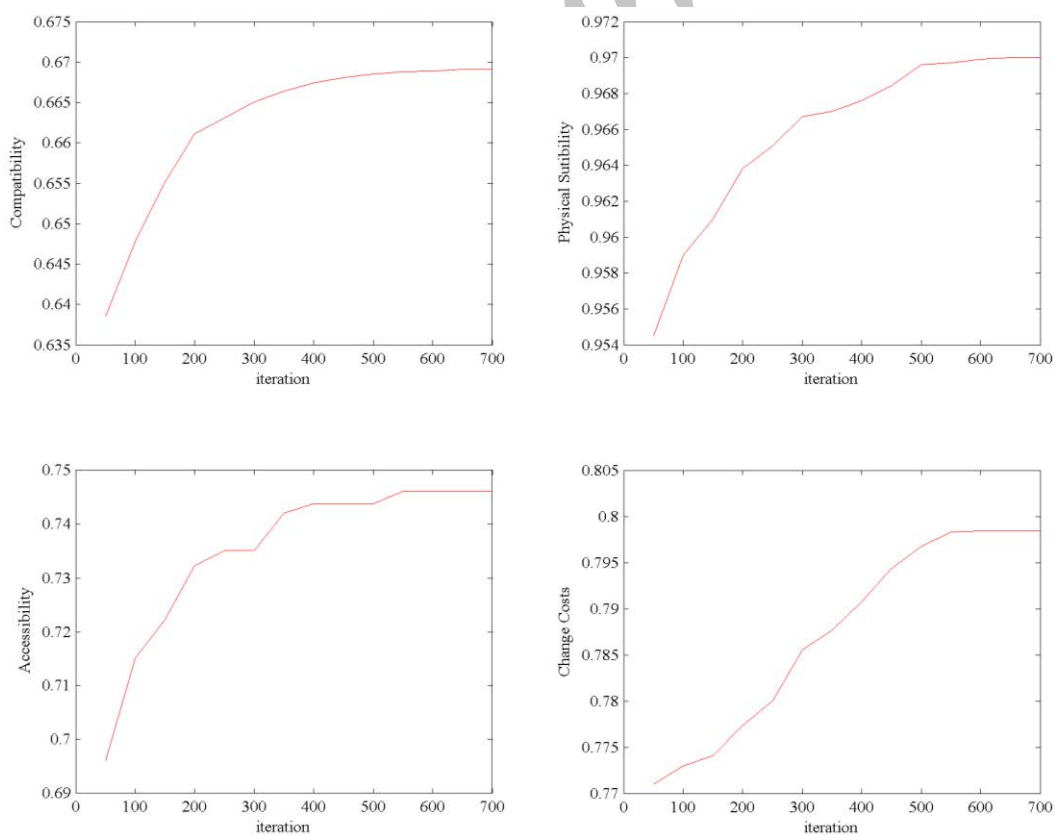
به منظور نمایش همگرایی هر دو الگوریتم نیز در شکل ۱۴ و ۱۵ نمودار تغییر مقادیر بیشینه هر یک از توابع هدف در هر ۵۰ تکرار نمایش داده شده است. مهمترین عاملی که نشان دهنده‌ی همگرایی الگوریتم است ثابت ماندن مقادیر توابع هدف پس از تعداد تکرار مشخص است. در حقیقت پس از اینکه الگوریتم همگرا می‌شود، تغییر معنی داری در مقادیر تابع هدف صورت نمی‌گیرد [۱۴].

بنابراین یکی از خروجی‌های تحقیق جبهه جواب بهینه است که با استفاده از آن تصمیم‌گیرنده می‌تواند با مشخص نمودن الویت‌های تصمیم‌گیری چینش متناظر را ملاحظه کند. همانطور که مشاهده می‌شود جبهه جواب بهینه (جبهه‌ی پارتو) در الگوریتم NSGA-II دارای نقاط متراکم و نزدیک به هم از نظر توابع هدف است. یکی از دلایل این امر نحوه‌ی کار الگوریتم NSGA-II است. با اینکه این الگوریتم با استفاده از فاصله‌ی ازدحامی قادر به کنترل ازدحام نقاط بر روی پارتو است ولی مکانیزم عمل این الگوریتم به عنوان یک الگوریتم مبتنی بر ژنتیک، به نحوی است که کنترلی بر روی تعداد نقاط در پارتو وجود ندارد و در بیشترین حالت تعداد جواب‌ها برابر تعداد جمعیت اولیه است. یعنی جواب‌ها به قدری بهبود داده می‌شوند که کل جمعیت وارد شده به الگوریتم غیر مغلوب باشند و در یک جبهه قرار گیرند.

از طرفی جبهه جواب بهینه بدست آمده در MOPSO دارای اعضاء کمتری نسبت به روش NSGA-II است. این امر به دلیل قابل کنترل بودن تعداد جواب‌های موجود در



شکل ۱۴- تغییر مقادیر بیشینه‌ی هر یک از چهار تابع هدف در الگوریتم NSGA-II



شکل ۱۵- تغییر مقادیر بیشینه‌ی هر یک از چهار تابع هدف در الگوریتم MOPSO

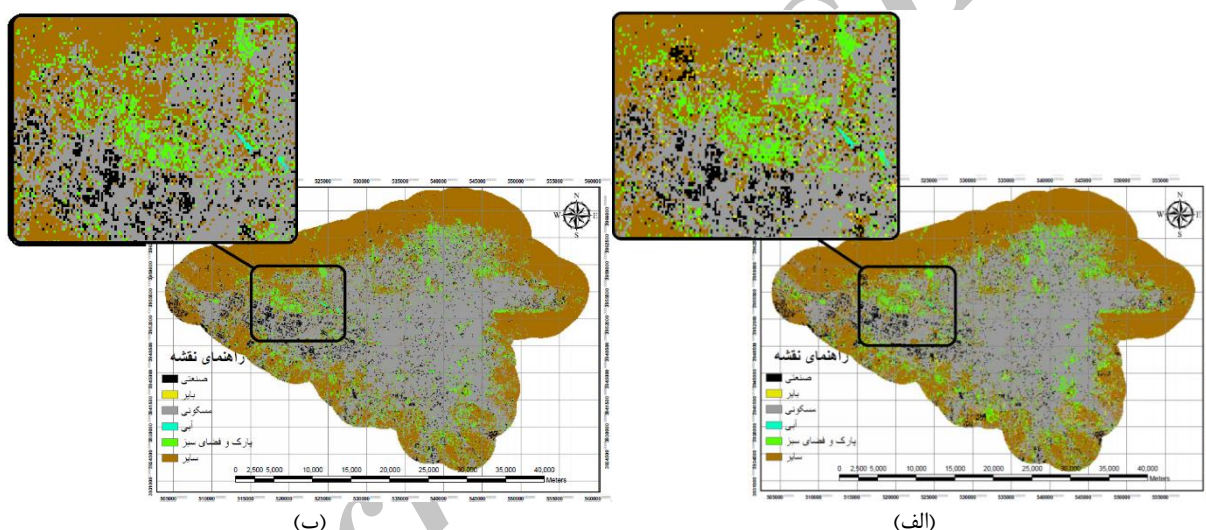
می‌کنند. همچنین در الگوریتم NSGA-II حدوداً پس از ۶۰۰ تکرار و در الگوریتم MOPSO حدوداً پس از ۷۰۰

