



نسخه از دور

GIS ایران



سال دوم، شماره سوم، پاییز ۱۳۸۹
Vol.2, No.3, Autumn 2010

سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

۴۲-۲۱

بهینه‌سازی مکانی فرایند طراحی و برنامه‌ریزی شهری به کمک عملگرهای ابتکاری توسعه داده شده در قالب الگوریتم تکاملی چندهدفه NSGA-II

محمد رضا رجیبی^۱، علی منصوریان*^۲، عباس علیمحمدی سراب^۲، محمد طالعی^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲. استادیار گروه GIS، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸۹/۶/۲۴

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۲/۲۸

چکیده

بهره‌گیری از روش‌های امروزی برای بهینه‌سازی فرایند برنامه‌ریزی شهری می‌تواند منجر به حل بسیاری از مسائل پیچیده‌ای شود که تصمیم‌گیرندگان و تحلیل‌گران امور شهری با آن مواجه‌اند. الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه را می‌توان با توجه به گستردگی عوامل درگیر با امور شهری، به عنوان ابزاری مناسب در این زمینه در نظر گرفت. اما با توجه به ماهیت مکانی بسیاری از امور مرتبط با برنامه‌ریزی شهری، استفاده از الگوریتم‌های تکاملی که عموماً روابط مکانی و منطقی موجود میان عوارض را در جهان واقعی نادیده می‌گیرند و صرفاً به بهینه‌سازی اطلاعات توصیفی عوارض می‌پردازند، نمی‌تواند به حل درست و مناسب مسائل پیچیده شهری بینجامد. در این مقاله با ارائه‌ی مدلی نو و ابتکاری، راه‌حلی مؤثر برای به‌کارگیری الگوریتم‌های تکاملی در انواع مسائل مکان‌محور، به گونه‌ای که امکان تحلیل‌های مکانی نیز وجود داشته باشد، ارائه شده است. این مدل ابتدا با استفاده از ساختار جدید سلولی-درختی، فضای جست‌وجو را کدگذاری می‌کند و سپس با استفاده از عملگرهای ابتکاری ادغام و جهش مکانی در قالب جست‌وجویی تکاملی به ارائه راه‌حل‌های مناسب می‌پردازد. مدل ابتکاری تکوین و توسعه‌یافته براساس الگوریتم NSGA-II برای طراحی و برنامه‌ریزی به منظور ایجاد شهری به‌کار گرفته شده و نتایج و بررسی‌های حاصل از آن در این مقاله ارائه گردیده است.

کلیدواژه‌ها: برنامه‌ریزی شهری، تصمیم‌گیری چندهدفه، الگوریتم NSGA-II، GIS، بهینه‌سازی مکانی.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، تقاطع خیابان ولی‌عصر با میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده نقشه‌برداری تلفن: ۸۸۷۸۶۲۱۲

۱- مقدمه

طراحی و برنامه‌ریزی شهری از مؤلفه‌های تعیین‌کننده بسیار تأثیرگذار در مدیریت بهینه شهری است. امروزه برای تأمین نیازهای شهروندان مختلف و مهیاسازی فضای شهری مناسب، بایستی اهداف و معیارهای گوناگون و گاه ناسازگاری را در نظر گرفت؛ و برآورده ساختن همه این اهداف و معیارها به گونه‌ای که پاسخگوی تمامی نیازهای موجود باشند کاری است بس پیچیده (Balling, 2004). از طرفی هم برای برنامه‌ریزی به‌منظور رسیدن به شرایط ایده‌آل، تحلیل‌گران و مدیران می‌بایست جوانب و شرایط مختلف را ارزیابی کنند تا بتوانند دست به تصمیم‌گیری‌هایی مفید و کارا بزنند. اما گستردگی مسائل مربوط به جوامع مدرن امروزی و همچنین پیچیدگی آنها، شرایط تصمیم‌گیری را بسیار سخت و دشوار ساخته است. با پیشرفت تکنولوژی و ظهور فناوری‌های نو، استفاده از روش‌های جدید و توجه به آنها در برنامه‌ریزی برای امور شهری ضرورت یافت (Feng 1999, Stewart 2004). با توجه به ماهیت مسائل مرتبط با طراحی شهری و دخالت داشتن معیارها و اهداف مختلف و ناسازگار در این مسائل، الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌توانند به‌عنوان ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری در امور به کار روند (Zhu, 1994).

الگوریتم‌های تکاملی، از روش‌های بهینه‌سازی مدرن‌اند که قابلیت‌های بسیاری در ارائه جواب‌های مناسب برای مسائل مختلف و پیچیده در زمینه‌های گوناگون دارند. این الگوریتم‌ها که دارای مشتقات بسیاری نیز هستند همگی از اصل بقای بهترین‌های داروین^۱ پیروی می‌کنند و با مدل‌سازی فرایند تکامل در طبیعت، در پی رسیدن به بهترین شرایطاند (Holland, 1975). الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه نوعی از الگوریتم‌های تکاملی‌اند که برای بهینه‌سازی مواردی که در آنها نمی‌توان همه معیارها و دیدگاه‌ها را در قالب تابع هدفی واحد گنجانند، به کار گرفته می‌شوند

(Deb et al., 2002). با توجه به پیچیدگی و تعدد روابط موجود در برنامه‌ریزی شهری، مدل‌سازی آنها با استفاده از تابع منحصر به فرد و مستقل، نمی‌تواند منجر به بهینه‌سازی کارا شود. مثلاً برای رسیدن به برنامه‌ریزی و طراحی مناسب به‌منظور اختصاص کاربری‌های اراضی و همچنین راه‌ها و شبکه ارتباطی شهری، به‌کارگیری یک تابع هدف جوابگو نخواهد بود، چرا که در بسیاری از مواقع دو مقوله کاربری و شبکه ارتباطی در جهت عکس یکدیگر بهینه‌سازی می‌شوند (Lowry, 2009).^۱ الگوریتم NSGA-II^۲ از معروف‌ترین و پرکاربردترین الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه است که نخستین بار Deb و همکاران (۲۰۰۲) آن را پیشنهاد کردند. بررسی‌ها نشان از آن دارند که عدم نیاز الگوریتم NSGA-II به پارامترهای اضافی و سرعت محاسباتی بالای آن سبب محبوبیت این الگوریتم و افزایش به‌کارگیری آن در پژوهش‌های مختلف شده است. به‌علاوه استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی در مدیریت و برنامه‌ریزی شهری، با مسائل مختلف مکان‌محور سروکار دارد. به‌همین دلیل استفاده از سیستم‌های اطلاعات مکانی (GIS)، می‌تواند گزینه‌ای بسیار مناسب برای مدل‌سازی روابط مکانی موجود در برنامه‌ریزی شهری باشد (Xiao, 2006). GIS با اتصال اطلاعات مکانی و توصیفی و مهیاسازی امکانات نرم‌افزاری قدرتمند، می‌تواند نقش و تأثیر بسیار مفیدی در بهینه‌سازی اهداف مکان‌محور برنامه‌ریزی و طراحی شهری داشته باشد. از آنجا که کاربردهای مرتبط با اطلاعات مکانی معمولاً با حجم وسیعی از اطلاعات پردازش‌ها مواجه‌اند و فضایی که بایستی بهینه‌سازی شود نیز گستردگی زیادی دارد، استفاده از الگوریتمی سریع می‌تواند بسیار مورد توجه قرار گیرد. با توجه به موارد ذکر شده، استفاده از الگوریتم NSGA-II در کارکردهای مکانی می‌تواند مزایای دوچندانی داشته

1. Darwin

2. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II

ارتباطی بود. Stewart و همکاران (۲۰۰۴)، روش الگوریتم ژنتیک را برای برنامه‌ریزی چندهدفه کاربری اراضی استفاده کردند. هدف آنها طراحی سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای حل مسئله اختصاص کاربری‌های اراضی بود. Balling.R (۲۰۰۴)، به برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای با استفاده از الگوریتمی چندهدفه و تکاملی پرداخت. او در پژوهشی که انجام داد، ابتدا به برنامه‌ریزی جداگانه برای دو شهر Provo و Orem دست زد و با استفاده از روش چندهدفه تکاملی، پیشنهادهایی را برای تغییر کاربری‌ها و تغییر نوع خیابان‌ها مطرح و ارائه کرد. Ligmann و همکاران (۲۰۰۸)، بهینه‌سازی مکانی را برای تخصیص کاربری‌های اراضی در برنامه‌ریزی شهری به کار بردند. آنها مدل مکانی چندهدفه‌ای را ارائه کردند که سازگاری کاربری‌های مجاور را در فضای شهری بهینه‌سازی می‌کرد. افزون بر اینها Lowry و Balling (۲۰۰۹)، روشی جدید برای برنامه‌ریزی کاربری‌های اراضی و حمل و نقل ارائه کردند که موجب ایجاد هماهنگی میان برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای می‌شد. آنها این مسئله را به‌عنوان مسئله‌ای چندهدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل کردند. در روش به‌کار گرفته شده در تحقیق آنها از شبکه حمل و نقل شهری در بهینه‌سازی استفاده گردید، ولی ساختار هندسی و مکانی شبکه تحت تأثیر قرار نگرفت و تنها نوع و اطلاعات توصیفی راه‌ها تغییر یافتند.

در این تحقیق با به‌کارگیری ساختار تصمیم‌گیری چندهدفه، امکان مدل‌سازی المان‌های متنوع تأثیرگذار در محیط شهری فراهم خواهد آمد و با استفاده از الگوریتم تکاملی چندهدفه NSGA-II، به بهینه‌سازی فرایند ایجاد شهری جدید پرداخته خواهد شد. بسیاری از عواملی که بایستی در این گونه مسائل برنامه‌ریزی شهری در نظر گرفته شوند، ماهیت مکانی دارند و معمولاً در دو دسته کاربری اراضی و شبکه حمل و نقل

باشد. هدف از این پژوهش به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی به منظور تولید الگوهایی مناسب برای طراحی و برنامه‌ریزی شهری است.

در زمینه طراحی و برنامه‌ریزی شهری، تاکنون تحقیقات و پژوهش‌های بسیاری صورت گرفته است. از دهه ۱۹۹۰، راهبرد یکپارچه‌سازی تصمیم‌گیری چندمعیاره با GIS برای حل مسائل برنامه‌ریزی مکانی، مورد توجه گسترده‌ای در میان برنامه‌ریزان شهری قرار گرفت. Diamond و Wright (۱۹۸۸)، سیستم اطلاعات مکانی یکپارچه‌ای را برای برنامه‌ریزی کاربری زمین چندهدفه طراحی کردند. Duckstein و Pereira (۱۹۹۳)، در مورد ایجاد و توسعه روش تصمیم‌سازی چندمعیاره‌ای برای ارزیابی تناسب زمین بر مبنای GIS، پژوهش کردند. Heywood و همکاران (۱۹۹۵)، در زمینه ایجاد محیط مدل‌سازی چندمعیاره برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری مکانی تحقیق کردند. Zhu و همکاران (۱۹۹۶)، تلفیق GIS و سیستم‌های خبره و مدل‌های تحلیلی را برای پشتیبانی در حل مشکل و تصمیم‌سازی در برنامه‌ریزی کاربری زمین، تکوین و توسعه دادند. Dai و همکاران (۲۰۰۰)، ارزیابی‌ای محیطی-مکانی^۱ را بر مبنای GIS برای برنامه‌ریزی شهری با تلفیق تحلیل چندمعیاره انجام دادند. Joerin و همکاران (۲۰۰۱)، سیستم‌های اطلاعات مکانی و تحلیل چندمعیاره را برای ارزیابی تناسب اراضی به‌کار گرفتند. افزون بر اینها برخی از روش‌های پیشرفته، مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های ژنتیکی در فرایند ارزیابی تناسب کاربری زمین به‌کار رفته‌اند (Yao Mu, 2006).

