نشریه علمی- پژوهشی علوم و فنون نقشه برداری، دوره پنجم، شماره ۱، مرداد ماه ۱۳۹۴

مدل‌سازی مکانی تغییر کاربری‌های شهری با استفاده از الگوریتم NSGA-II و خوشه‌بندی جواب‌های بده بستان در طرح‌های سیال شهری

زهره معصومی*[۱]، محمدسعدی مسگری[۲]

[۱]استادیار دانشکده‌ی علوم زمین - دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه‌ی زنجان
z.masoumi@iasbs.ac.ir

[۲]دانشیار گروه سیستم‌های اطلاعات مکانی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
(قطب علمی فناوری اطلاعات مکانی)
mesgari@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت مهر ۱۳۹۳، تاریخ تصویب خرداد ۱۳۹۴)

چکیده

با توجه به تغییرات مختلف و مداوم کاربری ها، در نظر گرفتن خاصیت دینامیک محیط شهری در برنامه‌ریزی شهری از اهمیت خاصی برخوردار است. بنابراین پیشنهاد چینش مناسب کاربری‌های شهری پس از وقوع تغییر در کاربری‌ها، کمک شایانی به مسأله‌ی مدیریت پویای شهری می‌نماید. هدف اصلی این تحقیق ارائه‌ی روشی بر اساس GIS و الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه‌ی NSGA-II است که با استفاده از آن بتوان در صورت تغییر یک کاربری، چینش بهینه‌ی سایر کاربری‌های منطقه، در سطح قطعات شهری، به دست آورد. یک هدف فرعی نیز استفاده از آنالیز خوشه‌بندی برای کمک به تصمیم‌گیرنده در انتخاب جواب مورد نظر می‌باشد به نحوی که تصمیم‌گیرنده بتواند با توجه به معرفی اولویت‌های برنامه‌ریزی، سناریوی حاصل را ملاحظه و انتخاب نماید. در سازگارسازی الگوریتم NSGA-II با مسأله، چهار تابع هدف بیشینه‌سازی سازگاری، بیشینه‌سازی وابستگی، بیشینه‌سازی مطلوبیت و بیشینه‌سازی همسانی کاربری‌های مجاور تعریف شدند. تأمین سرانه‌ی کاربری‌ها در منطقه نیز به صورت قید در سناریوهای تولید شده به کار گرفته شد. به منظور حمایت از تصمیم‌گیری و نمایش سناریوها به تصمیم‌گیرندگان از آنالیز خوشه‌بندی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه استفاده شد. در نهایت مدل با استفاده از داده های دو محله از منطقه‌ی ۷ شهرداری تهران پیاده سازی و تست شد. همچنین نتایج حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی از نظر همگرایی و تست تکرارپذیری در سطح قابل قبولی می‌باشند. در چینش‌های بهینه‌ی به دست آمده نیز وضعیت توابع هدف بهتر از وضعیت موجود است و کمبود سرانه‌ها تا حد قابل توجهی جبران شده است. مدل حاصل به برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران شهری در خصوص اصلاح طرح تفصیلی موجود پس از تغییر یک یا چند کاربری کمک می‌نماید.

واژگان کلیدی: مدیریت کاربری اراضی شهری، تغییر کاربری، سیستم اطلاعات مکانی، بهینه‌سازی چندهدفه، خوشه‌بندی، حمایت از تصمیم‌گیری، NSGA-II

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

علی رغم استفاده‌ی رایج از طرح‌های تفصیلی در برنامه‌ریزی کاربری اراضی شهری، مهم‌ترین مشکل این طرح‌ها عدم انعطاف‌پذیری آنها با تغییرات پیش آمده است[۱]. از طرفی در صورتیکه تعدادی از کاربری‌ها بدون پیروی از طرح تفصیلی تغییر یابند، چیدمان مابقی کاربری‌ها در طرح اعتبار اولیه‌ی خود را نخواهند داشت. بنابراین با توجه به پویایی شهر و تغییر نیاز شهروندان، در صورتیکه حالت دینامیک شهر در نظر گرفته نشود، برنامه-ها به خوبی پاسخگوی نیازها نخواهند بود[۲]. یکی از مهم‌ترین مسائل در فرآیند پویایی شهر، به دست آوردن تأثیر تغییر یک کاربری بر روی کاربری‌های دیگر در یک سطح مکانی است. یعنی در صورت تغییر یک کاربری، چینش سایر کاربری‌ها بایستی چگونه تغییر کنند تا همچنان معیارهای کمی و کیفی مربوط به برنامه‌ریزی شهری به صورت بهینه تعادل خود را حفظ کنند[۲]. لذا با توجه به لزوم در نظر گرفتن معیارهای کمی و کیفی در چینش جدید به صورت بهینه و همزمان، این مسئله یک مسئله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه با فضای جستجوی وسیع (حالات مختلف چینش کاربری‌ها) است. سختی مدل-سازی هر یک از معیارهای مذکور و دشورای تحلیل در پیش‌بینی آینده در هنگام تغییر کاربری از یک سو و وجود تعداد حالات مختلف چینش کاربری‌ها از سوی دیگر، مدلسازی مسئله را با پیچیدگی‌های زیادی همراه می‌کند. در این صورت موضوع یک مسئله‌ی NP-hard محسوب می‌شود. بنابراین حل این مسئله نیازمند به کارگیری روش‌هایی است که بتوانند با وجود موارد مذکور جواب‌های قابل قبولی تولید نمایند. الگوریتم‌های فرا ابتکاری چندهدفه مانند NSGA-II[۱] گزینه‌ی مناسبی جهت حل این نوع مسائل هستند[۳].

در تحقیقاتی که در مورد چینش بهینه‌ی کاربری اراضی شهری انجام شده اهداف مختلفی مد نظر بوده است؛ در برخی از تحقیقات چینش بهینه تنها از جنبه‌ی خاص مانند ترافیک، شرایط اجتماعی- اقتصادی و غیره و یا تنها برای یک نوع کاربری خاص مد نظر بوده است[۴،۵،۶]. در برخی دیگر از تحقیقات اثرات همسایگی کاربری‌ها و تأثیرات چینش کاربری‌ها بررسی شده و با توجه به اثرات همسایگی تغییراتی در قرارگیری کاربری‌ها پیشنهاد شده است. این کار بدون استفاده از بهینه‌سازی انجام شده و تخصیصی در آن صورت نگرفته است بلکه بیشتر بررسی جنبه‌ی پیامدهای خارجی کاربری‌ها مد نظر بوده است، که از جمله‌ی آنها می‌توان به [۷] اشاره کرد. از جمله تحقیقاتی که در آنها چینش بهینه‌ی کاربری‌ها بر اساس چند تابع هدف به دست آمده‌اند، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: در [۸] هدف اصلی بهینه‌سازی همزمان چند تابع هدف برای دستیابی به چینش بهینه‌ی کاربری‌ها بوده است. روش بهینه‌سازی به کار رفته، PSO[۲] تک هدفه است و تابع برازندگی خود به صورت تابعی از سه تابع هدف تعریف شده است. در تحقیق ذکر شده کاربری‌ها در واحد مکانی ناحیه وارد مسأله شده‌اند. به علاوه از آنجائیکه مسأله به صورت تک هدفه حل شده، نتایج دارای انعطاف پذیری چندانی نیست. ولی در برخی دیگر از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شده است: در Ligmann-Zielinska et al. (2009) از یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای بهینه‌سازی توابع هدف کمینه کردن ناسازگاری‌های در همسایگی، کمینه کردن فاصله از مناطق شهری و کمینه کردن توسعه در مناطق غیر شهری و تغییر در مناطق شهری استفاده شده است. همچنین در قیود مسئله تدابیری اندیشیده شده است تا همواره تراکم و پیوستگی کاربری‌ها حفظ شود. همچنین برای تولید سناریوهای متفاوت از یکدیگر برای ورود به مدل، از روش HSJ[۳] استفاده شده است. در این تحقیق تأکید خاصی بر انتخاب جواب‌های بهینه از جواب‌های بده بستان و ارتباط متقابل با کاربر نشده است [۹]. Balling et al. (1999) از الگوریتم ژنتیک چند هدفه‌ی ابتکاری برای بهینه‌سازی سه تابع هدف کمینه کردن ترافیک، کمینه کردن هزینه‌های جابجایی و کمینه کردن تغییر کاربری استفاده کرده است. در این الگوریتم ابتکاری در حقیقت بهینه‌سازی به صورت همزمان انجام نشده است بلکه الگوریتم ژنتیک به صورت مرحله‌ای بر روی هریک از توابع هدف اجرا شده و بهترین‌های آن تابع وارد بهینه‌سازی در تابع هدف بعدی شده است. که این امر خود باعث می‌شود برخی از جواب‌های بهینه در پردازش‌ها در

۱ Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm

۲ Particle Swarm Optimization

۳ Hop-Skip-Jump

نظر گرفته نشوند [۲]. در تحقیق دیگری که توسط Cao et al. (2011) انجام شده است، با تعریف توابع هدف بیشترین بهره‌ی اقتصادی، بیشترین دسترسی و بیشترین سازگاری سعی بر آن بوده است تا سناریوهای مختلف تصمیم‌گیری در مورد چینش بهینه‌ی اراضی در یک شهر جدید ارائه شود. این چینش در زمین‌هایی تعریف شده است که هنوز هیچ کاربری برای آنها تعریف نشده است. همچنین چینش-ها در سه سطح کاربری مسکونی، تجاری و صنعتی ارائه شده است [۱۰]. در تحقیق Feng and Lin (1999) هدف ایجاد گزینه‌های مختلف برای مدیریت کاربری شهری برای شهرسازان بوده است. در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک چند هدفه‌ی CGA[1] استفاده شده است و واحد مکانی مورد بررسی، ناحیه‌های شهری بوده‌اند. توابع هدف به کار رفته در این تحقیق، مناسب بودن کاربری با اهداف توسعه و نیز سازگاری ناحیه‌های همسایه با یکدیگر بوده است. از محدودیت‌های این تحقیق می‌توان به عدم پوشش تمامی عوامل در چینش کاربری‌ها و نیز استفاده از واحد مکانی ناحیه اشاره کرد [۱۱].

همانطور که ملاحظه می‌شود در تحقیقات مذکور یا هدف چینش بهینه از یک جنبه‌ی خاص و یا برای یک کاربری خاص مطرح بوده، یا پیامدهای خارجی ناشی از تغییرات کاربری و توجه به چینش کاربری‌ها فقط در سطح همسایگی و بدون بهینه‌سازی مد نظر قرار داشته و یا چینش بهینه‌ی کاربری‌ها بر اساس چند تابع هدف به دست آمده که در برخی از آنها از بهینه‌سازی تک هدفه [۸]، برخی از بهینه‌سازی چندهدفه‌ی ابتکاری [۹] و در برخی دیگر از بهینه‌سازی چندهدفه‌ی فراابتکاری [۲،۳،۱۱] وابسته به هدف اصلی مسئله استفاده شده است.

هدف اصلی این تحقیق، ارائه‌ی روشی جهت پیشنهاد چینش بهینه‌ی کاربری اراضی شهری با در نظر گرفتن همزمان معیارهای کمی و کیفی (سازگاری، وابستگی، مطلوبیت) برنامه‌ریزی شهری با استفاده از الگوریتم NSGA-II، در حالتی است که یک یا چند کاربری تغییر کنند. همچنین یکی دیگر از اهداف تحقیق دسته بندی و اولویت‌گذاری جواب-های ایجاد شده برای سهولت تصمیم‌گیری و نمایش چینش بهینه‌ی متناظر با هر جواب به تصمیم‌گیرنده است که این امر با استفاده از آنالیز خوشه‌بندی میسر شده است.

