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

فاطمه پودات[۱]، کالین ارواسمیت[۲]، علیرضا میکاییلی تبریزی[۳] و اسلین گوردن[۴]

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

چکیده

تئوری گرف، 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 ساختاری 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 گرف و سابقه کاربرد آن در مطالعات مختلف اکولوژیک، روش‌ها، نرم‌افزارها و سنجه‌های مختلف جهت مدل‌سازی و سنجش شبکه‌ها بررسی شدند. سپس براساس این تئوری، شبکه زیستگاهی Varanus varius در محدوده کلان‌شهر ملبورن استرالیا به‌صورت یک گرف 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 به‌صورت بالقوه می‌توانند میان برنامه‌های حفاظتی و برنامه‌ریزی کاربری تعارض ایجاد کنند. با توجه به سهولت استفاده و دقت نتایج، استفاده از این تئوری و سنجرهٔ DC_{flux} در مطالعه شبکه زیستگاه‌های منقطع گونه‌های جانوری به‌خصوص در سیمای سرزمین شهری توصیه می‌شود.

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

۱. گروه معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲. گروه علوم زمین، دانشگاه آر ام 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 آر ام آی تی ملبورن

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

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.5.8]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.81]

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 تئوری گرف یا آنالیز شبکه است. تئوری گرف 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. یک گرف، مجموعه‌ای از نقاط یا گره‌ها و اتصالات یا یال‌هاست. مدلی به ظاهر 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)، مدل گرف 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 چیستی و چگونگی پیوستگی به تفصیل در مرجع (۱) آمده است. کاربرد تئوری گرف 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 پودات 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 توأمان تئوری گرف 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 توأمان لحاظ کند.

جهت آشنایی مبسوط با مبانی تئوری گرف 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 بزمجه استرالیایی با نام علمی *Varanus varius* در محدوده کلان‌شهری ملبورن استرالیا و همچنین اولویت‌بندی زیستگاه‌های آن گونه با استفاده از تئوری گرف است. بر همین اساس ابتدا مبانی تئوری گرف شامل: تعریف گرف، سابقه کاربرد آن در مطالعات مختلف اکولوژیک، روش‌ها، نرم‌افزارها، و سنجه‌های مختلف به‌کار رفته

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.5.8]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.81]

بررسی می‌شود. سپس براساس این تئوری شبکه زیستگاهی گونه مورد مطالعه به‌صورت یک گرف وزن داده شده در محیط GIS مدل‌سازی می‌شود. درنهایت 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 گرف

مبانی تئوری گرف به تفصیل در مطالعات پیشین نشان داده شده است (۱۳،۱۲، ۱۶، ۴۹ و ۵۰). همان‌طور که گفته شد دو جزء اصلی تشکیل دهنده یک مدل گرف، 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 درتسهیل جابه‌جایی‌های زیستی، متصل خواهند بود. در طول این مقاله مدل‌های پیوستگی، مدل گرف 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 می کنند (مدل منبع-مخزن) و بعضی زیستگاه‌های مخزن هستند که حرکت جانوران به آنجا ختم می‌شود. پس در یک مدل گرف 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. گرف‌های ناپیوسته شامل زیرگرف‌ها هستند. زیرگرف‌ها مجموعه‌ای از گره‌ها هستند که به یکدیگر پیوسته‌اند اما با سایر گره‌ها پیوستگی ندارند. پس حتی یک گره کاملاً مجزا نیز می‌تواند یک زیرگرف باشد. البته شیوه‌های دیگری نیز برای مدل کردن یک شبکه براساس تئوری گرف وجود دارد. به‌طور مثال استفاده از لکه‌ها و دالان‌ها به‌جای نقاط و اتصالات که در مطالعه زتربرگ 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 گرف ابزاری تصویری است که براساس آن می‌توان یک شبکه را با قوت‌ها و ضعف‌هایش به نمایش گذاشت (۱۶). مطالعات زیادی اذعان کرده‌اند که تئوری گرف روشی مؤثر جهت مدل کردن زیستگاه‌ها و برهم‌کنش‌ها و ارتباطات آنهاست (۱۷، ۳۲، ۴۹ و ۵۳). برای مدل کردن براساس تئوری گرف نیاز به فراهم آوردن داده‌های پیچیده‌ای نیست (۸ و ۴۵) و یک مدل گرف می‌تواند مطابق با هر حجم داده‌ای ساخته شود. همچنین ویژگی تحسین برانگیز مدل گرف قابلیت اضافه کردن اطلاعات به مدل گرف ساخته شده (۱۰ و ۴۹) و یا کاستن اطلاعات از آن است. به‌طور کلی گرف به‌عنوان روشی سریع جهت تجزیه و تحلیل مطالعات اکولوژیکی شناخته می‌شود (۴۹).

