

Impacts of urban expansion on spatio-temporal patterns of carbon storage ecosystem service in Bandar Abbas Watershed using InVEST software

Javid Jahandari¹, Rokhshad Hejazi^{2*}, Seyed Ali Jozi³, Abbas Moradi⁴

¹ Ph. D. Student, Department of Environmental Management, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran

² Assistant Professor, Department of Environmental Management, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran

³ Professor, Department of Environmental Management, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Geographical Science, Faculty of Humanities, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran

Abstract

Introduction

Urban development and land use pattern changes strongly affect the ecosystem service of carbon sequestration and storage. To integrate the concept of this climate regulation service into land use issues, we need to have information about its spatio-temporal distribution, so that with the help of mapping and quantification, protection and development sites can be selected with the continued provision of this service by the ecosystem. The current research was conducted with the aim of investigating the process of carbon sequestration and carbon storage ecosystem service changes in the process of urban growth and development and its valuation to improve the spatial planning of the land.

Materials and Methods

The study area is the coastal strip of Bandar Abbas City with a coastline length of 69 km. To comprehensively conduct the research, the smallest hydrological unit in the region where this city is located was selected which included three sub-watersheds. The total area of the region is equal to 272806 ha. At first, the land cover-land use map for the years 2000 and 2020 was prepared, and the future changes were predicted with different scenarios. Then, using the InVEST carbon storage and sequestration model, spatial distribution and changes in carbon storage and economic value were obtained.

Results and Discussion

The results showed that the largest area of the study watershed is the barren and range lands, which during the study period have decreased and man-made uses, water levels, and agriculture have increased. Modeling calculations showed the carbon sequestration capacity from 3741321.08 t in 2000 to 3763695.92 t in 2020 with an increase of 22374.82 t positive carbon sequestration. The reason for that was the growth of agricultural lands. Correspondingly, the economic value of this increase in deposition power during the study period was calculated as 874393.08 \$.

Conclusion

It is expected that with the future usage scenarios, the positive growth of sequestration and subsequent financial benefit in terms of carbon sequestration will continue. But various factors can cause changes or disturbances in ecosystems and ultimately in ecological functions, that climate change is one of the most important factors and causes changes in the structure and functioning of ecosystems. As a result, services should be checked depending on climatic factors and land use changes, because the influence of climatic factors creates new states of the possible future situation, and uncertainty of land use scenarios and conflicts between ecosystem services can cause a change in the nature and change in the direction and size of services being provided by the ecosystem. Along with quantification, the economic value of service can provide valuable spatial principles for urban development and environmental awareness.

Keywords: Ecosystem services, spatial planning, Carbon sequestration, Sustainable urban development, InVEST software

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: rokshad47@yahoo.com

Citation: Jahandari, J., Hejazi, R., Jozi, S.A., & Moradi, A. (2022). Impacts of urban expansion on spatio-temporal patterns of carbon storage ecosystem services in Bandar Abbas Watershed using InVEST software. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(4), 91-106.

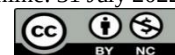
DOI: 10.22098/MMWS.2022.11069.1097

DOR: 20.1001.1.27832546.1401.2.4.9.0

Received: 28 June 2022, Received in revised form: 31 July 2022, Accepted: 31 July 2022, Published online: 31 July 2022
Water and Soil Management and Modeling, Year 2022, Vol. 2, No. 4, pp. 91-106

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





اثرات توسعه شهری بر الگوهای مکانی-زمانی خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن در حوزه آبخیز بندرعباس با نرم افزار InVEST

جاوید جهانداری^۱، رخشاد حجازی^{۲*}، سید علی جوزی^۳، عباس مرادی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مدیریت محیط زیست، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران
^۲ استادیار، گروه مدیریت محیط زیست، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران
^۳ استاد، گروه مدیریت محیط زیست، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران
^۴ استادیار، گروه علوم جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

چکیده

توسعه شهری و تغییرات الگوی کاربری زمین به شدت بر خدمت اکوسیستمی ترسیب و ذخیره کربن اثر می گذارد. برای تلفیق مفهوم این خدمت تنظیم اقلیمی در مباحث کاربری اراضی، کسب اطلاعات کاربردی از توزیع مکانی آن ضروری است، تا بتوان با کمک پهنه بندی و کمی سازی، محل های حفاظت و توسعه را با استمرار تدارک این خدمت توسط اکوسیستم انتخاب نمود. بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی روند تغییرات خدمات اکوسیستمی ترسیب و ذخیره کربن در روند رشد و توسعه شهری و ارزش گذاری آن در حوزه آبخیزی واقع در شهر بندرعباس جهت بهبود برنامه ریزی مکانی سرزمین انجام شده است. در ابتدا نقشه پوشش و کاربری برای سال های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ تهیه و همچنین پیش بینی تغییرات آتی با سناریوهای مختلف انجام شد. سپس با استفاده از مدل ذخیره سازی و ترسیب کربن InVEST، توزیع فضایی و تغییرات در ذخیره سازی و ارزش اقتصادی کربن به دست آمد. نتایج نشان داد بیشترین مساحت منطقه مورد مطالعه مناطق بایر و مرتع است که طی دوره مورد مطالعه کاهش و کاربری های انسان ساخت، پهنه های آبی و کشاورزی افزایش یافته اند. محاسبات مدل سازی، توان ترسیب کربن را از ۳۷۴۱۳۲۱/۰۸ تن در سال ۲۰۰۰ به ۳۷۶۳۶۹۵/۹۲ تن در سال ۲۰۲۰ با افزایش ۲۲۳۷۴/۸۲ تن و ترسیب مثبت کربن نشان داد، دلیل آن رشد زمین های کشاورزی بوده است. همچنین ارزش اقتصادی این افزایش توان ترسیب طی دوره مورد مطالعه به میزان ۸۷۴۳۹۳/۰۸ دلار محاسبه شد. با توجه به غالبیت اراضی بایر و سناریوهای تغییرات کاربری آینده، اهمیت اولویت دادن به توسعه محیط زیستی در طراحی و شهرسازی پایدار با ادغام مفهوم خدمات اکوسیستم ضرورت دارد. کمی سازی میزان تغییرات خدمت ترسیب کربن و ارزش گذاری اقتصادی آن و تحلیل تضاد و هم افزایی با سایر خدمات اکوسیستمی اطلاعات مفیدی در اختیار برنامه ریزان قرار می گیرد.

واژه های کلیدی: برنامه ریزی فضایی، ترسیب کربن، توسعه پایدار شهری، خدمات اکوسیستمی، نرم افزار InVEST

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: rokshad47@yahoo.com

استاد: جهانداری، ج.، حجازی، ر.، جوزی، س.ع.، و مرادی، ع. (۱۴۰۱). اثرات توسعه شهری بر الگوهای مکانی-زمانی خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن در حوزه آبخیز بندرعباس با نرم افزار InVEST. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۲(۴)، ۹۱-۱۰۶.

DOI:10.22098/MMWS.2022.11069.1097

DOR: 20.1001.1.27832546.1401.2.4.9.0

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۷، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۹، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۵/۰۹



مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۱، دوره ۲، شماره ۴، صفحه ۹۱ تا ۱۰۶
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسندگان

۱- مقدمه

توسعه شهری یک فرآیند تغییر کاربری اراضی، الگوی تغییر آن و نحوه توزیع و پراکنش فضایی آن، بخش مهمی از اندیشه‌های برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری‌های شهری و منطقه‌ای را به خود اختصاص داده است (Beriasolice, 2010). این فرآیند به اندازه‌ای دارای اهمیت است که برخی از برنامه‌ریزان شهری در کشورهای پیشرفته آن را مساوی با برنامه‌ریزی شهری می‌دانند (Hekmatnia and Mousavi, 2017). با توجه به این که سیستم‌های ساحلی، شهری‌ترین سیستم در مقایسه با سایر سیستم‌ها هستند (Marsousi and Sadat Hosseini, 2008)، این روند آغازگر طرح مباحثی مهم در لزوم تغییر دیدگاه مدیریتی و فضایی در نواحی ساحلی شده و توسعه پایدار را در صدر الگوهای برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست در این شهرها قرار داده است. به دنبال آن رویکردها و تکنیک‌هایی که به مدیریت این چالش‌ها و ناسازگاری‌ها در شهرهای ساحلی به شکلی پایدار می‌پردازند در کانون توجه قرار گرفته است (Samhoury and Levin, 2012). پدیده توسعه شهری در یک کشور را نباید با رشد شهری اشتباه گرفت، رشد نقاط شهری به عنوان یک مقوله کمی، خود را به دو صورت افزایش در اندازه جمعیتی شهرها و گسترش در مقیاس کالبدی آن‌ها نشان می‌دهد، در حالی که پدیده توسعه شهری، نمایانگر توزیع بهینه دو عامل یکی تعداد شهرها در یک سلسله نظام مراتبی و دیگری امکانات و تسهیلات زندگی و موقعیت‌های اشتغال و شکوفایی اقتصادی- اجتماعی در مراکز شهری است (Karbasi et al., 2013).

مناطق ساحلی به دلیل دسترسی به آب و مجاورت با زمین‌های حاصلخیز به شکلی تاریخی ارائه‌دهنده امکانات مناسبی برای توسعه بوده‌اند. جذب جمعیت در این مناطق هیچ‌گاه متوقف نشده و گسترش شهرنشینی در آن بسیار سریع است (IHDP, 2007). بی‌توجهی به پایداری ساختار و فرایندهای طبیعی مناطق ساحلی تضمینی بر پایداری تولیدات انسانی نخواهد بود. با توسعه سریع دانش پایداری که بر رابطه پویا میان طبیعت و جامعه تمرکز می‌کند، گرایش‌های همسو با آن شکل گرفت و با انتشار "ارزیابی اکوسیستم هزاره" در سال ۲۰۰۵ خدمات اکوسیستم و رابطه آن با سلامت انسان به جریان اصلی اکولوژی تبدیل شد (Wu and David, 2002). بر اساس این گزارش خدمات اکوسیستمی منفعی هستند که انسان‌ها از اکوسیستم‌ها دریافت می‌کنند، و این نهاد ارزیابی خدمات اکوسیستم را در چهار دسته عمده تقسیم کرده که شامل خدمات پشتیبان حیات، خدمات تولیدی، خدمات تنظیمی و خدمات فرهنگی است. منافع حاصل از فرایندهای تنظیم طبیعی

اکوسیستم، خدمات تنظیمی نامیده می‌شود که در این میان می‌توان به تنظیم اقلیم اشاره نمود.

یکی از خدمات مهم اکوسیستمی تنظیمی که نقش تعیین‌کننده‌ای در حفظ اکوسیستم و کارکردهای آن دارد، خدمت ذخیره و ترسیب کربن است. اکوسیستم‌ها با اضافه و حذف گازهای گلخانه‌ای، مانند دی‌اکسیدکربن از سطح اتمسفر نقش مهمی در تنظیم اقلیم به عنوان یک خدمت اکوسیستمی ایفا می‌کنند (IPCC, 2006). با توجه به اثرات اجتناب‌ناپذیر تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی بر بخش‌های کشاورزی و منابع طبیعی، باید کلیه گزینه‌های ممکن در اصلاح یا سازگاری با پدیده تغییر اقلیم مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. به دام انداختن کربن اتمسفری یا ترسیب کربن به شکل طبیعی از طریق اقدامات مدیریتی به‌ویژه در عرصه اراضی از جمله راهکارهای شناخته شده است، در حقیقت جنگل‌ها، مراتع و سایر اکوسیستم‌های خشکی، کربن را چهار بار بیش از آنچه که در اتمسفر مشاهده می‌شود، ذخیره می‌کنند (Lal, 2004)، علاوه بر ذخیره کربن، اکوسیستم‌ها طی زمان در حال انباشت کربن در خاک و گیاهان هستند که موجب ترسیب کربن مازاد در هر سال می‌شود (Stern, 2007). باید توجه داشت که نوع کاربری اراضی و مدیریت آن‌ها مهم‌ترین عامل در توان ترسیب کربن خاک اکوسیستم به حساب می‌آید و ذخیره کربن آلی خاک با تغییر پوشش و کاربری تغییر می‌کند (Wang et al., 2014).

