

ORIGINAL ARTICLE**Ecological Footprint Index and Assessment of Biotic Sustainability in the Development of the Tehran-Alborz Metropolitan Area**Parvaneh Sobhani¹, Afshin Danehkar²

1. Assistant Professor, Department of Environmental Science, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2. Professor, Department of Environmental Science, University of Tehran, Karaj, Iran

Correspondence
Afshin Danehkar
Email: danehkar@ut.ac.ir

Received: 03/Feb/2025
Accepted: 20/Feb/2025

How to cite

Sobhani, P.; Danehkar, A. (2024). Ecological Footprint Index and Assessment of Biotic Sustainability in the Development of the Tehran-Alborz Metropolitan Area, Physical Social Planning, 9 (4), 36, 69-86 (DOI: [10.30473/psp.2025.73644.2761](https://doi.org/10.30473/psp.2025.73644.2761))

ABSTRACT

Cities, as the most consuming ecosystems globally, are responsible for a significant portion of environmental problems. To achieve sustainable development, it is essential to examine the ecological conditions governing these areas. Accordingly, the present study investigated the trend of land cover/use changes during the years 2008-2023, as well as the prediction and modeling of these changes using the Markov chain model and cellular automata (CA-Markov) for the year 2041. Subsequently, the ecological footprint, biocapacity, and ecological deficit/surplus were calculated, and the performance and ecological balance in this region were examined. Finally, ecological pressure and sustainability were also assessed. According to the results, during the years 2008-2023, the most significant decreasing trend was related to sparse rangelands with an area of -1220.7 square kilometers, while the most significant increasing changes were allocated to semi-dense rangelands with an area of 1221.2 square kilometers. In the Tehran-Alborz metropolitan area during the studied years, nearly 2905.2 square kilometers of land cover/use classes showed a decreasing trend, which constitutes 15.41% of the total area of the region. The most significant decreasing trend in 2041 is also related to sparse rangelands with an area of 2661 square kilometers, while the most significant increasing trend is related to semi-dense rangelands with an area of 4548 square kilometers. This trend indicates the rapid pace of urbanization and the transformation of land cover/use classes in this metropolitan area. The investigation of performance and equivalence between land cover/use classes in the region showed that equivalence factors are relatively stable, while performance factors fluctuate significantly. Furthermore, the results indicated that the ecological footprint in the Tehran-Alborz metropolitan area (2008-2041) has an increasing trend, while biocapacity and ecological surplus have a decreasing trend. The ecological footprint index and ecological depth also show an increasing trend, indicating an increase in ecological pressure and a decrease in ecological sustainability during the studied years. Therefore, the realization of sustainable development and the protection of natural resources, as well as establishing a balance between human consumption of resources and the absorption of produced waste by nature, necessitates the action of planners and authorities in preserving and protecting the environment in this area, in a way that they strive to preserve its valuable biological resources and improve the ecological environment in this region.

Keywords: Land Cover/Use Change, Ecological Footprint, Biocapacity, Ecological Performance and Balance, Tehran-Alborz Metropolitan Area.



مقاله پژوهشی

شاخص ردپای اکولوژیک و ارزیابی پایداری زیستی در توسعه مجموعه شهری تهران-البرز

پروانه سبحانی^۱، افشین دانه‌کار^۲

۱. استادیار گروه محیط‌زیست، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
۲. استاد گروه محیط‌زیست، دانشگاه تهران، کرج، ایران

نویسنده مسئول: افشین دانه‌کار
رایانامه: danehkar@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۱

استناد به این مقاله:

سبحانی، پروانه؛ دانه‌کار، افشین (۱۴۰۳). شاخص ردپای اکولوژیک و ارزیابی پایداری زیستی در توسعه مجموعه شهری تهران-البرز، فصلنامه علمی برنامه‌ریزی توسعه کالبدی، ۹ (۴)، ۳۶-۶۹.

(DOI: 10.30473/psp.2025.73644.2761)

چکیده

شهرها به‌عنوان پرمصرف‌ترین اکوسیستم‌های جهان مسئول بخش عظیمی از مشکلات محیط‌زیستی هستند. به منظور دستیابی به توسعه پایدار، بررسی شرایط اکولوژیک حاکم بر این مناطق امری ضروری است. براین اساس در مطالعه حاضر، به بررسی روند تغییرات پوشش/کاربری اراضی طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۴۰۲ و همچنین پیش‌بینی و مدل‌سازی این تغییرات با استفاده از مدل زنجیره‌ای مارکوف و سلول‌های خودکار (CA-Marcove) در سال ۱۴۲۰ پرداخته شد. در ادامه به محاسبه ردپای اکولوژیک، ظرفیت زیستی و مازاد/کسری اکولوژیک و بررسی میزان عملکرد و توازن اکولوژیک در این منطقه اقدام شد. در نهایت فشار و پایداری اکولوژیک نیز مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۴۰۲، بیشترین روند تغییرات کاهشی مربوط به مراتع کم تراکم با مساحت ۱۲۲۰/۷- کیلومترمربع است، در حالی که بیشترین تغییرات افزایشی به مراتع نیمه متراکم با وسعت ۱۲۲۱/۲ کیلومترمربع اختصاص یافته است. در مجموعه شهری تهران-البرز طی سال‌های مورد مطالعه، نزدیک به ۲۹۰۵/۲ کیلومترمربع از طبقات پوشش/کاربری اراضی روند کاهشی داشته است، که ۱۵/۴۱ درصد از مساحت کل منطقه را به خود اختصاص داده است. بیشترین روند تغییرات کاهشی در سال ۱۴۲۰ نیز مربوط به مراتع کم متراکم با مساحت ۲۶۶۱ کیلومترمربع می‌باشد، در حالی که بیشترین روند افزایشی مربوط به مراتع نیمه متراکم با مساحت ۴۵۴۸ کیلومترمربع است. این روند نشان‌دهنده سرعت توسعه شهرنشینی و تبدیل طبقات پوشش/کاربری اراضی در این مجموعه شهری است. بررسی عملکرد و هم‌ارزی بین طبقات پوشش/کاربری اراضی منطقه نشان داد که عوامل هم‌ارزی نسبتاً ثابت، درحالی‌که عوامل عملکرد به‌طور قابل توجهی در نوسان است. همچنین نتایج نشان داد که ردپای اکولوژیک در مجموعه شهری تهران-البرز (۱۳۸۷-۱۴۲۰) دارای روند افزایشی، ظرفیت زیستی و مازاد اکولوژیک نیز دارای روند کاهشی هستند. شاخص ردپای اکولوژیک و عمق پا نیز از روند افزایشی برخوردار است، که نشان‌دهنده افزایش فشار اکولوژیک و کاهش پایداری اکولوژیک طی سال‌های مورد مطالعه است. بنابراین تحقق توسعه پایدار و حفاظت از منابع طبیعی و همچنین برقراری تعادل بین مصرف منابع توسط انسان و جذب ضایعات تولید شده به‌وسیله طبیعت، مستلزم عملکرد برنامه‌ریزان و مسئولان در حفظ و حمایت از محیط زیست در این محدوده است، به گونه‌ای که در راستای حفظ منابع با ارزش زیستی آن تلاش نمایند و وضعیت محیط اکولوژیک در این منطقه را ارتقاء بخشند.

واژه‌های کلیدی

تغییرات پوشش/کاربری اراضی، ردپای اکولوژیک، ظرفیت زیستی، عملکرد و توازن اکولوژیک، مجموعه شهری تهران-البرز.



مقدمه

فشار فزاینده فعالیت‌های انسانی هم‌چون تغییرات کاربری اراضی، بهره‌وری بدون برنامه‌ریزی به‌منظور دستیابی به منافع اقتصادی و تجاری، نیاز به برنامه‌ریزی و مدیریتی یکپارچه در تمامی سطوح دارد تا به حفاظت از سرزمین و منابع با ارزش زیستی بپردازد (Sobhani et al., 2021; Wassie, 2020). همچنین در استقرار کاربری‌ها و توسعه فعالیت‌ها، لزوم بهره‌برداری بهینه از منابع سرزمین همراه با حفاظت اصولی و جلوگیری از تخریب آن‌ها، با هدف نیل به توسعه پایدار امری ضروری است (سبحانی و اسماعیل‌زاده، ۱۴۰۰). تغییرات کاربری اراضی که شامل دخالت‌های مستقیم و غیرمستقیم انسان می‌شود، می‌تواند حدود نیمی از سطح خشکی‌های زمین را تحت تغییرات جدی قرار دهد (Xie et al., 2024). از این‌رو، کاربری اراضی همواره یکی از مهم‌ترین عواملی است که انسان می‌تواند محیط زیست خود را تحت تأثیر قرار دهد و اطلاع از چگونگی این تغییرات نقش بسزایی در مدیریت و برنامه‌ریزی سرزمین دارد (Nuissl & Siedentop, 2021).

شهرها به‌عنوان پرمصرف‌ترین اکوسیستم‌های جهان مسئول بخش عظیمی از مشکلات محیط‌زیستی هستند (Javan et al., 2024). اطلاع از شرایط اکولوژیک حاکم بر این مناطق برای دستیابی به توسعه پایدار امری ضروری است (Zadehdabagh et al., 2022). شاخص ردپای اکولوژیک در زمینه ارزیابی جوامع شهری به‌عنوان روشی برای اندازه‌گیری سطوح پایداری در این مناطق از کاربرد بالایی برخوردار است (Shamaee et al., 2024; Genta et al., 2022). این شاخص با ارائه مقایسه جامعی از تقاضا و مقدار عرضه منابع طبیعی، اهداف و راهبردهای مفیدی را در جلوگیری از تخریب‌ها و نابرابری‌های توسعه فعالیت‌های انسانی مورد بررسی قرار می‌دهد (Yadav et al., 2023).

هدف از رویکرد ردپای اکولوژیک برقراری تعادل بین "مصرف منابع و تولید ضایعات به‌وسیله انسان" و "تولید منابع و جذب ضایعات به‌وسیله طبیعت" است (Skakovska, 2023). امروزه شاخص ردپای اکولوژیک در بسیاری از کشورهای جهان در سطح ملی و محلی استفاده می‌شود و نشان می‌دهد که در کدام ناحیه و کجا بر منابع طبیعی فشار وارد می‌شود (Li et al., 2023). ردپای اکولوژیک با تأکید بر محدودیت سرمایه‌ها و منابع زمینی، به عنوان چارچوبی برای ارزیابی اثرات و برنامه‌ریزی پایدار رواج یافته است و مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است (Sarwar et al., 2024). شاخص ردپای اکولوژیک مدل کمی مناسبی برای