تاریخچه کاربرد تئوری گرف در سنجش پیوستگی

اولین کاربرد تئوری گرف 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 گرف 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.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.5.8]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.81]

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 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).

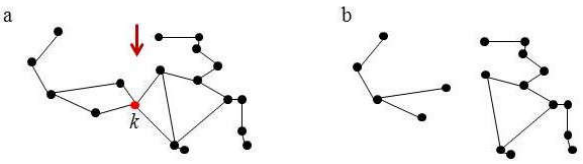
تئوری گرف همچنین در سیماهای سرزمین متنوعی به‌کار رفته است، از جمله سیمای سرزمین طبیعی (۸ و ۳۳)، کشاورزی (۶)، جنگلی (۱۷)، حوزه‌های آبی (۴۶)، روستایی (۴۱) و شهری (۵۳). مطالعات انجام شده نشان داد که این تئوری، قابلیت انطباق بیشتری با ساختارهای منقطع و لکه‌ای دارد که در آن لکه‌های زیستگاهی در یک ماتریس غیرزیستگاهی پراکنده شده‌اند (۱۶). همچنین گرف در مقیاس های 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 درنظر گرفتن مجموعه‌ای از جانداران که علی‌رغم ترجیحات زیستگاهی مشابه، ویژگی‌های حرکتی متفاوتی دارند (۸، ۱۷ و ۴۴) به‌کار رفته است. پودات (۳۷) تئوری گرف را در سنجش پیوستگی، برای تعدادی از جانوران دارای زیستگاه‌های متفاوت و ویژگی‌های حرکتی متفاوت، به طور موفقی به‌کار برد. درحالی که هنوز جای مطالعات بیشتر در این زمینه خالی است و می تواند 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

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.5.8]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.81]



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 ویژگی های اکولوژیکی شبکه‌های زیستگاهی می‌پردازند (سنجه‌های اکولوژیک)، برای سنجش جنبه‌های مختلف پیوستگی عملکردی به‌کار رفته است (۱۰، ۳۴، ۴۲، ۴۹ و ۵۱). مطالعاتی نیز این سنجه‌ها را گردآوری، دسته‌بندی و کاربرد آنها را تحلیل کرده‌اند (۱۶، ۳۵ و ۳۹). برخلاف حجم زیاد سنجه‌ها، 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 سنجه را باید از خیل سنجه‌های 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 سنجه (۴، ۲۵ و ۳۹)، تطبیق سنجه‌ها با معیارهای مورد نیاز در سنجش پیوستگی (۹، ۳۱ و ۳۵)، تأکید بیشتر بر سنجه‌های احتمالی به‌جای سنجه‌های دوتایی (سنجه‌های احتمالی شانس حضور تمامی اجزاء را در محاسبات فراهم می‌کنند و تغییرات کوچک ولی حساس را لحاظ می‌کنند) (۳۲) و درنظر گرفتن سنجه‌هایی از هر دو مقیاس کل شبکه و خرد (۳۵) است.

سنجه‌های مقیاس شبکه، پیوستگی کل شبکه و جریان پراکنش کلی را بر شبکه مورد بررسی قرار می‌دهد. این سنجه‌ها پیوستگی بین هر دو نقطه را با درنظر 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 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 سنجه‌ها، سنجهٔ IIC (۳۴) و PC (۴۳) هستند.

