سنجش از دور
و
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 (مطالعهٔ موردی: رودبار جنوب – استان کرمان)

علی‌اکبر متکان[۱]، علیرضا شکیبا[۲]، بابک میرباقری[۳]، مهران شایگان[۴]، محمد تناسان[۵]*

۱ و ۲. دانشیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکدهٔ علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
۳. مربی گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکدهٔ علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
۴. مربی گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تربیت مدرس
۵. کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکدهٔ علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۵/۲۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۰/۲۴

چکیده

با افزایش جمعیت و به‌تبع آن افزایش نیازهای جامعه، آمایش سرزمین اهمیت ویژه‌ای یافته است. به‌دلیل پیوند آمایش سرزمین با چندین هدف متضاد، استفاده از الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه ـ درصورت تناسب الگوریتم با نوع مسئله ـ می‌تواند مفید باشد. در پژوهش حاضر ضمن ارائهٔ مدلی به‌منظور بهینه‌سازی کاربری اراضی، راه‌حلی مؤثر برای به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک چندهدفه در انواع مسائل مربوط به آمایش سرزمین معرفی می‌گردد. مدل طراحی‌شده در پژوهش حاضر به‌منظور بهینه‌سازی کاربری اراضی از الگوریتم NSGA-II بهره می‌برد. خروجی‌های این مدل، الگوهایی 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. به‌منظور 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 طراحی‌شده در منطقهٔ رودبار جنوب واقع در استان کرمان پیاده‌سازی شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که الگوهای آمایش سرزمین پیشنهادشده در این مدل می‌توانند درحدود ۳۰ تا ۳۵ درصد فرسایش منطقه را کاهش دهند؛ درعین‌حال 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 عملکرد عملگرهای ابتکاری ارائه‌شده، مشخص شد این عملگرها تأثیر بسزایی در روند حل مسئله داشتند.

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

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، گروه سنجش از دور و GIS. تلفن: ۰۹۱۳۳۵۸۵۰۰۲
Email: Tanasan.mohammad@gmail.com

۱- مقدمه

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

ازآنجاکه 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 NSGA-II[1] 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 زمینهٔ بهینه‌سازی کاربری اراضی و آمایش سرزمین با استفاده از الگوریتم های بهینه‌یابی تاکنون تحقیقات و پژوهش‌های فراوانی صورت گرفته است. کمپبل[2] و همکارانش (۱۹۹۲) از GIS و الگوریتم بهینه‌یابی برنامه‌ریزی خطی (LP) برای برنامه‌ریزی استفاده از زمین در بخش کشاورزی استفاده کردند. استوارت[3] و همکارانش (۲۰۰۴) برای حل مسئلهٔ آمایش سرزمین از روش برنامه‌ریزی آرمانی استفاده کردند و الگوریتم ژنتیک را برای توسعهٔ آن به‌کار بردند. داتا و دب[4] (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[5] و همکارانش (۲۰۰۸) از الگوریتم تکاملی چندهدفه در مدیریت زمین‌های کشاورزی استفاده کردند و الگوریتمی تحت عنوان سیستم متقابل چندهدفهٔ مدیریت زمین‌های کشاورزی را طراحی کردند و به‌کار گرفتند. کیا کائو[6] 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. درخصوص 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 بهینهٔ کاربری‌های اراضی را در منطقه مشخص کردند. هدف آنها از این پژوهش کاهش میزان فرسایش و افزایش درآمد در حوضهٔ آبریز مورد مطالعه بود. صادقی و همکاران (۱۳۸۷) در مطالعه‌شان از بهینه یابی چندهدفهٔ خطی برای مینیمم‌کردن فرسایش خاک و ماکزیمم‌کردن تولید در منطقه برای هر کاربری در حوضهٔ 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

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

هدف پژوهش حاضر، طراحی مدل بهینه‌سازی کاربری اراضی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفهٔ NSGA-II به‌منظور تولید الگوهای مناسب آمایش سرزمین در بستر GIS است. بدین منظور ابتدا با مطالعهٔ منابع اکولوژیک منطقه و به‌کارگیری مدل اکولوژیکی مخدوم و با استفاده از قابلیت‌های GIS، توان بالقوهٔ 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 طراحی‌شده 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 به‌صورت چندین الگوی بهینه که ارزش کاربردی یکسانی دارند، ارائه شده است که براساس شرایط موجود در منطقهٔ 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[1] متناسب با مسائل آمایش سرزمین، طراحی و استفاده شد.

۱-۱- بهینه‌یابی چندهدفه[2]

هنگامی‌که مسئلهٔ بهینه‌یابی بیش از یک تابع هدف دارد، عمل یافتن یک یا چند جواب بهینه، بهینه‌یابی چندهدفه نامیده می‌شود (Dias et al., 2002). در مسئلهٔ بهینه‌یابی چندهدفه پس از شناسایی مسئله، مجموعه‌ای از متغیرهای تصمیم کشف می‌شود و با توجه به محدودیت‌های مسئله، بهینه‌کردن توابع هدف دنبال می‌شود. ازاین‌رو واژهٔ «بهینه‌یابی» به‌معنای پیداکردن مجموعه‌ای از جواب یا جوابی است که از لحاظ تمامی مقادیر توابع هدف مورد پذیرش است (Coello Coello et al., 2007).

۱-۲- جواب‌های بهینهٔ پاره‌تو[3] و جبههٔ بهینهٔ پاره‌تو[4]

هنگامی‌که در مقایسهٔ 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 مجموعهٔ چنین جواب‌هایی، جواب‌های بهینهٔ پاره‌تو گفته می‌شود (Deb, 2001). مجموعهٔ تمام جواب‌های بهینهٔ پاره‌تو در مسئلهٔ چندهدفهٔ مجموعهٔ بهینهٔ پاره‌تو و بردارهای هدف متناظر با آن، لبه یا جبههٔ بهینهٔ پاره‌تو نامیده می‌شود (Horn, 1999).

