



وزارت جهاد کشاورزی  
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی  
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری



# نشریه فنی

**روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه در تخصیص  
کاربری اراضی در حوزه‌های آبخیز:  
مفاهیم، الگوریتم‌ها و کاربردها**

نویسندگان:  
سوسن براتی قهفرخی، محمودرضا طباطبایی

شماره ثبت: ۶۹۲۹۲

۱۴۰۵

وزارت جهاد کشاورزی  
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی  
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

نشریه فنی:

روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه در تخصیص کاربری اراضی در حوزه‌های آبخیز: مفاهیم، الگوریتم‌ها و کاربردها

نویسندگان:

سوسن براتی قهفرخی، محمودرضا طباطبایی

شماره ثبت: ۶۹۲۹۲

وزارت جهاد کشاورزی  
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی  
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

عنوان: روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه در تخصیص کاربری اراضی در حوزه‌های آبخیز: مفاهیم، الگوریتم‌ها و کاربردها

نویسندگان: سوسن براتی قهفرخی، محمودرضا طباطبایی

ویراستار: سعید نبی‌پی لشکریان

طراحی جلد: عباس صدیق

ناشر: پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

شمارگان: ۱۰ نسخه

تاریخ انتشار: بهار ۱۴۰۵

این اثر در مورخه ۱۴۰۵/۰۲/۲۷ با شماره ۶۹۲۹۲ در مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به ثبت رسیده است.

حق چاپ محفوظ است. نقل مطلب، تصاویر، جداول، منحنی‌ها و نمودارها با ذکر مأخذ بلامانع است.

## فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
۱	چکیده
۲	فصل اول: کلیات و ضرورت پژوهش
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- اهمیت و ضرورت بررسی موضوع
۳	۳-۱- چارچوب مفهومی و رویکردهای رایج
۴	۱-۳-۱- طبقه‌بندی روش‌های حل
۷	۴-۱- برآیند مباحث فصل اول
۹	فصل دوم: مرور و تحلیل الگوریتم‌های بهینه‌سازی منتخب در تخصیص کاربری اراضی
۹	۱-۲- مقدمه‌ای بر کاربرد بهینه‌سازی در برنامه‌ریزی کاربری زمین
۱۰	۲-۲- دسته‌بندی رویکردهای بهینه‌سازی در تخصیص کاربری اراضی
۱۶	۳-۲- معرفی و تحلیل الگوریتم‌های منتخب
۱۶	۱-۳-۲- الگوریتم ژنتیک
۲۲	۲-۳-۲- الگوریتم ژنتیک غیرمغلوب
۲۸	۳-۳-۲- مدل تخصیص چندهدفه کاربری زمین
۳۵	۴-۲- جمع‌بندی و مقایسه تطبیقی الگوریتم‌ها
۳۶	۱-۴-۲- مطالعات شاخص در کاربرد مدل‌های ترکیبی
۳۸	۲-۴-۲- مقایسه تطبیقی الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه در تخصیص کاربری اراضی
۴۰	۵-۲- برآیند مباحث فصل دوم
۴۲	فصل سوم: چارچوب عملیاتی پیاده‌سازی بهینه‌سازی چندهدفه در حوزه‌های آبخیز
۴۲	۱-۳- مراحل اجرای بهینه‌سازی تخصیص کاربری اراضی
۴۴	فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۴۴	۱-۴- نتایج تحلیلی (یافته‌های کلیدی)
۴۴	۲-۴- پیشنهادات اجرایی و پژوهشی
۴۵	منابع و مأخذ
۴۹	Abstract

## فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۶	شکل ۱-۱- طبقه‌بندی روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه در برنامه‌ریزی کاربری اراضی (ترسیم: نویسندگان)
۱۵.....	شکل ۱-۲- دسته‌بندی الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه در تخصیص کاربری اراضی (ترسیم: نویسندگان)
۱۸.....	شکل ۲-۲- منطق عملکرد الگوریتم ژنتیک (GA) در بهینه‌سازی چندهدفه کاربری اراضی (ترسیم: نویسندگان)
۲۵.....	شکل ۲-۳- منطق عملکرد الگوریتم ژنتیک غیرمغلوب (NSGA-II) در بهینه‌سازی چندهدفه (ترسیم: نویسندگان)
۳۰.....	شکل ۲-۴- منطق عملکرد مدل تخصیص چندهدفه کاربری زمین (MOLA) (ترسیم: نویسندگان)

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۳۸.....	جدول ۱-۲- مقایسه تطبیقی الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه در تخصیص کاربری اراضی (منبع: نویسندگان)

## چکیده

مدیریت کاربری اراضی در حوزه‌های آبخیز به دلیل وجود اهداف متعارض، محدودیت‌های اکولوژیکی و فشارهای اقتصادی- اجتماعی، ماهیتی ذاتی چندهدفه دارد و تصمیم‌گیری در آن نیازمند بهره‌گیری از روش‌های علمی و داده‌محور است. این گزارش با هدف ارائه یک مرور تحلیلی و نظام‌مند، سه طیف اصلی روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه شامل مدل‌های کلاسیک، الگوریتم‌های فراابتکاری و رویکردهای ترکیبی را بررسی می‌کند و کاربرد هر یک را در برنامه‌ریزی کاربری زمین تحلیل می‌کند. در بخش نخست، مفاهیم پایه و ضرورت بهره‌گیری از رویکردهای چندهدفه در مدیریت حوزه‌های آبخیز تشریح شده و نقش متغیرهای تصمیم، توابع هدف و قیود محیطی در شکل‌گیری مدل‌ها تبیین شده است. سپس، الگوریتم‌هایی نظیر GA و NSGA-II به عنوان ابزارهای قدرتمند برای جست‌وجوی فضاها پیچیده و تولید جبهه پارتو معرفی شده و نقاط قوت و محدودیت‌های آن‌ها با تکیه بر مطالعات موردی داخلی و بین‌المللی بررسی می‌شود. در ادامه، مدل‌های ترکیبی مبتنی بر تلفیق الگوریتم‌های تکاملی با مدل‌های شبیه‌سازی تغییر کاربری زمین نظیر FLUS و PLUS معرفی شده و قابلیت آن‌ها در سناریونویسی، ارزیابی پیامدهای اکولوژیک و تحلیل توسعه پایدار تبیین می‌شود. جمع‌بندی گزارش نشان می‌دهد که روش‌های کلاسیک برای مسائل ساده‌تر و داده‌های محدود مناسب‌اند، الگوریتم‌های فراابتکاری برای مسائل واقعی با چندین هدف متعارض کارایی بالاتری دارند و چارچوب‌های ترکیبی ابزارهایی پیشرفته برای برنامه‌ریزی راهبردی و شبیه‌سازی آینده محسوب می‌شوند. این تحلیل می‌تواند مبنایی کاربردی برای انتخاب روش مناسب بهینه‌سازی در پروژه‌های مدیریت سرزمین، تخصیص کاربری و آمایش حوزه‌های آبخیز کشور فراهم آورد.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم NSGA-II، الگوریتم ژنتیک (GA)، بهینه‌سازی چندهدفه، تخصیص کاربری

اراضی، مدل MOLA.

## فصل اول: کلیات و ضرورت پژوهش

### ۱-۱- مقدمه

کاربری زمین و چگونگی تخصیص آن به کاربری‌های مختلف، یکی از پایه‌های کلیدی در برنامه‌ریزی مکانی و مدیریت پایدار منابع طبیعی به‌شمار می‌آید. تغییرات ایجادشده در کاربری اراضی، که عمدتاً ناشی از رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی، توسعه کشاورزی فشرده و بهره‌برداری بی‌رویه از زمین است، در سال‌های اخیر منجر به تشدید ناپایداری‌های محیطی در بسیاری از حوزه‌های آبخیز شده است. این ناپایداری‌ها شامل افزایش رواناب، کاهش پوشش گیاهی، فرسایش خاک، تهدید منابع آبی و در نهایت کاهش کیفیت خدمات اکوسیستمی می‌باشند (Luan و همکاران، ۲۰۲۴؛ Foley و همکاران، ۲۰۰۵).

در بسیاری از مناطق، به‌ویژه در حوزه‌های آبخیز نیمه‌خشک و کوهستانی ایران، نبود چارچوبی کارآمد برای تخصیص بهینه کاربری زمین منجر به تداخل و رقابت میان نیازهای توسعه‌ای و ملاحظات بوم‌شناختی شده است. این تعارض‌ها زمانی پیچیده‌تر می‌شوند که تصمیم‌گیری درباره الگوی مطلوب کاربری زمین نیازمند ملاحظه هم‌زمان اهدافی متضاد، از جمله افزایش سود اقتصادی، حفاظت محیط زیست و استفاده بهینه از ظرفیت اکولوژیکی باشد.

در چنین شرایطی، روش‌های تصمیم‌گیری و بهینه‌سازی چندهدفه به‌عنوان یکی از رویکردهای پیشرو برای برنامه‌ریزی فضایی مطرح شده‌اند. این روش‌ها امکان تحلیل هم‌زمان چندین هدف و ارائه مجموعه‌ای از راه‌حل‌های متعادل را فراهم می‌سازند که انتخاب گزینه نهایی را برای مدیران و سیاست‌گذاران تسهیل می‌کند. توسعه این‌گونه روش‌ها در تعامل با داده‌های مکانی، سامانه‌های GIS و مدل‌های ارزیابی زیست‌محیطی، بستری مناسب برای تصمیم‌سازی علمی و هماهنگ با اصول توسعه پایدار فراهم کرده است (Sicuaio و همکاران، ۲۰۲۴).

## ۲-۱- اهمیت و ضرورت بررسی موضوع

در مواجهه با بحران‌های زیست‌محیطی ناشی از تغییرات کاربری زمین، به‌ویژه در مناطقی با آسیب‌پذیری بوم‌شناختی بالا، نیاز به توسعه ابزارهای تحلیلی و پشتیبان تصمیم‌گیری برای تخصیص بهینه کاربری‌ها بیش از گذشته احساس می‌شود. مدیریت کاربری اراضی نقشی اساسی در کنترل فرسایش خاک، تنظیم رواناب، افزایش بهره‌وری اقتصادی و ارتقاء کیفیت خدمات اکوسیستمی ایفا می‌کند (Stewart و همکاران، ۲۰۰۴). در شرایطی که سیاست‌گذاران و مدیران منابع طبیعی ناچار به انتخاب میان گزینه‌های متعدد با پیامدهای متضاد هستند، رویکردهای چندهدفه در تصمیم‌سازی اهمیت ویژه‌ای می‌یابند.

روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه به‌عنوان راهکاری علمی و منعطف، امکان ملاحظه هم‌زمان اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و مکانی را فراهم می‌سازند و از این‌رو ابزاری قدرتمند برای مدیریت پایدار زمین محسوب می‌شوند (Deb و همکاران، ۲۰۰۲). استفاده از این روش‌ها در ترکیب با سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و داده‌های محیطی، به تصمیم‌گیرندگان این امکان را می‌دهد که سناریوهای مختلف تخصیص زمین را از منظر پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی مقایسه و ارزیابی کنند (Liu و همکاران، ۲۰۱۷).

با توجه به تنوع الگوریتم‌ها، پیچیدگی مدل‌ها و حساسیت بالای حوزه‌های آبخیز به تغییرات کاربری، بررسی مقایسه‌ای و تحلیلی روش‌های مختلف بهینه‌سازی چندهدفه می‌تواند به انتخاب رویکرد مناسب و متناسب با شرایط منطقه‌ای کمک کند. این مهم به‌ویژه در طراحی پروژه‌های مرتبط با مدیریت جامع سرزمین و تخصیص منابع، اهمیت زیادی خواهد داشت.

## ۳-۱- چارچوب مفهومی و رویکردهای رایج

بهینه‌سازی چندهدفه<sup>۱</sup> یکی از زیرشاخه‌های اصلی در علوم تصمیم‌گیری و تحلیل سامانه‌ها است که برای حل مسائلی طراحی شده است که در آن چندین هدف مستقل یا متضاد باید به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شوند (Marle و Arora، ۲۰۰۴). در حوزه برنامه‌ریزی و مدیریت کاربری اراضی، این اهداف معمولاً شامل بیشینه‌سازی سود اقتصادی، کمینه‌سازی تخریب بوم‌شناختی (مانند رواناب و فرسایش خاک) و افزایش تطابق

کاربری‌ها با توان اکولوژیکی منطقه است (Liang و همکاران، ۲۰۲۰). چالش اصلی در این زمینه، یافتن تعادلی منطقی میان این اهداف متعارض است. در یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه، سه مؤلفه اساسی تعریف می‌شود:

- متغیرهای تصمیم<sup>۱</sup>: مشخص‌کننده نوع کاربری اختصاص‌یافته به هر واحد مکانی (مانند هر سلول در نقشه) است.

- توابع هدف<sup>۲</sup>: برای ارزیابی عملکرد هر راه‌حل از نظر اهدافی مانند اقتصادی، زیست‌محیطی یا مکانی به کار می‌روند.

- قیود<sup>۳</sup>: محدودیت‌هایی که براساس شرایط واقعی منطقه (شیب زمین، منابع آبی، مناطق حفاظت‌شده و...) اعمال می‌شوند (Cao و همکاران، ۲۰۱۲).

بهینه‌سازی این مدل‌ها منجر به تولید مجموعه‌ای از راه‌حل‌های موسوم به راه‌حل‌های غیرمغلوب<sup>۴</sup> می‌شود که در آن هیچ راه‌حلی وجود ندارد که بتواند در تمامی اهداف به‌طور هم‌زمان بهتر از سایر گزینه‌ها عمل کند. این مجموعه که به‌عنوان جبهه پارتو<sup>۵</sup> شناخته می‌شود، امکان انتخاب سناریوی بهینه براساس اولویت‌های مختلف مدیریتی را فراهم می‌سازد.

### ۱-۳-۱- طبقه‌بندی روش‌های حل

روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه در برنامه‌ریزی کاربری اراضی را می‌توان به‌طور کلی در دو دسته طبقه‌بندی کرد شکل (۱-۱):

- 
1. Decision Variables
  2. Objective Functions
  3. Constraints
  4. Non-dominated Solutions
  5. Pareto Front

الف- روش‌های کلاسیک یا قطعی<sup>۱</sup>

این روش‌ها شامل فناوری‌هایی مانند برنامه‌ریزی خطی چندهدفه<sup>۲</sup>، برنامه‌ریزی آرمانی<sup>۳</sup> و روش وزن‌دهی<sup>۴</sup> است. ویژگی این روش‌ها، شفافیت ساختار ریاضی و امکان تحلیل دقیق نتایج است. با این حال، این روش‌ها معمولاً در مسائل غیرخطی، گسسته و دارای فضای جست‌وجوی پیچیده عملکرد محدودی دارند (Martins و Mendoza، ۲۰۰۶؛ Ehrgott، ۲۰۰۵).

ب - الگوریتم‌های فراابتکاری یا متاهوریستیک<sup>۵</sup>:

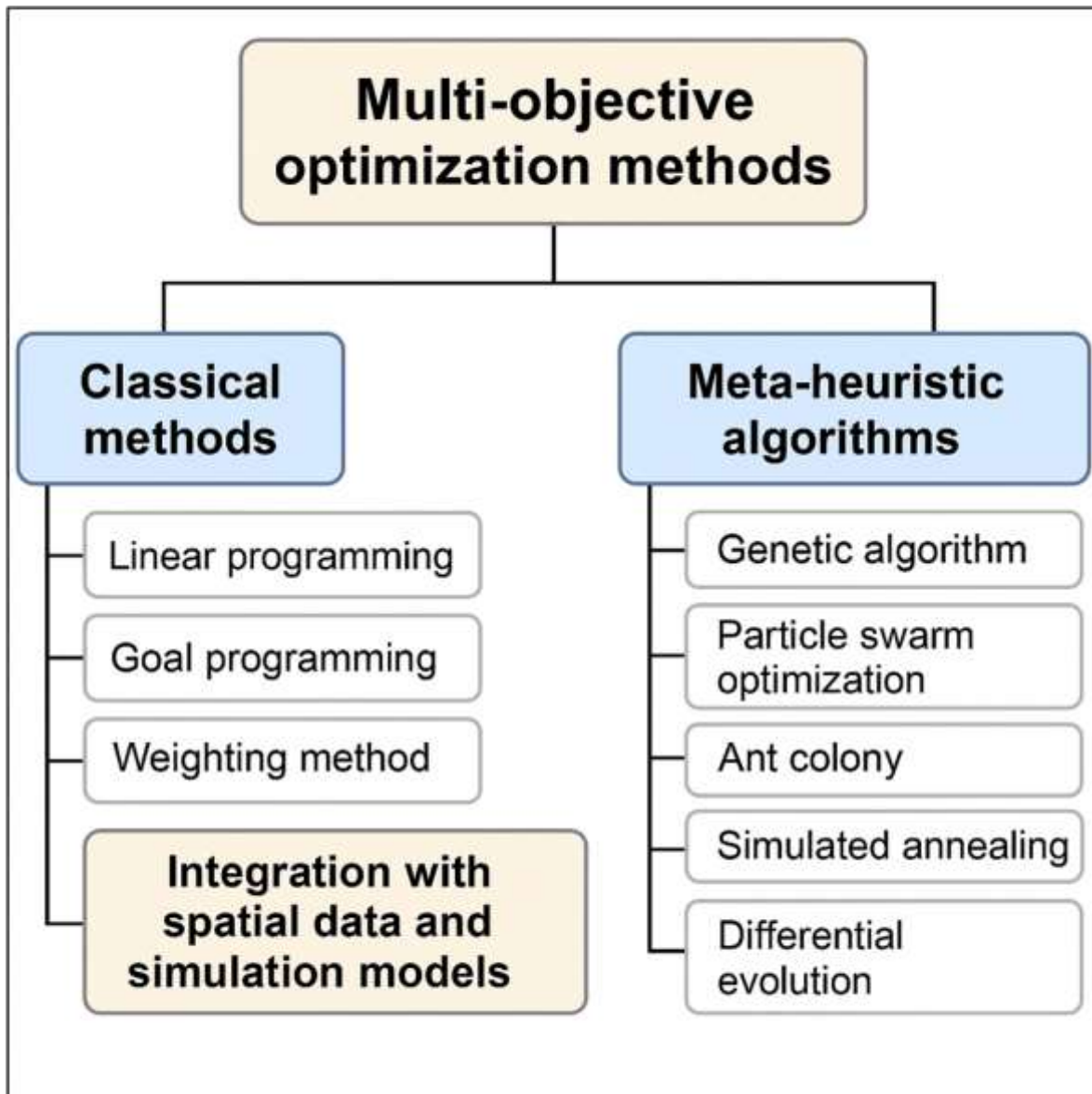
این الگوریتم‌ها، که عموماً الهام گرفته از فرآیندهای طبیعی هستند، انعطاف‌پذیری بالاتری برای حل مسائل پیچیده دارند. پرکاربردترین الگوریتم‌ها در این دسته عبارت‌اند از: الگوریتم ژنتیک<sup>۶</sup>، بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۷</sup>، الگوریتم مورچگان<sup>۸</sup>، شبیه‌سازی تبرید<sup>۹</sup> و تکامل تفاضلی<sup>۱۰</sup>. این روش‌ها قادرند در هر اجرا، مجموعه‌ای از سناریوهای بهینه (جبهه پارتو) تولید کنند، که تنوع مناسبی برای انتخاب گزینه نهایی در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار می‌دهند (Deb و همکاران، ۲۰۰۲).