[1] Cumulative Genetic Algorithm

۲- بهینه‌سازی به عنوان ابزاری برای بررسی اثرات تغییر کاربری‌های شهری

مدل‌سازی فضایی تأثیر تغییرات در چینش کاربری‌ها در کنار یکدیگر را می‌توان از دو دیدگاه مختلف بررسی کرد [۱۲]:

- معیارهای کمی: در این معیار کاربری‌ها بر اساس مقایسه‌ی سرانه‌های موجود با استانداردهای مربوطه یا از طریق بررسی نیازهای فعلی و آتی منطقه‌ی مورد مطالعه به فضا در نظر گرفته می‌شود.
- معیارهای کیفی: در مطالعه‌ی این معیارها ویژگی-های کیفی معین شده و نسبت آنها به یکدیگر بر اساس خصوصیات ذیل بررسی می‌شوند:
  - وابستگی: گاهی اوقات فعالیت یک کاربری، وابسته به فعالیت دیگر کاربری‌هاست. برای مثال فعالیت یک کاربری مسکونی بدون وجود خدمات آموزشی، درمانی و تجاری در فواصلی از آن ناقص است.
  - سازگاری: کاربری‌هایی که در یک منطقه استقرار می‌یابند، نباید موجب مزاحمت اجرای فعالیت‌های کاربری‌های دیگر شوند.
  - مطلوبیت: به مفهوم سازگاری بین کاربری و خصوصیات درونی محل استقرار آن است.

با توجه به موارد ذکر شده، در صورتیکه یک کاربری شهری در سطح پلاک تغییر کند، توازن المان‌های کمی و کیفی به هم می‌ریزد. بنابراین می‌توان با تعریف یک مکانیزم بهینه‌سازی چندهدفه، المان‌های کیفی (به صورت توابع هدف) و کمی (به صورت قیود) را به صورت همزمان در نظر گرفت و چینش بهینه‌ی کاربری‌ها را به دست آورد.

۲-۱- مختصری از بهینه‌سازی

از نظر ریاضی، مسأله‌ی چند هدفه به صورت زیر تعریف می‌شود [۸]:

کمینه یا بیشینه کردن بردار $f(x)$ که در آن x بردار n بعدی متغیرهای تصمیم $x=(x_1,x_2,...,x_n)$ از مجموعه‌ی S است. به عبارت دیگر:

$$\text{Minimize} \quad f(x)=(f_1(x),...,f_m(x)) \qquad (۱)$$

$$\text{Subject to} \quad g_i(x)\le 0, i=1,...,q, x\in S \qquad (۲)$$

بنابراین مسأله‌ی چندهدفه شامل n متغیر و q شرط و m هدف است. همچنین $g_i(x)$ نشاندهنده‌ی شرط iام مسأله است.

در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه به جای یک جواب بهینه با مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه مواجه هستیم زیرا به جای بهینه کردن یک تابع، هدف بهینه‌سازی همزمان چند تابع است که شاید با یکدیگر در تعارض نیز باشند. در اینجا مفهوم غلبگی و انتخاب جواب‌های بهینه مطرح می‌شود. به این منظور تمامی جواب‌ها از حیث غلبگی بایستی مورد بررسی قرار گیرند. در حالت کلی جواب x_1 بر جواب x_2 غالب است اگر هر دو شرط زیر برقرار باشد [۶]:

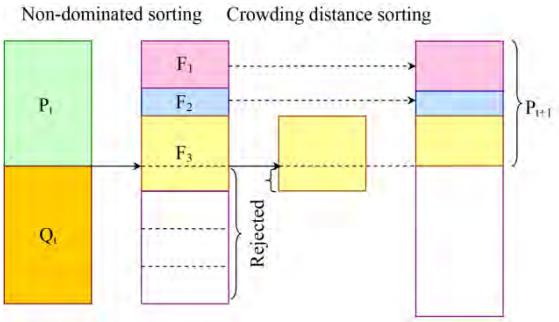
- جواب x_1 در هیچ یک از اهداف بدتر از x_2 نباشد.
- جواب x_1 دست کم در یک هدف اکیداً بهتر از x_2 باشد.

به منظور یافتن جواب‌های بهینه، مفهوم غلبگی برای تمامی جواب‌ها بررسی شده و مجموعه‌ی نامغلوب کل فضای موجه جستجو به عنوان جواب مسئله‌ی چندهدفه به دست می‌آید. این مجموعه‌ی جواب، جبهه‌ی جواب بهینه[۱] یا جواب‌های بده بستان بهینه[۲] نام دارد [۳،۶].

در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، روش‌ها و الگوریتم‌های متفاوتی ارائه شده‌اند. در الگوریتم‌های ریاضی- مبنا حل مسئله منجر به یک جواب قطعی و دقیق خواهد شد. ولی در صورتیکه فضای جستجو فضای بزرگی باشد و یا حجم محاسبات بالا رود، این روش‌ها یا به سختی عمل خواهند نمود یا حل مسئله با آنها غیر ممکن خواهد بود. الگوریتم‌های فرا ابتکاری در مسائل پیچیده با حجم بالای فضای جستجو جواب‌های قابل قبولی پیدا می‌کنند [۱۳]. الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از الگوریتم‌های فرابتکاری و تکاملی برای حل مسائل چندهدفه مناسب است زیرا توانایی کار با مجموعه‌ای از جواب های متفاوت به عنوان جمعیت اولیه را دارد. این قابلیت منجر به تولید مجموعه‌ای از جواب‌ها در یک بار اجرای الگوریتم می‌شود و در فضاهای جستجوی گسترده جواب‌های قابل قبولی تولید می‌کند [۸]. الگوریتم‌های ژنتیک چندهدفه‌ی مختلفی پیشنهاد شده است که در این تحقیق از NSGA-II به دلیل سرعت مناسب [۲]، وجود نخبه‌گرایی [۱۴] و سهولت نسبی پیاده‌سازی [۶] استفاده شد.

۲-۲- NSGA-II

NSGA-II توسط Deb (2001) توسعه داده شده است. این الگوریتم یک الگوریتم تکاملی چندهدفه است. NSGA-II با استفاده از مرتب‌سازی نامغلوب و فاصله ازدحامی از نخبه-گرایی بهره می‌برد.



شکل ۱- نحوه‌ی مرتب کردن جمعیت در الگوریتم NSGA-II که در آن P_t جمعیت اولیه و Q_t جمعیت ناشی از تقاطع و جهش است و F_i نشان‌دهنده‌ی جبهه‌ها است [۶].

بر اساس این دو پارامتر که در ادامه توضیح داده می‌شوند، بهترین نسل‌ها از نظر عدم غلبه و پراکندگی مناسب انتخاب می‌شوند. شمای کلی تبدیل مجموعه‌ی جواب P_t به P_{t+1} در شکل ۱ آمده است.

- مرتب‌سازی نامغلوب: یک نقطه جواب نامغلوب است اگر هیچ نقطه‌ی دیگری در فضای جستجو وجود نداشته باشد به نحوی که در همه‌ی توابع هدف بهتر از آن نقطه باشد [۶].
- فاصله‌ی ازدحامی: این فاکتور برای انتخاب بهتر جواب‌ها از نظر پراکندگی بر روی یک جبهه استفاده می‌شود. بنابراین همانطور که در شکل۱ دیده می‌شود، ابتدا جمعیت P_t و Q_t (حاصل از جهش و تقاطع) بر اساس شرط غلبگی مرتب شده و به ترتیب جبهه‌ها قرار می‌گیرند سپس جبهه‌ی آخر که بایستی اعضا در آن حذف شوند تا به تعداد مورد نظر جمعیت دست پیدا کرد (جبهه‌ی۳ در شکل۱)، از نظر فاصله‌ی ازدحامی مرتب شده و در نهایت تعداد مورد نظر جمعیت انتخاب و P_{t+1} تولید می‌شود.

۳- بیان ریاضی بهینه‌سازی چیدمان کاربری اراضی شهری در پاسخ به تغییر کاربری

در بیان ریاضی یک مسئله‌ی چندهدفه، توابع هدف و شرایط مسئله بایستی به درستی و بر اساس معیارهای

---

۱ Optimal Pareto-Front

۲ به منظور سادگی از این پس در مقاله به این جواب‌ها، جواب‌های بده بستان اطلاق می‌شود.

تصمیم‌گیرندگان تعریف شوند. در ادامه به نحوه‌ی مدلسازی این المان‌ها در مدل به کار رفته پرداخته خواهد شد.

۳-۱- توابع هدف

توابع هدف لحاظ شده در این تحقیق وابستگی، سازگاری، مطلوبیت و همسانی کاربری‌های مجاور می‌باشند که در این بخش به جزئیات نحوه‌ی تعریف آنها پرداخته خواهد شد.

۳-۱-۱- وابستگی

در تحقیق حاضر برای مدلسازی وابستگی کاربری‌ها و استخراج ماتریس وابستگی از روش دلفی استفاده شد.[۱] بر اساس نظر کارشناسان وابستگی در پنج سطح وابستگی زیاد (*HD*)، وابستگی متوسط (*MD*)، وابستگی کم (*LD*)، نسبتاً مستقل (*MI*) و کاملاً مستقل (*HI*) تقسیم‌بندی شد. همچنین از متخصصان خواسته شده المان وابستگی به صورت مستقل از تمامی المان‌های کمی و کیفی دیگر مانند سازگاری و مطلوبیت در نظر گرفته شود. جدول ۱ یک قسمت از ماتریس وابستگی استخراج شده از مدل دلفی برای دو نوع کاربری تجاری و مسکونی نشان می‌دهد.

جدول ۱- قسمتی از ماتریس وابستگی استخراج شده از مدل دلفی

نوع کاربری		تجاری			مسکونی		
		منطقه	محله	روزانه	تراکم بالا	تراکم متوسط	کم تراکم
مسکونی[۲]	کم تراکم	MD	MD	HD	LD	MD	MD
	تراکم متوسط	MD	MD	HD	MD	MD	
	تراکم بالا	MI	MD	HD	MD		
تجاری	روزانه	HD	MI	HI			
	محله	HD	HI				
	منطقه	HI					

در ادامه از آنجائیکه الگوریتم مورد نظر برای حل مسئله با مقادیر عددی کار می‌کند، مقادیر کیفی به دست آمده از روش دلفی در ماتریس وابستگی با استفاده از روش مقایسه‌ی زوجی ساختار یافته در روش تحلیل سلسله مراتبی(AHP[۳]) به مقادیر عددی تبدیل شدند. با استفاده از روش AHP ضرایب ۰/۴۳، ۰/۲۸، ۰/۱۸، ۰/۰۸، ۰/۰۴به ترتیب برای سطوح پنجگانه‌ی وابستگی زیاد، وابستگی متوسط، وابستگی کم، نسبتاً مستقل و کاملاً مستقل به دست آمدند. پس از کمی‌سازی ماتریس وابستگی به تعریف تابع هدف وابستگی پرداخته می‌شود.

