# ارزیابی تاب آوری شبکه‌های سبز با به‌کارگیری فناوری‌های نوین سنجش از دور و متریک‌های سیمای سرزمین

**سعیده ناصحی**

**استادیار گروه مهندسی فضای سبز،مجتمع آموزش عالی میناب،دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران**

## چکیده

امروزه، ارزیابی انسجام اکولوژیک شبکه‌های سبز به عنوان یک ضرورت در برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار شهری مطرح است. این پژوهش با هدف ارزیابی انسجام اکولوژیک شبکه‌های سبز شهری تهران با به‌کارگیری فناوری‌های نوین سنجش از دور و متریک‌های سیمای سرزمین انجام شد. بدین منظور، ابتدا نقشه‌های تغییرات کاربری/پوشش اراضی برای سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۳ با پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست در محیط نرم‌افزار IDRISIتولید گردید. سپس، با استخراج لکه‌های سبز و تحلیل آن‌ها در نرم‌افزار FRAGSTATS، مجموعه‌ای از متریک‌های سیمای سرزمین (همچون مساحت لکه، تراکم، اندازه میانگین و شاخص‌های پیوستگی) محاسبه شد. یافته‌ها نشان می‌دهد که در بازه زمانی مطالعه، مساحت زیرساخت‌های سبز شهری از ۷۳۹۶ هکتار به ۴۱۷۱ هکتار کاهش یافته و به‌طور همزمان، فرآیند تجزیه و پراکندگی لکه‌ها تشدید شده است. محاسبه متریک‌های اکولوژیک، کاهش شدید پیوستگی ساختاری و عملکردی شبکه را تایید می‌کند. در گام نهایی، برای مواجهه با این چالش، راهبردهای مدیریتی شهری (شامل اقدامات حفاظتی، تدافعی، فرصت‌طلبانه و تهاجمی) به منظور تقویت انسجام و افزایش تاب‌آوری اکولوژیک شبکه سبز پیشنهاد شده است. این پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق داده‌های سنجش از دور و تحلیل‌های کمی سیمای سرزمین، ابزاری کارآمد برای پایش، تشخیص گسست‌ها و ارائه راهکارهای عملی در مدیریت شبکه‌های اکولوژیک شهری فراهم می‌کند.

## مقدمه

رشد سریع شهرنشینی و گسترش کالبدی شهرها در چند دهه اخیر، فشار فزاینده‌ای بر ساختار و عملکرد شبکه‌های اکولوژیک شهری وارد کرده است (Sun et al., 2018; Wang et al., 2018). این فرآیند، که همراه با تخریب و تجزیه زیستگاه‌های طبیعی است، تهدیدی جدی برای انسجام اکولوژیک—به عنوان عاملی کلیدی در حفظ تنوع زیستی، جریان‌های اکولوژیک و تاب‌آوری شهری—به شمار می‌رود (Girma et al., 2019). در این زمینه، زیرساخت‌های سبز شهری به مثابه شبکه‌ای حیاتی از فضاهای طبیعی و نیمه‌طبیعی، نقشی تعیین‌کننده در تعدیل اثرات نامطلوب توسعه شهری و تداوم خدمات اکوسیستمی ایفا می‌کنند (Benedict & McMahon, 2012).

با این حال، حفظ و ارزیابی کارآمد این شبکه‌ها نیازمند ابزارها و روش‌های دقیق و کمّی است. در این راستا، فناوری‌های نوین سنجش از دور به دلیل پوشش گسترده زمانی و مکانی، و متریک‌های سیمای سرزمین به علت قابلیت سنجش عینی ویژگی‌های ساختاری لکه‌های سبز (مانند اندازه، شکل، تراکم و پیوستگی)، رویکردی قدرتمند برای ارزیابی انسجام اکولوژیک شبکه‌های سبز فراهم می‌آورند (Liang et al., 2017; Nasehi et al., 2023). این روش‌ها امکان پایش روند تغییرات، تشخیص گسست‌های ساختاری و ارائه مبنای علمی برای برنامه‌ریزی و مداخله را ممکن می‌سازند.

