

بهینه‌سازی چندهدفه تخصیص کاربری اراضی با استفاده از الگوریتم NSGA-II (مورد شناسی: منطقه ۱۰ شهر تبریز)

حسن محمودزاده* (دانشیار جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران)
زهرآ پیشه‌ور (کارشناسی ارشد مطالعات شهری و روستایی، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران)
مهدی هریسچیان (دانشجوی دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران)

چکیده

بهینه‌سازی تخصیص کاربری اراضی به‌عنوان یکی از بهترین مدل‌ها برای حفاظت زیست‌محیطی و هماهنگ‌کننده اهداف متضاد و مختلف اقتصادی، اجتماعی و غیره کاربری اراضی است. منطقه ۱۰ کلان‌شهر تبریز در زمینه تناسب و توزیع بهینه کاربری‌ها دارای نارسایی بوده است؛ از این رو این تحقیق با هدف بهینه‌سازی تخصیص کاربری اراضی منطقه ۱۰ کلان‌شهر تبریز انجام گرفته است. پژوهش حاضر با ماهیت توسعه‌ای - کاربردی و روش توصیفی - تحلیلی در زمینه تخصیص کاربری اراضی با هشت کاربری اصلی: مسکونی به تفکیک سه نوع طبقاتی، تجاری، آموزشی، درمانی، فرهنگی، فضای سبز، ورزشی، تجاری-مسکونی به تفکیک سه نوع طبقاتی به‌وسیله الگوریتم ژنتیک از نوع مرتب‌سازی نامغلوب نسخه دوم (NSGA-II) انجام گرفته است. بدین منظور از چهار تابع هدف حداکثر غیرخطی: بیشینه‌سازی FAR، بیشینه‌سازی سود اقتصادی، بیشینه‌سازی سازگاری، بیشینه‌سازی فشردگی استفاده شده است. هشت نوع کاربری اراضی اصلی و هشت محدودیت تعریف شد و برای ترکیب مقدار عددی تابع هدف بعد از نرمال‌سازی، روش مجموع وزن‌دار به‌کار گرفته شد. عملگرهای NSGA-II اصلاح شد و مدل پیشنهادی در زبان برنامه‌نویسی MATLAB توسعه داده شد. مدل با توجه به محدودیت‌های مدل‌سازی اجرا شده و برای به‌تصویر کشیدن خروجی مدل، روش کدگذاری ویژه راه‌حل‌ها که خروجی را با نرم‌افزار GIS مرتبط می‌کرد، تعریف شد. نتایج، نشان‌دهنده کارایی و اثربخشی مدل پیشنهادی و پتانسیل آن در پشتیبانی از فرایند برنامه‌ریزی شهری و تصمیم‌سازی است. این پتانسیل از طریق تولید آلترناتیوهای گوناگون کاربری و نمایش راه‌حل‌های بهینه به‌دست آمده است. در نهایت نتایج نشان داد که در صورت بهینه‌سازی کاربری اراضی در منطقه ۱۰ کلان‌شهر تبریز، مقدار FAR به اندازه ۱۳.۰۴ درصد و سود اقتصادی به اندازه ۲۱.۰۶ درصد و سازگاری - فشردگی بین کاربری‌ها به ترتیب ۲.۳ و ۴.۶ درصد افزایش می‌یابد.

تاریخ دریافت: ۷ آبان ۱۳۹۸

تاریخ پذیرش: ۱۰ خرداد ۱۳۹۹

صفحات: ۱۹۰-۱۶۳



کلید واژه‌ها:

بهینه‌سازی چندهدفه، تخصیص کاربری اراضی، الگوریتم NSGA-II، GIS، کلان‌شهر تبریز، منطقه ۱۰.

* نویسنده مسئول: دکتر حسن محمودزاده

پست الکترونیک: mahmoudzadeh@tabrizu.ac.ir

مقدمه

در برمی‌گیرد که گاهاً این اهداف با یکدیگر در تضاد هستند؛ در صورتی که این کار به درستی انجام نشود، زیان‌های جبران‌ناپذیری را به محیط زیست، اکولوژی و اقتصاد منطقه و حتی جوامع انسانی وارد خواهد کرد؛ از این رو استفاده از فن‌های دقیق محاسباتی در این کار اجتناب‌ناپذیر است. همچنین تصمیم‌گیری‌های مدیران این زمینه، از عوامل کمی و کیفی مختلف تأثیر می‌پذیرد که عموماً با یکدیگر در تعارض‌اند، به گونه‌ای که بهینه‌سازی یک عامل موجب تخریب عوامل دیگر می‌شود (معصومی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲). بررسی چنین موضوعاتی به صورت مستقیم بسیار مشکل است. برای شناخت تأثیر کاربری‌های مختلف باید از مدل‌های کامپیوتری استفاده کرد (Deb et al, 2005). (503 استفاده از ابزاری قدرتمند در زمینه تغییر کاربری، ارائه و تحلیل داده‌های مکانی کاربری اراضی همانند سامانه اطلاعات جغرافیایی GIS در جهت حل این گونه مسائل امروزه اجتناب‌ناپذیر است. از طرفی بسیاری از روش‌ها و توابع استاندارد امروزی GIS در حل بعضی از مسائل پیچیده مکانی ناتوان بوده و استفاده از الگوریتم‌های هوشمند از جمله الگوریتم‌های بهینه‌یابی چندهدفه می‌تواند در حل این گونه مسائل تصمیم‌گیری مکانی مفید باشد (Herzig, 2008:4). از میان روش‌های متنوع برنامه‌ریزی چندهدفه، روش‌های تکاملی به دلیل کمترین دخالت نظر کارشناسان در جواب نهایی، تولید چندین جواب بهینه به جای یک جواب، قابلیت بهینه‌سازی مسائل با بیش از دو تابع به راحتی و... توانایی خاصی در بهینه‌سازی مسائل چندهدفه دارند. روش‌های تکاملی روش‌هایی هستند که از تکامل طبیعی پیروی و جستجو را به سوی راه‌حل بهینه هدایت می‌کنند. خروجی الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه، خروجی از راه‌حل‌ها است. قابلیت پیدا کردن چندین راه‌حل بهینه در یک اجرا، الگوریتم‌های تکاملی را برای حل مسائل

گسترش جمعیت شهری و تداوم تغییرات آب و هوایی توسعه شهرهای پایدار را با چالش روبه‌رو می‌کند (Ward et al., 2017). دستیابی به اهداف پایداری محیط زیست جهانی نیاز به حفظ تنوع زیستی و همچنین تضمین ارائه خدمات اکوسیستم مانند آب شرب، غذا یا چوب دارد؛ در حالی که این اهداف به‌طور غیرقابل پیوندی با یکدیگر پیوند می‌خورند، اغلب به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته و از یکدیگر مدیریت می‌شوند (Liu et al., 2015). استفاده از منابع پایدار و استراتژی‌های مدیریتی که باعث تقویت چندمنظوره چشم‌انداز می‌شوند، نه تنها باعث ایجاد درک متقابل چندگانه بین خواسته‌های متعدد می‌شوند؛ بلکه همچنین راه‌حلی را نیز برای به حداقل رساندن مبادلات بین خود می‌یابند (Strauch et al, 2019). از طرف دیگر، کمبود فزاینده اراضی شهری و تقاضاهای رقابتی در مورد استفاده از آن، نیاز به راه‌حل‌های برنامه‌ریزی نوآورانه‌ای دارد که به‌طور مناسب مدیریت رواناب‌های رگباری، تولید انرژی، تفریح و سایر اولویت‌های اجتماعی را به تعادل برساند (Macro et al, 2018: 42)؛ یعنی باید از برنامه‌ریزی‌ای استفاده کرد که بتواند اهداف مختلف و متضاد شهری را در کنار یکدیگر دیده و تخصیص هر کاربری به مناسب‌ترین زمین را با ایجاد سازگاری متعادل بین آن‌ها به انجام رساند؛ از این رو امروزه برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری برای استفاده بهینه از زمین بسیار پیچیده و دشوار شده که دلیل آن، وجود اهداف مختلف و متضادی همچون افزایش بهره‌وری از زمین به همراه سازگاری بین کاربری‌ها و رسیدن به حداکثر منفعت اقتصادی و غیره است (Datta et al, 2007: 2). مسائل تصمیم‌گیری مکانی مانند تخصیص کاربری نه تنها نیازمند روش‌های فنی است؛ بلکه ابعاد اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و سیاسی را نیز

مالکیت مطرح شد؛ ولی با گسترش شهرنشینی ابعاد و محتوای این مفهوم، روزبه‌روز وسیع‌تر شد (Ziari, 2009: 2). کاربری اراضی شهری و چگونگی توزیع فضایی - مکانی آن‌ها، یکی از مهم‌ترین کارکردها به‌منظور استفاده بهینه از فضای شهری است. به‌طور کلی، تعریف کاربری زمین، مشخص‌کننده انواع گوناگون استفاده از زمین، تراکم هر کاربری بر روی هر قطعه زمین، ارتفاع، اندازه و سیمای ساختمان‌ها، چگونگی ترکیب و تداخل کاربری‌های تجاری، مسکونی، بهداشتی در هر محله است (رضویان، ۱۳۸۱: ۳). در تقسیم صنایع و کارکردهای شهری، تغییرات جدیدی اتفاق افتاده است. در عین حال، کاربری اراضی در جهان دستخوش تحولات شدیدی شده است و انواع کاربری اراضی که نشان‌دهنده منافع بخش‌های مختلف است، دارای تعارضات فضایی هستند (Amundson et al., 2015; Bryan et al., 2018; Serra et al., 2008) که با گسترش سریع اراضی شهری و تبدیل شدید اراضی زراعی نمایان‌تر می‌شوند (Chen et al., 2020). 1) همچنین گذار کاربری اراضی، منعکس‌کننده توسعه اقتصادی - اجتماعی است. در عین حال، مشکلات مختلف ناشی از فرایند توسعه اقتصادی و اجتماعی نیز می‌تواند از طریق گذار کاربری اراضی قابل حل باشد (Long & Qu, 2018: 111-120). گذار کاربری اراضی به تغییرات موقتی مورفولوژی کاربری اراضی که ناشی از تحولات اقتصادی - اجتماعی متناسب با مراحل توسعه اقتصادی - اجتماعی در یک دوره معین است، اشاره دارد (Ibid) و مورفولوژی کاربری اراضی به ساختاری اطلاق می‌شود که به وسیله انواع اصلی کاربری اراضی در یک منطقه خاص و یک دوره خاص شکل گرفته است (Long, 2012; Long & Qu, 2018). این ساختار دارای دو شکل فضایی و غیرفضایی است. مورفولوژی کاربری اراضی در یک نقطه معین، هم نتیجه گذار کاربری اراضی در دوره قبل و هم شروع آن

بهینه‌سازی چندهدفه مناسب می‌سازد. بهینه‌سازی تخصیص کاربری اراضی از راهکارهای مناسب برای حفاظت خاک و افزایش بازده اقتصادی است. مدل‌های بهینه‌سازی در برنامه‌ریزی کاربری اراضی باید انعطاف‌پذیر، توانا و کارآمد باشند؛ به‌ویژه مهم است که ابزارهای به‌کاررفته توانایی حل مسئله به‌صورت مکانی را داشته باشد، بدون اینکه نیازی به تبدیل راه‌حل بهینه به الگوی مکانی باشد. البته توانایی حل مسئله با چند هدف متضاد نیز می‌بایست وجود داشته باشد. استفاده از الگوریتم ژنتیک برای جست‌وجو و بهینه‌سازی، با شرایط و موارد ذکرشده مطابقت دارد و بستر مناسبی را برای تصمیم‌گیری منطقی و مستدل فراهم می‌کند (شایگان و همکاران، ۱۳۹۱: ۳). الگوریتم‌های ژنتیک در کنار سیستم اطلاعات مکانی یک ترکیب بالقوه قوی برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی بزرگ‌مقیاس و مکانی ارائه می‌کنند. الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب یکی از پرکاربردترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های موجود برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است که نخستین بار دب و همکاران، آن را پیشنهاد دادند (Deb et al., 197-182: 2002). مزایای عمده این روش سرعت بالا، وجود نخبه‌گرایی، عدم نیاز به جمعیت خارجی و سهولت نسبی پیاده‌سازی است (Deb et al., 2002: 182-197; Beheshtifar, 2014). از این‌رو هدف این تحقیق، تدوین مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای تخصیص کاربری اراضی مناسب به واحدهای مختلف اراضی کل منطقه ۱۰ کلان‌شهر تبریز با استفاده از الگوریتم تکاملی NSGA-II است.