با توجه به شکل‌های ۱۴ و ۱۵ می‌توان دریافت که مقادیر هر چهار تابع هدف با افزایش تکرارها بهبود پیدا

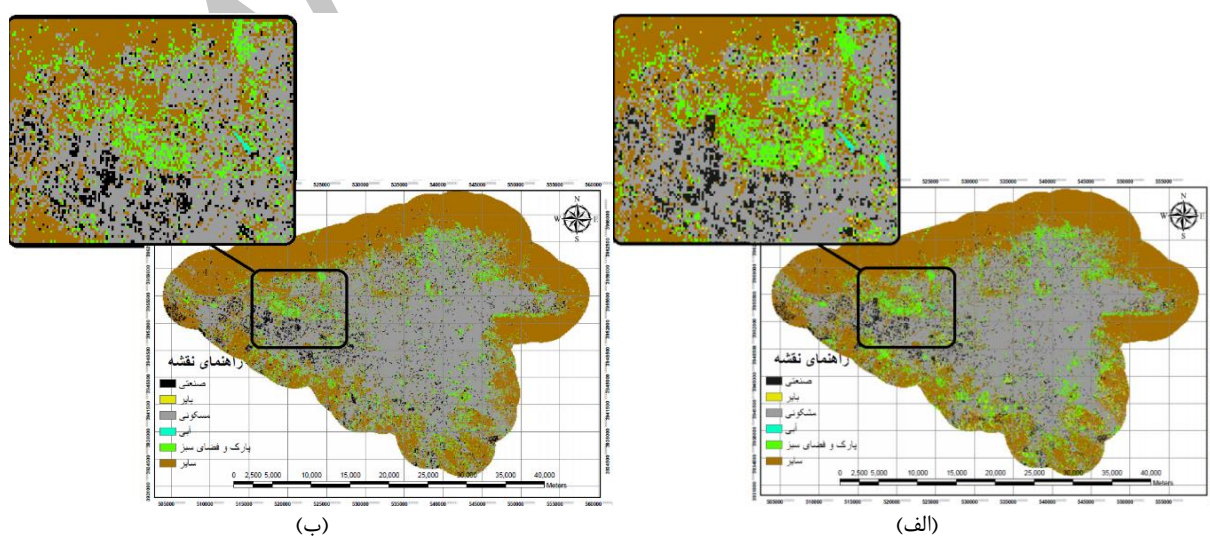
در NSGA-II می‌تواند همخوانی نوع مسئله با نوع الگوریتم باشد.

در جبهه‌های پارتو معمولاً جواب‌هایی که هرکدام از لحاظ یک تابع هدف بیشینه باشند بیشترین تفاوت‌ها را با یکدیگر دارند، از این رو جهت بررسی و رتبه بندی بصری نقشه‌های تولید شده توسط دو مدل، در شکل‌های ۱۶ الی ۲۰ چیدمان‌های بهینه مربوط به بیشینه‌سازی هر یک از توابع هدف و همچنین یک حالت تعادلی میان توابع هدف از میان جواب‌های حاصل از هر دو مدل، به عنوان نمونه آورده شده است. برای مثال نقشه‌های شکل ۱۶ (الف) و (ب) به ترتیب راه‌حلی هستند که در آخرین تکرار، دارای بیشترین مقدار سازگاری در الگوریتم NSGA-II و الگوریتم MOPSO می‌باشند.

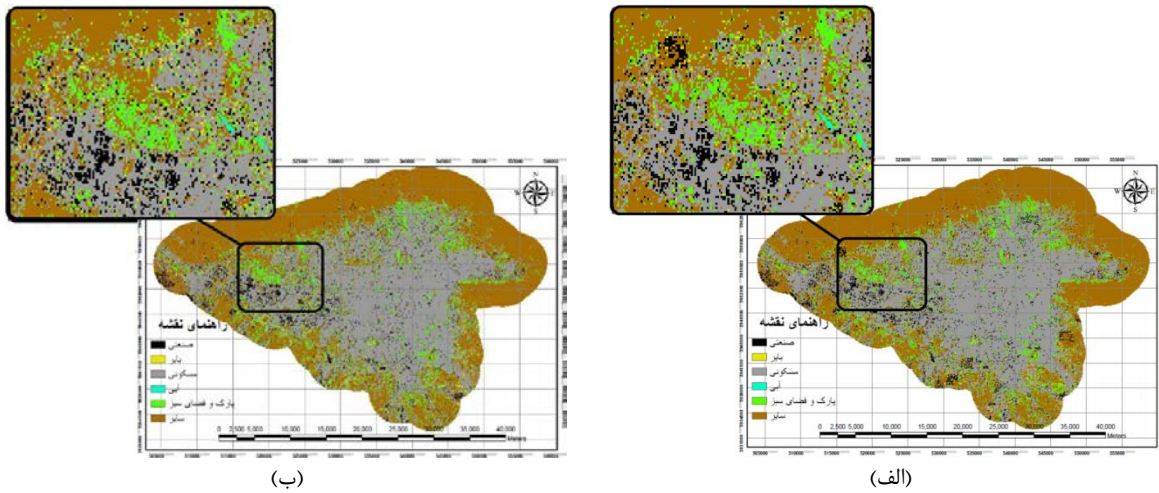
تغییر معنی داری در توابع هدف صورت نمی‌گیرد. مکانیزم الگوریتم و بهره بردن از جست و جوی تعاملی و استفاده از هوش جمعی می‌تواند یکی از دلایل همگرایی سریع‌تر الگوریتم MOPSO باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت هر دو الگوریتم از همگرایی مناسبی برخوردار می‌باشند. همچنین با مقایسه نمودارهای مربوط به هر دو الگوریتم مشاهده می‌شود که الگوریتم NSGA-II در تمامی اهداف به مقادیر بهتر نسبت به الگوریتم MOPSO دست پیدا کرده است. این امر می‌تواند به دلیل استفاده از عملگرهای جهش و تقاطع در دستیابی به جواب‌های بهتر باشد. همچنین NSGA-II این الگوریتم برای مسائل گسسته است و از آنجائیکه مسئله موجود در این تحقیق نیز یک مسئله گسسته است، دلیل دیگر جواب‌های با کیفیت بهتر