اندازه‌گیری توسعه پایدار جوامع و شهرها به‌شمار می‌رود. این شاخص عمدتاً برای ارزیابی ظرفیت بوم‌شناختی، ظرفیت نهایی اکولوژیک و همچنین توسعه پایدار کاربرد دارد (Li et al., 2023). به منظور تحقق توسعه پایدار در نواحی شهری این شاخص در مطالعات و پژوهش‌های متعددی به کار گرفته شده است. با توجه به اهمیت این موضوع، در مطالعه حاضر به بررسی برخی از این مطالعات پرداخته شد که می‌توان به پژوهش پیمانفر^۳ (۱۴۰۲) در ارزیابی پیامد طرح‌های جامع شهری بر وضعیت پایداری شهرستان بروجرد با استفاده از روش ردپای اکولوژیک اشاره کرد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که بیشترین درصد ردپا در سال‌های ۱۳۹۴-۱۴۰۱، به‌ترتیب مربوط به کربن، زمین کشتزاری، زمین جنگلی، زمین ساخته شده، زمین آبی و زمین مرتع است. همچنین شهرستان بروجرد در سال ۱۳۹۴ با کسری اکولوژیک حدود ۳/۴۴- هکتار به ازای هر نفر روبه‌رو بوده است که در صورت اجرای طرح جامع، وضعیت پایداری با اندکی تغییر تنزل خواهد یافت و کسری اکولوژیک به میزان ۳/۶۷- هکتار به ازای هر نفر خواهد رسید. در مطالعه‌ای دیگر، نظری و کلانتری^۴ (۱۴۰۲)، به بررسی عوامل مؤثر بر ردپای اکولوژیک شهر ساری پرداختند. آن‌ها بیان کردند که در بین ردپاهای محاسبه شده در بخش مصرف، حمل‌ونقل بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. تحلیل ردپای اکولوژیک در مناطق چهارگانه شهر ساری نیز نشان داد که این شهر از نظر اکولوژیک در وضعیت ناپایداری قرار دارد. Ozdamar و Yigit (۲۰۲۴)، ردپای اکولوژیک و وضعیت پایداری در شهر ساکارایا^۵ (کشور ترکیه) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که مهم‌ترین محرک‌های افزایش ردپای اکولوژیک در این منطقه، استفاده از سوخت‌های فسیلی و مصرف انرژی بوده است. از این‌رو، نتایج این مطالعه بر اهمیت اجرای منابع انرژی جایگزین، مانند سوخت‌های زیستی و انرژی تولید شده از زباله‌ها، در کنار اتخاذ روش‌های حمل و نقل جایگزین برای کاهش ردپای اکولوژیک تأکید دارد. Li و همکاران (۲۰۲۲) نیز به بررسی تأثیرات ردپای اکولوژیک بر توسعه پایدار کشور چین پرداختند. مطابق نتایج، عمق ردپای اکولوژیک کمربند اقتصادی رودخانه یانگ تسه از طریق متعادل‌سازی ساختار صنعتی و بهبود توسعه پایدار امکان‌پذیر است. بنابراین، بررسی تأثیرات ردپای اکولوژیک بر کمربند اقتصادی رودخانه یانگ تسه از دو منظر اشغال سرمایه جریان و اشغال سرمایه منابع از اهمیت بالایی برخوردار است.

مطابق بررسی‌های انجام شده توسعه پایدار بر پایداری منابع طبیعی و محیط زیست تأکید دارد که تحقق این امر از طریق سنجش

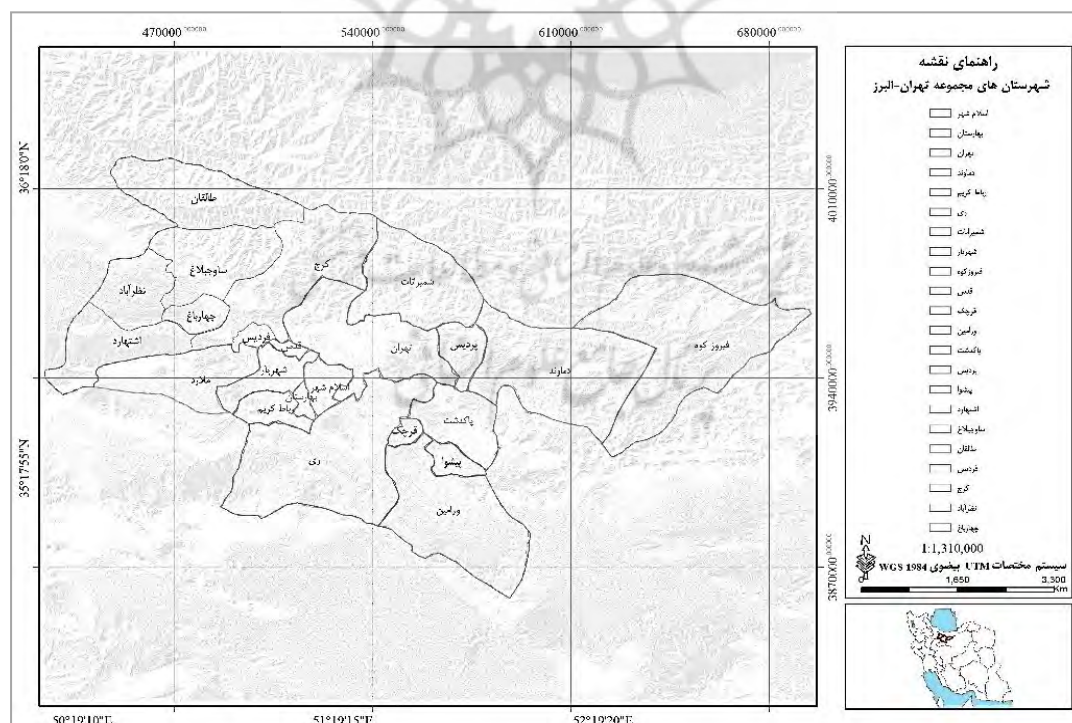
فشار و پایداری اکولوژیک نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه می‌تواند به برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در بلندمدت و همچنین پیش‌بینی روند تغییرات در آینده کمک نماید.

داده‌ها و روش کار

مجموعه شهری تهران- البرز دارای مساحت ۱۸۸۵۱/۵ کیلومترمربع با ۲۳ شهرستان و ۱۵۹۸۰۰۳۷ نفر جمعیت است (مرکز آمار ایران^۱، ۱۳۹۵). این محدوده در دو استان تهران و البرز واقع شده است. طبقات ارتفاعی در این منطقه از کمتر از ۱۰۰ متر تا بیش از ۳۰۰۰ متر می‌باشد و از نظر آب و هوایی نیز دارای اقلیم خشک بیابانی سرد است. این منطقه در فصول گرم سال تحت تأثیر سیستم پرفشار جنب حاره‌ای قرار دارد، بدین سبب میزان بارندگی آن کم و عمدتاً ناشی از عبور سیستم‌های کم فشار دینامیکی سرد از روی شیب‌های شمالی رشته کوه البرز می‌باشد. در زمستان‌ها نیز تحت تأثیر سیستم‌های شمالی، شمال غربی و جنوب غربی وارد شده به فلات ایران قرار می‌گیرد (دانه کار و سبحانی^۲، ۱۴۰۳). در شکل ۱، موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه نمایش داده شده است.

ردپای اکولوژیک و ایجاد تعادل بین مصرف منابع توسط انسان و جذب ضایعات تولید شده به‌وسیله طبیعت امکان‌پذیر است. از این رو در مطالعه حاضر، به محاسبه ردپای اکولوژیک، ظرفیت زیستی و مازاد/کسری اکولوژیک و بررسی میزان عملکرد و توازن اکولوژیک در مجموعه شهری تهران- البرز اقدام شد.

طی دهه‌های اخیر، روند رو به رشد جمعیت و توسعه سریع شهرنشینی منجر به تغییرات قابل ملاحظه‌ای در توسعه و تغییرات طبقات پوشش/کاربری اراضی در مجموعه شهری تهران- البرز شده است. تداوم این روند می‌تواند منجر به نابودی منابع زیستی و افزایش ناپایداری در این مجموعه شهری شود. براین اساس در مطالعه حاضر، به منظور بررسی تغییرات احتمالی آینده و عدم قطعیت‌ها، ابتدا به شناسایی طبقات پوشش/کاربری اراضی و روند تغییرات آن‌ها طی سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۴۰۲ پرداخته شد. همچنین روند تغییرات در سال ۱۴۲۰ با استفاده از مدل زنجیره‌ای مارکوف و سلول‌های خودکار (CA-Marcove) پیش‌بینی و مدل‌سازی شد. در ادامه به محاسبه ردپای اکولوژیک، ظرفیت زیستی و مازاد/کسری اکولوژیک و بررسی میزان عملکرد و توازن اکولوژیک در این منطقه اقدام شد. در نهایت



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

کالیبراسیون مدل از طریق شبیه‌سازی نقشه پوشش-کاربری اراضی سال ۱۴۰۲ با استفاده از نقشه سال ۱۳۸۷ و ۲) تهیه ماتریس دوم به منظور پیش‌بینی نقشه تغییرات پوشش-کاربری اراضی در سال ۱۴۲۰ از طریق نقشه شبیه‌سازی شده در سال ۱۴۰۲ است. علاوه‌براین، به منظور سنجش صحت مدل‌سازی به مقایسه نقشه شبیه‌سازی شده ۱۴۰۲ با نقشه واقعی آن اقدام شد. از آنجایی که معمول‌ترین پارامترهای برآورد دقت، صحت کلی و ضریب کاپا است (Lu et al., 2004). از این‌رو، در این مطالعه سنجش صحت اطلاعات از طریق ضریب کاپا مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت نقشه شبیه‌سازی شده پوشش-کاربری اراضی با استفاده از مدل CA-Marcove در سال ۱۴۲۰ با توجه به صحت اطلاعات بررسی شده حاصل شد. مطابق با احتمال فرمول بیز، به منظور پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در مدل زنجیره مارکوف از رابطه ۱ استفاده شد (Sang et al., 2011).

رابطه ۱)

$$S_{t+1} = P_{ij} S_t$$

در این رابطه $S(t)$ و $S(t+1)$ حالت‌های سیستم در زمان t و $t+1$ می‌باشند و P_{ij} ماتریس احتمال انتقال در این حالت‌ها می‌باشد که از طریق رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

رابطه ۲)

$$P_{11} \quad K \quad P_{1n} \\ M \quad O \quad M \quad P_{ij} \quad 0, \quad P_{ij} \quad 1, j = 1, \dots, n \\ P_{n1} \quad L \quad P_{nn}$$

در ادامه از مدل سلول‌های خودکار استفاده شد که در این مدل، فضا به صورت یک شبکه تعریف شده که به هر خانه یک سلول گفته می‌شود. سلول‌های خودکار در زمان‌های گسسته به‌طور هم‌زمان و بر طبق یک قانون محلی به هنگام می‌شوند که مقدار هر سلول بر اساس مقادیر سلول‌های همسایه و خود آن سلول تعیین می‌گردد (Aslami et al, 2015). از این‌رو مدل سلول‌های خودکار را می‌توان از رابطه ۳ محاسبه نمود (Sang et al., 2011).

رابطه ۳)

$$S_{t+1} = f(S_t, N_t)$$

در این رابطه S مجموعه‌ای از حالت‌های سلولی، N زمینه سلولی، t و $t+1$ نشان دهنده تغییرات حالت در زمان‌های مختلف و f یک تابع انتقال را در حالت‌های سلولی و فضای محلی نشان می‌دهد.

شناسایی و بررسی روند تغییرات پوشش/کاربری اراضی

در مطالعه حاضر به بررسی روند تغییرات پوشش/کاربری اراضی مجموعه شهری تهران-البرز طی سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۴۰۲ پرداخته شد. در ادامه، به منظور برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در بلندمدت و همچنین پیش‌بینی روند تغییرات در آینده به مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات پوشش/کاربری اراضی در سال ۱۴۲۰ با استفاده از مدل CA-Marcove اقدام شد. اطلاعات پوشش/کاربری اراضی طی سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۴۰۲ از مرکز مطالعات و تحقیقات شهرسازی و معماری ایران (۱۴۰۲) دریافت شد و اطلاعات طبقات پوشش/کاربری اراضی سال ۱۴۲۰ نیز طی مطالعه حاضر به شرح زیر تهیه و مورد تحلیل قرار گرفت.