مبانی نظری

اصطلاح و مفهوم کاربری اراضی و توزیع عادلانه منابع و خدمات شهری، ابتدا در غرب به‌منظور نظارت بیشتر دولت‌ها بر نحوه استفاده از اراضی و حفظ حقوق

طبیعی و انسانی را به یکدیگر متصل می‌کند و تأثیر مستقیمی بر تمام فعالیت‌های انسانی دارد. مدل‌های شبیه‌سازی کاربرد آتی زمین به اشکال گوناگون وجود دارند، اما بیشتر آن‌ها بر تعداد محدودی نظریات و روش‌ها قرار دارند؛ برای نمونه، نظریات اقتصادی اغلب برای توضیح الگوهای کاربرد زمین و پویایی آن‌ها به کار گرفته می‌شوند که این مدل‌ها و روش‌ها عبارت‌اند از: اصول اقتصادی، میان‌کنش فضایی، مدل سلول‌های خودکار و فنون بهینه‌سازی. زمین بنا به سه دلیل یک دارایی ویژه اقتصادی تلقی می‌شود. نخست: از آنجاکه عرضه زمین ثابت است، روابط عرضه و تقاضای ویژه‌ای بر آن حاکم است. دوم: هر قطعه از زمین (به‌همراه بافت یگانه خود در مفهوم کیفیت خاک، دسترسی به تسهیلات) مکان ثابتی دارد. سوم: کاربرد زمین در یک مکان معین بر پیرامون خود تأثیرگذار است. از اولین نظریات در این مورد می‌توان به نظریه ریکاردو و فون تانن اشاره کرد که نظریه‌شان اساس قیمت زمین و نظریات کاربرد زمین را شکل داده‌اند. گروه کلاسیک مدل‌های کاربرد زمین براساس نظریه مدل‌سازی میان‌کنش فضایی قرار دارند. میان‌کنش فضایی در متن اجتماعی-جغرافیایی جای دارد که به هرگونه جابه‌جایی در فضا در نتیجه فرایندهای انسانی، اشاره دارد. روش‌های CA برگرفته از علم ریاضیات که برای نسخه‌برداری فرایندهای پیچیده فضایی، براساس قوانین ساده تصمیم عمل می‌کنند. هر سلول یک وضعیت معین (کارکرد) را نشان می‌دهد که تأثیرپذیر از سوی سلول‌های محیط پیرامون است. درجه و سمت‌وسوی میان‌کنش بین کارکردها توسط قوانین تغییر تعریف شده‌است. یکی از رهیافت‌های مدل‌سازی فنون بهینه‌سازی است. با به‌کارگیری فنون بهینه‌سازی ریاضی چون برنامه‌ریزی خطی، وضعیت بهینه کاربرد زمین را با ارائه مجموعه‌ای از شرایط اولیه معیارها و متغیرهای تصمیم محاسبه می‌کند. ساده‌ترین کاربرد

در دوره بعدی است. گذار کاربری اراضی یک مورفولوژی ثابت یا نهایی کاربری اراضی نیست؛ بلکه یک روند تکاملی مداوم مورفولوژی کاربری اراضی است. گذار کاربری اراضی در دو مفهوم غالب و مغلوب گسترش می‌یابد (Ibid). مورفولوژی غالب به ساختار کاربری اراضی در یک منطقه خاص طی یک دوره خاص اشاره می‌کند و دارای ویژگی‌هایی مانند کمیت و الگوی فضایی انواع کاربری اراضی است. در حالی که مورفولوژی مغلوب، مورفولوژی ویژه‌ای است که به مورفولوژی غالب بستگی دارد؛ اما تنها با روش‌های تجزیه و تحلیل، آزمایش، نظارت و بررسی قابل‌مشاهده است و شامل ویژگی‌های کاربری اراضی در مورد جنبه‌های کیفی، حقوق مالکیت، حالت‌های مدیریتی، ورودی‌ها و خروجی‌ها است (Long, 2012).

برنامه‌ریزی کاربری اراضی علم تقسیم زمین و مکان برای کاربردها و مصارف مختلف زندگی است؛ به‌عبارتی دیگر، برنامه‌ریزی کاربری اراضی را می‌توان فرایند تخصیص کاربری‌های مختلف همانند کشاورزی، صنعتی، مسکونی و تفریحی، به واحد مشخصی از زمین در یک ناحیه تعریف کرد (Stewart et al, 2004: 2293-2313). تعیین مساحت موردنیاز (تقاضا) و تناسب زمین (عرضه) و در نظر گرفتن شرایط حاکم بر منطقه مورد مطالعه انجام می‌گیرد (کریمی، ۱۳۸۹). بسته به مقیاس مورد مطالعه و نوع منطقه، متغیرهای مختلفی وارد تصمیم‌گیری می‌شود. این متغیرها عبارت‌اند از: تناسب فیزیکی زمین، دسترسی، همسایگی، دشواری تغییر و محدودیت‌ها (علائق مقدم و همکاران، ۱۳۹۴: ۴۸). هدف از ارزیابی و تخصیص چندهدفه کاربری اراضی دستیابی به تخصیص بهینه کاربری و به‌حداکثر رساندن میزان تناسب بین آن‌ها است (سلمان‌ماهینی و همکاران، ۱۳۹۳: ۱). تخصیص کاربرد زمین، فرایندی پویا و پیچیده است که سیستم‌های

سالیان اخیر تحقیقات زیادی در عرصه داخلی و خارجی انجام گرفته است که در جدول ۱ به این تحقیقات اشاره می‌شود.

آن کمک به بهینه کردن یک هدف (مثل بیشینه کردن سود) برای یک گروه خاص از تصمیم‌سازان (مثل توسعه‌دهندگان) است (ابراهیم‌نیا و همکاران، ۱۳۸۸: ۹) که یکی از موارد بهینه‌سازی، بهینه‌سازی چندهدفه است. اغلب مسائل مربوط به بهینه‌سازی در دنیای واقعی، دارای ساختار چندهدفه هستند. در چنین شرایطی پیدا کردن جوابی که همه اهداف را بهینه کند، تقریباً ناممکن است و کوشش می‌شود مجموعه‌ای از جواب‌ها با بهینه‌سازی نسبی در همه اهداف یافت شود. به این پاسخ‌ها، جواب‌های متعادل یا متوازن‌کننده گفته می‌شود که تصمیم‌گیرنده می‌تواند برحسب شرایط مسئله یکی از آن‌ها را برگزیند (Deb et al., 2002: 184).

در دهه‌های اخیر رشد شهرنشینی و تراکم جمعیت فزاینده در مناطق شهری منجر به افزایش تقاضا برای منابع اراضی شهری شده است (Deng et al, 2008: 96-115) و این مورد باعث شده تعداد زیادی از اراضی زراعی با کیفیت بالا به ساخت‌های غیرکشاورزی اختصاص یابد (Long et al, 2007; Song et al, 2015). این مسئله رفته‌رفته موجب چالش‌های جدی برای حفاظت از اراضی کشاورزی، ایمنی تأمین مواد غذایی، مصرف شدید اراضی شهری و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی شده است (Deng et al, 2015; Huang et al, 2019). بدین سان باید با استفاده از تدابیر ویژه‌ای همچون تخصیص بهینه کاربری اراضی از هدررفت اراضی بارز کشاورزی و دیگر اراضی مهم زیست‌محیطی جلوگیری کرد.

پیشینه تحقیق

در رابطه با بهینه‌سازی چندهدفه، تخصیص کاربری اراضی با استفاده از الگوریتم NSGA-II، در طی

جدول ۱. پیشینه داخلی و خارجی پژوهش

نویسندگان (سال)	عنوان	یافته‌های پژوهش
تناسان (۱۳۹۴)	طراحی مدل مدیریت کاربری اراضی مبتنی بر الگوریتم NSGA-II با رویکرد مدیریت رواناب سطحی در بستر GIS	نتایج حاصل از مدل در چندین الگو کاربری بهینه پیشنهاد داده می‌شود که دارای ارزش کاربردی یکسانی هستند. با بررسی نتایج، مشخص شده الگوهای خروجی مدل ۱۵ تا ۲۲ درصد ضریب رواناب منطقه را کاهش داده و همچنین سطح منفعت اقتصادی منطقه، حدود ۵ تا ۱۵ درصد رشد داشته‌است که این امر نشان از تأثیر بسزای این الگوها در مدیریت سیلاب دارد.
کامیاب و همکاران (۱۳۹۵)	مقایسه تخصیص اکوسیستمی کاربری سرزمین با استفاده از الگوریتم ژنتیک و رویکرد تخصیص چندهدفه	نتایج نشان داد که در مقایسه با روش MOLA که تنها به تناسب سلولی زمین توجه دارد، تخصیص کاربری با الگوریتم ژنتیک اکوسیستمی منجر به بهبود قابل ملاحظه‌ای در شاخص‌های سیمای سرزمینی شده‌است. این نکته را می‌توان در بهبود چهار شاخص سیمای سرزمین شامل تعداد لکه، میانگین توپری، اندازه مؤثر شبکه و شاخص پیوستگی مشاهده کرد.
سدیدی و درواری (۱۳۹۶)	ارائه مدل توسعه یافته فرآیند کاربری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه در جهت مدل‌سازی تغییر بهینه کاربری اراضی	الگوهای کاربری پیشنهاد شده در این مدل می‌تواند سطح منفعت اقتصادی منطقه را در حدود ۴۸ درصد افزایش دهد؛ با این توضیح که تمامی الگوها تا حد امکان دارای سازگاری بالا و دشواری تغییر اندک هستند.
خیرخواه و همکاران (۱۳۹۸)	مقایسه الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی برای حل مسائل بهینه‌سازی کاربری اراضی حوزه‌های آبخیز	الگوریتم‌های تکاملی (مانند الگوریتم ژنتیک) زمانی که با مسائلی که دارای محدودیت‌های زیاد هستند مواجه می‌شوند، در مقایسه با تکنیک‌های کلاسیک بهینه‌سازی، ضعیف‌تر عمل می‌کنند.
لیو و همکاران ^۱ (۲۰۱۲)	یک روش بهینه‌سازی کلنی مورچگان چندهدفه (MACO) برای تخصیص بهینه کاربری اراضی در مناطق بزرگ	از الگوریتم کلونی مورچگان چندهدفه برای بهینه‌سازی چندهدفه کاربری اراضی در منطقه گواندوگ چین استفاده کرده و نتایج حاصل از این الگوریتم را با الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شبیه‌سازی تبرئید مقایسه کرده‌اند. نتیجه این تحقیق نشان داد که الگوریتم پیشنهادی بر پایه الگوریتم کلونی مورچگان سرعت همگرایی بالاتری نسبت به الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شبیه‌سازی تبرئید را دارد.
شایگان و همکاران ^۲ (۲۰۱۴)	رویکرد بهینه‌سازی فضایی چند هدفه برای تخصیص کاربری اراضی با استفاده از NSGA-II	الگوریتم NSGA-II در مقایسه با الگوریتم GoA-MOLA کارایی بیشتری دارد.
لی و پاروت ^۳ (۲۰۱۶)	الگوریتم ژنتیک بهبود یافته برای بهینه‌سازی فضایی چندهدفه و چندمکانی تخصیص کاربری اراضی	نتایج نشان داد که الگوریتم ژنتیک پیشرفته GA پیشنهادی از توانایی خوبی برخوردار است و می‌تواند هر سناریوی بهینه کاربری اراضی را مطابق با اهداف ترجیحی ذی‌نفعان ایجاد کند؛ بنابراین توانایی ارائه پشتیبانی فنی تعاملی را برای برنامه‌ریزی کاربری اراضی ایجاد می‌کند.
دوزی سرخابی و همکاران ^۴ (۲۰۱۶)	تأثیر محدودیت‌های کاربری اراضی در بهینه‌سازی طرح چندهدفه انرژی مزرعه بادی	یک الگوریتم تکاملی احتمالی (NSGA-II) مشکل بهینه‌سازی را حل می‌کند؛ در حالی که محدودیت‌های کاربری اراضی با عملگرهای جبرانی ایستا و پویا کنترل می‌شود.

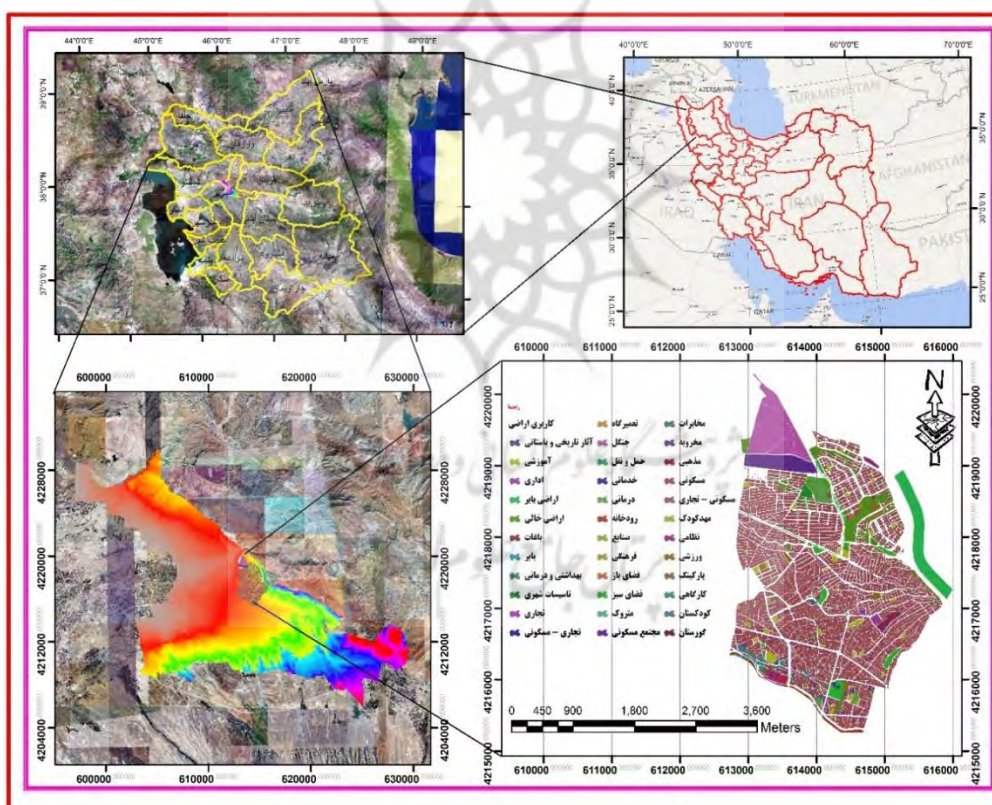
(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

- 1- Liu et al
- 2- Shaygan et al
- 3- Li & Parrott
- 4- Douzi Sorkhabi

منطقه مورد مطالعه

تبریز یکی از شهرهای بزرگ ایران و مرکز استان آذربایجان شرقی است. این شهر بزرگ‌ترین شهر منطقه شمال غرب کشور و قطب اداری، ارتباطی، بازرگانی، سیاسی، صنعتی، فرهنگی و نظامی این منطقه شناخته می‌شود. منطقه ۱۰ که جزو مناطق شمالی شهر است، به وسعت ۱۹۰۲/۲ هکتار تقریباً ۴/۳ درصد از کل پهنه شهر تبریز را دربر گرفته است. با توجه به موقعیت جغرافیایی آن در شمال شهر تبریز و دامنه‌های کوه عون بن علی و نیز در محل ورود رودخانه آجی چای به دشت تبریز ساختار توپوگرافی آن شامل دامنه‌های نسبتاً مرتفع و شیب‌داری است که

مورفولوژی کوهپایه‌ای و تناوب سیستم‌های آبراهه‌ای منشعب از کوهستان شمالی شهر و نیز دره رودخانه آجی چای باعث شکل‌گیری سطوح مختلف شیب در سطح آن شده است (شکل ۱) (مهندسین مشاور نقش محیط، ۱۳۹۱: ۳۸). این منطقه دربرگیرنده ۲۰۰۱۴۳ نفر جمعیت و مساحتی بالغ بر ۱۰۵۰ هکتار است. بدین واسطه تراکم ناخالص جمعیتی این منطقه معادل ۱۹۱ نفر در هکتار و تراکم خالص جمعیتی آن برابر با ۴۵۰ نفر در هکتار است. این منطقه شامل ۴۶۴۴۷ قطعه است که از این تعداد ۳۸۰۰۹ قطعه آن مسکونی است. همچنین وسعت منطقه حدود ۱۰۵۰ هکتار است (همان، ۱۷).

