



سجل از دور

و

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS
سال دوم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۸۹
Vol.2, No.4, Winter 2011
۱-۲۲

کاربرد الگوریتم ژنتیک چندهدفه در مطالعات مکان‌یابی کاربری‌های صنعتی

زهره معصومی^{۱*}، علی منصوریان^۲، محمدسعیدی مسگری^۳

۱. دانشجوی دکتری سیستم اطلاعات مکانی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲ و ۳. استادیار گروه سیستم اطلاعات مکانی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸۹/۱۲/۲۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۱۲/۱۱

چکیده

با رشد روزافزون جمعیت و نیاز جوامع بشری به مدیریت بهینه منابع، آمایش سرزمین اهمیت ویژه‌ای یافته است. تعیین مکان مناسب برای برخی از کاربری‌ها مانند کاربری‌های صنعتی، که تأثیری عمده در شرایط اقتصادی و اجتماعی و زیست‌محیطی دارند، پیامدهای مثبتی برای رشد منطقه خواهند داشت. در این بین از جمله مهم‌ترین مشکلات پیش‌رو برای مدل‌سازی و مکان‌یابی کاربری‌های صنعتی، تعدد توابع هدف اقتصادی و اجتماعی و زیست‌محیطی، و تناقض برخی از آنها با یکدیگر است، به گونه‌ای که روش‌ها و توابع پایه موجود در سیستم‌های اطلاعات مکانی (نظیر هم‌پوشانی) پاسخگوی چنین برنامه‌ریزی‌های چندهدفه آمایشی نیست. تحقیق حاضر، در زمینه یافتن مکان‌های مناسب برای تأسیس صنایع بزرگ و کاربری‌های صنعتی انجام شده است. در این تحقیق پس از بررسی روش‌های بهینه‌سازی همزمان چندهدفه، از الگوریتم چندهدفه ژنتیک NSGA-II به منظور حمایت از تصمیم‌گیری در یافتن زمین‌های مناسب برای کاربری صنعتی در محدوده استان زنجان استفاده شده است. روند کار بدین ترتیب بوده است که ابتدا شرایط و توابع هدف مورد نیاز تعریف شده و داده‌های مورد نظر از مراجع جمع‌آوری و آماده‌سازی شده‌اند. سپس، با استفاده از متد NSGA-II و نرم‌افزارهای GIS و نرم‌افزار طراحی‌شده در این حیطه، زمین‌های مناسب برای کاربری‌های صنعتی استخراج گردیده و رتبه‌بندی شده‌اند. به علاوه، یکی از مهم‌ترین نتایج این تحقیق، جبهه جواب‌های مؤثر بوده است که نتایج حاصل از تغییر اولویت‌های تصمیم‌گیری را به مدیران نشان می‌دهد و آنان را در انتخاب گزینه‌ای مطلوب از بین گزینه‌های برتر یاری می‌رساند. این الگوریتم در محدوده مطالعاتی آزمون گردیده و نتایج آن در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفته، که در بخش درج شده است.

کلیدواژه‌ها: آمایش سرزمین، مکان‌های مناسب کاربری صنعتی، الگوریتم‌های تکاملی، الگوریتم ژنتیک چندهدفه، NSGA-II.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، تقاطع خیابان ولیعصر و میرداماد، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده نقشه‌برداری، گروه سیستم اطلاعات مکانی تلفن: ۸۸۷۷۰۲۱۸

۱- مقدمه

از جمله مراحل موجود در آمایش سرزمین، معرفی مکان‌های مناسب برای فعالیت‌های مختلف - مانند صنایع، کشاورزی، جنگل و جز اینها - برای پاسخگویی به اهداف مدیران است (Stewart et al., 2004). در صورتی که این کار به درستی انجام نشود زیان‌های جبران‌ناپذیری را به محیط زیست، اکولوژی و اقتصاد منطقه و حتی جوامع انسانی وارد خواهد کرد. از این رو استفاده از تکنیک‌های دقیق محاسباتی در این کار اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. در این میان یافتن مکان بهینه برای استقرار صنایع اهمیت ویژه‌ای دارد، چرا که از یک سو اقتصاد منطقه وابسته به صنایع است، و از سوی دیگر محیط زیست به شدت تحت تأثیر فعالیت‌های صنعتی قرار دارد. همچنین تصمیم‌گیری‌های مدیران این زمینه، از عوامل کمی و کیفی مختلف تأثیر می‌پذیرد، که عموماً هم با یکدیگر در تعارض‌اند، به طوری که ممکن است بهینه‌سازی یکی از عوامل موجب تخریب عامل دیگر شود. بدین منظور، برای پیشگیری از خطا در تصمیم‌گیری، تکنیک‌های برنامه‌ریزی چندهدفه در سال‌های گذشته مورد توجه قرار گرفته و با پیشرفت روزافزون همراه بوده است.

روش‌های متفاوتی برای حل مسائل تصمیم‌گیری چندهدفه^۱ وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش‌های بدون وزن‌دهی^۲، روش‌های وزن‌دهی پیش از حل^۳، و روش‌های وزن‌دهی پس از حل^۴ اشاره کرد (Hwang and Masud, 1979). در روش‌های بدون وزن‌دهی، تصمیم‌گیرنده ترجیح و اولیوی را برای معیارها قائل نیست و ملاک، حالت ایده‌آل تعریف شده است و معیار انتخاب گزینه‌ها، نزدیکی به حالت ایده‌آل بدین ترتیب جواب‌ها کاملاً به تعریف حالت ایده‌آل بستگی می‌یابد. در روش‌های وزن‌دهی پیش از حل، ترجیحات پیش‌پیش ارائه می‌گردند و اهداف با توجه به وزن‌شان با هم تلفیق می‌شوند و به صورت جمله واحد درمی‌آیند (Coello Coello, 2007). در این حالت نیز از آنجا که وزن‌ها را کارشناسان این زمینه تعریف

می‌کنند، جواب‌ها کاملاً تحت تأثیر نظر کارشناسان قرار دارند. در روش‌های وزن‌دهی پس از حل، ابتدا جواب‌های مؤثر^۵ مشخص می‌شود، و سپس با توجه به ترجیحات اعلام شده از طرف تصمیم‌گیرنده، جواب به دست می‌آید (Zitzler and Thiele, 1998). به عبارت دیگر، در این میان تنها یک جواب بهینه وجود ندارد بلکه جواب را مجموعه‌ای از نقاط تشکیل می‌دهد که می‌تواند سطح، منحنی و جز آن باشد (که منحنی Trade-off نامیده می‌شود). همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، در این روش هیچ وزن اولیه‌ای وارد محاسبات نمی‌شود و پس از مشخص شدن مجموعه جواب بهینه، تصمیم‌گیرنده با توجه به ترجیحات خود می‌تواند جواب مورد نظر خود را به دست آورد و حالت‌های مختلف جواب را نیز با توجه به اولویت‌های خود بررسی کند.

در سال‌های گذشته از روش‌های وزن‌دهی پیش از حل که متأثر از دیدگاه کارشناسان است، در موارد متعددی به منظور مکان‌یابی منابع، استفاده شده است. به عنوان مثال، در استان قم به‌منظور مکان‌یابی عرصه‌های مناسب برای احداث صنایع از روش روی هم‌گذاری^۶ وزن‌دار استفاده شده است (Jafari and Karimi, 2005)، ولسی در زمینه استفاده از تصمیم‌گیری‌های چندهدفه در آمایش سرزمین و مکان‌یابی‌های مورد نیاز در آن، کارهای محدودی انجام شده است. Matthews و همکارانش از الگوریتم ژنتیک چندهدفه (MOGA)^۷ برای مدیریت زمین‌های روستایی استفاده کردند. مدل به کار رفته در تحقیق آنها مدل‌های بر مبنای جبهه جواب رتبه‌بندی شده بود که

1. Multi objective
2. Methods for no Articulation of Preference Information Given
3. Methods for a Priori Articulation of Preference
4. Methods for Posterior Articulation of Preference Information Given
5. Pareto-Optimal Solution
6. Weighted Overaly
7. Multi Objective Genetic Algorithm

نقشه‌های مقایسه‌ای وضعیت موجود و وضعیت مدل‌شده تولید شده است (Koomen et al., 2008). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در موارد مطالعاتی مذکور، یا از روش‌های وزن‌دهی پیش از حل استفاده شده است (Agrell, 2004, Jafari, 2005) که در آن تصمیم‌گیری با تأثیرپذیری از دیدگاه‌های کارشناسان است و در عین حال دارای پیچیدگی محاسباتی بالایی است (Yang et al., 2008 & Matthews et al., 2000)، یا تعریف کاربری‌های زمین، همزمان در کنار یکدیگر مطرح بوده است (Obayashi et al., 2007 & Koomen et al., 2008). در این تحقیق، مشکلات پیش‌گفته در روش به کار رفته حل شده است. در این تحقیق از الگوریتم NSGA-II به عنوان الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه در تعریف مکان‌های مناسب برای ساخت صنایع بزرگ برمبنای GIS استفاده شده است. تعداد توابع هدف به کار رفته در این تحقیق پنج تابع است که الگوریتم، بهینه‌سازی را برمبنای آنها انجام می‌دهد. به علاوه، تعدادی شرایط نیز در مسئله برای بهتر کردن نتایج تعریف شده است. در واقع یک مدل تصمیم‌گیری برای مکان‌یابی صنایع بزرگ ارائه گردیده است که در آن از الگوریتم ژنتیک چندهدفه استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش پس از تعریف مسئله چندهدفه، الگوریتم NSGA-II و مزایای آن بررسی خواهد شد.

1. Pareto-dominance ranking, Niche induction
2. Computational complexity
3. Decision Support System
4. Interactive Weighted Tchebycheff Procedure
5. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II
6. Constraint
7. Suburb
8. Interactive Multigoal Agro-Landscape Generation and Evaluation System
9. Pareto Archived Evolution Strategy

در آن از منطق استقرایی نیچه^۱ استفاده شده است. این مدل دارای پیچیدگی محاسباتی^۲ $O(MN^3)$ و دارای دو تابع هدف بوده است (Matthews et al., 2000). Agrell و همکارانش در کنیا نوعی سیستم حمایت از تصمیم‌گیری^۳ به‌منظور مدیریت آمایش سرزمین طراحی کردند. در این سیستم از الگوریتم‌های تکاملی استفاده نشده بلکه روش وزن‌دهی متقابل چیبیشف (IWTP)^۴ استفاده شده است که روشی متقابل از روش‌های وزن‌دهی پیش از حل است و در هر بار اجرا یک جواب می‌دهد؛ به این صورت که کاربر در هر بار اجرا ترجیحات خود را مشخص می‌کند و در تکرار بعدی سیستم جواب را به سمت این ترجیحات می‌برد (Agrell et al., 2004).