پیش‌بینی و مدل‌سازی روند تغییرات پوشش/کاربری اراضی در سال ۱۴۲۰

مدل زنجیره‌ای مارکوف و سلول‌های خودکار CA-(Marcove)

امروزه تغییرات و تبدیل پوشش/کاربری اراضی به عنوان یک عامل تهدید در مناطق شهری شناخته شده است (دانه کار و سبحانی، ۱۴۰۳). از این‌رو، پایش این تغییرات از طریق تصاویر ماهواره‌ای و پیش‌بینی و ارزیابی پتانسیل آن‌ها از طریق مدل‌سازی می‌تواند به برنامه‌ریزان محیط زیست و مدیران منابع طبیعی برای تصمیمات آگاهانه‌تر و آینده‌نگری در برنامه‌ریزی‌ها کمک نماید (Sobhani et al., 2022). برای این اساس در مطالعه حاضر با استفاده از مدل CA-Marcove به پیش‌بینی روند تغییرات آتی پوشش-کاربری اراضی موجود در منطقه برای سال ۱۴۲۰ اقدام شد. زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار به عنوان ابزاری به توصیف تغییرات و فرآیندهای بوم سازگان در آینده می‌پردازد. همچنین این مدل تغییرات کاربری‌ها را از یک دوره به دوره دیگر مورد تفسیر قرار می‌دهد و از آن به عنوان مبنایی در نقشه‌سازی تغییرات آینده استفاده می‌نماید که این فرآیند با استفاده از یک ماتریس احتمال انتقال، از زمان ۱ به زمان ۲ صورت می‌گیرد (Arkhi & Esfahani, 2019). برای این اساس در این مطالعه پس از پایش روند تغییرات پوشش-کاربری اراضی از طریق تصاویر ماهواره‌ای طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۴۰۲، نقشه‌های پوشش-کاربری اراضی هر یک مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. در ادامه به منظور پیش‌بینی روند تغییرات احتمالی در سال ۱۴۲۰ از آنالیز زنجیره مارکوف به منظور تعیین احتمال تغییر هر طبقه کاربری به دیگر طبقات کاربری موجود با استفاده از نرم‌افزار Idrisi TerrSet ۲۰۲۰ اقدام گردید. اجرای آنالیز زنجیره مارکوف در این مطالعه به دو منظور صورت گرفت: ۱) تهیه ماتریس اول (ماتریس احتمال انتقال) جهت

سنجش ردپای اکولوژیک

پس از شناسایی طبقات پوشش/کاربری اراضی در منطقه، ردپای اکولوژیک مطابق جدول ۱ و بر اساس یک سیستم جهانی در gha محاسبه شد. در مطالعه حاضر، هر یک از طبقات پوشش/کاربری اراضی در مجموعه شهری تهران-البرز به عنوان منابع اصلی در سنجش ردپای اکولوژیک در نظر گرفته شد. در این طبقه‌بندی منابع زیستی به سه دسته از جمله محصولات کشاورزی (زراعت آبی و زراعت دیم)، محصولات مرتعی (مراعت متراکم، مراعت نیمه متراکم و

مراعت کم تراکم) و محصولات جنگلی (جنگل‌های دست کاشت، جنگل و بیشه کم تراکم و جنگل‌های تنک) تقسیم شدند. منابع آبی نیز شامل آب مصرفی برای شرب، کشاورزی و صنعت است. انرژی در این منطقه شامل جذب کربن و سوخت‌های فسیلی می‌باشد و آلاینده‌ها نیز به انتشار گازهای گلخانه‌ای اختصاص یافته است. همچنین از اراضی ساخته شده در این منطقه می‌توان به پهنه‌های انسان ساخت هم‌چون مراکز جمعیتی روستایی، شهرک مسکونی، محدوده شهر، تأسیسات و آرامستان اشاره نمود.

جدول ۱. منابع و جزئیات داده‌ها (<https://data.footprintnetwork.org>)

عوامل	شاخص‌ها
منابع زیستی	- محصولات کشاورزی (مانند غلات، لوبیا، پنبه، محصولات روغنی، محصولات فیبری، تنباکو، نیشکر و غیره) - محصولات مرتعی (مانند گوشت، شیر، پشم، تخم مرغ و عسل) - محصولات جنگلی (مانند الوار و میوه‌های باغی) - محصولات آبی (مانند میگو، خرچنگ و ماهی)
منابع آبی	کل آب مصرفی در کشاورزی، صنعت و فعالیت‌های محیط زیستی
منابع انرژی	مصرف انرژی‌های مختلف و سوخت‌های فسیلی از جمله زغال سنگ، کک، نفت، نفت خام، بنزین، نفت سفید، گازوئیل، نفت کوره، گاز و برق
آلاینده‌ها	انتشار آلاینده‌ها از جمله COD، NH ₃ -N، SO ₂ ، NOx و زباله‌های جامد
اراضی ساخته شده	اراضی ایجاد شده توسط انسان (مسکن و جاده)

ردپای اکولوژیک

ردپای اکولوژیک وابسته به سطح تولید اقتصاد محلی، کل جمعیت و میزان توسعه منطقه دارد و محاسبات آن برای منابع مصرفی مختلف، در ارتباط با مساحت زمین مولد زیستی صورت می‌گیرد. از سوی دیگر، مدل ردپای اکولوژیک عرضه و تقاضای فضای تولید زیستی را در فرآیندهای پیچیده اکولوژیک و اقتصادی متعادل و ساده می‌کند (Dang et al., 2018). واحد اندازه‌گیری آن بر اساس میانگین واحد جهانی در هکتار (gha) تعیین می‌شود، زیرا به‌طور ویژه به عملکرد محصولات زیستی در سطح جهانی اشاره دارد. gha نشان‌دهنده هکتار در پتانسیل تولید زیست‌توده قابل استفاده برابر با میانگین بالقوه جهانی در آن سال است (Monfreda et al., 2004). بدین منظور میانگین تولید جهانی را می‌توان با استفاده از رابطه ۴، محاسبه کرد. در این رابطه، Epj: میانگین محصول جهانی؛ pj: محصول جهانی، و Sj: سطح تولید جهانی منابع مولد زیستی در طبقه j است.

رابطه ۴)

$$E_{pj} = p_j / s_j$$

در محاسبه ردپای اکولوژیک، هر گونه خدمات اکوسیستمی، صرف نظر از این که به‌صورت محلی تولید، وارد یا صادر شده باشد، می‌توان مطابق رابطه ۵ به مساحت زمین مولد زیستی تخصیص داد (Yang, 2018; Mancini, 2018; Galli, 2020). در این رابطه، EF_c کل ردپای اکولوژیک مصرفی، ef سرانه ردپای اکولوژیک، N کل جمعیت، i دسته محصول، C_i سرانه مصرف کالای i، Y_{w,i} میانگین بازده جهانی محصول i و EQFi عامل هم ارزی طبقه کاربری اراضی محصول A است.

رابطه ۵)

$$EF_c = N \sum_i \left(\frac{C_i}{Y_{w,i}} \right) EQF_i$$

ردپای کربن: نشان‌دهنده زایدات مدل ردپای اکولوژیک می‌باشد که مقدار تقاضای جداسازی طولانی مدت انتشار CO₂ توسط اکوسیستم‌های جنگلی را محاسبه می‌نماید. ردپای اکولوژیک کربن از رابطه ۶ محاسبه می‌شود. در رابطه زیر، EF_c مؤلفه ردپای اکولوژیک کربن، یعنی سطح زمین مورد نیاز برای جذب CO₂ ناشی از احتراق انرژی فسیلی، P_c میزان انتشار سالانه CO₂ و Y_c نرخ سالانه جذب

$$EF_{size,forestland} \cdot \min\{EF_{forestland}, EF_{carbon}, BC_{forestland}\} \\ EF_{depth,forestland} \cdot 1 \frac{\max\{EF_{forestland}, EF_{carbon}, BC_{forestland}, 0\}}{BC_{forestland}}$$

در این مطالعه، با استفاده از شاخص‌های فشار اکولوژیک (EPI)^۲ و پایداری اکولوژیک (ESI)^۳، Rstok flow، Orflow و میزان مازاد جریان سرمایه طبیعی (EFremain) نیز مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

EPI نشان‌دهنده فشار مصرف منطقه‌ای و وضعیت خدمات اکوسیستمی منطقه می‌باشد که هر چه این مقدار بزرگتر شود، نشان‌دهنده افزایش فشار اکولوژیک است (Yang & Hu, 2018). این شاخص از طریق رابطه ۱۰، قابل محاسبه است. در جدول ۲ نیز طبقه‌بندی وضعیت اکوسیستم بر اساس EPI نمایش داده شده است. (رابطه ۱۰)

$$EFI = \frac{ef}{bc}$$

جدول ۲. طبقه‌بندی وضعیت اکوسیستم بر اساس EPI (Liu et al., 2021)

سطح	۱	۲	۳	۴	۵	۶
EPI	<۰/۵۰	-۵/۸۰	-۸۱	-۰۱/۵۰	۱/۲-۵۱	>۲
وضعیت خدمات اکوسیستم	کاملاً امن	بسیار امن	نسبتاً امن	نسبتاً ناامن	بسیار ناامن	کاملاً ناامن

مقادیر ESI نیز نشان می‌دهد که چه مقدار از عرضه اکولوژیک پایدار یک منطقه می‌تواند تقاضای اکولوژیک جامعه را برآورده نماید و این شاخص از طریق رابطه ۱۱، قابل محاسبه است (Zhu, 2020). مقدار ESI در بازه عددی {۰ و ۱} قرار دارد که هر چه به ۱ نزدیکتر باشد، پایدارتر و هر چه به صفر نزدیکتر شود پایداری کمتر است، و همچنین ESI=۰/۵ نشان‌دهنده آستانه بین توسعه پایدار و ناپایدار است.

رابطه (۱۱)

$$ESI = \frac{ec}{ec + ef}$$

علاوه بر این، Rstok flow، برای درک بهتر سهم استفاده از جریان و انباشت در استفاده از سرمایه طبیعی به کار می‌رود که هر چه

کربن به ازای متوسط هکتار جهانی زمین جنگلی، معادل ۳/۶۷ تن در هکتار است (GFN, 2017).

رابطه ۶)

$$EQF = \frac{EF_c}{3} \frac{P_c}{Y_c}$$

ظرفیت زیستی: در این مطالعه، ظرفیت زیستی به طبقات مختلف پوشش-کاربری اراضی (نوع استفاده از زمین) که دارای توانایی تولید منابع ضروری تجدیدپذیر یا جذب زباله‌های CO₂ (خدمات تنظیمی اکوسیستم) می‌باشند، تقسیم و محاسبه شد (رابطه ۷). در این راستا، ظرفیت زیستی نشان‌دهنده حداکثر میزان جریان خدمات اکوسیستمی منطقه است. بدین ترتیب، تقاضاهای بشر برای منابع تجدیدپذیر و ترسیب CO₂، توسط محصولات یا خدمات اولیه طبقات پوشش-کاربری اراضی برآورده می‌شود (Lazarus, 2015; Lin, 2015; Mancini, 2018). علاوه بر این، مطابق کمیسیون جهانی محیط زیست و توسعه (WCED, 1987)، ۱۲ درصد از مناطق مولد زیستی باید برای حفظ تنوع زیستی و یکپارچگی اکوسیستم‌ها ذخیره شود.

رابطه ۷)

$$EQF_i = \frac{BC_i}{0.88} \frac{A_{N,i}}{Y_{F,N,i}}$$

A_{Ni} ناحیه تولیدزیستی در دسترس برای تولید هر محصول آ؛ Y_{FNi} عامل عملکرد و EQF_i عامل هم ارزی برای کاربری اراضی تولید کننده هر محصول i است (Galli, 2020; Mancini, 2018).

در ادامه به منظور بررسی مصرف انباشت سرمایه به جریان (Rstok flow) و اشغال جریان سرمایه (Orflow) به محاسبه دو شاخص EF_{size} و EF_{depth} مطابق رابطه‌های ۸ و ۹ پرداخته شد (Long, 2020, 2021).