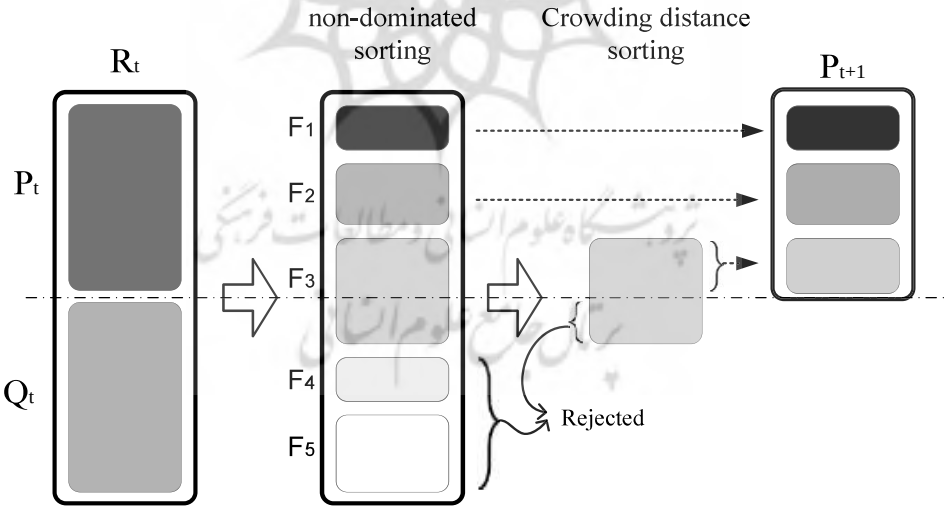
۱-۳- الگوریتم NSGA-II

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 به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود، سپس این جمعیت با توجه به توابع هدف و براساس مفهوم غالب‌بودن به‌کمک عملگر مرتب‌سازی نامغلوب[5] (Deb et al., 2002) به n سطح پاره‌تو[6] (F) تقسیم می‌شود. به هر سطح پاره‌تو، رتبه‌ای

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

جداگانه و به اعضای درون سطح، رتبه‌ای مساوی براساس مفهوم غالب‌بودن نسبت داده می‌شود. برای اعضایی که در یک سطح پاره‌تو قرار می‌گیرند و هم‌رتبه هستند، یک عدد فاصله با توجه به روش فاصلهٔ ازدحامی[1] که بیانگر رتبهٔ فاصله است نسبت داده می‌شود. در مرحلهٔ بعد به‌کمک الگوریتم رقابت دودویی، جمعیت والد (P) با توجه به رتبهٔ غالب‌بودن کمتر و رتبهٔ فاصلهٔ بیشتر انتخاب می‌شود. در ادامه، جمعیت نتیجه (Q) از روی جمعیت والد به‌کمک عملگرهای کلاسیک ژنتیک ایجاد می‌شود. درنهایت، جمعیت‌های والد و فرزندان با هم ترکیب می‌شوند و جمعیت نسل بعد (R) از کل مجموعهٔ این دو جمعیت که شامل جمعیت نخبه نیز هستند، انتخاب می‌شود. این روند در نسل‌های بعد نیز به‌همین ترتیب تکرار می‌شود تا معیار اختتام ارضا شود. به‌عنوان نمونه می‌توان همگراشدن کل جمعیت یا فاصلهٔ ارزیابی (برازندگی) بهترین فرد جمعیت از متوسط ارزیابی‌ها (برازندگی‌ها) را در نظر گرفت (Deb et al., 2002). شکل ۱ نمایشی از نحوهٔ 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 به‌وسیلهٔ 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 به‌دلیل داشتن رتبهٔ غالب‌بودن بهتر می‌توانند به‌صورت مستقیم وارد نسل بعد شوند ولی جمعیت F_3 نمی‌تواند به‌طور کامل به نسل بعد انتقال یابد. ازاین‌رو ابتدا اعضای جمعیت F_3 به‌روش فاصلهٔ ازدحامی مرتب شدند، سپس تعدای از اعضای این جبههٔ پاره‌تو که فاصلهٔ ازدحامی بهتری داشته باشند به نسل بعد انتقال می‌یابند و باقی اعضای این سطح پاره‌تو به‌همراه اعضای F_4 و F_5 حذف می‌شوند.



شکل ۱. نمایشی از نحوهٔ عملکرد الگوریتم NSGA-II

منبع: Deb et al., 2002

1. Crowding Distance

۱-۴- معیار فراگشایش[1]

کشف جواب‌های بهینهٔ پاره‌تو یا نزدیک به آن و پیداکردن جواب‌هایی با تنوع و گوناگونی خوب (فاصلهٔ ازدحامی مناسب بین جواب‌ها)، دو هدف اصلی الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه هستند (Deb, 2001). چندین معیار وجود دارد که هم‌زمان می‌توانند هردو وظیفهٔ مسائل بهینه‌یابی را ارزیابی کنند. در پژوهش حاضر برای ارزیابی مدل از معیار فراگشایش (Deb, 2001) استفاده شد. این معیار، میزان ناحیهٔ (واقع در فضای هدف) پوشیده‌شده به‌وسیلهٔ جواب‌های جبههٔ پاره‌تو را محاسبه می‌کند. به‌بیان ریاضی برای هر جواب عضو جبههٔ اول، یک مکعب فضایی (V_i) با یک نقطهٔ مرجع (مبنا) ساخته می‌شود. از اجتماع تمام مکعب‌های به‌وجودآمده، معیار فراگشایش (HV) از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

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

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

۱-۵- نمودار مسیر ارزش

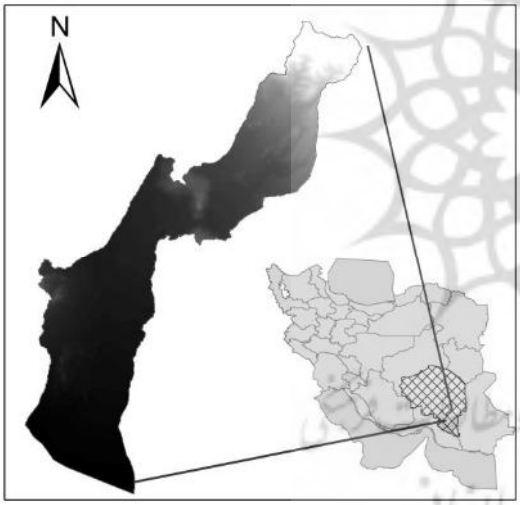
از دیگر روش‌های بررسی کیفیت جواب‌های مدل، روش مسیر ارزش است (Geoffrion et al., 1972). در این نمودار محور افقی توابع هدف را نشان می‌دهد و میله‌های عمودی برای نمایش هر تابع هدف به‌کار می‌رود که برد آن کمترین و بیشترین مقدار تابع هدف برای مجموعهٔ بهینهٔ پاره‌تو است. هر خط متقاطع که توابع هدف را به‌هم وصل می‌کند، با یک جواب از مجموعهٔ 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، ارزیابی‌ای کیفی از جواب‌های به‌دست‌آمده 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) اندازهٔ شیب میان خطوط، مبادلهٔ میان توابع هدف را نشان می‌دهد. الگوریتمی که تغییرات عمده در شیب خطوط بین دو تابع هدف متوالی (میله‌های عمودی) را داشته باشد، دارای مبادلهٔ خوبی از جواب نامغلوب است (Deb, 2001).

