فصلنامه علوم‌محیطی، دوره دوازدهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۳

۹۹-۱۱۰

طراحی شبکه پیوسته فضای سبز شهری با استفاده از تئوری گراف

(مطالعه موردی: منطقه یک تهران)

مجید رمضانی‌مهریان[۱]* و شهرزاد فریادی[۲]

[۱] دانشجوی دکتری برنامه‌ریزی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران

[۲] دانشیار گروه برنامه‌ریزی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۹۲/۴/۵ تاریخ پذیرش: ۹۳/۵/۱۵

چکیده

پیوستگی لکه‌های سبز شهری یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های شبکه فضای سبز و از الزامات افزایش کارایی و مخصوصاً حفاظت از تنوع‌زیستی است. بنابراین برنامه‌ریزان و طراحان فضاهای سبز شهری نیاز به ابزاری برای تجزیه و تحلیل پیوستگی شبکه و بهینه‌سازی آن دارند. با به‌کارگیری اصول اکولوژی سیمای‌سرزمین و مفاهیم موجود در تئوری گراف در کنار هم می‌توان به شبیه‌سازی و تجزیه تحلیل شبکه فضای سبز پرداخت و طرح مناسبی برای توسعه فضای سبز در راستای بهبود پیوستگی، کارایی و حفظ تنوع‌زیستی ارائه کرد. با انتخاب منطقه یک شهر تهران به‌عنوان مطالعه موردی در این مقاله، ابتدا مسیرهای بالقوه برای اتصال مهم‌ترین لکه‌های سبز با استفاده از تحلیل مسیر حداقل هزینه تعیین می‌شود. و سپس با تجزیه و تحلیل شبکه و استفاده از مفاهیم موجود در تئوری گراف و هم‌چنین مدل جاذبه طرح بهینه‌ای برای توسعه فضای سبز منطقه یک تهران ارائه می‌گردد. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده کارایی بالای تحلیل شبکه در مدل‌سازی، تجزیه تحلیل و بهینه‌سازی شبکه فضای سبز شهری است. هم‌چنین در راستای پوشش نارسایی‌های موجود در برنامه‌های توسعه فضای سبز شهری، روش مناسبی برای افزایش پیوستگی شبکه فضای سبز شهری و در نتیجه بهبود کارایی فضای سبز ارائه شد.

کلمات‌کلیدی: فضای سبز، تنوع‌زیستی، تئوری گراف، اکولوژی سیمای‌سرزمین.

Urban Green Space Network Development Using Landscape Ecology Principles and Graph Theory (Case Study: Region 1 Tehran, Iran)

Majid Ramezani Mehrian[1]* & Shahrzad Faryadi[2]

[1] *PhD. Student of Environmental Planning, Faculty of Environment, University of Tehran*

[2] *Associate Professor, Department of Environmental Planning, Faculty of Environment, University of Tehran*

Abstract

Connectivity is one of the most important characteristics of urban green network and its necessary to enhance efficiency of landscape and biodiversity. Hence, urban green space designers need a tool to analyze and optimize the connectivity of green networks. Concepts of graph theory can be used to simulate and analyze of green networks and develop a plan prepared for improving efficiency and biodiversity. In this paper, potential corridors were determined for connecting the main green patches of district 1 of Tehran using shortest path analysis. Then, using network analysis and principles existed in graph theory and gravity model, an optimized plan was developed for urban green space network of this area. Results indicated that network analysis provided high efficiency in modeling, analyzing and optimizing of the urban green space network. Therefore, in order to cover the deficiencies in urban green space development plans, an appropriate method for increasing network continuity and enhancing the efficiency green space was presented.

Keywords: Green space, Biodiversity, Graph theory, Landscape ecology.

* Corresponding author. *E-mail Address*: majidmehrian@ut.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه تنوع‌زیستی از مهم‌ترین مباحث مربوط به حفاظت از محیط‌زیست به شمار می رود و تاثیر اکوسیستم‌های شهری بر تنوع‌زیستی نیز امری شناخته شده است. ارتقاء سطح تنوع‌زیستی در اکوسیستم‌های شهری از اهمیت بالایی برخوردا است [۱]. هم‌چنین حضور عناصر طبیعی در شهرها تعیین‌کننده میزان حساسیت شهروندان به مباحث محیط‌زیستی است. از آن‌جایی‌که جمعیت شهرنشین جهان در حال افزایش است، حضور عناصر طبیعی در اکوسیستم‌های شهری می‌تواند نقش تاثیر گذاری بر دیدگاه افراد در مورد اکوسیستم‌های طبیعی ایفا کند [۲]. هم‌چنین از نقطه نظر اکولوژیکی اکوسیستم‌های شهری پویایی بالایی دارند و می‌توانند دانش مدیریت تنوع‌زیستی در دیگر اکوسیستم‌ها را افزایش دهند. مباحث مربوط به تنوع‌زیستی در اکوسیستم‌های شهری را می‌توان در سه دسته عمده قرار داد: (۱) مباحث مربوط به اثر شهر بر تنوع‌زیستی (۲) مباحث مربوط به چگونگی افزایش تنوع‌زیستی در شهرها و (۳) مباحث مربوط به مدیریت گونه‌های ناخواسته [۲].

پیوستگی سیمای‌سرزمین یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مهم و لازم برای حفاظت از تنوع‌زیستی است. حفظ و ارتقاء پیوستگی سیمای‌سرزمین منجر به حفظ و بهبود عناصر زیستی و عملکرد سیمای‌سرزمین می‌شود. تکه‌تکه شدن زیستگاه در اکوسیستم‌های شهری می‌تواند اثرات نامطلوبی داشته باشد. بنابراین جهت مدیریت صحیح، شناخت پیوستگی سیمای‌سرزمین شهری و روستایی و برنامه‌ریزی برای حفظ و بهبود آن رویکرد مناسبی به‌نظر می‌رسد [۳].

زیست‌شناسان و بوم‌شناسان حفاظت، استفاده از کریدورها را جهت کاهش انزوای زیستگاه‌های تکه‌تکه شده[۱] و حفظ پیوستگی[۲] لکه‌ها توصیه می‌کنند، آن‌ها معتقدند توسعه شبکه فضای سبز شهری می‌تواند منجر به افزایش جابه‌جایی گونه‌ها و در نتیجه بهبود ارزش اکولوژیکی آن شود [۴]. کریدورها، فضاهای سبز را به‌هم مرتبط می‌کنند و جهت حفظ و ارتقاء تنوع‌زیستی شهری از اهمیت بالایی برخوردارند. آن‌ها نه‌تنها جابه‌جایی گونه‌ها را آسان می‌سازند بلکه زیستگاه‌هایی را برای گونه‌های حاشیه‌ای فراهم می‌آورند. پیوستگی لکه‌های سبز در مقیاس سیمای‌سرزمین نقش مهمی را در بقاء جامعه زیستی ایفا می‌کند. بنابراین بهبود پیوستگی لکه‌های سبز یکی از ارکان اصلی حفظ تنوع‌زیستی در شهرها است.

توسعه شبکه فضای سبز شهری شامل حفاظت از فضاهای سبز موجود، ایجاد شکل‌های فضایی جدید، احیا و حفظ پیوستگی میان فضاهای سبز متنوع است. جهت حفظ و احیاء پیوستگی برنامه‌ریزان ابتدا باید بهترین لکه‌ها را تعیین کنند و سپس به تعیین مسیرکریدورهای اتصال‌دهنده لکه‌ها با درنظر گرفتن فاصله بین لکه‌ها و هم‌چنین موانع ناشی از انواع کاربری زمین بپردازند [۵].