از طرف دیگر، استفاده از تصمیم‌گیری چندهدفه تکاملی برای برنامه‌ریزی شهری طی دهه اخیر گسترش بسیاری یافته است. Lin و Feng (۱۹۹۹)، از الگوریتم ژنتیک برای تولید نقشه‌های اولیه برنامه‌ریزی شهری استفاده کردند. آنها با بهره‌گیری از روش برنامه‌سازی چندهدفه‌ای، به اختصاص یک‌سری اشیا به فضا پرداختند که شامل کاربری‌های اراضی و اتصالات

1. Geo-Environmental

مسائل بهینه‌سازی چندهدفه را می‌توان با این فرمول‌بندی نمایش داد:

$$\min f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)]^T \quad (1)$$

subject to $x \in S$

f یک بردار از m تابع هدف (f_1, f_2, \dots, f_m) است که بایستی کمینه‌سازی شود، X یک بردار از متغیرهای تصمیم‌گیری است، و S یک دسته از همه راه‌حل‌های ممکن. در مسائلی مانند موارد مذکور، گفته می‌شود که یک راه حل x' ، بر راه حل دیگر x'' چیره می‌شود، اگر و فقط اگر:

رابطه (۲)

$$\forall i f_i(x') \leq f_i(x'') \text{ and } \exists i f_i(x') < f_i(x'')$$

در بهینه‌سازی چندهدفه، همان‌طور که از نام آن مشخص است، سروکار با چند تابع هدف ناسازگار خواهد بود و معمولاً جواب بهینه یک تابع، برای سایر توابع هدف جوابی بهینه نخواهد بود. در چنین سناریویی به جای یک جواب بهینه، مجموعه‌ای از جواب‌ها بهینه خواهند بود. به این جواب‌ها Pareto-optimal می‌گویند.

برای به‌کارگیری مناسب عملگرهای انعطاف‌پذیر الگوریتم‌های تکاملی، آنها بایستی طوری تنظیم گردند تا توازن از دو جنبه برقرار شود: (۱) جست‌وجو و کشف تمامی منابع موجود؛ و (۲) بررسی فضای جست‌وجو. این دو جنبه از مهم‌ترین نیازهای الگوریتم بهینه‌سازی موفق به شمار می‌آیند (Deb et al. 2002). کشف تمامی منابع موجود ارتباط مستقیمی با احتمال انتخاب اعضای بهتر برای به‌کارگیری به عنوان والد نسل بعد دارد. اما از آنجا که نسل‌های اولیه جواب‌های بهینه چندانی ندارند، جست‌وجوی نامناسب ممکن است منجر به همگرایی پیش از موقع کل الگوریتم بشود. وقوع همگرایی زود هنگام رابطه نزدیکی با قدرت جست‌وجوی الگوریتم دارد. این موضوع به عملگرهای تغییر (ادغام جهش) که در الگوریتم تکاملی به‌کار گرفته می‌شوند، بستگی می‌یابد. NSGA-II از برخی

طبقه‌بندی می‌شوند. در بهینه‌سازی تکاملی روند طراحی شهر جدید، نادیده گرفتن شرایط مکانی، مخصوصاً در مورد عوامل مرتبط با شبکه حمل و نقل شهری، مشکلات بسیاری را همچون گسستگی شبکه و عدم پوشش مناطقی از شهر در پی خواهد داشت. ولی در بسیاری از پژوهش‌های صورت گرفته بعدی، شبکه حمل و نقل به دلیل پیچیدگی زیاد آن نادیده انگاشته شده و تنها از دیدگاه کاربری اراضی و عناصر مرتبط با آن به برنامه‌ریزی شهری پرداخته شده است. دیگر اینکه از ماهیت مکانی شبکه ارتباط شهری چشم‌پوشی گردیده و تنها خصوصیات توصیفی خطوط ارتباطی بهینه‌سازی شده است. هدف اصلی این پژوهش بهینه‌سازی فرایند یک برنامه‌ریزی شهری با در نظر گرفتن روابط مکانی در قالب توسعه عملگرهای ابتکاری در الگوریتم تکاملی چندهدفه است.

در این مقاله ابتدا مقدمه‌ای از برنامه‌ریزی شهری و کاربردهای مختلف آن، به همراه تعاریف چارچوب‌های کلی مسئله مورد مطالعه ارائه شد. در قسمت دوم مواد و روش‌های به‌کار گرفته شده تشریح گردیده و در آن ابتدا به شرح الگوریتم تکاملی چند هدفه NSGA-II پرداخته شده است. سپس با مدل‌سازی مسئله، توابع هدف معرفی شده‌اند. در انتهای بخش دوم مدل ابتکاری تکوین و توسعه داده شده برای حل مسائل مکان‌محور شهری با استفاده از عملگرهای مکانی ژنتیک توضیح داده شده است. در بخش سوم نمونه‌ای مطالعاتی، مورد بحث و بررسی و آزمون قرار می‌گیرد. در انتها نیز نتایج و پیشنهادهای بیان می‌شوند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- الگوریتم NSGA-II

الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه تکاملی در طی سال‌ها با تحولات بسیاری در حرکت به سمت تکامل مواجه بوده‌اند. نخستین مطالعات مربوط به بهینه‌سازی در مسائل چندهدفه در بسیاری از موارد به Pareto (۱۸۹۶) منسوب است. فرایند تحلیلی کلی مربوط به

ازدحام محلی ($I_{distance}$). این بدان معناست که بین دو راه‌حل با رتبه‌های مختلف، نقطه با رتبه کمتر ترجیح داده می‌شود و همچنین اگر دو نقطه دارای رتبه یکسانی بودند و به دسته‌ای واحد تعلق داشتند، آن نقطه‌ای ترجیح داده می‌شود که در محلی واقع است که تعداد نقطه‌ی کمتری در آن وجود دارد (اندازه مکعب احاطه‌کننده آن بزرگ‌تر است).

۲-۱-۱- چرخه اصلی الگوریتم NSGA-II

در ابتدا یک نسل اولیه والد به طور تصادفی به وجود می‌آید (P_0). این نسل براساس شکست‌ناپذیری مرتب می‌گردد. به هر جواب یک مقدار شایستگی اختصاص داده می‌شود (۱ بهترین سطح است). انتخاب رقابتی باینری^۵، ادغام و جهش، عملگرهایی هستند که برای ایجاد نسل فرزند با اندازه N استفاده می‌شوند (Q_0). از نسل نخست به بعد، روش الگوریتم متفاوت می‌شود.

ابتدا یک نسل ترکیبی به صورت $R_1 = P_1 + Q_1$ - که مجموعه‌ای از نسل والد و نسل فرزند است - تشکیل داده می‌شود. جمعیت R_t به اندازه $2N$ یا همان دو برابر «اندازه جمعیت» خواهد بود. سپس جمعیت R_t مطابق با درجه شکست‌ناپذیری جواب‌ها و براساس عملگر مقایسه‌ای ازدحام، مرتب و دسته‌بندی می‌شود و از آنها N جواب برتر انتخاب می‌گردد و نسل والد بعدی P_{t+1} با اندازه N تولید شود. باید توجه داشت که معیار انتخاب رقابتی باینری، بر مبنای مقایسه ازدحام (\geq_n) خواهد بود (Deb et al., 2002).

۲-۲- مدل‌سازی مسئله و معرفی توابع هدف

برای طراحی شهرک‌های مسکونی جدید، مسائل متعددی پیش روی برنامه‌ریزان و کارشناسان قرار دارد که بایستی به شکل بهینه یا به بهترین شکل ممکن

جنبه‌ها با دیگر الگوریتم‌های چندهدفه تکاملی متفاوت است (Deb, 2007):

- ۱ نیاز به پارامتر اضافی ندارد؛
- ۲ از استراتژی نخبه‌سالارانه استفاده می‌کند؛
- ۳ به جای استفاده از مقادیر پارامترهای تصمیم‌گیری، از روند سریع محاسباتی برای استراتژی موقعیتی^۱ با استفاده از مقادیر تابع هدف بهره می‌گیرد؛ و
- ۴ چارچوبی انعطاف‌پذیر را برای توسعه استراتژی‌های مختلف مانند الگوریتم‌های تکاملی پایا یا الگوریتم‌های تکاملی مبتنی بر ارجحیت، ایجاد می‌کند.

روش NSGA-II برای استراتژی موقعیتی کاملاً متفاوت است. به جای اختصاص شایستگی یا rank (رتبه) به هر جواب، روشی دومرحله‌ای در این الگوریتم به کار گرفته می‌شود. نخست، جواب‌ها براساس رتبه‌بندی شکست‌ناپذیر^۲ انتخاب می‌شوند. دوم، جواب‌هایی را که به خاطر محدودیت در اندازه جمعیت نمی‌توان به طور کلی پذیرفت، براساس معیار شلوغی مورد ارزیابی قرار می‌دهد. عمل موقعیتی، در اینجا یافتن زیرمجموعه‌ای است از جمعیت که جواب‌های کمتری در اطراف آنها وجود دارد. این عمل موقعیتی نیاز به هیچ‌گونه پارامتر اضافی نخواهد داشت.

برای برآورد تراکم جواب‌های موجود در نزدیکی نقطه‌ای مشخص در جمعیت، از فاصله متوسط (در امتداد توابع هدف) دو نقطه‌ای که در دو طرف آن نقطه (جواب) قرار دارند استفاده می‌شود. این مقدار $I_{distance}$ به عنوان برآوردی از اضلاع بزرگ‌ترین مکعب احاطه‌کننده نقطه i ، که هیچ نقطه دیگری از جمعیت در آن وجود ندارد، در نظر گرفته می‌شود (و فاصله ازدحام^۳ نام دارد).

عملگر مقایسه ازدحام (\geq_n)، فرایند انتخاب در مراحل مختلف الگوریتم را به سمت یک دسته بهینه پارتو^۴ با توزیع یکنواخت، سوق می‌دهد. فرض می‌کنیم که هر کدام از اعضای i در جمعیت دارای دو خصوصیت باشند: (۱) رتبه شکست‌ناپذیری (I_{rank})؛ و (۲) فاصله

1. Nicheing
2. Non-dominated
3. crowding distance
4. pareto-optimal front
5. Binary Tournament

اهدافی که مد نظر قرار گرفت، تأثیرات متقابل کاربری‌ها و شبکه حمل‌ونقل و پیامدهای آنها در سفرهای درون‌شهری و ترافیک و همچنین ساختار و توزیع مکانی کاربری‌ها در توابع هدف در نظر گرفته نشد. Ligmann و همکاران (۲۰۰۸) به برنامه‌ریزی شهری چندهدفه با استفاده از کاربری‌های اراضی پرداختند اما در توابعی که برای مدل‌سازی مسئله استفاده کردند، وابستگی ترافیکی کاربری‌ها در نظر گرفته نشده بود.