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقهٔ مورد مطالعه

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



شکل ۲. منطقهٔ 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، به‌طوری‌که ۷۴/۳ درصد مساحت منطقه دارای تیپ فرسایشی با حساسیت

1. Hyper Volume

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

۲-۲- داده‌ها

در پژوهش حاضر نقشهٔ مدل رقومی ارتفاع، نقشهٔ کاربری اراضی و داده‌های بارندگی و خاک‌شناسی منطقهٔ مطالعه‌شده به‌عنوان نقشه‌ها و داده‌های پایه به‌کار گرفته شدند (منبع تمامی داده‌ها و نقشه‌های پایه، شرکت مهندسین مشاور طرح آب‌ریز است). از این داده ها و نقشه‌ها به سه منظور استفاده شد: تعیین توان اکولوژیکی منطقه به‌عنوان ورودی مدل طراحی‌شده، ورودی مدل RUSLE برای محاسبهٔ 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). نقشهٔ 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 تهیهٔ 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 نقشهٔ شیب و طبقات ارتفاعی و براساس نیاز کاربری‌های جنگل‌داری، کشاورزی و مرتع، نقشهٔ واحدهای شکل زمین در منطقه تولید شد و در ادامه با تلفیق این نقشه با نقشه‌های حساسیت به فرسایش، بافت و عمق خاک منطقه، نقشهٔ واحدهای زیست‌محیطی منطقه تهیه گردید. در پایان، براساس نقشهٔ واحدهای زیست‌محیطی منطقه و نیازمندی‌های هریک از کاربرهای مدنظر، نقشهٔ توان اکولوژیکی منطقه برای کاربری‌های کشاورزی، مرتع و جنگل‌داری تهیه شد و قدرت بالقوهٔ 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- 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 درنظر گرفته شد، که در ادامه شرح داده می‌شوند.

الف) فرسایش

براساس تحقیقات شرکت مهندسین مشاور طرح آب‌ریز، حوضهٔ 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 محاسبهٔ فرسایش، از مدل RUSLE که به استفاده از اراضی وابسته است، استفاده شد (Wischmeier, 1978). تابع هدف مورد نظر به‌کمک رابطه (۲) در مدل طراحی‌شده 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 فرسایندگی 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

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

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 به‌کمک رابطه (۳) منفعت اقتصادی تغییر کاربری فعلی یک پیکسل به کاربری مدنظر محاسبه شد. لازم به‌ذکر است که در تهیهٔ ماتریس منفعت اقتصادی تغییر کاربری‌ها فقط به اقتصاد بازاری تغییر کاربری‌ها توجه شده است.

$Maximaiz$:

رابطه (۳)

$$Z_2 = \sum_{i=1}^{Runit} \sum_{j=1}^{Cunit} P_{i,j}$$

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 محدودهٔ اطراف آن به‌گونه‌ای 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 به‌کمک دانش کارشناسی مشخص می‌کند. در ادامه به‌کمک روش AHP سطوح سازگاری کاربری‌ها وزن‌دهی شد و با استفاده از رابطه‌های (۴) و (۵)، سازگاری هر کاربری با کاربری‌های همسایهٔ خود محاسبه گردید.

$Maximaiz$:

رابطه (۴)

$$Z_3 = \sum_{i=1}^{Runit} \sum_{j=1}^{Cunit} C_{i,j}$$

رابطه (۵)

$$C_{i,j} = \frac{\sum_{h=1}^{n} C_{i,j,h}}{n}$$

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 همسایهٔ hام خود و n تعداد همسایه‌های پیکسل (i,j) است. i و j نیز شمارهٔ سطر و ستون پیکسل‌ها هستند.

د) دشواری تغییر کاربری‌ها

یکی از اهدف پژوهش حاضر، به‌حداقل‌رساندن دشواری تغییر کاربری‌ها در الگوهای خروجی مدل است. برای محاسبهٔ 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.

$Minimaiz$:

رابطه (۶)

$$Z_4 = \sum_{i=1}^{Runit} \sum_{j=1}^{Cunit} D_{i,j}$$

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

هـ) حفظ پیوستگی کاربری‌ها

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

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.

$$Minimize:$$

رابطه (۷)

$$Z_5 = \frac{N}{A}$$

که در آن، N تعداد خوشه‌ها و A مساحت منطقهٔ مطالعه‌شده برحسب هکتار است.

۲-۳-۲- اجرای مدل

به‌منظور حل مسائل آمایش سرزمین با استفاده از الگوریتم NSGA-II لازم است کروموزوم‌های متناسب با مسئله طراحی شوند و عملگرهای ژنتیکی متناسب با این‌گونه مسائل به‌کار 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[1] (CUC) طراحی و به‌کار گرفته شد. در ادامه نحوهٔ شکل‌دهی کروموزوم‌ها، روش ابتکاری ایجاد جمعیت اولیه و عملگر ترکیب ابتکاری CUC شرح داده می‌شود.