ادغام مفهوم خدمات اکوسیستم در مباحث مدیریت کاربری اراضی و انتخاب مناطق حفاظتی اکوسیستم نیازمند وجود اطلاعاتی از توزیع مکانی خدمات است. برای خدمت ترسیب کربن باید دانست که چه میزان کربن و در کجا ذخیره می‌شود، چه میزان کربن در طول زمان ترسیب شده و یا از دست می‌رود و تغییر کاربری اراضی، میزان کربن ذخیره و ترسیب شده را در طول زمان چگونه تحت تأثیر قرار می‌دهد؟ (Asadolahi and Salmanmahiny, 2017). پژوهش حاضر از چند مفهوم خدمات اکوسیستم، ترسیب کربن، اکولوژی شهری، شهر زیست‌گرا^۱ (طبیعت بارگی) و توسعه پایدار شهرهای ساحلی تشکیل شده است که هر یک موضوع پژوهش‌های مختلفی بوده‌اند. برای مثال Xiaoying et al. (2022) در مطالعه الگوهای فضایی و زمانی ذخیره و ترسیب کربن با استفاده از مدل InVEST، تغییرات مکانی و زمانی در انواع پوشش و کاربری و ذخیره‌سازی کربن را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد که در میان انواع مختلف پوشش و کاربری، جنگل و زمین‌های زراعی انواع غالب در این منطقه هستند. هم‌چنین، به دلیل تبدیل گسترده وسیعی از علفزار و زمین‌های بدون استفاده به زمین‌های زراعی، که

³ Biophilic

¹ International Human Dimensions Programe (IHDP)

² Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

تشکیل مخازن کربن را تسهیل کرده و در نتیجه ذخیره کربن را به میزان قابل توجهی افزایش داده است. پژوهش دیگری توسط Dida et al. (2021) برای برآورد ذخایر کربن حوزه های آبخیز با استفاده از مدل InVEST، در فیلیپین انجام داده اند. این مطالعه با هدف برآورد ذخایر کربن در حوزه های آبخیز مورد مطالعه و بررسی اثر تغییر کاربری اراضی انجام شده است. تصاویر ماهواره ای Landsat-5 و Sentinel-2 که دوره های زمانی مختلف را پوشش می دهند برای تولید نقشه های کاربری زمین استفاده و فرآیند تخمین ذخایر کربن با استفاده از مدل ذخیره و ترسیب کربن InVEST انجام شده است. نتایج نشان داد که بیشترین کاربری ها در بین کاربری های مختلف در حوزه های آبخیز منتخب، ساختمانی و کشاورزی است. بیشترین ارزش ذخایر کربن به منطقه جنگل نسبت داده شد و کاهش سطح جنگلی در حوزه های آبخیز منجر به کاهش کل ذخایر کربن شده است. همچنین سناریوی کاربری که نشان دهنده ادامه ساخت و ساز و توسعه کشاورزی است، کاهش ذخایر کربن را به دنبال دارد. همچنین پژوهش Nazari et al. (2022) برای نشان دادن تغییرات کاربری اراضی محدوده تالاب و تنوع پرندگان آبی و کنار آبی در تالاب های بین المللی انزلی، آلماتل، آلاگل و آجی گل مشخص می کند که علل اصلی این تغییرات در مسائلی، مانند خشکسالی، احداث سد، برداشت بی رویه آب تالاب ها برای مصارف کشاورزی، پرورش ماهی و احداث کانال و جاده در منطقه و بین تالاب ها بوده که باعث کاهش چشمگیر اراضی بخش آبیگر در سالیان گذشته و تبدیل به زمین های بایر و انسان ساخت شده است.

این مطالعه در نظر دارد تا ذخیره سازی و ترسیب کربن را به عنوان یکی از متداول ترین خدمات تنظیمی مورد ارزیابی، نقشه سازی و کمی سازی قرار دهد. به طور معمول در ارزیابی های محیط زیستی بررسی های مربوط به این خدمات اکوسیستمی در مقیاس های بزرگ آبخیز یا سرزمین به دلیل محدودیت در زمان و بودجه، امکان نمونه برداری های متعدد و کافی برای نمایش تغییرات فضایی-زمانی مورد غفلت واقع می شود. بدین منظور از مدل ذخیره و ترسیب کربن InVEST برای سنجش تغییرات فضایی-زمانی ذخیره سازی و ترسیب کربن در حوزه آبخیز بندرعباس استفاده شد. InVEST ابزار فضایی مناسبی از نوع مدل های منبع باز است که برای نقشه سازی و کمی سازی خدمات اکوسیستمی منابع طبیعی استفاده می شود (Sharp et al., 2014). این نرم افزار از داده های محیط زیستی استفاده می کند تا چگونگی تغییرات در اکوسیستم ها و تأثیر آن ها بر مزایایی که به مردم می رسد را برآورد کند. به دلیل کارایی زیاد و سادگی از این مدل در مطالعات زیادی استفاده شده است. بنابراین، اثر تغییر کاربری اراضی بر ذخیره و ترسیب کربن در سال های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ با این نرم افزار مورد بررسی قرار گرفت.

با کمی سازی و تجسم مکانی خدمات اکوسیستمی، تصمیم گیران از این اطلاعات به عنوان بخشی از فرآیند تصمیم گیری استفاده می کنند. تلاش برای برآورد خدمات اکوسیستم و کارکردهای آن ها از آن جا ضرورت می یابد که هم اکنون فشارهای گوناگون ناشی از انگیزه ها و مقاصد اقتصادی، زمینه ساز تخریب و تغییر این منابع شده است. از آن جا که تراکم و الگوی مکانی توسعه، اثر مهمی بر بسیاری از جنبه های محیط زیستی دارد، در هر راهبرد مدیریت محیط زیست شهری باید سرمایه و هزینه های مرتبط با الگوی مکان، سود و زیان حفاظت از منابع و هزینه های اشغال غیررسمی اراضی در نظر گرفته شود (Karbasi et al., 2013). از این رو ضرورت دارد از نظر اقتصادی نیز خدمات اکوسیستمی مهم طبیعی ارزش گذاری شوند؛ بنابراین، هدف دیگر این مطالعه شناسایی و ارزش گذاری اقتصادی خدمات ترسیب کربن است. به طور کلی در این پژوهش ضمن ارزیابی روند تغییرات میزان ترسیب کربن در دوره زمانی معین با نقشه سازی، کمی سازی و ارزش گذاری تغییرات آن، به بررسی آن تحت سناریوهای آتی کاربری اراضی منطقه پرداخته می شود. همچنین به دلیل این که عوامل گوناگونی می توانند در اکوسیستم ها و نهایتاً در عملکردهای اکولوژیکی تغییر یا اختلال ایجاد کنند که تغییرات اقلیمی یکی از مهم ترین عوامل است و باعث ایجاد تغییرات ساختار و کارکرد اکوسیستم ها می شود، در نتیجه خدمات اکوسیستمی باید وابسته به عوامل اقلیمی و تغییرات کاربری اراضی بررسی شوند. سرزمین ایران جزء آن دسته از کشورهایی است که ضریب تأثیرپذیری از تغییرات اقلیمی در آن بالا است (Hejazizadeh et al., 2022).

در میان مؤلفه های تأثیرگذار اقلیم، بارش و دما از مؤلفه های اصلی هستند که تعیین کننده فرآیندهای اکوسیستم، مانند تولید اولیه خالص و فرسایش خاک هستند، و از عوامل تعیین کننده ذخیره و ترسیب کربن خشکی محسوب می شوند (McGuire et al., 2001)، که تغییرات در الگوی آن می تواند منجر به افزایش سیلاب، وقوع خشکسالی، کاهش تنوع زیستی و کاهش محصولات کشاورزی شود. این تغییرات در پژوهش Rahimiani Iranshahi et al. (2022) برای حوزه آبخیز کرخه به عنوان بخشی از آبریز خلیج فارس نشان داده است که تغییرات بارش در اکثر ایستگاه های مطالعاتی کاهشی و همچنین در تمام سری های زمانی مورد بررسی، دماهای کمینه و بیشینه در اکثر ایستگاه ها دارای روند افزایشی است. از این رو مقایسه ای بین حالت های اقلیمی آینده و سناریوهای آتی کاربری اراضی در روند تغییرات خدمات اکوسیستمی ترسیب و ذخیره کربن انجام می گیرد.

۲- مواد و روش ها

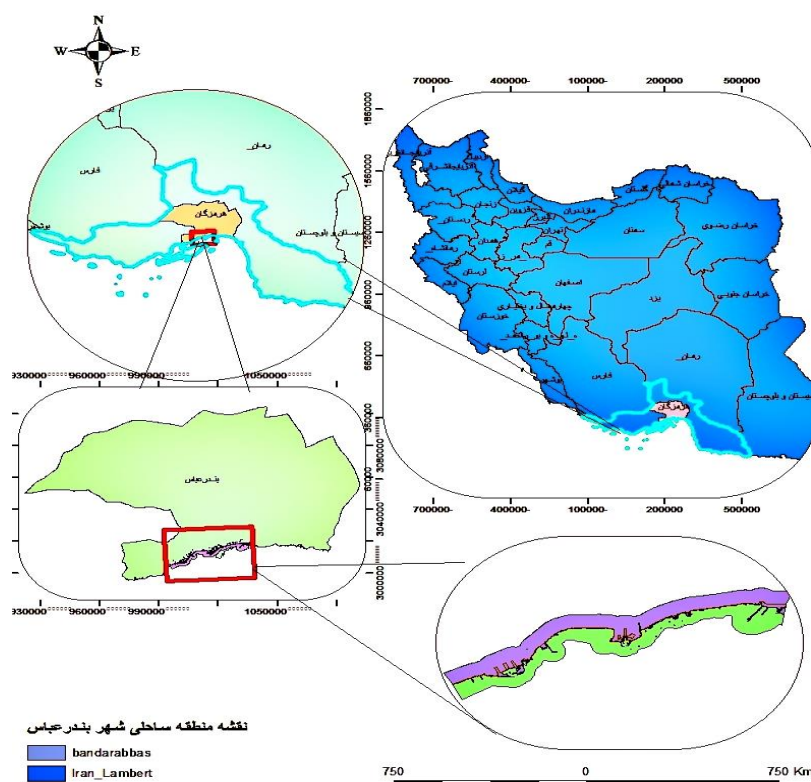
۲-۱- منطقه مورد مطالعه

ذخیره شده در واحد سرزمینی و تعیین کمی ترسیب کربن طی یک دوره زمانی به کار گرفته می‌شود و با مقایسه خروجی‌های مدل می‌توان تعیین کرد که مقدار ترسیب کربن چه تغییراتی داشته است. بنابراین، اثر تغییر کاربری اراضی بر ذخیره و ترسیب کربن طی دوره ۲۰ ساله (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰) بررسی شده، و ادامه روند با سناریوهای تغییرات کاربری در آینده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

این فرآیند شامل دو مرحله کلی است، ابتدا پردازش و آماده‌سازی تصاویر ماهواره‌ای سپس مدل‌سازی ترسیب کربن با مدل InVEST است. برای تهیه تصاویر بر حسب موقعیت مکانی و زمانی منطقه، امکان تهیه تصاویر از سنجنده‌های ماهواره‌ای لندست وجود دارد (Morshedi and Hoseini Boroujeni, 2021) که در این پژوهش تصاویر ماهواره‌ای لندست (۵ و ۸) برای تهیه تصاویر نقشه برداری منطقه مورد مطالعه به کار گرفته شد (جدول ۱) و پس از انجام تصحیحات رادیومتریک، اتمسفریک، روش Radiometric Typy: Ye and) Atmpspheric correction: Flash و Radiance (Grimm, 2013) و طبقه‌بندی تصاویر با الگوریتم حداکثر احتمال^۱ تشابه (Shrestha et al., 2018) به دست آمد.