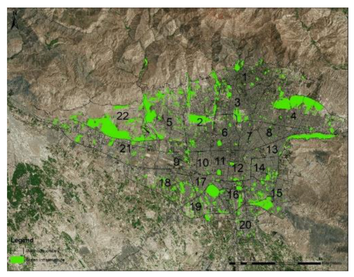
در ایران نیز مطالعات متعددی بر اهمیت زیرساخت‌های سبز و تاب‌آوری اکولوژیکی تأکید داشته‌اند. برای نمونه، پژوهش‌هایی به تحلیل ساختار فضایی شهرها با استفاده از متریک‌های سیمای سرزمین (زاهدی کلاکی و همکاران، ۱۴۰۲؛ یوسفی مقدم و همکاران، ۱۳۹۹)، ارزیابی تاب‌آوری محلات (شیرگیر و همکاران، ۱۴۰۰) و اثرات گسترش فیزیکی شهر بر انسجام اکولوژیکی (یدالله‌نیا و همکاران، ۱۴۰۰) پرداخته‌اند. با این وجود، ارزیابی جامع روند تغییرات انسجام شبکه سبز کلانشهری مانند تهران با استفاده از تلفیق داده‌های سنجش از دور و متریک‌های کمی سیمای سرزمین در یک بازه زمانی طولانی‌مدت، کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف تحقیقاتی، به ارزیابی انسجام اکولوژیک شبکه‌های سبز شهری تهران در بازه زمانی ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۳ می‌پردازد. سؤال اصلی تحقیق این است: روند تغییرات مساحت و انسجام ساختاری (پیوستگی) زیرساخت‌های سبز تهران تحت تأثیر توسعه شهری چگونه بوده و چه راهبردهای مدیریتی می‌تواند تاب‌آوری آن را افزایش دهد؟ برای پاسخ به این پرسش، از تصاویر ماهواره‌ای لندست برای استخراج تغییرات کاربری/پوشش اراضی و از نرم‌افزار FRAGSTATSبرای محاسبه متریک‌های سیمای سرزمین استفاده شده است. در نهایت، با اتکا به یافته‌های کمّی راهبردهای عملی برای تقویت انسجام شبکه پیشنهاد می‌شود. این مطالعه نشان می‌دهد که چگونه ادغام این روش‌ها می‌تواند تصویر روشنی از سلامت و پایداری شبکه اکولوژیک شهری ارائه کند و مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی فراهم آورد

## روش تحقیق

### منطقه مورد مطالعه

شهر تهران بعنوان پایتخت ایران، در شمال کشور و در دامنه جنوبی کوه‌های البرز و حاشیه کویری شمالی کویر ایران، در دشتی به نسبت هموار واقع شده است. تهران به ۲۲ منطقه شهری تقسیم شده است. این شهربا جمعیتی بالغ بر ۸۲۴۴۵۳۵ نفر و مساحتی معادل ۷۳۰ کیلومترمربع، بیست و پنجمین شهر پرجمعیت و بیست و هفتمین شهر بزرگ جهان به شمار می¬آید. حد فاصل طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲دقیقه شرقی تا ۵۱ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۴۴ دقیقه شمالی تا ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی گسترده شده است(خانی و همکاران، ۱۳۹۸). شکل ۱ زیرساخت های سبز منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد. این شهر با چالش‌هایی مانند تراکم جمعیت زیاد، تمرکز فعالیت‌ها، ساخت‌وسازهای وسیع و گسترش فیزیکی مراکز شهری روبرو است که منجر به تخریب اکوسیستم طبیعی آن شده است. در نتیجه، تهران در وضعیت ناپایداری از نظر وضعیت اکولوژیکی و همچنین مواجهه با خطرات زیست‌محیطی قرار دارد( Shamsipour et al., 2024).




شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

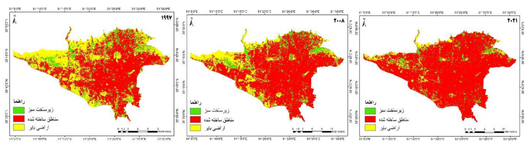
در این پژوهش، به‌منظور بررسی روند تغییرات پوشش اراضی، از تصاویر ماهواره‌ای سری لندست با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر در سه مقطع زمانی ۱۹۹۷، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۳ که از پایگاه USGSدریافت شدند، استفاده شد. در گام نخست، برای دستیابی به شناختی اولیه از الگوی پراکنش و طبقات پوشش اراضی، طبقه‌بندی نظارت‌نشده بر روی تصاویر انجام گرفت. سپس به‌منظور افزایش دقت نتایج، تصاویر تحت تصحیحات هندسی و اتمسفری قرار گرفتند و پس از تهیه نمونه‌های آموزشی، با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده و الگوریتم حداکثر احتمال در نرم‌افزار IDRISIطبقه‌بندی شدند. این الگوریتم از جمله روش‌های رایج و معتبر در مطالعات سنجش از دور به شمار می‌رود و بر اساس بیشترین احتمال تعلق هر پیکسل به یک طبقه مشخص عمل می‌کند. در ادامه، برای اطمینان از اعتبار نتایج به‌دست‌آمده، دقت طبقه‌بندی با استفاده از ماتریس خطا، شاخص صحت کلی و ضریب کاپا مورد ارزیابی قرار گرفت تا میزان انطباق نقشه‌های تولیدشده با واقعیت زمینی مشخص شود.

در مرحله بعد، به‌منظور تحلیل ساختار فضایی پوشش اراضی و ارزیابی وضعیت پایداری زیرساخت‌های سبز شهری، از متریک‌های سیمای سرزمین استفاده شد. انتخاب این متریک‌ها با تأکید بر سه مؤلفه اصلی پایداری زیرساخت‌های سبز، یعنی وسعت نسبی، انسجام شکلی و پیوستگی فضایی انجام گرفت. بر این اساس، شاخص بزرگ‌ترین لکه و شاخص میانگین مساحت هسته برای سنجش وسعت نسبی و میزان هسته‌های پایدار لکه‌های سبز، شاخص میانگین شکل لکه‌ها برای ارزیابی میزان انسجام و پیچیدگی شکل لکه‌ها، و شاخص پیوستگی لکه‌ها برای بررسی درجه اتصال و یکپارچگی درونی لکه‌های سبز محاسبه شدند. این متریک‌ها در مجموع امکان شناسایی میزان پراکندگی، تکه‌تکه‌شدن، فشردگی، نظم شکلی و پیوستگی فضاهای سبز را فراهم می‌کنند و از این طریق می‌توانند تصویری روشن از وضعیت ساختار اکولوژیکی شهر و روند پایداری یا ناپایداری زیرساخت‌های سبز در دوره مورد مطالعه ارائه دهند. به بیان دیگر، تلفیق نتایج طبقه‌بندی پوشش اراضی با متریک‌های سیمای سرزمین، چارچوبی مناسب برای تحلیل تغییرات فضایی و ارزیابی کیفیت اکولوژیکی فضاهای سبز شهری فراهم کرده است.

## نتایج و بحث

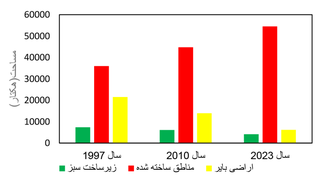
تغییرات انواع پوشش اراضی، به شرح زیر و مطابق شکل ۲ و شکل ۳ می‌باشد. بررسی ماتریس خطای تهیه شده برای نقشه های تهیه شده از تصاویر ماهواره ای، نشاندهنده ضریب کاپای کلی بیش از ۹۰ درصد و صحت کلی بیش از ۸۰ درصد می‌باشد که بر اساس مرور منابع انجام شده، دقت قابل قبول نقشه های تهیه شده را نشان می‌دهد.