رابطه ۸)

$$EF_{depth} = 1 \frac{ED_i}{BC_i} \quad 1 \frac{\max\{EF_i, BC_i, 0\}}{BC_i} \\ EF_{size,3D} = \min\{EF, BC\} \\ EF_{3D} = \partial EF_{size} \partial EF_{depth}$$

برای محاسبه EF_{size} اراضی جنگلی نیز می‌توان از رابطه ۹ استفاده نمود. در این رابطه EF_{depth} عمق ردپای اکولوژیک، EF_{size} اندازه ردپای اکولوژیک، ED^۱ کسری اکولوژیک و عدد ۱، نشان‌دهنده عمق طبیعی است.

رابطه ۹)

شرح و تفسیر نتایج

مطابق نتایج، در سال ۱۳۸۷ بیشترین وسعت طبقه پوشش/کاربری اراضی مربوط به مرتع متراکم با مساحت ۳۷۰۶/۸۰ کیلومترمربع (۱۹/۶۶ درصد) است، در حالی که کمترین وسعت به زمین‌های شور و مرطوب در کفه‌های نمکی با مساحت ۰/۲۵ کیلومترمربع (۰/۰۰۱ درصد) اختصاص یافته است (جدول ۳ و شکل ۲). در سال ۱۴۰۲ نیز، بیشترین وسعت مربوط به مراتع نیمه متراکم با مساحت ۴۵۲۲/۶۹ کیلومترمربع (۲۴/۱۹ درصد) و کمترین وسعت مربوط به آرامستان با مساحت ۸/۵۳ کیلومترمربع (۰/۰۵ درصد) می‌باشد. بررسی‌های صورت گرفته نشان داد که طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۴۰۲، بیشترین روند تغییرات کاهشی مربوط به مراتع کم تراکم با مساحت ۱۲۲۰/۷- کیلومترمربع است، در حالی که بیشترین تغییرات افزایشی به مراتع نیمه متراکم با وسعت ۱۲۲۱/۲ کیلومترمربع اختصاص یافته است (جدول ۳ و شکل ۴). در مجموعه شهری تهران- البرز طی سال‌های مورد مطالعه، نزدیک به ۲۹۰۵/۲ کیلومترمربع از طبقات پوشش/کاربری اراضی روند کاهشی داشته است، که ۱۵/۴۱ درصد از مساحت کل منطقه را به خود اختصاص داده است (جدول ۳ و شکل ۴). این روند نشان‌دهنده توسعه بی‌رویه شهرنشینی و تخریب و تبدیل منابع طبیعی در طی دهه‌های اخیر است.

مقدار این شاخص بیشتر باشد، پایداری استفاده از سرمایه طبیعی کمتر است (Zhang, 2020). این شاخص از طریق رابطه ۱۲، محاسبه می‌شود.

رابطه ۱۲)

$$R_{\text{stock flow}} = \frac{EF_{\text{size region}}}{EF_{\text{size region}}} \frac{ED}{BC} \frac{1}{EF_{\text{size region}} (EF - BC)}$$

در مطالعه حاضر، Or_{flow} نیز برای توصیف کارایی واقعی استفاده انسانی از جریان و تحلیل وضعیت استفاده بیش از حد به کار گرفته شد که از طریق رابطه ۱۳ قابل محاسبه است (Bi, 2021). EF_{remain} نیز برای انواع کاربری‌ها، مطابق رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود (Dong, 2021).

رابطه ۱۳)

$$Or_{\text{flow}} = \frac{EF_{\text{size},i}}{BC_i} 100$$

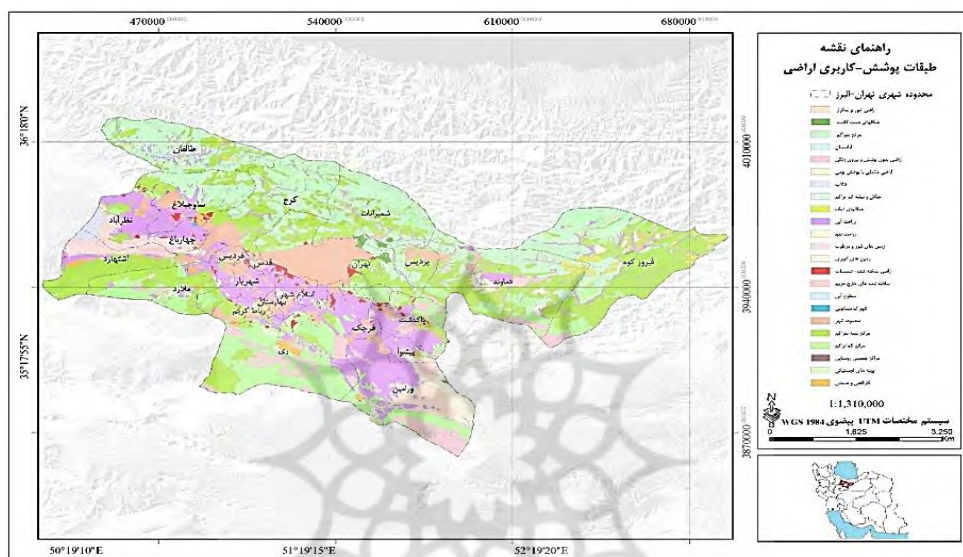
رابطه ۱۴)

$$EF_{\text{remain},i} = 1 - \{ \min EF_i, BC_i \} / BC_i$$

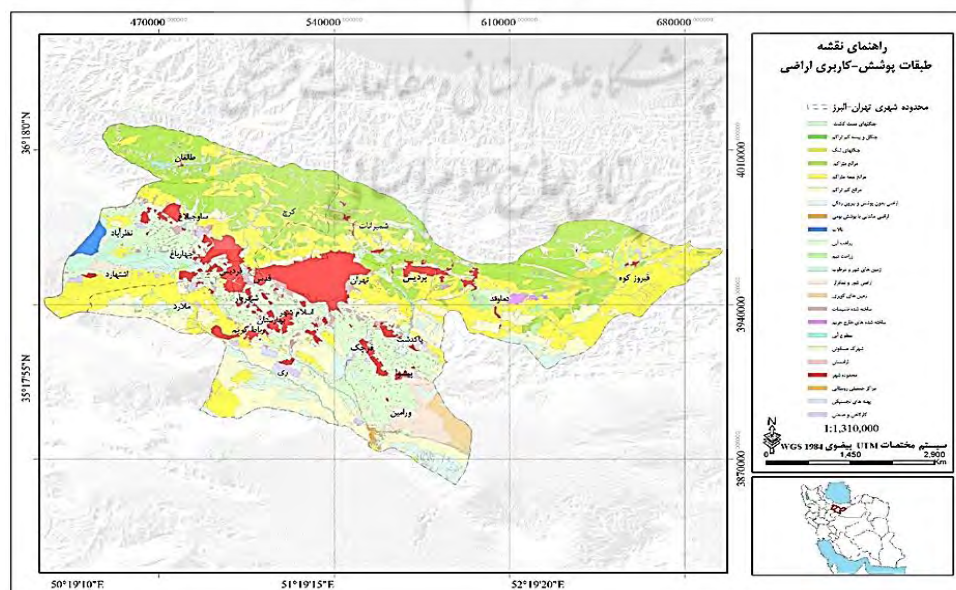
جدول ۳. روند تغییرات طبقات پوشش/کاربری اراضی در مجموعه شهری تهران- البرز (طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۴۰۲)

۱۳۸۷		۱۴۰۲		۱۴۰۲-۱۳۸۷	
طبقات	مساحت (کیلومترمربع)	درصد	مساحت (کیلومترمربع)	درصد	روند تغییرات مساحت (کیلومترمربع)، افزایشی (+) / کاهشی (-)
جنگل‌های دست کاشت	۱۳۴/۱	۰/۷۱	۸۶/۱	۰/۴۶	کاهشی -۴۸
جنگل و بیشه کم تراکم	۸۹/۲	۰/۴۷	۵۹/۶	۰/۳۲	کاهشی -۲۹/۶
جنگل‌های تنک	۳۰۶/۱	۱/۶۲	۱۸۷/۲	۱	کاهشی -۱۱۸/۹
مراتع متراکم	۳۷۵۹/۱	۱۹/۹۴	۳۹۹۴/۸	۲۱/۱۹	افزایشی ۲۳۵/۷
مراتع نیمه متراکم	۳۳۲۲/۸	۱۷/۶۳	۴۵۴۴	۲۴/۱۱	افزایشی ۱۲۲۱/۲
مراتع کم تراکم	۴۰۲۴/۷۷	۲۱/۳۵	۲۸۰۴/۶	۱۴/۸۷	کاهشی -۱۲۲۰/۷
زراعت آبی	۲۷۱۵/۱	۱۴/۴۰	۲۸۵۰/۳	۱۵/۱۲	افزایشی ۱۳۴/۹
زراعت دیم	۱۲۷/۷	۰/۶۸	۲۷۷/۷	۱/۲۱	افزایشی ۱۰۰
اراضی بدون پوشش و بیرون زدگی	۲۶۲/۸	۱/۳۹	۸۷۱/۵	۴/۶۲	افزایشی ۶۰۸/۷
اراضی ماندابی با پوشش بومی	۱۱۴/۴	۰/۶۱	۶۱	۰/۳۲	کاهشی -۵۳/۴
اراضی شور و نمکزار	۹۴۰/۲	۵	۴۱۱/۶	۲/۱۸	کاهشی -۵۲۸/۶
زمین‌های شور و مرطوب	۱۱۶۵/۹	۶/۱۸	۴۰۰/۱	۲/۱۲	کاهشی -۷۶۵/۸

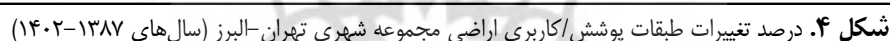
زمین‌های کویری	۲۷۸/۵	۱/۴۸	۲۱۱/۷	۱/۱۲	-۶۶/۸	کاهش
سطوح آبی	۱۶۷	۰/۸۹	۱۶۹/۵	۰/۹۰	۲/۵	افزایش
مراکز جمعیتی روستایی	۱۶۵/۷	۰/۸۸	۹۲/۳	۰/۴۹	-۷۳/۴	کاهش
شهرک مسکونی	۵۶/۷	۰/۳۰	۵۸/۹	۰/۳۱	۲۱/۲	افزایش
محدوده شهر	۹۱۷/۳	۴/۸۷	۱۵۱۸/۶	۸/۰۶	۶۰۱/۳	افزایش
تاسیسات	۲۴۶/۸	۱/۳۱	۲۹۶/۲	۱/۵۷	۴۹/۴	افزایش
آرامستان	۵۷/۳	۰/۳۰	۵۹	۰/۳۱	۱/۷	افزایش
مجموع	۱۸۸۵۱/۵	۱۰۰	۱۸۸۵۱/۵	۱۰۰	-	-



شکل ۲. نقشه طبقات پوشش/کاربری اراضی مجموعه شهری تهران-البرز در سال ۱۳۸۷



شکل ۳. نقشه طبقات پوشش/کاربری اراضی مجموعه شهری تهران-البرز در سال ۱۴۰۲

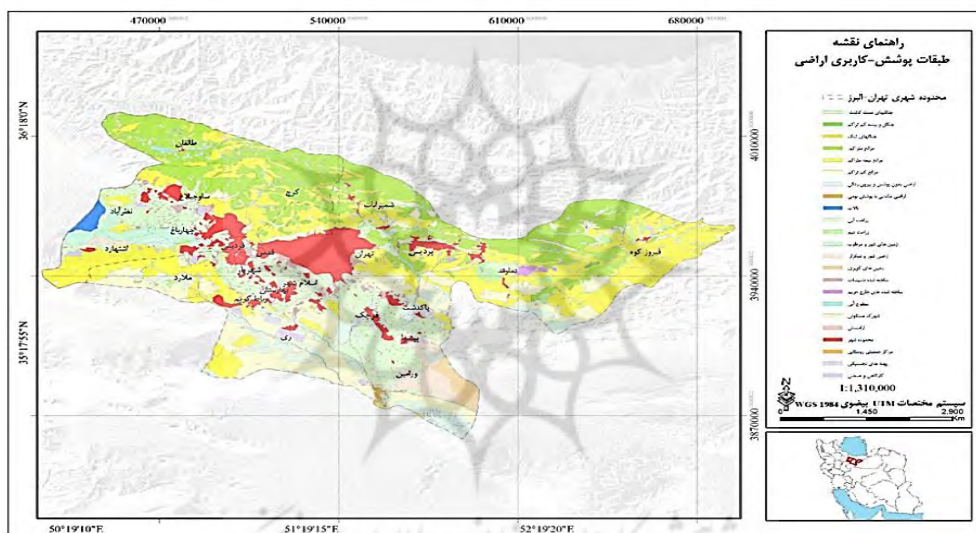


کیلومتر مربع (۱۴/۱۲ درصد) می‌باشد، در حالی که بیشترین روند افزایشی مربوط به مراتع نیمه مтраکم با مساحت ۴۵۴۸ کیلومتر مربع (۲۴/۱۳) است (جدول ۴ و شکل ۵). این روند نشان‌دهنده سرعت توسعه شهرنشینی و تبدیل طبقات پوشش/کاربری اراضی در این مجموعه شهری است.

جدول ۴. پیش‌بینی روند تغییرات پوشش/کاربری اراضی با استفاده از مدل CA-Markov (سال‌های ۱۴۰۲-۱۴۲۰)

سال	مساحت واقعی پوشش/کاربری های اراضی		مساحت شبیه سازی شده پوشش/کاربری های اراضی		مساحت پیش بینی شده پوشش/کاربری های اراضی		روند کاهشی/افزایشی
	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	
جنگل های دست کاشت	۸۶/۱	۰/۴۶	۸۳/۶	۰/۴۴	۸۴/۳۳	۰/۴۵	کاهشی
جنگل و بیشه کم تراکم	۵۹/۶	۰/۳۲	۵۵/۳۳	۰/۲۹	۵۷/۳	۰/۳۰	کاهشی
جنگل های تنک	۱۸۷/۲	۱	۱۸۰	۰/۹۵	۱۸۵/۳	۰/۹۸	کاهشی
مراتع متراکم	۳۹۹۴/۸	۲۱/۱۹	۳۹۹۶	۲۱/۲۰	۴۰۱۱	۲۱/۲۸	افزایشی
مراتع نیمه متراکم	۴۵۴۴	۲۴/۱۱	۴۵۴۰	۲۴/۰۸	۴۵۴۸	۲۴/۱۳	افزایشی
مراتع کم تراکم	۲۸۰۴/۶	۱۴/۸۷	۲۸۰۵	۱۴/۸۸	۲۶۶۱	۱۴/۱۲	کاهشی
زراعت آبی	۲۸۵۰/۳	۱۵/۱۲	۲۸۳۹	۱۵/۰۶	۲۸۶۳	۱۵/۱۹	افزایشی

افزایشی	۱/۵۴	۲۹۰	۱/۴۶	۲۷۶	۱/۲۱	۲۷۷/۷	زراعت دیم
افزایشی	۴/۶۷	۸۸۰	۴/۶۰	۸۶۷	۴/۶۲	۸۷۱/۵	اراضی بدون پوشش و بیرون زدگی
کاهشی	۰/۲۵	۴۸	۰/۳۳	۶۳	۰/۳۲	۶۱	اراضی ماندابی با پوشش بومی
کاهشی	۲/۰۶	۳۸۸	۲/۱۶	۴۰۷/۵	۲/۱۸	۴۱۱/۶	اراضی شور و نم‌زار
کاهشی	۱/۸۵	۳۴۸	۲/۱۱	۳۹۷	۲/۱۲	۴۰۰/۱	زمین‌های شور و مرطوب
کاهشی	۱	۱۸۹/۲۷	۱/۰۹	۲۰۵	۱/۱۲	۲۱۱/۷	زمین‌های کویری
افزایشی	۰/۹۲	۱۷۳/۲۱	۰/۸۸	۱۶۶	۰/۹۰	۱۶۹/۵	سطوح آبی
کاهشی	۰/۴۵	۸۵/۴۶	۰/۵۰	۹۳/۸	۰/۴۹	۹۲/۳	مراکز جمعیتی روستایی
افزایشی	۰/۳۵	۶۶/۲۲	۰/۱۹	۳۵	۰/۱۹	۳۴/۹	شهرک مسکونی
افزایشی	۸/۴۰	۱۵۸۴	۸/۰۶	۱۵۱۹	۸/۰۶	۱۵۱۸/۶	محدوده شهر
افزایشی	۱/۶۵	۳۱۱/۲۳	۱/۵۷	۲۹۶	۱/۵۷	۲۹۶/۲	تاسیسات
افزایشی	۰/۴۱	۷۸	۰/۱۴	۲۷	۰/۱۶	۲۹/۹	آرامستان
–	۱۰+	۱۸۸۵۱/۵	۱۰+	۱۸۸۵۱/۵	۱۰+	۱۸۸۵۱/۵	مجموع



شکل ۵. نقشه طبقه‌بندی پوشش/کاربری اراضی مجموعه شهری تهران-البرز در سال ۱۴۲۰

بررسی عملکرد و هم‌ارزی بین طبقات پوشش/کاربری اراضی منطقه

در این بخش به ارزیابی عامل عملکرد و هم‌ارزی (توازن اکولوژیک) بین طبقات پوشش/کاربری اراضی منطقه طی سال‌های مورد مطالعه پرداخته شد (جدول ۵). مطابق نتایج به‌دست آمده، عوامل هم‌ارزی

نسبتاً ثابت، درحالی‌که عوامل عملکرد به‌طور قابل توجهی در نوسان است. بدین‌ترتیب در بین کاربری‌های موجود، مراتع کم تراکم بیشترین ضریب هم‌ارزی را به خود اختصاص داده است و در طی این دوره، بیشترین کاهش سطح را نشان می‌دهند. در حالی‌که، مراتع نیمه متراکم در بین کاربری‌ها، بیشترین ضریب عملکرد را دارا می‌باشد.

جدول ۵. عامل عملکرد و هم‌ارزی در بین کاربری‌های منطقه

عامل هم‌ارزی EQF			عامل عملکرد YF			طبقات/سال
۱۴۲۰	۱۴۰۲	۱۳۸۷	۱۴۲۰	۱۴۰۲	۱۳۸۷	
۳/۳۶	۳/۲۲	۱/۴۳	۲/۳۷	۲/۲۵	۰/۳۶	جنگل‌های دست کاشت
۳/۵۲	۳/۴۶	۱/۳۲	۳/۰۲	۲/۸۶	۰/۴۵	جنگل و بیشه کم تراکم

۳/۴۸	۳/۳۲	۱/۲۸	۳/۱۸	۳/۰۵	۰/۳۲	جنگل‌های تنک
۴/۲۳	۴/۱۱	۲/۵۴	۴/۰۵	۳/۵۶	۰/۸۹	مراعات متراکم
۴/۴۱	۴/۳۲	۲/۶۷	۴/۲۱	۳/۸۶	۰/۹۶	مراعات نیمه متراکم
۲/۷۴	۲/۶۳	۱/۱۲	۲/۵۸	۲/۵۳	۰/۲۳	مراعات کم تراکم
۳/۷۶	۳/۶۳	۲/۴۳	۳/۳۶	۳/۲۱	۰/۶۷	زراعت آبی
۳/۶۸	۳/۵۷	۲/۳۶	۳/۳۸	۳/۱۸	۰/۵۸	زراعت دیم
۴/۱۱	۳/۸۰	۲/۴۸	۳/۵۶	۳/۴۲	۰/۷۰	اراضی بدون پوشش و بیرون زدگی
۳/۳۲	۳/۲۴	۱/۳۶	۳/۱۵	۳/۱۰	۰/۳۸	اراضی ماندابی با پوشش بومی
۳/۲۶	۳/۱۸	۱/۳۳	۳/۱۱	۳/۰۸	۰/۳۵	اراضی شور و نم‌زار
۳/۳۸	۳/۲۵	۱/۳۰	۳/۱۷	۲/۷۳	۰/۴۲	زمین‌های شور و مرطوب
۳/۳۴	۳/۲۸	۱/۳۶	۳/۰۹	۲/۷۰	۰/۴۵	زمین‌های کویری
۳/۵۲	۳/۴۰	۲/۲۳	۳/۲۸	۳/۱۸	۰/۶۶	سطوح آبی
۳/۵۸	۳/۴۵	۲/۰۵	۳/۳۷	۳/۱۵	۰/۵۲	مراکز جمعیتی روستایی
۳/۶۳	۳/۵۲	۲/۱۰	۳/۴۲	۳/۳۳	۰/۵۵	شهرک مسکونی
۴/۳۶	۴/۲۳	۲/۵۴	۴/۱۵	۳/۶۷	۰/۸۵	محدوده شهر
۴/۲۳	۴/۱۸	۲/۵۰	۴/۰۸	۳/۶۲	۰/۸۲	تاسیسات
۳/۲۸	۳/۱۵	۱/۴۷	۲/۹۶	۲/۷۵	۰/۴۸	آرامستان

بررسی ردپای اکولوژیک، ظرفیت زیستی و مازاد/کسری اکولوژیک در منطقه

مطابق نتایج، حدود ۸۰ درصد مصرف منابع مربوط به انرژی می‌باشد که در این میان سوخت‌های فسیلی بیش‌ترین درصد را به خود اختصاص داده‌اند. پس از آن محدوده شهر و تأسیسات به‌ترتیب

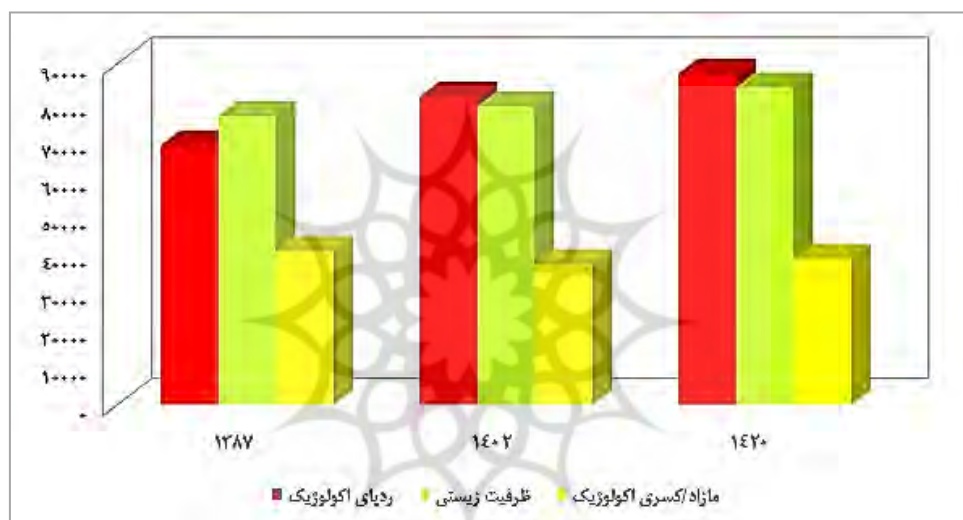
بیشترین ردپای کربن را در بین طبقات کاربری اراضی نشان می‌دهد (جدول ۶). همان‌طور که در شکل ۶ قابل مشاهده است ردپای اکولوژیک در مجموعه شهری تهران- البرز (طی سال‌های ۱۴۲۰-۱۳۸۷) دارای روند افزایشی، ظرفیت زیستی و مازاد اکولوژیک نیز دارای روند کاهشی هستند.

جدول ۶. ردپای اکولوژیک، ظرفیت زیستی و مازاد/کسری اکولوژیک در منطقه (طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۴۲۰)

سال	۱۳۸۷			۱۴۰۲			۱۴۲۰			
منابع	طبقات	ردپای اکولوژیک	ظرفیت زیستی	مازاد/کسری اکولوژیک	ردپای اکولوژیک	ظرفیت زیستی	مازاد/کسری اکولوژیک	ردپای اکولوژیک	ظرفیت زیستی	مازاد/کسری اکولوژیک
زیستی	محصولات کشاورزی	۱۰۱۵۶	۲۳۴۵۶	+۱۳۳۰۰	۱۲۵۳۲	۲۵۱۱۹	+۱۲۵۸۷	۱۴۷۸۱	۲۵۳۳۴	+۱۰۵۴۳
	محصولات مرتعی	۱۱۴۲۱	۲۴۸۷۴	+۱۳۴۵۳	۱۲۷۵۶	۲۵۳۱۷	+۱۲۵۶۱	۱۴۸۵۶	۲۶۱۱۴	+۱۱۲۵۸
	محصولات جنگلی	۱۳۰۶۸	۲۶۸۸۷	+۱۳۸۱۹	۱۴۳۵۷	۲۷۴۳۶	+۱۳۰۷۹	۱۵۶۳۲	۲۷۸۵۶	+۱۲۲۲۴
آبی	آب مصرفی	۱۰۶۵	۹۸۷	-۷۸	۱۰۱۸	۸۶۳	-۱۵۵	۹۳۶	۷۳۴	-۲۰۲

کشاورزی و صنعت، برای شرب،								
انرژی	جذب کربن	۱۱۱۲۴	.	.	۱۳۵۶۸	.	.	۱۴۳۴۵
آلاینده‌ها	انتشار گازهای گلخانه‌ای	۱۰۵۳۶	.	.	۱۳۱۶۷	.	.	۱۴۵۶۸
اراضی ساخته شده	پهنه‌های انسان ساخت	۱۱۰۴۸	.	.	۱۲۸۸۴	.	.	۱۳۲۵۴
کل		۷۴۴۱۸	۷۸۸۵۹	۳۷۱۴۹	۸۰۲۸۲	۷۶۰۸۰	۳۸۰۷۲	۸۸۳۷۲
		۷۲۰۲۸	۳۳۸۲۳					

+ : مازاد اکولوژیک، - : کسری اکولوژیک



شکل ۶. روند تغییرات ردیای اکولوژیک، ظرفیت زیستی و مازاد/کسری اکولوژیک در منطقه (طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۴۲۰)

بررسی اندازه و عمق ردیای اکولوژیک در منطقه

بین سرمایه‌های طبیعی به خود اختصاص داده است که این امر می‌تواند به دلیل وسعت بالای این کاربری در منطقه باشد. از طرفی در طی گذشت زمان جریان‌های سرمایه طبیعی مراتع کم تراکم به دلیل توسعه فعالیت‌های انسانی و تبدیل طبقات پوشش/کاربری اراضی روند کاهنده‌ای را نشان می‌دهد و در مقابل پهنه‌های انسان ساخت هم‌چون مراکز جمعیتی روستایی، شهرک مسکونی، محدوده شهر، تأسیسات و آرامستان از روند افزایشی برخوردار هستند.

همان‌طور که نتایج نشان داد، شاخص اندازه ردیای اکولوژیک طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۴۲۰ افزایش یافته است که این نتایج حاکی از شدت بالای استفاده از منابع دارد (جدول ۷). شاخص عمق پا نیز از روند افزایشی برخوردار است، که نشان دهنده افزایش شدت مصرف سرمایه طبیعی و کاهش انباشت سرمایه در طی سال‌های مورد مطالعه است. هم‌چنین در طی این سال‌ها، مراتع متراکم بیشترین سهم را در

جدول ۷. اندازه ردیای اکولوژیک و عمق ردیای اکولوژیک در منطقه (طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۴۲۰)

سال	۱۳۸۷	۱۴۰۲	۱۴۲۰			
طبقات	اندازه ردیای اکولوژیک	عمق ردیای اکولوژیک	اندازه ردیای اکولوژیک	عمق ردیای اکولوژیک	اندازه ردیای اکولوژیک	عمق ردیای اکولوژیک
جنگل‌های دست کاشت	۶۷۵	۱/۲	۸۳۴	۱/۵۸	۸۸۷	۱/۷۶
جنگل و بیشه کم تراکم	۸۸۴	۴/۸۰	۹۶۸	۵/۳۷	۱۰۲۳	۵/۸۸

۵/۳۶	۸۷۴	۵/۱۸	۸۴۰	۴/۷۳	۸۲۵	جنگل های تنک
۵/۲۴	۱۱۰۸	۵/۰۲	۱۰۲۵	۴/۳۲	۹۲۳	مراتع متراکم
۵/۳۲	۱۱۲۸	۴/۹۸	۱۰۱۱	۴/۲۳	۹۱۲	مراتع نیمه متراکم
۴/۱۱	۸۲۳	۳/۸۷	۵۶۸	۳/۳۷	۴۸۷	مراتع کم تراکم
۵/۹۴	۱۲۰۶	۵/۸۶	۱۱۴۷	۵/۴۱	۱۰۳۲	زراعت آبی
۶/۰۸	۱۲۵۴	۵/۹۴	۱۳۳۲	۵/۸۷	۱۱۵۷	زراعت دیم
۶/۲۵	۱۲۱۸	۵/۸۲	۱۱۸۷	۵/۳۴	۱۰۱۸	اراضی بدون پوشش و بیرون زدگی
۵/۳۶	۹۸۵	۵/۱۳	۹۴۳	۴/۸۵	۸۷۵	اراضی ماندابی با پوشش بومی
۵/۳۲	۹۳۸	۵/۰۹	۹۱۱	۴/۷۲	۷۵۶	اراضی شور و نمکزار
۵/۶۷	۱۱۳۲	۵/۲۰	۱۰۲۱	۴/۸۳	۸۷۶	زمین های شور و مرطوب
۵/۱۱	۱۱۲۴	۴/۹۶	۱۰۸۸	۴/۵۸	۸۳۶	زمین های کویری
۵/۲۲	۱۱۶۷	۴/۸۴	۱۱۴۲	۴/۲۸	۹۷۲	سطوح آبی
۷/۴۷	۱۳۶۸	۷/۳۶	۱۳۵۲	۶/۲۰	۱۲۴۸	مراکز جمعیتی روستایی
۷/۸۵	۱۴۵۶	۷/۵۴	۱۴۲۳	۶/۴۲	۱۳۵۶	شهرک مسکونی
۸/۰۵	۱۴۳۲	۷/۷۲	۱۳۹۶	۶/۸۵	۱۳۷۸	محدوده شهر
۷/۷۲	۱۴۱۰	۷/۶۴	۱۳۸۸	۶/۷۲	۱۳۶۲	تاسیسات
۷/۵۶	۱۳۸۴	۷/۲۸	۱۳۵۶	۶/۰۵	۱۳۰۸	آرامستان

بررسی فشار اکولوژیک و پایداری اکولوژیک در منطقه

مطابق نتایج به دست آمده شاخص فشار اکولوژیک طی سال های ۱۳۸۷-۱۴۲۰، در مجموعه شهری تهران- البرز افزایش یافته است، در حالی که شاخص پایداری اکولوژیک روند کاهشی را نشان می دهد (جدول ۸). از این رو، نتایج به دست آمده حاکی از افزایش فشار

اکولوژیک و کاهش پایداری در منطقه است. در بین کاربری های اراضی نیز مراتع متراکم دارای بیشترین پایداری و در مقابل مراتع کم تراکم با گذشت زمان، وضعیت ناپایداری را نشان می دهد و همچنین از روند کاهنده ای برخوردار است.

جدول ۸. وضعیت پایداری اکولوژیک به تفکیک طبقات پوشش/ کاربری اراضی در منطقه (طی سال های ۱۳۸۷-۱۴۲۰)

سال	۱۳۸۷	۱۴۰۲	۱۴۲۰	سال	۱۳۸۷	۱۴۰۲	۱۴۲۰
طبقات کاربری	تعداد اکولوژیک	فشار اکولوژیک	پایداری اکولوژیک	تعداد اکولوژیک	فشار اکولوژیک	پایداری اکولوژیک	تعداد اکولوژیک
جنگل های دست کاشت	۰/۶۷	۰/۵۸	۰/۷۵	۰/۵۲	۰/۷۲	۰/۵۷	۰/۴۸
جنگل و بیشه کم تراکم	۰/۷۲	۰/۴۳	۰/۶۵	۰/۶۴	۰/۸۱	۰/۶۴	۰/۵۸
جنگل های تنک	۰/۵۸	۰/۶۵	۰/۵۸	۰/۴۸	۰/۸۶	۰/۵۲	۰/۴۷
مراتع متراکم	۱/۲۳	۰/۳۶	۰/۹۴	۱/۱۱	۰/۴۵	۰/۸۷	۰/۷۳
مراتع نیمه متراکم	۱/۳۸	۰/۳۰	۰/۹۸	۱/۲۴	۰/۴۲	۰/۹۰	۰/۸۵
مراتع کم تراکم	۰/۳۸	۰/۹۰	۰/۴۲	۰/۲۸	۰/۹۸	۰/۳۳	۰/۲۷
زراعت آبی	۰/۵۴	۰/۶۳	۰/۵۲	۰/۴۳	۰/۷۰	۰/۴۲	۰/۳۳
زراعت دیم	۰/۴۶	۰/۵۸	۰/۴۲	۰/۳۲	۰/۴۷	۰/۳۶	۰/۲۶
اراضی بدون پوشش	۱/۱۸	۰/۳۸	۰/۹۰	۱/۰۲	۰/۴۵	۰/۸۴	۰/۷۵

و بیرون زدگی	۰/۶۲	۰/۵۸	۰/۵۴	۰/۵۶	۰/۶۷	۰/۴۸	۰/۴۴	۰/۷۲	۰/۴۳
اراضی ماندابی با پوشش بومی	۰/۵۶	۰/۶۳	۰/۵۰	۰/۴۲	۰/۷۰	۰/۴۲	۰/۳۸	۰/۷۵	۰/۳۵
اراضی شور و نمکزار	۰/۶۸	۰/۵۲	۰/۵۸	۰/۵۲	۰/۶۵	۰/۵۱	۰/۴۴	۰/۷۴	۰/۴۱
زمین‌های شور و مرطوب	۰/۷۰	۰/۵۸	۰/۴۸	۰/۶۲	۰/۶۷	۰/۴۲	۰/۵۵	۰/۷۳	۰/۳۶
زمین‌های کویری	۰/۵۹	۰/۶۷	۰/۵۵	۰/۵۱	۰/۷۴	۰/۴۰	۰/۴۸	۰/۸۳	۰/۳۲
سطوح آبی	۰/۴۳	۰/۹۰	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۹۵	۰/۲۸	۰/۲۸	۱/۱۵	۰/۲۴
مراکز جمعیتی روستایی	۰/۴۸	۰/۸۷	۰/۳۴	۰/۳۶	۰/۹۰	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۹۷	۰/۱۸
شهرک مسکونی	۰/۳۵	۰/۹۴	۰/۲۵	۰/۲۷	۰/۹۸	۰/۱۸	۰/۲۳	۱/۲۴	۰/۱۱
محدوده شهر	۰/۳۸	۰/۸۹	۰/۲۸	۰/۳۲	۰/۹۳	۰/۲۴	۰/۲۷	۰/۹۷	۰/۱۹
تاسیسات	۰/۴۲	۰/۷۵	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۸۲	۰/۳۰	۰/۲۶	۰/۹۲	۰/۲۷
آرامستان									

+ : مازاد اکولوژیک، - : کسری اکولوژیک

است. از طرفی در بین کاربری‌های موجود، محدوده شهری و تأسیسات نشان‌دهنده مازاد ردپا و افزایش هزینه ظرفیت زیستی در منطقه است.

