



سبش از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

سال نهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۶
Vol.9, No. 3, Autumn 2017

۱۵-۲۲

ارائه مدلی برای بهینه‌یابی تخصیص کاربری اراضی جهت ذخیره آب مجازی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری

جواد سدیدي^۱، پرویز ضیائیان فیروزآبادی^۲، سید زهرا درواری^{۳*}
۱. استادیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران
۲. دانشیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران
۳. دانشجوی سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۶/۲۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۵/۲۴

چکیده

امروزه یکی از محدودیت‌های موجود، در زمینه منابع آب، ضعف راهکارهای مرتبط با مدیریت منابع آب است. از جمله راهکارهای مدیریتی برای بهبود این مشکل، تخصیص بهینه کاربری با رویکرد آب مجازی است. در تحقیق حاضر، مدلی برای بهینه‌یابی تخصیص کاربری با رویکرد ذخیره آب مجازی، با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک (GA.NSGA-II) در اراضی آبادی حاجی‌لک واقع در بخش سیمینه شهرستان بوکان (استان آذربایجان غربی) ارائه شده است. پس از تهیه لایه کاربری اراضی و آماده‌سازی آن در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تهیه ضرایب توابع هدف، تخصیص کاربری با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک، با توجه ویژه به کاهش مصرف آب مجازی، بهینه شده است. نتایج نشان می‌دهد الگوهای کاربری پیشنهادی در سناریوی آب مجازی، به ترتیب، در الگوریتم‌های GA و NSGA-II، ۲۹ و ۳۵ درصد مصرف آب مجازی را کاهش داده است. این مدل می‌تواند، به‌منزله سیستم پشتیبان تصمیم، نقش مؤثری در تصمیم‌گیری مدیران براساس اهداف گوناگون ایفا کند. همچنین، آزمون تکرارپذیری، زمان اجرا و همگرایی الگوریتم‌ها در مدل حاکی از برتری الگوریتم NSGA-II بر GA است؛ به طوری که الگوریتم NSGA-II، در مقایسه با الگوریتم GA، دارای زمان کمتر در اجرای مدل است و همگرایی بیشتر و واریانس کمتری در آزمون تکرارپذیری از خود نشان می‌دهد. استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌یابی تخصیص کاربری با رویکرد آب مجازی را می‌توان نوآوری موضوعی این تحقیق بیان کرد.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌یابی، تخصیص کاربری، آب مجازی، الگوریتم فراابتکاری ژنتیک.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: تهران، دروازه دولت، دانشگاه خوارزمی، دانشکده جغرافیا.

۱- مقدمه

آب و درنهایت، به توسعه پایدار وارد کرده است. به همین دلیل، توجه جدی به مدیریت تخصیص کاربری، با رویکرد آب مجازی می‌تواند نقش مهمی در حفظ منابع آب کشور داشته باشد.

امروزه وجود عوامل متعدد و پیچیده در مسائل برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری درمورد تخصیص کاربری دیگر با روش‌های قدیمی و دستی امکان‌پذیر نیست. از سوی، استفاده از ابزاری قدرتمند همچون سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)^۳ در حل برخی مسائل پیچیده مکانی نیز ناتوان بوده و استفاده از الگوریتم‌های هوشمندی مانند الگوریتم‌های بهینه‌یابی چندهدفه می‌تواند مؤثر باشد (نصیری، ۱۳۸۸؛ Deb et al., 2005؛ Datta and Deb, 2006؛ Herzog, 2008؛ Datta et al., 2007). در این زمینه، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری می‌تواند گزینه‌های مناسبی برای حل مسائل بهینه‌یابی چندهدفه محسوب شود (Deb and Sundar, 2006؛ Villalta-Calderon and Pérez-Stewart et al., 2004؛ Alegria, 2010). این الگوریتم‌ها بیشتر درمورد مسائلی به کار می‌روند که از پیوستگی خاصی تبعیت نمی‌کنند، فضای تصمیم موجه یکپارچه‌ای ندارند و یا توابع هدف آنها دارای پارامترهای تصادفی‌اند (پورطبری و همکاران، ۱۳۸۸).

در زمینه بهینه‌سازی کاربری اراضی و توسعه پایدار با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌یابی، تا کنون تحقیقات و پژوهش‌های فراوانی صورت گرفته است (شایگان و همکاران، ۱۳۹۱؛ علانی مقدم و همکاران، ۱۳۹۴؛ متکان و همکاران، ۱۳۹۴؛ Krink, 2002؛ Briassoulis, 2000؛ Cao et al., 2011). نتایج حاکی از توانایی بالای این مدل در حل مسائل چندهدفه و پیچیده مکانی است. تمرکز این تحقیق بر تخصیص کاربری با در نظر داشتن تابع هدف اصلی، کمینه کردن مصرف آب مجازی و سه تابع هدف فرعی، یعنی بیشینه کردن منفعت اقتصادی، سازگاری کاربری‌ها و از سوی،

کمبود آب در بخش‌های زیادی از کره زمین مشکلات بسیاری برای تأمین آب شرب سالم، تولید محصولات کشاورزی و در کل روند عمومی زندگی انسان‌ها به وجود آورده است؛ به طوری که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۵ میلادی، ۵۰ تا ۶۰ درصد مردم جهان با تنش آبی و مشکلات ناشی از کم‌آبی مواجه شوند (احسانی و همکاران، ۱۳۸۷). کشور ایران هم که جزء کشورهای نیمه‌خشک به‌شمار می‌رود، از این قاعده مستثنا نیست. از سوی، در نظر داشتن سیاست توسعه صادرات غیرنفتی به همراه مفهوم آب مجازی باعث می‌شود به تولید محصولات کشاورزی و هزینه فرصت و منافع حاصل از تولید آنها دید واقع‌بینانه‌تری داشته باشیم و اهداف ملی را به صورتی تنظیم کنیم که بیشترین میزان منافع بلندمدت جامعه، با لحاظ کارآیی در تولید و مصرف منابع ملی، حاصل شود.

به‌رغم محدودیت ظرفیت تجدیدپذیری منابع آبی، برخی از کشورهای کم‌آب به پمپاژ بیش از حد آب‌های زیرزمینی، نمک‌زدایی آب دریا و اجرای پروژه‌های بسیار بزرگ انتقال آب اقدام می‌کنند. در چنین شرایطی، تولید محصولات چندین برابر گران‌تر تمام می‌شود. در حالی که این کشورها می‌توانند، با وارد کردن تجارت آب مجازی^۱ در سیاست‌های آبی کشور، میزان دسترسی خود را به منابع آب کشور و جهان افزایش دهند و به همان نسبت، از افزایش فشار بر منابع محدود خود نیز بکاهند (احسانی و همکاران، ۱۳۸۷؛ El-Sadek, 2010؛ Du Fraiture, 2004؛ Antonelli et al., 2017).

نخستین بار در دهه ۹۰ میلادی، اصطلاح آب مجازی را تونی آلن^۲ برای نشان دادن کل مقدار آب مصرف شده برای تولید یک محصول (از کالای صنعتی گرفته تا محصول کشاورزی) مطرح کرد. در واقع، کل مقدار آب مصرفی در زنجیره تولید برای پدید آوردن هر محصول نهایی را «آب مجازی» می‌نامند (Hoekstra et al., 2006). از سوی، تغییرات در کاربری اراضی خسارت‌های جبران‌ناپذیری را به طبیعت و به‌ویژه منابع