در مطالعات مربوط به توسعه فضای سبز در ایران، غالباً پیوستگی شبکه فضای سبز در نظر گرفته نمی‌شود و صرفاً شاخص‌هایی از قبیل سرانه فضای سبز یا نسبت سطح فضای سبز معیار تصمیم‌گیری است. تاکنون مطالعات کمی در زمینه ارزیابی شبکه فضای سبز شهری صورت‌پذیرفته است. کارهای انجام شده بیش‌تر بر مبانی نظری مسیرهای سبز [۶]، شبکه سبز [۷] و یا بر مبحث الگوی های پراکنش مانند تکه شدگی[۳] و پیوستگی [۸] تمرکز داشته‌اند. در مطالعات انجام شده روش مناسبی برای تعیین مسیر کریدور بهینه در شبکه فضای سبز وجود ندارد. جغرافیای زیستی جزیره نیز، تنها فاصله میان زیستگاه‌ها را بدون در نظر گیری عدم تجانس محیط، معیار قرار می دهد [۹]. والکر و همکارش ابزار "مسیر بهینه" موجود در سیستم اطلاعات جغرافیایی را برای تعیین کریدورهای بالقوه در سال ۱۹۹۷ به‌کار بردند. آن‌ها با محاسبه هزینه تجمعی سفر در جهت‌های مختلف، مناسب‌ترین مسیرها را برای احداث کریدورهای سبز جهت تسهیل جابه‌جایی حیات‌وحش در سه زیستگاه حفاظت‌شده تعیین کردند [۱۰]. هارگروف و همکارانش مدل تحلیل مسیرهای میان زیستگاهی را برای تعیین کریدورهای بالقو در سرزمین‌های پیچیده ارائه کرده‌اند [۹]. خروجی مدل آن ها شامل: ۱) نقشه مسیرهای پرتردد میان لکه‌ها؛ ۲) ماتریس نرخ تردد میان هر لکه با سایر لکه‌ها؛ و ۳) اولویت‌بندی لکه‌ها بر اساس درجه اهمیت آن‌ها در تسهیل سازی جابه‌جایی حیات‌وحش؛ است. هم‌چنین کنگ[۴] و همکارانش با استفاده از روش مسیر بهینه محتمل‌ترین کریدورهای ارتباطی را تعیین و با استفاده از مدل جاذبه و تئوری گراف یک شبکه پیوسته فضای سبز برای شهر

جینان چین ارائه کرده‌اند [۷].

در این تحقیق ابتدا با استفاده از تحلیل حداقل هزینه[۵] و کوتاه‌ترین مسیر[۶] در سیستم اطلاعات جغرافیایی[۷]، مسیرکریدورهای بالقوه با در نظر گرفتن عدم تجانس موجود در سیمای‌سرزمین شهری تعیین می‌شود. هم‌چنین سعی می‌شود با استفاده از مفاهیم موجود در تئوری گراف به ارائه راهکاری مناسب برای بهینه‌سازی پیوستگی و توسعه مناسب شبکه فضای سبز شهری در راستای افزایش تنوع‌زیستی پرداخته شود.

۲- مواد و روش‌ها

پیشینه تئوری گراف به بیش از ۳۰۰ سال پیش می‌رسد و اکنون این تئوری در علوم طبیعی، اجتماعی، مهندسی و ریاضیات مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱]. تئوری گراف و آنالیز شبکه ابزارها و روش‌های قدرتمندی برای تحلیل سیستم‌های پیچیده و بهینه‌سازی آن‌ها فراهم می‌کند [۱۲]. تئوی گراف سیستم‌های پیچیده را به‌عنوان مجموعه‌ای از گره‌ها و لینک‌ها تعریف می‌کند، و قواعدی را برای تعیین ویژگی‌های شبکه به‌کار می‌گیرد.

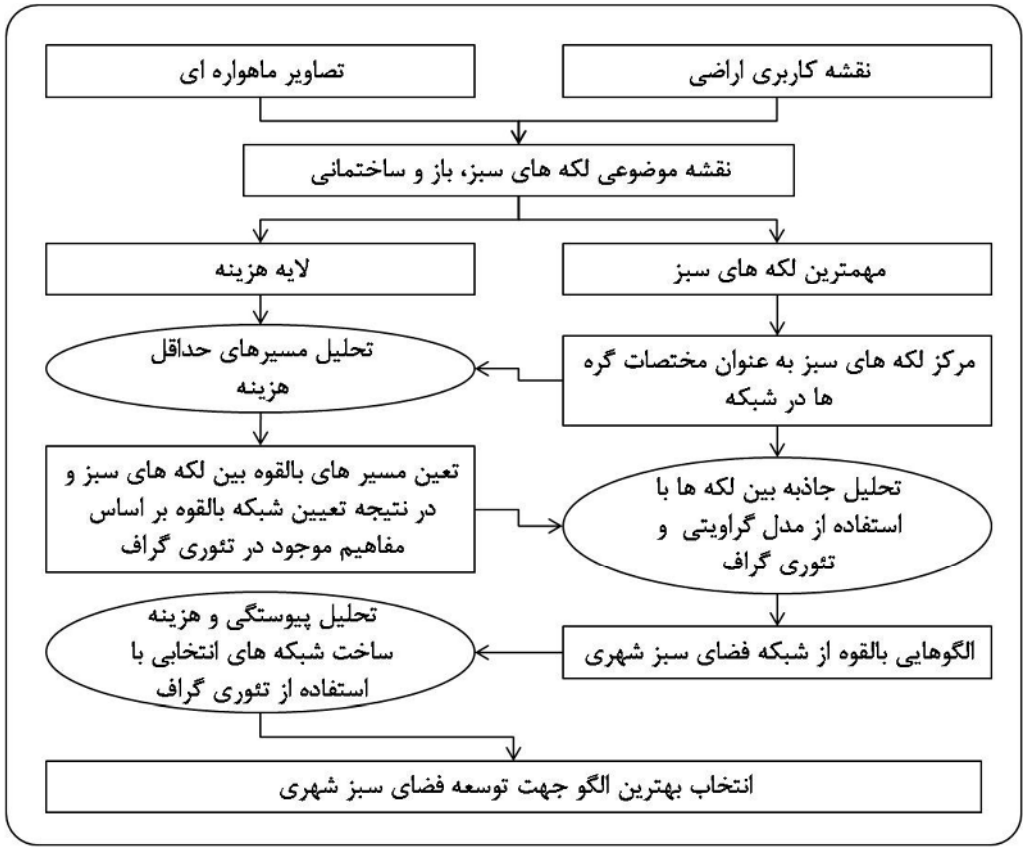
به‌عنوان مثال با گراف می‌توان یک نقشه بسیار بزرگ یا شبکه‌ای عظیم را در درون یک ماتریس به نام ماتریس وقوع گراف ذخیره کرد و یا الگوریتم‌های مناسب مانند الگوریتم دایجسترا یا کروسکال را بر روی آن اعمال نمود. هم‌چنین شاخص‌های مرکزیت[۸] در شبکه برای پیدا کردن مهم‌ترین عارضه شبکه به‌کار می‌روند. درجه مابینی‌گره[۹] نمایانگر تعداد مسیرهای کوتاهی است که از یک گره معین می‌گذرد؛ گرهی دارای مرکزیت بالایی است که درجه مابینی بودن آن بالا باشد[۱۱]. یکی دیگر از مهم‌ترین تحلیل‌هایی که با استفاده از مفاهیم شبکه انجام می‌شود، تعیین محدوده سرویس‌دهی یک کاربری خاص در شبکه دسترسی یک شهر است.