سنجه‌های مقیاس خرد، نقش هر نقطه یا اتصال را در میزان پیوستگی شبکه مشخص می‌کند. سنجه‌های این دسته براساس مساحت و کیفیت لکه‌های زیستگاهی (۱۵ و ۴۹)، الگوریتم برداشت نقطه و یا اتصال (۲۴ و ۴۳) و یا سنجه‌های 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 گرف

دو گروه از نرم‌افزارها جهت ساخت شبکه وجود دارند. دسته اول نرم‌افزارهایی که مشخصاً برای ساخت شبکه‌های زیستی درنظر گرفته شده‌اند مانند: LinkageMapper (۲۸)، FunnConn (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 igraph، tnet و network X هستند. همچنین ابزارهای مختلف نرم‌افزار GIS همچون cost-distance، least-cost corridor، network 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 و در گستره وسیع جغرافیایی به‌کار رود مورد نیاز است (۱۶). هدف از این پژوهش سنجش پیوستگی زیستگاه‌های گونه بزمجهٔ استرالیایی در محدوده کلان‌شهر ملبورن است.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.5.8]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.81]

بر مبنای مطالعات انجام شده و با استفاده از تئوری گرف، 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.

گونهٔ مورد مطالعه

بزمجهٔ استرالیایی با نام علمی *Varanus varius* گونه مورد مطالعه این پژوهش است. این گونه خزنده، مارمولکی درشت چثه 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.