الف) نحوهٔ شکل‌دهی کروموزوم‌ها

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

ب) ایجاد جمعیت اولیه

یکی از قسمت‌های مهم الگوریتم ژنتیک ایجاد جمعیت اولیه است (Beady et al., 1993). در اکثر مسائل بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی تولید می‌شود، اما گاه در مسائل پیچیده برای بالابردن سرعت و کیفیت الگوریتم، روش‌هایی ابتکاری نیز برای تولید جمعیت اولیه به‌کار گرفته می‌شوند؛ همچنین می‌توان مجموعه‌ای از قیود و محدودیت‌های مسئله را نیز هنگام ایجاد جمعیت اولیهٔ آن پیاده‌سازی کرد. برای ایجاد جمعیت اولیه در پژوهش حاضر از روشی ابتکاری مبنی بر توابع جریمه‌ای و انتخاب به‌وسیلهٔ چرخهٔ رولت[2] استفاده شد. در این روش ابتدا لازم است مجموعه‌ای از قیود و محدودیت‌ها برای قرارگیری یک کاربری در یک پیکسل (واحد کاری) از منطقه درنظر گرفته شود. قیود درنظر گرفته‌شده شامل اینها هستند: ۱) کاربری فعلی موجود در یک پیکسل اگر از کاربری‌های بالقوهٔ آن پیکسل باشد، به‌دلیل کاهش هزینه‌های آمایش سرزمین بر بقیهٔ کاربری‌ها ارجحیت دارد؛ ۲) کاربری‌های موجود در منطقه به‌دلیل سازگاری بالاتر با شرایط منطقه، بر بقیهٔ کاربری‌ها ارجحیت دارند؛ ۳) یکی از اهداف مهم در آمایش سرزمین حفظ پیوستگی کاربری‌هاست، لذا کاربری‌های بالقوهٔ یک پیکسل که با کاربری همسایهٔ آن یکسان است، بر باقی کاربری‌ها ارجحیت دارند. محدودیت‌های درنظر گرفته‌شده 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 گفته‌شده، کاربری‌های مجاز براساس توابع جریمه‌ای امتیازبندی و احتمال انتخاب هر کاربری محاسبه می‌شود. در ادامه

1. Classter Union Crossover
2. Roulette Wheel Selection

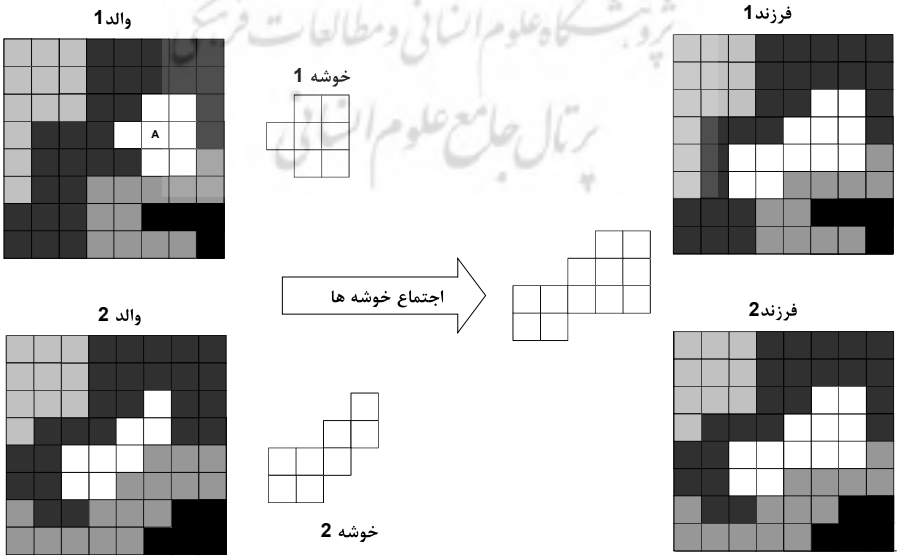
با استفاده از روش انتخاب چرخهٔ رولت، یک کاربری برای هر واحد مطالعاتی انتخاب می‌شود. در امتیازبندی براساس توابع جریمه‌ای، جواب‌های غیرموجه با احتمالی اندک امکان حضور می‌یابند، بدین‌ترتیب جواب‌های غیرموجه به‌سادگی حذف نمی‌شوند زیرا ممکن است در ژن‌های آنها اطلاعات مفیدی باشد که با اندکی تغییر به جواب بهینه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

ج) عملگر ترکیب

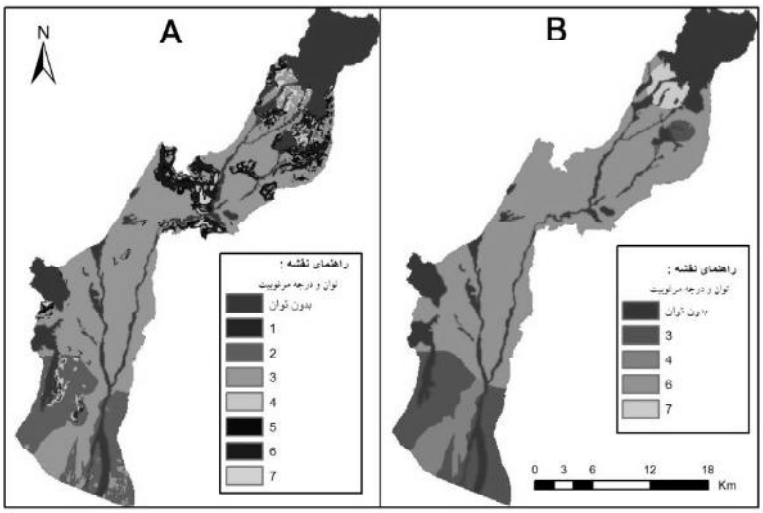
یکی از عملگرهای مهم در الگوریتم NSGA-II، عملگر ترکیب است. هدف عملگر ترکیب، کاوش در قسمت‌های جدید و به‌خصوص سودمند فضای جست‌وجو به‌وسیلهٔ تعویض قسمت یک مجموعه از ژن‌ها بین دو کروموزوم است. در پژوهش حاضر از سه نوع عملگر ترکیب مختلف استفاده شد، که سهم هریک از آنها در تولید جمعیت، از ترکیب برابر به‌دست آمد. 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 به‌کار گرفته‌شده، عملگر ترکیب XTD و XBC (Datta et al., 2007) هستند. عملگر ترکیب 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 نحوهٔ 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 به‌منظور ارث‌بری ژن‌های خوب دو والد و درعین‌حال حفظ پیوستگی کاربری‌ها و بهبود یکپارچگی در کاربری‌ها تعریف شد. برای اعمال این نوع ترکیب ابتدا دو والد انتخاب می‌شود. سپس به‌صورت 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 (مجموعهٔ پیکسل‌هایی با کاربری یکسان و دارای همسایگی) مربوط به این پیکسل در دو والد (خوشهٔ ۱ و خوشهٔ ۲) شناسایی و این خوشه‌ها با هم ترکیب (عمل اجتماع) و به نسل بعد انتقال داده می‌شوند. شکل ۳ این موضوع را به‌خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۳. عملگر ابتکاری طراحی‌شده: اجتماع خوشه‌ها (CUC)