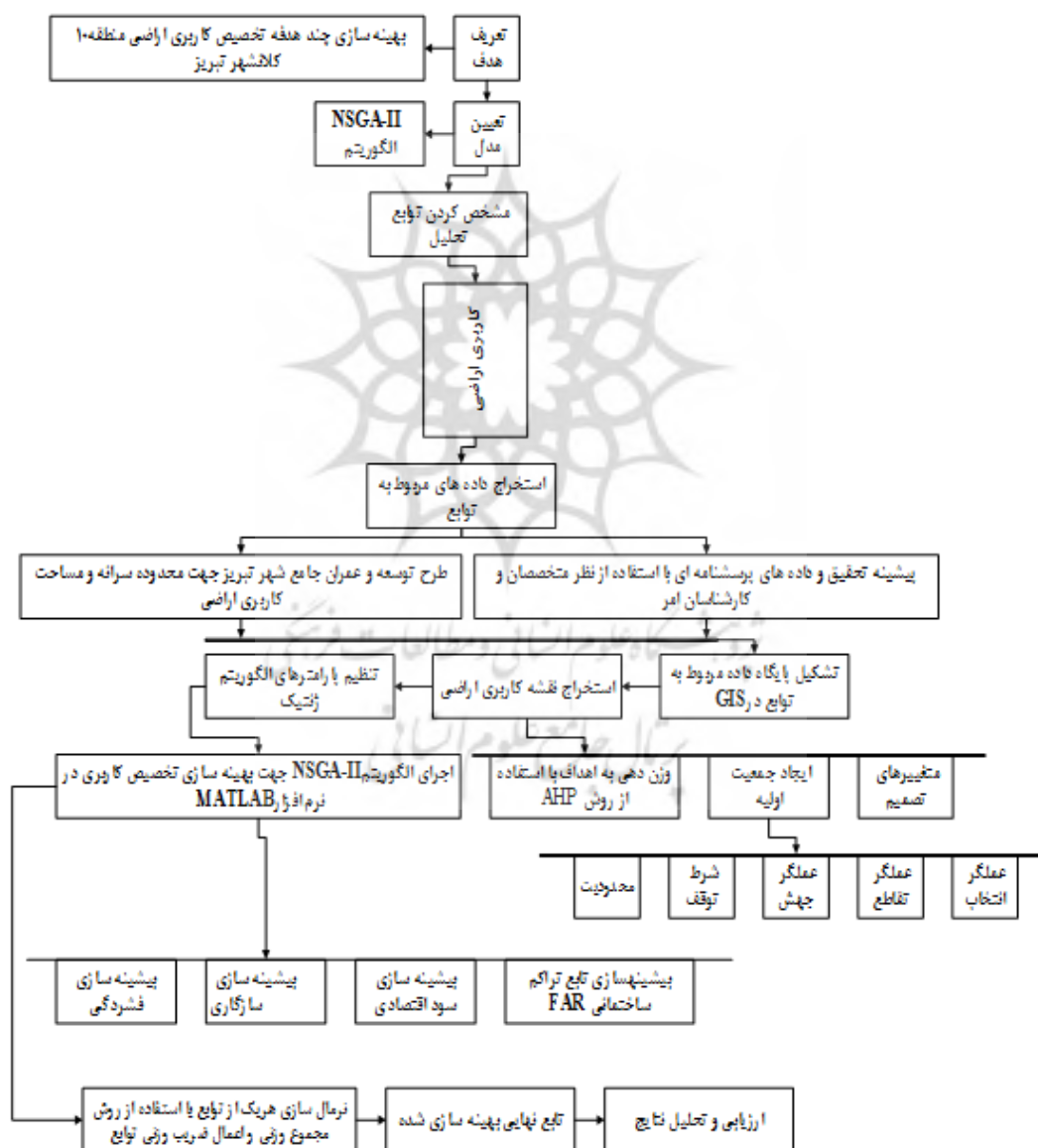


شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه
(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

مواد و روش‌ها

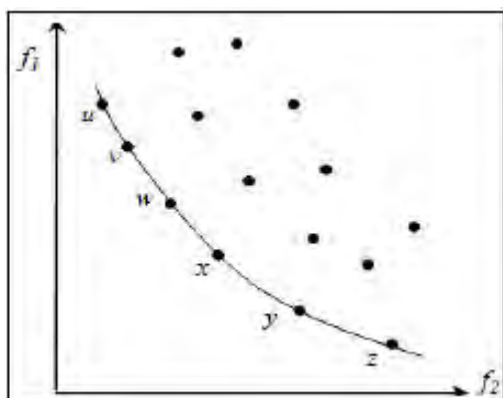
فضای سبز، ورزشی، اداری، مذهبی، نظامی، کارگاهی، حمل‌ونقل، آثار تاریخی)، داده‌های پرسشنامه‌ای با استفاده از نظر متخصصان امر (استادان، کارشناسان) و طرح توسعه و عمران (جامع) شهر تبریز برای استخراج محدوده، سرانه و مساحت هر یک از کاربری‌های اراضی منطقه، داده‌های موردنیاز جمع‌آوری شده و پایگاه داده مربوط به آن‌ها در محیط GIS تشکیل شد. مراحل انجام این تحقیق در شکل ۲ آورده شده است.

پژوهش حاضر از نظر روش، توصیفی-تحلیلی و دارای ماهیت توسعه‌ای-کاربردی است. اطلاعات موردنیاز با استفاده از منابع کتابخانه‌ای، اسنادی، الکترونیکی، بررسی‌ها و مشاهدات میدانی جمع‌آوری شد. در ادامه بعد از تعیین توابع هدف مورد استفاده در امر بهینه‌سازی براساس پیشینه مطالعاتی و نظر کارشناسان امر شامل کاربری اراضی (کاربری مسکونی، تجاری، تجاری-مسکونی، فرهنگی، درمانی، آموزشی،



شکل ۲. مراحل انجام پژوهش

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)



شکل ۳. نمودار کمینه‌سازی پارتو فرانت با دو تابع هدف (منبع: حسینی و زهرایی، ۱۳۹۳)

بهینه‌سازی چندهدفه تخصیص کاربری زمین

اغلب مسائل مربوط به بهینه‌سازی در دنیای واقعی، دارای ساختار چندهدفه هستند. در چنین شرایطی پیدا کردن جوابی که همه اهداف را بهینه کند؛ تقریباً ناممکن است و کوشش می‌شود مجموعه‌ای از جواب‌ها با بهینه‌سازی نسبی در همه اهداف یافت شود. به این پاسخ‌ها، جواب‌های متعادل یا متوازن‌کننده گفته می‌شود که تصمیم‌گیرنده می‌تواند برحسب شرایط مسئله یکی از آن‌ها را برگزیند. منظور یافتن جواب‌های بهینه پارتو^۱ است، جبهه جواب پارتو از مفاهیم پایه‌ای در مسائل چندهدفه است (Deb et al., 2001: 184)

شکل ۳ پاسخ‌های یک مسئله دو هدفه از نوع حداقل‌سازی را نشان می‌دهد. پاسخ بهینه برای این مسئله پاسخی است که در هر یک از اهداف از بقیه جواب‌ها بدتر نباشد و حداقل در یکی از اهداف بهتر از سایر جواب‌ها باشد؛ یا به عبارت دیگر، پاسخ مسئله پاسخی است که در مقایسه با هیچ جواب دیگری در فضای مسئله پست^۲ نباشد. چنین جواب بهینه‌ای، جواب بهینه پارتو نامیده می‌شود. هر چند روش‌های مختلفی برای حل مسائل چندهدفه پیشنهاد شده است، هدف همه این روش‌ها، یافتن مجموعه بهینه پارتو است (حسینی و زهرایی، ۱۳۹۳: ۱۷۴).

فرم کلی توابع چندهدفه به صورت زیر است:

$$\min (\max) f_m(x) \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$m=1,2,\dots,M;$$

$$\text{Subject to } g_j(x) \geq 0; \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$j=1,2,\dots,J;$$

$$h_k(x)=0; K=1,2,\dots,K.$$

$$x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)}, i=1,2,\dots,n.$$

یک جواب x برداری از n متغیر تصمیم است:

$$X=[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T \quad \text{رابطه (۳)}$$

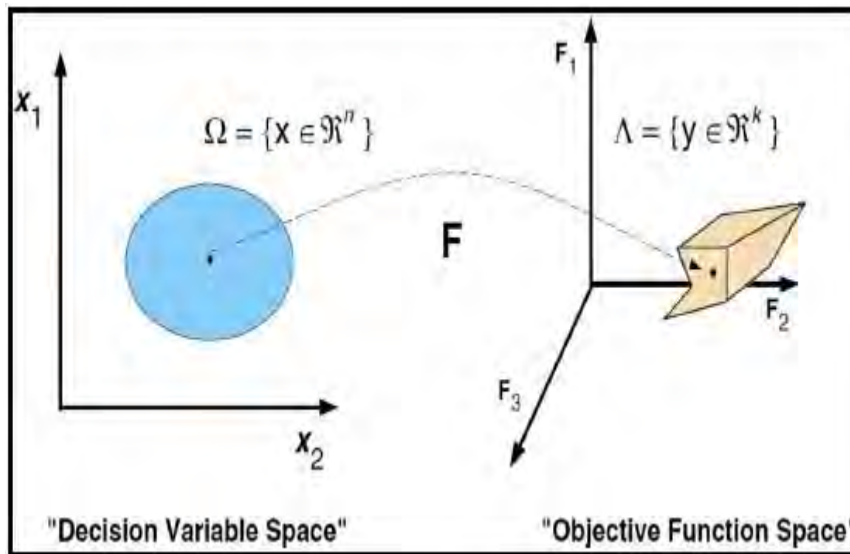
هر متغیر تصمیم، محدود به گرفتن مقداری بین حد پایینی $x_i^{(L)}$ و $x_i^{(U)}$ است. این حدود، فضای متغیر تصمیم را شکل می‌دهند. همچنین f برداری از m تابع هدف است:

$$f(x)=[f_1(x) \ f_2(x) \ \dots \ f_m(x)]^T \quad \text{رابطه (۴)}$$

$g_j(x)$ و $h_k(x)$ توابع محدودیت‌اند، J تعداد محدودیت نامعادله و k تعداد محدودیت معادله است. نداشت بین فضای متغیر تصمیم^۳ و فضای هدف^۴ در شکل ۴ نمایش داده شده است.

3-Decision space
4-Object space

1-Pareto optimal solutions
2-Dominat



شکل ۴. نمایش فضای متغیر تصمیم و فضای هدف

(منبع: Coello et al, 2002)

الگوریتم ژنتیک

ممکن است باعث بهتر شدن نسل بعدی شوند. الگوریتم فراابتکاری ژنتیک نیز با استفاده از این ایده اقدام به حل مسائل می‌کند (Sheta et al, 2006: 71). در اجرای یک الگوریتم ژنتیک باید مراحل سه‌گانه زیر انجام شود.

۱) به‌طور تصادفی جمعیتی از کروموزوم‌ها با طول ثابت تولید شود.

۲) به‌طور تکراری بر روی جمعیت اعمال زیر انجام شود تا اینکه شرط خاتمه فرایند حاصل شود.

I. میزان برازندگی^۳ هر کروموزوم در جمعیت محاسبه شود.

II. با استفاده از فرایندهای زیر جمعیت جدید ایجاد شود. این فرایندها بر روی یک یا دو کروموزوم از جمعیت حاضر که به‌طور تصادفی متناسب با میزان برازندگی انتخاب می‌شوند، عمل می‌کنند.