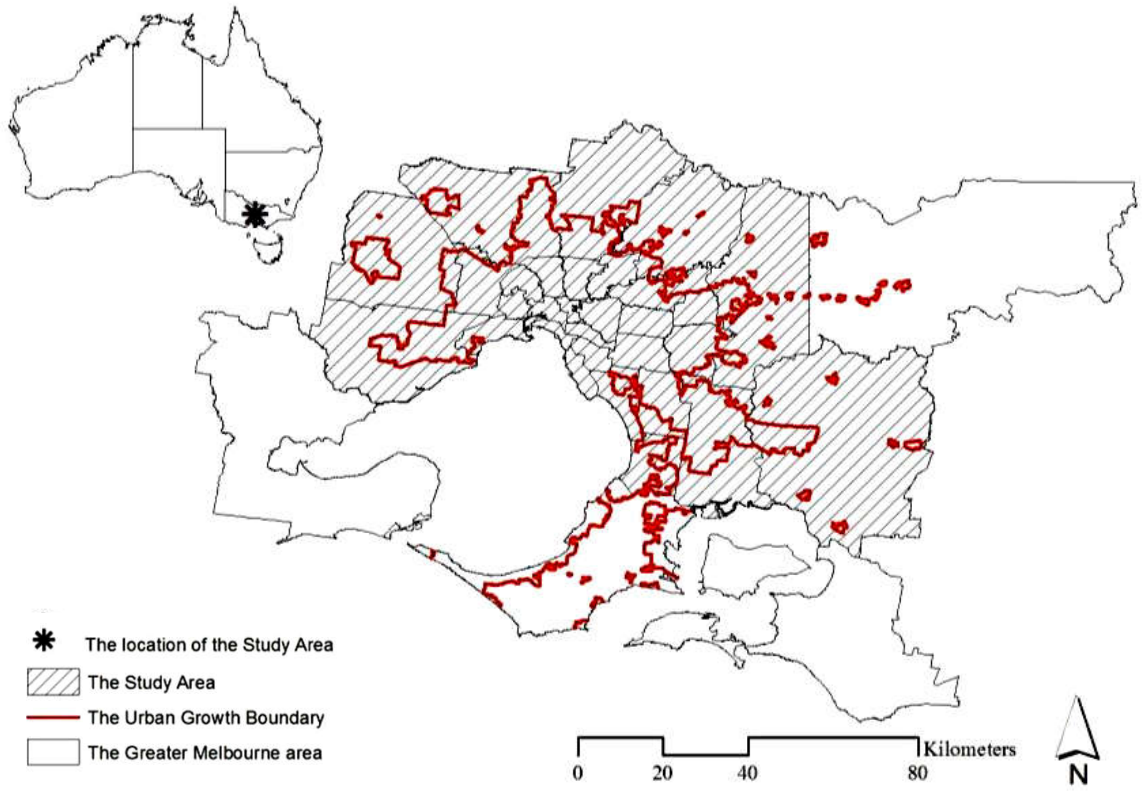
ساخت شبکه زیستگاهی بزمجه استرالیایی

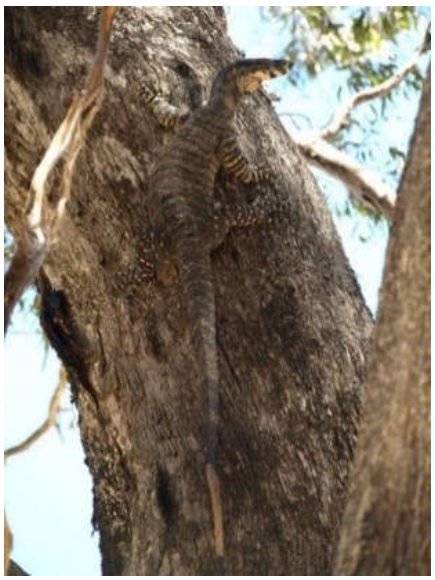
در ساخت شبکه زیستگاهی از کاربرد توأمان تئوری گرف و مدل‌سازی حداقل هزینه استفاده شد. شبکه زیستگاهی بزمجه استرالیایی، یک شبکه وزن داده شده و بدون جهت در محیط GIS است که شامل مجموعه‌ای از نقاط و اتصالات است. نقاط نشان‌دهنده موقعیت جغرافیایی لکه‌های زیستگاهی جانور هستند و هر نقطه یک لکه زیستگاهی را نمایندگی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

به‌منظور ساخت نقاط شبکه، از نقشه زیستگاه‌های مطلوب گونه استفاده شد که توسط گوردن و همکاران در سال ۲۰۰۹ با هدف منطقه‌بندی حفاظتی منطقهٔ مطالعاتی مشابه تهیه شده بود. آنها نقشهٔ 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 وکتری در محیط GIS درج شد. جهت ساخت اتصالات شبکه، در کنار روش تئوری گرف، 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 نرم‌افزارLinkage Mapper داده شد (۲۸). مطابق اهداف این مطالعه، نرم‌افزار مذکور شبکه زیستگاهی جانور را براساس تئوری گرف و روش مدل‌سازی حداقل هزینه تهیه کرد. این نرم‌افزار فاصله بین ۲ لکه را براساس فاصله اقلیدسی لبه به لبهٔ لکه‌های هم‌جوار محاسبه

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.5.8]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.81]





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

می‌کند که درکی واقع گرایانه‌تر از مسافت جابه‌جایی گونه است. حاصل پردازش نرم‌افزار، شبکه‌ای اولیه شامل مجموعه‌ای از نقاط و اتصالات بود. نقاط نشان‌دهنده مرکز لکه‌های زیستگاهی بودند. بین هر دو نقطه هم‌جوار یک لینک ساخته

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.5.8]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.81]

شد و براساس فاصله مؤثر در طول مسیر با حداقل هزینه، وزن داده شدند. وزن لینک‌ها مشروط بود به اینکه فاصله اقلیدسی لبه به لبه 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 درنظر گرفته شد.

سنجش پیوستگی شبکه زیستگاهی

شبکه زیستگاهی بزمجه 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 سنجه‌های 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 سنجه 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. به‌طوری که 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).

$$p_{ij} = \exp(-k.cwdist_{ij}) \qquad [۱]$$

جهت محاسبه اهمیت هر لکه در پیوستگی کل شبکه زیستگاهی، لینک‌ها بار دیگر توسط سنجه flux وزن داده شدند. flux به میزان پراکنش جانور بین زیستگاه‌ها مربوط می‌شود و سنجه‌ای 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 flux برای هر جفت نقطه حاصل‌ضرب مساحت لکه‌های متناظر نقاط در احتمال پراکنش جانور، متفاوت است.