Obayashi و همکارانش از نگارش دوم الگوریتم ژنتیک چندهدفه غیرغالب^۵ (NSGA-II) برای مدیریت زمین و آمایش سرزمین در منطقه‌ای در جنوب پرتغال استفاده کردند. در این کار سه تابع هدف و چهار شرط^۶ در نظر گرفته شده‌اند. نتایج شامل نقشه‌ی مربوط به زمین‌های مناسب کشاورزی سالانه، زمین‌های مناسب برای جنگل و کشاورزی دائمی، زمین‌های مناسب برای مناطق حاشیه‌ای^۷ است. در حقیقت این مناطق به صورت یکجا و تعریف توابع هدف در یک‌بار اجرای الگوریتم به دست آمده‌اند (Obayashi et al., 2007). در تحقیق دیگری که Yang و همکارانش انجام دادند، از الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه در مدیریت زمین‌های کشاورزی در هلند استفاده شده است. در این تحقیق، الگوریتمی تحت عنوان سیستم متقابل چندهدفه^۸ مدیریت زمین‌های کشاورزی (IMAGES)^۸ طراحی شده و به کار رفته، که در آن بهینه کردن توابع هدف و شرایط خاص آن همزمان حل شده است (Yang et al., 2008).

در تحقیق دیگری از یکی دیگر از الگوریتم‌های ژنتیک چندمعیاره با عنوان PAES^۹ برای مدل کردن تغییرات کاربری زمین استفاده شده است، که در آن سه تابع هدف و سه شرط حل شده است. در آخر

۱-۲- مسئله تصمیم‌گیری چندهدفه

از منظر ریاضی، مسئله چندهدفه بدین صورت تعریف می‌شود (Veldhuizen and Lamont, 1999):

کمینه یا بیشینه کردن بردار $f(x)$ ، که در آن x بردار n بعدی متغیرهای تصمیم $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ از مجموعه S است؛ یا به عبارت دیگر:

$$\text{Minimize } f(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x)) \quad (1)$$

رابطه (۲)

$$\text{Subject to } g_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, q \quad x \in S$$

بنابراین مسئله چندهدفه شامل n متغیر و q شرط و m هدف است که در آن توابع هدف می‌توانند خطی یا غیرخطی باشند. تابع ارزیابی F^1 در مسئله چندهدفه، مجموعه را در متغیر تصمیم تصویر می‌کند: یعنی $fF \rightarrow S$.

در روش‌های وزن‌دهی پیش از حل مسئله چندهدفه تبدیل به مسئله‌ای تک‌هدفه می‌شود. به عبارت دیگر، در این روش برای پیدا کردن جواب‌های مؤثر این مسئله چندمعیاره:

$$\text{Max} f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)] \quad (3)$$

می‌بایست جواب بهینه این مسئله تک‌معیاره را یافت:

$$\text{Max} f(x) = \sum_{k=1}^m W_k f_k(x) \quad (4)$$

که در آن $f_m(x)$ توابع هدف، $f(x)$ تابع هدف نهایی است که از تلفیق توابع هدف مسئله به وجود آمده و هدف بهینه کردن آن است، و W_k نیز وزن‌های توابع هدف‌اند.

در این حالت شرط لازم برای اینکه یک نقطه بهینه کلی باشد، آن است که شرایط کان و تاکر برقرار باشد و شرط کافی این است که برنامه‌ریزی محدب باشد (Cohon, 1978 & Hillier and Liberman, 1995).

در شرایط کان و تاکر چنین بیان می‌شود:

۱- تابع هدف $Z(x)$ تابعی مقعر باشد (در حالت حداکثر کردن)؛

۲- مجموعه جواب‌های پذیرفتنی، مجموعه‌ای محدب باشد (در حالت حداکثر کردن)؛ و

۳- توابع هدف مشتق‌پذیر باشند.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، این روش علاوه بر محدودیت‌هایی که در شرایط اجرا دارد (شرایط کان و تاکر)، در وزن‌دهی نیز با مشکلاتی مواجه است و جواب خروجی وابسته به وزن‌های ورودی است (Coello, 2002). به علاوه، در این روش‌ها برای به دست آوردن مجموعه جواب‌های مؤثر، لازم است الگوریتم به دفعات حل شود و در هر اجرا می‌بایست جواب جدیدی به دست آید (Deb et al., 2002).

در روش‌های وزن‌دهی پس از حل، مشکلات ناشی از وزن‌دهی - که در روش مذکور بیان شد - وجود ندارد. همچنین با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در این روش‌ها، یک بار حل مسئله به مجموعه‌ای از جواب‌های مؤثر منجر خواهد شد (Sarker et al., 2003). همچنین این الگوریتم‌ها با تأکید بر حرکت به سوی جواب بهینه کار می‌کنند و با تعریف تابع هزینه در آن می‌توان شرایط بهینگی را تعریف کرد (Coello, 2002). از طرفی، در این الگوریتم‌ها تأکید بر شرایط کان و تاکر، نظیر آنچه که در روش‌های وزن‌دهی پیش از حل وجود داشت، نیست (Abbass and Sarker, 2002).

در دهه اخیر الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه^۲ بسیاری پیشنهاد شده است. از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم‌های VEGA^۳ (Schaffer, 1985) و FFGA^۴ (Fonseca and Fleming, 1993) SPEA^۵ (Zitzler and Thiele, 1993) و NSGA^۶ (Srinivas)

1. Evaluation Function
2. Multi Objective Evolutionary Algorithms
3. Vector Evaluated Genetic Algorithm
4. Fonseca and Fleming Genetic Algorithm
5. Strength Pareto Evolutionary Algorithm
6. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm

(Sivanandam and Deepa, 2008). در حقیقت یک نقطهٔ جواب مؤثر است اگر هیچ نقطه‌ی دیگری در فضای جست‌وجو وجود نداشته باشد به نحوی که در همهٔ توابع هدف بهتر از آن نقطه باشد. مفهوم جواب مؤثر منجر به تعریف جبههٔ جواب مؤثر خواهد شد اگر به جای یک نقطه، مفهوم به مجموعه‌ای از نقاط تعمیم داده شود. به عبارت دیگر، جبههٔ جواب مؤثر مجموعه‌ای از نقاط جواب است که هیچ‌کدام بر یکدیگر غلبه نمی‌کنند (Sumathi et al., 2008) و در بین مجموعه‌ای از جواب، جبهه‌ای که اعضای دیگر جبهه‌ها بر آن غلبه نکنند، جبههٔ پارتو تقریبی است (Coello Coello, 2004).

۲-۳- الگوریتم‌های تکاملی مدرن

الگوریتم‌های تکاملی که براساس رتبه‌بندی^۶ جواب‌ها براساس یک معیار بهینگی (مانند تابع هزینه) کار می‌کنند، راه حل مناسبی برای تولید یک جبهه جواب در یک بار اجرا هستند (Coello Coello, 1999). تفاوت انواع مختلف این الگوریتم‌ها در تشخیص جواب‌های مؤثر (بهینه) و مبنای انتخاب آنها از میان مجموعه‌ای از جواب‌هاست (Coello Coello, 1996). یکی از اولین الگوریتم‌های MOEA، الگوریتمی بود که Fleming و Fonseca آن را ارائه کردند و دارای پیچیدگی محاسباتی بالایی بود (Fonseca and Fleming, 2003). با گذشت زمان مشکلات الگوریتم‌های قبلی حل شد و الگوریتم‌های تکاملی پیشرفت کردند. یکی از الگوریتم‌های تکاملی در این زمینه، NSGA-II است. این الگوریتم برخی از مشکلات الگوریتم‌های پیشین را حل کرده است. برخی از تفاوت‌های این الگوریتم با سایر الگوریتم‌های متداول به شرح زیر است:

1. Binary Code
2. Roulette Wheel
3. Parent
4. Pareto-optimal Front
5. Non-Dominated
6. Ranking

(and Deb, 1995) اشاره کرد. الگوریتم ژنتیک دارای مشخصاتی است که کاربرد آن را در مسائل چندهدفه، در قیاس با دیگر الگوریتم‌ها آسان‌تر می‌سازد (Goldberg and Richardson, 1987):

- الگوریتم ژنتیک از کدهای دودویی^۱ برای کدینگ متغیرهای تصمیم‌گیری استفاده می‌کند.
- الگوریتم ژنتیک از چرخهٔ احتمال^۲ برای انتخاب والد^۳ استفاده می‌کند، و این خود باعث نزدیک شدن به بهترین جواب می‌شود.

۲-۲- جبههٔ جواب‌های مؤثر^۴

جواب مؤثر از مفاهیم پایه‌ای در مسائل چندهدفه است. اگر در مسئله‌ای f_1 و f_2 و ... و f_k توابع هدف باشند، x جواب مؤثر یا غیرغالب^۵ است البته در صورتی که برای تمامی $i = 1, 2, \dots, k$ این دو شرط برقرار باشد (Deb and Pratap, 2002):

۱- جواب x_i در تمامی هدف‌ها بدتر از x_j نباشد؛ یعنی:

رابطه (۵)

$$f_k(x_i) < f_k(x_j) \text{ for all } k \in \{1, 2, \dots, m\}$$

۲- جواب x_i حداقل در یک هدف بهتر از x_j است؛ یعنی:

رابطه (۶)

$$f_k(x_i) > f_k(x_j) \text{ for at least one } k \in \{1, 2, \dots, m\}$$

در فضای جست‌وجوی $S \in R^n$ ، فضای توابع هدف $F \in R^m$ و تابع هدف $f: S \rightarrow F = \{f(x) : x \in S\}$ بردار $x \in S$ ، جوابی مؤثر در S و F است اگر وجود نداشته باشد $y \in F$ به قسمی که $f_k(y) \leq f_k(x)$ برای $\forall k = 1, \dots, m$ و حداقل برای یک k $f_k(y) < f_k(x)$ باشد

