

Investigation of Land Use Changes in the Salehiyeh Wetland Basin Using Landsat Satellite Data

Mahdiye Shaker¹ , Hadi Eskandari Damaneh² , Hassan Khosravi^{1*} 

1. Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resource, University of Tehran, Karaj, Iran

2. Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

* Corresponding author: hakhosravi@ut.ac.ir

(Received: 29 April 2025

Revised: 28 Jun 2025

Accepted: 13 July 2025)

Extended Abstract

Introduction: Wetlands are among the most ecologically significant yet vulnerable ecosystems, playing a pivotal role in biodiversity conservation, water regulation, and climate stabilization. However, these ecosystems are increasingly threatened by both anthropogenic pressures and climate change, leading to widespread degradation. According to global assessments, more than 50% of wetlands have been lost since the early 20th century. This alarming trend underscores the urgent need for effective monitoring and management strategies, particularly in semi-arid regions where wetlands are critical for maintaining environmental balance. The Salehiyeh Wetland, located in Alborz Province, Iran, has experienced substantial environmental changes over recent decades, largely attributed to human interventions such as the construction of drainage systems. This study aims to investigate land use/land cover (LULC) changes in the Salehiyeh Wetland between 1988 and 2021 (1367–1400 in the Iranian calendar) by employing satellite remote sensing data, Normalized Difference Water Index (NDWI) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) indices, and the Random Forest (RF) machine learning algorithm.

Materials and Methods: This research utilized Landsat 5 TM and Landsat 8 OLI/TIRS imagery to analyze temporal variations in land cover within the wetland and its surrounding areas. The satellite data underwent standard preprocessing, including geometric and radiometric corrections, to ensure optimal data quality. To quantify water bodies and vegetation cover, the NDWI and NDVI were computed. These indices were employed to distinguish between water surfaces and vegetation, providing critical insights into the wetland's hydrological and ecological dynamics. For land cover classification, the RF algorithm was applied, a robust and widely-used machine learning technique known for its high classification accuracy and ability to handle large, multidimensional datasets. The classification results were evaluated using traditional accuracy assessment metrics, including Overall Accuracy (OA) and Kappa Coefficient (Kappa), which are standard indicators for the reliability of remote sensing-based classifications.

Results and Discussion: The analysis of NDWI revealed that the highest water extent in the study area occurred in 1988, with a peak NDWI value of 0.64, indicating a substantial water coverage. However, over the 42-year period, a marked decline in aquatic areas was observed. Specifically, the extent of water bodies decreased from 2.64% of the total land area in 1988 to 0.05% in 2021, signifying a dramatic reduction in wetland habitats. In terms of land cover dynamics, rangelands predominated the landscape in 1988, 1998, and 2008, occupying over 49% of the study area. However, this trend reversed significantly by 2021, as large portions of rangeland were converted into agricultural lands. By 2021, agricultural areas expanded to cover 2,817.84 km², accounting for over 45% of the total area, marking a clear transition towards more intensive land use. Urbanization and the expansion of built-up areas also showed a significant upward trend. From 1988 to 2021, urban and residential areas increased from 46.25 km² to 770.21 km², reflecting growing human encroachment on natural ecosystems. This expansion further exacerbates the pressures on the wetland, as urban sprawl often leads to the drainage of surrounding water bodies. The performance of the RF classifier was exemplary, with overall classification accuracy exceeding 93%, and the Kappa coefficient exceeding 0.90, confirming the high reliability of the model for accurately detecting long-term LULC changes in the region.

Conclusion: This study provides compelling evidence of the profound environmental transformations occurring in the Salehiyeh Wetland over the past four decades. The construction of drainage systems, agricultural intensification, and urban sprawl have all contributed to the drastic reduction of natural water bodies and rangelands. The integration of satellite remote sensing data with advanced machine learning techniques, such as the RF algorithm, offers a highly effective framework for monitoring LULC changes over time. The high accuracy of the results highlights the potential of these methodologies for large-scale environmental monitoring and decision-making. Given the ecological importance of wetlands, it is imperative that policymakers adopt comprehensive conservation and restoration strategies to mitigate further degradation. A balanced approach that integrates urban development, agricultural needs, and ecological preservation is crucial for ensuring the long-term sustainability of wetland ecosystems. Continuous remote sensing monitoring should be prioritized to support evidence-based decision-making and adaptive management in the face of ongoing environmental challenges.

Keywords: Kappa coefficient, water table, MNDWI, NDVI, wetland

Citation: Shaker, M., Eskandari Damaneh, H., & Khosravi, H. (2026). Investigation of Land Use Changes in the Salehiyeh Wetland Basin Using Landsat Satellite Data. *Integrated Watershed Management*, 6(1), 61-84. doi: 10.22034/iwm.2025.2058563.1222

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



بررسی تغییرات کاربری اراضی حوضه تالاب صالحیه با استفاده از داده‌های ماهواره لندست

مهديه شاکر^۱، هادی اسکندری دامنه^۲، حسن خسروی^{*۱}

۱. گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

۲. مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

*نویسنده مسئول: hakhosravi@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹

چکیده مبسوط

مقدمه: تالاب‌ها از نظر بوم‌شناختی جزو بااهمیت‌ترین و درعین‌حال آسیب‌پذیرترین اکوسیستم‌ها به شمار می‌روند. این اکوسیستم‌ها نقش اساسی در حفاظت از تنوع زیستی، تنظیم منابع آبی و تثبیت اقلیم ایفا می‌کنند. با این حال، این منابع طبیعی به‌طور فزاینده‌ای در معرض تهدید ناشی از فشارهای انسانی و تغییرات اقلیمی قرار دارند و همین امر منجر به تخریب گسترده آن‌ها شده است. بر اساس ارزیابی‌های جهانی، بیش از ۵۰ درصد تالاب‌های جهان از اوایل قرن بیستم تاکنون از بین رفته‌اند. این روند نگران‌کننده، ضرورت توسعه راهبردهای مؤثر برای پایش و مدیریت تالاب‌ها را - به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک که تالاب‌ها نقشی حیاتی در حفظ تعادل زیست‌محیطی دارند - دوچندان می‌کند. تالاب صالحیه واقع در استان البرز ایران طی دهه‌های اخیر دچار تغییرات زیست‌محیطی گسترده‌ای شده است که بخش عمده‌ای از آن به مداخلات انسانی از جمله احداث زهکش‌ها نسبت داده می‌شود. هدف این مطالعه بررسی تغییرات کاربری و پوشش اراضی (LULC) در تالاب صالحیه طی بازه زمانی ۱۳۶۷ تا ۱۴۰۰ شمسی (معادل ۱۹۸۸ تا ۲۰۲۱ میلادی) با استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور ماهواره‌ای، شاخص‌های NDVI و NDWI و الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی (Random Forest) است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ (TM) و لندست ۸ (OLI/TIRS) برای تحلیل تغییرات زمانی در پوشش اراضی تالاب و نواحی پیرامونی آن استفاده شد. داده‌های ماهواره‌ای پس از دریافت، تحت پردازش‌های اولیه شامل تصحیح هندسی و رادیومتریک قرار گرفتند تا کیفیت اطلاعات بهینه شود. به‌منظور استخراج اطلاعات درباره پهنه‌های آبی و پوشش گیاهی، شاخص نرمال‌شده تفاوت آب (NDWI) و شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) محاسبه شد. این شاخص‌ها در تفکیک مؤثر بین آب، پوشش گیاهی و سایر کاربری‌ها بسیار مفید بودند و درک بهتری از پویایی‌های هیدرولوژیکی و بوم‌شناختی منطقه فراهم کردند. طبقه‌بندی کاربری اراضی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی انجام شد؛ این الگوریتم یادگیری ماشین با دقت طبقه‌بندی بالا و توانایی پردازش داده‌های بزرگ و چندبعدی، یکی از روش‌های پرکاربرد در سنجنش‌ازدور محسوب می‌شود. برای ارزیابی عملکرد طبقه‌بندی، از شاخص‌های رایج دقت کلی (Overall Accuracy) و ضریب کاپا (Kappa Coefficient) استفاده شد که معیارهای استاندارد سنجنش دقت طبقه‌بندی در مطالعات سنجنش‌ازدور هستند.

نتایج و بحث: نتایج حاصل از تحلیل شاخص NDWI نشان داد که در سال ۱۳۶۷ بیشترین میزان این شاخص (حداکثر ۰/۶۴) و وسیع‌ترین سطح پوشش آبی در منطقه وجود داشته است. با گذر زمان و به‌ویژه پس از احداث زهکش، مساحت پهنه‌های آبی از جمله تالاب صالحیه با روندی کاهشی مواجه شد. بر این اساس، سهم اراضی آبی از کل منطقه از ۲/۶۴ درصد در سال ۱۳۶۷ به ۰/۰۵ درصد در سال ۱۴۰۰ کاهش یافته است. در خصوص کاربری اراضی، بررسی‌ها نشان داد که در سال‌های ۱۳۶۷، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۷، بیشترین مساحت به اراضی مرتعی اختصاص داشته که بیش از ۴۹ درصد از کل منطقه را در بر می‌گرفت. اما در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۴۰۰ این روند معکوس شده و اراضی کشاورزی جایگزین مراتع شده‌اند؛ به‌گونه‌ای که در سال ۱۴۰۰، مساحت اراضی کشاورزی به حدود ۲۸۱۷/۸۴ کیلومترمربع معادل بیش از ۴۵ درصد از کل منطقه رسیده است. رشد نواحی مسکونی نیز یکی دیگر از روندهای بارز مشاهده شده بود. این اراضی از ۴۶/۲۵ کیلومترمربع در سال ۱۳۶۷ به ۷۷۰/۲۱ کیلومترمربع در سال ۱۴۰۰ افزایش یافتند. این موضوع حاکی از فشار فزاینده انسانی و توسعه‌طلبی شهری بر منابع طبیعی منطقه است. همچنین دقت کلی نقشه‌های طبقه‌بندی شده بالای ۹۳ درصد و ضریب کاپا بیش از ۰/۹۰ بود که نشان‌دهنده دقت و کارایی بالای الگوریتم جنگل تصادفی در تحلیل تغییرات کاربری اراضی است.

نتیجه‌گیری: این مطالعه شواهد روشنی از تغییرات گسترده زیست‌محیطی در تالاب صالحیه طی چهار دهه گذشته ارائه می‌دهد. احداث زهکش‌ها، تشدید فعالیت‌های کشاورزی و گسترش شهری از عوامل اصلی کاهش چشمگیر منابع آبی طبیعی و مراتع به شمار می‌روند. ادغام داده‌های سنجنش‌ازدور ماهواره‌ای با تکنیک‌های پیشرفته یادگیری ماشین نظیر الگوریتم جنگل تصادفی، چارچوبی کارآمد برای پایش تغییرات کاربری و پوشش اراضی در طول زمان فراهم می‌کند. با توجه به اهمیت تالاب‌ها، لازم است سیاست‌گذاران راهبردهای جامع حفاظتی و احیایی را به‌منظور جلوگیری از تخریب بیشتر اتخاذ کنند. دستیابی به توسعه پایدار در گرو رویکردی متوازن میان توسعه شهری، نیازهای کشاورزی و حفظ منابع طبیعی است. همچنین، پایش مستمر با استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور باید به‌عنوان اولویت در برنامه‌های مدیریتی لحاظ شود تا امکان تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد و مدیریت تطبیقی در برابر چالش‌های زیست‌محیطی فراهم شود.

واژه‌های کلیدی: ضریب کاپا، بستر آبی، NDVI، MNDWI، تالاب

استناد: شاکر، م.، اسکندری، دامنه، هـ و خسروی، ح. (۱۴۰۵). بررسی تغییرات کاربری اراضی حوضه تالاب صالحیه با استفاده از داده‌های ماهواره لندست. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز. ۱(۱)، ۶۱-۸۴.

حق چاپ:



حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وبسایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

مقدمه

تالاب‌ها ۶/۵ درصد از سطح زمین را پوشش می‌دهند، با این حال خدمات اکوسیستمی به ارزش ۴۷/۴ تریلیون دلار در سال ارائه می‌دهند (Abdullah *et al.*, 2024) و تقریباً ۱۲ درصد از کربن جهانی در مناطق تالابی ذخیره می‌شود (IPCC, 2019). کنوانسیون رامسر تالاب‌ها را به عنوان "مناطق باتلاقی، مرداب، چه طبیعی و چه مصنوعی، دائمی یا موقت، با آب ساکن یا جاری، شیرین، لب‌شور یا شور، از جمله مناطقی از آب‌های دریایی که عمق آنها در جزر و مد از شش متر تجاوز نمی‌کند تعریف می‌کند. اکوسیستم تالاب در کنار اکوسیستم‌های جنگلی و دریایی جزو سه اکوسیستم اصلی روی زمین است که نقش به‌سزایی در حفظ تعادل اکولوژیکی، حفظ تنوع زیستی، حفظ آب، ذخیره سیل و جلوگیری از خشکسالی، تنظیم آب‌وهوا و تخریب آلودگی دارند (Sulman *et al.*, 2013; Shen *et al.*, 2019; Zhu *et al.*, 2023)؛ اما به دلیل تغییرات اقلیمی و خشکسالی‌های اخیر از سطح مرطوب آن‌ها کاسته شده است که می‌تواند به‌عنوان یکی از کانون‌های گردوغبار محسوب شود. بر اساس اطلاعات منتشر شده، از سال ۱۹۰۰ میلادی تا کنون، جهان ۵۰ درصد از تالاب‌های خود را از دست داده است. این بررسی از ۱۸۹ گزارش تغییر در مساحت تالاب‌ها نشان می‌دهد که میانگین از دست رفتن طولانی‌مدت تالاب‌های طبیعی گزارش شده بین ۵۴ تا ۵۷ درصد است، اما از سال ۱۷۰۰ میلادی ممکن است تا ۸۷ درصد نیز رسیده باشد. در طول قرن بیستم و اوایل قرن بیست و یکم، سرعت از بین رفتن تالاب‌ها بسیار بیشتر (۳/۷ برابر) بوده است (Davidson, 2014). به طوری که از سال ۱۹۰۰ میلادی، ۶۴ تا ۷۱ درصد از تالاب‌ها از بین رفته‌اند. این میزان از دست رفتن تالاب‌ها در مناطق داخلی بیشتر و سریع‌تر از تالاب‌های طبیعی ساحلی بوده است. اگرچه سرعت از دست رفتن تالاب‌ها در اروپا کاهش یافته است و در آمریکای شمالی از دهه ۱۹۸۰ پایین مانده است، اما این سرعت در آسیا، جایی

که تبدیل سریع و گسترده تالاب‌های طبیعی ساحلی و داخلی ادامه دارد، همچنان بالا بوده است (Ramsar Convention on Wetlands, 2018).