## تلفیق با داده‌های مکانی و مدل‌های شبیه‌سازی

در مطالعات اخیر، استفاده از این الگوریتم‌ها در کنار سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مدل‌های شبیه‌سازی تغییرات کاربری زمین مانند مدل‌ساز تغییرات کاربری زمین<sup>۱۱</sup>، مدل شبیه‌سازی کاربری آینده

- 
1. Classical / Deterministic Methods
  2. Multi-Objective Linear Programming - MOLP
  3. Goal Programming - GP
  4. Weighted Sum Method
  5. Metaheuristic / Evolutionary Algorithms
  6. Genetic Algorithm - GA
  7. Particle Swarm Optimization - PSO
  8. Ant Colony Optimization - ACO
  9. Simulated Annealing - SA
  10. Differential Evolution - DE
  11. Land Change Modeler - LCM

زمین<sup>۱</sup> و مدل شبیه‌سازی کاربری زمین مبتنی بر تولید لکه<sup>۲</sup> رواج یافته است. این ترکیب، امکان ارزیابی هم‌زمان سناریوهای کاربری و مکان‌یابی بهینه آن‌ها را فراهم می‌سازد (Liu و همکاران، ۲۰۱۷). چنین رویکردهای ترکیبی، به‌ویژه در مدیریت حوزه‌های آبخیز که نیازمند تصمیم‌گیری چندمعیاره در فضای مکانی هستند، بسیار اثربخش بوده‌اند.



شکل ۱-۱- طبقه‌بندی روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه در برنامه‌ریزی کاربری اراضی (ترسیم: نویسندگان)

1. Future Land Use Simulation - FLUS
2. Patch-generating Land Use Simulation - PLUS

با توجه به چالش‌های روزافزون ناشی از کاربری ناپایدار اراضی در حوزه‌های آبخیز و ضرورت استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری علمی برای انتخاب الگوی بهینه بهره‌برداری از زمین، هدف از تدوین این اثر، مروری تحلیلی و کاربردی بر روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه در تخصیص کاربری اراضی است. این اثر تلاش می‌کند ضمن معرفی مفاهیم پایه، ساختار مدل‌ها و طبقه‌بندی روش‌های کلاسیک و فراابتکاری، قابلیت‌ها، محدودیت‌ها و کاربردهای هر رویکرد را در بستر مطالعات کاربری زمین و مدیریت منابع طبیعی بررسی کند. همچنین تلاش شده است تا مدیران و کارشناسان حوزه‌های آبخیزداری با معیارهایی برای انتخاب روش بهینه در شرایط مختلف آشنا شوند و بتوانند از یافته‌های این مرور در طراحی پروژه‌های تخصیص زمین، ارزیابی سناریوهای کاربری یا برنامه‌ریزی منطقه‌ای بهره‌گیرند. در نهایت، گزارش حاضر با هدف ارتقای تصمیم‌سازی آگاهانه، پیشنهادهایی را نیز برای کاربرد این روش‌ها در سطوح برنامه‌ریزی محلی و منطقه‌ای ارائه خواهد داد.

#### ۱-۴- برآیند مباحث فصل اول

بررسی محتوای ارائه‌شده نشان داد که تغییرات کاربری زمین در حوزه‌های آبخیز نتیجه مجموعه‌ای از پیشران‌های انسانی و محیطی است که اغلب به بروز ناپایداری‌های اکولوژیکی از جمله افزایش رواناب، تشدید فرسایش، تخریب پوشش گیاهی و کاهش خدمات اکوسیستمی منجر می‌شوند. اهمیت این موضوع زمانی برجسته می‌شود که بدانیم بسیاری از این حوزه‌ها، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک ایران، ظرفیت زیست‌محیطی محدودی دارند و هرگونه تصمیم‌گیری نادرست در کاربری اراضی می‌تواند اثرات بلندمدت و غیرقابل جبران به دنبال داشته باشد.

مرور مبانی نظری و چارچوب‌های مفهومی روشن ساخت که مدیریت کاربری زمین یک مسأله ذاتاً چندهدفه است؛ زیرا تصمیم‌گیری در این زمینه هم‌زمان بر ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اکولوژیکی اثر می‌گذارد. همچنین مشخص شد که رویکردهای سنتی تک‌هدفه توانایی مواجهه با تعارض‌ها و پیچیدگی‌های موجود را ندارند و برای تحلیل علمی و واقع‌بینانه این موضوع باید از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه و ابزارهای مدل‌سازی مکانی استفاده کرد. تعریف دقیق متغیرهای تصمیم، توابع هدف و قیود محیطی به‌عنوان عناصر

کلیدی هر مدل معتبر تخصیص زمین شناخته شد و مفهوم جبهه پارتو نیز به‌عنوان ابزاری برای نمایش راه‌حل‌های متعادل و قابل‌انتخاب اهمیتی ویژه پیدا کرد.

در مجموع، مباحث مطرح‌شده نشان داد که مدیریت اصولی کاربری اراضی نیازمند بهره‌گیری از رویکردهای تحلیلی، محاسباتی و چندمعیاره است. تکیه بر روش‌های علمی و داده‌محور می‌تواند امکان دستیابی به الگوهای تخصیص زمین را فراهم کند که ضمن سازگاری با محدودیت‌های محیطی، تعادل لازم میان بهره‌وری اقتصادی و پایداری اکولوژیکی را نیز برقرار سازند.

## فصل دوم: مرور و تحلیل الگوریتم‌های بهینه‌سازی منتخب در تخصیص کاربری اراضی

### ۲-۱- مقدمه‌ای بر کاربرد بهینه‌سازی در برنامه‌ریزی کاربری زمین

تخصیص بهینه کاربری اراضی<sup>۱</sup> به‌عنوان یکی از مسائل کلیدی مدیریت منابع طبیعی و توسعه پایدار، نقش اساسی در تعادل بین نیازهای انسانی و حفاظت اکوسیستم‌ها ایفا می‌کند. با افزایش جمعیت، رشد سریع شهرنشینی، تغییرات اقلیمی و محدودیت منابع خاک و آب، مدیریت اصولی کاربری زمین به یکی از دغدغه‌های اساسی دولت‌ها و مدیران منابع طبیعی تبدیل شده است. چالش‌هایی همچون گسترش بی‌رویه شهرها، کشاورزی فشرده، تخریب پوشش گیاهی و فرسایش خاک، نمونه‌هایی از تبعات تخصیص نامناسب اراضی هستند که در بسیاری از حوزه‌های آبخیز، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک و کوهستانی، شدت یافته‌اند (Stewart و همکاران، ۲۰۰۴؛ Foley و همکاران، ۲۰۰۵).

مدیریت کاربری اراضی مستقیماً بر فرایندهایی مانند کنترل سیلاب، کاهش فرسایش، حفظ تنوع زیستی، بهره‌وری اقتصادی و خدمات اکوسیستمی تاثیرگذار است. انتخاب الگوی بهینه کاربری زمین می‌تواند موجب بهبود معنادار بهره‌وری زمین، کاهش هزینه‌های مدیریتی و ارتقاء سطح پایداری منابع شود (Gashaw و همکاران، ۲۰۱۸) در مقابل، تصمیمات نامناسب و مبتنی بر ارزیابی‌های سنتی یا تک‌هدفه اغلب به تعارض میان ذی‌نفعان و بروز بحران‌های محیط‌زیستی و اقتصادی منجر می‌شود (Liu و همکاران، ۲۰۱۷).

در این راستا، توسعه و کاربرد مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه در مطالعات کاربری اراضی، امکان تحلیل علمی و نظام‌مند گزینه‌های مختلف تخصیص زمین را فراهم ساخته است. این مدل‌ها با در نظر گرفتن هم‌زمان اهداف گوناگون (مانند بیشینه‌سازی سود اقتصادی، کمینه‌سازی تخریب محیط‌زیست و افزایش کارایی اکولوژیکی) و محدودیت‌های موجود (شامل ویژگی‌های فیزیکی، بوم‌شناختی و اجتماعی) بستری را برای تولید سناریوهای عملی و قابل اجرا به وجود می‌آورند (Marle و Arora، ۲۰۰۴؛ Deb و همکاران، ۲۰۰۲).

الگوریتم‌ها و روش‌های بهینه‌سازی، بسته به ساختار و پیچیدگی مدل و اهداف پژوهش، می‌توانند کلاسیک (مانند برنامه‌ریزی خطی و آرمانی)، فراابتکاری (مانند الگوریتم ژنتیک یا NSGA-II، یا تلفیقی (ترکیب الگوریتم

<sup>۱</sup> . Land Use Optimization

با مدل‌های مکانی و شبیه‌سازی) باشند. اهمیت این رویکردها زمانی بیشتر می‌شود که داده‌های مکانی متنوع (نقشه‌های کاربری، خاک، شیب، هیدرولوژی و ...) و ذی‌نفعان متعدد با منافع و اولویت‌های متضاد در منطقه وجود داشته باشد.

شواهد مطالعات بین‌المللی و داخلی نشان می‌دهد که استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه در تصمیم‌سازی تخصیص زمین، نه تنها باعث افزایش اثربخشی مدیریتی و ارتقاء سطح پایداری می‌شود، بلکه امکان مقایسه سناریوهای مختلف و تحلیل تبعات تصمیمات را نیز فراهم می‌کند (Luan و همکاران، ۲۰۲۴؛ Liu و همکاران، ۲۰۱۷). برای مثال، می‌توان مدل‌هایی طراحی کرد که همزمان سطح درآمد کشاورزی، میزان فرسایش یا تغییر کاربری اراضی مرتعی و جنگلی را در حوزه‌های آبخیز شبیه‌سازی و بهینه کنند و نهایتاً جبهه‌ای از راه‌حل‌های غیرمغلوب برای انتخاب سیاستگذاران ارائه دهند.

در مجموع، بهینه‌سازی چندهدفه نه تنها رویکردی تکنیکی، بلکه ابزاری برای افزایش شفافیت، ارتقای تصمیم‌سازی، و کاهش تعارض میان اهداف اقتصادی و محیط‌زیستی در مدیریت سرزمین محسوب می‌شود. در ادامه این فصل، مفاهیم پایه و طبقه‌بندی روش‌ها و نیز رویکردهای رایج و الگوریتم‌های مهم در تخصیص بهینه کاربری اراضی با تأکید بر مطالعات آبخیزداری، مرور و تحلیل خواهد شد.

## ۲-۲- دسته‌بندی رویکردهای بهینه‌سازی در تخصیص کاربری اراضی

بهینه‌سازی تخصیص کاربری اراضی یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی فضایی به‌شمار می‌آید. این فرآیند به دلیل وجود اهداف متضاد (مانند منافع اقتصادی در مقابل حفاظت زیست‌محیطی)، داده‌های مکانی پیچیده و محدودیت‌های متعدد، نیازمند رویکردهای حل چندبعدی است (Stewart و همکاران، ۲۰۰۴؛ Ehr Gott، ۲۰۰۵).

براین اساس، سه دسته اصلی از روش‌های بهینه‌سازی در مطالعات علمی و پروژه‌های عملی مورد استفاده قرار می‌گیرند: روش‌های کلاسیک، روش‌های فراابتکاری و روش‌های ترکیبی (شکل ۱-۲). در ادامه، هر دسته با ویژگی‌ها، مزایا، محدودیت‌ها و مثال کاربردی در حوزه تخصیص کاربری اراضی توضیح داده می‌شود.

الف) روش‌های کلاسیک<sup>۱</sup>

روش‌های کلاسیک بر پایه مدل‌های ریاضی صریح و ساختار تحلیلی طراحی شده‌اند. این روش‌ها برای مسائلی مناسب هستند که ساختار ساده‌تری دارند، یا روابط میان متغیرها خطی یا پیوسته‌اند (Ehrgott, ۲۰۰۵).

از جمله مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به برنامه‌ریزی خطی چندهدفه (MOLP)، برنامه‌ریزی آرمانی (Goal Programming)، روش مجموع وزنی (Weighted Sum) و مدل تخصیص چندهدفه کاربری زمین (MOLA)<sup>۲</sup> اشاره کرد.

از مزایای این روش‌ها می‌توان به سادگی در پیاده‌سازی و شفافیت ریاضی، سرعت محاسبات بالا در مسائل کوچک و میان‌مقیاس و مناسب بودن برای تحلیل پروژه‌های دارای داده‌ها و اهداف محدود اشاره کرد (Ehrgott, ۲۰۰۵).

محدودیت‌ها شامل کاهش کارایی و انعطاف‌پذیری در مسائل بزرگ و پیچیده، عدم پوشش کامل جبهه پارتو در مسائل چندهدفه واقعی (Stewart و همکاران، ۲۰۰۴)، ناتوانی در مدل‌سازی قیود غیرخطی، فضایی و گسسته است.

## تجارب پیاده‌سازی در ایران:

در مطالعات منطقه‌ای و پروژه‌های پایلوت مدیریت منابع طبیعی کشور، از مدل‌های کلاسیک برای حوزه‌هایی با اهداف مشخص اقتصادی-زیست محیطی بهره گرفته شده است. برای نمونه، جلیلی و همکاران (۱۳۸۵) در حوزه آبخیز بریموند کرمانشاه، از برنامه‌ریزی خطی برای کمینه‌سازی فرسایش خاک استفاده کردند. ایشان با به‌کارگیری مدل MPSIAC و تحلیل‌های GIS نشان دادند که تغییر کاربری اراضی حساس به جنگل‌کاری و مرتع، می‌تواند تا ۳۰ درصد میزان فرسایش را کاهش داده و هم‌زمان با حفاظت از منابع، بازده اقتصادی را افزایش دهد.

<sup>۱</sup>. Deterministic/Traditional Methods

<sup>۲</sup>. Multi Objective Land Allocation

شایگان و همکاران (۱۳۹۲) در زیرحوضه کویین طالقان، با استفاده از مدل چندهدفه MOLA، بهترین ترکیب کاربری‌ها را استخراج کردند. این پژوهش نشان داد که مدل MOLA در مقایسه با روش‌های سنتی، دقت بالاتری در تعیین مناطق مناسب برای هر کاربری و کاهش تخریب محیط‌زیست ارائه می‌دهد.

وفاخواه و همکاران (۱۳۹۴) در بخشی از حوزه آبخیز طالقان با استفاده از نرم‌افزار ADBASE به بهینه‌سازی تخصیص اراضی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده کاهش معنی‌دار فرسایش از ۶/۲۸ به ۵/۸۴ تن در هکتار و بهبود سودآوری بود. در این مطالعه تبدیل اراضی دیم به زراعت آبی و باغ به‌عنوان استراتژی بهینه پیشنهاد شد.

هنربخش و همکاران (۱۳۹۶) در حوزه آبخیز چلگرد با تلفیق روش‌های برنامه‌ریزی آرمانی و تخصیص چندهدفه (MOLA)، موفق به ارائه مدلی شدند که سود را تا ۹۷ درصد افزایش و فرسایش را ۱۲ درصد کاهش داد. این مطالعه بر نقش مثبت افزایش سطح باغات و بیشه‌ها در پایداری اکوسیستم تأکید داشت.

یاراحمدی و همکاران (۱۳۹۷) در حوزه آبخیز اهرچای با بهره‌گیری از مدل برنامه‌ریزی خطی (روش سیمپلکس) و نرم‌افزار WinQSB، نشان دادند که اعمال مدیریت حفاظتی و توسعه باغات می‌تواند متوسط وزنی فرسایش خاک را حدود ۲۷ درصد کاهش داده و درآمد خالص منطقه را از ۳۱/۸ به ۵۰/۳ میلیون ریال در سال برساند.

