



Quantification and Valuation of Climate Regulation Ecosystem Services Using the InVEST Blue Carbon Model in the Khorkhoran International Wetland Reserve

Fatemeh Mohammadyari,¹  Ardavan Zarandian,^{2*} Majid Ramezani Mehrian,³ Roya Mousazadeh⁴

1. Department of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: mohammadyari.f@sku.ac.ir
2. Corresponding author, Research Group of Environmental Assessment and Risk, Research Center for Environment and Sustainable Development (RCESD), Department of Environment, Tehran, Iran. E-mail: azarandian@gmail.com
3. Department of Environmental Studies, The Institute for Research and Development in the Humanities (SAMT), Tehran, Iran. E-mail: mehrian@samt.ac.ir
4. Research Group of Environmental Economics, Research Center for Environment and Sustainable Development (RCESD), Department of Environment, Tehran, Iran. E-mail: Roya.mousazadeh@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received July 03, 2025
Received in revised form
August 10, 2025
Accepted August 30, 2024
Available online September 23,
2025

Keywords:

Blue carbon storage and sequestration, economic valuation, marine ecosystem services, mangrove forests, Khorkhoran

ABSTRACT

Research Topic: Assessing the potential of Khorkhoran International Mangrove Wetland Habitats in Providing Ecosystem Services.

Objective: Quantifies and values the blue carbon storage and sequestration ecosystem service as a climate change adaptation strategy.

Method: In this study, the InVEST Blue Carbon model was employed to simulate carbon storage and sequestration services within the coastal mangrove forests of Khorkhoran. Input data comprised land use/ land cover maps, carbon pool inventories, biomass carbon, soil carbon, and disturbance rates. The social cost of carbon method was also used to value this ecosystem service.

Results: Between 2000–2020, each hectare of mangrove forests in the study area sequestered an average of 10,510,000 tons of CO₂. Total carbon sequestration from 2000–2050 was estimated at 23,122,400.79 Mt, equating to an average release of 954,000 tons of CO₂ per hectare over this period mangrove forests in the study area. The annual economic value of blue carbon sequestration also, across the Khorkhoran International Wetland sub-basins was valued at 176,241,001,299,200 Rials (approx. USD 4.2 million*).

Conclusions: Decision-makers can leverage the results of this research to support protective measures that preserve mangroves while enhancing co-benefits like water quality and ecosystem health.

Cite this article: F. Mohammadyari, A. Zarandian, M. Ramezani Mehrian, R. Mousazadeh. (2025). Quantification and Valuation of Climate Regulation Ecosystem Services Using the InVEST Blue Carbon Model in the Khorkhoran International Wetland Reserve. *ECOHYDROLOGY*, 12(3), 851-866.
<http://doi.org/10.22059/IJE.2025.399269.1878>



© Fatemeh Mohammadyari, Ardavan Zarandian, Majid Ramezani Mehrian, Roya Mousazadeh.
Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/IJE.2025.399269.1878>

Extended Abstract

Introduction

Coastal ecosystems—mangrove forests, seagrass beds, and salt marshes—have gained significant recognition for their pivotal role in climate change mitigation through carbon sequestration functions, commonly termed "blue carbon." Blue carbon refers to carbon captured and stored within these coastal ecosystems, offering high potential as nature-based solutions for climate change adaptation. The Khorkhoran International Mangrove Wetland habitats are among Iran's most vital coastal ecosystems, supporting biodiversity, ecological resilience, and blue economic development. However, degradation from unsustainable development and anthropogenic activities threatens their ecosystem service delivery. A lack of robust economic valuation of their multifunctional services has led to their exclusion from planning processes. This study quantifies and values the blue carbon ecosystem service within Khorkhoran to inform regional and national policy frameworks.

Materials and Methods

The InVEST Blue Carbon model simulated carbon storage and sequestration dynamics within Khorkhoran's coastal mangroves. This model estimates the quantity and marginal value of carbon storage/sequestration by comparing changes in carbon stocks and sequestration rates between current and future scenarios, incorporating social cost (or market) valuations. Inputs included land use/cover maps, carbon pool data (biomass, soil carbon), and disturbance parameters. Economic valuation employed the social cost of carbon methodology.

Results

Estimated carbon storage was 124,602,691 megatons (Mt) in 2000 and 83,418,000 Mt in 2020. Projected storage for 2050, accounting for ongoing sequestration, reached 140,106,759 Mt. Between 2000–2020, each hectare of mangroves sequestered an average of 10,510,000 tons of CO₂. Total carbon sequestration from 2000–2050 was estimated at 23,122,400.79 Mt, equating to an average release of 954,000 tons of CO₂ per hectare over this period. The annual economic value of blue carbon sequestration across the Khorkhoran sub-basins was valued at 176,241,001,299,200 Rials (approx. USD 4.2 million*).

Discussion

This study pioneers the modeling of potential changes in blue carbon storage/sequestration within Khorkhoran. Total carbon emissions across the study area from 2000–2020 were 1,963,954.09 Mt, underscoring the urgency of conservation. The carbon sequestration-to-emission ratio was approximately 11:1, highlighting the mangroves' exceptional efficacy in preventing carbon release. Results indicate that maintaining current mangrove distribution will enhance blue carbon storage and sequestration over time. Observed variations in carbon stocks and sequestration rates can be attributed to physical processes (sediment transport, deposition) and environmental conditions (biogeochemical factors, climate) influencing carbon dynamics and species distribution.

Conclusions

Despite conservation efforts, enhanced management and protection of these critical resources—particularly in developing nations like Iran—are imperative. Essential steps include robust economic valuation of ecosystem services to inform decision-making for complex socio-ecological systems. Quantifying mangrove-derived services enables policymakers and local communities to recognize their environmental and societal value, facilitating informed land-use and conservation decisions.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conception and design of the study.

Acknowledgements

This article derives from a research project supported by the Office of Marine Ecosystems and Coastal Protection, Department of Environment, Iran. We express our gratitude for their support.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

کمی سازی و ارزش گذاری خدمت اکوسیستمی تنظیم اقلیم با استفاده از مدل کربن آبی InVEST در تالاب بین المللی حرای خورخوران

فاطمه محمدیاری،^۱ اردوان زرنديان،^{۲*} مجید رمضانی مهربان،^۳ رؤیا موسی زاده^۴

۱. گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: mohammadyari.f@sku.ac.ir
۲. گروه پژوهشی ارزیابی و مخاطرات محیط زیستی، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران. رایانامه: azarandian@gmail.com
۳. گروه مطالعات محیطی، پژوهشکده تحقیق و توسعه علوم انسانی (سمت)، تهران، ایران. رایانامه: mehrian@samt.ac.ir
۴. گروه پژوهشی اقتصاد محیط زیست، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران. رایانامه: Roya.mousazadeh@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	موضوع: ارزیابی پتانسیل زیستگاه های تالاب بین المللی حرای خورخوران در تدارک خدمات اکوسیستمی.
مقاله پژوهشی	هدف: کمی سازی و ارزش گذاری خدمت اکوسیستمی ذخیره و ترسیب کربن آبی، راهبردی برای سازگاری با تغییرات اقلیمی است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۲	روش تحقیق: در این مطالعه برای مدل سازی خدمت اکوسیستمی ذخیره و ترسیب کربن از مدل کربن آبی InVEST استفاده شد. داده های ورودی شامل نقشه کاربری، اطلاعات مخازن کربن، میزان اختلال کربن زیست توده و کربن خاک است. همچنین برای ارزش گذاری این خدمت اکوسیستمی از روش هزینه اجتماعی کربن استفاده شد.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹	یافته ها: هر هکتار از جنگل های حرای محدوده مورد مطالعه بین سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ به طور میانگین موجب انباشت ۱۰۵۱۰۰۰ تن دی اکسید کربن می شود. همچنین مقدار کل انباشت کربن معادل ۲۳۱۲۲۴۰۰/۷۹ مگاتن برآورد شد. بر این اساس، از هر هکتار از جنگل های حرای محدوده مورد مطالعه به طور میانگین ۹۵۴۰۰۰ تن دی اکسید کربن طی این دوره زمانی منتشر می شود. همچنین مجموع ارزش اقتصادی خدمت ترسیب کربن آبی در زیرحوضه های آبخیز حرای خورخوران ۱۷۶۲۴۱۰۰۱۲۹۹۲۰۰ ریال در سال برآورد شد.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸	نتیجه گیری: تصمیم گیرندگان می توانند از نتایج این تحقیق برای حمایت از اقدامات حفاظتی استفاده کنند که نه تنها از حرا حفاظت می کند، بلکه مزایای دیگری مانند کیفیت آب و سلامت اکوسیستم را در منطقه به دنبال دارد.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱	کلیدواژه ها: ذخیره و ترسیب کربن آبی، ارزش گذاری اقتصادی، خدمات اکوسیستم های دریایی، جنگل های حرا، خورخوران.
استناد: محمدیاری، فاطمه؛ زرنديان، اردوان؛ رمضانی مهربان، مجید؛ موسی زاده، رؤیا. کمی سازی و ارزش گذاری خدمت اکوسیستمی تنظیم اقلیم با استفاده از مدل کربن آبی InVEST در تالاب بین المللی حرای خورخوران. مجله اکوهیدرولوژی، ۱۲ (۳)، ۸۶۶-۸۵۱	
ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.	© فاطمه محمدیاری، اردوان زرنديان، مجید رمضانی مهربان، رؤیا موسی زاده.
	http://doi.org/10.22059/IJE.2025.399269.1878



