



# سنجش از دور & GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران / سال هفتم، شماره یکم، بهار ۱۳۹۴  
Iranian Remote Sensing & GIS / Vol.6, No.2, Summer 2014

۳۹-۵۷

## طراحی مدل بهینه‌سازی کاربری اراضی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه با رویکرد آمایش سرزمین (مطالعه موردی: رودبار جنوب - استان کرمان)

علی‌اکبر متکان<sup>۱</sup>، علیرضا شکیبیا<sup>۲</sup>، بابک میرباقری<sup>۳</sup>، مهران شایگان<sup>۴</sup>، محمد تناسان<sup>۵</sup>\*

۱. دانشیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۲. مربی گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۳. مربی گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تربیت مدرس

۴. کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۰/۲۴

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۵/۲۳

### چکیده

با افزایش جمعیت و به تبع آن افزایش نیازهای جامعه، آمایش سرزمین اهمیت ویژه‌ای یافته است. به دلیل پیوند آمایش سرزمین با چندین هدف متضاد، استفاده از الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه - در صورت تناسب الگوریتم با نوع مسئله - می‌تواند مفید باشد. در پژوهش حاضر ضمن ارائه مدلی به منظور بهینه‌سازی کاربری اراضی، راه‌حلی مؤثر برای به کارگیری الگوریتم ژنتیک چندهدفه در انواع مسائل مربوط به آمایش سرزمین معرفی می‌گردد. مدل طراحی شده در پژوهش حاضر به منظور بهینه‌سازی کاربری اراضی از الگوریتم NSGA-II بهره می‌برد. خروجی‌های این مدل، الگوهای برای آمایش سرزمین هستند که فرسایش منطقه را تا حد زیادی کاهش می‌دهند و سطح منفعت اقتصادی منطقه را بالا می‌برند. در این مدل، کاربری‌ها دارای بالاترین سازگاری، کمترین دشواری تغییر و بیشترین پیوستگی هستند. به منظور استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه در حل مسائل آمایش سرزمین در این پژوهش راهکاری ابتکاری برای تولید جمعیت اولیه و عملگر ابتکاری ترکیب متناسب با مسائل آمایش سرزمین شرح و بسط داده شد. مدل طراحی شده در منطقه رودبار جنوب واقع در استان کرمان پیاده‌سازی شد. نتایج به دست آمده نشان دادند که الگوهای آمایش سرزمین پیشنهاد شده در این مدل می‌توانند در حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد فرسایش منطقه را کاهش دهند؛ در عین حال سطح منفعت اقتصادی حاصل از تغییر کاربری بین ۴۰ تا ۵۰ درصد رشد خواهد داشت. همچنین تمامی الگوها دارای سازگاری بالا و دشواری تغییر اندک هستند. با بررسی عملگرهای ابتکاری ارائه شده، مشخص شد این عملگرها تأثیر بسزایی در روند حل مسئله داشتند.

**کلیدواژه‌ها:** بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم NSGA-II، توسعه عملگرهای ابتکاری، آمایش سرزمین، توان اکولوژیک.

\* نویسنده مکاتبه کننده: تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، گروه سنجش از دور و GIS، تلفن: ۰۹۱۳۳۵۸۵۰۰۲

## ۱- مقدمه

در دنیای امروز زمین از مواهب کمیاب به شمار می‌آید و برای استفاده از آن، بین فعالیت‌های گوناگون انسانی - مانند زراعت، مرتع، جنگل، صنعت و شهر- رقابت وجود دارد. تخصیص عقلانی زمین به این فعالیت‌ها از مباحث برنامه‌ریزی است که «آمایش سرزمین» خوانده می‌شود. به دلیل وجود اهداف مختلف و متضادی همچون کاهش میزان فرسایش، افزایش سازگاری عملیات با شرایط منطقه و حداکثر منفعت اقتصادی، برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری برای استفاده بهینه از طبیعت و حفاظت از آن پیچیده و دشوار است ( Datta et al., 2007). از این رو استفاده از ابزاری قدرتمند در زمینه مدیریت، ارائه و تحلیل داده‌های مکانی همانند سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) می‌تواند در حل این‌گونه مسائل مفید باشد. با این حال، بسیاری از روش‌ها و توابع استاندارد امروزی GIS در حل بعضی از مسائل پیچیده مکانی ناتوان‌اند و استفاده از الگوریتم‌های هوشمند - از جمله الگوریتم‌های بهینه‌یابی چندهدفه - می‌تواند در حل این‌گونه مسائل تصمیم‌گیری مکانی مفید باشد (Herzig, 2008).

از آنجاکه مسائل مرتبط با اطلاعات مکانی معمولاً با حجم وسیعی از اطلاعات و پردازش‌ها مواجه‌اند و فضایی که باید بهینه‌سازی شود نیز با توجه به تنوع اهداف، پیچیدگی زیادی دارد، استفاده از الگوریتمی سریع می‌تواند بسیار مفید باشد (رجبی و همکاران، ۱۳۸۹). الگوریتم تکاملی<sup>۱</sup> NSGA-II به‌عنوان یکی از انواع الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌یابی ( Goldberg, 2007)، از معروف‌ترین و پرکاربردترین الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه است، که تکنیکی بسیار قدرتمند برای حل مسائل جست‌وجو و بهینه‌یابی دنیای واقعی به‌شمار می‌آید. نیازنداشتن این الگوریتم به پارامترهای اضافی و سرعت محاسباتی بالای آن ( Deb et al., 2002)، سبب افزایش به‌کارگیری آن در پژوهش‌های مختلف به‌ویژه در زمینه‌های مرتبط با GIS شده است. در زمینه بهینه‌سازی کاربری اراضی و آمایش

سرزمین با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌یابی تاکنون تحقیقات و پژوهش‌های فراوانی صورت گرفته است. کمپبل<sup>۲</sup> و همکارانش (۱۹۹۲) از GIS و الگوریتم بهینه‌یابی برنامه‌ریزی خطی (LP) برای برنامه‌ریزی استفاده از زمین در بخش کشاورزی استفاده کردند. استوارت<sup>۳</sup> و همکارانش (۲۰۰۴) برای حل مسئله آمایش سرزمین از روش برنامه‌ریزی آرمانی استفاده کردند و الگوریتم ژنتیک را برای توسعه آن به‌کار بردند. داتا و دب<sup>۴</sup> (۲۰۰۷) در پژوهش خود از الگوریتم NSGA-II برای مدیریت زمین استفاده کردند و سه هدف جنبه‌های اقتصادی مدیریت زمین، میزان فرسایش خاک و میزان ازدست‌رفتن کربن را در نظر گرفتند. یانگ<sup>۵</sup> و همکارانش (۲۰۰۸) از الگوریتم تکاملی چندهدفه در مدیریت زمین‌های کشاورزی استفاده کردند و الگوریتمی تحت عنوان سیستم متقابل چندهدفه مدیریت زمین‌های کشاورزی را طراحی کردند و به‌کار گرفتند. کیا کائو<sup>۶</sup> و همکارانش (۲۰۱۱) مدلی به نام NSGA-II\_MOLM یا همان الگوریتم NSGA-II را به‌منظور آمایش سرزمین با چند هدف شرح و بسط دادند. در خصوص تحقیقات انجام‌شده در این زمینه در ایران، به چند مورد اشاره می‌شود.

شعبانی و همکاران (۱۳۸۶) در پژوهش خود با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه و روش سیمپلکس، سطح بهینه کاربری‌های اراضی را در منطقه مشخص کردند. هدف آنها از این پژوهش کاهش میزان فرسایش و افزایش درآمد در حوضه آبریز مورد مطالعه بود. صادقی و همکاران (۱۳۸۷) در مطالعه‌شان از بهینه‌یابی چندهدفه خطی برای مینیمم کردن فرسایش خاک و ماکزیمم کردن تولید در منطقه برای هر کاربری در حوضه آبریز بریموند استفاده کردند. معصومی و

1. Non Dominated Sorting Genetic Algorithm-II
2. Campbell
3. Stewart
4. Datta & Deb
5. Yang
6. Kia Cao

دنبال می‌شود. از این رو واژه «بهینه‌یابی» به معنای پیدا کردن مجموعه‌ای از جواب یا جوابی است که از لحاظ تمامی مقادیر توابع هدف مورد پذیرش است (Coello Coello et al., 2007).

### ۱-۲- جواب‌های بهینه پاره‌تو<sup>۳</sup> و جبهه بهینه پاره‌تو<sup>۴</sup>

هنگامی که در مقایسه دو جواب، هیچ‌یک از دو جواب به‌ازای تمامی اهداف بهتر از دیگری نباشد، گفته می‌شود که آن دو جواب‌های نامغلوب هستند. اگر اهمیت اهداف به یک اندازه باشد، نمی‌توان گفت کدام‌یک از این دو جواب به‌ازای تمامی اهداف بهتر از دیگری است. به مجموعه چنین جواب‌هایی، جواب‌های بهینه پاره‌تو گفته می‌شود (Deb, 2001). مجموعه تمام جواب‌های بهینه پاره‌تو در مسئله چندهدفه مجموعه بهینه پاره‌تو و بردارهای هدف متناظر با آن، لبه یا جبهه بهینه پاره‌تو نامیده می‌شود (Horn, 1999).

### ۱-۳- الگوریتم NSGA-II

الگوریتم NSGA-II را نخستین بار دب و همکارانش در سال ۲۰۰۲ مطرح کردند. این الگوریتم یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه است، که از نگرش نخبه‌گرایی استفاده می‌کند و می‌تواند در فضایی گسترده از متغیر تصمیم و هدف، جست‌وجو را انجام دهد (Maringanti et al., 2009).

در این الگوریتم ابتدا جمعیت اولیه به صورت تصادفی انتخاب می‌شود، سپس این جمعیت با توجه به توابع هدف و براساس مفهوم غالب بودن به کمک عملگر مرتب‌سازی نامغلوب<sup>۵</sup> (Deb et al., 2002) به n سطح پاره‌تو<sup>۶</sup> (F) تقسیم می‌شود. به هر سطح پاره‌تو، رتبه‌ای

همکارانش (۱۳۸۹)، الگوریتم NSGA-II را در آمایش سرزمین به‌کار گرفتند. هدف آنها حمایت از تصمیم‌گیری در یافتن زمین‌های مناسب برای کاربری صنعتی در محدوده استان زنجان بود.