رحیمی و همکاران (۱۴۰۰) در حوزه آبخیز چهل‌چای گلستان، از ارزیابی چندمعیاره (MCE) و تحلیل اقتصادی (B/C Ratio) در محیط نرم‌افزار TerrSet استفاده کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که کاربری‌های علوفه‌کاری و باغداری بیشترین تناسب و سودآوری اقتصادی (با نسبت سود به هزینه ۱۱/۳۹ برای باغداری) را در منطقه دارا هستند.

در مجموع، این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که مدل‌های کلاسیک نظیر برنامه‌ریزی خطی و MOLA، ابزارهایی کارآمد برای برقراری تعادل میان سود و حفاظت در سطح مدیریت محلی و پروژه‌های با پیچیدگی کمتر محسوب می‌شوند.

## ب) روش‌های فراابتکاری<sup>۱</sup>

روش‌های فراابتکاری با الهام از فرآیندهای طبیعی، تکاملی یا رفتار جمعی توسعه یافته‌اند و به دلیل توان بالای جستجو در فضای پیچیده و غیرخطی، برای مسائل بزرگ‌تر و داده‌های مکانی متنوع بسیار کاربرد دارند (Holland، ۱۹۹۲؛ Deb و همکاران، ۲۰۰۲). الگوریتم‌هایی مانند الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم ژنتیک غیرمغلوب (NSGA-II)، ازدحام ذرات (PSO) و مورچگان (ACO) در این دسته قرار می‌گیرند.

مزایای این روش‌ها شامل توانایی حل مسائل چندهدفه و تولید همزمان جبهه‌ای از راه‌حل‌های بهینه (Deb و همکاران، ۲۰۰۲)، انعطاف‌پذیری بالا در ترکیب با داده‌های مکانی و مدل‌های شبیه‌سازی و مناسب برای سناریونویسی و پروژه‌های سیاستی است.

از محدودیت‌های این روش‌ها می‌توان به احتمال گرفتادن در بهینه‌های محلی، نیاز به تنظیم پارامترها و محاسبات بیشتر و زمان محاسباتی زیاد برای مسائل با ابعاد بزرگ اشاره کرد. در پروژه‌های بزرگ‌تر یا مناطقی با اهداف و قیود پیچیده‌تر (مانند حوزه‌های آبخیز وسیع یا مناطق با کاربری‌های متنوع)، الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر ژنتیک (GA) و NSGA-II بسیار رایج هستند.

برای مثال، ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای در مناطق روستایی، کارایی الگوریتم ژنتیک (GA) را با مدل‌های سنتی مقایسه کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که الگوریتم ژنتیک با در نظر گرفتن متغیرهایی نظیر دسترسی به منابع و سازگاری فیزیکی، توانسته است کارایی تخصیص را در اراضی کشاورزی و مسکونی تا ۲۵ درصد نسبت به روش‌های سنتی بهبود بخشد و هم‌زمان پایداری اکوسیستم‌های جنگلی را حفظ نماید. شایگان و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از NSGA-II در حوزه طالقان، هم‌زمان اهداف اقتصادی (بیشینه‌سازی سود) و زیست‌محیطی (کمینه‌سازی فرسایش و افزایش تطبیق با تناسب اکولوژیکی) را بهینه‌سازی کردند و مجموعه‌ای از سناریوهای غیرمغلوب (جبهه پارتو) برای انتخاب تصمیم‌گیرندگان فراهم آوردند. همچنین، Luan و همکاران (۲۰۲۴) در یک مطالعه بین‌المللی با تلفیق الگوریتم NSGA-II و مدل PLUS، توانستند تخصیص بهینه کاربری زمین را در منطقه‌ای در چین شبیه‌سازی و ارزش خدمات اکوسیستمی را پیش‌بینی کنند (Luan و همکاران، ۲۰۲۴).

<sup>۱</sup>. Metaheuristic/Evolutionary Algorithms

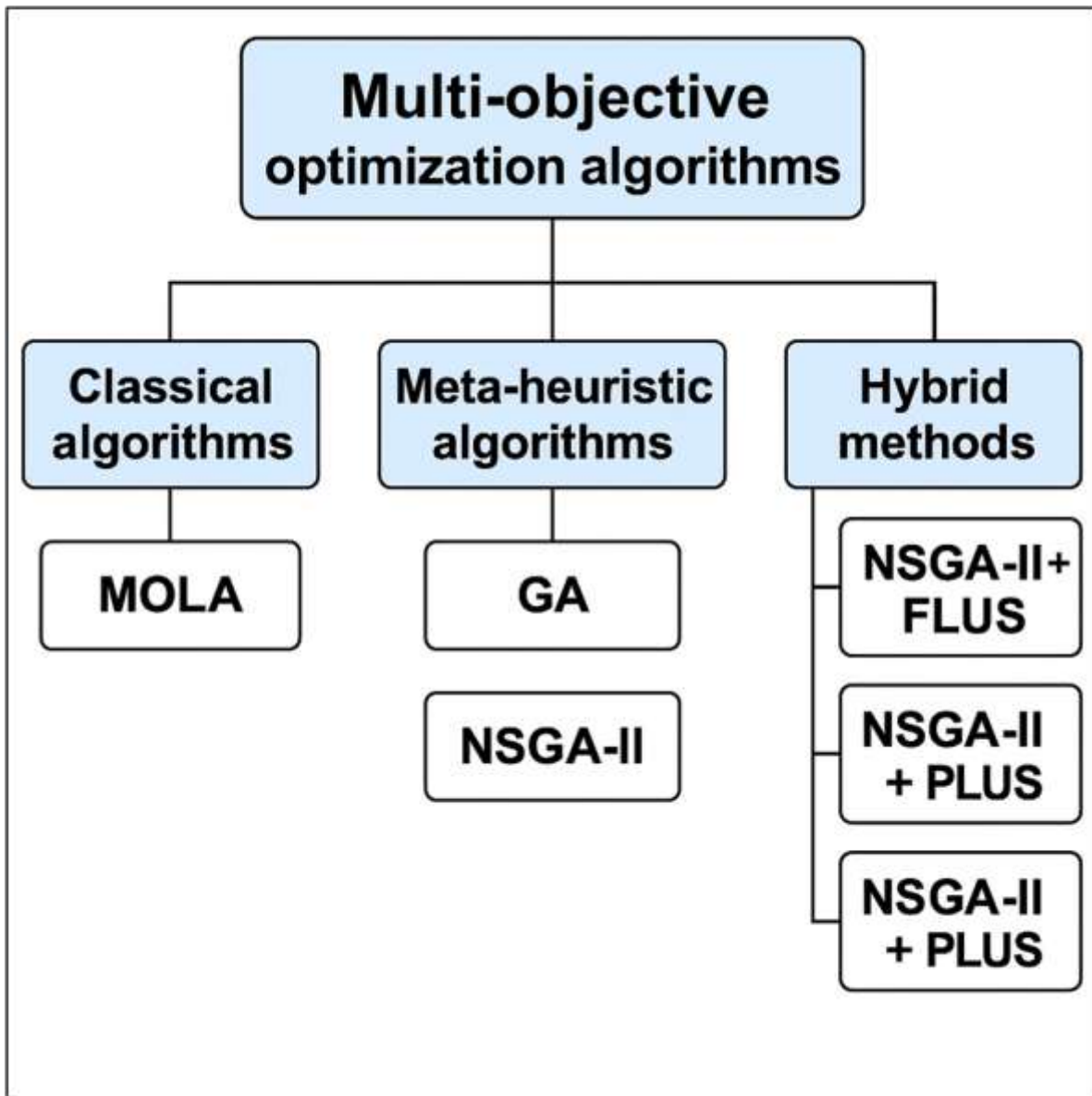
### ج) روش‌های ترکیبی<sup>۱</sup>

روش‌های ترکیبی به‌منظور بهره‌گیری همزمان از مزایای مدل‌سازی مکانی، شبیه‌سازی و قدرت بهینه‌سازی الگوریتم‌های تکاملی توسعه یافته‌اند (Liang و همکاران، ۲۰۲۰؛ Liu و همکاران، ۲۰۱۷). در این رویکردها، یک الگوریتم فراابتکاری (مانند NSGA-II یا GA) با مدل‌های شبیه‌سازی مکانی و سناریونویسی (مانند LCM، PLUS، FLUS یا ابزارهای GIS) ترکیب می‌شود.

مزایای این روش‌ها ادغام تحلیل مکانی و بهینه‌سازی برای سناریوهای واقع‌گرایانه، شبیه‌سازی تغییرات آینده و تولید نقشه‌های بهینه (Liang و همکاران، ۲۰۲۰)، قابلیت تصمیم‌سازی برای مدیریت اجرایی و سیاست‌گذاری سرزمین است. از محدودیت‌ها می‌توان به افزایش پیچیدگی محاسبات و نیاز به دانش تخصصی، حساسیت به کیفیت داده‌های مکانی و انتخاب مدل، زمان اجرای بالاتر نسبت به روش‌های منفرد اشاره کرد. در مطالعات پیشرفته و پروژه‌هایی با نیاز به پیش‌بینی سناریوهای آینده، رویکردهای ترکیبی بسیار پرکاربرد هستند. به‌عنوان مثال، Liang و همکاران (۲۰۲۰) با ترکیب مدل PLUS و الگوریتم‌های تکاملی، توانستند توزیع فضایی و تغییرات کاربری اراضی را در سطح حوزه آبخیز به‌طور همزمان بهینه‌سازی و شبیه‌سازی کنند. همچنین، Liu و همکاران (۲۰۱۷) مدل FLUS را توسعه دادند که از ترکیب داده‌های مکانی، عوامل انسانی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای شبیه‌سازی چندین سناریوی توسعه و مدیریت پایدار زمین بهره می‌گیرد.

---

<sup>۱</sup>. Hybrid/Integrated Approaches



شکل ۱-۲- دسته‌بندی الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه در تخصیص کاربری اراضی (ترسیم: نویسندگان)

این طبقه‌بندی سه‌گانه به تصمیم‌گیرندگان و پژوهشگران کمک می‌کند که متناسب با هدف، مقیاس، داده‌های در دسترس و پیچیدگی پروژه، مناسب‌ترین رویکرد یا ترکیب از روش‌ها را برای بهینه‌سازی تخصیص کاربری اراضی انتخاب کنند (Luan و همکاران، ۲۰۲۴؛ Ehrgott، ۲۰۰۵) همچنین، امکان ارتقاء دقت، واقع‌گرایی و کارایی تصمیم‌گیری در پروژه‌های مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی فضایی را افزایش می‌دهد.

## ۲-۳- معرفی و تحلیل الگوریتم‌های منتخب

### ۲-۳-۱- الگوریتم ژنتیک<sup>۱</sup>

#### معرفی و منطق کلی

الگوریتم ژنتیک (GA)، یکی از مهم‌ترین روش‌های فراابتکاری<sup>۲</sup> و مبتنی بر جمعیت برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، الهام‌گرفته از اصول تکامل زیستی، انتخاب طبیعی و ژنتیک کلاسیک است (Mitchell, ۱۹۹۸؛ Holland, ۱۹۹۲). ایده اصلی آن، شبیه‌سازی فرآیند انتخاب طبیعی و بقای اصلح، جستجوی تصادفی و تدریجی در فضای راه‌حل‌های ممکن با استفاده از عملگرهای انتخاب<sup>۳</sup>، ترکیب ژنتیکی<sup>۴</sup> و جهش<sup>۵</sup> است. این الگوریتم، به‌خصوص در مسائل تخصیص کاربری اراضی و برنامه‌ریزی منابع طبیعی به‌دلیل توانایی مدیریت داده‌های مکانی، اهداف متضاد و قیود پیچیده، بسیار کاربرد دارد (Liu و همکاران، ۲۰۱۷؛ Stewart و همکاران، ۲۰۰۴).

#### نحوه عملکرد در تخصیص کاربری زمین

در بهینه‌سازی تخصیص کاربری اراضی، هر راه‌حل (یا کروموزوم) معمولاً به‌صورت یک آرایه عددی تعریف می‌شود که هر عضو آن نمایانگر نوع کاربری تخصیص‌یافته به یک سلول یا واحد مکانی خاص است. جمعیت اولیه معمولاً به‌صورت تصادفی یا براساس اطلاعات پیشین ایجاد می‌شود.

در طول هر نسل، کروموزوم‌ها با ارزیابی چندین تابع هدف بررسی می‌شوند. سپس برترین راه‌حل‌ها براساس عملکرد، انتخاب و ترکیب شده و جهش می‌یابند تا نسل‌های جدیدی از سناریوهای تخصیص تولید شود. این فرآیند تکرار می‌شود تا جبهه‌ای از راه‌حل‌های غیرمغلوب و متنوع تولید شود.

---

1. Genetic Algorithm – GA

2. Metaheuristic

3. Selection

4. Crossover

5. Mutation

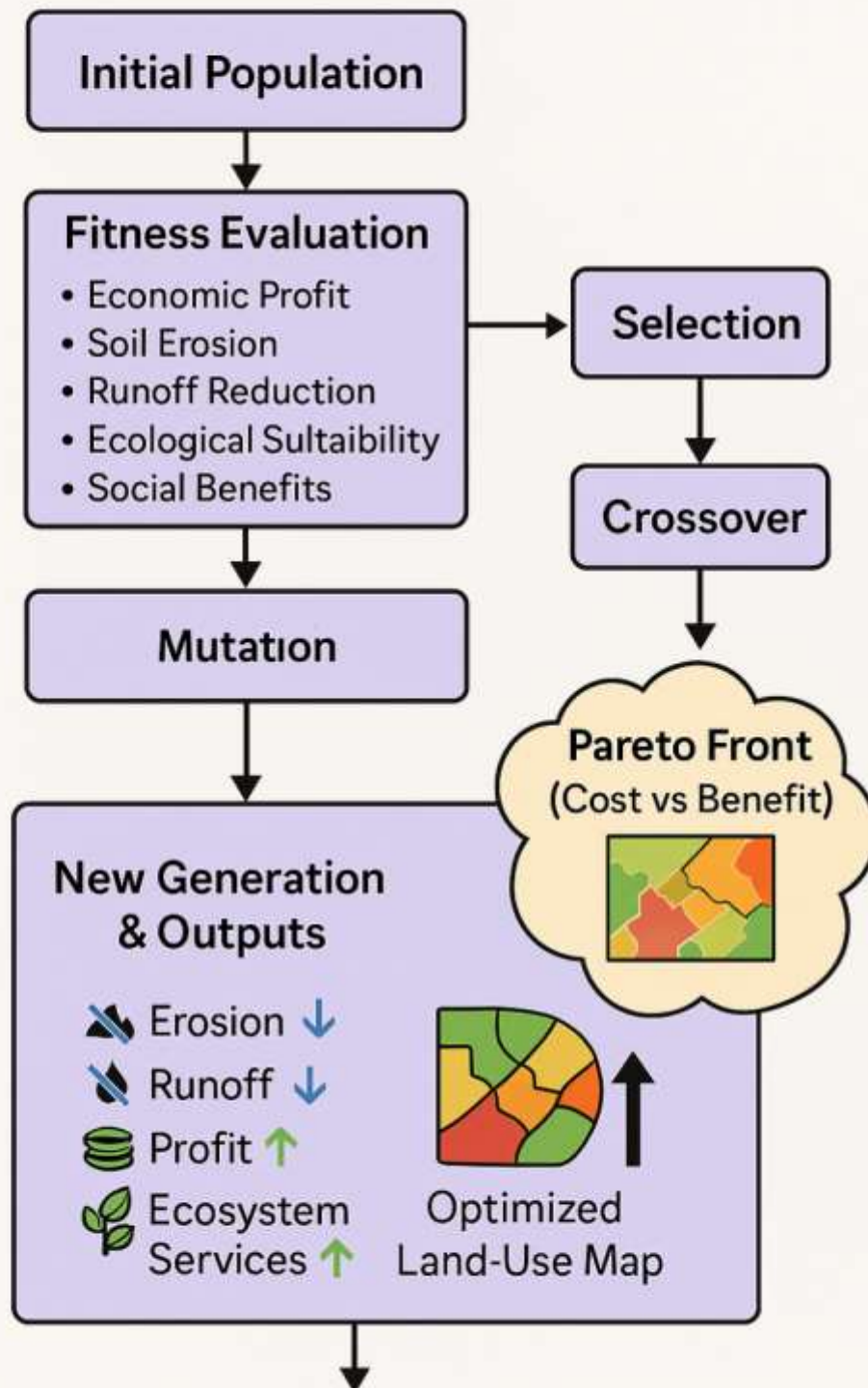
## توابع هدف متنوع در کاربری زمین:

اهداف بهینه‌سازی کاربری اراضی می‌توانند بسیار متنوع باشند و براساس شرایط منطقه و سیاست‌های مدیریتی تعریف شوند. یکی از این اهداف، بهینه‌سازی سود اقتصادی است که از طریق افزایش درآمد حاصل از کشاورزی، باغداری، دامداری یا کاربری‌های شهری دنبال می‌شود (Stewart و همکاران، ۲۰۰۴). کمینه‌سازی فرسایش خاک نیز با هدف کاهش خروج رسوب یا جلوگیری از تخریب اراضی مطرح است (شایگان و همکاران، ۱۳۹۱).