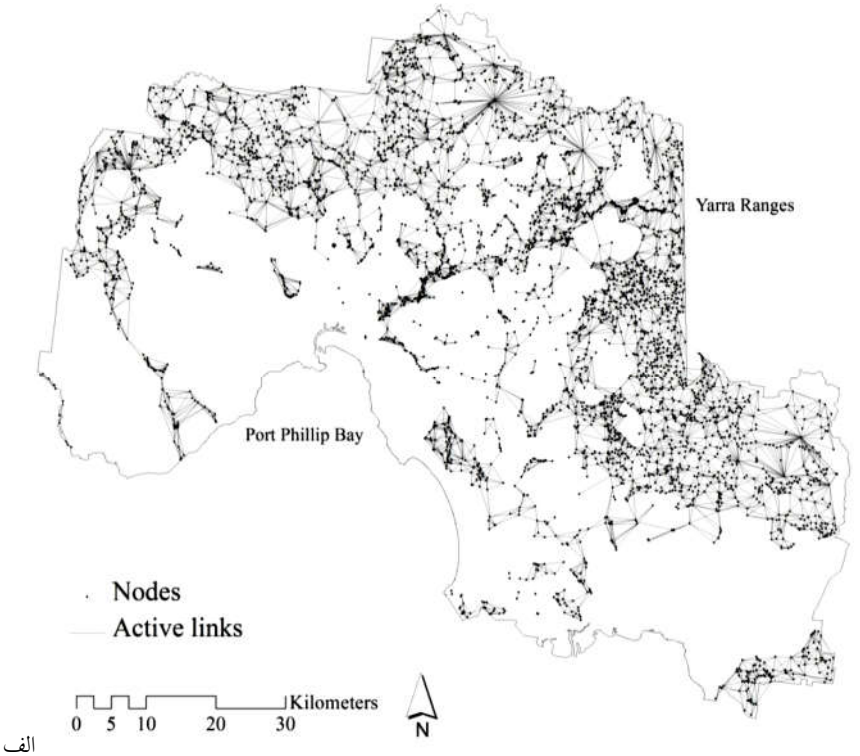
$$flux_{ij} = a_i \times a_j \times p_{ij} \qquad [۲]$$

پس از وزن‌دهی شبکه براساس سنجه‌های ذکر شده، نقاط موجود در شبکه از نظر اهمیت و نقشی که در پیوستگی دارند اولویت‌بندی شدند. جهت اولویت‌بندی لکه‌ها از سنجه DC_{flux} استفاده شد. بدین معنا که سنجه 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 اپساهل و همکاران (۴۰)، وزن لینک‌های متصل به لکه i در محاسبه DC_{flux} منظور می‌شود. جهت محاسبه سنجه از نرم‌افزار R و پکیج tnet استفاده شد. سپس مقادیر به‌دست آمده اولویت‌بندی شدند به‌طوری که مقادیر بزرگتر حاصل از سنجهٔ DC_{flux}، دارای رتبه بالاتر و مقادیر کوچک‌تر حائز رتبهٔ پایین‌تر بودند. مقادیر محاسبه شده در پنج دستهٔ مساوی دسته بندی شدند درنهایت رتبه‌های به‌دست آمده به نقاط متناظر در مدل فضایی گراف الصاق شدند.