1. virtual water trade 2. John Anthony Allan
3. geographic information system

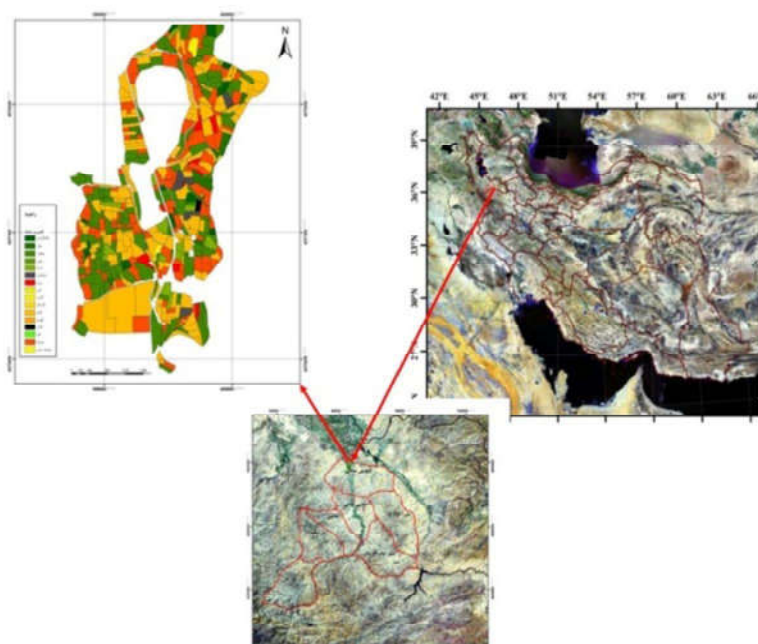
آذربایجان غربی قرار دارد. از نظر موقعیت جغرافیایی، بین شمالی و طول شرقی و شمالی و طول شرقی و تا طول شرقی، در محدوده عرض شمالی واقع شده است. مساحت این روستا ۵۸۷.۹۵ هکتار و دارای شانزده نوع کاربری است. شکل ۳ نمایی از منطقه مورد مطالعه را در ایران نشان می‌دهد. شکل ۱ نمایی از منطقه مورد مطالعه را در ایران نشان می‌دهد. این منطقه، سه کاربری گندم (۳۶٪)، چغندر (۲۸٪) و یونجه (۲۴٪) بیشترین مساحت را به خود اختصاص داده‌اند. کمبود آب و کاهش منفعت اقتصادی در سال‌های اخیر و مصرف بالای آب مجازی برای سه کاربری ذکر شده، همچنین، وجود نقشه‌های کاداستر اراضی کشاورزی (سال ۱۳۹۵) در مقیاس ۱:۲۰۰۰ از این محدوده را می‌توان از دلایل استفاده از این منطقه به‌منزله محدودۀ مورد مطالعه بیان کرد.

کمینه‌کردن دشواری در روستای حاجی‌لک شهرستان بوکان، از توابع استان آذربایجان غربی است. بدین‌منظور، ابتدا با مطالعه و گردآوری اطلاعات (میزان آب مصرفی، عملکرد در هکتار، قیمت)، آب مجازی و منفعت اقتصادی هر محصول و سپس سازگاری و دشواری آنها محاسبه شده است. در ادامه، ضرایب توابع آب مجازی، منفعت اقتصادی، سازگاری و دشواری تغییرات کاربری با روش AHP^۱ به‌دست آمده است. درنهایت، کاربری‌های بهینه که اهداف مورد نظر در سناریوهای ذکر شده در این تحقیق را برآورده می‌کنند (کاهش مصرف آب مجازی، افزایش منفعت اقتصادی، افزایش سازگاری و کاهش دشواری)، با استفاده از توانایی الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک (GA^۲ و NSGA-II^۳)، تعیین شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

روستای حاجی‌لک، از توابع شهرستان بوکان، در استان



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

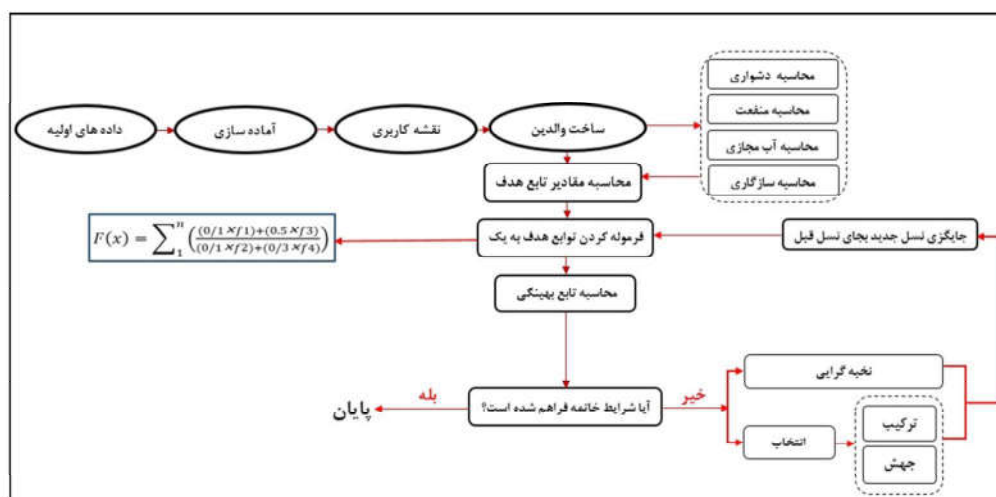
1. analytic hierarchy process
2. genetic algorithm
3. non sorting genetic algorithm

۲-۲- بهینه‌یابی چندهدفه^۱

مسئله بهینه‌یابی در واقع یافتن پاسخ یا پاسخ‌هایی روی مجموعه‌ای از گزینه‌های امکان‌پذیر (رعایت قیدهای مسئله)، با هدف بهینه‌کردن معیار یا معیارهای مسئله است. از سویی، مسئله بهینه‌یابی چندهدفه زیرشاخه‌ای از مجموعه روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) است که در میان مجموعه نامحدودی از پاسخ‌های محتمل صورت می‌گیرد (Dias et al., 2002). این روش شامل مجموعه‌ای از اهداف و معیارهای متضاد و متعارض می‌شود. در این‌گونه مسائل، با مجموعه‌ای از پاسخ‌ها روبه‌رو می‌شویم. البته در برخی موارد می‌توان، با استفاده از توابع تعریفی، توابع چندهدفه را در قالب یک هدف بررسی کرد. از این‌رو، واژه «بهینه‌یابی» به معنای پیدا کردن مجموعه‌ای از پاسخ‌ها یا پاسخی است که از لحاظ تمامی مقادیر توابع هدف، مورد پذیرش است (Coello et al., 2007). از جمله روش‌های بهینه‌یابی چندهدفه، می‌توان الگوریتم‌های ژنتیک GA و NSGA-II را نام برد که در این تحقیق استفاده شده است.

۲-۲-۱- الگوریتم فراابتکاری GA

این الگوریتم تصادفی و هوشمند است و بر مبنای نظریه داروین بنیان نهاده شده است (Deb et al., 2005). این روش با ایده اصلی مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها، که جمعیت اولیه نامیده می‌شوند، شروع به کار می‌کند. کروموزوم‌هایی از این جمعیت انتخاب می‌شوند و نسل بعدی را پدید می‌آورند (Yeh and Lin, Sheta and Turabieh, 2006; Eldrandaly, 2010; 2007). در انتخاب این کروموزوم‌ها از تابع برازش استفاده می‌شود. این تابع مقداری را به منزله خروجی برای هر کروموزوم برمی‌گرداند که میزان توانایی آن کروموزوم در حل مسئله را نشان می‌دهد. کروموزوم‌هایی که توانایی بالاتری داشته باشند شانس بیشتری برای بقا در نسل بعد خواهند داشت. این کروموزوم‌ها، با عمل تزیج، با یکدیگر ترکیب می‌شوند و کروموزوم‌های نسل بعد را تشکیل می‌دهند. پارامتر جهش باعث نایکنواختی در تولید نسل جدید و ایجاد تغییراتی، هر چند کوچک، در فرزندان می‌شود (Sivanandam and Deepa, 2007؛ سعیدیان و همکاران، ۱۳۹۴). شکل ۲ مراحل حل یک مسئله بهینه‌یابی را، با استفاده از الگوریتم ژنتیک در این تحقیق، نشان می‌دهد.



شکل ۲. روند حل مسئله بهینه‌یابی با استفاده از الگوریتم ژنتیک GA

1. multi-objective optimization
2. multi criteria decision making

۲-۲-۲- الگوریتم فراابتکاری NSGA-II

الگوریتم فرا ابتکاری NSGA-II یکی از انواع الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌یابی و از معروف‌ترین و پرکاربردترین الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه است که تکنیکی بسیار قدرتمند برای حل مسائل جست‌وجو و بهینه‌یابی دنیای واقعی به‌شمار می‌آید (Coello et al., 2007; معصومی و همکاران، ۱۳۸۹). این الگوریتم را نخستین‌بار دب و همکارانش^۱ در سال ۲۰۰۲ مطرح کردند. در شکل ۳، مراحل حل یک مسئله بهینه‌یابی، با استفاده از الگوریتم NSGA-II در این تحقیق، نشان داده شده است. در ادامه، مفاهیم تخصصی در الگوریتم NSGA-II توضیح داده می‌شوند.

مفهوم غلبه: پاسخ x_1 بر پاسخ x_2 غالب است؛ اگر این هر دو شرط برقرار باشد: الف) پاسخ x_1 در هیچ‌یک از اهداف بدتر از x_2 نباشد؛ ب) پاسخ x_1 دست کم در یک هدف بهتر از پاسخ x_2 باشد. از آنجا که

مفهوم غلبه زمینه مقایسه پاسخ‌ها با اهداف چندگانه را مهیا می‌کند، معمولاً در روش‌های بهینه‌یابی چندهدفه، برای جست‌وجوی پاسخ‌های نامغلوب به‌کار می‌رود.

مجموعه نامغلوب: از بین مجموعه پاسخ‌های P ، مجموعه پاسخ‌های نامغلوب P^* آنهایی‌اند که مغلوب هیچ‌یک از اعضای مجموعه P نیستند.