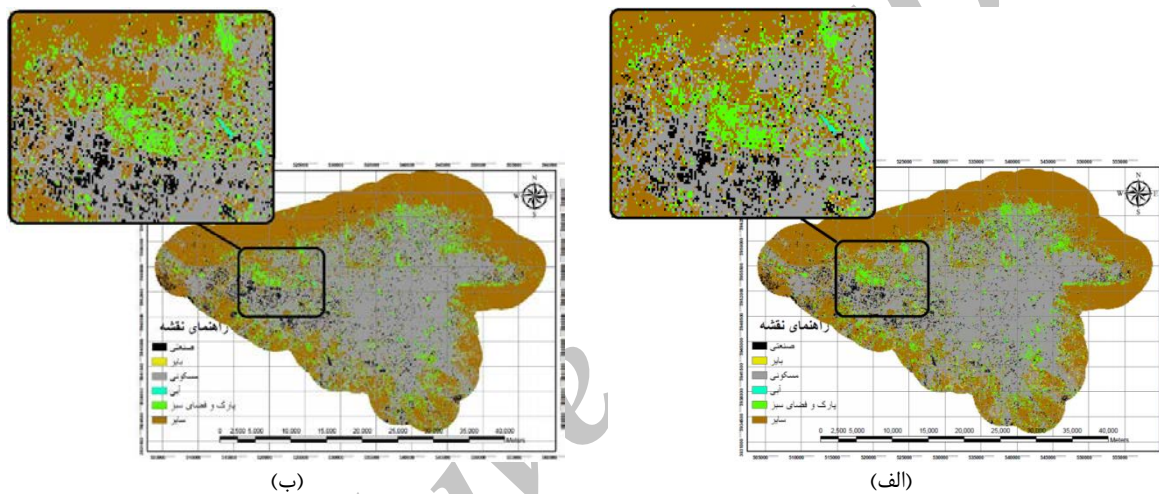
شکل ۱۶- نقشه‌ی مربوط به بیشینه‌سازی هدف سازگاری حاصل از مدل (الف) NSGA-II و (ب) MOPSO



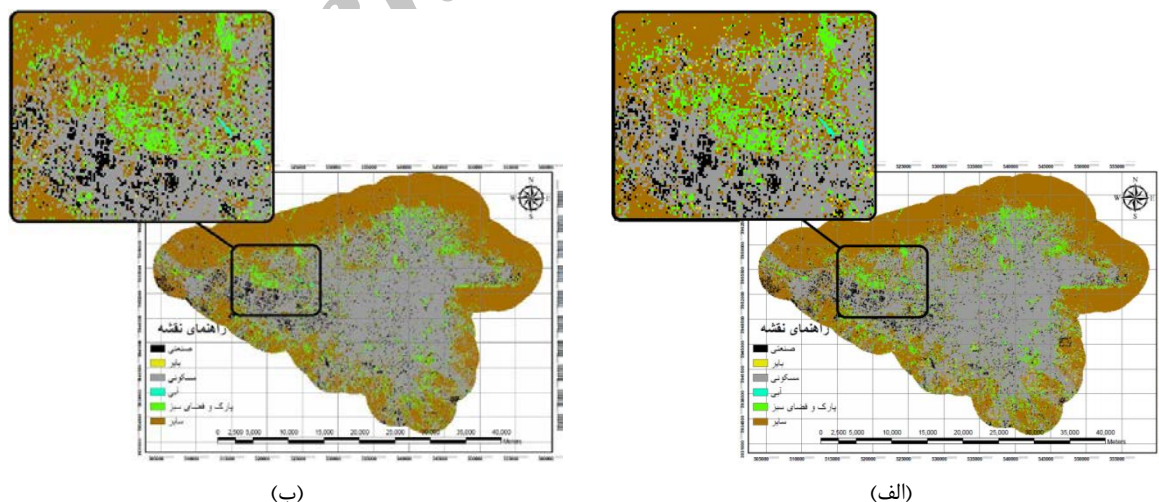
شکل ۱۷- نقشه‌ی مربوط به بیشینه‌سازی هدف مناسبت زمین حاصل از مدل (الف) NSGA-II و (ب) MOPSO



شکل ۱۸- نقشه‌ی مربوط به بیشینه‌سازی هدف دسترسی حاصل از مدل (الف) NSGA_II و (ب) MOPSO



شکل ۱۹- نقشه‌ی مربوط به کمینه‌سازی هدف هزینه‌ی تغییرات حاصل از مدل (الف) NSGA_II و (ب) MOPSO



شکل ۲۰- نقشه‌ی مربوط به برقراری حالت تعادلی میان اهداف حاصل از مدل (الف) NSGA_II و (ب) MOPSO

الگوریتم بیشترین تغییر کاربری مربوط به کلاس کاربری باپر و فضای سبز است. این مسئله به این دلیل است که با توجه به تقاضای مورد نیاز سایر کاربری‌ها مانند مسکونی و

به منظور مشخص‌تر شدن تغییرات در هر جواب قسمتی از محدوده مورد مطالعه بزرگنمایی گردیده است. همانطور که مشاهده می‌شود به طور کلی در هر دو

