Geography and Environmental Sustainability
Homepage: http://ges.razi.ac.ir/

Investigating the Dynamic Changes in the Area and Morphology of the Water Body of the Anzali Wetland Complex Using Sentinel-1 Radar Images, Alongside Ground-Based and Satellite Meteorological Data

Ali Sam-Khaniani[1] | **Rahman Hesabi fard**[2]

1. Corresponding Author, Department of Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran. E-mail: Ali.sam@nit.ac.ir
2. Department of Photogrammetry, Faculty of Geomatics Engineering, Tafresh University, Markazi, Iran.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 24 Jul 2025
Received in revised form: 30 Nov 2025
Accepted: 08 Dec 2025
Available online: 22 Jun 2026

Keywords:
Anzali wetland complex,
Meteorological parameters,
Sentinel-1,
Sea level,
NDVI.

ABSTRACT

I Wetlands represent some of the most crucial natural ecosystems on our planet, facing alterations due to climate change and human activities. Coastal wetlands, including the Anzali Wetland complex, are undergoing considerable transformations influenced by various factors such as climate change, tourism expansion, urban development, and sea-level fluctuations. This research investigates changes in water coverage of the Anzali Wetland from 2017 to 2024. The complex consists of three primary sections: Siakshim, Sorkhangol, and Western Wetland, with radar imagery from the Sentinel-1 satellite utilized to analyze annual variations. Over the eight-year study period, the Anzali Wetland complex experienced significant changes in water body coverage, which were analyzed in relation to meteorological factors including temperature, precipitation, and evaporation, using data from Gilan's synoptic stations and satellite sensors. Radar imagery revealed a total reduction of 2,605 hectares in water coverage, with the Western, Sorkhankol, and Siakshim wetlands contributing 50%, 48%, and 2% to this loss, respectively. Compared to 2017, water coverage in these wetlands declined by 36%, 92%, and 6%. The study also examined NDVI indices from Landsat 8, Landsat 9, and Sentinel 2, comparing them with annual average land surface temperature (LST) data. Findings indicated increased vegetation growth in wetland areas, replacing portions of the water cover. This transformation resulted in a reduction of the temperature difference between maximum and minimum temperatures in recent years, in contrast to the beginning of the study period.

Cite this article: Sam-Khaniani, A., Hesabi fard, R. (2026). Investigating the Dynamic Changes in the Area and Morphology of the Water Body of the Anzali Wetland Complex Using Sentinel-1 Radar Images, Alongside Ground-Based and Satellite Meteorological Data. *Geography and Environmental Sustainability*, *16*(2), 33-52. https://doi.org/10.22126/GES.2025.12494.2900

© The Author (s).
DOI: https://doi.org/10.22126/GES.2025.12494.2900
Publisher: Razi University

جغرافیا و پایداری محیط
وبگاه نشریه: http://ges.razi.ac.ir/

بررسی تغییرات دینامیکی مساحت و مورفولوژی بدنه آبی مجموعه تالاب انزلی به کمک تصاویر راداری سنتینل ۱ و داده‌های هواشناسی زمینی و ماهواره‌ای

علی سام خانیانی[۱]| رحمان حسابی فرد[۲]

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی،بابل، مازندران، ایران. رایانامه: Ali.sam@nit.ac.ir
۲. گروه فتوگرامتری، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه تفرش، مرکزی، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخچهٔ مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۷
دسترسی آنلاین: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

کلیدواژه‌ها:
مجموعه تالاب انزلی،
پارامترهای هواشناسی،
سنتینل -۱،
تراز آب دریا،
NDVI

چکیده

تالاب‌ها از مهم‌ترین زیست‌بوم‌های طبیعی زمین هستند که به دلیل تغییرات اقلیمی و دخالت‌های انسانی در معرض تحول‌اند. تالاب‌های ساحلی، مانند مجموعه تالاب انزلی، تحت‌تأثیر عواملی چون تغییرات آب‌وهوایی، گسترش گردشگری، توسعه شهری و تغییرات تراز آب دریا دچار دگرگونی‌های قابل‌توجهی می‌شوند. در این تحقیق، تغییرات پوشش آبی تالاب انزلی طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۴ بررسی شده است. این مجموعه شامل سه بخش اصلی سیاکشیم، سرخانکل و تالاب غرب بوده و برای استخراج تغییرات سالیانه، تصاویر راداری ماهواره سنتینل ۱ به کار گرفته شده‌اند. در طول دوره هشت ساله مطالعه، مجموعه تالاب انزلی تغییرات قابل‌توجهی در پوشش آبی خود تجربه کرد که با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک گیلان و حسگرهای ماهواره‌ای دررابطه‌با عوامل هواشناسی مانند دما، بارش و تبخیر مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. تصاویر راداری کاهش کلی ۲۶۰۵ هکتاری پوشش آبی را نشان داد که تالاب‌های غربی، سرخانکل و سیاه‌کشیم به ترتیب ۵۰، ۴۸ و ۲ درصد در این کاهش نقش داشتند. در مقایسه با سال ۲۰۱۷، پوشش آبی در این تالاب‌ها به ترتیب ۳۶، ۹۲ و ۶ درصد کاهش یافت. این مطالعه همچنین شاخص‌های NDVI از لندست ۸، لندست ۹ و سنتینل ۲ را بررسی کرد و آنها را با داده‌های میانگین سالانه LST مقایسه کرد. یافته‌ها نشان دهنده افزایش رشد پوشش گیاهی در مناطق تالابی و جایگزینی بخش‌هایی از پوشش آبی بود. این تغییر منجر به کاهش قابل توجه اختلاف دما بین بالاترین و پایین‌ترین دماهای روزانه در سال‌های اخیر شد که نشان‌دهنده تغییرات در میکروکلیما به دلیل گسترش پوشش گیاهی است.

استناد: سام خانیانی، علی؛ حسابی فرد، رحمان (۱۴۰۵). بررسی تغییرات دینامیکی مساحت و مورفولوژی بدنه آبی مجموعه تالاب انزلی به کمک تصاویر راداری سنتینل ۱ و داده‌های هواشناسی زمینی و ماهواره‌ای. *جغرافیا و پایداری محیط*، *۱۶*(۲)، ۵۲-۳۳. https://doi.org/10.22126/GES.2025.12494.2900

© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22126/GES.2025.12494.2900
ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

براساس تعریف در ماده ۱-۱ کنوانسیون رامسر، تالاب شامل مرداب‌ها، باتلاق‌ها، لجن‌زارها یا علفزارها و دریاچه‌های طبیعی یا مصنوعی، دائمی یا موقت است که آب‌های شیرین، تلخ یا شور در آن به صورت راکد یا جاری یافت شود و قسمت‌هایی از کرانه‌های دریایی که عمق آن‌ها در پایین‌ترین نقطه جزر از شش متر تجاوز ننماید؛ این مناطق به عنوان محل رشد نباتات بومی و زیستگاه حیوانات مخصوص به تالاب‌ها، به خصوص پرندگان آبزی مورد توجه هستند. همچنین یکی از مهم‌ترین زیست بوم‌های طبیعی در کره‌زمین بوده و دارای فواید بسیاری در گردش طبیعی انرژی و برقراری تعادل زیست محیطی در محیط‌زیست پیرامون ما انسان‌ها می‌باشند (مدبری و شکوهی، ۱۳۹۹).

همچنین، تالاب‌ها نقش مهمی برکنترل و برقراری چرخه فرآیندهای زیست‌شناسی، بوم‌شناسی و آب‌شناسی هم در مقیاس منطقه‌ای و جهانی دارند و از تنوع زیستی بیشتری نسبت به هر نوع اکوسیستم دیگری روی کره زمین برخوردار هستند. تالاب‌ها موجب تصفیه و فیلتر منابع آب‌وهوا، تولید و نگهداری مواد مغذی، کنترل سیلاب‌ها، پشتیبانی حیاتی از زیستگاه‌ها، رشد اقتصادی از طریق فعالیت‌های توریستی در مقیاس جهانی می‌شوند. از طرفی دیگر، تالاب‌ها نقش کلیدی در کاهش گازهای گلخانه‌ای دارند (Costanza et al., 1997). با ادامه روند خشک شدن و نابودی تالاب‌ها ممکن است عملکرد تالاب به عنوان یک مخزن نگهدارنده کربن، به منبع تولید آن تغییر یابد (Salimi et al., 2021). این اکوسیستم‌های منحصر به فرد توسط عوامل طبیعی مختلف مانند کاهش بارش، افزایش دما، افزایش تبخیر و دیگر عوامل طبیعی مثل خشکسالی و عوامل غیرطبیعی ناشی از فعالیت‌های انسانی تهدید می‌شوند (Seyed Mousavi & Akhoondzadeh, 2022).

استفاده از یک روش دقیق و کامل با قدرت تفکیک مکانی و زمانی با دقت بالا و خطای کم برای پایش مناطق محیط‌زیستی از اهمیت بسزایی برخوردار است. بعضی از نقشه‌های حاصل از عکس‌های هوایی بیش از دو دهه قدمت دارند و به‌روز نیستند. سازمان‌ها و افرادی که تلاش می‌کنند تا پایش تغییرات را در مناطق زیست‌محیطی با استفاده از تصاویر هوایی بررسی کنند، اغلب با محدودیت‌های قانونی و پراکندگی زمانی و یا هزینه‌های سنگین تهیه این تصاویر مواجه می‌شوند. استفاده از تصاویر ماهواره‌های سنجش‌ازدوری نسبت به تصاویر هوایی به علت وجود پایگاه‌داده در طول چند دهه اخیر و با دورهٔ تناوب منظم و تفکیک مکانی مناسب، بیشتر شده است (Fickas et al., 2016).

مجموعه تالاب انزلی یک محیط طبیعی در جنوب غربی دریای کاسپین و شمال کشور ایران است که به علت مجاورت با دریای کاسپین به عنوان یک تالاب ساحلی شناخته می‌شود که متشکل از آب بندان‌های متعدد بوده و زیستگاه گیاهان، پرندگان و جانوران آبزی متنوع است. این تالاب، هر ساله پذیرای تعداد زیادی از پرندگان مهاجری است که با آغاز فصل مهاجرت از سوی کشورهای همسایه شمالی به ایران می‌آیند. همچنین از نظر ازدیاد میزان رطوبت با هیچ یک از تالاب‌های ایران قابل مقایسه نیست (Ebrahimi et al., 2009). تالاب انزلی جز اولین تالاب‌های بین المللی ثبت شده ایران و جهان در فهرست کنوانسیون رامسر است. با وجود تعهد مزبور، این تالاب بنا به دلایل متعددی از جمله ورود فاضلاب های شهری کشاورزی و صنعتی، نوسانات سطح آب دریای کاسپین، وارد شدن گونه گیاهی غیربومی سنبل آبی و ساخت جاده کنارگذر بندر انزلی موجب شده تالاب انزلی در سال ۱۹۹۳ در فهرست تالاب‌های در معرض نابودی و انقراض ملقب به مونترو قرارگیرد. مطالعه انجام شده توسط سازمان همکاری بین‌المللی ژاپن (JICA) نشان می‌دهد که مساحت سطح آبی تالاب در سال ۱۹۸۹ (حدود ۵۲ کیلومتر مربع) تقریباً یک پنجم مساحت آن در سال ۱۹۳۰ (حدود ۲۵۸ کیلومتر مربع) بوده است (Mahdian et al., 2023).

این تالاب به علت مجاورت با مناطق شهری و پرتراکم جمعیتی، نقش مهمی در برقراری صنعت گردشگری و شیلات و به طور کلی تامین اقتصاد، محیط زیست و سلامت سکنه اطراف آن دارد. تالاب انزلی که در کرانه جنوبی دریای خزر و در استان گیلان واقع شده است، زیستگاه گونه‌های متنوعی از پرندگان مهاجر، ماهیان بومی، گیاهان آبزی و جانداران ریزبوم‌زی است و به‌عنوان یک منبع طبیعی ارزشمند، در تنظیم اقلیم محلی، تغذیه آب‌های زیرزمینی و کنترل سیلاب‌ها نقش دارد. با این حال، در دهه‌های اخیر، تغییرات گسترده‌ای در پهنه آبی این تالاب رخ داده که ناشی از عوامل انسانی مانند توسعه شهری، ورود آلاینده‌ها، برداشت بی‌رویه از منابع آب و تغییرات اقلیمی است. این تحولات نه‌تنها ساختار اکولوژیکی تالاب را تهدید

می‌کند، بلکه پیامدهای جدی برای معیشت جوامع محلی و آینده زیست‌محیطی منطقه به‌همراه دارد. از این‌رو، بررسی دقیق تغییرات پهنه آبی تالاب انزلی، گامی ضروری در جهت شناخت روندهای تخریب و ارائه راهکارهای حفاظتی مؤثر به‌شمار می‌رود.

