



پاسخ ریزاقلیم محلی به خشکیدگی تالاب بر اساس شاخص‌های حدی اقلیمی (مطالعه موردی: تالاب میانکاله)

رسول سعیدی کمال^۱، علیرضا شکوهی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

^۲ استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

* نویسنده مسئول: shokoohi@eng.ikiu.ac.ir

چکیده:

این پژوهش به بررسی تأثیر خشکیدگی تالاب میانکاله بر شرایط اقلیمی محلی می‌پردازد. بررسی تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی ایستگاه گلوگاه در بازه سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴، نشان می‌دهند که مساحت تالاب ۴۶٪ کاهش یافته است. ارزیابی ۱۵ شاخص حدی دما نظیر TX10p، DTR، TXx، TNx، TX90p، SU در همین دوره، روند افزایشی معناداری در شاخص‌هایی مانند گرم‌ترین روزها، گرم‌ترین شب‌ها، روزهای تابستانی و فراوانی روزهای گرم را نشان می‌دهد. یک وقفه زمانی دو ساله بین سال جهش در خشکیدگی تالاب (۲۰۱۴) و سال تغییر ناگهانی در شاخص‌های دمایی فوق‌الذکر (۲۰۱۶) شناسایی شد. این تأخیر زمانی کوتاه بین کاهش سطح تالاب و واکنش اقلیمی، حساسیت اکوسیستم منطقه را نشان می‌دهد. نتایج آزمون تی-استیوننت در سطح ۵ درصد، نسبت تغییرات شاخص‌های TXx و TX10p در ایستگاه گلوگاه را به ترتیب ۱/۵۹ و ۱/۷۳ برابر بیشتر از ایستگاه ساری در سال جهش این شاخص‌ها (۲۰۱۶) نشان داد. این مقایسه و همچنین بررسی توسعه شهری نشان می‌دهد که تغییرات شدید اقلیمی در گلوگاه عمدتاً ناشی از خشک شدن تالاب است و نه تغییرات اقلیمی جهانی یا اثرات شهرنشینی. این مطالعه نتیجه می‌گیرد که خشکیدگی تالاب میانکاله نقش مستقیم و تعیین‌کننده‌ای در تشدید روند گرمایش محلی و اختلال در تعادل اکولوژیکی منطقه داشته است.

واژگان کلیدی: تالاب میانکاله، خشکیدگی تالاب، شاخص‌های دمایی شدید، واکنش‌پذیری اقلیم منطقه‌ای، گرمایش جهانی

۱. مقدمه

تالاب‌ها از آسیب‌پذیرترین اکوسیستم‌های جهان هستند که به دلیل مدیریت منابع آب در بالادست، مصرف بی‌رویه، آلودگی و تغییر کاربری اراضی با تخریب سریعی مواجهند (Junk et al., 2013; Dixon et al., 2016). بر اساس گزارش صندوق جهانی طبیعت (WWF, 2020)، بیش از ۸۵٪ از مساحت تالاب‌های جهان از بین رفته است. یکی از نمونه‌های بارز اثرات مخرب محیط زیستی خشکیدگی تالاب‌ها و دریاچه‌های داخلی، خشک شدن دریاچه آرال در اثر دخالت عوامل انسانی است. در تحقیقی که توسط Small et al. (2001) انجام گردید نشان داده شد که خشکیدگی دریاچه آرال موجب بروز تغییرات دمایی قابل توجه در اقلیم اطراف دریاچه شده است و افزایش ۲-۳ درجه سانتیگراد در دامنه تغییرات دمایی (DTR) در بازه زمانی ۳۸ ساله (۱۹۶۰-۱۹۹۷) ناشی از کاهش توان دریاچه در تعدیل تغییرات حرارتی روزانه و تضعیف اثر تعدیل‌کننده دریاچه بوده است. در ایران نیز بسیاری از تالاب‌ها تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، کاهش بارش، افزایش تبخیر و فعالیت‌های انسانی مانند ساخت سدها، کاهش قابل توجهی در مساحت و عمق را تجربه کرده‌اند (Hamzeh et al., 2017). تالاب امیرکلاهی از جمله تالاب‌هایی است که کارکرد اکوسیستمی آن عملاً و بیشتر در قالب تأمین آب کشاورزی و در درجه دوم حفظ محیط زیست تعریف شده است. در تحقیقات به عمل آمده نشان داده شد که اگر بهره‌برداری از این تالاب از یک حد بحرانی که بر حسب زنده مانی جانوری به نام سنگ تعریف شد تجاوز نماید، تالاب مزبور می‌تواند وارد چرخه‌ای

بدون بازگشت شود چنانکه نقش محیط زیستی تالاب را با مخاطراتی جدی همراه نماید (Modaberi and Shokoohi, 2020). در تحقیقاتی که بر روی تالاب انزلی به منظور ارائه الگویی متناسب با اهداف IWRM برای مدیریت کمی و کیفی این تالاب انجام شد، محققین به این نتیجه رسیدند که مشکلات این تالاب بیش از آنکه به تغییر اقلیم مربوط باشد، به کاهش عمق تالاب به علت ورود رسوبات و تغذیه‌گرایی تالاب به علت ورود حجم عظیمی از فاضلاب‌های صنعتی، کشاورزی و خانگی از شهرهای مشرف بر تالاب و بخصوص رشت برمی‌گردد. این وضعیت تالاب را به سمتی پیش می‌برد که قبل از خشکیدگی کلیه کارکردهای اکوسیستمی خود را طی یک دهه آینده از دست می‌دهد (Modaberi and Shokoohi, 2019; Karimi and Shokoohi, 2025).