از بین رفتن گسترده تالاب‌ها نه تنها منجر به ناپدید شدن زیستگاه‌ها و محل‌های تولیدمثل بسیاری از گونه‌ها شده است، بلکه نقش آنها را در حفاظت از سواحل، تنظیم آب و خاک و تصفیه آلودگی نیز کاهش داده است (Elmore *et al.*, 2023). این امر باعث ایجاد مجموعه‌ای از مسائل زیست‌محیطی، از جمله بیابان‌زایی، سیل، کاهش کیفیت آب و از بین رفتن تنوع زیستی شده است (Wang *et al.*, 2022; Karnatak *et al.*, 2022). در این بین تالاب‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، با اهمیت‌ترین نوع تالاب در جهان هستند که نقشی بی‌بدیل در تأمین آب‌های زیرزمینی و حفظ تنوع گونه‌ای دارند. با این حال، این مناطق توسط عوامل طبیعی و عوامل انسانی در سال‌های اخیر مورد تهدید قرار گرفته‌اند (Zhao *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2019). معمولاً از بین رفتن تالاب‌ها غیرقابل برگشت است و عوامل زیادی مانند سکونت‌گاه‌های انسانی، تحولات، پیشرفت اقتصادی و تغییرات اقلیمی مستقیماً بر دگرگونی تالاب‌ها تأثیر می‌گذارند که این امر به شدت به موقعیت‌ها و محیط‌های محلی وابسته است (Rebelo *et al.*, 2009; Rebelo *et al.*, 2019).

در مارس ۲۰۲۴، ۱۹۰ کشور در ششمین مجمع محیط زیست سازمان ملل متحد (Deslippe *et al.*, 2025) با مجموعه‌ای از قطعنامه‌ها برای بهبود کیفیت و کمیت آب از طریق احیا و حفاظت از تالاب‌ها موافقت کردند. به همین ترتیب، احیای تالاب‌ها یک استراتژی کلیدی برای دستیابی به اهداف متعدد سیاستی در جهت توسعه پایدار، از جمله امنیت آب و غذا، کاهش تغییرات اقلیمی و حمایت از سلامت انسان است (Tomscha *et al.*, 2023; Goyette *et al.*, 2023). برای مدیریت پایدار تالاب‌ها، تهیه نقشه تالاب‌های موجود و طبقه‌بندی آن‌ها برای مطالعه بیشتر و ایمن نگه‌داشتن

(Eskandari *et al.*, 2025). تجزیه و تحلیل، تشخیص و اندازه‌گیری تغییرات می‌تواند منجر به قضاوت واقعی در شیوه‌های استفاده از کاربری و پوشش زمین شود (Ahmad, 2012). تشخیص تغییرات LULC شامل اطلاعات چندزمانی است که از طریق داده‌های سنجنش از دور و همچنین داده‌های مکانی حاصل از سیستم اطلاعات جغرافیایی به دست آمده در شناسایی تغییرات گذشته و حال هر پدیده یا اشیا می‌باشد و بنابراین به تعیین کمی تغییرات مرتبط با LULC کمک خواهد کرد (Zoran & Anderson, 2006; Othman *et al.*, 2014). مطالعه تغییرات LULC، اطلاعاتی از قبیل محل تغییرات، روند تغییرات، نوع تبدیل کاربری‌ها، سرعت تغییرات و علل و نیروهای محرک این تغییرات را نشان می‌دهد (Jamal & Ahmad, 2020). مطالعات مختلف با استفاده از اطلاعات به دست آمده از داده‌های سنجنش از دوری مخصوصاً داده‌های ماهواره لندست روند تغییرات پوشش سطح زمین را مورد بررسی قرار داده‌اند. Moisa و همکاران (۲۰۲۳) تلاش کردند تا پویایی تالاب حوزه آبخیز اتیوپی غربی را با استفاده از تکنیک‌های مکانی مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد. نتایج آن‌ها نشان داد که اکوسیستم تالاب در منطقه، روندی کاهشی داشته به طوری که (۸/۸ درصد) با نرخ ۴/۲ کیلومتر مربع در سال کاهش یافته است (Moisa *et al.*, 2023). Peters و Kusimi (۲۰۲۳) به بررسی LULC با استفاده از داده‌های ماهواره لندست در سال‌های ۱۹۹۱، ۲۰۰۵ و ۲۰۱۸ پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد که یک الگوی تغییر در انواع عمده LULC وجود داشته است. تالاب‌ها در این طبقه‌بندی از ۱۸۲/۳۳ کیلومتر مربع به ۱۳۵/۱۱ کیلومتر مربع کاهش یافتند. مطالعات متعددی به بررسی تغییرات زمانی و مکانی پوشش اراضی و پهنه‌های آبی تالاب‌های کشور با استفاده از شاخص‌های سنجنش از دور پرداخته‌اند. Feyzolahpour و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی با استفاده از شاخص‌های NDBI و ENDBI

اکوسیستم برای نسل‌های آینده بسیار مهم است. در طول پنج دهه گذشته، سنجنش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی به عنوان ابزارهای ضروری در نقشه‌برداری، ارزیابی و پایش اطلاعات فضایی در مورد منابع طبیعی، از جمله اکوسیستم‌های آبی ظاهر شده‌اند (Singh *et al.*, 2024). حسگرهای مختلف در سنجنش از دور اطلاعات فراوانی را ذخیره می‌کنند و اطلاعات به دست آمده از این حسگرها به طور گسترده در نقشه‌برداری، بررسی تغییرات مکانی-زمانی اکوسیستم‌های تالاب استفاده می‌شوند (Park *et al.*, 2003). با این حال، اطلاعات دقیق در مورد پویایی تالاب برای طراحی استراتژی‌های حفاظت و مدیریت تالاب نامشخص است. داده‌های ماهواره لندست از جمله داده‌هایی هستند که برای برآورد تغییرات سطح زمین به خصوص پهنه‌های آبی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Van Deventer *et al.*, 2022). مطالعات نشان داده است که داده‌های ماهواره لندست از دقت مناسبی برخوردارند. از جمله موارد برتری این داده‌ها، دقت مکانی مناسب نسبت به سنجنده مودیس و همچنین بازه زمانی طولانی مدت نسبت به داده‌های ماهواره سنتینل می‌باشد (Zhang *et al.*, 2024).

تجزیه و تحلیل تغییرات در کلاس‌های کاربری و پوشش اراضی^۱ (LULC) حاصل از داده‌های سنجنش از دوری یک تکنیک مفید برای پایش تالاب‌ها، کیفیت محیطی و اکولوژیکی با مقیاس‌های فضایی-زمانی مختلف است (Kafy *et al.*, 2020). تغییرات کاربری و پوشش زمین ترکیبی از دو اصطلاح کاربری زمین-پوشش زمین است که مستلزم طبقه‌بندی سطح زمین به گروه‌های بسیاری بسته به اشکال متعدد پوشش زمین مانند جنگل‌ها، کشاورزی، مناطق شهری، بدنه‌های آبی و غیره است (Sawant *et al.*, 2023). بررسی روند تغییرات LULC معمولاً الگوهای تغییرات مکانی-زمانی در کاربری و پوشش زمین را نشان می‌دهد که می‌تواند در بهره‌برداری و مدیریت صحیح منابع کمک کند

۲۰۲۰ و ابتدای ۲۰۲۱، به دلیل تأمین آب از رودخانه جراحی و مخازن بالادست، وسعت تالاب به بیشترین حد خود در این بازه رسید.

تالاب صالحیه به‌عنوان یکی از تالاب‌های مهم در محدوده بین دو استان قزوین و استان البرز، در محدوده‌ای خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته که نقش حیاتی در حفظ تعادل آبی، تغذیه سفره‌های زیرزمینی، کنترل گردوغبار و حفظ تنوع زیستی منطقه ایفا می‌کند. با این حال، طی دو دهه اخیر این تالاب به‌دلیل عواملی همچون احداث زهکش، توسعه اراضی کشاورزی، افزایش جمعیت و کاهش بارندگی به‌شدت آسیب دیده و پهنه آبی آن تقریباً به‌طور کامل کاهش یافته است.

تاکنون اغلب مطالعات تالاب‌های ایران بر تالاب‌های ثبت‌شده در کنوانسیون رامسر (همچون گاوخونی، انزلی، هامون) متمرکز بوده‌اند، اما تالاب صالحیه علی‌رغم اهمیت محلی و منطقه‌ای آن، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو انتخاب این منطقه برای مطالعه، پاسخی به خلأ علمی موجود و گامی در جهت ارزیابی جامع تأثیر مداخلات انسانی (به‌ویژه زهکشی) و تغییرات اقلیمی بر اکوسیستم‌های حساس داخلی است. از این رو در این پژوهش، به بررسی روند تغییرات کاربری تالاب صالحیه با استفاده از مدل یادگیری ماشین جنگل تصادفی، قبل از احداث زهکش (۱۳۸۶-۱۳۷۶) و پس از احداث زهکش (۱۴۰۰-۱۳۸۷) با استفاده از شاخص‌های کمکی NDWI و NDVI حاصل از تصاویر لندست ۵ و ۸ پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

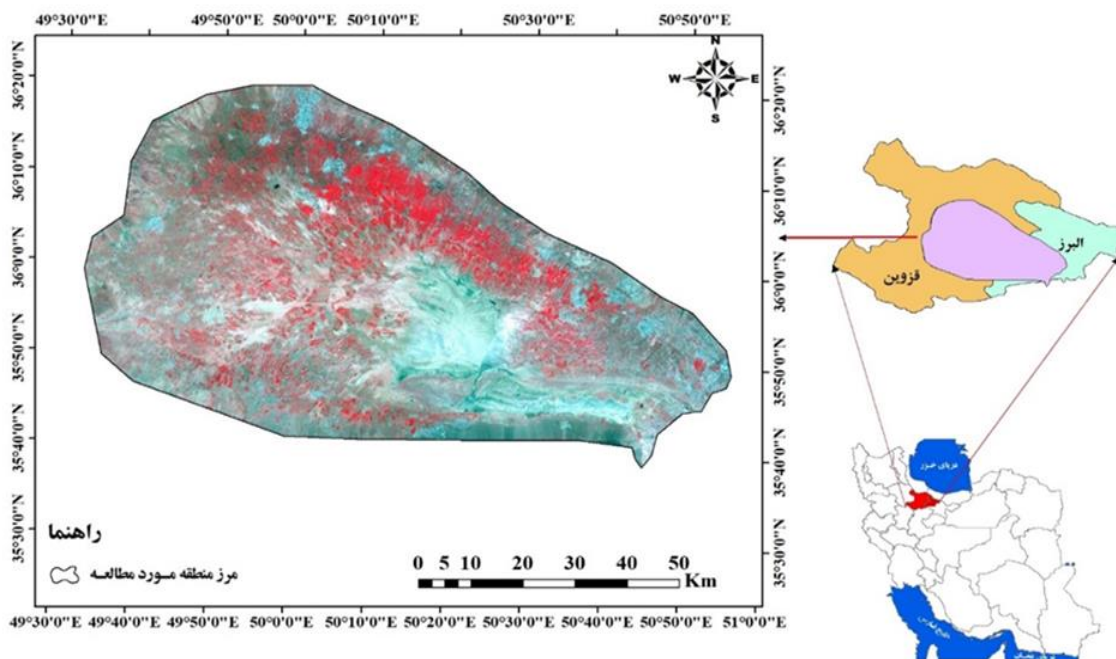
منطقه مورد مطالعه شامل بخشی از دو استان البرز و قزوین است. تالاب صالحیه واقع در جنوب روستای صالحیه در نظرآباد استان البرز تنها تالاب این استان است. عرض جغرافیایی این منطقه بین $35^{\circ}30'$ تا $36^{\circ}20'$ شمالی و طول جغرافیایی آن بین $49^{\circ}30'$

به این نتیجه رسیدند که روند گسترش مناطق ساخته‌شده در حوزه تالاب انزلی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است، در همین راستا شاخص NDVI از ۰/۶۷ در سال ۱۳۷۱ به ۰/۵۹ در سال ۱۴۰۱ کاهش یافته و شاخص NDWI نیز از ۰/۳۴ به ۰/۱۰ رسیده است که نشان‌دهنده کاهش چشمگیر پوشش گیاهی و منابع آبی است. به‌علاوه، بر اساس مدل RTC، وسعت پهنه آبی از ۴۴/۱۷ کیلومترمربع در سال ۱۳۷۱ به ۶/۳۶ کیلومترمربع در سال ۱۴۰۱ کاهش یافته است. در پژوهشی دیگر، Golafarin و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از مدل درخت تصمیم و تصاویر ماهواره‌ای به بررسی پویایی زمانی و مکانی پوشش اراضی تالاب پریشان پرداختند. یافته‌های این مطالعه نشان داد که در بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۶، از مجموع ۱۹۶۳ هکتار مساحت اولیه پهنه آبی تالاب، تنها ۱۳ هکتار در پایان دوره باقی مانده است. مقایسه سال‌های مختلف نشان می‌دهد که نسبت به سال ۱۳۶۶، حدود ۱۹۵۰ هکتار، نسبت به ۱۳۷۷ حدود ۳۶۰۵ هکتار و نسبت به ۱۳۸۶ حدود ۲۲۷۲ هکتار از سطح آبی کاسته شده است.