تالاب‌های ساحلی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی همانند نوسانات سطح آب دریا، تغییرات خط ساحلی، نفوذ آب شور یا شیرین قرار دارند. همچنین، تالاب‌ها به تغییرات دما، تبخیر و مقدار بارش حساس هستند این عناصر جوی بر مقدار و کیفیت آب‌های سطحی ورودی به تالاب و سطح آب‌های زیرزمینی تأثیر می‌گذارند (Conly & Van der Kamp, 2001). به‌طور کلی تالاب‌ها از دیدگاه‌های گوناگون زمین‌شناسی، زمین‌ریخت‌شناسی، آب‌شناسی، بوم‌شناسی و زیست‌شناسی بررسی می‌شوند (Costanza et al., 1997). با توجه به اهمیت بالای تالاب انزلی محققان مختلفی سعی کرده‌اند تا تالاب انزلی را نیز از منظرهای متفاوت مورد پایش قرار دهند. به عنوان مثال، توکلی و ثابت، رفتار در سال ۱۳۸۱ از منظر بوم شناسی تالاب انزلی را مورد مطالعه قرار دادند عواقب مثبت و منفی ناشی از اجرای پروژه جاده کنارگذر انزلی بر اکوسیستم حساس تالاب را شناسایی کردند. به کمک روش ماتریس طراحی با در نظر گرفتن ۵۹ ریز فعالیت پروژه و ۷۶ عامل محیط زیستی، عبور جاده ۱۶ کیلومتری از محدوده حفاظتی تالاب مردود دانسته شد (توکلی و ثابت رفتار، ۱۳۸۲).

زبردست و جعفری در سال ۱۳۹۰ به کمک تصاویر لندست ۴، ۵ و۷ مربوط به سال‌های ۱۹۹۱،۱۹۹۸ و ۲۰۰۱ برای پایش تغییرات تالاب انزلی با روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال در دو طبقه آب وخشکی طبقه‌بندی کرده و نتایج آنها افزایش ۲۴ درصدی در بازه سال ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۸ و کاهش ۳ درصدی در بازه ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۱ را برای پوشش آبی با دقت ۹۱ درصد به کمک ۳۰ نقطه چک برگرفته از گوگل‌ارث نشان‌داد (زبردست و جعفری، ۱۳۹۰).

در تحقیقی دیگر، عدل و همکاران در سال ۲۰۲۰ به کمک تصاویر لندست ۵ و۷ مربوط به سال‌های ۱۹۸۹ و ۲۰۰۰ و Aster سال ۲۰۱۱ تغییرات کاربری اراضی در شهرستان انزلی را بررسی کردند. یافته‌های آنها نشان داد که یک روند کاهشی ۱۰/۶۴ درصدی در کاربری جنگلی، افزایش ۶/۰۴ درصدی از ۴۱۸۵ هکتار به ۶۵۹۰ هکتار در اراضی آبی تالاب‌انزلی رخ داده است (عدل و همکاران، ۱۳۹۹). پناهنده و عبدلی در سال ۲۰۲۱ با طبقه‌بندی نظارت‌شده از طریق الگوریتم حداکثر احتمال روی تصاویر ماهواره لندست ۵ و ۸ مربوط به سال‌های ۱۹۹۴، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۸، تغییرات طبقه‌های پوشش آبی، زمین تالابی، گیاهان تالابی، مرتع و کشاورزی را به منظور بررسی وضعیت تالاب انجام دادند. نتایج آنها نشان داد در بازه زمانی (۱۹۹۴ – ۲۰۰۸) پوشش آبی بیشترین تغییرات مساحت را با کاهش ۶۳/۷ درصد داشته است که در این تغییرات طبقه گیاهان تالابی بیشترین سهم را داشته به طوریکه ۹۸ هکتار از پیکره‌آبی به گیاهان تالابی تبدیل شده‌است (پناهنده و عبدلی، ۱۴۰۰).

هزینه بالای داده‌های ماهواره‌ای نوری با رزولوشن فضایی بسیار خوب، یک محدودیت اصلی برای پایش تغییرات تالاب در مقیاس‌های فضایی و زمانی بزرگ است. همچنین در مناطقی که میزان پوشش ابر وسیع و تعداد روزهای بارانی فراوان دارند، استفاده از سنجنده نوری دارای محدودیت خواهد بود (Guo et al., 2017; Ottinger et al., 2017).

تصاویر سنجنده‌های راداری، نقش مهمی در پایش تالاب‌ها داشته‌اند، زیرا این سنجنده‌ها در تمام شرایط آب‌وهوایی فعالیت می‌کنند و به زبری و رطوبت سطح حساس هستند. همچنین صحت زیاد طبقه‌بندی آنها نشان دهنده قابلیت تفکیک مناسب در تشخیص بدنه آبی تالاب است (Hemati et al., 2023; Atarchi et al., 2021).

هدف مقاله حاضر این بوده تا با استفاده از تصاویر ارزشمند سنتینل ۱ از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۴ تغییرات پهنهٔ آبی مجموعه تالاب انزلی را در محدوده‌ای که در کنوانسیون رامسر به ثبت رسیده است را برآورد کنند. برای دستیابی به این هدف، با استفاده از بیش از ۸۳ تصویر سنتینل ۱ از هر سال، تصویر میانگین سالانه در بازهٔ مورد مطالعه محاسبه خواهد شد و با طبقه‌بندی در دو طبقه آبی و غیرآبی و مقایسه تصاویر میانگین سالیانه، روند دینامیکی تغییرات پوشش آبی منطقه مورد بررسی قرار گیرد. همچنین از سری‌های زمانی داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های زمینی هواشناسی و سنجنده‌های هواشناسی ماهواره‌ای، ارتباط بین عناصر هواشناسی و تغییرات مساحت پوشش آبی تالاب در بازهٔ مطالعاتی مورد مقایسه و بحث قرار گیرد.

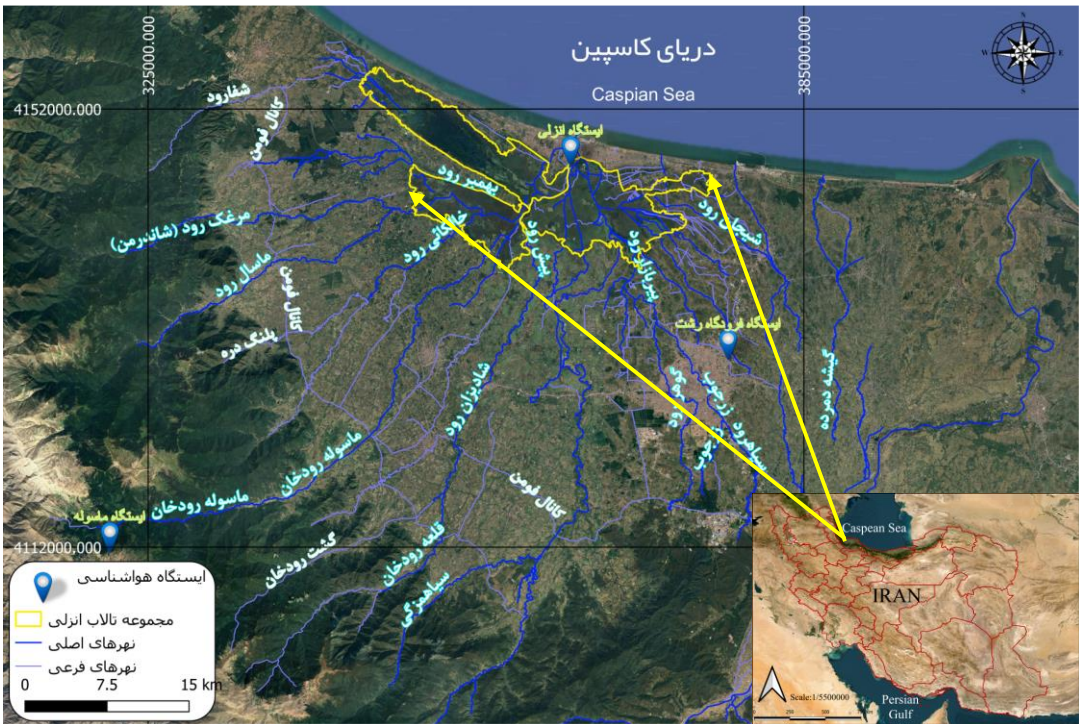
مواد و روش‌ها

معرفی منطقه موردمطالعه

مجموعه تالاب انزلی به انضمام مناطق حفاظت‌شده و بخش تالابی، با مساحتی حدود ۱۹۵۰۰ هکتار در شمال ایران و در جنوب دریای کاسپین قرار دارد. این تالاب در استان گیلان ، شهرستان بندر انزلی واقع شده است و محدوده‌ی عرض جغرافیایی ۳۷ شمالی و طول جغرافیایی ۴۹ را شامل می‌شود. پهنه آبی تالاب در شهرستان انزلی قرار گرفته و از جنوب متصل به شهرستان صومعه‌سرا، از شرق متصل به شهرستان‌های خمام و رشت و از غرب متصل به شهرستان رضوانشهر است.

مجموعه تالاب انزلی شامل سه بخش اصلی است. بخش غربی آن از نوع تالاب دریاچه‌ای می‌باشد، که در آن پهنه آبی وسیع و عمیق بوده و به تالاب غرب معروف است. منطقه جنوبی، سیاکشیم نام دارد و قدیمی‌ترین منطقه حفاظت شده در مجموعه تالاب انزلی است. بخش شرقی و مرکزی، تالاب سرخانکل نام دارد که از اتصال چندین رود بزرگ و دریاچه فصلی و دائمی تشکیل شده و در قسمت شرقی آن تالاب دهنه‌سر شیجان و در قسمت جنوب شرقی آن مناطق حفاظت شده چوکام و جیرسرباقرخاله قرار دارد. مطابق شکل ۱، خروجی مجموعه تالاب انزلی در این بخش توسط پنج رود از طریق اسکله بندر انزلی به دریای کاسپین متصل می‌شود و دارای رودهای اصلی و فرعی است که حوضه آبریز تالاب انزلی را تشکیل می‌دهند.

مجموعه تالاب انزلی دارای دمای معتدل، بارش‌های سالانه حدود ۱۵۰۰ میلیمتر و تنوع پوشش گیاهی که شامل گیاهان شناور، حاشیه‌ای و کفزی زیادی بوده و به همین علت میزبان و پناهگاه انواع مختلفی از حیوانات آبزی و پرندگان به صورت دائمی یا مهاجر در فصول مختلف است. این تالاب به علت اکوسیستم فعال و زنده خود نقش مهمی در تکثیر انواع گونه‌های آبزیان در دریای کاسپین، تصفیه آب و کنترل شوری نواحی ساحلی این دریا و کاهش گازهای گلخانه‌ای مانند متان و دی اکسید کربن و انتشار اکسیژن در محدوده خود و اطرافش را دارد. این تالاب در استان گیلان و در نزدیکی بندر انزلی واقع شده و مساحتی حدود ۲۰ هزار هکتار دارد و میانگین عمق آن حدود ۱ متر است و از طریق رودهای مختلف تغذیه می‌شود. تالاب انزلی به‌عنوان زیستگاه پرندگان مهاجر از شمال، محل زندگی گونه‌های مختلفی از کپورماهیان، قورباغه‌ها و گیاهان آبزی مانند نیلوفر مردابی، آزیریان و پسته دریایی است. این تالاب به‌دلیل رطوبت بالا و اتصال به دریای کاسپین از نظر بوم شناختی با سایر تالاب‌های ایران متفاوت است و نقش مهمی در توازن محیط‌زیست منطقه ایفا می‌کند.



شکل ۱. موقعیت مجموعه تالاب انزلی و نهرهای تاثیرگذار بر آن

روش انجام مطالعه

یکی از ابزارهای علمی کمک‌کننده به حفظ اکوسیستم تالاب‌ها و اخذ تصمیم‌های مدیریتی نوین برای پایش وضعیت تالاب‌ها و کاربری اطراف آن‌ها، علم سنجش‌ازدور است. با وجود شرایط آب‌وهوایی خاص بارانی و مرطوب منطقه تالاب انزلی، استفاده از تصاویر راداری به علت عدم حساسیت به ابر و رطوبت نسبت به تصاویر ماهواره‌های نوری، گزینه مناسب‌تری برای سنجش تالاب در این منطقه است. در مطالعه حاضر از تصاویر راداری ماهواره سنیتنل ۱ از نوع رادار دریچه مصنوعی با محدوده زمینی آشکار شده (SAR GRD) که در محدوده طیفی باند C با فرکانس ۵,۴۰۵ گیگاهرتز و دقت مکانی ۱۰ متر است، در بازه‌های یک‌ساله از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۴ مطابق جدول ۱ برای میانگین‌گیری استفاده شده است. این دو ماهواره سنتینل ۱ در بازه‌های ۱۲ روزه با فاصله ۶ روز از یکدیگر از سطح کره زمین تصاویر راداری اخذ می‌کنند. تصاویر مورداستفاده در این مطالعه دارای قطبش (VV) از سامانه گوگل ارث انجین (GEE) اخذ شده است. در این سامانه پیش‌پردازش‌هایی همچون اصلاح مدار ماهواره، حذف نویز حاشیه، تصحیح تشعشع‌سنجی، حذف نویز حرارتی و تصحیح زمینی با استفاده از داده‌های ارتفاعی SRTM یا ASTER به‌صورت پیش‌فرض انجام شده است.