تأثیر تغییر یک کاربری بر کاربری‌های مجاور تابعی از فاصله‌ی آنهاست. بنابراین وابستگی کل تابعی از فواصل میان کاربری‌ها و درجه‌ی وابستگی آنهاست. به عبارت دیگر:

$$DEP_{ij}=f_1(d_{ij},DEP_{cicj})= DEP_{cicj} \times \alpha^1_{Ci,Cj}(d_{ij}) \qquad (۳)$$

که در آن DEP_{cicj} درایه‌ی مربوط به دو کلاس C_i و C_j کاربری در ماتریس وابستگی و $\alpha^1_{Ci,Cj}(d_{ij})$ تابع فاصله‌ی مربوط به وابستگی است که شکل کلی آن در رابطه‌ی ۴ آمده است.

$$\alpha^1_{Ci,Cj}(d_{ij}) = \begin{cases} 1 & d_{ij} \le d_{ij}^{\min} \\ \left(\frac{d_{ij}^{\max} - d_{ij}}{d_{ij}^{\max} - d_{ij}^{\min}}\right) & d_{ij}^{\min} \le d_{ij} \le d_{ij}^{\max} \\ 0 & d_{ij} \ge d_{ij}^{\max} \end{cases} \qquad (۴)$$

که در آن $d_{ij}^{\min}$ حداقل فاصله‌ی میان کاربری تغییر یافته‌ی i و پارسل j است که در حالت همسایگی دو پارسل رخ می‌دهد و $d_{ij}^{\max}$ بیشترین فاصله‌ی اثر گذاری کاربری i بر پارسل j است. این فاصله در این تحقیق برابر حوزه‌ی نفوذ کاربری تغییر یافته در نظر گرفته شده است و ناحیه‌ی خارج از شعاع نفوذ کاربری به عنوان ناحیه‌ی بی‌تأثیر فرض شده است. هر فعالیتی در شهر شعاع نفوذ و عملکردی خاصی دارد که به آن آستانه فعالیتی نیز گفته می‌شود [۱۲]. این مقادیر در منابع موجود و استانداردها[۴]

---

۱ روش دلفی و مراحل انجام آن در Skulmoski et al. (2007) تشریح شده است.

۲ این مقادیر با توجه به طرح تفضیلی منطقه‌ی مطالعاتی آورده شده‌اند مثلاً در کاربری مسکونی تراکم پایین، متوسط و بالا به ترتیب ساختمان‌های با تعداد طبقه‌ی ۱ تا ۲، ۳ تا ۵ و بیشتر از ۵ طبقه می‌باشند.

۳ Analytical Hierarchy Process

۴ در مواردی که در منابع موجود شعاع نفوذ برای کاربری مورد نظر ذکر نشده و یا اختلافی وجود داشته است از نظر کارشناسی برای استخراج شعاع نفوذ استفاده شده است.

برای هر کاربری تعریف شده است. این مقادیر برای هر کاربری در ضمیمه‌ی ۲ آمده است.

در نهایت تابع هدف وابستگی به صورت رابطه‌ی ۵ تعریف شده است.

$$F_1 : Maximize(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\frac{1}{n_i}\sum_{j=1}^{n_i}(Dep_{ij})) + \min_{ij}(Dep_{ij})) \quad (۵)$$

که در آن n_i تعداد همسایه‌های[۱] قطعه‌ی i و n تعداد کل قطعات می‌باشد. همچنین جمله‌ی دوم تابع هدف به این دلیل در نظر گرفته شده است که شاید در یک چینش با اینکه میانگین وابستگی‌ها در حد قابل قبولی بالا باشد ولی در میانگین بخشی از وابستگی‌های بسیار ضعیف توسط وابستگی‌های بسیار بالا جبران شده باشند. به این دلیل در صورتیکه در چینش پیشنهادی توسط الگوریتم کمترین مقدار وابستگی بیشینه شود، تا حد زیادی از به وجود آمدن این مشکل جلوگیری خواهد شد. همچنین در این تحقیق چون مطالعه‌ای روی میزان بهینه‌ی وزن‌دهی روی دو جمله‌ی رابطه‌ی ۵ صورت نگرفت و از نظر محاسباتی هر دو جمله دارای ارزش یکسانی بودند، برای مجموع وابستگی و کمترین وابستگی وزن یکسان داده شده است. در هر صورت، تصمیم‌گیرنده می‌تواند وزن‌های متفاوتی به این دو عامل بدهد.

۳-۱-۲- سازگاری

به منظور تعیین ماتریس سازگاری در سطح واحد مکانی پلاک در اینجا نیز از روش دلفی و در نهایت کمی-سازی نتایج آن با استفاده از روش AHP استفاده شده است.

مراحل کاری طی شده مشابه مراحل استخراج ماتریس وابستگی است. تابع هدف سازگاری نیز مانند تابع هدف وابستگی بر اساس فاصله تعریف شده است. زیرا با افزایش فاصله‌ی دو کاربری اثر سازگاری یا ناسازگاری آنها نسبت به یکدیگر کمتر خواهد شد. از اینرو تابع سازگاری طبق رابطه‌ی ۶ تعریف شده است.

$$^{2}{}_{Ci,Cj}(d_{ij})\times\alpha\ Comp_{ij}=f_2(d_{ij},C_iC_j)=f_2(d_{ij},CMP_{cicj}) \quad (۶)$$

که در آن d_{ij} فاصله‌ی مرکز ثقل میان پارسل‌های i و j، CMP_{cicj} سازگاری دو کلاس کاربری C_i و C_j در ماتریس سازگاری و $\alpha^2{}_{Ci,Cj}(d_{ij})$ تابع فاصله‌ی مربوط به سازگاری (مشابه آنچه در تابع هدف وابستگی دیده شد.) می‌باشند. در نهایت تابع هدف سازگاری به صورت رابطه‌ی ۷ تعریف شده است.

$$F_2 : Maximize(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\frac{1}{n_i}\sum_{j=1}^{n_i}(Comp_{ij})) + \min_{ij}(Comp_{ij})) \quad (۷)$$

که در آن ، i نشاندهنده‌ی قطعات، j همسایه‌های قطعه‌ی i، n_i تعداد همسایه‌های قطعه‌ی i و n تعداد کل قطعات می‌باشد.

۳-۱-۳- مطلوبیت (مناسبت کاربری با زمین)

همانطور که قبلاً اشاره شد، منظور از مطلوبیت، مناسب بودن قطعه زمین برای استقرار یک کاربری مشخص در آن می‌باشد. بنابراین مطلوبیت وابسته به بسیاری از پارامترهای فیزیکی، اقتصادی و ... است [۱۵،۱۶]. آنچه در این تحقیق مد نظر قرار گرفته است بیشتر بر مبنای پارامترهای فیزیکی و مشخصات ظاهری قطعه زمین می‌باشد. بنابراین با مطالعه‌ی منابع و مستندات موجود و با استفاده از نظر متخصصان، پارامترهای زیر برای تعیین مطلوبیت در نظر گرفته شدند؛

- مساحت (A): مساحت قطعه‌ی زمین یکی از عوامل مهم برای تعیین کاربری مناسب برای آن می‌باشد [۱۶]. در مواردی که امکان استخراج مساحت مطلوب از استانداردها و منابع موجود مقدور بود، مساحت بر این مبنا قرار گرفت و در مواردی که مساحت مطلوب برای کاربری-ها در منابع ذکر نشده بود از دانش کارشناسی استفاده شده است. ضمیمه‌ی ۱ مقادیر درجات مناسبت برای مساحت‌های مختلف برای کاربری‌های به کار رفته در تحقیق را نشان می‌دهد.
- دسترسی (Ac): منظور از این المان، دسترسی قطعات زمین به شبکه‌ی حمل و نقل عمومی است. برای مدل‌سازی دسترسی، برای هر نوع کاربری جدولی مشابه جدول ۲ ایجاد شد و با توجه به فاصله‌ی قطعه زمین از راه درجه‌ی مناسبت کاربری مشخص شد.

---

۱ همسایه‌ی هر کاربری به شکل پلیگون دارای ضلع مشترک، گوشه-ی مشترک و نیز قطعات روبرو در معابر در نظر گرفته شده اند.

جدول ۲- درجات مناسبت دسترسی قطعات زمین برای کاربری مسکونی با تراکم متوسط با توجه به فاصله و نوع راه

سطح مناسبت	بالا	متوسط	کم	میانگین هندسی	مقادیر استاندارد شده
بالا	۱	۲	۳	۱/۸	۰/۵۳
متوسط	۰/۵	۱	۲	۱	۰/۲۹
کم	۰/۳۳	۰/۵	۱	۰/۵۴	۰/۱۶

• آلودگی صوتی (VP): این پارامتر برای هر یک از قطعات با توجه به فاصله‌ی قطعه از شبکه‌ی ارتباطی مشخص شد.[۱]

• آلودگی هوا (AP): این پارامتر مشابه آلودگی صوتی تعریف شده است.

• سختی تغییر (R): درجات سختی تغییر کاربری‌ها به یکدیگر با توجه به دانش کارشناسی به صورت بالا[۲]، متوسط[۳] و پایین[۴] استخراج شدند. مقادیر این درجات تنها برای دو کاربری مسکونی و تجاری در جدول ۳ آمده است. سپس این مقادیر کیفی با استفاده از روش مقایسه‌ی زوجی ساختار یافته در AHP با توجه به اعداد درج شده در جدول ۴ به مقادیر کمی میان ۰ و ۱ تبدیل شدند.

جدول ۳- مقادیر سختی تغییر کاربری‌ها به یکدیگر در دو کلاس کاربری مسکونی و تجاری

کاربری در چینش		مسکونی			تجاری		
		کم تراکم	متوسط تراکم	تراکم بالا	روزانه	محله	منطقه
مسکونی	کم تراکم	0	L	L	L	M	H
	تراکم متوسط	H	0	M	M	H	H
	تراکم بالا	H	H	0	H	M	M
تجاری	روزانه	M	M	M	0	L	M
	محله	M	M	M	L	0	L
	منطقه	H	H	M	L	L	0

۱ برای محاسبه‌ی آلودگی صوتی و آلودگی هوا در نظر گرفتن فقط معیار فاصله از شبکه کافی نمی‌باشد و باید میزان ترافیک در انواع شبکه‌های ارتباطی برای محاسبه‌ی آلودگی صوتی و آلودگی هوا وارد مدل شود. از آنجائیکه داده‌های مناسب در این زمینه موجود نبود، نویسندگان تنها از معیار فاصله از شبکه‌های ارتباطی را مدنظر قرار دادند. همچنین در منطقه‌ی مطالعاتی انتخاب شده تقریباً از نظر ترافیکی شرایط مشابهی وجود دارد.

۲ High (H)
۳ Moderate (M)
۴ Low (L)

جدول ۴- مقادیر کمی به دست آمده از روش AHP ساختار یافته برای تعیین سطوح سختی تغییر کاربری‌ها به یکدیگر

نوع راه/ فاصله	۰-۱۰۰	۱۰۰-۳۰۰	۳۰۰-۵۰۰	۵۰۰<
خیابان محلی	HS	MS	LS	NS
خیابان جمع کننده	HS	MS	LS	NS
خیابان درجه ۲	NS	MS	MS	NS
خیابان درجه ۱	NS	LS	LS	NS
اتوبان و آزادراه	NS	LS	LS	NS

برای محاسبه‌ی نهایی مطلوبیت هر قطعه برای کلاس‌های کاربری مورد نظر، وزن‌هایی با توجه به نظرسنجی از کارشناسان شهرسازی استخراج شد که به ترتیب برای پارامترهای مساحت، دسترسی، آلودگی هوا، آلودگی صوتی و سختی تغییر برابر ۰/۲۵، ۰/۲۵، ۰/۲، ۰/۱۵ و ۰/۱۵ می‌باشند. مطلوبیت کلی کلاس کاربری C_i برای قطعه‌ی j به صورت رابطه‌ی ۸ به‌دست آمد.

$$S_{j,Ci}=w_1A_{j,Ci}+w_2Ac_{j,\,Ci}+w_3VP_{j,\,Ci}+w_4Ap_{j,\,Ci}+w_5R_{j,\,C} \qquad (۸)$$

به طوریکه مجموع وزن‌ها برابر ۱ باشد. در نهایت تابع هدف سوم به صورت رابطه‌ی ۹ تعریف شد.

$$F_3 : Maximize(\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{n}S_{j,Ci}+Minimmum(S_{j,C_i})) \qquad (۹)$$

که در آن $S_{j,\,Ci}$ مناسبت کاربری C_i با قطعه‌ی j و n تعداد قطعات در چینش می‌باشد. همانطور که در رابطه‌ی ۹ ملاحظه می‌شود، در این تابع هدف نیز به منظور جلوگیری از به وجود آمدن حالت جبرانی در مجموع مناسبت‌ها جمله‌ی دوم به تابع هدف اضافه شد.