A. جمعیت حاضر عیناً به نسل بعدی منتقل می‌شوند (تکثیر^۴)

B. با استفاده از ترکیب، از دو کروموزوم انتخاب‌شده

اصول اولیه الگوریتم ژنتیک در سال ۱۹۶۳ توسط هاللند و همکارانش ارائه شد. آنان برای مدل‌سازی سیستم‌های مصنوعی به فرایند سازگاری در سیستم‌های طبیعی روی آوردند. این تحقیقات باعث به‌وجود آمدن الگوریتم ژنتیک شد. در سال ۱۹۷۵ هاللند به مبانی ریاضی الگوریتم ژنتیک در کتاب مشهور خود پرداخت (Holland, 1975) و امروزه به‌طور گسترده در حل مسائل بهینه‌سازی و فرایندهای یادگیری به‌کار می‌رود (Sheta et al, 2006: 71). دو مفهوم مهم در این الگوریتم، کروموزوم^۱ و ژن^۲ است که به رمز درآمده یا کدشده یک جواب یا قسمتی از یک جواب را کروموزوم و عناصر تشکیل‌دهنده یک کروموزوم را ژن می‌گویند که معمولاً عدد یا کلمه یا حتی دستورات برنامه‌نویسی هستند (Beady et al, 1993)؛ به‌طور کلی در طبیعت از ترکیب کروموزوم‌های مناسب نسل‌های بهتری پدید می‌آیند. در این بین گاهی جهش‌هایی نیز در کروموزوم‌ها رخ می‌دهد که

3- Fitness
4- Reproduction

1- Chromosome
2- Gene

بحث و یافته‌ها

در این پژوهش مراحل زیر طی شده است:

تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک

-متغیرهای تصمیم

قبل از شروع الگوریتم، انواع کاربری‌ها باید به شکل کروموزوم کدگذاری شوند. کروموزوم شبکه‌ای است که هر بخش از آن ژن نامیده می‌شود. هر ژن نشانگر یک واحد است و نوع کاربری توسط اعداد خاص مشخص می‌شوند. در این پژوهش، هر سلول یک ژن است و مقدار عددی هر کد یک نوع کاربری است (جدول ۲).

دو کروموزوم دیگر تولید کرده به نسل بعدی انتقال داده شوند.

C. با استفاده از جهش کروموزوم‌های جدیدی تولید کرده و به نسل بعدی انتقال داده شوند.

۳) بهترین کروموزوم در هر نسل - یعنی کروموزومی که میزان برازندگی بالاتری دارد - نتیجه اجرای الگوریتم تا آن نسل است (تناسان، ۱۳۹۴: ۳۱-۳۲).

جدول ۲. کدگذاری کاربری‌ها

کد	نوع کاربری اراضی	سطوح کاربری اراضی
۱	مسکونی (با چگالی دو طبقه)	مقیاس محلی
۲	مسکونی (با چگالی سه طبقه)	
۳	مسکونی (با چگالی چهار طبقه)	
۴	تجاری	
۵	درمانی	
۶	آموزشی	
۷	فضای سبز	
۸	فرهنگی	
۹	ورزشی	
۱۰	تجاری-مسکونی (با چگالی دو طبقه)	
۱۱	تجاری-مسکونی (با چگالی سه طبقه)	مقیاس شهری
۱۲	تجاری-مسکونی (با چگالی چهار طبقه)	
۱۳	اداری	
۱۴	مذهبی	
۱۵	نظامی	
۱۶	کارگاهی	
۱۷	حمل و نقل	
۱۸	آثار تاریخی	

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

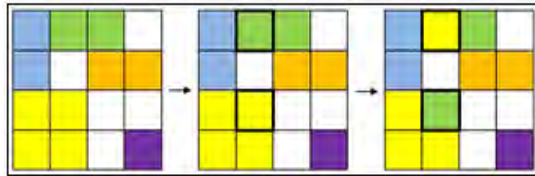
ایجاد جمعیت اولیه

بعد از تعیین روش کدگذاری کروموزوم‌ها، جمعیت اولیه که همان راه حل تصادفی است باید تولید شود. این مرحله نقش مهمی در کارایی الگوریتم و کیفیت راه حل‌ها دارد؛ بنابراین، ۱۰۰ راه حل تصادفی به عنوان راه حل اولیه (والدین) تولید می‌شود. برای تولید

جمعیت اولیه، یک کد برای هر نوع کاربری تعیین می‌شود و جمعیت اولیه به صورت تصادفی تولید می‌شود.

روش کدگذاری بدین معناست که برای هر سلول یک نوع کد کاربری انتخاب می‌شود (عدد صحیح بین ۱ تا ۱۲) و به آن اختصاص داده می‌شود. باید در نظر داشت

بعد از اجرای عملگر تقاطع، مقدار عددی تابع هدف ترکیب شده برای هر فرزند محاسبه می‌شود. سپس راه حل مناسب‌تر به مرحله جهش می‌رود (شکل ۵) که شبه‌کد^۱ مربوط به این تابع هدف در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۵. عملگر تقاطع
(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

پ) عملگر جهش

جابه‌جایی ارزش هر ژن در راه حل به صورت رندم جهش نامیده می‌شود. جهش نقش مهمی در همگرایی و عملکرد بهتر NSGA-II دارد. در این پژوهش یک جهش مبتنی بر patch مدنظر قرار گرفته است. جهش مبتنی بر patch که به نام جهش MPC خوانده می‌شود، به صورت مراحل ذیل اجرا می‌شود.

- ۱- تعیین پنجره جهش (در این مطالعه، یک مربع‌شکلی که شامل ۹ سلول است، مدنظر قرار گرفته است)
 - ۲- تعیین پنجره جهش نوع کاربری (تجاری، مسکونی و غیره)
 - ۳- تعیین موقعیت پنجره جهش به صورت تصادفی با تعیین یک عدد به صورت تصادفی بین ۱ و مجموع تعداد قطعه‌ها، به عنوان مرکز پنجره جهش.
 - ۴- تغییر نوع کاربری راه حل برطبق پنجره جهش نوع کاربری.
- چون ممکن است که مشکلات برطرف نشوند، یک عملگر جهش دیگر نیز به عملگر جهش اضافه می‌شود.

که کاربری‌های مقیاس شهری تخصیص داده نشود و موقعیت کنونی آن‌ها حفظ شود؛ بنابراین، کدهای بالاتر از ۱۲ به سلول‌ها تخصیص نمی‌یابد. در این تحقیق کوروموزوم تعریف شده به وسیله داتا و همکاران (۲۰۰۶) مورد استفاده قرار گرفت. نمایش ریاضی کوروموزوم تعریف شده به صورت رابطه ۵ است:

$$Ch = [e_{ij}^u] R_u \cdot C_u \quad \text{رابطه (۵)}$$

e_{ij}^u کلاس کاربری e که به واحد (i, j) اختصاص داده شده، R_u تعداد کل سطرها و C_u تعداد کل ستون‌هاست. با توجه به تعریف مذکور که در شکل ۵ نشان داده شده است، گستره منطقه مورد مطالعه به صورت ماتریس در نظر گرفته شده است؛ به گونه‌ای که مکان هر واحد با اندیس (i, j) و مقدار هر واحد نیز بیانگر کاربری اراضی آن است.

الف) عملگر انتخاب

در تعیین والدین برای اجرای عملگرهای تقاطع و جهش، تابع برازش (fitness) محاسبه می‌شود. سپس، راه حل‌ها براساس ارزش تابع برازش و به حداکثرسانی اهداف مرتب می‌شود؛ هرچه مقدار عددی تابع برازش بیشتر، راه حل بهتر و والدین انتخاب می‌شوند.

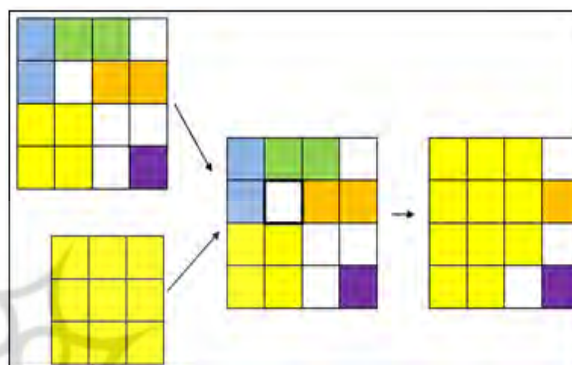
ب) عملگر تقاطع

عملگرهای متداول تقاطع مانند روش تقاطعی تک‌نقطه‌ای برای مشکل بهینه‌سازی کاربری مناسب نیستند، چون عملگرهای معمولی راه‌حلهایی تولید نمی‌کنند که کیفیت فشرده‌گی قابل قبولی داشته باشند؛ بنابراین در این مطالعه این عملگر به صورت زیر اصلاح شده است:

- ۱- تولید دو عدد بین ۱ و عدد سلول در منطقه مورد مطالعه به عنوان نقطه تقاطع.
- ۲- بررسی نقطه تقاطع نوع کاربری در راه حل تولید شده
- ۳- اگر مقدار عددی سلول مساوی نقطه تقاطع نبود، مقدار عددی را با هم باید جابه‌جا کرد.

حداکثر ارتفاع ساختمان‌ها برای مناطق برطبق مقررات شهری و عرض متوسط خیابان تعیین می‌شود. در ایران، این میزان توسط منطقه‌بندی تراکم و طبقات مشخص می‌شود که در نقشه دارای جزئیات شهرها و با تأیید شورای شهر به نمایش درمی‌آید.

در این عملگر، در ابتدا برطرف‌شدن هر محدودیت بررسی خواهد شد و سپس اگر موقعیت هر نوع کاربری در گستره محدودی قرار نداشته‌باشد، عملگر به صورت تصادفی یک موقعیت انتخاب می‌کند و نوع کاربری موردنیاز را به آن تخصیص می‌دهد تا راه‌حل را در جهت عملی‌شدن به پیش ببرد (شکل ۶) که شبه‌کد مربوط به این پارامتر هدف در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۶. عملگر جهش

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

به دلیل اینکه کاربری‌های مسکونی، تجاری، درمانی، آموزشی، فضای سبز، فرهنگی و ورزشی، نیازهای اساسی اراضی در سطح منطقه هستند، این ۷ نوع کاربری در منطقه مورد مطالعه مدنظر قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، کاربری مختلط قابل قبول در این سطح، مسکونی - تجاری است؛ در ضمن، کاربری مسکونی به تراکم پایین، متوسط و بالا تقسیم می‌شود (با در نظر گرفتن ارتفاع و تعداد طبقات مجاز).

از آنجایی که موقعیت کاربری‌ها در مقیاس شهر با توجه به سیاست‌های دولت تعیین می‌شود، این نوع کاربری‌ها نباید در طول زمان تغییر کند؛ بنابراین، اراضی در مقیاس شهر که در منطقه مطالعاتی قرار گرفته‌اند، در فرایند بهینه‌سازی حال و آینده ثابت مدنظر گرفته می‌شوند.

جدول ۳. شبه‌کد (pseudocode) مربوط به عملگرهای انتخاب، تقاطع و جهش

الگوریتم ۱: روش Hypercube مبتنی بر الگوریتم ژنتیک	الگوریتم ۲: تعداد همسایگان مورد محاسبه هر راه حل در Hypercubes
<p>P_t: Population of generation t</p> <p>P_{t+1}: Population of generation $t + 1$</p> <p>Ch_{t+1}: Child Solutions</p> <p>A_{t+1}: Collection of population and child solutions</p> <p>$Fr[]$: All Fronts of A_{t+1}</p> <p>S_{t+1}: All populations from front 1 to front l</p> <p>Fr_L: Last front of S_{t+1}</p> <p>Input: P_t</p> <p>Output: P_{t+1}</p> <p>1: $Ch_{t+1} = \text{Crossover} + \text{Mutation}(P_t)$</p> <p>2: $A_{t+1} = P_t + Ch_{t+1}$</p> <p>3: $A_{t+1} = \text{Calculate_neighbor_count}(A_{t+1})$</p> <p>4: $Fr[] = \text{Non_dominated_sort}(A_{t+1})$</p> <p>5: $S_{t+1} = \emptyset, Fr_L = \emptyset$</p> <p>6: Repeat</p> <p>7: $S_{t+1} = S_{t+1} \cup Fr_i, \quad i = i + 1$</p> <p>8: Until $S_{t+1} > N$</p> <p>9: if ($S_{t+1} = N$) then $P_{t+1} = S_{t+1}, \quad \text{break};$</p> <p>10: else</p> <p>11: $P_{t+1} \cup_{j=1}^{i-1} Fr_j$</p> <p>12: $Fr_L = Fr_i$</p> <p>13: Number of points Remains in $Fr_L: K = N - P_{t+1}$</p> <p>14: Remained Solutions From: $R_L = \text{RDH}(Fr_L, K)$</p> <p>15: $P_{t+1} = P_{t+1} \cup R_L$</p> <p>16: End if</p>	<p>$A_{t+1}[i].HC$: Attribute Containing Hypercube of solution</p> <p>$A_{t+1}[i].N$: Solution Attribute containing the number of neighbors</p> <p>Input: A_{t+1}</p> <p>Output: A_{t+1}</p> <p>1: for $i = 1$ to A_{t+1}</p> <p>2: Find Hypercube of $A_{t+1}[i]$ and assign to: $A_{t+1}[i].HC$</p> <p>3: end for</p> <p>4: for $i = 1$ to A_{t+1}</p> <p>5: Finding the number of neighbors for $A_{t+1}[i]$ in the Hypercube containing $A_{t+1}[i]$ and assign it to $A_{t+1}[i].N$</p> <p>6: end for</p>
	<p>الگوریتم ۳: حذف تراکم (RDH) Hypercubes</p> <p>C: Candidate Solutions for Elimination</p> <p>Input: Fr_L, K</p> <p>Output: R_L</p> <p>1: $C = \emptyset$</p> <p>2: for $i = 1$ to $Fr_L - K$</p> <p>3: Select a Solution to Remove: $S = \text{Tournament_Selection}(Fr_L)$</p> <p>4: foreach (Neighbor of $S: S_n$)</p> <p>5: $S_n.N = S_n.N - 1$</p> <p>6: end foreach</p> <p>7: $C = C \cup S$</p> <p>8: end for</p> <p>9: $R_L = Fr_L - C$</p>

(منبع: Masoumi et al, 2016: 12)

قرار داشته‌باشد. این محدودیت را می‌توان با شرایط زیر بیان کرد:

$$P_k^{\min} \propto P_k \propto P_k^{\max} \quad (۶) \quad \text{رابطه (۶)}$$

در محدوده بیان شده، P_k^{\min} ، حداقل مساحت موردنیاز برای کاربری نوع k و P_k^{\max} ، حداکثر مساحت موردنیاز برای کاربری نوع k ، P_k مساحت موردنیاز برای کاربری نوع k است.