هدف پژوهش حاضر، طراحی مدل بهینه‌سازی کاربری اراضی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II به منظور تولید الگوهای مناسب آمایش سرزمین در بستر GIS است. بدین منظور ابتدا با مطالعه منابع اکولوژیک منطقه و به‌کارگیری مدل اکولوژیکی مخدوم و با استفاده از قابلیت‌های GIS، توان بالقوه زمین‌های واحدهای کاری حوضه برای کاربری‌های مختلف سنجیده شد. در ادامه با استفاده از توانایی الگوریتم NSGA-II، کاربری‌های بهینه برای منطقه که اهداف مورد نظر را برآورده سازند، تعیین شدند. مدل طراحی شده به‌گونه‌ای تعریف شده است که الگوهایی از آمایش سرزمین ایجاد کند که در آنها فرسایش تا حد ممکن کاهش یابد، منفعت اقتصادی استفاده از حوضه بالا رود، کاربری‌های همسایه حداکثر سازگاری را با هم داشته باشند، دشواری تغییر کاربری کم باشد و کاربری‌ها دارای بیشترین پیوستگی باشند. نتایج نهایی مدل به صورت چندین الگوی بهینه که ارزش کاربردی یکسانی دارند، ارائه شده است که براساس شرایط موجود در منطقه مورد مطالعه و نظر کارشناسی، الگوهای بهینه‌ای با قابلیت اجرایی هستند. در پژوهش حاضر، روشی ابتکاری برای تولید جمعیت اولیه و همچنین یک عملگر ابتکاری ترکیب<sup>۱</sup> متناسب با مسائل آمایش سرزمین، طراحی و استفاده شد.

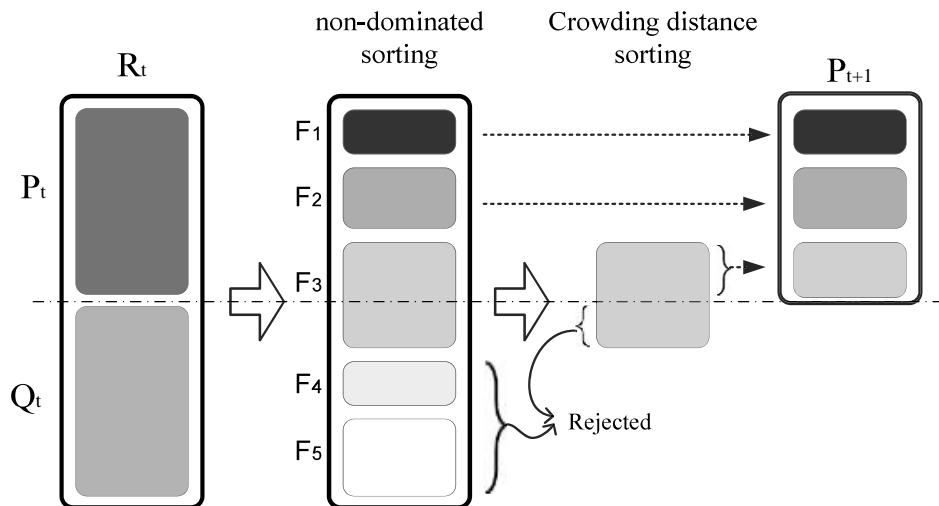
### ۱-۱- بهینه‌یابی چندهدفه<sup>۲</sup>

هنگامی که مسئله بهینه‌یابی بیش از یک تابع هدف دارد، عمل یافتن یک یا چند جواب بهینه، بهینه‌یابی چندهدفه نامیده می‌شود (Dias et al., 2002). در مسئله بهینه‌یابی چندهدفه پس از شناسایی مسئله، مجموعه‌ای از متغیرهای تصمیم کشف می‌شود و با توجه به محدودیت‌های مسئله، بهینه‌کردن توابع هدف

1. Crossover
2. Multi-objective optimization
3. Pareto-Optimal Set
4. Pareto-Optimal Front (Surface)
5. Non dominated Sorting
6. Pareto Front

متوسط ارزیابی‌ها (برازندگی‌ها) را در نظر گرفت (Deb et al., 2002). شکل ۱ نمایشی از نحوه عملکرد این الگوریتم را نشان می‌دهد. در این شکل  $R_t$  جمعیت حاصل از ترکیب جمعیت والدین (P) و فرزندان (Q) نسل t است. ابتدا جمعیت  $R_t$  به وسیله عملگر مرتب‌سازی نامغلوب به ۵ سطح پاره‌تو (F) تقسیم شد. چون فقط به تعداد جمعیت اولیه از جمعیت  $R_t$  می‌تواند به نسل بعد (t+1) انتقال یابد، جمعیت  $F_1$  و  $F_2$  به دلیل داشتن رتبه غالب بودن بهتر می‌توانند به صورت مستقیم وارد نسل بعد شوند ولی جمعیت  $F_3$  نمی‌تواند به طور کامل به نسل بعد انتقال یابد. از این رو ابتدا اعضای جمعیت  $F_3$  به روش فاصله ازدحامی مرتب شدند، سپس تعدادی از اعضای این جبهه پاره‌تو که فاصله ازدحامی بهتری داشته باشند به نسل بعد انتقال می‌یابند و باقی اعضای این سطح پاره‌تو به همراه اعضای  $F_4$  و  $F_5$  حذف می‌شوند.

جداگانه و به اعضای درون سطح، رتبه‌ای مساوی براساس مفهوم غالب بودن نسبت داده می‌شود. برای اعضای که در یک سطح پاره‌تو قرار می‌گیرند و هم‌رتبه هستند، یک عدد فاصله با توجه به روش فاصله ازدحامی<sup>۱</sup> که بیانگر رتبه فاصله است نسبت داده می‌شود. در مرحله بعد به کمک الگوریتم رقابت دودویی، جمعیت والد (P) با توجه به رتبه غالب بودن کمتر و رتبه فاصله بیشتر انتخاب می‌شود. در ادامه، جمعیت نتیجه (Q) از روی جمعیت والد به کمک عملگرهای کلاسیک ژنتیک ایجاد می‌شود. در نهایت، جمعیت‌های والد و فرزندان با هم ترکیب می‌شوند و جمعیت نسل بعد (R) از کل مجموعه این دو جمعیت که شامل جمعیت نخبه نیز هستند، انتخاب می‌شود. این روند در نسل‌های بعد نیز به همین ترتیب تکرار می‌شود تا معیار اختتام ارضا شود. به عنوان نمونه می‌توان همگراشدن کل جمعیت یا فاصله ارزیابی (برازندگی) بهترین فرد جمعیت از



شکل ۱. نمایشی از نحوه عملکرد الگوریتم NSGA-II

منبع: Deb et al., 2002

## 1. Crowding Distance

#### ۴-۱- معیار فراگشایش<sup>۱</sup>

کشف جواب‌های بهینه پاره‌تو یا نزدیک به آن و پیدا کردن جواب‌هایی با تنوع و گوناگونی خوب (فاصله ازدحامی مناسب بین جواب‌ها)، دو هدف اصلی الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه هستند (Deb, 2001). چندین معیار وجود دارد که هم‌زمان می‌تواند هر دو وظیفه مسائل بهینه‌یابی را ارزیابی کنند. در پژوهش حاضر برای ارزیابی مدل از معیار فراگشایش (Deb, 2001) استفاده شد. این معیار، میزان ناحیه (واقع در فضای هدف) پوشیده‌شده به وسیله جواب‌های جبهه پاره‌تو را محاسبه می‌کند. به بیان ریاضی برای هر جواب عضو جبهه اول، یک مکعب فضایی ( $V_i$ ) با یک نقطه مرجع (مبنا) ساخته می‌شود. از اجتماع تمام مکعب‌های به وجود آمده، معیار فراگشایش (HV) از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$HV = \text{Volume} \left( U_{i=1}^{|Q|} v_i \right) \quad \text{رابطه (۱)}$$

الگوریتم‌هایی که دارای مقدار بزرگی برای HV باشند، الگوریتم‌های بهتری خواهند بود.

#### ۵-۱- نمودار مسیر ارزش

از دیگر روش‌های بررسی کیفیت جواب‌های مدل، روش مسیر ارزش است (Geoffrion et al., 1972). در این نمودار محور افقی توابع هدف را نشان می‌دهد و میله‌های عمودی برای نمایش هر تابع هدف به کار می‌رود که برد آن کمترین و بیشترین مقدار تابع هدف برای مجموعه بهینه پاره‌تو است. هر خط متقاطع که توابع هدف را به هم وصل می‌کند، با یک جواب از مجموعه نامغلوب متناظر است. این خطوط، ارزش یک جواب را در هر مورد از توابع هدف نشان می‌دهند.

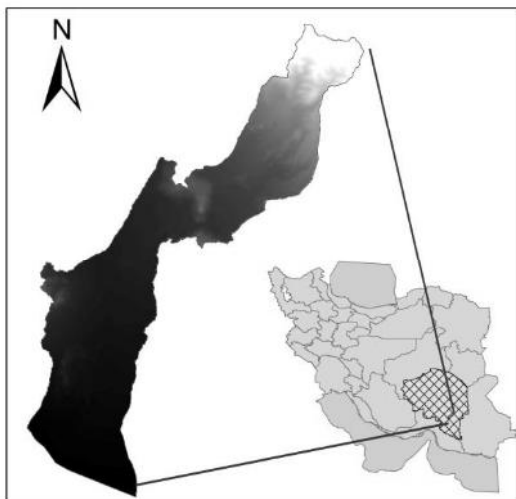
در مورد نمودار مسیر ارزش ذکر دو نکته ضروری است: (۱) این نمودار، ارزیابی کیفی از جواب‌های به دست آمده را از منظر هر تابع هدف نشان می‌دهد. الگوریتمی که بتواند جواب‌های خود را در سراسر طول میله بگستراند، جواب‌های با پراکندگی خوب را پیدا

کرده است. (۲) اندازه شیب میان خطوط، مبادله میان توابع هدف را نشان می‌دهد. الگوریتمی که تغییرات عمده در شیب خطوط بین دو تابع هدف متوالی (میله‌های عمودی) را داشته باشد، دارای مبادله خوبی از جواب نامغلوب است (Deb, 2001).