۳-۱-۴- همسانی کاربری‌های مجاور[۵]

در برخی از کاربری‌ها مانند کاربری‌های مسکونی، همسانی کاربری‌های مجاور از اهمیت خاصی در برنامه‌ریزی شهری برخوردار است. به منظور تأمین یکسانی کاربری‌های مجاور در این تحقیق به این شکل عمل شد؛ ابتدا همسایه‌های هر بلوک ساختمانی در برنامه مشخص شده و سپس شمارنده‌ای تعریف شد که در صورت یکسان

۵ Similarity of neighbors

بودن کاربری‌های مجاور در چینش، یک واحد به آن اضافه می‌شود. بنابراین تابع هدف مربوطه به صورت زیر تعریف شد؛

$$F_4 : \max imize \sum Similarity \qquad (۱۰)$$

که در آن *Similarity* شمارنده‌ی مزبور است.

۳-۲- قید مسئله

در این تحقیق قید مسئله تأمین سرانه‌های کاربری‌ها در چینش‌های ارائه شده در نظر گرفته شد. در روش‌های چندهدفه‌ی بهینه‌سازی روش‌های متفاوتی برای برخورد با شرایط مسئله ذکر شده است [۶]. در این تحقیق از روش مبتنی بر تابع جریمه به علت سادگی و کارآیی استفاده شد. در این روش یک عبارت جریمه، به جریمه کردن جواب‌های ناموجه می‌پردازد. به منظور ورود این قید به مدل، سرانه‌ی هر کلاس کاربری با شرط زیر وارد مسئله شد.

$$P_{c,min} \le P_c \le P_{c,max} \qquad (۱۱)$$

که در آن P_c، سرانه‌ی موجود کاربری کلاس C، $P_{c,min}$ کمینه‌ی سرانه‌ی کاربری کلاس C و $P_{c,max}$ بهینه‌ی سرانه‌ی کاربری کلاس C می‌باشد $P_{c,min}$ و $P_{c,max}$ از استانداردها و آیین‌نامه‌های مصوب شورای عالی شهرسازی و معماری ایران در سال ۱۳۸۹ استخراج شدند. عبارت جریمه نیز به صورت زیر تعریف شد:

$$v_i = \begin{cases} 1 - \frac{P_{C_i}}{P_{\min C_i}} & P_{C_i} < P_{\min C_i} \\ 0 & P_{C_i} > P_{\min C_i} \end{cases} \qquad (۱۲)$$

$$v_i' = \begin{cases} \frac{P_{C_i}}{P_{\max C_i}} - 1 & P_{C_i} > P_{\max C_i} \\ 0 & P_{C_i} \le P_{\max C_i} \end{cases} \qquad (۱۳)$$

که در آن v_i ,v_i' میزان اصلاح (جریمه) مورد نظر است و با تعریف کسرهای فوق مقادیر در بازه‌ی ۰ و ۱ نرمال‌سازی شده است. بنابراین میانگین جریمه‌ها به صورت رابطه‌ی ۱۴ محاسبه می‌شود.

$$\begin{cases} \bar{v} = < v_i > = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} v_i \\ \bar{v}' = < v_i' > = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} v_i' \end{cases} \qquad (۱۴)$$

که در آن n تعداد کلاس‌های کاربری است که در این مسئله ۳۴ کلاس است و $\bar{v}', \bar{v}$ میانگین تخطی‌های مثبت و منفی وجود در چینش مفروض می‌باشند. مقدار تخطی کل با استفاده از میانگین وزن‌دار (رابطه‌ی ۱۵) به دست آمد.

$$\bar{V} = \frac{w_1 \bar{v} + w_2 \bar{v}'}{w_1 + w_2} \qquad (۱۵)$$

که در آن w_1, w_2 مقادیر وزن‌های مورد نظر برای تخطی‌های مثبت و منفی هستند. با در نظر گرفتن این اوزان می‌توان در صورت نیاز وزن تخطی‌ها را تغییر داد. از آنجائیکه در این مسئله هدف بیشینه کردن توابع هدف است، میزان تخطی به صورت یک عامل کاهنده به توابع هدف اعمال شد. یعنی در هر چینش که تخطی وجود داشته باشد، ضریبی کاهشی به توابع هدف اعمال می‌گردد و مقدار آن را کاهش می‌دهد. مقدار تخطی کل به دست آمده به صورت رابطه‌ی ۱۶ به توابع هدف اعمال شد.

$$\hat{F} = \frac{F}{1 + \bar{V}} \qquad (۱۶)$$

که در آن F مقدار توابع هدف و $\hat{F}$ مقدار اصلاح شده‌ی همان تابع (از لحاظ جریمه‌ی سرانه) می‌باشد.

۳-۳- تعریف المان‌های NSGA-II در مسئله‌ی چیدمان کاربری‌ها

در این قسمت به تعریف المان‌های روش بهینه‌سازی چندهدفه‌ی NSGA-II پرداخته می‌شود.

۳-۳-۱- تعریف ژن و کروموزوم

در این تحقیق کروموزوم به صورت مجموعه‌ای از سلول‌ها تعریف شده است که هر کدام یک ژن هستند و در فضای مسئله همان واحدهای کاربری اراضی را نمایش می‌دهند. به عبارت دیگر یک کروموزوم لیستی منظم از کاربری‌های تخصیص یافته به پارسل‌های شماره‌بندی شده است. این روش در مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی

کاربرد الگوریتم‌های تکاملی در آنالیزهای مکانی به کرات استفاده شده است [۸].

۳-۳-۲- ایجاد جمعیت اولیه

در این مسئله در ابتدا جمعیت اولیه به صورت کاملاً تصادفی ایجاد شد. با اجرای برنامه در این حالت مشخص شد به دلیل پراکندگی کاربری‌های ایجاد شده و سعی مسئله در بیشینه کردن توابع هدف، زمان اجرای بالایی لازم است و مسئله همگرایی لازم را به دست نمی‌آورد. برای حل این مشکل قسمتی از جمعیت اولیه با استفاده از تغییری به میزان ۲۰% در کاربری‌های واقعی و موجود بلوک‌ها در منطقه ایجاد شد. در حقیقت جمعیت اولیه به صورت ترکیبی از جمعیت اولیه‌ی کاملاً تصادفی و جمعیت اولیه‌ی حاصل از تغییر وضعیت فعلی وارد الگوریتم شد. به این روش از ایجاد جمعیت اولیه "جمعیت اولیه بر مبنای مسئله" گویند که در بسیاری از تحقیقات در زمینه‌ی مدیریت کاربری زمین استفاده شده است [۱۰،۱۷].

۳-۳-۳- تقاطع

الگوریتم‌های ژنتیک با استفاده از تقاطع، کروموزوم-های جدید برای جستجوی بهتر فضای جواب‌های ممکن تولید می‌کنند. روش‌های مختلف تقاطع در [۱۰] آمده است. در این تحقیق برای سادگی محاسبات از تقاطع خطی تک نقطه‌ای و دو نقطه‌ای استفاده شد. در صورتی‌که تقاطع به صورت کاملاً تصادفی انجام پذیرد، امکان دارد به دلیل عدم در نظر گرفتن همسایگی چینش‌ها مناسب نباشند. به منظور جلوگیری از این حالت در این تحقیق ابتدا الگوریتم برای تعیین نقطه‌ی تقاطع، در دو والد انتخاب شده به دنبال قطعات مسکونی می‌گردد که در همسایگی حداقل دارای دو همسایه با کاربری مسکونی باشند. سپس به صورت تصادفی، تقاطع را از موقعیت یکی از این مناطق انجام می‌دهد. همچنین میزان تقاطع در این تحقیق ۰/۹ در نظر گرفته شد.

۳-۳-۴- جهش

جهش نیز یکی از اپراتورهای الگوریتم ژنتیک است که امکان جستجوی فضای بیشتر و متنوع‌تری به الگوریتم می‌دهد. در این تحقیق به منظور رعایت مناسبت‌ها از روش خاصی از جهش استفاده شد. در این روش درصدی از قطعات انتخاب شده و به صورت تصادفی کاربری آنها به یکی از کاربری‌هایی که قطعه برای آن مناسبت بالا و یا متوسط دارد، تبدیل شد. این امر باعث می‌شود الگوریتم به قطعات، کاربری با مناسبت کم و نامناسب نسبت ندهد. همچنین میزان جهش ۰/۱ در نظر گرفته شد.

۳-۳-۵- انتخاب

مبنای روش‌های انتخاب در الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه بهتر بودن تابع هزینه در والدهاست. از این‌رو لازم است این روش‌ها برای حالت چندهدفه تغییر داده شوند زیرا تصمیم‌گیری نمی‌تواند بر مبنای بهتر بودن یک تابع هدف باشد. در این تحقیق از یک مکانیزم انتخاب تورنومنتی چندهدفه استفاده شده است. به این ترتیب که ابتدا دو والد به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. سپس یکی از این دو والد بر مبنای یکی از دو شرط زیر انتخاب می‌شود:

- رتبه: در صورتیکه دو والد انتخاب شده دارای رتبه‌ی یکسانی نباشند، والد با رتبه‌ی پایین‌تر انتخاب می-شود.
- دانسیته: در صورتیکه رتبه‌ی دو جواب یکسان باشد، والد با فاصله‌ی ازدحامی بیشتر انتخاب خواهد شد.

گفتنی است پیچیدگی محاسباتی و زمانی الگوریتم منطبق بر پیچیدگی محاسباتی NSGA-II می‌باشد. گام اول از NSGA-II به یک مرتب‌سازی نامغلوب از جمعیت با اندازه‌ی 2N نیاز دارد. این عمل حداکثر از درجه‌ی $O(MN^2)$ خواهد بود. در مرحله‌ی بعد مرتب‌سازی به محاسبه‌ی فاصله‌ی ازدحام نیازمند است که برای تمام اعضا انجام می‌شود. مسابقه‌ی انتخابی در گام چهارم به محاسبه‌ی فاصله‌ی ازدحام برای تمام N عضو (اندازه‌ی جمعیت P_{t+1}) نیاز دارد. بنابراین پیچیدگی محاسباتی الگوریتم از درجه‌ی $O(MN^2)$ خواهد بود [۶].