پارامتر انتخاب مسابقه‌ای ازدحام: با فرض اینکه هر جواب یا راه‌حل i دارای یک رتبه نامغلوب بودن (r_i) و یک فاصله ازدحام محلی (d_i) است، پارامتر مسابقه‌ای ازدحام (c)، براساس قاعده‌ای که ذکر می‌شود، دو پاسخ را مقایسه می‌کند و یکی را برمی‌گزیند. جواب i در رقابت با جواب j ، صرفاً در صورتی انتخاب می‌شود که این شرایط برقرار باشد: پاسخ i رتبه بهتری داشته باشد؛ که آن‌گاه، $r_i < r_j$ و پاسخ‌های i و j در یک صف قرار داشته باشند اما پاسخ i در مقایسه با پاسخ j فاصله ازدحام بهتری دارد؛ پس $r_i = r_j$ و $d_i > d_j$.



شکل ۳. روند حل مسئله بهینه‌یابی با استفاده از الگوریتم ژنتیک NSGA-II

1. Deb et al.

توجه به سناریوهای تعریف‌شده (دشواری، منفعت اقتصادی، مصرف آب مجازی و سازگاری)، در مسئله اجرا شده است.

۲-۴-۲- مدل‌سازی مسئله در الگوریتم

در این بخش یک پاسخ، تابع بهینگی، قیدهای مسئله و سناریوهای در نظر گرفته‌شده در این تحقیق را تعریف می‌کنیم.

۲-۴-۱- تعریف یک پاسخ مسئله در فضای

بهینه‌یابی

تعریف یک پاسخ، در این تحقیق، واحد مکانی مالکیت در لایه کاربری است. پاسخ، در صورت داشتن n زمین (در این تحقیق، ۴۴۴ قطعه زمین)، مانند شکل ۴ تعریف می‌شود که در آن L کاربری بهینه تغییر یافته در همان قطعه زمین است؛ به شرطی که قیدهای تعریف‌شده در مسئله رعایت و توابع هدف و سناریوی تعریف‌شده در کروموزوم بهینه شود. در نتیجه، مقادیر L بین ۱ و تعداد کاربری‌ها (در این تحقیق، شانزده عدد) جایگزین شده است.

L1	L2	L3	L4	L5	...	Ln
----	----	----	----	----	-----	----

شکل ۴. یک پاسخ مسئله

۲-۴-۲- تعریف تابع بهینگی، قیدهای مسئله و

سناریوها

در تحقیق حاضر، به منظور تولید الگوهای تغییر کاربری، چهار تابع هدف دشواری ($f1$)، منفعت اقتصادی ($f2$)، مصرف آب مجازی ($f3$) و سازگاری ($f4$) در نظر گرفته شده که هر یک از این توابع یکی از چهار سناریوی این تحقیق را شامل می‌شود. در نتیجه، با مسئله بهینه‌یابی چندهدفه‌ای روبه‌رویم که در الگوریتم GA، تمامی

فاصله ازدحام: برای به دست آوردن تخمینی از

چگالی پاسخ‌های موجود در کنار پاسخی خاص، مانند پاسخ i در جمعیت، میانگین فاصله‌ای از دو پاسخ واقع در طرفین پاسخ i برای هر یک از M تابع هدف محاسبه می‌شود. مقدار عددی d_i که از محاسبه تقریبی فضای مکعبی اطراف پاسخ i و با به کار بردن نزدیک‌ترین همسایه‌های آن به دست می‌آید فاصله ازدحام نامیده می‌شود.

پاسخ‌های بهینه پارتو^۱ و جبهه بهینه پارتو^۲ در مقایسه دو پاسخ وقتی هیچ‌یک از آن دو، به‌ازای تمامی اهداف، بهتر از دیگری نباشد؛ گفته می‌شود که آن دو پاسخ نامغلوب‌اند. اگر اهمیت اهداف به یک اندازه باشد، نمی‌توان گفت کدام‌یک از این دو پاسخ، به‌ازای تمامی اهداف، بهتر از دیگری است. به مجموعه چنین پاسخ‌هایی پاسخ‌های بهینه پارتو گفته می‌شود (Coello and Romero, 2003). مجموعه تمامی پاسخ‌های بهینه پارتو، در مسئله چندهدفه مجموعه بهینه پارتو و بردارهای هدف متناظر با آن، لبه یا جبهه بهینه پارتو نامیده می‌شود (Horn et al., 1994).

۲-۳- داده‌ها

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل نقشه کاربری اراضی منطقه (تهیه‌شده از سازمان جهاد کشاورزی، در مقیاس ۱:۲۰۰۰) و همچنین، ضرایب فاکتورهای توابع هدف (با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) می‌شود. نقشه همسایگی بین کاربری‌ها براساس مجاورت چندضلعی (هم‌پوشانی، لبه هم‌زمان یا گره)، که یکی از ابزار تحلیل مجاورت چندضلعی‌هاست، استفاده شده است؛ به طوری که تعداد دفعات یا میزان طول مشترک مرز یک کاربری با کاربری‌های دیگر در مدل در نظر گرفته شده است. این لایه یکی از ورودی‌های مدل به حساب می‌آید که با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) تهیه شده است. در مرحله بعد، مسئله بهینه‌یابی تغییر کاربری اراضی مدل شده، سپس مدل توسعه یافته و با

1. Pareto-optimal set
2. Pareto-optimal front (surface)

محاسبه می‌شود. سپس، از روش AHP سطوح آب مجازی وزن‌دهی و در ادامه، به کمک رابطه (۳) بهینه تغییر کاربری، با هدف مینیمم کردن مصرف آب مجازی، به دست می‌آید. در آن، مصرف آب مجازی تغییر کاربری پیکسل (i, j) از کاربری فعلی آن به کاربری پیشنهادی است.

$$\text{Max } F_2 = \sum_i^n \sum_j^n P_{i,j} \quad \text{رابطه (۳)}$$

تابع منفعت اقتصادی: دستیابی به بیشترین میزان سودمندی الگوهای تغییر کاربری یکی از اهداف این تحقیق است. در تهیه ماتریس منفعت اقتصادی تغییر کاربری‌ها، فقط به اقتصاد بازاری تغییر کاربری‌ها توجه شده است. ماتریس منفعت اقتصادی تغییر کاربری‌ها، با در نظر گرفتن میانگین قیمت هر محصول طی دو سال اخیر و با روش AHP تهیه و در ادامه، به کمک رابطه (۴)، منفعت اقتصادی تغییر کاربری فعلی یک پیکسل به کاربری مدنظر محاسبه شد. در آن، $P_{i,j}$ منفعت اقتصادی تغییر کاربری پیکسل (i, j) از کاربری فعلی آن به کاربری پیشنهادی است.

$$\text{Max } F_2 = \sum_i^n \sum_j^n P_{i,j} \quad \text{رابطه (۴)}$$

تابع سازگاری: افزایش سازگاری کاربری‌ها در الگوهای خروجی مدل دلیل اصلی استفاده از این تابع هدف است تا ارتباط هر کاربری با محدوده اطراف آن به گونه‌ای باشد که تأثیرات ناخواسته میان آن کاربری با کاربری‌های مجاور به کمترین میزان برسد. این تابع هدف براساس میزان سازگاری کاربری هر واحد مکانی با کاربری واحدهای مکانی مجاور محاسبه می‌شود. برای تهیه این ماتریس نیز، با روش AHP، سطوح سازگاری کاربری‌ها وزن‌دهی شد و با استفاده از رابطه‌های (۵) و (۶)، سازگاری هر کاربری با کاربری‌های همسایه خود محاسبه شد.

$$\text{Max } F_2 = \sum_i^n \sum_j^n C_{i,j} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$C_{i,j} = \sum_{n=1}^n C_{i,j} / n \quad \text{رابطه (۶)}$$

اهداف تبدیل به یک تابع هدف شده است (رابطه (۱)). البته با این توضیح که هر کاربری با ایندکس مورد نظر خود وارد مدل شده و در تمامی موارد، قیدهای مسئله رعایت شده است.

$$F(x) = \sum_1^m \left(\frac{(0/1 \times f1) + (0/5 \times f2)}{(0/2 \times f4) + (0/2 \times f2)} \right) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه، f1 میزان دشواری، f2 منفعت اقتصادی، f3 مصرف آب مجازی، f4 سازگاری کاربری‌ها و n تعداد واحدهای مکانی در منطقه است؛ با هدف مینیمم کردن این تابع. برای دستیابی به این هدف، باید صورت کسر تا حد امکان مینیمم و مخرج کسر تا حد امکان ماکزیمم شود که همان چهار تابع هدف تعریف شده (بیشینه منفعت اقتصادی و سازگاری، کمینه دشواری و مصرف آب مجازی) را دنبال کند. از سویی، رسیدن به کمترین میزان مصرف آب مجازی در الگوهای تغییر کاربری هدف اصلی این تحقیق است. به همین علت، بیشترین وزن (۰/۵) در تابع برازندگی به این تابع اختصاص یافته است.