همچنین مقایسه جواب‌ها با الگوی توسعه شهر در سال افق، شاخص‌های مکانی مورد نظر برای شهر تهران در سال‌های ۱۳۸۵، ۱۳۸۰ و ۱۳۹۰ استخراج گردیدند و با توجه به نتایج سه سناریو برای رشد شهر در سال افق در نظر گرفته شد که مقادیر حاصل برای کاربری‌های مسکونی، صنعتی، بایر و فضای سبز در جدول ۷ و ۸ آورده شده است. اولین سناریو ادامه‌ی روند موجود ساختار توسعه شهر می‌باشد و به‌وسیله‌ی رگرسیون خطی ساده مقادیر برای سال افق به دست می‌آیند، دومین سناریو مربوط به الگوی پراکنده رشد شهری می‌باشد که همراه با افزایش مقادیر شاخص‌هایی مانند تعداد لکه‌ها، تراکم لکه‌ها، تراکم حاشیه‌ها و بعد فراکتال لکه‌ها و در مقابل کاهش شاخص‌های بزرگترین لکه و شاخص تراکم، همراه خواهد بود و سومین سناریو نیز الگوی فشرده‌ی رشد شهری را مورد نظر قرار می‌دهد که با کاهش در مقادیر شاخص‌هایی مانند تعداد لکه‌ها، تراکم لکه‌ها، تراکم حاشیه‌ها و بعد فراکتال لکه‌ها و افزایش در شاخص‌های بزرگترین لکه و شاخص تراکم، همراه خواهد بود. لازم به ذکر است کاربری‌های آبی و سایر به دلیل اینکه در فرآیند مدلسازی به عنوان محدودیت در نظر گرفته شدند لذا تغییراتی در آن‌ها صورت نمی‌گیرد و در محاسبات شاخص‌های مکانی نیز در نظر گرفته نشده‌اند.

صنعتی، بیشترین تغییرات برای جبران تقاضا بر روی این دو کاربری رخ داده است. همچنین پارامتر سختی تغییر که به عنوان یکی از اهداف مسئله در نظر گرفته شده است در این دو نوع با توجه به نظر کارشناسان و اطلاعات موجود در تحقیقات پیشین در پایین تری نسبت به سایر کاربری‌ها قرار دارد. با مقایسه‌ی بصری دو به دو قسمت‌های بزرگنمایی شده در جواب‌های حاصل از هر دو الگوریتم در قسمت‌های بزرگنمایی شده نشان می‌دهد تفاوت بین حالات مختلف MOPSO کمتر از تفاوت نظیر بین حالات مختلف در روش NSGA-II می‌باشد. به عبارت دیگر جواب‌های حاصل از NSGA-II از توزیع بیشتری برخوردار هستند. از طرفی مشاهده می‌شود در جواب‌های مربوط به الگوریتم MOSPO کاربری‌های پارک و فضای سبز و صنعتی از چینش پراکنده تری نسبت به الگوریتم NSGA-II برخوردار می‌باشند و تعداد زیاد از کاربری‌های سبز به کاربری مسکونی و صنعتی تغییر یافته است. این امر در بخش پایانی و در مقایسه الگوریتم‌ها با یکدیگر از نظر تشابه ساختاری با الگوی مکانی شهر توسط شاخص‌های مکانی موجود بررسی خواهد شد.

۴-۲- ارزیابی و رتبه‌بندی جواب‌ها

همان‌طور که در بخش ۲ گفته شد، به منظور رتبه‌بندی جواب‌های تولید شده توسط هر الگوریتم و

جدول ۷- نتایج محاسبات شاخص‌های مکانی برای نقشه‌های کاربری سال‌های ۱۳۸۰، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۰

	کاربری	CA	NP	PD	LPI	ED	AEA-MN	FRAC-AM	ENN-MN	AI
۱۳۸۰	صنعتی	۳۳۳۰	۱۶۸۳	۱,۴۲۰۸	۰,۰۹۴۶	۸,۶۹۱۱	۱,۹۷۸۶	۱,۰۵۹۵	۳۵۵,۵۵۰۲	۲۲,۷۸۴۲
	بایر	۲۰۳۰۳	۲۲۲۰	۱,۸۷۴۱	۱,۹۹۴	۲۹,۳۲۰۸	۹,۱۴۵۵	۱,۲۰۶۶	۲۶۷,۳۱۱۱	۵۷,۱۵۸۸
	مسکونی	۳۸۹۴۲	۱۴۴۷	۱,۲۲۱۶	۲۸,۳۸۹۷	۳۵,۱۰۰۲	۲۶,۹۱۲۲	۱,۳۳۷۷	۲۶۶,۶۰۲۹	۷۳,۶۱۰۴
	پارک و فضای سبز	۱۰۰۰۰	۱۸۱۳	۱,۵۳۰۵	۰,۶۰۰۲	۱۷,۳۶۳۶	۵,۵۱۵۷	۱,۱۳۶۴	۲۹۷,۶۸۵۵	۴۸,۹۱۹۲
۱۳۸۵	صنعتی	۴۵۳۳	۲۲۹۱	۱,۹۳۴۱	۰,۰۶۸۴	۱۲,۰۰۰۳	۱,۹۷۸۶	۱,۰۵۹۵	۳۱۹,۲۷۲۲	۲۱,۵۵۴۱
	بایر	۱۴۰۹۵	۲۸۰۶	۲,۳۶۸۸	۰,۶۲۴۷	۲۷,۱۲	۵,۰۲۳۲	۱,۱۶۲۳	۲۷۲,۱۹۱	۴۲,۹۵۲۲
	مسکونی	۴۰۷۲۵	۱۱۲۵	۰,۹۴۹۷	۳۰,۲۰۷۳	۳۲,۸۱۵۸	۳۶,۲	۱,۳۳۴۳	۲۵۷,۴۴۲۸	۷۶,۴۶۲۷
	پارک و فضای سبز	۹۱۱۶	۱۹۶۹	۱,۶۶۲۲	۰,۴۹۱۳	۱۷,۸۵۵۷	۴,۶۲۹۸	۱,۱۳۶۸	۲۹۰,۹۰۸۲	۴۲,۲۱۵
۱۳۹۰	صنعتی	۵۱۴۲	۲۵۶۷	۲,۱۶۷۱	۰,۰۶۹۲	۱۳,۵۸۳۲	۲,۰۰۳۱	۱,۰۶۰۳	۳۱۱,۵۷۲۷	۲۱,۶۶۶۷
	بایر	۷۹۱۴	۲۳۱۳	۱,۹۵۲۶	۰,۲۷۰۱	۱۷,۴۱۵۹	۳,۴۲۱۵	۱,۱۲۳۹	۳۰۳,۱۱۷۳	۳۴,۷۷۹۶
	مسکونی	۴۶۶۷۱	۱۲۰۰	۱,۰۱۳	۳۶,۰۵۴۲	۳۶,۲۶۴۴	۳۸,۸۹۲۵	۱,۳۴۷	۲۵۵,۶۷۹۶	۷۷,۲۶۰۵
	پارک و فضای سبز	۸۷۴۲	۲۵۷۹	۲,۱۷۷۲	۰,۴۳۰۵	۱۹,۲۷۸۲	۳,۳۸۹۷	۱,۱۱۰۹	۲۸۵,۴۱۸۹	۳۴,۸۰۳۷

