

## کاربرد تئوری گراف در مطالعات اکولوژی سیمای سرزمین نمونه موردی: سنجش پیوستگی زیستگاه‌های کلان‌شهر ملبورن

فاطمه پودات<sup>۱</sup>، کالین ارواسمیت<sup>۲</sup>، علیرضا میکایلی تیریزی<sup>۳</sup> و اسلین گوردن<sup>۴</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۲/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۲۳)

### چکیده

تئوری گراف، از روش‌های جدید جهت کمی‌سازی، پایش و سنجش ساختارها و کارکردهای اکولوژیک است. در بوم‌شناسی این تئوری بهترین کاربرد را در سنجش پیوستگی اکولوژیکی نشان داده است. پیوستگی ویژگی سازخاری سیمای سرزمین است که موجب تسهیل در حرکت جانوران در بین زیستگاه‌هایشان می‌شود. هدف از این مقاله سنجش پیوستگی زیستگاه‌های سیمای سرزمین شهری با استفاده از این تئوری است. در همین راستا ابتدا مبانی تئوری گراف و سابقه کاربرد آن در مطالعات مختلف اکولوژیک، روش‌ها، نرم‌افزارها و سنجش‌های مختلف جهت مدل‌سازی و سنجش شبکه‌ها بررسی شدند. سپس براساس این تئوری، شبکه زیستگاهی *Varanus varius* در محدوده کلان‌شهر ملبورن استرالیا به صورت یک گراف وزن داده شده شامل نقاط و اتصالات مدل‌سازی شد. پیوستگی بین لکه‌های زیستگاهی همجوار با استفاده از دو متریک  $p_{ij}$  و  $flux$  سنجش شدند. پیوستگی کل شبکه براساس متریک  $DC_{flux}$  محاسبه شد و زیستگاه‌ها براساس اهمیت اولویت‌بندی شدند. یافته‌ها نشان داد که اکثریت لکه‌های با اولویت بالا در حاشیه کلان‌شهر ملبورن قرار گرفته‌اند. همچنین تعدادی از لکه‌های با اهمیت روی مرز توسعه شهری در شمال، شمال شرق و شرق ملبورن قرار گرفته‌اند که به صورت بالقوه می‌توانند میان برنامه‌های حفاظتی و برنامه‌ریزی کاربری تعارض ایجاد کنند. با توجه به سهولت استفاده و دقت نتایج، استفاده از این تئوری و سنجش  $DC_{flux}$  در مطالعه شبکه زیستگاه‌های منقطع گونه‌های جانوری به خصوص در سیمای سرزمین شهری توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تئوری گراف، شبکه زیستگاهی، سیمای سرزمین شهری، *Varanus varius*

۱. گروه معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲. گروه علوم زمین، دانشگاه آرم آی تی ملبورن

۳. گروه محیط‌زیست، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۴. مدرسه مطالعات اجتماعی، شهری، منطقه‌ای، دانشکده طراحی و علوم اجتماعی، دانشگاه آرم آی تی ملبورن

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: F.poodat@scu.ac.ir

## مقدمه

پژوهشگران در حوزه دانش اکولوژی همواره در پی کمی‌سازی، پایش و سنجش جنبه‌های مختلف ساختارها، فرایندها و کارکردها هستند. از سال ۱۸۶۹، که برای اولین بار واژه اکولوژی یا بوم‌شناسی در دل دانش زیست‌شناسی شکل گرفت، تاکنون ابزارها، نرم‌افزارها، شاخص‌ها و سنجه‌های متنوعی جهت کمی‌سازی مفاهیم مختلف اکولوژیک تولید و به‌کار گرفته شده است. بر این اساس ژورنال‌های علمی مختلفی نیز همچون Ecological Modelling و Ecological Indices تشکیل شد تا روش‌ها، ابزارها، نرم‌افزارها و شاخص‌های جدید و به‌روز در این زمینه را معرفی کنند. یکی از روش‌های جدیدی که امروزه با رشدی روزافزون در مطالعات اکولوژیک به‌کار برده می‌شود، استفاده از تئوری‌گرف یا آنالیز شبکه است. تئوری‌گرف از سال ۱۹۶۹ به‌عنوان یک مفهوم ریاضی توسط هراری (۲۱) ارائه شد و تا به امروز در شاخه‌های مختلفی از دانش، همچون مطالعات شهری و ترافیک، مطالعات ریاضی و علوم کامپیوتر، مطالعات علوم اجتماعی و اقتصادی، هیدرولوژی و مدیریت منابع آب و حتی در مطالعات منظر و زیبایی‌شناختی به‌کار می‌رود. یک‌گرف، مجموعه‌ای از نقاط یا گره‌ها و اتصالات یا یال‌هاست. مدلی به‌ظاهر ساده که قادر است ساختارها و کارکردهای پیچیده‌ای را مدل‌سازی و بررسی کند. اما در حوزه دانش اکولوژی اولین بار در سال ۱۹۷۷ توسط کیت و همکاران (۲۴)، مدل‌گرف برای سنجش مفهوم پیوستگی اکولوژیکی استفاده شد و از آن روز تاکنون بهترین کاربرد را در همین زمینه از خود نشان داده است.

به‌طور کلی پیوستگی اکولوژیکی از جمله مفاهیم شناخته شده در شاخه‌های اکولوژی سیمای سرزمین، حفاظت حیات وحش و اکولوژی جمعیت است که به‌دلیل اهمیت آن برای تنوع زیستی و سلامت اکوسیستم‌ها، مطالعات مختلفی در این زمینه انجام شده است (۱۸ و ۲۲). براساس تعریف تیلور و همکاران (۴۷)، پیوستگی ویژگی ساختاری سیمای سرزمین است که موجب تسهیل در حرکت جانوران در بین

زیستگاه‌هایشان می‌شود. پیوستگی ویژگی منحصر به هر گونه جانوری است به‌طوری که ممکن است یک سیمای سرزمین مشخص دارای درجه‌های مختلفی از پیوستگی برای گونه‌های مختلف باشد. بحث درباره چستی و چگونگی پیوستگی به تفصیل در مرجع (۱) آمده است. کاربرد تئوری‌گرف نشان داد که این روش قادر است پیوستگی سیمای سرزمین را از جنبه‌های مختلف بررسی کند و هم‌زمان پیوستگی ساختاری و عملکردی را بسنجد.

معیارهایی که ضمن سنجش پیوستگی لازم است در نظر گرفته شود توسط بودات و همکاران (۲) تدوین شد. آنها همچنین روش‌های مختلف مطالعه پیوستگی را که تاکنون به کار برده شده در سه دسته روش‌های تجربی، مدل‌های ساختاری و مدل‌های عملکردی دسته‌بندی کرده و براساس معیارهای تدوین شده بررسی کردند. آنها (۲) نشان دادند که کاربرد توآمان تئوری‌گرف و مدل حداقل هزینه تمامی معیارهای مذکور را در اندازه‌گیری پیوستگی اکولوژیکی مدنظر قرار می‌دهد و قادر است جنبه‌های ساختاری مربوط به سیمای سرزمین (ویژگی‌های ساختاری لکه‌های زیستگاهی، فاصله اقلیدسی لکه‌های زیستگاهی و توپولوژی و چینش فضایی لکه‌ها نسبت به یکدیگر و همچنین جنبه‌های عملکردی مربوط به هزینه حرکت برای جاندار، ویژگی‌های خاص هر گونه جانوری و ترجیحات زیستگاهی جانور) را توآمان لحاظ کند.

جهت آشنایی مبسوط با مبانی تئوری‌گرف می‌توان به مطالعات مروری اربن و همکاران (۵۰)، دیل و فورتین (۱۲) و گالپرن و همکاران (۱۶) اشاره کرد. هدف از این پژوهش سنجش پیوستگی شبکه زیستگاه‌های گونه بزوجه استرالیایی با نام علمی *Varranus varius* در محدوده کلان‌شهری ملبورن استرالیا و همچنین اولویت‌بندی زیستگاه‌های آن گونه با استفاده از تئوری‌گرف است. بر همین اساس ابتدا مبانی تئوری‌گرف شامل: تعریف‌گرف، سابقه کاربرد آن در مطالعات مختلف اکولوژیک، روش‌ها، نرم‌افزارها، و سنجه‌های مختلف به‌کار رفته

مجموعه‌ای از گره‌ها هستند که به یکدیگر پیوسته‌اند اما با سایر گره‌ها پیوستگی ندارند. پس حتی یک گره کاملاً مجزا نیز می‌تواند یک زیرگراف باشد. البته شیوه‌های دیگری نیز برای مدل کردن یک شبکه براساس تئوری گراف وجود دارد. به‌طور مثال استفاده از لکه‌ها و دالان‌ها به‌جای نقاط و اتصالات که در مطالعه زتبرگ و همکاران (۵۳) شرح داده شده است. انتخاب روش مدل‌سازی، بستگی به هدف مطالعه، داده‌های خام در دسترس و اطلاعات اکولوژیکی مربوط به موجودات مورد بررسی دارد.