جدول ۱. تعداد تصاویر مورد استفاده برای میانگین گیری در هر سال

سال تصاویر	۲۰۱۷	۲۰۱۸	۲۰۱۹	۲۰۲۰	۲۰۲۱	۲۰۲۲	۲۰۲۳	۲۰۲۴
تعداد تصاویر	۸۳	۱۱۹	۱۱۶	۱۲۰	۱۱۷	۸۷	۸۹	۸۹

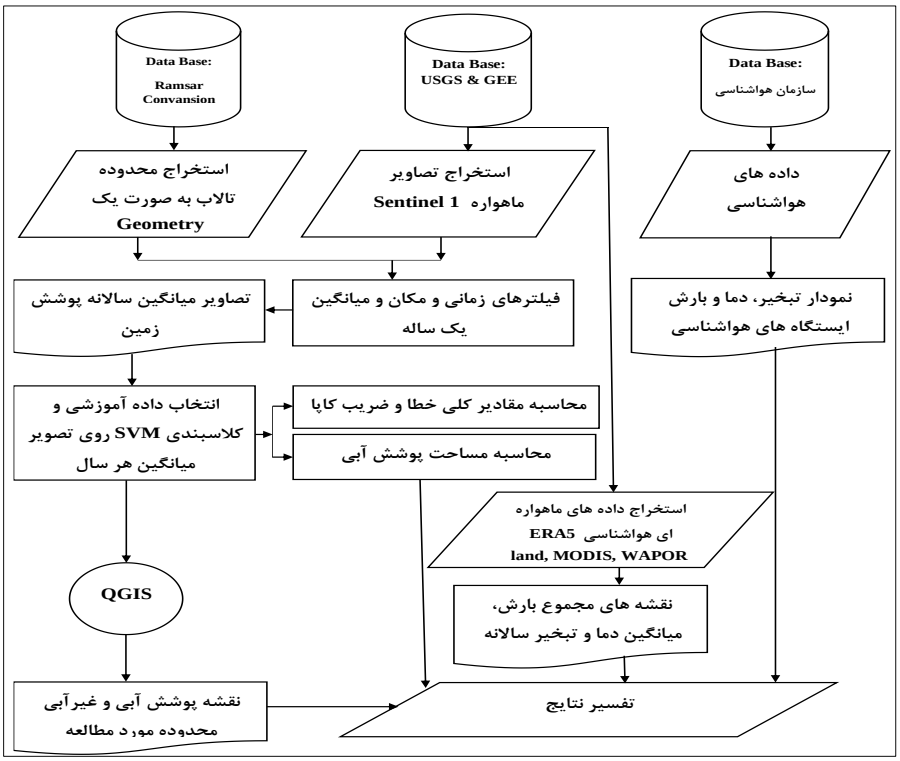
به‌منظور بررسی عناصر جوی و تأثیر آن بر روند تغییرات دینامیکی پوشش آبی در منطقه و دوره مطالعه، داده‌های هواشناسی شامل عناصری مثل دما، تبخیر و بارش از سازمان هواشناسی کشور تهیه شدند. در اینجا، داده‌های موردنظر در سه ایستگاه هواشناسی واقع در حوضه آبریز تالاب انزلی شامل ایستگاه بندر انزلی، فرودگاه رشت و ماسوله که در شکل ۱ موقعیت آن‌ها نشان‌داده‌شده است مورداستفاده قرار گرفته است. همچنین به‌منظور بررسی تأثیر تراز آب دریای کاسپین بر روند خشکسالی این مجموعه تالاب ساحلی، از داده‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌های POSDN/TOPEX، JASN 1,2,3 و Sentinel 6 در بازه سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۴ برگرفته از وب‌سایت ناسا استفاده شد.

علاوه بر داده‌های فوق، به دلیل محدودیت تعداد ایستگاه‌های زمینی، از داده‌های ماهواره‌ای نیز در بازه مطالعاتی مورداستفاده شده است. به‌منظور تولید نقشه‌های میانگین دمای سالیانه از داده‌های روزانه اخذ شده توسط سنجنده MODIS با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و به صورت میانگین ۳۶۴ تصویر روزانه در هر سال استفاده می‌شود. از داده‌های بارش روزانه باز تحلیل (ERA5-Land) که دارای تفکیک مکانی حدود ۱۱ کیلومتر است بهره گرفته شد. علاوه براین، مقدار میانگین تبخیر سالانه از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۲ به کمک سنجنده‌های پروژه WAPOR با قدرت تفکیک مکانی ۲۴۸/۲ متر و قدرت تفکیک زمانی ۵ روزه در بستر سامانه گوگل ارث انجین استخراج و مورد تحلیل قرار گرفت. لازم به ذکر است به علت اتمام ماموریت سنجنده های پروژه WAPOR در ابتدای سال ۲۰۲۳ و عدم جایگزین مناسب با سنجنده رایگان دیگر، در سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ مقادیری برای تبخیر مورد مشاهده قرار نگرفته است.

مزیت استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های زمینی نسبت به داده‌های هواشناسی برگرفته از سنجنده‌های ماهواره‌ای وجود قطعیت و اطمینان از صحت آن‌ها می‌باشد؛ اما مشکل بزرگ آنها کمبود تعداد ایستگاه‌های هواشناسی زمینی و نیز هزینه بالای احداث و نگهداری آنها می‌باشد. این قبیل عوامل موجب شده فواصل مکانی آن‌ها از هم زیاد بوده و در مورد منطقه موردمطالعه مجموعه تالاب انزلی آرایش و تراکم مناسبی نداشته باشند، لذا داده‌های هواشناسی ماهواره‌ای حتی با قدرت تفکیک کم دارای تعدد و گستردگی داده در سطح زمین بوده و می‌توانند منطقه موردمطالعه را به مناطق کوچک‌تر تقسیم‌بندی کرده و از هر منطقه داده منحصربه‌فردی را استخراج نمایند. این بدین معنی است که هر پیکسل از تصویر ماهواره‌ای خود نقش یک ایستگاه هواشناسی زمینی را دارد؛ اما مقادیر آن‌ها دارای اریبی و خطاهایی نیز می‌باشد که می‌تواند روی صحت داده‌ها تأثیرگذار باشد (Ahmed et al., 2024).

شکل ۲ روندنمای کلی این پژوهش را نشان می‌دهد. برای انجام این مطالعه، از سه پایگاه‌داده اصلی شامل کنوانسیون

رامسر برای استخراج محدوده قانونی تالاب، سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا (USGS) و گوگل ارث انجین به‌منظور استخراج تصاویر ماهواره سنتینل ۱ و انجام پردازش روی آن‌ها در محیط GEE و همچنین استخراج داده‌های ماهواره‌ای و بازتحلیل هواشناسی از قبیل (MODIS, ERA5-Land, WAPOR) استفاده شده است. علاوه بر این، از داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های زمینی سازمان هواشناسی کشور ایران بهره گرفته شد. در ادامه پردازش‌های مورد نیاز روی تصاویر سنتینل ۱ برای تعیین مساحت و تغییرات آن در پوشش‌های آبی و غیرآبی منطقه و ارتباط آن با تغییرات آب‌وهوایی که از روی پارامترهای هواشناسی مورد بررسی قرار گرفت که ارائه خواهد شد.



شکل ۲. روندنمای روش کار در این تحقیق

در مطالعات گذشته اغلب از محدوده‌های غیررسمی برای بررسی تالاب استفاده شده است و نتایج به‌دست‌آمده از چنین مطالعاتی قابلیت مقایسه و ارزیابی به علت تفاوت در ابعاد منطقه ندارند. به همین منظور برای بررسی تغییرات دینامیکی پهنه آبی مجموعه تالاب انزلی، ابتدا محدوده قانونی بستر تالاب از طریق سایت کنوانسیون رامسر استخراج و در این تحقیق مورداستفاده قرار گرفت. این محدوده توسط دولت جمهوری اسلامی ایران در کنوانسیون رامسر و همچنین در اداره ثبت اسناد استان گیلان به ثبت رسیده و دارای سند رسمی با مالکیت اداره منابع طبیعی استان گیلان است. به‌منظور استخراج تصاویر از GEE ابتدا محدوده موردمطالعه ثبت شده در کنوانسیون رامسر، در GEE تعیین شد و سپس تصاویر ذکر شده در بازه‌های یک‌ساله با مُد IW فیلتر شده و تصاویر میانگین سالیانه تولید شدند. یکی از بهترین روش‌های طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای، روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) است. به علت سرعت و دقت پردازش بالاتر این روش در مقایسه با سایر روش‌های نظارت‌شده یادگیری ماشین، عملکرد بهتری دارد (باقری و رستمی، ۱۴۰۳).

برای طبقه‌بندی، روش SVM بکار گرفته شد. در طبقه‌بندی به روش نظارت‌شده، انتخاب داده‌های آموزشی از اهمیت بالایی برخوردار است. به‌منظور آموزش روش مورداستفاده از داده‌های آموزشی در دو کلاس پوشش آبی و غیرآبی به تعداد هر کدام ۶۰۰ پیکسل بر روی هر تصویر به‌صورت پراکنده توسط اپراتور انتخاب شدند. از انتخاب پیکسل‌های مشکوک و قابل‌تردید به‌عنوان داده آموزشی خودداری شده است. برای کنترل طبقه‌بندی از ۳۰۰ پیکسل در خشکی به‌عنوان نقاط چک داده آموزشی طبقه خشکی و ۳۰۰ پیکسل در محدوده آبی تالاب به‌عنوان نقاط چک داده آموزشی طبقه آب استفاده شد.

مقادیر ضرایب تابع گاما و کرنل (C) به کمک الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات (PSO) با تعداد ۱۰۰ ذره اولیه، ۲۰ تکرار، ضریب اینرسی ۰/۷ و نرخ یادگیری جمعی و فردی برابر ۱/۵ برای هر تصویر محاسبه شد و مقدار تابع هدف الگوریتم توده ذرات به کمک نقاط چک از طریق محاسبه میانگین خطای مربعی (MSE) به‌دست آمد. بعد از تشکیل ماتریس ابهام و به کمک آن برای هر تصویر از معادله خطای کلی مطابق رابطه ۱ و معادله شاخص کاپا مطابق رابطه ۲ محاسبه می‌شوند (مغانی رحیمی و زیدی، ۱۴۰۳).

$$\text{Overall Accuracy} = \frac{\sum_1^{i=n} CM(i,i)}{N} \qquad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه ۱ خطای کل از محاسبه مجموع درایه های قطر اصلی ماتریس ابهام تقسیم بر N که تعداد کل نمونه‌های ماتریس ابهام است به‌دست می آید. مقدار این آماره بین عدد صفر و یک است و اگرتمامی پیکسل های چک دقیقا درست طبقه‌بندی شده باشند مقدار خطای کلی برابر با عدد یک خواهد شد.

$$\text{Kappa Coofficient} = \frac{N\sum_1^n CM(i,i) - \sum_1^n CMi*CMj}{N^2 + \sum_1^n CMi*CMj} \qquad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه ۲، N تعداد کل درایه‌های ماتریس ابهام و CM ماتریس ابهام است که مقدار شاخص کاپا بین عدد صفر و یک محاسبه می‌شود و هرچه به عدد یک نزدیک‌تر باشد نشان دهنده دقت بالا در طبقه‌بندی تصویر است.

به‌منظور گویاسازی و رقومی‌سازی تصاویر و برآورد تغییرات مساحت طبقه‌های آبی و خشکی در این مطالعه، تصاویر به‌دست‌آمده از طبقه‌بندی از طریق نرم‌افزار متن‌باز QGIS به فایل‌های برداری تبدیل شده و مساحت تغییرات طبقه‌ها به دو صورت کمی با نمایش نموداری و کیفی با نمایش نقشه‌های تغییرات در بخش نتایج آورده شده است. مطابق روندنمای ارایه شده در شکل ۲ از داده‌های هواشناسی کشور ایران در سه ایستگاه هواشناسی نزدیک به منطقه مطالعه شامل ایستگاه انزلی، رشت و ماسوله بهره گرفته شد. در هر ۶ ساعت هر سه پارامتر دما، تبخیر و باش دارای مقادیر ثبت شد که برای تولید نمودارهای میانگین سالانه مورد استفاده قرار گرفتند و در بخش نتایج در مورد ارتباط و تاثیر عناصر جوی بر روند خشکسالی بحث شد. همچنین از داده‌های ماهواره‌ای برای تولید نقشه‌های میانگین سالانه و یا تجمیعی سالانه سه عنصر دما، تبخیر و بارش به کمک داده‌های رایگان سامانه GEE استفاده شده که در قسمت نتایج آورده شد.

