

GES	Geography and Environmental Studies, 14 (53), 2025 https://sanad.iau.ir/journal/ges ISSN: 2008-7845 Doi: 10.71740/ges.2025.979140
-----	---

Research Paper

Received: 19 April 2024

Revised: 24 August 2024

Accepted: 08 October 2024

Analysing the Quality Karaj City Green Spaces using Remote Sensing Ecological Index (RSEI)

Nazanin Naseri¹, Milad Hosseinzadeh Niri², Raoof Mostafazadeh³

1. M.Sc in Land Use Planning and Assessment, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, Malayer University, Malayer, Iran

2. M.Sc Student of Remote Sensing and GIS, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Human Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3. Associate Professor, Department of Natural Resources and Member of Water Management Research Center, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Iran, (Corresponding Author)

Email: raoofmostafazadeh@uma.ac.ir

Abstract

The increase of human activities has caused disturbances in human ecosystems and environment in different scales. Remote sensing techniques have been found to be effective for quantifying and detecting ecological changes and can be considered as an alternative for monitoring spatial changes in the ecological conditions of the environment. Today, the use of remote sensing data for studies related to the quality of the urban environment has also gained a great attention. In this research, the ecological quality of Karaj city's environment was evaluated and analyzed using Landsat series images in 2010 and 2020 by analyzing the main components of greenness, humidity, dryness and heat to determine four remote sensing ecological indicators. Remote sensing ecological indicators used in environmental quality extraction include LST, NDVI, NDBI and WET. The results showed that the quality of the environment of Karaj city has generally decreased from 2010 to 2022 and the average RSEI has decreased from 0.59 to 0.25, which shows the destruction of the environment of this city due to the expansion of its residential parts. Environmental changes in the study area are closely related to human activities in the form of spatial expansion of residential areas and development, which is caused by the immigration of the study area and its proximity to the Tehran. The index used in the present research can adequately reflect the spatial changes of environmental quality from different dimensions and is an effective method for comprehensive evaluation of environmental quality and ecological conditions in urban environments.

Keywords: Environmental quality, Green space, NDVi, Ecological quality index, Land surface temperature.

Citation: Naseri, N.; Hosseinzadeh Niri, M.; Mostafazadeh, R. (2025), Analysing the Quality Karaj City Green Spaces using Remote Sensing Ecological Index (RSEI), Journal of Geography and Environmental Studies, 14 (53), 40-55. Doi: 10.71740/ges.2025.979140

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author (s), with publication rights granded to Journal of Geography and Environmental Studies. This is an open – access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. **Publisher: Islamic Azad Univesity of Najafabad.**



تحلیل کیفیت فضای سبز شهرستان کرج با استفاده از شاخص اکولوژیکی سنجش از دور (RSEI)

نازنین ناصری^۱، میلاد حسین زاده نیری^۲، رئوف مصطفی زاده^{۳*}

۱. کارشناس ارشد ارزیابی و آمایش سرزمین، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم انسانی

دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳. دانشیار، گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

چکیده

افزایش فعالیت‌های انسانی باعث ایجاد اختلال در اکوسیستم‌ها و محیط زیست انسان در مقیاس‌های مختلف شده است. تکنیک‌های سنجش از دور برای تعیین کمیت و تشخیص تغییرات اکولوژیکی موثر تشخیص داده شده اند و می‌تواند به عنوان یک جایگزین برای پایش تغییرات مکانی در شرایط اکولوژیکی محیط مطرح باشد. امروزه استفاده از داده‌های سنجش از دور برای مطالعات مرتبط با کیفیت محیط زیست شهری نیز افزایش یافته است. در این پژوهش کیفیت اکولوژیکی محیط زیست شهرستان کرج با استفاده از تصاویر سری لندست در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی درجه سبز، رطوبت، خشکی و گرما برای تعیین چهار شاخص اکولوژیکی سنجش از دور ارزیابی و تجزیه و تحلیل شد. شاخص‌های اکولوژیکی سنجش از دوری مورد استفاده در استخراج کیفیت محیط زیست شامل LST، NDVI، NDBI و WET است. نتایج نشان داد که کیفیت محیط زیست شهرستان کرج از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ به طور کلی سیر نزولی داشته و میانگین RSEI از ۰/۵۹ تا ۰/۲۵ کاهش یافته است که نشان از تخریب محیط زیست این شهرستان با توجه به گسترده شدن بخش‌های مسکونی آن دارد. تغییرات محیط زیست در منطقه مورد مطالعه ارتباط تنگاتنگی با فعالیت‌های انسانی در قالب گسترش مکانی مناطق مسکونی و توسعه دارد که ناشی از مهاجرپذیری منطقه مورد مطالعه و مجاورت آن با شهر تهران است. شاخص مورد استفاده در پژوهش حاضر می‌تواند به طور مناسبی تغییرات مکانی کیفیت محیط زیست را از ابعاد مختلف منعکس نماید و یک روش موثر برای ارزیابی جامع کیفیت محیط زیست و شرایط اکولوژیکی در محیط‌های شهری است.

کلمات کلیدی: کیفیت محیط زیست، فضای سبز، شاخص نرمال شده پوشش گیاهی استاندارد، شاخص کیفیت اکولوژیکی، دمای سطح زمین.

تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۰۱/۳۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۷

نویسنده مسئول: رئوف مصطفی زاده، دانشیار، گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل،

ایران. raofmostafazadeh@uma.ac.ir

نحوه ارجاع به مقاله:

ناصری، نازنین؛ حسین زاده نیری، میلاد؛ مصطفی زاده، رئوف (۱۴۰۴)، تحلیل کیفیت فضای سبز شهرستان کرج با استفاده از شاخص اکولوژیکی سنجش از دور (RSEI)،

فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی، ۱۴ (۵۳)، ۴۰-۵۵. Doi: 10.71740/ges.2025.979140

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author (s), with publication rights granded to Journal of Geography and Environmental Studies. This is an open – access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. **Publisher: Islamic Azad University of Najafabad.**