پژوهش حاضر به بررسی تغییرات ریزاقليمی در منطقه‌ای می‌پردازد که تحت تأثیر شرایط هیدرولوژیکی تالاب میانکاله قرار دارد. هدف اصلی، بررسی رابطه بین خشک شدن تالاب و تغییرات مشاهده‌شده در دماهای شدید و میزان بارش است. فرضیه کلیدی این است که تغییرات در پارامترهای اقلیمی فوق در مجاورت تالاب، مستقیماً تحت تأثیر فرآیند خشک شدن آن قرار دارند. با توجه به مقیاس جغرافیایی نسبتاً کوچک منطقه مورد مطالعه و بازه زمانی محدود داده‌های هواشناسی (۲۰ تا ۳۰ سال گذشته)، به نظر می‌رسد تأثیر مستقیم خشک شدن تالاب بر ریزاقليم منطقه در عین هم‌افزایی، نسبت به تغییرات اقلیمی جهانی معنی‌دارتر است. تالاب میانکاله، واقع در جنوب دریای کاسپین، به دلیل کاهش شدید سطح آب و قرارگیری در فهرست قرمز IUCN^۱ به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. این پژوهش، بخش عمده‌ای از تغییرات شاخص‌های اقلیمی شدید در ایستگاه هواشناسی گلوگاه را به نوسانات سطح آب تالاب و روند خشک شدن آن در دو دهه گذشته نسبت می‌دهد. برای ارزیابی تغییرات اقلیم، به ویژه رویدادهای حدی، شاخص‌های تعریف‌شده توسط تیم تخصصی شاخص‌های تغییر اقلیم و شاخص‌های فرین (ETCCDI)^۲ به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. همانطور که پیش‌تر گفته شد در یکی از اولین تحقیقات انجام شده برای تعیین تأثیر خشک شدن پهنه‌های آبی بر اقلیم مناطق مجاور (Small et al., 2001) گزارش نمودند که خشکی زدگی دریاچه آرال، که ناشی از دخالت انسان در تغییر بیلان حوضه آبریز آن بوده، موجب بروز تغییرات دمایی قابل توجه در اقلیم اطراف دریاچه شده است. در ایران نیز دریاچه ارومیه طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵، به‌ویژه در دوره ۲۰۱۵-۲۰۱۰، پیامدهای شدید محیط‌زیستی، اجتماعی و اقتصادی در شمال غرب ایران ایجاد کرده است. مهم‌ترین اثرات شامل طوفان‌های نمکی، بیابان‌زایی، تشدید نوسانات اقلیمی، تنش‌های قومی و از دست رفتن اراضی کشاورزی بوده‌اند (Barani-Pasian et al., 2017). در آخرین تحقیقات منتشر شده در مورد وضعیت تالاب میانکاله (Arji et al., 2025) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مربوط به ۴۰ سال اخیر (۲۰۲۴-۱۹۸۴) تغییرات سطح آب میانکاله و پوشش گیاهی آن را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این تحقیق افت سطح تالاب تقریباً ۱۰۱ هکتار در سال برآورد شده و سال ۲۰۱۴ به عنوان سال جهش در روند نزولی تغییرات سطح تالاب گزارش شده است.

مطالعات متعدد در سطح جهان روند افزایشی معنادار در شاخص‌های مرتبط با گرما (مانند شب‌های گرم و روزهای داغ) و کاهش در شاخص‌های سرمای را گزارش کرده‌اند (Yin and Sun, 2018; Sankaran et al., 2024; Liu et al., 2025; Bogale et al., 2025). در ایران، رحیمی و حجابی (۲۰۱۸) با بررسی داده‌های ۳۳ ایستگاه، روند گرم‌شدن معناداری را به ویژه در شاخص‌های مبتنی بر دمای حداقل روزانه شناسایی کردند. مطالعات خاص در منطقه شمال ایران نیز حاکی از تغییرات چشمگیر است: کوهشاهی و همکاران (۲۰۱۸) در استان مازندران گزارش کردند که ایستگاه‌های شرقی (نزدیک به تالاب میانکاله) روند کاهشی در شاخص‌های بارش شدید داشته‌اند. برارخانپور و همکاران (۲۰۱۹) و قربانی و همکاران (۲۰۲۳) در ایستگاه هاشم‌آباد (مجاور تالاب میانکاله) روند گرم‌شدن در تمام فصل‌ها و افزایش معنادار شاخص‌های گرمایی مانند SU (تعداد روزهای تابستانی) و TR (شب‌های گرمسیری) را ثبت کردند. نساجی زرواره و قرمز چشمه (۲۰۲۳) نیز افزایش معنادار دمای شبانه و کاهش شب‌های سرد را در شمال ایران تأیید نمودند (Zarvareh and Ghermezcheshmeh, 2023). پایش تغییرات سطح آب تالاب‌ها با استفاده از داده‌های سنجنش از دور و شاخص‌هایی مانند NDWI^۳ به یک روش استاندارد و کارآمد تبدیل شده است (Tsyganskaya et al., 2018; Hassan et al., 2024). مطالعات متعددی کاهش شدید مساحت تالاب میانکاله و خلیج گرگان را کمی‌سازی کرده‌اند: کاهش ۱۱۸۷۹ هکتاری مساحت تالاب میانکاله بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۶ توسط Dashti et al., (2019) گزارش شده است. (Khoshhravan (2020) کاهش ۱۷۶ کیلومتر

مربعی مساحت خلیج گرگان را به دلیل کاهش ۱۵۰ سانتی متری سطح آب دریای خزر محاسبه کرد. (Hamzeh and Torabi (2022 همبستگی بسیار قوی (۰/۹۲) بین سطح آب خلیج گرگان و نوسانات سطح آب دریای خزر را نشان دادند. با وجود ظرفیت گرمایی ویژه بالای آب (تقریباً چهار برابر خاک خشک) و انتظار قابل توجه خشکی تالاب بر ریزاقلیم محلی، تاکنون هیچ پژوهشی به صورت مستقیم و کمی، رابطه علی بین خشک شدن یک تالاب و تغییرات پارامترهای دمایی و بارشی در منطقه مجاور آن را بررسی نکرده است. مطالعات پیشین یا به روندهای اقلیمی یا به کاهش مساحت تالاب، بدون ایجاد پیوندی مستقیم و کمی بین این دو پدیده پرداخته‌اند. این مطالعه با هدف پر کردن این خلأ پژوهشی و با در نظرگیری همزمان دو مجموعه داده طراحی شده است: (۱) یک سری زمانی بلندمدت از شاخص‌های حدی دما و بارش در ایستگاه هواشناسی اطراف تالاب میانکاله و (۲) یک سری زمانی مناسب از تغییرات مساحت سطح آب تالاب (که با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و شاخص NDWI استخراج خواهد شد). هدف نهایی این پژوهش، تعیین سهم قابل انتساب به خشک شدن تالاب میانکاله در تغییرات ریزاقلیمی مشاهده‌شده در منطقه است. شکل ۱ روندنمای تحقیق را نشان می‌دهد.