در مسائل برنامه‌ریزی شهری اغلب از دو زیرسیستم اصلی کاربری و حمل‌ونقل به عنوان مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار نام برده می‌شود که به شدت در تعامل و تقابل با یکدیگر هستند (Wegner, 1996). بر این اساس، در این تحقیق با توجه به نیازهای موجود دو تابع هدف جدید در نظر گرفته شدند. تابع هدف نخست به مدل‌سازی روابط و مسائل مربوط به برنامه‌ریزی کاربری اراضی^۲ می‌پردازد؛ در حالی که تابع هدف دوم برنامه‌ریزی و طراحی خطوط ارتباط شهری و راه‌ها را مدل‌سازی می‌کند^۳. فرمول‌بندی ریاضی مربوط به توابع هدف بدین صورت است:

تابع هدف نخست:

رابطه (۳)

$$\text{Maximize} \left\{ \left[\sum_{i,j,k} X_{ij}^k \left(h_{kk}^d \right) \right] + \sum_{j=1}^I \sum_{k=1}^J B_{ijk} X_{ij}^k, \forall k \right\}$$

تابع هدف دوم:

رابطه (۴)

$$\text{Maximize} \left\{ \sum_{(i,j,k)} \left[1 - \left| \left(\sum_{kk'} X_{ij}^{k'} X_{i'j'}^{kk'} \right) - a_{ij,i'j'} \right| \right] \right\}$$

قیود مسئله:

1. Multi Objective Genetic Algorithm
2. Land Use Planning
3. Transportation Planning

پیاده‌سازی شوند. در این پژوهش با استفاده از الگوریتم NSGA-II کوشش شد تا به تولید نقشه‌های بهینه، که نیازها و دیدگاه‌های موجود را به بهترین شکل ممکن در نظر می‌گیرند، پرداخته شود. از آنجا که در مرحله نخست از پیاده‌سازی NSGA-II می‌بایست توابع هدف تعیین می‌شدند، مطالعات گسترده‌ای روی منابع و پژوهش‌های انجام شده در زمینه برنامه‌ریزی و طراحی شهری صورت گرفت.

Lin و Feng (۱۹۹۹)، به برنامه‌ریزی شهری چندهدفه با الگوریتم ژنتیک هدفی^۱ MOGA پرداختند. توابع هدف آنها، هر دو مقوله کاربری و شبکه ارتباطات شهری را بهینه‌سازی می‌کرد، لیکن کاستی‌هایی هم داشت. آنها برای تعیین تعداد سلول‌هایی که به یک کاربری اختصاصی داده می‌شد از مقداری ثابت استفاده کردند ولی بهتر بود تعداد سلول‌هایی که بایستی به کاربری مشخصی اختصاص‌دهی شوند در یک بازه خاص باشند، نه اینکه برابر با عددی ثابت قرار داده شوند. تحقق عدد ثابت برای الگوریتم، شرایط را دشوارتر می‌سازد. همچنین آنها به نحوه چیدمان کاربری‌ها در مجاورت یکدیگر در منطقه توجهی نکردند و برای کاربری‌ها خصوصیات مکانی را - مانند چگونگی پراکندگی سلول‌های دارای یک کاربری- در نظر نگرفتند.

Stewart و همکاران (۲۰۰۴)، مسئله برنامه‌ریزی شهری چندهدفه‌ای برای کاربری اراضی را با تبدیل آن به مسئله‌ای تک‌هدفه به وسیله یک تابع Scalarizing، با یک الگوریتم ژنتیک حل کردند. تبدیل مسائل با ماهیت چندهدفه به تک‌هدفه امکان ایجاد بایاس‌ها یا تورش‌های مختلفی را در جواب‌های نهایی ایجاد می‌کند (Aerts et al., 2005). در توابع چندهدفه (توابع هزینه و توابع خصوصیات مکانی) مورد استفاده در تحقیق مذکور، روابط و تأثیرات متقابل کاربری‌ها در نظر گرفته نشد.

Balling (۲۰۰۴)، به برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای با استفاده از الگوریتم تکاملی چندهدفه پرداخت. اما در

دسترسی ترافیکی بیشتر می‌شود؛ بدین معنی که تأثیر فاصله دسترسی در قیاس با سایر عوامل تأثیرگذار بر ترافیک - مانند وابستگی کاربری‌ها - افزایش می‌یابد.

• λ_k, μ_k ، حداقل و حداکثر مساحتی که بایستی برای کاربری k اختصاص داده شود.

از آنجا که تأثیر کاربری‌های مختلف بر یکدیگر تا حدود بسیار زیادی تابعی است از فاصله بین کاربری‌ها، لذا برای مدل‌سازی تأثیر کاربری خاصی بر دیگر کاربری‌ها، محاسبه فاصله بین آنها ضروری است. از طرفی اندازه‌گیری فاصله می‌تواند به روش‌های مختلفی انجام گیرد. استفاده از فاصله مستقیم (اقلیدسی) به عنوان فاصله دسترسی بین دو کاربری، به‌خصوص در محدوده‌ای شهری که ارتباط بین کاربری‌ها از طریق شبکه معابر کوچک‌ها و خیابان‌ها انجام می‌شود نمی‌تواند مدل‌سازی واقعی از شرایط باشد، چرا که در عمل شبکه معابر و راه‌ها برای دسترسی به کاربری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌منظور مدل‌سازی واقعی فاصله بین دو کاربری، فاصله طی شده بین دو کاربری در شبکه معابر، کوچه‌ها و خیابان‌ها محاسبه می‌شود. لذا در این تحقیق فاصله دسترسی (مبتنی بر معابر شهری) بین دو کاربری برای مدل‌سازی و تشکیل لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز استفاده شد.

سازگاری کاربری‌ها، $h_{kk'}$ ^d، بر اساس دو المان تعریف می‌شود: خصوصیات کاربری‌ها، و فاصله اقلیدسی میان دو سلول. بنابراین شباهت بیشتر در خصوصیات کاربری‌ها و فاصله اقلیدسی کمتر میان دو سلول منجر به توازن بیشتر - و در نتیجه، ارزش‌گذاری بیشتر نیز - می‌شود. با توجه به بررسی‌ها و مطالعات صورت گرفته، هفت کاربری برای تخصیص در نظر گرفته شد: (۱) مسکونی، (۲) تجاری، (۳) صنعتی، (۴) پارک، (۵) آموزشی، (۶) بازار، و (۷) ورزشی. رابطه میان دو نوع از کاربری‌ها را اندازه می‌گیرد و هر چه مقدار آن بیشتر باشد، به این معنی است که وابستگی دو کاربری بیشتر است. به عبارت دیگر، از آنجا که $r_{kk'}$ از طریق بررسی

$$\text{Subject to: } \lambda_k < \sum_{ij}^k X_{ij} < \mu_k, \forall k$$

$$\sum_k^k X_{ij} = 1, \forall ij$$

$$D_{ij,i'j'} \neq \emptyset, \forall (ij, i'j')$$

Where $X_{ij} \in \{0,1\}$

$$a_{ij,i'j'} = (D_{ij,i'j'})^{-1/\alpha}$$

$$i'j' \neq ij, d = d_{ij,i'j'}$$

مفاهیم مربوط به نمادهای به کار رفته در مدل و فرمول‌بندی اهداف در ادامه درج می‌گردد:

- $K \in [1, K], K' \in [1, K]$
- $i \in [1, I], j \in [1, J]$
- X_{ij}^k یک متغیر تصمیم‌گیری باینری که اگر در سلول ij کاربری برابر با k باشد، برابر با یک می‌شود و گرنه صفر.
- B_{ijk} تعداد کاربری‌های موجود در همسایگی هشت‌گانه سلول ij که دارای کاربری یکسان با آن هستند (همسایگی قطری).
- $d_{ij,i'j'}$ فاصله مستقیم (اقلیدسی) میان دو سلول ij و $i'j'$
- $D_{ij,i'j'}$ کوتاه‌ترین مسیر میان دو سلول ij و $i'j'$ که روی شبکه‌ها راه‌ها تعیین می‌شود.
- $h_{kk'}$ ^d عددی در بازه [۰ و ۱] که بیانگر سازگاری کاربری k نسبت به کاربری k' است که در فاصله اقلیدسی d قرار دارند. این پارامتر از داده‌های ورودی به مدل است.
- $r_{kk'}$ عددی در بازه [۰ و ۱] که درجه وابستگی میان کاربری k و k' را بیان می‌کند. این پارامتر از داده‌های ورودی به مدل است.
- $a_{ij,i'j'}$ عددی در بازه [۰ و ۱] که بیانگر دسترسی ترافیکی میان دو سلول ij و $i'j'$ است.
- α یک پارامتر $\alpha > 0$ که برای محاسبه دسترسی ترافیکی میان دو سلول به کار می‌رود و هر قدر که بیشتر باشد، تأثیر کوتاه‌ترین مسیر تحت شبکه روی

منطقه طراحی تخصص یافته باشند، به این ترتیب فرمول بندی شد که مجموع $\sum_{ij}^k X_{ij}$ برای کل سلول‌ها بایستی در محدوده تعیین شده برای کاربری k باشد $(\lambda_k < \sum_{ij}^k X_{ij} < \mu_k)$. قید سوم که بیان کننده این امر بود که دست کم یک مسیر می‌بایست بین دو سلول وجود داشته باشد، به این ترتیب اعمال شد که فاصله مسیری میان هر کدام از دو سلول نباید برابر با تهی (ϕ) شود.

۲-۳- توسعه عملگرهای تکاملی NSGA-II برای

حل مسائل برنامه ریزی شهری

برای اجرای هر کدام از الگوریتم‌های تکاملی بایستی یک سری عملگرهای عمومی مشترک پیاده‌سازی شوند. این عملگرها با وجود تفاوت در نحوه پیاده‌سازی همگی دارای ماهیت کلی یکسانی هستند و از اصول مشترکی تبعیت می‌کنند. به طور کلی می‌توان این انواع عملیات را در سه دسته کلی قرار داد. دسته نخست روش‌های کدگذاری مسئله، دسته دوم روش‌های ادغام‌اند، و دسته سوم روش‌های جهش. در این پژوهش با توجه به شکل مکانی مسئله، روش‌های ابتکاری و جدیدی برای اجرای عملگرهای تکاملی مذکور پیشنهاد شده است که می‌تواند کارکرد بسیاری در بهینه‌سازی انواع مسائل مکانی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی داشته باشد (شکل ۱). در روش‌های قبلی به کار گرفته شده در بهینه‌سازی تکاملی مسائل مکانی، با مشکلات فراوانی در اجرای عملگرهای تکاملی - مانند کدگذاری غیرمکانی، ناممکن بودن پردازش‌های مکانی و هندسی روی جواب‌ها در حین تکامل، عدم امکان استفاده از قیود هندسی روی توابع هدف و جز اینها- همراه بود. با راه‌حل‌های ارائه شده در این مقاله، بسیاری از این مشکلات برطرف خواهند شد. در این پژوهش با معرفی روش جدید کدگذاری، امکان انجام تحلیل مکانی روی کروموزوم‌ها فراهم شده است و با معرفی روشی ابتکاری برای اجرای عملگرهای ادغام و جهش به صورت مکانی،

میزان سفرهای دو نوع از کاربری‌ها اندازه‌گیری می‌شود، هر قدر که f_{kk} بیشتر باشد بیانگر تعدد سفرهای شهروندان میان دو کاربری خواهد بود. $a_{ij,ij}$ دسترسی ترافیکی، به وسیله کوتاه‌ترین فاصله تحت شبکه معابر میان دو سلول اندازه‌گیری می‌شود و مسیر کوتاه‌تر نشانگر دسترسی بالاتر است و در نتیجه مقدار بالاتری را نیز در پی خواهد داشت.