تئوری گراف ابزاری تصویری است که براساس آن می‌توان یک شبکه را با قوت‌ها و ضعف‌هایش به نمایش گذاشت (۱۶). مطالعات زیادی اذعان کرده‌اند که تئوری گراف روشی مؤثر جهت مدل کردن زیستگاه‌ها و برهم‌کنش‌ها و ارتباطات آنهاست (۱۷، ۳۲، ۴۹ و ۵۳). برای مدل کردن براساس تئوری گراف نیاز به فراهم آوردن داده‌های پیچیده‌ای نیست (۸ و ۴۵) و یک مدل گراف می‌تواند مطابق با هر حجم داده‌ای ساخته شود. همچنین ویژگی‌های تحسین برانگیز مدل گراف قابلیت اضافه کردن اطلاعات به مدل گراف ساخته شده (۱۰ و ۴۹) و یا کاستن اطلاعات از آن است. به‌طور کلی گراف به‌عنوان روشی سریع جهت تجزیه و تحلیل مطالعات اکولوژیکی شناخته می‌شود (۴۹).

### تاریخچه کاربرد تئوری گراف در سنجش پیوستگی

اولین کاربرد تئوری گراف در حوزه اکولوژی توسط کانت ول و فورمن (۱۰) در سال ۱۹۹۳ با شبیه‌سازی یک سیمای سرزمین نامتجانس انجام شد. سپس کیت و همکاران (۲۴)، تئوری گراف را برای سنجش پیوستگی در سیمای سرزمین به‌کار بردند و از آن به بعد به‌طور روزافزون این تئوری در مطالعات پیوستگی به‌کار می‌رود. مجموعه مطالعاتی که در این زمینه انجام شده به تفصیل در مرجع (۳۷) در پنج زمینه هدف مطالعه، روش مورد استفاده، عملیات به‌کار رفته، نوع سیمای سرزمین و گونه‌های مورد مطالعه دسته‌بندی شده‌اند که در اینجا مختصراً اشاره می‌شود.

بررسی می‌شود. سپس براساس این تئوری شبکه زیستگاهی گونه مورد مطالعه به‌صورت یک گراف وزن داده شده در محیط GIS مدل‌سازی می‌شود. در نهایت شبکه مورد نظر از جهت پیوستگی زیستگاه‌های هم‌جوار و اهمیت لکه‌ها در حفظ پیوستگی سنجش خواهد شد. روش این پژوهش از نوع مدل‌سازی و نمونه موردی است و گردآوری اطلاعات از منابع کتابخانه‌ای صورت گرفته است.

### مبانی تئوری گراف

مبانی تئوری گراف به تفصیل در مطالعات پیشین نشان داده شده است (۱۲، ۱۳، ۱۶، ۴۹ و ۵۰). همان‌طور که گفته شد دو جزء اصلی تشکیل دهنده یک مدل گراف، نقاط یا گره‌ها و اتصالات یا یال‌ها هستند. در بستر اکولوژی، گره‌ها نشان‌دهنده موقعیت استقرار جمعیت‌های زیستی و یا زیستگاه‌های مطلوبی هستند که انتظار می‌رود جمعیت‌ها در آنها استقرار داشته باشند. اتصالات نیز نشان‌دهنده فاصله اقلیدسی یا فاصله مؤثر بین زیستگاه‌ها یا امکان و یا احتمال جابه‌جایی یا پراکنش گونه‌های جانوری یا دانه‌های گیاهی بین دو زیستگاه است. در یک رویکرد دوتایی (Binary)، اتصالات ممکن است وجود داشته یا نداشته باشند. درحالی که در یک رویکرد احتمالی (Probability) گره‌ها به اندازه میزان پتانسیل آنها در تسهیل جابه‌جایی‌های زیستی، متصل خواهند بود. در طول این مقاله مدل‌های پیوستگی، مدل گراف یا شبکه خطاب می‌شوند.

یک شبکه می‌تواند جهت‌دار یا بدون جهت باشد. در یک شبکه جهت‌دار، بعضی از گره‌ها منبع هستند به این معنا که جانوران حرکت خود را از آنجا آغاز می‌کنند (مدل منبع-مخزن) و بعضی زیستگاه‌های مخزن هستند که حرکت جانوران به آنجا ختم می‌شود. پس در یک مدل گراف جهت‌دار به‌طور مثال درحالی که گره  $i$  به  $j$  پیوسته است، ممکن است گره  $j$  به  $i$  پیوسته نباشد. یک شبکه می‌تواند کاملاً پیوسته و یا ناپیوسته باشد. گره‌های ناپیوسته شامل زیرگراف‌ها هستند. زیرگراف‌ها

نزدیک‌ترین همسایه (۲۸) ساخته شود. در واقع وزن لینک‌ها فرصت بی‌نظیری جهت لحاظ کردن ویژگی‌های حرکتی جانداران و واکنش‌های حرکتی جانداران نسبت به اجزای سیمای سرزمین است.

آنالیز گرف، انجام عملیات‌های مختلف را ممکن می‌سازد. از مجموعه عملیات‌های شناخته شده گرف، کشف ساختار اجتماعات و خوشه‌ها (۶ و ۳۰)، انعطاف گرف نسبت به افزودن و یا حذف نقاط و اتصالات است که معمولاً حذف نقاط با هدف اولویت‌بندی لکه‌ها (۲۴ و ۴۹) و حذف اتصالات با هدف شناخت آستانه‌های مهم انجام شده است (۸ و ۱۳).

تئوری گرف همچنین در سیمای سرزمین متنوعی به کار رفته است، از جمله سیمای سرزمین طبیعی (۸ و ۳۳)، کشاورزی (۶)، جنگلی (۱۷)، حوزه‌های آبی (۴۶)، روستایی (۴۱) و شهری (۵۳). مطالعات انجام شده نشان داد که این تئوری، قابلیت انطباق بیشتری با ساختارهای منقطع و لکه‌ای دارد که در آن لکه‌های زیستگاهی در یک ماتریس غیرزیستگاهی پراکنده شده‌اند (۱۶). همچنین گرف در مقیاس‌های مختلف محلی (۲۳)، منطقه‌ای (۵۱) و حتی قاره‌ای (۴۴) قابل کاربرد است.

گرف برای مطالعه روی شبکه یک گونه خاص جانوری (۲۴ و ۳۰) و همچنین با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از جانداران که علی‌رغم ترجیحات زیستگاهی مشابه، ویژگی‌های حرکتی متفاوتی دارند (۸ و ۱۷) (۴۴) به کار رفته است. پودات (۳۷) تئوری گرف را در سنجش پیوستگی، برای تعدادی از جانوران دارای زیستگاه‌های متفاوت و ویژگی‌های حرکتی متفاوت، به طور موفق‌تری به کار برد. درحالی که هنوز جای مطالعات بیشتر در این زمینه خالی است و می‌تواند محوری جهت توسعه مطالعات آتی به‌شمار آید (۵۰).

### سنجه‌های گرف

سنجه‌های متنوعی بر مبنای اصول ریاضی تئوری گرف (سنجه‌های توپولوژیک) و پایه‌های اکولوژیک آن که ریشه در

تئوری گرف با دو هدف کلی سنجش و اندازه‌گیری پیوستگی و بهبود و ارتقای پیوستگی در مطالعات به‌کار گرفته شده است. از جمله اهداف این مطالعات، سنجش پیوستگی کلی شبکه زیستگاه‌ها و اولویت‌بندی لکه‌های زیستگاهی براساس اهمیتی که در حفظ پیوستگی شبکه داشته‌اند (۲۴ و ۴۹)، برداشت اتصالات از شبکه به‌منظور محاسبه آستانه تحمل شبکه نسبت به تغییرات احتمالی (حداکثر فاصله نقاط، پیش از آنکه شبکه کاملاً منقطع شود) (۸)، سنجش تغییرات فضایی و زمانی پیوستگی سیمای سرزمین، ارزیابی اثرات توسعه بر میزان پیوستگی (۴۴) و اولویت‌بندی و بهینه‌سازی گزینه‌های مختلف توسعه بر این اساس (۴۶ و ۵۱) و ارائه گزینه‌های بهینه جهت مرمت و احیای پیوستگی هستند (۱۷، ۳۵ و ۵۳).