نتایج

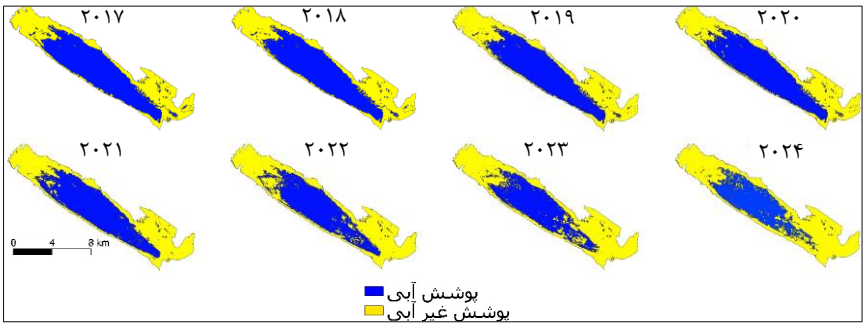
در مطالعه حاضر پس از پردازش تصاویر ماهواره‌ای در طول دوره زمانی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۴ تعیین مساحت میانگین سالانه پوشش آبی انجام و مقادیر خطای طبقه‌بندی تصاویر سنتینل ۱ برای هر تصویر محاسبه و در جدول ۲ آورده شده است. سپس تغییرات آن در سه محدوده جداگانه شامل ناحیه غربی با نام دریاچه تالاب انزلی در شکل۳ ، ناحیه جنوبی با نام سیاکشیم در شکل ۴ و ناحیه شرقی و میانی با نام تالاب سرخانکل در شکل ۵ آورده شده است. در شکل‌های ۳ تا ۵ نواحی آبی رنگ نشان دهنده طبقه آب و نواحی زرد نشان دهنده طبقه خشکی است. در شکل ۶ مقادیر پوشش آبی و در شکل ۷، درصد تغییرات نسبت به سال ۲۰۱۷ برای کلاس پوشش آبی مجموعه تالاب انزلی آورده شده است. همچنین نمودارهای تولید شده از داده‌های هواشناسی در دوره منتهی به این تحقیق از سه ایستگاه بندر انزلی، ماسوله و رشت، مقادیر تراز آب دریای کاسپین و داده‌های هواشناسی اخذ شده از سنجنده‌های ماهواره‌ای به عنوان عوامل مهم تاثیر گذار در روند خشکسالی این مجموعه تالاب ساحلی مطابق شکل‌های ۸ تا ۱۶ آورده شده است.

جدول ۲. مقادیر خطای کلاسبندی برای هر تصویر

تاریخ تصاویر	۲۰۱۷	۲۰۱۸	۲۰۱۹	۲۰۲۰	۲۰۲۱	۲۰۲۲	۲۰۲۳	۲۰۲۴
شاخص کاپا	۰,۹۷۷۷	۰,۹۷۱۲	۰,۹۷۷۴	۰,۹۸۵	۰,۹۸۸	۰,۹۷۱۷	۰,۹۸۸۹	۰,۹۸۷۳
خطای کلی	۹۸,۱۸۳۷	۹۸,۸۴۰۶	۹۸,۸۹۰۴	۹۸,۶۶۸۹	۹۸,۹۹۸۵	۹۸,۷۷۷۸	۹۸,۸۲۳۴	۹۸,۶۱۷۴

دقت‌های بالای ۹۷ درصد در طبقه‌بندی به روش SVM مطابق جدول ۲ به علت کم بودن تعداد طبقه‌ها و نیز استفاده از

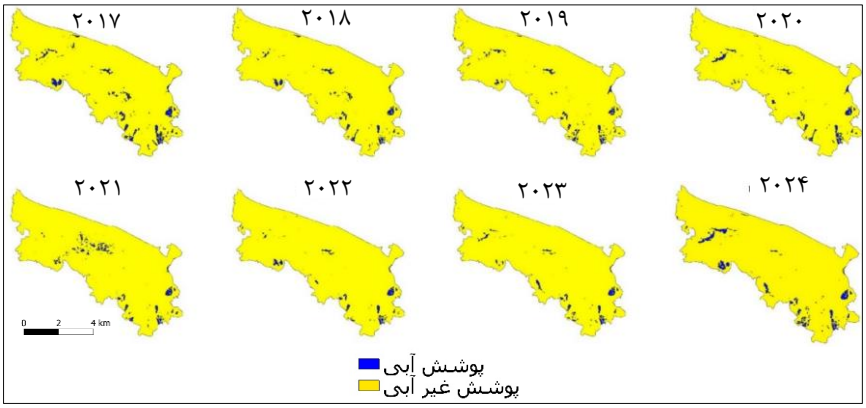
بافت‌های کنتراست و واریانس روی هر تصویر به منظور استخراج و بارزسازی لبه‌ها و همچنین استفاده از روش PCA به منظور حذف اطلاعات مشابه در باندهای تصویر و بهینه سازی پارامترهای طبقه‌بندی‌کننده می‌باشد.



شکل ۳. ناحیه غربی مجموعه تالاب انزلی با نام دریاچه انزلی

در ناحیه تالاب غرب که نتایج تغییرات آن در شکل ۳ آورده شده است، کاهش مساحت پوشش آبی در این ناحیه ابتدا از نقاط کم‌عمق‌تر غربی آغاز و در ادامه در جهت شرقی آن که محل خروجی این دریاچه به سمت اسکله انزلی است ادامه پیدا کرده است. باتوجه‌به نمودارهای شکل ۶ و ۷ و همچنین تصاویر شکل ۳ می‌توان دریافت به‌غیراز سال ۲۰۲۰ که حدود ۵۲/۸ هکتار نسبت به سال ۲۰۱۹ افزایش کلاس پوشش آبی رخ داده، اما هر ساله نسبت به سال ۲۰۱۷ کاهش مساحت پوشش آبی اتفاق افتاده است. این تغییرات کاهش پوشش آبی بین سالهای ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲ در حدود ۱۲ درصد کاهش با مقدار ۴۲۴/۹۹ هکتار یک جهش بزرگ در روند خشکسالی تالاب غرب بوده و در مجموع از ابتدای سال ۲۰۱۷ تا سال ۲۰۲۴ کاهش حدود ۳۶ درصدی با مقدار ۱۳۲۸/۳۵ هکتار برآورد شده است.

ناحیه دوم مجموعه تالاب انزلی منطقه حفاظت شده سیاکشیم نام دارد که تغییرات پهنه آبی مرتبط با آن در شکل ۴ آورده شده است. تغییرات مساحت پوشش آبی در این ناحیه که به صورت آبگیر و دریاچه‌های کوچک پراکنده توسط رودهای بهمبر رود، مرغک، خالکائی، کسما و شادیزان تغذیه می‌شوند در طول سال‌های مورد مطالعه دچار کاهش شده است. همچنین، مکان آبگیرها به علت تغییر مسیر رودها که وابسته به رسوب‌گذاری رودهای نامبرده و مورفولوژی منطقه دارد تغییر کرده است. باتوجه‌به نمودار شکل ۶ و ۷ می‌توان دریافت که بیشترین کاهش پوشش آبی در سال ۲۰۲۲ نسبت به سال ۲۰۱۷ با تغییر حدود ۴۳ درصدی و در بازه سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۲ یک جهش کاهش پوشش آبی با تغییر حدود ۱۴ درصدی رخداده است و همچنین مقادیر پوشش آبی در سال ۲۰۲۰ نسبت به سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۱۸ به ترتیب حدود ۷ و ۵ درصد رشد داشته است. به‌طورکلی تغییرات پوشش آبی هرساله نسبت به سال ۲۰۱۷ با کمینه مقدار در سال ۲۰۲۴ با مقدار حدود ۵/۹ درصد و بیشینه مقدار در سال ۲۰۲۲ با مقدار حدود ۴۳ درصد کاهشی بوده است. روند روبه‌رشد مساحت تالاب سیاکشیم از ۲۰۲۲ تا سال ۲۰۲۴ را می‌توان مؤثر از مسدودشدن راه‌های خروجی این تالاب به سمت دریا که به‌صورت مخصوص به علت خشک‌شدن مناطق خروجی تالاب غرب انزلی و تالاب سرخانکل دانست.

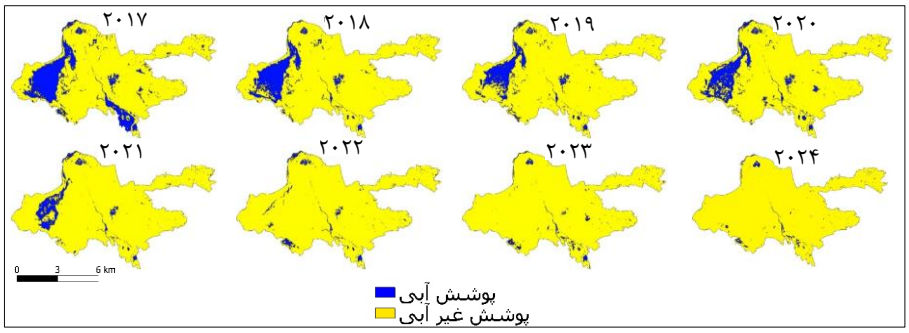


شکل ۴. ناحیه جنوبی مجموعه تالاب انزلی با نام تالاب سیاکشیم

بسته‌شدن مسیرهای خروجی تالاب سیاکشیم به سمت دریا موجب آب‌گرفتگی‌های پراکنده شده و این مسئله نشان می‌دهد تأثیر تراز آب دریا روی این منطقه با قطع مسیرهای متصل‌کننده به دریا در سال ۲۰۲۴ کم یا بی‌اثر شده است.

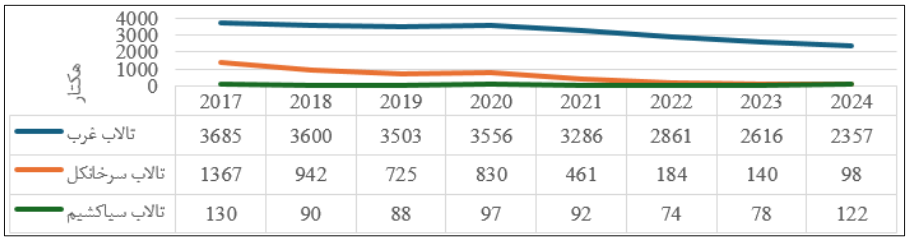
ناحیه سوم که تالاب سرخانکل نام دارد تغییرات پهنه آبی مرتبط با آن در شکل ۵ آورده شده است. باتوجه‌به شکل ۵ و نمودار شکل ۶ و ۷ مساحت پوشش آبی در این ناحیه که به‌صورت یک دریاچه در قسمت غربی می‌باشد به‌شدت کاهشی است. تالاب سرخانکل محل ورود رودهای سیاه درویشان، بازارجمعه رود، پیشرود، زرجوب و گوهررود است.

بیشترین و کمینه مقدار کاهش پهنه آبی در محدودهٔ سرخانکل در سال ۲۰۲۱ و ۲۰۱۸ به ترتیب با حدود ۳۵ و ۳۱ درصد رخ داده است. با افزایش تراز آب دریا و مجموع بارش‌ها و کاهش دمای متوسط ایستگاه‌های هواشناسی در سال ۲۰۲۰ نسبت به سال ۲۰۱۹ حدود ۷ درصد رشد پوشش آبی در این ناحیه رخداده است.



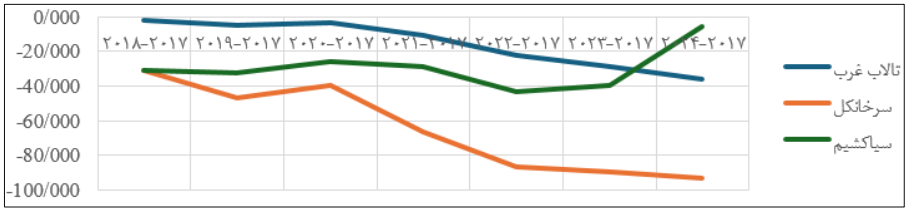
شکل ۵. ناحیه شرقی و میانی مجموعه تالاب با نام تالاب سرخانکل

لازم به ذکر است باتوجه‌به آلودگی و حجم بالای رسوبات دو رود زرجوب و گوهررود که حاوی زباله و رسوبات ناشی از فعالیت‌های شهرک صنعتی و کلان‌شهر رشت و رسوبات رودهای خالکائی، کسما و شادیزان که گذرنده از شهرهای صومعه‌سرا و فومن که در نهایت به رودهای سیاه‌درویشان و هندخاله متصل می‌شوند در نهایت با تجمیع زباله‌های شهری و فعالیت‌های صنعتی این نواحی به تالاب سرخانکل می‌ریزند و مطابق تصاویر شکل ۵ و نمودارهای شکل ۶ و۷ بیشترین تغییرات و کاهش سطح آبی از بین نواحی سه گانه مجموعه تالاب انزلی در تالاب سرخانکل صورت گرفته است.