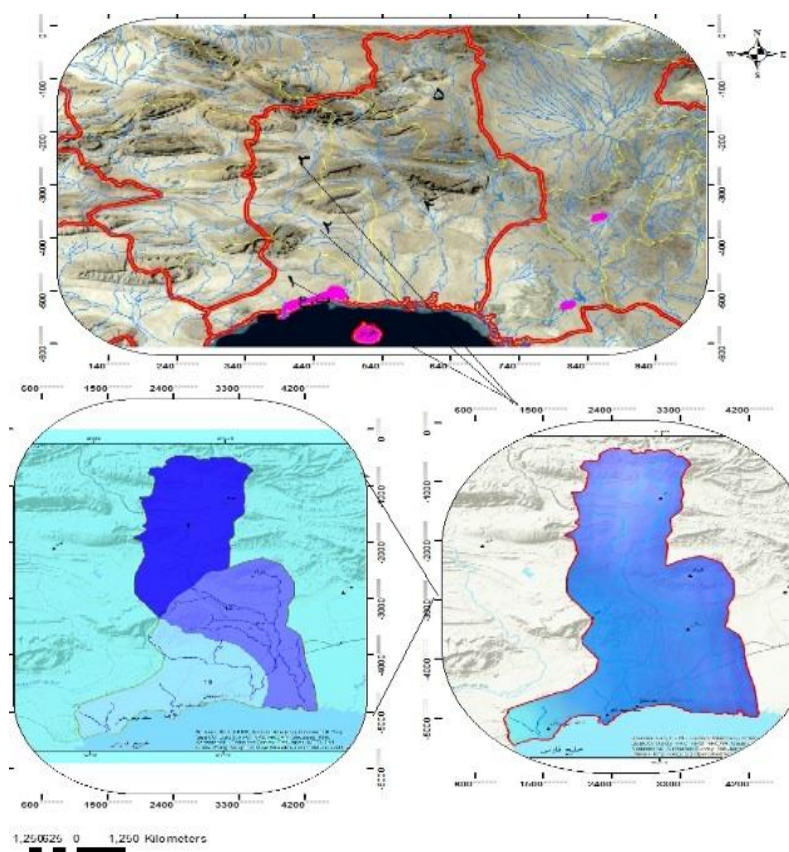
منطقه مورد مطالعه، نوار ساحلی شهر بندرعباس از منطقه بوستانو (غرب) تا فرودگاه بندرعباس (شرق) به طول خط ساحلی ۶۹ کیلومتر است. شکل ۱ محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همچنین برای جامعیت بخشیدن به پژوهش، کوچک‌ترین واحد هیدرولوژی در منطقه یا حوزه آبخیز که این محدوده شهر بندرعباس در آن واقع شده است، انتخاب شد (شکل ۲). حوزه آبخیزی که به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است، شامل سه زیرحوضه بوده که مساحت کل منطقه برابر ۲۷۲۸۰۶ هکتار است.

ابتدا برای تهیه نقشه کاربری از طبقه‌بندی نظارت شده در محیط نرم‌افزار ENVI بهره‌گیری شد که پس از بررسی‌های میدانی صورت گرفته نسبت به تعیین نقاط و طبقه‌بندی تصویر برای پنج طبقه مناطق انسان ساخت، سطوح آبی، کشاورزی، بایر و مرتع اقدام شد. سپس مدل‌سازی ابتدا در سال ۲۰۰۰ به عنوان سال پایه مبنای مقایسه برای دوره‌های بعد و سپس سال ۲۰۲۰ انجام شد. جهت مدل‌سازی، مدل ترسیب کربن از مجموعه مدل‌های InVEST 3.8.9 با هدف ترسیم آینده محتمل از منطقه مورد مطالعه استفاده شد. مدل ذخیره‌سازی و ترسیب کربن یک ابزار ارزیابی بیوفیزیکی سرزمین است که برای برآورد موجودی کربن



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه
Figure 1- Geographical location of the study area

¹ Maximum Likelihood



شکل ۲- حوزه آبخیز پوشش دهنده محدوده مورد مطالعه

Figure 2- The watershed covering the study area

جدول ۱- پردازش و آماده سازی تصاویر ماهواره ای

Table 1- Processing and preparation of satellite images

ردیف	تصویر	سنجنده	دقت مکانی (متر)	سال
۱	لندست ۵	TM	30	2000
۲	لندست ۸	OLI	30	2020

$$D = \ln(a_c) - [0.5 \ln(|Cov_c|)] - [0.5(X - M_c)^T (Cov_c^{-1})(X - M_c)] \quad (1)$$

در این رابطه، D ، فاصله وزنی (احتمال)، C ، کلاس مخصوص، X ، بردار اندازه گیری پیکسل مورد نظر، M_c ، مرکز بردار کلاس C ، a_c ، درصد احتمالی پیکسل مورد نظر عضو کلاس، Cov_c^{-1} ، معکوس ماتریس کواریانس پیکسل ها در کلاس C و T ، تابع تقدم و تاخر (ماتریس الجبرا) است.

۳-۲- ارزیابی دقت طبقه بندی ضریب کاپا

پس از طبقه بندی تصاویر و تعیین پوشش ها و کاربری اراضی منطقه، بایستی دقت نتایج خاص بررسی شود. این امر معمولاً با مقایسه نقشه مرجع (نقشه واقعیت زمینی) و یا تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا، یا نقشه حاصل از روش های مختلف طبقه بندی و تولید ماتریس خطا انجام می پذیرد. برای این کار روش دیگری وجود دارد که می توان از طبقه بندی انجام شده

۲-۲- طبقه بندی تصاویر با الگوریتم حداکثر احتمال تشابه

یکی از روش های متداول طبقه بندی نظارت شده، الگوریتم طبقه بندی حداکثر احتمال است. الگوریتم طبقه بندی حداکثر احتمال، پیکسل مجهول را به کلاسی که محتمل ترین کلاس برای آن پیکسل است اختصاص می دهد. این روش بر این فرض است که توزیع داده های آموزشی هر کلاس، به صورت نرمال است (Jensen, 1996). این شیوه که متداول ترین شیوه طبقه بندی نظارت شده در سنجش از دور است، در مرحله اول بر اساس نمونه های تعلیمی طبقات، میانگین و جدول کواریانس برای باندهای مورد استفاده در طبقه بندی محاسبه می شود. در مرحله دوم، میزان احتمال تعلق پیکسل ها به هر یک از طبقه ها محاسبه می شود و بر اساس بالاترین میزان احتمال، عمل طبقه بندی و اختصاص پیکسل ها به طبقات مختلف صورت می گیرد. معادله روش حداکثر احتمال به شرح زیر است (ERDAS, 1999):

مرده شامل بستر و همچنین چوب مرده خوابیده و ایستاده است. نمودار جریانی اجرای مدل در شکل ۳ ارائه شده است. این مدل با استفاده از نقشه‌های کاربری و پوشش زمین و انواع پوشش زمین و مقدار کربن ذخیره شده در مخازن کربن، مقدار خالص کربن ذخیره شده در یک قطعه زمین را در طول زمان و ارزش بازار کربن ذخیره شده در موجودی باقی‌مانده را تخمین می‌زند. محدودیت‌های مدل شامل چرخه کربن بیش از حد ساده شده، یک تغییر خطی فرضی در ترسیب کربن در طول زمان و نرخ‌های تنزیل بالقوه نادرست است. شرایط بیوفیزیکی مهم برای ترسیب کربن، مانند نرخ فتوسنتز و حضور ارگانسیم‌های فعال خاک نیز در مدل گنجانده نشده است. این مدل تراکم ذخیره‌سازی کربن را به رسترهای کاربری زمین و پوشش زمین (LULC) ترسیم می‌کند که ممکن است شامل انواعی مانند جنگل، مرتع یا زمین کشاورزی باشد. این مدل نتایج را در خروجی‌های رستری ذخیره‌سازی، جداسازی و ارزش و همچنین مجموع کل خلاصه می‌کند.

برای هر نوع LULC، مدل نیاز به تخمین مقدار کربن در حداقل یکی از چهار مخزن اصلی توضیح داده شده در بالا دارد. اگر داده‌ای برای بیش از یک مخزن وجود داشته باشد، نتایج مدل‌سازی شده کامل‌تر خواهند بود. این مدل به‌سادگی این تخمین‌ها را برای نقشه LULC اعمال می‌کند تا نقشه‌ای از ذخیره کربن در مخازن کربن موجود را تهیه کند. اگر هم نقشه LULC فعلی و هم آینده ارائه داده شود، می‌توان تغییر خالص ذخیره‌سازی کربن در طول زمان (جداسازی و از دست دادن) و ارزش اجتماعی آن را محاسبه کرد. برای تخمین این تغییر در ترسیب کربن در طول زمان، این مدل به‌سادگی روی منظر فعلی و چشم‌انداز آینده پیش‌بینی شده اعمال می‌شود و تفاوت ذخیره‌سازی پیکسل به پیکسل محاسبه می‌شود. همچنین اگر چندین سناریوی آینده در دسترس باشد، تفاوت‌های بین چشم‌انداز فعلی و هر یک از چشم‌اندازهای آینده را می‌توان مقایسه کرد. محاسبات مدل مبتنی بر کاربرد معادلات عمومی سنجش کربن به شرح زیر است (Aalde et al., 2006). تغییرات سالانه موجودی کربن برای کل واحد سرزمینی مورد پژوهش از طریق محاسبه مجموع تغییرات در همه انواع طبقات کاربری زمین و طبق رابطه ۳ به‌دست می‌آید:

آستانه مشخصی از احتمال درستی طبقه‌بندی در نظر گرفت و سپس یک نمونه‌گیری تصادفی در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 ایجاد کرد و بعد صحت طبقه‌بندی را با آن سنجید. ضریب کاپا روشی است که برای ارزیابی طبقه‌بندی به کار می‌رود و در آن از تمامی عناصر ماتریس خطا برای محاسبه دقت استفاده می‌کنند. ضریب کاپا طبقه‌بندی را نسبت به یک طبقه‌بندی کاملاً تصادفی محاسبه می‌کند. به این معنی که مقدار کاپا دقت طبقه‌بندی را نسبت به حالتی که یک تصویر به‌صورت کاملاً تصادفی طبقه‌بندی شود به‌دست می‌آورد. این کار را به این صورت می‌توان معنی کرد که پس از حذف تأثیر شانس در طبقه‌بندی مقدار تطابق با واقعیت زمینی محاسبه خواهد شد. ضریب کاپا به‌منظور خلاصه کردن اطلاعات ایجاد شده به‌وسیله ماتریس خطا به‌کاربرده می‌شود. این ضریب با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

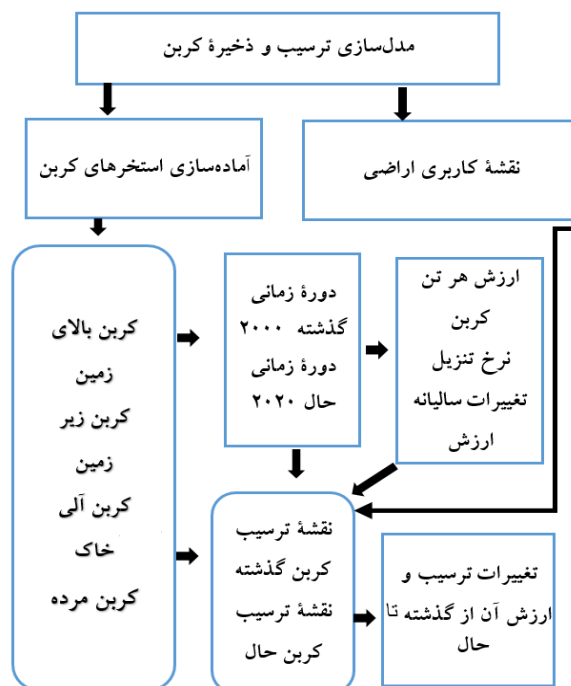
$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r x_{i+} x_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^r x_{i+} x_{+i}} \quad (2)$$

در این رابطه، x_{ii} ورودی‌های قطری ماتریس خطا، x_{i+} تعداد کل مشاهدات در سطر i ، x_{+i} تعداد کل مشاهدات در ستون i و N تعداد کل مشاهدات در تصویر است. ارزش یک معیار کاپا نشان‌دهنده مطابقت کامل بین اطلاعات حاصل از طبقه‌بندی و اطلاعات واقعیت زمینی است (Mather, 1999).