Soltani و همکاران (۲۰۲۱) با بهره‌گیری از شاخص‌های MNDWI، AWEI و WRI به تحلیل تغییرات پهنه‌های آبی دریاچه فصلی جازموریان پرداختند. یافته‌ها نشان داد که میزان آگیری پلاهای جازموریان ارتباط مستقیمی با بارش‌های فصلی و سیلاب‌ها دارد. ضریب همبستگی بالا ($R^2=0.89$) میان بارش سالانه و وسعت پهنه‌های آبی بر پایه شاخص MNDWI نشان‌دهنده تأثیر اصلی بارندگی بر پایداری اکوسیستم آبی این منطقه است. Seyed Mousavi و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی به بررسی تغییرات درون‌سالی و بین‌سالی پهنه‌های آبی تالاب بین‌المللی شادگان در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۱ با استفاده از سامانه Google Earth Engine و شاخص MNDWI پرداختند. نتایج این تحلیل مکانی-زمانی نشان داد که در این دوره، روندی نزولی در وسعت پهنه‌های آبی تالاب مشاهده شده است. با این حال، در انتهای سال

قزوین شناخته می‌شود. دمای میانگین سالانه آن حدود ۱۲ درجه سانتی‌گراد است که براساس طبقه‌بندی دومارتن دارای اقلیم نیمه‌خشک و سرد است. ارتفاع محدوده از ۱۰۶۹ تا ۱۱۳۵ متر از سطح دریا متغیر بوده و از نظر تقسیمات حوضه‌های آبریز کشور، در حوضه آبریز فلات مرکزی و زیرحوضه دریاچه نمک و رودخانه شور قرار دارد (Eskandari et al., 2025). شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را در دو استان البرز و قزوین نشان می‌دهد.

۵۰°۵۰' شرقی است و این تالاب از رودخانه‌های ابهرود، خررود و تعدادی مسیل بزرگ و کوچک تغذیه می‌شود. ازجمله مهم‌ترین رودخانه‌های جاری در منطقه می‌توان به ابهرود، خررود، شور، فشند و کردان اشاره کرد (Doroudi, 2018). بخش عمده‌ای از مساحت تالاب در استان قزوین واقع شده و بیشتر با نام‌های الله‌آباد و شوره‌زار مرکزی دشت قزوین شناخته می‌شود. بیشتر مساحت تالاب در استان قزوین قرار گرفته که بیشتر با نام الله‌آباد و شوره‌زار مرکزی دشت



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در دو استان البرز و قزوین
Figure 1- Location of the study area in Alborz and Qazvin provinces

(Landsat 8) از وب‌سایت^۱ USGS و با سطح پردازش Level-1TP تهیه شدند. مشخصات این تصاویر در جدول ۱ آمده است. با توجه به سطح پردازش-Level-1TP، تصحیح‌های هندسی و رادیومتریک اولیه به‌صورت پیش‌فرض توسط USGS انجام شده‌اند و نیازی به اعمال مجدد آن‌ها نبوده است. در این سطح، موقعیت مکانی تصاویر با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی

روش تحقیق

داده‌های ماهواره‌ای و پردازش‌ها

در این تحقیق به‌منظور بررسی تغییرات کاربری اراضی در بازه زمانی ۱۳۶۷ تا ۱۴۰۰، از تصاویر ماهواره‌ای لندست با فواصل زمانی ۱۰ ساله استفاده شد. ابزارهای مورد استفاده شامل نرم‌افزارهای ArcGIS 10.8، ArcGIS Pro 3.1، ENVI 5.3 و Excel بوده‌اند. تصاویر مربوط به سنجنده‌های TM (Landsat 5) و OLI

سنجنده‌های ۵ و ۸ در ماهواره لندست استفاده شده است. داده‌های NDVI و NDWI برای هر تصویر، پس از تصحیح‌های اتمسفریک، در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 استخراج گردیدند و به‌عنوان ورودی کمکی در فرآیند طبقه‌بندی کاربری اراضی مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۱- مشخصات تصاویر استفاده‌شده

Table 1- Images specifications

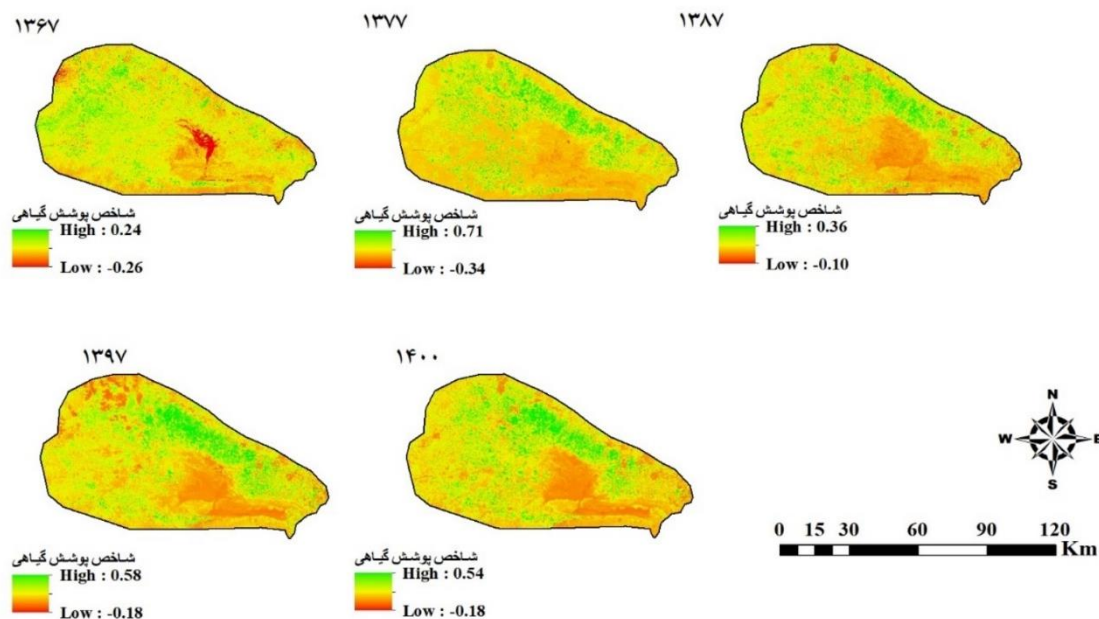
تاریخ میلادی	ماهواره	درصد ابرناکی	خطای زمین مرجع (متر)
1989.03.13	لندست 5	<10	±12.5
1999.03.09	لندست 5	<10	± 12.5
2009.02.16	لندست 5	<10	± 12.5
2019.03.16	لندست 8	<10	±12
2022.04.01	لندست 8	<10	±12

جدول ۲- جزئیات کاربری‌های موردنظر

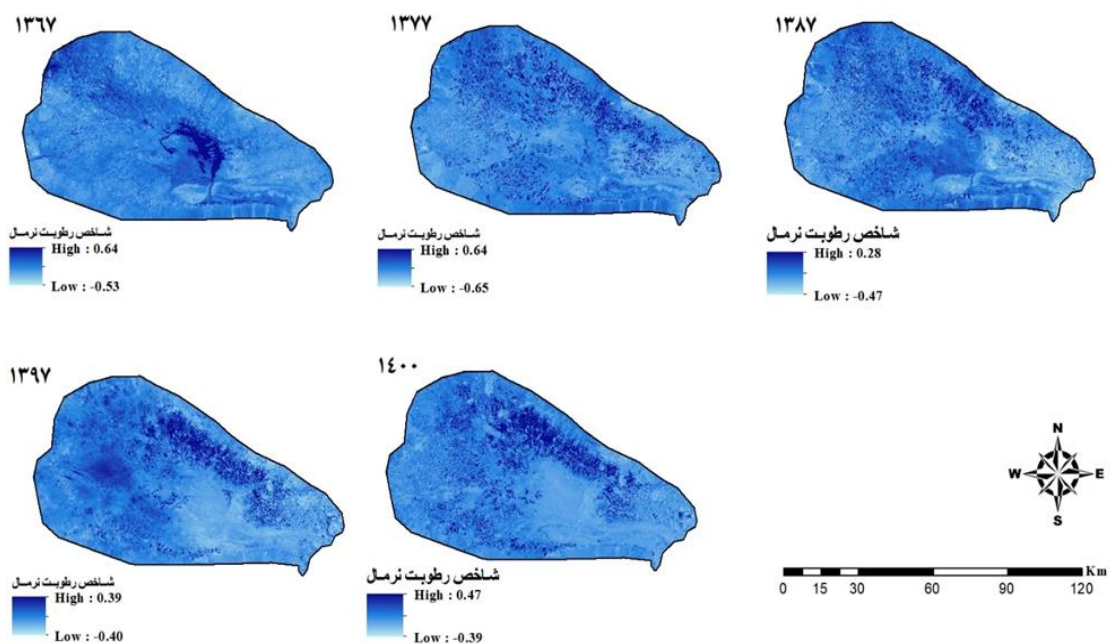
Table 2- Details of the selected land uses

کاربری اراضی	توضیحات
بسترهای آبی	تالاب، اراضی مرطوب حاشیه تالاب، زهکش‌ها، رودها
مناطق مسکونی و انسان‌ساخت	مناطق مسکونی، تجاری، شبکه‌های حمل‌ونقل مانند جاده‌ها و شبکه ریلی
پوشش گیاهی	پوشش گیاهی متراکم، اراضی کشاورزی، باغی، زراعی
ارضای مرتعی	مراتع، اراضی با پوشش گیاهی پراکنده، پوشش ضعیف، پوشش ناچیز
ارضای شور و بایر	ارضای شور، ماسه‌زارها، اراضی لخت و بدون پوشش گیاهی

(DEM) و نقاط کنترل زمینی (GCP) تنظیم شده است. با این حال، برای دستیابی به بازتاب سطحی دقیق، تصحیح اتمسفری با استفاده از الگوریتم FLAASH در نرم‌افزار ENVI 5.3 انجام شد. این الگوریتم، بر پایه مدل MODTRAN، اثرات جوی از جمله بخار آب، ذرات معلق و گازهای اتمسفری را کاهش داده و بازتاب واقعی سطح زمین را تخمین می‌زند. پس از اعمال پیش‌پردازش‌های لازم، نقشه طبقه‌بندی کاربری اراضی برای سال‌های ۱۳۶۷، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷، ۱۳۹۷ و ۱۴۰۰ با استفاده از روش یادگیری ماشین، جنگل تصادفی در نرم‌افزار ArcGIS Pro3 تهیه شد (جدول ۲). در این پژوهش، برای تحلیل پوشش گیاهی و شناسایی پهنه‌های آبی، از شاخص‌های نرمال‌شده‌ی NDVI^۱ و NDWI^۲ استفاده شد. شاخص NDVI که توسط Tucker و همکاران (۱۹۸۶) معرفی شده است، تفاوت بازتاب طیفی بین باند مادون قرمز نزدیک و باند قرمز را نسبت به مجموع آن‌ها محاسبه می‌کند و در بازه عددی بین منفی یک تا مثبت یک قرار دارد (شکل ۲). مقادیر مثبت بالا معمولاً نشان‌دهنده پوشش گیاهی متراکم و فعال هستند. از سوی دیگر، شاخص NDWI برای شناسایی نواحی آبی به کار می‌رود و بر اساس اختلاف بین بازتاب باند سبز و باند مادون قرمز نزدیک نسبت به مجموع آن‌ها محاسبه می‌شود (Gao et al., 1996). این شاخص نیز در بازه ۱- تا +۱ قرار داشته و مقادیر مثبت آن معمولاً بیانگر وجود آب یا رطوبت بالا در سطح زمین هستند (شکل ۳). در محاسبه این شاخص‌ها، از باندهای استاندارد



شکل ۲- شاخص پوشش گیاهی (NDVI) در بازه زمانی ۱۳۶۷ تا ۱۴۰۰
 Figure 2- Normalized difference vegetation index (NDVI) from 1988 to 2021



شکل ۳- شاخص رطوبت نرمال (NDWI) در بازه زمانی ۱۳۶۷ تا ۱۴۰۰
 Figure 3- Normalized Difference Water Index (NDWI) from 1988 to 2021

ناپارامتریک مناسب برای مدل‌سازی داده‌های پیوسته و گسسته روش درخت تصمیم است (Seyedian *et al.*, 2017). الگوریتم جنگل تصادفی از روش تجمیع تصادفی با جایگزینی (Bootstrap Aggregating) یا

جنگل تصادفی

جنگل تصادفی یک نوع مدرن از روش‌های درخت پایه است که شامل انبوهی از درخت‌های کلاس‌بندی و رگرسیونی می‌باشد. همچنین یکی از روش‌های

که در آن M مجموع مجذور خطاهای درخت تصمیم است. h_u مقدار خروجی نمونه u در مجموعه داده است. h_v مقدار پیش‌بینی شده گره برگ پایانی درخت تصمیم است. برای k مجموعه آموزشی، k درخت تصمیم تشکیل می‌شود و نتیجه T با میانگین‌گیری نتایج $(T_1, T_2 \dots T_k)$ درخت‌های تصمیم (همه درخت‌های تصمیم به یک اندازه مهم هستند) به صورت زیر در رابطه ۴ ادغام می‌شود (Zhou et al., 2023).

$$T = \frac{1}{k} \sum (T_1 + T_2 + \dots + T_k) \quad (4)$$

ارزیابی صحت

پس از پایان مرحله طبقه‌بندی، نتایج طبقه‌بندی با استفاده از معیارهای تعیین صحت، به صورت کمی برآورد شد. برای ارزیابی دقت و صحت نقشه‌های طبقه‌بندی شده، با تطبیق دادن نقشه‌های طبقه‌بندی شده با نقشه‌ی واقعیت زمینی، ماتریس خطا^۱ تشکیل می‌شود و بر اساس آن، دقت کلی^۲، ضریب کاپا^۳، دقت کاربر^۴ و صحت تولیدکننده^۵ محاسبه می‌گردد (Kafy et al., 2021). به منظور تهیه داده‌های تعلیمی (Training Samples) جهت الگوریتم جنگل تصادفی، از ترکیبی از منابع زیر استفاده شد:

بازدید میدانی و GPS سال‌های اخیر (برای سال ۱۴۰۰): در این سال، نقاط نمونه از طریق بازدید میدانی و جمع‌آوری داده‌های زمینی برداشت شدند. این داده‌ها با استفاده از تصاویر Google Earth و داده‌های مکانی محلی کنترل و تکمیل شدند.