#### ۲- مواد و روش‌ها

##### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعه شده در پژوهش حاضر، حوضه آبخیز رودبار جنوب در استان کرمان است. این حوضه با مساحت ۵۲۳۴۵/۱ هکتار بین ۵۷°۵۵'۵۵" تا ۵۹°۱۹'۳۳" طول شرقی و ۲۸°۰۲'۵۲" تا ۲۸°۰۳'۲۷" عرض شمالی واقع است (شکل ۲).



شکل ۲. منطقه مورد مطالعه

گسترش سازندهای حساس به فرسایش، شرایط خاص توپوگرافی و ویژگی‌های اقلیمی به‌ویژه در ارتفاعات فوقانی باعث شده است که این حوضه از نظر فرسایش آسیب‌پذیر باشد، به طوری که ۷۴/۳ درصد مساحت منطقه دارای تیپ فرسایشی با حساسیت

1. Hyper Volume

گردید. در پایان، براساس نقشه واحدهای زیست‌محیطی منطقه و نیازمندی‌های هریک از کاربرهای مدنظر، نقشه توان اکولوژیکی منطقه برای کاربری‌های کشاورزی، مرتع و جنگل‌داری تهیه شد و قدرت بالقوه عرصه‌های مختلف سرزمین برای کاربری‌های مورد نظر تعیین گردید. لازم به ذکر است که با توجه به گستردگی موضوع، بررسی و تحلیل وضعیت منابع آبی به‌منظور تعیین توان اکولوژیکی منطقه صورت نگرفت.

## ۲-۳-۲- طراحی و اجرای مدل

### ۲-۳-۱- تعریف توابع هدف

در پژوهش حاضر به‌منظور تولید الگوهای آمایش سرزمین، پنج تابع هدف فرسایش، منفعت اقتصادی، سازگاری کاربری‌ها، دشواری تغییر کاربری‌ها و حفظ پیوستگی کاربری‌ها در نظر گرفته شد، که در ادامه شرح داده می‌شوند.

### الف) فرسایش

براساس تحقیقات شرکت مهندسی مشاور طرح آبریز، حوضه آبخیز رودبار از نظر فرسایش آسیب‌پذیر است، لذا یکی از اهداف پژوهش حاضر ایجاد الگوهایی برای آمایش سرزمین در نظر گرفته شد که فرسایش را تا حد ممکن کاهش دهند. در این پژوهش برای محاسبه فرسایش، از مدل RUSLE که به استفاده از اراضی وابسته است، استفاده شد (Wischmeier, 1978). تابع هدف مورد نظر به‌کمک رابطه (۲) در مدل طراحی شده به‌کار گرفته شد.

رابطه (۲)

$$Minimiz : Z_1 =$$

$$\sum_{e=1}^E \sum_{i=1}^{Runit} \sum_{j=1}^{Cunit} (R_{i,j} \times K_{i,j} \times L_{i,j} \times S_{i,j} \times C_{e,i,j} \times P_{e,i,j})$$

که در آن،  $R_{i,j}$  عامل فرسایش باران،  $K_{i,j}$  عامل فرسایش‌پذیری خاک،  $L_{i,j}$  عامل طول شیب،  $S_{i,j}$  عامل تندی شیب،  $C_{e,i,j}$  عامل مدیریت پوشش برای کاربری

فرسایشی متوسط است (شرکت مهندسی مشاور طرح آبریز، ۱۳۹۱). با بررسی‌های صورت‌گرفته مشخص شد که در منطقه مطالعه‌شده - به‌رغم وجود پتانسیل بالای کشاورزی- همچنان مردم گرفتار محرومیت عمیقی هستند. در چنین شرایطی استفاده بهینه از امکانات و منابع موجود منطقه اهمیت بسیار بالایی برای کشاورزان دارد.

## ۲-۲- داده‌ها

در پژوهش حاضر نقشه مدل رقومی ارتفاع، نقشه کاربری اراضی و داده‌های بارندگی و خاک‌شناسی منطقه مطالعه‌شده به‌عنوان نقشه‌ها و داده‌های پایه به‌کار گرفته شدند (منبع تمامی داده‌ها و نقشه‌های پایه، شرکت مهندسی مشاور طرح آبریز است). از این داده‌ها و نقشه‌ها به‌سه منظور استفاده شد: تعیین توان اکولوژیکی منطقه به‌عنوان ورودی مدل طراحی‌شده، ورودی مدل RUSLE برای محاسبه فرسایش منطقه به‌عنوان یکی از توابع هدف، و ورودی توابع هدف و ساخت کروموزوم‌های اولیه (جمعیت اولیه).

## ۲-۲-۱- تعیین توان بوم‌شناسی منطقه

یکی از مراحل اصلی آمایش سرزمین، تعیین توان بوم‌شناختی یا اکولوژیکی سرزمین است (کریمی و همکاران، ۱۳۸۸). نقشه توان اکولوژیک منطقه یکی از ورودی‌های مدل طراحی‌شده است. در پژوهش حاضر، تعریف و مبانی مدل ارزیابی توان اکولوژیکی مخدوم به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شد. به‌منظور تهیه این نقشه باید وضعیت منابع اکولوژیک منطقه مورد شناسایی و تجزیه و تحلیل و همچنین جمع‌بندی و ارزیابی قرار گیرد (مخدوم، ۱۳۸۷). ابتدا با استفاده از نقشه شیب و طبقات ارتفاعی و براساس نیاز کاربری‌های جنگل‌داری، کشاورزی و مرتع، نقشه واحدهای شکل زمین در منطقه تولید شد و در ادامه با تلفیق این نقشه با نقشه‌های حساسیت به فرسایش، بافت و عمق خاک منطقه، نقشه واحدهای زیست‌محیطی منطقه تهیه

$P_{e,ij}$  عامل حفاظت کاربری  $e$  و  $i$  و  $j$  شماره سطر و ستون هر پیکسل است.

رابطه‌های (۴) و (۵)، سازگاری هر کاربری با کاربری‌های همسایه خود محاسبه گردید.

Maximaz :

$$Z_3 = \sum_{i=1}^{Runit} \sum_{j=1}^{Cunit} C_{i,j} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$C_{i,j} = \frac{\sum_{h=1}^n C_{i,j,h}}{n} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در رابطه (۴)،  $C_{i,j}$  میانگین سازگاری پیکسل ( $i,j$ ) با همسایه‌های خود است. در رابطه (۵)،  $C_{i,j,h}$  سازگاری پیکسل ( $i,j$ ) با همسایه  $h$ ام خود و  $n$  تعداد همسایه‌های پیکسل ( $i,j$ ) است.  $i$  و  $j$  نیز شماره سطر و ستون پیکسل‌ها هستند.

#### د) دشواری تغییر کاربری‌ها

یکی از اهداف پژوهش حاضر، به حداقل رساندن دشواری تغییر کاربری‌ها در الگوهای خروجی مدل است. برای محاسبه سختی تغییر کاربری‌ها از ماتریس دشواری تغییر کاربری‌ها (بختیاری‌فر و همکاران، ۱۳۹۰) استفاده شد. ابتدا با استفاده از روش AHP، سطوح مختلف دشواری تغییر کاربری‌ها وزن‌دهی شد و در ادامه با استفاده از رابطه (۶) مقدار دشواری تغییر از کاربری فعلی هر پیکسل به کاربری مدنظر محاسبه گردید.

Minimaz :

$$Z_4 = \sum_{i=1}^{Runit} \sum_{j=1}^{Cunit} D_{i,j} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن،  $D_{i,j}$  دشواری تغییر کاربری از کاربری فعلی پیکسل ( $i,j$ ) به کاربری پیشنهادشده در مدل است.

#### ه) حفظ پیوستگی کاربری‌ها

دلیل استفاده از این تابع هدف، ایجاد الگوهایی برای آمایش سرزمین است که کاربری‌های آن حداکثر پیوستگی را داشته باشند. برای اعمال این تابع هدف

#### ب) منفعت اقتصادی

هدف از این تابع هدف رسیدن به حداکثر سودمندی الگوهای آمایش سرزمین است. برای اعمال این تابع هدف ابتدا با استفاده از نظر کارشناسی، ماتریس منفعت اقتصادی تغییر کاربری‌ها تهیه شد، سپس با استفاده از روش AHP سطوح منفعت اقتصادی وزن‌دهی گردید و در ادامه به کمک رابطه (۳) منفعت اقتصادی تغییر کاربری فعلی یک پیکسل به کاربری مدنظر محاسبه شد. لازم به ذکر است که در تهیه ماتریس منفعت اقتصادی تغییر کاربری‌ها فقط به اقتصاد بازاری تغییر کاربری‌ها توجه شده است.

Maximaz :

$$Z_2 = \sum_{i=1}^{Runit} \sum_{j=1}^{Cunit} P_{i,j} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن،  $P_{i,j}$  منفعت اقتصادی تغییر کاربری پیکسل ( $i,j$ ) از کاربری فعلی آن به کاربری پیشنهادی است.