- راه حل سریع تری در مقایسه با سایر روش‌ها در رتبه‌بندی دارد و پیچیدگی‌های محاسباتی الگوریتم‌های قبلی در آن از بین رفته است. با فرض اینکه M تعداد توابع هدف و N اندازه جمعیت باشد، پیچیدگی محاسباتی در الگوریتم‌های قبلی، $O(MN^3)$ بوده است در صورتی که در این روش این میزان $O(MN^2)$ است (Bui and Alam, 2008).
- از فاصله ازدحامی^۱ برای به دست آوردن جبهه جواب یکنواخت تری از سایر الگوریتم‌ها و تخمین دانسیته نقاط حول جواب‌ها استفاده می‌کند. لازم به ذکر است که فاصله ازدحامی، فاکتوری است که برای انتخاب بهتر جواب‌ها از نظر پراکندگی بر روی یک جبهه استفاده می‌گردد و به صورت زیر تعریف می‌شود (Deb, 2001 & Jin, 2006):
 - برای نقاط ابتدا و انتهای یک جبهه مقدار آن بی‌نهایت فرض می‌شود.
 - برای سایر نقاط جبهه، از ۲ تا $k-۱$ به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود.
$$\text{CD}[i] = (f_m^{i+1} - f_m^{i-1}) / (f_m^{\max} - f_m^{\min}) \quad (7)$$

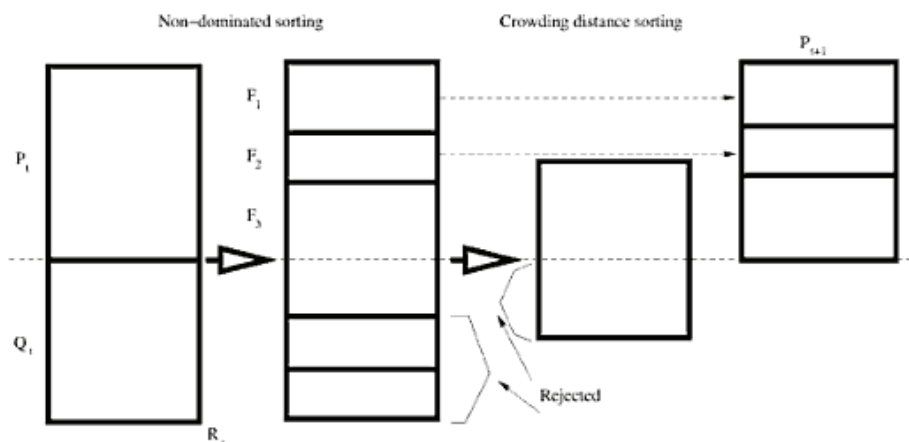
که در آن $\text{CD}[i]$ فاصله ازدحامی فرد i ام بر روی جبهه F ، f_m^i مقدار تابع هدف f_m در i امین فرد در جبهه F و f_m^{\max} ، f_m^{\min} به ترتیب کمترین مقدار و بیشترین مقدار تابع هدف m در جبهه F است. جوابی بهتر است که فاصله ازدحامی بیشتری داشته باشد (Gen and Cheng, 2000).
- انتخاب: به محض اینکه جمعیت اولیه براساس شرط‌های غلبه کردن مرتب شد، مقدار فاصله ازدحامی در آن محاسبه خواهد شد و انتخاب از میان جمعیت اولیه آغاز می‌شود. این انتخاب براساس دو المان صورت می‌پذیرد:
 - (۱) رتبه جمعیت: جمعیت‌ها در رتبه‌های پایین‌تر انتخاب می‌شوند، و
 - (۲) محاسبه فاصله: با فرض اینکه p و q دو عضو از یک رتبه باشند، عضو انتخاب می‌شود که فاصله ازدحامی بیشتری دارد. لازم به ذکر است که اولویت انتخاب ابتدا با رتبه و سپس براساس فاصله ازدحامی است.
- انجام تقاطع^۴ و جهش^۵ برای تولید فرزندان جدید. این کار با استفاده از روش انتخاب دودویی^۶ انجام می‌گیرد؛
- تلفیق جمعیت اولیه و جمعیت به دست آمده از تقاطع و جهش؛
- جایگزین کردن جمعیت والدین با بهترین اعضای جمعیت تلفیق شده در مراحل قبل. در مرحله اول، اعضای رتبه‌های پایین‌تر جایگزین والدهای قبلی می‌شوند و سپس براساس فاصله ازدحامی مرتب می‌شوند. این فرآیند به صورت خلاصه در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که شکل ۱ نشان می‌دهد، جمعیت اولیه و جمعیت ناشی از تقاطع و جهش، ابتدا برحسب رتبه دسته‌بندی می‌شوند و قسمتی از آنها که دارای رتبه پایین‌تری هستند، حذف می‌گردند. در مرحله بعد، جمعیت باقیمانده براساس فاصله ازدحامی مرتب می‌شوند. در اینجا مرتب‌سازی داخل یک جبهه انجام می‌شود؛ و
- تمامی مراحل تا نسل (و یا شرایط بهینگی) مورد نظر تکرار می‌شوند.

1. Crowding Distance
2. Population Initialization
3. Calculation the fitness
4. Cross Over
5. Mutation
6. Binary tournament

۲-۴- الگوریتم کلی روش NSGA-II

روش کار و الگوریتم کلی NSGA-II به شرح زیر است (Coello Coello et al., 2007 & Jin, 2006):

- ایجاد جمعیت اولیه^۲؛
- محاسبه معیارهای برازندگی^۳؛
- مرتب کردن جمعیت براساس شرط‌های غلبه کردن؛
- محاسبه فاصله ازدحامی؛



شکل ۱. نحوه مرتب کردن جمعیت در الگوریتم NSGA-II که در آن P جمعیت اولیه و Q جمعیت ناشی از تقاطع و جهش است و F_i نشان‌دهنده جبهه است.

۳- به‌کارگیری الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه در آمایش سرزمین

آمایش سرزمین همواره در زمره مسائلی بوده که نیاز به تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره و چندهدفه داشته است، زیرا بهینه کردن فاکتورهای مؤثر در آن نقش اساسی ایفا می‌کند. در پژوهش حاضر به مشخص کردن مکان‌های مناسب برای ساخت صنایع بزرگ که از مهم‌ترین مسائلی است که می‌بایست در آمایش سرزمین حل شود، پرداخته شده است. بهینه کردن این مسئله به شرایط مختلف اکولوژیکی، اجتماعی، اقتصادی و زیست - محیطی وابسته است (Makhdoum, 2008 & Huston, 2006). جدول ۱ مهم‌ترین فاکتورهایی را که در یافتن مکان‌های مناسب برای ساخت صنایع بزرگ می‌بایست در نظر گرفته شوند، نشان می‌دهد (Sarvar, 2006). برخی از این فاکتورها با یکدیگر در تناقض قرار می‌گیرند و ممکن است بهینه کردن یک فاکتور (مثلاً دسترسی به مواد اولیه) بر روی فاکتور دیگر (مثلاً فاصله از جنگل) تأثیر منفی داشته باشد. این ویژگی کاربردی بودن الگوریتم‌های MOEA را بر روی مطالعات آمایش و به طور خاص مکان‌یابی صنایع بزرگ نشان می‌دهد. برخی از فاکتورها می‌توانند با چند ویژگی مرتبط باشند. به عنوان مثال نزدیکی به بازار کار علاوه بر تأثیر بر دسترسی به عوامل زیربنایی - با توجه به اشتغال‌زایی -

دارای تأثیرات اجتماعی نیز هست. به هر حال این نکته در اهداف پژوهش حاضر تأثیری ندارد و طبقه‌بندی جدول ۱ با توجه به تناسب بیشتر هر فاکتور با یک ویژگی انجام پذیرفته است. بدون شک در کارهای اجرایی ممکن است تعدد و تنوع فاکتورها بیش از موارد مندرج در جدول ۱ باشد اما فاکتورهای منتخب، مهم‌ترین فاکتورهای به کار رفته در این زمینه‌اند و نمونه‌هایی از ویژگی‌های اجتماعی، اقتصادی، زیست‌محیطی و زیربنایی را پوشش می‌دهند و اهداف این تحقیق را تأمین می‌کنند.

همانطور که ملاحظه می‌شود، برای رعایت برخی از فاکتورهای مندرج در جدول ۱، استاندارد و مقدار خاصی وجود دارد که بایستی در فرآیند مکان‌یابی وارد محاسبات شود (مثلاً درصد شیب منطقه منتخب برای احداث واحد صنعتی بزرگ نبایستی از ۸ درصد بیشتر باشد). ولی برخی دیگر از فاکتورها بایستی کمینه یا بیشینه شوند و نمی‌توان مقدار مشخصی برای آنها در نظر گرفت. از این رو در این تحقیق، جدول ۱ به دو قسمت تقسیم شده است: شرایط مشخص و توابع هدف^۱. جدول ۲ فهرست شرایط مشخص و جدول ۳ فهرست توابع هدف را نشان می‌دهد.

1. Objective functions

زهره معصومی و همکاران

جدول ۱. فاکتورهای مهم در مشخص کردن مکان‌های مناسب برای ساخت صنایع بزرگ

ویژگی	مورد
ویژگی‌های زمین	شیب زمین
	وسعت زمین
	لرزه‌خیزی
	جهت باد
ویژگی‌های اجتماعی	فاصله از شهر
	نزدیکی به بازار کار
ویژگی‌های اقتصادی	تأمین برق (نیروگاه یا خط انتقال اصلی)
	دسترسی به آب
	فاصله تا راه‌های دسترسی
ویژگی‌های زیست-محیطی	دسترسی به مواد اولیه
	دوری از مناطق حفاظت‌شده
	دوری از جنگل
فاصله از شهر	

منبع: Sarvar, 2006 & Makhdoum, 2008

جدول ۲. فهرست شرایط مورد نیاز برای یافتن مکان بهینه برای ساخت صنایع بزرگ

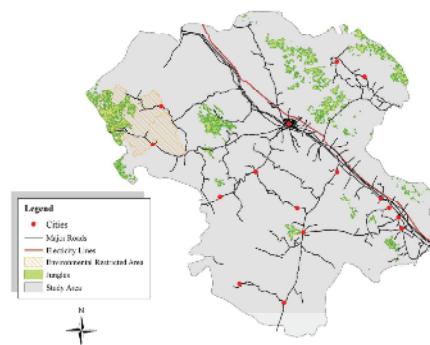
ویژگی	مورد
ویژگی‌های زمین	شیب زمین
	وسعت زمین
	لرزه‌خیزی
	جهت باد
ویژگی‌های زیست-محیطی	فاصله از شهر
	فاصله از آب‌های زیرزمینی

جدول ۳. فهرست توابع هدف برای یافتن مکان بهینه برای ساخت صنایع بزرگ

ویژگی	مورد
ویژگی‌های اجتماعی	فاصله از شهر
	نزدیکی به بازار کار
ویژگی‌های اقتصادی	تأمین برق (نیروگاه یا خط انتقال اصلی)
	دسترسی به آب
	فاصله تا راه‌های دسترسی
ویژگی‌های زیست-محیطی	دسترسی به مواد اولیه
	دوری از مناطق حفاظت‌شده
دوری از جنگل	