۳-۴- آماده‌سازی داده‌ها در منطقه‌ی مطالعاتی

نقشه‌های شهری ناحیه‌ی ۱ منطقه‌ی ۷ تهران با مقیاس ۱:۲۰۰۰ به عنوان داده‌ی مکانی نمونه وارد مدل شده‌اند. شکل ۲ محدوده‌ی مطالعاتی را نشان می‌دهد. از نقاط قابل توجه در این منطقه، وجود کاربری‌های متنوع در سطوح مختلف مدیریت شهری است که در این منطقه

مسئله‌ی مدیریت کاربری‌های شهری را پیچیده می‌سازد. همچنین این منطقه تحت فشار بخش‌های مرکزی شهر تهران قرار دارد که نتیجه‌ی آن افزایش درخواست برای تغییر کاربری‌ها می‌باشد.

داده‌های اصلی مورد نیاز برای ایجاد پایگاه داده‌های مکانی در این تحقیق به شرح زیر بوده است؛

- اطلاعات جمعیتی به تفکیک سن افراد :این اطلاعات حاصل سرشماری ۱۳۸۵ کل کشور توسط مرکز آمار ایران و پیمایش‌های صورت گرفته توسط شرکت‌های مشاور جهت تخمین جمعیت فعلی منطقه‌ی مورد مطالعه می‌باشد.
- اطلاعات کاربری اراضی شهری: این اطلاعات شامل کاربری عمده‌ی هر پلاک ساختمانی در مقیاس ۱:۲۰۰۰ می‌باشد و با توجه به مشخصات مدل مورد نظر، طبقه‌بندی کاربری‌های شهری بر اساس سطح عملکرد انجام گرفته است. این اطلاعات شامل ۲۷۱۰ قطعه‌ی شهری و راه‌های ارتباطی است که پس از اخذ ابتدا در محیط نرم‌افزارهای GIS ویرایش شده و تمامی خطاهای موجود در آنها حذف گردیده است و سپس تمامی اطلاعات توصیفی مورد نیاز به آنها نسبت داده شده است.

شکل ۲- منطقه‌ی مطالعاتی تحقیق

۴- کمک به تصمیم‌گیری در انتخاب جواب‌ها با استفاده از روش‌های خوشه‌بندی

همانطور که اشاره شد، با توجه به تعدد جواب‌ها در جبهه‌ی جواب بهینه، تصمیم‌گیرندگان در انتخاب جواب-های مورد نظر دچار سردرگمی خواهند شد. به منظور حمایت از تصمیم‌گیری و نمایش جواب‌های مطابق با درخواست تصمیم‌گیرندگان، در این تحقیق نتایج حاصله با استفاده از آنالیزهای خوشه‌بندی دسته‌بندی شدند. در حقیقت از این طریق می‌توان پارامترهای زبانی فازی در مورد یک تابع هدف مانند سازگاری را به صورت سازگاری خیلی بالا، سازگاری بالا، سازگاری متوسط، سازگاری پایین و سازگاری خیلی پایین از تصمیم‌گیرنده دریافت کرد و نماینده‌ی هر گروه را با استفاده از پنج خوشه‌ی متناظر با این پارامترها به تصمیم‌گیرنده نمایش داد. به این ترتیب تصمیم‌گیرنده می‌تواند نقشه‌ی چیدمان کاربری متناظر با هر یک از نمایندگان خوشه‌ها را ملاحظه نماید. گفتنی است تصمیم‌گیرندگان معمولاً به دنبال جواب‌هایی هستند که در آن توابع هدف حالت تعادلی و میانی داشته باشند و انتخاب حالات افراطی مانند بیشترین یا کمترین مقدار توابع هدف کمتر مورد توجه هستند. علت این است که اغلب رسیدن افراطی به یکی از اهداف به قیمت عدم ارضاء شدید سایر اهداف می‌باشد. هدف اصلی از آنالیز خوشه‌بندی نیز بیشتر معرفی چینش با مقادیر میانی و متعادل برای توابع هدف است.

۴-۱- خوشه‌بندی

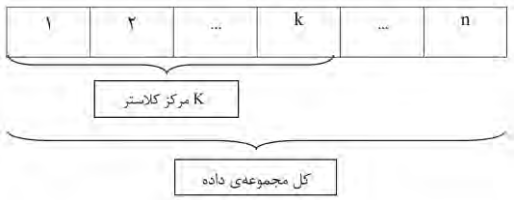
آنالیز خوشه‌بندی به اختصاص دادن مجموعه‌ای از اشیاء به گروه‌ها (دسته‌ها) گفته می‌شود به نحوی که هر شیئ در هر گروه به اعضای گروه خود شبیه‌تر از سایر گروه‌ها باشد. الگوریتم‌های متفاوتی برای انجام خوشه‌بندی وجود دارند که انتخاب آنها به نوع داده بستگی دارد. علاقمندان برای مطالعه‌ی بیشتر می‌توانند به [۱۸] مراجعه کنند. در این تحقیق به منظور استفاده از مزایای هوش مصنوعی از جمله سرعت بالا، برای خوشه‌بندی از یک الگوریتم بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه استفاده شده است. همچنین از آنجائیکه در این تحقیق جواب‌های جبهه‌ی جواب بهینه به هم نزدیک هستند بهتر است روشی به کار برده شود که بر خلاف الگوریتم‌های متداول خوشه‌بندی مانند *k-means* نماینده‌ی مستقیم خوشه (ضعفی که در این الگوریتم‌ها وجود دارد این است که به جای معرفی نماینده از نقاط خود خوشه، میانه‌ی نقاط را محاسبه کرده و نزدیک‌ترین نقطه در خوشه به میانه را به عنوان نماینده معرفی می‌کند.) را معرفی نماید. در اینجا به دلیل گستردگی مطالب از توضیح مراحل کاری الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه صرفنظر شده و تنها به نحوه‌ی اجرای الگوریتم به کار برده شده در این تحقیق

پرداخته خواهد شد. علاقمندان برای مطالعه‌ی بیشتر در خصوص نحوه‌ی عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه می‌توانند به [۱۹] مراجعه کنند.

در خوشه‌بندی جواب‌ها در این مسئله فرض بر این است که هدف انتخاب k نماینده (و متعاقباً k خوشه) از میان مجموعه‌ی داده‌ای به ابعاد n است. بنابراین تعداد جایگشت ممکن برای انتخاب به صورت رابطه‌ی ۱۷ است:

$$\binom{k}{n}=\frac{n!}{k!(n-k)!} \qquad (۱۷)$$

نحوه‌ی کدینگ در این تحقیق به صورت کدینگ جایگشت در نظر گرفته شده است زیرا در این کدینگ هر عدد یکبار در جایگشت وارد می‌شود و نیز در جایگزینی، مراکز خوشه در اولویت‌های اول هستند. برای روشن‌تر شدن مطلب نحوه‌ی کدینگ در شکل ۳ آمده است. بنابراین طبق این کدینگ k لایه‌ی اول حرکت مورچه‌ها به عنوان مراکز خوشه‌ها در نظر گرفته شده و سایر نقاط با توجه به کمترین فاصله‌ای که از مراکز دارند (شبیه‌ترین نقاط به مرکز) به عنوان نقاط خوشه در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین در حرکت مورچه‌ها تنها حرکت در مراکز خوشه‌ها اهمیت دارد.



شکل ۳- نحوه‌ی کدینگ در تحقیق به منظور حل مسئله‌ی خوشه‌بندی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه

در الگوریتم پیشنهادی این تحقیق مراحل زیر به منظور خوشه‌بندی داده‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه طی شده است:

- مرحله‌ی ۱: تعداد $nAnt$ مورچه بر روی هر نقطه به عنوان جمعیت اولیه که در آن قرار داده شد.
- مرحله‌ی ۲: حرکت بر روی k نقطه به عنوان مراکز خوشه آغاز شده و. رفتار فرمون و احتمال انتخاب نقطه‌ی بعدی با استفاده از رابطه‌ی ۱۸ محاسبه شده است.

$$P_{ij}^{l}=\frac{(\tau_{ij})^{\alpha}}{\sum_{m}(\tau_{im})^{\alpha}} \qquad (۱۸)$$

که در آن τ_{ij} مقدار فرمونی است که بر روی هر یال در هر لایه‌ی خوشه ریخته شده است و α ضریب ثابتی است. τ_{im} نیز مقدار فرمون در سایر یال‌هاست.

- مرحله‌ی ۳: سایر نقاط باقی مانده به مراکز خوشه‌ها نسبت داده شدند.
- مرحله‌ی ۴: تابع هزینه برای هر حرکت به صورت رابطه‌ی ۱۹ تعریف شد:

$$Cost = \text{مجموع فاصله هر کدام از گره‌ها از مرکز خوشه‌ی مربوطه} \qquad (۱۹)$$

- مرحله‌ی ۵: قانون به روز رسانی فرمون به صورت رابطه‌ی ۲۰ تعریف شد.

$$\tau_{ij} \longleftarrow \tau_{ij}+\frac{Q}{Cost_Function} \qquad (۲۰)$$

- مرحله‌ی ۶: محاسبه تبخیر فرمون: مقدار تبخیر فرمون در هر مسیر طبق رابطه‌ی ۲۱ به دست آمد.

$$\tau_{ij}=\tau_{ij}(1-\rho) \qquad (۲۱)$$

که در آن ρ ضریب تبخیر فرمون است.

- مرحله‌ی ۷: بعد از حرکت تمامی مورچه‌ها و محاسبه فرمون نهایی، بهترین حرکت ذخیره شد.
- مرحله‌ی ۸: الگوریتم تا رسیدن به شرط پایانی از مرحله‌ی ۲ تکرار می‌شود.

۵- نتایج

در این بخش نتایج حاصل از مدلسازی مسئله و نیز ارزیابی آنها در دو قسمت مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۱- نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل

در این قسمت به تشریح نتایج حاصل از مدلسازی اثر تغییر کاربری‌های شهری با استفاده از روش بهینه‌سازی NSGA-II پرداخته می‌شود. همچنین نتایج حاصل از خوشه‌بندی جواب‌ها در ۵ خوشه به همراه جواب‌ها ارائه خواهد شد.

طبق بررسی‌های انجام شده به منظور تدوین طرح تفصیلی در محله‌های انتخاب شده در منطقه‌ی ۷، کاربری تجاری محله با کمبود اساسی مواجه است. از این رو به

منظور امتحان کارآیی مدل در یک منطقه از محدوده‌ی مطالعاتی تعدادی از زمین‌ها به این کاربری اختصاص داده شده است تا تأثیر تغییر آنها بر چینش سایر کاربری‌ها بررسی شود. این قسمت در شکل ۵ با عنوان پارسل‌های تغییر یافته به رنگ قرمز نمایش داده شده است.

شکل ۴ جبهه‌ی جواب بهینه‌ی به دست آمده از NSGA-II و نیز نتایج خوشه‌بندی جواب‌ها را در ۵ خوشه با الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه در فضای سه بعدی نشان می‌دهد. همانطور که ذکر شد هر نقطه روی این جبهه‌ی جواب نشانگر یک چینش کاربری می‌باشد. و نماینده‌ی خوشه‌ی میانی، جواب با وزن یکسان توابع هدف است.