جدول ۸- نتایج مقادیر شاخص‌های مکانی برای سناریوهای تعیین شده

	کاربری	CA	NP	PD	LPI	ED	AEA-MN	FRAC-AM	ENN-MN	AI
روند موجود	صنعتی	۵۹۲۲	۲۹۵۸	۲,۴۹۷۸۹	۰,۰۵	۱۵,۷۲۲۷۸۴۸	۲	۱,۰۶۰۳۶۹۴۵	۲۸۸,۹	۲۰,۹۳
	مسکونی	۵۲۱۲۰	۱۱۰۰	۰,۸۸۶۲۰۹	۴۱	۳۷,۳۱۶۵۱۲۵	۴۶,۷۵	۱,۳۵۴۰۵۹۱۸	۲۴۸,۵۸	۷۹,۶۵
	پارک و فضای سبز	۸۴۱۰	۲۵۸۵	۲,۱۸۲۵۴۶	۰,۳۹	۱۹,۳۴۶۳۲۱۶	۳,۱۴	۱,۱۱۳۵۵۱۲۳	۲۸۳,۱۲	۳۲,۷۲
رشد پراکنده	صنعتی	۵۹۲۲	۳۲۰۰	۲,۷	۰,۰۴	۵,۱۶	۲	۱,۰۷	۲۸۸,۹	۱۹,۹۳
	مسکونی	۵۲۱۲۰	۱۴۰۰	۱,۲	۳۲	۳۸	۴۶,۷۵	۱,۳۶	۲۴۸,۵۸	۷۶,۵
	پارک و فضای سبز	۸۴۱۰	۲۷۰۰	۲,۴	۰,۳۵	۲۱,۳	۱۴,۳	۱,۱۲	۲۹۳,۱۲	۵,۲۸
رشد فشرده	صنعتی	۵۹۲۲	۲۷۰۰	۲,۱	۰,۰۶	۱۴,۷	۲	۱,۰۴	۲۸۸,۹	۲۱,۹۳
	مسکونی	۵۲۱۲۰	۱۰۰۰	۰,۷	۴۵	۳۴	۴۶,۷۵	۱,۳۴	۲۴۸,۵۸	۸۲
	پارک و فضای سبز	۸۴۱۰	۲۳۰۰	۲	۰,۴۳	۱۸,۳	۳,۱۴	۱,۱۰	۲۷۳,۱۲	۵,۳۶

به منظور ارزیابی جواب‌های حاصل از مدلسازی و همچنین رتبه‌بندی جواب‌ها با توجه به ساختار و الگوی توسعه شهر و سناریوهای تعیین شده، شاخص‌های مکانی تعیین شده برای هر یک از جواب‌ها محاسبه گردیدند که همان‌گونه که پیش‌تر بحث شد این شاخص‌ها از جنبه‌های مختلف الگوی توسعه شهر را مورد بررسی قرار می‌دهند. مقایسه ساختاری از طریق رابطه ۸ صورت می‌پذیرد [۳۹]:

$$a_1 = 1 - \frac{1}{9} \sum \Delta l_i$$

$$\Delta l_i = \begin{cases} |l_{i,s} - l_{i,o}| & , \quad l = AI, LPI \\ \frac{|l_{i,s} - l_{i,o}|}{l_{i,o}} \times 100 & , \quad l = \text{Otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

که در این رابطه a_1 درصد تشابه ساختاری $l_{i,s}$ و $l_{i,o}$ مقادیر شاخص مکانی نام حاصل از نقشه مدلسازی و نقشه سناریو سال افق می‌باشند. Δl_i در واقع مقدار نرمال شده تفاوت بین شاخص مکانی محاسبه شده از نقشه سناریو و نقشه مدلسازی شده می‌باشد. این مقدار برای شاخص‌های LPI و AI همان مقدار خروجی از نرم افزار می‌باشد زیرا خروجی این شاخص‌ها از نرم افزار به صورت درصد می‌باشد و نیازی به نرمال‌سازی ندارد. مقادیر درصد تشابهات محاسبه شده برای هر یک از پنج نقشه‌ی نمایش داده شده حاصل از الگوریتم‌های NSGA_II و MOPSO برای هر یک از سه سناریو با یکدیگر دو به دو مقایسه گردیده‌اند و نتایج در نمودار شکل ۲۱ قابل مشاهده می‌باشد.

از مقایسه جدول ۷ می‌توان دریافت در طی زمان شاخص‌هایی مانند تعداد لکه‌ها، تراکم لکه‌ها، تراکم حاشیه‌ها و بعد فراکتال لکه‌ها تقریباً برای تمام کاربری‌های با افزایش همراه بوده‌اند و در نقطه‌ی مقابل شاخص‌های بزرگترین لکه و شاخص تراکم کاهش یافته‌اند که با توجه به توضیحات ارائه شده و ماهیت شاخص‌های مکانی گفته شده، می‌توان دریافت ساختار شهر در سال‌های اول ساختاری فشرده بوده و به تدریج به سمت ساختار پراکنده در کاربری‌ها کشیده شده است. بنابراین می‌توان گفت شهر تهران تاکنون به طور کلی از الگوی رشد پراکنده در سطح کلاس‌های کاربری مورد نظر برخوردار بوده است.