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

ج-۲) عملگر جهش

عملگر جهش باعث ورود اطلاعات جدید به جمعیت و همچنین جست‌وجو در فضاهای دست‌نخوردهٔ 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 به‌کار می‌رود. عملگر جهش MSIS2 برای هدایت جواب‌های نشدنی به‌سمت قسمت‌های شدنی فضای جست‌وجو به‌کار 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، و۱۹۳۰۰ هکتار بدون توان کشاورزی است. همچنین ۳۳۵۰۰ هکتار از سطح منطقه دارای توان ۱ مرتع‌داری، حدود ۳۶۴۰۰ هکتار دارای توان ۲ مرتع داری، ۳۸۸۷۰ هکتار دارای توان ۳ مرتع داری، و ۱۳۴۷۰ هکتار بدون 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. نکتهٔ درخور توجه اینکه حدود ۲۰۰ هکتار از اراضی کشاورزی و ۳۶۰۰ هکتار از مراتع در این حوضهٔ آبخیز در قسمت‌هایی واقع شده‌اند که توانایی بالقوه را برای این کاربری‌ها ندارند. شکل ۴ توان اکولوژیک منطقهٔ مطالعه‌شده را برای کاربری‌های کشاورزی، مرتع و جنگل‌داری نشان می‌دهد.

۳-۲- نتایج مدل

ازآنجاکه مدل طراحی‌شده مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه است، خروجی مدل به‌صورت چندین الگوی بهینه که ارزش کاربردی یکسانی دارند، ارائه می‌شود. براساس شرایط موجود در منطقهٔ مطالعه‌شده و نظر کارشناسی، الگوهای بهینه قابلیت انتخاب و اجرا خواهند داشت.

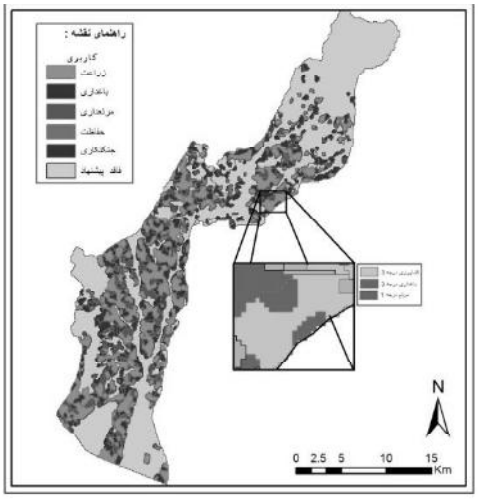
میزان فرسایش منطقه در شرایط کاربری فعلی برای مناطق منتخب در فضای جست‌وجو $۱/۶۳۶\times۱۰^{۵}$ تن در سال برآورد شد. این در حالی است که در

الگوهای خروجی مدل، کمترین مقدار فرسایش $۱/۰۳۱\times۱۰^{۵}$ تن در سال است، که کاهش ۳۷/۰۳ درصدی فرسایش در این الگو را درمقایسه با شرایط فعلی در قسمت‌های موردنظر نشان می‌دهد. این الگوی آمایش سرزمین، سطح منفعت اقتصادی حاصل از تغییر کاربری منطقه را به ۰/۱۵۳۶ رسانده که برابر با رشد ۵۳/۴۶ درصدی در سطح منفعت اقتصادی حاصل از تغییر کاربری است. سطح منفعت اقتصادی الگوی کاربری فعلی منطقه نقطهٔ سربه‌سر (نه سود و نه زیان) در نظر گرفته شد، که مقدار کمّی آن طبق ماتریس منفعت اقتصادی تغییر کاربری‌ها برابر با ۰/۱ است. جدول ۱ تعدادی از نتایج الگوهای خروجی مدل و تأثیر این الگوها را در منطقه نشان می‌دهد.

همان‌طورکه نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهند، مدل طراحی‌شده در کنار مزیت‌هایی چون درنظرگرفتن مسئلهٔ توان اکولوژیک در تخصیص کاربری، توجه به بعد مکانی آمایش سرزمین، و استفاده از عملگرهای ژنتیکی متناسب با آمایش سرزمین، توانسته است 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 (بختیاری‌فر و همکاران، ۱۳۹۰) دارای سطح سازگاری بالا، دشواری تغییر کم، و پیوستگی بالا هستند. در مسائلی همچون موضوع پژوهش حاضر، به‌دلیل استفاده از داده‌های مختلف و تفاوت در شرایط اقلیمی مناطق مطالعه‌شده و همچنین درنظرگرفتن اهداف و قیود مختلف، نمی‌توان نتایج به‌دست‌آمده را به‌صورت مستقیم با سایر کارها مقایسه و ارزیابی کرد. ازاین‌رو مقادیر عددی نتایج مدل طراحی‌شده در این پژوهش با دیگر کارهای انجام‌شده در این زمینه متفاوت است. در پژوهش حاضر به‌منظور بررسی کارایی مدل و مقایسهٔ با سایر کارها، تأثیر به‌کارگیری عملگرهای ابتکاری طراحی‌شده در مدل بررسی و ارزیابی شد. شکل ۵ یکی از الگوهای خروجی مدل را در دو سطح کلی و جزئی نشان می‌دهد.

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 A،B،D،E،G،K تغییرات معیار فراگشایش طی نسل‌های مختلف روند صعودی روبه‌رشدی دارد، که نشان می‌دهد مدل توانسته است طی نسل‌های مختلف به‌سمت جواب‌های بهینهٔ نهایی حرکت کند. در شکل ۶ در مواردی که یکی از توابع هدف، دشواری تغییر کاربری‌هاست (C،F،H)، 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 بالقوهٔ آن است. بنابراین می‌توان در این منطقه یا مناطق دیگری که شرایطی مشابه منطقهٔ مطالعه‌شده دارند، تابع هدف دشواری تغییر کاربری‌ها را در نظر نگرفت.

نمودار مسیر ارزش برای جواب‌های نسل ۲۰۰ام حاصل از مدل، در شکل ۷ نشان داده شده است. این شکل برای توابع هدف نرمال‌شده رسم گردید.