علاوه‌براین، کمینه‌سازی رواناب سطحی با کاهش پیک سیلاب و افزایش نفوذپذیری آب، به مدیریت پایدار منابع آب کمک می‌کند. هدف دیگر، بهینه‌سازی تطابق کاربری با تناسب اکولوژیکی است که شامل ارزیابی همخوانی هر کاربری با پتانسیل خاک، شیب، اقلیم و سایر ویژگی‌های محیطی می‌شود (Liu و همکاران، ۲۰۱۷).

در بسیاری از مطالعات، بهینه‌سازی ارزش خدمات اکوسیستمی نیز مدنظر قرار می‌گیرد تا حفاظت از تنوع زیستی، ارتقاء کربن‌گیری و بهبود کیفیت زیست‌محیطی تضمین شود (Costanza و همکاران، ۲۰۱۷). از سوی دیگر، کمینه‌سازی هزینه تغییر کاربری یا توسعه زیرساخت به‌ویژه در مناطق دارای محدودیت منابع و هزینه‌های بالای تبدیل زمین اهمیت دارد. نهایتاً، بهینه‌سازی شاخص‌های اجتماعی مانند حفظ اشتغال روستایی، کاهش مهاجرت یا ارتقای رفاه جمعیتی نیز می‌تواند بخشی از اهداف باشد (Li و همکاران، ۲۰۲۳). بسته به اهداف مدیریتی و داده‌های در دسترس، هر یک از این توابع هدف را می‌توان به‌صورت مستقل یا ترکیبی در چارچوب الگوریتم ژنتیک تعریف و به‌کار گرفت.

# Genetic Algorithm



شکل ۲-۲- منطق عملکرد الگوریتم ژنتیک (GA) در بهینه‌سازی چندهدفه کاربری اراضی (ترسیم: نویسندگان)

## مزایا و محدودیت‌ها

مزایای این روش شامل توانایی حل مسائل با داده‌های مکانی، اهداف متنوع و قیود پیچیده یا غیرخطی است (Stewart و همکاران، ۲۰۰۴؛ Holland، ۱۹۹۲). همچنین امکان به‌کارگیری همزمان چندین تابع هدف و قیود فضایی-محیطی وجود دارد (Mitchell، ۱۹۹۸) و می‌توان جبهه‌ای از راه‌حل‌های متنوع (Pareto front) را برای تصمیم‌گیری آگاهانه تولید کرد (Deb و همکاران، ۲۰۰۲). از دیگر مزایا، قابلیت ادغام با داده‌های GIS و سنجش‌ازدور برای استفاده در پروژه‌های واقعی است (Liu و همکاران، ۲۰۱۷). باین‌حال، این روش محدودیت‌هایی نیز دارد از جمله نیاز به تنظیم دقیق پارامترها مانند اندازه جمعیت، نرخ جهش، نرخ ترکیب و معیار توقف (Mitchell، ۱۹۹۸)، احتمال گیر افتادن در بهینه‌های محلی که ممکن است نیاز به افزایش تعداد تکرارها داشته باشد (Holland، ۱۹۹۲)، افزایش زمان اجرا و هزینه محاسباتی با رشد مقیاس و ابعاد پروژه (Stewart و همکاران، ۲۰۰۴) و در برخی موارد وابستگی نتایج به مقداردهی اولیه جمعیت وجود دارد (Mitchell، ۱۹۹۸).

## مثال‌های کاربردی در پروژه‌های آبخیز و منابع طبیعی

در مطالعات جدیدتر، الگوریتم ژنتیک با داده‌های GIS و شاخص‌های خدمات اکوسیستمی ترکیب شده تا تصمیم‌گیرندگان بتوانند همزمان سناریوهای محیطی، اقتصادی و اجتماعی را ارزیابی کنند (Liu و همکاران، ۲۰۱۷).

Stewart و همکاران (۲۰۰۴)، در مطالعه خود در منطقه Jisperveld هلند، یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک را برای برنامه‌ریزی کاربری اراضی توسعه دادند. سه هدف اصلی شامل بیشینه‌سازی ارزش طبیعی اراضی، بیشینه‌سازی ارزش تفریحی و کمینه‌سازی هزینه تغییر کاربری زمین در نظر گرفته شد. الگوریتم با استفاده از داده‌های مکانی و قیود مشخص سناریوهای متنوعی از تخصیص زمین را تولید کرد که امکان انتخاب میان گزینه‌های اقتصادی‌تر و گزینه‌های با حفاظت بالاتر از محیط زیست را برای مدیران فراهم کرد. نسخه بومی‌سازی شده این رویکرد برای ایران می‌تواند در حوزه‌های آبخیز کشاورزی

با اهدافی همچون کاهش هزینه تغییر کاربری، کاهش فرسایش خاک، بهبود پوشش گیاهی، و ارتقاء ارزش‌های اجتماعی - تفریحی به کار رود.

Mansor و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعه‌ای بر روی حوزه آبخیز مندرجان (بخشی از حوضه زاینده‌رود در استان اصفهان)، یک مدل مکانی- فضایی<sup>۱</sup> (مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندعاملی) را برای بهینه‌سازی تناسب کاربری اراضی کشاورزی توسعه دادند. هدف پژوهش، ایجاد چارچوبی برای مدیریت پایدار زمین از طریق در نظر گرفتن هم‌زمان معیارهای زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی بود. در گام نخست، تناسب اراضی برای سه محصول اصلی منطقه یعنی گندم، سیب‌زمینی و بادام براساس چارچوب ارزیابی تناسب زمین سازمان خواروبار و کشاورزی ملل متحد (FAO، ۱۹۷۶) تعیین شد. سپس میزان فرسایش خاک با استفاده از مدل<sup>۲</sup> (EPM) برآورد شد و هزینه‌های اقتصادی ناشی از آن محاسبه شد. در کنار این شاخص زیست‌محیطی، سود اقتصادی محصولات نیز براساس داده‌های محلی به دست آمد و به‌عنوان تابع هدف اقتصادی وارد مدل شد. برای تحلیل و تصمیم‌گیری، سه سناریوی اصلی تعریف شد. در سناریوی اول، الگوی کاربری موجود در منطقه به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شد تا عملکرد فعلی زمین‌ها ارزیابی شود. در سناریوی دوم، هدف بر این بود که بیشترین سطح اراضی به محصولات دارای بالاترین تناسب اکولوژیکی، به‌ویژه کشاورزی آبی، اختصاص داده شود. در نهایت، سناریوی سوم بر توسعه کشت بادام در اراضی شیب‌دار تمرکز داشت، زیرا بادام به‌عنوان محصولی مقاوم به شرایط محیطی سخت شناخته شد و می‌توانست هم سود اقتصادی بالایی ایجاد کند و هم فشار فرسایشی کمتری نسبت به سایر محصولات داشته باشد. نتایج پژوهش نشان داد که ترکیب الگوریتم ژنتیک با داده‌های مکانی- فضایی توانست الگوهای بهینه‌ای از تخصیص زمین ارائه دهد. این الگوها هم‌زمان موجب افزایش سود اقتصادی کشاورزان و کاهش هزینه‌های ناشی از فرسایش خاک شدند. نویسندگان تأکید کردند که توسعه کشت بادام در اراضی پرشیب، گزینه‌ای پایدار و کارآمد برای مدیریت حوزه آبخیز مندرجان است. این مطالعه بیانگر آن است که مدل‌های مکانی- فضایی ترکیب‌شده با الگوریتم‌های فراابتکاری می‌توانند

1. Geospatial Model

2. Erosion Potential Method

ابزار قدرتمندی برای برنامه‌ریزی کاربری اراضی و کشاورزی پایدار در ایران و سایر کشورهایی با شرایط مشابه باشند.

سدیدی و همکاران (۱۳۹۶) در مطالعه‌ای بر روی بخشی از حوزه آبخیز طالقان در استان البرز، یک مدل توسعه‌یافته مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه را برای تغییر بهینه کاربری اراضی طراحی و اجرا کردند. هدف اصلی آن‌ها ایجاد تعادلی میان افزایش منفعت اقتصادی، ارتقای سازگاری اکولوژیکی کاربری‌ها و کاهش دشواری تغییر کاربری‌ها بود تا چارچوبی یکپارچه برای مدیریت پایدار زمین ارائه دهند. در این پژوهش، داده‌های مکانی از تصاویر ماهواره‌ای لندست و لایه‌های زمین‌شناسی، خاک، شیب و کاربری موجود استخراج شد. برای تعیین اهمیت نسبی شاخص‌ها، از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)<sup>۱</sup> استفاده شد. سه تابع هدف اصلی مدل شامل منفعت اقتصادی، سازگاری کاربری‌ها و دشواری تغییر کاربری تعریف شد. الگوریتم ژنتیک چندهدفه این توابع هدف را همزمان بهینه‌سازی کرد و قیود مکانی و اکولوژیکی نیز در فرآیند محاسبات در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که مدل توانست مجموعه‌ای از راه‌حل‌های غیرمغلوب تولید کند که سناریوهای متنوعی از تغییر کاربری‌ها را پوشش می‌داد. در بهترین حالت، منفعت اقتصادی منطقه حدود ۴۸ درصد افزایش یافت، در حالی که سطح سازگاری کاربری‌ها بهبود چشمگیری پیدا کرد و میزان دشواری تغییر کاربری‌ها کاهش یافت. الگوهای جدید علاوه بر افزایش کارایی اقتصادی، از نظر پیوستگی و قابلیت اجرا نیز واقع‌بینانه‌تر بودند و توانستند تعادل مناسبی بین اهداف اقتصادی و محیطی برقرار سازند. نویسندگان نتیجه گرفتند که الگوریتم ژنتیک چندهدفه ابزاری قدرتمند برای حل مسائل پیچیده تغییر کاربری اراضی است. این مدل توسعه‌یافته می‌تواند به مدیران کمک کند تا الگوهای پایدار و قابل اجرا برای مدیریت تغییرات کاربری تدوین نمایند. همچنین پیشنهاد شد که در آینده، این مدل با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری مانند NSGA-II و PSO<sup>۲</sup> مقایسه شود تا نقاط قوت و ضعف آن دقیق‌تر ارزیابی شود.

Wang و همکاران (۲۰۱۸) در حوزه آبخیز Xiangxi در چین، الگوریتم را در ترکیب با مدل CLUE-S<sup>۳</sup>

برای پیش‌بینی تغییرات کاربری و مدل SWAT<sup>۴</sup> برای ارزیابی اثرات هیدرولوژیکی و آلودگی غیرنقطه‌ای به کار

1. Analytic Hierarchy Process

2. Particle Swarm Optimization

3. Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent

4. Soil and Water Assessment Tool

بردند. هدف اصلی این پژوهش، بهینه‌سازی الگوی کاربری زمین به منظور کنترل بار فسفر آلی و معدنی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و دامداری بود. نتایج نشان داد که در سناریوی مبتنی بر روند تاریخی (پیش‌بینی زنجیره مارکوف)، تا سال ۲۰۲۰ سطح جنگل بیش از ۲۰۰۰ هکتار کاهش و زمین‌های دیم افزایش یافت. در حالی که در سناریوی بهینه‌سازی شده با الگوریتم ژنتیک، بیش از ۳۳۰۰ هکتار زمین دیم به جنگل تبدیل شد و سطح جنگل حدود ۳۸۰۰ هکتار افزایش یافت. این تغییرات عمدتاً در مناطق شمال غرب و جنوب شرق حوزه رخ داد که دارای شیب‌های تند و حساسیت بالای فرسایشی بودند. براساس شبیه‌سازی‌های مدل SWAT، سناریوی بهینه منجر به کاهش ۳/۶ درصدی فسفر آلی و ۳/۷ درصدی فسفر معدنی در مقایسه با سناریوی روند تاریخی شد. توزیع مکانی نتایج نشان داد که بیشترین کاهش آلودگی در زیرحوضه‌های دارای اراضی دیم و شالیزار با شیب تند و فاصله زیاد از مراکز شهری رخ داده است. این مطالعه نشان داد که ترکیب الگوریتم ژنتیک با مدل‌های CLUE-S و SWAT می‌تواند ابزاری کارآمد برای پشتیبانی از برنامه‌ریزی آینده کاربری زمین و کنترل آلودگی‌های غیرنقطه‌ای در حوزه‌های آبخیز باشد. نویسندگان تأکید کردند که کاهش زمین‌های کشاورزی در مناطق شیب‌دار و جایگزینی آن با جنگل می‌تواند به‌طور مؤثری در بهبود کیفیت آب و کاهش بار رسوب و آلاینده‌ها نقش داشته باشد. این مثال‌ها نشان می‌دهند که الگوریتم ژنتیک ابزاری انعطاف‌پذیر و قدرتمند برای تخصیص بهینه کاربری زمین در پروژه‌های آبخیز و منابع طبیعی است و می‌تواند اهداف چندگانه و گاه متضاد را در قالب یک چارچوب منسجم مدیریت کند.

## ۲-۳-۲- الگوریتم ژنتیک غیرمغلوب<sup>۱</sup>

### معرفی و منطق کلی

الگوریتم ژنتیک غیرمغلوب (NSGA-II) یکی از پیشرفته‌ترین و پرکاربردترین الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است که توسط Deb و همکاران (۲۰۰۲) توسعه یافت. این الگوریتم علاوه بر سازوکار انتخاب طبیعی و جهش، از مرتب‌سازی غیرمغلوب و حفظ تنوع جمعیت بهره می‌برد تا مجموعه‌ای

<sup>۱</sup>. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

از گزینه‌های کارا را که در آن‌ها بهبود یک هدف با کاهش کارایی در هدف دیگر همراه است، استخراج کند (Coello و همکاران، ۲۰۰۷؛ Deb و همکاران، ۲۰۰۲).

در NSGA-II، برخلاف بسیاری از روش‌های کلاسیک که صرفاً یک راه‌حل ارائه می‌دهند، هدف ارائه جبهه‌ای از سناریوهای متعادل است؛ به گونه‌ای که مدیر یا تصمیم‌گیرنده می‌تواند متناسب با سیاست و نیاز خود، راه‌حل مطلوب را از میان گزینه‌هایی با وزن‌دهی متفاوت اهداف انتخاب کند. برای این منظور، الگوریتم جمعیت اولیه را به جبهه‌هایی براساس میزان غیرمغلوب بودن تقسیم‌بندی کرده و با معیار فاصله ازدحامی<sup>۱</sup> تنوع راه‌حل‌ها را حفظ می‌کند و از همگرایی زودرس به یک نقطه خاص جلوگیری به عمل می‌آورد (Deb و همکاران، ۲۰۰۲).

#### کاربرد در تخصیص کاربری زمین و ساختار الگوریتم

در پروژه‌های تخصیص کاربری اراضی، هر راه‌حل در NSGA-II بیانگر یک سناریوی تخصیص برای تمام واحدهای مکانی منطقه مورد مطالعه است. جمعیت اولیه معمولاً با استفاده از روش‌های تصادفی یا مبتنی بر تجربه تولید می‌شود و با تکرار مراحل انتخاب، ترکیب و جهش، نسل‌های جدیدی از راه‌حل‌ها تولید می‌شوند. در هر نسل، جمعیت براساس جبهه غیرمغلوب مرتب شده و راه‌حل‌هایی که هیچ‌یک در همه اهداف بر دیگری برتری مطلق ندارند، در جبهه اول (Pareto front) قرار می‌گیرند (Coello و همکاران، ۲۰۰۷؛ Deb و همکاران، ۲۰۰۲).

#### توابع هدف متنوع در کاربری زمین:

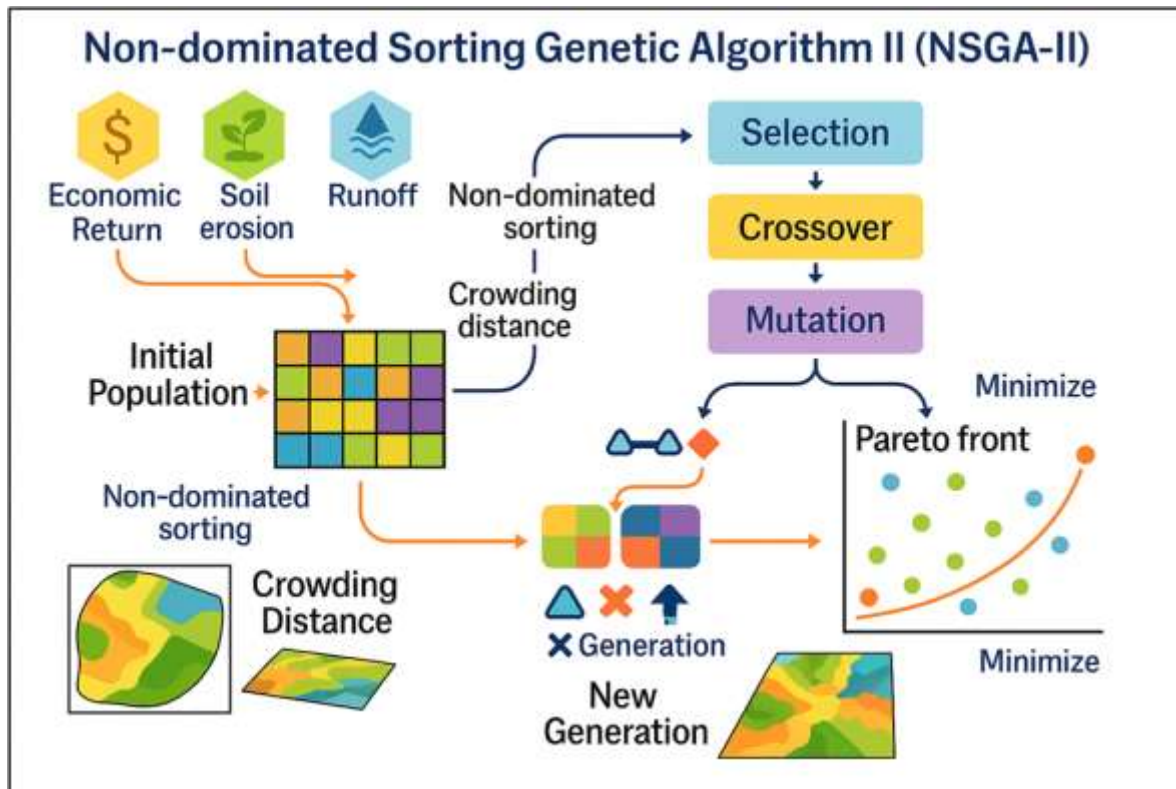
نمونه‌های متعددی از اهداف را می‌توان در مدیریت کاربری اراضی تعریف کرد که هر یک متناسب با شرایط منطقه و اولویت‌های مدیریتی اهمیت خاصی دارند. یکی از این اهداف، افزایش سود اقتصادی است که از طریق ارتقای درآمد حاصل از زمین‌های کشاورزی، باغات یا توسعه فعالیت‌های شهری محقق می‌شود (Stewart و

<sup>1</sup>. Crowding Distance

همکاران، ۲۰۰۴). در کنار آن، کاهش فرسایش خاک و رواناب نیز از اهداف کلیدی به شمار می‌رود و این امر با افزایش پوشش گیاهی و مدیریت بهینه کاربری‌ها امکان‌پذیر است (شایگان و همکاران، ۱۳۹۲).