(ت) شرط توقف

شرط توقف براساس استفاده از محدودیت دفعات اجرای الگوریتم در نظر گرفته شده‌است و الگوریتم برای ۱۲۰۰ بار تکرار برنامه‌نویسی شده‌است.

(ج) محدودیت

سرانه تقاضا، میزان موردنیاز برای هر نوع کاربری است که به‌عنوان محدودیت در این مطالعه محسوب می‌شود. این مقدار می‌تواند در محدوده حداقل و حداکثر که توسط برنامه‌ریزان شهری تعیین می‌شود،

تقاضای اراضی برای هشت کاربری اساسی برطبق سرانه و رشد جمعیتی آینده از طرح توسعه و عمران (جامع) شهر تبریز محاسبه شده است (جدول ۴).

جدول ۴. تقاضای اراضی برای کاربری‌ها

کاربری اراضی	مینیمم سرانه (متر)	ماکزیمم سرانه (متر)	مینیمم مساحت (مترمربع)	ماکزیمم مساحت (مترمربع)
مسکونی	۲۲.۲۰	۳۲.۹۱	۴۴۴۳۰۶۷	۶۵۸۶۰۲۵
تجاری	۱.۳۱	۲.۹۸	۲۶۲۴۲۷	۵۹۸۱۳۲
آموزشی	۱.۰۲	۲.۰۱	۲۰۳۳۱۴	۴۰۲۵۹۳
درمانی	۰.۵۷	۱.۷۸	۱۱۳۵۴۲	۳۵۶۷۱۲
فضای سبز	۰.۸۸	۱.۸۳	۱۷۶۱۱۴	۳۶۵۸۴۱
فرهنگی	۰.۰۶	۰.۲۱	۱۱۳۸۷	۴۱۲۶۸
ورزشی	۰.۳۰	۰.۴۵	۶۰۸۵۴	۸۹۶۲۵
تجاری=مسکونی	۰.۱۴	۰.۱۹	۲۸۴۱۰	۳۹۲۶۵

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

اجرای الگوریتم NSGA-II

برای بهینه‌سازی تخصیص کاربری از طریق NSGA-II، براساس عملگرهای ذکر شده و روش کدگذاری جمعیت اولیه، یک برنامه در MATLAB توسعه داده شد. مدل برای ۳۰۰ و ۸۰۰ و ۱۲۰۰ تکرار، ۱۰۰ جمعیت اولیه، ۴۰ جهش و ۱۰۰ تقاطع نقطه‌ای اجرا شد. زمان اجرای مدل برای پارامترهایی که در بالا ذکر شد و ۵ هدفی که تعریف شد، در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵. زمان اجرای برنامه برای تکرارهای ۳۰۰، ۸۰۰ و ۱۲۰۰

تعداد تکرارها	زمان اجرای برنامه
۳۰۰	۱۸ ساعت، ۲۵ دقیقه و ۵ ثانیه
۸۰۰	۲۵ ساعت، ۱۰ دقیقه و ۵۹ ثانیه
۱۲۰۰	۲۹ ساعت، ۵۳ دقیقه و ۳۶ ثانیه

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

- نتایج حاصل از اجرای الگوریتم بهینه‌سازی

الف) بهینه‌سازی تابع تراکم ساختمانی FAR

FAR نسبت زیربنای سرپوشیده کل طبقات و ساختمان‌های موجود در یک قطعه زمین (زیربنای ناخالص)، به مساحت آن قطعه زمین است؛ به طور کلی، هرچه FAR بیشتر باشد، به میزان کمتری از تغییر

کاربری نیاز است. در حقیقت FAR نشان‌دهنده تراکم توسعه شهری است. به منظور محاسبه تابع تراکم ساختمانی (FAR)، لایه‌های دوازده‌گانه کاربری اراضی که در جدول ۲ به آن‌ها اشاره شده است، با تفکیک مکانی ۳۰ متر ایجاد شده و داده رستری منطقه را به محدوده ۹۰۰ مترمربع برای هر سلول، resample کرده، سپس با هم‌پوشانی لایه موردنظر با لایه‌های مسکونی تفکیک شده به سه گروه طبقاتی، تعداد طبقات اختصاص یافته به هر سلول شمارش شد. بعد از تشکیل بانک اطلاعاتی، داده‌ها در فرمت ascii تهیه شده و وارد نرم‌افزار MATLAB شده و خروجی حاصل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

تابع هدف FAR به صورت رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

رابطه (۷)

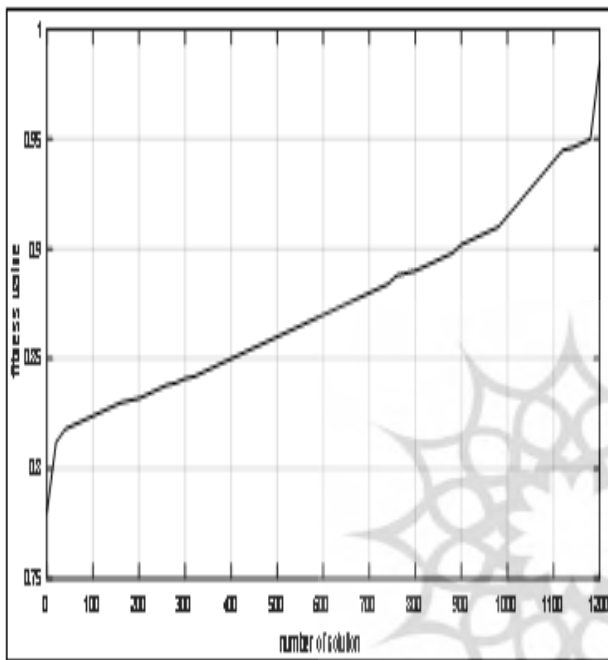
$$\max f_1 \cong \frac{\sum_{i=1}^n F_i * A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

$$i \cong 1, 2, \dots, n$$

که در آن F برابر با تعداد طبقاتی که به هر سلول

۱۳/۰۴ درصد بهبود می‌یابد. مقدار ماکزیمم از تابع نرمالیزه شده ۰/۹۸۶۸۰۳ حاصل شده است. لازم به ذکر است، جواب نمایش داده شده، بهترین جواب برای تابع مربوط در پارتو فرانت بدون احتساب نتایج دیگر توابع بوده است.

اختصاص یافته، A مساحت هر سلول و i تعداد سلول‌هایی که در منطقه مورد مطالعه قرار دارد. اشکال ۷ و ۸ روند بهبود بهترین جواب‌های یافت شده توسط الگوریتم برای تابع FAR را در هر تکرار نشان می‌دهد. در صورت بهینه‌سازی تابع، مقدار آن به اندازه



اشکال ۷ و ۸. به ترتیب بهترین جواب‌های تابع FAR در هر تکرار و نقشه طبقه‌بندی شده بهترین جواب تابع بیشینه تراکم ساختمانی (منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

است:

$$\max f_2 \equiv \left| \prod_{i=1}^n \varepsilon_i * x_i^{commercial} \right. \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$i \equiv 1, 2, \dots, n$$

که در آن i تعداد سلول‌هایی که در منطقه مورد مطالعه قرار دارد، β_i مساحت قطعه i است که کاربری تجاری دارد.

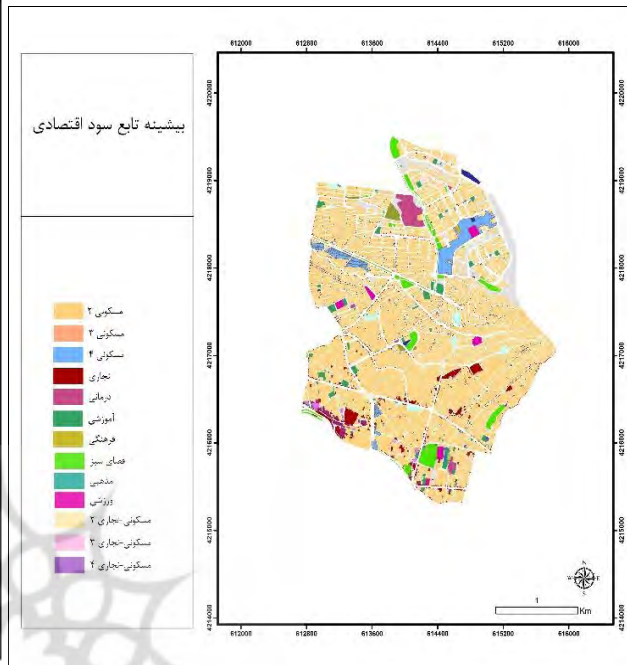
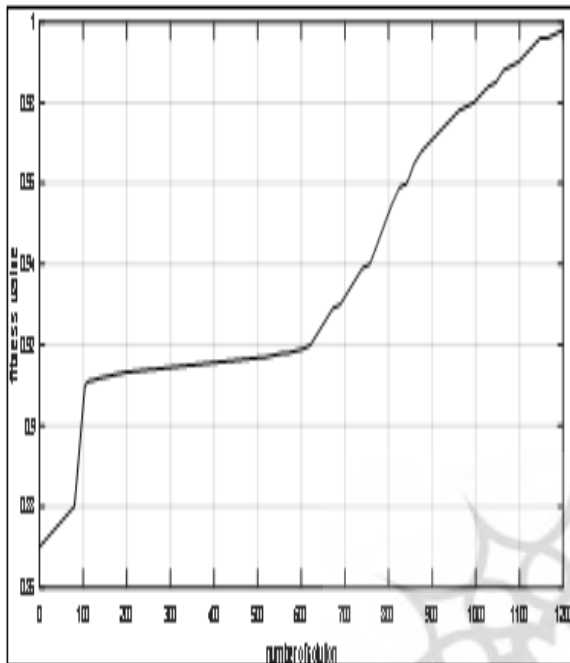
$x_i^{commercial}$ ؛ نمایشگر این است که کاربری سلول i تجاری است یا نه. اشکال ۹ و ۱۰ روند بهبود بهترین جواب‌های یافت شده توسط الگوریتم برای تابع بیشینه‌سازی سود اقتصادی را در هر تکرار نشان

ب) بیشینه‌سازی سود اقتصادی

برای محاسبه سود اقتصادی لایه تجاری به صورت باینری با دقت مکانی ۳۰ متر مربع تهیه شده سپس به صورت ascii وارد الگوریتم شده و خروجی حاصل به صورت نقشه قابل تجزیه و تحلیل می‌شود. در برنامه‌ریزی کاربری زمین، منافع اقتصادی مستقیم از کاربری‌های تجاری و صنعتی به دست می‌آید. به دلیل آلودگی و ناسازگاری بالای کاربری صنعتی و کاربری مسکونی، نباید کاربری صنعتی در سطح منطقه اختصاص یابد؛ بنابراین، هرچه کاربری تجاری بیشتری اختصاص یابد، منافع اقتصادی بیشتری به دست می‌آید. تابع هدف مربوط به سود اقتصادی به صورت رابطه ۸

تابع نرمالیزه شده ۰/۹۹۶ حاصل شده است.