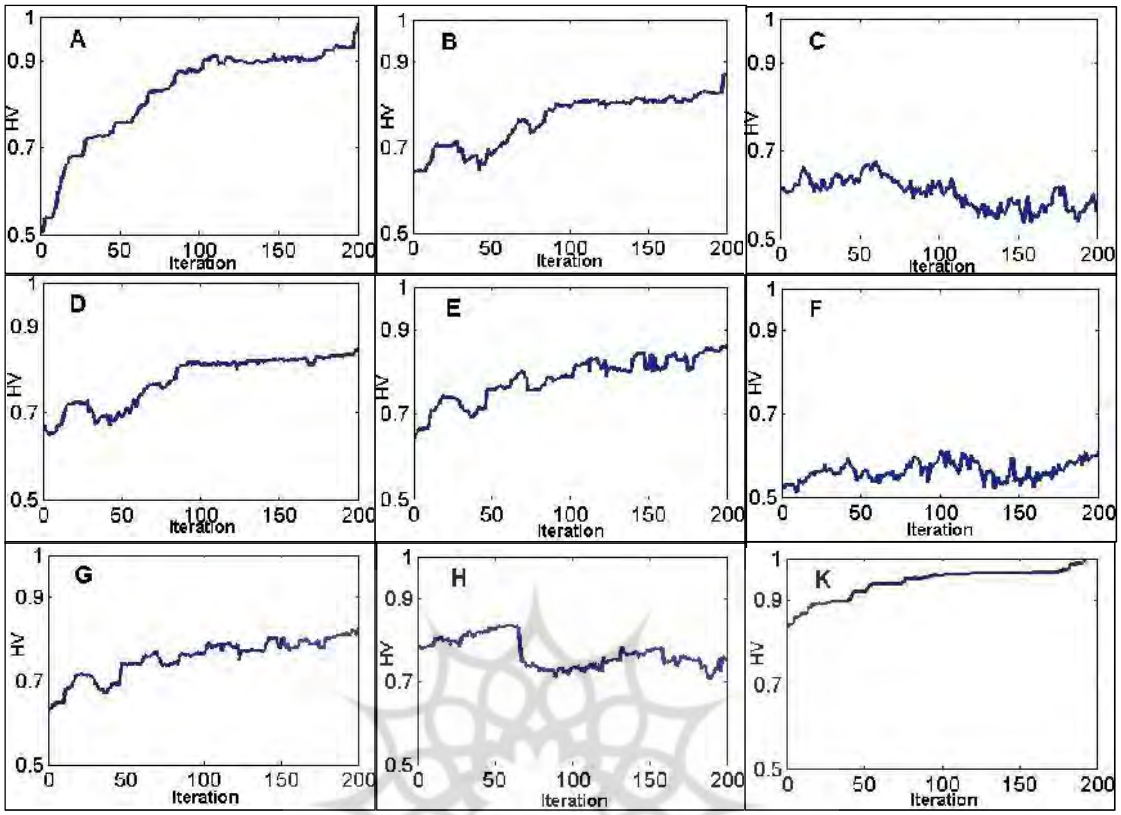
همان‌طورکه در شکل ۷ مشاهده می‌شود، جواب‌های به‌دست‌آمده از مدل در هریک از توابع هدف در سراسر طول میلهٔ آن تابع هدف گسترده شده است، که نشان از پراکندگی خوب نتایج دارد. تغییرات عمده‌ای نیز در شیب خطوط بین هر دو تابع هدف متوالی دیده می‌شود که نشان از مبادلهٔ خوب بین جواب‌های نامغلوب دارد.

۴-۲- بررسی عملگرهای ابتکاری طراحی‌شده

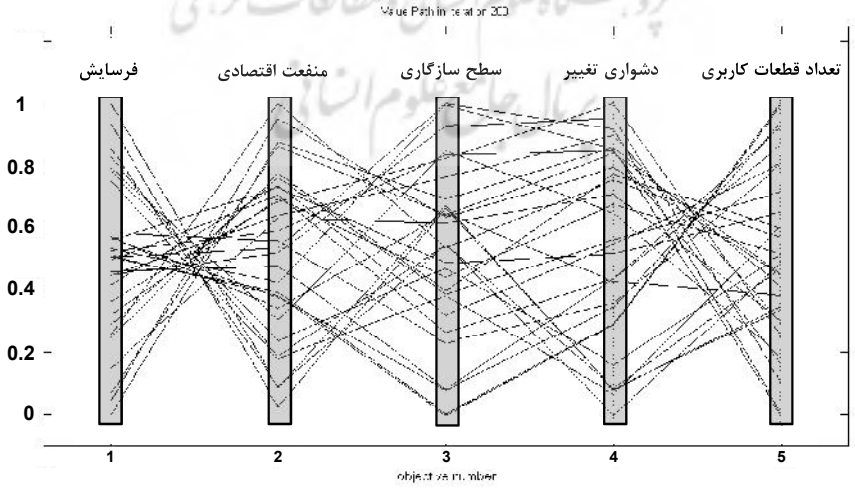
در این قسمت نتایج حاصل از اعمال عملگرهای ابتکاری طرح‌شده، بررسی می‌گردد.

۴-۲-۱- راهکار تولید جواب اولیه

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



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



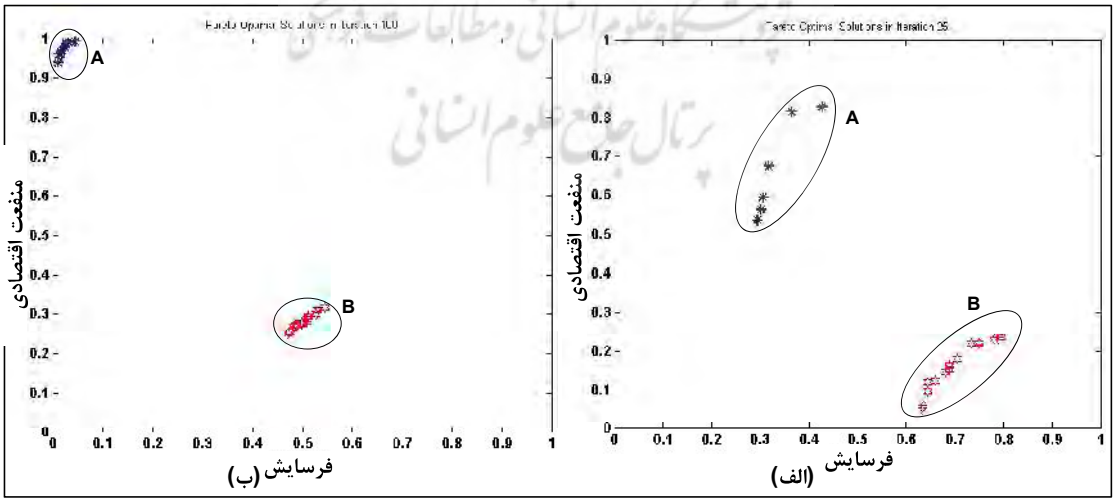
شکل ۷. نمودار مسیر ارزش برای ۵ تابع هدف در نسل ۲۰۰