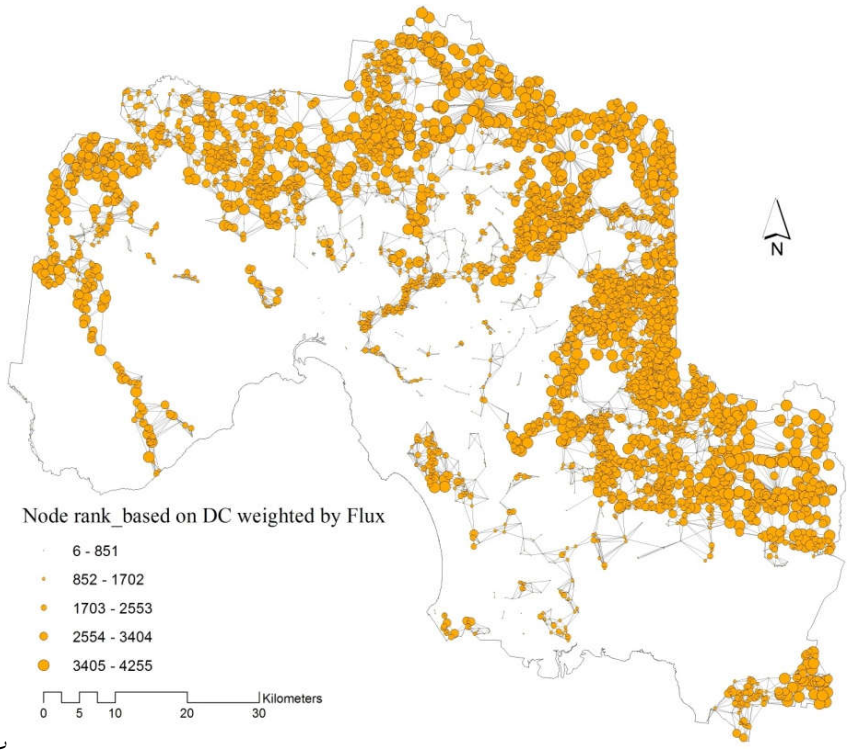
یافته‌ها

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 نقاط۱۰۸۲ متر و متوسط فاصله مؤثر بین نقاط ۳۰۵۹۱ واحد است (جدول ۱). شکل۳- الف شبکه زیستگاهی بزمجه استرالیایی را با تمام لینک‌های فعال نشان می‌دهد. لینک های فعال آنهایی هستند که فاصله مؤثر آنها از حداکثر فاصله مؤثر کمتر و فاصله اقلیدسی منتسب به آنها از حداکثر فاصله اقلیدسی طی شده توسط جاندار کمتر باشد. ۹۰ درصد لینک های شبکه این گونه، به‌عنوان لینک فعال درنظر 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.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.5.8]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.81]



الف



ب

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

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.5.8]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.81]