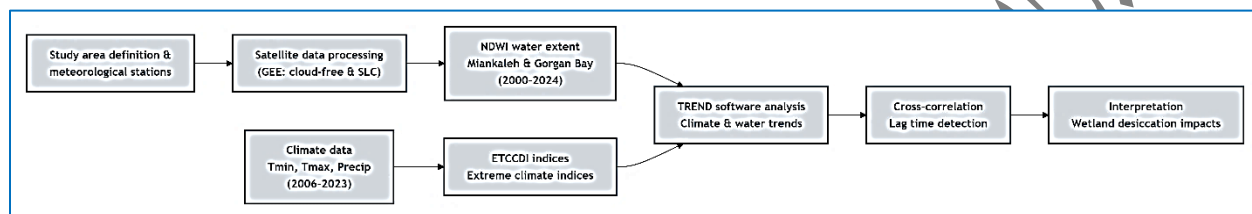


Fig 1. Research Workflow

شکل ۱- روندنمای تحقیق

۲- مواد و روش‌ها

• منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، نواحی مجاور تالاب میانکاله و خلیج گرگان را در بر می‌گیرد که از بهشهر تا گلگاه امتداد دارد (شکل ۲). داده‌های مورد نیاز از ایستگاه هواشناسی گلگاه واقع در شرقی‌ترین بخش استان مازندران، در فاصله ۵۰۵ کیلومتری جنوب تالاب میانکاله، تهیه شده است. این ایستگاه در منطقه معتدل شمالی ایران و در مختصات جغرافیایی ۳۶°۴۴'۲ شمالی و ۵۳°۵۰'۲ شرقی، با ارتفاع ۱۰ متر پایین‌تر از سطح دریا قرار دارد. میانگین دمای سالانه این ایستگاه ۱۷٫۸۸ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه آن ۵۹۶ میلی‌متر است. در این مقاله، داده‌های روزانه دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش از این ایستگاه در دوره آماری ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۳ مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

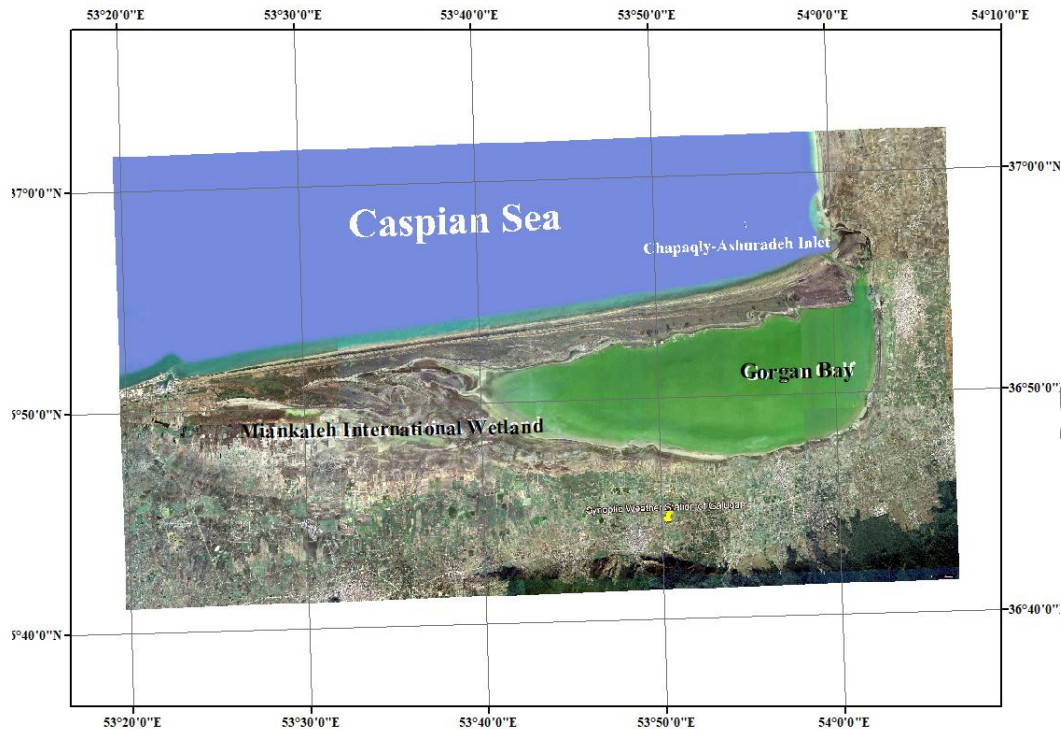


Fig. 2- Geographical location of Gorgan Bay and Miankaleh International Wetland (Source: Landsat8,2025)
 شکل ۲- موقعیت جغرافیایی خلیج گرگان و تالاب بین‌المللی میانکاله (منبع: لندست ۸، ۲۰۲۵)

محدودیت داده‌ها به دلیل تأسیس این ایستگاه در سال ۲۰۰۶ بوده است. همچنین داده‌های مفقودی هواشناسی با استفاده از روابط رگرسیونی مبتنی بر ۵ ایستگاه هم‌مدیدی مجاور (شامل ایستگاه‌های هواشناسی هاشم‌آباد و بندر ترکمن در استان گلستان و سه ایستگاه هواشناسی بندر امیرآباد، دشت‌ناز و ساری در استان مازندران) برآورد گردید. به‌منظور تفکیک بهتر اثرات محلی ناشی از خشکیدگی تالاب از تغییرات اقلیمی منطقه‌ای، علاوه بر ایستگاه گلوگاه، از داده‌های مشابه ایستگاه هم‌مدیدی ساری واقع در ۹۰ کیلومتری شرق ایستگاه گلوگاه با مختصات طول جغرافیایی $36^{\circ}32.13'$ و عرض جغرافیایی $53^{\circ}59.9'$ و ارتفاع ۱۷+ متری از سطح دریای آزاد در همان دوره آماری استفاده شد. فرض آن است که ایستگاه ساری به‌عنوان یک ایستگاه مرجع با شرایط اقلیمی نسبتاً مشابه در مقیاس منطقه‌ای، تأییدپذیری کمتری از تغییرات سطح آب تالاب داشته و بنابراین امکان مقایسه و تشخیص دقیق‌تر نقش خشکیدگی تالاب در تغییر شاخص‌های اقلیمی محلی را فراهم می‌کند. شکل ۳ موقعیت دو ایستگاه هواشناسی مزبور را نشان می‌دهد.