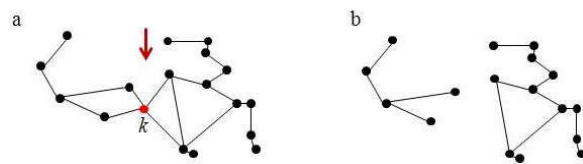
از جهت شیوه ساخت شبکه زیستگاه‌ها در آنالیزهای پیوستگی، اگرچه شیوه‌های مدل‌سازی نقاط نسبتاً مشابه است (۳۰ و ۳۶)، پژوهشگران در ساخت و مدل‌سازی لینک‌ها و تعریف ارتباطات توپولوژیک بین گره‌ها، شیوه‌های مختلفی را اتخاذ کرده‌اند. وزن لینک‌ها براساس فاصله اقلیدسی (۶، ۳۰ و ۴۹)، فاصله مؤثر (۳۸، ۴۲، ۵۱ و ۵۳) و یا امکان و یا احتمال جابه‌جایی بین نقاط (۸، ۳۳ و ۳۹) محاسبه می‌شود. فاصله مؤثر بین نقاط تابعی از فاصله اقلیدسی و مقاومت سرزمین نسبت به جابه‌جایی جاندار است که می‌تواند با ساخت یک لایه رستر در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی با عنوان مقاومت سیمای سرزمین محاسبه شود. همچنین در مطالعات محدودتر و با وسعت کمتر می‌توان با نظارت مستقیم بر نحوه جابه‌جایی جاندار (۴۱) فاصله مؤثر را محاسبه کرد. ساخت توپولوژی شبکه بستگی به قابلیت‌های سیستم‌های کامپیوتری در دسترس دارد. یک شبکه می‌تواند به‌صورت گرف کامل (یعنی هر نقطه با تمامی نقاط دیگر اتصال داده شود) (۲۷)، درخت پوشای کمینه (درخت پوشای، گرفی است که شامل تمام نقاط می‌شود و اتصالات با کمترین وزن را داراست) (۴۹)، گرف مسطح (یک گرف مسطح را می‌توان در یک صفحه دو بعدی محاط کرد بدون اینکه اتصالاتش یکدیگر را قطع کنند) (۱۳) و گرف

مجموع پیوستگی دو به دوی نقاط است (۲۷) که البته برای پرهیز از خطاهای محاسباتی باید پیوستگی درون هر زیستگاه نیز علاوه بر پیوستگی بین آنها در نظر گرفته شود (۱۳، ۱۵ و ۳۴). یکی از آزموده‌ترین و موفق‌ترین این سنجها، سنجۀ IIC (۳۴) و PC (۴۳) هستند.

سنج‌های مقیاس خرد، نقش هر نقطه یا اتصال را در میزان پیوستگی شبکه مشخص می‌کند. سنج‌های این دسته براساس مساحت و کیفیت لکه‌های زیستگاهی (۱۵ و ۴۹)، الگوریتم برداشت نقطه و یا اتصال (۲۴ و ۴۳) و یا سنج‌های سنترالیتی (۴، ۶، ۷، ۱۱ و ۲۵)، قادر هستند اهمیت و نقش هر جزء از شبکه را در حفظ و نگهداشت پیوستگی کل شبکه محاسبه کنند. شکل ۱ کارکرد الگوریتم برداشت نقطه را به تصویر کشیده است. اختلاف پیوستگی کل شبکه در دو حالت a و b نشان دهنده نقش نقطه k در حفظ و نگهداشت پیوستگی است.

### نرم‌افزارهای مرتبط با گراف

دو گروه از نرم‌افزارها جهت ساخت شبکه وجود دارند. دسته اول نرم‌افزارهایی که مشخصاً برای ساخت شبکه‌های زیستی در نظر گرفته شده‌اند مانند: LinkageMapper (۲۸)، FunConn (۴۸) و Conefor Sensinode (۴۳). دسته دیگر از نرم‌افزارها، آنهایی هستند که قادر هستند هر نوع شبکه‌ای را اعم از شبکه‌های زیستی و غیرزیستی مربوط به علوم دیگر همچون علوم اجتماعی و علوم کامپیوتر بررسی کنند. نمونه‌های این‌گونه نرم‌افزارها: pajek (۵)، پکیج‌های برنامه R مانند tnet، igraph و network X هستند. همچنین ابزارهای مختلف نرم‌افزار GIS همچون network least-cost corridor، cost-distance در مطالعات گوناگون به‌کار گرفته شده‌اند (۴۴، ۵۰ و ۵۳). با وجود نرم‌افزارهای متعددی که در این زمینه ساخته شده است، هنوز به نرم‌افزارهایی که بتواند برای حجم زیاد اطلاعات در گستره وسیع جغرافیایی به‌کار رود مورد نیاز است (۱۶). هدف از این پژوهش سنجش پیوستگی زیستگاه‌های گونه بزمجۀ استرالیایی در محدوده کلان‌شهر ملبورن است.



شکل ۱. الگوریتم برداشت نقطه (a) شبکه تغییر نیافته (b) حالتی که نقطه k از شبکه برداشته شده است

اکولوژی جمعیت و حفاظت بیولوژیک دارد و به بررسی ویژگی‌های اکولوژیکی شبکه‌های زیستگاهی می‌پردازند (سنج‌های اکولوژیک)، برای سنجش جنبه‌های مختلف پیوستگی عملکردی به‌کار رفته است (۱۰، ۳۴، ۴۲، ۴۹ و ۵۱). مطالعاتی نیز این سنج‌ها را گردآوری، دسته‌بندی و کاربرد آنها را تحلیل کرده‌اند (۱۶، ۳۵ و ۳۹). برخلاف حجم زیاد سنج‌ها، مطالعات اندکی کارایی، دقت و حساسیت آنها و درک آنها از واقعیت اکولوژیک سیمای سرزمین را مورد آزمون قرار داده‌اند (۴، ۲۶، ۳۴، ۳۷ و ۴۳). واقعیت این است که هیچ قانون مدونی برای اینکه نشان دهد کدام سنج را باید از خیل سنج‌های به‌کار برده شده انتخاب کرد وجود ندارد (۱۴). با این همه توصیه‌هایی در جهت بالا بردن دقت و صحت محاسبات شده است. از جمله این توصیه‌ها کاربرد هم‌زمان دو یا چند سنج (۴، ۲۵ و ۳۹)، تطبیق سنج‌ها با معیارهای مورد نیاز در سنجش پیوستگی (۹، ۳۱ و ۳۵)، تأکید بیشتر بر سنج‌های احتمالی به‌جای سنج‌های دوتایی (سنج‌های احتمالی شانس حضور تمامی اجزاء را در محاسبات فراهم می‌کنند و تغییرات کوچک ولی حساس را لحاظ می‌کنند) (۳۲) و در نظر گرفتن سنج‌هایی از هر دو مقیاس کل شبکه و خرد (۳۵) است.

سنج‌های مقیاس شبکه، پیوستگی کل شبکه و جریان پراکنش کلی را بر شبکه مورد بررسی قرار می‌دهد. این سنج‌ها پیوستگی بین هر دو نقطه را با در نظر گرفتن فاصله بین آنها (۲۰)، مقاومت سرزمین در فاصله بین دو نقطه (۳ و ۲۹) و ارزش‌های اکولوژیک زیستگاه‌هایی مربوط به نقاط (۸، ۱۹، ۳۲ و ۴۹) را اندازه‌گیری می‌کنند. پیوستگی کل شبکه، تابعی از

بر مبنای مطالعات انجام شده و با استفاده از تئوری گراف، شبکه زیستگاهی این گونه مدل‌سازی شده و لکه‌های زیستگاهی جانور براساس نقش آنها در حفظ پیوستگی شبکه اولویت‌بندی می‌شوند که در بخش بعد به تفصیل بیان شده است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

کلان‌شهر ملبورن در شمال خلیج پورت فیلیپ در ایالت ویکتوریا کشور استرالیا واقع شده است. منطقه مورد مطالعه با مساحت ۶۳۲۰ کیلومتر مربع، بخش اعظم کلان‌شهر ملبورن را دربرمی‌گیرد (شکل ۲). منطقه مورد مطالعه شامل ۳۰ دولت محلی است و دربردارنده مرز توسعه شهری است که توسط دولت ایالتی ویکتوریا در سال ۲۰۰۲ وضع شده است. فاصله بین مرز خارجی کلان‌شهر و مرز توسعه شهری، منطقه حاشیه شهر نامیده می‌شود که شامل زیستگاه‌های با اهمیت است.