شکل ۵ نیز چینش بهینه‌ی متناظر با حالت تعادلی توابع هدف (خوشه‌ی میانی) و پارسل‌های تغییر یافته در منطقه به پیشنهاد الگوریتم، با توجه به تغییر به وجود آمده را نشان می‌دهند. به منظور سهولت مقایسه شعاع نفوذ کاربری‌های تغییر یافته نیز در این شکل آمده است. تعداد پیشنهاد تغییر کاربری در این چینش از سایر چینش‌ها کمتر و ۱۸۴ مورد بوده است که ۱۲۵ مورد آن در داخل شعاع نفوذ کاربری تغییر یافته قرار دارند. گفتنی است که با افزایش تعداد قطعات در منطقه‌ی مطالعاتی، طول کروموزوم هم افزایش می‌یابد ولی از طرف دیگر از آنجائیکه عامل فاصله از کاربری تغییر یافته به عنوان یک عامل کلیدی در محاسبات توابع هدف آورده شده است، بیشترین تغییرات در فاصله‌ی شعاع عملکردی (شعاع نفوذ) می‌باشد و رفته رفته این تغییر به صورت معنی‌داری کم می‌شود. در حقیقت در محاسبات همواره این امر مد نظر بوده است که با افزایش فاصله تأثیر کاربری تغییر یافته نیز کم می‌شود. در این محدوده‌ی مطالعاتی تقریباً در فاصله‌ی بیش از ۳ برابر شعاع نفوذ، تغییری توسط الگوریتم پیشنهاد نشده است. در اینصورت در شهرهای با تعداد بلوک بالاتر می‌توان این مسئله را ملاک قرار داد و مسئله را به این صورت مقید نمود که طول کروموزوم تا ۳ برابر شعاع نفوذ در نظر گرفته شود. در این صورت حجم محاسبات نیز قابل قبول خواهد بود.

برای مقایسه‌ی نتایج خوشه‌بندی حاصل از روش بهینه‌سازی کلونی مورچه، خوشه‌بندی با دو روش متداول Fuzzy K-means و K-means نیز انجام شده و نتایج آنها از دو دیدگاه یعنی نقاط مراکز خوشه و سرعت اجرا با روش بهینه‌سازی کلونی مورچه مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاکی از انطباق کامل مراکز خوشه در روش بهینه‌سازی کلونی مورچه با Fuzzy K-means و اختلاف در یک مرکز با روش K-means است. این مسئله می‌تواند به دلیل انتخاب نماینده‌ی خوشه از خود نقاط در روش بهینه‌سازی کلونی مورچه باشد. ولی در حالت کلی سرعت عمل الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه در مقایسه با هر دو روش ذکر شده بالاتر است. هر چند دو روش ذکر شده در بیشتر نرم‌افزارها در دسترس ترند. شکل ۶ و ۷ نتایج حاصل از خوشه‌بندی با روش‌های K-means و Fuzzy K-means را نشان می‌دهد.

جدول ۵- مقادیر توابع هدف برای حالت‌های بیشینه‌ی هر یک از توابع در روش NSGA-II

پاسخ/ مقدار تابع هدف	نماینده‌ی خوشه با مقدار بیشینه‌ی تابع هدف اول	نماینده‌ی خوشه با مقدار بیشینه‌ی تابع هدف دوم	نماینده‌ی خوشه با مقدار بیشینه‌ی تابع هدف سوم	نماینده‌ی خوشه با مقدار بیشینه‌ی تابع هدف چهارم	نماینده‌ی خوشه با وزن یکسان توابع هدف
F_1	۰/۱۸۸	۰/۱۸۵	۰/۱۸۷	۰/۱۸۷	۰/۱۸۷
F_2	۰/۰۷۵	۰/۰۷۸	۰/۰۷۳	۰/۰۷۳	۰/۰۷۶
F_3	۰/۴۸۴	۰/۴۸۲	۰/۴۸۵	۰/۴۸۴	۰/۴۸۲
F_4	۰/۹۳۲	۰/۹۳۲	۰/۹۳۵	۰/۹۳۶	۰/۹۳۴
جبران سرانه‌ها	۱۸/۸	۱۸/۹	۱۹/۳	۱۶/۵	۲۰/۲

جدول ۵ نشاندهنده‌ی مقدار توابع هدف در نماینده‌ی خوشه‌ها در حالت‌هایی است که توابع هدف دارای مقادیر بیشینه هستند. همانطور که گفته شد، تصمیم‌گیرندگان معمولاً به دنبال مقادیر متعادل برای تمامی توابع هدف هستند، به این دلیل ستونی تحت عنوان "پاسخ با وزن یکسان توابع هدف" ایجاد شده است که نشاندهنده‌ی پاسخی است که مقدار هر چهار تابع هدف در آن یک مقدار میانی دارد. همانطور که در جدول ۵ ملاحظه می‌شود، پاسخ با وزن یکسان توابع هدف بیشترین جبران کسری سرانه‌ها (۲۰/۲ درصد) را دارد. این امر می‌تواند به دلیل میانه بودن این چینش از نظر کلیه‌ی توابع هدف باشد و حالت افراطی در ارضای یک تابع در اینجا وجود ندارد.

۵-۲- ارزیابی نتایج

در الگوریتم‌هایی که جمعیت اولیه به صورت تصادفی انتخاب می‌شود، ممکن است نتایج در اجراهای مختلف،

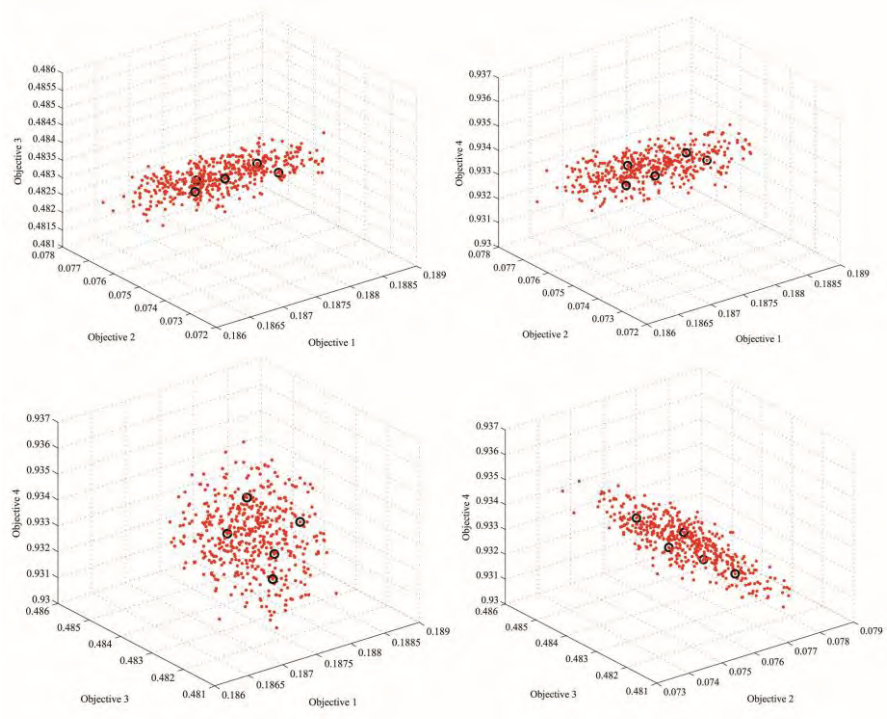
متفاوت باشد. بنابراین لازم است تست‌هایی بر روی این الگوریتم‌ها انجام شود تا ثبات الگوریتم بررسی شود [۱۰]. از جمله‌ی این تست‌ها می‌توان به تست تکرارپذیری الگوریتم و تست همگرایی الگوریتم اشاره کرد که در این بخش به بررسی نتایج مدل از منظر این تست‌ها پرداخته خواهد شد.

۵-۲-۱- تست تکرارپذیری الگوریتم

برای انجام این تست، الگوریتم با جمعیت اولیه و تعداد تکرار یکسان چندین بار اجرا می‌شود. در صورتیکه پارامترهای اجرایی الگوریتم به خوبی تعریف و تنظیم شده باشند، پایستی الگوریتم در اجراهای مختلف جواب‌های نسبتاً یکسانی (حدود ۷۰ درصد) تولید کند [۶] در این تحقیق الگوریتم به تعداد ۵ بار و با جمعیت اولیه ۵۰۰ و تعداد تکرار ۵۰۰، مورد آزمایش قرار گرفته است. جدول ۶ به منظور بررسی دقیق‌تر این مسئله تولید شده است که درصد همپوشانی دو به دوی هر یک از اجراها را نشان می‌دهد. به عنوان مثال ستون مربوط به شماره‌ی اجرای ۱، مقایسه‌ی نتایج این اجرا را با اجراهای شماره‌ی ۲، ۳، ۴و ۵ و درصد همپوشانی تعداد جواب‌های به دست آمده را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، درصد تکرارپذیری الگوریتم در ۵ بار اجرا در سطح قابل قبولی قرار دارد. قید سرانه نقش مهمی در این مسئله و پراکندگی جواب‌های آن دارد به طوریکه با تغییر آن در مسئله نتایج به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرند.

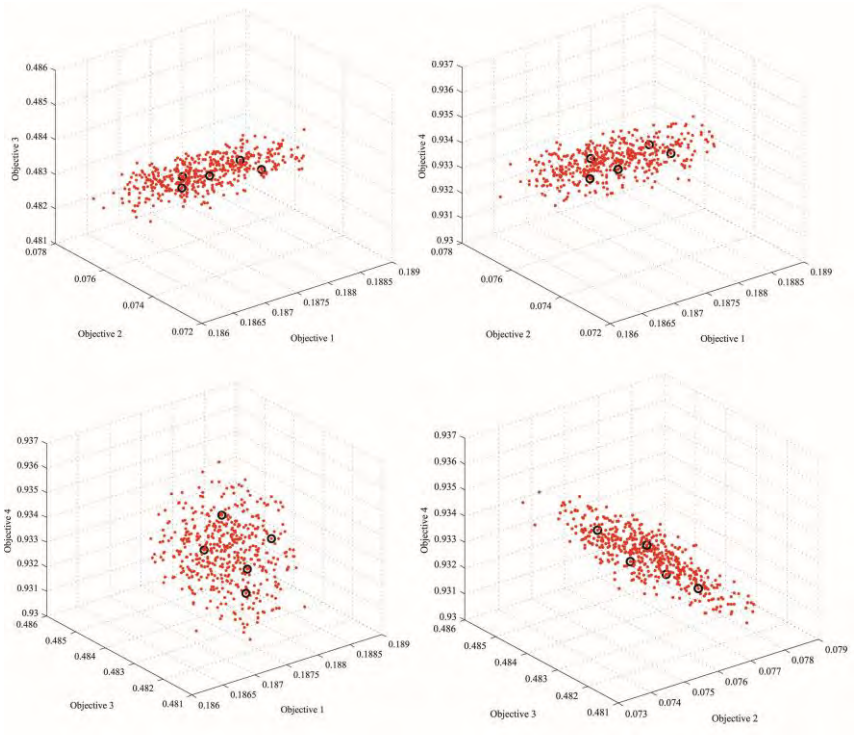
جدول ۶- مقایسه‌ی دو به دوی درصد همپوشانی جواب‌ها در ۵ بار اجرای الگوریتم NSGA-II

شماره‌ی اجرای مورد بررسی	شماره‌ی اجرای مورد مقایسه	درصد همپوشانی جواب‌ها
۱	۲	۷۲
	۳	۷۸
	۴	۸۴
	۵	۸۲
۲	۳	۸۶
	۴	۸۳
	۵	۸۵
۳	۴	۷۳
	۵	۷۹
۴	۵	۸۱