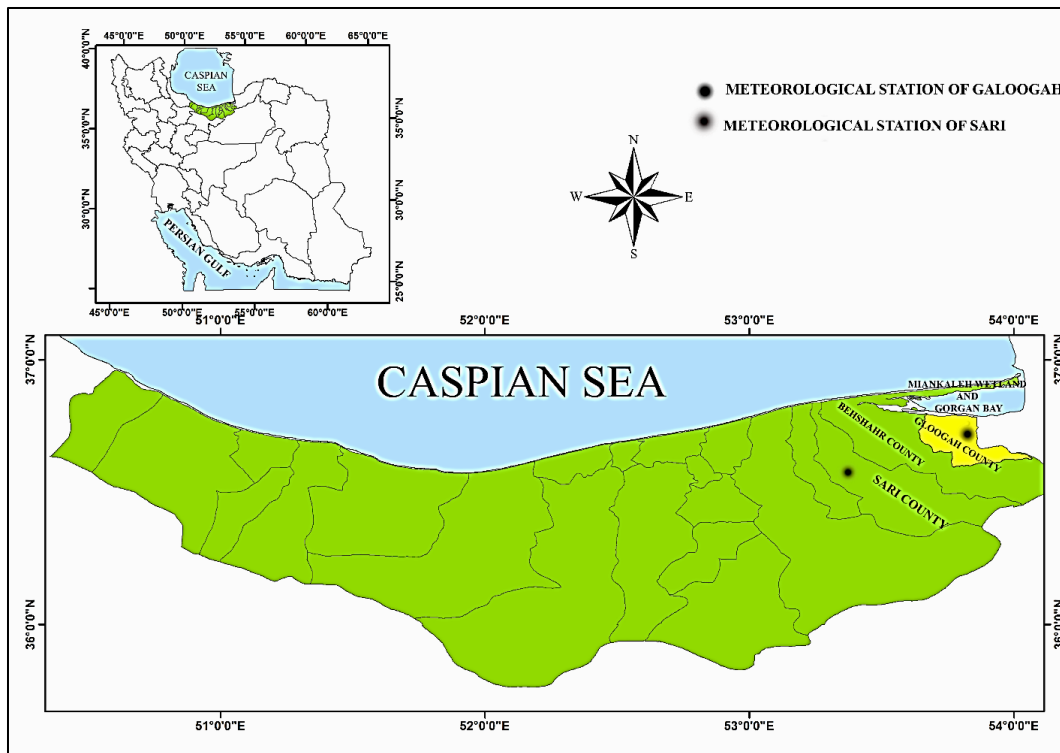


Fig.3-Location of the synoptic stations of Galoogah and Sari

شکل ۳- موقعیت ایستگاه های هواشناسی گلوگاه و ساری

تغییرات سالانه تراز آب دریای کاسپین نیز برای یک دوره ۲۵ ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۴) از مرکز ملی مطالعات و تحقیقات دریای خزر اخذ گردید.

• برآورد گستره آبی تالاب

برای محاسبه سری زمانی تغییرات در سطح آب خلیج گرگان و تالاب میانکاله، تصاویر ماهواره‌ای حاصل از سنسورهای Landsat و Landsat 7 در بازه زمانی ۲۵ ساله (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴) مورد استفاده قرار گرفتند و با برنامه‌نویسی در پلتفرم GEE^۴ و به کمک شاخص NDWI پردازش شدند. همچنین اطمینان حاصل شد که اصلاح خطای نواربندی تصاویر Landsat 7 در همین پلتفرم انجام شده باشد. این دو ماهواره دارای وضوح زمانی ۱۴ و ۱۶ روز هستند و هر دو وضوح مکانی ۳۰ متر را ارائه می‌دهند. تصاویر Landsat 7 برای دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۲ و تصاویر Landsat 8 برای دوره ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۴ به کار گرفته شدند. به منظور حذف اثر ابر و سایه ابر، از اطلاعات کیفیت تصویر (QA_PIXEL) و الگوریتم‌های ماسک‌گذاری ابر و سایه در محیط GEE استفاده شد و پیکسل‌های آلوده از تحلیل حذف گردیدند. در سال‌هایی که بیش از یک تصویر سالم در دسترس بود، بهترین تصویر از نظر کیفیت یا ترکیب زمانی چند تصویر با تولید کامپوزیت میانه به کار گرفته شد تا نواقص داده‌ای ناشی از وجود ابر، سایه و خطای راه‌راه شدگی در Landsat 7 برطرف شود و تصویر نهایی یکپارچه و قابل تحلیل باشد. فرمول کلی شاخص NDWI که به‌عنوان مؤثرترین شاخص برای تفکیک ویژگی‌های آبی از سایر سطوح زمینی شناخته می‌شود، در معادله ۱ آمده است. در این فرمول، NIR^۵ نشان‌دهنده بازتاب سطحی در باند نزدیک به فروسرخ و Green نشان‌دهنده بازتاب سطحی در باند سبز است:

$$NDWI = \frac{(Green - NIR)}{(Green + NIR)} \quad (۱)$$

برای تصاویر ماهواره‌ای Landsat 7، از باند ۲ (سبز) و باند ۴ (فروسرخ نزدیک) استفاده شد، در حالی که برای تصاویر Landsat 8، باند ۳ (سبز) و باند ۵ (فروسرخ نزدیک) برای محاسبات به کار گرفته شدند.

• شاخص‌های دمای شدید و بارش شدید

گروه تخصصی ETCCDI در زمینه شناسایی و پایش تغییرات اقلیمی و شاخص‌های مرتبط با آن فعالیت دارد. این گروه در چارچوب پروژه‌های مشترک بین CCL⁶ و CLIVAR⁷، که یکی از شش پروژه اصلی برنامه جهانی پژوهش اقلیم (WCRP⁸) است فعالیت می‌کند. این گروه که به بررسی تغییرات، پیش‌بینی‌پذیری و نوسانات بلندمدت اقلیم و اقیانوس می‌پردازد، ۲۷ شاخص دمای شدید و بارش شدید را توسعه داده است. از میان این شاخص‌ها، در مطالعه حاضر ۱۶ شاخص دمای شدید و ۲ شاخص بارش شدید برای ارزیابی تغییرات اقلیم منطقه‌ای براساس تجربیات سایر محققین (Nassaji Zavareh and Ghermezcheshmeh, 2023; Ebrahimi Khoramabadi et al., 2024) انتخاب شده‌اند که در جدول ۱ ارائه شده‌اند. علاوه بر استفاده از این شاخص‌ها در تعیین نقش تالاب در ریزاقلیم منطقه مشرف بر آن، در خصوص تفکیک اثر ویژه خشکیدگی تالاب میانکاله از اثرات ناشی از تغییر اقلیم جهانی، به مقایسه تغییر میانگین شاخص‌های حرارتی دو شهر مجاور یعنی گلگاه و ساری مبادرت ورزیده شد.