### گونه مورد مطالعه

بزمجه استرالیایی با نام علمی *Varanus varius* گونه مورد مطالعه این پژوهش است. این گونه خزنده، مارمولکی درشت چته و گوشتخوار است که در اراضی مشجر و جنگل‌های جنوبی و جنوب شرق استرالیا زیست می‌کند (شکل ۲). بنا به مصاحبه‌های انجام شده، این بزمجه می‌تواند تا ۴۰ سال عمر کند و روزانه تا بیش از یک کیلومتر جابه‌جا می‌شود. این گونه از سوی دولت استرالیا در دسته جانوران آسیب‌پذیر فهرست شده است.

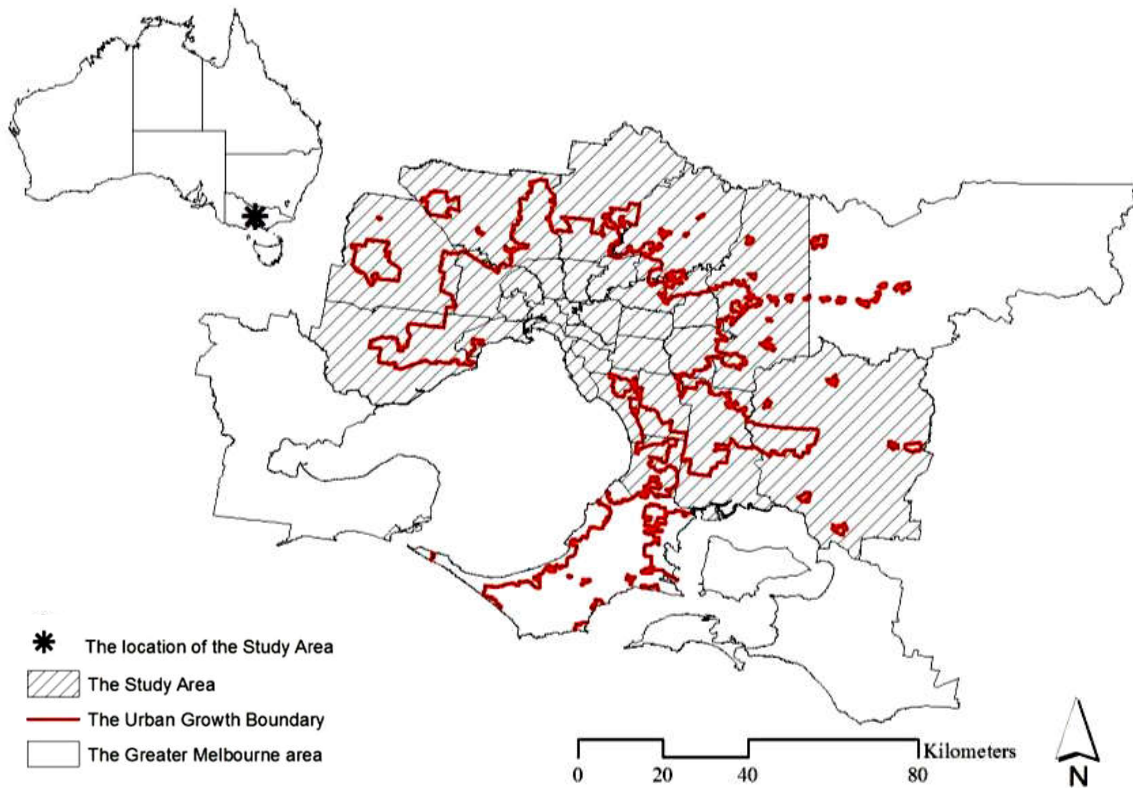
### ساخت شبکه زیستگاهی بزمجه استرالیایی

در ساخت شبکه زیستگاهی از کاربرد توأمان تئوری گراف و مدل‌سازی حداقل هزینه استفاده شد. شبکه زیستگاهی بزمجه استرالیایی، یک شبکه وزن داده شده و بدون جهت در محیط GIS است که شامل مجموعه‌ای از نقاط و اتصالات است. نقاط نشان‌دهنده موقعیت جغرافیایی لکه‌های زیستگاهی جانور هستند و هر نقطه یک لکه زیستگاهی را نمایندگی می‌کند.

اتصالات نشان‌دهنده ارتباط توپولوژیکی بین زیستگاه‌ها است. لینک‌ها توسط فاصله مؤثر بین نقاط وزن داده شده‌اند تا منعکس کننده ساختار نامتجانس سیمای سرزمین شهری و واکنش حرکتی جانور به چنین ساختاری باشند.

به منظور ساخت نقاط شبکه، از نقشه زیستگاه‌های مطلوب گونه استفاده شد که توسط گوردن و همکاران در سال ۲۰۰۹ با هدف منطقه‌بندی حفاظتی منطقه مطالعاتی مشابه تهیه شده بود. آنها نقشه زیستگاه‌های مطلوب را برای تعدادی از گونه‌های در معرض انقراض براساس نظر متخصصین بر سه لایه کاربری‌ها، پوشش گیاهی و منابع آب و با استفاده از ابزار پرسشنامه تهیه کردند. به‌ازای هر لکه زیستگاهی یک نقطه در یک لایه وکتوری در محیط GIS درج شد. جهت ساخت اتصالات شبکه، در کنار روش تئوری گراف، از مدل‌سازی حداقل هزینه استفاده شد. بدین منظور ابتدا یک لایه مقاومت از کلان‌شهر ملبورن تهیه شد. لایه مقاومت سرزمین یک فایل رستری است که در آن ارزش هر پیکسل نشان‌دهنده میزان مقاومت سرزمین نسبت به حرکت جانور مورد مطالعه و ریسک مرگ‌ومیر جانور حین عبور از آن بخش است. ارزش هر پیکسل توسط جانورشناس متخصص درباره گونه مورد نظر تعیین شد. از متخصص خواسته شد تا ۴ لایه تسهیلات حمل و نقل، پوشش گیاهی، هیدرولوژی و منابع آب و کاربری را در ارتباط با میزان مقاومتی که نسبت به حرکت جانور ایجاد می‌کند، امتیاز دهد. لایه مقاومت برای هر یک از ویژگی‌های ذکر شده در بالا، دارای پیکسل‌هایی بود که در ۵ طبقه بین ۱ تا ۱۰۰ امتیاز داده شده بودند. ۴ لایه ویژگی روی هم قرار داده شد و با آنالیز پیکسل به پیکسل، امتیاز حداکثری در هر سلول انتخاب شد و به لایه نهایی مقاومت سرزمین الصاق شد.

دو لایه زیستگاه‌ها و مقاومت به نرم‌افزار Linkage Mapper داده شد (۲۸). مطابق اهداف این مطالعه، نرم‌افزار مذکور شبکه زیستگاهی جانور را براساس تئوری گراف و روش مدل‌سازی حداقل هزینه تهیه کرد. این نرم‌افزار فاصله بین ۲ لکه را براساس فاصله اقلیدسی لبه به لبه لکه‌های هم‌جوار محاسبه



شکل ۲. موقعیت منطقه و گونه جانوری مورد مطالعه (۳۵)

از نقاط و اتصالات بود. نقاط نشان‌دهنده مرکز لکه‌های زیستگاهی بودند. بین هر دو نقطه هم‌جوار یک لینک ساخته

می‌کند که درکی واقع‌گرایانه‌تر از مسافت جابه‌جایی گونه است. حاصل پردازش نرم‌افزار، شبکه‌ای اولیه شامل مجموعه‌ای

جانور، متفاوت است.

$$\text{flux}_{ij} = a_i \times a_j \times p_{ij} \quad [2]$$

پس از وزن‌دهی شبکه براساس سنج‌های ذکر شده، نقاط موجود در شبکه از نظر اهمیت و نقشی که در پیوستگی دارند اولویت‌بندی شدند. جهت اولویت‌بندی لکه‌ها از سنج  $\text{DC}_{\text{flux}}$  استفاده شد. بدین معنا که سنج DC برای سنجش شبکه وزن داده شده با flux استفاده شد. DC برابر با تعداد لینک‌هایی است که به یک لکه متصل است. مطابق روش اسپاهل و همکاران (۴۰)، وزن لینک‌های متصل به لکه  $i$  در محاسبه  $\text{DC}_{\text{flux}}$  منظور می‌شود. جهت محاسبه سنج از نرم‌افزار R و پکیج tnet استفاده شد. سپس مقادیر به‌دست آمده اولویت‌بندی شدند به طوری که مقادیر بزرگتر حاصل از سنج  $\text{DC}_{\text{flux}}$ ، دارای رتبه بالاتر و مقادیر کوچک‌تر حائز رتبه پایین‌تر بودند. مقادیر محاسبه شده در پنج دسته مساوی دسته بندی شدند در نهایت رتبه‌های به‌دست آمده به نقاط متناظر در مدل فضایی گراف الصاق شدند.