مقدمه

شهرنشینی کنونی در سراسر جهان باعث ایجاد مشکلاتی مانند تراکم بالای جمعیت، کمبود شدید آب، ایجاد اثر جزیره حرارتی شهری و آلودگی هوا شده است. بنابراین، توسعه اکولوژیکی و طراحی اصولی فضای سبز در محیط‌های شهری موضوع مهمی است که باید در برنامه‌ریزی منطقه‌ای توسعه شهری در اولویت قرار گیرد (Wang et al. 2018). پیشرفت‌های اخیر در سیستم‌های پایش ماهواره‌ای زمین، پتانسیل تبدیل شدن به یک ابزار قدرتمند در مدیریت اکوسیستم را دارد که می‌تواند وضعیت محیط زیست و اکوسیستم را در مقیاس‌های مختلف محلی و جهانی مشخص نماید (Ellis et al. 2006; Willis et al. 2016). استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای اندازه‌گیری اجزای مختلف یک اکوسیستم توانایی شناسایی طیف گسترده‌ای از ویژگی‌های اکولوژیکی را دارد. با توجه به اینکه، سنجش از دور تشعشعات منعکس شده از پدیده‌های زمینی را اندازه‌گیری می‌کند، قادر به تخمین ویژگی‌های سطح زمین مانند نوع پوشش زمین، شاخص سطح برگ و زیست توده برای هر پیکسل تصویر است (Abdullah et al. 2011; Dearing et al. 2015). بنابراین، تکنیک‌های سنجش از دور به‌طور گسترده در تحقیقات اکولوژیکی و محیط زیستی و نیز به‌عنوان ابزاری در مدیریت محیط می‌تواند استفاده شوند (Kennedy et al. 2014). در دهه‌های اخیر، سنجش از دور به روشی موثر برای ارزیابی محیط زیست اکولوژیکی منطقه‌ای تبدیل شده است (Xu et al. 2019; Hu et al. 2018; Willis et al. 2015). به کارگیری یک شاخص یکسان برای ارزیابی شرایط اکوسیستم‌ها به دلیل پیچیدگی آن دشوار است و بنابراین، شاخص‌های اکولوژیکی متنوعی برای ارزیابی وضعیت سلامت اکوسیستم پیشنهاد شده است (Tang et al. 2015). به‌عنوان مثال، شاخص تفاوت نرمال شده گیاهی (NDVI) یا شاخص سطح برگ برای پایش تغییرات محیطی استفاده شده است (Tang et al. 2015; Brehaut et al. 2018). دمای سطح زمین (LST) برای ارزیابی و تعیین الگوی مکانی وقوع و تعیین اثرات جزایر حرارتی شهری توسعه داده شده‌اند (Chakraborty et al. 2019; Meng et al. 2018; Zhou et al. 2014; Weng et al. 2009). ساختمان نرمال شده (NDBI) و شاخص سطح غیرقابل نفوذ نرمال شده (NDISI) برای تعیین سطوح ساخته شده و نفوذناپذیر شهری استفاده می‌شوند (Sekertekin et al. 2018; Xu et al. 2008). شاخص تفاضل آب نرمال شده (NDWI) و شاخص تفاضل آب نرمال شده اصلاح شده (MNDWI) برای استخراج بدنه‌های آبی محیط مورد استفاده قرار گرفت (Meng et al. 2018; Sandholt et al. 2002). در همین راستا، NDVI و LST نیز برای پایش خشکسالی یا رطوبت خاک استفاده شده است (Marzban et al. 2002; Sandholt et al. 2002; Sandholt et al. 2002). به دلیل پیچیدگی و تنوع عوامل تأثیرگذار، تنها استخراج شاخص‌های منفرد اکولوژیکی برای ارزیابی وضعیت اکوسیستم کافی نیست. شاخص‌های اکولوژیکی مختلف مبتنی بر سنجش از دور نقش مهمی در کمی‌سازی و نقشه‌بندی ویژگی‌ها و عملکردهای اکوسیستم ایفا کرده‌اند. از میان آن‌ها، شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) متداول‌ترین شاخص مورد استفاده در مطالعات مختلف اکولوژیکی برای توصیف مناطق دارای پوشش گیاهی است (White et al. 2016; Ochoa-Gaona et al. 2010; Tilt et al. 2007). دمای سطح زمین (LST) به دست آمده از سنجش از دور اغلب برای توصیف جزیره حرارتی شهری¹ (UHI) استفاده شده است (Xu et al. 2017; Coutts et al. 2016; Nichol, 2009). شاخص‌های اکولوژیکی مبتنی بر سنجش از دور در ارزیابی مکانی صریح شرایط پیچیده اکولوژیکی از طریق ترکیبی از معیارها و داده‌های موجود به کار گرفته شده‌اند. با استفاده از روش تحلیل مکانی مولفه‌های اصلی (SPCA) می‌توان شاخص اکولوژیک مبتنی بر سنجش از دور² (RSEI) را به دست آورد که به‌طور گسترده در مطالعات ارزیابی کیفیت اکولوژیک استفاده شده است.

1. Urban Heat Islands

2. Remote Sensing-based Ecological Index

پیشینه پژوهش:

Tiner (۲۰۰۴) یک شاخص ترکیبی را فرموله نمود که در آن وسعت زیستگاه و شاخص‌های اختلال زیستگاه در نظر گرفته شد. در نهایت، با ترکیب متغیرهای مختلف، یک مقدار عددی کلی برای زیستگاه طبیعی در حوضه آبخیز رودخانه Nanticoke Delaware's به دست آمد و مبنای ارزیابی وضعیت زیستی منطقه مورد مطالعه قرار گرفت. Sean و همکاران (۲۰۰۵) یک شاخص اختلال جنگل مبتنی بر سنجش از دور را ایجاد کردند. در این شاخص سه مولفه تغییر مقیاس (روشنایی، سبزی و رطوبت) را ترکیب و یک منحنی با توزیع نرمال به دست آوردند که در آن تغییر مقادیر به سمت مقدار مثبت و افزایشی، نشان‌دهنده احتمال بیش‌تر اختلال در پوشش جنگلی است. Schwarz و همکاران (۲۰۱۲) از دمای هوا و دمای سطح زمین (LST) برای تعیین مقدار کمی جزایر حرارتی شهری در شهر لایپزیگ (آلمان) استفاده نمودند. ایشان دریافتند که دمای سطح زمین (LST) مشتق شده از سنجش از دور می‌تواند در شناسایی جزایر حرارتی در مناطق با بافت شهری تراکم نسبت به مناطق با تراکم جمعیت کم‌تر قابل اعتمادتر باشد.

Hu و همکاران (۲۰۱۸) انواع پوشش زمین و وضعیت اکولوژیکی در منطقه جدید Xiong'an را با استفاده از تکنیک‌های وارونگی عوارض و شاخص اکولوژیکی مبتنی بر سنجش از دور بهبود یافته (RSEI) بررسی کردند. مدل‌های آماری برای پیش‌بینی اثرات اکولوژیکی بر اساس افزایش جمعیت افزایش سطوح نفوذناپذیر در آینده استفاده شد و پیش‌بینی مبتنی بر RSEI نشان می‌دهد که منطقه IS تأثیر قابل توجهی بر شرایط اکولوژیکی منطقه‌ای دارد و تغییر نسبت‌های IS در ناحیه جدید می‌تواند منجر به تغییر قابل توجه RSEI شود و برنامه‌ریزی اصلی در منطقه باید مبتنی بر کنترل افزایش سطوح نفوذناپذیر باشد. Xu و همکاران (۲۰۱۸) چهار شاخص سبزی‌نگی، رطوبت، خشکی و دما را برای تولید یک شاخص اکولوژیکی کاملاً مبتنی بر سنجش از دور (RSEI) ادغام کرد و این شاخص را در ارزیابی شرایط اکولوژیکی شهر فوژو کشور چین به کار برد. نتایج نشان داد که RSEI می‌تواند به طور موثر کیفیت اکولوژیکی منطقه‌ای را در سال‌های متوالی نشان دهد. کریمی فیروزجایی و همکاران (۲۰۲۰) از شاخص اکولوژیکی سطح شهری سنجش از دور (RSUSEI) در شش شهر منتخب ایالات متحده استفاده کردند. برای این منظور، تصاویر Landsat 8، داده‌های بخار آب، و مجموعه داده‌های پوشش زمین و نفوذناپذیری پایگاه داده ملی پوشش زمین (NLCD) به کار گرفته شد. نتایج حاکی از آن بود که تنوع مکانی LST، ISC، NDVI، NDSI و Wetness در داخل محدوده شهری و بین شهرهای مختلف ناهمگن است. میانگین مقدار RSUSEI برای مینیاپولیس، دالاس، فینیکس، لس آنجلس، شیکاگو و سیاتل به ترتیب ۰/۵۸، ۰/۵۴، ۰/۴۷، ۰/۱۹، ۰/۲۱ و ۰/۵ به دست آمد. برای همه شهرها، مولفه اول بیش از ۹۳ درصد از واریانس اطلاعات سطح زمین را توجیه می‌کند که سبزی‌نگی، رطوبت، خشکی، دما و نفوذناپذیری به تبیین آن کمک می‌کند. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار میانگین RSUSEI به ترتیب در اراضی شدیداً توسعه یافته با مقدار ۰/۷۶ و فضای باز توسعه یافته با مقدار ۰/۳۵ مشاهده شد. میانگین ضریب همبستگی بین RSUSEI و LST، ISC، NDVI، NDSI و Wetness به ترتیب ۰/۴۷، ۰/۹۷، ۰/۳۱، ۰/۱۷ و ۰/۲۷- است. نتایج ایشان هم‌چنین نشان داد که درجه ارتباط ISC در مدل‌سازی USES با وجود تفاوت در پوشش زمین و ویژگی‌های بیوفیزیکی در شهرها، بالاترین میزان است. Wang و همکاران (۲۰۲۲) از شاخص RSEI به عنوان شاخص ارزیابی اثربخشی مدیریت محیط زیستی با هدف احیای اکولوژیکی معدن متروکه جهت رسیدن به توسعه پایدار اجتماعی-اقتصادی استفاده کردند. ایشان داده‌های تصویر Landsat-8 و شاخص اکولوژیکی سنجش از دور (RSEI) را برای ارزیابی تغییرات پویایی و تفاوت‌های مکانی و زمانی اکولوژیکی-محیط زیستی در منطقه مورد مطالعه تحت مدیریت جامع بلندمدت کمی نمودند. نتایج ایشان نشان داد که RSEI برای ارزیابی اثربخشی مدیریت جامع اکولوژیکی در مناطق تحت معدن کاوی با محدوده وسیعی از مناطق بدون پوشش مناسب است. Pukowiec-Kurda (۲۰۲۲) از شاخص خدمات اکوسیستم شهری با زیرمعیارهای مختلف به عنوان یک شاخص جدید برای