#### ج) سازگاری کاربری‌ها

دلیل استفاده از این تابع هدف، افزایش سازگاری کاربری‌ها در الگوهای خروجی مدل است تا ارتباط هر کاربری با محدوده اطراف آن به گونه‌ای باشد که تأثیرات ناخواسته میان آن کاربری با کاربری‌های مجاور به حداقل برسد. این تابع هدف براساس میزان سازگاری کاربری هر واحد مکانی با کاربری‌های واحدهای مکانی مجاور محاسبه می‌شود. لذا از ماتریس سازگاری کاربری‌ها (بختیاری‌فر و همکاران، ۱۳۹۰) برای دستیابی به شرایط سازگاری میان کاربری‌های همسایه استفاده شد. این ماتریس، سطوح مختلف سازگاری میان کاربری‌های گوناگون را به کمک دانش کارشناسی مشخص می‌کند. در ادامه به کمک روش AHP سطوح سازگاری کاربری‌ها وزن‌دهی شد و با استفاده از

اولیه است (Beady et al., 1993). در اکثر مسائل بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، جمعیت اولیه به صورت تصادفی تولید می‌شود، اما گاه در مسائل پیچیده برای بالابردن سرعت و کیفیت الگوریتم، روش‌هایی ابتکاری نیز برای تولید جمعیت اولیه به کار گرفته می‌شوند؛ همچنین می‌توان مجموعه‌ای از قیود و محدودیت‌های مسئله را نیز هنگام ایجاد جمعیت اولیه آن پیاده‌سازی کرد. برای ایجاد جمعیت اولیه در پژوهش حاضر از روشی ابتکاری مینی بر توابع جریمه‌ای و انتخاب به وسیله چرخه رولت<sup>۱</sup> استفاده شد. در این روش ابتدا لازم است مجموعه‌ای از قیود و محدودیت‌ها برای قرارگیری یک کاربری در یک پیکسل (واحد کاری) از منطقه در نظر گرفته شود. قیود در نظر گرفته شده شامل اینها هستند: (۱) کاربری فعلی موجود در یک پیکسل اگر از کاربری‌های بالقوه آن پیکسل باشد، به دلیل کاهش هزینه‌های آمایش سرزمین بر بقیه کاربری‌ها ارجحیت دارد؛ (۲) کاربری‌های موجود در منطقه به دلیل سازگاری بالاتر با شرایط منطقه، بر بقیه کاربری‌ها ارجحیت دارند؛ (۳) یکی از اهداف مهم در آمایش سرزمین حفظ پیوستگی کاربری‌هاست، لذا کاربری‌های بالقوه یک پیکسل که با کاربری همسایه آن یکسان است، بر باقی کاربری‌ها ارجحیت دارند. محدودیت‌های در نظر گرفته شده شامل اینها هستند: (۱) محدودیت شرایط محیطی یک پیکسل که آن را مقید می‌کند که فقط مجموعه‌ای از کاربری‌های مشخص، مجاز به اعمال در پیکسل مورد نظر باشند؛ (۲) محدودیت مساحت هر کاربری که موجب می‌شود تا در حد امکان مساحت کاربری‌ها در یک حد مجاز قرار گیرند. سپس براساس قیود و محدودیت‌های گفته شده، کاربری‌های مجاز براساس توابع جریمه‌ای امتیازبندی و احتمال انتخاب هر کاربری محاسبه می‌شود. در ادامه

ابتدا پیکسل‌هایی که کاربری آنها یکسان است و مرز مشترک نیز دارند، خوشه‌بندی می‌شوند. در ادامه، تعداد این خوشه‌ها شمارش و بر مساحت منطقه تقسیم می‌شوند. رابطه (۷) شکل کلی این تابع هدف را نشان می‌دهد.

Minimize :

$$Z_5 = \frac{N}{A} \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در آن، N تعداد خوشه‌ها و A مساحت منطقه مطالعه شده بر حسب هکتار است.

## ۲-۳-۲- اجرای مدل

به منظور حل مسائل آمایش سرزمین با استفاده از الگوریتم NSGA-II لازم است کروموزوم‌های متناسب با مسئله طراحی شوند و عملگرهای ژنتیکی متناسب با این گونه مسائل به کار گرفته شوند. بدین منظور در پژوهش حاضر، راهکاری ابتکاری برای ایجاد جمعیت اولیه و عملگری ابتکاری برای انجام نوع خاصی از عملیات ترکیب با نام عملگر ترکیب اجتماع خوشه‌ها<sup>۱</sup> (CUC) طراحی و به کار گرفته شد. در ادامه نحوه شکل‌دهی کروموزوم‌ها، روش ابتکاری ایجاد جمعیت اولیه و عملگر ترکیب ابتکاری CUC شرح داده می‌شود.

## الف) نحوه شکل‌دهی کروموزوم‌ها

مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها به مثابه جمعیتی برای الگوریتم ژنتیک قلمداد می‌شوند (Goldberg, 1989) که به وسیله عملگرهای الگوریتم ژنتیک تکامل می‌یابد. در پژوهش حاضر هر کروموزوم متشکل از یک فضای دوبعدی از ژن‌هاست. موقعیت هر ژن نشان‌دهنده یک واحد مکانی (پیکسل‌هایی به ابعاد یک هکتار) از منطقه و ارزش آن بیانگر کاربری آن واحد است. این موارد به گونه‌ای طراحی شده‌اند که نیاز فضایی مسئله را ارضا کنند.

## ب) ایجاد جمعیت اولیه

یکی از قسمت‌های مهم الگوریتم ژنتیک ایجاد جمعیت

1. Classter Union Crossover  
2. Roulette Wheel Selection



XTD مستقل از نوع مسئله و عملگر XBC مختص مسائل آمایش سرزمین است، که موجب افزایش یا کاهش مساحت یک قطعه از کاربری می‌شود. در ادامه نحوه اعمال عملگر ترکیب CUC شرح داده می‌شود.

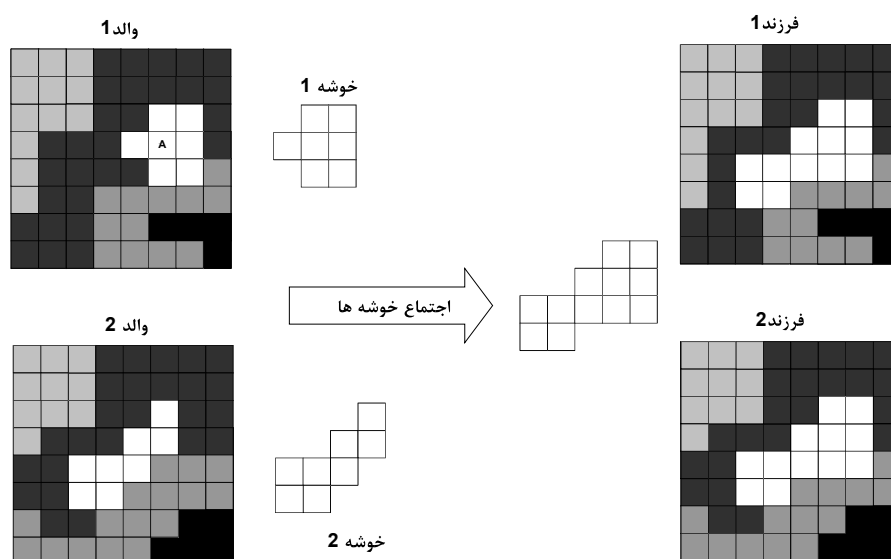
### ج-۱) عملگر ترکیب اجتماع خوشه‌ها

یکی از اهداف مهم در آمایش سرزمین حفظ پیوستگی کاربری‌هاست. در پژوهش حاضر، عملگر ابتکاری CUC به منظور ارتقای ژن‌های خوب دو والد و درعین حال حفظ پیوستگی کاربری‌ها و بهبود یکپارچگی در کاربری‌ها تعریف شد. برای اعمال این نوع ترکیب ابتدا دو والد انتخاب می‌شود. سپس به صورت تصادفی از میان پیکسل‌هایی از والد اول که کاربری آنها با کاربری پیکسل‌های هم‌مکان آنها در والد دوم یکسان است، یک پیکسل انتخاب می‌شود (پیکسل A) و در ادامه خوشه (مجموعه پیکسل‌هایی با کاربری یکسان و دارای همسایگی) مربوط به این پیکسل در دو والد (خوشه ۱ و خوشه ۲) شناسایی و این خوشه‌ها با هم ترکیب (عمل اجتماع) و به نسل بعد انتقال داده می‌شوند. شکل ۳ این موضوع را به خوبی نشان می‌دهد.

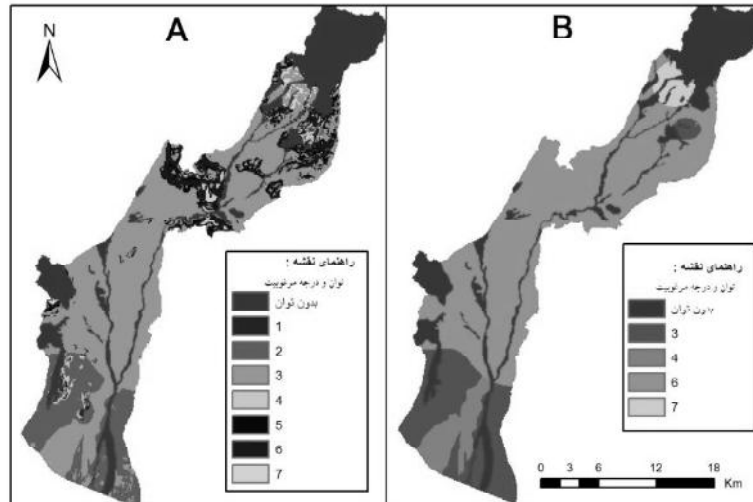
با استفاده از روش انتخاب چرخه رولت، یک کاربری برای هر واحد مطالعاتی انتخاب می‌شود. در امتیازبندی براساس توابع جریمه‌ای، جواب‌های غیرموجه با احتمالی اندک امکان حضور می‌یابند، بدین ترتیب جواب‌های غیرموجه به سادگی حذف نمی‌شوند زیرا ممکن است در ژن‌های آنها اطلاعات مفیدی باشد که با اندکی تغییر به جواب بهینه تبدیل شوند.