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

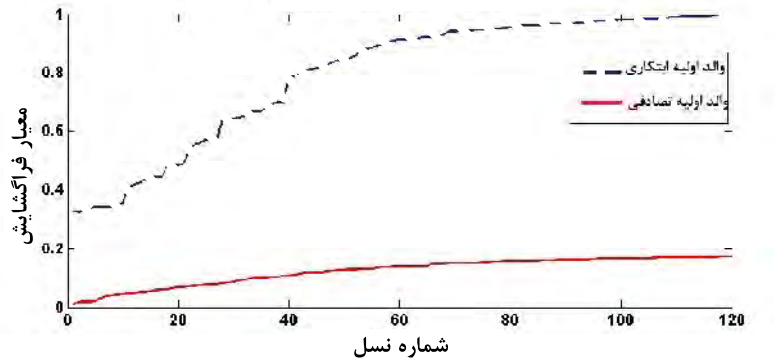
به‌منظور تولید جواب‌های اولیهٔ ابتکاری از روش توضیح داده‌شده در بخش ایجاد جمعیت اولیه استفاده شد. برای تولید جواب‌های تصادفی نیز پس از تهیهٔ فهرستی از کاربری‌های مجاز برای تخصیص به هر پیکسل (توان اکولوژیک هر پیکسل)، یک کاربری از بین آنها به‌صورت تصادفی انتخاب شد. نتایج حاصل از اجزای مدل در شرایط یادشده، بهبود چشمگیر روند حل مسئله را با درنظرگرفتن جمعیت اولیهٔ ابتکاری نشان می‌دهند. شکل ۸ تفاوت مجموعه جواب بهینهٔ پاره‌توی حاصل از اجرای مدل را در دو حالت ـ با والد اولیهٔ ابتکاری (مجموعه جواب A) و با والد اولیهٔ تصادفی (مجموعه جواب B)ـ نشان می‌دهد. چون در این شکل، هدف حداقل‌سازی فرسایش و حداکثرسازی منفعت اقتصادی است، هرچه جواب‌ها به‌سمت گوشهٔ بالا و سمت چپ فضای جواب (جایی‌که منفعت اقتصادی ۱ و فرسایش صفر است) نزدیک‌تر شوند، مناسب‌ترند. همان‌طورکه در شکل مشخص است در تمامی نسل‌ها جواب‌های حاصل از جمعیت اولیهٔ ابتکاری تفاوت چشمگیری با جواب‌های حاصل از جمعیت اولیهٔ تصادفی داشته است.

به‌منظور کمی‌سازی تأثیر راهکار ساخت جواب‌های اولیهٔ ابتکاری، از معیار فراگشایش استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان از تفاوت چشمگیری در مقادیر این معیار بین اجرای مدل در دو حالت یادشده دارد، به‌نحوی‌که مقدار این معیار در نسل ۱۰۰ در اجرای مدل اجراشده با جواب اولیهٔ ابتکاری برابر با ۰/۹۸۲ و با جواب اولیهٔ تصادفی برابر با ۰/۱۶۵ است.

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



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



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

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

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

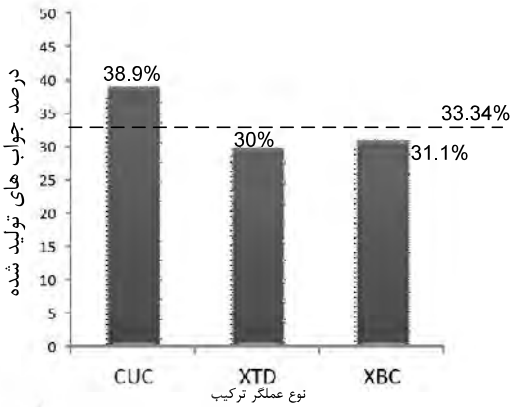
به‌طورکلی از مزایای تولید جواب اولیه به‌وسیلهٔ راهکار ابتکاری مطرح‌شده در پژوهش حاضر، می‌توان به این موارد اشاره کرد: ۱) مدل از محل مناسب فضای جواب، شروع به جست‌وجو می‌کند. ۲) سرعت حرکت به‌سمت جواب بهینهٔ نهایی افزایش می‌یابد. ۳) الگوهای ایجادشده کاربردی‌ترند. در الگوهای ایجادشده به‌وسیلهٔ تولید جواب تصادفی، کاربری‌ها بسیار پراکنده و خرد هستند که درعمل کارایی ندارند؛ ولی الگوهای ایجادشده ازطریق راهکار تولید جواب ابتکاری خوشه‌بندی معقول‌تری دارند. ۴) راهکار تولید جواب ابتکاری موجب هدایت مسئله به‌سمت قسمت‌های موجه فضای جست‌وجو می‌شود.

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

همان‌طورکه پیش‌تر اشاره شد، در پژوهش حاضر یک عملگر ترکیبِ 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 به‌وسیلهٔ آن ایجاد شد ثبت گردید و در پایان، تعداد جواب‌های تولیدشده به‌وسیلهٔ هریک از عملگرها، طی تمامی نسل‌ها شمارش شد. برای اعمال شرایط مساوی، سهم هریک از عملگرهای ترکیب برابر درنظر گرفته شد.

بررسی‌ها نشان دادند که از کل ۲۸۷۱ جواب ایجادشده طی ۱۰۰ نسل، ۱۱۱۶ جواب (۳۸/۹ درصد) به‌وسیلهٔ 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 به‌وسیلهٔ این عملگر توانستند در نسل‌های بعدی نیز در انتخاب پیروز شوند و به نسل‌های بعدی انتقال یابند. ۸۶۳ جواب (۳۰ درصد جواب‌ها) ازطریق عملگر ترکیب XTD و ۸۹۲

جـواب (۳۱/۱ درصـد) ازطریـق عملگـر ترکیـب XBC تولید شدند. این آمار شامل جواب‌هایی که به‌وسیلهٔ یک عملگر مشخص ترکیب ایجاد شده‌اند و روی آنها جهش رخ داده است نیز می‌شود.



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

از کل ۲۸۷۱ جـواب ایجادشـده، ۱۲۰۹ فرزنـد (۴۲ درصد) به‌وسیلهٔ عملگر جهش بهبـود یافتنـد؛ بنـابراین ۱۲۰۹ فرزنـد جهـش‌یافتـه و موفـق در کـل مجموعـهٔ نسل‌ها تولید شده است.