استفاده از تصاویر Google Earth در گذشته: برای سال‌های گذشته که دسترسی به بازدید میدانی وجود نداشت، از تصاویر تاریخی Google Earth با دقت مکانی بالا بهره گرفته شد. تصاویر مرجع از همان فصل سال (اسفند تا فروردین) انتخاب شده‌اند تا با تصاویر ماهواره‌ای هم‌زمان‌سازی شوند. برای هر سال، مجموعه داده‌های تعلیمی (Training) و داده‌های ارزیابی

(Bagging) استفاده می‌کند، به این صورت که چندین زیرمجموعه تصادفی از داده‌های آموزشی با بازگرداندن نمونه‌ها انتخاب شده و برای هر کدام یک درخت تصمیم ساخته می‌شود. سپس نتایج همه درخت‌ها برای تصمیم‌گیری نهایی به صورت رای‌گیری اکثریت تجمیع می‌شود (Zhou et al., 2022). فرایند الگوریتم جنگل تصادفی از روش تجمیع تصادفی به شرح زیر است که از روابط ۱ و ۲ بدست می‌آید: k نمونه آموزشی به طور تصادفی از مجموعه نمونه اصلی حاوی n نمونه به روش بوت‌استرپینگ انتخاب می‌شوند و k مجموعه آموزشی جدید از طریق k بار نمونه‌برداری بدون هیچ‌گونه جایگزینی نمونه به دست می‌آید (k مجموعه‌های آموزشی مستقل از یکدیگر هستند و عناصر را می‌توان تکرار کرد). نسبت مجموعه آموزشی جدید حاوی نمونه‌هایی از مجموعه نمونه اصلی به شرح زیر است (Zhou et al., 2022).

(۱)

$$x = 1 - \left(1 - \frac{1}{k}\right)^n$$

زمانی که k در رابطه ۲ به بی‌نهایت میل کند:

(۲)

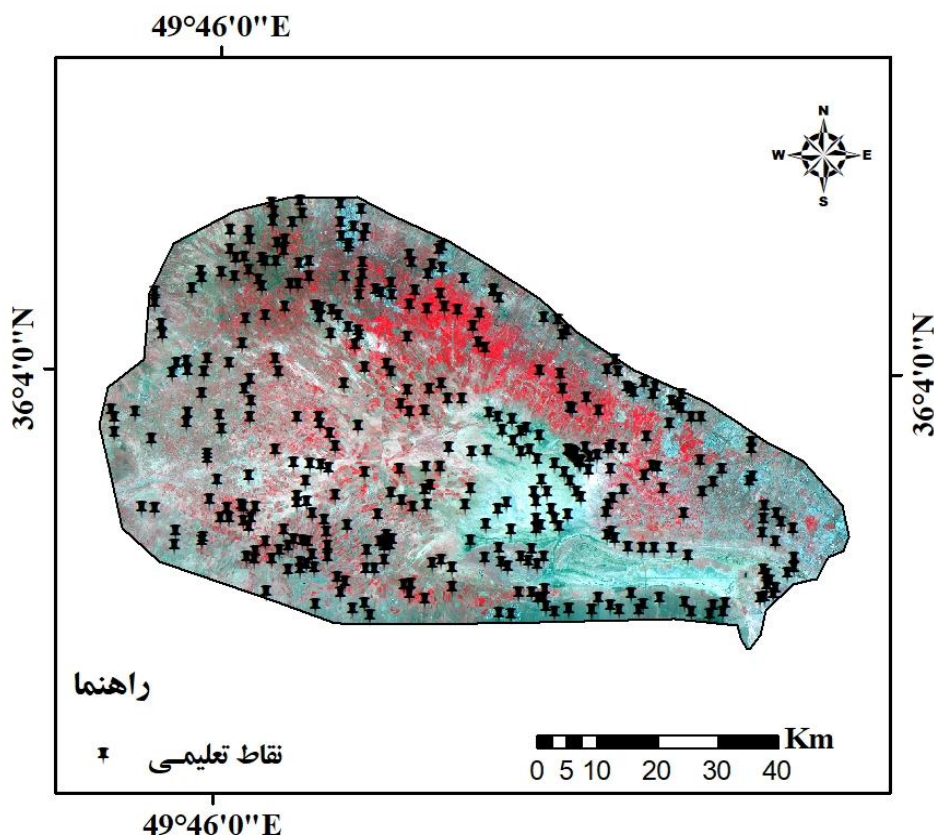
$$\lim_{k \rightarrow \infty} x = 1 - \lim_{k \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{k}\right)^k = 1 - e^{-1} \approx 0.632 = 63.2\%$$

نمونه‌هایی در مجموعه نمونه اصلی که در مجموعه آموزشی جدید وجود ندارند، پیش‌بینی‌کننده‌های خارجی نامیده می‌شوند که برای ارزیابی عملکرد درخت‌های تصمیم‌گیری تولیدشده توسط مجموعه آموزشی جدید استفاده می‌شوند. از رابطه ۳ برای ارزیابی شکل‌گیری درخت‌های تصمیم استفاده می‌شود.

$$M = \operatorname{argmin} \sum_{u \in U} \sum_{v \in V} (h_u - h_v)^2 \quad (3)$$

به صورت یکنواخت بین کلاس‌های مختلف کاربری توزیع گردید (شکل ۴).

(Validation) به صورت مجزا انتخاب شدند. در مجموع، ۵۰۰ نقطه نمونه تعلیمی برای طبقه‌بندی تهیه شد که



شکل ۴- نقشه کاربری اراضی سال ۱۴۰۰ و نقاط تعلیمی استفاده شده
Figure 4- Land Use Map for 2021 and Training Points

کیفیت نمونه‌های تعلیمی و ارزیابی مناسب تلقی می‌شود. دقت تولیدکننده یعنی احتمال اینکه یک کلاس در تصویر کلاس‌بندی در همان کلاس در روی زمین قرار بگیرد و دقت کاربر یعنی احتمال اینکه یک کلاس مشخص در روی زمین در همان کلاس بر روی تصویر طبقه‌بندی شده قرار بگیرد که از روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌گردند (Rasti et al., 2022).

$$PA = \frac{ta}{n1} \times 100 \quad (5)$$

$$UA = \frac{ta}{ga} \times 100 \quad (6)$$

که در این روابط PA درصد دقت کلاس a برای دقت تولیدکننده، ta تعداد پیکسل‌های صحیح

از این تعداد، ۷۰ درصد از نمونه‌ها برای آموزش مدل و ۳۰ درصد برای ارزیابی صحت مورد استفاده قرار گرفتند. در انتخاب نمونه‌ها، تلاش شد تا نقاط از سراسر منطقه مورد مطالعه و برای تمامی کلاس‌های کاربری به صورت یکنواخت و هدفمند انتخاب شوند. همچنین از روش نمونه‌برداری تصادفی^۱ طبقه‌بندی شده برای انتخاب نمونه‌ها استفاده شد. به دلیل محدودیت دسترسی به زمین در سال‌های گذشته، امکان برداشت میدانی برای آن سال‌ها فراهم نبود؛ بنابراین، تصاویر تاریخی Google Earth و اطلاعات جانبی به‌عنوان جایگزین معتبر در تهیه نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به نتایج ارزیابی دقت بالای ۹۳ درصد،

1- Stratified Random Sampling

$$\text{LULC Change} = \frac{\text{Km}^2}{\text{year}} = \frac{\text{A2}-\text{A1}}{\text{Z}} \quad (9)$$

که در آن A1 و A2 مساحت LULC در کیلومتر مربع در زمان است و Z فاصله زمانی بین A1 و A2 در سال است.

نتایج

طبقه‌بندی شاخص NDWI

شاخص تفاوت نرمال شده نواحی آبی (NDWI) در این پژوهش برای سال‌های منتخب ۱۳۶۷، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷، ۱۳۹۷ و ۱۴۰۰ با استفاده از روش Natural Breaks Classification به صورت طبقه‌بندی شده در قالب هفت کلاس رطوبتی استخراج گردید. این کلاس‌ها شامل بسیار خشک / بایر، خشک / بدون پوشش، خاک مرطوب / کشاورزی آبیاری شده، رطوبت کم، رطوبت متوسط، رطوبت زیاد و رطوبت خیلی زیاد می‌باشند. در سال ۱۳۶۷، مساحت کلاس خاک مرطوب بیش از ۱۹۲۰ کیلومتر مربع و کلاس رطوبت خیلی زیاد حدود ۹۸۴ کیلومتر مربع بوده است. در سال ۱۳۷۷، کلاس بسیار خشک / بایر بیشترین مساحت را با بیش از ۳۵۵۱ کیلومتر مربع به خود اختصاص داده است. در سال ۱۳۸۷، کلاس بسیار خشک با ۲۷۱۱ کیلومتر مربع و کلاس خاک مرطوب با حدود ۲ کیلومتر مربع گزارش شده است. در سال ۱۳۹۷، کلاس خاک مرطوب با ۱۵۲۱ کیلومتر مربع و کلاس رطوبت کم با ۱۵۲۵ کیلومتر مربع در صدر قرار داشته‌اند. در سال ۱۴۰۰، کلاس خاک مرطوب همچنان بزرگ‌ترین طبقه با مساحتی بالغ بر ۱۸۶۹ کیلومتر مربع بوده است (جدول ۴).

طبقه‌بندی شده به عنوان کلاس a، ga تعداد پیکسل‌های کلاس a در واقعیت زمینی، UA درصد دقت کلاس a برای دقت کاربر n1 تعداد پیکسل‌های کلاس a می‌باشد. از نظر تئوری احتمالات، دقت کل نمی‌تواند معیار خوبی برای ارزیابی نتایج طبقه‌بندی باشد؛ زیرا در این شاخص نقش شانس قابل توجه است. دقت کلی از جمع عناصر قطر اصلی ماتریس خطا تقسیم بر تعداد کل پیکسل‌ها طبق رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$\text{OA} = \frac{1}{N} \times \sum P \quad (7)$$

در این رابطه OA برابر با دقت کلی N تعداد پیکسل‌های آزمایشی و $\sum P$ جمع عناصر قطر اصلی ماتریس می‌باشد. شاخص کاپا، پیکسل‌های نادرست طبقه‌بندی شده را مدنظر قرار می‌دهد و صحت طبقه‌بندی را نسبت به یک طبقه‌بندی کاملاً تصادفی محاسبه می‌کند. شاخص کاپا با استفاده از رابطه ۸ محاسبه شد.

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r (X_{io} \times X_{oi})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (X_{io} \times X_{oi})} \quad (8)$$

در این رابطه K شاخص کاپا، r تعداد ردیف ماتریس طبقه‌بندی شده، xii تعداد مشاهدات در ردیف ستون (محور اصلی ماتریس)، Xio مجموع مشاهدات در ردیف (مجموع ردیف برای هر کاربری)، Xoi مجموع مشاهدات در ستون (مجموع ستون برای هر کاربری) و N مجموع کل مشاهدات ماتریس طبقه‌بندی می‌باشد در محاسبه ضریب کاپا علاوه بر پیکسل‌هایی که درست طبقه‌بندی شده پیکسل‌های نادرست نیز دخالت داده می‌شود. در نتیجه معیاری مناسب برای مقایسه نتایج طبقه بندی مختلف می‌باشد (Rezaee et al., 2016).

ارزیابی درجه تغییرات

بعد از تهیه نقشه کاربری اراضی و صحت‌سنجی آن، ارزیابی درجه تغییرات انجام می‌شود. مقدار مساحت تغییر یافته، در واحد زمان با استفاده از (۹) تعیین می‌شود (Gessesse et al., 2017; Abebe et al., 2019; Moisa et al., 2022).

جدول ۴- توزیع مساحت طبقات شاخص NDWI در منطقه تالاب صالحیه طی سال‌های منتخب بر حسب کیلومتر مربع
Table 4 – Area distribution of NDWI classification in Salehiyeh wetland for selected years (Km²)

سال مورد بررسی					طبقه‌بندی شاخص NDWI
1400	1397	1387	1377	1367	
1491.315	559.682	2711.91	3551.306	705.957	بسیار خشک / بایر
358.605	942.868	1833.404	1507.461	2262.835	خشک / خاک بدون پوشش
1869.417	1521.897	2.288	0.791	1920.595	خاک مرطوب / کشاورزی آبیاری شده
1259.779	1525.21	1134.568	70.856	136.0359	رطوبت کم / پوشش گیاهی با رطوبت
542.976	934.306	22.929	609.548	45.524	رطوبت متوسط
366.824	481.063	317.94	285.528	89.537	رطوبت زیاد
256.376	180.2226	122.73	119.832	989.420	رطوبت خیلی زیاد

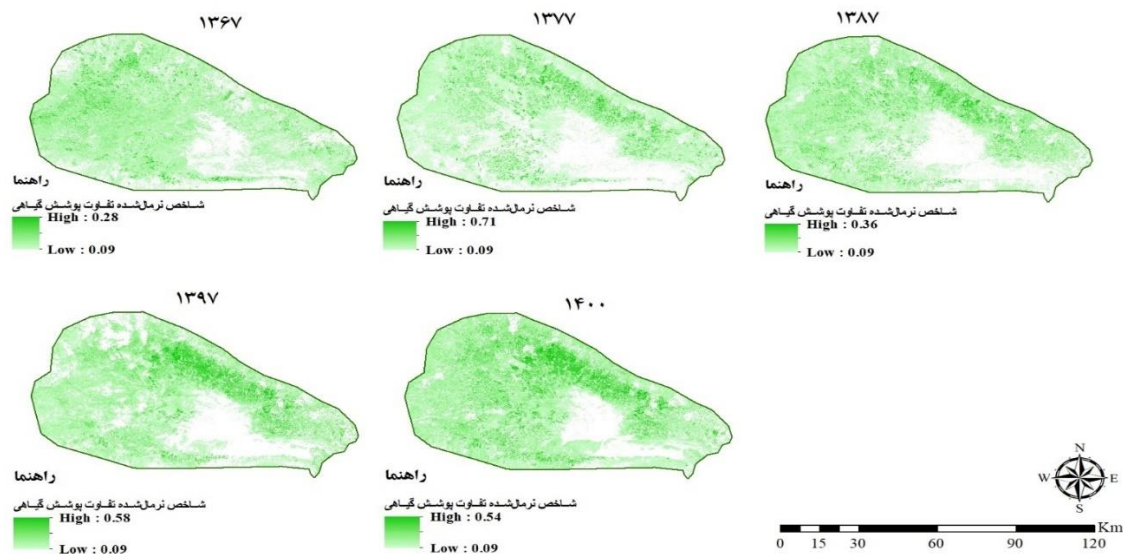
می‌دهد که در سال ۱۳۶۷، عمده مساحت منطقه در کلاس‌های پایین‌تر قرار داشته است؛ به طوری که کلاس خیلی ضعیف با ۲۵۱۶/۳۰ کیلومتر مربع و ضعیف با ۱۵۹۶/۰۸ کیلومتر مربع، بیشترین سهم را به خود اختصاص داده‌اند. این روند در سال‌های ۱۳۷۷ و ۱۳۸۷ نیز با کمی نوسان تکرار شده است. در سال ۱۳۹۷، مساحت کلاس‌های متوسط و خوب افزایش یافته و به ترتیب به ۵۹۲/۵۹ و ۲۶۷/۰۵ کیلومتر مربع رسیده است. این روند در سال ۱۴۰۰ ادامه یافته و بهبود قابل توجهی در وضعیت پوشش گیاهی ثبت شده است؛ به طوری که مساحت کلاس متوسط به ۶۹۵/۶۸ و کلاس خوب به ۴۱۰/۰۸ کیلومتر مربع افزایش یافته است.