شکل ۶. نمودار مقادیر پوشش آبی مجموعه تالاب انزلی در بازه ۸ ساله مطالعه

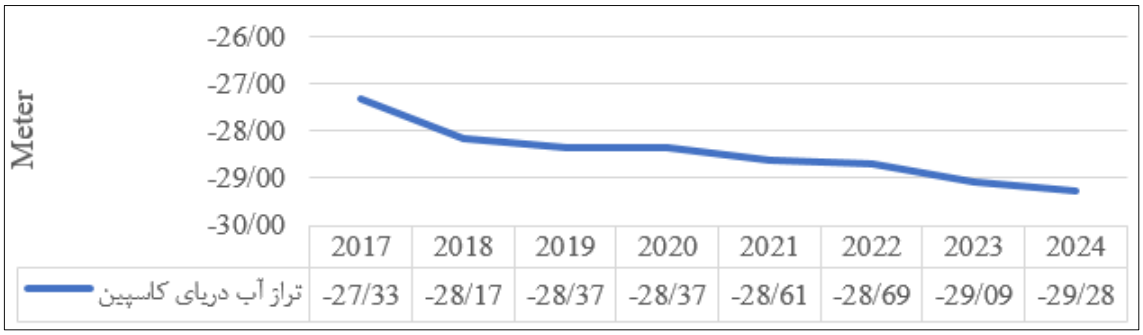
مطابق شکل ۷، تحلیل تصاویر ماهواره‌های به‌منظور محاسبه تغییرات دینامیکی پهنه آبی نشان می‌دهد که از نظر درصد تغییرات پوشش آبی در مقایسه با سال ۲۰۱۷ بین نواحی سه‌گانه مجموعه تالاب انزلی بیشترین کاهش با مقدار حدود ۹۲/۸ درصد در ناحیه سرخانکل در سال ۲۰۲۴ و سپس سیاکشیم با حدود ۴۳ درصد در سال ۲۰۲۲ و تالاب انزلی با حدود ۳۶ درصد در سال ۲۰۲۴ برآورد شد.



شکل ۷. نمودار درصد تغییرات پوشش آبی مجموعه تالاب انزلی نسبت به سال ۲۰۱۷

مطابق با شکل ۸ روند نزولی تراز سطح آب دریای کاسپین که از داده‌های ارتفاع سنجی ماهواره‌ای استخراج شده است، ارتباط زیادی با کاهش مساحت پوشش آبی مجموعه تالاب انزلی دارد؛ زیرا این تالاب‌ها از نوع تالاب‌های ساحلی بوده و سطح آب زیرزمینی منطقه نیز به سطح آب دریا وابسته است. متعاقباً با کاهش تراز آب دریا در خروجی این تالاب‌ها، کاهش تراز آب تالاب و به دنبال آن کاهش مساحت پوشش آبی را به همراه خواهد داشت. به جز در سال ۲۰۲۰ که تراز میانگین آب دریای کاسپین نسبت به سال قبل تقریبا غیر نزولی است در بقیه سال‌ها به خصوص سال ۲۰۱۸ نسبت به سال ۲۰۱۷ کاهش ۸۳ سانتی متری را به ثبت رسانده که در روند ۸ ساله نزولی تراز آب دریای کاسپین این یک جهش نزولی محسوب می‌شود و همچنین در جایگاه دوم، تراز میانگین سالانه سال ۲۰۲۳ نسبت به سال ۲۰۲۲ با کاهش ۳۹ سانتی متری همراه بوده است. عدم کاهش سطح تراز آب دریایی کاسپین در سال ۲۰۲۰ با افزایش مساحت پوشش آبی در هر سه منطقه مجموعه تالاب انزلی در همان سال و کاهش تراز آب دریای کاسپین در سال ۲۰۱۸ با کاهش مساحت پوشش آبی تالاب‌های فوق در همان سال ارتباط مستقیمی را بین تراز آب دریا و مساحت پوشش آبی در این مجموعه تالاب‌ها را نشان می‌دهد.

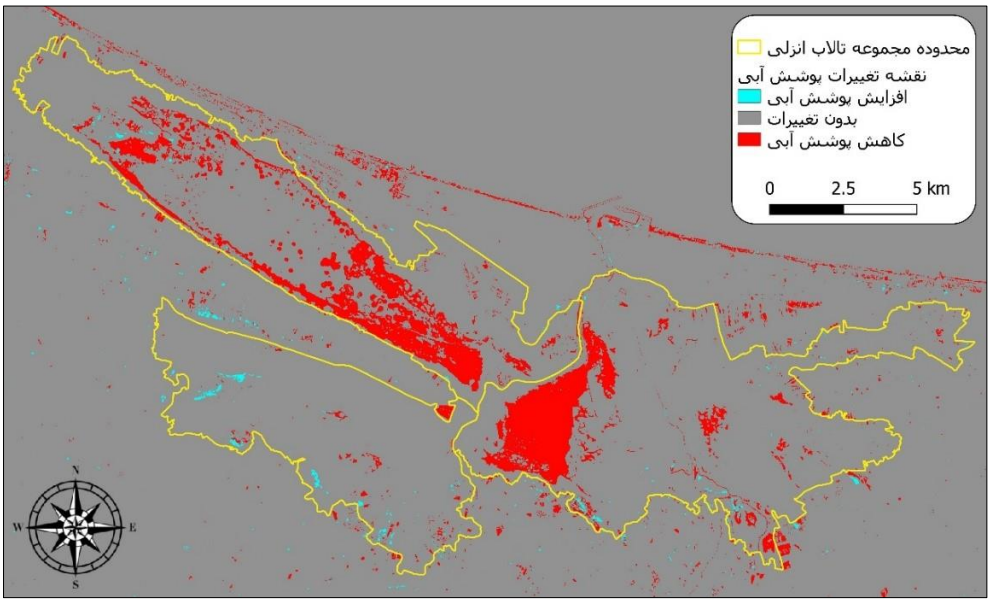
باوجود روند نزولی کاهش تراز آب دریای کاسپین در سال ۲۰۲۴ به جز در تالاب سیاکشیم در دو ناحیه دیگر روند خشکسالی صعودی باقی مانده و رشد آن متوقف نشده است. همین امر نشان می‌دهد افزایش مساحت پوشش آبی در تالاب سیاکشیم با توجه به موقعیت و ارتفاع آن نسبت به دو ناحیه دیگر نمی‌تواند فقط برگرفته از کاهش تراز آب دریای کاسپین باشد و احتمالا بیشتر متاثر از رسوب‌گذاری در مناطق خروجی تالاب و ثابت بودن مقادیر بارندگی ها و دما است و به طور کلی دیگر عناصر جوی می‌تواند باعث چنین امری شده باشد.



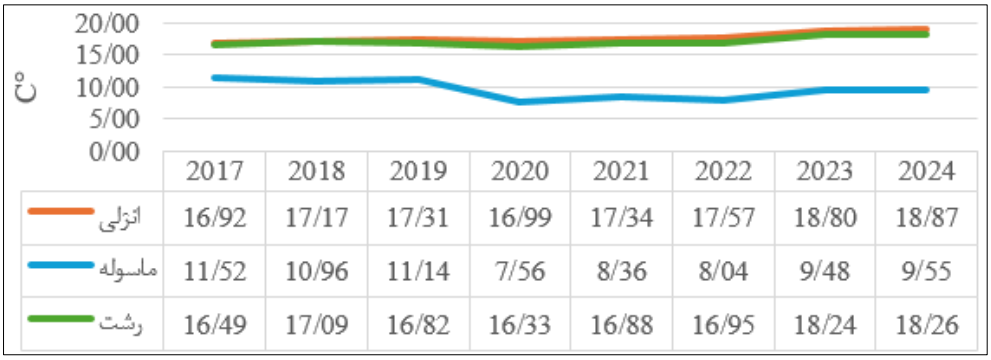
شکل ۸. میانگین سالانه تراز آب دریای کاسپین به کمک داده های ماهواره ای ارتفاع سنجی

به‌منظور بررسی مکانی دقیق‌تر، تغییرات پوشش آبی نسبت به سال ۲۰۱۷ در شکل ۹ نمایش داده شده است. بر اساس شکل ۱۲، پوشش آبی مجموعه تالاب انزلی در دو بخش تالاب غرب و تالاب سرخانکل در نواحی قرمز رنگ به کلاس‌های خشکی تبدیل شده بسیار بیشتر از نواحی آبی رنگ در این مناطق است؛ اما در ناحیه تالاب سیاکشیم نواحی پوشش آبی جدید که به رنگ آبی نشان داده شده پدیدار گشته است که همین امر موجب شده به صورت کلی تغییرات کاهش پوشش آبی تالاب سیاکشیم نسبت به بقیه نواحی کمتر باشد. با اینحال در این ناحیه هم، مناطقی دارای پوشش آبی خشک شده وجود دارد؛ لذا خشکسالی در تالاب سیاکشیم هم دیده می‌شود. بر اساس شکل ۹ ، مناطق ساحلی در دریای کاسپین به علت کاهش تراز آب از طبقه آب به طبقه خشکی تغییر پیدا کرده و مساحت نواحی ساحلی افزایش پیدا کرده است.

پس از بررسی کمی و کیفی تغییرات پوشش آبی مجموعه تالاب انزلی به‌صورت مکانی - زمانی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ در شکل‌های ۳ تا ۹ ارتباط تغییرات زمانی شرایط هواشناسی حاکم در مجموعه تالاب انزلی با تغییرات بدنه آبی تالاب‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور هم از داده‌های هواشناسی سطحی و هم از محصولات ماهواره‌ای و باز تحلیل بهره گرفته شد و نتایج آن در شکل‌های ۱۰ تا ۱۵ آورده شده است.



شکل ۹. تغییرات پوشش آبی بین سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۴



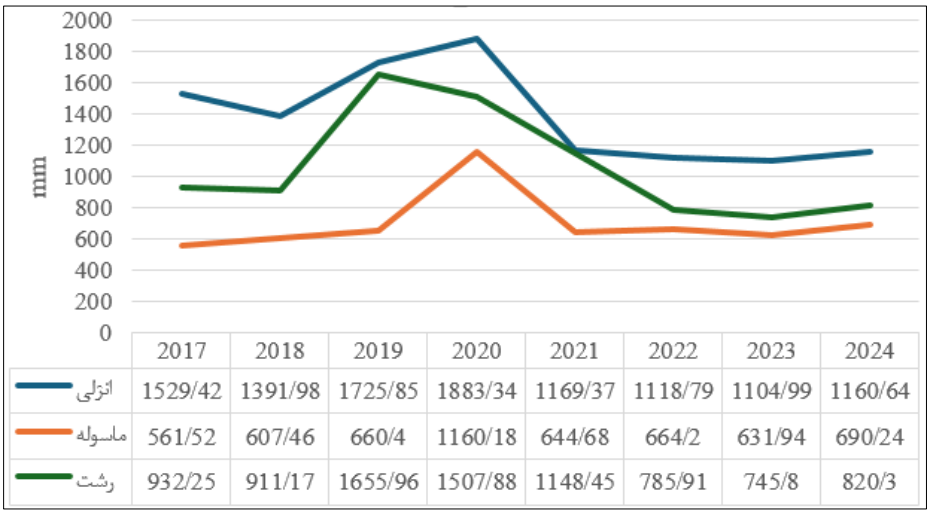
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
انزلی	16/92	17/17	17/31	16/99	17/34	17/57	18/80	18/87
ماسوله	11/52	10/96	11/14	7/56	8/36	8/04	9/48	9/55
رشت	16/49	17/09	16/82	16/33	16/88	16/95	18/24	18/26

شکل ۱۰. نمودار میانگین دمای سالانه ایستگاه‌های هواشناسی زمینی

شکل ۱۰ مقادیر میانگین دمای سالانه سه ایستگاه هواشناسی موجود در منطقه را نشان می‌دهد. سردترین دمای ثبت شده در دو ایستگاه رشت و ماسوله در سال ۲۰۲۰ بوده و در ایستگاه انزلی نیز در سال ۲۰۲۰ با اختلاف ۰/۰۷ سلسیوس بیشتر نسبت به سال ۲۰۱۷ دومین سال سرد دوره مطالعه را شامل می‌شود که می‌تواند با روند افزایش پوشش آبی در سال ۲۰۲۰ مرتبط باشد. همچنین افزایش دما در سال ۲۰۲۳ در همه ایستگاه‌ها مشهود است، سالی که روند پوشش آبی تالاب‌ها نیز در آن کاهش شدیدی داشته است.

باتوجه‌به روند کاهشی شدید مساحت پوشش آبی تالاب‌های سرخانکل و سیاکشیم در سال ۲۰۱۸ در مقایسه با سال ۲۰۱۷ که مقادیر حدود ۳۰ درصد کاهش را به ثبت رسانده‌اند و کاهش پوشش آبی محدود حدود ۲ درصدی تالاب غرب در همان سال در مقایسه با تغییرات دمای ایستگاه‌های هواشناسی بین سال ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ می‌توان دریافت بین مقادیر دمای ثبت شده در ایستگاه‌های رشت و انزلی با تغییرات مقادیر پوشش آبی تالاب‌های سرخانکل و سیاکشیم و همچنین بین ایستگاه ماسوله با تالاب غرب ارتباط وجود دارد. این امر بدان علت است که تنها در ایستگاه ماسوله تغییرات دما کاهشی بوده و تغییرات مساحت پوشش آبی در تالاب غرب نیز با کاهش بسیار محدودی همراه شده است.

مجموع بارش سالانه ایستگاه‌های هواشناسی در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که بیشترین بارش‌ها مربوط به سال ۲۰۲۰ و سپس ۲۰۱۹ بوده است. این مشاهدات با مقادیر افزایش و توقف روند نزولی خشکسالی در سال ۲۰۲۰ مجموعه تالاب انزلی ارتباط مستقیم دارد. کم‌ترین بارش‌ها به جز ایستگاه ماسوله مربوط به سال ۲۰۲۳ می‌باشد که ایستگاه ماسوله در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ مقادیر نزدیک به مقدار سال ۲۰۲۳ داشته است.

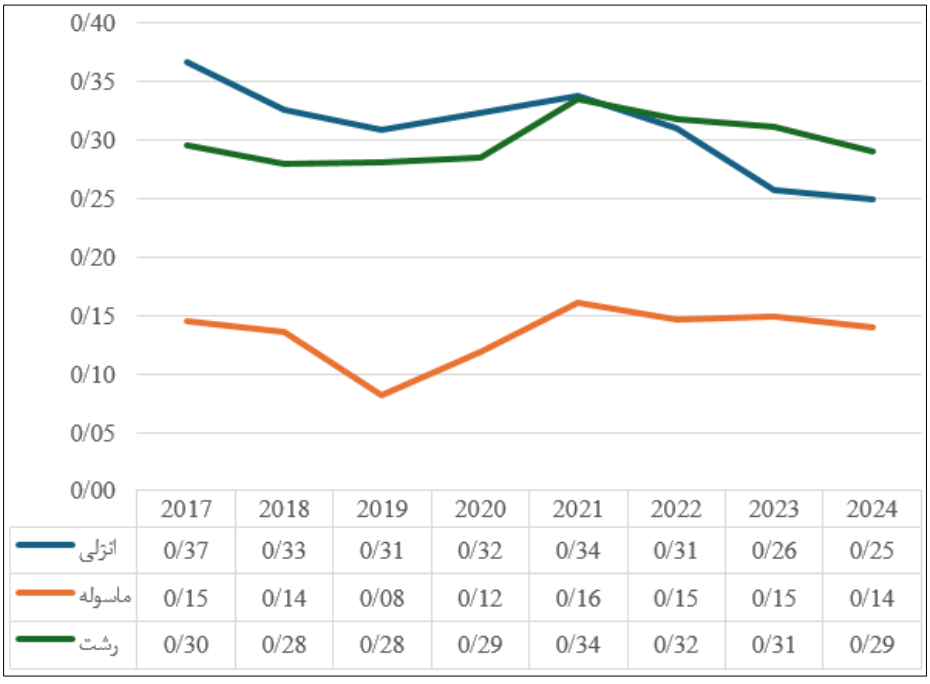


	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
انزلی	1529/42	1391/98	1725/85	1883/34	1169/37	1118/79	1104/99	1160/64
ماسوله	561/52	607/46	660/4	1160/18	644/68	664/2	631/94	690/24
رشت	932/25	911/17	1655/96	1507/88	1148/45	785/91	745/8	820/3

شکل ۱۱. نمودار مجموع بارش سالانه ایستگاه‌های هواشناسی زمینی

باوجود بارش‌های تقریباً متوسط به بالای ثبت شده در ایستگاه انزلی در سال ۲۰۱۷، اما کمتر بودن بارش‌ها در سایر ایستگاه‌ها در همان سال و کاهش شدید پوشش‌آبی در آن سال نشان می‌دهد که با وجود نزدیک بودن ایستگاه انزلی به مجموعه تالاب فوق، مقادیر بارندگی در آن تاثیر کمتری نسبت به دو ایستگاه دیگر دارد زیرا بیشتر آب حاصل از بارش‌ها در شهر انزلی مستقیما به دریا می‌ریزند و کمکی به افزایش پوشش‌آبی در تالاب‌انزلی نمی‌کنند اما افزایش بارندگی‌ها در ایستگاه‌های رشت و ماسوله که محل عبور رودهای متصل شده به تالاب هستند تاثیر زیادی در جلوگیری از روند خشکسالی در مجموعه تالاب‌انزلی را دارد. لذا مشاهده می‌شود با کاهش بارندگی‌ها در ایستگاه رشت در سال های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴ مقادیر کاهش پوشش‌آبی تالاب فوق نیز شدت یافته است.

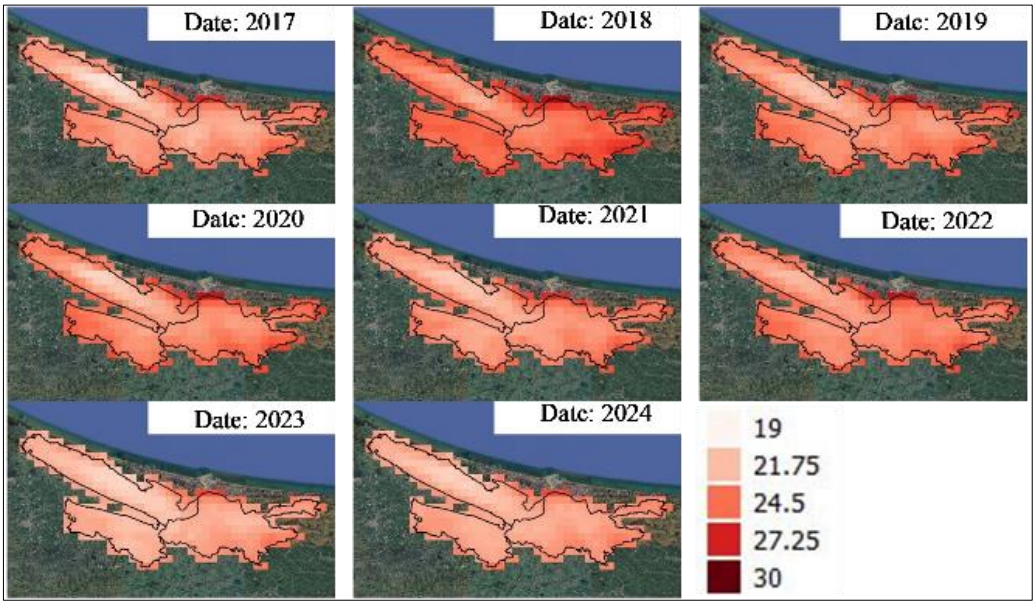
مطابق نمودار شکل ۱۲ میانگین تبخیر سالانه ایستگاه‌های هواشناسی ذکر شده نشان می‌دهد که روند تبخیر در ۲۰۱۹ برای ایستگاه ماسوله در مقایسه با سال ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ تقریبا نصف شده و دوباره در سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ به مقدار قبلی خود یعنی حدود ۰/۱۵ گرم بر مترمربع رسیده است.



	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
انزلی	0/37	0/33	0/31	0/32	0/34	0/31	0/26	0/25
ماسوله	0/15	0/14	0/08	0/12	0/16	0/15	0/15	0/14
رشت	0/30	0/28	0/28	0/29	0/34	0/32	0/31	0/29

شکل ۱۲. نمودار میانگین تبخیر سالانه ایستگاه هواشناسی زمینی

در ادامه، نقشه عناصر هواشناسی حاصل از داده‌های سنجنده‌های ماهواره‌ای ارائه شده است. برای هر سال، نقشه میانگین سالانه تهیه شده تا ارتباط عناصر هواشناسی با روند خشکی پهنه آبی منطقه موردمطالعه مورد بررسی قرار گیرد.

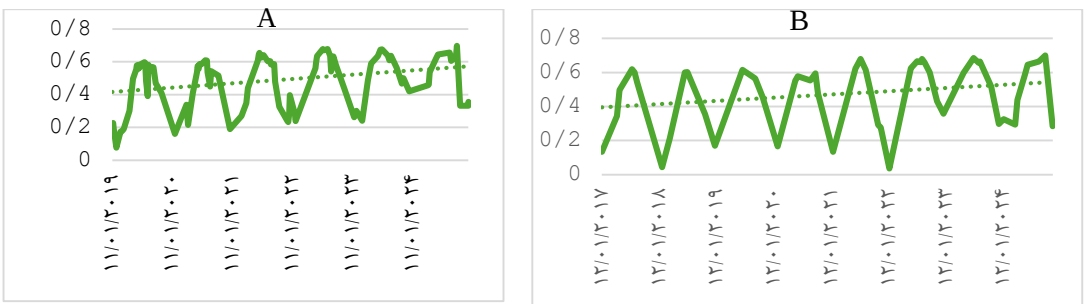


شکل ۱۳. تصویر میانگین دمای سالانه سنجنده MODIS

مطابق شکل ۱۳، میانگین سالانه دمای سطح زمین (LST) اخذ شده از سنجنده MODIS نشان می‌دهد مناطق نزدیک به شهر انزلی در شمال مجموعه تالاب انزلی همواره دمای بالاتری را در همه سال‌ها دارد و مناطقی که دارای پوشش آبی بیشتر در درون تالاب هستند دارای دمای کمتری نسبت به بقیه نقاط تالاب می‌باشند. بالاترین دمای به ثبت رسیده سطح زمین در مجاورت شهر انزلی با دمای ۲۹/۱۲ درجه سانتی‌گراد مربوط به سال ۲۰۱۸ می‌شود که با کاهش ۳۰ درصدی پوشش آبی در تالاب‌انزلی و سرخانکل که مراکز اصلی پوشش‌آبی بودند در ارتباط است و پایین‌ترین دمای در سال ۲۰۱۷ در مرکز تالاب غرب با دمای ۱۹/۸۸ درجه سانتی‌گراد به ثبت رسیده است.

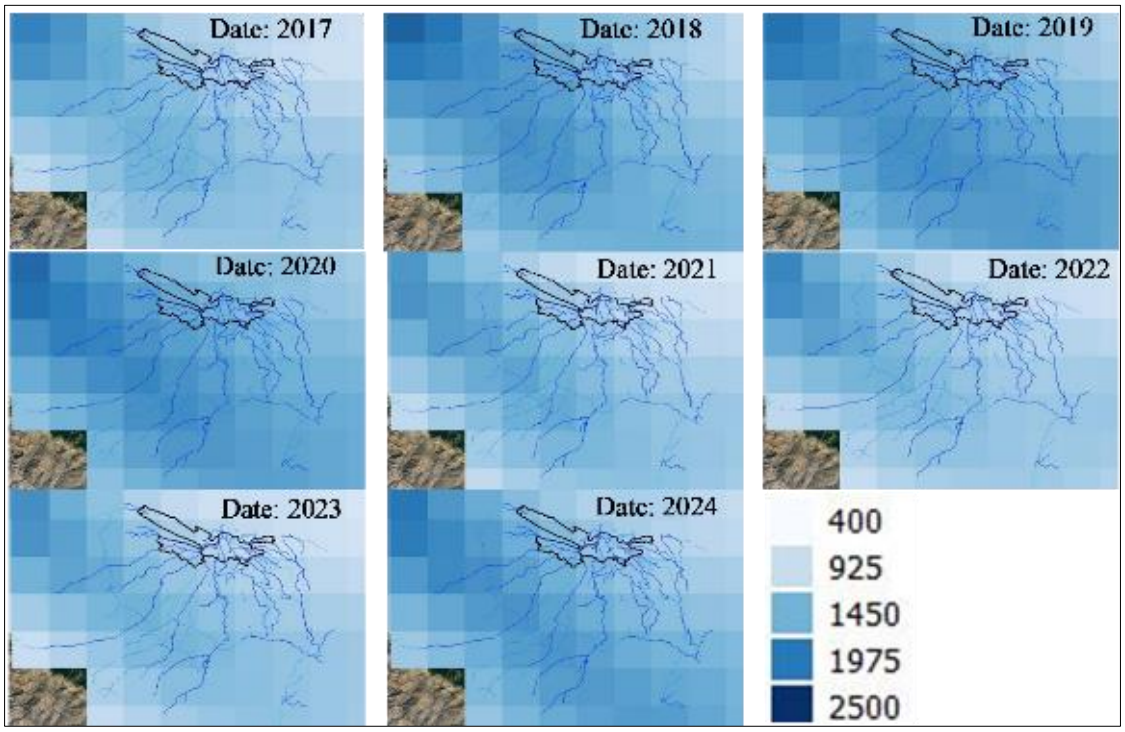
همچنین می‌توان از شکل ۱۳ دریافت که LST در محدوده مجموعه تالاب انزلی در سال‌های ۲۰۲۴ و ۲۰۲۳ با وجود کاهش پوشش سطح آبی نسبت به سال‌های قبل کم‌تر است. علت این امر را مطابق با شکل ۱۶ می‌توان به رشد گونه‌های گیاهی تالابی و جایگزین شدن آنها با پوشش آبی دانست که موجب کاهش اختلاف دما در مناطق مختلف این مجموعه تالاب شده و قبل از کاهش پوشش آبی در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ اختلاف بین کمترین و بیشترین دما در یک سال در حدود ۷/۵ درجه بوده اما در سال ۲۰۲۴ این اختلاف ۵ درجه سلسیوس و در سال ۲۰۲۳ حدود ۴/۵ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شده است.