بعد دیگر اهداف، توجه به خدمات اکوسیستمی است که شامل حفاظت از تنوع زیستی، ارتقای کیفیت زیست‌محیطی و تقویت نقش منطقه در چرخه کربن می‌شود (Costanza و همکاران، ۲۰۱۷) همچنین، افزایش تطابق کاربری‌ها با ظرفیت اکولوژیک اهمیت زیادی دارد؛ چرا که تناسب هر کاربری با شرایط خاک، شیب، اقلیم و دسترسی به منابع طبیعی می‌تواند تعیین‌کننده موفقیت برنامه‌های بلندمدت باشد (Liu و همکاران، ۲۰۱۷).

از جنبه اقتصادی و زیرساختی، کاهش هزینه‌های تغییر کاربری یا توسعه زیرساخت‌ها به‌ویژه در مناطق دارای محدودیت منابع، یکی دیگر از اهداف اساسی محسوب می‌شود (Wang و همکاران، ۲۰۱۸). افزون بر این، توجه به شاخص‌های اجتماعی مانند تثبیت جمعیت روستایی یا کاهش مهاجرت می‌تواند سبب پایداری جوامع محلی و پذیرش اجتماعی طرح‌ها شود (Luan و همکاران، ۲۰۲۴). در نهایت، در هر پروژه بسته به سیاست‌های منطقه‌ای و اهداف برنامه‌ریزی، می‌توان ترکیب یا اولویت‌دهی اهداف را متناسب با نیاز تغییر داد. این انعطاف‌پذیری سبب شده است که الگوریتم NSGA-II در مطالعات پیشرفته مدیریت زمین و آبخیزداری جایگاه ویژه‌ای پیدا کند.



شکل ۲-۳- منطق عملکرد الگوریتم ژنتیک غیرمغلوب (NSGA-II) در بهینه‌سازی چندهدفه (ترسیم: نویسندگان)

#### مزایا و محدودیت‌ها

یکی از مهم‌ترین مزایای به‌کارگیری الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه، به‌ویژه NSGA-II، توانایی تولید هم‌زمان مجموعه‌ای متنوع از سناریوهای غیرمغلوب و متعادل یا همان جبهه پارتو است. (Deb و همکاران، ۲۰۰۲؛ Luan و همکاران، ۲۰۲۴). این ویژگی موجب می‌شود که تصمیم‌گیرندگان و مدیران منابع طبیعی بتوانند در میان گزینه‌های متعدد، انتخاب آگاهانه‌تر و متناسب‌تری با شرایط پروژه داشته باشند (Coello و همکاران، ۲۰۰۷). چنین رویکردی به‌ویژه در پروژه‌هایی که با اهداف متضاد، قیود پیچیده و داده‌های مکانی متنوع سروکار دارند، کارآمدی بالایی نشان می‌دهد (Liu و همکاران، ۲۰۱۷). افزون بر این، امکان ادغام این الگوریتم‌ها با مدل‌های مکانی نظیر GIS، FLUS و PLUS قابلیت شبیه‌سازی تغییرات فضایی و زمانی را فراهم ساخته و ارزش کاربردی آن‌ها را در حوزه مدیریت کاربری اراضی افزایش می‌دهد (Liu و همکاران، ۲۰۱۷). با این وجود، این روش‌ها با محدودیت‌هایی نیز مواجه‌اند. از جمله می‌توان به نیاز به زمان محاسباتی قابل توجه در پروژه‌های بزرگ و با داده‌های حجیم اشاره کرد (Deb و همکاران، ۲۰۰۲). همچنین، عملکرد آن‌ها به میزان زیادی به تنظیم دقیق پارامترهای الگوریتمی همچون اندازه جمعیت و نرخ جهش وابسته است (Coello و همکاران، ۲۰۰۲).

همکاران، ۲۰۰۷). کیفیت نتایج به‌طور مستقیم تحت تأثیر تعریف صحیح اهداف، قیود و جمعیت اولیه قرار دارد (Liu و همکاران، ۲۰۱۷) و در شرایطی که داده‌ها یا مدل‌های محیطی با عدم قطعیت بالا همراه باشند، حساسیت نتایج افزایش می‌یابد (Luan و همکاران، ۲۰۲۴).

#### نمونه‌های کاربردی در مطالعات مدیریت زمین و آبخیز

شایگان و همکاران (۱۳۹۱) در مطالعه خود در حوضه طالقان، الگوریتم NSGA-II را به‌عنوان یکی از قدرتمندترین روش‌های فراابتکاری برای بهینه‌سازی چندهدفه تخصیص کاربری اراضی به‌کار گرفتند. در این پژوهش، دو هدف اصلی شامل بیشینه‌سازی یکپارچگی فضایی کاربری‌ها<sup>۱</sup> و کمینه‌سازی هزینه توسعه و تغییر کاربری<sup>۲</sup> تعریف شد. مدل با استفاده از داده‌های مکانی و قیود مشخص، در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی پیاده‌سازی شد و از ساختار شبکه سلولی برای نمایش و بهینه‌سازی کاربری‌ها بهره گرفته شد. خروجی مدل، مجموعه‌ای از سناریوهای بهینه در قالب جبهه پارتو بود که امکان انتخاب میان سناریوهای اقتصادی‌تر با یکپارچگی کمتر و سناریوهای زیست‌محیطی‌تر با هزینه بالاتر را برای مدیران فراهم می‌کرد. نویسندگان نتیجه گرفتند که این چارچوب قابلیت بالایی برای استفاده در برنامه‌ریزی کاربری اراضی حوزه‌های آبخیز ایران، به‌ویژه در مناطقی با محدودیت منابع و نیاز به یکپارچگی فضایی دارد.

متکان و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعه‌ای بر روی حوزه آبخیز رودبار کرمان، الگوریتم NSGA-II را برای بهینه‌سازی چندهدفه تخصیص کاربری اراضی به‌کار گرفتند. این پژوهش با هدف ارائه چارچوبی علمی برای مدیریت پایدار منابع طبیعی انجام شد و در آن چندین تابع هدف در نظر گرفته شد که شامل کاهش فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE، افزایش سود اقتصادی اراضی بر پایه ارزش اقتصادی کاربری‌های کشاورزی، باغی و سایر فعالیت‌ها، ارتقای تناسب اکولوژیکی کاربری‌ها متناسب با پتانسیل‌های خاک، شیب و اقلیم منطقه و همچنین بهبود یکپارچگی فضایی برای کاهش پراکندگی و افزایش پیوستگی کاربری‌ها بود. نتایج نشان داد که اجرای مدل NSGA-II توانست مجموعه‌ای از راه‌حل‌های غیرمغلوب تولید کند که طیفی از سناریوهای

1. Urban Compactness

2. Total Development Cost

مدیریتی را دربر می‌گرفت. در مقایسه با وضعیت موجود، فرسایش خاک حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد کاهش و سود اقتصادی حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد افزایش یافت. همچنین، شاخص تناسب اکولوژیکی کاربری‌ها ارتقاء یافت و الگوی مکانی اراضی به شکل معناداری یکپارچه‌تر شد. نویسندگان نتیجه گرفتند که الگوریتم‌های فراابتکاری در ترکیب با GIS می‌توانند ابزار قدرتمندی برای حل مسائل پیچیده تخصیص کاربری اراضی باشند و چارچوب ارائه‌شده قابلیت تعمیم به سایر حوزه‌های آبخیز کشور را دارد.

Luan و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی جامع در چین، با بهره‌گیری از مدل ترکیبی NSGA-II و PLUS، به بهینه‌سازی چندهدفه کاربری زمین با هدف دستیابی به توسعه‌ای متوازن و پایدار پرداختند. پژوهشگران با تمرکز بر چالش‌های ناشی از صنعتی‌شدن و رشد سریع شهرنشینی، پیامدهای منفی بهره‌برداری بی‌رویه از زمین و تخریب محیط‌زیست را بررسی کرده و تلاش نمودند الگویی ارائه دهند که میان منافع اقتصادی و ملاحظات زیست‌محیطی تعادل برقرار کند. در این چارچوب، مدل NSGA-II برای بهینه‌سازی ساختار کمی کاربری زمین و مدل PLUS برای شبیه‌سازی فضایی تغییرات کاربری به‌کار گرفته شد. ترکیب این دو مدل، امکان تحلیل دقیق تغییرات آبی در الگوهای استفاده از زمین و پیش‌بینی ارزش خدمات اکوسیستمی را در قالب سناریوهای گوناگون توسعه فراهم ساخت. چهار سناریو شامل توسعه بی‌رویه، اولویت اقتصادی، تعادل میان توسعه اقتصادی و حفاظت زیست‌محیطی، و اولویت اکولوژیکی بررسی شدند. نتایج نشان داد که هر سناریو آثار متفاوتی بر شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی دارد، اما سناریوی تعادل توانست بیشترین هماهنگی را میان این دو حوضه ایجاد کند. در نهایت، پژوهش نشان داد که مدل یکپارچه NSGA-II-PLUS ابزاری کارآمد و کاربردی برای تصمیم‌گیری در زمینه مدیریت بهینه زمین است و می‌تواند در کاهش تعارضات میان توسعه اقتصادی و حفاظت از محیط‌زیست، نقش مؤثری ایفا کند.

در مجموع، الگوریتم NSGA-II نه تنها در مطالعات موردی حوزه‌های آبخیز و مناطق شهری برای طراحی سناریوهای توسعه اقتصادی و حفاظت اکولوژیکی به‌کار گرفته شده است، بلکه در پروژه‌های برنامه‌ریزی منابع طبیعی در ایران و دیگر کشورها، نیز به‌عنوان ابزاری تحلیلی مؤثر عمل می‌کند. این الگوریتم امکان استخراج جبهه پارتو، ارزیابی پیامدهای سیاست‌های مختلف و ارائه گزینه‌های پایدار مدیریتی را فراهم ساخته و به

همین دلیل جایگاه ویژه‌ای در مدیریت زمین و آبخیزداری یافته است (شایگان و همکاران، ۱۳۹۱؛ شایگان و همکاران، ۱۳۹۴؛ Liu و همکاران، ۲۰۱۷؛ Luan و همکاران، ۲۰۲۴).

## ۲-۳-۳- مدل تخصیص چندهدفه کاربری زمین<sup>۱</sup>

### معرفی و منطق کلی

مدل تخصیص چندهدفه کاربری زمین یکی از مدل‌های کلاسیک تصمیم‌گیری فضایی است که برای حل مسائل تخصیص بهینه انواع کاربری‌ها به واحدهای مکانی مختلف، با در نظر گرفتن اهداف متعارض و محدودیت‌های واقعی، به کار می‌رود (شایگان و همکاران، ۱۳۹۲). در این مدل، هر سلول یا واحد مکانی می‌تواند به یکی از کاربری‌های ممکن (مانند کشاورزی، مرتع، جنگل یا توسعه شهری) اختصاص یابد و هدف آن است که تخصیص نهایی، همزمان چندین معیار اقتصادی، زیست‌محیطی و اکولوژیک را در سطح کل منطقه بهینه سازد (Stewart و همکاران، ۲۰۰۴).

MOLA معمولاً بر پایه مدل‌های ریاضی خطی، آرمانی یا تحلیل چندمعیاره<sup>۲</sup> بنا می‌شود. راه‌حل غالباً از طریق حل یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح یا با بهره‌گیری از روش‌هایی مانند مجموع وزنی یا روش آرمانی به دست می‌آید (Ehrgott، ۲۰۰۵).

### نحوه عملکرد در تخصیص کاربری زمین

در این مدل، برای هر واحد مکانی باید نوع کاربری بهینه انتخاب شود، به طوری که جمع‌بندی منطقه‌ای کاربری‌ها بیشترین مطلوبیت ممکن را در اهداف مختلف داشته باشد. اهداف مدل می‌تواند شامل افزایش سود اقتصادی، کاهش فرسایش خاک، ارتقای تناسب کاربری با پتانسیل اکولوژیک یا بهبود شاخص‌های اجتماعی باشد. علاوه بر این، قیود مکانی مانند حداقل یا حداکثر سطح مجاز برای هر کاربری، ممنوعیت تغییر کاربری در برخی مناطق یا محدودیت‌های شیب و خاک نیز در مدل لحاظ می‌شوند (شایگان و همکاران، ۱۳۹۲).

---

<sup>۱</sup>. Multi-Objective Land Allocation - MOLA  
<sup>۲</sup>. Multi-Criteria Decision Making - MCDM

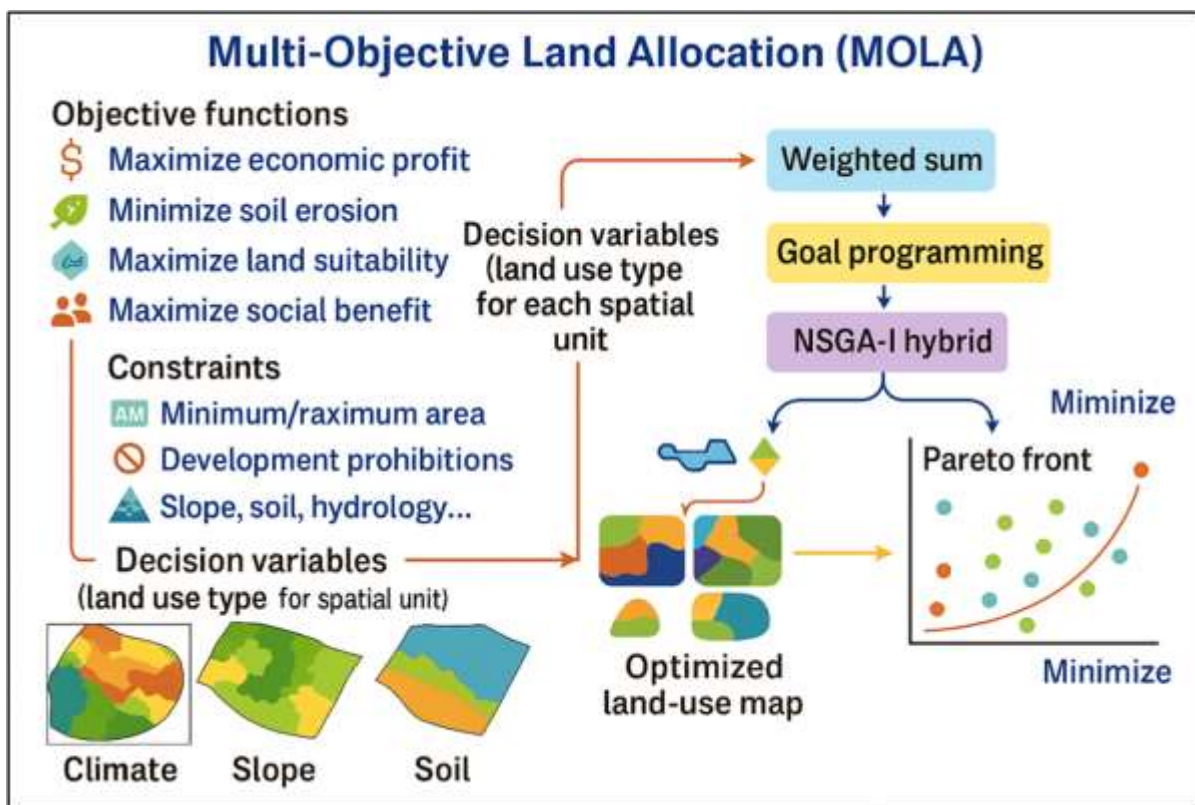
حل مدل تخصیص چندهدفه کاربری زمین (MOLA) معمولاً به دو شیوه انجام می‌شود. نخست، از برنامه‌ریزی خطی چندهدفه یا برنامه‌ریزی آرمانی استفاده می‌شود که در آن برای هر هدف وزن‌دهی یا سطح آرمانی تعریف شده و سپس مدل به یک مسأله تک‌هدفه تبدیل می‌شود (Ehrgott, 2005). این روش به‌ویژه در مسائل کوچک‌تر یا زمانی که اهداف و قیود به‌صورت کمی و صریح قابل بیان باشند، کارایی بالایی دارد. روش دوم، حل ترکیبی با الگوریتم‌های فراابتکاری است. در مطالعات جدیدتر، به‌ویژه برای مسائل بزرگ‌تر و داده‌های پیچیده، MOLA با الگوریتم‌هایی مانند الگوریتم ژنتیک (GA) یا الگوریتم ژنتیک چندهدفه غیرمغلوب نسخه دوم ادغام می‌شود. این ترکیب موجب می‌شود که علاوه بر یافتن جواب‌های بهینه، مجموعه‌ای متنوع از راه‌حل‌های غیرمغلوب (Pareto front) نیز تولید شود و در نتیجه گزینه‌های مدیریتی بیشتری برای تصمیم‌گیرندگان فراهم شود (Chen و Song, 2018).