#### یافته‌ها

براساس روش اعمال شده، شبکه‌ای با ۴۲۵۵ نقطه و ۱۴۳۶۸ لینک به‌دست آمد. در این شبکه به هر نقطه حداقل یک لینک متصل است. میانگین درجه نقاط ۶/۷۵ است. متوسط فاصله اقلیدسی بین نقاط ۱۰۸۲ متر و متوسط فاصله مؤثر بین نقاط ۳۰۵۹۱ واحد است (جدول ۱). شکل ۳- الف شبکه زیستگاهی بزجه استرالیایی را با تمام لینک‌های فعال نشان می‌دهد. لینک‌های فعال آنهایی هستند که فاصله مؤثر آنها از حداکثر فاصله مؤثر کمتر و فاصله اقلیدسی متناسب به آنها از حداکثر فاصله اقلیدسی طی شده توسط جاندار کمتر باشد. ۹۰ درصد لینک‌های شبکه این گونه، به‌عنوان لینک فعال در نظر گرفته شدند. پس از تعیین لینک‌های فعال، ۱۱ نقطه از مجموع ۴۲۵۵ نقطه کاملاً به‌صورت مجزا از شبکه قرار گرفتند که این تعداد ۰/۲ درصد از کل نقاط هستند.

شد و براساس فاصله مؤثر در طول مسیر با حداقل هزینه، وزن داده شدند. وزن لینک‌ها مشروط بود به اینکه فاصله اقلیدسی لکه به لکه بین دو لکه از حداکثر مسافتی که گونه در طول عمر خود می‌تواند طی کند بیشتر نباشد. براساس مطالعات به عمل آمده حداکثر فاصله جابه‌جایی جانور ۷۵۰۰ متر در نظر گرفته شد.

#### سنجش پیوستگی شبکه زیستگاهی

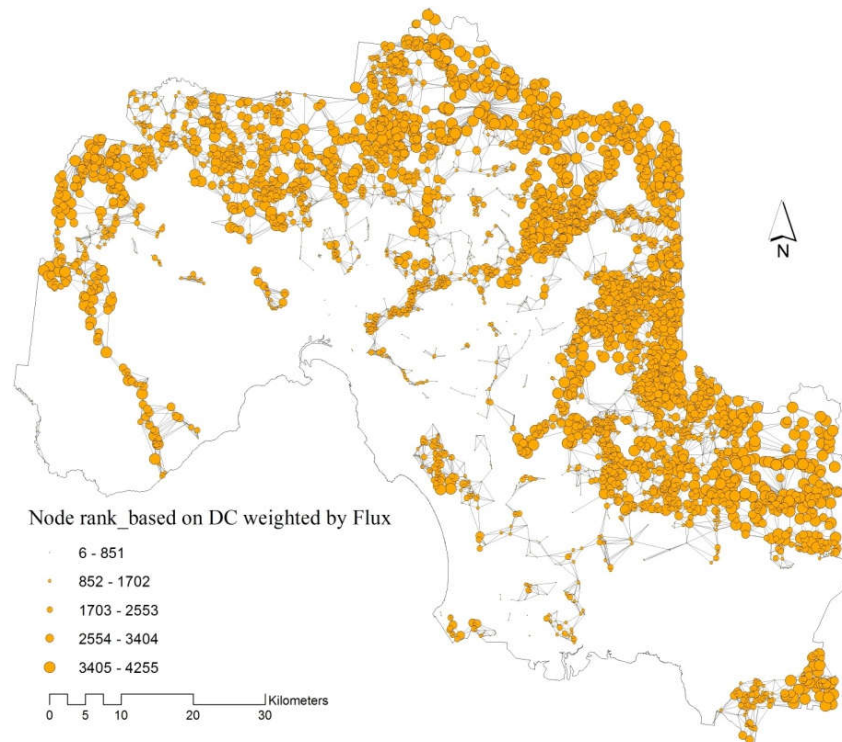
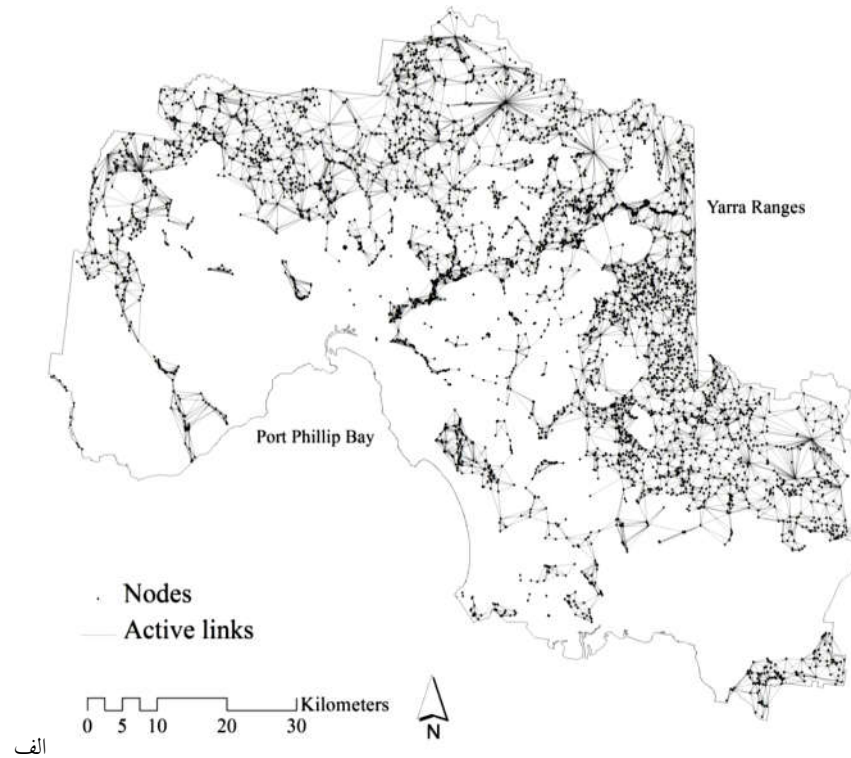
شبکه زیستگاهی بزجه استرالیایی در دو مرحله سنجش شد: (۱) سنجش پیوستگی بین هر جفت نقطه و (۲) تعیین نقش و اهمیت هر لکه در حفظ پیوستگی شبکه. هر دو مرحله آنالیز با استفاده از سنج‌های مرتبط با آنالیز گرف انجام شد. بحث در مورد چرایی انتخاب هر یک از این آنالیزها را می‌توان در مرجع (۳۵) مشاهده کرد.

پیوستگی بین دو لکه با استفاده از سنج احتمال پراکنش جانور بین دو لکه ( $p_{ij}$ ) محاسبه شد که در معادله ۱ قابل مشاهده است (۲۰). احتمال پراکنش جانور تابعی از فاصله مؤثر بین دو لکه است. به طوری که  $\text{cwdist}$  به فاصله مؤثر در طول مسیر با کمترین هزینه بین لکه  $i$  و لکه  $j$  است. احتمال پراکنش جاندار بین دو لکه به صفر میل می‌کند وقتی فاصله مؤثر به بیشینه مقدار خود می‌رسد.  $k$  یک ضریب است که خاص جانور است و براساس شیب نمودار  $p_{ij}$  به‌دست می‌آید (۸، ۴۴ و ۴۹).

$$p_{ij} = \exp(-k \cdot \text{cwndist}_{ij}) \quad [1]$$

جهت محاسبه اهمیت هر لکه در پیوستگی کل شبکه زیستگاهی، لینک‌ها بار دیگر توسط سنج  $\text{flux}$  وزن داده شدند.  $\text{flux}$  به میزان پراکنش جانور بین زیستگاه‌ها مربوط می‌شود و سنج‌ای مناسب برای محاسبه پیوستگی بین لکه‌ای است (معادله ۲). این معادله تابعی از مساحت دو لکه هم‌جوار و احتمال پراکنش جاندار بین آن دو لکه است. احتمال پراکنش جانور رقمی بین ۰ و ۱ و میزان  $\text{flux}$  برای هر جفت نقطه حاصل ضرب مساحت لکه‌های متناظر نقاط در احتمال پراکنش





شکل ۳. الف) شبکه زیستگاهی گونه بزوجه استرالیایی در منطقه مورد مطالعه با تمامی نقاط و همچنین لینک‌های فعال و ب) اولویت‌بندی نقاط در شبکه زیستگاهی بزوجه استرالیایی (نقاط بزرگتر موقعیت لکه‌های بااهمیت‌تر را نشان می‌دهد (۳۷)).