می‌دهد. با توجه به روند بهینه‌سازی مقدار تابع، به اندازه ۲۱/۰۶ درصد بهبود می‌یابد. مقدار ماکزیمم از



اشکال ۹ و ۱۰. به ترتیب نقشه طبقه‌بندی شده بهترین جواب تابع سود اقتصادی و بهترین جواب‌های بیشینه‌سازی بازگشت اقتصادی در هر تکرار (منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

طراحی پرسشنامه، تحلیل پاسخ و آماده‌سازی پیش‌نویس ماتریس سازگاری است. مرحله دوم، از ماتریس اولیه‌ای که در مرحله توزیع قبل به دست آمده، نتایج دوباره ارزیابی شده و ماتریس سازگاری تشکیل می‌شود. جدول ۶ ماتریس سازگاری بین کاربری‌ها در این پژوهش را نشان می‌دهد. برای ماتریس سازگاری از تابع ریاضی زیر استفاده شده است:

$$\max f_4 \cong \prod_{i=1}^n \prod_{p=1}^l Co_{ip} \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$i \cong 1, 2, \dots, n$$

که در آن l تعداد کاربری‌های مجاور در اطراف هر سلول i است. Co_{ip} ارزش سازگاری بین کاربری که در سلول i قرار دارد و کاربری که در سلول p است. i تعداد

پ) بیشینه‌سازی سازگاری

برای استخراج ماتریس سازگاری از مدل دلفی براساس نظر کارشناسان استفاده شد. با کاربرد این روش می‌توان بر مشکلات کمی‌سازی متغیرهای مختلف و روابط میان آن‌ها با توجه فقدان مدل‌ها و داده‌های کافی و موردنیاز، غلبه کرد و به روشی ساده‌تر، ماتریس سازگاری میان کاربری‌ها را ایجاد کرد (Taleai, 2007). روش دلفی فرایندی ساختاریافته برای جمع‌آوری و طبقه‌بندی دانش موجود در نزد گروهی از کارشناسان و خبرگان است که از طریق توزیع پرسشنامه‌هایی در بین افراد و بازخور کنترل‌شده پاسخ‌ها و نظرات دریافتی صورت می‌گیرد (Masoomi, 2014; Deb et al., 2002). روش دلفی متشکل از دو مرحله اصلی و یک فرایند پیوسته و تکرارشونده است. مرحله اول، شامل

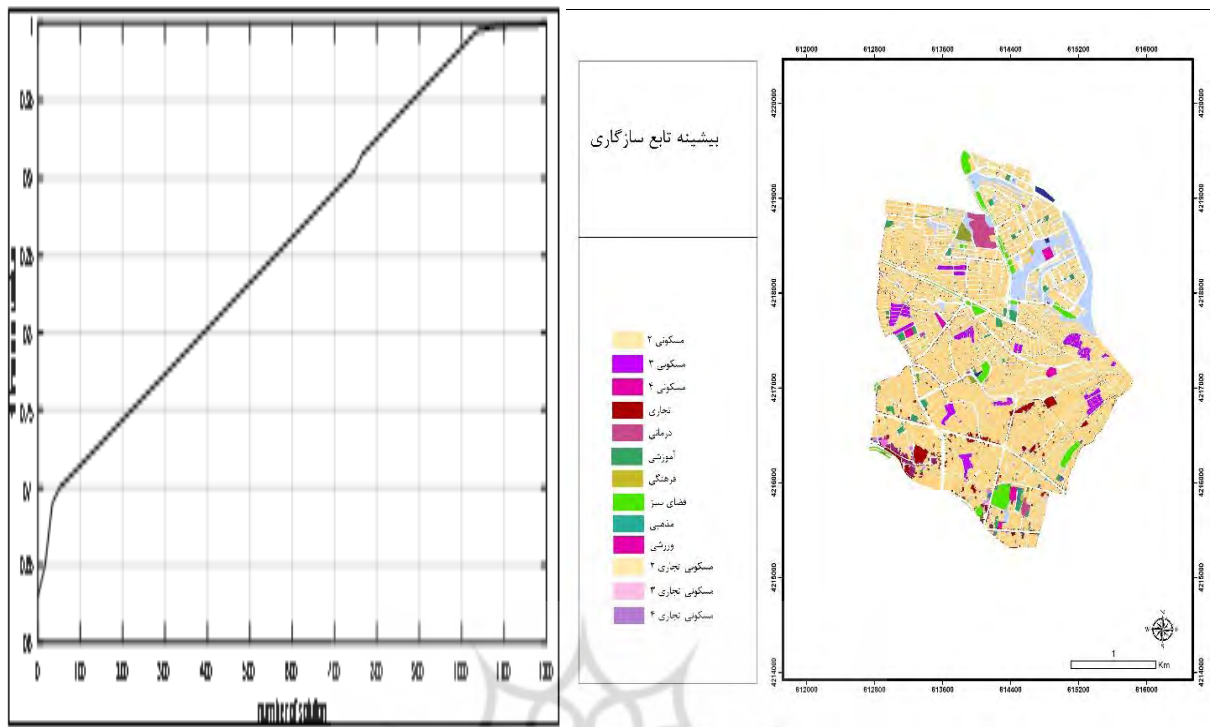
یافت شده توسط الگوریتم برای تابع بیشینه‌سازی سازگاری را در هر تکرار نشان می‌دهد. تابع سازگاری پس از بهینه‌سازی به میزان $\frac{2}{3}$ درصد بهبود می‌یابد، هم‌چنین مقدار ماکزیمم حاصل از تابع نرمالیزه شده برابر با $0/9912$ است.

سلول‌هایی که در منطقه مورد مطالعه قرار دارد. تابع برآزش مربوط به سازگاری در محیط نرم‌افزار متلب، برنامه‌نویسی شده و با استفاده از این تابع برآوردی از وضعیت سازگاری در منطقه مورد مطالعه به دست آمد. اشکال ۱۱ و ۱۲ روند بهبود بهترین جواب‌های

جدول ۶. ماتریس سازگاری بین کاربری‌ها

کاربری اراضی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸
۱	۱	۰.۸	۰.۴	۱	۰.۶	۰.۸	۱	۰.۸	۰.۸	۱	۰.۶	۰.۴	۱	۰.۶	۰.۲	۰.۴	۰.۲
۲	۰.۸	۱	۰.۸	۱	۰.۶	۰.۸	۱	۰.۸	۰.۸	۱	۰.۶	۰.۴	۱	۰.۶	۰.۲	۰.۴	۰.۲
۳	۰.۴	۰.۸	۱	۱	۰.۶	۰.۸	۱	۰.۸	۰.۸	۱	۰.۶	۰.۴	۱	۰.۶	۰.۲	۰.۴	۰.۲
۴	۱	۱	۱	۱	۰.۴	۱	۱	۰.۸	۰.۸	۱	۰.۶	۰.۴	۱	۱	۱	۱	۰.۸
۵	۰.۶	۰.۶	۰.۶	۰.۶	۱	۰.۸	۱	۱	۰.۶	۰.۶	۰.۶	۰.۶	۰.۸	۰.۶	۰.۲	۰.۶	۰.۲
۶	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۱	۰.۸	۱	۰.۸	۰.۶	۰.۶	۰.۶	۰.۶	۰.۶	۰.۸	۱	۰.۲	۰.۸	۰.۴
۷	۱	۱	۱	۱	۰.۶	۰.۸	۱	۰.۸	۱	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۲	۰.۸	۰.۴
۸	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۱	۰.۶	۱	۰.۶	۰.۶	۰.۶	۰.۶	۰.۶	۰.۸	۰.۸	۰.۲	۰.۸	۰.۴
۹	۱	۱	۱	۱	۰.۶	۰.۸	۱	۰.۸	۱	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۲	۰.۸	۰.۴
۱۰	۱	۱	۱	۱	۰.۶	۰.۸	۰.۸	۰.۶	۰.۸	۱	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۲	۰.۸	۰.۴
۱۱	۰.۶	۱	۱	۱	۰.۶	۰.۸	۰.۸	۰.۶	۰.۸	۰.۸	۱	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۲	۰.۸	۰.۴
۱۲	۰.۴	۰.۶	۰.۶	۱	۰.۶	۰.۸	۰.۸	۰.۶	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۱	۰.۸	۰.۸	۰.۲	۰.۸	۰.۴
۱۳	۱	۱	۱	۱	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۱	۱	۱	۱	۰.۶
۱۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۱	۰.۶	۱	۱	۰.۶	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰.۴
۱۵	۰.۶	۰.۶	۰.۶	۰.۶	۱	۰.۸	۱	۱	۰.۶	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰.۶
۱۶	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۴	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۱	۱	۱	۱	۰.۶
۱۷	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۱	۰.۶	۱	۱	۰.۶	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰.۶
۱۸	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۴	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۱

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)



اشکال ۱۱ و ۱۲. به ترتیب بهترین جواب‌های بیشینه‌سازی سازگاری در هر تکرار نقشه طبقه‌بندی شده بهترین جواب تابع بیشینه‌سازی سازگاری (منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

اراضی مشابه در همسایگی سلول (j, i) ام و d فاصله تا سلول مرکزی است. تابع برازش مربوط به فشردگی در محیط نرم‌افزار متلب، برنامه‌نویسی شده و با استفاده از این تابع، برآوردی از وضعیت فشردگی در منطقه مورد مطالعه به دست آمد. اشکال ۱۳ و ۱۴ روند بهبود بهترین جواب‌های یافت شده توسط الگوریتم برای تابع بیشینه‌سازی فشردگی را در هر تکرار نشان می‌دهد. تابع فشردگی پس از بهینه‌سازی به میزان ۴/۶ درصد بهبود می‌یابد. هم‌چنین مقدار ماکزیمم حاصل از تابع نرمالیزه شده برابر با ۰/۹۹۵۸ است.

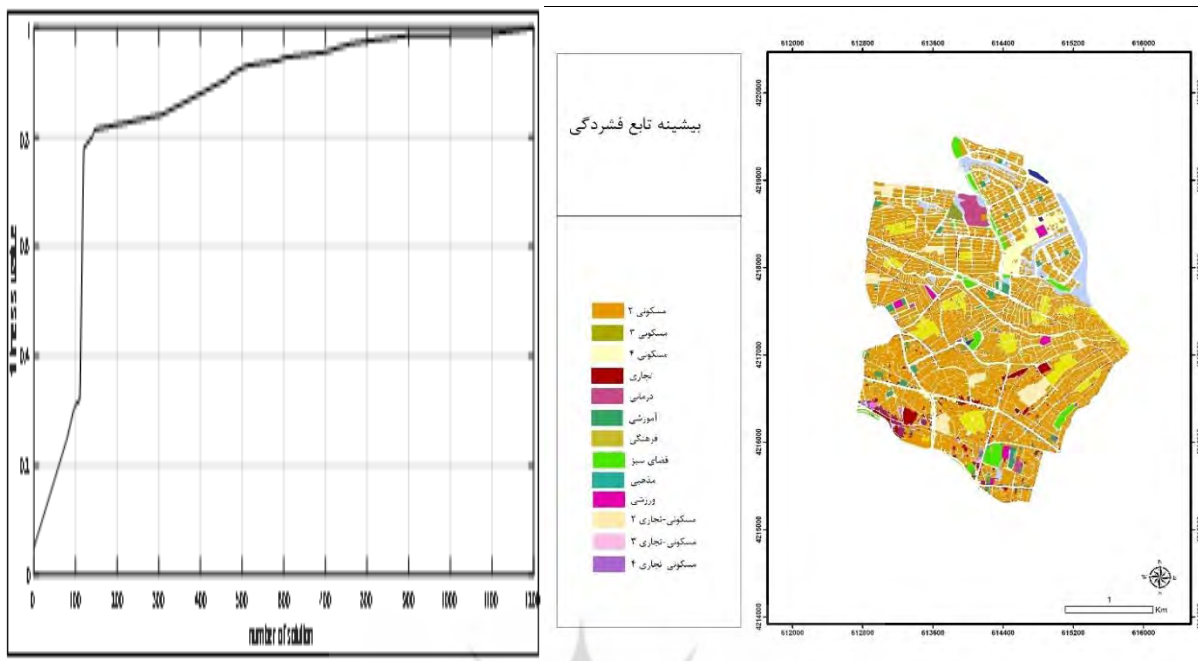
ت) بیشینه‌سازی فشردگی

برای محاسبه فشردگی بین کاربری‌های مختلف از رابطه ۱۰ استفاده شده است (شایگان و همکاران، ۲۰۱۴: ۹۱۱):

رابطه (۱۰):

$$f_3 = \max \left\{ \left[\sum_{j+d}^{i+d} \sum_{j-d}^{j+d} C_{cc'} \right] + \left[\sum_{j+d}^{i+d} \sum_{j-d}^{j+d} Com_c \right] \right\}$$

که در این رابطه، $C_{cc'}$ میزان سازگاری بین دو کاربری اراضی، Com_c تعداد سلول‌های با کاربری

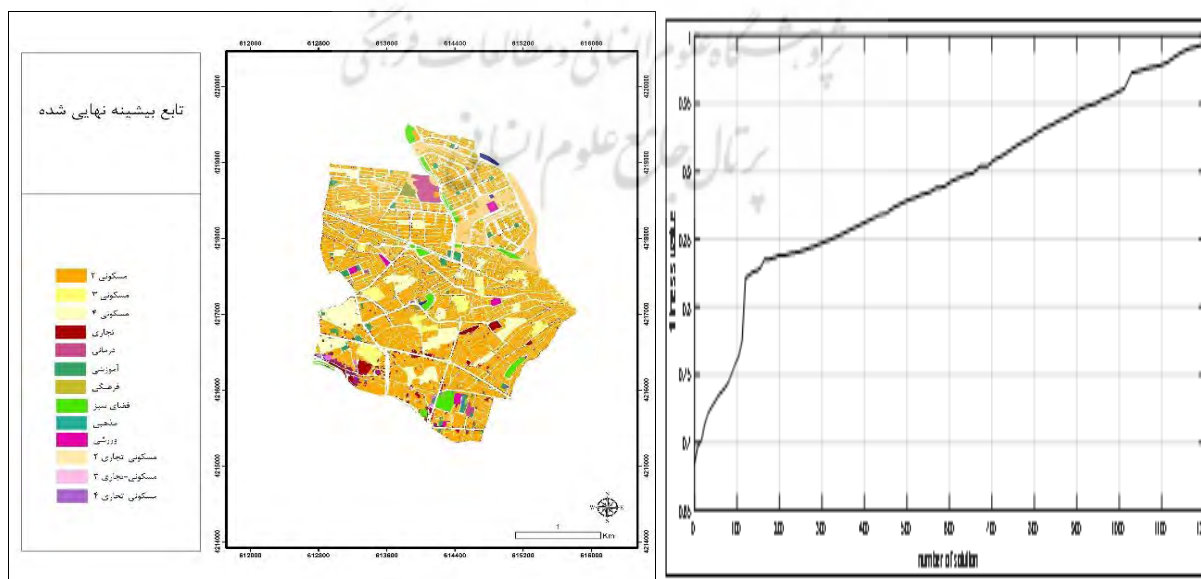


اشکال ۱۳ و ۱۴. به ترتیب بهترین جواب‌های بیشینه‌سازی فشرده‌گی در هر تکرار و نقشه طبقه‌بندی شده بهترین جواب تابع بیشینه‌سازی فشرده‌گی (منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

وضعیت حاصل شده از بهینه‌سازی این توابع است. اشکال ۱۵ و ۱۶ روند بهبود بهترین جواب‌های یافت شده توسط الگوریتم برای هر چهار تابع را در هر تکرار نشان می‌دهد.