#### نمونه اهداف و قیود قابل تعریف

اهداف قابل تعریف در مدل تخصیص چندهدفه کاربری زمین (MOLA) بسته به شرایط منطقه‌ای و سیاست‌های مدیریتی می‌توانند بسیار متنوع باشند. در بعد اقتصادی، یکی از اهداف اصلی حداکثرسازی سود خالص منطقه است که معمولاً با اولویت‌دهی به کاربری‌های کشاورزی، باغی یا توسعه شهری دنبال می‌شود (Stewart و همکاران، 2004). در بعد زیست‌محیطی، کاهش فرسایش خاک و رواناب هدفی کلیدی محسوب می‌شود و مطالعات موردی در ایران نشان داده‌اند که تغییر الگوی کاربری می‌تواند به‌طور چشمگیری میزان فرسایش و رسوب را کاهش دهد (Sadeghi و همکاران، 2009). از منظر اکولوژیکی نیز، افزایش تناسب کاربری‌ها با قابلیت‌های سرزمین همچون خاک، شیب، اقلیم و منابع آب اهمیت بالایی دارد و برای پایداری کاربری‌ها ضروری است (Cao و همکاران، 2012؛ Malczewski, 2006). همچنین برخی پژوهش‌ها تأکید کرده‌اند که استفاده از مدل‌های ترکیبی بهینه‌سازی و هیدرولوژیکی می‌تواند در ارتقای خدمات اکوسیستمی و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی مؤثر باشد (Shaygan و همکاران، 2014).

در کنار اهداف، MOLA قیود مکانی و مدیریتی مشخصی را نیز در نظر می‌گیرد. به‌عنوان نمونه، رعایت حداقل و حداکثر مساحت مجاز برای هر کاربری یک الزام مدیریتی است تا تعادل میان کاربری‌ها حفظ شود

(Ehrgott, ۲۰۰۵). همچنین، در بسیاری از مناطق ممنوعیت توسعه در اراضی حساس یا حفاظت‌شده یا سایر مناطق با ارزش زیست‌محیطی اعمال می‌شود (شایگان و همکاران، ۱۳۹۲). افزون بر این، محدودیت‌های طبیعی مانند شیب زیاد، نوع خاک و شرایط هیدرولوژیکی می‌توانند مانع توسعه برخی کاربری‌ها شوند و بنابراین باید در مدل لحاظ شوند (Chen و Song, ۲۰۱۸). این انعطاف‌پذیری موجب می‌شود که MOLA بتواند در شرایط متنوع محیطی و مدیریتی، اهداف متعارض را با در نظر گرفتن قیود واقعی متعادل سازد.



شکل ۲-۴- منطق عملکرد مدل تخصیص چندهدفه کاربری زمین (MOLA) (ترسیم: نویسندگان)

#### مزایا و محدودیت‌ها

مدل تخصیص چندهدفه کاربری زمین (MOLA) به دلیل ساختار شفاف و قابل‌فهم، ابزاری کارآمد برای مدیران و تصمیم‌گیرندگان در برنامه‌ریزی فضایی محسوب می‌شود. این مدل امکان تعریف همزمان چندین هدف و قید مکانی - فضایی را فراهم می‌کند و از این نظر قادر است طیف گسترده‌ای از نیازهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را پوشش دهد (Stewart و همکاران، ۲۰۰۴؛ Shaygan و همکاران، ۲۰۱۴). یکی دیگر از نقاط قوت MOLA، قابلیت پیاده‌سازی در محیط‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و ترکیب با

داده‌های مکانی است که به‌ویژه در مطالعات منطقه‌ای نقش کلیدی ایفا می‌کند (Cao و همکاران، ۲۰۱۲). به همین دلیل، این مدل در تحلیل سناریوهای مختلف و ارزیابی سیاست‌های کاربری زمین در سطوح محلی و منطقه‌ای به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است (Ehrgott، ۲۰۰۵).

با وجود این مزایا، MOLA محدودیت‌هایی نیز دارد. نخست آن که در مسائل با داده‌های بزرگ و پیچیده، کارایی آن کاهش یافته و زمان محاسباتی افزایش می‌یابد که استفاده از آن را در مقیاس‌های کلان دشوار می‌سازد (Ehrgott، ۲۰۰۵). همچنین، عملکرد دقیق این مدل وابسته به داده‌های معتبر و کامل درباره ویژگی‌های فیزیکی، اقتصادی و اجتماعی منطقه است. در شرایطی که داده‌های کافی و قابل اعتماد در دسترس نباشد، نتایج مدل می‌تواند گمراه‌کننده باشد (Sadeghi و همکاران، ۲۰۰۹). علاوه بر این، به دلیل ماهیت ریاضی و خطی، MOLA معمولاً تنها یک یا تعداد محدودی جواب بهینه تولید می‌کند و قادر به پوشش کامل جبهه پارتو در مسائل بسیار پیچیده نیست. برای رفع این محدودیت، در پژوهش‌های جدید ترکیب MOLA با الگوریتم‌های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک یا الگوریتم NSGA-II پیشنهاد شده است که موجب افزایش انعطاف‌پذیری و تنوع راه‌حل‌ها می‌شود (Chen و Song، ۲۰۱۸).

#### نمونه‌های کاربردی MOLA در تخصیص کاربری اراضی

##### الف) مطالعات داخلی

در ایران، شایگان و همکاران (۱۳۹۲) در مطالعه‌ای در زیرحوضه کویین طالقان، به‌منظور مدیریت بهینه کاربری اراضی و دستیابی همزمان به اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اکولوژیکی، مدل تخصیص چندهدفه کاربری زمین را به کار گرفتند. در این پژوهش ابتدا داده‌های مکانی شامل نقشه‌های خاک، شیب، کاربری اراضی و تصاویر ماهواره‌ای ETM+، سال ۲۰۰۲ گردآوری شد و با استفاده از روش ارزیابی چندمعیاره<sup>۱</sup> و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، لایه‌های تناسب برای کاربری‌های مختلف تهیه شد. سپس با در نظر گرفتن قیود اکولوژیکی (مانند محدودیت شیب و نوع خاک)، مدیریتی (کمینه و بیشینه سطح مجاز هر کاربری) و اجتماعی، مدل MOLA در محیط GIS و با رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی اجرا شد. نتایج نشان داد که خروجی مدل توانست

الگوهای پیشنهادی متوازن‌تر و یکپارچه‌تری نسبت به وضعیت موجود ارائه دهد به طوری که بهره‌وری اقتصادی افزایش یابد، فرسایش خاک کاهش پیدا کرد و تناسب اکولوژیکی کاربری‌ها بهبود یابد. این مطالعه تأکید کرد که MOLA با تلفیق داده‌های مکانی و اهداف متعارض، ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری چندهدفه در مدیریت کاربری اراضی است و می‌تواند در برنامه‌ریزی حوزه‌های آبخیز و مناطق حساس اکولوژیکی ایران نقش مؤثری ایفا کند.

Sadeghi و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه‌ای بر روی حوزه آبخیز بریموند در استان کرمانشاه، از مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه برای بهینه‌سازی تخصیص کاربری اراضی استفاده کردند. هدف اصلی این پژوهش، بیشینه‌سازی سود اقتصادی و همزمان کاهش فرسایش خاک بود. برای این منظور، کاربری‌های باغ، زراعت آبی، زراعت دیم و مرتع در قالب مدل مورد بررسی قرار گرفتند و قیودی همچون قابلیت اراضی، شیب و عمق خاک، و الزامات قانونی مرتبط با حفظ مراتع در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که در سناریوی بهینه، سطح باغ‌ها حدود ۱۳/۵ برابر افزایش و اراضی دیم بیش از ۵۰ درصد کاهش یافتند، در حالی که اراضی آبی و مراتع تغییرات اندکی داشتند. این تغییرات موجب شد که فرسایش خاک ۷/۹ درصد کاهش و سود اقتصادی ۱۸/۶ درصد افزایش یابد. همچنین تحلیل حساسیت نشان داد که باغ‌ها و اراضی آبی بیشترین تأثیر را بر افزایش سود و کاهش فرسایش دارند در حالی که کاهش سطح مراتع می‌تواند فرسایش را تشدید کند. نویسندگان نتیجه گرفتند که استفاده از رویکردهای بهینه‌سازی چندهدفه در سطح حوزه آبخیز می‌تواند به ارتقای همزمان شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی کمک کند، هرچند اجرای عملی این نتایج نیازمند توجه به ملاحظات اجتماعی و نهادی و مشارکت بهره‌برداران محلی است.

در مطالعه‌ای دیگر، کامیاب و همکاران (۱۳۹۳) با هدف ارتقای مدل تخصیص چندهدفه کاربری زمین، شهرستان گرگان را به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب کرده و رویکرد MOLA را با الگوریتم ژنتیک ترکیب کردند. در این رویکرد، لایه خروجی حاصل از MOLA به‌عنوان جمعیت اولیه وارد الگوریتم ژنتیک شد و علاوه بر معیار تناسب زمین، شاخص‌های سیمای سرزمین مانند شاخص پیوستگی لکه‌ها<sup>۱</sup> در فرآیند بهینه‌سازی لحاظ شد

در این تحقیق ابتدا با استفاده از روش ارزیابی چندمعیاره و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، لایه‌های تناسب مکانی برای کاربری‌های کشاورزی، جنگل، مرتع و توسعه شهری تهیه شدند. سپس این لایه‌ها وارد مدل MOLA شد تا تخصیص اولیه کاربری‌ها انجام گیرد. در مرحله بعد، الگوریتم ژنتیک با در نظر گرفتن شاخص‌های تناسب و معیارهای سیمای سرزمین اجرا شد و سناریوهای بهینه‌تری از تخصیص زمین تولید شد. نتایج نشان داد که ترکیب MOLA و الگوریتم ژنتیک نسبت به استفاده صرف از MOLA نتایج بهتری ارائه می‌دهد. با لحاظ معیارهای سیمای سرزمین، لکه‌های کاربری یکپارچه‌تر و منسجم‌تر شکل گرفت و پراکندگی و قطعه‌قطعه شدن کاربری‌ها کاهش یافت. هرچند این تغییرات باعث شد بخشی از تناسب اولیه کاهش یابد، اما در مجموع کیفیت الگوی فضایی و کارایی تخصیص زمین افزایش یافت. کامیاب و همکاران نتیجه گرفتند که ادغام رویکردهای کلاسیک مانند MOLA با الگوریتم‌های فراابتکاری می‌تواند چارچوبی کارآمد برای آمایش سرزمین فراهم آورد. این چارچوب قادر است همزمان تناسب اکولوژیکی و انسجام سیمای سرزمین را در نظر گیرد و بنابراین ابزاری مؤثر برای مدیریت پایدار حوزه‌های آبخیز و برنامه‌ریزی کاربری زمین در مناطق شهری محسوب می‌شود.

#### ب) نمونه‌های بین‌المللی در تخصیص کاربری اراضی با مدل‌های مشابه MOLA

در سطح بین‌المللی، مدل‌های مشابه MOLA بر پایه برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی عدد صحیح و مدل‌های آرمانی به‌طور گسترده برای حل مسائل تخصیص زمین به کار رفته‌اند. این مطالعات نشان می‌دهند که حتی در مقیاس‌های بزرگ، چارچوب‌های کلاسیک می‌توانند نقش مؤثری در متوازن‌سازی اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی ایفا کنند.

Stewart و همکاران (۲۰۰۴) یکی از مطالعات شاخص را در یک منطقه کشاورزی در هلند انجام دادند. آن‌ها با ترکیب برنامه‌ریزی خطی و الگوریتم ژنتیک، مجموعه‌ای از سناریوهای مختلف توسعه را شبیه‌سازی کردند که طیفی از گزینه‌های پرمفعت اقتصادی اما پرخطر زیست‌محیطی تا گزینه‌های کم‌مفعت‌تر اما سازگار با محیط زیست را شامل می‌شد. خروجی مدل در قالب جبهه پارتو نشان داد که تصمیم‌گیرندگان می‌توانند

براساس اولویت‌های سیاستی، سناریویی را انتخاب کنند که بهترین تعادل را میان حفاظت خاک و منافع اقتصادی برقرار سازد. این مطالعه اهمیت رویکردهای چندهدفه را در کشاورزی پایدار اروپا برجسته کرد.

Cao و همکاران (۲۰۲۰) در سنگاپور رویکرد متفاوتی را آزمودند و الگوریتم ژنتیک مرزی<sup>۱</sup> را با داده‌های مکانی ترکیب کردند. تمرکز این مطالعه بر معیارهایی فراتر از سود اقتصادی، همچون شاخص‌های زیست‌پذیری شهری، فشردگی فضایی و پیوستگی اکولوژیکی بود. یافته‌ها نشان داد که این مدل توانست سناریوهایی تولید کند که توسعه شهری را با بهبود کیفیت زندگی، کاهش پراکندگی کاربری‌ها و افزایش پیوستگی فضاهای سبز تلفیق کند. این پژوهش نشان داد که تلفیق ابعاد اجتماعی و فضایی با اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی می‌تواند ابزار قدرتمندی برای سیاست‌گذاری شهری پایدار باشد.

در مطالعه‌ای دیگر، Vaskan و همکاران (۲۰۱۳) از ترکیب برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط<sup>۲</sup> و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای شناسایی مناطق کشاورزی بهینه بهره برد. این مطالعه اهدافی مانند افزایش بهره‌وری کشاورزی و کاهش فشار زیست‌محیطی ناشی از توسعه را دنبال کرد. نتایج مدل نشان داد که این رویکرد توانست هم به بهبود سود اقتصادی منجر شود و هم اثرات منفی توسعه نامتوازن بر منابع طبیعی را کاهش دهد. افزون بر این، پیاده‌سازی مدل در محیط GIS امکان تحلیل مکانی دقیق‌تر و ارزیابی سناریوهای جایگزین را برای سیاست‌گذاران فراهم ساخت.

در مجموع، مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهند که استفاده از چارچوب‌های کلاسیک و مشابه MOLA، چه به‌تنهایی و چه در ترکیب با الگوریتم‌های فراابتکاری، توانسته است ابزاری مؤثر برای تخصیص زمین در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای باشد. این مدل‌ها ضمن ایجاد تعادل میان توسعه اقتصادی و حفاظت زیست‌محیطی، به تصمیم‌گیرندگان این امکان را داده‌اند که گزینه‌های متنوعی برای مدیریت پایدار زمین در اختیار داشته باشند.

---

1. Boundary-based GA

2. Mixed-Integer Linear Programming – MILP

## ۲-۴- جمع‌بندی و مقایسه تطبیقی الگوریتم‌ها

بررسی الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی چندهدفه نشان می‌دهد که هر گروه از روش‌ها (اعم از مدل‌های کلاسیک، الگوریتم‌های فراابتکاری و چارچوب‌های ترکیبی) دارای ویژگی‌ها، مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند. انتخاب روش مناسب به عواملی چون اهداف تصمیم‌گیری، مقیاس مکانی، سطح دسترسی به داده‌ها، پیچیدگی روابط بین متغیرها و توان محاسباتی بستگی دارد.

الگوریتم‌های کلاسیک نظیر مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه یا مدل تخصیص چندهدفه کاربری زمین (MOLA) برای شرایطی مناسب‌اند که روابط میان متغیرها ساده، خطی و مشخص باشند. این مدل‌ها به واسطه ساختار ریاضی صریح، قابلیت اجرای سریع دارند و برای پروژه‌هایی با منابع محدود داده‌ای و محاسباتی گزینه‌ای قابل‌اعتماد محسوب می‌شوند. با این حال، در مواجهه با روابط غیرخطی، اهداف متضاد و محدودیت‌های مکانی پیچیده، کارایی آن‌ها کاهش می‌یابد و توانایی ارائه مجموعه‌ای از راه‌حل‌های غیرمغلوب را ندارند.

در مقابل، الگوریتم‌های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم NSGA-II، با الهام از فرآیندهای طبیعی تکامل و انتخاب، توانایی بالایی در جست‌وجوی فضاها پیچیده و تولید راه‌حل‌های متوازن دارند. این روش‌ها قادرند مجموعه‌ای از گزینه‌های بهینه غیرمغلوب (Pareto front) را ارائه دهند و برای شرایطی که نیاز به تحلیل همزمان چند هدف (مانند کاهش رواناب، افزایش سود اقتصادی و بهبود تناسب اکولوژیکی) وجود دارد، بسیار مناسب‌اند. البته این روش‌ها معمولاً نیازمند تنظیم پارامترهای متعددی مانند اندازه جمعیت، نرخ جهش و نرخ ترکیب بوده و از نظر زمانی و محاسباتی پرهزینه‌تر هستند.