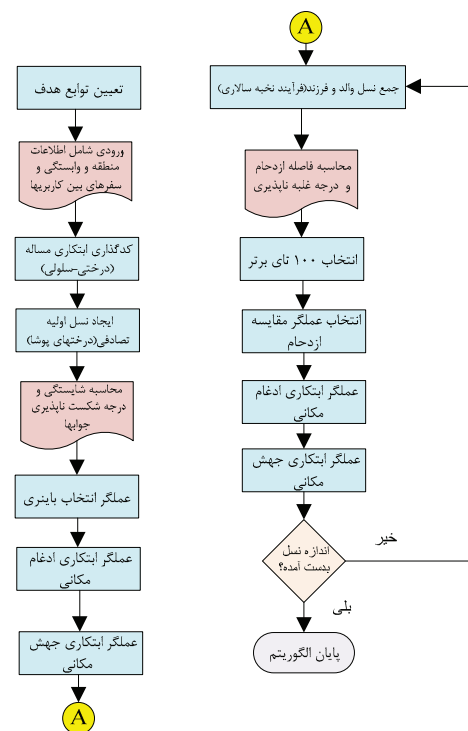
در هدف نخست، بیشینه‌سازی میزان سازگاری کاربری‌ها در یک نقشه الگو در نظر است. در بخش نخست آن، مقدار $\sum_{ij,ij}^k X_{ij}^d h_{kk}$ نشان‌دهنده مجموع سازگاری کاربری‌های یک نقشه است. از طرف دیگر، در بخش دوم $\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J B_{ijk}^K X_{ij}$ ، به چگونگی استقرار کاربری‌های یکسان پرداخته می‌شود. این عبارت در صورتی به سمت صفر میل می‌کند که هر سلول (ij) دارای کاربری k ، هیچ همسایه‌ای با این کاربری نداشته باشد. $\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J B_{ijk}^K X_{ij}$ در صورتی به سمت بیشینگی میل می‌کند که تمام سلول‌هایی که به کاربری k اختصاص داده شده‌اند منطقه مربع‌شکل یگانه‌ای را تشکیل بدهند. سلول (i', j') همسایه سلول (i, j) محسوب می‌شود، در صورتی که داشته باشیم $|i - i'| \leq 1$ و $|j - j'| \leq 1$.

به عنوان دومین هدف، به مدل‌سازی شبکه ارتباطی راه‌های شهری پرداخته می‌شود. در تابع هدف دوم سعی بر آن است تا کاربری‌هایی که ارتباط بیشتری با یکدیگر دارند و میانگین سفرهای بین آنها بیشتر است در فاصله نزدیک‌تری از هم قرار گیرند و خطوط ارتباطی نیز به بهترین نحو طراحی گردند. برای این دو تابع هدف، سه قید در نظر گرفته شد. نخست اینکه حتماً همه کاربری‌های از پیش تعیین شده بایستی در منطقه مورد طراحی وجود داشته باشند. دوم، هر سلول تنها یک کاربری را می‌تواند در خود جای دهد. سوم، دست کم یک مسیر می‌بایست میان هر دو سلول موجود در منطقه، طراحی وجود داشته باشد. قید یکم که عبارت بود از اینکه بایستی همه کاربری‌های اراضی در

است. هر کروموزوم اصلی از دو قسمت تشکیل خواهد شد که نیمی از آن کاربری‌ها را کدگذاری می‌کند و نیمی از آن شبکه ارتباطی شهر را. نیمه مربوط به کاربری‌ها شامل اعداد ۱ تا N خواهد بود که هر کدام از این اعداد صحیح بیانگر یک کاربری است. نیم کروموزوم مربوط به شبکه ارتباطی راه‌های شهر به صورت ساختاری درختی خواهد بود که هر کدام از یال‌های آن بیانگر یک راه ارتباطی میان کاربری‌هاست. با این نوع کدگذاری می‌توان کروموزوم‌ها را از لحاظ چگونگی برقراری ارتباط مورد تجزیه و تحلیل شبکه در محیط GIS قرار داد. با کدگذاری رشته‌ای، که در بسیاری از پژوهش‌ها از آن استفاده شده است، امکان بررسی این موضوع که آیا کروموزوم تولید شده شرایط و قیود مکانی و هندسی مسئله را برآورده می‌کند، وجود نخواهد داشت (Feng & Lin, 1999, Lowry, 2009). اما در روش پیشنهادی این مقاله همه این مسائل در نظر گرفته شده‌اند. در ژن‌های مربوط به کاربری‌ها هر کدام از اعداد ۱ تا n به شبکه‌ای دوبعدی از سلول‌ها اختصاص داده می‌شوند که بر منطقه مورد مطالعه محاط شده‌اند.

بنابراین کدگذاری نیمه نخست، کدگذاری دوبعدی صحیح خواهد بود. در این روش کدگذاری دو نوع ژن وجود خواهد داشت. در قسمت کاربری‌ها هر سلول بیانگر یک ژن است ولی در نیم کروموزوم شبکه حمل و نقل شهری، هر یال یک ژن خواهد بود. با در کنار هم قرار دادن این دو نیمه، کروموزوم اصلی به وجود می‌آید که نزدیک‌ترین شکل کدگذاری یک شهر برای طراحی کاربری و خطوط ارتباطی خواهد بود. شکل ۲ نمونه‌ای از کدگذاری را ارائه می‌کند. ساختار ترکیبی سلولی-درختی تکوین و توسعه داده شده، مستقیماً و با استفاده از ویژگی‌های هندسی و مکانی و اندکس گذاری مکانی در قالب یک فرمت مکانی برداری تحت فرمت shp ذخیره‌سازی می‌شوند.

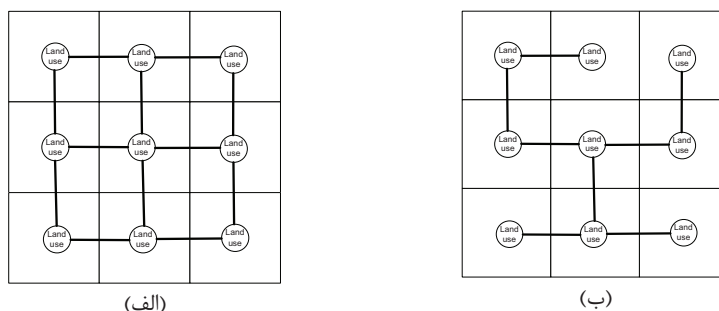
کروموزوم‌های جدید از همان ابتدا به گونه‌ای تولید می‌شوند که قیود در نظر گرفته شده برای مسئله را پاسخگو باشند و در نتیجه به مرحله بررسی و حذف کروموزوم‌ها نیازی نخواهد بود.



شکل ۱. روند کلی الگوریتم پیشنهادی

۲-۳-۱- کدگذاری

نخستین مرحله در پیاده‌سازی الگوریتم‌های تکاملی مختلف، کدگذاری مسئله و تعیین چگونگی تشکیل اعضای هر نسل - یعنی کروموزوم‌ها- است. با کدگذاری مسئله خصوصیات کروموزوم‌ها و ژن‌ها برای تشکیل جمعیت‌ها و نسل‌های تکاملی مشخص می‌شود. مطالعات نشان داده است که بهترین کدگذاری آن است که نزدیک‌ترین حالت را به شرایط طبیعی مسئله داشته باشد (Xiao et al., 2002). روشی که در این مسئله مکانی برای ارائه کدگذاری به کار گرفته شد، شامل تلفیق کدگذاری سلولی صحیح و کدگذاری درختی



شکل ۲. الف) نمونه‌ای از یک کروموزوم اصلی؛ و ب) یک کروموزوم تولید شده از کروموزوم اصلی

۲-۳-۲- تولید نسل اولیه تصادفی

پس از کدگذاری مسئله، نخستین گام در پیاده‌سازی الگوریتم تکاملی، تولید یک نسل تصادفی از کروموزوم‌هاست. اما روش اجرای این مرحله برای مسائل مقید^۱ اندکی متفاوت است. مسائل تکاملی مقید، آنهایی هستند که در کروموزوم‌هایشان بایستی برخی شرایط از پیش تعیین شده را برآورده کنند. معمولاً در این نوع از مسائل پس از تولید کروموزوم یک مرحله برای بررسی اینکه آیا کروموزوم شرایط مورد نیاز را برآورده می‌کند یا نه، قرار داده می‌شود. مثلاً برای تولید یک نسل با اندازه جمعیت N ، مرحله تولید و بررسی آن قدر تکرار می‌شود تا تعداد کروموزوم‌های واجد شرایط به اندازه نسل برسد. البته تولید جمعیت اولیه به گونه‌ای که با بهترین شرایط تولید شود، یکی از مسائل بسیار اصلی و اساسی در انواع الگوریتم‌های تکاملی بوده است. اما هنگامی که مسئله ماهیت مکانی پیدا می‌کند و مخصوصاً هنگامی که ترکیبی از ژن‌های کاربری و ارتباطی به میان می‌آیند، بسیار پیچیده می‌شود. تولید کروموزوم‌های اولیه به گونه‌ای که از همان ابتدا از هر گوشه شهر به گوشه دیگر مسیری وجود داشته باشد و تمامی مناطق نیز تحت پوشش قرار گرفته باشند، مسئله تولید جمعیت اولیه را بسیار پیچیده و حساس می‌سازد؛ چرا که اگر کروموزوم‌های اولیه قیود را برآورده نکنند کل روند تکاملی دچار مشکل خواهد شد. بدین ترتیب نگارندگان در این پژوهش بر آن شدند تا

مسئله تولید جمعیت اولیه به صورت هدفمند را ماهیت مکانی ببخشند و از این جنبه روشی مؤثر در فرایند بهینه‌سازی تکاملی برنامه‌ریزی شهری معرفی شود. ابتکاری که در این تحقیق به کار گرفته شد، این بود که کروموزوم‌های مکانی به گونه‌ای تولید می‌شوند که تمامی قیود از پیش تعیین شده را برآورده سازند. بدین ترتیب مرحله‌ای برای بررسی واجد شرایط بودن کروموزوم‌ها ضروری نخواهد بود و این باعث می‌شود تا الگوریتم سرعت بالاتری داشته باشد. برای تولید نسل تصادفی اولیه مربوط به این مسئله، ابتدا به تمامی سلول‌ها اعداد $i=1,2,\dots,n$ به عنوان یک کاربری مشخص به طور تصادفی اختصاص داده شد. این مرحله به گونه‌ای پیاده‌سازی گردید که قید در نظر گرفته شده برای کمترین و بیشترین مساحت اختصاصی به هر کاربری رعایت شود. این امر برای N مرتبه تکرار گشت تا اندازه نسل در نظر گرفته شده به دست آید. همچنین برای ایجاد ژن‌های ارتباطی مجموعه‌ای از درخت‌های پوشا^۲ به گونه‌ای تولید شدند که در وهله نخست از همه کاربری‌ها عبور کنند و دوم اینکه هیچ گسستگی در آنها وجود نداشته باشد. بنابراین تعداد N درخت پوشای تصادفی با کمترین طول، تولید شد که به همراه N ترکیب سلولی کاربری‌ها، N کروموزوم تصادفی برای

1. Constrained
2. Spanning Tree

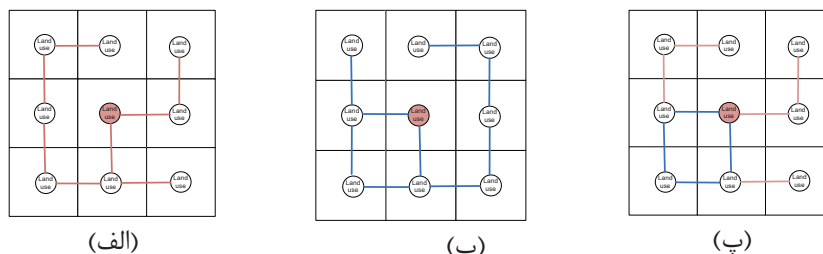
می‌گردند تا کروموزوم‌های فرزند تولید شوند. اما برای ژن‌های شبکه ارتباط شهری مسئله ادغام به شکل کاملاً متفاوتی پیاده‌سازی گشت. ابتدا x و y در محدوده جغرافیایی مورد مطالعه به طور تصادفی ایجاد می‌شود و سپس برای تشکیل فرزند، همه راه‌های ارتباطی که مرکز هندسی آنها دارای x و y کوچک‌تر از آن نقطه باشند از یک والد - و بقیه راه‌ها از والد - دوم در کروموزوم فرزند قرار داده می‌شوند (شکل ۳).