ث) تابع نهایی بهینه‌سازی شده

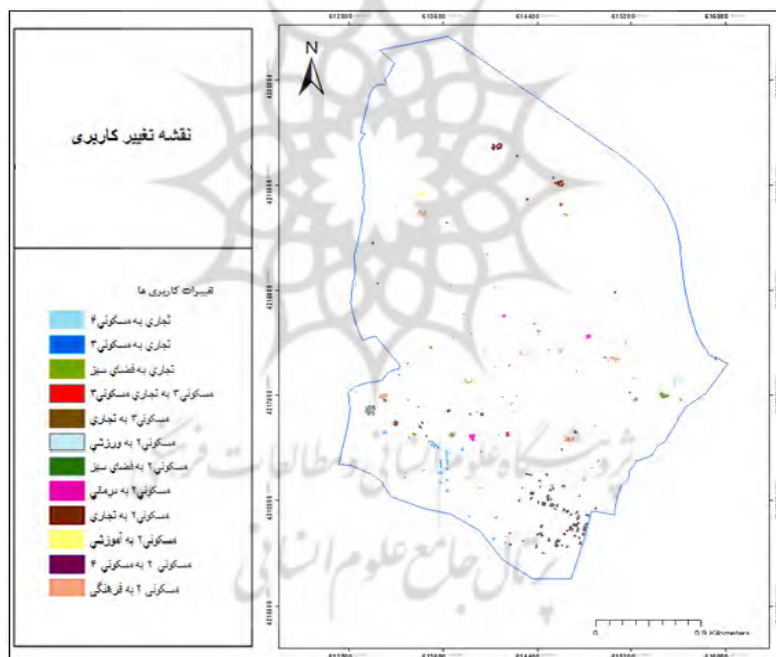
برای به دست آوردن تابع بهینه‌شده نهایی بعد از نرمال‌سازی هر یک از توابع، با استفاده از روش مجموع وزنی اشاره شده در این قسمت و اعمال ضرایب وزنی توابع که در جدول ۵ بیان شده است، این تابع در محیط نرم افزار متلب برنامه نویسی شده و برآوردی از



اشکال ۱۵ و ۱۶. به ترتیب بهترین جواب‌های بهینه‌سازی تابع نهایی در هر تکرار و نقشه طبقه‌بندی شده حاصل از بهینه‌سازی (منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

کاربری‌های مسکونی به کاربری‌های مذکور، افزایش یافته‌است و کمبود کاربری‌های آموزشی و ورزشی در قسمت‌های شمالی و شرقی تا حدودی جبران شده‌است. همچنین در بخش‌های مرکزی و جنوبی، کاربری فضای سبز بیشتر شده و برخی کاربری‌های تجاری اطراف مراکز آموزشی به‌علت ناسازگاری به کاربری مسکونی تغییر یافته‌است. با توجه به اثر تابع FAR مشاهده می‌کنیم که در برخی نقاط، کاربری‌های مسکونی دو طبقه به کاربری مسکونی چهار طبقه تغییر یافته‌است و کاربری فرهنگی در مناطق مسکونی بیشتر شده‌است (شکل ۱۷).

در صورت بهینه‌سازی مقدار تابع FAR با حالت بهینه‌شده ۱۳/۰۴ درصد است. همچنین در صورت بهینه‌سازی، سود اقتصادی در منطقه ۲۱/۰۶ درصد افزایش می‌یابد و تابع سازگاری و فشردگی بین کاربری‌ها به ترتیب ۲/۳ و ۴/۶ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت که با استخراج نقشه تغییرات حاصل از خروجی مدل و شرایط فعلی آرایش فضایی بهینه کاربری اراضی در این مدل با کاربری اراضی فعلی تفاوت نه‌چندان معنی‌دار، بلکه تفاوت نسبتاً محسوسی وجود دارد. همان‌طور که نقشه تغییرات گویای آن است مشاهده می‌کنیم که تعداد کاربری‌های تجاری و تجاری-مسکونی با تبدیل



شکل ۱۷. نقشه تغییرات شرایط بهینه و شرایط فعلی

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

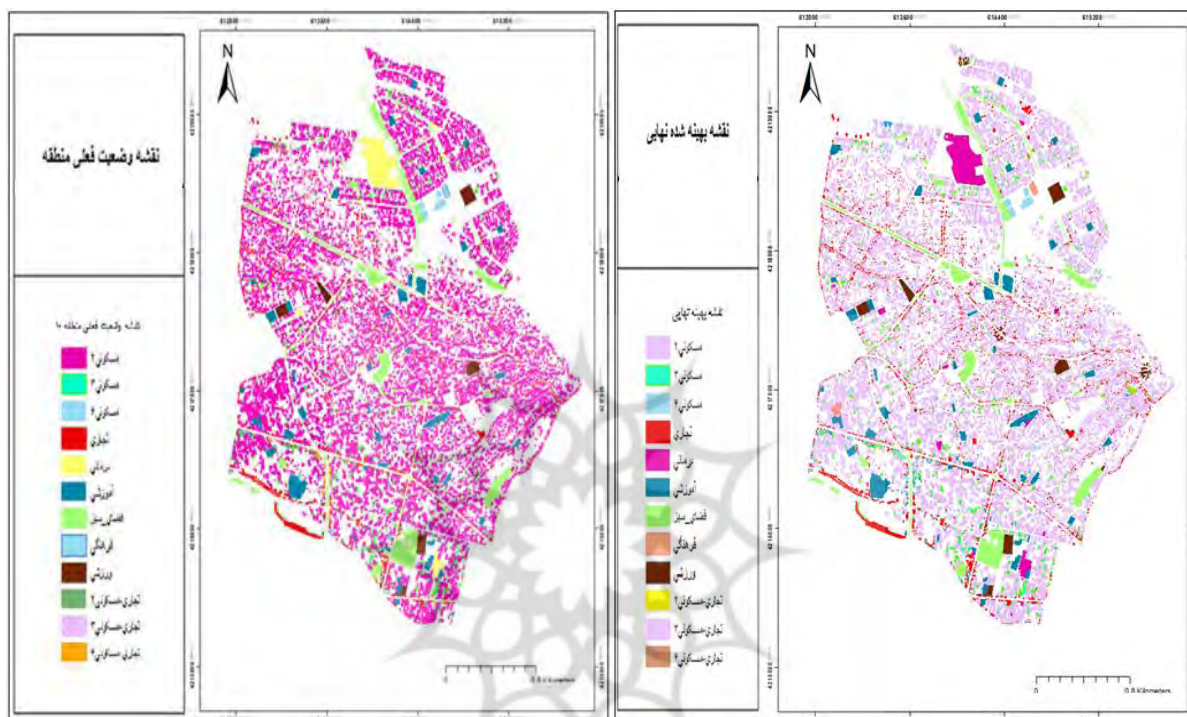
می‌تواند آرایش بهینه کاربری اراضی را بیان کند. همچنین با مقایسه مقدار توابع قبل و بعد از بهینه‌سازی که در جدول ۷ به آن‌ها اشاره شده و همچنین اشکال ۱۸ و ۱۹ می‌توان به این مورد پی‌برد.

همچنین با توجه به شکل ۲۰ که نمایشی از نقشه طبقه‌بندی شده حاصل از بهینه‌سازی منطقه مورد مطالعه است، می‌توان گفت که تلفیق روش‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی و الگوریتم NSGA-II

جدول ۷. مقایسه خروجی مدل با اعداد تابع هدف در وضعیت فعلی

توابع هدف	مقدار فعلی (بدون نرمال‌سازی)	مقدار حاصل از الگوریتم (بدون نرمال‌سازی)	درصد بهبود
f_1	۸۵۶۵۲۳/۰۳	۹۶۸۲۴۶	۱۳/۰۴
f_2	۹۵۶	۲۰/۱۳۳	۲۱/۰۶
f_3	۷۶	۹۸/۲۱	۲/۳
f_4	۴۰۹	۱۸/۸۱۴	۴/۶

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)



شکل ۱۸ و ۱۹. به ترتیب نقشه وضعیت فعلی منطقه و نقشه نهایی حاصل از بهینه‌سازی

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۸)

نتیجه‌گیری

در صورت بهینه‌سازی، مقدار تابع FAR با حالت بهینه‌شده ۱۳/۰۴ درصد است. همچنین در صورت بهینه‌سازی، سود اقتصادی در منطقه، ۲۱/۰۶ درصد افزایش می‌یابد و تابع سازگاری و فشردگی بین کاربری‌ها به ترتیب ۲/۳ و ۴/۶ درصد افزایش می‌یابد. همچنین مطابق با نقشه بهینه کاربری اراضی، این مدل با کاربری اراضی فعلی تفاوت نه‌چندان معنی‌دار، بلکه نسبتاً محسوسی دارد. مطابق با تابع نهایی بهینه‌سازی شده، تعداد کاربری‌های تجاری و تجاری-مسکونی با تبدیل کاربری‌های مسکونی به کاربری‌های مذکور، افزایش یافته‌است و کمبود کاربری‌های آموزشی

بهینه‌سازی تخصیص کاربری اراضی، از جمله بهترین روش‌های حفاظت محیط زیست است که علاوه بر آن، موجبات منافع اقتصادی، اجتماعی و غیره را نیز فراهم می‌آورد که در این بین، الگوریتم ژنتیک به دلیل سرعت بالا، سهولت نسبی و توانایی حل مسئله با در نظر گرفتن اهداف متضاد به‌عنوان مناسب‌ترین مدل بهینه‌سازی تخصیص کاربری اراضی است؛ از همین رو در این پژوهش، به‌منظور بهینه‌سازی تخصیص کاربری اراضی منطقه ۱۰ کلان‌شهر تبریز، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده‌است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که

خیرخواه و همکاران (۱۳۹۸) و لئو و همکاران (۲۰۱۲) از نامناسب بودن الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی تخصیص کاربری اراضی سخن گفته‌اند. در مورد تفاوتی که این پژوهش با پژوهش‌های دیگر دارد؛ می‌توان به تبدیل نتایج مبتنی بر پیکسل به صورت قطعاتی (پارسل) موجود در منطقه، مدنظر قراردادن تراکم ساختمانی (FAR) به عنوان یک تابع هدف و به‌کارگیری توابع غیرخطی به جای توابع خطی، اشاره کرد.

پیشنهادها

از جمله محدودیت‌های تحقیق می‌توان به نبود سخت‌افزار قوی برای محاسبات سنگین اشاره کرد تا باعث کاهش زمان محاسباتی شود. طراحی عملگر تقاطع دو بُعدی می‌بایست به گونه‌ای باشد که مساحت بلوک انتخابی نه آن قدر بزرگ باشد که جواب مسئله را از حالت موجه یا نزدیک به موجه دور کند و نه آن قدر کوچک که تأثیری داشته باشد. از آنجاکه تغییر کاربری اراضی در جهان واقعی به این صورت است که افزایش مساحت یک کاربری به کاهش مساحت کلاس دیگر منجر می‌شود، اگر عملگر تقاطعی با توجه به این اصل طراحی شود، به احتمال زیاد نتایج بهتری به دست خواهد آمد. یکی از محدودیت‌ها، محدودیت حداقل و حداکثر مساحت مجاز هر کاربری است. برای در نظر گرفتن این محدودیت بایستی مطالعات اقتصادی و اجتماعی خاصی صورت بگیرد و براساس نیازها، اقدام به برنامه‌ریزی کرد. هر کاربری علاوه بر اقتصاد بازاری، دارای اقتصادی غیربازاری نیز است. برای کارهای آینده پیشنهاد می‌شود علاوه بر در نظر گرفتن منفعت اقتصاد بازاری، به منفعت اقتصاد غیربازاری کاربری‌ها نیز توجه شود. همچنین نیاز است روالی تعریف شود که با استفاده از مکانیسم مکانی، تعداد مناسبی جواب از بین N جواب نهایی به دست آید.

و ورزشی در قسمت‌های شمالی و شرقی تا حدودی جبران شده است. در بخش‌های مرکزی و جنوبی، کاربری فضای سبز بیشتر شده و برخی کاربری‌های تجاری اطراف مراکز آموزشی به علت ناسازگاری، به کاربری مسکونی تغییر کاربری یافته است. با توجه به اثر تابع FAR در برخی نقاط، کاربری‌های مسکونی دو طبقه به کاربری مسکونی چهار طبقه تغییر یافته است و کاربری فرهنگی در مناطق مسکونی بیشتر شده است. نهایتاً می‌توان گفت که تلفیق روش‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی و الگوریتم NSGA-II، می‌تواند آرایش بهینه کاربری اراضی را بیان کند. این پژوهش با تحقیقات انجام شده در این راستا، با الگوریتم ژنتیک شباهت‌ها و تفاوت‌هایی را نشان می‌دهد؛ در مورد شباهت‌های این تحقیق با تحقیقات قبلی می‌توان به پژوهش‌های زیر اشاره کرد؛ از جمله: پژوهش کامیاب و همکاران (۱۳۹۵) (نتایج نشان داد که در مقایسه با روش MOLA که تنها به تناسب سلولی زمین توجه دارد، تخصیص کاربری با الگوریتم ژنتیک اکوسیستمی منجر به بهبود قابل ملاحظه‌ای در شاخص‌های سیمای سرزمینی شده است) و سدید و درواری (۱۳۹۶) (الگوهای کاربری پیشنهاد شده در این مدل می‌تواند سطح منفعت اقتصادی منطقه را در حدود ۴۸ درصد افزایش دهد)، در عرصه داخلی و لی و پارت (۲۰۱۶) (الگوریتم ژنتیک پیشرفته GA پیشنهادی از توانایی خوبی برخوردار است و می‌تواند هر سناریوی بهینه کاربری اراضی را مطابق با اهداف ترجیحی ذی‌نفعان ایجاد کند) و دوزی سرخابی و همکاران (۲۰۱۶) (یک الگوریتم تکاملی احتمالی (NSGA-II) مشکل بهینه‌سازی را حل می‌کند؛ در حالی که محدودیت‌های کاربری اراضی با عملگرهای جبرانی ایستا و پویا کنترل می‌شود) که همانند این پژوهش به مناسب بودن این روش برای بهینه‌سازی تخصیص کاربری اراضی اذعان کرده‌اند؛ اگرچه برخی تحقیقات نیز مانند پژوهش

منابع

الگوریتم NSGA-II، فصلنامه علمی - پژوهشی سنجش‌ازدور و GIS ایران (انجمن سنجش‌از دور و GIS ایران)، دوره ۴، شماره ۲، صص ۱۸-۱.