تابع آب مجازی: در تهیه ماتریس آب مجازی تخصیص کاربری‌ها، ویژگی ژنتیکی گیاهان، زمان کاشت، اقلیم و دیگر عوامل در میزان مصرف آب مجازی محصولات کشاورزی مناطق گوناگون تأثیر داشته‌اند. کاهش میزان مصرف آب مجازی، برای هر کاربری، یکی از اهداف توسعه پایدار محسوب می‌شود. برای اعمال این تابع هدف، ابتدا نیاز آبی و عملکرد محصولات در منطقه مورد مطالعه از طریق نرم‌افزار NETWAT استخراج می‌شود و سپس آب مجازی یک گیاه از نسبت کل آب مصرفی برای تولید آن (مترمکعب در سال) به عملکرد محصول تولیدی (تن در سال) به دست می‌آید. معمولاً این فاکتور برحسب مترمکعب در تن اندازه‌گیری و محاسبه می‌شود (رابطه (۲)).

$$\text{WVC}[c] = \text{CWU}[c] / \text{Tp}[c] \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن WVC^۱ مصرف آب مجازی و Tp عملکرد محصول در سال (تن در سال) مورد نظر است CWU^۲ نیز آب مصرفی گیاه است که براساس نیاز آبی گیاه

1. virtual water consumption
2. crop water use (CWU)

پارامترهای آن (جمعیت اولیه، درصد نخبه‌گرایی، نوع ترکیب، نقطه تقاطع در ترکیب، نرخ جهش، تعداد ژن تغییر یافته در جهش و تعداد تکرارها (شرط توقف)) وابسته است. بنابراین، لازم است پارامترهای آن، برای اجرای موفق تر و سریع تر مدل، بهینه شوند. این کار مستلزم تحلیل حساسیت روی همگرایی مدل به‌ازای مقادیر گوناگون پارامترهاست.

۳- نتایج

در این قسمت، به نتایج حاصل از آنالیز حساسیت پارامترهای دو الگوریتم، بررسی تغییرات توابع هدف در الگوریتم‌ها و ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها در حوزه همگرایی، آزمون تکرارپذیری و زمان اجرا پرداخته‌ایم.

۳-۱- آنالیز حساسیت پارامترهای الگوریتم‌های

فراابتکاری GA و NSGA-II

در این تحقیق، مقادیر بهینه پارامترهای اولیه الگوریتم‌های GA و NSGA-II، براساس تجربه، از تکرارهای گوناگون الگوریتم و به‌صورت سعی و خطا به‌دست آمده است. ادامه، نتایج این ارزیابی ارائه شده است.

براساس جدول ۱، در این تحقیق تعداد جمعیت از ۱۰۰ تا ۶۰۰ تغییر کرده که در بهترین حالت، جمعیت ۵۰۰ انتخاب شده است. از سویی، در این تحقیق از ترکیب‌های تک‌نقطه‌ای، دونقطه‌ای، احتمالی و ترکیبی استفاده شده که، در بهینه‌ترین حالت، ترکیب تک‌نقطه - احتمالی انتخاب شده است. مقایسه پارامتر ترکیب، در دو الگوریتم فراابتکاری GA و NSGA-II، نقطه تقاطع بصورت احتمالی و در شماره ژن‌های گوناگون بررسی شده است، بصورتی که شماره ژن نقطه تقاطع از ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵ درصد اولیه کل ژن‌ها استفاده شده که در نهایت، روی ژن شماره ۲۱۰ بهترین پاسخ دریافت شده است و این نشان می‌دهد که شماره ژن نقطه تقاطع از ۰/۵۰ درصد هریک از دو والد، در ترکیب تک‌نقطه‌ای - احتمالی، پاسخی بهتر از نقطه تقاطع‌های دیگر دارد.

در رابطه (۵)، میانگین سازگاری پیکسل (j, i)، با همسایه‌های خود است. در رابطه (۶)، سازگاری پیکسل (j, i) با همسایه nم خود و n تعداد همسایه‌های پیکسل (j, i) است. i و j نیز شماره سطر و ستون پیکسل‌ها هستند.

تابع دشواری تغییر کاربری‌ها: به‌حداقل‌رساندن دشواری تغییر کاربری‌ها در الگوهای خروجی مدل یکی از اهداف تحقیق حاضر است. برای محاسبه دشواری تغییر کاربری‌ها از ماتریس آن با روش AHP، سطوح گوناگون دشواری تغییر کاربری‌ها وزن‌دهی شد و در ادامه، با استفاده از رابطه (۷)، مقدار دشواری تغییر از کاربری فعلی هر پیکسل به کاربری مدنظر محاسبه شده است. در آن، $D_{i,j}$ دشواری تغییر کاربری از کاربری فعلی پیکسل (j, i) به کاربری پیشنهاد شده در مدل است.

$$\text{رابطه (۷)} \quad \text{Min } F_3 = \sum_i^n \sum_j^n D_{i,j}$$

قیدهای مسئله: مدل بهینه‌یابی پیشنهادی دارای قیدهایی است که به‌صورت ماتریسی برای الگوریتم تعریف شده است؛ به‌صورتی که کاربری‌های معدن و ساختمان نمی‌توانند به کاربری دیگر تبدیل شوند و برعکس، کاربری‌های دیگر نیز نمی‌توانند به این کاربری تبدیل شوند. همچنین، کاربری‌های سیب، گردو، هلو و یونجه - سیب به‌علت آب مجازی مصرفی کمتر و بهره اقتصادی بیشتر، نباید به کاربری‌های آفتابگردان، پیاز، چغندر، خیار، ذرت، کدو، گل‌کلم، گندم، گوجه و یونجه تغییر کاربری بدهند.

سناریوها: در این تحقیق، چهار سناریو تعریف

شده است؛ به‌طوری که بهینه‌ترین حالت هریک از توابع هدف را شامل می‌شود. در سناریوی اول، کمینه تابع دشواری؛ سناریوی دوم، بیشینه تابع منفعت اقتصادی؛ سناریوی سوم، کمینه تابع مصرف آب مجازی؛ سناریوی چهارم، بیشینه تابع سازگاری مد نظر است.

۳-۲- آنالیز حساسیت پارامترهای الگوریتم

فراابتکاری GA و NSGA-II

عملکرد مدل الگوریتم ژنتیک به انتخاب مقادیر

جدول ۱. آنالیز حساسیت پارامترهای به کاررفته در الگوریتم‌های GA و NSGA-II

فاکتورها	مورد آزمایش	انتخاب شده در GA	انتخاب شده در NSGA-II
تعداد جمعیت اولیه	۶۰۰-۱۰۰	۵۰۰	۵۰۰
درصد نخبه‌گرایی	۰/۵-۰/۲	۰/۲	-
نوع ترکیب	تک‌نقطه، دونقطه، احتمالی، ترکیبی	ترکیبی (احتمالی - تک‌نقطه‌ای)	ترکیبی (احتمالی - تک‌نقطه‌ای)
نقطه تقاطع در ترکیب	براساس شماره ژن	شماره ژن ۲۱۰	شماره ژن ۲۱۰
نرخ جهش	۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۷	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳
تعداد ژن در جهش	۲ تا ۴۴۴	۴	۴
تعداد تکرارها	۱۰۰ تا ۳۵۰۰	۳۰۰۰	۱۵۰۰-۱۰۰۰-۱۰

منطقه نداشته باشیم، مقدار تابع منفعت اقتصادی ۶۳۷.۵۴ تابع سازگاری ۲۱.۲۴۲، تابع دشواری صفر و تابع مصرف آب مجازی ۹۶.۵۹ به دست می‌آید. در بهینه‌ترین حالت اجرای الگوریتم GA، با استفاده از سعی و خطا در پارامترهای الگوریتم، تابع بهینگی ۵۵/۰ و مقادیر تابع منفعت اقتصادی ۳۴۰۷، سازگاری ۱۷۶.۳۱، دشواری ۱۷.۹۱۷ و تابع مصرف آب مجازی ۶۰۷.۴۲ در شماره تکرار ۳۰۰۰ به دست آمده است. جدول ۲ میزان تغییرات توابع هدف را، در بهینه‌ترین حالت تابع برازندگی (رابطه ۱) در الگوریتم GA نشان می‌دهد. شکل ۵. الف نیز نقشه کاربری اراضی برای منطقه مورد مطالعه را، پیش از تغییر کاربری، و شکل ۵. ب نقشه کاربری حاصل از الگوریتم تکاملی GA را، در بهینه‌ترین حالت تابع برازندگی، نشان می‌دهد.