### ج) عملگر ترکیب

یکی از عملگرهای مهم در الگوریتم NSGA-II، عملگر ترکیب است. هدف عملگر ترکیب، کاوش در قسمت‌های جدید و به خصوص سودمند فضای جست‌وجو به وسیله تعویض قسمت یک مجموعه از ژن‌ها بین دو کروموزوم است. در پژوهش حاضر از سه نوع عملگر ترکیب مختلف استفاده شد، که سهم هر یک از آنها در تولید جمعیت، از ترکیب برابر به دست آمد. در این پژوهش یک عملگر ترکیب ابتکاری و متناسب با مسائل آمایش سرزمین، تحت عنوان «عملگر ترکیب اجتماع خوشه‌ها (CUC)» شرح و بسط داده شد. دو عملگر دیگر به کار گرفته شده، عملگر ترکیب XTD و XBC (Datta et al., 2007) هستند. عملگر ترکیب



شکل ۳. عملگر ابتکاری طراحی شده: اجتماع خوشه‌ها (CUC)



شکل ۴. نقشه توان اکولوژیکی کاربری‌های کشاورزی و مرتع (A) و کاربری جنگلداری (B)

توان مرتع‌داری است. در مورد جنگلداری، ۸۲۰۰ هکتار از سطح منطقه دارای توان ۳، ۱۱۰۰۰ هکتار دارای توان ۴، ۳۸۰۰۰ هکتار دارای توان ۶، ۳۹۰۰۰ هکتار دارای توان ۷ جنگلداری، و حدود ۱۳۳۰۰ هکتار بدون توان برای جنگلداری است. نکته درخور توجه اینکه حدود ۲۰۰ هکتار از اراضی کشاورزی و ۳۶۰۰ هکتار از مراتع در این حوضه آبخیز در قسمت‌هایی واقع شده‌اند که توانایی بالقوه را برای این کاربری‌ها ندارند. شکل ۴ توان اکولوژیک منطقه مطالعه‌شده را برای کاربری‌های کشاورزی، مرتع و جنگلداری نشان می‌دهد.

### ۲-۳- نتایج مدل

از آنجاکه مدل طراحی شده مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه است، خروجی مدل به صورت چندین الگوی بهینه که ارزش کاربردی یکسانی دارند، ارائه می‌شود. براساس شرایط موجود در منطقه مطالعه‌شده و نظر کارشناسی، الگوهای بهینه قابلیت انتخاب و اجرا خواهند داشت.

میزان فرسایش منطقه در شرایط کاربری فعلی برای مناطق منتخب در فضای جست‌وجو  $10^5 \times 1/636$  تن در سال برآورد شد. این در حالی است که در

### ج-۲) عملگر جهش

عملگر جهش باعث ورود اطلاعات جدید به جمعیت و همچنین جست‌وجو در فضاهای دست‌نخورده مسئله می‌شود. در پژوهش حاضر از دو عملگر جهش MBC و MSIS2 که داتا و همکارانش تعریف کردند، استفاده شد. عملگر جهش MBC برای جست‌وجوی محلی و همچنین حفظ تنوع در میان جواب‌ها به کار می‌رود. عملگر جهش MSIS2 برای هدایت جواب‌های نشدنی به سمت قسمت‌های شدنی فضای جست‌وجو به کار می‌رود (Datta, 2007).

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- توان اکولوژیک منطقه

براساس نتایج حاصل از بررسی توان اکولوژیک منطقه، ۴۹ هکتار از سطح حوضه دارای توان ۱ کشاورزی، ۷۰۰۰ هکتار از سطح حوضه دارای توان ۲ کشاورزی، ۳۳۰۰۰ هکتار از سطح حوضه دارای توان ۳ کشاورزی، و ۱۹۳۰۰ هکتار بدون توان کشاورزی است. همچنین ۳۳۵۰۰ هکتار از سطح منطقه دارای توان ۱ مرتع‌داری، حدود ۳۶۴۰۰ هکتار دارای توان ۲ مرتع‌داری، ۳۸۸۷۰ هکتار دارای توان ۳ مرتع‌داری، و ۱۳۴۷۰ هکتار بدون

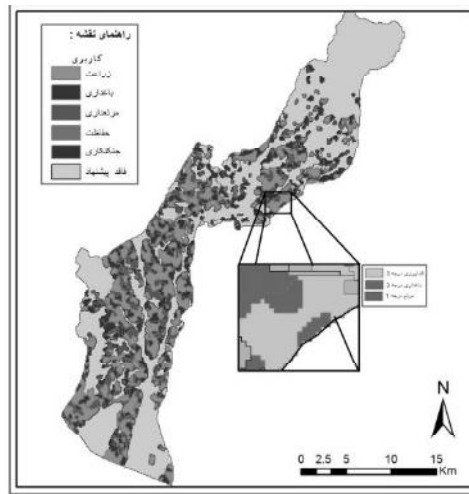
طراحی مدل بهینه‌سازی کاربری اراضی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه با رویکرد آمایش سرزمین

میزان فرسایش را کاهش و منفعت اقتصادی الگوها را افزایش دهد. از طرفی این الگوها براساس جداول ماتریس سازگاری کاربری‌ها و ماتریس دشواری تغییر کاربری‌ها (بختیاری فر و همکاران، ۱۳۹۰) دارای سطح سازگاری بالا، دشواری تغییر کم، و پیوستگی بالا هستند. در مسائلی همچون موضوع پژوهش حاضر، به دلیل استفاده از داده‌های مختلف و تفاوت در شرایط اقلیمی مناطق مطالعه شده و همچنین در نظر گرفتن اهداف و قیود مختلف، نمی‌توان نتایج به دست آمده را به صورت مستقیم با سایر کارها مقایسه و ارزیابی کرد. از این رو مقادیر عددی نتایج مدل طراحی شده در این پژوهش با دیگر کارهای انجام شده در این زمینه متفاوت است. در پژوهش حاضر به منظور بررسی کارایی مدل و مقایسه با سایر کارها، تأثیر به کارگیری عملگرهای ابتکاری طراحی شده در مدل بررسی و ارزیابی شد. شکل ۵ یکی از الگوهای خروجی مدل را در دو سطح کلی و جزئی نشان می‌دهد.

الگوهای خروجی مدل، کمترین مقدار فرسایش  $10.31 \times 10^5$  تن در سال است، که کاهش  $3/0.37$  درصدی فرسایش در این الگو را در مقایسه با شرایط فعلی در قسمت‌های مورد نظر نشان می‌دهد. این الگوی آمایش سرزمین، سطح منفعت اقتصادی حاصل از تغییر کاربری منطقه را به  $0.1536$  رسانده که برابر با رشد  $46/53$  درصدی در سطح منفعت اقتصادی حاصل از تغییر کاربری است. سطح منفعت اقتصادی الگوی کاربری فعلی منطقه نقطه سربه‌سر (نه سود و نه زیان) در نظر گرفته شد، که مقدار کمی آن طبق ماتریس منفعت اقتصادی تغییر کاربری‌ها برابر با  $0.1$  است. جدول ۱ تعدادی از نتایج الگوهای خروجی مدل و تأثیر این الگوها را در منطقه نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهند، مدل طراحی شده در کنار مزیت‌هایی چون در نظر گرفتن مسئله توان اکولوژیک در تخصیص کاربری، توجه به بعد مکانی آمایش سرزمین، و استفاده از عملگرهای ژنتیکی متناسب با آمایش سرزمین، توانسته است

جدول ۱. تعدادی از الگوهای حاصل از مدل و تأثیر آن بر منطقه

شماره	مقدار فرسایش (تن در سال)	درصد کاهش فرسایش	سطح منفعت اقتصادی	درصد رشد سطح اقتصادی	سطح سازگاری	سطح دشواری تغییر	تعداد خوشه‌ها
۱	۱۰۷۰۳۰	۳۴/۵۸	۰/۱۵۴	۵۳/۹۹	۰/۳۹۱۸	۰/۰۲۲۴	۷۷۰۲
۲	۱۱۰۷۷۸	۳۲/۲۹	۰/۱۵۳۲	۵۳/۱۷	۰/۳۸۸۴	۰/۰۲۱۹	۸۰۱۴
۳	۱۱۵۲۷۲/۲	۲۹/۵۴	۰/۱۵۱۹	۵۱/۸۸	۰/۳۹۱	۰/۰۲۱۵	۷۶۴۶
۴	۱۰۳۰۱۶/۲	۳۷/۰۳	۰/۱۵۳۶	۵۳/۶۴	۰/۳۹۳۸	۰/۰۲۲۶	۷۵۳۶
۱۵	۱۱۰۲۱۲/۴	۳۲/۶۳	۰/۱۵۲۵	۵۲/۵۴	۰/۳۸۶۱	۰/۰۲۱۹	۸۰۷۵
۱۶	۱۱۰۹۵۵/۳	۳۲/۱۸	۰/۱۵۲۷	۵۲/۷۱	۰/۳۹۷۶	۰/۰۲۲۷	۷۱۱۰
۲۴	۱۱۶۴۱۳/۶	۲۸/۸۴	۰/۱۵۱۵	۵۱/۴۷	۰/۳۹۱۹	۰/۰۲۱۳	۷۶۱۶
۲۵	۱۰۴۱۱۲/۲	۳۶/۳۶	۰/۱۵۳۶	۵۳/۶	۰/۳۹۳۱	۰/۰۲۲۵	۷۵۸۱
۲۶	۱۰۸۰۲۱/۱	۳۳/۹۷	۰/۱۵۳۱	۵۳/۱۴	۰/۳۹۰۶	۰/۰۲۲۳	۷۶۴۸
۲۷	۱۱۱۳۵۰/۷	۳۱/۹۴	۰/۱۵۲۴	۵۲/۴	۰/۳۹۷۵	۰/۰۲۲۶	۷۱۰۴
۳۰	۱۱۱۲۳۴/۹	۳۲/۰۱	۰/۱۵۲۸	۵۲/۸۶	۰/۳۹۵۵	۰/۰۲۲۶	۷۲۷۹



شکل ۵. الگوی آمایش سرزمین تولیدشده در مدل

#### ۴- بحث و نتایج

در این بخش پس از انجام ارزیابی‌های مختلف روی الگوریتم، به اعتبارسنجی مدل و نتایج آن و تأثیر به‌کارگیری عملگرهای ابتکاری طراحی‌شده در مدل پرداخته می‌شود.