۳-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه منطبق بر آخرین تقسیمات استانی محدوده استان زنجان است. این محدوده ۲۲۱۶۴ کیلومترمربع وسعت دارد و در آخرین سرشماری انجام‌شده در سال ۱۳۸۵، برابر با ۹۰۱۷۲۴ نفر جمعیت داشته که ۵۰/۱۵ درصد آن در نقاط شهری و بقیه (یعنی ۴۹/۸۵ درصد آن) را جمعیت روستایی تشکیل داده است. نسبت افراد بیکار در منطقه مورد مطالعه ۱۵ درصد جمعیت را تشکیل می‌دهد؛ که برطبق استانداردها آمار بالایی است. این در حالی است که این منطقه دارای معادن بسیار غنی است و می‌تواند پذیرای صنایع متنوعی باشد. از طرفی استان زنجان دارای پوشش اکولوژیکی متنوع و در برخی موارد منحصر به فرد در کل کشور است. از این رو ایجاد صنایع می‌تواند به پیشرفت اقتصادی منطقه منجر شود، به شرطی که مکان‌یابی واحدهای صنعتی به گونه‌ای باشد که به محیط زیست و اقلیم منطقه آسیبی نرسد. این مسئله دلیل انتخاب مورد مطالعاتی مکان‌یابی صنایع بزرگ در استان زنجان است. شکل ۲ محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. محدوده مطالعاتی تحقیق

(GIS-Ready کردن)، داده‌های توصیفی به داده‌های مکانی مرتبط^۱ شد و در آخر پایگاه داده‌های مکانی^۲ مرتبط طراحی گردید.

از آنجا که برای حل این مسئله در محیط GIS، انجام محاسبات ریاضی بر روی داده‌های رستری راحت‌تر بود، تمامی لایه‌های اطلاعاتی به داده‌های رستری با ابعاد ۲۵۰ متر تبدیل شدند که با توجه به مساحت استان مورد قبول است. لایه محدوده استان و لایه‌های دیگر مورد نیاز به عنوان مجموعه‌ای از پیکسل‌ها با ارزش^۳ مشخص به عنوان ورودی الگوریتم ژنتیک استفاده شد و محاسبات لازم بر روی آنها انجام پذیرفت. به دلیل پیچیدگی الگوریتم و توابع مورد نیاز در برنامه‌نویسی آن، در این تحقیق از زبان برنامه‌نویسی Matlab برای کدنویسی استفاده شده و نتایج آن به محیط نرم‌افزارهای GIS مرتبط شده است.

۳-۳- شرایط مورد نیاز برای استقرار بهینه صنایع بزرگ

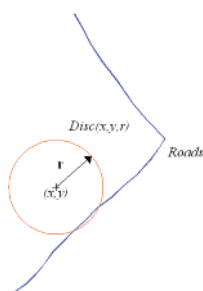
هر کدام از فاکتورهای ذکر شده در جدول ۲، دارای استانداردهایی هستند که از منابع مربوط استخراج گردیده‌اند. همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود، این شرایط در دو گروه زیست - محیطی^۴ و ویژگی‌های زمین^۵ قرار می‌گیرند. برای ورود شرایط در مسئله، نقاطی که در شرایط فوق صدق نمی‌کردند از کل محدوده استان از محاسبات خارج شدند. به عنوان مثال زمین‌هایی که دارای شیب بالای ۸ درصد هستند برای استقرار صنایع بزرگ نامناسب‌اند (Makhdoum, 2008). بنابراین با استفاده از تحلیل‌های GIS، پس از تهیه نقشه شیب استان از روی منحنی‌های میزان، نقاطی که شیب آنها بالای ۸ درصد بود از محاسبات

۳-۲- آماده‌سازی داده‌ها

در مرحله اول داده‌های مکانی و توصیفی مورد نیاز برای حل مسئله جمع‌آوری شد. پس از آماده کردن لایه‌های اطلاعاتی برای ورود به سامانه اطلاعات مکانی

1. Link
2. Spatial Data Base
3. Value
4. Environmental - Ecological
5. Land Characteristics

C_i است که به این صورت محاسبه می‌شود: ابتدا فاصله هر پیکسل که برای بررسی مقدار تابع هزینه در الگوریتم انتخاب شده است، به صورت مستقیم تا شبکه راه‌ها محاسبه می‌شود و نزدیک‌ترین راه به دست می‌آید؛ یعنی کمترین فاصله پیکسل‌ها از راه‌های اصلی کمینه خواهد شد. در ادامه، فاصله وارد شده به الگوریتم چنین است: مجموع فاصله پیکسل تا نزدیک‌ترین راه (که طول خط عمود است) و فاصله پای عمود تا شهر مورد نظر که با توجه به الگوریتم دایجسترا و معیار کمترین فاصله بر روی شبکه راه‌ها محاسبه می‌شود. در مورد سایر توابع هدف آورده شده نیز فاصله به همین شکل محاسبه شده است. شکل ۳ و رابطه (۹) نحوه انتخاب نزدیک‌ترین راه دسترسی به پیکسل را نشان می‌دهند.



شکل ۳. توضیح کمینه کردن کمترین فاصله

رابطه (۹)

$$\min_{D(x,y), Roads} = \min \{r | Roads \cap Disc(x, y, r) \neq \emptyset\}$$

- کمینه کردن فاصله از راه‌های دسترسی: برای سهولت دسترسی به واحدهای صنعتی، لازم است نزدیکی آنها به راه‌های اصلی تأمین شود.

۱. از آنجا که برای هر پیکسل در منطقه راه دسترسی وجود ندارد، بنابراین ابتدا فاصله مستقیم تا راه‌های اصلی به دست می‌آید و سپس مابقی فاصله روی گراف محاسبه می‌شود. در حقیقت این کار سبب می‌گردد که فاصله از نزدیک‌ترین راه کمینه شود و نه فاصله از تمامی راه‌های موجود.

خارج گردید. به عنوان نمونه‌ای دیگر، واحدهای صنعتی باید حریم مشخصی از شهرها را رعایت کنند. این حریم با استفاده از آنالیز بافر محاسبه گردید و پیکسل‌های مربوط از محاسبات خارج شدند. این امر به کم کردن حجم محاسبات در NSGA-II نیز کمک می‌کند، زیرا قسمتی از پیکسل‌ها که در شرایط مسئله صدق نمی‌کنند، از محاسبات خارج می‌شوند. تأثیر برخی شرایط، نظیر بررسی جهت وزش باد، در پایان و پس از اجرای الگوریتم بررسی گردید؛ به این صورت که پس از استخراج نتایج، نقاطی که در جهت وزش باد به سمت شهرها قرار دارند، از مجموعه جواب‌ها حذف شدند.

۳-۴- توابع هدف مورد نیاز برای استقرار بهینه صنایع بزرگ

آمایش سرزمین وابستگی شدیدی به پتانسیل هر زمین و انتظارات و خواسته‌های مدیران از آن زمین دارد. هر قسمت از زمین دارای پتانسیل ویژه‌ای است که در مدیریت زمین، بایستی با محیط اطراف خود هماهنگ باشد تا مانع از لطمات جبران‌ناپذیر زیست‌محیطی و حتی اقتصادی و اجتماعی شود (Ducheyne, 2003). در ادامه، توابع هدف در نظر گرفته‌شده در این مسئله به تفکیک آمده است:

- کمینه کردن فاصله از شهر: به منظور سهولت تأمین نیروی کار مورد نیاز واحدهای صنعتی، همچنین تسهیل رفت و آمد کارکنان بین کارخانه و شهر و جنبه‌های اشتغال‌زایی واحدهای صنعتی، لازم است واحدهای صنعتی حتی‌الامکان به شهرها نزدیک باشند. بنابراین تابع هدف کمینه کردن فاصله از شهر به صورت زیر تعریف می‌شود:

رابطه (۸)

$$f_1(x, y) = \min \sum_{i=1}^n D(x_j, y_j), C_i$$

که در آن $f_1(x, y)$ معرف تابع هدف اول، n تعداد شهرها و $D(x_j, y_i), c_i$ فاصله پیکسل i با شهر j

رابطه (۱۲)

$$D_{(x,y),Water} = D_{Per-to-road} + D_{Per-from-resource} + D_{Road}$$

که در آن $D_{Per-road}$ فاصله عمودی از پیکسل تا نزدیک‌ترین راه، $D_{Per-from-resource}$ فاصله عمودی از منبع تا نزدیک‌ترین راه و D_{Road} کوتاه‌ترین فاصله از پای عمود پیکسل تا پای عمود منبع بر روی شبکه راه‌هاست.

ج) کمینه کردن فاصله از منابع مواد اولیه: منابع اولیه و تأمین آنها از مهم‌ترین مسائل موجود در مدیریت صنایع به شمار می‌آید. در اینجا معادن و بازارهای فروش مواد اولیه به عنوان منابع مواد اولیه در نظر گرفته شده و فاصله از آنها کمینه شده است. بنابراین تابع هدف مربوط به آن به صورت رابطه (۱۳) تعریف شده است:

رابطه (۱۳)

$$f_4(x, y) = \min \sum_{i=1}^k D_{(x_j, y_j), \text{mine}}$$

• بیشینه کردن فاصله از مناطق مهم زیست‌محیطی: مناطق زیست‌محیطی مهم شامل مناطق حفاظت‌شده و جنگل‌هاست. در اینجا لازم است فاصله بیشینه شود تا صنایع بزرگ کمترین لطمات زیست‌محیطی را در این مناطق داشته باشند.

رابطه (۱۴)

$$f_5(x, y) = \max \sum_{i=1}^n D_{(x_j, y_j), R_i}$$

۳-۵- تعریف المان‌های الگوریتم ژنتیک

در این قسمت نحوه تعریف المان‌های الگوریتم ژنتیک به کار رفته تشریح خواهد شد.