بوم‌شناسان سیمای‌سرزمین از تئوری گراف برای ساده سازی سیمای‌سرزمین های پیچیده به اشکال فضایی قابل درک و الگوهای آشکار استفاده می‌کنند [۱۳]. وقتی که از تئوری گراف در اکولوژی سیمای‌سرزمین استفاده می‌کنیم لکه‌ها نشان‌دهنده گره‌ها و مسیرهای جابه‌جایی بین لکه‌ها همان لینک‌ها هستند. در چارچوب حفاظت حیات‌وحش، منظور از گره، می‌تواند لکه، زیستگاه، مناطق حفاظت‌شده، یا محل تقاطع کریدورها باشد [۱۲]. بنابراین کیفیت، کارایی و پیوستگی شبکه فضای سبز را می‌توان با استفاده از تئوری گراف مورد ارزیابی قرار داد.

یک گره در شبکه می‌تواند ویژگی‌هایی چون، مختصات جغرافیایی، وسعت و کیفیت یا حاصلخیزی داشته باشد. شبکه‌ای که در آن لینک‌ها دارای خصوصیاتی مثل فاصله و یا دیگر ویژگی‌های کمی شده هستند شبکه وزن‌دار، و اگر جهت جریان در لینک‌ها مشخص باشد، شبکه جهت دار[۱۰] نامیده می‌شود. باتوجه‌به ویژگی جریان های طبیعی و خصوصیات بیولوژیکی جوامع زیستی شبکه‌های زیستگاه اغلب از نوع گراف‌های "وزن‌دار و دارای جهت"[۱۱] هستند [۱۱].

شکل ۱ فرآیند تعیین کریدورهای بالقوه و ارائه طرح توسعه فضای سبز به‌کار رفته در این تحقیق را ارائه می‌دهد. با استفاده از نقشه کاربری‌اراضی و تصاویر ماهواره‌ای، نقشه اولیه جهت تأمین داده‌های جغرافیایی مورد نیاز تهیه شد. این نقشه یک نقشه موضوعی است که در آن عوارض جغرافیایی به سه دسته لکه‌های سبز، فضای باز و فضای ساختمانی تقسیم شده‌اند. با استفاده از این نقشه دو لایه اطلاعاتی تحت عنوان‌های مهم‌ترین لکه‌های سبز و لایه هزینه تهیه شد. لایه مهم‌ترین لکه‌های سبز در بر گیرنده مهم‌ترین لکه‌های موجود در محدوده مورد مطالعه است که باتوجه‌به کیفیت و اندازه لکه از میان لکه‌های سبز انتخاب می‌شوند. مرکز این لکه‌ها به‌عنوان موقعیت جغرافیایی آن‌ها و محل قرارگیری لکه‌ها در شبکه فضای سبز تعیین شد. لایه هزینه یک لایه رستری است که ارزش هر پیکسل در آن نشان‌دهنده میزان مقاومت آن پیکسل در برابر جابه‌جایی در سیمای‌سرزمین است.

تابع مسیر حداقل هزینه یک الگوریتم بهینه‌سازی رستر محور است. در ابتدا از این الگوریتم برای تعیین کم‌هزینه‌ترین مسیر برای ساخت راه ارتباطی بین دو نقطه استفاده می‌شد. از این الگوریتم هم‌چنین می‌توان جهت تعیین مسیرهای ارتباطی لکه‌های سبز یا زیستگاه‌ها استفاده کرد [۱۴]. جهت استفاد از این الگوریتم در تعیین مسیرهای حداقل هزینه برای هرکدام از لکه‌ها باید یک لایه وزن‌دار هزینه تهیه شود. این لایه نیز یک لایه رستری است که در آن ارزش هر پیکسل نشان‌دهنده هزینه تجمعی از مرکز لکه تا آن پیکسل است. اگر برای تمام



شکل ۱- فرآیند مورد استفاده در این مقاله جهت طرح توسعه شبکه فضای سبز

لکه‌ها مسیرهای حداقل هزینه به دیگر لکه‌ها تعیین شود، از ترکیب همه مسیرها در کنار هم شبکه بالقوه ای که در آن تمام لکه‌ها بهم مرتبط‌اند ارائه می‌شود. با محاسبه میزان برهم‌کنش بین لکه‌ها و تعیین اولویت لینک‌ها و لکه‌ها می‌توان گزینه‌های مختلفی را برای توسعه شبکه فضای سبز ارائه داد و سپس با استفاده از شاخص‌های پیوستگی موجود در تئوری گراف و ضریب هزینه، گزینه بهینه را انتخاب کرد.

۲-۱- تحلیل برهم‌کنش گره‌ها در شبکه

برهم‌کنش بین گره‌ها معمولاً با استفاده از مدل جاذبه[۱۲] مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [۱۵]. میزان برهم‌کنش دو گره نشان‌دهنده اهمیت گره‌ها و کارایی لینکی است که آن‌ها را به‌هم وصل می‌کند. برهم‌کنش بین گره‌ها با استفاده از فرمول زیر (معادله ۱) محاسبه می‌شود [۷-۱۲].

$$G_{ab} = \frac{N_a N_b}{D_{ab}^2} \qquad (۱)$$

به‌طوری‌که G_{ab} برهم‌کنش بین گره‌های a و b، N_a و N_b وزن گره‌های a و b، و D_{ab}، مقاومت تجمعی نرمال شده کریدور بین گره‌های a وb است. وزن گره‌ها با استفاده از کیفیت و اندازه نرمال شده آن به‌دست می‌آید (معادله ۲):

$$N_i = \frac{1}{P_i} \times \ln(S_i) \qquad (۲)$$

که در آن N_i وزن گره iام، P_iمقاومت گره iام، و S_i اندازه نرمال شده گره iام است. D_{ab} نیز با استفاده از فرمول زیر تعیین می‌شود (معادله ۳):

$$D_{ab} = \frac{L_{ab}}{\sum L} \qquad (۳)$$

که در آن L_{ab} مقاومت تجمعی کریدور بین گره‌های a و b، و $\sum L$ مجموع مقاومت تجمعی بین گره‌ها است. بنابراین می‌توان معادله را به این صورت معادله (۴) نوشت:

$$G_{ab} = \frac{N_a N_b}{D_{ab}^2} = \frac{(\sum L)^2 \ln(S_a S_b)}{L_{ab}^2 P_a P_b} \qquad (۴)$$

۲-۲- تحلیل پیوستگی شبکه

در تئوری گراف درجه ارتباط تمامی گره‌های موجود در شبکه به‌عنوان پیوستگی شبکه نامیده می‌شود. فاکتورهای تعیین‌کننده پیوستگی شامل [۱۲]: (۱) تعداد شبکه‌های گسسته موجود در منطقه (۲) تعداد لینک‌های موجود در شبکه و (۳) تعداد گره‌های موجود در شبکه، هستند.