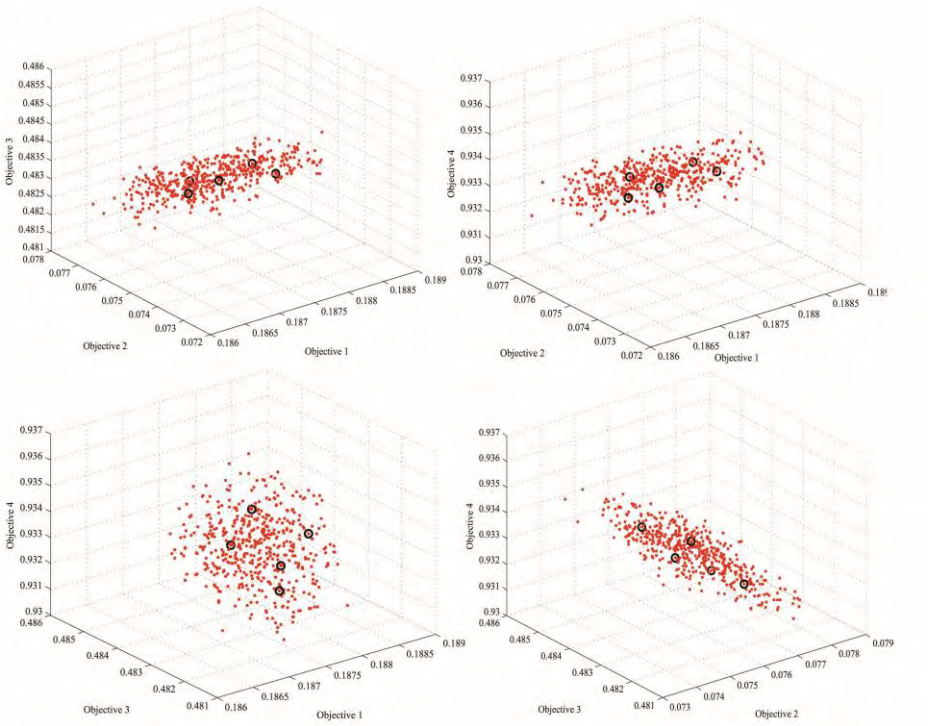


شکل ۴– جبهه‌ی جواب بهینه‌ی حاصل از روش NSGA-II به همراه خوشه‌بندی جواب‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه، در فضای سه بعدی برای هر چهار تابع هدف (نقاط قرمز نشاندهنده‌ی جواب‌های بهینه و نقاطی که با دایره‌ی سیاه رنگ مشخص شده‌اند نماینده‌ی خوشه‌ها می‌باشند.)

شکل ۵- چینش بهینه‌ی متناظر با حالت تعادلی توابع هدف و پارسل‌های تغییر یافته در منطقه به پیشنهاد الگوریتم NSGA-II با توجه به تغییر به وجود آمده، متناظر با حالت تعادلی توابع هدف (پارسل‌های تغییر یافته با رنگ قرمز مشخص شده‌اند.)



شکل ۶- نتایج حاصل از خوشه‌بندی جواب‌های روش NSGA-II در فضای سه بعدی جبهه‌ی جواب‌های بهینه با استفاده از الگوریتم K-means

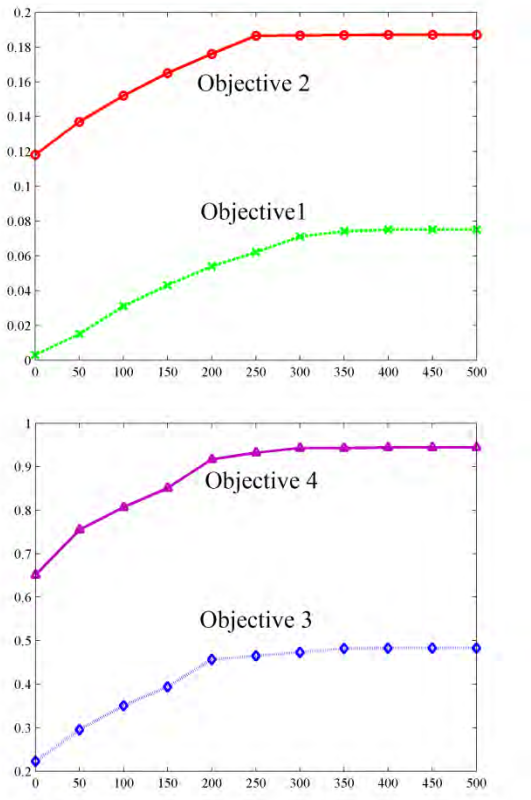


شکل ۷- نتایج حاصل از خوشه‌بندی جواب‌های NSGA-II در فضای سه بعدی جبهه‌ی جواب‌های بهینه با استفاده از الگوریتمFuzzy K-means

۵-۲-۲- تست همگرایی الگوریتم

همگرایی الگوریتم می‌تواند از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرد. مهم‌ترین عاملی که نشاندهنده‌ی همگرایی الگوریتم است ثابت ماندن مقادیر توابع هدف پس از تعداد تکرار مشخص است [۳]. در تست همگرایی این مدل، تغییر بیشینه‌ی مقادیر توابع هدف در هر ۵۰ تکرار مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۸ تغییر مقادیر هر یک از چهار تابع هدف با تکرارهای مختلف را نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل ۸ دیده می‌شود، مقادیر هر چهار تابع هدف با افزایش تکرارها بهبود پیدا می‌کنند. همچنین حدوداً پس از تکرار ۴۰۰ تغییر معنی‌داری در توابع هدف صورت نمی‌گیرد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت الگوریتم در تکرار ۴۰۰ به همگرایی لازم می‌رسد ولی در کل تحقیق به جهت حصول اطمینان به نتایج، تعداد تکرار ۵۰۰ به کار رفته است.



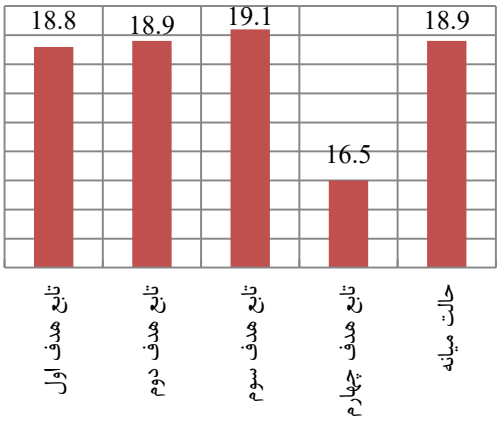
شکل ۸- تغییر مقادیر بیشینه‌ی هر یک از چهار تابع هدف در هر ۵۰ تکرار در الگوریتم NSGA-II

۵-۲-۳- بررسی میزان بهبود توابع هدف و مقایسه باوضع موجود

به منظور بررسی بهینه بودن جواب‌ها، مقادیر توابع هدف در هر یک از جواب‌هایی که در آن یکی از توابع هدف بیشینه بوده است با وضعیت موجود مقایسه شده و نتایج آن در جدول ۷ آورده شده است. همانطور که جدول ۷ نشان می‌دهد، توابع هدف در تمامی موارد درصدی از بهبود را نشان می‌دهند. گفتنی است در مسائلی مشابه این تحقیق که NP-hard می‌باشند و از الگوریتم‌های تکاملی در حل آن استفاده شده است، ادعایی مبنی بر رسیدن به بهینه‌ی کلی وجود ندارد بلکه جواب‌ها تنها به بهینه‌ی کلی نزدیک می‌شوند[۲۰،۳،۶]. در ادامه در شکل ۹ مقادیر توابع هدف پس از بهینه‌سازی و نیز مقدار جبران کسری سرانه در هر یک از جواب‌ها آمده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در تمامی جواب‌های ارائه شده درصد قابل قبولی از جبران کسری سرانه مشاهده می‌شود.

جدول ۷- مقادیر توابع هدف در وضعیت موجود و پس از بهینه‌سازی

توابع هدف	مقدار توابع هدف در وضعیت موجود	مقدار بیشینه‌ی توابع هدف پس از بهینه-سازی با NSGA-II	درصد بهبود مقدار
۱	۰/۱۳۸۷	۰/۱۸۷۷	۲۶
۲	۰/۰۵۶	۰/۰۷۸	۲۸
۳	۰/۳۱۰	۰/۴۸۵	۳۶
۴	۰/۸۹۵	۰/۹۳۶	۵



شکل ۹- درصد جبران کسری سرانه‌ها در حالت بیشینه‌ی هر یک از توابع هدف و حالت چینش تعادلی توابع هدف پس از بهینه‌سازی

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق با فرض وقوع تغییراتی در کاربری تعدادی از قطعات، چیدمان‌هایی بهینه برای سایر کاربری-ها با استفاده از الگوریتم NSGA-II پیشنهاد شدند. از آنجائیکه تصمیم‌گیرندگان ترجیح می‌دهند با معرفی اولویت‌های تصمیم‌گیری خود سناریوهای متناظر و محدودی را بررسی و ملاحظه نمایند، در ادامه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه جواب‌های به دست آمده خوشه‌بندی شدند.

در ادامه به ذکر خلاصه‌ی نتایجی که از این تحقیق حاصل شده‌اند پرداخته می‌شود:

- اصلاح چیدمان کاربری‌ها با وقوع تغییرات مقطعی امری بسیار پیچیده می‌باشد. به دلیل تنوع چیدمان‌های مختلف این موضوع تا کنون توجه زیادی را به خود جلب نکرده بود. با وجود الگوریتم‌های فرا ابتکاری چندهدفه و استفاده از مفاهیم جبهه‌ی جواب بده بستان می‌توان در حد قابل قبولی بر این پیچیدگی غلبه کرده و جواب‌های نسبتاً منطقی و مناسبی برای اصلاح چیدمان به دست آورد.
- نتایج حاصل در نهایت کمکی است برای تصمیم-گیری و نه جایگزینی برای آن. در حقیقت در بیشتر موارد تصمیم‌گیرندگان به دنبال تنوعی از جواب‌های محدود و مختلف از هم می‌باشند که این امر در این تحقیق میسر شده است.
- بسیاری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه بر اساس جمعیت اولیه‌ی کاملاً تصادفی عمل می‌کنند. ولی در بسیاری از موارد استفاده از این حالت موجب واگرا شدن الگوریتم و عدم دستیابی به نتایج مناسب می‌شود. در این تحقیق با اعمال شرط پیروی از وضعیت موجود، جمعیت اولیه دارای ساختار منطقی‌تری شد و این امر به همگرایی مناسب الگوریتم انجامید.
- در این تحقیق بخش کوچکی از دینامیک بودن امر تخصیص کاربری و مطالعه‌ی اثرات تغییر آن مورد بررسی قرار گرفت. مسلماً اجرای یک تحقیق کاملاً کاربردی و دقیق مستلزم کارهای متنوع و متعدد در ادامه می‌باشد که در آینده می‌تواند موجب بهبود عملکرد این مدل و مدل-های مشابه در این زمینه باشد.

مراجع

[1] Kivell, P. (1993). “Land and the City: Patterns and Processes of Urban Change”. New York: Routledge.

[2] Balling, R. J., Taber, J. T., Brown, M. R., & Day, K. (2000). “Multiobjective Urban Planning Using Genetic Algorithm”. Journal of Urban Planning and Development, 125(2), 86-99.

[3] Coello Coello, C. A., Lamount, G. B., & Veldhuizen, D. A. (2007). “Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems (2nd ed.)”. New York: Springer.

[4] Chang, N. B., Parvathinathanb, G., & Breedenc, J. B. (2008). “Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region”. Journal of Environmental Management, 87(1), 139-153.

[5] Farkas, A. (2009). “Site Selection of Urban Transportation Facilities: An Integrated GIS/MCDM Approach”. Paper presented at the 7th International Conference on Management, Enterprise and Benchmarking

[6] Deb, K. (2001). “Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms”. New York: John Wiley and Sons.