۲-۴- مدل خدمات اکوسیستمی ترسیب و ذخیره کربن

مدل ذخیره‌سازی و ترسیب کربن شامل دو ابزار ارزیابی بیوفیزیکی و ارزش‌گذاری اقتصادی است (Sharp et al., 2014) که برای برآورد موجودی کربن ذخیره شده در واحد سرزمینی و تعیین کمیت ترسیب کربن طی یک دوره زمانی به‌کار گرفته می‌شود و با مقایسه خروجی‌های مدل می‌توان تعیین کرد که مقدار ترسیب کربن چه تغییراتی داشته است. ذخیره کربن در یک قطعه زمین تا حد زیادی به اندازه چهار مخزن کربن بستگی دارد: زی‌توده بالای زمین، زی‌توده زیرزمینی، خاک و مواد آلی غیرزنده. مدل ذخیره‌سازی و ترسیب کربن InVEST مقدار کربن ذخیره شده در این مخازن را بر اساس نقشه‌های کاربری و پوشش زمین و طبقه‌بندی‌های ارائه شده توسط کاربر جمع‌آوری می‌کند. زی‌توده روی زمین شامل تمام مواد گیاهی زنده بالای خاک (مثلاً، تنه، شاخه، برگ) است. زی‌توده زیرزمینی شامل سیستم‌های ریشه زنده زی‌توده زیرزمینی می‌شود. ماده آلی خاک جزء آلی خاک است و بزرگ‌ترین مخزن کربن زمینی را نشان می‌دهد. مواد آلی

¹ Standing and lying dead wood



شکل ۳- نمودار جریان مدل ترسیب کربن

Figure 3- Flowchart of carbon sequestration model

توسط مدل تشریح می شود. باید توجه داشت که تمامی ورودی-های GIS باید در یک سیستم مختصات پیش بینی شده و در واحدهای متر خطی باشند. کاربری و پوشش زمین فعلی (الزامی): رستر کاربری زمین/پوشش زمین (LULC) را شامل می شود که هر پیکسل در آن، عدد صحیح منحصر به فرد یک کلاس کاربری/پوشش زمین متفاوت را نشان می دهد. همه مقادیر در این شطرنجی باید دارای ورودی های متناظر در جدول Carbon Pools باشند. سال تقویم کنونی پوشش زمین (الزامی) برای ترسیم و ارزیابی: سالی که توسط نقشه فعلی LULC برای استفاده در محاسبه ترسیب و ارزش های اقتصادی نشان داده شده است. مخازن کربن (الزامی): جدول CSV (مقدار جدا شده با کاما) از کلاس های LULC، حاوی داده های کربن ذخیره شده در هر یک از چهار مخزن اصلی برای هر کلاس LULC، اگر اطلاعاتی در مورد برخی از مخازن کربن در دسترس نباشد، می توان مخازن را از دیگر مخازن تخمین زد، یا با گذاشتن تمام مقادیر برای مخزن برابر با صفر حذف کرد. جدول باید شامل ستون های زیر باشد:

lucode: عدد صحیح منحصر به فرد برای هر کلاس LULC (به عنوان مثال، ۱ برای جنگل، ۳ برای علفزار و غیره) هر مقدار در نقشه LULC باید یک مقدار lucode متناظر در جدول Carbon Pool داشته باشد. شامل c_above چگالی کربن در زی توده بالای زمین، c_below چگالی کربن در زی توده زیرزمینی، c_soil چگالی کربن در خاک و c_dead چگالی کربن در ماده مرده هستند و واحد آنها مگاگرم بر هکتار است که در جدول ۲ آورده شده است.

$$\Delta C_{AFOLU} = \Delta C_{FL} + \Delta C_{CL} + \Delta C_{GL} + \Delta C_{WL} + \Delta C_{SL} + \Delta C_{OL} \quad (3)$$

ΔC = مجموع تغییرات سالانه موجودی کربن در یک محدوده، AFOLU = کشاورزی، جنگل داری و دیگر کاربری ها، FL = زمین جنگلی، CL = مزرعه، GL = مرتع، WL = تالاب، SL = سکونت گاه و OL = دیگر کاربری ها. همچنین، تغییرات موجودی کربن برای یک طبقه از کاربری زمین از طریق محاسبه مجموعی از تغییرات در هر چهار مخزن و طبق رابطه ۴ به دست می آید (Aalde et al., 2006):

$$\Delta C_{LUI} = \Delta C_{AB} + \Delta C_{BB} + \Delta C_{DW} + \Delta C_{LI} + \Delta C_{SO} \quad (4)$$

ΔC_{LU} تغییرات موجودی کربن برای یک کاربری، AB زی توده بالازمینی، BB زی توده زیرزمینی، DW مواد آلی چوبی مرده، LI برگ های مرده و SO خاک است (Aalde et al., 2006).

مبنای تعیین کمیت ترسیب کربن در دوره زمانی مورد نظر، محاسبه اختلاف میان موجودی کربن در نقطه آغاز و پایان دوره زمانی مورد نظر است. مدل برای انجام این محاسبه از یک روش موجودی-اختلاف و طبق رابطه ۵ استفاده می کند.

$$\Delta C = \frac{(C_{t2} + C_{t1})}{(t_2 - t_1)} \quad (5)$$

ΔC تغییر در موجودی کربن در هر مخزن بر حسب تن در سال، Ct1 موجودی کربن در مخزن در زمان t1 بر حسب تن، Ct2 موجودی کربن در مخزن در زمان t2 بر حسب تن (Aalde et al., 2006). همچنین، در این بخش داده های خاص مورد استفاده

هر تن کربن معادل ۶۰ دلار آمریکا با نرخ تنزیل ۲ درصد و تغییرات سالانه ۳ درصدی ارزش کربن در نظر گرفته شده است (Flues and Van Dender, 2020). همچنین جزئیات و ویژگی‌های مدل ترسیب کربن در جدول ۳ آورده شده است.

نقشه کربن آلی خاک توسط موسسه تحقیقات آب و خاک کشور در سال ۲۰۱۸ با استفاده از ۴۵۰۰۰ نمونه تولید شده است. تراکم این نقاط در مناطق مختلف کشور یکسان نیست. بیشترین تراکم در مناطق شمالی کشور و مناطق زاگرس است. برای ارزش گذاری اقتصادی خدمات اکوسیستمی ترسیب و ذخیره کربن ارزش

جدول ۲- مقادیر ذخایر کربن

Table 2- Amount of carbon reservoirs

کاربری زمین	C بالای زمین	C زیر زمین	C آلی خاک	C آلی مرده
انسان ساخت	3	0.5	6	0
آب	0	0.017	0	0
کشاورزی	4	15	12	0.1
بایر	0	0	6	0
مرتع	3	4	18	0.4

جدول ۳- جزئیات و ویژگی‌های اجزای مدل

Table 3- Details and features of model components

ابزار	منبع	مقیاس زمانی	وضوح (متر)	داده	نوع
ENVI 5.3 Arc GIS 10.6 InVEST 3.8.9	http://earthexplorer.usgs.gov/	2000 - 2020	30 * 30	کاربری سال ۲۰۰۰ Land sat 5-etm کاربری سال ۲۰۲۰ Land sat 8-OLI	مکانی - زمانی کاربری زمین
Arc GIS 10.6 InVEST 3.8.9		2000 - 2020	30 * 30	سال ۲۰۰۰ LULC سال ۲۰۲۰ LULC مخازن کربن	مکانی - زمانی کربن جدول

سیاست REDD ارائه داده شود، مدل با آن به عنوان یک سناریوی آینده دیگر برخورد می کند، ذخیره سازی و جداسازی را محاسبه می کند و نتایج را خلاصه می کند. خروجی های مدل به صورت مگا گرم کربن در هر پیکسل، و در صورت تمایل، مقدار جداسازی بر حسب واحد پول در هر پیکسل بیان می شود. اگر کاربر علاقه مند به بیان ترسیب در واحدهای پولی باشد، ارزش اجتماعی ترسیب کربن مفید است. ارزش اجتماعی یک تن کربن جدا شده آسیب اجتماعی است که با رها نشدن تن کربن در جو از آن جلوگیری می شود. لذا، جهت مدیریت و حفاظت پایدار از این منابع بررسی و پیش بینی تغییرات کاربری اراضی برای تعدیل و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای بر اساس سناریوهای پروژه REDD امری ضروری به نظر می رسد.

۳- نتایج و بحث

حوزه آبخیزی که به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است شامل سه زیرحوضه بوده که مساحت کل منطقه برابر ۲۷۲۸۰۶ هکتار است. در این بخش کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه به پنج طبقه مناطق انسان ساخت، سطوح آبی، کشاورزی، بایر و مرتع

باید توجه داشت که مدل کربن به صورت اختیاری می تواند تجزیه و تحلیل سناریو را بر اساس چارچوب کاهش انتشارات ناشی از تخریب جنگل و جنگل زدایی (REDD) یا REDD+ انجام دهد. REDD طرحی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای است که بر اساس آن کشورهایی که انتشارات ناشی از جنگل زدایی را کاهش می دهند می توان غرامت مالی دریافت کرد. برای تجزیه و تحلیل سناریوی REDD، مدل به سه نقشه پوشش و کاربری نیاز دارد، یکی برای سناریوی فعلی، یکی برای سناریوی پایه آینده، و دیگری برای یک سناریوی آینده تحت سیاست REDD. سناریوی پایه آینده برای محاسبه سطح مرجع انتشار استفاده می شود که سناریوی REDD را می توان با آن مقایسه کرد. بر اساس این سه نقشه LULC برای سناریوهای خط مشی فعلی، پایه و REDD، مدل بیوفیزیکی کربن رستریهای را برای ذخیره سازی کل کربن برای هر یک از سه نقشه LULC و دو رستر جداسازی برای سناریوهای آینده و REDD تولید می کند، که می توان از نتایج آن برای مطالعات مرتبط با آن استفاده نمود.

در واقع اگر یک نقشه پوشش زمین برای سناریوی آینده تحت

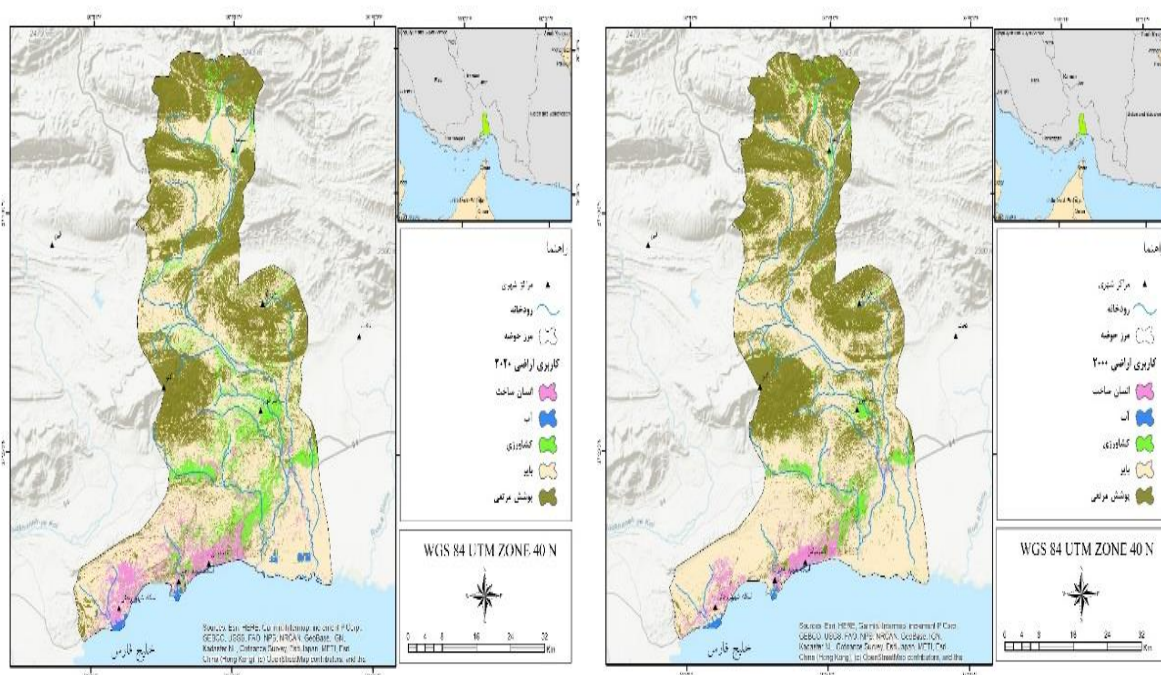
¹ Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation (REDD)

موضوعات مختلف شناسایی می‌کند. در سناریوی اول بر اساس روند تغییرات دو دوره ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ با روش شبکه‌های پرسپترون چندلایه (MLP) در نرم‌افزار Terrset انجام شد، که به دو نقشه پوشش اراضی متعلق به زمان‌های مختلف به مثابه ورودی نیاز دارد و بر اساس تغییرات ۲۰ سال گذشته برای ۱۰ سال آینده پیش‌بینی انجام شد که در شکل ۶ نشان داده شده است. پرسپترون چندلایه، الگوریتمی غیرپارامتریک است که ارتباط پیچیده را بین یک مجموعه متغیر و یک مجموعه خروجی برآزش می‌دهد، حتی اگر بین متغیرها ارتباط خطی هم وجود داشته باشد، در ساختار پرسپترون چندلایه، علاوه بر لایه‌های ورودی و خروجی، چند لایه بین این لایه‌ها وجود دارد که لایه‌های پنهان نامیده می‌شوند. این لایه‌ها جدا از محیط هستند و خروجی نیز تولید نمی‌کنند (Lin et al., 2014). در این سناریو در سال ۲۰۳۰ مساحت طبقه انسان‌ساخت ۲۳۳۸۵ هکتار، پهنه آبی ۱۶۸۰ هکتار، کشاورزی ۲۷۶۰۴ هکتار، اراضی بایر ۱۲۸۷۳۱ هکتار و پوشش مرتعی ۹۱۴۰۳ هکتار است و درصد هر یک از کاربری‌های منطقه به ترتیب ۸/۵، ۰/۶۱، ۱۰/۱، ۴۷/۱ و ۳۳/۵ است.

تقسیم شد. شکل‌های ۴ و ۵ کاربری اراضی و تغییرات آن را در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ نشان می‌دهند.

همان‌طور که در جدول ۴ دیده می‌شود در سال ۲۰۰۰ مساحت طبقه انسان‌ساخت ۱۰۷۲۱ هکتار، پهنه آبی ۶۷۱ هکتار، کشاورزی ۱۱۲۸۵ هکتار، اراضی بایر ۱۵۰۱۲۳ هکتار و پوشش مرتعی ۱۰۰۰۰۳ هکتار است. درصد هر یک از کاربری‌های منطقه به ترتیب ۳/۹، ۰/۲۴، ۴/۱، ۵۵، ۳۶/۶ است. اما در سال ۲۰۲۰ کاربری طبقه انسان‌ساخت ۱۷۰۸۵ هکتار، پهنه آبی ۱۷۰۷ هکتار، کشاورزی ۲۳۷۶۵ هکتار، بایر ۱۳۷۳۸۰ هکتار و پوشش مرتعی ۹۲۸۶۵ هکتار است. درصد هر یک از کاربری‌های منطقه به ترتیب با ۶/۲، ۰/۶۲، ۸/۷، ۵۰ و ۳۴ درصد است که مشاهده می‌شود در سال ۲۰۲۰ کاربری‌های انسان‌ساخت، آب و کشاورزی افزایش و کاربری‌های مرتع و بایر کاهش داشته‌اند.

هم‌چنین به‌منظور پیش‌بینی تغییرات آبی بر روند ذخیره و ترسیب کربن، سناریوسازی تغییرات کاربری اراضی آینده با سه روش انجام پذیرفت. مدل‌های تغییرات کاربری اراضی، ابزارهایی برای تحلیل دلایل و پیامدهای تغییرات کاربری اراضی به منظور درک بهتر عملکرد سیستم‌های کاربری اراضی و مدیریت کاربری اراضی می‌باشد که تغییرات پوشش اراضی را در آینده با توجه به

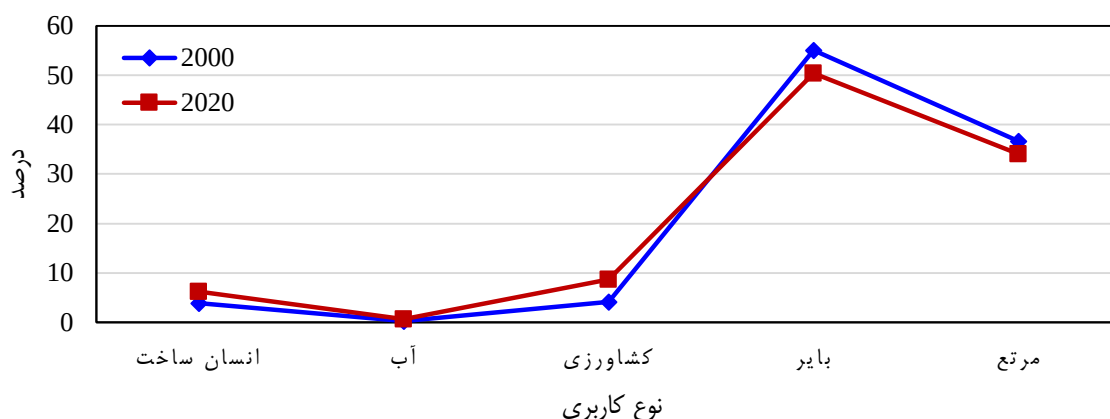


شکل ۴- کاربری اراضی در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰

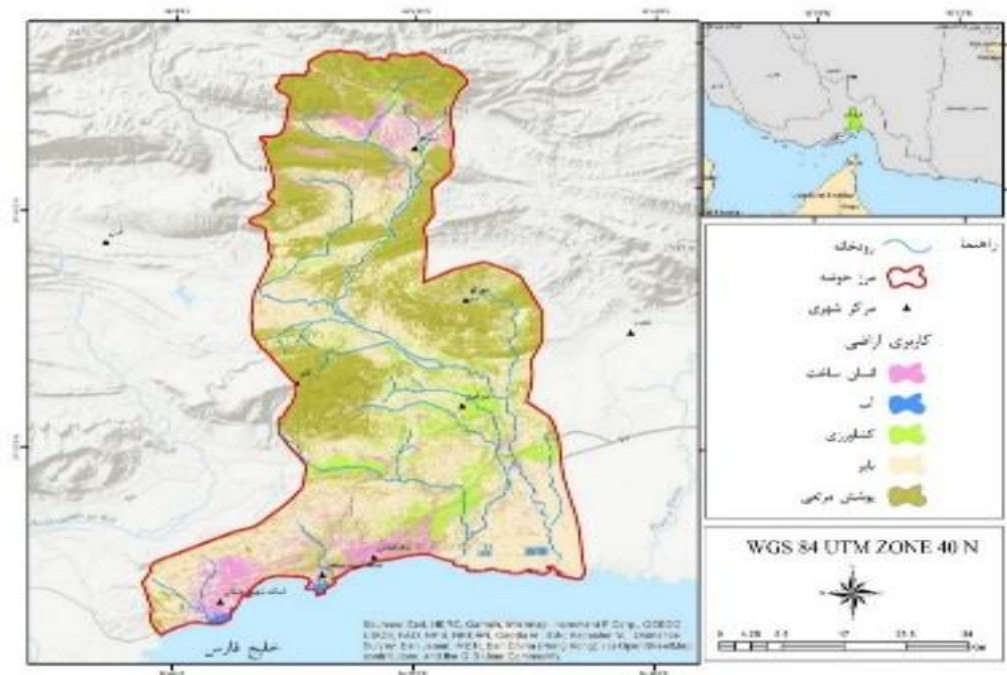
Figure 4 - Land use in 2000 and 2020

جدول ۴- مساحت و درصد هر یک از کاربری‌ها در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۰۰
Table 4- Area and percentage of each land use in 2000 and 2020

سال	مساحت	انسان ساخت	پهنه آبی	کشاورزی	بایر	مرتج
۲۰۰۰	هکتار	10721.97	671.49	11285.19	150123.42	100003.59
	درصد	3.930	0.246	4.136	55.029	36.657
۲۰۲۰	هکتار	17085.78	1707.75	23765.94	137380.5	92865.69
	درصد	6.262	0.625	8.711	50.358	34.040



شکل ۵- تغییرات کاربری سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۰۰
Figure 5- Changes in land uses of 2000 and 2020



شکل ۶- سناریوهای تغییرات کاربری با شبکه‌های پرسپترون چندلایه (MLP)
Figure 6- Scenarios of land use changes with multilayer perceptron networks (MLP)

روش nearest to edge اضافه شد. در ابزار سناریوسازی Invest دو روش nearest to edge و farthest to edge برای پیش‌بینی کاربری‌ها وجود دارد، در nearest to edge با توجه به فرض‌های منطقی از آینده منطقه مورد مطالعه با توجه به رشد جمعیت و شرایط اقلیمی تبدیل کاربری‌ها مشخص می‌شود (پتانسیل انتقال)، که

در سناریوهای دوم و سوم با استفاده از ابزار Scenario generator نرم‌افزار InVEST بر اساس تعریف کاربری و محاسبات مبنی بر وضعیت منطقه و رشد جمعیت و کشاورزی در دوره گذشته انجام گرفت. برای سناریوی دوم ۶۰۰۰ هزار هکتار و در سناریوی سوم ۳۰۰۰ هزار هکتار به اراضی کشاورزی منطقه با

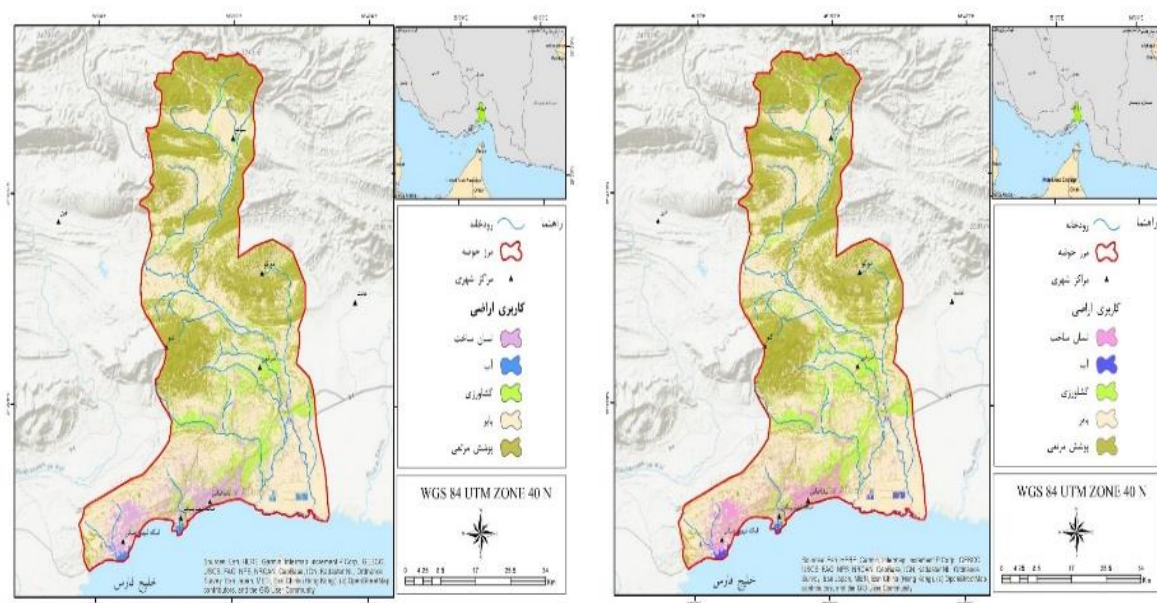
حوزه آبخیز مشابه، توسط Rahimiani Iranshahi et al. (2022) برای حوزه آبخیز کرخه به عنوان بخشی از آبریز خلیج فارس که نشان داده است تغییرات بارش در اکثر ایستگاه های مطالعاتی کاهشی و همچنین در تمام سری های زمانی مورد بررسی، دماهای کمینه و بیشینه در اکثر ایستگاه ها دارای روند افزایشی است. این نتایج نشان گر حالت جدیدی از وضعیت ممکن آینده و عدم قطعیت سناریوهای کاربری اراضی و تضادهای میان خدمات اکوسیستمی است که می تواند موجب تغییر در طبیعت و تغییر در جهت و اندازه خدمات در حال تدارک توسط اکوسیستم شود. این تضاد بدین صورت به وجود می آید که اکوسیستم منطقه برای به حداکثر رساندن خدمات تولیدی با افزایش کشاورزی (رشد زمین های کشاورزی) تحت مدیریت قرار گرفته و در مقابل آن کمبود شدید منابع آبی مورد نیاز وجود دارد. در نتیجه بهترین حالت آینده از نظر عملکرد ترسیب کربن و روند افزایشی آن با توجه به سناریوهای کاربری اراضی منوط بر تأمین و مدیریت منابع آب است.

نرم افزار از حاشیه مرزهای دو کاربری که برای تبدیل تعریف شده اند این کار را انجام می دهد. این تبدیل کاربری مناطق حاشیه اراضی کشاورزی و از کاربری های مرتع و بایر انجام شد که در شکل ۷ نشان داده شده است. در سناریوی دوم در سال ۲۰۳۰ مساحت طبقه انسان ساخت ۱۷۰۸۵، پهنه آبی ۱۷۰۷، کشاورزی ۲۹۷۶۵، اراضی بایر ۱۳۳۱۳۹ و پوشش مرتعی ۹۱۱۰۶ هکتار است و درصد هر یک از کاربری های منطقه به ترتیب ۶/۲، ۰/۶۲۵، ۱۰/۹، ۴۸/۸ و ۳۳/۳ است. در سناریوی سوم در سال ۲۰۳۰ مساحت طبقه انسان ساخت ۲۰۰۸۵، پهنه آبی ۱۷۰۷، کشاورزی ۲۳۷۶۵، اراضی بایر ۱۳۵۲۷۹ و پوشش مرتعی ۹۱۹۶۶ هکتار است و درصد هر یک از کاربری های منطقه به ترتیب ۷/۳، ۰/۶۲۵، ۸/۷، ۴۹/۵ و ۳۳/۷ است (جدول ۵). همچنین در شکل ۸ تغییرات کاربری های مختلف در سه سناریوی آینده نشان داده شده است. بر اساس سناریوهای کاربری اراضی مختلف آینده منطقه، رشد زمین های کشاورزی پیش بینی می شود، اما با توجه به نتایج پژوهش تغییرات اقلیمی

جدول ۵- مساحت و درصد کاربری ها در سناریوهای مختلف

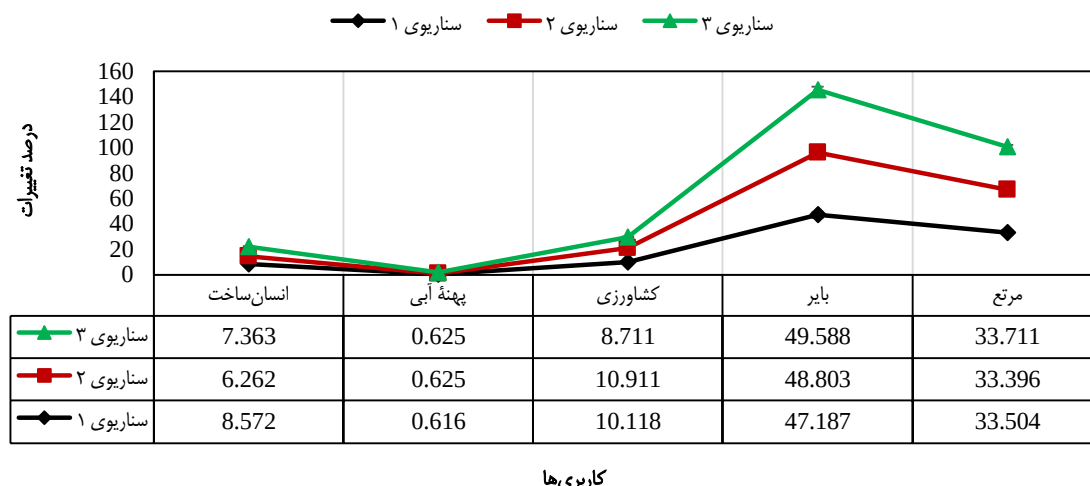
Table 5- Area and percentage of land uses in different scenarios

سناریو	مساحت	انسان ساخت	پهنه آبی	کشاورزی	بایر	مرتج
اول	هکتار	23385.69	1680.84	27604.8	128731.32	91403.01
	درصد	8.572	0.616	10.118	47.187	33.504
دوم	هکتار	17085.78	1707.75	29765.97	133139.52	91106.64
	درصد	6.262	0.625	10.911	48.803	33.396
سوم	هکتار	20085.84	1707.75	23765.94	135279.99	91966.14
	درصد	7.363	0.625	8.711	49.588	33.711



شکل ۷- سناریوهای تغییرات کاربری با روش سناریوساز InVEST

Figure 7- Scenarios of land use changes with InVEST 'Scenario generator



شکل ۸- تغییرات کاربری در سناریوهای آینده
Figure 8- Changes in land use in the future scenarios

۳-۱- نتایج مدل ترسیب کربن

اولین خروجی حاصل از اجرای نرم‌افزار ذخیره و ترسیب کربن InVEST تولید نقشه‌های موجودی کربن در هر دوره مورد مطالعه بود که در شکل ۹ برای سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ نشان داده شده است. خروجی دیگر اجرای نرم‌افزار، تولید نقشه کربن در دوره زمانی مورد مطالعه (از ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰) بود که این نقشه نشان‌دهنده تفاوت در کربن ذخیره شده در واحد سرزمینی پایه و جاری است که در یک دوره زمانی معین ترسیب می‌شود که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصل از محاسبات مدل‌سازی ترسیب کربن در محدوده مورد پژوهش طی سال ۲۰۰۰ توان ترسیب کربن $37413221/0.8$ و در سال ۲۰۲۰ به $3763695/92$ تن رسیده که در مجموع توان ترسیب کربن به مقدار $22374/82$ تن افزایش یافته است.

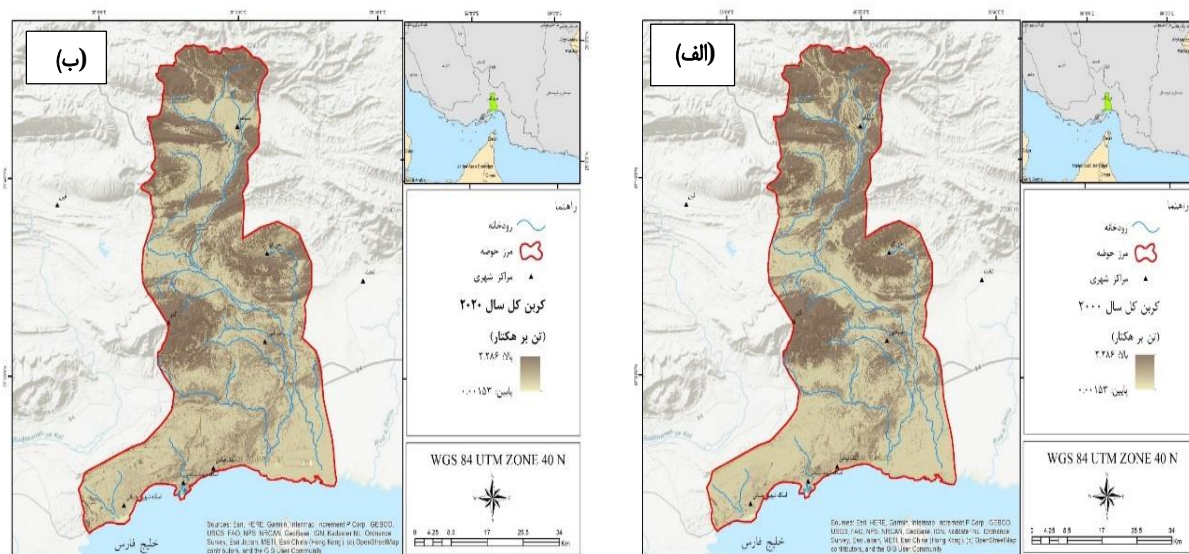
نتایج حاصل از مدل‌سازی فضایی زمانی توزیع کربن در منطقه مورد پژوهش و تغییرات آن به واسطه تغییرات در پوشش/کاربری زمین با پژوهش Xiaoying et al. (2022) قابل مقایسه است. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که به دلیل تبدیل گستره وسیعی از علفزار و زمین‌های بدون استفاده به زمین‌های زراعی، تشکیل مخازن کربن تسهیل شده و در نتیجه ذخیره کربن به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. همچنین، پژوهش مشابهی در سال ۲۰۱۹ توسط Maanan et al. (2019) در مراکش انجام گرفته است. آن‌ها نشان دادند که در طول ۲۱ سال، تغییرات کاربری بیش‌ترین تأثیر را بر ذخیره کربن و افزایش $6/8$ درصد کربن ذخیره شده را داشته است. زیرا اکثر زمین‌های بدون استفاده به جنگل و زمین‌های زیر کشت تغییر یافته‌اند.

با توجه به تغییرات ترسیب کربن بین سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰، ارزش اقتصادی کربن ترسیب شده بین این دو دوره در جدول ۷ و شکل ۱۱ نشان داده شده است. ارزش با واحد تن است که ممکن است منفی یا مثبت باشد. ارزش‌های مثبت نشان‌دهنده ترسیب کربن و ارزش‌های منفی نشان‌دهنده کربن اتلاف شده (منتشر شده در اتمسفر) هستند. نواحی با بزرگ‌ترین ارزش‌های مثبت یا منفی بیش‌ترین تغییرات در نقشه پوشش/ کاربری را دارند. ورودی‌های مدل کربن جهت ارزش‌گذاری در جدول ۶ آورده شده است.

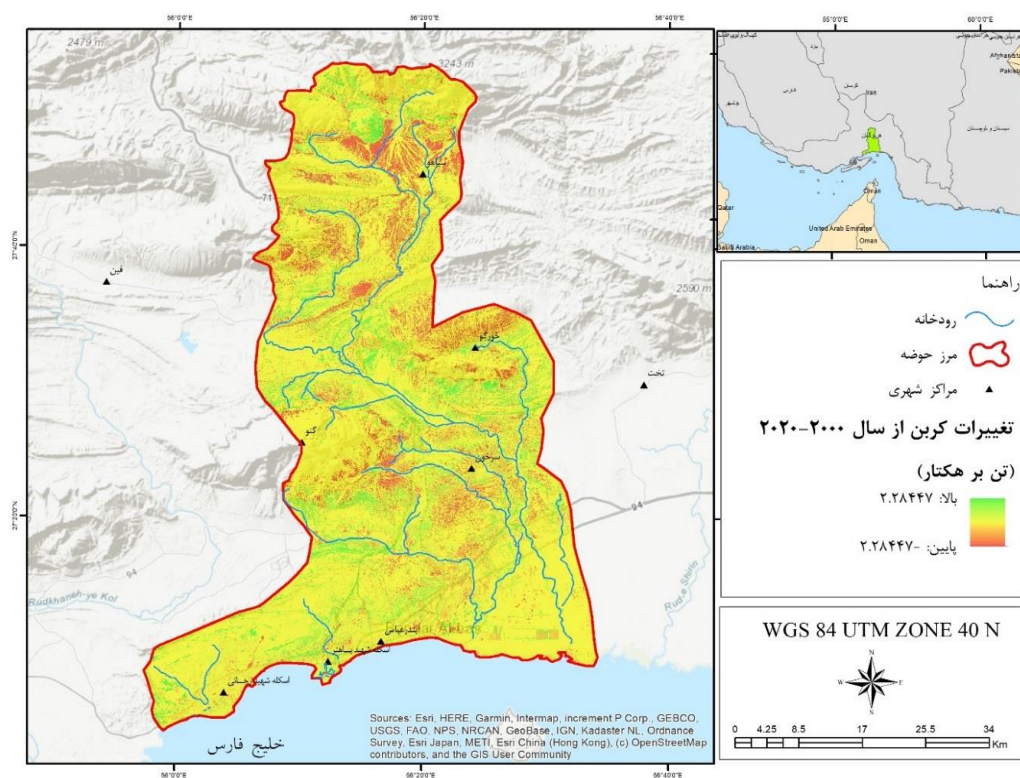
نقشه توزیع ارزش اقتصادی ناشی از ترسیب کربن در پهنه سرزمین مطالعه شده از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ نشان داد در مجموع شاهد منفعت مالی از نظر ترسیب کربن بوده است، چرا که با افزایش توان ترسیب کربن، ارزش آن نیز به مقدار $874393/0.8$ دلار افزایش پیدا کرده است.

در نقشه ارزش اقتصادی کربن ترسیب شده مناطقی که ذخیره کربن آن‌ها در اثر تغییرات کاربری حاصل دو دوره مورد مطالعه تغییر نمی‌کند، با رنگ زرد مشخص شده که ارزش آن صفر بوده و در واقع بدون تغییرات است. سایر نواحی که تغییر می‌کنند، نشان‌دهنده ترسیب کربن طی بازه زمانی مورد نظر است که شامل ارزش‌های مثبت و منفی است. ارزش‌های منفی به مفهوم کاهش ترسیب کربن است که با طیفی از رنگ‌های قرمز و ارزش‌های مثبت با رنگ سبز به مفهوم افزایش ترسیب نشان داده شده است.

با توجه به نتایج و افزایش خدمت تنظیمی ترسیب کربن و در نظر داشتن نتایج پژوهش Karimi et al. (2022) که نشان داده است تأثیر اقدامات آبخیزداری بر خدمات تنظیمی بیشتر از سایر خدمات اکوسیستمی حوضه آبخیز است، می‌توان در جهت بهبود



شکل ۹- ترسیب کربن در سال های ۲۰۰۰ (الف) و ۲۰۲۰ (ب)
Figure 9- Carbon sequestration in 2000 (a), and 2020 (b)



شکل ۱۰- تغییرات ترسیب کربن بین سال های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰
Figure 10- Changes in carbon sequestration between 2000 and 2020

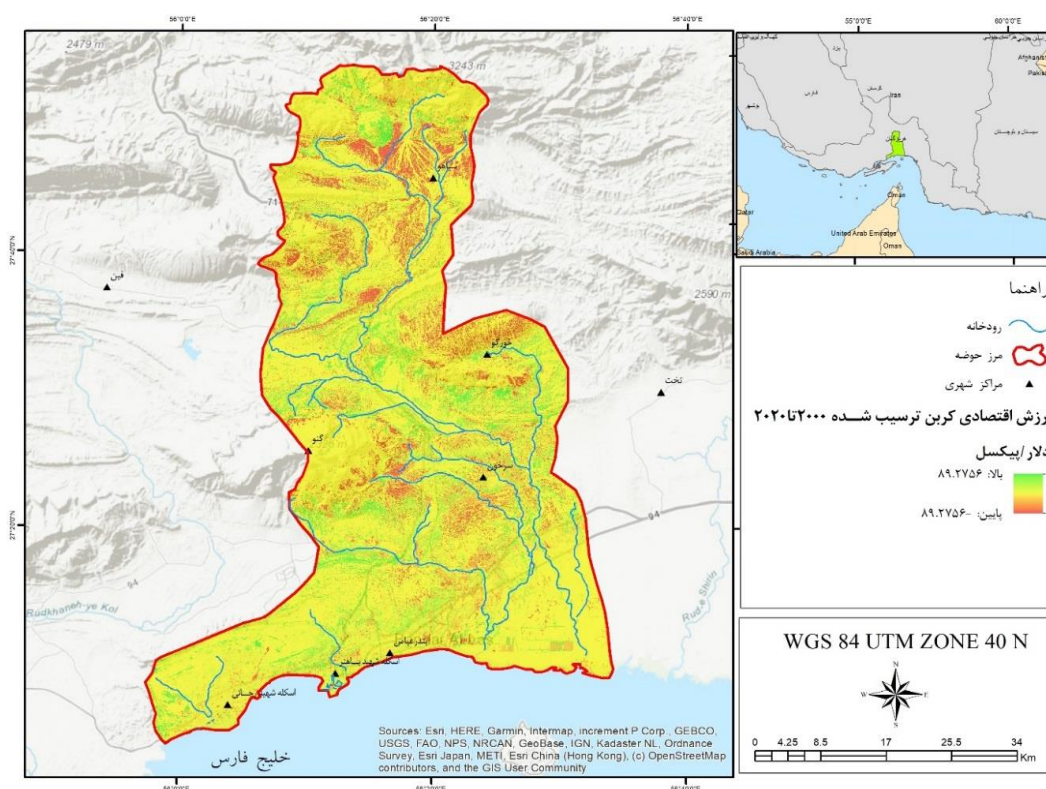
جدول ۶- ورودی های مدل ترسیب کربن
Table 6- Inputs of carbon sequestration model

سال- 2000	LULC- cur
سال- 2020	LULC- fut
60	قیمت هر تن متریک کربن
2	نرخ تنزیل
3	نرخ تغییر

جدول ۷- مقدار و ارزش اقتصادی ترسیب کربن

Table 7- Amount and economic value of carbon sequestration

واحد	ارزش	توضیح
Mg of C	3741321.08	میزان کربن سال 2000
Mg of C	3763695.92	میزان کربن سال 2020
Mg of C	22374.82	تفاوت کربن بین 2000 و 2020
Currency units	874393.08	ارزش تغییر کربن بین 2000 و 2020



شکل ۱۱- ارزش اقتصادی کربن ترسیب شده

Figure 11- Economic value of sequestered carbon

جنگل‌های شهری و برنامه‌های سبزسازی شهری، باید متناسب با اقلیم منطقه و در جهت توسعه محیط زیستی این شهر در نظر گرفته شود. هرچند در نگاه کلی و با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و الگوهای بارش و دما که تعیین‌کننده فرآیندهای اکوسیستم هستند، شهر بندرعباس از نظر زیرساخت سبز به‌ویژه عارضه‌های سبز و آبی حائز ویژگی‌های یک شهر بیوفیلیک نیست، اما با توجه به این‌که عوامل بارش و دما در این حوضه نقش نیروی محرکه وارد بر سیستم را دارند، خارج از کنترل مدیریت در مقیاس منطقه‌ای هستند و همچنین اجتناب‌ناپذیر بودن توسعه شهری و کشاورزی در سناریوهای آتی منطقه، لزوم مدیریت فعالیت‌های توسعه‌ای با سیاست‌های مناسب را ایجاب می‌نماید، زیرا مؤلفه سیاست‌های مدیریت شهری مؤثرترین گزینه در امر رسیدن به مقوله زیست‌پذیری است (Ebrahimpour, 2020). بنابراین می‌توان با سرمایه‌گذاری در بخش تصفیه فاضلاب شهری

شرایط آبخیز و کاهش تخریب آن مفید باشد. همچنین با توجه به غالبیت اراضی بایر در منطقه و سناریوهای پیش‌بینی تغییرات آبی (روند افزایشی تبدیل از مناطق بایر و مرتع به انسان‌ساخت و کشاورزی)، اهمیت گسترش شهری، و الگوهای طراحی و انطباق‌پذیری شهرها که از موارد مواجهه با تغییر اقلیم تعیین شده‌اند افزایش می‌یابد. این مسأله سبب شده که شهرهای پایدار به‌عنوان راه‌حلی برای حل این چالش مطرح شود و در این میان شهر فشرده، شهرسازی آبی، شهر کربن خنثی، شهر انرژی تجدیدپذیر و شهر بیوفیلیک از رویکردهای مورد توجه هستند. شهر بیوفیلیک که به‌عنوان رویکردی مکمل در کنار سایر راهکارها در راستای پایداری محیط زیستی شهرها مد نظر است، خواهان تلفیق شهر در طبیعت و افزایش عناصر و المان‌های طبیعی و سبز در شهر است (Fotuhi Mehrabani et al., 2018)، قابلیت‌های بیوفیلیکی پاسخ‌گو به تغییرات اقلیم در شهر بندرعباس، مانند افزایش فضای سبز و

و همچنین شیرین سازی آب دریا، یکی از بسترهای لازم و مهم جهت تداوم عملکرد مثبت ترسیب کربن و تحقق اهداف پایداری شهری بندرعباس را فراهم نمود.