برنامه‌ریزی شهر پایدار و رفاه انسان در کلان‌شهر سیلسیان کشور لهستان که تحت تاثیر شدید فعالیت‌های معدن کاوی است، استفاده نمودند. تاکید ایشان بر شناسایی خدمات اکوسیستم شهری و اثربخشی آن‌ها بود و نتایج نشان داد که اکوسیستم‌های طبیعی شهری برای شهرها ضروری هستند و وسعت بالای اکوسیستم‌های طبیعی باعث افزایش استانداردهای زندگی در مناطق تغییر یافته در اثر فعالیت‌های انسانی است. Yu و همکاران (۲۰۲۲) از یک شاخص مبتنی بر سنجش از دور و داده‌های Landsat و MODIS با تفکیک مکانی-زمانی مناسب برای تعیین زیست‌پذیری اکولوژیکی شهری استفاده کردند. شاخص زیست‌پذیری اکولوژیکی (ELI) پنج شاخص اولیه شامل سبزی‌نگی اکولوژیکی، دما، خشکی، رطوبت و کدورت اتمسفر را پوشش می‌دهد و بر اساس روش آنتروپی وزن‌دهی می‌شوند. شاخص مذکور در تعیین کیفیت زیست‌پذیری اکولوژیکی (ELQ) در منطقه مرکزی شهر ووهان از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ در دوره‌های ۵ ساله مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که ELQ شهر ووهان به‌طور کلی در سطح متوسط و به مقدار ۰/۶ ارزیابی شد. علاوه بر این، مشخص شد که زیست‌پذیری اکولوژیکی در فصل‌های بهار و پاییز و در نزدیکی رودخانه‌ها و دریاچه‌ها بهتر بوده است، در حالی که گسترش شهری منجر به تخریب کیفیت اکولوژیکی ووهان شده است و جنگل‌کاری شهری باعث بهبود محیط‌زیست شده است.

Xu شاخص اکولوژیکی مبتنی بر سنجش از دور به‌طور جامع محیط زیست یک منطقه را ارزیابی می‌کند و شامل چهار زیرشاخص است که متغیرهای بیوفیزیکی، آب و هوایی و سطح زمین را در محاسبه در نظر می‌گیرد (Xu et al. 2017). مطالعات نشان داده است که شاخص RSEI یک شاخص موثر و مناسب در ارزیابی سریع محیط‌زیستی-اکولوژیکی یک منطقه است (Yue et al. 2012; Schwarz et al. 2019). به‌طور خاص، زیرشاخص‌های RSEI به‌ترتیب عبارتند از: شاخص اختلاف نرمال شده گیاهی (NDVI)، رطوبت (WET)، دمای سطح زمین (LST) و شاخص اختلاف خاک لخت نرمال شده (NDBI) است. شاخص مذکور برآوردی از مولفه‌های مختلف اکولوژیکی در محیط شهری است.

احیای اکولوژیکی، مدیریت و حفاظت از محیط زیست در دهه‌های اخیر کانون توجه جهانی و یک نگرانی جهانی است. تغییر سیمای سرزمین به دلیل تغییرات انسان در محیط از مواردی است که به تغییر در محیط زیست و کیفیت آن منجر می‌شود. در این راستا، لازم است ارزیابی جامعی از وضعیت محیط زیست و روند تغییر در کیفیت آن صورت گیرد. در تعیین شاخص کیفیت محیط زیست لازم است ابعاد مختلف محیط در قالب شاخص‌های مختلف در نظر گرفته شود. بر این اساس در پژوهش حاضر شاخص کیفیت اکولوژیکی استخراج و مورد استفاده قرار گرفته است. پایش تغییرات کاربری/پوشش زمین و تجزیه و تحلیل الگوی سیمای سرزمین و نیز فضاهای سبز شهری از عوامل موثر بر تعیین کیفیت محیط زیست شهری است. در خصوص ضرورت انجام پژوهش حاضر می‌توان گفت که تعیین کیفیت محیط زیست و تغییرات آن در طول زمان می‌تواند به مدیریت بهتر محیط زیست و عوامل موثر بر تغییرات اقدام نمود. هدف از این تحقیق بررسی کیفیت محیط زیست شهرستان کرج در طی دوره ده ساله (۲۰۲۰-۲۰۱۰) با استفاده از تکنیک سنجش از دور و شاخص کیفیت اکولوژیکی است.

مواد و روش‌ها

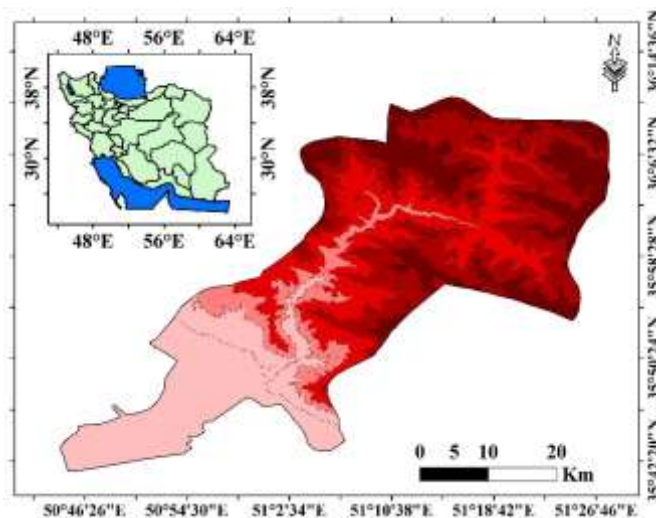
منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۸ دقیقه طول شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۱ دقیقه و ۳۶ درجه و ۱۰ دقیقه عرض شمالی در شمال غرب تهران واقع شده است. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. میانگین بارندگی سالیانه کرج حدود ۲۵۱ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه آن برابر ۱۴/۱ درجه سانتی‌گراد است.