جدول ۱. مشخصات توپولوژیک مدل شبکه زیستگاهی بزمجه استرالیایی

مقدار	مشخصه
۴۲۵۵	تعداد نقاط
۱۴۳۶۸	تعداد اتصالات
۶/۷۵	متوسط درجه نقاط
۷۶	بیشینه درجه نقاط
۱	کمینه درجه نقاط
۱۰۸۱/۸	متوسط فاصله اقلیدسی بین نقاط (متر)
۴۵۹۶۹	بیشینه فاصله اقلیدسی بین نقاط (متر)
۶۰	کمینه فاصله اقلیدسی بین نقاط (متر)
۳۰۵۹۱	متوسط فاصله مؤثر بین نقاط
۴۱۵۵۴۶	بیشینه فاصله مؤثر بین نقاط
۱۲۰	کمینه فاصله مؤثر بین نقاط

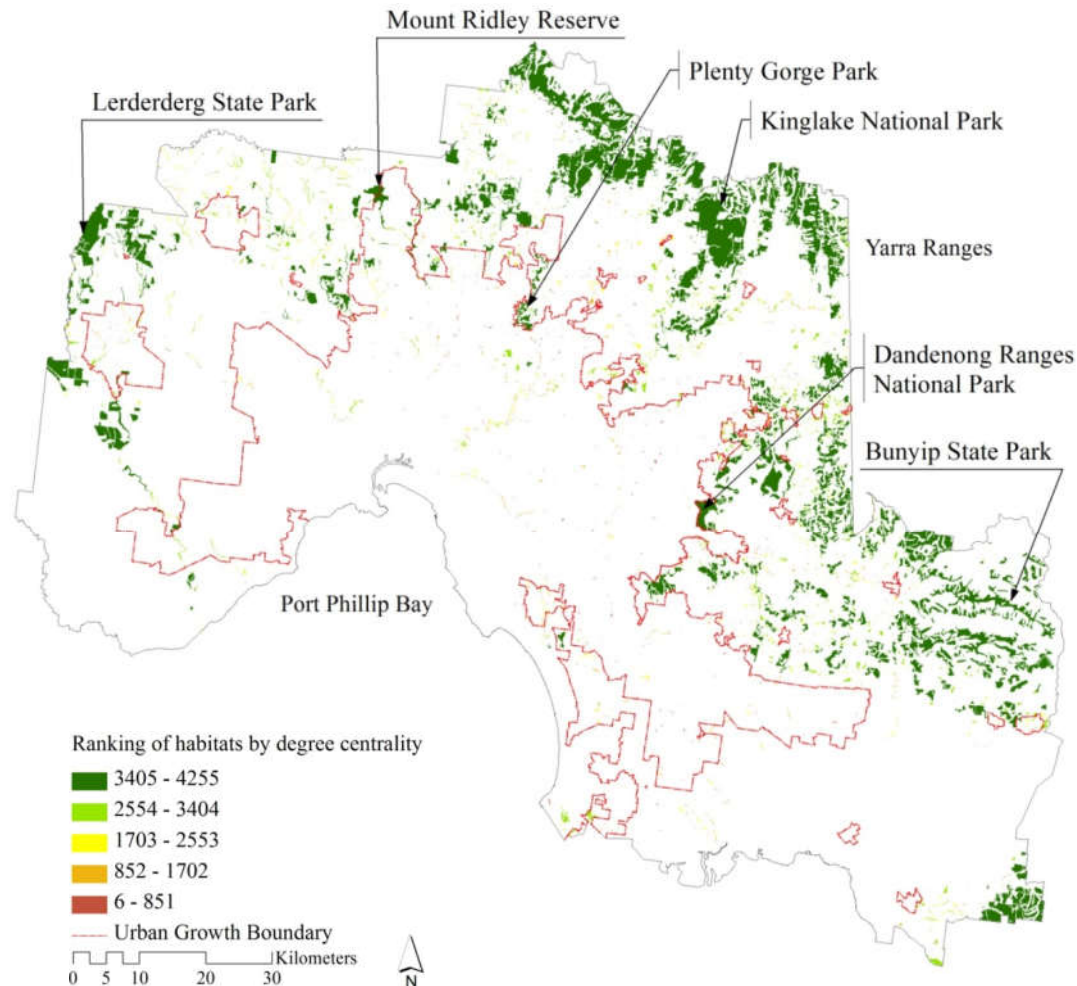
### اولویت‌بندی زیستگاه‌ها

نقاط در شبکه زیستگاهی براساس کاربرد سنجه  $DC_{flux}$  رتبه‌بندی شدند بدین صورت که رتبه بالاتر به نقطه‌ای با بالاترین میزان سنجه تعلق گرفت. شکل ۳- ب اولویت‌بندی نقاط شبکه جانور را براساس کاربرد سنجه  $DC_{flux}$  نشان می‌دهد. در این شکل اهمیت نقاط در ۵ دسته قرار گرفته‌اند، به طوری که هر دسته ۲۰ درصد از لکه‌های زیستگاهی جانور را شامل می‌شوند.

در گامی فزاینده، لکه‌های زیستگاهی براساس رتبه‌بندی نقاط اولویت‌بندی شدند و بدین صورت موقعیت جغرافیایی لکه‌های زیستگاهی با اهمیت‌تر مشخص شد (شکل ۴). بر این اساس مشخص شد که اکثریت لکه‌های با اولویت بالا در حاشیه کلان‌شهر ملبورن قرار گرفته‌اند. حاشیه کلان‌شهر ملبورن دارای پوشش گیاهی فراوان‌تر و زیستگاه‌هایی با مساحت بیشتر است. در حالی که درون هسته مرکزی شهر، سیمای سرزمین نسبت به حرکت جانور بسیار مقاوم است و زیستگاه‌ها دارای مساحت کمتری هستند و عملاً در حفظ و انسجام شبکه زیستگاهی نقش کمتری ایفا می‌کنند. همچنین تعدادی از لکه‌های با اهمیت بر خط توسعه شهری قرار گرفته‌اند که به صورت بالقوه می‌توانند

میان برنامه‌های حفاظتی و برنامه‌ریزی کاربردی تعارض ایجاد کنند. در این مقاله به روش تشخیص جاها که لکه‌های کوچک ولی حیاتی جهت پیوستگی شبکه هستند اشاره‌ای نشد. برای اطلاعات بیشتر در زمینه روش‌های موجود و سنجه‌های مناسب به مرجع (۳۷) مراجعه شود.

کاربرد گسترده تئوری گراف در حوزه‌های مختلف و خصوصاً اکولوژی، در مطالعات دلالت بر کارایی و قابلیت‌های گوناگون این روش در محاسبه ارتباطات و برهم‌کنش مجموعه‌ای از عناصری که در مقیاس کلان‌تر یک شبکه را به وجود می‌آورند و نیز بررسی نقش و اهمیت هر جزء در ارتباط با سایر اجزا و کلیت شبکه دارد. با مرور کاربرد تئوری گراف در مطالعات مختلف دریافتیم این نظریه علاوه بر اینکه سنجش پیوستگی را تسهیل می‌کند، در پیش‌بینی گزینه‌های بهینه جهت ارتقاء و بهبود پیوستگی نیز مؤثر است. همچنین تئوری گراف قابل کاربرد برای مطالعه منحصر به یک گونه و یا مجموعه‌ای از گونه‌های جانوری با زیستگاه‌ها و قابلیت‌های حرکتی مختلف است. اگرچه مطالعات اندکی رویکرد چندین جانوری با زیستگاه‌ها و قابلیت‌های حرکتی متفاوت را اتخاذ کرده‌اند و در این حوزه جای کار باقی است. در مطالعات مختلف شیوه‌های متنوعی جهت ساخت شبکه زیستگاه‌ها اتخاذ شده است که این تنوع خصوصاً در ساخت لینک‌ها و وزن‌دهی آنها مشخص است. در واقع وزن لینک فرصت بی‌نظیری جهت لحاظ کردن ویژگی‌های اکولوژیک گونه‌های مورد مطالعه و واکنش‌های حرکتی آنها نسبت به بخش‌های مختلف سیمای سرزمین فراهم می‌سازد. سنجه‌های مختلف توپولوژیک و اکولوژیک به کار برده شده در دو مقیاس کل شبکه و مقیاس خرد قابل دسته‌بندی هستند و براساس هدف مطالعه نوع مناسب سنجه‌ها انتخاب می‌شود. در زمینه نرم‌افزارها، نرم‌افزارهای عمومی مربوط به آنالیز شبکه و نرم‌افزارهای مخصوص ساخت شبکه‌های زیستی تهیه شده است. با این وجود ساخت نرم‌افزارهای جامع‌تر با قابلیت‌های متنوع‌تر جهت مطالعات زیستی همچنان مورد نیاز است.