طی سال¬های ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۳، اراضی انسان¬ساخت، از حدود ۳۵۹۷۹ هکتار به بیش از ۵۴۵۴۶ هکتار رسیده است. همچنین زیرساخت¬های سبز، از بیش از ۷۳۹۶ هکتار، به حدود ۴۱۷۱ هکتار رسیده است. در نهایت اراضی بایر از حدود ۲۱۵۲۶ به حدود ۶۱۸۵ هکتار کاهش یافته است. شایان ذکر است بیش از ۳۱۸۹ هکتار از زیرساخت¬های سبز و ۱۵۰۸۱ هکتار از اراضی بایر به اراضی انسان¬ساخت تبدیل شده است.




شکل ۲. نقشه تغییرات پوشش اراضی از ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۳ شهر تهران

تحلیل متریک‌های سیمای سرزمین در سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۳ نشان‌دهنده تغییرات ساختاری در زیرساخت‌های سبز شهری و تأثیر آن بر تاب‌آوری و پایداری اکوسیستم‌های شهری است. در این مطالعه، شاخص‌های بزرگ‌ترین لکه (LPI)، میانگین شکل لکه (MSI)، پیوستگی لکه‌ها (CONTIG_MN) و میانگین مساحت هسته (CORE_MN) برای بررسی روند تغییرات لکه‌های سبز مورد استفاده قرار گرفته است.




شکل ۳. نمودار تغییرات پوشش اراضی طی بازه زمانی مورد بررسی

کاهش مقدار شاخص بزرگ‌ترین لکه از ۰.۹۹۷۹ در سال ۱۹۹۷ به ۰.۸۲۵۸ در سال ۲۰۱۰ و سپس به ۰.۴۳۴۹ در سال ۲۰۲۳ نشان‌دهنده کاهش اندازه بزرگ‌ترین تراکم زیرساخت‌های سبز و افزایش پراکندگی آن‌ها در طول زمان است. مقدار نزدیک به یک این شاخص در سال ۱۹۹۷ بیانگر یکپارچگی بالای فضاهای سبز بوده، اما کاهش قابل توجه آن به‌ویژه در فاصله ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳ نشان می‌دهد که این فضاها به لکه‌های کوچک‌تر و جدا از هم تبدیل شده‌اند. چنین روندی می‌تواند باعث کاهش تنوع زیستی، افزایش آسیب‌پذیری در برابر تغییرات اقلیمی و کاهش ظرفیت جذب آلودگی و ذخیره کربن در محیط شهری شود.

از سوی دیگر، افزایش شاخص میانگین شکل لکه از ۱.۱۳۱۷ در سال ۱۹۹۷ به ۱.۱۵۲۳ در سال ۲۰۱۰ و ۱.۲۰۱۸ در سال ۲۰۲۳ نشان‌دهنده حرکت شکل لکه‌های سبز به سمت فرم‌های نامنظم‌تر است. هرچه مقدار این شاخص به عدد یک نزدیک‌تر باشد، شکل لکه‌ها پایدارتر و منظم‌تر است؛ بنابراین افزایش آن بیانگر کاهش انسجام شکلی و افزایش پیچیدگی مرز لکه‌ها است که می‌تواند عملکرد اکولوژیکی این فضاها را تحت تأثیر قرار دهد.

شاخص پیوستگی لکه‌ها نیز روندی کاهشی داشته است، به‌طوری‌که مقدار آن از ۰.۱۱۶۹ در سال ۱۹۹۷ به ۰.۰۹۶۵ در سال ۲۰۱۰ و ۰.۰۹۳۸ در سال ۲۰۲۳ کاهش یافته است. این کاهش نشان‌دهنده تضعیف ارتباطات اکولوژیکی میان لکه‌های سبز و کاهش تبادل انرژی، مواد مغذی و گونه‌های زیستی در میان آن‌هاست که در نهایت می‌تواند تاب‌آوری این زیرساخت‌ها را در برابر فشارهای محیطی کاهش دهد.