مقدمه

اکوسیستم‌های دریایی و ساحلی، بزرگ‌ترین اکوسیستم‌های آبی زمین هستند و در نتیجه برای بخش قابل توجهی از جمعیت انسانی در جهان حیاتی هستند. این اکوسیستم‌ها مزایای متعددی از جمله مواد غذایی و مواد خام، تنظیم اقلیم، منابع ژنتیکی و پزشکی، تعدیل و کاهش ضایعات، حفاظت از ساحل و همچنین هویت فرهنگی و تفریح را برای مردم فراهم می‌کنند (تاوونز^۱ و همکاران، ۲۰۱۸؛ مولر^۲ و همکاران، ۲۰۲۰). اکوسیستم‌های ساحلی شامل جنگل‌های حرا (مانگرو)، علف‌های دریایی و شوره‌زارها به دلیل نقش اساسی‌شان در کاهش تغییرات اقلیمی از طریق عملکردهای ترسیب کربن، که اغلب به‌عنوان «کربن آبی» شناخته می‌شوند، از اهمیت بالایی برخوردار شده‌اند (کودو و کشاکا^۳، ۲۰۲۴). کربن آبی، کربن ذخیره‌شده در این اکوسیستم‌هاست که پتانسیل بالایی به‌عنوان راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت برای کاهش اثرات تغییرات اقلیمی ارائه می‌دهد (وندركلیفت^۴ و همکاران، ۲۰۱۹). اکوسیستم‌های کربن آبی می‌توانند به‌طور قابل توجهی در تعادل کربن (یعنی تفاوت بین تجمع کربن و انتشار گازهای گلخانه‌ای) نقش داشته باشند، به‌طوری‌که جنگل‌های حرا نرخ ترسیب کربن و ذخایر بالقوه بیشتری نسبت به سایر اکوسیستم‌های ساحلی دارند (مک‌ریدی^۵ و همکاران، ۲۰۲۱). بیشتر اکوسیستم‌های دریایی در سراسر جهان به‌طور قابل توجهی توسط عوامل مرتبط با انسان تغییر کرده‌اند (سیمونی^۶ و همکاران، ۲۰۲۳). شهرنشینی تهدیدی است که بر جنگل‌های حرا و توانایی آن‌ها در ترسیب کربن تأثیر می‌گذارد. گسترش سریع شهرها در امتداد خطوط ساحلی همراه با ساخت بزرگراه‌ها و توسعه بنادر منجر به افزایش زمین‌های ساخته‌شده و قطعه‌قطعه شدن مناطق وسیعی از جنگل‌های حرا می‌شود (آی^۷ و همکاران، ۲۰۲۰). در نتیجه، ذخیره و ظرفیت ترسیب کربن در خاک تحت تأثیر قرار می‌گیرد و با افزایش معدنی شدن مجدد کربن ذخیره‌شده در رسوبات در نتیجه قرار گرفتن در معرض شرایط سمی، توانایی این اکوسیستم در جذب و ذخیره کربن کاهش می‌یابد (رز، دِ پائولا کوستا و دِ فریتاس^۸، ۲۰۲۲). بنابراین، با توجه به تغییرات مهم اکولوژیکی مرتبط با تبدیل کاربری زمین، از بین رفتن جنگل‌های حرا از طریق شهرنشینی راهبردهای استفاده از این جنگل‌ها را برای پشتیبانی از سازگاری با تغییرات اقلیمی تضعیف می‌کند (برایان - براون^۹ و همکاران، ۲۰۲۰). دلیل اساسی این مشکلات نادیده گرفتن ارزش خدمات اکوسیستمی ارائه‌شده توسط اکوسیستم‌های دریایی و تالاب‌های ساحلی در برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری‌ها است (باربیر^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۹؛ زینگ^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۳). در واقع، ارزیابی و ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستمی برای حمایت از مدیریت منابع طبیعی در محیط دریایی، به‌اندازه محیط خشکی پیشرفته و دقیق نبوده و روش‌های ارزیابی کمتر در دسترس هستند. دلیل این فقدان علاوه بر کمبود داده، این است که اثرات فعالیت‌های انسانی در دریا به‌اندازه فعالیت‌های روی زمین قابل مشاهده نیست. با این حال استفاده از این رویکرد به افزایش پایداری فعالیت‌های انسانی در دریا، محافظت از عرضه خدمات اکوسیستم دریایی و در نتیجه حمایت از بخش‌های دریایی و منطبق با اقتصاد آبی پایدار در درازمدت کمک می‌کند (ون دپول^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۳). در این مورد، نیاز به درک پتانسیل جنگل‌های حرا برای ذخیره و ترسیب کربن، جنبه‌ای مهم برای مدیریت اکوسیستم‌های ساحلی است. این اطلاعات می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا پتانسیل اکوسیستم‌های کربن آبی، مانند جنگل‌های حرا را به‌عنوان راهبردی برای کاهش و سازگاری با تغییرات اقلیمی درک کنند (برناردینو، نوبرگا و فریرا^{۱۳}، ۲۰۲۱). بدین منظور، در این مطالعه برای مدل‌سازی خدمت اکوسیستمی ذخیره و ترسیب کربن در محدوده‌های ساحلی دریایی جنگل‌های حرای

1. Townsend
2. Müller
3. Quevedo & Kohsaka
4. Vanderklift
5. Macreadie
6. Simeoni
7. Ai
8. Rosa, de Paula Costa, & de Freitas
9. Bryan-Brown
10. Barbier
11. Xiang
12. Van de Pol
13. Bernardino, Nobrega, & Ferreira

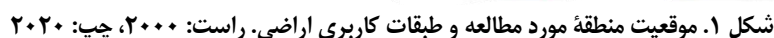
خورخوران، از مدل کربن آبی InVEST استفاده شد. این مدل، کمیت و ارزش حاشیه‌ای خدمات ذخیره‌سازی و ترسیب کربن را با تعیین و مقایسه میزان تغییر در موجودی و انباشت کربن بین سناریوهای فعلی و آینده برآورد می‌نماید. همچنین برآوردهایی از ارزش اجتماعی کربن را با تکیه بر اطلاعات ۱. توزیع و فراوانی پوشش گیاهی ساحلی، ۲. داده‌های ذخیره کربن خاص زیستگاه، ۳. اختلال زیست‌توده و کربن خاک و ۴. نرخ‌های انباشت برای برآورد ذخیره، ترسیب و ارزش کربن در پهنه سرزمین‌های خشکی و دریایی ارائه می‌دهد. همچنین برای تعیین کمیت ارزش ذخیره‌سازی و ترسیب کربن، بر تغییرات دی‌اکسید کربن جو و سایر گازهای گلخانه‌ای در نتیجه تغییرات ناشی از فعالیت‌های انسانی تمرکز می‌کند که می‌توانند بر ظرفیت اکوسیستم‌های دریایی در ذخیره‌سازی و ترسیب کربن تأثیر بگذارند (شارپ^۱ و همکاران، ۲۰۱۸). در دهه‌های اخیر، محققان به کمی‌سازی خدمات اکوسیستمی دریایی با مدل‌های InVEST تمرکز کردند. کمی‌سازی خدمات اکوسیستمی کربن آبی در اکوسیستم‌های دریایی ایران با مدل InVEST تاکنون گزارش نشده است اما در خارج از کشور به دلیل اهمیت این خدمات مورد توجه قرار گرفته است که می‌توان به مطالعات که^۲ و همکاران (۲۰۲۵)، پاورز، کودو و کامیاما^۳ (۲۰۲۵) و ماسی^۴ و همکاران (۲۰۲۵) اشاره کرد. برای مثال که و همکاران (۲۰۲۵)، کربن آبی در تالاب لیائووه طلی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ را با ترکیب توزیع چگالی کربن در خاک تالاب و با مدل کربن آبی InVEST محاسبه کردند. براساس نتایج، ذخایر کربن آبی تالاب روند صعودی داشته ولی نرخ رشد به تدریج کاهش پیدا کرده است. از طرف دیگر، ارزش‌گذاری اقتصادی خدمات اکوسیستم در ایران برای اکوسیستم‌های دریایی بیشتر با روش‌های مبتنی بر قیمت بازار و تمایل به پرداخت مورد توجه قرار گرفته است. برای مثال بادام‌فیروز، موسی‌زاده و سرخیل (۲۰۲۱) ارزیابی اقتصادی خدمات اکوسیستم تالاب‌های ملی ایران را با استفاده از رویکرد انتقال منافع و سلطانی قلعه، زراعت کیش و عابدی (۱۴۰۱) ارزش‌گذاری خدمات و خسارت‌های ناشی از برداشت بی‌رویه میگو در اکوسیستم‌های دریایی استان هرمزگان را با ارزش‌گذاری مشروط و انتقال منافع انجام دادند. در مطالعات خارجی نیز نی^۵ و همکاران (۲۰۲۳) به ارزش‌گذاری اقتصادی خدمات اکوسیستم تالاب ساحلی حرا در خلیج ببیو، چین براساس آزمون انتخاب و چنگ، ژائو و وانگ^۶ (۲۰۲۲) ارزش خدمات اکوسیستم تالاب لینگهکو را با دو رویکرد ارزش تابعی و عامل معادل مورد ارزیابی قرار دادند. کمی‌سازی و ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستمی به صورت توأمان به درک توزیع مکانی خدمات کمک می‌کند که این مهم در اکوسیستم‌های دریایی مورد غفلت واقع شده است و در مطالعه حاضر به رفع این خلأ در تالاب بین‌المللی حرای خورخوران پرداخته شده است. در بین مطالعات خارجی گونزالس-گارسیا^۷ و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از مدل کربن آبی InVEST ظرفیت فعلی و آینده فانروگام‌های دریایی برای ذخیره و ترسیب کربن آبی در اسپانیا را نقشه‌برداری و ارزیابی کردند. نتایج حاصل از سناریوهای مدل‌سازی، نشان‌دهنده کاهش مداوم میزان کربن ذخیره‌شده در این اکوسیستم‌ها تا سال ۲۰۵۰ است. تأثیر اقتصادی این خسارات معادل ۱۷۹۷۴ میلیون یورو (حدود ۱/۶ درصد از تولید ناخالص داخلی اسپانیا) است. همچنین در بین مطالعات داخلی کمی‌سازی و ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستمی چرخه مواد مغذی در این تالاب توسط زرنیدیان و همکاران (۱۴۰۴) انجام شده است.

زیستگاه‌های تالاب بین‌المللی حرای خورخوران از مهم‌ترین اکوسیستم‌های ساحلی ایران هستند که به حفظ تنوع زیستی، پایداری اکولوژیکی و توسعه اقتصاد آبی منطقه کمک می‌کنند. با وجود این، تخریب این اکوسیستم‌ها بر اثر توسعه نامتوازن و فعالیت‌های انسانی تهدیدی جدی برای ارائه خدمات اکوسیستمی آن‌ها محسوب می‌شود. کمبود اطلاعات معتبر در زمینه ارزش اقتصادی خدمات اکوسیستمی چندانکه در این اکوسیستم‌ها باعث شده است که در فرایندهای برنامه‌ریزی هیچ توجهی به این اکوسیستم‌ها نشود. بدین منظور مطالعه حاضر با هدف کمی‌سازی و ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستمی کربن آبی در تالاب بین‌المللی حرای خورخوران به منظور گنجاندن نتایج آن در برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای و ملی انجام شده است.

1. Sharp
2. Ke
3. Powers, Quevedo, & Kameyama
4. Masi
5. Nie
6. Cheng, Zhou, & Wang
7. González-García

معرفی منطقه مورد مطالعه

مطالعات، بعد از تعیین حریم اکولوژیک محدوده مورد مطالعه، ۱۹۷۹۹۶/۳۱ هکتار برآورد شده است (شکل ۱).



کمی سازی خدمت اکوسیستمی تنظیم اقلیم با استفاده از مدل کرین آبی InVEST

مدل کربن آبی InVEST، چرخه کربن را با در نظر گرفتن ذخیره سازی در چهار مخزن اصلی زیست توده روی زمین، زیست توده زیرزمینی، کربن مرده و کربن رسوب بررسی می کند. انباشت کربن در زیستگاه های ساحلی عمدتاً در رسوبات رخ می دهد (پندلتون^۱ و همکاران، ۲۰۱۲). این مدل از کاربران می خواهد تا نقشه هایی از اکوسیستم های ساحلی (مانند حرا و علف های دریایی) که کربن را ذخیره می کنند، ارائه دهند. کاربران همچنین باید اطلاعاتی در مورد میزان کربن ذخیره شده در چهار مخزن کربن و میزان تجمع سالانه کربن در رسوبات ارائه دهند. اگر اطلاعات محلی در دسترس نباشد، کاربران می توانند از پایگاه داده جهانی، مقادیر ذخایر کربن و نرخ های انباشتی آن را بر مبنای ادبیات علمی بررسی شده که در مدل گنجانده شده است، استفاده کنند. اگر داده های حاصل از مطالعات میدانی یا سایر منابع محلی در دسترس باشد، این مقادیر باید به جای مقادیر موجود در پایگاه داده جهانی استفاده

شوند. این مدل به نقشه‌های پوشش زمین نیاز دارد که نشان‌دهنده تغییرات در الگوهای استفاده انسان در مناطق ساحلی یا تغییرات سطح دریاست تا میزان کربن ازدست‌رفته یا به‌دست‌آمده در یک دوره زمانی مشخص را تخمین بزند. همچنین با جمع کردن کربن ذخیره‌شده در این چهار مخزن، ذخیره کربن در سراسر خشکی یا دریا را کمی می‌کند. اجرای مدل کربن آبی شامل دو گام پیش‌پردازش و سپس اجرای مدل اصلی است. مدل از ابزار پیش‌پردازش به‌منظور ایجاد یک ماتریس انتقالی استفاده می‌کند که نشان‌دهنده انباشت یا اختلالات در نتیجه انتقال‌های مختلف کاربری (مانند شوره‌زار به زمین‌های خشک توسعه‌یافته) است. برای هر پیکسل در ناحیه مورد مطالعه، ابزار پیش‌پردازش، کلاس کاربری موجود در زمان t_0 و سپس t_1 را به‌منظور شناسایی کل دامنه انتقال مقایسه می‌کند. این ماتریس انتقالی که توسط پیش‌پردازشگر مدل کربن آبی تولید شده و سپس توسط کاربر ویرایش می‌شود، به مدل اجازه می‌دهد تا شناسایی کند که فعالیت‌های انسانی و رویدادهای طبیعی، در کجاها کربن ذخیره‌شده توسط پوشش گیاهی را مختل می‌کنند. اگر انتقال از یک کلاس کاربری به کلاس دیگر در هیچ‌یک از مراحل زمانی رخ ندهد، ابزار سلول را با «هیچ»^۱ پر می‌کند. برای سلول‌های ماتریس که در آن جابه‌جایی رخ می‌دهد، ابزار «انباشت»^۲ یا «اختلال»^۳ را در هر سلول جدول پر می‌کند. برای مثال، اگر یک پیکسل باتلاق نمکی در زمان t_0 به زمین خشک توسعه‌یافته در زمان t_1 تبدیل شود، آن سلول حاوی متن «اختلال» خواهد بود. ازسوی دیگر، اگر حرا در همین بازه زمانی به‌صورت حرا باقی بماند، این سلول در ماتریس حاوی متن «انباشتگی» خواهد بود. این احتمال وجود دارد که حرا که به‌صورت حرا باقی می‌ماند، کربن را در خاک و زیست‌توده خود انباشته کند. پیش‌پردازنده همچنین می‌تواند به کاربر در ارائه انتقال‌های دقیق‌تر که منجر به درجات مختلف انباشت یا انتشار کربن می‌شود کمک کند. برای مثال، یک کاربر ممکن است فقط یک کلاس توسعه را در نقشه کاربری ارائه دهد. با این حال، برخی از انواع توسعه ممکن است کربن خاک را بیش از دیگران مختل کنند. با جداسازی این دو نوع توسعه، مدل قادر خواهد بود تغییرات کربن را در نتیجه عوامل طبیعی و انسانی با دقت بیشتری تعیین و نقشه‌برداری کند. به‌طور مشابه، گونه‌های مختلف حرا ممکن است کربن خاک را با سرعت‌های متفاوتی انباشت کنند. اگر این اطلاعات شناخته‌شده باشد، ارائه این تمایز بین دو کلاس مختلف در نقشه‌های ورودی کاربری اراضی و سپس نرخ‌های انباشت مرتبط با آن‌ها در جدول ورودی کربن مهم است. در ادامه داده‌های ورودی و چگونگی تهیه آن‌ها تشریح شده است:

- **نقشه‌های کاربری زمین:** نقشه‌های پایه و فعلی استخراج‌شده از تصاویر ماهواره لندست ۷ و ۸؛
- **مخازن کربن و جدول ذخیره‌سازی براساس نوع کاربری اراضی:** جدولی که حاوی مقادیر ذخیره کربن در زیست‌توده (تن $\text{CO}_2 \text{ e/ha}$)، رسوبات (تن $\text{CO}_2 \text{ e/ha}$) و نرخ انباشت (تن $\text{CO}_2 \text{ e/ha/yr}$) است.
- **ماتریس انتقال:** جدولی توسط ابزار پیش‌پردازشگر تولید می‌شود و ایجاد اختلال یا انباشت کربن را براساس منطق از پیش برنامه‌ریزی‌شده برای تبدیل کاربری اراضی از زمان اول به زمان دوم نشان می‌دهد.
- **اختلال زیست‌توده و خاک:** جدول‌های پیش‌فرضی که به‌ترتیب درصد اختلال کربن زیست‌توده و میزان اختلال کربن خاک را براساس شدت اثر و نوع پوشش گیاهی نشان می‌دهد. پیش‌فرض‌ها براساس مرور ادبیات جهانی است.
- **نیمه‌عمر کربن:** جدول پیش‌فرض حاوی نرخ‌های زوال کربن خاص پوشش گیاهی/اختلال که براساس مرور ادبیات جهانی تهیه شده است.