نمودارهای شکل ۱۴ مقادیر شاخص پوشش گیاهی که با پوشش ابر ۱۰ درصد تهیه شده‌اند را نشان می‌دهد. این مقادیر میانگینی از وضعیت پوشش گیاهی در سراسر منطقه مطالعاتی مجموعه تالاب‌انزلی است.



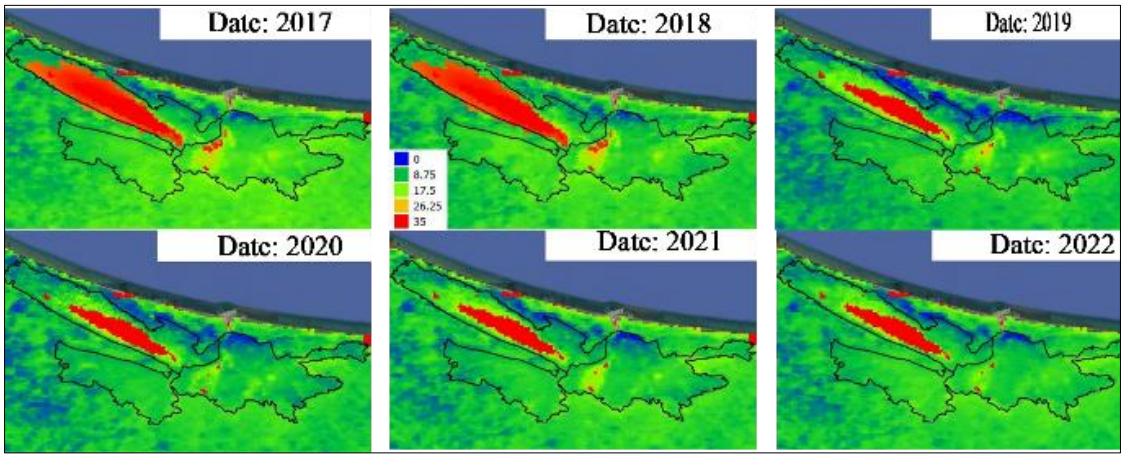
شکل ۱۴. نمودار NDVI در مجموعه تالاب‌انزلی، (A) به کمک سنجنده سنتینل ۲، (B) به کمک سنجنده لندست ۸ و۹

علاوه بر این، مجموع بارش سالانه اخذ شده از داده‌های بازتحلیل ERA5 برای منطقه در شکل ۱۵ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که شدت بارش رخداده در هر سال روی نقشه به‌صورت قطری توزیع شده است. به‌عبارت‌دیگر، مجموع بارش در قسمت شمال غربی آن بیشترین بوده و هرچه به سمت جنوب شرقی نزدیک‌تر شده کاهشی است. می‌توان از تصاویر سالیانه شکل ۱۵ و روند تغییرات پوشش آبی تالاب نتیجه گرفت هرگاه نواحی جنوب شرقی دارای بارندگی بیشتری باشند روند خشکسالی در تالاب متوقف یا کاهشی می‌شود. به طور نمونه در سال ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ و حتی ۲۰۲۴ تمرکز بارش‌ها بیشتر روی نواحی جنوب شرقی است و این گزاره بالا را تأیید می‌نماید. اما در سال ۲۰۱۸ و ۲۰۲۳ و ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ تمرکز بارش‌ها بر روی مناطق شمال غربی است که روند پوشش آبی نیز در این سال‌ها نزولی است.



شکل ۱۵. تصویر مجموع بارش سالانه بازتحلیل ERA5

مطابق شکل ۱۶، میانگین تبخیر سالانه اخذ شده از سنجنده‌های پروژه WAPOR موید این مطلب است که با کاهش پوشش‌آبی در تالاب غرب مقادیر میانگین تبخیر سالانه نیز در آن نواحی کاهش‌یافته است. همچنین، در نواحی شمالی و جنوب غربی تالاب با کاهش پوشش آبی و ازدیاد پوشش‌گیاهی، نقاط با تبخیرهای نزدیک صفر بیشتر شده‌اند.



شکل ۱۶. تصویر میانگین تبخیر سالانه پروژه WAPOR

باید توجه داشت که روند کاهشی پوشش تالاب انزلی که بـه علـت عوامـل مختلفـی از جملـه سـاخت کنارگـذر انزلـی در محدوده تالاب و به طبع آن ساخت ۵ پل موقت بر روی خروجی تالاب انزلی با عمر حـدود ۲۰ سـال، هماننـد سـدی در برابـر خروج رسوبات وارد شده به تالاب عمل می‌کند و با کاهش دبی آب از این محدوده موجب رسـوب‌گـذاری در محـدوده تـالاب سرخانکل شده است تنها یکی از عوامل خشکسالی تالاب است (توکلی و ثابت رفتار، ۱۳۸۲). از اینـرو مـی‌تـوان علـت کـاهش پوشش‌آبی را رسوب‌گذاری رودخانه‌ها همراه با کاهش تراز سطح آب دریای کاسپین و همچنین عوامل کاهنده سـرعت و دبـی رودخانه‌های فوق که موجب سرعت بخشیدن به رسوب‌گذاری و ته نشینی رسوبات رودخانه‌های فـوق شـده را سـاخت اسـکله انزلی در خروجی مجموعه تالاب انزلی دانست که در مواقع سیلاب نقش سد را دارد و مانع خروج رسوبات مـی‌شـوند، سـاخت موج شکن‌های بندرانزلی بر روی خروجی نهایی نهرهای تالاب انزلی که هم موجب رسوب‌گذاری داخل اسکله و رسوب‌گـذاری در داخل تالاب شده یکـی دیگـر از عوامـل بسـیار مخـرب و بـانی خشکسـالی در تـالاب‌انزلـی اسـت (Safaval et al., 2024). همچنین، رهاسازی زباله‌ها و فاضلاب شهری شهرهای بزرگ هماننـد رشـت، انزلـی، صـومعه‌سـرا، فـومن و خمـام و فاضـلاب شهرک صنعتی سپیدرود رشت به تالاب‌انزلی که حاوی مقادیر بالای میکروپلاسـتیک‌هـا و عناصـر سـنگین در تـالاب شـده و همچین رسوبات زیادی را وارد این منطقه کرده و موجب تغییر بافت پوشش‌گیاهی در این ناحیه و رشد گیاهان مهاجم سـنبل آبی شده است (Mirzajani et al., 2019; Navabian et al., 2020; Esmaeilzadeh et al., 2023).

بحث

در ارتباط با پایش تغییرات پوشش آبی تالاب‌انزلی می‌توان دریافت که اغلب پژوهشگران از طبقه‌بندی چنـد تصـویر بـا فاصـله چند ساله از یکدیگر بهره گرفته‌اند و همچنین منطقه موردمطالعه استفاده شده در تحقیقات آنها منطبـق بـا محـدوده رسـمی ثبت شده در کنوانسیون رامسر نبوده و بررسی‌ها بیشتر معطوف به قسمت تالاب غرب بوده است. همچنین، ایـن مطالعـات بـه طور معمول در هر سال، از تصویر ماهواره‌ای سری‌هـای لندسـت و یـا سـنتینل در یـک تـاریخ مشـخص اسـتفاده کـرده‌انـد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، تصاویر ۱۶ روزه لندست و ۵ روزه سنتینل ۲ به‌عنوان یک سنجنده نوری، نسبت به حضور ابـر حساس است. باتوجه‌به اقلیم بارانی منطقه تالاب انزلی، بخش زیادی از داده‌های سنجنده‌های نوری آلوده به ابـر خواهـد بـود و طبقه‌بندی تصاویر با مشکل مواجه خواهد شد. از طرفی دیگر، با دسترسی به تصاویر راداری و مستقل از ابر سـنجنده سـنتینل ۱ با تفکیک مکانی و زمانی بهتر از سنجنده لندست و همچنین به کمک فضای ابری سامانه گوگل ارث انجین در مطالعه فـوق تعداد تصاویر بیشتری از هر سال در تشخیص پهنه‌های آبی تالاب با دقت و قطعیت بالاتر به خدمت گرفته شد.

در مطالعات گذشته سعی شده از تصاویر با تاریخ‌های نزدیک به یکدیگر برای کاهش عوامل تغییـرات فصـلی و آب‌وهـوایی در یک سال با سال دیگر استفاده شود. اما این تغییرات فصلی فقط وابسته به زمان نیست و هرساله تغییرات دمـا و بـارش‌هـا و عوامل محیطی دیگر موجب می‌شود مقایسه دو تصویر حتی در یک روز مشخص در یک سال با تصـویر متنـاظر آن در همـان روز از سال بعدش تفاوت‌هایی از جنس تغییرات فصلی یا دمایی داشته باشد و این تغییرات از جنس تغییرات بلندمـدت و مانـا نباشد. در مطالعه حاضر، تعداد بالای تصاویر مستقل از ابر استفاده شده در هر سال، از طریق میانگین‌گیری سالانه ایـن امکـان را داده که پایش صورت‌گرفته فارغ از تغییرات فصلی تأثیرگذار بر پیکره آبی بـا به‌دسـت‌آوردن مقـادیر واقعـی یـا نزدیـک‌ترین حالت به واقعیت موجود با خنثی‌شدن عواملی مانند تغییرات فصلی و زمانی محاسبه گردد.

پایش پهنه آبی مجموعه تالاب انزلی در مطالعه زبردست و جعفری در سال ۲۰۱۰ متعلق به دوره‌هـای ۱۹۹۱ تـا ۱۹۹۸ و دوره ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۱ بوده است که به ترتیب در دوره ی اول و دوم، ۲۴ درصد افزایش و ۳ درصـد کـاهش را نشـان دادنـد. در مطالعه آن‌ها، ابعاد منطقه مورد مطالعه به صورت دقیق منطبق بر ابعاد ثبت شده مجموعه تالاب انزلـی در کنوانسـیون رامسـر نیست اما بسیار به آن نزدیک است. نتایج تحقیق حاضر که در ۷ سال اخیر و با داده هـای راداری انجـام گرفتـه اسـت، شـدت بیشتری در نرخ کاهش پهنه آبی این مجموعه تالاب را نسبت به مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد.

در مطالعه‌ای دیگر عبدلی و پناهنده در سال ۲۰۲۱ به کمک سه تصـویر لندسـت در سـال‌هـای ۱۹۹۴ و ۲۰۰۸ و ۲۰۱۸ تغییرات پوشش آبی مجموعه تالاب انزلی را در محدوده منطبق با محدوده ثبت شده در کنوانسـیون رامسـر بدسـت آوردنـد و

نتایج آنها نشان داد پوشش آبی در سال ۲۰۱۸ حدود ۱۰۴۲ هکتار را شامل می‌شود این در حالی است که در مقاله حاضر مقدار پوشش آبی حدود ۴۶۳۲ هکتار بدست آمده است و این اختلاف زیاد در کنار اختلاف رزولوشن تصاویر مورد استفاده، به علت دقت پایین تصاویر رنگی نسبت به تصاویر راداری در تشخیص پوشش آبی در محیط‌هایی که سطح آب با گیاهان تالابی پوشیده می‌شود است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به کمک ۸۲۰ تصویر ماهواره‌ای راداری، تغییرات پهنه آبی مجموعه تالاب انزلی با دقت‌های بالای ۹۷ درصد حاصل از طبقه‌بندی تصاویر به همراه عوامل آب‌وهوایی مرتبط در هشت سال اخیر مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، از داده‌های ماهواره‌ای در کنار داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی به‌منظور جبران کمبود اطلاعات هواشناسی محلی در منطقه مجموعه تالاب استفاده شد. از جمله مهم‌ترین نتایج این پژوهش، نمایش وضعیت تالاب‌انزلی به تفکیک نواحی سه‌گانه بوده که از نظر تغییرات پوشش آبی وضعیت تالاب سرخانکل بسیار شدیدتر دیده شده است. همچنین، مقایسه تصاویر ماهواره‌ای از دمای سطح زمین در کنار سری زمانی میانگین NDVI به‌دست‌آمده از ماهواره‌های سنتینل-۲ و لندست-۸ در منطقه موردمطالعه نشان داد که اگرچه در سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ مساحت پوشش آبی در مجموعه تالاب روبه‌کاهش بوده است؛ ولی با افزایش پوشش گیاهی پس از خشک‌شدن مناطق آبی، موجب تعدیل دما در منطقه شده است.