- ژن‌ها: هر کدام از پیکسل‌های تعریف‌شده در مناطق مورد قبول (محدوده مطالعاتی پس از اعمال شرایط) به عنوان ژن در نظر گرفته شده‌اند.
- کروموزوم‌ها: مجموعه‌ای از ژن‌ها (پیکسل‌ها) که مشخص‌کننده یک مجموعه جواب هستند که به

بنابراین تابع هدف به شکل رابطه (۱۰) درخواهد

آمد:

$$f_7(x, y) = \min D_{(x,y), Roads} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

• کمینه کردن فاصله از منابع تولید انرژی: یکی از مسائلی که در مکان‌یابی صنایع بزرگ بایستی در نظر گرفته شود، موضوع تأمین انرژی است. تأمین انرژی بایستی به گونه‌ای انجام شود که کمترین هزینه‌ها را به صنعت تحمیل کند. در این تحقیق نیز تأمین هر کدام از منابع به صورت جداگانه در نظر گرفته شده‌اند، که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

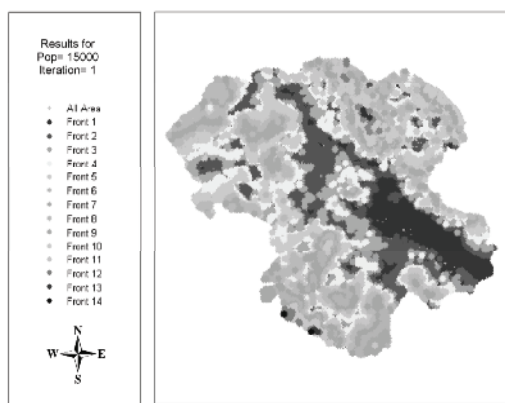
الف) کمینه کردن فاصله از خطوط انتقال نیرو: برای تأمین انرژی برق با کمترین هزینه‌ها لازم است صنایع بزرگ در مکان‌هایی باشند که کمترین فاصله را با خطوط انتقال نیروی قابل استفاده برای مصارف صنعتی داشته باشند. با مطالعه در شکل خطوط انتقال نیرو، مشخص شد که این خطوط در فاصله‌ای نزدیک از راه‌های اصلی واقع شده‌اند. بنابراین تابع هدف مربوط به نزدیکی به راه‌های دسترسی، این هدف را نیز تأمین می‌کند.

ب) کمینه کردن فاصله از منابع تولید آب: طبق استانداردهای موجود، صنایع بزرگ مجازند در صورت تأیید آب منطقه‌ای در استان مربوط از آب‌های موجود در شبکه رودخانه‌ها و نیز سدها و سفره‌های آب زیرزمینی برای مصارف‌شان استفاده کنند؛ پس برای تسهیل استفاده از منابع آبی باید فاصله از آنها کمینه شود. در این مسئله تمامی منابع آبی موجود در یک لایه تجمیع شده و پس از در نظر گرفتن فاصله استاندارد، فاصله از آنها، با توجه به توضیحات ارائه شده در مورد تابع هدف اول، کمینه شده است. بنابراین تابع هدف سوم به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود:

$$f_8(x, y) = \min D_{(x,y), Water} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

در مورد منابع تولید آب و مواد اولیه‌ای که راه دسترسی محلی آنها در نقشه‌های استاندارد تولیدشده وجود ندارد، فاصله ورودی به الگوریتم به صورت رابطه (۱۲) محاسبه شده است.

که حدوداً برابر تعداد کل پیکسل‌هاست، در یک تکرار انجام شد تا مکان‌های موجود که در شرایط تعریف‌شده می‌گنجند، برحسب اولویت طبقه‌بندی شوند (شکل ۴).



شکل ۴. نتیجه حاصل از جمعیت ۱۵۰۰۰ پیکسل در یک تکرار به منظور رتبه‌بندی جواب‌ها

همان‌طور که شکل ۴ نشان می‌دهد، نتایج در این مسئله در تکرار اول به ۱۴ جبهه تقسیم‌بندی شده‌اند (شکل ۴ جبهه جواب‌های ۱-۱۴). در اولویت جبهه‌ها، مکان‌های مناسب به کاربری‌های صنعتی اختصاص یافته است، به گونه‌ای که جبهه اول مشخص‌کننده مکان‌ها با اولویت اول و جبهه ۱۴ مکان‌های دارای آخرین رتبه را نشان می‌دهد.

با افزایش تعداد تکرار الگوریتم، بسته به شرط پایان تکرار، جواب‌ها به سمت بهینه شدن سوق می‌یابند. در عمل، الگوریتم با تعریف شرایط بهینگی و محقق شدن آن متوقف می‌شود. در این تحقیق تعداد تکرارهای ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ برای بررسی نتایج، مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که عملاً در تکرار ۱۵۰ شرایط بهینگی محقق گردیده، ولی به‌منظور بررسی دقیق‌تر، الگوریتم با تکرارهای ۲۰۰ و ۲۵۰ نیز انجام شده است.

عنوان کروموزوم در نظر گرفته شده‌اند. در الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه، در هر اجرا می‌توان به مجموعه‌ای از جواب‌ها دست یافت و همین امر سبب می‌شود که در هر تکرار، برحسب اینکه چند مجهول در مسئله تعریف شده باشد، به ناحیه‌ای از جواب رسید (Engelbrecht, 2007). بهتر است در این مسئله تعداد مجهول‌ها بیش از یک پیکسل انتخاب شود تا بتوان از اپراتورهای تقاطع و جهش برای ایجاد جمعیت جدید استفاده کرده و به یک ناحیه (که مجموعه‌ای از پیکسل‌هاست) دست یافت.

- انجام تقاطع و جهش: در الگوریتم‌های تکاملی برای تولید جواب‌های بهتر در نسل‌های بالاتر لازم است که تقاطع و جهش انجام شود (Coello Coello, 2004 & Haupt, 2007). در مسئله آمایش سرزمین، می‌توان از تقاطع خطی و جهش ساده استفاده کرد. ولی مشکلی که در اینجا به وجود می‌آید این است که امکان دارد در تقاطع و یا جهش، مختصاتی تولید شود که در محدوده مطالعاتی نباشد. برای حل این مشکل در مسئله پیش‌رو از روش خاصی در تقاطع و جهش استفاده شده است. ابتدا به هر سلول یک شماره نسبت داده شده و این شماره به کد باینری تبدیل شده است. سپس تقاطع و جهش به جای مختصات سلول، بر روی شماره سلول انجام شده است. در صورتی که شماره جدید تولیدشده در محدوده کدهای باینری نیز نباشد با استفاده از تصویر کردن^۲، دو فضای باینری به یکدیگر تبدیل می‌شوند. همچنین انتخاب والدین برای انجام تقاطع و جهش، برای ایجاد نسل جدید، با استفاده از انتخاب دودویی انجام شده است.

۴- نتایج

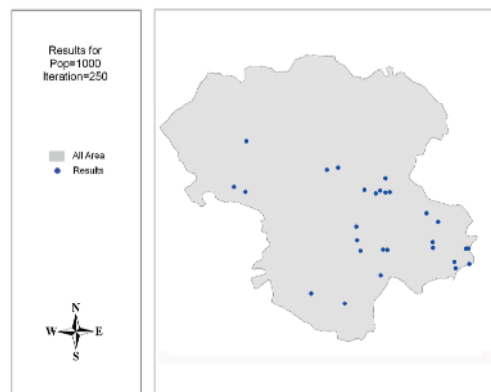
مکان‌یابی واحدهای صنعتی با استفاده از الگوریتم توسعه داده‌شده انجام گرفته و نتایج حاصل از آن به شرح زیر است:

ابتدا الگوریتم با جمعیتی مساوی با ۱۵۰۰۰ پیکسل

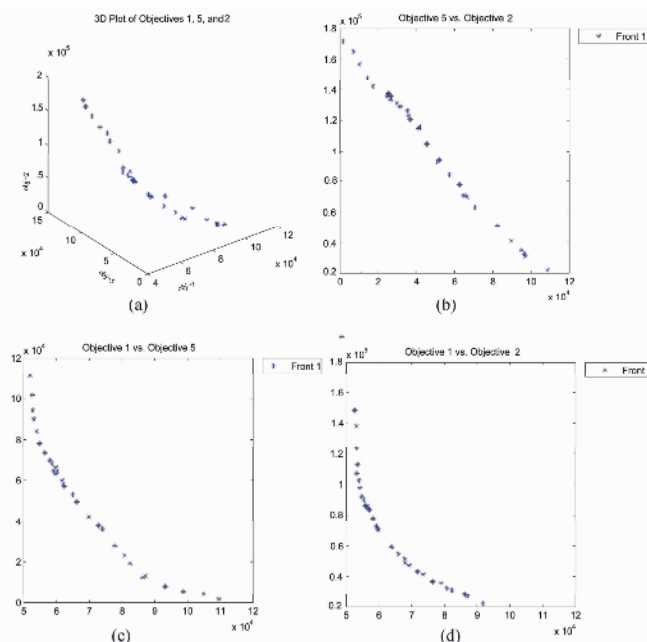
1. Offspring Population
2. Mapping

داده شده است. شکل ۶ نتایج جواب‌های بهینه و نقاط منحنی Trade-off حاصل از تکرار ۲۵۰ام و جمعیت اولیه ۱۰۰۰ را در سه تابع هدف ۱ و ۲ و ۵ نشان می‌دهد، که به‌منظور درک بهتر و راحت‌تر آن، سه تصویر دوبعدی از حالت سه‌بعدی نمایش داده شده است. هر نقطه روی نمودار سه‌بعدی شکل ۶ نشانگر یک نقطه جواب روی شکل ۵ است.

نتایج حاصل از تکرار ۲۵۰ام با جمعیت اولیه ۱۰۰۰ در شکل ۵ آورده شده است، که ۲۸ مکان مناسب را برای کاربری‌های صنعتی نشان می‌دهد. جواب‌های بهینه در این مسئله دارای فضای پنج‌بعدی - به تعداد توابع هدف - هستند. از آنجا که نمایش فضای پنج‌بعدی ناممکن است، در اینجا منحنی جواب‌ها برای سه تابع هدف در فضایی سه‌بعدی نمایش



شکل ۵. نتایج حاصل از تکرار ۲۵۰ با جمعیت اولیه ۱۰۰۰



شکل ۶. Trade-off سه‌بعدی و دوبعدی را برای سه تابع هدف ۱، ۲، و ۵ نشان می‌دهد که در آن شکل (a) جبهه جواب سه‌بعدی بهینه میان توابع هدف ۱، ۲، و ۵، شکل (b) جبهه جواب بهینه توابع هدف ۱ و ۲، شکل (c) جبهه جواب بهینه توابع هدف ۱ و ۵، شکل (d) جبهه جواب بهینه توابع هدف ۱ و ۲ هستند.

۵- بحث و نتیجه گیری

در این بخش پس از انجام تست‌های مختلف بر روی الگوریتم، به اعتبارسنجی مدل و نتایج آن پرداخته خواهد شد.

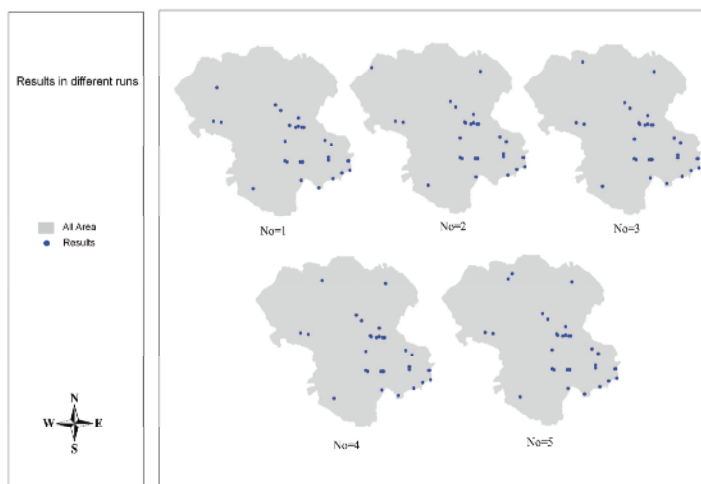
۵-۱- تست تکرارپذیری الگوریتم

از آنجا که در الگوریتم‌های تکاملی، جمعیت اولیه به صورت تصادفی انتخاب می‌شود، نتایج کار با اجراهای مختلف، متفاوت خواهد بود. بنابراین لازم است الگوریتم به دفعات مختلف با پارامترهای یکسان اجرا شود تا

تغییرات در نتایج ملاحظه شود (Saadatseresht et al., 2009). در این تحقیق، الگوریتم ۵ بار^۱، با جمعیت اولیه ۱۰۰۰ و تعداد تکرار ۱۰۰ بار اجرا شده است. جدول ۴ تعداد جواب‌ها را در هر جبهه و شکل ۷ نواحی انتخاب شده به وسیله الگوریتم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود، بیشتر جواب‌ها از نظر مختصاتی با یکدیگر پوشش دارند و نواحی انتخاب شده یکسان هستند، به همین دلیل الگوریتم از نظر تکرارپذیری ثابت دارد.

جدول ۴. تست تکرارپذیری الگوریتم

شماره ردیف	جمعیت اولیه	تعداد تکرارها	تعداد جواب‌ها در جبهه جواب اول
۱	۱۰۰۰	۲۵۰	۲۹
۲	۱۰۰۰	۲۵۰	۲۷
۳	۱۰۰۰	۲۵۰	۳۱
۴	۱۰۰۰	۲۵۰	۳۱
۵	۱۰۰۰	۲۵۰	۳۰
۶	۱۰۰۰	۲۵۰	۳۲



شکل ۷. نواحی انتخاب شده به وسیله الگوریتم با پارامترهای یکسان در اجراهای مختلف به منظور بررسی تکرارپذیری الگوریتم

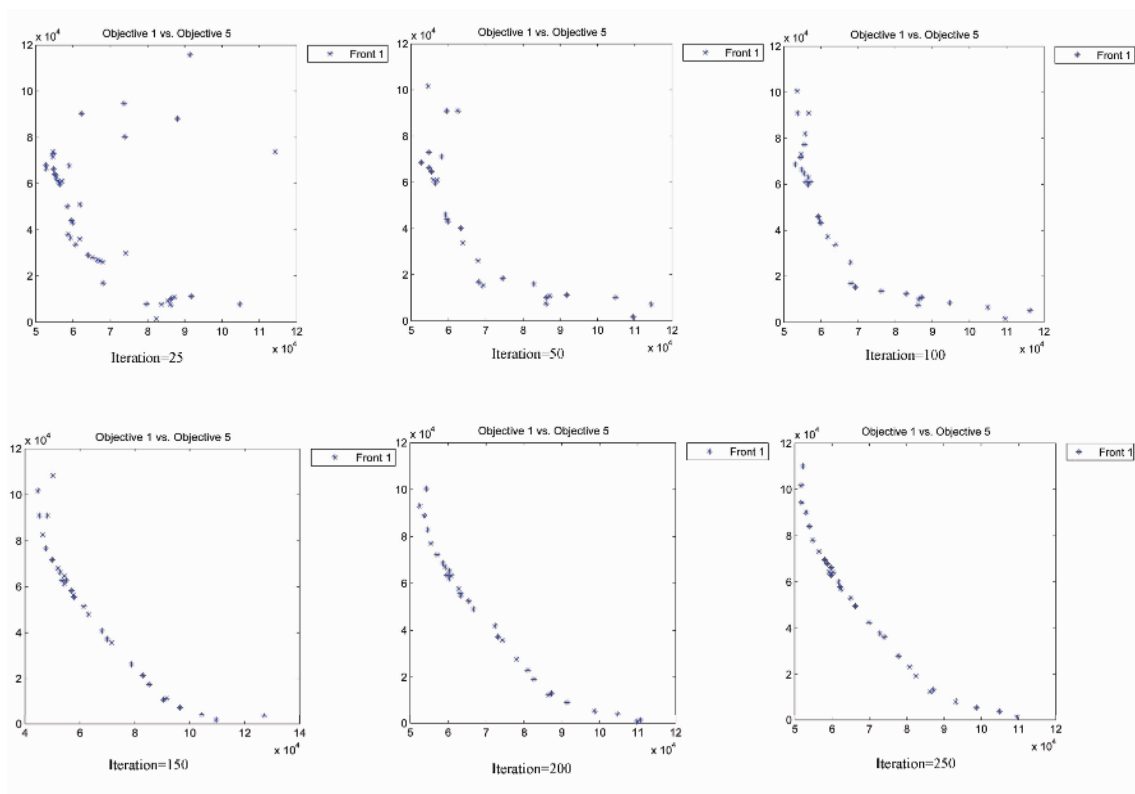
1. run

۵-۲- بررسی همگرایی نتایج و تأثیر تکرارها بر

روی آن

همان‌طور که گفته شد، در این تحقیق تعداد تکرارهای ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ برای بررسی تأثیر تعداد تکرار بر روی نتایج، مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که در تکرار ۱۵۰ شرایط بهینگی محقق شده

است و نتایج در تکرارهای ۲۰۰ و ۲۵۰ تغییر معنی‌داری در بهینه شدن ندارند. بنابراین الگوریتم در تکرار ۱۵۰ به همگرایی لازم رسیده است. جدول ۵ و شکل ۸ نتایج حاصل از این تکرارها را در منحنی Trade-off مربوط به تابع هدف اول و پنجم، نشان می‌دهند.



شکل ۸. منحنی Trade-off در تکرارهای ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ برای توابع هدف ۱ (فاصله از شهرها) و ۵ (فاصله از منابع اولیه)

جدول ۵. تعداد جواب‌ها در تکرارهای مختلف با جمعیت اولیه ۱۰۰۰

شماره ردیف	جمعیت اولیه	تعداد تکرارها	تعداد جواب‌ها در جبهه جواب اول
۱	۱۰۰۰	۲۵	۴۱
۲	۱۰۰۰	۵۰	۲۷
۳	۱۰۰۰	۱۰۰	۲۹
۴	۱۰۰۰	۱۵۰	۳۱
۵	۱۰۰۰	۲۰۰	۳۰
۶	۱۰۰۰	۲۵۰	۲۸

۵-۳- تست پارامترهای اولیه

از آنجا که پارامترهایی همچون تعداد تکرار و تعداد جمعیت اولیه نقشی اساسی در خروجی الگوریتم دارند، لازم است با تغییر این المان‌ها تغییر جواب نهایی بررسی شود. این دو المان در الگوریتم‌های تکاملی، تابع ارزیابی نام دارند. در جدول ۶، نتایج حاصل از اجرای الگوریتم با پارامترهای متفاوت برای حالتی که تابع هدف اول کمینه است، آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش جمعیت اولیه در الگوریتم جواب‌ها بهتر می‌شوند ولی از طرف دیگر، زمان لازم برای اجرای الگوریتم به شدت افزایش می‌یابد. در جدول ۶ برای گویاتر شدن مطلب و امکان مقایسه نتایج به دست آمده با پارامترهای مختلف، زمان لازم برای اجرای برنامه به صورت مقایسه‌ای با حالت جمعیت اولیه ۱۰۰۰ و تکرار ۲۵ آورده شده است. بنابراین تصمیم‌گیرنده می‌تواند با صرف زمان بیشتر به نتایج بهتری برسد ولی در صورتی که زمان برای

تصمیم‌گیری مهم باشد، با جمعیت اولیه پایین نیز می‌توان به نتایج خوبی رسید.

۵-۴- تصمیم‌گیری

همان‌طور که اشاره شد، یک نقطه انتخابی بر روی منحنی جواب‌های بهینه با شرایط مورد نظر، یک نقطه روی نقشه را به عنوان بهترین نقطه برای ساخت صنایع بزرگ نشان می‌دهد. نقطه مورد نظر روی منحنی جواب‌های بهینه می‌تواند با توجه به شرایط مورد نظر تصمیم‌گیرنده انتخاب شود. به عنوان مثال هدف تصمیم‌گیرنده انتخاب نقطه‌ای است که کمترین فاصله را با نقاط شهری و در عین حال بیشترین فاصله را از مناطق حفاظت‌شده و جنگل‌ها داشته باشد؛ بدین منظور این نقطه با توجه به شرایط مذکور روی منحنی بهترین جواب‌ها انتخاب می‌شود و نتیجه این انتخاب روی نقشه مشخص می‌گردد.

جدول ۶. تأثیر تغییر پارامترهای الگوریتم بر روی نتایج

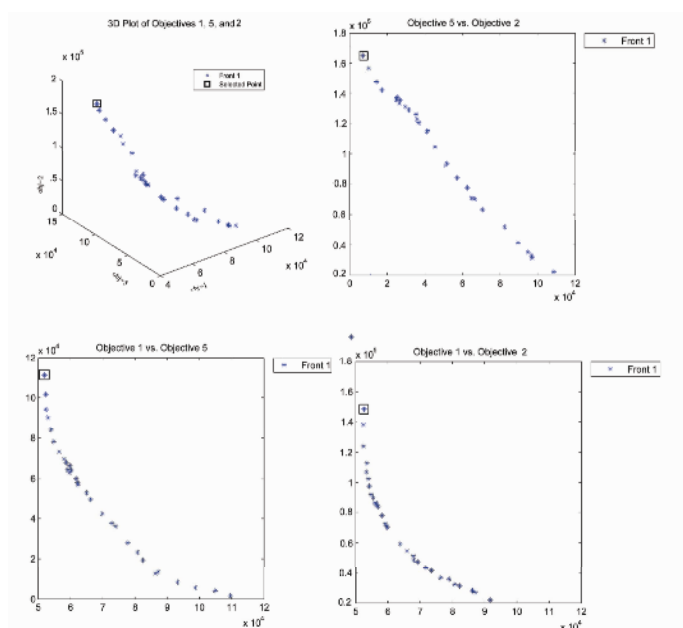
f_5	f_4	f_3	f_2	f_1	جمعیت اولیه	تعداد تکرار	زمان لازم برای اجرای برنامه
۹۴۰۶۷	۹۹۶۴۲	۲۷۱۴۵	۲۷۸۵	۶۲۶۷۰		۲۵	t
۹۵۰۸۷	۹۷۱۰۵	۲۶۹۶۰	۲۷۵۴	۶۲۵۸۱		۵۰	3t
۹۸۰۷۶	۹۴۰۵۳	۲۵۹۷۰	۲۶۹۸	۶۱۹۹۷	۱۰۰۰	۱۰۰	5t
۱۰۱۱۵۰	۹۲۵۶۹	۲۴۴۵۸	۲۶۸۹	۶۰۸۷۷		۱۵۰	8t
۱۰۱۱۲۸	۹۱۱۶۷	۲۳۸۸۷	۲۶۸۷	۶۰۸۷۶		۲۰۰	10t
۱۰۱۱۳۲	۸۹۷۱۰	۲۲۹۷۶	۲۶۸۶	۶۰۸۷۲		۲۵۰	12t
۹۵۶۸۰	۸۹۸۳۴	۲۳۷۶۰	۲۷۷۶	۶۲۵۳۹		۲۵	13t
۱۰۱۲۳۷	۸۹۰۱۳	۲۲۹۰۳	۲۶۷۸	۶۰۷۶۰	۱۰۰۰۰	۵۰	20t
۱۰۲۸۷۲	۸۸۷۲۰	۲۲۰۰۳	۲۶۷۴	۵۸۹۷۰		۱۰۰	27t
۱۰۱۵۴۹	۸۹۱۹۰	۲۳۰۵۴	۲۷۶۲	۵۶۴۳۹	۱۵۰۰۰	۵	21t
۱۰۳۰۳۰	۸۸۵۳۴	۲۱۹۶۵	۲۶۶۰	۵۲۶۸۰		۱۰	30t

از نتایج مربوط به جمعیت اولیه ۱۰۰۰ و تکرار ۲۵۰ استفاده شده است. نقطه انتخاب شده یک جواب بهینه است که به صورت نسبی دارای کمترین فاصله از شهرها و در عین حال بیشترین فاصله از مناطق حفاظت‌شده و جنگل‌ها و منابع مواد اولیه است. جدول ۷ نیز نتایج حاصل از کمینه (و یا بیشینه) کردن هر یک از توابع هدف و مقادیر متناظر سایر توابع هدف را به ازای آن نشان می‌دهد.

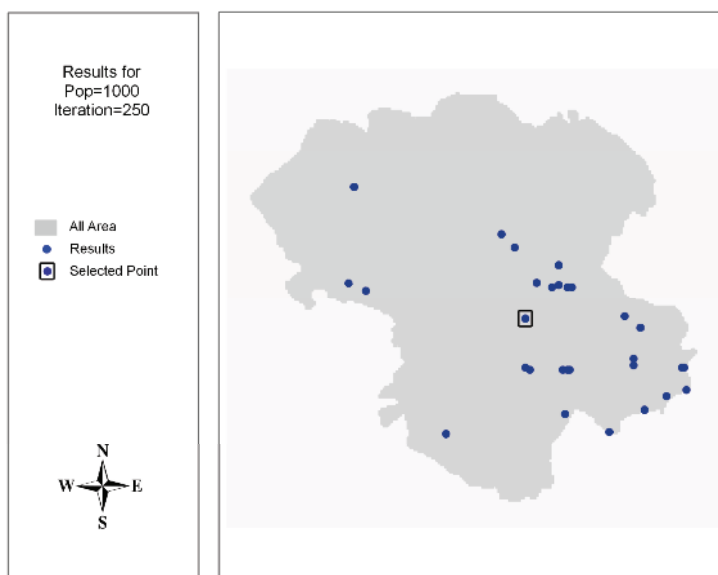
به عنوان مثال شکل‌های ۹ و ۱۰ حالتی را نشان می‌دهد که در آن هدف تصمیم‌گیرنده، حداقل کردن فاصله از نقاط شهری است؛ یعنی در آن تابع هدف اول کمینه است. شکل ۹، نقطه انتخاب شده بر روی Trade-off سه‌بعدی (با مربعی مشخص شده است) و تصاویر آن نقطه بر روی محورها را نشان می‌دهد تا وضعیت سایر توابع هدف در حالتی که این شرط برقرار است به نمایش گذاشته شود و شکل ۱۰ نتیجه اعمال این شرط را در نقشه مشخص می‌کند. در تحلیل‌های این قسمت

جدول ۷. کمینه (بیشینه) کردن هر یک از توابع هدف و مقادیر سایر توابع هدف بر اساس آن

تابع هدف	هدف (کمینه/بیشینه)	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
f_1	کمینه	$1.0e+005*0.5268$	$1.0e+005*0.0266$	$1.0e+005*0.2576$	$1.0e+005*0.8960$	$1.0e+005*1.0303$
f_2	کمینه	$1.0e+004*6.2499$	$1.0e+004*0.0018$	$1.0e+004*0.8345$	$1.0e+005*0.7654$	$1.0e+004*8.3858$
f_3	کمینه	$1.0e+005*0.6988$	$1.0e+005*0.0196$	$1.0e+005*0.0006$	$1.0e+005*0.5698$	$1.0e+005*1.3983$
f_4	کمینه	$1.0e+005*1.0958$	$1.0e+005*0.0163$	$1.0e+005*0.1235$	$1.0e+005*0.0164$	$1.0e+005*0.2839$
f_5	بیشینه	$1.0e+005*0.9176$	$1.0e+005*0.0063$	$1.0e+005*0.2809$	$1.0e+005*0.4569$	$1.0e+005*1.7806$



شکل ۹. انتخاب یک نقطه با شرط کمترین فاصله از نقاط شهری و تصاویر این نقطه در فضاهای دوبعدی



شکل ۱۰. نتیجه حاصل از اعمال شرط کمترین فاصله از نقاط شهری

۵-۵- اعتبارسنجی نتایج

به منظور اعتبارسنجی الگوریتم، نتایج به دست آمده از الگوریتم NSGA-II با نتایج روش وزن دهی شاخص^۱ که در زمره روش های وزن دهی قبل از حل به شمار می آید، مقایسه شده است. در ساده ترین مدل هم پوشانی شاخص، ابتدا نقشه های فاکتور تهیه می شود و سپس به هر فاکتور براساس اهمیت و نقش آن و با توجه به دیدگاه های کارشناسی، وزن تعلق می گیرد. این وزن به صورت عددی و در بازه مشخصی تعیین می گردد که معمولاً در بازه صفر و ۱ نرمال می شود. سپس نقشه های فاکتور پس از تأثیر وزن ها، با یکدیگر هم پوشانی می شوند.

در این تحقیق پس از تولید نقشه های فاکتور، به منظور مقایسه نتایج با NSGA-II و اعتبارسنجی آنها با توجه به دیدگاه های کارشناسی (وزن های استاندارد شده مندرج در جدول ۸) نقشه حاصل از مدل وزن دهی شاخص به دست آمد که در شکل ۱۱ نشان داده شده است و در آن، کلاس های ۱ تا ۱۰ اولویت بندی مکان های مناسب را نشان می دهند.^۲

پس از انطباق نتایج NSGA-II بر نتایج حاصل از روش

وزن دهی شاخص، ۷ نقطه حاصل از روش NSGA-II در مناطق دارای اولویت اول، ۶ نقطه در مناطق دارای اولویت دوم، ۹ نقطه در اولویت سوم، ۴ نقطه در مناطق دارای اولویت چهارم، ۱ نقطه در اولویت پنجم و ۱ نقطه در اولویت ششم قرار دارد. بنابراین همان طور که ملاحظه می شود، ۲۲ نقطه از نتایج NSGA-II در اولویت های ۱ تا ۳ قرار دارند که نشان دهنده درستی و اعتبار روش است. از طرفی با توجه به اینکه در مدل وزن دهی شاخص، مکان های انتخابی تحت تأثیر وزن های اعمال شده از طرف کارشناسان این زمینه هستند، با تغییر وزن المان ها نتایج نیز متفاوت خواهد بود. بنابراین دور از انتظار نیست که برخی از نتایج حاصل از الگوریتم NSGA-II در اولویت های بعد از چهارم قرار دارند. ولی الگوریتم NSGA-II متأثر از وزن دهی نیست و نتایج آن بهینه اند و وزن دهی می تواند پس از تعیین جواب ها صورت گیرد.

1. Index Overlay

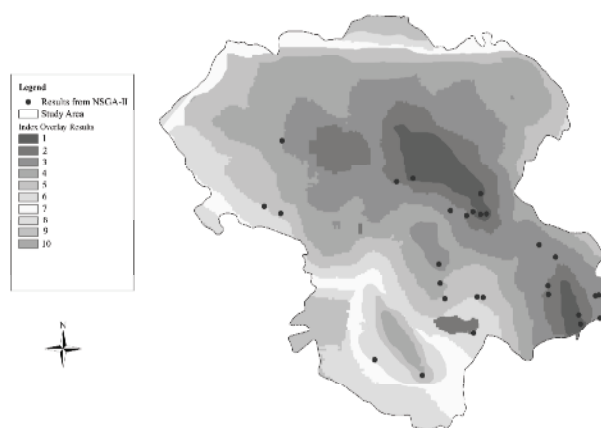
۲. می توان مناطقی را که در شرایط مسئله نمی گنجند پس از به دست آمدن نتایج حاصل از مدل هم پوشانی شاخص، حذف کرد. در اینجا هدف بیشتر مقایسه نتایج بوده است.