۴-۳- کاهش اندازهٔ جمعیت

همـان‌طـور کـه در جـدول ۱ مشـخص اسـت، تمـامی جواب‌های نهایی مدل، سطح سازگاری بـالا و دشـواری تغییر پایین دارند و پیوستگی کاربری‌ها نیز بهبود پیـدا کرده است. ازاین‌رو می‌توان این توابع هدف را به‌عنـوان محدودیت و قید برای مسئله در نظر گرفت که تا نسـل آخـر در مـدل قـرار داشـتند و جـواب‌هـا را بـه‌سـمت جواب‌هایی با سازگاری و پیوستگی بالا و دشواری تغییر کم هدایت کردند. در این مطالعـه بـرای کـاهش انـدازهٔ جمعیـت، جـواب‌هـای نهـایی بـا عملگـر مرتـب‌سـازی نامغلوب براساس دو تابع هدف میزان فرسایش و سـطح منفعت اقتصادی مرتب شدند و فقط جواب‌هایی کـه در جبههٔ اول این دو تابع هدف قرار داشتند به‌عنوان جواب نهایی معرفی شدند. این جواب‌ها در جدول ۲ آمده‌اند.

تمامی جواب‌های بهینهٔ نهایی مدل، ارزش کـاربردی یکسانی دارند و این روش فقط برای ارائهٔ پیشنهاد جـواب به‌منظور کاهش اندازهٔ مجموعه جواب نهایی است.

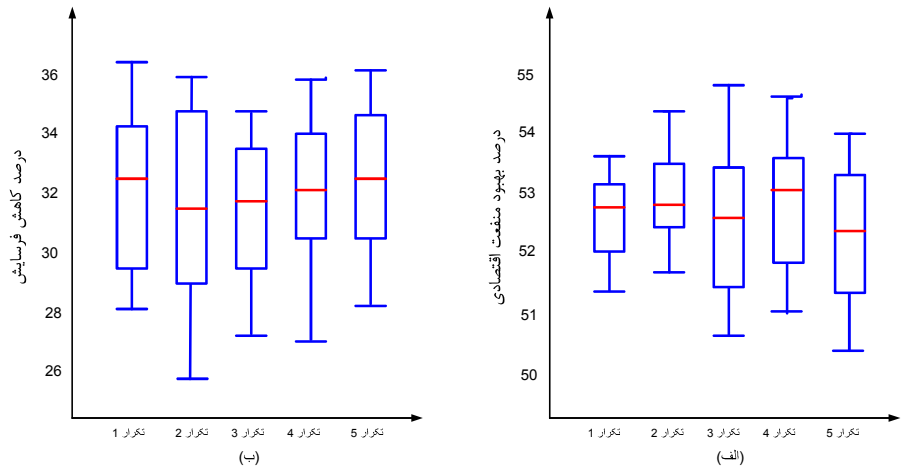
۴-۴- تست تکرارپذیری مدل

ازآنجاکه در الگوریتم‌های تکاملی، نقطهٔ آغاز جست‌وجـو در فضای جواب به‌صـورت تصـادفی انتخـاب مـی‌شـود، نتایج کار بـا اجراهـای مختلـف، متفـاوت خواهـد بـود. به‌منظور تست تکرارپـذیری، مـدل بـه دفعـات ۵بـار بـا جمعیـت اولیـهٔ ۳۰ و تعـداد تکـرار ۵۰ بـا پارامترهـای یکسان اجرا شد.

شـکل ۱۱ دامنـهٔ تغییـرات مقـادیر درصـد بهبـود منفعت اقتصادی (نمودار الف) و دامنهٔ تغییرات کـاهش فرسـایش (نمـودار ب) را بـرای ۵ تکـرار مـدل نشـان می‌دهد. همـان‌طورکـه در ایـن شـکل مشـخص اسـت، جواب‌های خروجی مدل در ۵ تکرار تقریباً در یک بـازه از فرسـایش و منفعـت اقتصـادی قـرار دارنـد و تفـاوت چندانی بین آنها از لحاظ ایـن دو تـابع هـدف مشـاهده نمی‌شود و تمامی الگوها توانسته‌اند فرسایش منطقـه را در حد پذیرفتنی کاهش دهند و سطح منفعت اقتصادی منطقه را بالا ببرند.

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



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

۵- نتیجه‌گیری

بررسی نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که مدل طراحی‌شده 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 به‌منظور بهبود روند جست‌وجو در ایجاد الگوی مناسب آمایش سرزمین، دو عملگر ابتکاریِ ایجاد جواب‌های اولیه و ترکیب اجتماع خوشه‌ها (CUC) طراحی و به‌کار گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده تأثیر شدید این عملگرها را در روند حل مسئلهٔ آمایش سرزمین نشان می‌دهد.

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

نتایج پژوهش حاضر نشان دادند که مدل طراحی‌شده 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**، نشریهٔ محیط‌شناسی، دورهٔ ۳۷، شمارهٔ ۲، صص. ۵۲-۴۳.

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

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

خارستان فارس)، نشریهٔ منابع طبیعی ایـران، دورهٔ ۶۰، شمارهٔ ۱.

صـادقی، س.ج.ر.، جلیلـی، خ.، نیـک‌کـامی، د.، ۱۳۸۷، **بیشینه‌سازی سـوددهی کـاربری اراضـی حوضـهٔ آبخیـز بریمونـد**، نشـریهٔ منـابع طبیعـی ایـران، دورهٔ ۶۰، شمارهٔ ۶.

کریمی، م.، مسگری، م.س.، شریفی، م.ع.، ۱۳۸۸، **مدل‌سازی توان اکولوژیکی سرزمین با اسـتفاده از منطـق فـازی (منطقهٔ مورد مطالعـه: شهرسـتان برخـوار و میمـه)**، سـنجش از دور و GIS ایـران، سـال اول، شـمارهٔ ۱، صص. ۳۸-۱۷.

مخـدوم، م.، ۱۳۸۷، **شـالودهٔ آمـایش سـرزمین**، انتشـارات دانشگاه تهران.

معصومی، ز.، منصوریان ع.، مسـگری م.س.، ۱۳۸۹، **کـاربرد الگوریتم ژنتیک چندهدفـه در مطالعـات مکـان‌یـابی کاربری‌های صنعتی**، سنجش از دور و GIS ایران، سال دوم، شمارهٔ 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, 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.

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 Niched 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.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی