

ارائه الگوریتم تلفیقی برای حل مسائل تحلیل تناسب کاربری اراضی با رویکرد تصمیم‌گیری چندهدفه

بهرام امین‌زاده گوهرریزی^{1*}، بابک امین‌زاده گوهرریزی²، سعید رستگار³

- 1- استادیار دانشکده شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین
- 2- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع - مدیریت سیستم و بهره‌وری، سازمان مدیریت صنعتی
- 3- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع - مدیریت سیستم و بهره‌وری، سازمان مدیریت صنعتی

دریافت: 91/12/23 پذیرش: 92/10/15

چکیده

برنامه‌ریزی کاربری زمین در طرح‌های توسعه شهری و منطقه‌ای یکی از محورهای اصلی مطالعه است. هنگامی که محدوده اراضی طرح وسیع و تعداد محدودیت‌های موجود برای استقرار پهنه‌ها زیاد است، مشکل بتوان بدون استفاده از هوش مصنوعی و الگوریتم‌های فراابتکاری پهنه‌بندی بهینه یا حتی نزدیک به آن را در مقیاس زمان و هزینه قابل قبول به دست آورد. هدف این مقاله نخست، معرفی رهیافتی تلفیقی برای مدل‌سازی مسئله پهنه‌بندی و سپس معرفی یک الگوریتم جدید برای حل مدل است. به همین منظور، یک مسئله پهنه‌بندی برای 14 پهنه و حدود 600 هکتار اراضی پارک علم و فناوری خلیج فارس، به‌عنوان مطالعه موردی، براساس الگوریتم‌های نام‌برده بررسی شده و بنابر شاخص‌هایی مانند اهداف اقتصادی، حجم ترافیک مجموعه و غیره، به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی با 3 تابع هدف تناسب کاربری، هزینه حمل‌ونقل در درون مجموعه و یکپارچگی پارسل‌های تخصیص‌یافته به هر کاربری پیکربندی شده است. در نهایت، با حل مدل از میان تعداد بسیار زیادی طرح پهنه‌بندی قابل قبول (بیش از 101,000 طرح پهنه‌بندی) بهترین پاسخ الگوریتم پیشنهادی به‌عنوان پاسخ نهایی در نظر گرفته شد. این فرایند مدل‌سازی و حل مسائل تحلیل تناسب کاربری اراضی با توجه به سرعت به‌نسبت زیاد در طراحی و همچنین ارائه یک سیستم پشتیبان تصمیم به‌عنوان رهیافتی تازه در مسائل پهنه‌بندی اراضی، جایگزینی مناسب برای روش‌های سنتی خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: تصمیم‌گیری چندمعیاره، الگوریتم ژنتیک، تجزیه و تحلیل تناسب کاربری اراضی، جست‌وجوی همسایگی متغیر، تصمیم‌گیری چندهدفه.

1- مقدمه

تجزیه و تحلیل تناسب کاربری زمین¹ روشی برای تخصیص مناسب‌ترین اراضی به بهترین کاربری‌ها براساس مجموعه‌ای از معیارهای تعیین‌شده و اهداف تجزیه و تحلیل است (Malczewski, 2004). به عبارت دیگر، در این روش براساس اهداف تجزیه و تحلیل مانند کمینه‌سازی هزینه حمل‌ونقل در درون مجموعه طراحی یا کمینه‌سازی خسارت به پوشش گیاهی منطقه، بهترین نوع چیدمان عملکردها در مجموعه اراضی مشخص می‌شود.

امروزه، تجزیه و تحلیل تناسب کاربری زمین در مباحث شهرسازی و برنامه‌ریزی محیطی کاربرد بسیار زیادی دارد (Hopkins, 1997). دو عامل در پیشبرد این رهیافت تحلیلی نقش اساسی دارد: اولی، پیدایش سیستم اطلاعات جغرافیایی² است که قابلیت پردازش ماشینی لایه‌های اطلاعاتی تولیدشده به‌منظور تعیین نسبت روابط هر یک از این لایه‌های اطلاعاتی را فراهم می‌کند و دومی، استفاده از تحلیل‌های مبتنی بر تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که قابلیت تعیین هر یک از لایه‌های اطلاعاتی را به‌منظور استفاده در سیستم اطلاعات جغرافیایی فراهم می‌آورد (Malczewski, 2004).

مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره³ در منطق کلاسیک تصمیم‌گیری شامل دو دسته کلی: مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه⁴ و چندهدفه⁵ است (Malczewski, 2006). مدل‌های چندشاخصه برای انتخاب یک گزینه از میان گزینه‌های محدود به‌کار می‌رود. در این نوع مدل‌های تصمیم‌گیری براساس اطلاعاتی که تصمیم‌گیر در اختیار می‌گذارد و بر مبنای قواعدی که از ساختار کلاسیک تصمیم‌گیری آمده است، گزینه‌ها بر این اساس که آیا معیارهای تصمیم‌گیری و تکنیک مورد استفاده جبرانی⁶ یا غیرجبرانی⁷ اند، به ترتیب اولویت مرتب و بهترین گزینه انتخاب می‌شود. درحالی که مدل‌های چندهدفه به‌منظور طراحی در یک مجموعه پیوسته از جواب‌ها به‌کار می‌روند و درنهایت، یک مدل ریاضی را در اختیار می‌گذارند که حل مدل می‌تواند گزینه‌های طراحی را در اختیار برنامه‌ریز قرار دهد (اصغرپور، 1387: 1).

1. Land-use Suitability Analysis
2. Geographical Information System
3. Multiple Attribute Decision Making
4. Multiple Criteria Decision Making
5. Multiple Objective Decision Making
6. Compensatory
7. Non-Compensatory

هدف این مقاله توسعه رهیافت جدیدی است که در آن با استفاده از ساختار مدل‌سازی چندشاخصه و چندهدفه، مسئله تحلیل تناسب کاربری اراضی به صورت یک مدل ریاضی تبیین، و آن‌گاه با استفاده از یک الگوریتم پیشنهادی، به عنوان یکی از روش‌های حل این نوع مسائل، حل می‌شود. برخلاف مدل‌های کلاسیک پهنه‌بندی که فقط به صورت چندشاخصه (روش روی هم‌اندازی¹ نقشه‌های وزن‌شده) مدل‌سازی، و سپس با یک فرایند تصمیم‌گیری جمعی پهنه‌بندی می‌شدند (اغلب با تعداد محدودی شاخص و معیار سروکار دارند)، روش مورد استفاده در این مقاله از نظر تعداد شاخص‌ها و معیارها و همچنین ابعاد اراضی، دارای هیچ نوع محدودیتی نیست؛ به این مفهوم که مسائلی جز مسئله مطرح شده در مطالعه موردی این مقاله می‌توانند با الگوریتم ارائه شده مدل‌سازی و پهنه‌بندی شوند. دستاورد دیگر این رهیافت زمان کمتر در ارائه مسئله پهنه‌بندی و استفاده از قابلیت سیستم پشتیبان تصمیم برای تصمیم‌گیری‌های جمعی است.

2- مبانی نظری

امروزه، بهترین شیوه تحلیل کاربری زمین براساس مدل‌هایی است که به وسیله سیستم اطلاعات جغرافیایی پشتیبانی می‌شوند. فرایند مدل‌سازی در این شیوه این‌گونه است که ابتدا لایه‌های اطلاعاتی برای هر شاخص تأثیرگذار در مجموعه اهداف پهنه‌بندی تعیین می‌شود؛ آن‌گاه براساس انواع تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه با شاخص‌های جبرانی، به منظور تعیین اوزان هر یک از لایه‌های عملکردی مدلی تهیه می‌شود و در نهایت، از روی هم‌اندازی نقشه‌ها برای یافتن مکان بهینه عملکرد استفاده می‌شود (Malczewski, 2004). مشکل اساسی این فرایند مدل‌سازی و حل مسئله این است که در این مدل‌ها ارتباط متقابل میان عملکردها در مجموعه اراضی هدف مورد سنجش قرار نمی‌گیرد (Malczewski, 2006)؛ به همین دلیل امروزه پاره‌ای از فرایندهای حل مسئله با یک تغییر رویکرد، مسئله تجزیه و تحلیل تناسب کاربری اراضی را براساس فرایندهای تصمیم‌گیری چندهدفه مدل‌سازی کرده، برای حل آن از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی استفاده می‌کنند (Ibid).

1. Overlay

2-1- مدل‌سازی تحلیل تناسب کاربری براساس روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه

مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه به دو دسته کلی مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه با شاخص‌های جبرانی و غیرجبرانی تقسیم می‌شوند. منظور از جبرانی و غیرجبرانی، در تأثیر متقابل میان شاخص‌هاست. در مدل جبرانی، نقصان یک شاخص با قوت دیگر شاخص‌ها قابل جبران است؛ اما در مدل‌های غیرجبرانی، نقصان یک شاخص ممکن است به حذف یک یا چند گزینه بینجامد (اصغرپور، 1387: 232). کاربرد مدل‌های جبرانی در تجزیه و تحلیل تناسب کاربری مرسوم‌تر است. رایج‌ترین تکنیک‌های چندشاخصه‌ای که در فرایند تجزیه و تحلیل تناسب کاربری استفاده می‌شوند، عبارت‌اند از: میانگین وزنی ترتیبی¹ (Rinner & Malczewski, 2003; Malczewski Et al., 2003; Gorsevski Et al., 2012)، روش تحلیل سلسله‌مراتبی² (Banai-Kashani, 1987; Dai Et al., 2001; Cengiz & Akbulak, 2009; Bagdanavičiute & Valiunas, 2012; Hossain & Das, 2010) و انواع گونه‌های ترکیبی (Al-yahyai Et al., 2012) و کلامی³ آن‌ها که برپایه منطق فازی⁴ مدل‌سازی می‌شود (Malczewski, 2006; Banai, 1993). دیگر تکنیک‌های جبرانی مانند تاپسیس⁵ (Mahalakshmi Et al., 2012)، تحلیل شبکه⁶ (Ferretti, 2011) و تعدادی از تکنیک‌های وزن‌دهی براساس مقیاس خطی مانند ساو⁷ (Carver, 1991) نیز به‌منظور تحلیل تناسب کاربری به کار رفته‌اند. تکنیک‌های غیرجبرانی مانند الکتراه⁸ (Mendas & Delali, 2012; Sahnoun Et al., 2012) و پرومته⁹ (Marinoni, 2006) نیز در تحلیل تناسب کاربری کمتر مورد توجه بوده‌اند.

2-2- مدل‌سازی تحلیل تناسب کاربری بر اساس روش‌های تصمیم‌گیری چندهدفه

در تصمیم‌گیری چندهدفه، مسئله ابتدا با بیان ریاضی مدل‌سازی، و آن‌گاه حل می‌شود (Qian Et al., 2010; Liu & Lan, 2012; Duh & Brown, 2007; Cao Et al., 2011; Huang

1. Ordered Weighted Average
2. Analytical Hierarchy Process
3. Linguistic
4. Fuzzy Logic
5. TOPSIS
6. Analytical Network Process
7. Simple Additive Weights
8. ELECTRE
9. PROMTE

(Et al., 2012). با توجه به اینکه در این گونه مدل‌ها هم‌زمان چند هدف را باید بهینه کرد، می‌توان ابتدا یکی از روش‌های برنامه‌ریزی آرمانی¹ یا برنامه‌ریزی سازشی² را برای تبدیل آن به مدل تک‌هدفه به کار گرفت و سپس مسئله را با استفاده از تکنیک‌های موجود حل کرد (Qian Et al., 2010; Liu Et al., 2012). در این نوع مدل‌های تصمیم‌گیری با توجه به اینکه مدل ریاضی مسئله با افزایش تعداد شاخص‌ها و ابعاد زمین به صورت نمایی بزرگ می‌شود، به نظر می‌رسد روشی برای حل دقیق مسئله در زمان معقول وجود نخواهد داشت. این نوع مسائل که به مسائل با مرتبه زمانی غیرچندجمله‌ای³ مشهورند، به طور کلی با استفاده از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و الگوریتم‌های فراابتکاری حل می‌شوند. این فرایندهای حل جواب بهینه را تضمین نمی‌کنند؛ اما براساس یافته‌های نویسندگان مقاله تنها روش‌های موجود برای حل این گونه مسائل اند. الگوریتم ژنتیک⁴ (Stewart Et al., 2004; Cao Et al., 2011; Juan Porta Et al., 2012; al., 2012)، الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی⁵ (Zhou & Civco, 1996)، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید⁶ (Liu Et al., 2012; Duh) (Duh & Brown, 2007)، الگوریتم کلونی مورچگان⁷ (Liu Et al., 2012)، جست‌وجوی ممنوع⁸ (Liu & Lan, 2010) و جست‌وجوی همسایگی متغیر⁹ (Yin & Wang, 2012) از مشهورترین الگوریتم‌های موجود برای حل مسئله تجزیه و تحلیل تناسب کاربری به‌شمار می‌آیند.

2-3- روش تحلیل سلسله‌مراتبی

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی یکی از رایج‌ترین مدل‌های جبرانی مورد استفاده در مسائل تصمیم‌گیری چندشاخصه است. این فرایند براساس مفهوم سلسله‌مراتب در تصمیم‌گیری و مقایسات زوجی بنیان نهاده شده و شامل اقدامات زیر است (Saaty, 2008):

1. Goal Programming
2. Compromise Programming
3. NP-Hard
4. Genetic Algorithm
5. Artificial Neural Network
6. Simulated Annealing
7. Ant colony Optimization
8. Tabu Search
9. Variable Neighborhood Search

- تعریف دقیق هدف، شاخص‌ها و گزینه‌های موجود؛
 - ساختن درخت تصمیم‌گیری به این صورت که هدف در بالاترین رده و گزینه‌ها در پایین‌ترین رده قرار گیرد؛
 - تدوین ماتریس‌های مقایسات زوجی میان شاخص‌ها در هر رده و گزینه‌ها نسبت به رده بالاتر؛
 - محاسبه وزن هر گزینه براساس میزان ترجیح/اهمیت آن در شاخص‌ها.
- درخت تصمیم‌گیری در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی با این فرض بنا نهاده می‌شود که همه معیارها و زیرمعیارهای موجود در یک سطح از هم مستقل هستند؛ همچنین همه معیارهای موجود در سطح پایین‌تر به معیارهای سطح بالاتر وابستگی ندارند (Saaty, 2004). این مفروضات در بسیاری از موارد با مفروضات دنیای واقعی مانند مسئله موضوع این مقاله در تناقض‌اند. برای حل این مشکل می‌توان از یکی از این دو روش استفاده کرد:
- روش تعمیم‌یافته تحلیل سلسله‌مراتبی با نام تحلیل شبکه (Ibid)؛
 - استفاده از یک فرایند اضافی بانام روش دیمتل که فقط ارتباط میان شاخص‌ها را در نظر می‌گیرد (اصغرپور، 1382: 141).

برای اجتناب از حجم زیاد مقایسات زوجی و به تبع آن، حجم زیاد محاسبات در روش تحلیل شبکه و همچنین مشکلات حاصل از وارونگی رتبه‌های¹ ناشی از مقایسات زوجی، از روش دوم به‌منظور غلبه بر فرض استقلال شاخص‌ها در مدل سلسله‌مراتبی استفاده شده است.

2-4- روش دیمتل

دیمتل روشی برپایه نظریه گراف‌هاست که براساس اثرگذاری یک شاخص بر دیگر شاخص‌ها یا اثرپذیری از آنها، وزن آن شاخص تعیین می‌شود. مراحل تعیین اوزان شاخص‌ها در روش دیمتل به این صورت است (Yang & Tzeng, 2011):

- ایجاد یک ماتریس مربعی که در آن سطر و ستون‌های ماتریس نمودار شاخص‌هاست و در آن اثر عنصر i واقع در سطر بر عنصر j واقع در ستون ماتریس بر مبنای اعداد 1-4 به ترتیب صعودی قرار داده می‌شود.

1. Rank Reversal

- نرمال کردن اعداد موجود در ماتریس براساس ضریب K به منظور قرار گرفتن اعداد در مقیاس 0-1.

$$k = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n a_{ij}}$$

- تعیین ماتریس نهایی تصمیم‌گیری به صورت زیر:

$$T = X(I - X)^{-1}$$

- جمع عناصر موجود در سطر و ستون ماتریس به این صورت که عناصر حاصل جمع در سطر ماتریس اثرگذاری و عناصر موجود در مجموع هر ستون اثرپذیری هر شاخص را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در مقدمه توضیح داده شد، در این مقاله از متوسط اوزان ناشی از روش تحلیل سلسله‌مراتبی و از روش دیمتل برای تهیه یک مدل چندهدفه تجزیه و تحلیل کاربری اراضی استفاده شده است.

2-5- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از الگوریتم‌های اکتشافی حل مسئله است که از مدل‌سازی زیستی جمعیت‌های جانداران به وجود آمده. در این الگوریتم، خصوصیات نسل جانداران به مقدار تابع هدف و بهبود در خصوصیات نسلی در پی گذشت زمان تشبیه، و ظهور نسل‌های جدید از آمیزش نسل‌های قبلی به بهبود در مقدار تابع هدف مانند شده است (Bennett Et al., 1999).

برای حل مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک باید به این ترتیب عمل کنیم (Ibid):

- تعیین نوع جمعیت اولیه و ماتریس (کروموزوم) قابل تخصیص به آن؛
- ساختن جمعیت اولیه به صورت تصادفی به طوری که در محدودیت‌های مسئله صدق کند؛
- محاسبه مقدار تابع هدف برای هر جزء از جمعیت اولیه؛

- انتخاب اعضای جمعیت براساس یکی از مدل‌های موجود مانند نخبه‌گرایی و غیره به‌منظور تولید نسل بعد جمعیت؛

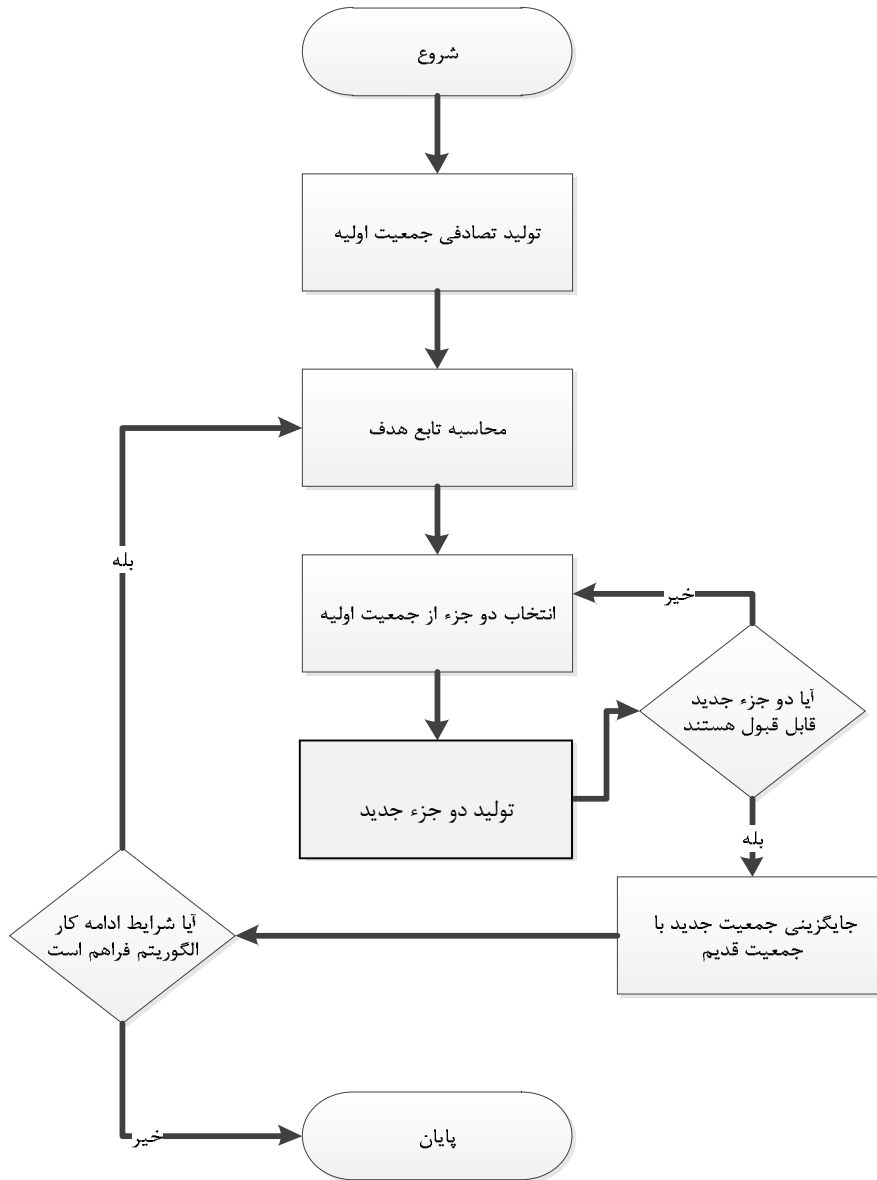
- استفاده از اپراتورهای اصلی الگوریتم تقاطع¹ و جهش² به‌منظور تولید نسل‌های بعدی؛

- تکرار فرایند حل تا زمان متوقف شدن شرایط ادامه الگوریتم؛

شکل شماره یک نحوه کار الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد.

خوان پورتا³ و دیگران (2013) یک مدل با پردازش هسته‌های موازی را برای الگوریتم ژنتیک در تحلیل کاربری اراضی پیشنهاد داده‌اند که سرعت پردازش در الگوریتم را بسیار بالاتر می‌برد. با اینکه تعداد کاربری‌ها فقط چهار کاربری است، قوت آن در این است شکل خاصی را برای اراضی قابل تخصیص استفاده نکرده است؛ به این معنا که شکل قرارگیری کاربری در اراضی به‌صورت یکپارچه بوده و از شکل خاصی به‌عنوان پارسل مرجع استفاده نشده و فقط تابع هدف تناسب کاربری در این مدل به‌کار برده شده است. کای چائو⁴ و دیگران (2012) از فرایند الگوریتم ژنتیک برای بررسی میزان اثربخشی یک طرح اجراشده در جنوب شرق پکن در محدوده شهر جدید تانگژو با پنج پهنه فضای سبز، تجاری، مسکونی، صنعتی و توسعه‌نیافته استفاده کرده‌اند. معیار مقایسه براساس ماکزیمم کردن مقدار تولید ناخالص داخلی حاصل از پهنه‌ها تخمین‌زده‌شده برای سال 2020م، ماکزیمم کردن دسترسی‌ها در مجموعه طراحی، بهینه کردن استقرار کاربری‌ها در تناسب با وضعیت زمین و یکپارچه‌سازی پهنه‌هاست. بر این اساس، مدل اجراشده طرح تفاوت زیادی با طرح بهینه حاصل از حل مدل دارد. این مسئله بیانگر آن است که ارزش‌افزوده اراضی برآوردشده برای طرح حاصل از فرایند الگوریتم ژنتیک اختلاف بسیار فاحشی با طرح اجراشده دارد.

1. Cross-Over
2. Mutation
3. Juan Porta
4. K. Cao



شکل 1 نحوه کار الگوریتم ژنتیک
(Source: Juan Porta Et al., 2013)

2-6- الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر

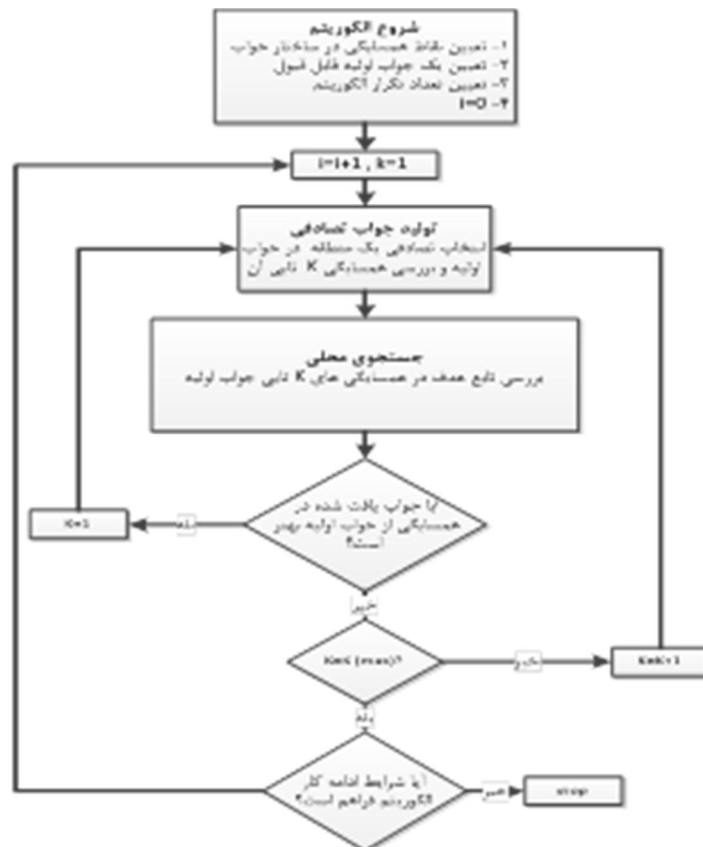
الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری¹ بهینه‌سازی است که در سال 1997م هسنس و ملادنویچ² (2001) آن را توسعه دادند. در این روش با تغییر یک یا چند جزء از اجزای جواب در هر مرحله، تابع هدف جواب‌های تغییر یافته که از نظر برداری در همسایگی جواب‌های قبلی هستند، محاسبه، و در صورت بهبود در مقدار تابع هدف، جواب‌های جدید را با جواب‌های قبلی جایگزین می‌کند. شکل شماره دو نحوه کار الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر را نشان می‌دهد (Adibi Et al., 2010).

بر اساس یافته‌های نویسندگان مقاله، فقط در یک مورد از الگوریتم جست‌وجوی همسایگی برای تجزیه و تحلیل تناسب کاربری اراضی به‌منظور انتخاب بهترین مکان برای احداث توربین‌های بادی با تابع هدف کاهش هزینه‌های تولید انرژی استفاده شده است (Yin, 2012). از سوی دیگر، از الگوریتم‌های ترکیبی جست‌وجوی همسایگی متغیر و هوش جمعی ذرات برای تعیین چیدمان یک مرکز تولیدی در مکان‌های رستری با تابع هدف کاهش حمل‌ونقل بین واحدها درون مرکز تولید استفاده شده است (Liu & Abraham, 2007).

3- معرفی محدوده مورد مطالعه

دهکده دانایی و پارک علم و فناوری خلیج فارس استان بوشهر یک منطقه ویژه علم و فناوری شامل دانشگاه‌ها و شرکت‌های دانش‌بنیان است. برپایه برنامه‌ریزی فیزیکی مجموعه منطقه ویژه علم و فناوری خلیج فارس استان بوشهر، این محدوده شامل چهارده پهنه با مساحت‌های مختلف است. به‌منظور استفاده بهینه از قابلیت‌های الگوریتم پیشنهادی در این مقاله، ابتدا اراضی 640 هکتاری منطقه ویژه علم و فناوری بوشهر به‌صورت پارسل‌های 250 متر در 250 متر (حدود 6 هکتار) تقسیم‌بندی شد. روش پهنه‌بندی کاربری‌ها در مجموعه منطقه ویژه علم و فناوری خلیج فارس استان بوشهر - همان‌طور که پیش از این نیز بیان شد - به‌صورت تهیه یک مدل تصمیم‌گیری چندهدفه و حل مدل از طریق یک الگوریتم تلفیقی ژنتیک - جست‌وجوی همسایگی متغیر انجام شده است.

1. Meta-Heuristic
2. Hansen & Mladenovic



شکل 2 نحوه کار الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر
(Source: Adibi, 2010)

4- مدل پیشنهادی تناسب کاربری

با توجه به اینکه مدل‌های تجزیه و تحلیل تناسب کاربری عموماً از معیارهای مربوط به اراضی و رابطه آن با نوع کاربری‌های موجود براساس دو مسئله مطلوبیت تصمیم‌گیرندگان و دسترسی به اطلاعات استفاده می‌کنند (Cao Et al., 2012; Juan Porta Et al., 2013; Huang Et al., 2012)، مدل تجزیه و تحلیل کاربری اراضی در این مقاله برپایه سه تابع هدف به این شرح شکل گرفته است:

- اولین تابع هدف براساس محدودیت‌های تخصیص کاربری به اراضی طرح شکل گرفته است. این تابع هدف محدودیت‌های مربوط به اراضی طرح برای هر کاربری را مشخص می‌کند. برای تعیین این تابع هدف از یک مدل تلفیقی تحلیل سلسله‌مراتبی و دیمتل برای هر کاربری استفاده شده است و در واقع مدل تلفیقی به کار گرفته شده برای این تابع هدف اوزان شاخص‌هایی را تعیین می‌کند که در جانمایی هریک از کاربری‌ها نقش دارند. رابطه 3 این تابع هدف را در مدل نشان می‌دهد.

- دومین تابع هدف بر مبنای کاهش حجم ترافیک در مجموعه طراحی پیشنهاد شده است. به این مفهوم که در ارتباط متقابل میان کاربری‌ها در مجموعه طرح، کاربری‌هایی که بیشترین ارتباط را دارند، در کنار یکدیگر و کاربری‌هایی که ارتباط کمتری دارند، با فاصله بیشتر از هم مکان‌یابی شوند (جدول 1). به همین منظور، ابتدا ارتباطات فضایی موجود میان کاربری‌ها تعیین، و سپس تابع هدفی مبتنی بر بهینه‌سازی میزان ارتباطات میان این کاربری‌ها تعریف شد. رابطه 4 تابع هدف حداقل کردن حجم ترافیک در سایت طراحی را نشان می‌دهد.

جدول 1 ارتباط فضایی میان کاربری‌ها

شماره پهنه	نام پهنه	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	پهنه نفت و گاز و پتروشیمی	■												
2	پهنه فناوری زیستی و دریایی		■											
3	پهنه دانشگاهی			■										
4	پهنه فناوری اطلاعات				■									
5	پهنه سلامت					■								
6	پهنه ورزشی						■							
7	پهنه گردشگری							■						
8	تأسیسات								■					
9	شهرک مسکونی و خوابگاه									■				
10	ناحیه خدمات شهری مرکزی										■			
11	ناحیه خدمات صنعتی مرکزی											■		
12	مجموعه مدیریتی مرکزی												■	
13	پایانه مرکزی													■

(منبع: نگارندگان)

جدول 2 راهنمای جدول 1

همجواری ضرورت دارد	نزدیکی ضرورت دارد	دوری و نزدیکی مهم نیست	عدم همجواری ضرورت دارد	فاصله زیاد ضرورت دارد

- سومین تابع هدف نیز وظیفه یکپارچه‌سازی کاربری‌ها را در مجموعه سایت نشان می‌دهد. این تابع هدف می‌کوشد سلول‌های کنار یکدیگر دارای کاربری یکسانی باشند. رابطه 5 این تابع هدف را در مدل نشان می‌دهد. بر این اساس، مدل تجزیه و تحلیل تناسب کاربری در این مقاله به صورت مدل تصمیم‌گیری چندهدفه به شکل یک مدل برنامه‌ریزی اعداد صحیح به این صورت است:

$$Max\ Suitability = \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L S_{rcl} W_{kl} X_{rck}$$

$$Min\ Distance = \sum_{k=1}^K f_{kk'} d_{kk'}$$

$$Max\ Compactness = \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C \sum_{k=1}^K X_{rck} C_{rck}$$

$$\sum_{k=1}^K x_{rck} = 1 \quad C_{rck} = X_{i-1j-1k} + X_{ij-1k} + X_{i+1j-1k} + X_{i-1jk} + X_{i+1jk} + X_{i-1j+1k} + X_{ij+1k} + X_{i+1j+1k} \quad (7)$$

$$d_{kk'} = \sqrt{\sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C \sum_{r'=1}^R \sum_{c'=1}^C (r-r')^2 + (c-c')^2 x_{rck} x_{r'c'k'}} \quad (8)$$

همان‌طور که توضیح داده شد، روابط 3، 4 و 5 توابع هدف مدل را نشان می‌دهند. رابطه 6 این محدودیت را بیان می‌کند که به هر پارسل در محیط طراحی فقط می‌توان یک کاربری اختصاص داد. رابطه 7 رابطه یکپارچه‌سازی مدل است که در آن برای هشت خانه اطراف هر پارسل در مدل که کاربری یکسانی با پارسل مورد بررسی داشته باشند، یک امتیاز به امتیازهای پارسل اضافه خواهد کرد. در واقع، تابع هدف سوم بر این اساس محاسبه خواهد شد. رابطه 8 مقدار فواصل کاربری‌ها را محاسبه می‌کند. تابع هدف رابطه 4 بر این اساس محاسبه می‌شود.

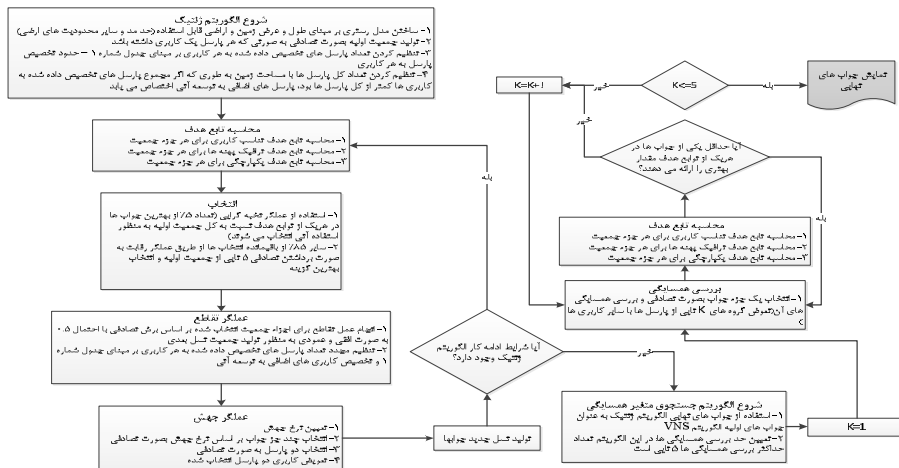


4-1- شاخص‌های اثرگذار در موقعیت کاربری‌ها

به منظور تعیین شاخص‌های اثرگذار در نوع قرارگیری کاربری‌ها در مجموعه طراحی براساس فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، از یک گروه متخصص برای تعیین شاخص‌ها و وزن‌دهی به آن‌ها استفاده شده است. فهرست نهایی شاخص‌های اثرگذار بر طرح شامل این موارد است: سطح آب زیرزمینی، قرارگیری مناسب نسبت به باد غالب، فاصله از سواحل غربی و شرقی، شیب و جهت‌گیری آن، نوع خاک، میزان پوشش گیاهی و غیره. شکل شماره چهار وضعیت پارس‌های طراحی را از نظر تعدادی از شاخص‌های روش تحلیل سلسله‌مراتبی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی نشان می‌دهد.

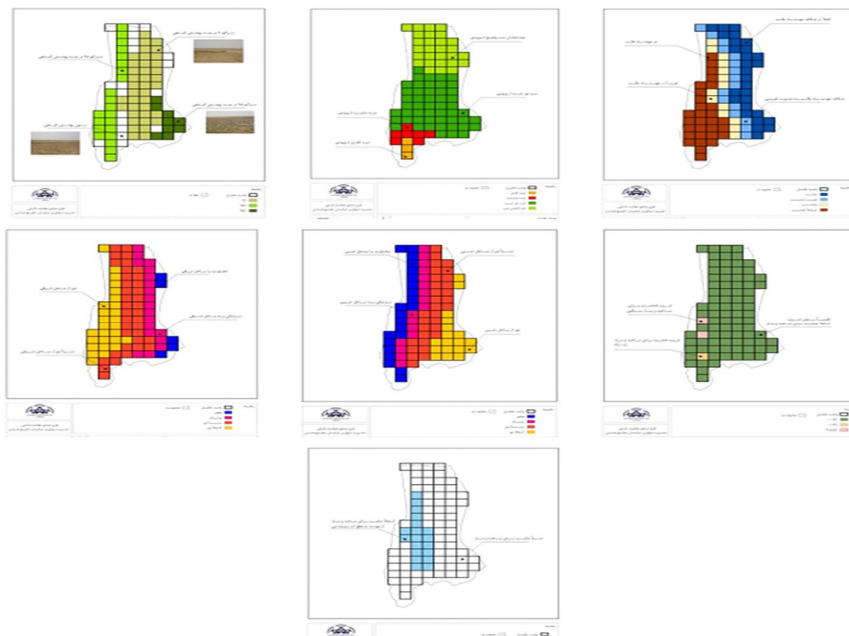
5- الگوریتم حل مسئله

همان‌طور که بیان شد، مسئله این مقاله از نوع مسائل با مرتبه زمانی غیرچندجمله‌ای است؛ از این‌رو نویسندگان یک الگوریتم تلفیقی جدید بر مبنای الگوریتم ژنتیک و الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر را برای حل آن پیشنهاد می‌دهند. فرایند حل این مسئله در شکل شماره سه آمده است. برای حل مدل، یک کد نرم‌افزاری در محیط نرم‌افزار Matlab R2010a براساس الگوریتم توضیح داده شده نوشته شده است.



شکل 3 الگوریتم حل مسئله

(منبع: نگارندگان)



شکل 4 وضعیت پارسل‌های طراحی‌شده اراضی طرح نسبت به شاخص‌های مدل تحلیل سلسله‌مراتبی (منبع: نگارندگان)

6- نتایج

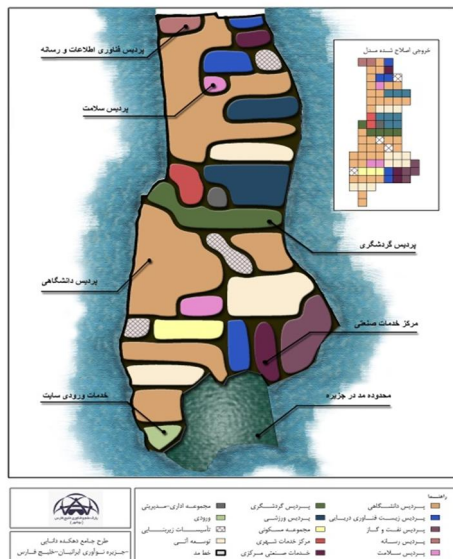
به منظور حل مسئله مدل‌سازی‌شده (مطالعه موردی مقاله) در بندهای قبل و با استفاده از الگوریتم توسعه داده‌شده در شکل شماره سه، از یک کد کامپیوتری در محیط MATLAB-R2010a استفاده شد. با در نظر گرفتن محدودیت‌های سخت‌افزاری و برای پرهیز از زمان بسیار زیاد حل مسئله، جمعیت ابتدایی الگوریتم ژنتیک معادل 100، و تعداد 1000 تکرار به عنوان شرایط خاتمه الگوریتم در نظر گرفته شد. (حداقل 101,000 ترکیب مختلف چیش کاربری‌ها بررسی شد. از این میان 100,000 جواب متعلق به الگوریتم ژنتیک و حداقل 1000 جواب متعلق به جست‌وجوی همسایگی متغیر خواهد بود.) بهترین جواب از میان چیش‌های مختلف کاربری‌ها براساس الگوریتم یادشده استخراج شد (جدول 3) و بر این اساس، مقدار هر یک از توابع هدف به دست آمد (ر.ک: جدول 3).

جدول 3 نتایج اجرای الگوریتم

تعداد تکرار	تابع هدف 1	تابع هدف 2	تابع هدف 3
1000	-13.121	51	25.021

(منبع: نگارندگان)

به منظور بهینه کردن طرح پهنه‌بندی اراضی پارک علم و فناوری خلیج فارس استان بوشهر و آماده‌سازی طرح پهنه‌بندی برای طراحی شبکه معابر روی آن، نقشه‌های بهترین گزینه در محیط نرم‌افزار GIS(10.1) به صورت شکل شماره پنج درآمد.



شکل 5 طراحی گزینه پهنه‌بندی اراضی پارک علم و فناوری خلیج فارس استان بوشهر براساس الگوریتم تبیین شده

(منبع: نگارندگان)

همان‌طور که مشاهده می‌شود، گزینه‌های نهایی پهنه‌بندی اراضی از میان حداقل 101000 گزینه‌ای که به وسیله فرایند الگوریتم پیشنهادی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، به‌عنوان بهترین جواب انتخاب شده‌اند. با اینکه در هر مرحله جواب‌های تولیدشده در فرایند الگوریتم پیشنهادی تصادفی است، در پیشرفت الگوریتم از نسلی به نسل دیگر حداقل با ترکیب

جواب‌های بهتر یک نسل، به جواب‌های بهتری در نسل‌های آینده خواهد رسید. این مطلب و فرایند حل مدل برنامه‌ریزی توسط کامپیوتر و بررسی وضعیت‌های مختلف چینش کاربری‌ها در اراضی طرح از یک سو برتری این روش را بر روش‌های سنتی نمایان می‌کند و از سوی دیگر می‌تواند به‌عنوان یک سیستم پشتیبان تصمیم، کاربر انسانی را در برنامه‌ریزی یاری کند.

7- تحقیقات آینده

مسئله‌های برنامه‌ریزی چندهدفه باینکه با روش‌هایی مانند برنامه‌ریزی آرمانی و برنامه‌ریزی سازشی حل می‌شوند، این‌گونه روش‌ها فقط بخش خاصی از مجموعه جواب‌ها را تولید می‌کنند. به این مفهوم که به توابع هدف به‌صورت جبرانی نگاه می‌شود؛ یعنی کاهش ارزش یک تابع هدف ممکن است توسط دیگر توابع هدف جبران شود و جواب همچنان خوب تلقی شود؛ اما با توجه به اینکه روش حل پیشنهادشده در مقاله قابلیت تبدیل شدن به سیستم پشتیبان تصمیم را دارد، لازم است آلترناتیوهای بیشتری از فضای حل به‌منظور به‌وجود آوردن داده‌های تصمیم‌گیری ایجاد کند. بر این اساس، یکی از زمینه‌های مطالعات آینده ارزیابی پارتویی توابع هدف خواهد بود. به این مفهوم که بهترین جواب‌ها در هریک از توابع هدف مشخص شود و آن‌گاه براساس آثاری که هر تابع هدف ایجاد می‌کند، بهترین جواب طی یک فرایند تصمیم‌گیری انتخاب شود. همچنین، با توجه به محدودیت‌های موجود در پردازش کامپیوتری اطلاعات و بزرگ‌بودن نسبی مسئله، نگارندگان از فرایند پارسل‌بندی قطعات در محدوده طراحی استفاده کردند؛ اما می‌توان به‌جای پارسل‌بندی محدوده اراضی از تکنیک‌های برنامه‌نویسی کامپیوتری برای تعیین نوع شکل‌های هندسی پهنه‌ها (قرار گرفتن در راستای افقی یا عمودی) استفاده کرد.

8- منابع

- اصغرپور، محمدجواد، تصمیم‌گیری گروهی و نظریه بازی‌ها با نگرش تحقیق در عملیات، تهران: انتشارات دانشگاه تهران، 1382.
- _____ تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره، چ 6، تهران: انتشارات دانشگاه تهران، 1387.

- Asgharpour, M.J., *Group Decision Making and Game Theory in Operations Research*, Tehran: Tehran University Press, 2003. [In Persian]
- Adibi, M.A., M. Zandieh & M. Amiri, "Multi-objective Scheduling of Dynamic Job Shop Using Variable Neighborhood Search", *Expert Systems with Applications*, No. 37 (1), Pp. 282-287. Doi: 10.1016/j.eswa.2009.05.001. 2010.
- _____ *Multiple Criteria Decision Making*, Tehran: Tehran University Press, 2008. [In Persian]
- Al-Yahyai, S., Y. Charabi, A. Gastli & A. Al-Badi, "Wind Farm Land Suitability Indexing Using Multi-Criteria Analysis", *Renewable Energy*, No. 44, Pp. 80-87, Doi: 10.1061/40976(316)481, 2012.
- Bagdavičiute, I. & J. Valiunas, "GIS-Based Land Suitability Analysis Integrating Multi-criteria Evaluation for the Allocation of Potential Pollution Sources", *Environmental Earth Sciences*, Pp. 1-16, Article in Press, Doi: 10.1007/s12665-012-1869-7, 2012.
- Banai-Kashani, R., "A New Method for Site Suitability Analysis: The Analytic Hierarchy Process", *Environmental Management*, No. 13 (6), Pp. 685-693. Doi: 10.1007/BF01868308, 1989.
- Banai, R., "Fuzziness in Geographic Information Systems: Contributions from the Analytic Hierarchy Process", *International Journal of Geographical Information Systems*, No. 7, Pp. 315- 329, Doi: 10.1080/02693799308901964, 1993.
- Bennett, David A., Greg A. Wade, Marc P. Armstrong, "Exploring the Solution Space of Semi-structured Geographical Problems Using Genetic Algorithms", *Transactions in GIS* *Transactions in GIS*, No. 3(1), Pp. 51-71, Doi: 10.1111/1467-9671.00006, 1999.

- Cao, K., M. Batty, B. Huang, Y. Liu, L. Yu & J. Chen, "Spatial Multi-Objective Land-use Optimization: Extensions to the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II", *International Journal of Geographic Information Science*, No. 25 (12), Pp. 1949-1969, 2011.
- Cao, K., B. Huang, S. Wang & H. Lin, "Sustainable Land Use Optimization Using Boundary-based Fast Genetic Algorithm Computers", *Environment and Urban Systems*, No. 36 (3), Pp. 257-269. Doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2011.08.001, 2012.
- Carver, S.J., "Integrating Multi-criteria Evaluation with Geographical Information Systems", *International Journal of Geographical Information Systems*, No. 5 (3), Pp. 321- 339. Doi: 10.1080/02693799108927858, 1991.
- Cengiz, T. & C. Akbulak, "Application of Analytical Hierarchy Process and Geographic Information Systems in Land-use Suitability Evaluation: A Case Study of Dümrek Village (Çanakkale, Turkey)", *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, No. 16 (4), Pp. 286-294, Doi: 10.1080/13504500903106634, 2009.
- Dai, F.C., C.F. Lee, X.H. Zhang, "GIS-based Geo-environmental Evaluation for Urban Land-use Planning: A Case Study", *Engineering Geology*, No. 61 (4), Pp. 257-271, Doi: 10.1016/S0013-7952(01)00028-X, 2001.
- Duh, J. & D.G. Brown, "Knowledge-informed Pareto Simulated Annealing for Multi-objective Spatial Allocation", *Computers, Environment and Urban Systems*, No.31 (3), Pp. 253-281, 2007.
- Ferretti, V., "Multi-criteria Spatial Decision Support Systems and Land Suitability Analysis: A Methodological Proposal for the Location of a Waste Landfill in the Province of Turin [Multi-criteria Spatial Decision

- Support Systems e Land Suitability Analysis: Unaproposta Metodologica per la Localizzazione di Unadiscarica di Rifiutinella Provincia di Torino]", *Geoingegneria Ambientale e Mineraria*, No. 134 (1), Pp. 13-38, 2011.
- Gorsevski, P.V., K.R. Donevska, C.D. Mitrovski & J.P. Frizado, "Integrating Multi-criteria Evaluation Techniques with Geographic Information Systems for Landfill Site Selection: A Case Study Using Ordered Weighted Average", *Waste Management*, 32 (2), Pp. 287-296. Doi: 10.1016/j.wasman.2011.09.023, 2012.
 - Hansen, P. & N. Mladenovic, "Variable Neighborhood Search: Principles and Applications", *European Journal of Operations Research*, Vol. 130, Pp. 449-467, Doi: 10.1016/S0377-2217(00)00100-4, 2001.
 - Hopkins, L.D. "Methods for Generating Land Suitability Maps: A Comparative Evaluation", *Journal of the American Planning Association*, 43: 4, Pp. 386- 400, Doi: 10.1080/01944367708977903, 1977.
 - Hossain, M.S. & N.G. Das, "GIS-based Multi-criteria Evaluation to Land Suitability Modelling for Giant Prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) Farming in Companigonj Upazila of Noakhali, Bangladesh", *Computers and Electronics in Agriculture*, 70 (1), pp. 172-186. Doi: 10.1016/j.compag.2009.10.003, 2010.
 - Huang, K., X. Liu, X. Li, J. Liang & S. He, "An Improved Artificial Immune System for Seeking the Pareto Front of Land-use Allocation Problem in Large Areas", *International Journal of Geographical Information Science*, No. 27 (5), Pp. 922-946, 2013.
 - Juan Porta et al., "High Performance Genetic Algorithm for Land Use Planning", *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 37, Pp. 45-58, Doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2012.05.003, 2013.