همانطور که در بخش‌های قبل نیز ذکر گردید، تصمیم‌گیرندگان بیشتر تمایل دارند با معرفی اولویت‌های خود در توابع هدف، نتایج حاصل را مشاهده و بررسی نمایند. یکی از نیازهای تصمیم‌گیران ملاحظه نتایج رده‌بندی شده بر اساس نزدیکی جواب‌های تولید شده به ساختار توسعه شهری می‌باشد. یکی از اهداف مهم رتبه‌بندی نتایج توسط شاخص‌های مکانی در این تحقیق نیز حمایت از تصمیم‌گیری در این حالات است. در حالت کلی در جبهه حواب جواب مسائل پیچیده (مانند تحقیق حاضر) معمولاً با تعداد بالا و پراکندگی نامنظم نقاط روبه رو هستیم. از این رو وجود امکان نمایش و بررسی جواب‌هایی که با اولویت تصمیم‌گیرنده مشخص شده‌اند کمک شایانی در جهت حمایت از تصمیم‌گیری خواهد نمود.



شکل ۲۱- درصد تشابه جواب‌های حاصل از دو الگوریتم با ساختار شهر در سناریوهای معین شده

تعریف جمعیت اولیه در هر دو الگوریتم درصدی از جمعیت اولیه به صورت غیر تصادفی و با توجه به نقشه سال ۱۳۹۰ ایجاد گردیدند، این امر نیز در تولید جواب‌های نهایی نزدیک به الگوی مکانی رشد پراکنده، تاثیر گذار بوده است. از طرف دیگر همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمامی جواب‌های حاصل از هر دو الگوریتم و در هر سه سناریو، جواب مربوط به بیشینه‌سازی دسترسی به راه‌ها از مقادیر کمتری نسبت به سایر جواب‌ها برخوردار می‌باشد، این امر نشان دهنده‌ی این می‌باشد که در روند توسعه شهر، میزان دسترسی کاربری‌ها به راه‌ها در اولیتهای پایین تری نسبت به اهدافی چون سازگاری، هزینه‌ی تغییرات و مناسبت سرزمین قرار گرفته است و جواب‌هایی که در هر دو الگوریتم به سمت بیشینه‌سازی دسترسی به راه‌ها تمایل داشته‌اند در رتبه‌های پایین تر قرار گرفته‌اند. به همین ترتیب مشاهده می‌شود در هر دو الگوریتم جوابی که حالت تعادلی میان اهداف را برآورده ساخته است دارای بهترین رتبه در سناریوها می‌باشد و می‌توان این نکته را به روشنی دریافت که جواب‌هایی که فقط برآورده ساختن یکی از توابع هدف را بیشتر از دیگر اهداف مدنظر قرار داده‌اند نمی‌توانند جواب‌های دقیقی از نظر تشابه به الگوی توسعه مورد نظر شهری باشند و بهترین حالت‌ها میان جواب‌هایی می‌باشد که میان برآورده سازی توابع هدف تعادل برقرار ساخته‌اند و به عبارتی با برقراری تعادل میان اهداف می‌توان به ساختاری نزدیک‌تر به ساختار و الگوی توسعه‌ی شهر رسید.

با توجه به شکل ۲۱ می‌توان این نکته را دریافت هر دو مدل از کارایی نسبتاً خوبی در مدلسازی تخصیص بهینه کاربری اراضی برخوردار می‌باشند، با دقت بیشتر و مقایسه‌ی دو به دو مقدار هر یک از توابع هدف در هر سناریو می‌توان این نکته را دریافت که الگوریتم NSGA-II در برآورده ساختن توابع هدف از دقت بیشتری نسبت به الگوریتم MOPSO برخوردار می‌باشد که یکی از علل این امر می‌تواند ماهیت پیوسته‌ی الگوریتم MOPSO باشد و با توجه به اینکه الگوریتم NSGA-II از ماهیت گسسته برخوردار می‌باشد برای حل مسائل گسسته مانند بهینه‌سازی تخصیص کاربری اراضی دارای دقت بیشتری است.

نکته‌ی قابل توجه دیگر آن است که جواب‌های هر دو الگوریتم در سناریوی رشد پراکنده شهر مقادیر درصد تشابه بیشتری به دست آورده‌اند و از سوی دیگر جواب‌های حاصل از هر دو الگوریتم در مقایسه با سناریویی که روند توسعه شهر به سمت رشد فشرده بوده است از درصد تشابه کمتری نسبت به دو سناریوی دیگر برخوردار هستند. این نکته بیانگر این امر است که هر دو الگوریتم برای برآورده ساختن نیازهایی که به صورت توابع هدف تعریف شده‌اند، مجبور به چینش کاربری‌ها به صورت پراکنده شده‌اند و تمایل به رشد پراکنده کاربری‌های شهری بیشتر بوده است. از طرفی با توجه به جدول ۷ نیز می‌توان دریافت الگوی توسعه شهر تهران در دوره‌های مورد نظر نیز رشدی به سمت پراکنده شدن بوده است و به دلیل اینکه در هنگام

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

هدف اصلی از این تحقیق مدلسازی تخصیص کاربری اراضی شهری با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و کمک به تصمیم‌گیران با استفاده از اولویت بندی جواب‌های حاصل از مدل، با توجه به الگوی توسعه شهر بوده است. در حقیقت هدف، ارائه‌ی پیشنهاد برای چینش بهینه‌ی کاربری‌ها در آینده به همراه اولویت بندی جواب‌ها با توجه به الگو و ساختار مکانی شهر به منظور حمایت بهتر از تصمیم‌گیری بوده که این امر با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه و رتبه‌بندی و مقایسه‌ی جواب‌های خروجی این الگوریتم‌ها توسط شاخص‌های مکانی میسر شده است. برای نیل به هدف مذکور ابتدا اهداف اصلی مؤثر بر چینش بهینه‌ی کاربری‌ها مورد بررسی قرار گرفت. پس از بررسی‌های انجام شده این اهداف شامل سازگاری، مناسبت، دسترسی و هزینه‌ی تغییر کاربری‌ها در منطقه بوده‌اند و بنابراین مسئله به صورت یک مسئله‌ی چندهدفه تعریف گشت. همچنین به منظور مشخص کردن ساختار مکانی توسعه شهری، نحوه‌ی انتخاب شاخص‌های مکانی که به بهترین نحو و از تمام جنبه‌ها بتوانند ساختار شهر را مشخص سازند و همچنین دامنه و سطح مورد نیاز برای مطالعه بر روی منطقه مورد نیز مورد بررسی قرار گرفتند که در نهایت شاخص‌های مکانی NP، PD، ED، CA، LPI، MPS، ENN-MN، FRAC-AM و AI در سطح کلاس کاربری انتخاب گشتند.