در ادامه به بررسی شاخص‌های انباشت سرمایه به جریان، نسبت اشغال جریان و همچنین مازاد جریان سرمایه طبیعی در محدوده مورد مطالعه پرداخته شد (جدول ۹). مطابق نتایج به‌دست آمده، استفاده از انباشت سرمایه به جریان طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۴۲۰ افزایش یافته

جدول ۹. شاخص‌های انباشت سرمایه به جریان، نسبت اشغال جریان و مازاد جریان سرمایه طبیعی در منطقه (طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۴۲۰)

سال	۱۳۸۷	۱۴۰۲	۱۴۲۰	سال	۱۳۸۷	۱۴۰۲	۱۴۲۰
طبقات	انباشت سرمایه به جریان	نسبت اشغال جریان	مازاد جریان سرمایه طبیعی	انباشت سرمایه به جریان	نسبت اشغال جریان	مازاد جریان سرمایه طبیعی	طبقات
جنگل‌های دست کاشت	۳/۸۴	۱۰۰	۰	۴/۱۱	۱۰۰	۰	۴/۸۵
جنگل و بیشه کم تراکم	۳/۵۴	۰/۹۱	۰	۴/۰۵	۰/۹۶	۰	۴/۲۳
جنگل‌های تنک	۳/۲۶	۰/۸۷	۰	۳/۸۷	۰/۹۲	۰	۴/۱۱
مراعات متراکم	۴/۴۸	۱۰۰	۰	۴/۸۷	۱۰۰	۰	۴/۹۴
مراعات نیمه متراکم	۴/۲۳	۰/۹۸	۰	۴/۴۵	۱۰۰	۰	۴/۵۶
مراعات کم تراکم	۴/۱۱	۰/۸۵	۰	۴/۳۳	۱۰۰	۰	۴/۶۵
زراعت آبی	۳/۸۷	۰/۷۵	۰/۴۲	۳/۹۶	۰/۸۴	۰/۵۲	۴/۲۳
زراعت دیم	۳/۶۲	۰/۷۱	۰/۳۸	۳/۷۲	۰/۷۹	۰/۴۶	۳/۸۵
اراضی بدون پوشش و بیرون زدگی	۲/۳۴	۰/۵۲	۰	۲/۴۷	۰/۶۱	۰	۲/۷۸
اراضی ماندابی با پوشش بومی	۱/۵۶	۰/۱۵	۰/۲۵	۱/۷۴	۱/۶۵	۰/۳۲	۱/۹۲

۰/۴۷	۲/۱۱	۲/۳۴	۰/۳۸	۱/۹۴	۲/۰۲	۰/۲۸	۰/۲۱	۱/۸۷	اراضی شور و نمکزار
۰/۶۳	۲/۸۴	۲/۵۶	۰/۵۳	۲/۷۶	۲/۶۴	۰/۳۸	۰/۴۲	۲/۵۲	زمین‌های شور و مرطوب
۰/۷۳	۳/۲۳	۳/۱۲	۰/۶۴	۳/۰۵	۲/۹۴	۰/۲۳	۰/۵۶	۲/۸۷	زمین‌های کویری
۰	۱۰۰	۴/۵۸	۰	۱۰۰	۴/۴۲	۰	۱۰۰	۴/۳۰	سطوح آبی
۰/۶۳	۰/۷۸	۱/۹۴	۰/۵۸	۰/۷۲	۱/۸۷	۰/۴۵	۰/۶۵	۱/۲۳	مراکز جمعیتی روستایی
۰/۷۲	۰/۹۳	۲/۵۸	۰/۶۷	۰/۸۶	۲/۴۷	۰/۵۸	۰/۷۰	۲/۳۶	شهرک مسکونی
۰/۸۴	۰/۹۸	۳/۳۴	۰/۷۵	۰/۹۰	۳/۲۶	۰/۶۳	۰/۸۴	۲/۸۷	محدوده شهر
۰/۹۲	۱/۰۵	۳/۴۵	۰/۸۷	۰/۹۶	۳/۳۶	۰/۷۰	۰/۸۸	۳/۱۱	تاسیسات
۰	۰	۰/۵۵	۰	۰/۶۲	۰	۰	۰/۴۸	۰	آرامستان

بحث و نتیجه‌گیری

منابع در دسترس انسان برای بهره‌برداری بسیار محدود است و همین منابع محدود روز به روز در اثر استفاده بی‌رویه و نادرست در حال تخریب و آلوده شدن هستند. به عبارتی محیط‌زیست توان محدودی برای استفاده انسان از بسترهای طبیعی دارد. در مجموعه شهری تهران-البرز با توجه به تقاضای بالا به تبدیل کاربری اراضی و توسعه فعالیت‌های صنعتی و سکونتگاهی، افزایش تهدید زمین‌های کشاورزی و منابع طبیعی، تولید انواع زباله‌ها و پسماندهای شهری، تشدید روند آلودگی‌ها و افزایش فشار بهره‌وری از منابع آب زیرزمینی، بنابراین لزوم بررسی روند تغییرات پوشش/کاربری اراضی و پیش‌بینی تداوم روند این تغییرات در سال‌های آتی را ضروریست. براین اساس، در مطالعه حاضر ابتدا به بررسی روند تغییرات پوشش/کاربری اراضی طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۴۰۲ و همچنین پیش‌بینی و مدل‌سازی این تغییرات در سال ۱۴۲۰ پرداخته شد. در ادامه به محاسبه ردپای اکولوژیک، ظرفیت زیستی و مازاد/کسری اکولوژیک و بررسی میزان عملکرد و توازن اکولوژیک در این منطقه اقدام شد. در نهایت فشار و پایداری اکولوژیک نیز مورد بررسی قرار گرفت.

مطابق نتایج، طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۴۰۲، بیشترین روند تغییرات کاهشی مربوط به مراتع کم تراکم با مساحت ۱۲۲۰/۷- کیلومترمربع است، در حالی که بیشترین تغییرات افزایشی به مراتع نیمه متراکم با وسعت ۱۲۲۱/۲ کیلومترمربع اختصاص یافته است. در مجموعه شهری تهران-البرز طی سال‌های مورد مطالعه، نزدیک به ۲۹۰۵/۲ کیلومترمربع از طبقات پوشش/کاربری اراضی روند کاهشی داشته است، که ۱۵/۴۱ درصد از مساحت کل منطقه را به خود اختصاص داده است. این روند نشان‌دهنده توسعه بی‌رویه شهرنشینی و تخریب و تبدیل منابع طبیعی در طی دهه‌های اخیر است. شرایط وضع موجود حاکی از رقابت بین کاربری‌های سبز و غیرسبز در این منطقه می‌باشد

که کاهش مستمر پوشش‌های سبز بیش از همه تحت تأثیر فعالیت‌های مخرب انسان است. علاوه بر این، طبقات پوشش/کاربری اراضی در این منطقه، با محدودیت‌هایی از جمله خشکی و شوری اراضی منطقه، توپوگرافی، فرسایش و تخریب خاک و همچنین افزایش تراکم جمعیت، رشد اراضی ساخته شده و تغییرات کاربری اراضی می‌باشد.

همان‌طور که نتایج نشان داد در مجموعه شهری تهران-البرز بیشترین روند تغییرات کاهشی در سال ۱۴۲۰، مربوط به مراتع کم متراکم با مساحت ۲۶۶۱ کیلومترمربع می‌باشد، در حالی که بیشترین روند افزایشی مربوط به مراتع نیمه متراکم با مساحت ۴۵۴۸ کیلومترمربع است. این روند نشان‌دهنده سرعت توسعه شهرنشینی و تبدیل طبقات پوشش/کاربری اراضی در این مجموعه شهری است. در این راستا، نتایج مطالعه فهمی^۱ و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که عمده‌ترین اثرات توسعه شهرنشینی، افزایش روند تغییرات پوشش/کاربری اراضی در محدوده‌های شهری است. همچنین الدوساری^۲ و همکاران (۲۰۲۳) نیز بیان کردند که گسترش سریع شهرها و رشد جمعیت، تقاضا برای تغییر و تبدیل کاربری اراضی در این مناطق افزایش یافته است.

بررسی عملکرد و هم‌ارزی بین طبقات پوشش/کاربری اراضی منطقه نشان داد که عوامل هم‌ارزی نسبتاً ثابت، درحالی که عوامل عملکرد به‌طور قابل توجهی در نوسان است. بدین ترتیب در بین کاربری‌های موجود، مراتع کم تراکم بیشترین ضریب هم‌ارزی را به خود اختصاص داده است و در طی این دوره، بیشترین کاهش سطح را نشان می‌دهند. در حالی که، مراتع نیمه متراکم در بین کاربری‌ها، بیشترین ضریب عملکرد را دارا می‌باشد. در مطالعه سبحانی و

1. Fahmy

2. Al-Dousari

طرفی در بین کاربری‌های موجود، محدوده شهری و تأسیسات نشان‌دهنده مازاد ردپا و افزایش هزینه ظرفیت زیستی در منطقه است. نتایج به‌دست آمده نشان داد که افزایش رشد جمعیت و توسعه سریع شهرنشینی منجر به تغییرات قابل ملاحظه‌ای در توسعه و تغییرات طبقات پوشش/کاربری اراضی در مجموعه شهری تهران-البرز شده است. همچنین تداوم روند این تغییرات تا سال ۱۴۰۲، منجر به افزایش ردپای اکولوژیک و کاهش سرمایه طبیعی در این محدوده می‌شود. بنابراین تحقق توسعه پایدار و حفاظت از منابع طبیعی و همچنین برقراری تعادل بین مصرف منابع توسط انسان و جذب ضایعات تولید شده به‌وسیله طبیعت، مستلزم عملکرد برنامه‌ریزان و مسئولان در حفظ و حمایت از محیط زیست در این محدوده است، به گونه‌ای که در راستای حفظ منابع با ارزش زیستی آن تلاش نمایند و وضعیت محیط اکولوژیک در این منطقه را ارتقاء بخشند.

References

- Abadi, Z., & Karimian Jezi, S. (2019). Estimation of direct energy footprint (fossil fuels in Tehran). Second International Conference on Eco-Energy. (in Persian)
- Al-Dousari, A. E., Mishra, A., & Singh, S. (2023). Land use land cover change detection and urban sprawl prediction for Kuwait metropolitan region, using multi-layer perceptron neural networks (MLPNN). The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 26(2), 381-392.
- Arkhi, S. & Esfahani, M. (2019). Forecasting land use changes using multi-temporal images and the Marko chain model (Case Study: Ilam city), Journal of Geography and Territorial Spatial Arrangement (GTSA), 9(30), 95-112.
- Aslami, F., Ghorbani, A., Sobhani, B. & Panahandeh, M. (2015). Comparing artificial neural network, support vector machine and object-based methods in preparation land use/cover maps using landSat-8 images, Journal of RS & GIS Techniques in Natural Resources, 6(3), 1-14. magiran.com/p1488940.
- Bi, M., Yao, C., Xie, G., Liu, J., & Qin, K. (2021). Improvement and application of the three-dimensional ecological footprint model. Ecological Indicators, 125, 107480.

همکاران (۲۰۲۲) نیز نتایج نشان داد که در بین طبقات پوشش/کاربری اراضی، بیشترین روند تغییرات و کاهش سطح تراکم مربوط به مراتع در این منطقه است.