Table 1- Extreme temperature and precipitation indices recommended by ETCCDI

جدول ۱- شاخص‌های حدی دما و بارش توصیه‌شده توسط ETCCDI

Index	Descriptive Name	Definition	Unites
FD	Number of frost days	Annual count of days when TN (daily minimum temperature) < 0°C.	Days
ID	Number of icing days	Annual count of days when TX (daily maximum temperature) < 0°C.	Days
SU	Number of summer days	Annual count of days when TX (daily maximum temperature) > 25°C.	Days
TR	Number of tropical nights	Annual count of days when TN (daily minimum temperature) > 20°C.	Days
TXx	Hottest day	Monthly maximum value of daily maximum temperature	°C
TNx	Hottest night	Monthly maximum value of daily minimum temperature	°C
TXn	Coollest day	Monthly minimum value of daily maximum temperature	°C
TNN	Coollest night	Monthly minimum value of daily minimum temperature	°C
GSL	Growing season length	Annual (1st Jan to 31st Dec in Northern Hemisphere (NH), 1st July to 30th June in Southern Hemisphere (SH)) count between first span of at least 6 days with daily mean temperature TG>5°C and first span after July 1st (Jan 1st in SH) of 6 days with TG<5°C.	Days
TN10p	Cool night frequency	Percentage of days when TN<10th percentile of 2006-2023	%
TX10p	Cool day frequency	Percentage of days when TX<10th percentile of 2006-2023	%
TN90p	Hot night frequency	Percentage of days when TN>90th percentile of 2006-2023	%
TX90p	Hot day frequency	Percentage of days when TX>90th percentile of 2006-2023	%
WSDI	Warm spell duration index	Annual count of days with at least 6 consecutive days when TX>90percentile of 2006-2023	Days
CSDI	Cold spell duration index	Annual count of days with at least 6 consecutive days when TN < 10th percentile of 2006-2023	Days
DTR	Diurnal temperature range	monthly mean difference between TX and TN	°C
R10mm	Number of heavy precipitation days	Annual count of days when precipitation≥10mm	Days
R20mm	Number of very heavy precipitation days	Annual count of days when precipitation≥20mm	Days

• آزمونهای آماری

برای تعیین روند و آزمونهای آماری مورد نیاز برای ارزیابی معنی‌داری روند و همچنین تعیین تأخیر فاز میان تغییر مساحت پهنه آبی تالاب و شاخص‌های مورد استفاده، از دو نرم افزار Trend و Minitab استفاده شد. برای بررسی روند از آزمون‌های Mann-Kendall و Spearman_ro و برای تعیین جهش در روند از آزمونهای CUSUM، Cumulative deviation و Worsely likelihood در محیط نرم افزار Trend و برای تعیین زمان تأخیر میان متغیرها از روش همبستگی متقابل و نرم‌افزار Minitab استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

در این بخش روند موجود در شاخص‌های منتخب مورد آزمون قرار می‌گیرد. آزمون معنی داری در همه موارد در سطح ۵٪ انجام شده و شیب خطوط نیز در رابطه خط روند و به عنوان ضریب متغیر مستقل x ارائه شده است.

• شاخص تعداد روزهای یخبندان (FD)

تحلیل‌ها نشان می‌دهند که روند معنادار آماری در شاخص FD مشاهده نشده است. ارزیابی سری زمانی نشان می‌دهد که حدود ۷۵٪ از رخدادهای یخبندان در ماه‌های دسامبر و ژانویه اتفاق افتاده‌اند و تقریباً ۹۰٪ آن‌ها در فصل زمستان رخ داده‌اند. به طور خاص، سال‌های ۲۰۰۷ (۳۴ روز)، ۲۰۱۳ (۱۹ روز)، ۲۰۱۶ (۲۲ روز)، ۲۰۲۰ (۲۸ روز) و ۲۰۲۲ (۲۳ روز) در مجموع حدود ۶۰٪ از کل روزهای یخبندان ثبت شده در دوره ۱۸ ساله مشاهداتی را شامل می‌شوند. این موضوع نشان‌دهنده وجود یک روند نزولی ضعیف و همچنین توزیع نامنظم تعداد روزهای یخبندان در ماه‌های زمستان است.

• شاخص تعداد روزهای یخ‌زدگی سطحی (ID)

این شاخص نیز فاقد روند معنی‌دار بوده و تنها سه روز در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۳ و ۲۰۱۶، این واقعه رخ داده است. این امر نشان می‌دهد که اقلیم معتدل شمال ایران به طور کلی پایدار است و وقوع چنین رخدادی عمدتاً محدود به سال‌های خاص و شرایط جوی ناپایدار است، نه بخشی از یک تغییر بلندمدت اقلیمی.

• شاخص‌های تعداد شب‌های گرمسیری (TR) و روزهای تابستان (SU)

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۴، شاخص TR (تعداد شب‌های گرمسیری) روند معنادار یا قابل توجهی را نشان نمی‌دهد، در حالی که شاخص SU (تعداد روزهای تابستانی) دارای روند افزایشی معنادار آماری در طول دوره مطالعه است. افزایش معنادار روزهای تابستانی همراه با نبود روند مشخص در شب‌های گرم می‌تواند بیانگر شدت گرفتن گرمایش روزانه و افزایش دامنه نوسان دمایی شبانه‌روزی باشد؛ وضعیتی که اغلب با کاهش رطوبت سطحی، تغییر شرایط پوشش زمین یا تضعیف اثر تعدیل‌کننده منابع آبی محلی مرتبط است.