جدول ۱. مشخصات توپولوژیک مدل شبکه زیستگاهی بزمجه استرالیایی

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

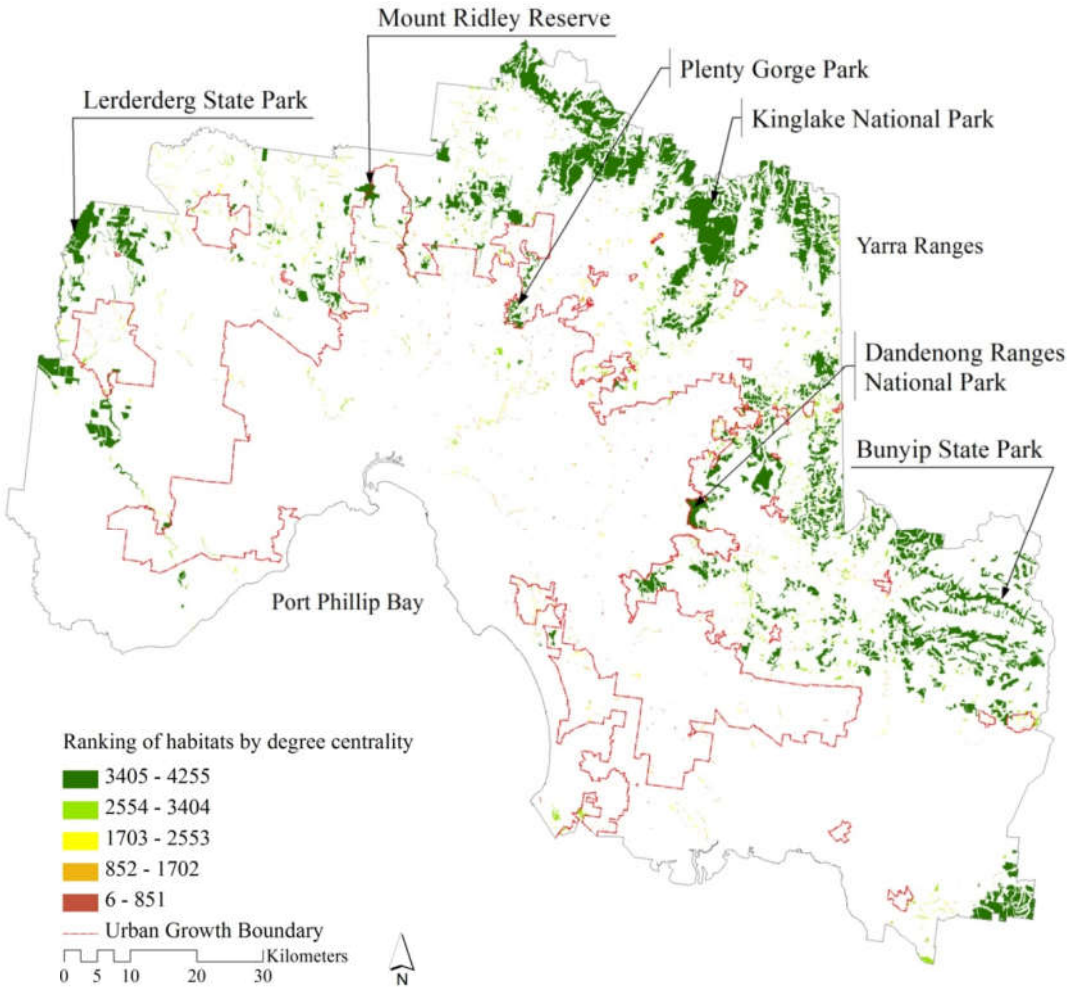
اولویت‌بندی زیستگاه‌ها

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، به‌طوری که هر دسته ۲۰ درصد از لکه‌های زیستگاهی جانور را شامل می‌شوند.

در گامی فراتر، 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. درحالی 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 به‌صورت بالقوه می‌توانند میان برنامه‌های حفاظتی و برنامه‌ریزی کاربری تعارض ایجاد کنند. در این مقاله به روش تشخیص جاپاها 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 گرف 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 مقیاسی 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 گرف 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 گرف 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 به‌کار 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.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.5.8]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.81]



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

تئوری گرف قابل کاربرد در انواع سیماهای 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 گرف است. به‌دلیل ماهیت توپولوژیک تئوری گرف، چینش فضایی نقاط و همسایگی و ارتباطات آنها با استفاده از این روش می‌تواند شبیه‌سازی شود. درحالی که مدل‌سازی نقاط و اتصالات فهم دقیقی از ساختار پیچیده گرف فراهم می‌سازد، این ویژگی در سیماهای سرزمینی که مرز مشخصی بین لکه‌های خود ندارند، به‌عنوان یک محدودیت تلقی می‌شود (۳۲)، با این وجود در سیماهای 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 گرف، یکی از روش‌های موجود است که به‌دلیل

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.5.8]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.81]

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 درنظر گرفته شده در مطالعه کاهش خواهد یافت.

سنجهٔ DC_{flux} که در این پژوهش جهت محاسبه پیوستگی شبکه به‌کار رفت، توانست نقاط را براساس میزان مشارکت آنها در پیوستگی کلی شبکه زیستگاهی بزمجهٔ استرالیایی ارزش گذاری کند و به‌همین دلیل جایگزین مناسبی برای الگوریتم برداشت نقطه که در پژوهش‌های پیشین به‌کار می‌رفت، به‌شمار آید. محاسبهٔ این سنجه با نرم‌افزارهای مختلف آنالیز شبکه قابل انجام است و این امر کاربرد آن را برای کاربران تسهیل می‌کند. درنظر گرفتن وزن اتصالات براساس سنجهٔ 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 درنظر گرفته شود. با درنظر گرفتن تمامی این عوامل، تفسیری جامع و مطابق واقعیت از میزان پیوستگی دو نقطه به‌دست 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 سیماهای سرزمین منقطع، استفاده از این تئوری به‌عنوان روشی برتر و کارا توصیه می‌شود. به‌ویژه این تئوری پتانسیل بالایی برای کاربرد در سیماهای 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 آر.ام.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.

منابع مورد استفاده

۱. پودات، 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 بین المللی اکولوژی سیمای سرزمین، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۸-۹ آبان.

۲. پودات، ف.، ش. برق جلوه، و س. ح. میرکریمی. ۱۳۹۳. مروری تحلیلی بر چگونگی اندازه‌گیری پیوستگی اکولوژیکی به‌منظور

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.5.8]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.81]

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* 261: 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.
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.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.5.8]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.81]

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 priorization 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.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.5.8]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.81]