برای اجرای مدل در محدوده مورد مطالعه این تحقیق، ابتدا گام پیش‌پردازش با ارائه داده‌های اولیه شامل نقشه‌های پوشش کاربری در دو مقطع زمانی سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ میلادی و معرفی کلاس‌های کاربری واجد مخزن کربن آبی (جنگل‌های حرا، باتلاق‌های ساحلی و پهنه‌های گلی) به ابزار پیش‌پردازنده انجام شد. با اجرای مدل پیش‌پردازنده دو خروجی شامل الگوهای نقل و انتقال مخازن کربن و ویژگی‌های بیوفیزیکی کربن در مخازن زیست‌توده و خاک حاصل شد. این الگوهای خروجی باید با توجه به داده‌های موجود در زمینه کمیت کربن در مخازن مربوطه توسط کاربر تکمیل و اصلاح شود تا پس از آن به‌عنوان ورودی لازم برای

اجرای مدل اصلی کربن آبی مورد استفاده قرار گیرد. چگونگی تکمیل داده های مورد نیاز برای تهیه جدول بیوفیزیکی مخازن کربن آبی در محدوده مورد مطالعه در ادامه ارائه شده است.

• تعیین کمیت کربن آبی در خاک

برای تعیین موجودی کربن (تن/هکتار) در خاک محدوده مورد مطالعه از نتایج مطالعه حمزه و لاهیجانی (۲۰۲۱) استفاده شد. در این مطالعه، کربن موجود در خاک در ۳۲ ایستگاه در محدوده های دارای تراکم بالا، متوسط و کم درختان مانگرو از طریق نمونه برداری میدانی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، برای تعیین موجودی کربن خاک، با خشک نمودن نمونه های خاک در آون، مقدار چگالی خشک رسوب (گرم بر سانتی متر مکعب) به دست آمده است. همچنین درصد کربن آلی رسوب توسط روش احتراق در کوره و میزان کربن آلی از رابطه زیر به دست آمده است:

$$\% \text{ Corg} = 0.21 \times \% \text{ LOI} \cdot 1.12 \quad (R^2 = 0.86)$$

میزان چگالی کربن خاک با ضرب میزان درصد غلظت کربن آلی خاک در چگالی خشک خاک هر نمونه رسوب به دست آمده است (چگالی کربن خاک $(\text{g/cm}^3) = \text{چگالی خاک خشک } (\text{g/cm}^3) \times \text{ضرب در درصد کربن آلی} / 100$). با ضرب کردن چگالی کربن در ضخامت افق خاک که نمونه از آن بخش خاک برداشته شده است، میزان چگالی کربن هر افق خاک به دست آمده است (میزان کربن در هر بخش مغزه $(\text{g/cm}^3) = \text{چگالی کربن خاک } (\text{g/cm}^3) \times \text{ضرب در ضخامت افق خاک بر حسب سانتی متر}$).

در نهایت با جمع کردن مقادیر چگالی کربن در تمام افق های خاک، میزان چگالی کربن کل خاک در هر ایستگاه نمونه برداری به دست آمده است. میزان چگالی کربن در هر مغزه به واحد معمول تن کربن در هکتار تبدیل شده است. براساس نتایج مطالعه ذکر شده، در زیستگاه های با تراکم بالای حرا، ذخایر کربن خاک عمدتاً بین ۵۰۰ تا ۶۰۰ تن در هکتار و حداکثر ۶۴۳ تن در هکتار متغیر است. از سوی دیگر، در محیط های با تراکم متوسط، ذخیره کربن خاک بین ۶۵۰ تا ۷۵۰ تن در هکتار در نوسان است. همچنین ذخیره کربن در محدوده های کم تراکم بین ۵۲۰ تا ۵۸۰ تن در هکتار در نوسان است. بنابراین میانگین ذخیره کربن خاک در محدوده های پرتراکم، تراکم متوسط و کم تراکم به ترتیب معادل ۵۸۱، ۷۰۰ و ۵۵۰ تن در هکتار محاسبه شد.

• تعیین کمیت کربن آبی در زیست توده گیاهی (درختان حرا)

اطلاعات این قسمت با استفاده از نتایج مطالعه (حمزه، ۱۴۰۱) تکمیل شد. در این مطالعه، زیست توده بالازمینی (اندام هوایی درختان) با استفاده از معادله عمومی آلومتریک و ارتفاع ۱/۳ متر dbh به عنوان متغیر مستقل، تعیین شده است. میزان زیست توده درخت روی سطح هر کدام از درختان موجود در هر دایره با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$ATB = 0.0509 \times \rho \times D^2 \times H$$

که در آن، ATB زیست توده بخش روی سطح درخت مانگرو (کیلوگرم)، ρ چگالی چوب (گرم بر سانتی متر مکعب)، D قطر تنه درخت در ارتفاع ۴۷۴ سانتی متری و H ارتفاع درخت (متر) است. برای استفاده در معادله محاسبه میزان زیست توده درختان، میزان چگالی چوب درختان حرا، ۰/۶۹ گرم بر سانتی متر مکعب در نظر گرفته شده است. برای محاسبه میزان کربن موجود در هر درخت، میزان زیست توده محاسبه شده در ضریب تبدیل (۰/۵) ضرب شده است. همچنین برای محاسبه زیست توده زیر سطح درختان (ریشه ها) میزان زیست توده بالازمینی در ضریب ۰/۷۲۴ ضرب شده است. سپس برای محاسبه کربن موجود در ریشه ها، عدد محاسبه شده زیست توده در ضریب ۰/۳۹ ضرب شده است. در نهایت، مجموع میزان کربن محاسبه شده در تمامی درختان یک دایره به عنوان میزان کربن درختان مانگرو در ۰/۱۵۴ هکتار (مساحت دایره) به مساحت کل هر منطقه تعمیم داده شده است. در این مطالعه، برای موجودی کربن ذخیره شده در زیست توده بالازمینی و زیرزمینی درختان حرا، از میانگین مربوط به زیستگاه های پرتراکم، تراکم متوسط و کم تراکم (بر حسب تن در هکتار) در محدوده های خلیج نایبند و مل گنزه به لحاظ نزدیکی جغرافیایی با محدوده خورخوران و انجام آزمایش های میدانی دقیق مورد استفاده قرار گرفت. بر این اساس، میانگین کربن زیست توده بالازمینی (تن/هکتار) در محدوده های زیستگاهی کم تراکم محدوده مورد مطالعه این تحقیق، ۳۲ تن بر هکتار و در محدوده های زیستگاهی نیمه متراکم و متراکم ۱۷۳/۵ تن بر هکتار در نظر گرفته شد. همچنین میانگین کربن در زیست توده زیرزمینی (تن در هکتار) در محدوده های زیستگاهی کم تراکم ۱۸ تن بر هکتار و در محدوده های متراکم و نیمه متراکم ۹۴/۵ تن بر هکتار در نظر گرفته شد.

الگوی اولیه حاصل از اجرای ابزار پیش‌پردازنده به‌عنوان جدول بیوفیزیکی لازم (جدول ۱) برای اجرای مدل اصلی کربن آبی براساس داده‌های محلی مخازن کربن تکمیل و اصلاح شد که جزئیات آن در ادامه تشریح شده است:

- **کد پوشش / کاربری:** کد هریک از کلاس‌های نقشه رستری کاربری زمین.
- **زیست‌توده اولیه گیاهی:** ذخایر کربن اولیه در مخزن زیست‌توده برای هر کلاس کاربری زمین برحسب متریک تن در هکتار؛
- **خاک اولیه:** ذخایر کربن اولیه در مخزن خاک برای هر کلاس کاربری زمین برحسب متریک تن در هکتار.
- **نیمه‌عمر زیست‌توده:** نیمه‌عمر کربن در مخزن زیست‌توده برحسب تعداد سال.
- **اثر اختلالی کم، متوسط و زیاد در زیست‌توده:** نسبتی از ذخیره کربن در مخزن زیست‌توده که هنگام انتقال یک پیکسل از یک کلاس کاربری زمین به کلاس‌های دیگر به‌ترتیب بر اثر یک اختلال کم، متوسط و زیاد تأثیر مختل می‌شود.
- **انباشت سالانه زیست‌توده:** نرخ سالانه انباشت (معادل CO₂) در مخزن زیست‌توده برحسب متریک تن در هکتار در سال.
- **نیمه‌عمر خاک:** نیمه‌عمر کربن در مخزن خاک برحسب تعداد سال.
- **اثر اختلالی کم، متوسط و زیاد در خاک:** نسبتی از ذخیره کربن در مخزن خاک که هنگام انتقال یک پیکسل از یک کلاس کاربری زمین به کلاس‌های دیگر به‌ترتیب بر اثر یک اختلال کم، متوسط و زیاد تأثیر مختل می‌شود.
- **انباشت سالانه خاک:** نرخ سالانه انباشت (معادل CO₂) در مخزن خاک برحسب متریک تن در هکتار در سال.

جدول ۱. جدول بیوفیزیکی مدل اصلی کربن آبی براساس داده‌های محلی مخازن کربن

کاربری	زیست‌توده اولیه	خاک اولیه	نیمه‌عمر زیست‌توده	اثر اختلالی زیست‌توده	انباشت سالانه زیست‌توده	نیمه‌عمر خاک	اثر اختلالی خاک	انباشت سالانه خاک
				کم / زیاد	کم / زیاد	کم / زیاد	کم / زیاد	کم / زیاد
پرورش آبزیان	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
مرتع تنک	۳۰	۲۴۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰
مرتع نیمه‌متراکم	۳۰	۲۴۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰
مرتع متراکم	۳۰	۲۴۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰
زمین‌های شورزار	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
جنگل حرا نیمه‌انبوه	۶۴	۳۱۳	۱۵	۰/۵	۱	۷/۵	۰/۳	۵/۳۵
جنگل حرا انبوه	۶۴	۳۱۳	۱۵	۰/۵	۱	۷/۵	۰/۳	۵/۳۵
آب داخل خشکی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
کشاورزی	۳۰	۲۴۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰
کاربری انسان ساخت	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
محدوده آب ساحلی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
رخمون سنگی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
جنگل نیمه‌انبوه	۲۴۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
جنگل تنک	۲۴۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
جنگل خیلی تنک	۲۴۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
باتلاق و منطقه مرطوب	۳۰	۲۶۹	۰/۵	۰/۵	۱	۷/۵	۰/۳	۱۰/۲۱
جنگل دست‌کاشت	۲۴۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
رودخانه	۰	۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
تپه و پهنه ماسه‌ای	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

ارزش‌گذاری خدمت اکوسیستمی تنظیم اقلیم با استفاده از روش هزینه اجتماعی کربن

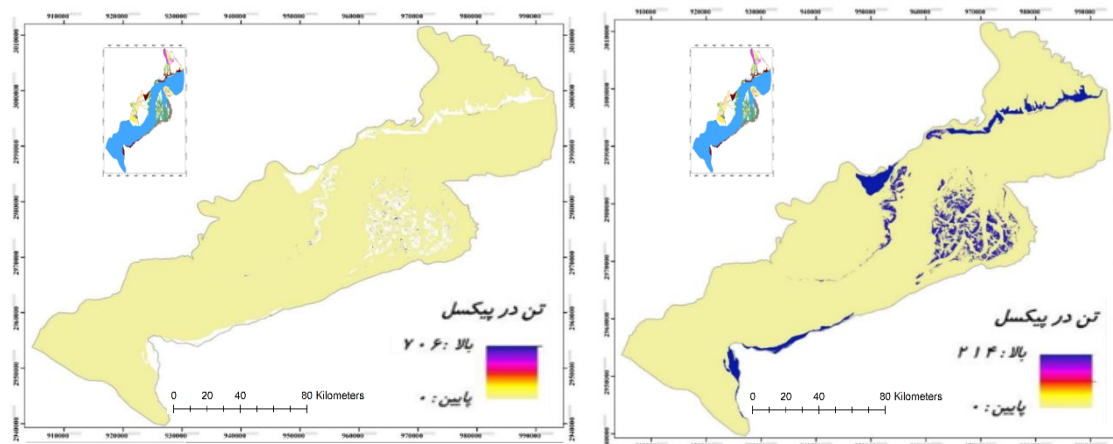
براساس سند پشتیبان فنی گروه کاری بین سازمانی، هزینه اجتماعی گازهای گلخانه‌ای دولت ایالات متحده، هزینه اجتماعی انتشار هر متریک تن CO₂ در سال ۲۰۲۰ با نرخ تنزیل ۲/۵ درصد برابر با ۷۶ دلار و سپس با استفاده از محاسبه‌گر نرخ تورم آمریکا، هزینه ۹۰ دلار در سال ۲۰۲۳ تخمین زده شد. طبق اعلام بانک مرکزی در سال ۱۴۰۳ قیمت یک دلار نیمایی برابر ۴۶۰۰۰۰ ریال در نظر گرفته شده است. از حاصل ضرب مقدار سالانه ذخیره و ترسیب کربن در پیکسل، درنهایت ارزش اقتصادی سالانه ذخیره و ترسیب کربن آبی

محاسبه شد. از آنجاکه در ایران هنوز نرخ معینی برای قیمت کربن تعیین نشده، از میانگین جهانی به‌منظور انجام محاسبات استفاده شد. با توجه به نسبت وزنی کربن به دی‌اکسید کربن، یک تن کربن معادل ۳/۶۷ تن دی‌اکسید کربن است (آرتسنس، دی‌ناکر، و گوین، ۲۰۱۳) که سهم کربن معادل ۳۳۰ دلار محاسبه شد. با در نظر گرفتن دلار نیمایی (۴۶۰۰۰۰ ریال) این سهم معادل ۱۵۱۸۰۰۰۰۰ ریال به‌ازای هر تن کربن است؛ لذا با توجه به بررسی‌های جهانی، مقدار ۳۳۰ دلار به‌ازای هر تن کربن به‌عنوان مبنای ارزش‌گذاری در محدوده مطالعاتی مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه، از میانگین جهانی تخمین هزینه اجتماعی گاز گلخانه‌ای استفاده شد.

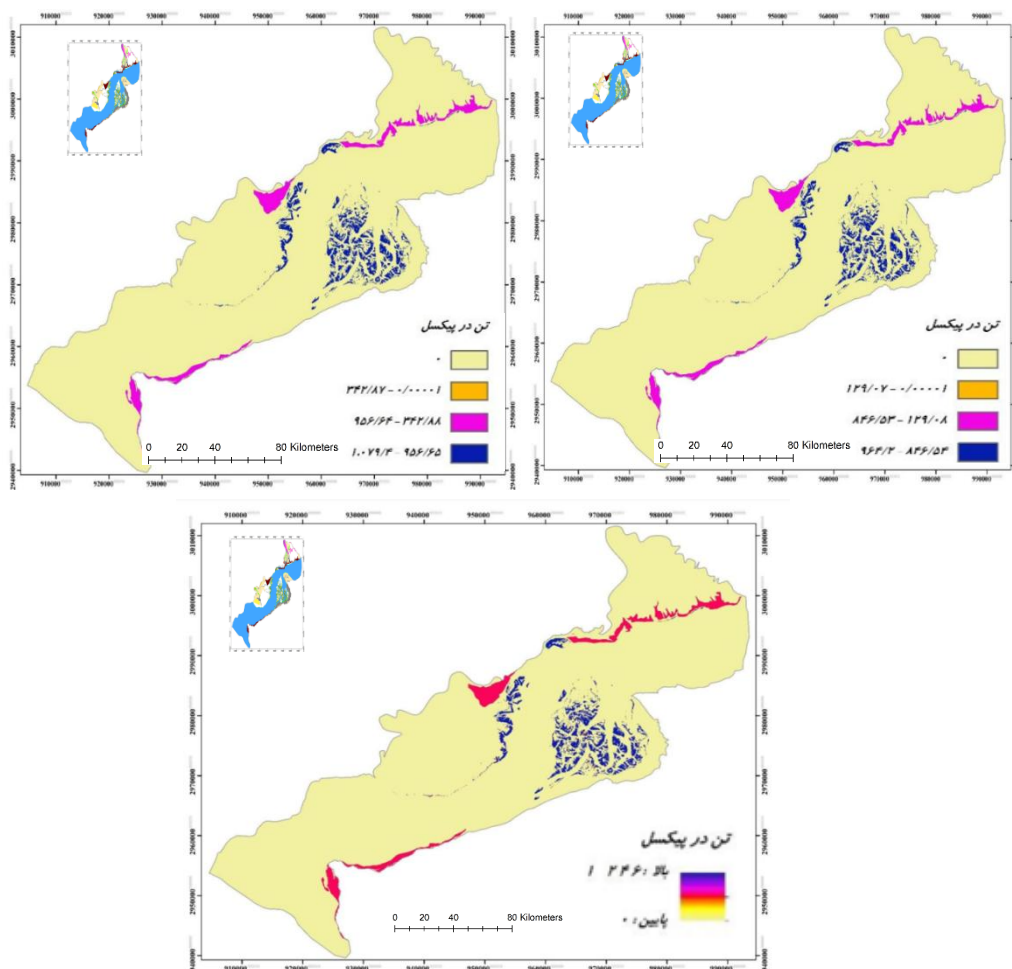
یافته‌های پژوهش

شکل‌های ۲ تا ۴ خروجی‌های حاصل از اجرای مدل کربن آبی در محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهند. شایان ذکر است دوره زمانی این تحقیق بین سال‌های پایه و جاری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ میلادی در نظر گرفته شده است. باین‌حال با توجه به تداوم خدمت ذخیره و ترسیب کربن طی سال‌های آتی به‌دلیل حفاظت و استمرار کارکرد جنگل‌های حرای جنوب کشور، اجرای مدل برای افق زمانی تا سال ۲۰۵۰ نیز صورت پذیرفته است. براساس شکل ۲، مقدار بیشینه، کمینه و میانگین انباشت معادل CO₂ بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ به‌ترتیب معادل ۲۱۴، صفر و ۱۰/۵۱۰ مگا تن در هکتار برآورد شد. بر این اساس، هر هکتار از جنگل‌های حرای محدوده مورد مطالعه به‌طور میانگین موجب انباشت ۱۰۵۱۰۰۰ تن دی‌اکسید کربن طی دوره زمانی مورد نظر می‌شود (معادل ۲۸۶۳۷۶۰/۲۱ تن کربن خالص؛ جرم اتمی کربن و اکسیژن به‌ترتیب ۱۲ و ۱۶ است. بنابراین جرم اتمی CO₂ ۴۴ است. این بدان معناست که هر کیلوگرم کربن می‌تواند ۳/۶۷ کیلوگرم CO₂ تولید کند). مقدار کل انباشت کربن در محدوده مورد مطالعه طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۵۰ بر همین اساس معادل ۲۳۱۲۲۴۰۰/۷۹ مگاتن برآورد شد. همچنین مقدار بیشینه، کمینه و میانگین انتشار CO₂ بر اثر بروز اختلالات در محدوده جنگلی بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ به‌ترتیب معادل ۷۰۶، صفر و ۰/۹۵۴ مگاتن در هکتار برآورد شد. بر این اساس، از هر هکتار از جنگل‌های حرای محدوده مورد مطالعه به‌طور میانگین ۹۵۴۰۰۰ تن دی‌اکسید کربن طی دوره زمانی مورد نظر منتشر می‌شود. (معادل ۲۵۹۹۴۵/۵ تن کربن خالص؛ جرم اتمی کربن و اکسیژن به‌ترتیب ۱۲ و ۱۶ است. بنابراین جرم اتمی CO₂ ۴۴ است. این بدان معناست که هر کیلوگرم کربن می‌تواند ۳/۶۷ کیلوگرم CO₂ تولید کند).

مقدار ذخیره کربن (شکل ۳) در سال پایه ۲۰۰۰ از صفر تا ۹۶۴ و به‌طور میانگین ۳۷/۹۱۸ مگاتن در هکتار بوده است. این مقدار برای کل محدوده مورد مطالعه معادل ۱۲۴۶۰۲۶۹۱ مگاتن برآورد شد. براساس همین محاسبات، مقدار ذخیره کربن در سال ۲۰۲۰ از صفر تا ۱۰۷۹ و به‌طور میانگین ۱/۵۴ مگاتن در هکتار بوده است. این مقدار برای کل محدوده مورد مطالعه ۸۳۴۱۸۰۰۰ مگا تن برآورد شد. در همین زمینه با توجه به تداوم کارکرد انباشت کربن در جنگل‌های حرا، این میزان ذخیره کربن در سال ۲۰۵۰ به‌طور میانگین معادل ۶۳/۶۸ مگاتن در هکتار (با کمینه و بیشینه صفر تا ۱۲۴۶ مگاتن در هکتار) (شکل ۳) و درمجموع معادل ۱۴۰۱۰۶۷۵۹ مگاتن خواهد بود.

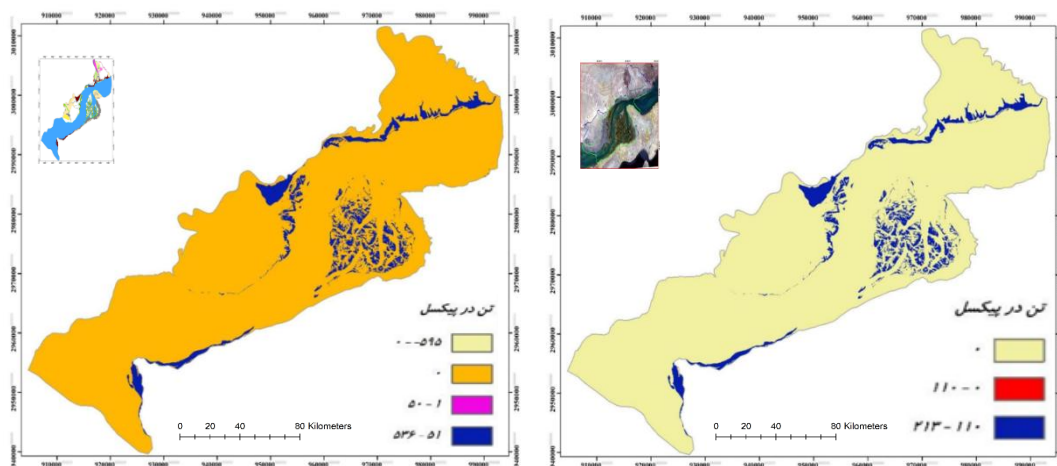


شکل ۲. مقدار کربن انباشته‌شده (راست) و کربن انتشاریافته (ب) بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ میلادی برحسب مگاتن معادل CO₂ در هکتار



شکل ۳. مجموع موجودی ذخیره کربن سال ۲۰۰۰ (بالا، راست) ۲۰۲۰ (بالا، چپ) و ۲۰۵۰ (پایین) برحسب مگاتن معادل CO₂ در هکتار

با توجه به اینکه برای گام ارزش گذاری اقتصادی، محاسبه میزان ترسیب سالانه کربن (شکل ۴) مورد نیاز خواهد بود، با استفاده از خروجی های مدل کربن آبی، مقدار این پارامتر نیز محاسبه شد. بر این اساس، کمینه، بیشینه و میانگین ترسیب کربن آبی طی سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ به ترتیب معادل صفر، ۲۱۳/۳۵ و ۱۰/۵۱ مگاتن در هر هکتار بوده است. مقدار این میانگین برای سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۵۰ معادل ۲۵ مگاتن و مقدار کل ترسیب کربن آبی طی بازه زمانی مورد نظر معادل ۵۴۹۶۶۴۴۳ مگاتن برآورد شد (شکل ۴).



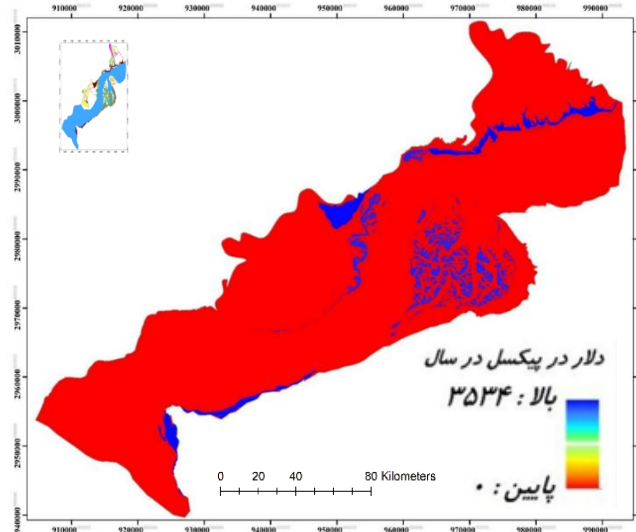
شکل ۴. ترسیب کربن بین سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ (بالا، راست) و ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ (چپ) برحسب مگاتن معادل CO₂ در هکتار

مجموع ارزش اقتصادی خدمت تنظیمی ترسیب کربن آبی در زیرحوضه‌های آبخیز حرای خورخوران در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰، ۱۷۶۲۴۱۰۰/۱۲۹۹۲۰۰ ریال در سال برآورد شده است (جدول ۲). همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، بالاترین ارزش اقتصادی سالانه ترسیب کربن آبی مربوط به زیرحوضه شماره (۵) و کمترین آن مربوط به زیرحوضه شماره (۳) است.

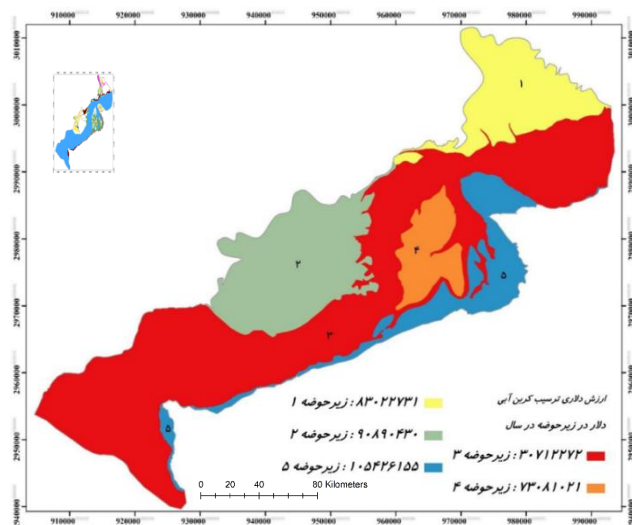
جدول ۲. ارزش اقتصادی خدمت تنظیمی ترسیب کربن آبی در زیرحوضه‌های آبخیز حرای خورخوران طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰

کد زیرحوضه	مساحت زیرحوضه (هکتار)	ارزش اقتصادی خدمت ترسیب کربن آبی		ارزش هر هکتار از خدمت ترسیب کربن آبی (ریال / هکتار)
		(ریال در سال)	(دلار در سال)	
۱	۲۳۸۹۳/۸۴	۳۸۱۹۰۴۵۶۴۱۱۸۰۰	۸۳۰۲۲۷۳۱/۳۳	۱۵۹۸۳۳۹۰۰۳/۳۴
۲	۳۵۷۸۵/۷۹	۴۱۸۰۹۵۹۸۰۶۲۲۰۰	۹۰۸۹۰۴۳۰/۵۷	۱۱۶۸۳۲۹۶۰۹/۶۶
۳	۱۰۶۵۲۹/۸۰	۱۴۱۲۷۶۴۵۲۰۲۸۰۰	۳۰۷۱۲۲۷۲/۱۸	۱۳۲۶۱۶۸۳۷/۷۵
۴	۱۱۳۹۳/۸۵	۳۳۶۱۷۳۷۰۰۱۸۸۰۰	۷۳۰۸۱۰۲۱/۷۸	۲۹۵۰۴۷۵۰۳۸/۶۲
۵	۲۰۳۹۳/۰۳	۴۸۴۹۶۰۳۱۶۰۳۶۰۰	۱۰۵۴۲۶۱۵۵/۶۶	۲۳۷۸۰۶۸۹۵۸/۰۵
مجموع	۱۹۷۹۹۶/۳۱	۱۷۶۲۴۱۰۰/۱۲۹۹۲۰۰	۳۸۳۱۳۲۶۱۱/۵۲	۸۹۰۱۲۲۶۵۵/۸۱

ارزش اقتصادی خدمت تنظیمی ترسیب کربن آبی در زیرحوضه‌های آبخیز محدوده مطالعاتی طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ به ترتیب براساس دلار در پیکسل در سال و دلار در زیرحوضه در سال در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵. ارزش اقتصادی ترسیب کربن آبی در محدوده حرای خورخوران (دلار در پیکسل در سال)



شکل ۶. ارزش اقتصادی ترسیب کربن آبی در زیرحوضه‌های محدوده حرای خورخوران (دلار در سال)

بحث

این مطالعه، اولین تلاش برای مدل سازی تغییرات بالقوه در ذخیره و ترسیب کربن آبی در تالاب حرای خورخوران است. مقدار کل انتشار کربن در محدوده مورد مطالعه طی سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰، معادل ۱۹۶۳۹۵۴/۰۹ مگاتن است که اهمیت تلاش های حفاظتی را برجسته می کند. مقایسه میزان انباشت و انتشار کربن در محدوده مورد مطالعه نشان می دهد که نسبت انباشت به انتشار کربن معادل ۱۱ برابر است که حاکی از نقش بسیار مؤثر پوشش جنگلی حرا در پیشگیری از انتشار کربن است. مقدار کل کربن آبی ترسیب یافته (۵۴۹۶۴۴۳ مگاتن) بیانگر ظرفیت بالای برخی زیست بوم های ساحلی منطقه در ایفای نقش های کلیدی در کاهش تغییرات اقلیم و تثبیت کربن در محیط است. با این حال، تحلیل فضایی نتایج نشان دهنده توزیع نامتوازن این خدمت اکوسیستمی در سطح زیرحوضه های آبخیز استان است. زیرحوضه ۵ و ۲، به دلیل وجود گسترده پوشش های طبیعی سالم از جمله جنگل های حرا، باتلاق های ساحلی و سایر زیست بوم های متراکم با قابلیت ذخیره کربن بالا در این نواحی، به عنوان مناطق کلیدی ترسیب کربن آبی شناسایی شده اند. به طور کلی، نتایج نشان داد اگر توزیع فعلی جنگل های حرا در طول زمان حفظ شود، ذخیره و ترسیب کربن آبی افزایش می یابد. تغییرات در ذخایر کربن و نرخ ترسیب را می توان با فرایندهای فیزیکی و یا شرایط محیطی (مانند انتقال و رسوب گذاری، شرایط بیوژئوشیمیایی، شرایط آب و هوایی) که بر ترسیب کربن و توزیع گونه های مختلف تأثیر می گذارند، توضیح داد. این عوامل بر تجمع، ذخیره و ترکیب مواد آلی در رسوبات جنگل های حرا تأثیر می گذارند و در نتیجه، در میزان ذخیره کربن اختلال ایجاد می کنند. ویژگی های خاک (مانند رطوبت و محتوای مواد آلی)، متغیرهای فیزیکی و شیمیایی و محیطی (مانند ارتفاع، شوری، بارندگی، منطقه آب و هوایی، نوع رسوب، دما، تابش خورشیدی) بر بهره وری کلی جنگل تأثیر می گذارند، اما می توانند مستقیماً بر کربن موجود در خاک نیز تأثیر بگذارند (کوسومانینگتیاس^۱ و همکاران، ۲۰۱۹؛ اورز لوئیس^۲ و همکاران، ۲۰۲۰؛ یانگ^۳ و همکاران، ۲۰۲۱؛ دوارته دپائولا کوستا^۴ و همکاران، ۲۰۲۱). عوامل دیگری مانند سن زیستگاه و ساختار پوشش گیاهی (مانند اندازه و تراکم درختان)، ممکن است ذخیره کربن را هدایت کنند. با توجه به اینکه درختان بزرگ تر و مسن تر قادر به ترسیب کربن بیشتر با سرعت بیشتری هستند و همچنین می توانند با نرخ بالاتر ترسیب کربن خاک مرتبط باشند (جانسون، راو، و آدامز،^۵ ۲۰۲۰؛ کارنل^۶ و همکاران، ۲۰۲۲). مدل کربن آبی InVEST پیش از این با موفقیت در مطالعات دیگر برای شناسایی فرصت های کربن آبی در مقیاس های مکانی مختلف و تحت سناریوهای مدیریتی متعدد در سیاست های اقلیمی مورد استفاده قرار گرفته است (موریچ^۷ و همکاران، ۲۰۲۲؛ ودینگ^۸ و همکاران، ۲۰۲۱؛ دوارته دپائولا کوستا و همکاران، ۲۰۲۱؛ رزا، د پائولا کوستا، و د فریتاس، ۲۰۲۲؛ مونترو-هیدالگو^۹ و همکاران، ۲۰۲۳).

نتیجه گیری و پیشنهادها

اگرچه تلاش های حفاظتی زیادی برای محافظت از جنگل های حرا و خدمات آن ها انجام شده است، باید کارهای بیشتری به ویژه در کشورهای در حال توسعه مانند ایران برای مدیریت و حفاظت مؤثرتر این منابع مهم انجام شود. یکی از کارهای ضروری در این زمینه، تعیین ارزش اقتصادی خدمات اکوسیستمی تدارک شده توسط این زیستگاه ها است که می تواند به ارائه اطلاعات ارزشمند برای تصمیم گیرندگان در مورد این سیستم های پیچیده اجتماعی و محیط زیستی کمک قابل توجهی بنماید. در واقع درک خدمات اکوسیستم ارائه شده توسط جنگل های حرا به تصمیم گیرندگان و جوامع محلی کمک می کند تا اهمیت این جنگل ها را برای محیط زیست و رفاه مردم تشخیص دهند. همچنین با کمی سازی این خدمات، سیاستمداران می توانند تصمیمات آگاهانه تری در

1. Kusumaningtyas
2. EwersLewis
3. Young
4. Duarte de Paula Costa
5. Johnson, Raw, & Adams
6. Carnell
7. Moritsch
8. Wedding
9. Montero-Hidalgo

مورد استفاده و حفاظت از زمین انجام دهند. نتایج مدل سازی خدمت ترسیب کربن آبی در این تحقیق، نشان دهنده پاداش ملموس حفاظت از این زیستگاه هاست. تصمیم گیرندگان می توانند از این داده ها برای حمایت از اقدامات حفاظتی استفاده کنند که نه تنها از حرا حفاظت می کند، بلکه مزایایی دیگری مانند کیفیت آب و سلامت اکوسیستم را در منطقه نیز حفظ می کند. مجموع ارزش اقتصادی ترسیب کربن آبی در محدوده مطالعاتی برابر با ۱۷۶۲۴۱۰۰۱۲۹۹۲۰۰ ریال در سال برآورد شده است که می تواند در توسعه طرح های مدیریتی برای حفاظت از منابع آبی و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی مؤثر باشد. همچنین می تواند به طور مؤثری در بهبود حفاظت این زیستگاه حساس و پایدارتر ساختن مدیریت آن نقش ایفا کند و مبنای مناسبی برای طراحی طرح های حفاظتی است. در این راستا، در برنامه ریزی های محیط زیستی و اقلیمی استان، حفاظت، احیا و بهره برداری پایدار از زیست بوم های ساحلی با ظرفیت بالای ترسیب کربن باید در اولویت قرار گیرد. همچنین، مناطقی که به دلایل طبیعی یا انسانی فاقد عملکرد ترسیب کربن هستند، می توانند به عنوان اهداف مداخله گری و احیای اکولوژیکی در راستای افزایش تاب آوری اقلیمی مد نظر قرار گیرند. این نتایج همچنین با شناسایی و مدیریت خردمقیاس عناصر آبی در کاربری های خشکی می تواند به افزایش کارایی اقدامات اقلیمی در مقیاس ناحیه ای کمک کند و مبنایی برای شناسایی مناطق مستعد ورود به بازارهای کربن و بهره مندی از سازوکارهای مالی بین المللی در حوزه تغییر اقلیم فراهم سازد.

در پژوهش حاضر، تمرکز بر قابلیت های مدل کربن آبی InVEST در ارائه خروجی های مناسب برای اکوسیستم های دریایی بود. اگرچه این مدل در ارائه صحت سنجی سیستماتیک خروجی دارای محدودیت است، نتایج آن براساس مطالعات پیشین قابل اعتماد و موفقیت آمیز بوده است. رویکرد به کاررفته در این مطالعه قابل تکرار است و می تواند در مکان ها و مقیاس های مکانی دیگر نیز مورد استفاده قرار گیرد. این داده ها به عنوان پایه ای برای شهرهای ساحلی در ایران و سراسر جهان عمل می کنند که می تواند برای هدایت مطالعات بیشتر و هدایت قوانین آینده در مورد سازگاری با تغییرات اقلیمی مورد استفاده قرار گیرد. سیاست های محلی می توانند امکان استفاده های مختلف از زمین را برای به حداکثر رساندن خدمات اکوسیستم حرا، که عمدتاً با تغییرات اقلیمی مرتبط هستند، فراهم کنند. همچنین حفاظت و احیای جنگل های حرا و گنجاندن آنها در اهداف ملی برای کاهش انتشار کربن اقدام مهمی برای تغییرات اقلیمی در مقیاس محلی و منطقه ای توصیه می شود.

References

- Aertsens, J., De Nocker, L., & Gobin, A. (2013). Valuing the carbon sequestration potential for European agriculture. *Land Use Policy*, no. 31, 584-594.
- Ai, B., Ma, C., Zhao, J., & Zhang, R. (2020). The impact of rapid urban expansion on coastal mangroves: A case study in Guangdong Province, China. *Frontiers in Earth Science*, no. 14, 37-49.
- Badamfirooz, J., Mousazadeh, R., & Sarkheil, H. (2021). A proposed framework for economic valuation and assessment of damages cost to national wetlands ecosystem services using the benefit-transfer approach. *Environmental Challenges*, no. 5, 100303.
- Barbier, E. B. (2019). The value of coastal wetland ecosystem services. In *Coastal wetlands* (pp. 947-964). Elsevier.
- Bernardino, A. F., Nobrega, G. N., & Ferreira, T. O. (2021). Consequences of terminating mangrove's protection in Brazil. *Marine Policy*, no. 125, 104389. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.104389>
- Bryan-Brown, D. N., Connolly, R. M., Richards, D. R., Adame, F., Friess, D. A., Brown, C. J., ... (2020). Global trends in mangrove forest fragmentation. *Scientific Reports*, no. 10, 7117. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63880-1>
- Carnell, P. E., Palacios, M. M., Waryszak, P., Trevathan-Tackett, S. M., Masqué, P., & Macreadie, P. I. (2022). Blue carbon drawdown by restored mangrove forests improves with age. *Journal of Environmental Management*, no. 306, 114301.
- Cheng, Q., Zhou, L., & Wang, T. (2022). Assessment of ecosystem services value in Linghekou wetland based on landscape change. *Environmental and Sustainability Indicators*, no. 15, 100195.
- De Paula Costa, M. D., Lovelock, C. E., Waltham, N. J., Moritsch, M. M., Butler, D., Power, T., ... & Macreadie, P. I. (2022). Modelling blue carbon farming opportunities at different spatial scales. *Journal of Environmental Management*, no. 301, 113813.
- Duarte de Paula Costa, M., Lovelock, C. E., Waltham, N. J., Young, M., Adame, M. F., Bryant, C. V., ... & Macreadie, P. I. (2021). Current and future carbon stocks in coastal wetlands within the Great Barrier Reef catchments. *Global Change Biology*, 27(14), 3257-3271.
- Ewers Lewis, C. J., Young, M. A., Ierodiaconou, D., Baldock, J. A., Hawke, B., Sanderman, J., ... & Macreadie, P. I. (2020). Drivers and modelling of blue carbon stock variability in sediments of southeastern Australia. *Biogeosciences*, 17(7), 2041-2059.
- González-García, A., Arias, M., García-Tiscar, S., Alcorlo, P., & Santos-Martín, F. (2022). National blue carbon assessment in Spain using InVEST: Current state and future perspectives. *Ecosystem Services*, no. 53, 101397.
- Hamzeh, M. A. (2023). Assessing the blue carbon sequestration in the mangrove forests of Bushehr Province (Nayband and Melgonze). *Journal of Natural Environment*, 75(Special Issue Coastal and Marine Environment), 184-197.
- Hamzeh, M. A., & Lahijani, H. A. K. (2022). Soil and vegetative Carbon Sequestration in Khuran Estuary Mangroves, Strait of Hormoz, during the last 18 centuries. *Estuaries and Coasts*, 45(6), 1583-1595. (in Persian)
- Johnson, J. L., Raw, J. L., & Adams, J. B. (2020). First report on carbon storage in a warm-temperate mangrove forest in South Africa. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, no. 235, 106566.
- Ke, L., Lei, N., Zhang, S., Yin, C., Lu, Y., Wang, L., ... & Wang, Q. (2025). Estimation of blue carbon stock in the Liaohe Estuary wetland based on soil thickness and multi-scenario modeling. *Ecological Indicators*, no. 171, 113201.
- Kusumaningtyas, M. A., Hutahaeen, A. A., Fischer, H. W., Pérez-Mayo, M., Ransby, D., & Jennerjahn, T. C. (2019). Variability in organic carbon stocks, sources, and accumulation rates of Indonesian mangrove ecosystems. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, no. 218, 310-323.
- Macreadie, P. I., Costa, M. D. P., Atwood, T. B., Friess, D. A., Kelleway, J. J., Kennedy, H., ... & Duarte, C. M. (2021). Blue carbon as a natural climate solution. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(12), 826-839. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00224-1>
- Masi, M., Marrocco, E. S., Fusco, G., Adinolfi, F., & Vecchio, Y. (2025). The economic sustainability of Italian aquaculture farms: Who has the potential to start the blue transition? *Marine Policy*, no. 171, 106478.
- Montero-Hidalgo, M., Tuya, F., Otero-Ferrer, F., Haroun, R., & Santos-Martín, F. (2023). Mapping and assessing seagrass meadows changes and blue carbon under past, current, and future scenarios. *Science of the Total Environment*, no. 872, 162244.
- Moritsch, M. M., Young, M., Carnell, P., Macreadie, P. I., Lovelock, C., Nicholson, E., ... & Ierodiaconou, D. (2021). Estimating blue carbon sequestration under coastal management scenarios. *Science of the Total Environment*, no. 777, 145962.
- Müller, F., Bicking, S., Ahrendt, K., Bac, D. K., Blindow, I., Fürst, C., ... & Zeleny, J. (2020). Assessing ecosystem service potentials to evaluate terrestrial, coastal and marine ecosystem types in Northern Germany - An expert-

- based matrix approach. *Ecological Indicators*, no. 112, 106116.
- Nie, X., Jin, X., Wu, J., Li, W., Wang, H., & Yao, Y. (2023). Evaluation of coastal wetland ecosystem services based on modified choice experimental model: A case study of mangrove wetland in Beibu Gulf, Guangxi. *Habitat International*, no. 131, 102735.
- Pendleton, L., Donato, D. C., Murray, B. C., Crooks, S., Jenkins, W. A., Sifleet, S., ... & Marbà, N. (2012). Estimating global "blue carbon" emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems.
- Powers, C. P., Quevedo, J. M. D., & Kameyama, Y. (2025). International blue carbon project management: Comparing the ideographs, innovation styles, and co-impacts of Japanese blue carbon projects to western countries. *Energy Research & Social Science*, no. 126, 104174.
- Quevedo, J. M. D., & Kohsaka, R. (2024). A systematic review of cultural ecosystem services of blue carbon ecosystems: Trends, gaps, and challenges in Asia and beyond. *Marine Policy*, no. 159, 105898.
- Rosa, L. N., de Paula Costa, M. D., & de Freitas, D. M. (2022). Modelling spatial-temporal changes in carbon sequestration by mangroves in an urban coastal landscape. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, no. 276, 108031.
- Sharp, R., Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A. D., Wood, S. A., Chaplin-Kramer, R., ... & Arkema, K. (2018). InVEST 3.7.0 User's Guide. Natural Capital Project.
- Simeoni, C., Furlan, E., Pham, H. V., Critto, A., de Juan, S., Trégarot, E., ... & Marcomini, A. (2023). Evaluating the combined effect of climate and anthropogenic stressors on marine coastal ecosystems: Insights from a systematic review of cumulative impact assessment approaches. *Science of the Total Environment*, no. 861, 160687.
- Soltani Ghaleh, M. J., Zaraat Kish, Y., & Abedi, Z. (2023). Valuation of the services and damages caused by overfishing of shrimp to optimize it in Hormozgan province. *Journal of Natural Environment*, 75(Special Issue Coastal and Marine Environment), 77-89. (in Persian)
- Townsend, M., Davies, K., Hanley, N., Hewitt, J. E., Lundquist, C. J., & Lohrer, A. M. (2018). The challenge of implementing the marine ecosystem service concept. *Frontiers in Marine Science*, no. 5, 359.
- Van de Pol, L., Van der Biest, K., Taelman, S. E., Peña, L. D. L., Everaert, G., Hernandez, S., ... & Vanaverbeke, J. (2023). Impacts of human activities on the supply of marine ecosystem services: A conceptual model for offshore wind farms to aid quantitative assessments. *Heliyon*, 9(3). <https://doi.org/10.2139/ssrn.4265419>.
- Vanderklift, M. A., Marcos-Martinez, R., Butler, J. R. A., Coleman, M., Lawrence, A., Prislán, H., ... & Thomas, S. (2019). Constraints and opportunities for market-based finance for the restoration and protection of blue carbon ecosystems. *Marine Policy*, 107, 103429. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.02.001>
- Wedding, L. M., Moritsch, M., Verutes, G., Arkema, K., Hartge, E., Reiblich, J., ... & Strong, A. L. (2021). Incorporating blue carbon sequestration benefits into sub-national climate policies. *Global Environmental Change*, no. 69, 102206.
- Xiang, Q., Kan, A., Yu, X., Liu, F., Huang, H., Li, W., & Gao, R. (2023). Assessment of topographic effect on habitat quality in mountainous area using InVEST Model. *Land*, 12(1), 186.
- Young, M. A., Serrano, O., Macreadie, P. I., Lovelock, C. E., Carnell, P., & Ierodiaconou, D. (2021). National scale predictions of contemporary and future blue carbon storage. *Science of the Total Environment*, no. 800, 149573.
- Zarandian, A., Mousazadeh, R., Ramezani Mehrian, M., Mohammadyari, F., Sadegh Saba, M., & Shojaei Langari, S. M. (2025). Assessment and Valuation of Nutrient Retention Ecosystem Service in the International Mangrove Wetland of Khorkhoran Using the InVEST NDR Model and Avoided Cost Method. *Environment and Interdisciplinary Development*, e222245. <https://doi.org/10.22034/envj.2025.517676.1492>. (in Persian)