جدول ۲. تغییرات توابع هدف در کاربری اولیه و تابع بهینگی با استفاده از الگوریتم GA

تابع هدف	کاربری اولیه	تابع بهینگی در بهترین حالت
دشواری	۰	۱۷.۹۱۷
منفعت اقتصادی	۵۴.۶۳	۳۴.۷
آب مجازی	۹۶.۵۹	۶۰۷.۴۲
سازگاری	۲۱.۲۴۲	۱۷۶.۱۳
شماره تکرار	-	۳۰۰۰

با توجه به جدول ۲، دشواری بالا رفته و سازگاری کاهش یافته است. همان‌طور که در بخش پیشین توضیح

از سویی، تغییر نرخ جهش از ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۷ و تعداد ژن تغییر در جهش از ۲ تا ۴۴۴ متغیر است. در بهترین حالت، نرخ جهش ۰/۰۰۳ و تعداد ژن تغییر در جهش ۴ عدد انتخاب شده است. به بیان دیگر، تعداد ژن تغییر در جهش ۰/۰۰۹ از کل ژن‌ها را دربر می‌گیرد. تکرار در این دو الگوریتم از ۱۰۰ تا ۳۵۰۰ مورد آزمون و خطا قرار گرفته شده که، در بهینه‌ترین حالت، تعداد تکرار در GA، ۳۰۰۰ و در NSGA-II، در سناریوهای گوناگون، متفاوت بوده است. تحلیل حساسیت پارامترهای گوناگون در هریک از دو الگوریتم نشان می‌دهد که نمی‌توان قانون ثابتی برای تعیین میزان و مقدار پارامترهای دو الگوریتم مطرح کرد و براساس تعریف مسئله و حوزه مطالعاتی و نوع الگوریتم، ممکن است میزان هر یک از پارامترها متفاوت انتخاب شود.

۳-۲- بررسی تغییرات توابع هدف در الگوریتم‌ها

در منطقه مورد مطالعه، گندم بیشترین مساحت کاربری را به خود اختصاص داده است. با توجه به تغییر کاربری منطقه با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری (GA و NSGA-II)، این مسئله مشهود است که دشواری بالا می‌رود زیرا، فقط در صورت تغییر نکردن کاربری‌ها، دشواری صفر محاسبه می‌شود و از سویی، با تعلق داشتن حجم بالایی از مساحت حوزه به گندم، این اطمینان وجود دارد که سازگاری طی تغییر کاربری پایین می‌آید. در صورتی که هیچ تغییر کاربری‌ای در

با توجه به جدول ۳، می‌توان بیان داشت که در بهینه‌ترین حالت تابع بهینگی، مساحت کاربری‌های سیب، گردو، هلو و یونجه- سیب افزایش یافته و کاربری‌های آفتابگردان، پیاز، چغندر، خیار، ذرت، کدو، گردو، گل کلم، گندم، گوجه، یونجه از فهرست کاربری‌های منطقه حذف شده‌اند. حذف این کاربری‌ها ممکن است علت‌های گوناگونی داشته باشد که شامل پیوستگی اندک این کاربری‌ها، دشواری آنها در مقایسه با سه کاربری انتخاب‌شده و ... باشد. شایان ذکر است کاربری‌های معدن و ساختمان هیچ تغییری در مساحت و مکان نداشته‌اند زیرا یکی از قیدهای این تحقیق بوده‌اند.

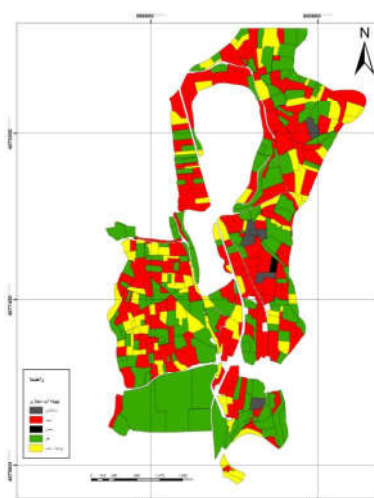
داده شد، این نتیجه امری طبیعی است. همچنین، میزان مصرف آب مجازی ۲۹٪ و منفعت اقتصادی ۴۸٪ کاهش را نشان می‌دهد. این جدول نمونه‌ای از یک مدل پشتیبان تصمیم را نشان می‌دهد که مدیران، براساس اهداف سازمان و اهداف منطقه‌ای، می‌توانند تابع بهینگی متفاوتی را تعریف و ضرایب گوناگونی را برای هر یک از توابع هدف در نظر بگیرند. جدول ۲ میزان تغییرات مساحت کاربری‌ها را، قبل و بعد از تغییر کاربری، با استفاده از الگوریتم GA نشان می‌دهد.

جدول ۳. مقایسه تغییرات مساحت کاربری‌ها در کاربری اولیه و بهینه‌ترین حالت تابع بهینگی، با استفاده از الگوریتم GA

مساحت کاربری	نوع کاربری	کد کاربری
بهینه‌ترین حالت تابع برازندگی	کاربری اولیه	
۰	۱۴/۱	۱ آفتابگردان
۰	۱۱/۲	۲ پیاز
۰	۱۶۳/۹	۳ چغندر
۰	۰/۴۴	۴ خیار
۰	۲۲/۳۷	۵ ذرت
۱۰/۲۶	۱۰/۲۶	۶ ساختمان
۳۱۷/۸۱	۹/۸۳	۷ سیب
۰	۰/۳۱	۸ کدو
۵/۲۷	۴/۱۳	۹ گردو
۰	۰/۲۶	۱۰ گل کلم
۰	۲۰۹/۴۶	۱۱ گندم
۰	۰/۵۹	۱۲ گوجه
۱/۱۶	۱/۱۶	۱۳ معدن
۵۱/۴۷	۰/۳۱	۱۴ هلو
۰	۱۳۹/۲	۱۵ یونجه
۲۰۱/۹۸	۰/۳۳	۱۶ یونجه - سیب
۵۸۷/۹۵	۵۸۷/۹۵	مجموع



شکل ۵. الف) نقشه کاربری وضع موجود منطقه



شکل ۵. ب) نقشه کاربری با استفاده از الگوریتم GA

با توجه به جدول ۴، براساس چهار سناریوی تعریف شده در طرح مسئله این تحقیق، در تمامی موارد دشواری بالا رفته و سازگاری کاهش یافته است. طبق این جدول، سناریوی دشواری، در بهینه ترین حالت خود، از عدد ۰ در کاربری اولیه به عدد ۲۸.۱۴۸ رسیده که این خود افزایش ۲۸ درصدی دشواری در منطقه را بیان می کند. از سویی، در همین سناریو، مصرف آب مجازی به میزان ۳۳٪ کاهش داشته است.

نتایج بهینه ترین حالت اجرای الگوریتم فراابتکاری NSGA-II، براساس چهار سناریوی تعریف شده، در جدول ۴ آورده شده است. طبق این جدول، چهار سناریوی تعریف شده بهینه دشواری، منفعت اقتصادی، مصرف آب مجازی و سازگاری، به ترتیب، در بهینه ترین حالت خود ۲۸.۶۶۸، ۱۱۹.۴۷۲۳، ۳۹.۱۵ و ۱۷۸.۲۴۲، به ترتیب، در تکرارهای ۱۵۰۰، ۱۰۰ و ۱۵۰۰ و ۱۰۰۰ به دست آمده است (جدول ۴).

جدول ۴. میزان تغییرات توابع هدف در کاربری اولیه و سناریوهای گوناگون، با استفاده از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II

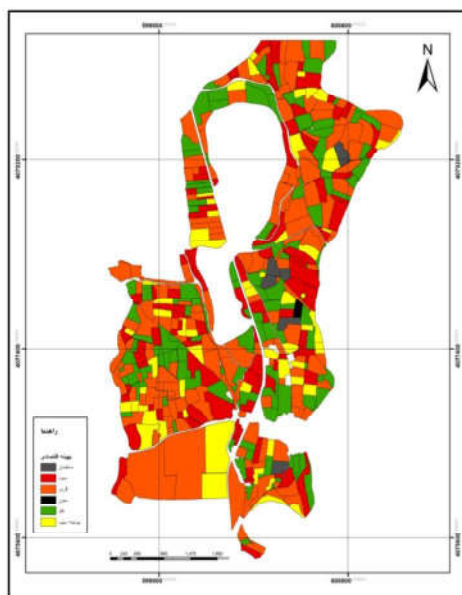
تابع هدف	کاربری اولیه	سناریوی دشواری	سناریوی منفعت اقتصادی	سناریوی آب مجازی	سناریوی سازگاری
دشواری	۰	۲۸.۱۴۸	۵۴.۲۸	۲۸.۶۶۸	۲۹.۲۴۸
منفعت اقتصادی	۶۷.۵۴	۴۰.۸۶	۱۱۹.۴۷۲۳	۳۸.۵۷	۴۱.۰۷۷
آب مجازی	۵۹.۹۶	۴۰.۳۳	۶۳.۷	۳۹.۱۵	۳۹.۴۶
سازگاری	۲۴۲.۲۱	۱۷۲.۲	۱۵۳.۵۵	۱۷۶.۱۱	۱۷۸.۲۴۲
میزان تکرار	۰	۱۵۰۰	۱۰۰	۱۵۰۰	۱۰۰۰