شکل ۴. موقعیت جغرافیایی زیستگاه‌های بزمجه استرالیایی اولویت بندی شده براساس اهمیت در حفظ پیوستگی (۳۷)

درحالی که مدل‌سازی نقاط و اتصالات فهم دقیقی از ساختار پیچیده گراف فراهم می‌سازد، این ویژگی در سیمای سرزمینی که مرز مشخصی بین لکه‌های خود ندارند، به‌عنوان یک محدودیت تلقی می‌شود (۳۲)، با این وجود در سیمای سرزمین شهری و به‌شدت منقطع که لکه‌های زیستگاهی پراکنده در میان محیط مصنوع هستند، همچون نمونه موردی پژوهش حاضر، این محدودیت موضوعیت ندارد. در این پژوهش استفاده از مدل حداقل هزینه در کنار کاربرد تئوری گراف، یکی از روش‌های موجود است که به‌دلیل

تئوری گراف قابل کاربرد در انواع سیمای سرزمین نامتجانس و منقطع است. پژوهش حاضر با استفاده از این تئوری در سنجش پیوستگی زیستگاه‌های یک مارمولک عظیم الجثه در معرض انقراض در شهر ملبورن، کاربرد موفق این تئوری را در یک سیمای سرزمین شهری منقطع و نامتجانس نشان می‌دهد. ساختار سیمای سرزمین شهری و زیستگاه‌های آن، مناسب و منطبق با کاربرد تئوری گراف است. به‌دلیل ماهیت توپولوژیک تئوری گراف، چینش فضایی نقاط و همسایگی و ارتباطات آنها با استفاده از این روش می‌تواند شبیه‌سازی شود.

خواهد آمد.

کاربرد تئوری گرف، روشی جامع با قابلیت‌های متنوع، منطبق با اهداف گوناگون جهت مطالعه شبکه زیستگاه‌های منقطع و مجزا گونه‌های جانوری است. با توجه به سهولت استفاده از آن و در عین حال دقت نتایج در بررسی پیوستگی سیمای سرزمین منقطع، استفاده از این تئوری به‌عنوان روشی برتر و کارا توصیه می‌شود. به‌ویژه این تئوری پتانسیل بالایی برای کاربرد در سیمای شهری کشورمان دارد که همه روزه از مرگ‌ومیر گونه‌های در معرض انقراض خود رنج می‌برند. فضاهای سبز شهری با مالکیت عمومی و خصوصی، باغات و اراضی کشاورزی، و لکه‌های سبز باقی‌مانده از جمله زیستگاه‌های شهری به‌شمار می‌آیند که در بردارنده تنوع گیاهی و جانوری هستند و در بستری نامتجانس از ساخت‌وسازهای شهری به‌صورت جزیره‌هایی مجزا محصور شده‌اند. شناخت پیوستگی این لکه‌های دارای ارزش اکولوژیک می‌تواند گامی مؤثر در جهت حفظ تنوع زیستی باقی‌مانده در شهرها باشد. امید آنکه با شناخت جوانب مختلف تئوری گرف، این روش بتواند به‌طور مؤثرتری در پژوهش‌های اکولوژیک در ایران به‌کار رود.

### سپاسگزاری

این تحقیق، بر مبنای نتایج علمی- عملی پایان‌نامه دکتری در دانشگاه آرام‌آی.آی. تی. استرالیا تحت راهنمایی دکتر کالین ارواسمیت و مشاوره دکتر دیوید فریزر و دکتر اسلین گوردن و نظرات تکمیلی و علمی دکتر علیرضا میکاییلی تبریزی انجام شده است.

کثرت استفاده، روش‌ها و نرم‌افزارهای مرتبط با آن در دسترس است. با این وجود ممکن است مواردی از عدم قطعیت را به پژوهش تحمیل کند. در واقع محاسبه یک مسیر با حداقل هزینه بین دو نقطه ممکن دقیقاً بازتاب واقعیت موجود در سیمای سرزمین نباشد و جابه‌جایی جانور بین دو زیستگاه را به‌درستی به تصویر نکشد. زیرا ممکن است جانور از مسیرهای متعددی خود را به زیستگاه مجاور برساند که در این روش نادیده گرفته می‌شود. روش‌های مناسب دیگری نیز ارائه شده است (۲۹ و ۴۸) که البته با توجه به حجم داده در مطالعه حاضر و تعداد زیاد نقاط در شبکه گونه مورد مطالعه، کاربردشان میسر نبود. به طور کلی به‌دلیل محدودیت کارایی تجهیزات کامپیوتری، هر چه وسعت محدوده مورد مطالعه گسترده‌تر باشد، ناگزیر قدرت تفکیک و میزان جزئیات در نظر گرفته شده در مطالعه کاهش خواهد یافت.

سنجه DCflux که در این پژوهش جهت محاسبه پیوستگی شبکه به‌کار رفت، توانست نقاط را براساس میزان مشارکت آنها در پیوستگی کلی شبکه زیستگاهی بزمجه استرالیایی ارزش گذاری کند و به‌همین دلیل جایگزین مناسبی برای الگوریتم برداشت نقطه که در پژوهش‌های پیشین به‌کار می‌رفت، به‌شمار آید. محاسبه این سنجه با نرم‌افزارهای مختلف آنالیز شبکه قابل انجام است و این امر کاربرد آن را برای کاربران تسهیل می‌کند. در نظر گرفتن وزن اتصالات براساس سنجه flux موجب شد که به‌طور همزمان هم مساحت لکه‌های مبدأ و مقصد حرکت جانور و هم احتمال پراکنش جانور بین دو لکه که تابعی از مقاومت سرزمین و توانایی حرکتی جانور مورد مطالعه است در نظر گرفته شود. با در نظر گرفتن تمامی این عوامل، تفسیری جامع و مطابق واقعیت از میزان پیوستگی دو نقطه به‌دست

### منابع مورد استفاده

۱. بودات، ف.، ش. برق جلوه و ک. ارواسمیت. ۱۳۹۲. مروری تحلیلی بر پیوستگی اکولوژیکی و ضرورت آن به منظور حفاظت از تنوع زیستی در شهرها، نخستین کنفرانس بین‌المللی اکولوژی سیمای سرزمین، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۸-۹ آبان.
۲. بودات، ف.، ش. برق جلوه، و س. ح. میرکریمی. ۱۳۹۳. مروری تحلیلی بر چگونگی اندازه‌گیری پیوستگی اکولوژیکی به‌منظور

حفاظت از تنوع زیستی در شهرها، پژوهش‌های محیط زیست ۵(۱۰): ۲۱۰-۱۹۵.