پیچیدگی یک شبکه فضای سبز را می‌توان با استفاده از مفاهیم درجه گردش شبکه[۱۳]، نسبت لینک به گره، پیوستگی شبکه، نسبت هزینه، و آنالیز ویژگی‌های گره و لینک اندازه‌گیری کرد [۷-۱۷]. درجه گردش شبکه به درجه حضور حلقه در شبکه اشاره دارد، و با استفاده از شاخص α (نسبت تعداد حلقه‌ها موجود در شبکه به تعداد حداکثر حلقه‌های ممکن (معادله ۵)) محاسبه می‌شود [۱۷-۱۸]:

$$\alpha = \frac{(L\text{-}V+1)}{(2V\text{-}5)} \qquad (۵)$$

که درآن L تعداد کریدورها و V تعداد گره‌ها یا لکه‌ها است. گستره شاخص α از صفر (برای شبکه‌های بدون حلقه) تا یک (برای شبکه با حداکثر تعداد حلقه ممکن) است. نسبت تعداد لینک به گره شاخص β نام دارد و هرچه بیش‌تر باشد نشان‌دهنده پیوستگی بیش‌تر شبکه است [۱۹]. دیگر شاخص پیوستگی شبکه از تقسیم تعداد لینک‌های شبکه بر حداکثر تعداد ممکن لینک به‌دست می‌آید و شاخص γ نام دارد (معادله ۶) [۱۸]:

$$\gamma = \frac{l}{l_{\max}} = \frac{l}{3(v\text{-}2)} \qquad (۶)$$

۲-۳- تحلیل هزینه

شاخص‌های α، β و γ تنها ویژگی‌های فضایی لکه‌ها و کریدورها را بدون درنظر گرفتن کارایی هزینه مورد بررسی قرار می‌دهند [۷]. شاخص نسبت هزینه[۱۴] (معادله ۷)، برای درنظر گرفتن هزینه‌های ساخت شبکه به‌کار می‌رود [۷-۱۲]:

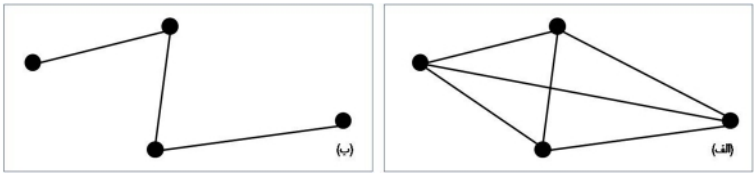
$$Cost\ ratio = 1\text{-}\left(\frac{n}{\sum_{i=1}^{n} L_i}\right) \qquad (۷)$$

که در آن n تعداد لینک و L_i مقاومت تجمعی کریدور iام است.

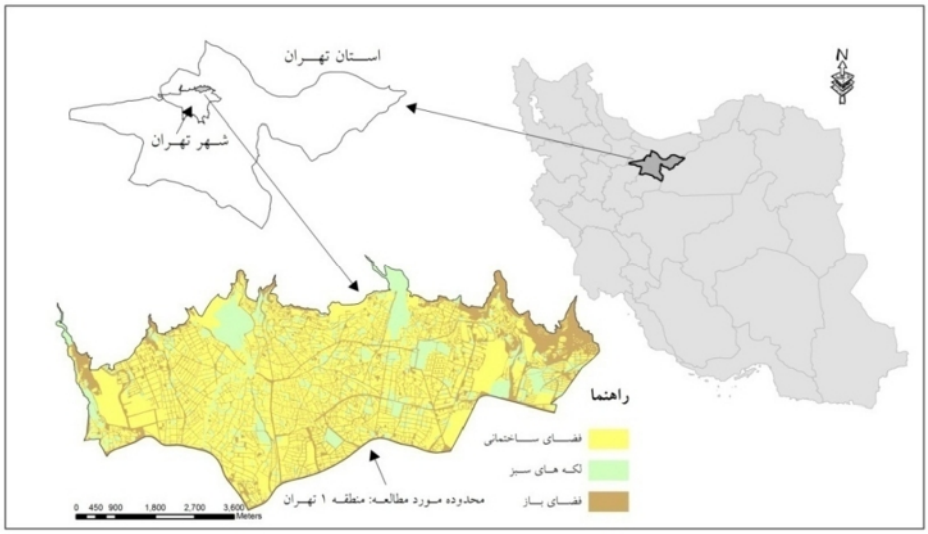
به‌گفته هلموند کارایی شبکه‌ها را می‌توان برحسب "هزینه برای استفاده‌کننده"[۱۵] و یا "هزینه برای سازنده"[۱۶] مورد سنجش قرار داد [۲۰]. شبکه‌ای که در آن هزینه جابه‌جایی بین هرکدام از زوج گره‌ها کم‌ترین میزان باشد را شبکه "حداقل هزینه برای استفاده‌کننده" می‌نامند، شکل۲ الف مثالی از شبکه‌ای با ۴ گره نشان می‌دهد که در آن هرکدام از گره‌ها به‌طور مستقیم به‌سایر گره‌ها مرتبط‌اند در این شبکه هزینه جابه‌جایی بین گره‌ها به‌حداقل رسیده است. از طرف دیگر شبکه‌ای که هزینه ساخت آن برای سازنده حداقل باشد را شبکه "حداقل هزینه برای سازنده" می‌نامند، شکل۲-ب شبکه‌ای را نشان می‌دهد که در آن گره‌ها با حداقل هرینه ساخت با یکدیگر مرتبط شده‌اند.

۲-۴- محدوده مورد مطالعه

در اجرای روش پیشنهادی این مقاله منطقه یک تهران به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. منطقه یک کوهستانی است و دارای باغات فراوان است. سطح سرانه فضای سبز در این منطقه در سال ۱۳۸۵، ۴٫۵۸ مترمربع بود، که در صورت اجرای طرح جامع مصوب سال ۱۳۸۶ قرار بود این میزان به ۲۳٫۴۷ مترمربع برسد [۲۱]. شکل ۳ موقعیت جغرافیایی این منطقه را نشان می‌دهد. این منطقه از شمال به رشته‌کوه البرز، از غرب به رودخانه درکه، از جنوب به بزرگراه‌ها شهید چمران و آیت‌الله‌صدر و از شرق به جاده لشکرک و پارک جنگلی قوچک محدود می‌شود. شهرداری منطقه یک دارای ۱۰ ناحیه و ۲۶ محله شهری است. مساحت منطقه بدون احتساب حریم ۴۶ کیلومترمربع و جمعیت آن بر اساس سرشماری سال ۸۵ حدود ۳۸۰ هزار نفر می‌باشد.