<http://gisj.sbu.ac.ir/article/view/1177>

علائقی مقدم، ساناز؛ کریمی، محمد؛ محمدزاده، علی. (۱۳۹۴).

مدل‌سازی تخصیص کاربری‌های شهری با استفاده از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نقطه مرجع، نشریه علمی - پژوهشی علوم و فنون نقشه‌برداری (انجمن علمی مهندسی نقشه‌برداری و ژئوماتیک ایران)، ۴(۴)، صص ۶۶-۴۷.

http://jgst.issge.ir/browse.php?a_id=63&sid=1&slc_lang=fa

کریمی، محمد. (۱۳۸۹). توسعه روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی برای تعیین کاربری و پوشش مطلوب سرزمین، رساله دکتری، استاد راهنما: محمدعلی شریفی و محمد سعدی‌مسگری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده نقشه‌برداری.

<https://ganj-old.irandoc.ac.ir/articles/514906>

کامیاب، حمیدرضا؛ سلمان ماهینی، عبدالرسول؛ شهرآیینی، محمد. (۱۳۹۵). مقایسه تخصیص اکوسیستمی کاربری سرزمین با استفاده از الگوریتم ژنتیک و رویکرد تخصیص چندهدفه، دو فصلنامه علمی پژوهش‌های محیط زیست (انجمن ارزیابی محیط زیست ایران)، دوره ۷، شماره ۱۴، صص ۱۶۸-۱۵۷.

http://www.iraneiap.ir/article_45235.html

معصومی، زهره؛ منصوریان، علی؛ مسگری، محمدسعدی. (۱۳۸۹). کاربرد الگوریتم ژنتیک چندهدفه در مطالعات مکان‌یابی کاربری‌های صنعتی، فصلنامه علمی - پژوهشی سنجش‌ازدور و GIS ایران (انجمن سنجش‌از دور و GIS ایران)، دوره ۲، شماره ۴، صص ۲۲-۱.

<http://gisj.sbu.ac.ir/article/view/1142>

مهندسین مشاور نقش محیط. (۱۳۹۱). طرح توسعه و عمران (جامع) شهر تبریز، گزارش مطالعات کالبدی مرحله موجود، وزارت راه و شهرسازی، اداره کل راه و شهرسازی استان آذربایجان شرقی.

مهندسین مشاور نقش محیط. (۱۳۹۱). طرح توسعه و عمران (جامع) شهر تبریز، گزارش محیطی مرحله موجود، وزارت راه

ابراهیم‌نیا، وحیده؛ رسولی، مژگان؛ زندیه، سمیه. (۱۳۸۸). روش‌ها و مدل‌های تخصیص کاربرد زمین، مجله معماری و شهرسازی آرمان‌شهر (دکتر مصطفی بهزادفر)، ۲(۲)، صص ۲۲-۹.

http://www.armanshahrjournal.com/article_32157.html

تناسان، محمد. (۱۳۹۴). طراحی مدل مدیریت کاربری اراضی مبتنی بر الگوریتم NSGA-II با رویکرد مدیریت رواناب سطحی در بستر GIS، پروژه تحقیقاتی، استادان راهنما: مهندس سید حسن مهدوی‌فر و مهندس اصغر شجاعی، بنیاد نخبگان نیروهای مسلح، وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران.

حسینی، سید موسی؛ زهرایی، بنفشه. (۱۳۹۳). الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی مهندسی، تهران: انتشارات گوتنبرگ.

خیرخواه، آرزو؛ معاریان، هادی؛ تاجبخش، سید محمد. (۱۳۹۸). مقایسه الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی برای حل مسائل بهینه‌سازی کاربری اراضی حوزه‌های آبخیز، نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز (پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری)، دوره ۱۱، شماره ۱، صص ۲۶۳-۲۵۲.

https://jwem.areeo.ac.ir/article_118435.html

رضویان، محمدتقی. (۱۳۸۱). برنامه‌ریزی کاربری اراضی شهری، تهران: انتشارات منشی.

سلمان ماهینی، عبدالرسول؛ اسدالهی، زهرا؛ سعید صبائی، مریم؛ کامیاب، حمیدرضا؛ نصیر احمدی، کامران. (۱۳۹۳). مقایسه روش‌های شبیه‌سازی تبرید تدریجی و اختصاص چندهدفه زمین در گزینش بهینه کاربری‌های اراضی، فصلنامه بوم‌شناسی کاربردی (دانشگاه صنعتی اصفهان)، دوره ۳، شماره ۹، صص ۱۳-۱.

https://ijae.iut.ac.ir/browse.php?a_code=A-10-1-61&sid=1&slc_lang=fa

سدیدی، جواد؛ درواری، سیده زهرا. (۱۳۹۶). ارائه مدل توسعه یافته فرا ابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه جهت مدل‌سازی تغییر بهینه کاربری اراضی، فصلنامه برنامه‌ریزی و آمایش فضا (دانشگاه تربیت مدرس)، دوره ۲۱، شماره ۳، صص ۳۲۷-۳۰۷.

<https://hsm.sp.modares.ac.ir/article-21-4654-fa.html>

شایگان، مهران؛ علی محمدی، عباس؛ منصوریان، علی. (۱۳۹۱). بهینه‌سازی چندهدفه تخصیص کاربری اراضی با استفاده از

- Deb, K., Mohan, M., Mishra, S. (2005). Evaluating the ϵ -domination based on multiobjectives evolutionary algorithm for a quick computation of pareto-optimal solutions, *Journal of evolutionary computation*, 13(4): 501-525.
<https://www.mitpressjournals.org/doi/abs/10.1162/106365605774666895>
- Datta, D. (2007). Multi-Objective Evolutionary Algorithms for Resource Allocation Problems, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur (IIT-Kanpur), Indian.
- Douzi Sorkhabi, S. Y., Romero, D. A., Yan, G. K., Gu, M. D., Moran, J., Morgenroth, M., Amon, C. H. (2016). The impact of land use constraints in multi-objective energy-noise wind farm layout optimization, *Renewable Energy*, 85: 359-370.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148115300495>
- Deng, X. Z., Huang, J. K., Rozelle, S., Uchida, E. (2008). Growth, population and industrialization, and urban land expansion of China, *Journal of Urban Economics*, 63(1): 96-115.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0094119007000022>
- Deng, X. Z., Huang, J. K., Rozelle, S., Zhang, J. P., Li, Z. H. (2015). Impact of urbanization on cultivated land changes in China, *Land Use Policy*, 45: 1-7.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264837715000101>
- Holland, J.H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. University of Michigan Press, Ann Arbor, 183 pages.
- Huang, Z. H., Du, X. J., Castillo, C. S. Z. (2019). How does urbanization affect farmland protection? Evidence from China, *Resources, Conservation and Recycling*, 145: 139-147.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344918304798>
- Herzig, A. (2008). A GIS-based module for the multi objectives optimization of areal resource allocation. In Friis. *Proceedings of the 11th AGILE International Conference on Geographic Information Science*, University of Girona, Spain.
- Long, H. L., Tang, G. P., Li, X. B., Heilig, G. K. (2007). Socio-economic driving forces of land-use و شهرسازی، اداره کل راه و شهرسازی استان آذربایجان شرقی.
- Amundson, R., Berhe, A.A., Hopmans, J.W., Olson, C., Sztein, A.E., Sparks, D.L. (2015). Soil and human security in the 21st century, *Science*, 348(6235): 647-654.
<https://science.sciencemag.org/content/348/6235/1261071>
- Bryan, B.A., Gao, L., Ye, Y., Sun, X., Connor, J.D., Crossman, N.D., Stafford-Smith, M., Wu, J., He, C., Yu, D., Liu, Z., Li, A., Huang, Q., Ren, H., Deng, X., Zheng, H., Niu, J., Han, G., Hou, X. (2018). China's response to a national landsystem sustainability emergency, *Nature*, 559: 193-204.
<https://www.nature.com/articles/s41586-018-0280-2/>
- Beheshtifar, S. (2014). Design and implement of a simultaneous location-allocation model of different service centers using evolutionary algorithms. PhD Thesis. Faculty of Geodesy and Geomatics. K. N. Toosi University of Technology. Tehran. Iran.
- Beady, D., Bull, D.R., Martin, R. R. (1993). An Overview of Genetic Algorithms: Part I, *Fundamentals: University Computing.*, 15: 58-69.
- Coello, C.A. (2002). *Introduction to Evolutionary Multi-objective Optimization*, Lecture notes, Depto. de Ingenier'ia El'ectrica, Secci'on de Computaci'on, Instituto Polit'ecnico Nacional, MEXICO.
- Chen, J., Long, H., Liao, L., Tu, S., Li, T. (2020). Land use transitions and urban-rural integrated development: Theoretical framework and China's evidence, *Land Use Policy*, 92: 1-12.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264837719318411>
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. (2001). A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2):182-197.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/996017>
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182-197.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/996017>

- Macro, K., Matott, L. S., Rabideau, A., Ghodsi, S. H., Zhu, Z. (2018). A New Multi-Objective Optimization Tool for Green Infrastructure Planning with SWMM, *Environmental Modelling and Software*, 113:42-47.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364815218307515>
- Song, W., Pijanowski, B. C., Tayyebi, A. (2015). Urban expansion and its consumption of high-quality farmland in Beijing, China, *Ecological Indicators*, 54: 60–70.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X15000928>
- Serra, P., Pons, X., Sauri, D. (2008). Land-cover and land-use change in a Mediterranean landscape: a spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors, *Applied Geography*. 28: 189–209.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014362280800012X>
- Shaygan, M., Alimohammadi, A., Mansourian, A., Govara, Z. S., Kalami, S. M. (2014). Spatial multi-objective optimization approach for land use allocation using NSGA-II, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(3): 873–883.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6676851>
- Sheta, A., Turabieh, H. (2006). A comparison between genetic algorithms and sequential quadratic programming in solving constrained optimization problems, *International Journal on artificial intelligence and machine learning (AIML)*, 6(1): 67-74.
- Stewart, T., Janssen, R., Herwijnen, M. (2004). A genetic algorithm approach to multi objective landuse planning, *Computers & Operations Research*, 31(14): 2293-2313.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305054803001886>
- Strauch, M., Cord, A. f., Pätzold, C., Lautenbach, S., Kaim, A., Schweitzer, C., Seppelt, R., Volk, M. (2019). Constraints in multi-objective optimization of land use allocation – Repair or penalize?, *Environmental Modelling & Software*, 118:241-251.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364815218311204>
- Taleai, M. (2007). GIS-based planning support system for urban land use externalities evaluation, change in Kunshan, the Yangtze River Delta economic area of China, *Journal of Environmental Management*, 83: 351–364.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479706001241>
- Long, H.L. (2012). Land use transition and rural transformation development, *Progress in Geography* 31 (2): 131–138.
<http://www.progressingography.com/EN/abstract/abstract12371.shtml>
- Long, H.L., Qu, Y. (2018). Land use transitions and land management: a mutual feedback perspective. *Land Use Policy*, 74: 111–120.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264837716312133>
- Liu, X., Li, X., Shi, X., Huang, K., Liu, Y. (2012). A multi-type ant colony optimization (MACO) method for optimal land use allocation in large areas, *International Journal of Geographical Information Science*, 26(7):1325–1343.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13658816.2011.635594>
- Liu, J., Mooney, H., Hull, V., Davis, S. J., Gaskell, J., Hertel, T., Lubchenco, J., Seto, K.C., Gleick, P., Kremen, C., Li, S. (2015). Systems integration for global sustainability. *Science*, 347 (6225).
<https://science.sciencemag.org/content/347/6225/1258832>
- Li. X., Parrott, L.(2016). An improved Genetic Algorithm for spatial optimization of multi-objective and multi-site land use allocation, *Computers, Environment and Urban Systems*, 59: 184-194.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971516301223>
- Masoomi, Z. (2014). Modeling of the Physical effects of urban land use changes using optimization algorithms and spatial analysis, PhD Thesis. Faculty of Geodesy and Geomatics. K. N. Toosi University of Technology. Tehran. Iran.
- Masoumi, Z., Maleki, J., Mesgari, M.S., Mansourian, A.(2016). Using an Evolutionary Algorithm in Multiobjective Geographic Analysis for Land Use Allocation and Decision Supporting, *Geographical Analysis*, 1-26.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gean.12111>

Scussolini, P., Winsemius, H. C. (2017). A global framework for future costs and benefits of river-flood protection in urban areas, *Nature Climate Change*, 7(9): 642–646.

<https://www.nature.com/articles/nclimate3350>

Ziari, K. (2009). urban land use planning, Eighth Edition (Second Edition Tehran University), publisher of Tehran University.

PhD Thesis. Faculty of Geodesy and Geomatics. K. N. Toosi University of Technology. Tehran. Iran.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364815218311204>

Ward, P. J., Jongman, B., Aerts, J. C. J. H., Bates, P. D., Botzen, W. J. W., Diaz Loaiza, A., Hallegatte, S., Kind, J. M., Kwadijk, J.,