#### ۴-۱- ارزیابی مدل طراحی‌شده

در پژوهش حاضر به‌منظور ارزیابی مدل، از معیار فراگشایش و نمودار مسیر ارزش استفاده شد. شکل ۶ معیار فراگشایش بین توابع هدف را به‌صورت دوبه‌دو نشان می‌دهد. در این شکل در مواردی همانند K,G,E,D,B,A تغییرات معیار فراگشایش طی نسل‌های مختلف روند صعودی روبه‌رشدی دارد، که نشان می‌دهد مدل توانسته است طی نسل‌های مختلف به‌سمت جواب‌های بهینه‌نهایی حرکت کند. در شکل ۶ در مواردی که یکی از توابع هدف، دشواری تغییر کاربری‌هاست (H,F,C)، در نسل‌های مختلف تغییر مشخصی در معیار فراگشایش مشاهده نمی‌شود که به‌دلیل نبود تنوع در کاربری‌های بالفعل و بالقوه در منطقه و پایین‌بودن دشواری تغییر کاربری‌ها از کاربری فعلی هر پیکسل به هریک از کاربری‌های بالقوه آن است. بنابراین می‌توان در این منطقه یا مناطق دیگری

که شرایطی مشابه منطقه مطالعه‌شده دارند، تابع هدف دشواری تغییر کاربری‌ها را در نظر نگرفت. نمودار مسیر ارزش برای جواب‌های نسل ۱۲۰۰ حاصل از مدل، در شکل ۷ نشان داده شده است. این شکل برای توابع هدف نرمال‌شده رسم گردید. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، جواب‌های به‌دست‌آمده از مدل در هریک از توابع هدف در سراسر طول میله آن تابع هدف گسترده شده است، که نشان از پراکندگی خوب نتایج دارد. تغییرات عمده‌ای نیز در شیب خطوط بین هر دو تابع هدف متوالی دیده می‌شود که نشان از مبادله خوب بین جواب‌های نامغلوب دارد.

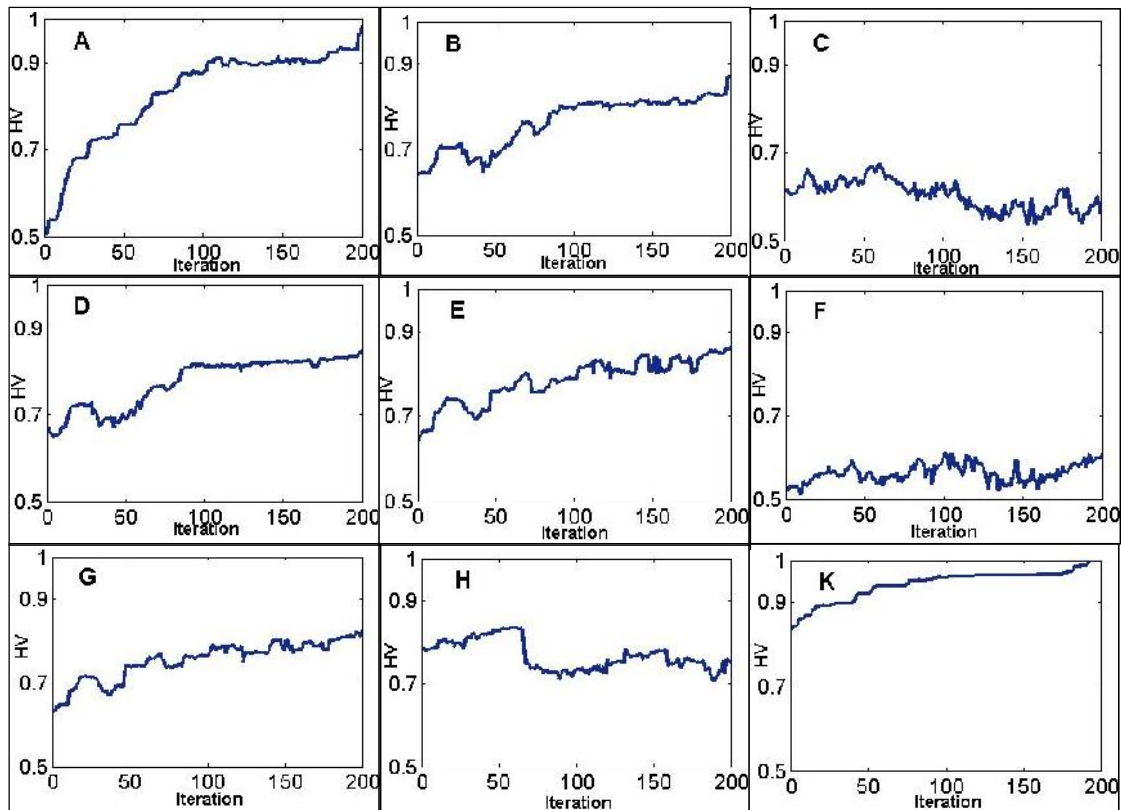
#### ۴-۲- بررسی عملگرهای ابتکاری طراحی‌شده

در این قسمت نتایج حاصل از اعمال عملگرهای ابتکاری طرح‌شده، بررسی می‌گردد.

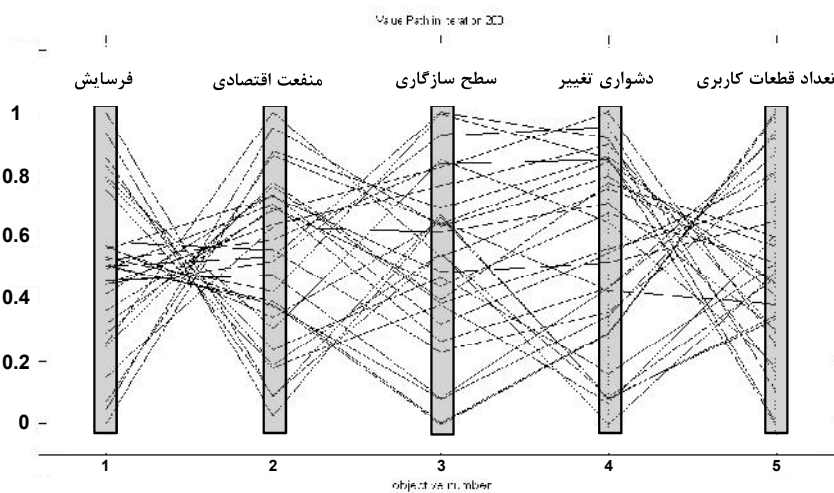
#### ۴-۲-۱- راهکار تولید جواب اولیه

در بیشتر پژوهش‌های صورت‌گرفته در زمینه بهینه‌سازی کاربری اراضی، جواب‌های اولیه به‌صورت تصادفی تولید شده بودند ولی در پژوهش حاضر راهکاری ابتکاری به‌منظور تولید والد اولیه طراحی و استفاده شد.

طراحی مدل بهینه‌سازی کاربری اراضی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه با رویکرد آمایش سرزمین



شکل ۶. معیار فراگشایش طی ۲۰۰ نسل بین A- تابع هدف فرسایش و منفعت اقتصادی؛ B- فرسایش و سازگاری کاربری‌ها؛ C- فرسایش و دشواری تغییر کاربری‌ها؛ D- فرسایش و تعداد خوشه‌ها؛ E- منفعت اقتصادی و سازگاری کاربری‌ها؛ F- منفعت اقتصادی و دشواری تغییر کاربری‌ها؛ G- تابع هدف منفعت اقتصادی و تعداد خوشه‌ها؛ H- سازگاری کاربری‌ها و دشواری تغییر؛ K- سازگاری کاربری‌ها و تعداد خوشه‌ها



شکل ۷. نمودار مسیر ارزش برای ۵ تابع هدف در نسل ۲۰۰

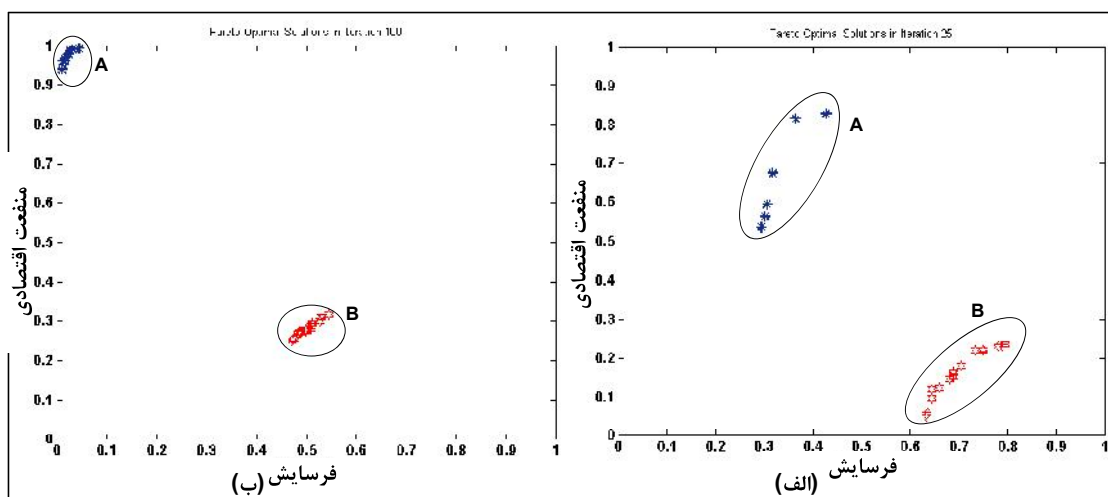
منفعت اقتصادی است، هرچه جواب‌ها به سمت گوشه بالا و سمت چپ فضای جواب (جایی که منفعت اقتصادی ۱ و فرسایش صفر است) نزدیک‌تر شوند، مناسب‌ترند. همان‌طور که در شکل مشخص است در تمامی نسل‌ها جواب‌های حاصل از جمعیت اولیه ابتکاری تفاوت چشمگیری با جواب‌های حاصل از جمعیت اولیه تصادفی داشته است.