شکل ۲- مثال انواع شبکه: الف) شبکه حداقل هزینه برای استفاده‌کننده، ب) شبکه حداقل هزینه برای سازنده (برگرفته از: [۷])

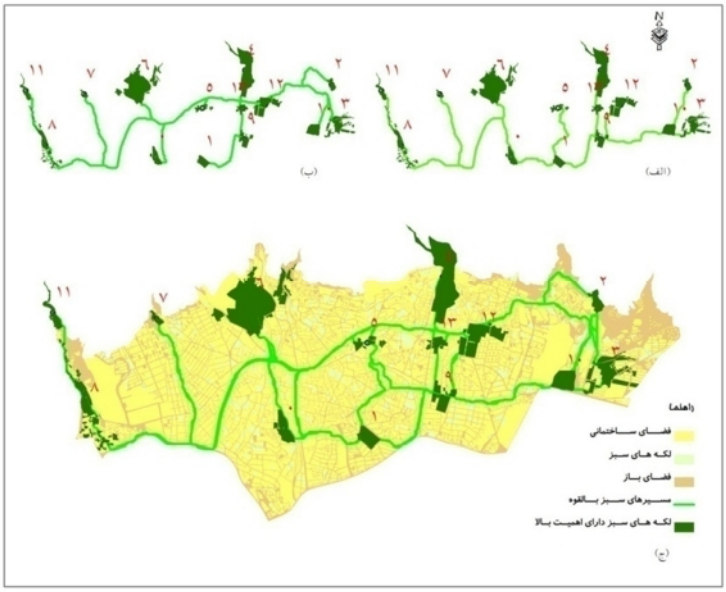


شکل ۳- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

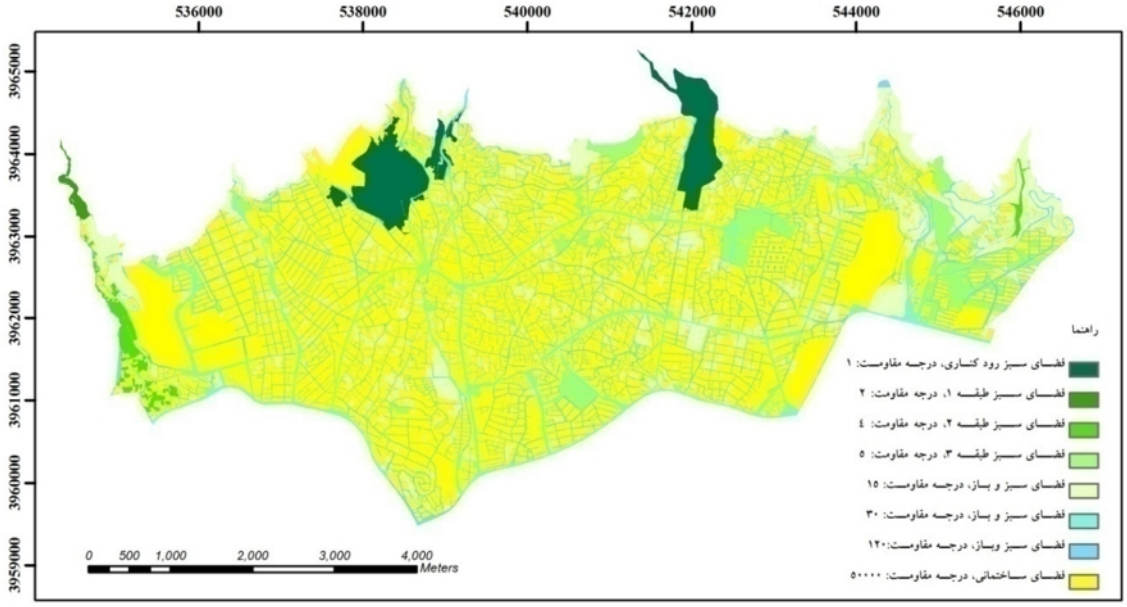
۳- نتایج و بحث

طبق نقشه موضوعی به‌دست آمده از نقشه کاربری زمین سال ۱۳۸۹ با مقیاس ۵۰۰۰، ۵۸ درصد از سطح منطقه یک تهران به فضای ساختمانی، ۱۵ درصد به فضای سبز عمومی و خصوصی و ۲۶ درصد به فضای باز، اختصاص داده شده است. تراکم جمعیتی در این منطقه ۷۵ نفر در هکتار است و از تراکم پوشش گیاهی کم تا متوسط برخوردار است [۲۲].

شکل ۴-ج مسیرهای بالقوه ای به‌دست آمده از الگوریتم حداقل هزینه را نشان می‌دهد. جهت تعیین این مسیرها برای هرکدام از نقطه ها تحلیل کوتاه‌ترین مسیر به‌سایر لکه‌ها انجام شد. به‌عنوان مثال شکل ۴-الف کوتاه‌ترین مسیرها از لکه شماره یک به‌سایر لکه‌ها و شکل ۴-ب کوتاه‌ترین مسیرها از لکه شماره چهار به‌سایر لکه را نشان می‌دهد. پیش‌نیاز این تحلیل‌ها لایه وزن‌دار هزینه برای هرکدام از گره‌ها به‌صورت جداگانه بود که با استفاده از آنالیز هزینه وزنی در محیط رستر نرم افزار GIS انجام شد لایه هزینه به‌کار رفته در این تحلیل در شکل ۵ ارائه شده است. در این لایه فضای ساختمانی بیش‌ترین درجه مقاومت را در برابر جابه‌جایی در سیمای‌سرزمین دارا است.



شکل ۴- مسیرهای بالقوه فضای سبز ، الف) کوتاه‌ترین مسیرهای بالقوه لکه شماره یک به دیگر لکه‌ها، ب) کوتاه‌ترین مسیرهای بالقوه لکه شماره چهار به دیگر لکه‌ها، ج) کوتاه‌ترین مسیرهای بالقوه تمامی لکه‌ها به یکدیگر



شکل ۵- لایه هزینه نشان‌دهنده میزان درجه مقاومت عوارض در برابر جابه‌جایی در سیمای‌سرزمین

کریدورهای بالقوه در شکل ۴-ج نشان‌دهنده مسیرهای اتصال است که می‌توانند به‌عنوان راه‌حل افزایش پیوستگی لکه‌های سبز منطقه یک تهران بالفعل شوند. میزان برهم‌کنش میان لکه‌ها به وزن لکه‌ها و هزینه تجمعی میان آن‌ها وابسته است. جدول ۱ هزینه تجمعی بین لکه‌ها و جدول ۲ وزن لکه‌ها و اولویت‌بندی درجه اهمیت آن‌ها را ارائه می‌دهد. با استفاده از این داده‌ها (جدول ۱ و ۲) میزان برهم‌کنش میان لکه‌ها با استفاده از معادله ۴ تعیین شد (جدول ۳). هرچه میران برهم‌کنش میان دو لکه بیش‌تر باشد نشان‌دهنده اهمیت و کارایی بیش‌تر آن دو لکه و لینکی است که آن ها را به‌هم متصل می‌کند. بنابراین می‌توان گفت هرچه برهم‌کنش میان دو لکه بیش‌تر باشد اولویت احداث لینک اتصال‌دهنده آن دو لکه بالاتر است.