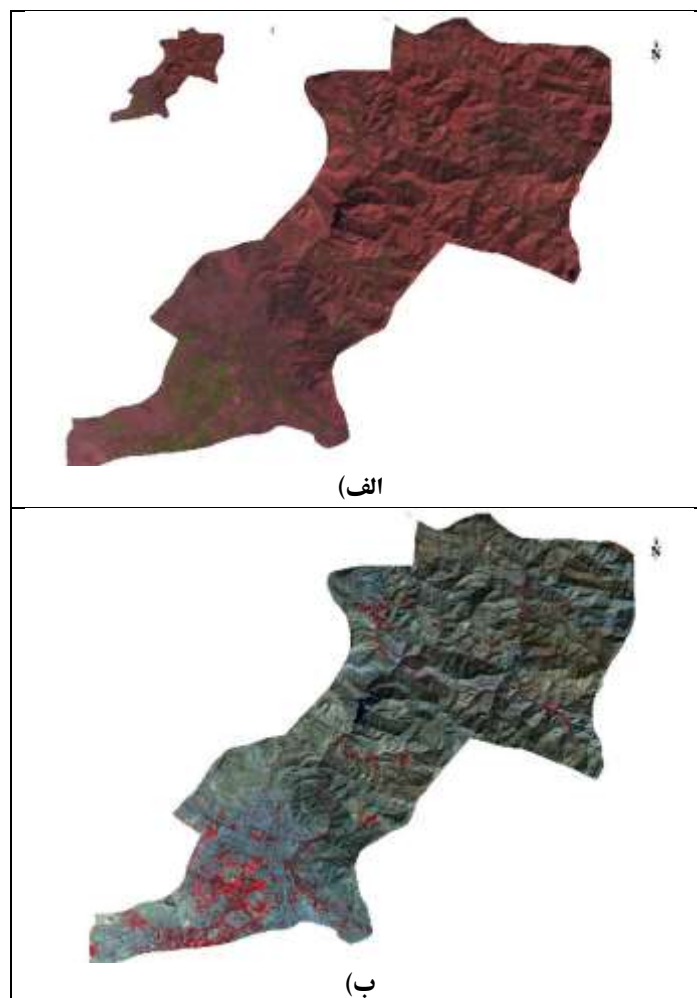
شهرستان کرج به دلیل موقعیت و نزدیکی آن به شهر تهران، دارای نرخ مهاجری پذیری بسیار بالایی است. در طی سال‌های اخیر و با مهاجرت از مناطق مختلف کشور به کرج، توسعه شهری باعث از بین رفتن و تخریب باغ‌های این محدوده شده است. برخی از این مناطق جهان‌شهر، مهرشهر و عظیمیه در گذشته دارای درختان انبوهی بوده و امروزه دارای فضای سبز بیش‌تری هستند. پارک و بوستان‌های متعدد کوچک و بزرگ است که در راستای احیای باغ‌شهر و هویت شهری توسط شهرداری احداث شده است. بر اساس نرخ بالای رشد جمعیت، دارای رشد جمعیت ۴/۷ درصد در میان کلان‌شهری ایران است. کرج دارای تعداد زیادی واحد تولیدی و صنعتی است که در مناطق مختلف شهر و یا عمدتاً در شهرک‌های صنعتی متمرکز شده‌اند (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵).

آماده سازی داده‌ها و محاسبه RSEI

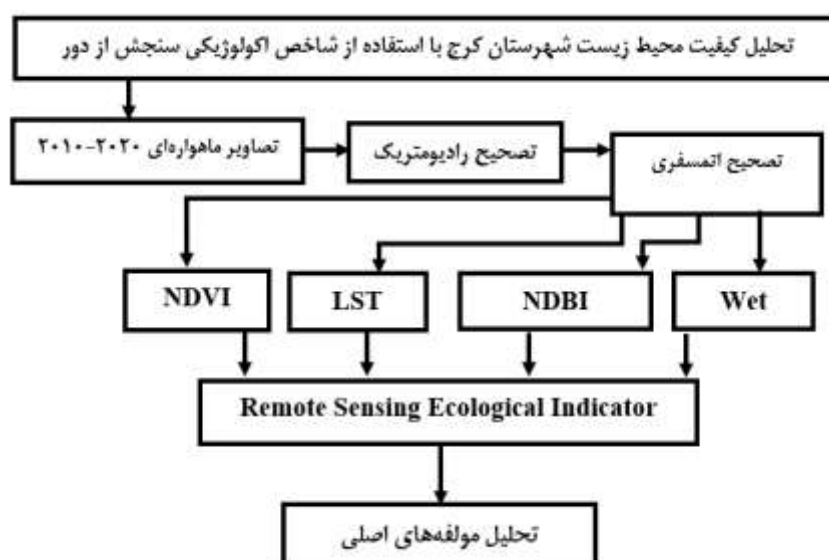
برای انجام پژوهش حاضر، داده‌های سنجش از دور، شامل تصاویر Landsat 5 TM در سپتامبر ۲۰۱۰، و تصاویر Landsat 8 OLI و TIRS در سپتامبر ۲۰۲۰ از وب‌سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) دانلود شد. تصاویر استفاده شده در ماه یکسان در دو دوره مورد مطالعه برای تجزیه و تحلیل انتخاب شده است که امکان مقایسه نتایج را فراهم خواهد نمود. تصحیح رادیومتری تصاویر در نرم‌افزار ENVI 5.1 انجام شد. هم‌چنین مقدار خاکستری تصویر به بازتاب سنسور تبدیل شد و تصحیح اتمسفری در خصوص باندهای مرئی و فروسرخ نزدیک هر فاز توسط روش FLAASH انجام شد (عبدالله و همکاران، ۲۰۱۱؛ آقایی و همکاران، ۱۳۹۸). در نهایت تصاویر بر اساس مرز شهرستان کرج برش داده شد (شکل ۲ الف و ب). مراحل انجام پژوهش در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران



شکل (۲): تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در سال‌های الف) ۲۰۱۰ و ب) ۲۰۲۰ مربوط به منطقه مورد مطالعه



شکل (۳): مراحل انجام پژوهش و محاسبه شاخص کیفیت محیط زیست (RSEI)

محاسبه شاخص RSEI

شاخص RSEI تابع چهار شاخص (سبزی‌نگی، رطوبت، خشکی و دما) است که می‌تواند به‌طور کامل از داده‌های سنجش از دور استخراج شود (Xu et al. 2018; Meng et al. 2016; Atkinson et al. 2015). شاخص NDVI سبزی بودن و معرف پوشش گیاهی و برای نشان دادن وضعیت پوشش گیاهی محیط به کار می‌رود. Wet نشان‌دهنده رطوبت در محیط‌های آبی و LST نشان‌دهنده شاخص دما است که به‌عنوان شاخص تغییرات آب و هوای محلی در پاسخ به تغییرات محیطی در مدل RSEI انتخاب شده است. جزء NDBI نشانگر خشکی است که برای نشان دادن فشارهای ناشی از فعالیت‌های انسانی بر محیط به کار می‌رود. به این ترتیب، شاخص اکولوژیکی مبتنی بر سنجش از دور (RSEI) به‌عنوان تابعی از چهار شاخص فوق‌الذکر به‌صورت رابطه ۱، تعریف می‌شود.

$$RSEI = 1 - PC1[f(NDVI, Wet, LST, NDBSI)] \quad (1)$$

الف) پوشش گیاهی

شاخص NDVI به‌طور گسترده برای نشان دادن وضعیت رشد و انبوهی پوشش گیاهی استفاده می‌شود (Pettorelli et al. 2005)، که به‌صورت رابطه ۲ بیان می‌شود:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (2)$$

که در آن، ρ_{nir} و ρ_{red} به ترتیب نشان دهنده بازتاب نوارهای مادون قرمز نزدیک و قرمز هستند.

ب) رطوبت سطح زمین

تبدیل Kauth-Thomas (تبدیل K-T) می‌تواند سه جزء رطوبت، سبزی‌نگی و روشنایی ایجاد می‌کند، که به‌طور گسترده در ارزیابی وضعیت اکولوژیکی محیط‌زیست مورد استفاده قرار گرفته است. محتوای آب خاک و پوشش گیاهی را می‌توان با مؤلفه رطوبتی منعکس کرد (Hengliang et al. 2017). مؤلفه رطوبتی در سنجنده TM (Crist et al. 1985) و OLI (Baig et al. 2014) را می‌توان با روابط ۳ و ۴ محاسبه نمود.

$$WetTM = 0.0315\rho_{bule} + 0.2021\rho_{green} + 0.3102\rho_{red} + .1594\rho_{nir} - 0.6806\rho_{swir1} - 0.6109\rho_{swir2} \quad (3)$$

$$WetOLI = 0.1511\rho_{blue} + 0.1973\rho_{green} + 0.3283\rho_{red} + 0.3407\rho_{nir} - 0.7117\rho_{swir1} - 0.4559\rho_{swir2} \quad (4)$$

که در آن، ρ_{bule} ، ρ_{green} ، ρ_{swir1} و ρ_{swir2} به ترتیب بازتاب باند آبی، باند سبز، باند مادون قرمز موج کوتاه ۱ و باند ۲ هستند.

ج) دمای سطح زمین

دمای سطح زمین (LST) به‌صورت زیر محاسبه شد (Bertolo et al. 2012; Dadash poor et al. 2019)، (رابطه ۵):

$$LST = \frac{T}{[1 + (\lambda \times T_{sensor} / \rho) \ln \varepsilon]} \quad (5)$$

که در آن، λ طول موج تابش ساطع شده است (۱۱/۴۳۵ um برای Landsat 5/7 و ۱۰/۹ um برای باند ۱۰ Landsat 8). ρ یک ثابت است. ε تابش سطح زمین است که می‌توان آن را به‌صورت رابطه ۶، بیان کرد:

$$\varepsilon = \begin{cases} 0.995 & NDVI \leq 0 \\ 0.970 & 0 < NDVI \leq 0.157 \\ 1.0094 + 0.047 \ln NDVI & 0.157 < NDVI \leq 0.727 \\ 0.986 & NDVI > 0.727 \end{cases} \quad (6)$$

در رابطه فوق، T_{sensor} دمای روشنایی در ماهواره بر حسب کلونین است و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (رابطه ۷ و ۸).

$$T_{sensor} = \frac{K_2}{\ln(k_1/L_\lambda + 1)} \quad (7)$$

$$L\lambda = Gain \times DN + Bias \quad (8)$$

که در آن، $L\lambda$ تابش طیفی در حس گر است. Gain و Bias به ترتیب عامل مقیاس گذاری مجدد ضربی مخصوص باند موردنظر، و تغییر مقیاس افزودنی مخصوص باند موردنظر هستند، که در فایل اصلی تصویر مورد استفاده موجود است. DN عدد دیجیتال یک پیکسل معین را نشان می دهد. K1 و K2 ضرایب واسنجی برای باند حرارتی سنجنده TM/ETM+/OLI هستند.

د) شاخص تفاوت مناطق انسان ساز نرمال شده

NDBI در رابطه ۹، شاخص اختلاف مناطق ساخته شده نرمال شده است که برای استخراج مساحت محدوده های انسان ساز استفاده می شود، ابتدا برای داده های TM توسط (Gao et al. 2003) ارائه و به کار گرفته شد.

$$NDBI = \frac{SWIR1 - NIR}{SWIR1 + NIR} \quad (9)$$

ه) تجزیه و تحلیل اجزای مولفه های اصلی

تحلیل مولفه های اصلی (PCA) در نرم افزار Geoda انجام شد که برای تحلیل داده های مکانی توسعه داده شده و برای تسهیل بینش های جدید از تجزیه و تحلیل داده ها با کاوش و مدل سازی الگوهای فضایی طراحی شده است (<https://geodacenter.github.io>). این برنامه یک رابط کاربر پسند و گرافیکی برای روش های تحلیل داده های فضایی اکتشافی مانند آماره های خودهمبستگی مکانی برای داده های انبوه و تجزیه و تحلیل رگرسیون فضایی پایه برای داده های نقطه ای و چندضلعی فراهم می کند. در این نرم افزار بعد از فراخوانی نقشه تهیه شده شاخص RSEI در منوی Clusters با استفاده از ابزار PCA به تجزیه و تحلیل مولفه های اصلی پرداخته شد. تحلیل مولفه های اصلی می تواند وزن هر عامل را با توجه به مقدار بار هر عامل نسبت به اجزای اصلی تخصیص دهد. اما از آنجایی که واحدها و محدوده داده های شاخص ها متفاوت است، باید قبل از انجام PCA، مقدار چهار شاخص را بین ۰ و ۱ نرمال شوند. برای ادغام چهار شاخص، یعنی LST، Wet، NDBI، NDVI و اولین جزء PCA (PC1) مشخص که معمولاً بیش از ۸۰ درصد از ویژگی های مجموعه داده را تفسیر می کند، برای نشان دادن اهمیت هر کدام از زیرشاخص ها در شاخص RSEI استفاده می شود.

نتایج

شاخص RSEI یک معیار مکانی-پیوسته از کیفیت اکولوژیکی است که با محاسبه و امتیازدهی مقادیر مولفه های اصلی آن از چهار شاخص LST، NDVI، Wet، NDBI با توجه به ویژگی های آن ها شکل می گیرد. در جدول ۱ نتایج تحلیل مولفه های اصلی برای شاخص اکولوژیکی مبتنی بر سنجش از دور (RSEI) تصویر لندست ۵ برای سال ۲۰۱۰ ارائه شده است.

جدول (۱): تحلیل مؤلفه های اصلی چهار شاخص سنجش از دور برای تصویر سال ۲۰۱۰

مؤلفه	PC1	PC2	PC3	PC4
LST	-۰/۲۸۹۹۰۷	۰/۶۷۱۰۴۷	۰/۶۷۶۹۴۳	۰/۰۸۶۰۱۲۶
NDBI	-۰/۴۲۵۶۳۲	-۰/۶۲۵۷۰۶	۰/۳۶۹۴۵۳	۰/۵۳۹۲۹
WET	۰/۶۵۹۹۳۳	۰/۱۸۳۶۷۴	۰/۰۷۹۸۶۲	۰/۷۲۸۴۸۴
NDVI	۰/۵۴۷۰۶۵	-۰/۳۵۲۷۷۷	۰/۶۳۶۵۴۵	-۰/۴۱۳۶۱۸
Eigenvalue	۱/۵۳۴۷۹	۱/۱۷۳۲۴	۰/۷۳۹۸۴	۰/۵۵۰۵۱۷

همان‌طور که در جدول یک مشاهده می‌شود مولفه اول دارای بیش‌ترین مقدار ویژه در بین چهار مؤلفه اصلی است. مولفه اول به خوبی می‌تواند چهار متغیر شاخص را نشان دهد زیرا بیش‌تر اطلاعات مربوط به چهار شاخص را در مقایسه با سه جزء دیگر به خود اختصاص داده است. همان‌طور که مقادیر مولفه اول در جدول ۱ نشان داده شده است، مقادیر شاخص‌های Wet و NDVI مثبت هستند، که نشان از تأثیر مثبت در کیفیت محیط زیستی محدوده مورد مطالعه دارند و شاخص‌های LST و NDBI در همان مولفه منفی هستند، که نشان از تأثیر منفی آن‌ها بر کیفیت محیط زیست است. بنابراین، چهار زیرمعیار مربوط به مولفه اول را می‌توان با توجه به علائم آن‌ها در تصویر ۲۰۱۰ به دو گروه، Wetness و NDVI در یک گروه و LST و NDBI در گروه دیگر تقسیم کرد. این دو گروه دارای تأثیر متفاوت و متضاد بر کیفیت اکولوژیکی محدوده شهری هستند. در مقابل، اطلاعات ارائه شده در سایر مولفه‌های دوم، سوم و چهارم و علائم مربوط به زیرشاخص‌های مربوط به شاخص RESI به‌طور منطقی دسته‌بندی نشده‌اند. هم‌چنین در جدول ۲ نتایج تحلیل مولفه‌های اصلی مربوط به تصویر لندست ۸ سال ۲۰۲۰ نشان داده شده است.

جدول (۲): تحلیل مؤلفه‌های اصلی چهار شاخص سنجش از دور برای تصویر سال ۲۰۲۰

مؤلفه شاخص	PC1	PC2	PC3	PC4
LST	-۰/۲۶۳۲۸	-۰/۵۰۱۹۲۷	-۰/۸۲۲۹۴۲	۰/۰۳۸۹۷۵۶
NDBI	-۰/۶۷۱۲۱۷	-۰/۲۱۵۵۸۷	۰/۳۷۴۷۴۷	۰/۶۰۲۱۲۶
WET	-۰/۰۸۴۴۲۷۰۵	۰/۷۷۹۳۰۵	-۰/۴۲۶۹۹۹	۰/۴۵۰۸۳۸
NDVI	۰/۶۸۷۷۸۶	-۰/۳۰۷۰۴۴	-۰/۷۶۱۵۴	۰/۶۵۷۷۷۷
Eigenvalue	۱/۵۶۸۳۴	۱/۲۶۷۵۶	۰/۸۴۳۶۰۳	۰/۳۲۰۱۵۸

بر اساس اطلاعات ارائه شده تحلیل مولفه‌های اصلی مربوط به سال ۲۰۲۰ در جدول ۲ و نتایج مربوط به مولفه اول می‌توان گفت که سه زیرشاخص LST، NDVI و WET دارای علامت منفی و شاخص NDVI دارای علامت مثبت است. می‌توان گفت که دو شاخص LST و NDBI برای هر دو سال در یک گروه قرار دارند و بر اساس کیفیت اکولوژیکی تأثیر منفی بر محیط زیست محدوده مورد مطالعه داشته‌اند. علاوه بر این، علائم مربوط به چهار زیرشاخص در مولفه‌های دوم سوم و چهارم (PC2، PC3 و PC4) بین تصاویر ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ با یکدیگر تفاوت دارند. مقدار شاخص اکولوژیکی مبتنی بر سنجش از دور (RSEI) نه تنها در امتیاز نهایی برای یک منطقه خاص بلکه در تفسیر امتیازهای منفرد به خوبی خصوصیات مکانی مختص شرایط اکولوژیکی را ارائه می‌دهد. چهار زیرشاخص RSEI برای ارائه یک ارزیابی کمی از پاسخ به عوامل تنش‌زای اکولوژیکی به‌طور هماهنگ به کار می‌رود و نسبت به معیارهای جداگانه، اطلاعات بیش‌تری در قالب RSEI ارائه می‌کند.

مقادیر شاخص اکولوژیکی مبتنی بر سنجش از دور در دوره مورد مطالعه شهرستان کرج در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به رابطه مورد استفاده و اشاره شده در بخش روش پژوهش (رابطه ۱)، مقدار شاخص اکولوژیکی مبتنی بر سنجش از دور برای سال ۲۰۱۰ در شهرستان کرج برابر ۰/۵۹ بوده است که با گذشت زمان در سال ۲۰۲۰ به مقدار ۰/۲۵ کاهش یافته است.

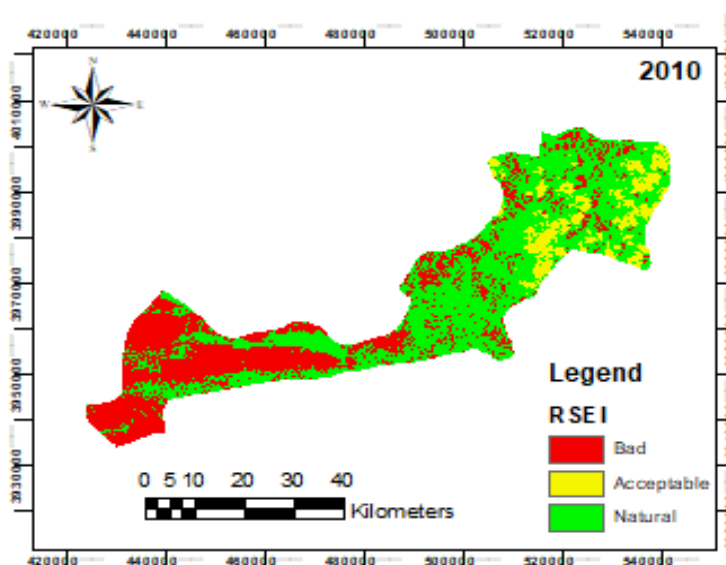
جدول (۳): مقادیر شاخص اکولوژیکی مبتنی بر سنجش از دور در دوره مورد مطالعه شهرستان کرج

سال	مقدار شاخص RSEI
۲۰۱۰	۰/۵۹
۲۰۲۰	۰/۲۵

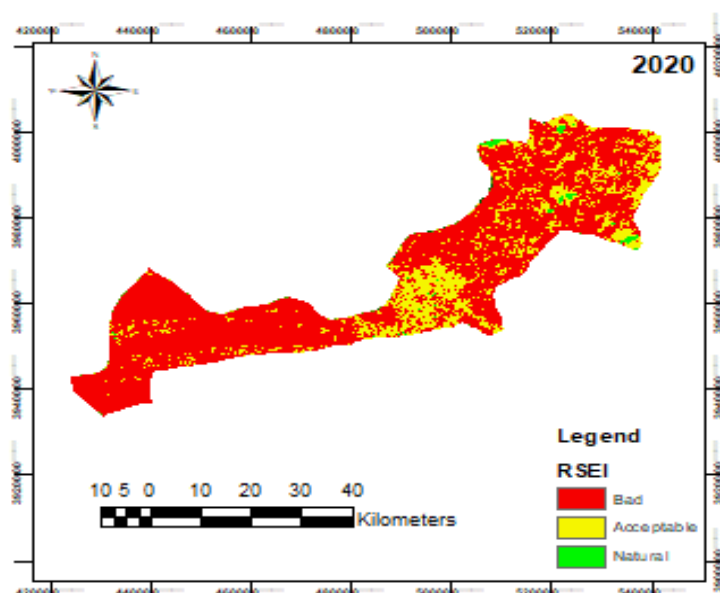
در شکل‌های ۴ و ۵، توزیع مکانی شاخص اکولوژیکی مبتنی بر سنجش از دور به ترتیب در سال ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ نشان داده شده است.

میانگین مقادیر RSEI در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ به ترتیب ۰/۵۹ و ۰/۲۵ محاسبه شد. به طور کلی کیفیت محیط زیست کرج از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ به شدت کاهش پیدا کرده است. به طور مشخص می‌توان دریافت که در سال ۲۰۱۰ قسمت شمالی کرج از محیط زیست محیطی بهتری نسبت به شمال غربی، مرکزی و جنوب شرقی برخوردار بوده است که در سال ۲۰۲۰ نیز این قسمت نیز تخریب و دچار افت کیفیت شده است. دلیل این تخریب را می‌توان با توسعه مناطق مسکونی و مهاجرت مردم از شهرهای دیگر به این شهرستان برای سکونت و یافتن شغل مرتبط دانست. بر اساس تصاویر ماهواره‌ای سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ در شهرستان کرج مناطق مسکونی وسعت قابل توجهی پیدا نموده است. در همین راستا، داده‌های مرکز آمار ایران نیز نشان می‌دهد که تراکم جمعیت در این دوره رو به افزایش بوده و این امر منجر به افزایش بیش‌تر فعالیت‌های انسانی، تغییر کاربری اراضی و افزایش سطوح بدون پوشش در منطقه شده است.

به عبارتی عوامل مذکور باعث کاهش قابل توجه سهم زیرشاخص‌های NDVI و Wetness و افزایش سهم زیرشاخص‌های NDSI و LST در سال ۲۰۲۰ نسبت به سال ۲۰۱۰ شده است.



شکل (۴): توزیع مکانی شاخص اکولوژیکی مبتنی بر سنجش از دور (RSEI) در شهرستان کرج سال ۲۰۱۰



شکل (۵): توزیع مکانی شاخص اکولوژیکی مبتنی بر سنجش از دور (RSEI) در شهرستان کرج سال ۲۰۲۰

در جدول ۴ مقادیر درصد مساحت طبقات مختلف شاخص اکولوژیکی مبتنی بر سنجش از دور RSEI نشان داده شده است.

جدول (۴): مقادیر و درصد طبقات مختلف شاخص اکولوژیکی مبتنی بر سنجش از دور در دوره‌های مورد مطالعه

سال		طبقه		
۲۰۲۰		۲۰۱۰		
درصد	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد	مساحت (کیلومتر مربع)	
۳۸/۶۱	۸۷۰/۷۱	۳۵/۱۷	۷۹۱/۷۳	نامناسب
۵۴/۱۸	۱۲۲۱/۹۲	۹/۲۰	۲۰۸/۸۳	قابل قبول
۷/۲۱	۱۶۲/۶۰	۵۵/۶۳	۱۲۵۴/۷۱	طبیعی

بر اساس نتایج می‌توان گفت که در منطقه مورد مطالعه طبقات کیفی بد و قابل قبول در طول سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ افزایش یافته است و نیز مساحت طبقه طبیعی در دوره مورد مطالعه کاهش یافته است. بر اساس نتایج می‌توان گفت که کیفیت محیط زیست محدوده مورد مطالعه (شهرستان کرج) دستخوش تغییرات قابل توجهی شده است. به‌طور خاص، بزرگ‌ترین تغییر را می‌توان در طبقه طبیعی مشاهده کرد که از مقدار آن از ۵۵/۶۳ درصد در سال ۲۰۱۰ به ۷/۲۱ درصد در سال ۲۰۲۰ کاهش یافته است. به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد که باید اقدامات بیش‌تری در راستای برنامه‌ریزی به‌منظور توسعه هماهنگ میان افزایش مناطق مسکونی و حفظ کیفیت محیط زیست طبیعی انجام شود. قابل ذکر است که در پژوهش حاضر دمای سطح زمین به‌عنوان یک عامل در ارزیابی کیفیت محیط زیست استفاده شد که در پژوهش Schwarz و همکاران (۲۰۱۲) نیز از دمای هوا و دمای سطح زمین (LST) برای تعیین مقدار کمی جزایر حرارتی شهری در شهر لایپزیگ آلمان شده است. در همین راستا، Sean و همکاران (۲۰۰۵) نیز با ترکیب مولفه‌های روشنایی، سبزی و رطوبت به احتمال اختلال در پوشش جنگلی پی بردند. هم‌چنین، Hu و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از شاخص اکولوژیکی مبتنی بر سنجش از دور بهبود یافته (RSEI) پیش‌بینی نمودند که مناطق غیرقابل نفوذ تأثیر قابل توجهی بر شرایط اکولوژیکی منطقه‌ای دارد. هم‌چنین نتایج Xu و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که RSEI می‌تواند به‌طور موثر کیفیت اکولوژیکی منطقه‌ای را در سال‌های متوالی نشان دهد که نتایج پژوهش حاضر نیز در راستای نتایج ایشان برای ارزیابی وضعیت اکولوژیکی محیط زیست استفاده شده است. علاوه بر این، Wang و همکاران (۲۰۲۲) نیز از شاخص RSEI برای ارزیابی

تغییرات پویایی و تفاوت‌های مکانی و زمانی اکولوژیکی-محیط زیستی مورد استفاده قرار گرفت و به این نتیجه رسیدند که امکان شاخص مورد نظر می‌تواند در ارزیابی وضعیت اکولوژیک اطلاعات مناسبی در اختیار مدیران قرار دهد. در خصوص تغییرات شاخص کیفیت محیط زیست در پژوهش حاضر، نتایج نشان داد که در دو سال مورد مطالعه کیفیت اکولوژیک منطقه مورد بررسی کاهش یافته است که با یافته‌های Yu و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت دارد. قابل ذکر است که ایشان با تعیین کیفیت زیست‌پذیری اکولوژیکی (ELQ) در منطقه مرکزی شهر ووهان از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ نتیجه گرفتند که زیست‌پذیری اکولوژیکی در فصل‌های بهار و پاییز و در نزدیکی رودخانه‌ها و دریاچه‌ها بهتر بوده است، در حالی که گسترش شهری منجر به تخریب کیفیت اکولوژیکی ووهان شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

توسعه شهری و تغییرات الگوی کاربری زمین به شدت بر خدمت اکوسیستمی ترسیب و ذخیره کربن اثر می‌گذارد. برای تلفیق مفهوم این خدمت تنظیم اقلیمی در مباحث کاربری اراضی، کسب اطلاعات کاربردی از توزیع مکانی آن ضروری است، تا بتوان با کمک پهنه‌بندی و کمی‌سازی، محل‌های حفاظت و توسعه را با استمرار تدارک این خدمت توسط اکوسیستم انتخاب نمود (جهاننداری و همکاران، ۱۴۰۱). در پژوهش حاضر کیفیت محیط زیست شهرستان کرج در طی دوره ده ساله (۲۰۱۰-۲۰۲۰) با استفاده از تکنیک سنجش از دور و شاخص کیفیت اکولوژیک بررسی شده است. کاربرد شاخص اکولوژیکی سنجش از دور در شهرستان کرج نشان می‌دهد که RSEI نسبت به تغییرات شرایط اکولوژیکی حساس بوده و استفاده از آن برای توصیف کیفیت محیط زیست این شهرستان می‌تواند مفید واقع شود. با توجه به این که شرایط اکولوژیکی در مناطق مختلف طبقه‌بندی شده است، لذا این ارزیابی می‌تواند در مناطق جغرافیایی گسترده اعمال شود. علاوه بر این، RSEI می‌تواند برای پیش‌بینی تغییرات اکولوژیکی منطقه‌ای نیز استفاده شود. در این مطالعه برای بررسی کیفیت محیط زیستی شهرستان کرج در طول دهه اخیر از تحلیل مولفه‌های اصلی استفاده شد. با توجه به شاخص‌های موجود در این تحلیل مشخص شد که دو گروه از شاخص‌ها متضاد هم عمل می‌کنند به‌طوری که شاخص‌های سبز و رطوبت با کیفیت محیط زیست رابطه مستقیم داشته و در بهبود کیفیت محیط زیست تأثیر مثبت دارند و شاخص‌های گرما و انسان ساخت عکس عمل کرده و هر چه این دو مقادیر بالاتری داشته باشند کیفیت محیط زیست تضعیف می‌شود. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۴، در سال ۲۰۱۰ محیط زیست شهرستان کرج وضعیت بهتری نسبت به سال ۲۰۲۰ داشته است و این به دلیل وجود شاخص‌های رطوبت و سبز بیشتر در این شهرستان بوده است. در سال ۲۰۱۰، طبقه طبیعی، بخش‌های شمالی و شرقی شهر کرج را به خود اختصاص داد، زیرا در این سال شهر کرج از استان تهران جدا شده و به شهر مستقلی تبدیل شده بود. شهری که در آن زمان تغییر کاربری اراضی در منطقه کم بود و جمعیت تراکم زیادی نداشته است، اما به تدریج شهر توسعه یافته و تراکم جمعیت بیش‌تر شده و از مساحت محیط طبیعی کاسته و به مساحت طبقه ضعیف اضافه شده و در نهایت کیفیت محیط زیست تضعیف شده است. این مقاله رویکردی را نشان می‌دهد که در آن چگونه یک شاخص اکولوژیکی سنجش از دور (RSEI)، می‌تواند به‌طور مستقیم برای توصیف اکولوژیکی منطقه‌ای مورد استفاده قرار گیرد. این مطالعه نشان داد که محیط زیست شهرستان کرج در ده سال گذشته تخریب شده است و مقدار RSEI از ۰/۵۹ در سال ۲۰۱۰ به ۰/۲۵ در سال ۲۰۲۰ کاهش یافته است. در مجموع می‌توان گفت که کیفیت محیط زیست منطقه مورد مطالعه در طول زمان کاهش یافته است که می‌تواند بر کیفیت خدمات محیطی تأثیر منفی بگذارد. با توجه به بحران‌های اخیر مانند تغییر اقلیم، خشکسالی و بحران آب و با توجه به مهاجرت بیش‌تر مردم استان‌های دیگر به شهرستان کرج به دلیل مجاورت آن با کلان‌شهر تهران، انتظار تشدید روند کاهشی کیفیت

محیط زیست این شهرستان در آینده وجود خواهد داشت. شاخص اکولوژیکی سنجش از دور می‌تواند به طور عینی تفاوت در پویایی مکانی و زمانی محیط زیست را منعکس کند، لذا پیشنهاد می‌شود نتایج حاصل از تغییرات شاخص مذکور در برنامه‌ریزی برای بهبود شرایط محیطی و کیفیت محیط زیست مدنظر قرار گیرد. در راستای نتایج پژوهش حاضر پیشنهاد می‌شود که تاثیر عواملی که در طول زمان دچار تغییر جدی خواهند شد، بر کیفیت محیط زیست در قالب سناریوهای مختلف بررسی و وضعیت کیفیت محیط زیست در آینده پیش‌بینی شود. هم‌چنین می‌توان پیشنهاد نمود که تاثیر شیوه‌های مختلف احیای طبیعت و نیز راهکارهای بهبود پوشش گیاهی و توسعه فضای سبز شهری بر شاخص کیفیت محیط زیست مورد ارزیابی قرار گیرد. در همین راستا، لازم است که برنامه بهبود سرانه فضای سبز و نیز گسترش محدوده‌های فضای سبز در برنامه‌ریزی‌های شهری بیش‌تر مورد توجه قرار گیرد. قابل ذکر است که بهبود کیفیت محیط زیست می‌تواند به بهبود محیط زیست طبیعی و در نهایت سلامت شهروندان کمک نماید.