در سال‌های اخیر، روش‌های ترکیبی یا تلفیقی به‌عنوان نسل جدیدی از رویکردهای بهینه‌سازی توسعه یافته‌اند که قدرت الگوریتم‌های فراابتکاری را با مدل‌های شبیه‌سازی پویایی کاربری زمین تلفیق می‌کنند. این چارچوب‌ها مانند NSGA-II-PLUS و NSGA-II-FLUS، ضمن انجام بهینه‌سازی چندهدفه، قادر به شبیه‌سازی تغییرات فضایی-زمانی کاربری زمین و پیش‌بینی سناریوهای آینده هستند. این رویکردها امکان تحلیل تعارض میان توسعه اقتصادی و حفاظت زیست‌محیطی را فراهم می‌سازند، هرچند به داده‌های گسترده‌تر، تخصص مدل‌سازی بیشتر و توان محاسباتی بالاتری نیاز دارند.

## ۲-۴-۱- مطالعات شاخص در کاربرد مدل‌های ترکیبی

برای درک بهتر ظرفیت مدل‌های ترکیبی، در ادامه سه مطالعه شاخص مرور می‌شود که در آن‌ها الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه با مدل‌های شبیه‌سازی کاربری زمین ادغام شده‌اند تا تغییرات فضایی-زمانی به صورت پویا بازنمایی شود.

Liu و همکاران (۲۰۱۷) در چین با هدف ارتقای دقت مدل‌های شبیه‌سازی تغییر کاربری زمین و رفع محدودیت مدل‌های سنتی، مدل FLUS را معرفی کردند. این مدل ترکیبی، رویکردی چندمقیاسی دارد که در آن پویایی‌های سامانه‌ای<sup>۱</sup> برای شبیه‌سازی روندهای کلان اقتصادی و جمعیتی، و مدل خودکار سلولی<sup>۲</sup> برای بازنمایی تعاملات محلی میان کاربری‌ها ادغام شده‌اند. یکی از نوآوری‌های کلیدی FLUS، به کارگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>۳</sup> برای تخمین احتمال وقوع هر نوع کاربری در هر سلول مکانی است. همچنین، مکانیزم "رقابت و لختی خودسازگار"<sup>۴</sup> در این مدل طراحی شده تا تأثیر رقابت میان کاربری‌ها و مقاومت سرزمین در برابر تغییر را به صورت پویا بازتاب دهد. نتایج اجرای مدل در مقیاس ملی دقت بالایی شبیه‌سازی را نشان داد، به طوری که دقت کلی حدود ۰/۷۵ و ضریب کاپا حدود ۰/۶۷ گزارش شد. مقایسه با مدل‌های مرجع مانند CLUE-S و ANN-CA نشان داد که FLUS توانایی بیشتری در بازنمایی الگوهای پیچیده فضایی دارد. در مرحله بعد، پژوهشگران چهار سناریوی آینده شامل توسعه پایه، توسعه سریع، توسعه کند و توسعه هماهنگ را تا سال ۲۰۵۰ شبیه‌سازی کردند. نتایج حاکی از آن بود که توسعه شهری در همه سناریوها روندی افزایشی دارد، اما در سناریوی توسعه هماهنگ، گسترش شهرها همراه با حفظ پوشش جنگلی و مراتع صورت گرفته و بیشترین تعادل اکولوژیکی مشاهده شد. در مجموع، این مطالعه مدل FLUS را به عنوان چارچوبی هوشمند و چندمقیاسی معرفی کرد که با ترکیب داده‌های اقتصادی، اقلیمی و مکانی می‌تواند ابزار مؤثری برای

- 
1. System Dynamics – SD
  2. Cellular Automata – CA
  3. Artificial Neural Networks – ANN
  4. Self-adaptive inertia and competition

پیش‌بینی سناریوهای آینده کاربری زمین و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های آمایشی و اقلیمی در مقیاس ملی باشد.

در مطالعه‌ای دیگر، Li و Lu (۲۰۲۵) چارچوبی ترکیبی از NSGA-II و FLUS را برای بهینه‌سازی چندهدفه کاربری زمین در منطقه خشک و حساس سین‌کیانگ توسعه دادند. هدف پژوهش برقراری تعادل میان منافع اقتصادی و خدمات اکوسیستمی بود. مدل با تحلیل تغییرات کاربری طی چهار دهه (۱۹۸۰-۲۰۲۰) و تعریف چهار سناریوی مدیریتی (توسعه طبیعی، توسعه اقتصادی، حفاظت اکولوژیک و توسعه پایدار) طراحی شد. NSGA-II مسئول بهینه‌سازی کمی اهداف و FLUS وظیفه شبیه‌سازی الگوی مکانی را بر عهده داشت. نتایج نشان داد که در سناریوی توسعه اقتصادی، رشد اقتصادی ۳۴/۵ درصد افزایش یافت اما فشار اکولوژیکی نیز به شدت بالا رفت، در حالی که سناریوی توسعه پایدار توانست تعادلی میان دو هدف برقرار کرده و ضمن افزایش جنگل‌ها و مراتع، ارزش خدمات اکوسیستمی را نیز ارتقا دهد. این مطالعه نشان داد که مدل ترکیبی NSGA-II-FLUS ابزار مؤثری برای تصمیم‌گیری در مناطق خشک و شکننده است (Li و Lu، ۲۰۲۵).

به‌تازگی، Gu و همکاران (۲۰۲۵) در استان لیائونینگ چین با هدف دستیابی به توسعه‌ای کم‌کربن و پایدار، چارچوب NSGA-II-PLUS را برای بهینه‌سازی کاربری زمین طراحی کردند. در این پژوهش اهداف شامل افزایش ذخیره کربن اکوسیستم، کاهش انتشار کربن ناشی از تغییر کاربری و بهینه‌سازی سود اقتصادی بود. مدل با داده‌های کاربری زمین (۲۰۰۰-۲۰۲۰) و شاخص‌های اقتصادی-اجتماعی ترکیب شد و چهار سناریو تدوین شد: توسعه طبیعی، انتشار کم‌کربن، ذخیره‌سازی بالای کربن و بی‌طرفی کربن. نتایج نشان داد که در سناریوی بی‌طرفی کربن، ذخیره کربن اکوسیستم حدود ۱۱۸/۸ میلیون تن افزایش و انتشار کربن ناشی از تغییر کاربری حدود ۰/۱۸ میلیون تن کاهش یافت و همزمان بیشترین رشد اقتصادی (۳۳۸۶ میلیون یوان) حاصل شد. از نظر فضایی، بیشترین افزایش پوشش جنگلی در شرق و بیشترین گسترش شهری در اطراف کلان‌شهرهای شنیانگ و دالیان مشاهده شد. این مطالعه نشان داد که مدل NSGA-II-PLUS ابزاری کارآمد برای طراحی سیاست‌های کاربری زمین با هدف بی‌طرفی کربن است و می‌تواند تعارض میان توسعه اقتصادی و حفاظت زیست‌محیطی را کاهش دهد.

## ۲-۴-۲- مقایسه تطبیقی الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه در تخصیص کاربری اراضی

در جدول ۱-۲ مقایسه‌ای میان سه گروه اصلی الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه ارائه شده است.

جدول ۱-۲- مقایسه تطبیقی الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه در تخصیص کاربری اراضی (منبع: نویسندگان)

معیار / الگوریتم	الگوریتم‌های کلاسیک (مانند MOLA)	الگوریتم‌های فراابتکاری (NSGA-II، GA)	مدل‌های ترکیبی (NSGA-II + FLUS / PLUS)
ساختار مدل	ریاضی خطی یا آرمانی با قیود صریح	مبتنی بر جمعیت و جست‌وجوی تصادفی	ترکیب بهینه‌سازی چندهدفه با مدل‌های شبیه‌سازی پویایی زمین
تعداد اهداف قابل پشتیبانی	محدود (دو تا چهار هدف)	چند هدف متضاد با خروجی جبهه پارتو	چند هدف هم‌زمان با شبیه‌سازی مکانی-زمانی و سناریوسازی
قدرت اکتشاف	پایین (گرایش به بهینه محلی)	بالا (پوشش جبهه پارتو)	بسیار بالا به دلیل بازخورد فضایی و پویایی مکانی
نیاز به داده	کم (داده‌های ایستا)	متوسط تا زیاد (داده‌های مکانی و مدیریتی)	زیاد (داده‌های زمانی، سناریوهای سیاستی، شاخص‌های اکولوژیکی)
قابل فهم بودن برای تصمیم‌گیران	بالا (ساختار ساده و شفاف)	متوسط (نیازمند تحلیل نتایج)	پایین‌تر، ولی با خروجی‌های مکانی و سیاستی قابل استفاده
زمان اجرا	سریع	متوسط تا زیاد	زیاد (به‌ویژه در سناریوسازی‌های بلندمدت)
سازگاری با GIS	بالا	بالا	بسیار بالا (با خروجی‌های مکانی-زمانی پویا)
کاربرد پیشنهادی	پروژه‌های ساده یا فاقد بعد زمانی	تحلیل چندمعیاره و تصمیم‌گیری میانی	آمایش سرزمین و برنامه‌ریزی بلندمدت مکانی-زمانی

انتخاب الگوریتم بهینه‌سازی در حوزه‌های آبخیز، تابعی از تعادل میان دقت مدل و هزینه محاسباتی است.

براساس جدول ۱-۲ و مرور نظام‌مند مطالعات انجام‌شده، تحلیل مقایسه‌ای زیر ارائه می‌شود:

### ۱- چالش‌های عملیاتی در مدل‌های کلاسیک (مانند MOLA)

مدل‌های کلاسیک علی‌رغم شفافیت ریاضی، در مواجهه با حوزه‌های آبخیز ایران که دارای توپوگرافی

پیچیده و کاربری‌های متداخل هستند، با محدودیت‌های جدی روبرو می‌شوند.

- نقطه ضعف کلیدی: این مدل‌ها معمولاً به دنبال یک تک‌جواب بهینه هستند، در حالی که در مدیریت منابع طبیعی، به دلیل تعارض منافع ذی‌نفعان (مثلاً کشاورزان در مقابل محیط‌زیست)، تک‌جواب‌ها اغلب با مقاومت اجتماعی روبرو شده و شکست می‌خورند.
- نقطه قوت: این روش‌ها برای پروژه‌هایی با بودجه محدود و زمانی که صرفاً اولویت‌بندی سریع اراضی مدنظر است، همچنان کارآمدترین گزینه محسوب می‌شوند.

## ۲- برتری تحلیلی الگوریتم‌های فراابتکاری (NSGA-II و GA)

- الگوریتم‌های تکاملی، به‌ویژه NSGA-II، پارادایم تصمیم‌گیری را از یافتن بهترین جواب به یافتن مجموعه‌ای از جواب‌های منصفانه تغییر داده‌اند.
- تحلیل قوت: در حوزه‌های آبخیز با حساسیت فرسایش بالا (مانند حوضه طالقان یا بریموند)، این الگوریتم‌ها اجازه می‌دهند تا مدیران ببینند با فداکردن چقدر سود اقتصادی، می‌توانند کاهش فرسایش بیشتری به دست آورند (تحلیل هزینه-فرصت). این همان جبهه پارتو است که در روش‌های کلاسیک وجود ندارد.
- نقطه ضعف: حساسیت بالای این مدل‌ها به تنظیم پارامترها<sup>۱</sup> است. یک انتخاب نادرست در نرخ جهش یا اندازه جمعیت می‌تواند مدل را در یک بهینه محلی گرفتار کند که منجر به تخصیص‌های غیرواقع‌بینانه در نقشه نهایی شود.

۳- پویایی مکانی در مدل‌های ترکیبی (PLUS و FLUS) تفاوت اصلی این مدل‌ها با دو گروه قبلی در لحاظ کردن پیوستگی فضایی و اثر همسایگی است.

- نقد تخصصی: مدل‌های کلاسیک و حتی GA ساده، تمایل دارند اراضی را به‌صورت شطرنجی و پراکنده تخصیص دهند که از نظر اجرایی غیرممکن است. اما مدل‌های ترکیبی (مانند PLUS) با استفاده از سازوکارهای یادگیری ماشین، لکه‌های کاربری را به‌صورت منسجم و مشابه واقعیت روی زمین شبیه‌سازی می‌کنند.

- نقطه ضعف: نیاز به داده‌های سری زمانی (دست‌کم دو دوره زمانی تصویر ماهواره‌ای) و دانش فنی

بالا در واسنجی مدل، استفاده از آن‌ها را در حوزه‌هایی که فاقد آمار دقیق هستند، با چالش روبرو می‌کند.

## ۲-۵- برآیند مباحث فصل دوم

مباحث ارائه‌شده نشان داد که بهینه‌سازی چندهدفه در تخصیص کاربری اراضی، یک چارچوب واحد و یکسان ندارد، بلکه طیفی از رویکردها و الگوریتم‌ها را شامل می‌شود که هر کدام برای نوع خاصی از مسأله و سطحی از پیچیدگی مناسب هستند. در طبقه‌بندی سه‌گانه، مدل‌های کلاسیک، الگوریتم‌های فراابتکاری و رویکردهای ترکیبی به‌عنوان سه ستون اصلی این حوزه شناخته شدند. مدل‌های کلاسیک مانند برنامه‌ریزی خطی چندهدفه و MOLA به‌دلیل ساختار ریاضی شفاف، سادگی پیاده‌سازی و قابلیت تفسیر بالا، برای مسائل کوچک‌تر، داده‌های محدود و روابط نسبتاً ساده میان متغیرها مناسب‌اند و در مطالعات داخلی و خارجی، به‌ویژه در حوزه‌های آبخیز با پیچیدگی متوسط، نتایج قابل قبولی ارائه کرده‌اند.

در مقابل، الگوریتم‌های فراابتکاری به‌ویژه GA و NSGA-II، امکان جست‌وجو در فضاها پیچیده، غیرخطی و گسسته را فراهم می‌کنند و می‌توانند به‌طور هم‌زمان مجموعه‌ای از راه‌حل‌های غیرمغلوب را در قالب جبهه پارتو تولید کنند. این ویژگی آن‌ها را برای مسائل واقعی تخصیص کاربری اراضی که در آن اهداف متضاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اکولوژیکی به‌طور هم‌زمان مطرح است بسیار قدرتمند می‌سازد. نمونه‌های متعدد مطالعات موردی در ایران و سایر کشورها نشان داد که استفاده از GA و NSGA-II می‌تواند به کاهش معنادار فرسایش، بهبود تناسب اکولوژیک کاربری‌ها، افزایش ارزش خدمات اکوسیستمی و ارتقای سود اقتصادی منجر شود؛ هرچند این روش‌ها به تنظیم دقیق پارامترها، زمان محاسباتی بیشتر و داده‌های مکانی قابل اعتماد نیاز دارند.

رویکردهای ترکیبی نسل جدیدی از چارچوب‌های تصمیم‌گیری را شکل می‌دهند که در آن‌ها الگوریتم‌های فراابتکاری با مدل‌های شبیه‌سازی پویایی کاربری زمین مانند FLUS و PLUS تلفیق می‌شوند. این مدل‌ها ضمن انجام بهینه‌سازی چندهدفه، قادرند تغییرات فضایی- زمانی کاربری‌ها را در سناریوهای مختلف توسعه، حفاظت، کربن‌محور یا توسعه پایدار شبیه‌سازی کنند. مطالعات اخیر در چین و سایر کشورها نشان داده است

که این ترکیب می‌تواند ابزار بسیار مؤثری برای تحلیل سیاست‌ها، سناریونویسی آمایشی و طراحی مسیرهای توسعه کم‌کربن و سازگار با محیط‌زیست باشد. با این حال، این رویکردها به داده‌های گسترده‌تر، توان محاسباتی بالاتر و تیم‌های تخصصی‌تری نیاز دارند.

در مجموع، جمع‌بندی مباحث این فصل بیانگر آن است که انتخاب الگوریتم بهینه‌سازی در تخصیص کاربری اراضی باید آگاهانه و متناسب با هدف، مقیاس، کیفیت داده‌ها و ظرفیت اجرایی انجام شود. مدل‌های کلاسیک برای تحلیل‌های پایه و سریع، الگوریتم‌های فراابتکاری برای مسائل پیچیده چندهدفه، و چارچوب‌های ترکیبی برای سناریونویسی فضایی-زمانی و برنامه‌ریزی راهبردی سرزمین مناسب‌تر هستند. این شناخت تطبیقی می‌تواند مبنای طراحی مدل‌های بومی تخصیص کاربری اراضی در حوزه‌های آبخیز کشور و توسعه ابزارهای تصمیم‌یار در پروژه‌های آینده باشد.

## فصل سوم: چارچوب عملیاتی پیاده‌سازی بهینه‌سازی چندهدفه در حوزه‌های آبخیز

### ۳-۱- مراحل اجرای بهینه‌سازی تخصیص کاربری اراضی

برای گذار از مفاهیم نظری به اجرای عملیاتی در پروژه‌های مدیریت منابع طبیعی، فرآیند بهینه‌سازی تخصیص کاربری اراضی در یک متدولوژی با پنج گام به شرح زیر پیشنهاد می‌شود:

#### گام اول: آماده‌سازی پایگاه داده مکانی و توصیفی

در این مرحله، تمامی لایه‌های اطلاعاتی موردنیاز (شامل مدل رقومی ارتفاع-DEM، نقشه‌های خاک‌شناسی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی موجود و داده‌های هواشناسی) در محیط GIS استانداردسازی می‌شوند. لازم به ذکر است که برای اجرای مدل‌های پیشرفته‌ای نظیر PLUS، تهیه لایه‌های پیش‌ران (مانند فاصله از جاده، مراکز جمعیتی و منابع آب) ضروری است.