جدول ۵. میزان تغییرات مساحت کاربری ها با استفاده از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II

کد کاربری	نوع کاربری	مساحت کاربری اولیه در منطقه (هکتار)			مساحت کاربری ها براساس سناریوهای تعریف شده، با استفاده از الگوریتم NSGA-II		
		کاربری اولیه در منطقه (هکتار)	سناریوی دشواری	سناریوی منفعت اقتصادی	سناریوی آب مجازی	سناریوی سازگاری	
۱	آفتابگردان	۱۴/۱	۰	۰	۰	۰	
۲	پیاز	۱۱/۲	۰	۰	۰	۰	
۳	چغندر	۱۶۴	۰	۰	۰	۰	
۴	خیار	۰/۴۴	۰	۰	۰	۰	
۵	ذرت	۲۲/۳۷	۰	۰	۰	۰	
۶	ساختمان	۱۰/۲۶	۱۰/۲۶	۱۰/۲۶	۱۰/۲۶	۱۰/۲۶	
۷	سیب	۹/۸۳	۲۳۱/۳۳	۱۱۰/۶۵	۲۳۱/۳۳	۲۱۷/۸۰	
۸	کدو	۰/۳۱	۰	۰	۰	۰	
۹	گردو	۴/۱۳	۲۳/۷۴	۲۵۸/۷۳	۲۳/۷۴	۲۶/۱۴	
۱۰	گل کلم	۰/۲۶	۰	۰	۰	۰	
۱۱	گندم	۲۰۹/۴۶	۰	۰	۰	۰	
۱۲	گوچه	۰/۵۹	۰	۰	۰	۰	
۱۳	معدن	۱/۱۶	۱/۱۶	۱/۱۶	۱/۱۶	۱/۱۶	
۱۴	هلو	۰/۳۱	۲۶۷/۹۵	۱۳۲/۶۷	۲۶۷/۹۵	۳۰۶/۵۲	
۱۵	یونجه	۱۳۹/۲	۰	۰	۰	۰	
۱۶	یونجه- سیب	۰/۳۳	۵۳/۵۱	۷۴/۴۸	۵۳/۵۱	۲۶/۰۶	
	مجموع	۵۸۷/۹۵	۵۸۷/۹۵	۵۸۷/۹۵	۵۸۷/۹۵	۵۸۷/۹۵	

این سناریو گزینه مناسبی برای سال‌هایی است که کمبود آب شدید در منطقه وجود دارد و توجه به مصرف آب مجازی در منطقه از مهم‌ترین اهداف به‌شمار رود. در نهایت، سناریوی سازگاری، در بهینه‌ترین حالت خود، حاکی از کاهش ۲۶ درصدی سازگاری در منطقه است. در این سناریو، دشواری ۲۹٪ افزایش، منفعت اقتصادی به میزان ۲۳.۵٪ کاهش و مصرف آب مجازی ۳۴٪ کاهش داشته است. با توجه به جدول ۵، در تمامی سناریوهای تعریف‌شده، مساحت کاربری‌های سیب، گردو، هلو و یونجه-سیب افزایش یافته و کاربری‌های آفتابگردان، پیاز، چغندر، خیار، ذرت، کدو، گل‌کلم، گندم، گوجه، یونجه از فهرست کاربری‌های منطقه حذف شده‌اند. شکل ۶ (الف، ب، ج، د) نقشه تغییر کاربری حاصل از الگوریتم NSGA-II در سناریوهای متفاوت را نشان می‌دهد.

از سویی، سناریوی منفعت اقتصادی در بهینه‌ترین حالت خود، از عدد ۵۴.۶۷ در کاربری اولیه به ۱۱۹.۴۷۲۳ رسیده است که افزایش ۱۱۸ درصدی منفعت اقتصادی در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همچنین، در همین سناریو، دشواری به میزان ۵۴٪ افزایش، مصرف آب مجازی ۶٪ افزایش و سازگاری ۳۶٪ کاهش داشته است. این سناریو زمانی مناسب است که در منطقه مورد مطالعه کمبود آب وجود نداشته باشد و هدف اصلی منفعت اقتصادی باشد. همچنین، در سناریوی آب مجازی، تابع هدف مصرف آب مجازی، در بهینه‌ترین حالت خود، از عدد ۵۹.۹۶ در کاربری اولیه به ۳۹.۱۵ رسیده است که این خود کاهش ۳۵ درصدی مصرف آب مجازی را می‌رساند. از سویی، در همین سناریو دشواری به میزان ۲۸٪ افزایش، منفعت اقتصادی ۳۹٪ و سازگاری ۲۷٪ کاهش داشته است.



شکل ۶. ب) کاربری‌های سناریوی منفعت اقتصادی در NSGA-II



شکل ۶. الف) کاربری‌های سناریوی دشواری در NSGA-II



شکل ۶.د) کاربری‌های سناریوی سازگاری در NSGA-II



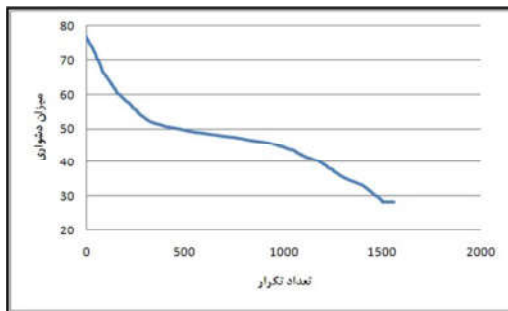
شکل ۶.ج) کاربری‌های سناریوی آب مجازی در NSGA-II

۴-۲-۱- پارامتر همگرایی الگوریتم‌های فراابتکاری و NSGA-II

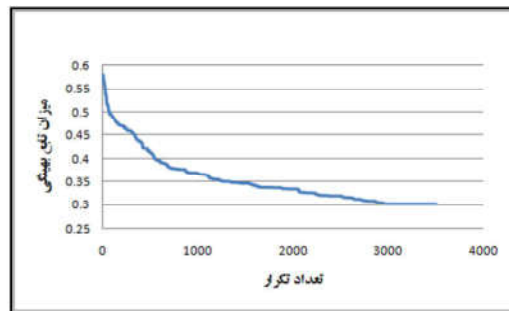
هرقدر الگوریتمی سریع‌تر به همگرایی برسد، برتری آن بیشتر است. شکل ۷. الف روند همگرایی تابع بهینگی در الگوریتم GA و شکل ۷. ب، ج، د و ۷. ه روند همگرایی توابع در الگوریتم NSGA-II را نشان می‌دهد.

۴-۲-۲- ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری و NSGA-II

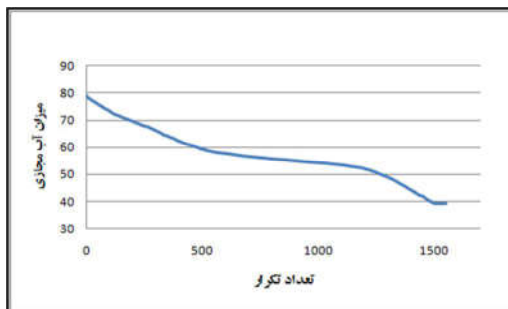
به‌منظور ارزیابی دو الگوریتم مورد استفاده در این تحقیق، از پارامترهای همگرایی و پایداری و آزمون تکرارپذیری و زمان اجرای الگوریتم استفاده شده که نتایج این ارزیابی‌ها، در ادامه، بررسی شده است.