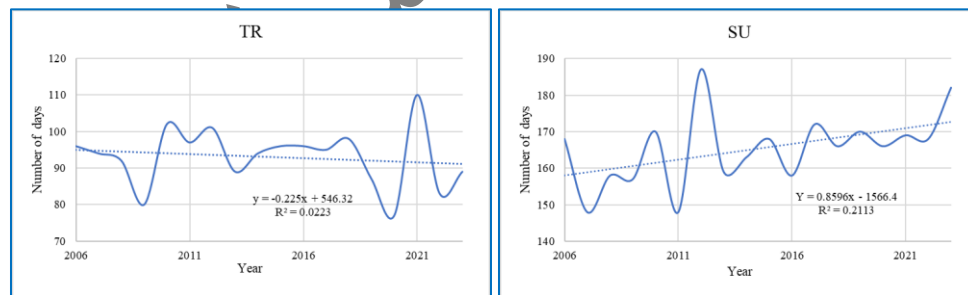


Fig. 4- Trends of TR and SU indices

شکل ۴- روند شاخص‌های TR و SU

• شاخص‌های سردترین (TNn) و گرم‌ترین (TNx) شب‌ها

شکل ۵ نشان می‌دهد که شاخص TNn (سردترین شب‌ها) روند معناداری ندارد، در حالی که شاخص TNx (گرم‌ترین شب‌ها) دارای روند افزایشی معنادار آماری است. این الگو می‌تواند بیانگر کاهش ظرفیت تعدیل حرارتی محیط در اثر افت رطوبت سطحی و تضعیف اثر تنظیم‌کنندگی تالاب باشد. رفتار متفاوت این دو شاخص را می‌توان نشانه‌ای از افزایش ناپایداری حرارتی و تشدید گرمایش شبانه در مقیاس محلی دانست. افزایش تعداد شب‌های گرم را می‌توان به عنوان نشانه‌ای آشکار از تغییرات اکوسیستمی در نظر گرفت که با سرعتی رخ می‌دهند که ممکن است از آستانه‌های سازگاری جمعیت‌های انسانی آسیب‌پذیر و گونه‌های گیاهی و جانوری حساس فراتر رود (Sharma et al., 2024; Guo et al., 2024).

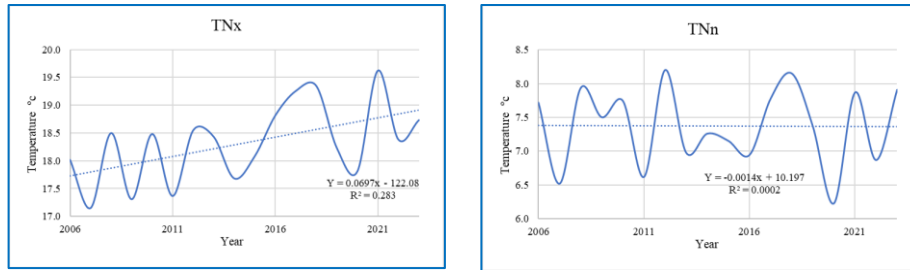


Fig. 5- Trends of TNn and TNx indices

شکل ۵- روند شاخص‌های TNn و TNx

• شاخص‌های سردترین (TNn) و گرم‌ترین روزها (TXx)

تغییرات زمانی این دو شاخص در دوره آماری ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۳ در شکل ۶ نمایش داده شده است. شاخص TXn (سردترین روزها) روند معناداری را نشان نمی‌دهد، اما شاخص TXx (گرم‌ترین روزها) دارای روند افزایشی معنادار آماری است. شباهت روند صعودی TXx با TNx بیانگر گرم‌شدن سریع اقلیم در منطقه مشرف به تالاب است.

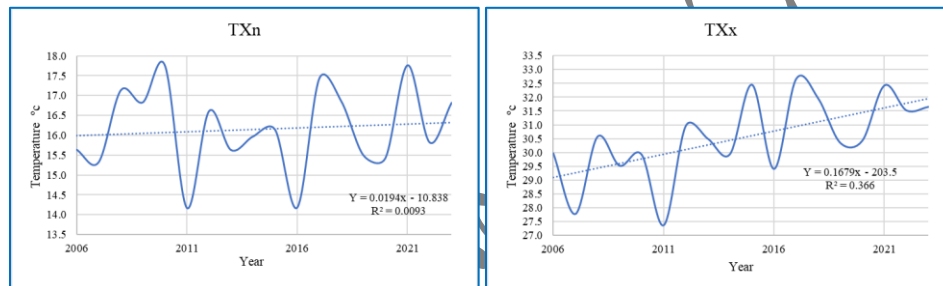


Fig. 6- Trends of TXn and TXx indices

شکل ۶- روند شاخص‌های TXn و TXx

• شاخص طول فصل رشد (GSL)

نتایج مربوط به این شاخص نشان‌دهنده عدم وجود روند معنادار آماری هستند. بر اساس تعریف این شاخص، در بیش از ۷۰٪ از دوره مورد مطالعه، طول فصل رشد در هر سال ثابت باقی مانده است.

• شاخص‌های فراوانی شب‌های سرد (TN10p) و گرم (TN90p)

شاخص فراوانی شب‌های سرد (TN10p) به‌عنوان درصد سالانه شب‌هایی تعریف می‌شود که دمای حداقل آن‌ها کمتر از صدک دهم $(TN \leq 3^{\circ}C)$ باشد، و شاخص فراوانی شب‌های گرم (TN90p) درصد سالانه شب‌هایی را نشان می‌دهد که دمای حداقل آن‌ها از صدک نودم (C) $(TN \geq 23^{\circ})$ فراتر رود. تحلیل داده‌های اقلیمی ۱۸ ساله نشان می‌دهد که در طول دوره مطالعه، هیچ روند معناداری در هیچ‌یک از این دو شاخص مشاهده نشده است.

• شاخص‌های فراوانی روزهای سرد (TX10p) و گرم (TX90p)

درصد روزهایی از سال که دمای بیشینه آن‌ها کمتر از صدک دهم $(TX < 8.11^{\circ})$ باشد، به‌عنوان شاخص فراوانی روزهای سرد تعریف می‌شود؛ در حالی که درصد روزهایی با دمای بیشینه بالاتر از صدک نودم $(TX > 33.4^{\circ})$ به‌عنوان شاخص فراوانی روزهای گرم شناخته می‌شود. شکل ۷ روند آماری معنادار کاهشی در شاخص TX10p و روند افزایشی معنادار در شاخص TX90p را نشان می‌دهد که در مجموع بیانگر گرم‌شدن سریع



منطقه و گسترش دامنه دمایی است. شیب تند معادله روند نشان می‌دهد که این گرم‌شدن ممکن است از آستانه‌های سازگاری اکوسیستم فراتر رود و موجب اختلالات محیط زیستی شود.