همچنین شاخص میانگین مساحت هسته از ۶.۷۹ هکتار در سال ۱۹۹۷ به ۵.۷۷۴۲ هکتار در سال ۲۰۱۰ و ۴.۷۳۷۷ هکتار در سال ۲۰۲۳ کاهش یافته است که بیانگر کوچک‌تر شدن هسته‌های مرکزی زیرساخت‌های سبز است. کاهش این هسته‌ها نشان می‌دهد بخش‌های پایدار و کمتر متأثر از اثرات لبه‌ای به‌تدریج کوچک‌تر شده‌اند و این موضوع می‌تواند توانایی زیرساخت‌های سبز را در مقابله با تهدیدات زیست‌محیطی کاهش دهد.

در مجموع، نتایج بیانگر کاهش یکپارچگی و پیوستگی لکه‌های سبز، نامنظم‌تر شدن شکل آن‌ها و کوچک‌تر شدن هسته‌های مرکزی در طول زمان است؛ روندی که می‌تواند منجر به کاهش تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز و افزایش آسیب‌پذیری اکوسیستم‌های شهری در برابر توسعه شهری و تغییرات محیطی شود. از این‌رو، تقویت اتصال لکه‌های سبز و افزایش مساحت هسته‌ای آن‌ها می‌تواند نقش مهمی در بهبود پایداری این زیرساخت‌ها داشته باشد.

## پیشنهادها

این پژوهش با هدف ارزیابی انسجام اکولوژیک شبکه‌های سبز شهری تهران، با اتکا به قابلیت‌های نوین سنجش از دور و تحلیل‌های کمی مبتنی بر متریک‌های سیمای سرزمین انجام شد. یافته‌ها به‌وضوح نشان داد که رویکرد تلفیقی مذکور، ابزاری دقیق و کارآمد برای پایش روند تغییرات ساختاری، تشخیص گسست‌های اکولوژیک و سنجش عینی تاب‌آوری شبکه سبز فراهم می‌کند.

نتایج حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و محاسبه متریک‌ها در یک بازه زمانی ۲۶ساله افول شدید انسجام ساختاری شبکه را تأیید می‌کند. کاهش ۵۶٫۵ درصدی شاخص بزرگ‌ترین لکه درصدی شاخص پیوستگی و کاهش ۳۰ درصدی میانگین مساحت هسته، همگی گواه تجزیه، پراکندگی و ضعف فزاینده در کارکرد اکولوژیک این زیرساخت حیاتی هستند. تحلیل حساسیت شاخص‌ها نیز مؤید اولویت بالای معیارهای ساختاری (مانند مساحت هسته و یکپارچگی) در تعیین سطح تاب‌آوری است، که بر لزوم توجه به کیفیت درونی و پیوندهای فضایی لکه‌های سبز، فراتر از صرفاً مساحت کلی آنها، تأکید دارد. این یافته‌ها که همسو با مطالعات پیشین است. که خطری جدی برای مدیریت شهری محسوب می‌شود. تخریب انسجام شبکه، به‌ویژه در مناطق مرکزی و جنوبی تهران، نه‌تنها ظرفیت ارائه خدمات اکوسیستمی را تحلیل برده، بلکه آسیب‌پذیری شهر را در برابر مخاطراتی چون جزایر گرمایی و سیلاب‌های شهری افزایش می دهد.

در پایان، این مطالعه نشان می‌دهد که ادغام داده‌های سنجش از دور و متریک‌های سیمای سرزمین، یک چارچوب تحلیلی قدرتمند برای تصمیم‌سازی در مدیریت منظر شهری فراهم می‌کند. بر این اساس، راهبردهای آتی باید بر حفظ و تقویت هسته‌های باقیمانده، احیای پیوندهای اکولوژیک از طریق ایجاد کریدورهای سبز، و اتخاذ سیاست‌های ضدپراکندگی شهری متمرکز شوند.