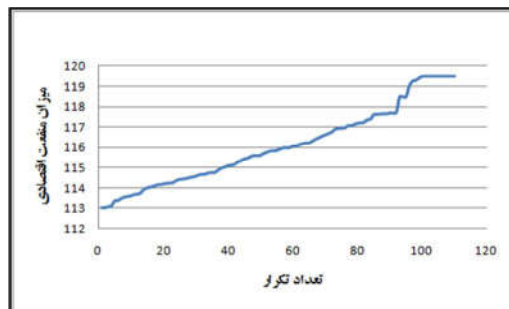
شکل ۷.ب) روند همگرایی سناریوی دشواری در الگوریتم NSGA-II



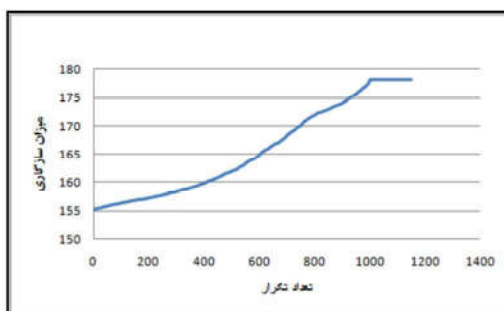
شکل ۷.الف) روند همگرایی تابع بهینگی در الگوریتم GA



شکل ۷.د) روند همگرایی سناریوی مصرف آب مجازی در الگوریتم NSGA-II



شکل ۷.ج) روند همگرایی سناریوی منفعت اقتصادی در الگوریتم NSGA-II



شکل ۵.۷ روند همگرایی سناریوی سازگاری در الگوریتم NSGA-II

۴-۲-۲- بررسی پارامتر آزمون تکرارپذیری

هرقدر یک الگوریتم در اجراهای متوالی نتایج مشابه‌تری به دست آورد، این الگوریتم پایداری بیشتری دارد. برای بررسی این معیار، هر الگوریتم ده بار اجرا شده است. به منظور مقایسه دقیق‌تر ثبات الگوریتم‌ها، واریانس تغییرات پاسخ نهایی الگوریتم در ده اجرا محاسبه شده است. برای درک و مقایسه بهتر، از واریانس داده‌های نرمال شده () استفاده می‌شود.

=

هریک از داده‌ها در ده اجرا،
مینیمم داده‌ها در ده اجرا، : مینیمم
داده‌ها در ده اجرا هستند.

به دلیل نرمال کردن داده‌ها، واریانس بین صفر تا یک متغیر خواهد بود و هرقدر به صفر نزدیک‌تر باشد، الگوریتم ثبات بیشتری دارد. واریانس پاسخ‌های نرمال شده الگوریتم‌ها، در ده اجرا، در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶. واریانس تغییرات پاسخ در ده اجرا، در الگوریتم‌های

NSGA-II و GA

واریانس	الگوریتم
۰/۱۳۷	GA
۰/۱۱۹	NSGA-II (سناریوی دشواری)
۰/۱۱	NSGA-II (سناریوی منفعت اقتصادی)
۰/۱۳	NSGA-II (سناریوی آب مجازی)
۰/۱۱۴	NSGA-II (سناریوی سازگاری)

با توجه به شکل ۷. الف، سرعت همگرایی در نسل‌های اولیه بسیار زیاد است. اما به تدریج از این سرعت کاسته و در نهایت، در نسل ۳۰۰۰ همگرا می‌شود. در شکل ۷. ب، روند همگرایی از شروع تا اجرای ۴۰۰ تقریباً شیب بیشتری دارد. از این اجرا تا اجرای تقریباً ۱۰۰۰، شیب کمتر شده است. سپس یک همگرایی نزولی با شیب بیشتری، از این اجرا تا اجرای ۱۵۰۰، دیده شده و در نهایت، در نسل ۱۵۰۰ همگرا می‌شود. در شکل ۷. ج، سرعت همگرایی از نسل اول تا نسل ۱۰۰ تقریباً به طور یکنواختی صعودی دیده شده و در نهایت، در نسل (تعداد تکرار) ۱۰۰، تابع همگرا شده است. شکل ۷. د همگرایی متفاوتی راه، در هر مقطعی، از خود نشان می‌دهد؛ به طوری که از آغاز تا اجرای ۲۸۰، تقریباً همگرایی شیب بیشتری دارد. از این اجرا تا اجرای تقریباً ۵۰۰، شیب همگرایی کمتر شده است. سپس همگرایی کمتری، از این اجرا تا اجرای ۱۲۰۰، به چشم می‌خورد. از نسل ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ همگرایی با شیب بیشتری دیده می‌ود و در نهایت، در نسل ۱۵۰۰ همگرا شده است. در شکل ۷. ه، سرعت همگرایی از نسل اول تا نسل ۴۰۰ صعودی، با شیب ملایم، و از ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ صعودی، با شیب بیشتر، بوده و در نهایت، در نسل ۱۰۰۰ همگرا شده است. بدین ترتیب، نتایج حاصل نشان می‌دهد که، در مجموع، الگوریتم فراابتکاری NSGA-II با سرعتی بیشتر از الگوریتم GA به همگرایی می‌رسد و این یکی از نشانه‌های برتری الگوریتم NSGA-II بر الگوریتم GA به شمار می‌رود.

عملکرد کاربری‌ها، آب مجازی هر محصول تهیه شده تا به مدیریت صحیح و بهینه منابع آب کمک کند. بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد مدل طراحی شده می‌تواند الگوهایی برای تخصیص کاربری پیشنهاد دهد که حدود ۲۹٪ در الگوریتم GA و ۳۵٪ در الگوریتم NSGA-II مصرف آب مجازی را کاهش دهد. این در حالی است که اگر هدف آب مجازی در درجه دوم اهمیت واقع شود، منفعت اقتصادی در الگوریتم NSGA-II ممکن است تا ۱۱۸٪ رشد داشته باشد. در بهینه‌ترین حالت، تمامی الگوها دارای سازگاری و دشواری تغییر مناسب‌اند و تا حد ممکن، پیوستگی کاربری‌ها رعایت شده است. کاهش مصرف آب مجازی حاصل از تخصیص کاربری با الگوریتم NSGA-II اختلاف معناداری با نتایج الگوریتم GA دارد و از آن بیشتر است. همچنین، در مقوله منفعت اقتصادی نیز همین الگو رعایت شده است.

نتایج آزمون همگرایی الگوریتم‌ها، حاکی از سرعت همگرایی بالاتر NSGA-II است و نتایج آزمون تکرارپذیری الگوریتم‌ها ثبات بالاتر الگوریتم NSGA-II را در مقایسه با GA نشان می‌دهد. بنابراین، در مجموع، الگوریتم NSGA-II در بیشتر جنبه‌های بررسی شده برتری نسبی بر الگوریتم GA از خود نشان می‌دهد.

مدل طراحی شده در این الگوریتم می‌تواند به صورت مدلی در سیستم‌های پشتیبان تصمیم استفاده شود و نقش مؤثری در تصمیم‌گیری مدیران، براساس اهداف گوناگون متناسب با شرایط اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، ایفا کند. در این زمینه، اهداف انتخابی (بیشینه‌کردن سازگاری و منفعت اقتصادی، کمینه‌کردن دشواری تغییر کاربری و مصرف آب مجازی) در مدیریت کاربری منطقه، مدیریت بهینه منابع آب و توسعه پایدار که اهداف اقتصادی-اجتماعی (منفعت اقتصادی، دشواری تغییر و سازگاری) و زیست‌محیطی (ذخیره آب مجازی) را شامل می‌شود و این موضوع را می‌توان نقطه قوت تحقیق حاضر عنوان

با توجه به نتایج جدول ۶، واریانس الگوریتم‌ها ثابت نسبتاً مناسب هر دو الگوریتم را اثبات می‌کند. در این ارزیابی نیز الگوریتم NSGA-II، با اندکی اختلاف، پاسخ بهتری داده است و ثباتی بیشتر از الگوریتم GA از خود نشان می‌دهد.

۴-۲-۳- زمان اجرای الگوریتم‌ها

در جدول ۷، میانگین زمان اجرای هر الگوریتم در همان ده اجرای مربوط به بخش تکرارپذیری، یا پایداری با شرط توقف (تعداد تکرار)، ارائه شده است.

جدول ۷. زمان اجرای الگوریتم‌ها (با شرط توقف تعداد اجراها)

الگوریتم	زمان اجرا
الگوریتم GA	۲۸۰۰
NSGA-II (سناریوی دشواری)	۴۳۱۴
NSGA-II (سناریوی منفعت اقتصادی)	۳۷
NSGA-II (سناریوی آب مجازی)	۴۳۱۴
NSGA-II (سناریوی سازگاری)	۲۹۰۱

این زمان‌ها، با توجه به فضای گسترده پاسخ (تخصیص ۵۸۷/۹۵ هکتار به ۴۴۴ قطعه زمین با شانزده نوع کاربری) و پیوسته بودن این فضا، مناسب و قابل قبول است. همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌کنیم، زمان اجرای الگوریتم GA (غیر از یک سناریو در الگوریتم NSGA-II) کمتر از الگوریتم NSGA-II است. زمان بررسی شده، با فرض شرط توقف تعداد تکرار (تعداد نسل‌ها) است ولی امکان دارد برای رسیدن به نتیجه‌ای با دقت خاص، یک الگوریتم زمانی کمتر از الگوریتم دیگر داشته باشد.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با توجه به پویابودن پدیده اختصاص دادن کاربری و ارتباط داشتن آن با پارامترهای گوناگون، از مدل‌های چندهدفه برای تصمیم‌گیری‌های مرتبط با تخصیص بهینه کاربری، با رویکرد ذخیره آب مجازی، استفاده شده است. همچنین، با توجه به نیاز آبی و

بیستم، شماره اول، صص. ۱۲-۲.
 علائی مقدم، س.، کریمی، م.، محمدزاده، ع.، ۱۳۹۴،
 مدل‌سازی تخصیص کاربری‌های شهری با
 استفاده از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی
 نامغلوب نقطه مرجع، نشریه علوم و فنون
 نقشه‌برداری، دوره چهارم، شماره ۴، صص. ۶۵-۴۷
 .
 متکان، ع.، شکیبا، ع.، میرباقری، ب.، شایگان، م.،
 تناسان، م.، ۱۳۹۴، طراحی مدل بهینه‌سازی
 کاربری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه با
 رویکرد آمایش سرزمین (مطالعه موردی:
 رودبار جنوب - استان کرمان)، نشریه سنجش از
 دور و GIS ایران، سال هفتم، شماره اول، صص.
 ۵۹-۳۹.