به منظور کمی‌سازی تأثیر راهکار ساخت جواب‌های اولیه ابتکاری، از معیار فراگشایش استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان از تفاوت چشمگیری در مقادیر این معیار بین اجرای مدل در دو حالت یادشده دارد، به نحوی که مقدار این معیار در نسل ۱۰۰ در اجرای مدل اجراشده با جواب اولیه ابتکاری برابر با ۰/۹۸۲ و با جواب اولیه تصادفی برابر با ۰/۱۶۵ است.

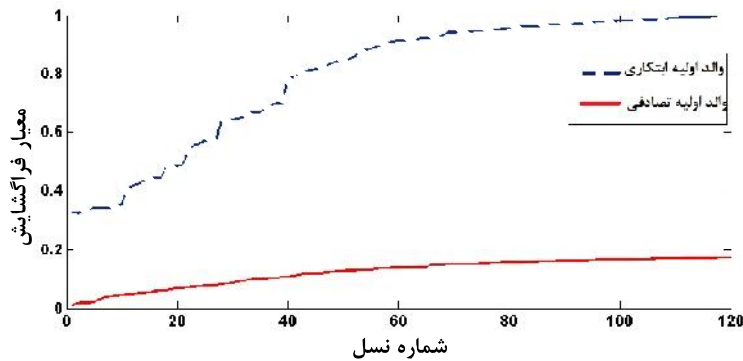
مقایسه میان معیار فراگشایش در دو تابع هدف فرسایش و منفعت اقتصادی طی ۱۲۰ نسل در اجرای مدل با جواب اولیه ابتکاری و جواب اولیه تصادفی، در شکل ۹ نشان داده شده است.

به منظور بررسی تأثیر این راهکار، مدل به دو صورت با جواب‌های اولیه ابتکاری و جواب‌های اولیه تصادفی اجرا شد. به منظور اعمال شرایط مساوی برای بررسی کارایی این راهکار، فقط از دو تابع هدف حداقل‌سازی فرسایش و حداکثرسازی منفعت اقتصادی استفاده شد. مقادیر هر یک از توابع هدف براساس جواب‌های تولیدشده از هر دو روش، نرمال شدند.

به منظور تولید جواب‌های اولیه ابتکاری از روش توضیح داده شده در بخش ایجاد جمعیت اولیه استفاده شد. برای تولید جواب‌های تصادفی نیز پس از تهیه فهرستی از کاربری‌های مجاز برای تخصیص به هر پیکسل (توان اکولوژیک هر پیکسل)، یک کاربری از بین آنها به صورت تصادفی انتخاب شد. نتایج حاصل از اجرای مدل در شرایط یادشده، بهبود چشمگیر روند حل مسئله را با در نظر گرفتن جمعیت اولیه ابتکاری نشان می‌دهند. شکل ۸ تفاوت مجموعه جواب بهینه پاره‌توی حاصل از اجرای مدل را در دو حالت - با والد اولیه ابتکاری (مجموعه جواب A) و با والد اولیه تصادفی (مجموعه جواب B) - نشان می‌دهد. چون در این شکل، هدف حداقل‌سازی فرسایش و حداکثرسازی



شکل ۸. تفاوت مجموعه جواب پاره‌توی حاصل از اجرای مدل با جواب‌های اولیه ابتکاری (مجموعه جواب A)، و جواب‌های اولیه تصادفی (مجموعه جواب B) در (الف) نسل ۲۵، (ب) نسل ۱۰۰



شکل ۹. مقایسه معیار فراگشایش بین اجرای مدل با جواب اولیه ابتکاری و جواب اولیه تصادفی طی ۱۲۰ نسل

ایجادشده از طریق راهکار تولید جواب ابتکاری خوشه‌بندی معقول‌تری دارند. (۴) راهکار تولید جواب ابتکاری موجب هدایت مسئله به سمت قسمت‌های موجه فضای جست‌وجو می‌شود.

#### ۴-۲-۲- بررسی نتایج به‌کارگیری عملگر ابتکاری CUC

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در پژوهش حاضر یک عملگر ترکیب ابتکاری برای حل مسائل آمایش سرزمین شرح و بسط داده شد. به‌منظور بررسی تأثیر این عملگر ترکیب، برای هر جواب در هر نسل نوع عملگر ترکیب یا جهشی که به‌وسیله آن ایجاد شد ثبت گردید و در پایان، تعداد جواب‌های تولیدشده به‌وسیله هریک از عملگرها، طی تمامی نسل‌ها شمارش شد. برای اعمال شرایط مساوی، سهم هریک از عملگرهای ترکیب برابر در نظر گرفته شد.

بررسی‌ها نشان دادند که از کل ۲۸۷۱ جواب ایجادشده طی ۱۰۰ نسل، ۱۱۱۶ جواب (۳۸/۹ درصد) به‌وسیله عملگر ترکیب ابتکاری ایجاد شدند، که این مقدار بیش از سهم هر عملگر از ایجاد جواب‌ها طی هر نسل است (سهم هر عملگر ترکیب ۳۳/۳۴ درصد است). بدین ترتیب جواب‌های ایجادشده به‌وسیله این عملگر توانستند در نسل‌های بعدی نیز در انتخاب پیروز شوند و به نسل‌های بعدی انتقال یابند. ۸۶۳ جواب (۳۰ درصد جواب‌ها) از طریق عملگر ترکیب XTD و ۸۹۲

همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است، معیار فراگشایش در اجرای مدل با جواب اولیه ابتکاری در سطح بالاتری قرار دارد که نشان می‌دهد در هر نسل جواب‌های بهینه تولیدشده با جواب اولیه ابتکاری به جواب بهینه نهایی نزدیک‌تر و فاصله ازدحامی (چگالی بین جواب‌ها) بهتر است. جواب اولیه ابتکاری موجب شد که مدل از محل مناسبی شروع به جست‌وجو در فضای جواب کند.

از دیگر مزیت‌های راهکار تولید جواب اولیه ابتکاری، افزایش سرعت حرکت به سمت جواب بهینه نهایی است. به‌طور کلی الگوریتمی مناسب است که گام‌های بلندتری به سمت جواب بهینه نهایی بردارد. همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است، افزایش معیار فراگشایش با اجرای مدل با جواب اولیه ابتکاری، شیب زیادی دارد که سرعت بالای حرکت به سمت جواب بهینه نهایی را در اجرای مدل با جواب اولیه ابتکاری نشان می‌دهد.

به‌طور کلی از مزایای تولید جواب اولیه به‌وسیله راهکار ابتکاری مطرح‌شده در پژوهش حاضر، می‌توان به این موارد اشاره کرد: (۱) مدل از محل مناسب فضای جواب، شروع به جست‌وجو می‌کند. (۲) سرعت حرکت به سمت جواب بهینه نهایی افزایش می‌یابد. (۳) الگوهای ایجادشده کاربردی‌ترند. در الگوهای ایجادشده به‌وسیله تولید جواب تصادفی، کاربری‌ها بسیار پراکنده و خرد هستند که در عمل کارایی ندارند؛ ولی الگوهای

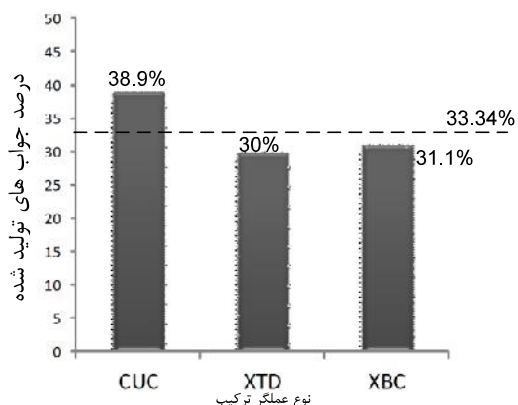
جواب‌هایی با سازگاری و پیوستگی بالا و دشواری تغییر کم هدایت کردند. در این مطالعه برای کاهش اندازه جمعیت، جواب‌های نهایی با عملگر مرتب‌سازی نامغلوب براساس دو تابع هدف میزان فرسایش و سطح منفعت اقتصادی مرتب شدند و فقط جواب‌هایی که در جبهه اول این دو تابع هدف قرار داشتند به‌عنوان جواب نهایی معرفی شدند. این جواب‌ها در جدول ۲ آمده‌اند. تمامی جواب‌های بهینه نهایی مدل، ارزش کاربردی یکسانی دارند و این روش فقط برای ارائه پیشنهاد جواب به‌منظور کاهش اندازه مجموعه جواب نهایی است.

#### ۴-۴- تست تکرارپذیری مدل

از آنجاکه در الگوریتم‌های تکاملی، نقطه آغاز جست‌وجو در فضای جواب به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود، نتایج کار با اجراهای مختلف، متفاوت خواهد بود. به‌منظور تست تکرارپذیری، مدل به دفعات ۵ بار با جمعیت اولیه ۳۰ و تعداد تکرار ۵۰ با پارامترهای یکسان اجرا شد.

شکل ۱۱ دامنه تغییرات مقادیر درصد بهبود منفعت اقتصادی (نمودار الف) و دامنه تغییرات کاهش فرسایش (نمودار ب) را برای ۵ تکرار مدل نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، جواب‌های خروجی مدل در ۵ تکرار تقریباً در یک بازه از فرسایش و منفعت اقتصادی قرار دارند و تفاوت چندانی بین آنها از لحاظ این دو تابع هدف مشاهده نمی‌شود و تمامی الگوها توانسته‌اند فرسایش منطقه را در حد پذیرفتنی کاهش دهند و سطح منفعت اقتصادی منطقه را بالا ببرند.

جواب (۳۱/۱ درصد) از طریق عملگر ترکیب XBC تولید شدند. این آمار شامل جواب‌هایی که به‌وسیله یک عملگر مشخص ترکیب ایجاد شده‌اند و روی آنها جهش رخ داده است نیز می‌شود.



شکل ۱۰. درصد جواب‌های تولیدشده به‌وسیله عملگرهای ترکیب به‌کار گرفته‌شده در مدل، طی ۱۰۰ نسل

از کل ۲۸۷۱ جواب ایجادشده، ۱۲۰۹ فرزند (۴۲ درصد) به‌وسیله عملگر جهش بهبود یافتند؛ بنابراین ۱۲۰۹ فرزند جهش‌یافته و موفق در کل مجموعه نسل‌ها تولید شده است.