طبقه‌بندی شاخص NDVI

در این پژوهش، برای بررسی وضعیت پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۳۶۷ تا ۱۴۰۰، از شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) استفاده شد. جهت طبقه‌بندی مقادیر NDVI، روش آماری Sturges (استرجس) به کار گرفته شد؛ با این تفاوت که به منظور تمرکز بر نواحی دارای پوشش گیاهی واقعی، تمام مقادیر NDVI کمتر از ۰/۰۹ به عنوان نواحی فاقد پوشش گیاهی یا خاک برهنه در نظر گرفته شده و از طبقه‌بندی حذف گردید (شکل ۵) در نتیجه، فقط مقادیر NDVI بالاتر از ۰/۰۹ وارد طبقه‌بندی نهایی شدند که شامل چهار کلاس پوشش خیلی ضعیف، ضعیف، متوسط و خوب می‌باشد. نتایج به دست آمده از جدول مقایسه‌ای (جدول ۵) نشان

جدول ۵- توزیع مساحت طبقات شاخص NDVI در منطقه تالاب صالحیه طی سال‌های منتخب بر حسب کیلومتر مربع
Table 5 – Area distribution of NDVI classification in the Salehiyeh wetland for selected years (Km²)

سال مورد بررسی					طبقه بندی شاخص NDVI
1400	1397	1387	1377	1367	
2139.31	2148.65	2479.20	2583.13	2516.30	پوشش خیلی ضعیف ($0.09 < NDVI \leq 0.15$)
1653.82	1301.52	1449.51	898.57	1596.08	ضعیف ($0.15 < NDVI \leq 0.22$)
695.68	592.59	450.85	415.79	379.10	متوسط ($0.22 < NDVI \leq 0.35$)
410.08	267.05	166.48	196.15	47	خوب ($NDVI > 0.35$)



شکل ۵- نقشه طبقه‌بندی پوشش گیاهی بر اساس شاخص NDVI با استفاده از روش (Sturges)

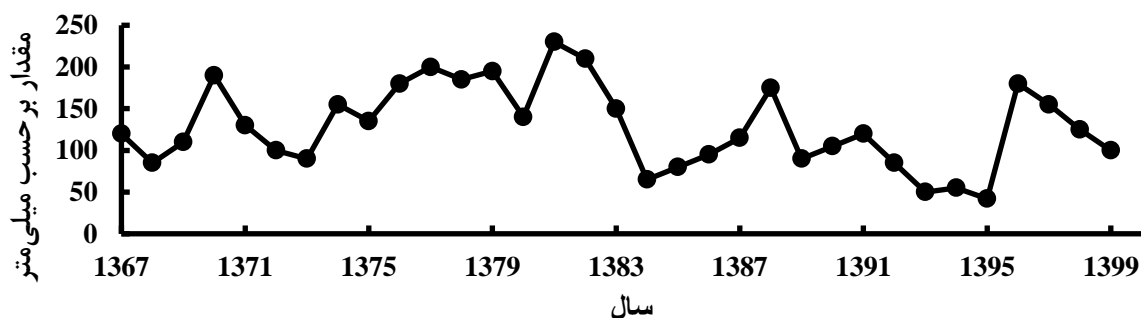
Figure 5- Vegetation cover classification map based on NDVI using the Sturges method

این افت بارش احتمالاً تأثیر مستقیمی بر کاهش منابع آبی سطحی و زیرزمینی و تشدید خشکی تالاب‌ها و اراضی پیرامونی داشته است. در مقابل، سال‌های پر بارش شامل ۱۳۷۱، ۱۳۷۷، ۱۳۸۱، ۱۳۸۸ و به‌ویژه ۱۳۹۶ هستند که در آن‌ها بارش سالانه به بیش از ۱۸۰ میلی‌متر رسیده است. با این حال، این افزایش‌ها عمدتاً مقطعی و فاقد استمرار بوده‌اند و به‌سرعت در سال‌های بعد کاهش یافته‌اند. الگوی کلی نشان می‌دهد که بارش سالانه در منطقه از شدت نوسان بالا و توزیع زمانی نامنظم برخوردار است (شکل ۶).

بررسی روند تغییرات بارش سالانه

به‌منظور بررسی روند اقلیمی منطقه تالاب صالحیه، داده‌های بارش سالانه طی دوره زمانی ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۱ مورد تحلیل قرار گرفت. نمودار تغییرات بارندگی سالانه نشان‌دهنده نوسانات قابل‌ملاحظه‌ای است که از نبود الگوی پایدار بارشی در منطقه حکایت دارد. در طول این بازه، چندین دوره خشکسالی چشمگیر قابل شناسایی است. به‌طور مشخص، سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۶ و همچنین بازه ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵ از جمله کم‌بارش‌ترین دوره‌ها محسوب می‌شوند که بارش سالانه در آن‌ها به حدود ۶۰ تا ۸۰ میلی‌متر کاهش یافته است.

میانگین بارش سالانه برحسب میلی‌متر



شکل ۶- روند تغییرات بارش سالانه در منطقه تالاب صالحیه طی سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۱

Figure 6- Annual precipitation trend in the Salehiyeh wetland region from 1989 to 2021

بررسی روند تغییرات کاربری اراضی و صحت‌سنجی

نتایج ارزیابی دقت پنج کاربری اراضی کشاورزی، اراضی مرتعی، اراضی بایر و شوره‌زار و بسترهای آبی در یک بازه زمانی ۳۲ ساله (۱۳۶۷ تا ۱۴۰۰) نشان داد که دقت کلی بالای ۹۳٪ و ضریب کاپا نیز بالای ۹۰٪ مساحت ۲۸۱۷/۸۴ کیلومترمربع و درصد مساحت بیش از ۴۵ درصد انتقال یافته است. همچنین مساحت بسترهای آبی از جمله تالاب صالحیه و اراضی مرطوب حاشیه آن به شدت کاهش یافته است. این مناطق در سال ۱۳۶۷ حدود ۲/۶۴ درصد از مساحت منطقه و در

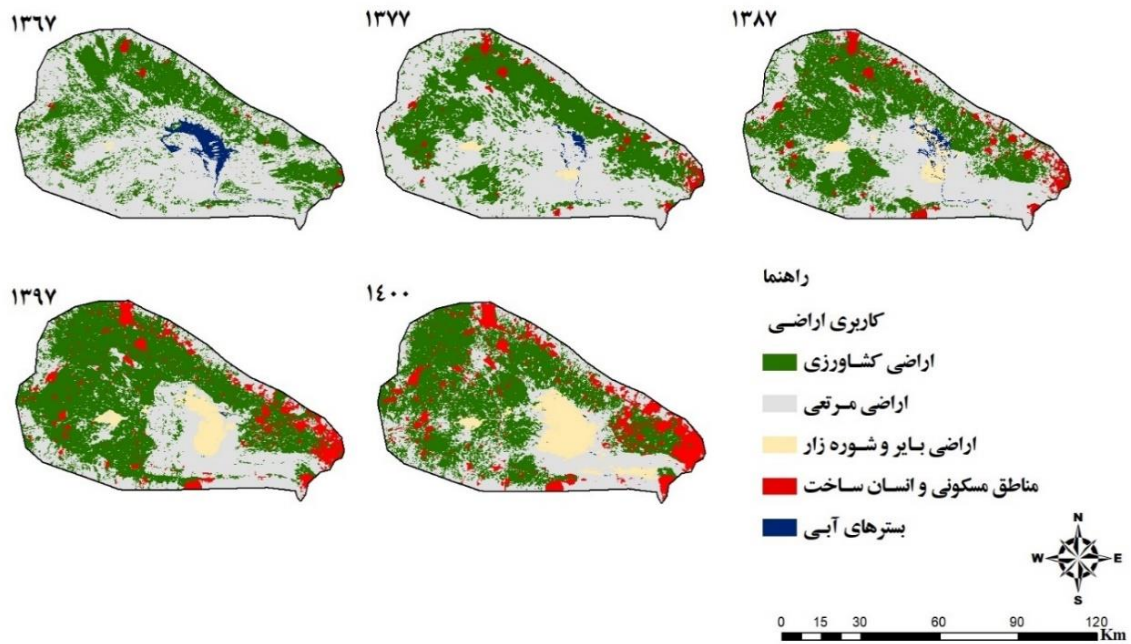
سال ۱۴۰۰ حدود ۰/۰۵ درصد را شامل می‌شوند که دارای پایین‌ترین درصد در بین اراضی طبقه‌بندی شده می‌باشند (جدول ۶). در این دوره زمانی ۳۲ ساله اراضی کشاورزی، اراضی بایر و شوره‌زار و همچنین اراضی مسکونی و انسان‌ساخت روندی افزایشی داشته است که به ترتیب از ۳۳/۶۹، ۰/۱۵ و ۰/۷۵ در سال ۱۳۶۷ به ۴۵/۸۴، ۸/۱۹ و ۱۲/۵۴ درصد در سال ۱۴۰۰ رسیده است. همچنین کاربری‌های مرتعی و بسترهای آبی نیز روندی کاهشی داشته که به ترتیب از ۶۲/۷۸ و ۲/۶۴ در سال ۱۳۶۷ به ۳۳/۳۸ و ۰/۰۵ درصد در سال ۱۴۰۰ کاهش پیدا کرده است.

جدول ۶- مساحت و درصد مساحت کاربری‌های منطقه مورد مطالعه
Table 6 - Area and Percentage of Land Uses in the Study Area

1400		1397		1387		1377		1367		طبقه‌بندی اراضی
Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	
2817.8	45.8	3165	51.5	2545.3	41.4	2248.0	36.5	2070.2	33.6	اراضی کشاورزی
2050.4	33.3	2184.7	35.5	6530.8	49.8	3635.9	59.1	3857.8	62.7	اراضی مرتعی
503.4	8.1	271.4	4.4	171.9	2.8	54.3	0.8	9.0	0.1	اراضی بایر و شوره‌زار
770.2	8.4	520.5	12.5	337.4	5.4	180.3	2.9	46.	0.7	مناطق مسکونی و انسان‌ساخت
3.2	0.06	3.4	0.05	24.7	0/4	26.4	0.4	161.9	2.6	بسترهای آبی
6145.20	100	6145.20	100	6145.20	100	6145.20	100	6145.20	100	جمع کل

جدول ۷- دقت کلی، ضریب کاپا، دقت کاربر و دقت تولید کننده طبقه‌بندی کاربری اراضی برای سال‌های مختلف
Table 7 – Overall Accuracy, Kappa Coefficient, User Accuracy and Producer Accuracy of Land Use Classification for Different Years

سال	دقت کلی	ضریب کاپا	دقت کاربر	دقت تولید کننده
1367	92.4 %	0.89	97.2 %	96%
1377	93.1 %	0.91	97.8 %	95.4 %
1387	94.6 %	0.92	95.4 %	94.2 %
1397	95.3 %	0.93	98.2 %	98.3 %
1400	96.1 %	0.94	99.6 %	99.2 %

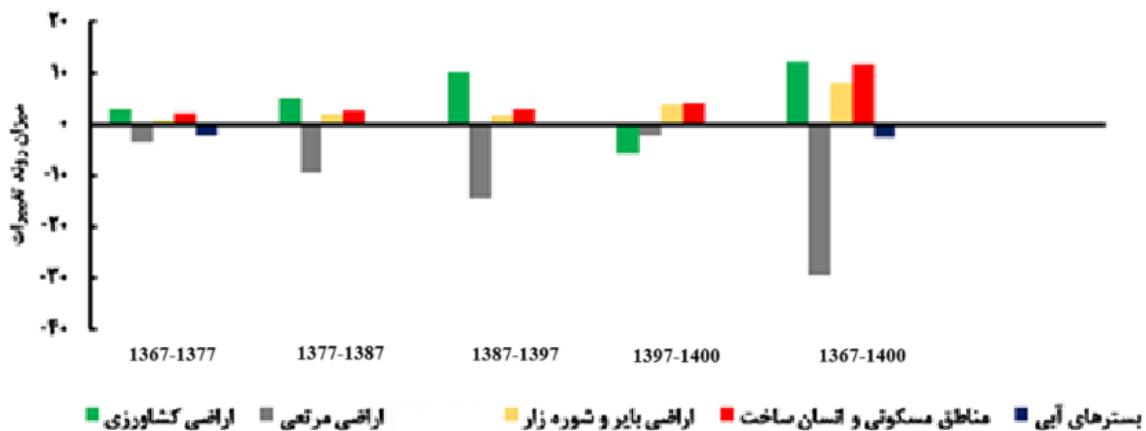


شکل ۷- نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه در سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۴۰۰
 Figure 7 - Land Use Map of the Study Area from 1988 to 2021

بسترهای آبی با منفی ۲/۵۸ درصد کاهش به دست آورده است. این بررسی سال به سال نشان داد که افزایش اراضی کشاورزی در بین سال‌های ۱۳۶۷-۱۴۰۰، از کاهش ۲۹/۴۰ درصدی اراضی بایر بوده است. از طرفی دیگر در این بازه ۳۲ ساله حدود ۲/۵۸ درصد کاهش بسترهای آبی باعث افزایش ۸/۰۵ درصدی اراضی شور نیز شده است.

درجه تغییرات کاربری در بازه زمانی ۱۳۶۷-۱۴۰۰

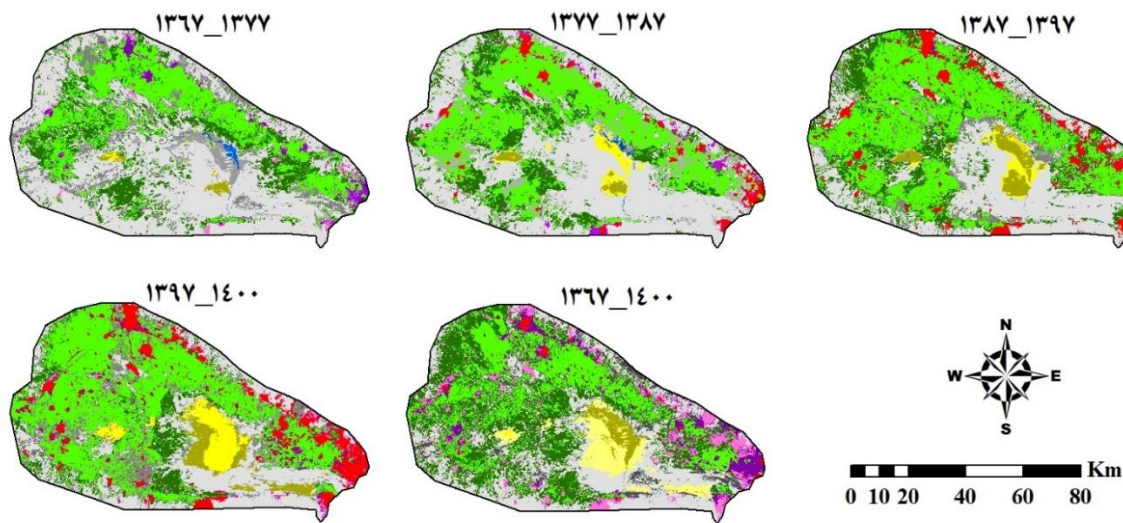
نتایج بررسی روند تغییرات کاربری اراضی در گام زمانی ۱۰ ساله از سال ۱۳۶۷ تا ۱۴۰۰ نشان داد که اراضی کشاورزی در حال افزایش بوده و در نهایت افزایش ۱۲/۱۷ درصدی را داشته است که این افزایش را از کاهش اراضی مرتعی با منفی ۲۹/۴۱ درصد کاهش و



شکل ۸- روند تغییرات کاربری اراضی در بازه زمانی ۱۳۶۷_۱۴۰۰
 Figure 8- Trend of Land Use Changes from 1988 to 2021

ساله بین سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۰ روند تغییرات کاربری اراضی مرتعی همچنان به صورت کاهش بوده است به طوری که ۲۳/۲۱ درصد به اراضی کشاورزی، ۱۰/۹۹ درصد به اراضی بایر و شوره‌زار و ۵/۰۲ درصد نیز به اراضی مسکونی و انسان‌ساخت تغییر کاربری داده است. به طور کلی روند تغییرات به سوی افزایش کشاورزی و مناطق انسان‌ساخت و همچنین اراضی بایر و شوره‌زار و همچنین کاهش قابل توجه اراضی مرتعی و بسترهای آبی بوده است (شکل‌های ۸ و ۹). نقشه روند تغییرات کاربری اراضی در شکل ۹ در واقع بیانگر تبدیل اراضی به یک‌دیگر در طی سال‌های متمادی می‌باشد. به این صورت که به عنوان مثال اراضی کشاورزی که با شماره ۱ مشخص شده‌اند به اراضی بایر و یا اراضی شهری با شماره‌های ۲ و ۴ تبدیل شده‌اند. همچنین، بسترهای آبی با شماره ۵ به مناطق بایر و شوره‌زار با شماره ۳ تغییر یافته‌اند.

به طور خاص روند تغییرات کاربری اراضی در شکل ۸ در سال‌های ۱۳۶۷، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷، ۱۳۹۷ و ۱۴۰۰ بسیار متغیر بوده به طوری که بیشترین تغییرات مربوط به اراضی مرتعی بوده است که از سال ۱۳۶۷ حدود ۲۴/۱۱ درصد این کاربری اراضی به اراضی کشاورزی، ۱/۵۰ درصد به اراضی مسکونی و انسان‌ساخت و ۱/۰۹ درصد به اراضی بایر و شوره‌زار در سال ۱۳۷۷ تبدیل شده است. بین سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۷ نیز اراضی مرتعی بیشترین تغییرات را داشته است ۲۳/۶۶ درصد این اراضی به اراضی کشاورزی، ۳ درصد به اراضی مسکونی و انسان‌ساخت و ۲/۹۸ درصد آن به اراضی بایر و شوره‌زار تبدیل شده است. همچنین کاربری اراضی مرتعی بیشترین تغییرات را در بازه‌ی ۱۰ ساله‌ی ۱۳۸۹ و ۱۳۹۷ داشته است به طوری که ۳۲/۵۵ درصد آن به اراضی کشاورزی، ۴/۱۴ درصد به کاربری اراضی مسکونی و انسان‌ساخت و ۲/۸۹ درصد آن به کاربری اراضی بایر و شوره‌زار تبدیل شده است. در یک بازه ۳



راه‌نما

1, 1	2, 3	3, 5	4, 4	5, 3
1, 4	2, 4	2, 1	3, 3	5, 2
1, 2	1, 5	2, 2	3, 2	5, 1
				5, 4
				5, 5

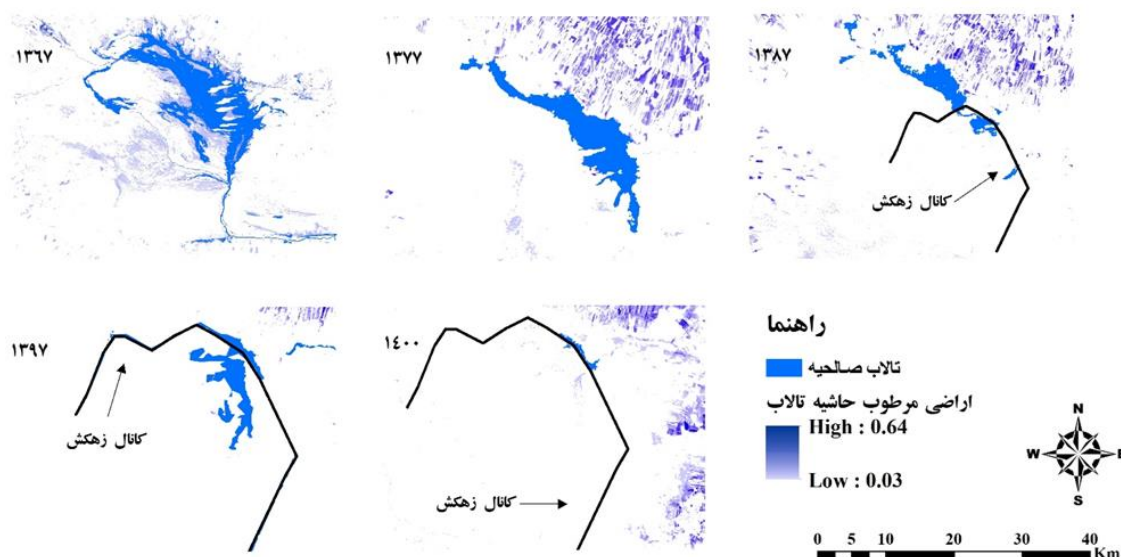
شکل ۹- نقشه روند تغییرات کاربری اراضی (اعداد ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ به ترتیب کاربری کشاورزی، مراتع، اراضی بایر و شوره‌زارها، مناطق مسکونی و انسان‌ساخت و بسترهای آبی است)

Figure 9 - Map of Land Use Change Trends (Numbers 1, 2, 3, 4, and 5 represent Agricultural Land, Pastures, Barren and Saline Lands, Residential and Built-up Areas, and Water Bodies, respectively)

شده است. همچنین در سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۷ حدود ۳۵/۴۰ درصد بسترهای آبی به اراضی مرتعی و ۱۵/۸۳ درصد آن، به اراضی بایر و شورزار تغییر کاربری داده است. در بازه زمانی ۱۰ ساله ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۷ نیز همچنان کاهش بستر آبی مشهود است به طوری که تنها ۲/۷۰ درصد این بستر در سال ۱۳۹۷ باقی مانده است و ۵۱/۰۱ درصد از آن به اراضی بایر و شورزار و ۴۰/۹۱ درصد آن به اراضی مرتعی تغییر یافته است. در بازه زمانی ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۰ مجدد کاهش بستر آبی نمایان است به طوری که در سال ۱۳۹۷ در حدود ۵۲/۶۱ درصد این کاربری اراضی به کاربری اراضی مرتعی و ۱۹ درصد آن به اراضی بایر و شورزار در سال ۱۴۰۰ تبدیل شده است.

کاهش بسترهای آبی در این بازه ۳۲ ساله از ۱۶۱/۹۳ کیلومترمربع به ۳/۳۵ کیلومترمربع رسیده است که حدود ۸۰/۳۱ درصد این کاربری به اراضی بایر و شورزار تبدیل شده است.

بررسی تغییرات بستر آبی تالاب صالحیه باتوجه به اهمیت بسترهای آبی در این پژوهش روند تغییرات آن به صورت مجزا در ادامه شرح داده خواهد شد (شکل ۱۰). بررسی تغییرات کاربری تالاب صالحیه و اراضی مرطوب حاشیه‌ی آن در شکل ۱۰ نشان داد که در بین سال‌های ۱۳۶۶ تا ۱۳۷۷ کاهش قابل توجهی داشته است به طوری که از ۱۰۰ درصد مساحت آن در سال ۱۳۶۷ حدود ۸۰/۲۱ درصد آن به اراضی مرتعی و ۲/۰۵ در آن به اراضی بایر و شورزار در سال ۱۳۷۷ تبدیل



شکل ۱۰- روند تغییرات تالاب صالحیه و اراضی مرطوب حاشیه تالاب
Figure 10- Trend of Changes in Salehiyeh Wetland and its Margins

چرخه‌های آبی طبیعی تالاب‌ها شده و کاهش سطح آب، تخریب زیستگاه‌ها و اختلال در تعادل اکولوژیکی را به دنبال دارد. به همین دلیل، اقدامات بازسازی و احیای تالاب‌ها به منظور بازیابی زیستگاه‌های از دست رفته و تأمین منابع غذایی برای جانوران منطقه آغاز شده است. همچنین، درباره تأثیر تالاب‌ها بر منابع آب زیرزمینی، هنوز شناخت کافی وجود ندارد و نیاز به پژوهش‌های بیشتری احساس می‌شود. لذا بررسی دقیق

بحث

مطالعات مختلف نشان می‌دهد که تالاب‌ها به دلیل فعالیت‌های انسانی در سطح جهانی آسیب‌پذیر شده‌اند و این امر باعث کاهش کارکردهای طبیعی آن‌ها شده است. یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های انسانی که بر تالاب‌ها تأثیرگذار است، زهکشی است که معمولاً به منظور توسعه کشاورزی یا شهرسازی انجام می‌شود (Bring et al., 2022). این فرآیند موجب تغییر در

پهنه‌های آبی در منطقه است، واکنش خطی یا هم‌راستایی با بارندگی‌ها نشان نمی‌دهد. برای مثال، انتظار می‌رفت که در پی بارش شدید سال ۲۰۱۸، در سال ۲۰۱۹ یا ۲۰۲۰ شاهد افزایش محسوس در سطح رطوبت باشیم، اما تنها افزایش محدود و کوتاه‌مدتی در کلاس‌های NDWI ثبت شده و در سال ۲۰۲۱ مجدداً روند کاهشی مشاهده شده است.

این ناهم‌خوانی میان افزایش بارندگی و کاهش رطوبت سطحی نشان می‌دهد که بارش به‌تنهایی تعیین‌کننده وضعیت منابع آبی تالاب نیست. به نظر می‌رسد که تغییرات ساختاری در سامانه هیدرولوژیکی منطقه، به‌ویژه احداث زهکش‌ها و کانال‌های انحرافی، تأثیر بیشتری در وضعیت آبی تالاب دارند. زهکش‌های ایجادشده با هدف تخلیه آب مازاد اراضی کشاورزی، موجب کاهش تغذیه طبیعی تالاب و انحراف روان‌آب‌های سطحی شده و نهایتاً باعث کاهش کارایی بارش در بهبود شرایط رطوبتی منطقه شده‌اند.

بنابراین، NDWI و بارندگی سالانه به‌وضوح بیانگر آن است که با وجود وقوع دوره‌های ترسالی، سامانه زهکشی و سایر مداخلات انسانی مانع از احیای طبیعی رطوبت و آب تالاب شده‌اند. تأثیر برنامه‌های زهکشی بر تالاب‌ها موضوعی است که در مطالعات محیط‌زیست موردتوجه قرار گرفته است. برای نمونه، در مطالعه‌ی Dorche و همکاران (۲۰۱۹) کیفیت آب تالاب‌ها در مناطق سرد و خشک ارزیابی گردید و اهمیت درک تأثیرات اکولوژیکی و مداخلات انسانی بر تالاب‌ها را برجسته نمود. با توجه به تغییرات چشمگیر در شاخص NDWI و کاهش شدید بستر آبی در سال‌های پس از احداث زهکش، می‌توان عنوان کرد که برنامه احداث زهکش منجر به کاهش محتوی رطوبتی تالاب، به‌ویژه در منطقه جمع‌آوری آب و ایجاد یک روند منفی در رطوبت در برخی از بخش‌های منطقه جمع‌آوری فعلی شده است. همچنین در مطالعه‌ی Uossef و Gomrokchi (۲۰۲۲) نشان داده شد که آب ورودی به این مناطق اغلب به دلیل رقابت با سایر مصارف آبی مانند کشاورزی، مصرف انسان و دام و

تغییرات سطح تالاب‌هایی مانند تالاب صالحیه برای فهم بهتر تأثیرات فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه زهکشی، بر اکوسیستم اهمیت فراوانی دارد. در تحقیق حاضر برای بررسی تغییرات کاربری با تأکید بر تغییرات تالاب صالحیه از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ OLI و لندست ۵ TM برای دوره زمانی ۳۲ ساله از سال ۱۳۶۷ تا ۱۴۰۰ استفاده گردید. این بررسی روند تغییرات نشان داد که در این بازه زمانی ۳۲ ساله اراضی کشاورزی، اراضی بایر و شوره‌زار و همچنین اراضی شهری روندی افزایشی داشته است که به ترتیب از ۳۳/۶۹، ۰/۱۵ و ۰/۷۵ به ۴۵/۸۴، ۸/۱۹ و ۱۲/۵۴ درصد رسیده است همچنین کاربری‌های مرتعی و بسترهای آبی نیز روندی کاهشی داشته که به ترتیب از ۶۲/۷۸ و ۲/۶۴ به ۳۳/۳۸ و ۰/۰۵ درصد کاهش پیدا کرده است. در راستای این نتایج Javadi و همکاران (۲۰۲۰) نیز در پژوهش خود در بازه زمانی ۱۳۷۹-۱۳۹۴ دریافتند که اراضی شوره‌زار ۳/۰۱ کیلومترمربع و اراضی رهاشده و بایر ۴۳/۶ کیلومترمربع در منطقه اشتهارد واقع در استان البرز افزایش یافته است (Javadi et al., 2020). تحلیل تلفیقی شاخص NDWI و داده‌های بارش سالانه در منطقه تالاب صالحیه طی سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۱، روندی مهم و نگران‌کننده را در ارتباط بین منابع آبی و فعالیت‌های انسان‌ساز، به‌ویژه زهکشی، آشکار می‌سازد.

نمودار بارندگی سالانه منطقه نشان می‌دهد که طی سه دهه گذشته، الگوی بارش با نوسانات قابل توجهی همراه بوده است. در برخی دوره‌ها، مانند سال‌های ۱۹۹۳، ۱۹۹۹، ۲۰۰۳ و ۲۰۱۰، بارش سالانه افزایش یافته و به بیش از ۱۸۰ میلی‌متر رسیده است؛ اوج این بارندگی‌ها در سال ۲۰۱۸ ثبت شده که بارش به حدود ۳۰۰ میلی‌متر رسیده است. در مقابل، دوره‌هایی چون ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸ و همچنین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ با کاهش محسوس بارش همراه بوده و مقدار آن به کمتر از ۸۰ میلی‌متر کاهش یافته است.

با وجود این نوسانات شدید در میزان بارش، شاخص NDWI که نشان‌دهنده میزان رطوبت سطحی و وسعت

اطراف تالاب، از جمله احداث زهکش‌ها، ساخت آزادراه آبیک-چرمشهر، تأسیس فرودگاه آزادی و گسترش اراضی کشاورزی، فشارهای اکولوژیکی بیشتری را بر این زیست‌بوم وارد کرده‌اند. این اقدامات نه تنها زیستگاه گونه‌های جانوری را تهدید می‌کند، بلکه موجب تشدید انزوای جغرافیایی و اختلال در ارتباطات اکولوژیکی تالاب با مناطق پیرامونی شده است. احداث زهکش به طول ۴۵ کیلومتر در سال ۱۳۸۸ با هدف مدیریت آب‌های سطحی، کاهش سطح آب زیرزمینی، آزادسازی اراضی برای کشاورزی و جلوگیری از پیشروی نمک انجام شد؛ اما این سازه در عمل به کانالی برای خروج آب از تالاب تبدیل شده است که تعادل آبی تالاب را بر هم زده است. از دیگر تهدیدات زیست‌محیطی تالاب، ورود پساب صنعتی از شهرک صنعتی نظرآباد در سال‌های اخیر است که به‌عنوان یک منبع آلودگی پایدار، اثرات منفی بر کیفیت آب و زیستگاه‌های وابسته به آن داشته است. در همین راستا، مطالعات صورت‌گرفته در سایر نقاط جهان نیز تأثیرات مشابهی را گزارش کرده‌اند. به عنوان نمونه، پژوهش Qu و همکاران (۲۰۲۳) در تالاب دشت سانجیانگ در چین نشان داد که تغییرات کاربری زمین و در پی آن، اختلال در چرخه هیدرولوژیکی تالاب، به‌طور قابل توجهی تنوع زیستی این زیست‌بوم را با تهدید مواجه ساخته است. این تغییرات باعث کاهش کیفیت زیستگاه‌ها، اختلال در الگوهای مهاجرتی گونه‌های پرندگان آبی و افزایش آسیب‌پذیری گونه‌های بومی شده است. Konar و همکاران (۲۰۱۳) نیز در مطالعات خود به این نتیجه دست یافتند که چرخه‌ی هیدرولوژیک مهم‌ترین نقش را در حفاظت از تنوع زیستی دشت‌های سیلابی بر عهده دارند. هرچند نباید از این نکته غافل بود که جدا از فعالیت‌های انسانی، نقش تغییرات اقلیمی در رابطه با برآورد آبی تالاب معنی‌دار بوده و می‌تواند هدف مطالعه‌های مجزا قرار گیرد. در ایران نیز Asgharizade و همکاران (۲۰۱۹) به پایش و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در تالاب بین‌المللی شادگان پرداختند

استفاده صنعتی تحت تنش شدید هستند. از طرف دیگر، احداث زهکش در محدوده بالایی تالاب صالحیه باعث شده که سیستم هیدرولوژیکی این تالاب از حالت تعادل خود خارج شود و آبی که در گذشته در مسیر خود وارد قسمت کم‌ارتفاع تالاب می‌شده به‌وسیله زهکش، مسدود و تخلیه شود. از سوی دیگر، شاخص NDVI که بیانگر تراکم پوشش گیاهی است، الگوی متفاوتی نشان می‌دهد. در سال ۱۳۶۷، کلاس‌های بالای NDVI بسیار محدود بوده‌اند که می‌تواند ناشی از شرایط خشکسالی یا عدم پوشش سبز وسیع در آن دوره باشد. اما از سال ۱۳۷۷ به بعد، افزایش تدریجی در کلاس‌های NDVI متوسط تا زیاد دیده می‌شود که به‌خصوص در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۴۰۰، کلاس‌های سوم و دوم (با پوشش گیاهی کم تا متوسط) بیشترین سهم را دارند. این مسئله، هم‌راستا با افزایش اراضی کشاورزی آبیاری شده است. به‌علاوه، مناطق شهری و انسان‌ساخت در حال افزایش بوده که این می‌تواند حاصل از افزایش جمعیت و نیاز جمعیت به مناطق مسکونی و همچنین گسترش مناطق صنعتی باشد و به پیرو این افزایش جمعیت، اراضی کشاورزی برای تأمین غذا افزایش یافته است. رشد جمعیت و تأمین مسکن و غذا برای این جمعیت در حال رشد، باعث تبدیل و تغییر در کاربری‌های مختلف شده است. این افزایش اراضی کشاورزی و جمعیت نیاز به تأمین آب دارد که باعث کاهش بستر آبی تالاب صالحیه شده است.

در میان عوامل مختلف انسانی که چرخه طبیعی تالاب صالحیه را مختل کرده‌اند، تغییر در الگوی تخصیص حقا به‌ویژه به دلیل احداث زیرساخت‌های بزرگ آبی و عمرانی، نقش تعیین‌کننده‌ای داشته است. ساخت سد «کینه‌ورس» بر روی رودخانه ابهررود، احداث بند انحرافی بر رودخانه کردان با هدف تغذیه مصنوعی دشت هشگرد و همچنین احداث سد انحرافی روی رودخانه زیاران، همگی باعث تغییر در جریان‌های ورودی به تالاب و برهم خوردن چرخه هیدرولوژیکی آن شده‌اند. افزون بر این، پروژه‌های عمرانی در داخل و

و پایش پهنه آبی تالاب، و شاخص NDVI برای بررسی تغییرات پوشش گیاهی در سطح منطقه به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که در این مدت، اراضی کشاورزی و مناطق شهری با روندی افزایشی مواجه شده‌اند، در حالی که مساحت پوشش گیاهی و بستر آبی تالاب به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است. این تغییرات عمدتاً به واسطه‌ی فعالیت‌های انسانی نظیر گسترش کشاورزی و توسعه شهری، به‌ویژه پس از احداث زهکش، و همچنین تأثیرات تغییرات اقلیمی و کاهش نزولات جوی رخ داده است. مطالعات مشابه انجام‌شده در سایر مناطق نیز نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند که نشان‌دهنده‌ی ارتباط مستقیم میان گسترش اراضی کشاورزی و شهری و کاهش مساحت تالاب‌ها و بسترهای آبی است. به‌ویژه در تالاب صالحیه، روند کاهش رطوبت و پوشش گیاهی به‌وضوح مشهود است و این امر تهدیدی جدی برای پایداری اکوسیستم‌های آبی و تنوع زیستی منطقه به‌شمار می‌آید؛ بنابراین، یافته‌های این تحقیق تأکید بر ضرورت استفاده از فناوری‌های سنجش از دور به‌عنوان ابزاری مؤثر در پایش تغییرات کاربری اراضی و ارزیابی تأثیرات ناشی از فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی دارند. علاوه بر این، مدیریت پایدار منابع آبی و اتخاذ تدابیر حفاظتی برای جلوگیری از تخریب بیشتر تالاب‌ها و اکوسیستم‌های مرتبط، به‌ویژه در مناطق حساس نظیر تالاب صالحیه، امری ضروری به نظر می‌رسد. انجام مطالعات تکمیلی با توجه به داده‌های اقلیمی و بررسی دقیق‌تر اثرات فعالیت‌های انسانی می‌تواند به بهبود سیاست‌ها و برنامه‌های مدیریت منابع طبیعی کمک شایانی نماید.

References

Abdullah, H. M., Mukti, M., Miah, M. G., Karim, M. A., Tanzir, M. T., & Hossain, M. S. (2024). Development at the cost of unsustainable degradation of wetlands: Unraveling the dynamics (historic and future) of wetlands in the megacity Dhaka. *World Development Sustainability*, 4,

که نتایج آن نشان‌دهنده کاهش قابل‌توجه مساحت پوشش اولیه تالاب و افزایش پهنه‌های کشاورزی و مناطق شهری در اطراف آن بود. پیش‌بینی‌ها با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی نشان داد که در صورت تداوم روند موجود، تا سال ۲۰۳۰ بخش بیشتری از تالاب به کاربری‌های انسانی اختصاص خواهد یافت. همچنین Salar و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی تأثیر تغییرات کاربری و پوشش اراضی بر تالاب جازموریان پرداختند، بررسی نقشه‌های تهیه شده نشان داد که سطح اراضی زیر آب از سال ۱۳۵۴ تا ۱۳۷۴ افزایش و پس از آن سیر نزولی داشته و از ۱۱۹۵۵۲ هکتار در سال ۱۳۷۴ به ۷۲۳ هکتار در سال ۱۴۰۱ کاهش یافته‌اند. سطح اراضی کشاورزی از ۲۱۳۱ هکتار در سال ۱۳۵۴ به ۱۳۳۹۱۳ هکتار در سال ۱۳۸۷ افزایش یافته و در سال ۱۴۰۱ به ۱۰۵۷۹۵ هکتار کاهش یافته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، در این دوره با ایجاد سد در بالادست رودخانه هلیل‌رود از یک‌طرف و توسعه اراضی کشاورزی، سطح آب تالاب کاهش پیدا کرده است؛ به‌طوری‌که در سال ۱۴۰۱ تالاب به‌طور کامل خشک شده است که همسو با تأثیرات فعالیت‌های انسانی از قبیل احداث زهکش در تالاب صالحیه می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، روند تغییرات تالاب صالحیه و اراضی اطراف آن طی دوره ۳۲ ساله (۱۳۶۷ تا ۱۴۰۰) با بهره‌گیری از دو شاخص سنجش‌از‌دور NDWI و NDVI و به کمک الگوریتم طبقه‌بندی جنگل تصادفی مورد بررسی قرار گرفت. شاخص NDWI برای استخراج

100131.