ماهیت مکانی کدگذاری و همچنین برآورده‌سازی قید اولیه «اتصال» از همان ابتدا، موجب می‌شود هنگامی که عمل ادغام ابتکاری روی والدین صورت می‌گیرد، اتصال کروموزوم فرزند تولید شده، خودبه‌خود انجام گرفته باشد. این قضیه از آنجا ثابت می‌شود که با توجه به قید اتصال، تمامی یال‌های والد نخست به «مرکز ادغام» متصل‌اند، و تمامی یال‌های والد دوم نیز به این نقطه اتصال دارند (یعنی مسیری از آنها به نقطه ادغام وجود دارد). پس تمام یال‌هایی که به این نقطه وصل هستند ولی از دو والد متفاوت‌اند، نیز با یکدیگر اتصال دارند. بنابراین مسئله «اتصال» پس از اجرای عملگر ادغام مکانی دچار مشکل نخواهد شد. بدین ترتیب در این روش ادغام تمامی قیود از پیش تعیین شده حفظ خواهند شد. البته می‌بایست توجه شود که در قسمت دوم ادغام، نقطه تصادفی که برای انتقال مقادیر ژن‌های والد انتخاب می‌شود برای هر دو نیم کروموزوم یکسان است.

ورود به مراحل تکاملی تولید شدند، که همه آنها قیود مسئله را برآورده می‌سازند. اندازه کروموزوم شبکه حمل و نقل، که بیانگر همان تعداد یال‌های تشکیل‌دهنده خطوط ارتباطی است، در کروموزوم‌های مختلف متفاوت است ولی همه آنها دارای وجه مشترکی به نام اتصال^۱ هستند.

۲-۳-۳- عملگر ادغام

به‌طور کلی یکی از اصلی‌ترین عملگرهای تولیدمثل در الگوریتم‌های تکاملی، عمل ادغام^۲ است که به شیوه‌های متفاوت - اما با اهداف یکسان - به کار گرفته می‌شود. عملگر ادغام از ترکیب دو والد استفاده می‌کند تا بتواند اعضای نسل فرزند را به وجود آورد. برای کروموزوم‌های رشته‌ای روش‌های مختلفی به‌منظور اجرای ادغام وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به روش‌های ادغام تک‌نقطه‌ای و دونقطه‌ای و یکنواخت اشاره کرد. برای پیاده‌سازی عملگر ادغام در این پژوهش، روشی ابتکاری پیشنهاد شد. در این روش که برای ادغام مکانی^۳ تکوین یافت و توسعه داده شد، عملگر ادغام بر روی ژن‌های یک کروموزوم به‌صورت دمرحله‌ای اجرا می‌شود. برای ژن‌های کاربری‌ها همان ادغام نقطه‌ای تصادفی که در کروموزوم‌های رشته‌ای به کار برده می‌شد مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا یک شماره تصادفی در محدوده تعداد سلول‌ها تولید می‌شود و ژن‌های قبل از آن از والد نخست و ژن‌های بعد از آن از والد دوم جای‌گذاری



شکل ۳. عملگر ابتکاری ادغام مکانی: (الف) والد نخست؛ (ب) والد دوم؛ و (پ) فرزند حاصل از عمل ادغام مکانی

1. Connectivity
2. Cross Over
3. Spatial Cross Over

۲-۳-۴- عملگر جهش

جهش^۱ یا موتاسیون عملگری حساس در الگوریتم‌های تکاملی است که کارکرد آن حفظ تنوع جمعیتی و رهایی الگوریتم از دام بهینه‌های نسبی است. این عملگر با تغییر تصادفی مقادیر ژن‌ها، می‌تواند از روند یکنواخت و ثابت در تکامل جلوگیری کند. اجرای عملگر جهش در یک الگوریتم بهینه‌سازی طی دو مرحله صورت می‌پذیرد: ابتدا برای یک ژن عددی تصادفی بین صفر و یک تولید می‌شود، و سپس اگر این عدد از نرخ جهش (که از پیش مشخص شده است) کوچک‌تر بود، مقدار آن ژن دستخوش تغییراتی می‌گردد که می‌توان آنها را به شیوه‌های متنوعی اجرا کرد. روشی که در این پژوهش برای پیاده‌سازی این عملگر به کار گرفته شد، برای ژن‌های کاربری بدین شکل بوده است که اگر مقدار تصادفی تولید شده از نرخ جهش کوچک‌تر بود، کاربری جدیدی به آن ژن (سلول) اختصاص می‌یافت وگرنه همان کاربری قبلی حفظ می‌شد. اما برای ژن‌های معرف خطوط ارتباط شهری روشی ابتکاری و نو برای ارائه عملگر جهش ایجاد گردید. در این روش ابتدا برای هر کدام از ژن‌ها مانند قبل یک عدد تصادفی تولید می‌شود که اگر این عدد تصادفی کوچک‌تر از نرخ جهش باشد آن اتصال حذف می‌شود و در غیر این صورت تغییری اعمال نمی‌گردد. اما مسئله مهم در این قسمت، همانا connectivity یا اتصال سراسری درخت‌های پوشا پس از حذف ژن ارتباطی است. به‌همین دلیل در پژوهش‌ها، مسئله بهینه‌سازی تکاملی طراحی و برنامه‌ریزی خطوط شهری تقریباً نادیده گرفته شده است. پس از اعمال عملگر جهش می‌توان دو گزینه داشت. نخست اینکه، کروموزوم از لحاظ برآورده ساختن قیود در نظر گرفته شده مورد بررسی قرار بگیرد. اگر کروموزوم شروط مسئله را برآورده سازد، آن‌گاه در چرخه تکامل باقی می‌ماند وگرنه از چرخه حذف می‌شود و اعضای جدیدی جایگزین آن می‌گردد. از آنجا که این روش باعث حذف تعداد بسیار زیادی کروموزوم می‌شود و در نسل‌های بالاتر منجر به حذف بسیاری از جواب‌های بهینه خواهد

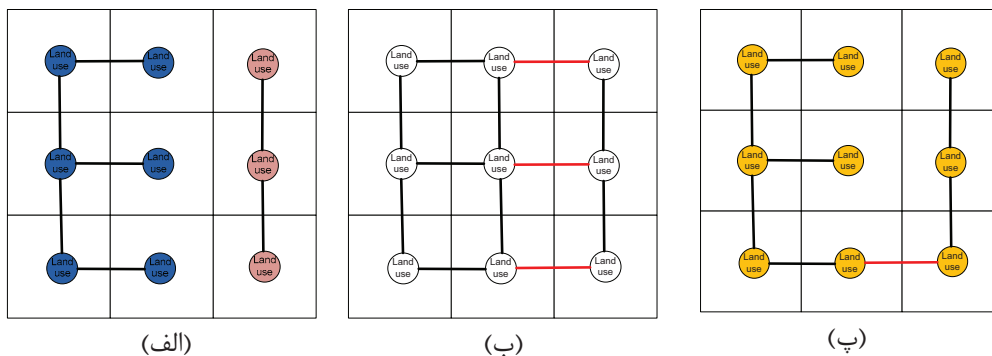
شد، نمی‌تواند روش مناسبی باشد. در عین حال حذف بسیاری از کروموزوم‌های مناسب منجر به کندی الگوریتم در رسیدن به همگرایی نیز خواهد شد. اما روش جدیدی که برای ارائه عملگر جهش در این پژوهش به کار گرفته شد، بدین طریق عمل می‌کند که نخست اتصال شبکه را پس از اجرای عمل جهش مورد بررسی قرار می‌دهد؛ و دوم، کروموزومی که از لحاظ برآورده ساختن شروط ناقص باشد، خواهد توانست خود را بازسازی کند و دوباره به چرخه تکامل بازگردد. به این ترتیب هیچ جوابی از چرخه تولید نسل به خاطر برآورده نشدن شروط مسئله حذف نمی‌شود.

همان‌طور که اشاره شد، در مدل تکوین یافته در این مقاله برای عملگر جهش در دو مرحله ژن‌های جهش‌یافته کروموزوم مورد بررسی قرار می‌گیرد و نواقص آنها برطرف می‌شود. نخستین مرحله، بررسی کروموزوم از لحاظ اتصال تمام خطوط ارتباطی است به طوری که از هر نقطه شهر به نقطه دیگر مسیری وجود داشته باشد. در این قسمت با استفاده از ابزارهای تحلیل شبکه در GIS به بررسی کروموزوم پرداخته می‌شود. اگر کروموزوم پس از اعمال جهش به دو قسمت مجزا تقسیم شده باشد که هیچ ارتباطی به هم ندارند، با استفاده از کروموزوم اصلی تمامی ژن‌هایی که می‌توانند این اتصال را دوباره برقرار سازند شناسایی می‌گردند و یکی از آنها به شبکه افزوده می‌شود تا مشکل اتصال برطرف شود و کروموزوم به چرخه تکامل بازگردد (شکل ۴).

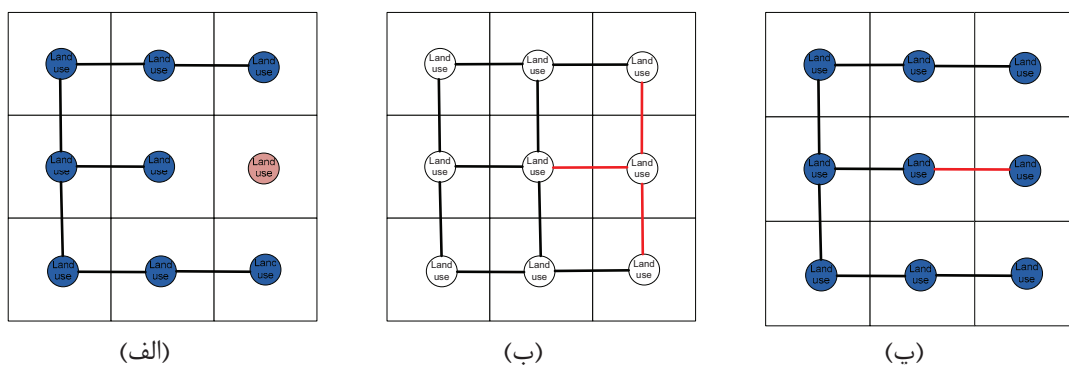
مشکل دیگری که پس از برقراری اتصال مجدد هنوز چه‌بسا وجود داشته باشد، این است که با وجود آنکه روی شبکه موجود از هر نقطه می‌توان مسیری به نقطه دیگر یافت، اما این شبکه همه کاربری‌ها را مورد پوشش قرار نمی‌دهد. نام این مشکل وجود single vertex است. این مسئله زمانی اتفاق می‌افتد که کروموزوم هنوز دارای اتصال سراسری است اما همه مناطق شهری یا منطقه مورد مطالعه تحت پوشش قرار نگرفته‌اند.

1. Mutation

بهبودسازی مکانی فرایند طراحی و برنامه‌ریزی شهری به کمک عملگرهای ابتکاری توسعه داده شده در قالب الگوریتم تکاملی ...