جدول ۱- هزینه تجمعی جابه‌جایی میان لکه‌های فضای سبز با استفاده از مسیرهای سبز بالقوه

شماره لکه	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
۰	۰	۷۰۳۲	۲۰۰۱۸	۲۰۵	۱۳۵	۲۰۲	۳۷۰	۱۰۹	۱۳۱	۱۲۴	۱۹۷	۱۴۵	۱۴۳	۱۳۸
۱		۰	۱۴۴۴۰	۱۴۰	۱۴۳	۲۲۴	۱۰۶	۱۷۸	۲۰۰	۵۴۰	۱۲۶	۲۱۴	۱۳۱	۱۲۲
۲			۰	۱۱۶	۸۱۶	۲۲۰	۱۷۱	۲۴۴	۲۶۵	۹۰۵	۱۷۹	۲۸۰	۵۷۱	۷۸۷
۳				۰	۸۷۲	۲۲۵	۱۷۷	۲۵۰	۲۷۱	۸۶۸	۱۵۳	۲۸۶	۶۲۷	۸۴۳
۴					۰	۱۵۵	۱۰۷	۱۸۰	۲۰۱	۹۵۷	۹۲۳	۲۱۶	۲۵۲	۲۱۴
۵						۰	۱۷۳	۲۴۶۶	۲۶۸	۲۲۳	۲۳۰	۲۸۲	۱۶۳	۱۵۸
۶							۰	۷۹۳	۱۰۰	۱۶۰	۱۸۲	۱۱۵	۱۱۵	۱۰۹
۷								۰	۱۲۳	۲۳۲	۲۵۵	۱۳۸	۱۸۸	۱۸۲
۸									۰	۲۵۴	۲۷۶	۱۴۶	۲۰۹	۲۰۴
۹										۰	۷۲۹	۲۶۸۶	۷۷۴	۷۴۳
۱۰											۰	۲۹۱	۶۷۸	۸۹۴
۱۱												۰	۲۲۴	۲۱۸
۱۲													۰	۲۲۳
۱۳														۰

جدول ۲- اولویت‌بندی اهمیت لکه‌های فضای سبز منطقه یک تهران

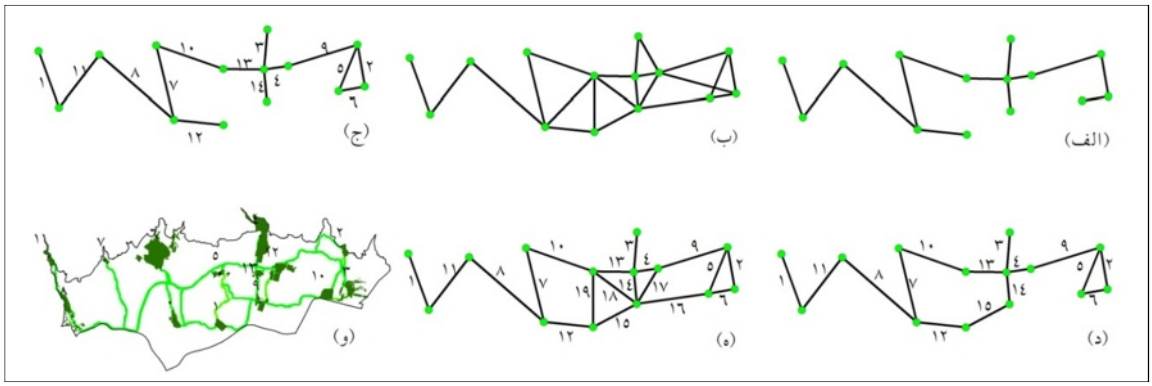
شماره لکه	مساحت (مترمربع)	مساحت نرمال شده	درجه مقاومت لکه	وزن	اولویت‌بندی‌اهمیت لکه‌ها
۰	۱۲۲۸۲۰	۰٫۰۳۹	۱۵	۰٫۲۱	۱۲
۱	۱۰۶۰۵۰	۰٫۰۳۴	۵	۰٫۶۷	۷
۲	۷۰۸۴۸	۰٫۰۲۲	۵	۰٫۷۵	۶
۳	۳۰۰۹۸۲	۰٫۰۹۶	۵	۰٫۴۶	۱۰
۴	۵۹۳۵۵۸	۰٫۱۹۱	۱	۱٫۶۵	۲
۵	۶۱۳۸۶	۰٫۰۱۹	۵	۰٫۷۸	۵
۶	۸۴۷۳۹۵	۰٫۲۷۲	۱	۱٫۲۹	۳
۷	۳۱۶۶۹	۰٫۱۰	۵	۰٫۹۱	۴
۸	۲۵۶۱۲۷	۰٫۰۸۲	۴	۰٫۶۲	۸
۹	۱۲۸۰۸۳	۰٫۰۴۱	۱۵	۰٫۲۱	۱۳
۱۰	۱۵۰۴۱۳	۰٫۰۴۸	۱۵	۰٫۲۰	۱۴
۱۱	۸۰۶۸۹	۰٫۰۲۶	۲	۱٫۸۲	۱
۱۲	۲۸۶۳۷۴	۰٫۰۹۲	۵	۰٫۴۷	۹
۱۳	۷۲۰۵۰	۰٫۰۲۳	۱۵	۰٫۲۵	۱۱

جدول ۳- برهم‌کنش میان لکه‌های فضای سبز منطقه یک تهران

شماره لکه	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
۰	۰	۵۶۷	۷۸۴	۴۵۸	۳۷۲	۷۹۶	۳۹۲	۳۱۷	۱۵۱۱	۵۷۳	۲۱۶	۳۵۷۹	۹۵۸	۵۴۵
۱		۰	۴۷۲	۳۰۷۱	۱۰۴	۲۰۲	۱۴۹	۳۷۴	۲۰۲۹	۹۴۸	۱۶۳۵	۵۱۵۶	۳۶۱۷	۲۱۷۸
۲			۰	۵۰۳۹	۳۶۲	۲۳۶	۶۴۵	۲۲۴	۱۲۸۷	۳۷۸	۹۱۲۶	۳۳۸۵	۲۱۳۱	۵۹۰۳
۳				۰	۱۹۵	۱۳۸	۳۷۳	۱۳۲	۷۶۲	۲۵۳	۷۷۰۶	۲۰۰۹	۱۰۹۰	۳۱۷۵
۴					۰	۱۰۳	۳۶۲	۹۰۲	۴۹۰۳	۷۴۰	۷۵۶۴	۱۲۴۷۴	۲۳۸۲	۱۷۴۹۶
۵						۰	۶۵۲	۲۲۸	۱۳۱۴	۶۴۳	۵۷۴	۳۴۵۸	۲۶۹۲	۱۵۱۷
۶							۰	۳۶۵	۱۵۳۸	۲۰۷	۱۵۲۷	۳۴۳۵۶	۹۰۳۸	۵۲۴۸
۷								۰	۷۲۴۴	۶۹۵	۵۴۹	۱۶۹۵۳	۲۳۸۶	۱۳۳۳
۸									۰	۳۹۶	۳۱۸	۱۰۲۷۴	۱۳۰۷	۷۲۶
۹										۰	۱۵۵۵	۱۰۳۷	۳۲۶۴	۱۸۶۱
۱۰											۰	۸۳۹	۴۰۴۰	۱۲۲۲
۱۱												۰	۳۳۴۳	۱۸۴۹
۱۲													۰	۴۶۰۸۱
۱۳														۰

شکل ۶-ب الگوی شبکه‌ای را نشان می‌دهد (در منطقه ۱ تهران) که در آن تمام مسیرهای بالقوه وجود دارد و یک شبکه با حداقل هزینه برای مصرف‌کننده محسوب می‌شود. در این شبکه شاخص‌های پیوستگی بالاترین میزان را دارند اما هزینه ساخت این شبکه برای اجرای آن بالاست. شکل ۶-الف نیز الگوی شبکه‌ای را نشان می‌دهد که در آن تمامی لکه‌ها با حداقل تعداد لینک ممکن و حداقل هزینه به یکدیگر متصل‌اند، در این شبکه شاخص پیوستگی پایین و هزینه ساخت حداقل است.