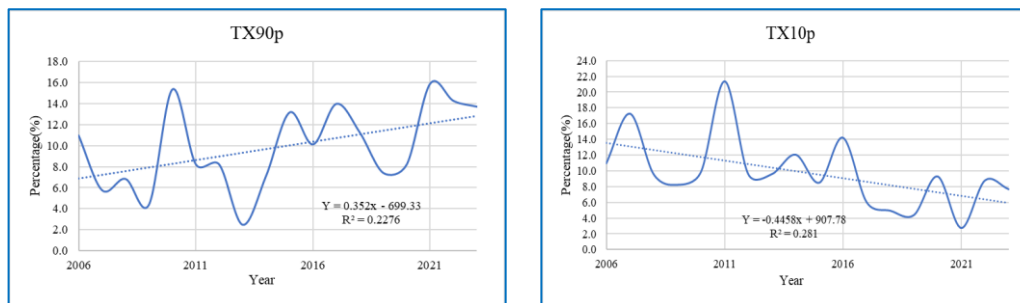


Fig. 7- Trends of TX10p and TX90p indices

شکل ۷- روند شاخص‌های TX10p و TX90p

• شاخص‌های مدت دوره‌های گرم (WSDI) و سرد (CSDI)

شاخص‌های WSDI و CSDI به ترتیب نشان‌دهنده تعداد روزهایی هستند که در آن‌ها حداقل شش روز متوالی دمای بیشینه از صدمک نودم فراتر می‌رود و یا دمای کمینه کمتر از صدمک دهم است. هر دو شاخص روند آماری معناداری را نشان نمی‌دهند. با این حال، شاخص WSDI روند کلی افزایشی دارد، در حالی که شاخص CSDI کاهش جزئی و بسیار اندکی را نشان می‌دهد. این نتایج نیز به‌طور ضمنی بیانگر روند گرم‌شدن اقلیم در منطقه هستند.

• شاخص دامنه دمایی روزانه (DTR)

نتایج مربوط به این شاخص، که در شکل ۸ نمایش داده شده است، روند افزایشی واضحی را در تفاوت بین دمای بیشینه و کمینه در منطقه مورد مطالعه طی دوره آماری نشان می‌دهند. از میان دو عامل مؤثر، افزایش دمای بیشینه برجسته‌تر بوده و به نظر می‌رسد عامل اصلی این روند صعودی در شاخص DTR باشد. افزایش دامنه حرارتی روزانه می‌تواند نشانه‌ای از خشک‌تر شدن محیط و حساس‌تر شدن سامانه اقلیم محلی به گرمایش باشد.

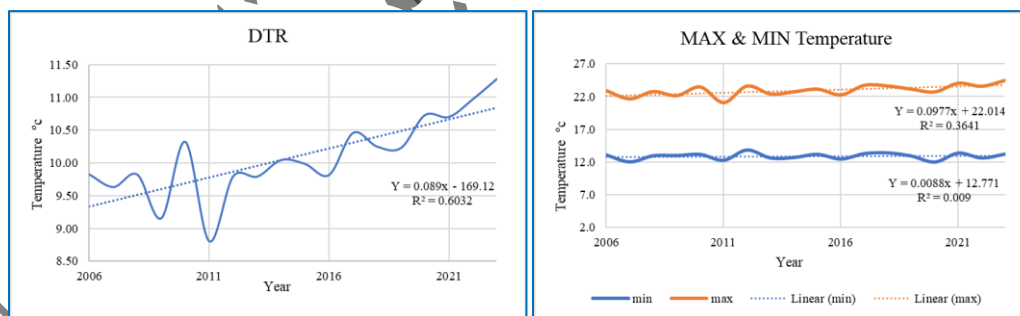


Fig. 8- Trends of DTR index and annual mean MAX-MIN temperature

شکل ۸- روند شاخص DTR و میانگین درجه حرارت حداقل - حداکثر

• شاخص تعداد روزهای بارش سنگین (R10mm) بسیار سنگین (R20mm)

روند افزایشی در هر دو شاخص دیده می‌شود با این حال، این روندها از نظر آماری معنادار نیستند. ارتباط میان این دو شاخص با گرم‌شدن منطقه از یک سو، و افزایش تبخیر از سطح آب‌ها و تجمع رطوبت منجر به بارش‌های سنگین از سوی دیگر، قابل چشم‌پوشی نیست.

• تغییرات در سطح آبی تالاب

شکل ۹- a روند تغییرات سطح آبی (بر حسب کیلومتر مربع) خلیج گرگان و تالاب میانکاله را از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد. بیشترین سطح آب این منطقه در سال ۲۰۰۵ با مقدار ۵۱۹٫۵۳ کیلومتر مربع ثبت شده است، در حالی که کمترین مقدار در سال ۲۰۲۴ با ۲۸۰٫۹۲ کیلومتر مربع مشاهده شده که نشان‌دهنده کاهش ۴۶ درصدی است. این کاهش منجر به پدید آمدن حدود ۲۴۰ کیلومتر مربع خشکی شده است که عمدتاً در بخش غربی منطقه (تالاب میانکاله) قرار دارد. با توجه به اینکه تالاب میانکاله و خلیج گرگان از طریق کانال چپلی-آشوراده (شکل ۲) به صورت هیدرولوژیکی به دریای خزر متصل هستند، افت حدود ۱۸۵ سانتی‌متری سطح آب دریای خزر طی دو دهه گذشته (شکل ۹- b) به عنوان عامل اصلی این کاهش چشمگیر در نظر گرفته شده است. پژوهش (Hamzeh and Torabi (2022 نیز همبستگی قوی ($r=0.92$) بین نوسانات سطح تالاب و تغییرات سطح آب دریای خزر را تأیید می‌کند.