3. Adriaensen, F., J. P. Chardon, G. De Blust, E. Swinnen, S. Villalba, H. Gulink and E. Matthysen. 2003. The application of 'least-cost' modelling as a functional landscape model. *Landscape and Urban Planning* 64: 233-247.
4. Baranyi, G., S. Saura, J. Podani and F. Jordán. 2011. Contribution of habitat patches to network connectivity: Redundancy and uniqueness of topological indices. *Ecological Indicators* 11(5): 1301-1310.
5. Batagelj, V. and A. Mrvar. 2011. Pajek: Program for Analysis and Visualization of Large Networks; Reference Manual, Ljubljana.
6. Bodin, O. and J. Norberg. 2007. A network approach for analyzing spatially structured populations in fragmented landscapes. *Landscape Ecology* 22: 31-44.
7. Bodin, O. and S. Saura. 2010. Ranking individual habitat patches as connectivity providers: Integrating network analysis and patch removal experiments. *Ecological Modelling* 221: 2393-2405.
8. Bunn, A. G., D. L. Urban and T. H. Keitt. 2000. Landscape connectivity: A conservation application of graph theory. *Journal of Environmental Management* 59: 265-278.
9. Calabrese, J. M. and W. F. Fagan. 2004. A comparison-shopper's guide to connectivity metrics. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2(10): 529-536.
10. Cantwell, M. D. and R. T. T. Forman. 1993. Landscape graphs: Ecological modelling with graph theory to detect configurations common to diverse landscapes. *Landscape Ecology* 8(4): 239-255.
11. Carroll, C., B. H. McRae and A. Brookes. 2012. Use of linkage mapping and centrality analysis across habitat gradients to conserve connectivity of Gray Wolf population in Western North America. *Conservation Biology* 26(1): 78-87.
12. Dale, M. R. T. and M. J. Fortin. 2010. From Graph to Spatial Graph. *The Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 41: 21-38.
13. Fall, A., M. J. Fortin, M. Manseau and D. O'Brien. 2011. Spatial graphs: Principles and applications for habitat connectivity. *Ecosystems* 10: 448-461.
14. Farina, A. 2000. *Landscape Ecology in Action*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 317 p.
15. Ferrari, J. R., T. R. Lookingbill and M. C. Neel. 2007. Two measures of landscape-graph connectivity: assessment across gradients in area and configuration. *Landscape Ecology* 22: 1315-1323.
16. Galpern, P., M. Manseau and A. Fall. 2011. Patch-based graphs of landscape connectivity: A guide to construction, analysis and application for conservation. *Biological Conservation* 144(1): 44-55.
17. García-Feced, C., S. Saura and R. Elena-Rosselló. 2011. Improving landscape connectivity in forest districts: A two-stage process for prioritizing agricultural patches for reforestation. *Frontiers in Ecology and Management* 26(1): 154-161.
18. Goodwin, B. J. 2003. Is landscape connectivity a dependent or independent variable? *Landscape Ecology* 18: 687-699.
19. Hanski, I. and O. Ovaskainen. 2000. The metapopulation capacity of a fragmented landscape. *Nature* 404: 755-758.
20. Hanski, I. 1994. A practical model of metapopulation dynamics. *Journal of Animal Ecology* 63: 151-162.
21. Harary, F. 1969. *Graph Theory*, Addison-Wesley Reading Mass, 274 p.
22. ISI web of science. 2012. Citation report. Available from: [http://apps.webofknowledge.com/summary.do?SID=W1HhecJnbaa1Ip5bobN&product=WOS&qid=6&search\\_mode=GeneralSearch](http://apps.webofknowledge.com/summary.do?SID=W1HhecJnbaa1Ip5bobN&product=WOS&qid=6&search_mode=GeneralSearch).
23. Jordán, F., A. Báldi, K. M. Orci, I. Rácz and Z. Varga. 2003. Characterizing the importance of habitat patches and corridors in maintaining the landscape connectivity of a *Pholidoptera transsylvanica* (Orthoptera) metapopulation. *Landscape Ecology* 18(1): 83-92.
24. Keitt, T. H., D. L. Urban and B. T. Milne. 1997. Detecting critical scales in fragmented landscapes. *Conservation Ecology* 1(1): 4.
25. Laita, A., J. S. Kotiaho and M. Mönkkönen. 2011. Graph-theoretic connectivity measures: What do they tell us about connectivity? *Landscape Ecology* 26(7): 951-967.
26. Magle, S. B., D. M. Theobald and K. R. Crooks. 2009. A comparison of metrics predicting landscape connectivity for a highly interactive species along an urban gradient in Colorado, USA. *Landscape Ecology* 24(2): 267-280.
27. Mastisziw, T. C. and A. T. Murray. 2009. Connectivity change in habitat networks. *Landscape Ecology* 24: 89-100.
28. McRae, B. H. and D. M. Kavanagh. 2011. Linkage Mapper Connectivity Analysis Software. Available from: <http://www.circuitscape.org/linkagemappe>.
29. McRae, B. H., B. G. Dickson, T. H. Keitt and V. B. Shah. 2008. Using circuit theory to model connectivity in ecology. *Ecology* 89(10): 2712-2724.
30. Minor, E. S. and D. L. Urban. 2008. A graph-theory framework for evaluating landscape connectivity and conservation planning. *Conservation Biology* 22(2): 297-307.
31. Moilanen, A. and I. Hanski. 2001. On the use of connectivity measures in spatial ecology. *Oikos* 95(1): 147-155.

32. Moilanen, A. 2011. On the limitations of graph-theoretic connectivity in spatial ecology and conservation. *Journal of Applied Ecology* 48(6): 1543-1547.
33. O'Brien, D., M. Manseau, A. Fall and M. J. Fortin. 2006. Testing the importance of spatial configuration of winter habitat for woodland caribou: An application of graph theory. *Biological Conservation* 130(1): 70-83.
34. Pascual-Hortal, L. and S. Saura. 2006. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation. *Landscape Ecology* 21: 959-967.
35. Poodat, F. 2013. Assessment of Ecological Connectivity for Urban Environments: A Multispecies Approach. PhD thesis in RMIT University, Melbourne.
36. Poodat, F., C. Arrowsmith and E. Farmer. 2011. Modelling Habitat Networks Using the Concept of Graph Theory, in Spatial Sciences & Surveying Biennial Conference 2011. Wellington, New Zealand.
37. Poodat, F., C. Arrowsmith, D. Fraser and A. Gordon. 2015. Prioritizing Urban Habitats for Connectivity Conservation: Integrating Centrality and Ecological Metrics. *Environmental Management* 56(3): 664-674.
38. Rayfield, B., M. J. Fortin and A. Fall. 2010. The sensitivity of least-cost habitat graphs to relative cost surface values. *Landscape Ecology* 25(4): 519-532.
39. Rayfield, B., M. J. Fortin and A. Fall. 2011. Connectivity for conservation: a framework to classify network measures. *Ecology* 92(4): 847-858.
40. Opsahl, T., F. Agneessens and J. Skvoretz. 2010. Node centrality in weighted networks: generalizing degree and shortest paths. *Social Networks* 32(3): 245-251.
41. Rhodes, M., G. W. Wardell-Johnson, M. P. Rhodes and B. Raymond. 2006. Applying network analysis to the conservation of habitat trees in urban environments: A case study from Brisbane, Australia. *Conservation Biology* 20(3): 861-870.
42. Rothley, K. D. and C. Rae. 2005. Working backwards to move forwards: Graph-based connectivity metrics for reserve network selection. *Environmental Modelling and Assessment* 10: 107-113.
43. Saura, S. and L. Pascual-Hortal. 2007. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: Comparison with existing indices and application of case study. *Landscape and Urban Planning* 83: 91-103.
44. Saura, S., C. Estreguil, C. Mouton and M. Rodríguez-Freire. 2011. Network analysis to assess landscape connectivity trends: Application to European forests (1990-2000). *Ecological Indicators* 11: 407-416.
45. Saura, S. 2010. Measuring connectivity in habitat mosaics: The equivalence of two existing network indices and progress beyond them. *Community Ecology* 11(2): 217-222.
46. Schick, R. S. and S. T. Lindley. 2007. Directed connectivity among fish populations in a riverine network. *Journal of Applied Ecology* 44(6): 1116-1126.
47. Taylor, P. D., L. Fahrig, K. Helein and G. Merriam. 1993. Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos* 68(3): 571-573.
48. Theobald, D. M., J. B. Norman and M. R. Sherburne. 2006. FunConn v1 User's Manual: ArcGIS tools for Functional Connectivity Modeling. Fort Collins: Natural Resource Ecology Lab, Colorado State University.
49. Urban, D. and T. Keitt. 2001. Landscape connectivity: a graph-theoretic perspective. *Ecology* 82(5): 1205-1218.
50. Urban, D. L., E. S. Minor, E. A. Treml and R. S. Schick. 2009. Graph model of habitat mosaics. *Ecology Letters* 12: 260-273.
51. Vasas, V., T. Magura, F. Jordan and B. Tothmeresz. 2009. Graph theory in action: evaluating planned highway tracks based on connectivity measures. *Landscape Ecology* 24: 581-586.
52. Victorian Environmental Assessment Council. 2010. Metropolitan Melbourne Investigation, Discussion Paper. Victorian Environmental Assessment Council: Melbourne.
53. Zetterberg, A., U. M. Mörtberg and B. Balfors. 2010. Making graph theory operational for landscape ecological assessments, planning, and design. *Landscape and Urban Planning* 95: 181-191.