در کنار عوامل هواشناسی عامل تراز آب دریای کاسپین و همچنین عامل رسوب‌گذاری نهرها در تغییرات پوشش آبی مجموعه تالاب به علت ساحلی بودن این تالاب نقش مؤثری دارند؛ بنابراین، دو معضل اخیر را می‌توان چالش اصلی در منطقه مطالعاتی دانست که کارشناسان این بخش می‌بایست راهکارهایی برای برون‌رفت از این چالش‌ها ارائه دهند. نتایج پژوهش فوق می‌تواند برای اتخاذ تصمیمات کارشناسی شده توسط مسئولان احیای تالاب مورداستفاده قرار گیرد و جوامع خارجی و داخلی محیط‌زیستی را نسبت به آنچه در این تالاب مورد تغییر قرار گرفته است آگاه کند. مدیران می‌توانند از راهکارهای بلندمدت برای نجات تالاب شامل جلوگیری از ورود رسوبات، رسوب‌برداری از بستر تالاب و ساخت تصفیه‌کننده فاضلاب شهرهای رشت و انزلی که نیازمند صرف وقت و هزینه بسیار زیاد می‌باشد و همچنین راهکارهای میان‌مدت نظیر تخریب پل‌های موقت و ساخت پل‌های کابلی یا پل‌های با پایه‌های با فاصله زیاد بر روی مسیرهای خروجی تالاب به سمت دریای کاسپین و نهایتاً راهکارهای کوتاه‌مدت همانند لایه روبی اطراف پل‌های موقت و گشایش حداقلی مسیر عبور آب و سیلاب به سمت دریا، استفاده کنند.

در روش‌های مورداستفاده برای بررسی پوشش آبی تالاب که از تصاویر راداری سنتینل ۱ به صورت میانگین سالانه با باند C استفاده شده است نیاز به تصاویر ماهواره‌ای با دقت‌های مکانی و زمانی بالاتر و همچنین تصاویر راداری در باند L به منظور شناسایی بهتر پوشش آبی و تفکیک آن از پوشش گیاهان تالابی احساس می‌شود. با وجود باند L و C راداری نه تنها پوشش آبی تالاب‌ها به صورت دقیق استخراج می‌شود بلکه می‌توان پوشش گیاهان تالابی را نیز با دقت از طریق تفاضل این دو باند راداری محاسبه نمود. همچنین با افزایش تعداد داده‌های اخذ شده در طول سال و دقت آن‌ها می‌توان ارزیابی‌های دقیق‌تری را از روند تغییرات تالاب‌ها در سراسر دنیا ارائه نمود. افزایش تعداد ایستگاه‌های سینوپتیک در اطراف مناطق تالابی و داخل آنها می‌تواند گزارش‌های دقیقی از تغییرات پارامترهای هواشناسی برای تحلیل‌های آینده ارائه کند.

پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده راهکارهایی برای استفاده از بانک تصاویر راداری ماهواره‌های قدیمی همانند رادارسَت و آلوس پالسار با دقت مکانی و زمانی متناسب شده با تصاویر سنتینل ۱ از طریق تلفیق تصاویر به روش‌های یادگیری عمیق، ارائه و استفاده شود. به دنبال این عملیات، تغییرات پوشش آبی مجموعه تالاب انزلی در بازه مطالعاتی قبل از سال ۲۰۱۷ مورد بررسی دقیق قرار خواهد گرفت. افزایش سیر زمانی مطالعه موجب آگاهی کارشناسان و متخصصان این حوزه نسبت به آنچه که درگذشته رخداده خواهد شد و به کمک آن می‌توان روابط علت‌ومعلولی عوامل تأثیرگذار بر رفتار و تغییرات پوشش آبی مجموعه تالاب انزلی را بهتر و دقیق‌تر درک نمود تا نسبت به گذشته تصمیمات بهتری برای آینده تالاب توسط تصمیم‌گیران اتخاذ شود.

سپاسگزاری

نویسندگان این تحقیق به‌موجب در اختیار قراردادن داده‌های هواشناسی استان گیلان در بازه مطالعاتی انجام شده کمال تشکر و قدردانی را از سازمان هواشناسی کل کشور و استان گیلان را دارند.

همچنین نویسندگان این تحقیق از جناب آقای حمیدرضا فتح‌شیرین رئیس اتحادیه قایقرانان استان گیلان به‌موجب فراهم‌آوردن تجهیزات بازدید میدانی از مجموعه تالاب انزلی اعم از قایق و تیم راهنما، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

باقری، حمید؛ رستمی، رحیمه (۱۴۰۳). ارزیابی دقت تصاویر فراطیفی و چندطیفی در طبقه بندی پوشش تالاب ها با استفاده از روش های مختلف طبقه بندی (مطالعه موردی: تالاب شادگان). *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*, ۲۴(۷۴), ۲۷۲-۲۹۲. http://doi.org 10.61186/jgs.24.74.22

پناهنده، محمد؛ عبدلی، مهسا (۱۴۰۰). بررسی روند توالی سرزمینی تالاب انزلی با استفاده از رویکرد اکولوژی سیمای سرزمین. *اکوبیولوژی تالاب (تالاب)*، ۱۳(۴۸)، ۵-۲۲. http://jweb.ahvaz.iau.ir/article-1-955-fa.html

توکلی، بابک؛ ثابت رفتار، کریم (۲۰۰۴). ارزیابی آثار توسعه (EIA) جاده کنار گذر انزلی. *محیط شناسی*, ۲۹(۳۲)، ۲۱-۲۶. http://dor. org/20.1001.1.10258620.1382.29.32.3.5

زبردست، لعبت؛ جعفری، حمیدرضا (۱۳۹۰). ارزیابی روند تغییرات تالاب انزلی با استفاده از سنجش از دور و ارایه راه حل مدیریتی. *محیط شناسی*, ۳۷(۵۷)، ۵۷-۶۴. http://dor.org/20.1001.1.10258620.1390.37.57.7.5

عدل، مهسا؛ قراگوزلو، علیرضا؛ نوری، جعفر؛ ارجمندی، رضا؛ فریادی، شهرزاد (۲۰۲۱). بررسی و تعیین روند سه دهه تغییرات کاربری اراضی شهرستان انزلی با استفاده از GIS/RS. *علوم و تکنولوژی محیط زیست*،۲۲ (۹)، ۱۶۷-۱۷۷. https://doi.org/10. 22034/jest.2021.39820.4468

مدبری، هادی؛ شکوهی، علیرضا (۱۳۹۹). تعیین نیاز آبی تالاب انزلی بر اساس شاخص های اکولوژیکی-گردشگری در چارچوب IWRM. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۱(۱۰)، ۲۵۰۱-۲۵۱۷. https://doi.org/10.22059/ijswr. 2020.303554.668633

مغانی رحیمی، فریبا؛ مزیدی، احمد (۱۴۰۳). مطالعه و پایش تغییرات تالاب هورالعظیم با استفاده تصاویر لندست ۸. *جغرافیا و پایداری محیط*, ۱۴(۱)، ۱۳-۳۳. https://doi.org/10.22126/GES.2023.9738.2698

References

Adl, M., Gharagozlou, A., Nouri, J., Arjmandi, R., & Faryadi, S. (2021). Three Decades of Land Use Changes Analyzing in Anzali, Using GIS/RS. *Journal of Environmental Science and Technology, 22*(9), 167-177. (In Persian) https://doi.org/10.22034/jest.2021.39820.4468

Ahmed, J. S., Buizza, R., Dell'Acqua, M., Demissie, T., & Pè, M. E. (2024). Evaluation of ERA5 and CHIRPS rainfall estimates against observations across Ethiopia. *Meteorology and Atmospheric Physics, 136*(3), 17. https://doi.org/10.1007/s00703-024-01008-0

Atarchi, S., Gheysari, M., Hamzeh, S., & Alavi Panah, S. K. (2021). Land Cover Classification of Anzali Wetland Using Fusion of Sentinel 1 and ALOS/PALSAR 2 Images. *Iranian journal of Ecohydrology, 8*(3), 611-622. https://doi.org/10.22059/ije.2021.320301.1478

Bagheri, H., & Rostami, R. (2024). Evaluating the accuracy of hyperspectral and multispectral images in wetland cover classification using data mining models (Case study: Shadegan wetland). *Applied Research in Geographical Sciences*, *24*(74), 272-292 (In Persian). http://doi.org/10.61186/jgs.24.74.22

Conly, F.M., & Van der Kamp, G., 2001. Monitoring the hydrology of canadian prairie wetlands to detect the effects of climate change and land use changes. *Environmental Monitoring and Assessment, 67* (1), 195–215. https://doi.org/10.1023/A:1006486607040

Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., ... & Van Den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature, 387*(6630), 253-260. https://doi.org/10.1038/387253a0

Ebrahimi, E., Filizadeh, Y., & Asgari, K. (2009). Anzali wetland hydrology monitoring to detect the effects of land use and climate change. *In 2009 Second International Conference on Environmental and Computer Science (pp. 122-127). IEEE*. https://doi.org/10.1109/ICECS. 2009.17

Esmaeilzadeh, M., Tavakol, M., Mohseni, F., Mahmoudi, M., Nguyen, U. P., & Fattahi, M. (2023). Biomarkers for monitoring heavy metal pollution in the Anzali Wetland. *Marine Pollution Bulletin*, *196*, 115599. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115599

Fickas, K. C., Cohen, W. B., & Yang, Z. (2016). Landsat-based monitoring of annual wetland change in the Willamette Valley of Oregon, USA from 1972 to 2012. *Wetlands ecology and management*, *24*, 73-92. https://doi.org/10.1007/s11273-015-9452-0

Guo, M., Li, J., Sheng, C., Xu, J., & Wu, L. (2017). A review of wetland remote sensing. *Sensors*, *17*(4), 777. https://doi.org/10.3390/s17040777

Hemati, M., Hasanlou, M., Mahdianpari, M., & Mohammadimanesh, F. (2023). Iranian wetland inventory map at a spatial resolution of 10 m using Sentinel-1 and Sentinel-2 data on the Google Earth Engine cloud computing platform. *Environmental Monitoring and Assessment*, *195*(5), 558. https://doi.org/10.1007/s10661-023-11202-z

Mahdian, M., Hosseinzadeh, M., Siadatmousavi, S. M., Chalipa, Z., Delavar, M., Guo, M., ... & Noori, R. (2023). Modelling impacts of climate change and anthropogenic activities on inflows and sediment loads of wetlands: Case study of the Anzali wetland. *Scientific Reports*, *13*(1), 5399. https://doi.org/10.1038/s41598-023-32343-8

Mirzajani, A., Naderi, S., & Parvaneh Moghadam, D. (2019). Distribution survey and some biological aspects of Water Hyacinth in Anzali Wetland, Guilan province. *Journal of Plant Biological Sciences*, *11(*2), 51-62. https://doi.org/10.22108/ijpb.2019.114456.1131

Modaberi, H., & Shokoohi, A. (2020). Determining Water requirement of Anzali Wetland based on Eco-Tourism Indices within the Framework of IWRM. *Iranian Journal of Soil and Water Research (IJSWR), 51*(10), 2501-2517 (In Persian). https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.303554.668633

Moghani Rahimi, F., & Mazidi, A. (2024). Study and monitoring of Hoor al-Azim wetland changes using Landsat8 images. *Geography and Environmental Sustainability, 14*(1), 13-33 (In Persian). https://doi.org/10.22126/GES.2023.9738.2698

Navabian, M., Vazifehdost, M., & Esmaeili Varaki, M. (2020). Estimation of pollution load to Anzali Wetland using remote sensing technique. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, *18*(3), 251-264. https://doi.org/10.22124/cjes.2020.4137

Ottinger, M., Clauss, K., & Kuenzer, C. (2017). Large-scale assessment of coastal aquaculture ponds with Sentinel-1 time series data. *Remote Sensing, 9*(5), 440. https://doi.org/10.3390/rs9050440

Panahandeh, M., & Abdoli, M. (2021). Investigating the Succession Process of Anzali Wetland Using a Landscape Ecology Approach. *Wetland Ecobiology (Talas), 13*(48), 5-22 (In Persian). http://jweb.ahvaz.iau.ir/article-1-955-fa.html

Safaval, P. A., Neshaei, S. A., Heidarian, P., Khanmohammadi, M., Ghanbarpour, F., Azizi, Z., ... & Stefanakis, A. (2024). Studying the effect of Anzali port breakwaters on sedimentation in Anzali wetland using remote sensing. *Environmental Engineering Research*, *29*(1). 1-13 https://doi.org/10.4491/eer.2023.064

Salimi, S., Almuktar, S. A., & Scholz, M. (2021). Impact of climate change on wetland ecosystems: A critical review of experimental wetlands. *Journal of Environmental Management*, *286*, 112160. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112160

Seyed Mousavi, S. M., & Akhoondzadeh Hanzaei, M. (2022). Monitoring and Prediction of the changes in water zone of wetlands using an intelligent neural-fuzzy system based on data from Google Eearth Engine system (Case study of Anzali Wetland, 2000-2019). *Engineering Journal of Geospatial Information Technology*, *9*(4), 19-42. https://doi.org/10.52547/jgit.9.4.19

Tavakoli, B., & Sabet Raftar, K. (2003). Environmental Impact Assessment (EIA) of Anzali bypass road. *Environmental Science, 29*(32), 21-26 (In Persian). http://dor.org 20.1001.1.10258620.1382.29.32.3.5

Zebardast, L., & Jafari, H.R. (2011). Evaluation of Anzali Wetland changes using remote sensing and presenting management solutions. *Environmental Science, 37*(57), 57-64 (In Persian). http://dor.org/20.1001.1.10258620.1390.37.57.7.5