شکل ۴. عملگر ابتکاری ترمیم جهش: (الف) کروموزوم گسسته شده؛ (ب) زن‌های ترمیمی مشخص شده‌اند؛ و (پ) کروموزوم ترمیم شده



شکل ۵. عملگر ابتکاری ترمیم جهش برای حل نقصان شبکه از لحاظ Single Vertex - (الف) کروموزوم گسسته شده؛ (ب) زن‌های ترمیمی مشخص شده‌اند؛ و (پ) کروموزوم ترمیم شده

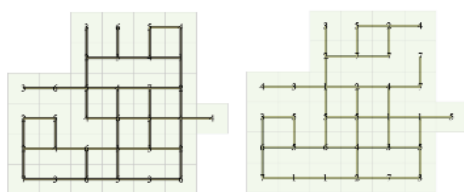
نمی‌کند بلکه همواره سعی بر ترمیم خود خواهد داشت. اینکه عملگر جهش باعث حذف هیچ کدام از جواب‌ها نمی‌شود، تأثیر بسزایی در کارایی الگوریتم خواهد داشت.

۳- نمونه مطالعاتی و نتایج اجرا

پس از تعیین توابع هدف و مشخص ساختن چگونگی کارکرد عملگرهای ابتکاری الگوریتم فضایی NSGA-II، امکان به‌کارگیری مدل تکوین‌یافته برای یک نمونه مطالعاتی فراهم آمد. مراحل آماده‌سازی داده‌ها و پیاده‌سازی الگوریتم با استفاده از ESRI ArcObjects برنامه‌نویسی شد. هدف از اجرای این بخش تخصیص کاربری‌های اراضی و خطوط ارتباط شهری به منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شده برای احداث شهر جدید است تا نقشه‌های الگویی مناسب در اختیار

از آنجا که کروموزوم تولید شده دارای همه شروط اولیه است و این مراحل هر بار که عمل جهش روی کروموزوم صورت می‌گیرد بررسی می‌شوند، بنابراین می‌توان با اطمینان بیان کرد که قطعاً هر بار که مشکل single vertex به‌وجود می‌آید، تنها یکی از زون‌ها مورد پوشش قرار نمی‌گیرد. برای حل نقص شبکه از لحاظ single vertex، زونی که پوشش ندارد انتخاب می‌شود و سپس از کروموزوم اولیه اصلی تمام اتصالاتی که به آن زون وجود دارند و می‌توانند اتصال دوباره شبکه را برقرار سازند شناسایی می‌شوند. در گام آخر از این مرحله یکی از این اتصالات به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود و به کروموزوم افزوده می‌گردد. بدین ترتیب نقصان single vertex نیز برطرف خواهد شد (شکل ۵). با انجام این عملگر به این شکل، الگوریتم پیشنهادی هیچ‌گاه جوابی را به‌خاطر برآورده نکردن قیود حذف

دارای ارتباط بودند، و (۲) اتصال سراسری در کل منطقه برقرار بود و از هر نقطه شهر مسیری به نقطه دیگر آن وجود داشت (شکل ۷). به این ترتیب ۱۰۰ نقشه خطوط حمل و نقل شهری ایجاد شد که به همراه ۱۰۰ نقشه مربوط به کاربری اراضی (نیم کروموزوم)، ۱۰۰ نقشه شهری به عنوان نسل اولیه الگوریتم NSGA-II تولید شدند. با پیاده‌سازی مرحله اول NSGA-II با این شیوه، به‌طور خودکار قیود در نظر گرفته شده اعمال گردیدند و به این ترتیب کروموزوم‌های تصادفی تولید شده را می‌توان در زمره جواب‌های موسوم به «شدنی»^۱ قرار داد و وارد مراحل بعدی تکامل گشت.

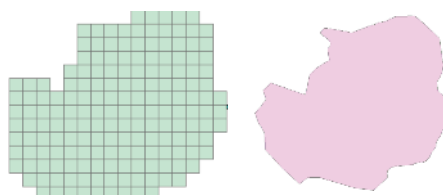


شکل ۷. نمونه‌ای از دو کروموزوم تولید شده ابتدایی برای ورود به مدل بهینه‌سازی

پس از تولید نسل اولیه تصادفی، مرحله دوم از اجرای NSGA-II آماده پیاده‌سازی خواهد بود. در این مرحله بایستی مقادیر تابع هدف برای هر کدام از کروموزوم‌ها محاسبه شود تا شایستگی آنها برای بقا در چرخه تولید نسل مشخص گردد. محاسبه مقادیر تابع هدف نیز در دو گام در محیط نرم‌افزاری GIS برنامه‌نویسی شد. گام نخست شامل مقادیر شایستگی کروموزوم‌ها به ازای تابع هدف نخست است که تأکید اصلی آن روی برنامه‌ریزی و طراحی کاربری‌های اراضی است. گام دوم به محاسبه مقادیر تابع هدف دوم برای هر کروموزوم مربوط می‌شود که تمرکز اصلی آن بر برنامه‌ریزی و طراحی خطوط ارتباط راه‌های داخلی شهری است.

1. Feasible

تصمیم‌گیرندگان و برنامه‌ریزان قرار داده شود. نخستین مرحله از اجرای بسیاری از الگوریتم‌های تکاملی، در بردارنده ایجاد یک نسل تصادفی از کروموزوم‌هایی است که دارای شرایط اولیه در نظر گرفته شده برای الگوریتم باشند. تولید نخستین نسل تصادفی برای NSGA-II در دو مرحله برنامه‌نویسی و پیاده‌سازی شد. در مرحله نخست ۱۰۰ کروموزوم تصادفی اولیه برای کاربری‌های اراضی تولید شد. در این مرحله ابتدا به منطقه مورد نظر برای برنامه‌ریزی یک پلی‌گون محاط گردید و سپس منطقه با توجه به دیدگاه‌های کارشناسی، شبکه‌بندی (زون‌بندی) شد (شکل ۶). در منطقه مطالعاتی اولیه در نظر گرفته شده برای این پژوهش با تعیین شبکه‌ها به اندازه 1000×1000 متر تعداد ۱۷۳ عارضه برای اختصاص کاربری ایجاد گردید. با اختصاص اعداد ۱ تا ۷ به طور تصادفی به هر کدام از این عوارض، در نهایت ۱۰۰ نقشه تصادفی کاربری تولید گردید که به عنوان نیمی از ژن‌های تشکیل‌دهنده نسل اولیه تصادفی در نظر گرفته شدند.



شکل ۶. منطقه مورد مطالعه و زون‌بندی اولیه آن

با استفاده از امکانات GIS و اتصال اطلاعات توصیفی به عوارض مکانی این امکان فراهم آمد که برای هر کدام از ۱۷۳ سلول حاصل از زون‌بندی، ۱۰۰ کاربری اختصاص داده شود. در مرحله دوم از اجرای روش‌شناسی (متدولوژی) مربوط به ایجاد نسل تصادفی اولیه، ژن‌های ارائه‌کننده خطوط ارتباط شهری براساس معیارهای در نظر گرفته شده تولید شدند. در این قسمت با استفاده از تحلیل شبکه در ESRI ArcObject یکصد درخت پوشا به عنوان نقشه شبکه ارتباطی درون شهری منطقه مورد مطالعه ایجاد شد، به گونه‌ای که: (۱) تمام مراکز زون‌های در نظر گرفته شده

بهبودسازی مکانی فرایند طراحی و برنامه‌ریزی شهری به کمک عملگرهای ابتکاری توسعه داده شده در قالب الگوریتم تکاملی ...

(الف)

	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	۱	۰/۴	۰/۴	۰/۹	۰/۹	۰/۶	۰/۱
۲	۰/۴	۱	۰/۲	۰/۴	۰/۵	۰/۵	۰/۵
۳	۰/۴	۰/۲	۱	۰/۵	۰/۴	۰/۷	۰/۸
۴	۰/۹	۰/۴	۰/۵	۱	۰/۸	۰/۴	۰/۳
۵	۰/۹	۰/۵	۰/۴	۰/۸	۱	۰/۵	۰/۱
۶	۰/۴	۰/۵	۰/۷	۰/۴	۰/۵	۱	۰/۵
۷	۰/۱	۰/۵	۰/۸	۰/۳	۰/۱	۰/۵	۱

(ب)

	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	۰/۴	۰/۴	۱	۰/۳	۰/۴	۰/۳	۰/۲
۲	۰/۴	۰/۲	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱
۳	۱	۰/۱۵	۰/۵	۰/۰۵	۰	۰/۰۵	۰/۳
۴	۰/۳	۰/۰۵	۰/۰۵	۰	۰/۳	۰/۴	۰/۱
۵	۰/۴	۰/۰۵	۰	۰/۳	۰/۳	۰/۱	۰/۰۵
۶	۰/۳	۰/۱	۰/۰۵	۰/۴	۰/۱	۰	۰/۲۵
۷	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۱	۰/۰۵	۰/۲۵	۰/۰۵

شکل ۸. داده‌های ورودی به مسئله: (الف) سازگاری کاربری‌ها؛ و (ب) درجه ارتباط و وابستگی کاربری‌ها

می‌آمد و سپس طول مسیری که بین مراکز آن زون‌ها در شبکه ارتباطی طراحی شده وجود داشت، محاسبه می‌شد. این مرحله با به‌کارگیری ابزارهای برنامه‌نویسی و استفاده از تحلیل شبکه در محیط GIS پیاده‌سازی شد. با توجه به پیچیدگی محاسباتی تحلیل شبکه و اینکه هر بار بایستی کوتاه‌ترین مسیر^۱ برای محاسبه طول مسیر بین دو زون به‌دست می‌آمد، این مرحله دارای بار محاسباتی سنگینی بوده است و تعداد محاسبات آن را می‌توان حدود $N \times n \times (C(n,2))^2$ تخمین زد. همان‌طور که اشاره شد، برای محاسبه مقادیر شایستگی کروموزوم‌ها به ازای تابع هدف دوم برای مراکز مربوط به هر زون نسبت به تمامی زون‌های دیگر، روی شبکه ارتباطی طراحی شده، کوتاه‌ترین مسیر محاسبه شد.

پس از محاسبه مقدار تابع هدف یکم و دوم برای هر کدام از اعضای نسل اولیه، آنها با استفاده از مفهوم شکست‌ناپذیری الگوریتم‌های چندهدفه رتبه‌بندی شدند که در آن رتبه «یک» به کروموزوم‌هایی اختصاص داده شد که مغلوب هیچ کروموزوم دیگری نشده بودند. برای تکرار نخست ۱۷ دسته تشکیل شد که در بهترین مجموعه، ۶ کروموزوم قرار داشتند. در ادامه عملگر ابتکاری ادغام مکانی با استفاده از انتخاب

برای محاسبه مقادیر تابع هدف نخست کروموزوم‌های نسل اولیه از یک سری مقادیر اولیه از پیش تعیین‌شده برای میزان تناسب کاربری‌های مختلف با توجه به اندازه فاصله مراکز زون‌ها استفاده شد و سپس برای هر کروموزوم مجموعه تناسب‌های کاربری‌های اختصاص داده شده در کل نقشه محاسبه گردید (شکل ۸-الف). به‌عبارت دیگر، برای هر زون با کاربری اختصاص داده شده k ، میزان تناسب با سایر کاربری‌ها محاسبه گردید. بنابراین اگر به تعداد n عارضه یا زون وجود داشته باشد، حجم محاسباتی به اندازه $N \times n \times C(n,2)$ خواهد بود که در آن N همان اندازه نسل است. نقشه‌های «کروموزوم‌ها»ی دارای مقادیر تابع هدف بزرگ‌تر، بیانگر این نکته‌اند که در آنها تناسب بهتری در زمینه تخصیص کاربری‌ها وجود داشته است. همان‌طور که اشاره شد، گام دوم در محاسبه شایستگی کروموزوم‌ها، محاسبه مقادیر تابع هدف دوم برای هر کدام از اعضای جمعیت است. در این مرحله نیز به پاره‌ای اطلاعات خام ورودی نیاز است (شکل ۸-ب).