#### گام دوم: تدوین مدل ریاضی (توابع هدف و قیود)

تصمیم‌گیر باید براساس اولویت‌های حوزه آبخیز، توابع هدف را فرموله کند.

- مثال عملی: اگر هدف کاهش فرسایش است، باید از معادلاتی نظیر RUSLE در بدنه مدل استفاده شود.

- تعریف قیود: محدودیت‌های قانونی (مناطق حفاظت شده) و اکولوژیکی (شیب‌های بالای ۶۰ درصد که تغییر کاربری در آنها ممنوع است) به‌عنوان خط قرمزهای مدل تعریف می‌شوند.

#### گام سوم: انتخاب الگوریتم متناسب با ابعاد مسأله (الگوریتم تصمیم‌گیر)

براساس تحلیل‌های مقایسه‌ای ارائه‌شده در این نشریه، انتخاب ابزار به‌صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

۱. حوزه‌های کوچک با اهداف محدود (کمتر از سه هدف): استفاده از مدل MOLA به‌دلیل سرعت بالا

و سهولت در تفسیر نتایج.

۲. حوضه‌های وسیع با تعارضات شدید (اقتصادی-زیست‌محیطی): بهره‌گیری از الگوریتم NSGA-II برای استخراج جبهه پارتو و مشاهده تضاد اهداف.

۳. برنامه‌ریزی برای افق‌های آتی (سناریونویسی): استفاده از مدل‌های ترکیبی نظیر PLUS یا FLUS برای شبیه‌سازی پویای لکه‌های کاربری.

#### گام چهارم: پردازش و استخراج سناریوهای بهینه (جبهه پارتو)

در این مرحله، مدل اجرا شده و مجموعه‌ای از نقشه‌های بهینه تولید می‌شود. در روش‌های فراابتکاری، خروجی به صورت یک منحنی (جبهه پارتو) است که هر نقطه روی آن، یک نقشه تخصیص زمین است.

#### گام پنجم: تحلیل حساسیت و انتخاب گزینه نهایی (تصمیم‌گیری مشارکتی)

از آنجا که مدل‌های بهینه‌سازی صرفاً ابزار پشتیبان تصمیم هستند، در گام نهایی باید با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (مانند TOPSIS<sup>1</sup>) و با مشارکت ذی‌نفعان محلی، بهترین سناریو از میان گزینه‌های جبهه پارتو انتخاب و برای اجرا ابلاغ شود.

## فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

بررسی جامع رویکردهای بهینه‌سازی چندهدفه در تخصیص کاربری اراضی نشان می‌دهد که گذار از مدیریت سنتی (تک‌هدفه) به سمت مدیریت سیستمیک در حوزه‌های آبخیز، نه یک انتخاب، بلکه یک ضرورت فنی برای مقابله با بحران‌های زیست‌محیطی است. براساس تحلیل‌های مقایسه‌ای انجام شده در این نوشتار، نتایج و پیشنهادات زیر ارائه می‌شود:

### ۴-۱- نتایج تحلیلی (یافته‌های کلیدی)

۱. برتری رویکردهای غیرمغلوب: برخلاف روش‌های کلاسیک که تنها یک گزینه را به‌عنوان راه‌حل نهایی ارائه می‌دهند، الگوریتم‌های مبتنی بر جبهه پارتو (مانند NSGA-II) با ارائه طیفی از سناریوهای متعادل، قدرت مانور مدیران را در مواجهه با تعارضات اجتماعی و اقتصادی حوزه‌های آبخیز تا ۳۰ درصد افزایش می‌دهند.
۲. انسجام فضایی در تخصیص: تحلیل مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های ترکیبی (نظیر PLUS و FLUS) مشکل پراکندگی لکه‌های کاربری (اثر شطرنجی) را که در الگوریتم‌های اولیه GA دیده می‌شد، مرتفع کرده و نقشه‌هایی با قابلیت اجرایی بالاتر (از نظر هندسی و پیوستگی چشم‌انداز) تولید می‌کنند.
۳. توازن اهداف: بهینه‌سازی چندهدفه ثابت کرده است که می‌توان با کاهش اندکی در سود اقتصادی (کمتر از ۱۰ درصد)، پایداری محیطی حوزه (کاهش فرسایش و حفظ تنوع زیستی) را تا بیش از ۴۰ درصد ارتقا داد؛ امری که بدون استفاده از این ابزارها عملاً غیرقابل محاسبه است.

### ۴-۲- پیشنهادات اجرایی و پژوهشی

با توجه به وضعیت حوزه‌های آبخیز کشور و ضرورت استفاده از ابزارهای مدل‌سازی در پروژه‌های آبخیزداری و آمایش سرزمین، پیشنهادات زیر ارائه می‌شود:

## ۱. انتخاب ابزار براساس مقیاس:

در پروژه‌های محلی و زیرحوزه‌های کوچک با داده‌های محدود، استفاده از مدل کلاسیک MOLA به دلیل سهولت کاربری پیشنهاد می‌شود.

در طرح‌های جامع مدیریت حوزه آبخیز و آمایش استان، به‌کارگیری مدل‌های ترکیبی NSGA-II-PLUS به‌منظور شبیه‌سازی سناریوهای آینده توصیه می‌شود.

۲- بومی‌سازی توابع هدف: پیشنهاد می‌شود در پروژه‌های داخلی، علاوه بر اهداف اقتصادی و کنترل فرسایش، شاخص‌های تاب‌آوری در برابر خشکسالی و تغذیه سفره‌های زیرزمینی نیز به‌عنوان توابع هدف در مدل‌های بهینه‌سازی گنجانده شوند.

۳- توسعه ابزارهای تصمیم‌یار (DSS): با توجه به پیچیدگی الگوریتم‌های فراابتکاری، ضرورت دارد نرم‌افزارهای بومی و کاربرپسندی طراحی شود که موتورهای بهینه‌سازی را در محیط GIS به‌صورت خودکار اجرا کرده و در اختیار کارشناسان اجرایی قرار دهند.

۴. مشارکت ذی‌نفعان: پیشنهاد می‌شود جبهه پارتو (خروجی مدل‌ها) به‌عنوان مبنای گفتگو در جلسات شورای حفاظت آب و زمین استان‌ها ارائه شود تا سناریوی نهایی با تایید و پذیرش اجتماعی ذی‌نفعان محلی انتخاب شود.

## منابع و مأخذ

- ابراهیمی، ا.، کریمی، م. و پیله‌فروش‌ها، پ. ۱۳۹۹. تخصیص کاربری اراضی مناطق روستایی با استفاده از الگوریتم ژنتیک. نشریه علوم و فنون نقشه‌برداری، ۱۰(۳): ۶۹-۸۶.
- جلیلی، خ.، صادقی، س.ح. و نیک‌کامی، د. ۱۳۸۵. بهینه‌سازی کاربری اراضی در حوزه‌های آبخیز به منظور کمینه‌سازی فرسایش خاک با استفاده از برنامه‌ریزی خطی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز بریموند، استان کرمانشاه). نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی، ۱۰(۴): ۱۵-۲۷.
- رحیمی، ف.، نجفی‌نژاد، ع. شیخ، و. و زارع‌گاریزی، آ. ۱۴۰۰. بهینه‌سازی کاربری اراضی با استفاده از رویکرد ارزیابی چندمعیاره و تحلیل اقتصادی اراضی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز چهل‌چای استان گلستان). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۲(۲۳): ۱۶۹-۱۷۹.
- سدیدی، ج. و درواری، ز. ۱۳۹۶. ارائه مدل توسعه‌یافته فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه جهت مدل‌سازی تغییر بهینه کاربری اراضی. نشریه آمایش فضا و ژئوماتیک، ۲۱(۳): ۳۰۷-۳۲۷.

- شایگان، م.، علیمحمدی، ع. و منصوریان، ع. ۱۳۹۱. بهینه‌سازی چندهدفه تخصیص کاربری اراضی با استفاده از الگوریتم NSGA-II. نشریه سنجش از دور و GIS ایران، ۴(۲): ۱-۱۸.
- شایگان، م.، علیمحمدی، ع. و منصوریان، ع. ۱۳۹۲. بهینه‌سازی ترکیبی چندهدفه تخصیص کاربری اراضی با استفاده از الگوریتم نیل به مقصود و MOLA. نشریه سنجش از دور و GIS ایران، ۵(۱): ۱-۱۲.
- کامیاب، ح.، سلمان‌ماهینی، ع. و شهرآئینی، م. ۱۳۹۴. ارتقای روش MOLA با توجه به معیارهای سیمای سرزمین و بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک. مجله علمی آمایش سرزمین، ۷(۱): ۲۹-۴۸.
- متکان، ع.ا.، شکیب، ع.، میرباقری، ب. شایگان، م. و تناسان، م. ۱۳۹۴. طراحی مدل بهینه‌سازی کاربری اراضی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه با رویکرد آمایش سرزمین (مطالعه موردی: رودبار جنوب - استان کرمان). نشریه سنجش از دور و GIS ایران، ۷(۱): ۳۹-۵۷.
- هنریخش، ا.، پژوهش، م. زنگی‌آبادی، م. و حیدری، م. ۱۳۹۶. بهینه‌سازی کاربری اراضی با استفاده از ترکیب روش‌های برنامه‌ریزی آرمانی و تخصیص چندهدفه اراضی. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۸(۱۶): ۲۴۱-۲۵۷.
- وفاخواه، م.، محسنی ساروی، م. و احمدی، ح. ۱۳۹۴. بهینه‌سازی کاربری اراضی به منظور کمینه‌سازی فرسایش خاک و بیشینه‌سازی سود در بخشی از حوضه آبخیز طالقان. نشریه مرتع و آبخیزداری ایران، ۶۸(۱): ۱۸۱-۱۹۵.
- یاراحمدی، ج.، نیک‌کامی، د. شهنوازی، ع. و صادق‌زاده، م.ا. ۱۳۹۷. بهینه‌سازی کاربری اراضی در بخشی از دامنه‌های جنوبی حوزه آبخیز اهرچای. نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۰(۱): ۴۳-۵۷.
- Cao, K., Huang, B., Wang, S. and Hui, L. 2012. Sustainable land use optimization using boundary-based fast genetic algorithm. *Computers, Environment and Urban Systems*, 36(3): 257-269.
- Coello, C., Van Veldhuizen, D. and Lamont, G. 2007. *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*, 2nd ed. Springer, New York. 80 pages.
- Costanza, R., de Groot, R., Braat, L., Fioramonti, L., Sutton, P., Farber, S. and Grasso, M. 2017. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 28: 1-16.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyerivan, T. 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6: 182-197.
- Ehrgott, M. 2005. *Multicriteria optimization*. Springer, Berlin. 323 pages.
- Foley, J., Defries, R., Asner, G., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S., Chapin III, F.S., Coe, C., Daily, M., Gibbs, G., Helkowski, H., Holloway, J., Howard, T., Kucharik, E., Monfreda, C., Patz, J., Prentice, I., Ramankutty, N. and Snyder, P. 2005. Global consequences of land use. *Science*, 309: 570-574.
- Gashaw, T., Tulu, T., Argaw, M., Worqlul, A.W., Tolessa, T. and Kindu, M. 2018. Estimating the impacts of land use/land cover changes on ecosystem service values: The case of the Andassa watershed in the Upper Blue Nile basin of Ethiopia. *Ecosystem Services*, 31: 219-228.
- Holland, J.H. 1992. *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT Press, Cambridge. 211 pages.

- Li, X., Lei, L. and Li, J. 2023. Integrating ecosystem service value into the evaluation of sustainable land use in fast-growing cities: A case study of Qingdao, China. *Ecological Indicators*, 153: 110434.
- Li, X. and Lu, Z. 2025. Exploring the balance between ecosystem services and economic benefits via multi-objective land use optimization. *Land*, MDPI, vol. 14(5), pages 1-20.
- Liang, X., Guan, Q., Clarke, K., Liu, S., Wang, B. and Yao, Y. 2021. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China. *Computers, Environment and Urban Systems*, 85: 101569.
- Liu, X., Liang, X., Li, X., Xu, X., Pei, F., Ou, J., Chen Y. and Li, S. 2017. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 168: 94–116.
- Luan, C., Liu, R., Zhang, Q., Sun, J. and Liu, J. 2024. Multi-objective land use optimization based on integrated NSGA-II-PLUS model: Comprehensive consideration of economic development and ecosystem services value enhancement. *Journal of Cleaner Production*, 434: 140306.
- Malczewski, J. 2006. GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20: 703–726.
- Mansor, S., Pourmanafi, S., Mahmud, A. and Pirasteh, S. 2012. Optimization of land use suitability for agriculture using integrated geospatial model and genetic algorithms. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1–2: 229–234.
- Marler, R. and Arora, J. 2004. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26: 369–395.
- Mendoza, G., and Martins, H. 2006. Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modelling paradigms. *Forest Ecology and Management*, 230: 1–22.
- Mitchell, M. 1998. *An introduction to genetic algorithms*. MIT Press, Cambridge. 209 pages.
- Sadeghi, S.H., Jalili, K. and Nikkami, D. 2009. Land use optimization in watershed scale. *Land Use Policy*, 26: 186–193.
- Shaygan, M., Alimohammadi, A., Mansourian, A., Govara Z.S. and 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: 906–916.
- Sicuaio, T., Zhao, P., Pilesjö, P., Shindyapin, A. and Mansourian, A. 2024. Sustainable and resilient land use planning: A multi-objective optimization approach. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(3).
- Song, M. and Chen, D. 2018. An improved knowledge-informed NSGA-II for multi-objective land allocation (MOLA). *Geo-spatial Information Science*, 21: 1–15.
- Stewart, T.J., Janssen, R. and van Herwijnen, M. 2004. A genetic algorithm approach to multiobjective land use planning. *Computers & Operations Research*, 31: 2293–2313.
- Vaskan, P., Passuello, A., Guillén-Gosálbez, G., Schuhmacher, M. and Jiménez Esteller, L. 2013. Combined use of GIS and mixed-integer linear programming for identifying optimal agricultural areas for sewage sludge amendment: A case study of Catalonia. *Environmental Modelling & Software*, 46: 163–169.

- Wang, Q., Liu, R., Men, C. and Guo, L.2018. Application of genetic algorithm to land use optimization for non-point source pollution control based on CLUE-S and SWAT. *Journal of Hydrology*, 560: 86–96.

**Abstract**

Land-use management in watersheds has an inherently multi-objective nature due to the presence of conflicting goals, ecological constraints, and socio-economic pressures, and decision-making in this field requires the use of scientific and data-driven methods. This report, with the aim of providing an analytical and systematic review, examines the three main categories of multi-objective optimization methods—including classical models, metaheuristic algorithms, and hybrid approaches—and analyzes the application of each in land-use planning. In the first part, the fundamental concepts and the necessity of employing multi-objective approaches in watershed management are explained, and the role of decision variables, objective functions, and environmental constraints in shaping optimization models is clarified. Subsequently, algorithms such as GA and NSGA-II are introduced as powerful tools for exploring complex solution spaces and generating the Pareto front, and their strengths and limitations are examined based on domestic and international case studies. Furthermore, hybrid models based on integrating evolutionary algorithms with land-use change simulation models such as FLUS and PLUS are introduced, and their capabilities in scenario development, ecological impact assessment, and sustainable development analysis are described. The report's conclusion indicates that classical methods are suitable for simpler problems and limited data, metaheuristic algorithms have higher efficiency for real-world cases with multiple conflicting objectives, and hybrid frameworks serve as advanced tools for strategic planning and future simulation. This analysis can provide a practical foundation for selecting an appropriate optimization method in land management, land-use allocation, and watershed spatial planning projects in the country.

**Keywords:** Genetic Algorithm (GA), Land use allocation, MOLA model, Multi-objective optimization, NSGA-II.



**Ministry of Agriculture-Jahad  
Agricultural Research, Education and Extension Organization  
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute**

---

**Title:** Multi-Objective Optimization Methods for Land Use Allocation in Watersheds: Concepts, Algorithms, and Applications

**Authors:** Sousan Barati Ghahfarokhi, Mahmoudreza Tabatabaei

**Editor:** Saeed Nabipay Lashkarian

**Page Layout:** Abbas Seddigh

**Publisher:** Soil Conservation and Watershed Management Research Institute

**Circulation:** 10 Copies

**Date of Publication:** Spring 2026

This scientific work has been registered with the series number of **69292** at the date of **2026-05-17** the Agriculture Information and Scientific Documents Center. All rights reserved. No part of this publication may reproduced or translated without the original reference.



**Ministry of Agriculture-Jahad  
Agricultural Research, Education and Extension Organization  
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute**

**Technical Manuscript:**  
Multi-Objective Optimization Methods for Land Use Allocation in  
Watersheds: Concepts, Algorithms, and Applications

**Authors:**  
Sousan Barati Ghahfarokhi, Mahmoudreza Tabatabaei

**Series Number: 69292**

**2026**



Ministry of Agriculture - Jihad  
Agriculture Research, Education and Extension Organization  
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute



# Technical Report

**Evaluation of the Advanced Topological  
Kriging Interpolation Method in  
Hydrological Variables Predictions in Arid  
and Semi-arid Regions**

**Authors:**

Sousan Barati Ghahfarokhi, Mahmoudreza Tabatabaei

Series Number: 69292

2026