بررسی ردپای اکولوژیک، ظرفیت زیستی و مازاد/کسری اکولوژیک در منطقه حاکی از آن است که حدود ۸۰ درصد مصرف منابع مربوط به انرژی است که در این میان سوخت‌های فسیلی بیش‌ترین درصد را به خود اختصاص داده‌اند. پس از آن محدوده شهر و تأسیسات به‌ترتیب بیشترین ردپای کربن را در بین طبقات کاربری اراضی نشان می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که ردپای اکولوژیک در مجموعه شهری تهران-البرز (طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۴۲۰) دارای روند افزایشی، ظرفیت زیستی و مازاد اکولوژیک نیز دارای روند کاهشی هستند. در این راستا عابدی و کریمیان جزی^۱ (۱۳۹۸) نیز بیان کردند که بیشترین مصرف منابع در کلان شهرها به ویژه محدوده استان تهران و البرز مربوط به انرژی و سوخت‌های فسیلی است.

همان‌طور که نتایج نشان داد، شاخص اندازه ردپای اکولوژیک طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۴۲۰ افزایش یافته است که این نتایج حاکی از شدت بالای استفاده از منابع دارد. شاخص عمق پا نیز از روند افزایشی برخوردار است، که نشان دهنده افزایش شدت مصرف سرمایه طبیعی و کاهش انباشت سرمایه در طی سال‌های مورد مطالعه است. میر^۲ و همکاران (۲۰۲۲) نیز بیان کردند که شاخص عمق پا با افزایش شدت استفاده از منابع روند افزایشی خواهد داشت و در مقابل انباشت سرمایه کاهش می‌یابد.

در مجموعه شهری تهران-البرز طی گذشت زمان جریان‌های سرمایه طبیعی مراتع کم تراکم به‌دلیل توسعه فعالیت‌های انسانی و تبدیل طبقات پوشش/کاربری اراضی روند کاهنده‌ای را نشان می‌دهد و در مقابل پهنه‌های انسان ساخت هم‌چون مراکز جمعیتی روستایی، شهرک مسکونی، محدوده شهر، تأسیسات و آرامستان از روند افزایشی برخوردار هستند. مطالعه روزبهانی^۳ و همکاران (۱۴۰۰) نیز نشان داد که طی توسعه فعالیت‌های انسانی و توسعه شهرنشینی در مناطق ۲۲ گانه شهر تهران، پوشش‌های سبز و منابع طبیعی به مناطق مسکونی، شهری و مراکز جمعیتی تبدیل شده است.

مطابق نتایج به‌دست آمده شاخص فشار اکولوژیک طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۴۲۰، در مجموعه شهری تهران-البرز افزایش یافته است، در حالی‌که شاخص پایداری اکولوژیک روند کاهشی را نشان می‌دهد. از این‌رو، نتایج به‌دست آمده حاکی از افزایش فشار اکولوژیک و کاهش پایداری در منطقه است. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از انباشت سرمایه به جریان طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۴۲۰ افزایش یافته است. از

1. Abadi and Karimian Jezi
2. Mir
3. Roozbahani

- Danehkar, A., & Sobhani, P. (2024). Ecological potential evaluation and balance measurement of macro-land use in the urban set of Tehran-Alborz. *Geographical Planning of Space*, 14(4), 37-57. (in Persian)
- Dang, X., Wu, Y., Liu, G., Yang, Q., Yu, X., & Jia, Y. (2018). Spatial-temporal changes of ecological footprint in the Loess Plateau after ecological construction between 1995 and 2010. *Geogr. Res.*, 37(4), 761-771.
- Dong, J., Zhang, Z., Zhang, H., Gao, F., Zhang, W., & Gong, W. (2021). Sustainable utilization and driving mechanism of natural capital in ecologically fragile areas: a case study of Ningxia. *China Popul. Resour. Environ.*, 2, 162-173.
- Fahmy, A. H., Abdelfatah, M. A., & El-Fiky, G. (2023). Investigating land use land cover changes and their effects on land surface temperature and urban heat islands in Sharqiyah Governorate, Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 26(2), 293-306.
- Galli, A., Iha, K., Pires, S. M., Mancini, M. S., Alves, A., Zokai, G., & Wackernagel, M. (2020). Assessing the ecological footprint and biocapacity of Portuguese cities: Critical results for environmental awareness and local management. *Cities*, 96, 102442.
- Genta, C., Favaro, S., Sonetti, G., Fracastoro, G. V., & Lombardi, P. (2022). Quantitative assessment of environmental impacts at the urban scale: the ecological footprint of a university campus. *Environment, Development and Sustainability*, 24(4), 5826-5845.
- Javan, K., Altaee, A., BaniHashemi, S., Darestani, M., Zhou, J., & Pignatta, G. (2024). A review of interconnected challenges in the water-energy-food nexus: Urban pollution perspective towards sustainable development. *Science of the Total Environment*, 912, 169319.
- Kovshun, N., Doroshenko, O., Zhydyk, I., Nalyvaiko, N., Vashai, Y., & Skakovska, S. (2023). Global measurement of ecological footprint in the context of sustainable development. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1269(1), 012032.
- Lazarus, E., Lin, D., Martindill, J., Hardiman, J., Pitney, L., & Galli, A. (2015). Biodiversity loss and the ecological footprint of trade. *Diversity*, 7(2), 170-191.
- Li, X., Li, S., Li, C., Shi, J., & Wang, N. (2023). The impact of high-quality development on ecological footprint: An empirical research based on STIRPAT model. *Ecological Indicators*, 154, 110881.
- Li, X., Xiao, L., Tian, C., Zhu, B., & Chevallier, J. (2022). Impacts of the ecological footprint on sustainable development: Evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 352, 131472.
- Lin, D., Galli, A., Borucke, M., Lazarus, E., Grunewald, N., Martindill, J., & Wackernagel, M. (2015). Tracking supply and demand of biocapacity through ecological footprint accounting. *Sustainability Assessment of Renewables Based Products: Methods and Case Studies*, 179-199.
- Liu, T., Wang, H. Z., Wang, H. Z., & Xu, H. (2021). The spatiotemporal evolution of ecological security in China based on the ecological footprint model with localization of parameters. *Ecological Indicators*, 126, 107636.
- Long, X., Yu, H., Sun, M., Wang, X. C., Klemeš, J. J., Xie, W., & Wang, Y. (2020). Sustainability evaluation based on the Three-dimensional Ecological Footprint and Human Development Index: A case study on the four island regions in China. *Journal of Environmental Management*, 265, 110509.
- Lu, D., Mausel, P., Batistella, M., Moran, E. (2004). Comparison of land-cover classification methods in the Brazilian Amazon basin, Photogrammetric

- Engineering & Remote Sensing, 70(7), 723-731.
<http://dx.doi.org/10.14358/PERS.70.6.723>
- Mancini, M. S., Galli, A., Coscieme, L., Niccolucci, V., Lin, D., Pulselli, F. M., & Marchettini, N. (2018). Exploring ecosystem services assessment through Ecological Footprint accounting. *Ecosystem Services*, 30, 228-235.
- Mir, A., Sobhani, P., & Sayahnia, R. (2022). Assessment of the ecological footprint associated with consumption resources and urbanization development in Sistan and Baluchestan province, Iran. *Results in Engineering*, 16, 100673.
- Monfreda, C., Wackernagel, M., & Deumling, D. (2004). Establishing national natural capital accounts based on detailed ecological footprint and biological capacity assessments. *Land use policy*, 21(3), 231-246.
- Nazari, M., & Kalantari, M. (2023). Investigating the Factors Affecting the Ecological Footprint of Sari City. *Geography and Environmental Planning*, 34(2), 17-26. (in Persian)
- Nuissl, H., & Siedentop, S. (2021). Urbanisation and land use change. Sustainable land management in a European context: a co-design approach, 75-99.
- Ozdamar, Z., & Yigit, M. G. (2024). Determining ecological footprints for sustainable cities; sample of Sakarya city. *Environment, Development and Sustainability*, 1-18.
- Paymanfar, S. (2023). Evaluating the effect of master urban plans on the region sustainability using the ecological footprint method; Case study: Boroujerd city. *Journal of Iranian Architecture & Urbanism (JIAU)*, 14(1), 73-86. (in Persian)
- Roobahani, M., Janbaz Ghobadi, G., Motevalli, S., & Azimi Amoli, J. (2022). Detection and District Analysis of Urban Green Space Changes in The 22 Districts of Tehran. *Journal of Urban Ecology Researches*, 12(25), 37-58. (in Persian)
- Sang, L., Zhang, C., Yang, J., Zhu, D., & Yun, W. (2011). Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA-Markov model, *Mathematical and Computer Modelling*, 54(4), 938-943.
- Sarwar, N., Junaid, A., & Alvi, S. (2024). Impact of urbanization and human development on ecological footprints in OECD and non-OECD countries. *Heliyon*, 10(19).
- Shamaee, S. H., Yousefi, H., & Zahedi, R. (2024). Assessing urban development indicators for environmental sustainability. *Discover Sustainability*, 5(1), 341.
- Sobhani, P., & Esmaeilzadeh, H. (2021). Evaluation and Analysis of Land Use Change Trends in Protected Areas (Case Study: Lar National Park). *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 13(2), 75-92. (in Persian)
- Sobhani, P., Esmaeilzadeh, H., & Mostafavi, H. (2021). Simulation and impact assessment of future land use and land cover changes in two protected areas in Tehran, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 75, 103296.
- Sobhani, P., Esmaeilzadeh, H., Barghjelveh, S., Sadeghi, S. M. M., & Marcu, M. V. (2022). Habitat integrity in protected areas threatened by LULC changes and fragmentation: A case study in Tehran province, Iran. *Land*, 11(1), 6.
- Statistical Center of Iran. (2016). Results of the General Population and Housing Census. (in Persian)
- Wassie, S. B. (2020). Natural resource degradation tendencies in Ethiopia: a review. *Environmental systems research*, 9(1), 1-29.
- WCED. (1987). Report of the World Commission on Environment and Development.
- Wu, F., Yang, X., Shen, Z., Bian, D., & Babuna, P. (2021). Exploring sustainability and decoupling effects of natural capital utilization in China: Evidence from a provincial three-dimensional ecological

- footprint. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126486.
- Xie, H., Sun, Q., & Song, W. (2024). Exploring the Ecological Effects of Rural Land Use Changes: A Bibliometric Overview. *Land*, 13(3), 303.
- Yadav, M. (2023). Assessment of Urban Growth and Ecological Sustainability: Insights from Mumbai, India. *Assessment*.
- Yang, Y., & Hu, D. (2018). Natural capital utilization based on a three-dimensional ecological footprint model: A case study in northern Shaanxi, China. *Ecological indicators*, 87, 178-188.
- Yang, Y., & Hu, D. (2018). Natural capital utilization based on a three-dimensional ecological footprint model: A case study in northern Shaanxi, China. *Ecological indicators*, 87, 178-188.
- Zadehdabagh, N., Monavari, S. M., Kargari, N., Taghavi, L., & Pirasteh, S. (2022). Sustainability of agroecosystems by indices: A comparative study between indicators of ecological footprint sustainability and emergy analysis; a case study in Dez catchment, Iran. *Ecological Modelling*, 474, 110165.
- Zhang, L., Huettmann, F., Liu, S., Sun, P., Yu, Z., Zhang, X., & Mi, C. (2020). Classification and regression with random forests as a standard method for presence-only data SDMs: a future conservation example using China tree species. *Ecological Informatics*, 52, 46-56.
- Zhu, L., Zhang, H., Liao, H., & Peng, R. (2020). Evaluation of ecological sustainability in Chongqing, China based on 3D ecological footprint model. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 15(1), 89-96.