#### ۴-۳- کاهش اندازه جمعیت

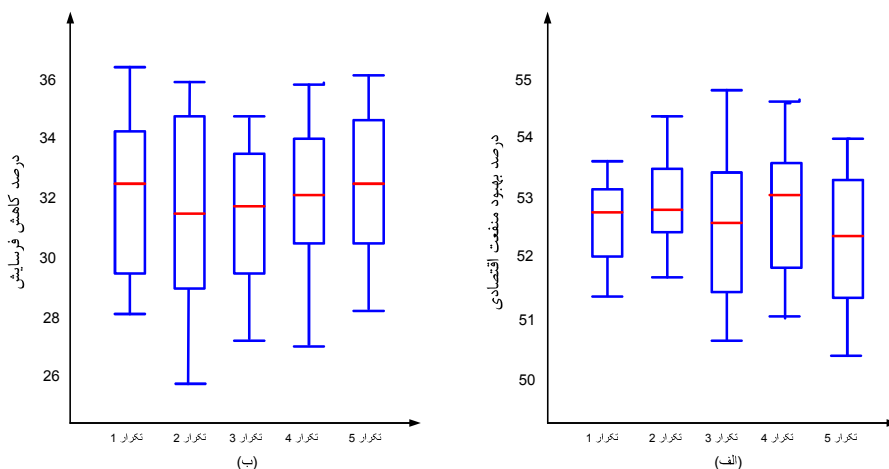
همان‌طور که در جدول ۱ مشخص است، تمامی جواب‌های نهایی مدل، سطح سازگاری بالا و دشواری تغییر پایین دارند و پیوستگی کاربری‌ها نیز بهبود پیدا کرده است. از این‌رو می‌توان این توابع هدف را به‌عنوان محدودیت و قید برای مسئله در نظر گرفت که تا نسل آخر در مدل قرار داشتند و جواب‌ها را به‌سمت

جدول ۱. جواب‌های نهایی پیشنهادی از مجموعه جواب بهینه

شماره	مقدار فرسایش (تن در سال)	درصد کاهش فرسایش	سطح منفعت اقتصادی	درصد رشد سطح اقتصادی
۱	۱۰۷۰۳۰	۳۴/۵۸	۰/۱۵۴	۵۳/۹۹
۴	۱۰۳۰۱۶/۲	۳۷/۰۳	۰/۱۵۳۶	۵۳/۶۴
۲۲	۱۰۳۷۲۳/۲	۳۶/۶	۰/۱۵۳۸	۵۳/۸۵



## طراحی مدل بهینه‌سازی کاربری اراضی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه با رویکرد آمایش سرزمین



شکل ۱۱. نمودار دامنه تغییرات؛ الف) درصد بهبود منفعت اقتصادی؛ ب) درصد کاهش فرسایش در ۵ بار تکرار مدل

### ۵- نتیجه‌گیری

بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مدل طراحی شده در پژوهش حاضر قادر است الگوهایی برای آمایش سرزمین پیشنهاد کند که فرسایش منطقه را بین ۳۰ تا ۳۵ درصد کاهش دهند. این در حالی است که سطح منفعت اقتصادی حاصل از تغییر کاربری حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد رشد داشته است. تمامی الگوها دارای سازگاری بالا و دشواری تغییر اندک‌اند و تا حد ممکن پیوستگی کاربری‌ها نیز افزایش یافته است. در این پژوهش به منظور بهبود روند جست‌وجو در ایجاد الگوی مناسب آمایش سرزمین، دو عملگر ابتکاری ایجاد جواب‌های اولیه و ترکیب اجتماع خوشه‌ها (CUC) طراحی و به کار گرفته شد. نتایج به دست آمده تأثیر شدید این عملگرها را در روند حل مسئله آمایش سرزمین نشان می‌دهد.

از نتایج و دستاوردهای پژوهش حاضر می‌توان به این موارد اشاره کرد: (۱) عرضه مدل بهینه‌سازی کاربری اراضی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه؛ (۲) مدیریت یکپارچه حوضه آبریز؛ (۳) طراحی عملگر ابتکاری تولید جواب‌های اولیه متناسب با مسائل آمایش سرزمین؛ (۴) طراحی عملگر ابتکاری ترکیب متناسب با مسائل آمایش سرزمین؛ و (۵) نگارش برنامه به گونه‌ای ارتقا‌یافتنی در آینده، به منظور استفاده در مطالعات آتی.

نتایج پژوهش حاضر نشان دادند که مدل

طراحی شده می‌تواند نقش مؤثری در مسائل آمایش سرزمین و موضوعاتی از این دست داشته باشد. از دیگر نتایج این پژوهش می‌توان به تأثیر فراوان استفاده از عملگرهای متناسب با نوع مسئله و نوع الگوریتم در روند جست‌وجوی جواب بهینه اشاره کرد.

### ۶- منابع

بختیاری‌فر، م.، مسگری، م.س.، کریمی، م.، چهرقانی، ا.، ۱۳۹۰، مدل‌سازی تغییر کاربری زمین با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و GIS، نشریه محیط‌شناسی، دوره ۳۷، شماره ۲، صص. ۴۳-۵۲.

رجبی، م.ر.، منصوریان، ع.، علیمحمدی، ع.، طالعی، م.، ۱۳۸۹، بهینه‌سازی مکانی فرایند طراحی و برنامه‌ریزی شهری به کمک عملگرهای ابتکاری توسعه داده شده در قالب الگوریتم تکاملی چندهدفه NSGA-II، سنجش از دور و GIS ایران، سال دوم، شماره ۳، صص. ۲۱-۴۲.

شعبانی، م.، احمدی، ح.، محسنی ساروی، م.، آذرنیوند، ح.، نیک‌نامی، د.، ۱۳۸۷، بهینه‌سازی کاربری اراضی به منظور کاهش میزان فرسایش و افزایش سوددهی حوضه‌های آبخیز (بررسی موردی: حوضه آبخیز

- International Journal of Geographical Information Science, iFirst, PP. 1-21.
- Coello Coello, C.A., Lamont G.B. & Van Veldhuizen D.A., 2007, **Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems**, Springer Science+Business Media, LLC, P. 810.
- Datta, D., Deb, K. & Fonseca, C.M., 2007, **Multi-Objective Evolutionary Algorithm for Land-Use Management Problem**, International Journal of Computational Intelligence Research, 3(4), PP. 371-384.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. & Meyarivan, T., 2002, **A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II**, IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 6(2), PP. 182-197.
- Deb K., 2001, **Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms**, John Wiley & Sons, LTD., P. 497.
- Dias, A.H.F. & Vasconcelos, J.A., 2002, **Multiobjective Genetic Algorithms Applied to Solve Optimization Problems**, IEEE., Transactions on Magnetics.
- Geoffrion, A.M., Dyer, J.S. & Feinberg A., 1972, **An Interactive Approach for Multicriterion Optimization with an Application to the Operation of an Academic Department**, Management Science, 19(4), PP. 335-368.
- Goldberg D.E., 2007, **Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems**, Second Edition, Springer Science+Business Media, LLC., P. 810.
- خارستان فارس)، نشریه منابع طبیعی ایران، دوره ۶۰، شماره ۱.
- صادقی، س.ح.ر.، جلیلی، خ.، نیک کامی، د.، ۱۳۸۷، پیشینه سازی سوددهی کاربری اراضی حوضه آبخیز بریموند، نشریه منابع طبیعی ایران، دوره ۶۰، شماره ۶.
- کریمی، م.، مسگری، م.س.، شریفی، م.ع.، ۱۳۸۸، مدل سازی توان اکولوژیکی سرزمین با استفاده از منطق فازی (منطقه مورد مطالعه: شهرستان برخوار و میمه)، سنجش از دور و GIS ایران، سال اول، شماره ۱، صص. ۳۸-۱۷.
- مخدوم، م.، ۱۳۸۷، شالوده آمایش سرزمین، انتشارات دانشگاه تهران.
- معصومی، ز.، منصوریان ع.، مسگری م.س.، ۱۳۸۹، کاربرد الگوریتم ژنتیک چندهدفه در مطالعات مکان یابی کاربری های صنعتی، سنجش از دور و GIS ایران، سال دوم، شماره ۴، صص. ۲۲-۱.
- Beady D., Bull D.R. & Martin R.R., 1993, **An Overview of Genetic Algorithms: Part 1, Fundamentals: University Computing**, 15, PP. 58-69.
- Campbell, J.C., Radke, J., Gless, J.T. & Wirtshafter, R.M., 1992, **An Application of Linear Programming and Geographic Information Systems**, Cropland allocation in Antigua: Environment and Planning, A 24, PP. 535-549
- Cao, K., Battyc, M., Huangb, B., Liud, Y., Yue, L. & Chenf, J., 2011, **Spatial Multi-objective Land Use Optimization: Extensions to the non-dominated sorting genetic algorithm-II**, Taylor & Francis,

- Herzig, A., 2008, **A GIS-based Module for the Multiobjective Optimization of Areal Resource Allocation**, 11th AGILE International Conference on Geographic Information Science, University of Girona, Spain, P. 17.
- Horn, J., Nafpliotis, N., Goldberg, D.E., 1999, **A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization**, In Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Computation, 1, PP. 82-87.
- Maringanti, C., Chaubey, I. & Popp, J., 2009, **Development of a Multiobjective Optimization Tool for the Selection and Placement of best Management Practices for Nonpoint Source Pollution Control**, Water Resources Reserch, 45(6), P. 15.
- Stewart, T.J., Janssen, R. & Herwijnen, M.V., 2004, **A Genetic Algorithm Approach to Multiobjective Landuse Plannin**, Elsevier, Computers & Operations Research, 31, PP. 2293-2313.
- Wischmeier, W.H. & Smith, D.D., 1978, **Predicting Rainfall Erosion Losses- A guide to conservation planning**, United States, Science and Education Administration, Purdue University, Agricultural Experiment Station, P. 58.
- Yang, A., Shan, Y. & Bui, L.T., 2008, **Success in Evolutionary Computation**, Springer, 92, P. 372.