این اطلاعات با توجه به مقادیر محاسبه شده برای ارتباط کاربری‌های مختلف با یکدیگر براساس متوسط سفرهایی است که معمولاً بین آنها صورت می‌گیرد. برای محاسبه مقادیر تابع هدف دوم، در وهله نخست می‌بایست میزان ارتباط هر زون با سایر زون‌ها به‌دست

1. shortest path

پاسخ‌های بهینه بیشتری وجود دارند و تعداد کمتری به نسل‌های بعدی راه یابند؛ و برعکس، در بخش‌هایی که جواب‌های کمتری تولید شده‌اند، درصد بیشتری از جواب‌ها در چرخه تکامل باقی بمانند. به این ترتیب، در تکرارهای پایانی علاوه بر جواب‌های بهینه، بهترین توزیع نیز به دست خواهد آمد که منجر به ارائه مجموعه متنوعی از جواب‌ها خواهد شد.

در شکل (۹-ر) سه جواب برچسب گذاری شده‌اند (a,b,c). جواب a دارای بهترین مقدار برای تابع هدف مربوط به خطوط حمل و نقل در میان تمامی جواب‌های تولید شده است. بررسی‌ها نشان داد که کروموزوم مربوط به این جواب در نسل ۴۵۶۳ تولید شد و تا آخر در دسته بهینه پاره‌تو باقی ماند. برچسب b نمایانگر مقدار جوابی است که دارای بهترین مقدار تابع هدف نخست، یعنی کاربری اراضی است. اطلاعات ذخیره شده مربوط به شایستگی کروموزوم‌ها بیانگر تولید این جواب در نسل ۳۲۳۱ است که پس از آن تا انتها در چرخه تکامل باقی مانده است. همچنین در مورد برچسب c، همان‌طور که مشخص است، می‌توان بیان کرد که دارای مقدار مناسب برای هر دو تابع هدف در نظر گرفته شده است.

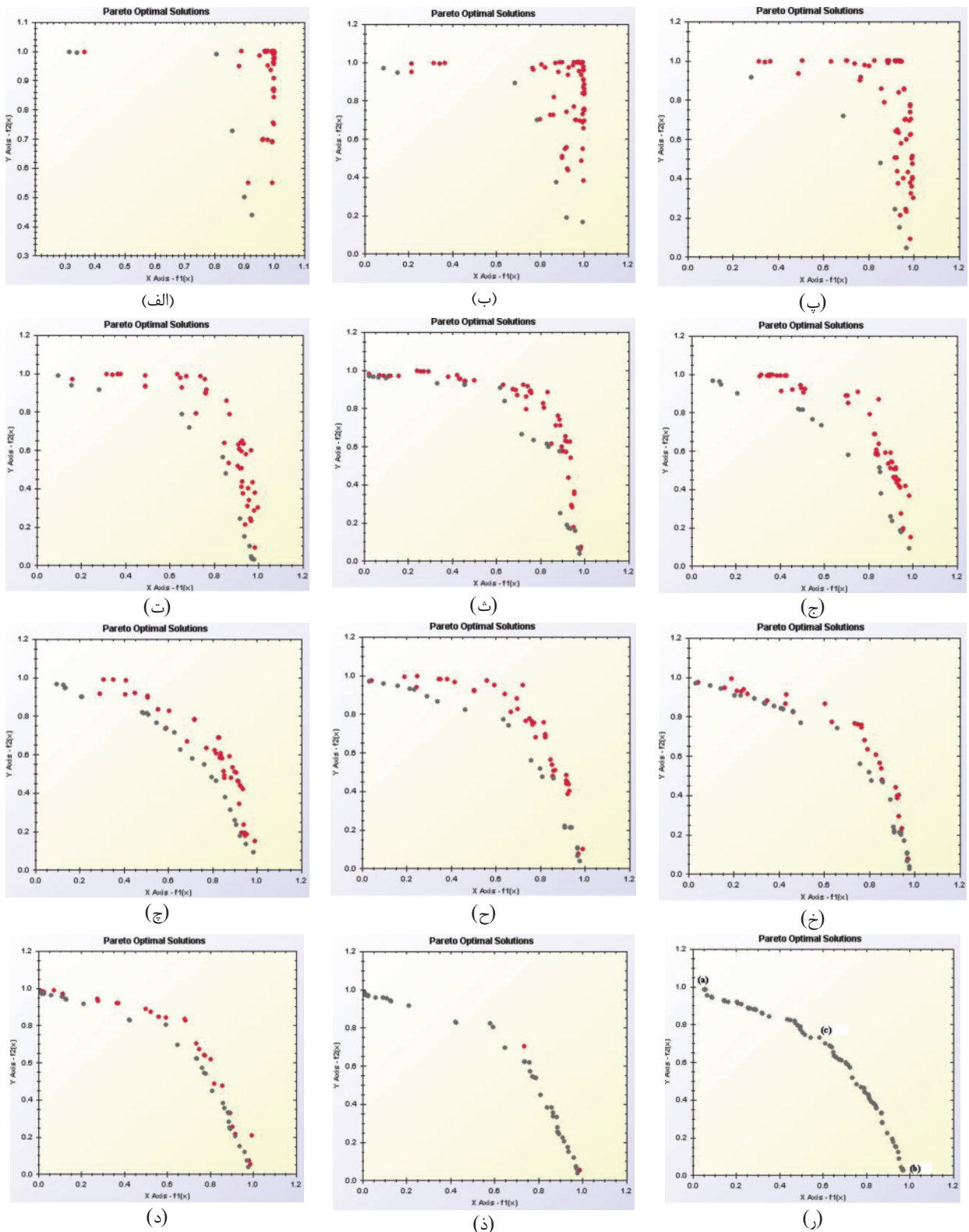
در شکل ۱۰ کروموزوم‌های مربوط به سه برچسب در شکل (۹-ر) ارائه شده است که کروموزوم مربوط به برچسب a دارای کمترین طول خطوط ارتباطی ولی بدترین شکل اختصاصی کاربری‌هاست (شکل ۱۰-ب). برعکس، کروموزوم مربوط به برچسب b دارای بهترین شکل اختصاص کاربری‌هاست ولی بیشترین هزینه احداث خطوط ارتباط شهری را نیز داشته است (شکل ۱۰-الف). همچنین کروموزوم مربوط به برچسب c در شکل (۹-ر) ارائه‌کننده تخصیص نسبتاً مناسب کاربری‌ها و هزینه متعادل احداث خطوط ارتباطی برای یک شهرک مسکونی جدید است (شکل ۱۰-پ).

رقابتی باینری روی هر کدام از اعضای نسل اولیه اجرا شد تا نخستین نسل فرزند تولید گردد. مرحله آخر از فرایند تولید نسل نیز با اجرای عملگر ابتکاری جهش مکانی روی نسل فرزند پیاده‌سازی شد. پس از تولید نسل فرزند طبق الگوی NSGA-II کروموزوم‌های فرزند با والدین‌شان به رقابت می‌پردازند، تا کروموزوم‌های شایسته‌تر وارد چرخه تکامل گردند. از نسل یکم به بعد، علاوه بر محاسبه مقادیر تابع هدف یکم و دوم و رتبه‌بندی کروموزوم‌ها براساس شکست‌ناپذیری، مقدار مربوط به فاصله ازدحام نیز برای هر کدام از کروموزوم‌ها محاسبه می‌گردد و برای انتخاب بهترین جواب‌ها از عملگر مقایسه ازدحام ($\geq n$) بهره‌گیری می‌شود. این فرایند به تعداد اندازه نسل تعیین شده تکرار می‌گردد، در نهایت جواب‌های بهینه برای استفاده در تصمیم‌گیری‌های مربوط به برنامه‌ریزی شهری قابل استفاده خواهند بود.

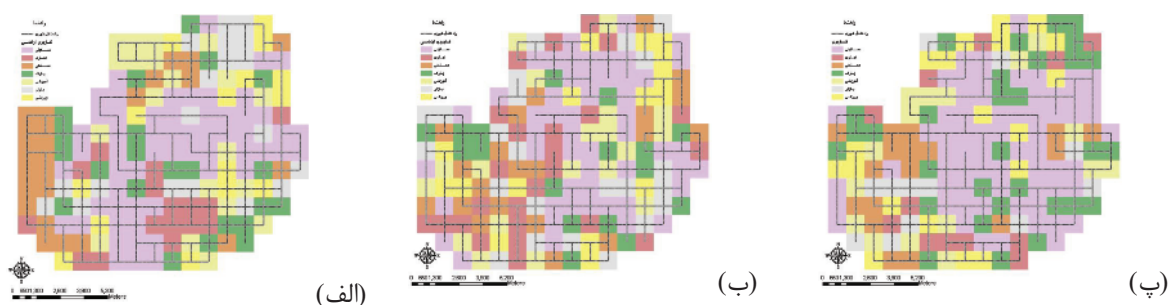
شکل (۹) روند تکاملی شایستگی اعضای نسل‌های تولید شده با Spatial NSGA-II را طی ۵۰۰۰ تکرار پیاده‌سازی شده نمایش می‌دهد، که به وسیله مقدار نرمالیزه شده دو تابع هدف‌شان نشان داده شده‌اند. اجرای الگوریتم در رایانه با مشخصات IBM Intel processor core 2 duo T7300 2.00 GHZ ۱۳۴ دقیقه طول کشید. در ابتدا جواب‌های شکست‌ناپذیر کمتر در فضای محاسباتی ارائه می‌شوند؛ اما با ادامه فرایند تکامل، جواب‌ها بهینه پاره‌تو^۱ با تعداد بیشتری ظاهر می‌شوند که خود نشان‌دهنده فرایند بهبود جواب‌های ارائه شده از طریق الگوریتم تکاملی است. همچنین با اکتساب بسیاری از جواب‌های بهینه، الگوریتم به سمتی حرکت می‌کند که جواب‌های بهینه با پراکندگی مناسب را ارائه دهد. به عبارت دیگر، همان‌طور که در شکل (۹) نیز ملاحظه می‌گردد، پس از تولید تعداد مناسبی جواب بهینه، الگوریتم سعی بر آن خواهد داشت تا جواب‌های بهینه‌ای را که توزیع مناسبی به مجموعه جواب‌ها می‌بخشند، در فرایند تکامل یعنی در قسمت‌هایی از فضای جواب که

1. Pareto Optimal

بهینه‌سازی مکانی فرایند طراحی و برنامه‌ریزی شهری به کمک عملگرهای ابتکاری توسعه داده شده در قالب الگوریتم تکاملی ...