۴- نتیجه گیری

با مقایسه نقشه های شرایط پوشش و کاربری مشخص شد در دو دوره مورد مطالعه مناطق بایر و پس از آن مرتع بیشترین مساحت را به خود اختصاص داده است. در حالی که طی این دوره و با توسعه شهری کمی از وسعت آن ها کاسته شده و به طور کلی کاربری های انسان ساخت، پهنه آبی و کشاورزی افزایش و کاربری های مرتع و بایر کاهش داشته اند. نتایج کمی سازی و ارزش گذاری ترسیب کربن در دوره ۲۰ ساله نشان می دهد روند تغییر کاربری با رشد ترسیب مثبت کربن همراه بوده که دلیل آن رشد زمین های کشاورزی بوده و مقدار ذخیره کربن افزایش یافته است. در نتیجه هزینه محیط زیستی تغییر کاربری در جهت منافع اقتصادی با افزایش عرضه خدمت ترسیب کربن همراه بوده است. همچنین بر اساس سناریوهای مختلف که مدل سازی دقیقی از وضعیت محتمل آینده منطقه ارائه کرد، پیش بینی می شود با سناریوهای کاربری آینده، رشد مثبت ترسیب و متعاقب آن منفعت مالی از نظر ترسیب کربن ادامه داشته باشد، چون تغییرات پوشش و کاربری

آینده و افزایش زمین های کشاورزی، ادامه وضع موجود و روند تغییر اراضی به افزایش ذخیره کربن منطقه منجر می شود. مطالعه حاضر نشان داد که تغییرات کاربری اراضی با توجه به شرایط بهره برداری موجود آثار افزایشی بر خدمت اکوسیستمی ترسیب کربن (تبدیل مناطق بایر و مرتع به کشاورزی) دارد و نتیجه هم افزایی با افزایش خدمات تولیدی اکوسیستم (تولید غذا و کشاورزی) است. اما عوامل گوناگونی می توانند در اکوسیستم ها و نهایتاً در عملکردهای اکولوژیکی تغییر یا اختلال ایجاد کنند که تغییرات اقلیمی یکی از مهم ترین عوامل است و باعث ایجاد تغییرات در ساختار و کارکرد اکوسیستم ها می شود. در نتیجه تغییرات خدمات وابسته به عوامل اقلیمی و تغییرات کاربری اراضی است.

به طور کلی می توان نتیجه گرفت علی رغم تداوم روند تغییرات اقلیمی که خود متأثر از فعالیت های بشری است، راهکارهایی مبتنی بر خدمات اکوسیستم در مقابله با این تغییرات نقش مؤثری دارد. با سنجش تغییرات، خدمت اکوسیستمی ذخیره و ترسیب کربن به عنوان یکی از لایه های اطلاعاتی مهم در ارزیابی های اثرات ناشی از تغییر کاربری، در کنار کمی سازی، ارزش اقتصادی خدمات با هم سویی انگیزه های اقتصادی، می تواند اصول فضایی ارزشمندی را در جهت توسعه شهری و آگاهی های محیطی در اختیار برنامه ریزان قرار دهد.

منابع

- اسدالهی، ز.، و سلمان ماهینی، ع. (۱۳۹۶). بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بر عرضه خدمات اکوسیستم (ذخیره و ترسیب کربن). *پژوهش های محیط زیست*، ۸(۱۵)، ۲۰۳-۲۱۳.
- ابراهیم پور، م. (۱۳۹۹). برنامه ریزی بیوفیلیک، رویکردی جدید در راستای دستیابی به زیست پذیری در شهرهای جدید ایران. *آمایش محیط*، ۱۱۳(۵)، ۳۹-۵۹.
- حجازی زاده، ز.، اکبری، م.، ساسان پور، ف.، حسینی، ع.، و محمدی، ن. (۱۴۰۱). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر بارش های سیل آسا در تهران. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۲)، ۸۷-۱۰۵.
- حکمت نیا، ح.، و موسوی، م.ن. (۱۳۹۶). کاربرد مدل در جغرافیا با تأکید بر برنامه ریزی شهری و ناحیه ای. چاپ پنجم، انتشارات آزاد پیم، ۳۳۰ صفحه.
- دیوسالار، ا.، علی اکبری، ا.، و بخشی، ا. (۱۳۹۵). بررسی نقش رشد هوشمند در توسعه پایدار شهرهای ساحلی (مورد مطالعه: شهر بابلسر). *آمایش جغرافیایی فضا*، ۲۹، ۱۸۱-۲۰۰.
- رحیمانی ایرانشاهی، ح.، مرادی، ح.ر.، و جلیلی، خ. (۱۴۰۱). روند تغییرات بارش و دما در مقیاس های زمانی مختلف در حوزه آبخیز کرخه. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۲)، ۱-۱۲.
- فتوحی مهربانی، ب.، و حاتمی نژاد، ح. (۱۳۹۷). شهر بیوفیلیک رهیافتی نوین در پایداری زیست محیطی شهرها. اولین همایش رقابت پذیری و آینده تحولات شهری، انجمن جغرافیا و برنامه ریزی شهری ایران.
- کرباسی، ع.، منوری، س.م.، و آذرکمند، س. (۱۳۹۲). راهبردهای مدیریت محیط زیست شهری، تهران. نشر تالاب، ۱۸۴ صفحه.
- کریمی، ز.، سعدالدین، ا.، و بردی شیخ، و. (۱۴۰۱). اثرات اقدامات آبخیزداری بر خدمات چهارگانه آبخیز چهل چای استان گلستان. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۴)، ۱۸-۳۶.
- مرشدی، ع.، و حسینی بروجنی، ب. (۱۴۰۰). پایش و مقایسه تغییرات NDSI با استفاده از داده های سنجنده های MODIS و ETM+ به منظور برآورد پوشش برفی در حوضه آبریز کارون شمالی. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۱(۴)، ۶۸-۸۲.
- نظری، ن.، شمس اسفندآباد، ب.، وروانی، ج.، احمدی، ع.، و ترنج زر، ح. (۱۴۰۱). تغییرات کاربری اراضی محدوده تالاب و تنوع پرندگان آبی و کنار آبی در تالاب های بین المللی انزلی، آلماتل، آلاگل و آجیگل. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۳)، ۲۷-۳۹.

References

- Aalde, H., Gonzalez, P., Gytarsky, M., Krug, T., Kurz, W.A., Ogle, S., Raison, J., Schoene, D., & Ravindranath, N.H. (2006). Forest Land. Pp. 4.1-4.83, In: Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K (eds), 2006 *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, IGES.
- Asadolahi, Zahra., Salmanmahiny, A. (2017). Investigating the effect of land use change on the supply of ecosystem services (Carbon storage and deposition). *Environmental Researches*, 8(15), 203-213 (in Persian).
- Beriasolice, H. (2010). *Patterns of land use change analysis*. Translation Rafiean, M., & Mahmoudi, M., Publishing Lightning.
- Dida, J.J.V., Tiburan Jr, C.L., Tsutsumida, N., & Saizen, I. (2021). Carbon stock estimation of selected watersheds in Laguna, Philippines using InVEST. *Philippine Journal of Science*, 150(2), 501-513.
- Divsalar, A., Aliakbari, E., & Bakhshi, A. (2018). The role of smart growth in sustainable development of coastal cities (case study: Babolsar). *Geographical Planning of Space Quarterly Journal*, 8(29), 181-200 (in Persian).
- Ebrahimpour, M. (2020). Biophilic planning is a new approach in order to achieve livability in new cities of Iran (Case example: Hashtgerd New City). *Environmental-based Territorial Planning*, 13(50). 39-59.
- ERDAS, (1999). Field Guide. 5th ed , ERDAS Inc., Atlanta.
- Flues, F., & Van Dender, K. (2020). Carbon pricing design: Effectiveness, efficiency and feasibility: An investment perspective. OECD Taxation Working Papers, No. 48, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/91ad6a1e-en>.
- Fotuhi Mehrabani, B., & Hataminejad, H. (2018). Biophilic city, a new approach to the environmental sustainability of cities. The first conference on competitiveness and the future of urban developments, Tehran, Iran (in Persian).
- Hejazizadeh, Z., Akbari, M., Sasanpour, F., Hosseini, A., & Mohammadi, N. (2022). Investigating the effects of climate change on torrential rains in Tehran province. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(2), 87-105 (in Persian).
- Hekmatnia, H., & Mousavi, M. (2017). *Application of the model in geography with emphasis on urban and regional planning*. 5th Edition: Azadpima, 320 pages (in Persian).
- IHDP, (2007). Strategic Plan 2007-2015. Archived from the original on 12 June 2010. Retrieved 30 July 2010.
- IPCC, (2006). IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan.
- Jensen, J.R. (1996). *Introductory digital image processing: A remote sensin perspective*. 2nd Edition: Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- Karbasi, A.R., Monavari, S.M., & Azarkamand, S. (2013). Urban Environmental Management Strategice. 1th Edition: Talab, 184 pages.
- Karimi, Z., Saad Aldin, A., & Bardi Sheikh, V. (2022). The effects of watershed management measures on the four services of Chelchai watershed in Golestan province. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(4), 18-36 (in Persian).
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304, 1623-7.
- Lin, L., Sills, E., & Cheshire, H. (2014). Targeting areas for Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation (REDD+) projects in Tanzania. *Global Environmental Change*, 24, 277-286.
- Maanan, M., Karim, H., Ait Kacem, S., Ajrrough, H., Rueff, M., Snoussi & H. Rhinane (2019). Modelling the potential impacts of land use/cover change on terrestrial carbon stocks in north-west Morocco. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 26(6), 560-570.
- Marsousi, N., & Sadat Hosseini, N. (2008). ESP: for Geography and urban planning students. PNU Publication, 160 pages.
- Mather, A.S. (1999). Land Use and Cover Change. *Land Use Policy*, 16, 143.
- McGuire, A.D., Sitch, S., Klein, J.S., Dargaville, R., Esser, G., Foley, J., Heimann, M., Joos, F., Kaplan, J., Kicklighter, D.W., & Meier, R.A. (2001). Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: Analyses of CO₂, climate and land use effects with four process-based ecosystem models. *Global Biogeochemical Cycles*, 15, 183-206.
- Morshedi, A., & Hoseini Boroujeni, B. (2021). Monitoring and comparing NDSI changes using MODIS and ETM+ sensor data to estimate snow cover in North Karun Basin. *Water and Soil Management and Modeling*, 1(4), 68-82 (in Persian).
- Nazari, N., Shams Esfandabad, B., Varvani, J., Ahmadi, A., & Toranjzar, H. (2022). Land use changes around the wetland and diversity of waterfowl and shorebirds in Anzali, Almagol, Alagol and Ajigol international wetlands (Iran). *Water and Soil Management and Modeling*, 2(3), 27-39 (in Persian).

- Rahimiani Iranshahi, H., Moradi, H.R., & Jalili, Kh. (2022). Trend of precipitation and temperature changes at different time scales in the Karkheh Watershed. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(2), 1-12 (in Persian).
- Samhouri, J., & Levin, P. (2012). Linking land-and sea-based activities to risk in coastal ecosystems. *Biological Conservation*, 145 (1), 118-129.
- Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin-Kramer, R., ... & Vogl, A.L. (2014). InVEST user's guide. *The Natural Capital Project: Stanford, CA, USA*.
- Shrestha, B.B., Joshi, S., Bisht, N., Yi, S., Kotru, R., Chaudhary, R.P., & Wu, N. (2018). Inventory and impact assessment of invasive alien plant species in Kailash Sacred Landscape. International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD).
- Stern, N. (2007). *The economics of climate change; the Stern review*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Wang, H., Guan, D., Zhang, R., Chen, Y., Hu, Y., & Xiao, L. (2014). Soil aggregates and organic carbon affected by the land use change from rice paddy to vegetable field. *Ecological Engineering*, 70, 206-211.
- Wu, J., & David, J. (2002). A spatially explicit hierarchical approach to modeling complex ecological systems: theory and applications. *Ecological Modelling*, (1-2), 7-26.
- Xiaoying, L., Chensheng, H., Huijun, J., Yilun, H., Siqu, K., Jing, L., Huiying, C., Tongxin, H., Guang, Y., Hongzhou, Y., & Long, S. (2022). Spatio-temporal patterns of carbon storage derived using the InVEST model in Heilongjiang Province, Northeast China. *Frontiers in Earth Science*, DOI: 10.3389/feart.2022.846456.
- Ye, L., & Grimm, N.B. (2013). Modelling potential impacts of climate change on water and nitrate export from a mid-sized, semiarid watershed in the US Southwest. *Climatic Change*, 120, 419-431.