کاربرد الگوریتم ژنتیک چندهدفه در مطالعات مکان‌یابی کاربری‌های صنعتی

جدول ۸. درصد اهمیت و وزن مربوط به فاکتورهای مؤثر در مکان‌یابی با توجه به نظر کارشناسی

ویژگی	مورد	درصد اهمیت و وزن مربوطه با توجه به نظر کارشناسی* (درصد)
ویژگی‌های اجتماعی و اقتصادی	فاصله از شهر	۲۰
دسترسی به عوامل زیربنایی	تأمین برق (نیروگاه یا خط انتقال اصلی)	۱۰
	دسترسی به آب	۱۰
	فاصله تا راه‌های دسترسی	۲۰
	دسترسی به مواد اولیه	۱۰
ویژگی‌های زیست-محیطی	دوری از مناطق حفاظت‌شده	۱۵
	دوری از جنگل	۱۵

* وزن‌ها به صورت روند شده، ارائه شده‌اند.



شکل ۱۱. اعتبارسنجی نتایج الگوریتم با نتایج حاصل از مدل هم‌پوشانی شاخص

۶- نتیجه‌گیری

در این پروژه با استفاده از NSGA-II که الگوریتم تکاملی است و براساس الگوریتم ژنتیک کار می‌کند، مکان‌های مناسب برای صنایع بزرگ در محدوده مطالعاتی استان زنجان مشخص شده است. برای انجام این کار در ابتدا با توجه به نظر کارشناسان و پروژه‌های انجام‌شده در سایر مناطق، المان‌های تأثیرگذار بر تعیین مکان‌های مناسب برای کاربری‌های صنعتی استخراج شدند، سپس این المان‌ها در دو تقسیم‌بندی کلی شرایط و توابع هدف قرار گرفتند. در مرحله بعد،

مناطقى که در شرایط موجود صدق نمی‌کردند از محدوده خارج شدند، سپس با برنامه‌ای که به این منظور طراحی گردیده، توابع هدف مورد نظر بر مسئله اعمال شدند و با استفاده از NSGA-II مناطق مناسب برای ساخت صنایع بزرگ و نیز جبهه جواب‌های بهینه تولید گردیدند. در پایان با استفاده از برنامه طراحی شده با انتخاب یک نقطه روی منحنی جواب‌های بهینه با شرایط مورد نظر مدیر، نقاط متناظر روی نقشه مشخص شده است. مهم‌ترین خروجی‌ها و نتایج حاصل از تحقیق در ادامه ذکر می‌گردند.

Agrell, P. J., Stam, A., Fischer, G. W., 2004, **Interactive Multiobjective Agro-ecological Land Use Planning: The Bungoma Region in Kenya**, European Journal of Operational Research, 158, 194–217.

Bui, L.T., Alam, S., 2008, **Multi-Objective Optimization in Computational Intelligence, Theory and Practice**, Information Science Reference, USA, 58-63.

Coello Coello, C.A., Lamont, G.B., Van Veldhuizen, D.A., 2007, **Evolutionary Algorithms for Solving Multi-objective Problems**, Springer, 2nd Ed., New York, USA.

Coello Coello, C.A., Lamont, G.B., 2004, **Application of Multi-objective Evolutionary Algorithms**, World Scientific Publishing Co., Singapore, 605-611.

Coello Coello, C.A., 2002, **Introduction to Evolutionary Multi-objective Optimization**, Lecture notes, Depto. de Ingenier'ia El'ectrica, Secci'on de Computaci'on, Instituto Polit'ecnico Nacional, MEXICO.

Coello Coello, C.A., 1999, **A Comprehensive Survey of Evolutionary-Based Multiobjective Optimization Techniques**, Knowledge and Information Systems, 1(3), 269–308.

Coello Coello, C.A., 1996, **An Empirical Study of Evolutionary Techniques for Multiobjective Optimization in Engineering Design**, Ph.D. thesis, Tulane University, New Orleans.

• یکی از مهمترین دستاوردهای پژوهش حاضر، توسعه مدلی است که با وجود در تناقض بودن برخی توابع هدف، بهینه‌سازی هم‌زمان انجام می‌دهد و به مدیران این امکان را می‌دهد که یک راه‌حل را از میان چندین راه‌حل بهینه برگزینند. به عبارت دیگر، سیستم پیشنهادی، نوعی سیستم حامی تصمیم‌گیری است که به مدیر کمک می‌کند تا با مشخص کردن اولویت‌ها، نتایج را مشاهده کند و بهترین تصمیم را بگیرد.

• تست تکرارپذیری الگوریتم نشان داد که الگوریتم دارای تکرارپذیری مورد قبولی است و تعداد جواب‌ها و مکان جواب‌ها بر روی نقشه، در اجراهای مختلف با پارامترهای یکسان، تغییر معنی‌داری ندارد.

• برای بررسی همگرایی الگوریتم، تست همگرایی انجام شد. نتایج این تست حاکی از آن است که الگوریتم با جمعیت اولیه ۱۰۰۰ در تکرار ۱۵۰ همگرا شده و نتایج مورد قبولی خواهد داد.

• تست پارامترهای اولیه نیز نشان داد که با صرف زمان بیشتر (با جمعیت اولیه بالاتر) می‌توان به جواب‌های بهتری رسید، ولی در صورتی که در تصمیم‌گیری زمان محدود باشد، جمعیت اولیه پایین نیز جواب مورد قبولی خواهد داد.

در پایان از آنجا که در تعداد جمعیت اولیه بالا سرعت انجام الگوریتم کاهش پیدا می‌کند، برای بهبود الگوریتم استفاده شده در پژوهش‌های بعدی می‌توان از روش‌هایی برای مکان‌یابی تقریبی استفاده کرد و جواب آنها را به عنوان جمعیت اولیه در الگوریتم این تحقیق به کار برد.

۷- منابع

Abbass, H.A., Sarker, R., 2002, **The Pareto Differential Evolution Algorithm**, International Journal on Artificial Intelligence Tools, 11(4), 531-552.

- Cohon, J.L., 1978, **Multiobjective Programming and Planning**, Academic press, New York.
- Datta, D., Deb, K., 2006, **Design of Optimum Cross-sections for Load-carrying Members Using Multi-objective Evolutionary Algorithms**, *Int. J. of Systemics, Cybernetics and Informatics (IJSCI)*, 6, 57-63.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T., 2002, **A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA - II**. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 181-197.
- Deb, K., 2001, **Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms**, John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Ducheyne, E., 2003, **Multiple Objective Forest Management Using GIS and Genetic Optimization Techniques**, Ph.D. Thesis, Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences, University of Ghent, Belgium.
- Engelbrecht, A.P., 2007, **Computational Intelligence: An Introduction**, 2nd ed., John Wiley & Sons, England.
- Fonseca, C.M., Fleming, P.J., 1993, **Genetic Algorithms for Multi-objective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization**, In: *Proceedings of the fifth International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufman, San Mateo, CA, 416-423.
- Gen, M., Cheng, R., 2000, **Genetic Algorithms and Engineering Optimization**, John Wiley & Sons, Canada.
- Goldberg, D.E., Richardson, J., 1987, **Genetic Algorithms with Sharing for Multimodal Function Optimization**, In: *Proceeding of 2nd international Conference on Gas: Genetic Algorithms and Their Applications*, Lawrence Erlbaum (Ed.), Cambridge MA., 41-49.
- Haupt, R.L., Haupt, S.E., 2004, **Practical Genetic Algorithms**, 2nd edition, John Wiley & Sons, New Jersey.
- Hillier, F., Liberman, G., 1995, **Introduction to Operational Research**, 6th Ed., MacGraw Hill, USA.
- Huston, M., 2006, **The Need for Science and Technology in Land Management**, Online Book - The International Development Research Centre, http://www.idrc.ca/en/ev-29587-201-1-DO_TOPIC.html.
- Jafari, H., Karimi, S., 2005, **Site Selection for Industrial Environments in Quom Province Using GIS**, *Journal of Environmental studies*, 37, 45-52.
- Jin, Y., 2006, **Multi-objective Machine Learning**, Springer, Netherland, 8-10.
- Koomen, E., Stillwell, J., Bakema, A., Scholten, H. J., 2008, **Modelling Land-Use Change: Progress and Applications**, Springer, Germany, 180-196.
- Makhdoum, M.F., 2008, **Fundamental of Land use Planning**, 8th Edition, Tehran University's Publication (Samt), Iran, Tehran (In Persian).

- Matthews, K.B., Craw, S., Elder, S., Sibbald, A.R., MacKenzie, I., 2000, **Applying Genetic Algorithms to Multi-Objective Land Use Planning**, In: Proceedings Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2000), 613-620.
- Obayashi, S., Deb, K., Poloni, C., Hiroyasu, T., Murata, T., 2007, **Evolutionary Multi-Criterion Optimization**, In: Proceeding of 4th international conference on Genetic Algorithm, Datta, D., Deb, K., Fonseca, C. M., (Eds), Springer, Mutsushima, Japan, 401-416.
- Sarker R., Coello Coello, C.A., 2003, **Evolutionary Optimization: Assessment Methodologies for MEAs**, Sarker, R., Mohammadian, M, Yao, X. (Eds.), Kluwer Academic Publishers, New York, 177-191.
- Sarvar, R., 2006, **Applicable Geography and Land use Planning**, 2nd Edition, Tehran University's Publication (Samt), 141-162 (In Persian).
- Schaffer, J.D., 1985, **Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms**, In: Proceedings of an International Conference on Genetic Algorithms and their Applications, 93-100.
- Sivanandam, S.N., Deepa, S.N., 2008, **Introduction to Genetic Algorithms**, Springer, Verlag Berlin, Germany, 99-104.
- Srinivas, N., Deb, K., 1995, **Multiobjective Function Optimization using Nondominated Sorting Genetic Algorithms**, *Evol. Comput.*, 2(3), 221-248.
- Stewart, T.J., Janssen, R., Herwijnen, M.V., 2004, **A Genetic Algorithm Approach to Multiobjective Land use Planning**, *Computers & Operations Research*, 31, 2293-2313.
- Sumathi, S., Hamsapriya, T., Surekha, P., 2008, **Evolutionary Intelligence: an Introduction to Theory and Applications with Matlab**, Springer, Berlin.
- Veldhuizen, D.A., Lamont, G.B., 1999, **Multiobjective Evolutionary Algorithm Test Suites**, In: Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing, Carroll, J., Haddad, H., Oppenheim, D., Bryant, B., and Lamont, G. B. (Eds), San Antonio, Texas, 351-357.
- Yang, A., Shan, Y., Bui, L.T., 2008, **Success in Evolutionary Computation**, Springer, Germany, 122-141.
- Zitzler, E., Thiele, L., 1998, **Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms- A Comparative Case Study**, In: Parallel Problem Solving From Nature, Eiben, A.E., Bäck, T., Schoenauer, M., Schwefel, H.P. (Eds.), Springer-Verlag, Berlin, Germany, 292-301.