<https://doi.org/10.1016/j.wds.2024.100131>

Abebe, M. S., Derebew, K. T., & Gemed, D. O. (2019). Exploiting temporal-spatial patterns of informal settlements using GIS and remote sensing technique: a case study of Jimma city, Southwestern Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 8(1), 1-

11. <https://doi.org/10.1186/s40068-019-0133-5>
Ahmad, F. (2012). Detection of change in vegetation cover using multi-spectral and multi-temporal information for District Sargodha, Pakistan. *Sociedade & Natureza*, 24, 557-571. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-45132012000300014>
- Asghari Poudeh, Z., Ghadirian Baharanchi, O., Nematollahi, S., Fakheran, S., & Pourmanafi, S. (2019). Monitoring and prediction of land use/cover changes in Shadegan International Wetland, Iran. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 8(3), 63-76. <http://ijae.iut.ac.ir/article-1-934-en.html>
- Bring, A., Thorslund, J., Rosen, L., Tonderski, K., Aberg, C., Envall, I., & Laudon, H. (2022). Effects on ground water storage of restoring, constructing or draining wetlands in temperate and boreal climates: A systematic review. *Environmental Evidence*, 11(1), 38. <https://doi.org/10.1186/s13750-022-00289-5>
- Davidson, N. C. (2014). How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 65(10), 934-941. <http://doi.org/10.1071/MF14173>
- Deslippe, J. R., & Bentley, S. B. (2025). The role of wetland restoration in mediating phosphorus ecosystem services in agricultural landscapes. *Current Opinion in Biotechnology*, 91, 103227. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2024.103227>
- Dorche, E. E., Fathi, P., & Ofogh, A. E. (2019). Wetland water quality assessment in cold and dry regions (Case study: Choghakhor wetland, Iran). *Limnological Review*, 19(2), 57-75. <https://doi.org/10.2478/limre-2019-0006>
- Doroudi, H. (2018). Breeding report of Greater Sand Plover *Charadrius leschenaultii* (Lesson, 1826) in Salhiyeh Lagoon (Karpozarbad) Nazarabad. *Zist Sepehr Student Magazine*, 13(1), 1-6. (In Persian)
- Elias, E., Seifu, W., Tesfaye, B., & Girmay, W. (2019). Impact of land use/cover changes on lake ecosystem of Ethiopia central rift valley. *Cogent Food & Agriculture*, 5(1), 1595876. <https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1595876>
- Elmore, J. A., Londe, D. W., Davis, C. A., Fuhlendorf, S. D., & Loss, S. R. (2024). Associations with landscape and local-scale wetland habitat conditions vary among migratory shorebird species during stopovers. *Wildlife Biology*, 2024(2), e01132. <https://doi.org/10.1002/wlb3.01132>
- Eskandari damaneh, H., & Ghasemi Aryan, Y. (2025). Investigating the trend and explaining the key drivers of desertification and land degradation in Salehiyeh wetland and Qazvin salt plain. *Integrated Watershed Management*, 4(4), 81-93. <https://doi.org/10.22034/iwm.2024.2026209.1146>
- Feyzolahpour, M. (2024). Analysis of changes in the surface of Anzali Wetland using spectral indices, Random Tree Classification (RTC), and Maximum Likelihood Classification (MLC) from 1992 to 2022. *Geographical Studies of Coastal Areas Journal*, 5(3), 17-36. <https://doi.org/10.22124/gscj.2024.24889.1251>
- Gessese, A. T., Chanie, T., Feyisa, T., & Jemal, A. (2017). Impact Assessment of land use/land cover change on soil erosion and rural livelihood in Andit Tid watershed, North Shewa, Ethiopia. *Asia Pacific Journal of Energy and Environment*, 4(2), 49-56. <https://doi.org/10.18034/apjee.v4i2.242>
- Golafarin, Z., Bahram Malekmohammadi, H., J., Ahmadreza, Y., & Ahmad Noheh, G. (2024). Spatiotemporal dynamics analysis of land cover in Parishan Wetland using decision tree model and satellite image processing. *Environmental Science and Technology*, 26(1), 101-118. (In Persian)
- Goyette, J. O., Savary, S., Blanchette, M., Rousseau, A. N., Pellerin, S., & Poulin, M. (2023). Setting targets for wetland restoration to mitigate climate change effects on watershed hydrology. *Environmental management*, 71(2), 365-378. <https://doi.org/10.1007/s00267-022-01763-z>
- IPCC. (2019). *Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food*

- security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/srccel/>
- Islam, I. (2008). *Wetlands of Dhaka Metro area: a study from social, economic, and institutional perspectives*. Dhaka: AH Development Publishing House.
- Jamal, S., & Ahmad, W. S. (2020). Assessing land use land cover dynamics of wetland ecosystems using Landsat satellite data. *SN Applied Sciences*, 2, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03685-z>
- Javadi, S., Zehtabian, G., Khosravi, H., & Abolhasani, A. (2020). Assessing the impact of land use change on Soil physical and chemical characteristics (Case study: Eshtehard, Alborz province). *Journal of Rangeland*, 14(2), 208-220. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20080891.1399.14.2.4.4>
- Kafy, A. A., Rahman, M. S., Hasan, M. M., & Islam, M. (2020). Modelling future land use land cover changes and their impacts on land surface temperatures in Rajshahi, Bangladesh. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18, 100314. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100314>
- Kafy, A.-A., Dey, N. N., Al Rakib, A., Rahaman, Z. A., Nasher, N. R., & Bhatt, A. (2021). Modeling the relationship between land use/land cover and land surface temperature in Dhaka, Bangladesh using CA-ANN algorithm. *Environmental Challenges*, 4, 100190. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100190>
- Karnatak, G., Das, B. K., Sarkar, U. K., Borah, S., Roy, A., Parida & Chandra, P. (2022). Integration of pen aquaculture into ecosystem-based enhancement of small-scale fisheries in a macrophyte dominated floodplain wetland of India. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(50), 75431-75440. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21112-1>
- Khemiri, K., Jebari, S., Mahdhi, N., Saidi, I., Berndtsson, R., & Bacha, S. (2022). Drivers of Long-Term Land-Use Pressure in the Merguellil Wadi, Tunisia, Using DPSIR Approach and Remote Sensing. *Land*, 11(1), 138. <https://doi.org/10.3390/land11010138>
- Konar, M., Jason Todd, M., Muneeppeerakul, R., Rinaldo, A., & Rodriguez-Iturbe, I. (2013). Hydrology as a driver of biodiversity: Controls on carrying capacity, niche formation, and dispersal. *Advances in Water Resources*, 51, 317-325. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.02.009>
- Moisa, M. B., Bulto, T. W., Werku, B. C., Berkessa, Y. W., Chebo, A. K., Negash, D. A., & Gemed, D. O. (2023). Analyzing Wetland Dynamics Using Geospatial Techniques: A Case of Abay Choman and Jimma Geneti Watershed, Horo Guduru Wollega Zone, Western Ethiopia. *Air, Soil and Water Research*, 16, 11786221221150183. <https://doi.org/10.1177/11786221221150183>
- Moisa, M. B., Dejene, I. N., Merga, B. B., & Gemed, D. O. (2022). Impacts of land use/land cover dynamics on land surface temperature using geospatial techniques in Anger River Sub-basin, Western Ethiopia. *Environmental Earth Sciences*, 81(3), 99. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10221-2>
- Othman, A. A., Al-Saady, Y. I., Al-Khafaji, A. K., & Gloaguen, R. (2014). Environmental change detection in the central part of Iraq using remote sensing data and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 1017-1028. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-0870-0>
- Park, N.-W., Chi, K.-H., & Kwon, B.-D. (2003). Geostatistical integration of spectral and spatial information for land-cover mapping using remote sensing data. *Geosciences Journal*, 7, 335-341. <https://doi.org/10.1007/BF02919565>
- Peters, M. K., & Kusimi, J. M. (2023). Changes in wetland and other landscape elements of the Keta Municipal area of Ghana. *Journal of Coastal Conservation*, 27(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s11852-022-00928-6>
- Qu, Y., Zeng, X., Luo, C., Zhang, H., & Ni, H. (2023). Prediction of wetland biodiversity pattern under the current land-use mode and wetland sustainable management in Sanjiang Plain, China. *Ecological Indicators*, 147, 109990. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109990>
- Ramsar Convention on Wetlands. (2018). *Global Wetland*

- Outlook: State of the World's Wetlands and their Services to People. Gland, Switzerland: Ramsar Convention Secretariat.*
- Rasti, S., MahdaviFardn, M., Shaykh Ghaderi, H., Nasiri, A., & Taktaz, N. Z. (2022). Improving Classification accuracy by combining multi-season images of Sentinel 1 and 2 in order to prepare a land use map in the cloud space of Google Earth Engine (Case study: Guilan province). *Geography and Human Relationships*, 5(3), 357-373. <https://doi.org/10.22034/gahr.2022.336692.1696>
- Rebello, A. J., Morris, C., Meire, P., & Esler, K. J. (2019). Ecosystem services provided by South African palmiet wetlands: A case for investment in strategic water source areas. *Ecological Indicators*, 101, 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.043>
- Rebello, L.-M., Finlayson, C. M., & Nagabhatla, N. (2009). Remote sensing and GIS for wetland inventory, mapping and change analysis. *Journal of environmental management*, 90(7), 2144-2153. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.06.027>
- Rezaee, M. M. H., Jabbari, I., & Pirouzinejad, N. (2016). A study of meandering, braided and anabranching channel planforms, using sinuosity and braided indexes in Gamasiab River. *Journal of Water and Marine Resources*, 7(13), 283. <http://doi.org/10.18869/acadpub.jwmr.7.13.283>
- Salar, A., Shahriari, M., Rahdari, V., & Maleki, S. (2024). Investigating the impact of land use and land cover changes on wetlands using satellite data (Case study: Jazmourian Wetland). *Journal of Water and Soil Science*, 28(2), 85-96. <http://dx.doi.org/10.47176/jwss.28.2.6215>
- Sawant, S., Garg, R. D., Meshram, V., & Mistry, S. (2023). Sen-2 LULC: Land use land cover dataset for deep learning approaches. *Data in Brief*, 51, 109724. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109724>
- Seyed Mousavi, S. M., & Akhoondzadeh, M. (2023). A quick seasonal detection and assessment of international Shadegan wetland water body extent using Google Earth Engine cloud platform. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-4/W1-2022, 699-706. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-699-2023>
- Seyedian, S. M., Rohani, H., Fathabadi, A., & Javadi Alinezhad, M. (2017). Stochastic modeling of sediment yield using random forest and quantile regression. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(4), 103-122. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2017.12600.2732>
- Shen, G., Yang, X., Jin, Y., Xu, B., & Zhou, Q. (2019). Remote sensing and evaluation of the wetland ecological degradation process of the Zoige Plateau Wetland in China. *Ecological Indicators*, 104, 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.04.063>
- Singh, R., Saritha, V., & Pande, C. B. (2024). Monitoring of wetland turbidity using multi-temporal Landsat-8 and Landsat-9 satellite imagery in the Bisalpur wetland, Rajasthan, India. *Environmental Research*, 241, 117638. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117638>
- Soltani, N., & Mohammadnejad, V. (2021). Efficiency of Google Earth Engine (GEE) system in land use change assessment and predicting it using CA-Markov model (Case study of Urmia plain). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 12(3), 101-114. (In Persian)
- Sulman, B. N., Desai, A. R., & Mladenoff, D. J. (2013). Modeling soil and biomass carbon responses to declining water table in a wetland-rich landscape. *Ecosystems*, 16, 491-507. <https://doi.org/10.1007/s10021-012-9624-1>
- Tomscha, S., Jackson, B., Benavidez, R., de Róiste, M., Hartley, S., & Deslippe, J. (2023). A multiscale perspective on how much wetland restoration is needed to achieve targets for ecosystem services. *Ecosystem Services*, 61, 101527. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2023.101527>
- Uossef Gomrokchi, A., Hassanoghli, A., Akbari, M., Mostashari Mohasses, M., & Amini, D. (2022). Prediction of soil salinity using neural network and multivariate regression based on remote sensing indices and comparison: A case study of Qazvin

- plain's Salt Marsh. *Desert Ecosystem Engineering*, 9(28), 73-88.
<https://doi.org/10.22052/deej.2020.9.28.51>
- Van Deventer, H., Linström, A., Naidoo, L., Job, N., Sieben, E. J. J., & Cho, M. A. (2022). Comparison between Sentinel-2 and WorldView-3 sensors in mapping wetland vegetation communities of the Grassland Biome of South Africa, for monitoring under climate change. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 28, 100875.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100875>
- Wang, Z., Zhao, H., & Zhao, C. (2022). Temporal and spatial evolution characteristics of land use and landscape pattern in key wetland areas of the West Liao River Basin, Northeast China. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 30(1), 195-205.
<https://doi.org/10.3846/jeelm.2022.16382>
- Xu, W., Fan, X., Ma, J., Pimm, S. L., Kong, L., Zeng, Y., Li, X., Xiao, Y., Zheng, H., & Liu, J. (2019). Hidden loss of wetlands in China. *Current Biology*, 29(18), 3065-3071.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.07.053>
- Zhang, C., Xiao, X., Wang, X., Qin, Y., Doughty, R., Yang, X., Meng, C., Yao, Y., & Dong, J. (2024). Mapping wetlands in Northeast China by using knowledge-based algorithms and microwave (PALSAR-2, Sentinel-1), optical (Sentinel-2, Landsat), and thermal (MODIS) images. *Journal of environmental management*, 349, 119618.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119618>
- Zhao, Q., Bai, J., Huang, L., Gu, B., Lu, Q., & Gao, Z. (2016). A review of methodologies and success indicators for coastal wetland restoration. *Ecological Indicators*, 60, 442-452.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.07.003>
- Zhou, J., Chen, Y., & Yong, W. (2022). Performance evaluation of hybrid YYPO-RF, BWOA-RF and SMA-RF models to predict plastic zones around underground powerhouse caverns. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 8(6), 179.
<https://doi.org/10.1007/s40948-022-00496-x>
- Zhou, J., Dai, Y., Tao, M., Khandelwal, M., Zhao, M., & Li, Q. (2023). Estimating the mean cutting force of conical picks using random forest with salp swarm algorithm. *Results in Engineering*, 17, 100892.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100892>
- Zhou, J., Huang, S., & Qiu, Y. (2022). Optimization of random forest through the use of MVO, GWO and MFO in evaluating the stability of underground entry-type excavations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 124, 104494.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104494>
- Zhu, X., Jiao, L., Wu, X., Du, D., Wu, J., & Zhang, P. (2023). Ecosystem health assessment and comparison of natural and constructed wetlands in the arid zone of northwest China. *Ecological Indicators*, 154, 110576.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110576>
- Zoran, M., & Anderson, E. (2006). The use of multi-temporal and multispectral satellite data for change detection analysis of the Romanian Black Sea coastal zone. *Journal of optoelectronics and advanced materials*, 8(1), 252.