به منظور مدلسازی تخصیص بهینه‌ی کاربری‌ها الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه NSGA_II و MOPSO انتخاب شده‌اند. از مهم‌ترین مراحل در مدلسازی مسئله، سازگاری آن با الگوریتم‌های نام برده است که تعریف توابع هدف و شروط مسئله از مهم‌ترین مراحل آن است. در پایان با توجه به جبهه‌ی جواب به دست آمده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه، سناریوهای مختلف با توجه به ساختار مکانی توسعه شهر تاکنون تعیین گردیدند و جواب‌ها با توجه به درصد تشابه به ساختار مکانی توسعه شهر مقایسه و رتبه‌بندی گردیدند و بهترین جواب به تصمیم‌گیرنده پیشنهاد شده است. نتایج حاصل از این مدلسازی را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- هدف اصلی از این تحقیق مدلسازی تخصیص کاربری اراضی شهری با استفاده از الگوریتم‌های NSGA_II و MOPSO و محاسبات درصد تشابه ساختار مکانی الگوی نقشه‌ها به واقعیت در این تحقیق نشان داد عملکرد این الگوریتم‌ها تا حد قابل قبولی در مسئله‌ی چینش بهینه کاربری که یک مسئله پیچیده‌ی مکانی می‌باشد، مناسب ارزیابی می‌شود.
- یکی از مهم‌ترین عوامل در ارائه دقیق نتایج استفاده از روش مناسب بهینه‌سازی و مطابق با ویژگی‌های مسئله است. به عنوان مثال استفاده از روش‌های پیوسته برای مسائل پیوسته و روش‌های گسسته برای مسائل گسسته آسان‌تر می‌باشد. در این تحقیق به منظور سازگاری مسئله با الگوریتم MOSPO، به دلیل پیوسته بودن ذاتی الگوریتم فضای گسسته‌ی مسئله به فضای پیوسته‌ی الگوریتم تصویر شد و این امر باعث شد تا نتایج نسبت به الگوریتم NSGA_II که ذاتاً یک الگوریتم گسسته است، ضعیف‌تر باشد.
- نتیجه‌ی مدلسازی در هر دو الگوریتم و محاسبه درصد تشابه نقشه‌های به سناریوهای توسعه شهر نشان داد در هر دو الگوریتم جواب‌هایی که حالت تعادلی میان اهداف برقرار کرده‌اند دارای نتایج بهتر و قابل قبول تری نسبت به سایر نقشه‌ها که در آن‌ها یکی از توابع هدف بیشینه‌سازی شده بود، می‌باشند.
- از بررسی الگوی توسعه شهر در دوره‌های زمانی گفته شده توسط شاخص‌های مکانی می‌توان دریافت ساختار شهر تهران در سال‌های اول ساختاری فشرده بوده و به تدریج به سمت ساختار پراکنده در کاربری‌ها کشیده شده است. بنابراین می‌توان گفت شهر تهران تاکنون به طور کلی از الگوی رشد پراکنده در سطح کلاس‌های کاربری مورد نظر برخوردار بوده است و جواب‌های مدلسازی نیز به سناریوی الگوی رشد پراکنده نیز نزدیک تر ارزیابی شده‌اند.
- از مقایسه نتایج نمودار درصد تشابه الگوی مکانی جواب‌های حاصل از هر دو مدل با واقعیت، مشاهده می‌شود در هر دو الگوریتم جوابی که حالت تعادلی میان اهداف را برآورده ساخته است دارای بهترین رتبه در سناریوها می‌باشد، که این امر بیانگر آن است

در نتایج به دست آمده نقش به سزایی دارند. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی اولاً آنالیزهایی بر روی تأثیر ایجاد جمعیت اولیه و توابع هدف گوناگون در نتایج حاصل و مقادیر درصد تشابه نقشه‌ها صورت پذیرد و ثانیاً در سطوح دیگر و با شاخص‌های مکانی متعدد تغییرات رشد شهری مورد بررسی قرار گیرد و نتایج ارزیابی شود و ثالثاً از شاخص‌های مکانی در حین اجرای الگوریتم‌های بهینه‌سازی و به عنوان توابع هدف در هدایت نقشه‌ها به سمت نزدیک شدن به الگوی مکانی توسعه شهر در حین اجرای الگوریتم‌ها استفاده گردد.

که جواب‌هایی که در آن‌ها یکی از اهداف به مقدار زیاد برآورده شود و اهداف دیگر به خوبی برآورده نشده باشند از دقت کمتری نسبت به ساختار و الگوی مکانی واقعیت برخوردار هستند.

نتیجه‌ی اجرای بهینه‌سازی تخصیص کاربری اراضی توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی به موارد گوناگونی از جمله تعریف توابع هدف، تعداد و نحوه تعریف جمعیت اولیه، تعداد تکرار و فضای مسئله و ... وابسته است. همچنین در آشکارسازی ساختار مکانی توسعه شهری پارامترهایی مانند انتخاب شاخص‌های مکانی، تعریف درست دامنه‌ی شاخص‌های مکانی و انتخاب درست سطوح مورد مطالعه