## منابع

زندسلیمی، میلاد؛ بهرامی، بختیار (۱۴۰۱). بررسی تغییرات ساختار اکولوژیک چهار تپه در سنندج به کمک روش شیءگرا و شاخص‌های پیوستگی و پیچیدگی. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۴(۱۰)، ۹۱-۷۷.
https://doi.org/10.22034/jest.2021.59586.5330

شیرگیر، المیرا؛ بهزادفر، مصطفی؛ خیرالدین، رضا (۱۴۰۰). تبیین روشی جهت سنجش و افزایش میزان تاب‌آوری شهری به تغییرات اقلیمی بر پایه اصول اکولوژی سیمای سرزمین در مقیاس محله شهری (مطالعه موردی: محله یوسف‌آباد تهران). پژوهش‌های معماری منظر، ۱۰(۱۹)، ۱-۱۸. https://doi.org/10.30495/hoviatshahr.2021.17026

یدالله‌نیا، هاجر؛ رجایی، سید عباس؛ پوراحمد، احمد؛ خراسانی، محمد امین (۱۴۰۰). اثرات گسترش فیزیکی بر تاب‌آوری زیست‌محیطی شهر بابل. جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، ۹(۳۲)، ۱۱۱-۱۳۰. https://mag.iga.ir/article_246244.html

یوسفی مقدم، علیرضا؛ نبی بیدهندی، غلامرضا؛ هویدی، حسن (۱۳۹۹). مدل‌سازی توان اکولوژیک توسعه شهری براساس سنجه‌های سیمای سرزمین (مطالعه موردی: شهر شیراز). پژوهش‌های جغرافیای انسانی، ۵۲(۴)، ۱۴۰۹-۱۴۳۲.
https://doi.org/10.22059/jhgr.2019.290379.1008019

زاهدی کلاکی، ابراهیم؛ متولی، صدرالدین؛ محمودزاده، حسن؛ جانباز قبادی، غلامرضا (۱۴۰۲). ارزیابی تغییرات ساختار اکولوژیک شهر بهشهر به منظور ارائه راهکارهایی جهت بهبود پیوستگی منظر و ارتقای تاب‌آوری زیست‌محیطی. مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی، ۱۱(۱)، ۲۳۹-۲۶۰. https://dorl.net/dor/20.1001.1.25385968.1402.18.1.19.6

Bernat, S. (2014). Revitalization of river valleys and development of tourism (Lublin and Puławy study case). Geography and Tourism, 2(1), 12-34. https://czasopisma.ukw.edu.pl/index.php/gat/article/view/1

Dramstad, W. E., Olson, J. D., & Forman, R. T. (1996). Landscape ecology principles in landscape architecture and land-use planning (Vol. 18). Harvard University Graduate School of Design.

Forman, R. T. T. (1995). Land mosaics: The ecology of landscapes and regions. Cambridge University Press.

Ha, J., Choi, D. H., & Darling, L. E. (2024). Is the spatial distribution of urban green space associated with crime in Chicago? Urban Forestry & Urban Greening, 95, 128282. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128282

McGarigal, K. (2002). FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for categorical maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/2243084

Nasehi, S., & Imanpour Namin, A. (2020). Assessment of urban green space fragmentation using landscape metrics (case study: district 2, Tehran city). Modeling Earth Systems and Environment, 6(4), 2405–2414. https://doi.org/10.1007/s40808-020-00809-7

Nasehi, S., Alemohammad, S., Mehrian, M. R., & Dinan, N. M. (2023). Formulating Sustainability Strategies for Urban Green Infrastructures by using the Landscape Changes Assessment (Tehran Metropolitan District 2). Geography and Environmental Sustainability, 13(2), 95-114. https://doi.org/10.22126/ges.2023.8640.2614

Nazombe, K., & Nambazo, O. (2023). Monitoring and assessment of urban green space loss and fragmentation using remote sensing data in the four cities of Malawi from 1986 to 2021. Scientific African, 20, e01639. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01639

Ramezani Mehrian, M. (2022). Assessing the structural quality of green space network in urban environments - case study: District 16 of Tehran Municipality. Geographical Urban Planning Research, 10(1), 81–99. https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2022.325283.1535

Sadat, M., Zoghi, M., & Amiri, M. J. (2024). Investigating the Effects of Some Ecological Indicators of Forest Patches on the Supply of Selected Ecosystem Services (Study Area: Eastern Part of Gilan Province). Geography and Environmental Planning, 35(1), 89–110. https://doi.org/10.22108/gep.2023.138399.1595