- Liu, H. & A. Abraham, "A Hybrid Fuzzy Variable Neighborhood Particle Swarm Intelligence for Solving Quadratic Assignment Problems", *Journal of Universal Computer Science*, Vol. 13, Issue. 6, Pp. 1309-1331. Doi: [10.3217/jucs-013-09-1309](https://doi.org/10.3217/jucs-013-09-1309), 2001.
- Liu, Y. & Z. Lan, "Automatic Districting of Land Consolidation Based on Multi-objective Tabu Search Algorithm", *Wuhan Daxue Xuebao (XinxiKexue Ban)/ Geomatics and Information Science of Wuhan University*, Vol. 35, Issue. 9, Pp. 1129- 1133, 2010.
- Liu, X., X. Li, X. Shi, K. Huang & Y. Liu, "A Multi-type Ant Colony Optimization (MACO) Method for Optimal Land Use Allocation in Large Areas", *International Journal of Geographical Information Science*, No. 26 (7), Pp. 1325-1343. Doi: [10.1080/13658816.2011.635594](https://doi.org/10.1080/13658816.2011.635594), 2012.
- Liu, Y., Y. Xia, D. Liu & X. Hong, "Optimization of Land Use Zoning Based on Goal Programming and Simulated Annealing", *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, No. 37 (7), Pp. 762-765, 2012.
- Mahalakshmi, P., K. Ganesan & V. Venkatasubramanian, "DMTIOLA: Decision making Tool for Identification of Optimal Location for Aquaculture Farming Development", *Aquaculture International*, 20 (5), Pp. 911-925, Doi: [10.1007/s10499-012-9516-6](https://doi.org/10.1007/s10499-012-9516-6), 2012.
- Malczewski, J., T. Chapman, C. Flegel, D. Walters, D. Shrubsole & M.A. Healy, "GIS Multi-criteria Evaluation with Ordered Weighted Averaging (OWA): Case Study of Developing Watershed Management Strategies", *Environment and Planning A*, No. 35 (10), Pp. 1769-1784, Doi: [10.1068/a35156](https://doi.org/10.1068/a35156), 2003.
- Malczewski, J., "GIS-based Land-use Suitability Analysis: A Critical Overview", *Progress in Planning*, No. 62 (1), Pp. 3- 65, Doi:[10.1016/j.progress.2003.09.002](https://doi.org/10.1016/j.progress.2003.09.002), 2004.

- _____ "GIS-based Multi-criteria Decision Analysis: A Survey of the Literature", *International Journal of Geographical Information Science*, No. 20 (7), Pp. 703-726, Doi: 10.1080/13658810600661508, 2006.
- _____ "Ordered Weighted Averaging with Fuzzy Quantifiers: GIS-based Multi-criteria Evaluation for Land-use Suitability Analysis", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8 (4), Pp. 270-277. Doi: 10.1016/j.jag.2006.01.003, 2006.
- Marinoni, O., "A Discussion on the Computational Limitations of Outranking Methods for Land-use Suitability Assessment", *International Journal of Geographical Information Science*, 20 (1), Pp. 69-87, Doi: 10.1080/13658810500287040, 2006.
- Mendas, A. & A. Delali, "Integration of Multi-criteria Decision Analysis in GIS to Develop Land Suitability for Agriculture: Application to Durum Wheat Cultivation in the Region of Mleta in Algeria", *Computers and Electronics in Agriculture*, No. 83, Pp. 117-126, Doi: 10.1016/j.compag.2012.02.003, 2012.
- Qian, M., L. Pu, M. Zhu & L. Weng, "Spatial Optimization Method for Sustainable Multi-objective Land Use Allocation" in *Geoinformatics, 2010 18th International Conference on*, Pp. 1-6, Doi: 10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567520, 2012.
- Rinner, C. & J. Malczewski, "Web-enabled Spatial Decision Analysis Using Ordered Weighted Averaging (OWA)", *Journal of Geographical Systems*, No. 4 (4), Pp. 385-403, Doi: 10.1007/s101090300095, 2002.
- Saaty, T.L., *The Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw Hill, International, Translated to Russian, Portuguese, and Chinese, Revised editions, Paperback (1996, 2000), Pittsburgh: RWS Publications, 1980.

- _____ "Fundamentals of the Analytic Network Process-dependence and Feedback in Decision-making with a Single Network", *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, Vol. 13, Issue2, Pp. 129-157, Doi: 10.1007/s11518-006-0158-y, 2004.
- _____ "Decision Making with the Analytic Hierarchy Process", *International Journal of Services Sciences*, Vol. 1, No. 1, Pp. 83- 98, 10.1504/IJSSci.2008.01759, 2008.
- Sahnoun, H., M.M. Serbaji, B. Karray & K. Medhioub, "GIS and Multi-criteria Analysis to Select Potential Sites of Agro-industrial Complex", *Environmental Earth Sciences*, No. 66 (8), Pp. 2477-2489, Doi: 10.1007/s12665-011-1471-4, 2012.
- Stewart, T.J., R. Janssen & M. Van Herwijnen, "A Genetic Algorithm Approach to Multi-objective Land Use Planning", *Computers and Operations Research*, No. 31 (14), Pp. 2293- 2313, Doi: 10.1016/S0305-0548(03)00188-6, 2004.
- Yang, J.L. & G.H. Tzeng, "An Integrated MCDM Technique Combined with DEMATEL for a Novel Cluster-weighted with ANP Method", *Expert Systems with Applications*, No. 38 (3), Pp. 1417-1424, Doi: 10.1016/j.eswa.2010.07.048, 2011.
- Yin, P.Y. & T.Y. Wang, "A Grasp-VNS Algorithm for Optimal Wind Turbine Placement in Wind Farms", *Renewable Energy*, Vol. 48, Pp. 489-498, Doi: 10.1016/j.renene.2012.05.020, 2012.
- Zhou, J. & D.L. Civco, "Using Genetic Learning Neural Networks for Spatial Decision Making in GIS", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62 (11), Pp. 1287-1295, 1996.