منابع

۱. آقائی، مریم؛ خاوریان، حسن؛ مصطفی‌زاده، رئوف (۱۳۹۹). پیش‌بینی و آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل CA مارکوف و LCM در آبخیز کوزه‌تپراقی استان اردبیل. *پژوهش‌های آبخیزداری*. ۳۳ (۳)، ۹۱-۱۰۷.
۲. جهاننداری، جاوید و دیگران (۱۴۰۱). اثرات توسعه شهری بر الگوهای مکانی، زمانی خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن در حوزه آبخیز بندرعباس با نرم‌افزار InVEST. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*. ۲ (۴)، ۹۱-۱۰۶.
3. Abdullah, S.A. & Reza, M.I.H. (2011). Regional index of ecological integrity: A need for sustainable management of natural resources. *Ecological Indicators*. 11 (2), 220-229.
4. Baig, M.H.A. et al (2014). Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing, Letters*. 5, 423-431. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.915434>
5. Brehaut, L. & Danby, R.K. (2018). Inconsistent relationships between annual tree ring-widths and satellite-measured NDVI in a mountainous subarctic environment. *Ecological Indicators*. 91, 698-711.
6. Chakraborty, T. & Lee, X. (2019). A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat island on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*. 74, 269-280.
- Coutts, A.M. et al (2016). Thermal infrared remote sensing of urban heat: Hotspots, vegetation, and an assessment of techniques for use in urban planning. *Remote Sensing*. 186, 637-651.
7. Crist, E. P. (1985). A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data. *Remote Sensing of Environment*. 17 (3), 301-306.
8. Dearing, J.A., De; Araujo Barbosa, C.C. & Atkinson, P.M. (2015). Remote sensing of ecosystem services: A systematic review. *Ecological Indicators*. 52, 430-443.
9. Ellis, E.C. et al (2006). Measuring long-term Ecological changes in densely populated landscapes using current and historical high-resolution imagery. *Remote Sensing of Environment*. 100 (4). 457-469.
10. Fan C. & Myint, S. (2014). A comparison of spatial autocorrelation indices and landscape metrics in measuring urban landscape fragmentation. *Landscape Urban Planning*. 121, 117-128.
11. Guo, H.L. et al (2017). Ecological environment assessment based on remote sensing in Zhengzhou. *J in Proc. Int. Conf. Energy Environment Mater Science Singapore*. 14 (23), 15771. <https://doi.org/10.3390/su142315771>
12. Gillanders, N. S. et al (2008). Multi temporal remote sensing of landscape dynamics and pattern change: Describing natural and anthropogenic trends. *Prog. Phys. Geography, Earth Environment*. 32 (5), 503-528.
13. Hengliang, G. et al (2017). Ecological environment assessment based on Remote Sensing in Zhengzhou. *Earth and Environment Science*. 94, 012190.
14. Hu, X. & Xu, H. (2018). A new remote sensing index for assessing the spatial heterogeneity in urban ecological quality: A case from Fuzhou City, China. *Ecological Indicators*. 89, 11-21.
15. Hao, R. et al (2017). Impacts of changes in climate and landscape pattern on ecosystem services. *Science Total Environment*. 579, 718-728.
16. Kang, H. et al (2018). A feasible method for the division of Ecological vulnerability and its driving forces in southern Shaanxi. *Cleaner Production*. 205, 619-628.

17. Kurda, K. P. (2022). The urban ecosystem services index as a new indicator for sustainable urban planning and human well-being in cities. *Ecological Indicators*. 144, 109532.
18. Karimi Firozjaei, m. et al (2020). Remotely sensed urban surface ecological index (RSUSEI): An analytical framework for assessing the surface ecological status in urban environments. *Remote Sensing*. 12 (12), 2029. <https://doi.org/10.3390/rs12122029>.
19. Meng, Q. et al (2018). Characterizing spatial and temporal trends of surface urban heat island effect in an urban mainbuilt-uparea: A12-year case study in Beijing, China. *Remote Sensing of Environment*. 204, 826–837.
20. Marzban, F.; Sodoudi, S. & Preusker R. (2018). The influence of land-cover type on the relationship between NDVI-LST and LST-Tair. *Remote Sensing*. 39 (5), 1377–1398.
21. Nichol, J. (2009). An emissivity modulation method for spatial enhancement of thermal satellite images in urban heat island analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 5 (10), 547–556.
22. Ochoa-Gaona, S. et al (2010). A multi-criterion index for the evaluation of local tropical forest conditions in Mexico. *Forest Ecology and Management*. 260 (5), 618–627.
23. Pettorelli, N. et al (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution*. 20 (9), 503-510.
24. Sean, P., Healey et al(2005). Comparison of tasseled cap-based landsat data structures for use in forest disturbance detection. *Remote Sensing of Environment*. 97 (3). 301-310.
25. Sekertekin, A.; Abdikan, S. & Marangoz, A.M. (2018). The acquisition of impervious surface area from Landsat 8 satellite sensor data using urban indices: A comparative analysis. *Environment. Monitoring and Assessment*. 190 (7), 381-392.
26. Sandholt, I.; Rasmussen, K. & Andersen, J. (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*. 79 (2), 213–224.
27. Schwarz, N. et al (2012). Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators an application for the city of Leipzig (Germany). *Ecological Indicators*. 18, 693–704.
28. Tiner, R.W. (2004). Remotely-sensed indicators for monitoring the general condition of “natural habitat” in watersheds: an application for Delaware’s Nanticoke River watershed. *Ecological Indicators*. 4, 227-243.
29. Tang, D. et al (2015). Integrated ecosystem health assessment based on ecoexergy theory: A case study of the Jiangsu coastal area. *Ecological Indicators*. 48, 107–119.
30. Xu, H.Q. (2013). A remote sensing urban ecological index and its application. *Acta Ecological Sinence*. 33, 7853-7862.
31. Xu, H.Q. et al (2017). Development of a fine-scale discomfort index map and its application in measuring living environments using remotely sensed thermal infrared imagery. *Energy Build*. 150, 598–607.
32. Xu, H. & Hu, X. (2019). A new remote sensing index based on the pressurestate-response framework to assess regional ecological change. *Environment Science Pollution Research*. 26 (6), 5381–5393.
33. Xu, H. (2008). A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. *Remote Sensing*. 29 (14), 4269–4276.
34. Xu, H. et al (2018). Prediction of ecological effects of potential population and impervious surface increases using a remote sensing based ecological index (RSEI). *Ecological Indicators*. 93, 730–740.
35. Willis, K.S. (2015). Remote sensing change detection for ecological monitoring in United States protected areas. *Biological Conservation*. 182, 233–242.
36. Williams, M., et al (2009). Development and evaluation of a spatially-explicit index of Chesapeake Bay health. *Mar. Pollut Bull*. 59, 14–25.
36. White, D.C. et al (2016). A generalizable NDVI-based wetland delineation indicator for remote monitoring of groundwater flows in the Australian Great Artesian Basin. *Ecological Indicators*. 60, 1309–1320.
37. Wang, M. Y. & Xu, H. O. (2018). Temporal and spatial changes of urban impervious surface and its influence on urban ecological quality: A comparison between Shanghai and New York Applied Ecology. *The Journal of Applied Ecology*. 29 (11), 3735–3746.
38. Wang, H. et al (2022). A remote-sensing ecological index approach for restoration assessment of rare-earth elements mining. *Computational Intelligence and Neuroscience*. <https://doi.org/10.1155/2022/5335419>.
39. Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *Photogrammetry and Remote Sensing*. 64 (4), 335–344.

40. Yu, J. et al (2022). A remote sensing assessment index for urban ecological livability and its application. *Geo-Spatial Information Science*. 27 (2), 289-310.
41. Zhou, D. et al (2014). Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers. *Remote Sensing of Environment*. 152, 51-61.