نصیری، ا.، ۱۳۸۸، کاربرد تلفیق روش‌های
 تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی (SMCDM) با
 GIS در کاربری اراضی، همایش ژئوماتیک
 سازمان نقشه‌برداری کشور، صص. ۴-۱.
 معصومی، ز.، منصوریان، ع.، مسگری، م.، ۱۳۸۹،
 کاربرد الگوریتم ژنتیک چندهدفه در مطالعات
 مکان‌یابی کاربری‌های صنعتی، سنجش از دور و
 GIS ایران، سال دوم، شماره ۴، صص. ۲۲-۱.

Antonelli, M., Laio, F. & Tamea, S., 2017,
**Water Resources, Food Security and the
 Role of Virtual Water Trade in the MENA
 Region**, In *Environmental Change and
 Human Security in Africa and the Middle
 East*, PP. 199-217.
 Briassoulis, H., 2000, **Analysis of Land Use
 Change: Theoretical and Modeling
 Approaches**, Additional contact information
 in Whole book from Regional Research
 Institute, West Virginia University, PP. 9-29.
 Cao, K., Batty, M., Huang, B., Liu, Y., Yu, L. &
 Chen, J., 2011, **spatial Multi-Objective
 Land Use Optimization: Extensions to the
 Non-Dominated Sorting Genetic
 Algorithm-II**, *International Journal of
 Geographical Information Science*, PP. 1949-
 1969.

کرد. به‌علاوه، تأثیر مستقیم مساحت هر کاربری (هر
 ژن) در برآورد آب مجازی و منفعت اقتصادی کاربری‌ها
 در طراحی مدل را می‌توان از نکات مثبت این تحقیق
 بیان داشت. حفظ زمین‌ها در همان قطعات قبلی کمک
 شایان توجهی به جلوگیری از تجزیه زمین‌ها و ایجاد
 خرده‌مالکی می‌کند و از سویی، زمینه‌ای برای تجمیع
 زمین‌ها و رسیدن به هدف توسعه پایدار به‌شمار می‌رود
 که در این تحقیق، به آن توجه شده است.

لازم است توضیح دهیم که، با توجه به داده‌ها و نوع
 توسعه و اجرای مدل، مدل پیشنهادی کاملاً پویاست و
 با بهنگام‌کردن داده‌های ورودی (لایه کاربری اراضی،
 لایه پیوستگی کاربری‌ها، ضرایب توابع هدف)، می‌توان
 به راحتی مدل را برای مناطق دیگر، در سطح جزئی و
 کلان نیز، اجرا کرد.

۶- منابع

احسانی، م.، خالدی، ه.، برقی، ی.، ۱۳۸۷، **مقدمه‌ای بر
 آب مجازی**، انتشارات کمیته ملی آبیاری و
 زهکشی ایران، تهران.
 سعیدیان ب.، مسگری، م.، قدوسی، م.، ۱۳۹۴، **مقایسه
 کارایی الگوریتم‌های فراابتنکاری ژنتیک و
 انبوه ذرات برای تخصیص بهینه آب به
 زمین‌های کشاورزی در شرایط محدودیت آب**،
 نشریه فناوری اطلاعات مکانی، سال سوم، شماره ۴،
 صص. ۴۲-۱۹.
 شایگان، م.، علیمحمدی، ع.، منصوریان، ع.، ۱۳۹۱،
**بهینه‌سازی چندهدفه تخصیص کاربری اراضی
 با استفاده از الگوریتم NSGA-II**، نشریه
 سنجش از دور و GIS ایران، سال چهارم، شماره ۲،
 صص. ۱۸-۱.
 پورطبری، م.، مکنون، ر.، عبادی، ت.، ۱۳۸۸، **مدل
 بهینه‌سازی چندهدفه به منظور مدیریت
 بهره‌برداری تلفیقی با استفاده از الگوریتم‌های
 NSGA-II و SGAs**، نشریه آب و فاضلاب، سال

- Coello, C.A.C. & Romero, C.E.M., 2003, **Evolutionary Algorithms and Multiple Objective Optimization**, In Multiple Criteria Optimization: State of the Art Annotated Bibliographic Surveys, PP. 277–331.
- Coello, C.A.C., Lamont, G.B. & van Veldhuizen, D.A., 2007, **Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems**, Vol. 5, New York: Springer, PP. 1–42.
- Datta, D., Deb, K., Fonseca, C.M., Lobo, F., Condado, P. & Seixas, J., 2007, **Multi-Objective Evolutionary Algorithm for Land-Use Management Problem**, International Journal of Computational Intelligence Research, PP. 371–384.
- Datta, D. & Deb, K., 2006, **Design of Optimum Cross-Sections for Load-Carrying Members Using Multi-Objective Evolutionary Algorithms**, International Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics, PP. 57–63.
- Deb, K. & Sundar, J., 2006, **Reference Point Based Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms**, In Proceedings of the 8th annual conference on Genetic and evolutionary computation, PP. 635–642.
- Deb, K., Mohan, M. & Mishra, S., 2005, **Evaluating the ϵ -Domination Based Multi-Objective Evolutionary Algorithm for a Quick Computation of Pareto-Optimal Solutions**, Evolutionary Computation, PP. 501–525.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T., A. M. T., (2002), A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, IEEE transactions on evolutionary computation, 6(2), 182–197.
- Dias, A.H. & De Vasconcelos, J.A., 2002, **Multiobjective Genetic Algorithms Applied to Solve Optimization Problems**, IEEE Transactions on Magnetics, PP. 1133–1136.
- Eldrandaly, K., 2010, **A GEP-Based Spatial Decision Support System for Multisite Land Use Allocation**, Applied Soft Computing, PP. 694–702.
- El-Sadek, A., 2010, **Virtual Water Trade as a Solution for Water Scarcity in Egypt**, Water Resources Management, PP. 2437–2448.
- Du Fraiture, C., 2004, **Does International Cereal Trade Save Water? The Impact of Virtual Water Trade on Global Water Use in Comprehensive**, Assessment Research Report, 4, PP. 1–27.
- Herzig, A., 2008. **A GIS-Based Module for the Multiobjective Optimization of Areal Resource Allocation**, In Friis-Christensen L, Pundt H, Compte I eds Proceedings of the 11th AGILE International Conference on Geographic Information Science, University of Girona, Spain. http://agile.gis.geo.tu-dresden.de/web/Conference_Paper/CDs/AGILE, Vol. 202008.
- Hoekstra, A.Y. & Chapagain, A.K., 2006, **Water Footprints of Nations: Water Use by People as a Function of their Consumption Pattern**, In Integrated Assessment of Water Resources and Global Change, PP. 35–48.
- Horn, J., Nafpliotis, N. & Goldberg, D.E., 1994, **A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization**, In Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence, PP. 82–87.
- Krink, T., 2002. **Multiobjective Land Use Optimisation using Evolutionary Algorithms**, Doctoral Dissertation, Dep. of Computer Science, University of Aarhus, PP. 1–84.
- Sivanandam, S.N. & Deepa, S.N., 2007, **Introduction to Genetic Algorithms**, Springer Science & Business Media, PP. 1–95.
- Sheta, A. & Turabieh, H., 2006, **A Comparison between Genetic Algorithms and Sequential Quadratic Programming in Solving Constrained Optimization Problems**, ICGST International Journal on Artificial Intelligence and Machine Learning (AIML), PP. 67–74.
- Stewart, T.J., Janssen, R. & van Herwijnen, M., 2004, **A Genetic Algorithm Approach to Multi Objective Land Use Planning**, Computers & Operations Research, 31(14), PP. 2293–2313.
- Villalta-Calderon, C.A. & Pérez-Alegría, L.R., 2010, **Multi-Objective Optimization Approach for Land Use Allocation Based on Water Quality Criteria**, In 21st Century Watershed Technology: Improving Water Quality and Environment Conference Proceedings, PP. 1–10.
- Yeh, J.Y. & Lin, W.S., 2007, **Using Simulation Technique and Genetic Algorithm to Improve the Quality Care of a Hospital Emergency Department**, Expert Systems with Applications, PP.1073–1083.