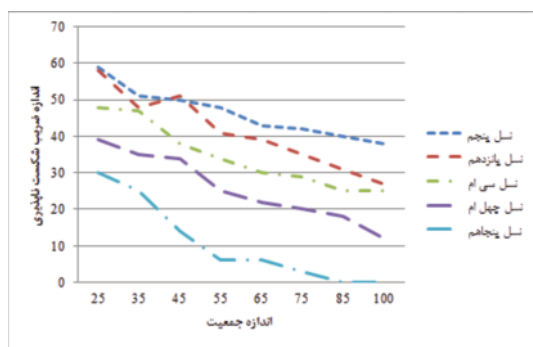


شکل ۹. شمایی از کروموزوم‌های غالب و کروموزوم‌های غالب با رتبه ۲ در فضای جواب حاصل از توابع هدف در نظر گرفته شده برای طراحی یک شهرک مسکونی در تکرهای (الف) ۱۰، (ب) ۱۰۰، (پ) ۵۰۰، (ت) ۱۰۰۰، (ث) ۱۵۰۰، (ج) ۲۰۰۰، (چ) ۲۵۰۰، (ح) ۳۰۰۰، (خ) ۳۵۰۰، (د) ۴۰۰۰، (ذ) ۴۵۰۰، (ر) ۵۰۰۰



شکل ۱۰. الف) کروموزوم دارای بیشترین مقدار تابع هدف مربوط به کاربری‌ها؛ ب) کروموزوم دارای بیشترین مقدار تابع هدف مربوط به خطوط حمل و نقل؛ و پ) کروموزوم دارای مقادیر مناسب توابع هدف مربوط به کاربری‌ها و خطوط حمل و نقل

از الگوریتم NSGA-II که با عملگرهای ابتکاری مکانی برای برنامه‌ریزی شهری از آنها استفاده شد، به خوبی در مسیر تکامل قرار گرفته‌اند. به عبارت دیگر، روند نزولی نمودارهای مربوط به نسل‌ها حاکی از این است که جواب‌هایی که در مراحل انتهایی روند تکامل تولید شده‌اند، در مقایسه با جواب‌های ابتدایی، کمتر شکست خورده‌اند. حرکت مناسب رو به رشد کروموزوم‌ها در مسیر تکامل نشان‌دهنده این نکته است که عملگرهای ابتکاری استفاده شده در روند تکامل، به خوبی توانسته‌اند در فضای جست‌وجو به حرکت و اکتشاف بپردازند و مرحله به مرحله جواب‌های مناسب‌تری را ارائه کنند و سرانجام نیز موفق به ارائه مجموعه‌ای از جواب‌های شکست‌ناپذیر گردند.



شکل ۱۱. آزمون مربوط به شاخص چیرگی کروموزوم‌های تولید شده

۳-۱- آزمون مدل پیشنهادی و نتایج به دست آمده، با استفاده از شاخص چیرگی

ضریب مربوط به میزان شکست‌ناپذیری اعضای نسل‌ها، با نام شاخص چیرگی^۱ یا DI، برای ارائه کیفیت جواب‌های به دست آمده مورد استفاده قرار گرفت. DI، دارای مقادیری بین صفر و صد خواهد بود. هر چه این مقادیر کمتر باشند بدین معنی است که جواب‌های به دست آمده به جواب‌های شکست‌ناپذیر نزدیک‌ترند و کیفیت بالایی نیز دارند. معادله ۵ برای محاسبه DI به کار گرفته می‌شود:

$$DI_i = \left(\sum_{j=1}^{n_i} \frac{\delta_{ij}}{N} \right) \div n_i \times 100\% \quad (5)$$

که در آن DI_i برابر است با ضریب شکست‌ناپذیری برای آزمون i ام، n_i تعداد جواب‌های به دست آمده که در آزمون i شرکت داده می‌شوند؛ δ_{ij} برابر است با تعداد مرتبه‌هایی که جواب i در آزمون j ام از تمام جواب‌های آزمون شکست‌خورده است و N برابر است با تعداد جواب‌های به دست آمده که در کل آزمون‌ها شرکت داده شده‌اند (Feng & Lin, 1999).

مقادیر DI برای آزمون‌های انجام شده در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هر قدر که تعداد نسل‌ها بالا می‌رود، جواب‌های به دست آمده بهتر می‌شوند. نتایج شاخص چیرگی نشان داد که کروموزوم‌های تولیدی با استفاده

1. Dominated Index

۴- نتیجه‌گیری

مدل‌سازی عوامل دخیل در طراحی خودکار شهرهای جدید با توجه به گستردگی فضای جواب و همچنین پیچیدگی روابط میان عوارض مختلف، مسئله تصمیم‌گیری چندهدفه بسیار دشواری است. از طرف دیگر، به کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی در مسائلی از این دست که نیاز به تحلیل شبکه و محاسبات هندسی مانند فاصله مراکز مربوط به زون‌ها، محاسبه طول مسیر مستقیم و بهترین مسیر تحت شبکه دارند، تا کنون مورد توجه قرار نگرفته‌اند و پژوهشگران با کدگذاری صرفاً توصیفی فضا، به بهبود خصوصیات عوارض می‌پرداختند. همچنین امکانی برای ارزیابی شایستگی جواب‌هایی که از طریق الگوریتم تکاملی ارائه می‌شدند، از لحاظ هندسی و مکانی فراهم نیامده است. بنابراین جواب‌های نهایی هنگامی که وارد مرحله به کارگیری می‌شدند، با مشکلاتی چون گسستگی شبکه ارتباطی و هندسه توجیه‌ناپذیر مربوط به تخصیص عوارض، روبه‌رو بودند. این مسائل منجر به کاهش کارایی الگوریتم‌های تکاملی در مسائل مکانی شده بود، به طوری که استفاده عملی از این الگوریتم‌ها در مسائلی که نیاز به تحلیل شبکه برای ارزیابی شایستگی جواب‌ها وجود داشت، امکان‌پذیر نبود. از طرف دیگر، امکان استفاده از قیود مکان‌محور نیز برای هدایت روند تکاملی مسئله وجود نداشت.

در این مقاله با طراحی عملگرهایی ابتکاری برای الگوریتم تکاملی چندهدفه امکان بهره‌گیری از قابلیت‌های مکانی و هندسی در حل مسائل ژنتیک فراهم آمد. همچنین علاوه بر تعریف عملگرهای ژنتیک مکان‌محور، ساختار کدگذاری ابتکاری و جدیدی معرفی گردید و به کار گرفته شد که با استفاده از ترکیب ساختار سلولی-درختی به مدل‌سازی فضای شهری می‌پردازد. در واقع در این پژوهش با استفاده از عملگرهای جدید و امروزی ژنتیکی در الگوریتم NSGA-II به تولید نقشه‌های الگو برای به کارگیری در

تصمیم‌گیری‌های مربوط به طراحی شهرهای جدید و باب روز پرداخته شد. بدین ترتیب می‌توان از این الگوریتم تکاملی چندهدفه به عنوان ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی شهری بهره برد. بررسی نتایج نشان داد که با توجه به ویژگی‌های به کار گرفته شده در عملگرهای الگوریتم تکاملی چندهدفه NSGA-II تمامی جواب‌های تولیدی نسل‌های مختلف از لحاظ برآورده‌سازی قیود، مجاز شناخته شدند و تنها عاملی که منجر به حذف یک جواب (کروموزوم) از چرخه تکامل می‌شد عدم شایستگی کافی آن با توجه به اهداف دستچین شده مسئله در قیاس با دیگر جواب‌ها بود. همچنین نتایج حاصل از آزمون شاخص چیرگی نشان‌دهنده عملکرد مناسب عملگرهای ابتکاری در قالب الگوریتم NSGA-II بود که توان ارائه بهترین جواب‌ها را با جست‌وجوی مناسب فضای جواب، داشتند. از الگوریتم NSGA-II می‌توان برای برنامه‌ریزی شهرهای موجود نیز استفاده کرد و با به کارگیری آن به بهینه‌سازی فضای شهری پرداخت. همچنین می‌توان از دیگر روش‌ها و الگوریتم‌های چندهدفه برای برنامه‌ریزی شهرها استفاده کرد - که کارهای آینده نگارندگان این مقاله را تشکیل می‌دهد.

۵- منابع

Aerts, J., Van Herwijhen, M., Janssen, R., & Stewart, T.J., 2005, **Evaluating Spatial Design Techniques for Solving Land-use Allocation Problems**, Journal of Environmental Planning & Management, 48(1), 121-142.

Balling, R.J., 2004, **City and Regional Planning via a MOEA: Lessons Learned**, APPLICATIONS OF MULTI-OBJECTIVE EVOLUTIONARY ALGORITHMS, C.A. Coello-Coello and G.B. Lamont editors, World Scientific, Singapore, pp. 227-245.

- Bennett, D. A., Xiao, N. & Armstrong, M. P., 2004, **Exploring the Geographic Ramifications of Environmental Policy Using Evolutionary Algorithms**, Annals of the Association of American Geographers, 94(4), pp. 827–847.
- Dai, F.C., C.F. Lee, et al., 2000, **GIS-based Geo-environmental Evaluation for Urban Land-use Planning: A Case Study**, Engineering Geology, 61: 257-271.
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., and Meyarivan, T., 2002, A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2):182–197.
- Deb K., (2007), Evolutionary Multi-Objective Optimization without Additional Parameters, Studies in Computational Intelligence (SCI), 54: 241–257.
- Diamond, J.T. and J.R. Wright, 1988, **Design of An Integrated Spatial Information System for Multi Objective Land-use Planning**, Environment and Planning B, 15(2): 205-214.
- Feng, C.M., & Lin, J.J., 1999, **Using A Genetic Algorithm to Generate Alternative Sketch Maps for Urban Planning**, Computers, Environment and Urban Systems, 23, 91–108.
- Goldberg, D.E., 1989, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Reading, MA: Addison- Wesley.
- Heywood, I., Oliver, J. & Tomlinson, S., 1995, **Building an Exploratory Multi Criteria Modeling Environment for Spatial Decision Support**, In Innovations in GIS2, pp. 127-136.
- Holland, J. H., 1975, **Adaptations in Natural and Artificial Systems**, Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.
- Joerin, F., Theriault, M. & Musy, A., 2001, **Using GIS and Multi Criteria Analysis for Land Use suitability Assessment**, International Journal of GIS.
- Ligmann Z.A., Church. R., Jankowski, P., 2008, **Spatial Optimization as A Generative Tool for Sustainable Multi Objective Land Use Allocation**, International Journal of Geographical Information Science. Vol.22 , No.6, 601-622.
- Lowry, B. M., Balling, J.R, 2009, An Approach to Land-use and Transportation Planning That Facilitates City and Region Cooperation, Environment and planning B: Planning and design, V. 36, pp. 487-504.
- Pareto, V., 1896, **Cours D'Economie Politique**, F. Rouge: Lausanne, English translation published in 1971 by Augustus M. Kelley, New York.
- Pereira, J.M.C, and Duckstein, L., 1993, **A Multiple Criteria Decision Making Approach to GIS-based Land Suitability Evaluation**, International Journal of Geographic Information Systems 7, pp. 407-424.
- Stewart, T.J., Janssen, R., & van Herwijnen, M., 2004, **A Genetic Algorithm Approach to Multiobjective Land Use Planning**, Computers & Operations Research, 31, pp. 2293–2313.

بهبودسازی مکانی فرایند طراحی و برنامه‌ریزی شهری به کمک عملگرهای ابتکاری توسعه داده شده در قالب الگوریتم تکاملی ...

- Wegener, M., 1996, **The Potential of Micro-simulation for Urban Models**, In : G.P. Clarke (Editor), *Micro-simulation for urban and regional policy analysis*, European research in Regional Sciences. pion.London.
- Xiao, N., 2006, **An Evolutionary Algorithm for Site Search Problems**, *Geographical Analysis*, 38(3), pp. 227–247.
- Xiao, N., Bennett, D.A., & Armstrong, M.P., 2002, *Using Evolutionary Algorithms to Generate Alternatives for Multiobjective Site Search Problems*, *Environment and Planning A*, 34(4), pp. 639–656.
- Yao Mu, 2006, **Developing a Suitability Index for Residential Land Use: A Case Study in Dianchi Drainage Area**, Ontario, Canada.
- Zhu, X., R.J. Aspinall, 1996, **ILUDSS: A Knowledge-based Spatial Decision Support System for Strategic Land-use Planning**, *Computers and electronics in Agriculture*, Vol. 15, No. 4, pp. 279-301.