باتوجه‌به اولویت لینک‌ها بر اساس کارایی می‌توان گزینه‌های دیگری از الگوی شبکه فضای سبز ارائه داد که از لحاظ پیوستگی و هزینه ساخت در حالت بینابینی قرار دارند. برهمین اساس چندین گزینه دیگر در این مقاله ارائه شده و با استفاده از شاخص‌های تحلیل شبکه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. شکل ۶-ج گزینه شماره یک را نشان می‌دهد که در آن تمامی لکه‌ها با ۱۴ لینک به‌هم مرتبط شده‌اند شماره‌های موجود در این شکل اولویت لینک‌ها را براساس کارایی آن‌ها نشان می‌دهد. در گزینه ی شماره دو تعداد لینک‌ها ۱۵ (شکل ۶-د). در گزینه شماره سه تعداد لینک‌ها به ۱۹ افزایش یافته است (شکل ۶-ه).



شکل ۶- گزینه‌های توسعه فضای شبکه فضای سبز بر اساس تئوری گراف و مدل گراویتی، الف) شبکه حداقل هزینه برای توسعه دهنده، ب)شبکه حداقل هزینه برای مصرف‌کننده، ج) گزینه شماره یک–شماره‌ها نشان‌دهنده اولویت لینک‌ها بر اساس کارایی هستند، د) گزینه شماره دو، ه) گزینه شماره سه، و) شمایی از لکه‌های سبز و مسیرهای سبز بالقوه

تحلیل پیوستگی و ضریب هزینه این چهار گزینه در جدول ۴ ارائه شده است. ضریب آلفا در شبکه با حداقل هزینه برای سازنده صفر است به این معنی است که لکه‌ها با حداقل تعداد لینک به‌یکدیگر متصل شده‌اند و هیچ حلقه‌ای در شبکه شکل نگرفته است. با مقایسه ضریب‌های آلفا، بتا و گاما در این شبکه با دیگر الگوها می‌توان گفت این شبکه دارای کم‌ترین میزان پیوستگی با نسبت هزینه ۰/۷۲ است. نسبت هزینه نشان‌دهنده ضریب هزینه به‌ازای هر واحد مسیر سبز است. با مقایسه ضریب هزینه برای گزینه‌های طراحی شده می‌توان گزینه‌ها را از لحاظ افزایش هزینه ساخت تحلیل کرد. در گزینه یک نسبت‌به شبکه با حداقل هزینه برای سازنده میزان پیوستگی کمی افزایش داشته اما نسبت هزینه تغییر نکرده است بنابراین می‌توان گفت گزینه یک انتخاب بهتری نسبت‌به شبکه حداقل هزینه برای سازنده است. در گزینه دو نسبت‌به گزینه یک شاخص‌های پیوستگی با افزایش محسوس و نسبت هزینه با افزایش نا محسوس (۰/۰۱) همراه بوده است. بر این اساس نیز می‌توان گفت که گزینه دو دارای کارایی بیش‌تری نسبت‌به گزینه یک است. در گزینه سه نسبت‌به گزینه دو پیوستگی با شدت بیش‌تری افزایش یافته و نسبت هزینه دارای افزایش نسبتاً کمی بوده است. بنابراین می‌توان گفت گزینه سه نسبت‌به گزینه دو دارای کارایی بیش‌تری است. در شبکه با حداقل هزینه برای مصرف‌کننده نسبت‌به گزینه سه، پیوستگی با نسبتی کم‌تر از افزایش پیوستگی گزینه سه نسبت‌به دو افزایش داشته اما نسبت هزینه با نسبتی بیش‌تر افزایش یافته است. باتوجه‌به تمامی این مقایسه‌ها می‌توان گفت گزینه شماره سه با ۱۴ لکه و ۱۹ لینک (شکل ۶-ه) بهترین گزینه جهت توسعه فضای سبز منطقه ۱ تهران در راستاس بهبود پیوستگی و حفظ کارایی و تنوع‌زیستی به‌شمار می رود.

جدول ۴- آنالیز پیوستگی و هزینه گزینه‌های توسعه شبکه فضای سبز منطقه یک تهران

گزینه‌ها	تعدادگره(v)	تعدادلینک (l)	ضریب (α)	ضریب بتا (β)	ضریب گاما (γ)	نسبت هزینه
حداقل هزینه برای سازنده	۱۴	۱۳	۰/۰۰	۰/۹۳	۰/۳۶	۰/۷۲
گزینه ۱	۱۴	۱۴	۰/۰۴	۱	۰/۳۹	۰/۷۲
گزینه ۲	۱۴	۱۵	۰/۰۹	۱/۰۷	۰/۴۲	۰/۷۳
گزینه ۳	۱۴	۱۹	۰/۲۶	۱/۳۶	۰/۵۳	۰/۷۵
حداقل هزینه برای مصرف‌کننده	۱۴	۲۲	۰/۳۹	۱/۵۷	۰/۶۱	۰/۷۹

۴- نتیجه‌گیری

در اغلب مطالعات مربوط به برنامه‌ریزی فضای سبز شهری در ایران تنها سرانه فضای سبز و اینچنین معیارهای کمی درنظر گرفته می‌شود. به‌عنوان مثال وارثی و همکارانش (۱۳۸۷) جهت رفع کمبود فضای سبز و بهینه‌سازی توزیع آن باتوجه‌به ارزش زمین معیارهای واقع شدن در زمین‌های بایر، نزدیکی به مراکز آموزشی، مراکز فرهنگی، مراکز جمعیتی، تاسیسات شهری، دسترسی به شبکه ارتباطی و فاصله از پارک‌ها و فضای سبز موجود را درنظر گرفته و از نتایج حاصل زمین‌های محدوده مورد مطالعه را برای فضای سبز اولویت‌بندی کرده‌اند [۲۳]. یا در مطالعه دیگری (تیموری و همکاران، ۱۳۸۷) صرفاً به مطالعه سرانه فضای سبز پرداخته شده و مناطق خالی از فضای سبز برای احداث فضای سبز جدید مشخص شده است [۲۴]. درحالی‌که عمل‌کرد فضاهای سبز در شهرها به فاکتورهای دیگر به‌خصوص پیوستگی شبکه فضای سبز بستگی دارد.

از پیوستگی فضاهای سبز شهری در تحقیق شیعه و مشرف دهکری (۱۳۹۰) به‌عنوان عامل افزایش کارایی فضاهای شهری و ارتقاء هویت طبیعی در شهر ذکر شده است: "عدم توجه‌به اصول پیوستگی فضاهای سبز، ماهیت طبیعی و عمل‌کردی آن‌ها را دست‌خوش تغییر کرده است و علی رغم تلاش‌هایی که در زمینه افزایش و یا حفظ این فضاها انجام می‌پذیرد، اغلب این فضاها، کارآیی اصلی خود را از دست داده و پس از مدتی به‌نواحی فاقد پشتیبان و بی‌هویت تبدیل شده‌اند" [۲۵]. همین مبحث در مطالعه بهبهانی و برنجی (۱۳۹۰) مورد تاکید قرار گرفته است آن‌ها مسئله را جستجوی راهی برای ایجاد پیوستگی و حفاظت توسط مسیرهای سبز بین ساختارهای طبیعی و تاریخی می‌دانند، به‌طوری‌که شبکه‌ای به‌هم پیوسته و مرتبط از ساختارهای طبیعی و تاریخی ایجاد شود [۲۶].