مراجع

- [1] Cao, K., et al., Spatial multi-objective land use optimization: extensions to the non-dominated sorting genetic algorithm-II. *International Journal of Geographical Information Science*, 1122. 12(21): p. 2191-2191
- [2] Masoomi, Z., Modeling physical impacts of urban land-use changes using optimization algorithm and spatial analyses, in Faculty of Geodesy and Geomatics. 2014, Khajeh Nasir Toosi University of Technology: Iran.
- [3] Saeednia, A., Municipality Green Book: Urban Management. Vol. 10. 2002, Iran: Tehran Urban Planning and Research Center.
- [4] Stewart, T.J., R. Janssen, and M. van Herwijnen, A genetic algorithm approach to multiobjective land use planning. *Computers & Operations Research*, 2004. 31(14): p. 2293-2313.
- [5] Karimi, M., Developing Multi-Criteria Decision Analysis Methods for Land Use Allocation, in Faculty of Geodesy and Geomatics. 2010, Khajeh Nasir Toosi University of Technology: Iran.
- [6] Huang, B. and W. Zhang, Sustainable land-use planning for a downtown lake area in central China: multiobjective optimization approach aided by urban growth modeling. *Journal of Urban Planning and Development*, 2014. 140(2): p. 04014002.
- [7] Aerts, J.C., et al., Using linear integer programming for multi-site land-use allocation. *Geographical Analysis*, 2003. 35(2): p. 169-148
- [8] Guldmann, J.-M., Urban land use allocation and environmental pollution control: an intertemporal optimization approach. *Socio-Economic Planning Sciences*, 1979. 13(2): p. 71-86.
- [9] Masoomi, Z., M.S. Mesgari, and M. Hamrah, Allocation of urban land uses by Multi-Objective Particle Swarm Optimization algorithm. *International Journal of Geographical Information Science*, 2013. 27(3): p. 542-566.
- [10] S. Alaei moghadam, M. Karimi, and M. Mohammadzadeh, Modeling of Urban Land Use Allocation Using Reference-Point-Nondominated Sorting Genetic Algorithm II. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2015. 4(4): p. 47-66.
- [11] Herold, M., H. Couclelis, and K.C. Clarke, The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2005. 29(4): p. 369-399.
- [12] Wu, J., et al., Quantifying spatiotemporal patterns of urbanization: The case of the two fastest growing metropolitan regions in the United States. *Ecological Complexity*, 2011. 8(1): p. 1-8.
- [13] Collette, Y. and P. Siarry, Multiobjective optimization: principles and case studies. 2013: Springer Science & Business Media.
- [14] Coello, C.C., G.B. Lamont, and D.A. Van Veldhuizen, Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems. 2007: Springer Science & Business Media.
- [15] Deb, K., et al., A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 2002. 6(2): p. 182-197.
- [16] Shaygan, M., et al., Spatial multi-objective optimization approach for land use allocation using NSGA-II. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014. 7(3): p. 906-916.

- [17] Z. Masoomi, A.M.S.M., Spatial modeling of urban land use change using NSGA-II algorithm and clustering of the Pareto-front for urban dynamic plans. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2015. 5(1): p. 139-157.
- [18] Parsopoulos, K.E., Particle swarm optimization and intelligence: advances and applications: advances and applications. 2010: IGI Global.
- [19] Ma, S., et al., Land-use spatial optimization based on PSO algorithm. *Geo-spatial Information Science*, 2011. 14(1): p. 54-61.
- [20] Coello, C.A.C., G.T. Pulido, and M.S. Lechuga, Handling multiple objectives with particle swarm optimization. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 2004. 8(3): p. 256-279.
- [21] McGarigal, K., S. Cushman, and N. Maile, Ene. E. 2012. FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps. Department of Environmental Conservation, University of Massachusetts, Amherst.
- [22] Pham, H.M., Y. Yamaguchi, and T.Q. Bui, A case study on the relation between city planning and urban growth using remote sensing and spatial metrics. *Landscape and Urban Planning*, 2011. 100(3): p. 223-230.
- [23] Herold, M., N.C. Goldstein, and K.C. Clarke, The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. *Remote sensing of Environment*, 2003. 86(3): p. 286-302.
- [24] Bhatta, B., Analysis of urban growth and sprawl from remote sensing data. 2010: Springer Science & Business Media.
- [25] McGarigal, K., et al., FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for categorical maps. 2002.
- [26] Gustafson, E.J., Quantifying landscape spatial pattern: what is the state of the art? *Ecosystems*, 1998. 1(2): p. 143-156.
- [27] McGarigal, K. and W.C. McComb, Relationships between landscape structure and breeding birds in the Oregon Coast Range. *Ecological monographs*, 1995. 65(3): p. 235-260.
- [28] McGarigal, K. and B.J. Marks, Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351. US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 1995.
- [29] Deng, J.S., et al., Spatio-temporal dynamics and evolution of land use change and landscape pattern in response to rapid urbanization. *Landscape and urban planning*, 2009. 92(3): p. 187-198.
- [30] Liu, X., et al., A multi-type ant colony optimization (MACO) method for optimal land use allocation in large areas. *International Journal of Geographical Information Science*, 2012. 26(7): p. 1325-1343.
- [31] Kleijn, D., et al., Mixed biodiversity benefits of agri-environment schemes in five European countries. *Ecology letters*, 2006. 9(3): p. 243-254.
- [32] Cao, K., et al., Sustainable land use optimization using Boundary-based Fast Genetic Algorithm. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2012. 36(3): p. 257-269.
- [33] Ligmann-Zielinska, A., R.L. Church, and P. Jankowski, Spatial optimization as a generative technique for sustainable multiobjective land-use allocation. *International Journal of Geographical Information Science*, 2008. 22(6): p. 601-622.
- [34] Xiang, Q. and B. Liu. Adaptive genetic algorithm for multi-objective sustainable land use planning. In *Natural Computation (ICNC), 2015 11th International Conference on*. 2015. IEEE.
- [35] Taleai, M., et al., Evaluating the compatibility of multi-functional and intensive urban land uses. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2007. 9(4): p. 375-391.
- [36] Y. Delaviz, J. Karami, and M. Shaygan, Using NSGA-II for Multi-Objective Optimization Allocation of Urban Land Use in Order to Reduce Earthquake Vulnerability. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2016. 5(3): p. 247-264.
- [37] Zhang, W., et al., Modeling urban growth by the use of a multiobjective optimization approach: Environmental and economic issues for the Yangtze watershed, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014. 21(22): p. 13027-13042.
- [38] Datta, D., K. Deb, and C.M. Fonseca. Multi-objective evolutionary algorithms for resource allocation problems. In *International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*. 2007. Springer.
- [39] Chen, Y., et al., Modeling urban land-use dynamics in a fast developing city using the modified logistic cellular automaton with a patch-based simulation strategy. *International Journal of Geographical Information Science*, 2014. 28(2): p. 234-255.