[7] Talei, M., Sharifi, A., Sliuzas, R., & Mesgari, M. (2006). “Evaluating the compatibility of multi-functional and intensive urban land uses”. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 9, 375-391.

[8] Engelbrecht, A. P. (2007). “Computational Intelligence: An Introduction”. England: John Wiley & Sons.

[9] Ligmann-Zielinska, A., Church, R. L., & Jankowski, P. (2008). “Spatial optimization as a generative technique for sustainable multiobjective land use allocation.” International Journal of Geographical Information Science, 22(6), 601-622.

[10] Cao, K., Batty, M., Huang, B., Liu, Y., Yu, L., & Chen, J. (2011). “Spatial multi-objective land use optimization: extensions to the non-dominated sorting genetic algorithm-II”. International Journal of Geographical Information Science, 1(21), 1-21.

[11] Feng, C. M., & Lin, J. J. (1999). “Using a genetic algorithm to generate alternative sketch maps for urban planning”. Computers Environment and Urban Systems, 23, 91-108.

[12] Poormohammadi, M.,2008, Urban land use planning, Tehran university publication (SAMT), Tehran, Iran

[13] Talbi, E. (2009). “Metaheuristics: from desgin to implementation”. New Jersey: John Wiley and Sons.

[14] Jin, Y. (2006). “Multi-objective machine learning.” Netherland: Springer.

[15] Koomen, E., Stillwell, J., Bakema, A., & Scholten, H. (2007). “Modelling Land-Use Change Progress and Applications.” Berlin: Springer.

[16] Malczewski, J. (2004). “GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview”. Progress in Planning, 62, 3-65.

[17] Shiffa, M., Jianhua, H., Feng, L., & Yan, Y. (2011). “Land-use spatial optimization based on PSO algorithm”. Geo-spatial Information Science 14, 54:61.

[18] Gan, G., Ma, C., & Wu, J. (2007). “Data Clustering Theory, Algorithms, and Applications”. Philadelphia, USA: American Statistical Association.

[19] Dorigo, M., & Blumb, C. (2005). “Ant colony optimization theory: A survey”. Theoretical Computer Science, 344, 243-278.

[20] Bui, L. T., & Alam, S. (2008). “Multi-Objective Optimization in computational intelligence, Theory and Practice”. New York: Information Science Reference.

ضمیمه‌ی ۱: درجات مناسبت مساحت به متر مربع برای کاربری‌های به کار رفته در تحقیق

کاربری/ مقدار مناسبت						
			کم تراکم	بالای ۲۵۰	بین ۲۵۰ و ۱۵۰	بین ۵۰ و ۱۵۰	کمتر از ۵۰
		مسکونی	تراکم متوسط	بالای ۲۵۰	بین ۱۵۰ و ۲۵۰	بین ۱۰۰ و ۱۵۰	کمتر از ۱۰۰
			تراکم بالا	بالای ۵۰۰	امکان پذیر نیست	امکان پذیر نیست	امکان پذیر نیست
کاربری سرویس دهنده	سرویس دهندگان با کالبد	تجاری	روزانه – هفتگی	بین ۶۵ و ۱۰۰	بین ۵۰ و ۶۵	کوچکتر از ۵۰	کوچکتر از ۵۱
			محله	بین ۲۵۰ و ۵۰۰	بین ۲۵۰ و ۱۰۰	کوچکتر از ۱۰۰	امکان پذیر نیست
			منطقه/ شهر	بالای ۵۰۰	بین ۲۵۰ و ۵۰۰	بین ۲۵۰ و ۱۰۰	کوچکتر از ۱۰۰
		آموزشی	مهد کودک	بین ۵۰۰ تا ۲۵۰۰	بین ۴۰۰ تا ۵۰۰	بین ۳۰۰ تا ۴۰۰	کوچکتر از ۳۰۰
			دبستان	بین ۲۵۰۰ و ۷۰۰۰	بین ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰	بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰	کوچکتر از ۱۰۰۰
			راهنمایی	بین ۲۵۰۰ و ۷۰۰۰	بین ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰	بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰	کوچکتر از ۱۰۰۰
			دبیرستان	بین ۷۰۰۰ و ۱۰۰۰۰	بین ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰	بین ۵۰۰۰ و ۴۰۰۰	کوچکتر از ۴۰۰۰
			هنرستان	بین ۷۰۰۰ و ۱۰۰۰۰	بین ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰	بین ۵۰۰۰ و ۴۰۰۰	کوچکتر از ۴۰۰۰
			دانشگاه/دانشکده	بین ۷۰۰۰ و ۱۰۰۰۰	بین ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰	بین ۵۰۰۰ و ۴۰۰۰	کوچکتر از ۴۰۰۰
		مذهبی	مقیاس محله	بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ متر	بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر	کوچکتر از ۲۰۰	کوچکتر از ۲۰۰
			مقیاس ناحیه	بین ۱۰۰۰و ۷۰۰	بین ۵۰۰ و ۷۰۰۰	بین ۴۰۰ و ۵۰۰	کوچکتر از ۴۰۰
			مقیاس منطقه	بین ۱۵۰۰و ۲۵۰۰	بین ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰	بین ۵۰۰ و ۱۰۰۰	کوچکتر از ۵۰۰
		بهداشتی	مقیاس محله	بین ۱۰۰۰ و ۷۵۰	بین ۷۵۰ و ۵۰۰	کمتر از ۵۰۰	کمتر از ۵۰۰
			مقیاس ناحیه	بین ۲۰۰۰و ۲۵۰۰	بین ۲۰۰۰ و ۱۵۰۰	بین ۱۵۰۰ تا ۱۰۰۰	کمتر از ۱۰۰۰
			مقیاس منطقه	بزرگتر از ۲۵۰۰۰	بین ۲۰۰۰۰ و ۲۵۰۰۰	کوچکتر از ۲۰۰۰۰	کوچکتر از ۲۰۰۰۱
		اداری	مقیاس ناحیه	بین ۷۵۰ تا ۱۰۰۰	بین ۷۵۰ تا ۵۰۰	کوچکتر از ۵۰۰	کوچکتر از ۵۰۱
			مقیاس منطقه	بین ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰	بین ۴۰۰۰ تا ۳۰۰۰	بین ۳۰۰۰ تا ۲۰۰۰	کمتر از ۲۰۰۰
		فرهنگی	مقیاس محله	بین ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰	بین ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰	بین ۱۰۰ تا ۱۲۰۰	کمتر از ۲۰۰۰
			مقیاس ناحیه	بین ۳۵۰۰ تا ۴۰۰۰	بین ۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰	بین ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰	کمتر از ۲۰۰۰
			مقیاس منطقه	بین ۴۵۰۰ تا ۵۰۰۰	بین ۴۰۰۰ تا ۴۵۰۰	بین ۳۵۰۰ تا ۴۰۰۰	کمتر از ۴۰۰۰
		ورزشی	مقیاس محله	بین ۴۵۰۰ تا ۵۰۰۰	بین ۴۰۰۰ تا ۴۵۰۰	بین ۳۵۰۰ تا ۴۰۰۰	کمتر از ۴۰۰۰
			مقیاس ناحیه	بین ۱۴۰۰۰ و ۱۵۰۰۰	بین ۱۴۰۰۰ و ۱۳۰۰۰	بین ۱۳۰۰۰ و ۱۲۰۰۰	کمتر از ۱۲۰۰۰
			مقیاس منطقه	بین ۲۵۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰	بین ۲۰۰۰۰ و ۲۵۰۰۰	بین ۱۵۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰	کمتر از ۱۵۰۰۰
		تأسیسات شهری	مقیاس محله	بین ۲۰۰ تا ۲۵۰	بین ۱۵۰ تا ۲۰۰	بین ۱۰۰ تا ۱۵۰	کمتر از ۱۰۰
			مقیاس ناحیه	بین ۴۵۰ تا ۵۰۰	بین ۴۰۰ تا ۴۵۰	بین ۳۵۰ تا ۴۰۰	کمتر از ۳۵۰
			مقیاس منطقه	بین ۱۷۵۰ تا ۲۰۰۰	بین ۱۵۰۰ تا ۱۷۵۰	بین ۱۲۵۰ تا ۱۵۰۰	کمتر از ۱۲۵۰
		صنعتی	مقیاس محله	بین ۸۰ تا ۱۰۰	بین ۶۰ تا ۸۰	کمتر از ۶۰	کمتر از ۶۰
			مقیاس ناحیه	بین ۷۵۰ تا ۱۰۰۰	بین ۵۰۰ و ۷۵۰	بین ۲۵۰ تا ۵۰۰	کمتر از ۵۰۰
			مقیاس منطقه	بین ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰	بین ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰	بین ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰	کمتر از ۱۵۰۰
	سرویس دهندگان بدون کالبد	پارک	مقیاس محله	بین ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰	بین ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰	بین ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰	کمتر از ۱۵۰۰
			مقیاس ناحیه	بین ۹۰۰۰ و ۱۰۰۰۰	بین ۸۰۰۰ و ۹۰۰۰	بین ۷۰۰۰ و ۸۰۰۰	کمتر از ۷۰۰۰
			مقیاس منطقه	بین ۲۴۰۰۰ و ۲۵۰۰۰	بین ۲۳۰۰۰ و ۲۴۰۰۰	بین ۲۲۰۰۰ و ۲۳۰۰۰	کمتر از ۲۲۰۰۰

ضمیمه‌ی ۲: شعاع نفوذ کاربری‌های مختلف در نظر گرفته شده در تحقیق (شیعه، ۱۳۸۳؛ سیف الدینی، ۱۳۸۸؛ پور محمدی، ۱۳۸۸؛ رضویان، ۱۳۸۱؛ زیاری، ۱۳۸۸)

کاربری ها			زیر کاربری ها	حد اکثر شعاع نفوذ
مسکونی			کم تراکم	۵۰
			تراکم متوسط	۱۰۰
			تراکم بالا	۴۵۰
کاربری سرویس دهنده	سرویس دهندگان با کالبد	تجاری	روزانه – هفتگی	۱۵۰
			محله	۴۰۰
			منطقه/ شهر (ناحیه)	۱۰۰۰
		آموزشی	مهد کودک	۵۰۰
			دبستان	۸۰۰
			راهنمایی	۱۲۰۰
			دبیرستان	۲۰۰۰
			هنرستان	۲۰۰۰
			دانشگاه/دانشکده	۲۰۰۰
		مذهبی	مقیاس محله	۱۵۰
			مقیاس ناحیه	۵۰۰
			مقیاس منطقه	۷۵۰
		بهداشتی	مقیاس محله	۲۵۰
			مقیاس ناحیه	۷۵۰
			مقیاس منطقه	۱۵۰۰
		اداری	مقیاس ناحیه	۵۰۰
			مقیاس منطقه	۷۵۰
		فرهنگی	مقیاس محله	۱۵۰
			مقیاس ناحیه	۵۰۰
			مقیاس منطقه	۷۵۰
		ورزشی	مقیاس محله	۲۵۰
			مقیاس ناحیه	۷۵۰
			مقیاس منطقه	۲۰۰۰
		تأسیسات شهری	مقیاس محله	۱۵۰
			مقیاس ناحیه	۵۰۰
			مقیاس منطقه	۱۰۰۰
		صنعتی	مقیاس محله	۱۵۰
			مقیاس ناحیه	۵۰۰
			مقیاس منطقه	۷۵۰
			صنایع سنگین	۱۵۰۰
	سرویس دهندگان بدون کالبد	پارک	مقیاس محله	۳۵۰
			مقیاس ناحیه	۷۵۰
			مقیاس منطقه	۱۰۰۰