در این مقاله با استفاده از مفاهیم موجود در تئوری گراف و استفاده از مدل جاذبه و هم‌چنین تحلیل هزینه ساخت، در راستای پوشش نارسایی های موجود، روش مناسبی برای افزایش پیوستگی شبکه فضای سبز شهری و در نتیجه بهبود کارایی فضای سبز ارائه شد.

تئوری گراف، ابزارها و روش‌های قدرتمندی برای تحلیل شبکه فضای سبز فراهم می‌کند. بدین‌صورت‌که می‌توان لکه‌ها سبز شهری را گره‌هایی از شبکه فضای سبز درنظر گرفت، با استفاده از مدل جاذبه برهم‌کنش لکه‌ها را به‌صورت دوبه‌دو تعیین و گزینه‌های مختلفی را برای توسعه یا بهبود شبکه‌های فضای سبز شهری طراحی کرد. سپس با استفاده از شاخص‌های تعیین‌کننده پیوستگی در شبکه و شاخص هزینه بهینه‌ترین طرح را انتخاب و جهت توسعه فضای سبز شهری به‌کار گرفت.

با تحلیل لکه‌های سبز و تعیین درجه اهمیت نسبی آن‌ها و هم‌چنین آنالیز کوتاه‌ترین مسیر می‌توان مسیرهای سبز بالقوه برای اتصال لکه‌ها را تعیین کرد. از آن‌جا که در تعیین این مسیرها فاصله و هزینه ساخت در نظر گرفته شده مسیرهای انتخاب شده بهترین مسیرهای ممکن به شمار می‌روند. اما اینکه اولویت احداث مسیرهای سبز چگونه است؟، کدام لینک‌ها از اهمیت بالاتری برخوردارند؟، کدام لکه‌ها دارای اهمیت بیش‌تری در فضای سبز شهری هستند؟، الگوی بهینه شبکه فضای سبز شهری چگونه باید باشد؟، سوالاتی است که برای مدیریت صحیح فضای سبز شهری می‌تواند مهم باشد. همان طور که در این مقاله ارائه شد تئوری گراف دارای مفاهیمی است که می‌توان با استفاده از آن‌ها به این سوالات پاسخ داد، شبکه ی فضای سبز را شبیه‌سازی کرد، با استفاده از شاخص‌های موجود به کمی سازی و مقایسه گزینه‌های توسعه پرداخت و بهینه‌سازی کرد.

پی‌نوشت‌ها

1. Fragmented habitat
2. Connectivity
3. Fragmentation
4. Kong
5. Least cost analysis
6. Shortest path analysis
7. Geographic Information System
8. Centrality indices
9. Node between
10. Directed, a digraph
11. Weighted digraphs
12. Gravity model
13. Network circuitry
14. Cost ratio
15. Cost to user
16. Cost to builder

منابع

[1] Simmons C S, Sorrensen C, Walker R. Urban rural linkages and environmental change: Addressing the human dynamics of urban ecologies. Urban Ecosystems; 2002. 6(1): 5-8.

[2] Savard J P L, Clergeau P, Mennechez G. Biodiversity concepts and urban ecosystems. Landscape and Urban Planning; 2000. 48(3–4): 131-142.

[3] Jongman R, Pungetti G. Ecological networks and greenways: concept, design, implementation. Studies in landscape ecology. United Kingdom: Cambridge University Press; 2004.

[4] Esbah H, Cook E, Ewan J. Effects of Increasing Urbanization on the Ecological Integrity of Open Space Preserves. Environmental Management; 2009. 43(5): 846-862.

[5] Opdam P. Metapopulation theory and habitat fragmentation: a review of holarctic breeding bird studies. Landscape Ecology; 1991. 5(2): 93-106.

[6] Baschak L.A, Brown R.D. An ecological framework for the planning, design and management of urban river greenways. Landscape and Urban Planning; 1995. 33(1–3): p. 211-225.

[7] Kong F, et al. Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling. Landscape and urban planning; 2010. 95(1): p. 16-27.

[8] Tian Y, Jim C.Y, Wang H. Assessing the landscape and ecological quality of urban green spaces in a compact city. Landscape and Urban Planning; 2014. 121(0): p. 97-108.

[9] Hargrove W.W, Hoffman F.M, Efroymson R.A. A practical map-analysis tool for detecting potential dispersal corridors. Landscape Ecology; 2005. 20(4): p. 361-373.

[10] Walker R, Craighead L. Analyzing wildlife movement corridors in Montana using GIS. in Environmental Sciences Research Institute. Proceedings of the 1997 International ArcInfo Users' Conference. http://gis. esri. com/library/userconf/proc97/proc97/to150/pap116/p116, (Accessed: December 10, 2002).

[11] Urban D L. Graph models of habitat mosaics. Ecology Letters; 2009. 12(3): 260-273.

[12] Linehan J, Gross M, Finn J. Greenway planning: developing a landscape ecological network approach. Landscape and Urban Planning; 1995. 33(1–3): 179-193.

[13] Bunn A G, Urban D L, Keitt TH. Landscape connectivity: A conservation application of graph theory. Journal of Environmental Management; 2000. 59(4): 265-278.

[14] Adriaensen F. The application of 'least-cost' modelling as a functional landscape model. Landscape and Urban Planning; 2003. 64(4): 233-247.

[15] Sklar F, Constanza R. The development of dynamic spatial models for landscape ecology: a review and prognosis, in Quantitative Methods in Landscape Ecology, M. Turner and R. Gardner, Editors. New York. Springer; 1991. p.230-287.

[16] Cook E A. Ecological networks in urban landscapes. The Netherlands. Wageningen University; 2000.

[17] Zhang L, Wang H. Planning an ecological network of Xiamen Island (China) using landscape metrics and network analysis. Landscape and Urban Planning; 2006. 78(4): 449-456.

[18] Forman, R.T.T. and M. Godron, Landscape Ecology. New York. JohnWiley; 1986.

[19] Haggett P, Chorley R J. Network Analysis in Geography. London. Edward Arnold; 1972. p. 348.

[20] Hellmund P. Quabbin to Wachusett Wildlife Corridor Study. Harvard Graduate School of Design. Cambridge. MA; 1989.

[21] Jalili A, khosravianpour E. A study of green space development strategies in Tehran Master Plan. Pajouhesh & Sazandegi; 2008(81): 176 - 185. [In Persian]

[22] Faryadi S, Taheri S. Interconnections of urban green spaces and environmental quality of Tehran. International Journal of Environmental Research, 2009. 3(2): 199-208.

[23] Varesi H R, Mohammadi J, Shahivandi, A. Urban green space Site selection using geographical information system. Geography and regional development, 2007. 10: 83-103. [In Persian]

[24] Teimouri S, Feghhi J, Sharifi M. Green space estimation using IKONOS imageries. Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 2008. 16 (2): 292-303. [In Persian]

[25] Shieh E, Moshref Dehkordi H. The roll of Green space continuity in natural identity of urban. Architechture and urnanism of utopia, 2010. 9: 3125-321 .[In Persian]

[26] Irani Behbehani H, Berenji M. Provide contiinuity between natural and historical structures existed in the urban areas using green design of urban roads, 2010. 3 (1): 45-64 .[In Persian]