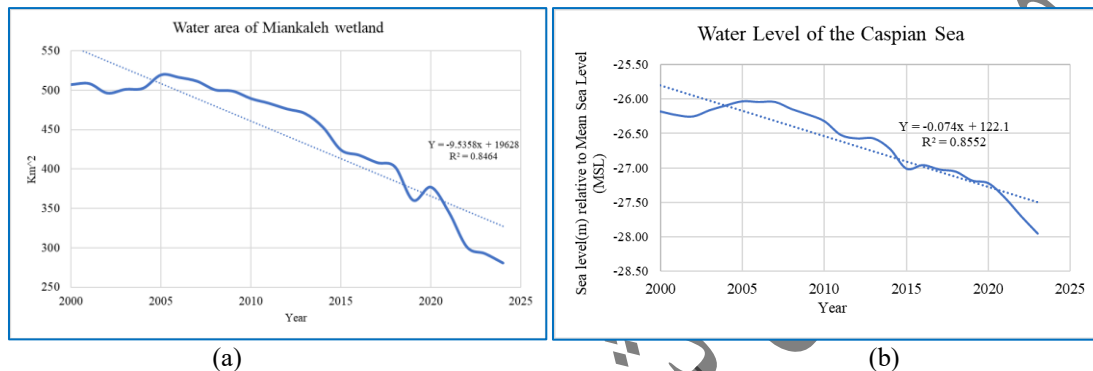


Fig.9- Trend of (a) changes in the water surface area of the Miankaleh wetland (b) Caspian Sea water level
شکل ۹- روند (a) تغییرات مساحت سطح آب تالاب میانکاله (b) سطح آب دریای خزر

جدول ۲ نتایج تحلیل روند شاخص‌های دمای شدید و بارش شدید و همچنین تغییرات سطح آبی منطقه مورد مطالعه را همراه با ارزیابی وجود یا عدم وجود جهش‌های معنادار و زمان وقوع آن‌ها ارائه می‌دهد. سه آزمون آماری شامل رگرسیون خطی، من-کندال و همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن به طور هم‌راستا روندهای معناداری را در شش شاخص دمای شدید و بارش شدید نشان دادند. به جز روند کاهشی در شاخص (TX10p)، سایر شاخص‌ها شامل (DTR)، (TXx)، (TNx)، و (TX90p) و (SU) روند افزایشی معناداری را تجربه کرده‌اند. همچنین، سطح آبی خلیج گرگان و تالاب میانکاله نیز روند کاهشی معناداری را نشان داده است. در خصوص شناسایی جهش‌ها، در حالی که روند افزایشی شاخص (SU) فاقد تغییر ناگهانی معنادار بود، پنج شاخص دیگر جهش‌های آماری معناداری را نشان دادند که عمدتاً بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ رخ داده‌اند و هر سه آزمون آماری این موضوع را تأیید کرده‌اند. برای تغییرات سطح آبی، دو مورد از سه آزمون سال ۲۰۱۴ را به عنوان سال وقوع جهش معنادار شناسایی کردند.

Table 2- Test statistics for trend/change detection

جدول ۲- آزمونهای آماری برای تعیین روند و جهش

Index	Significance Tests Trend				Detection Tests Change		
	Mann-Kendall	Spearman's rho	Linear regression	Type of Trend	Cusum	Cumulative deviation	Woresley likelihood
DTR	YES	YES	YES	Increasing	2016	2016	2016
FD	-	-	-	-	-	-	-
ID	-	-	-	-	-	-	-
TNn	-	-	-	-	-	-	-
TNx	YES	YES	YES	Increasing	-	2015	2015

TXn	-	-	-	-	-	-	-
TXx	YES	YES	YES	Increasing	-	2014	2014
TN10p	-	-	-	-	-	-	-
TN90p	-	-	-	-	-	-	-
TX10p	YES	YES	YES	Decreasing	2016	2016	2016
TX90p	YES	YES	YES	Increasing	-	2014	-
SU	YES	YES	YES	Increasing	-	-	-
TR20	-	-	-	-	-	-	-
RR10	-	-	-	-	-	-	-
RR20	-	-	-	-	-	-	-
WSDI	-	-	-	-	-	-	-
CSDI	-	-	-	-	-	-	-
-2024 AREA 2000	YES	YES	YES	Decreasing	2011	2014	2014

برای تعیین سال جهش از روش‌های آماری CUSUM، انحراف تجمعی⁹ و احتمال ورسلی¹⁰ و برای ارزیابی و تعیین مؤثرترین روش برای شناسایی سال تغییر از آزمون همبستگی متقاطع بین سری زمانی تالاب و هر یک از شاخص دمای و بارشی شدید که روندی معنادار از خود نشان دادند استفاده شد. از این آزمون برای تعیین تأخیر فاز میان دو سری زمانی استفاده می‌شود. شکل ۱۰ دو نمونه از آزمون همبستگی را نشان می‌دهد و جدول ۳ نتایج مربوط به وجود زمان تأخیر بین تغییرات تالاب و شاخص‌ها را خلاصه می‌کند. مقدار حدی یا آستانه برای تعیین زمان تأخیر از معادله ۲ با سطح اطمینان ۹۵٪ محاسبه شد:

$$\frac{2}{\sqrt{n-2}}$$

(۲)

در رابطه فوق n نشان‌دهنده تعداد سال‌های آماری است که در این مطالعه برابر با ۱۸ در نظر گرفته شده است؛ این مقدار بر اساس دوره هم‌پوشانی بین شاخص‌های شدید اقلیمی و داده‌های سطح آبی تالاب تعیین شده است. با توجه به نتیجه معادله ۲ که مقدار ضریب همبستگی متقاطع بحرانی را ۰/۵ بدست می‌دهد، مطابق آنچه که در شکل ۱۰ نیز دیده می‌شود قدر مطلق زمان تأخیر معنی‌دار میان دو متغیر مورد مطالعه ۲ سال می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همبستگی متقاطع بین تالاب و شاخص‌های شدید اقلیمی تأیید می‌کند که تغییرات در ریزاقلیم منطقه تا دو سال پس از وقوع یک جهش معنادار در سطح آبی تالاب رخ می‌دهد. زمان تأخیر به‌دست‌آمده از تحلیل همبستگی متقابل، تطابق بیشتری با نتایج روش آماری انحراف تجمعی یعنی CUSUM دارد.

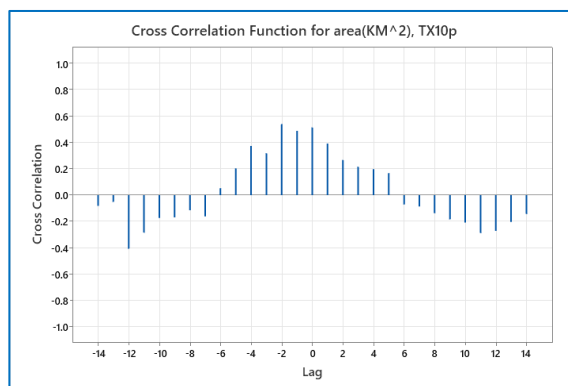
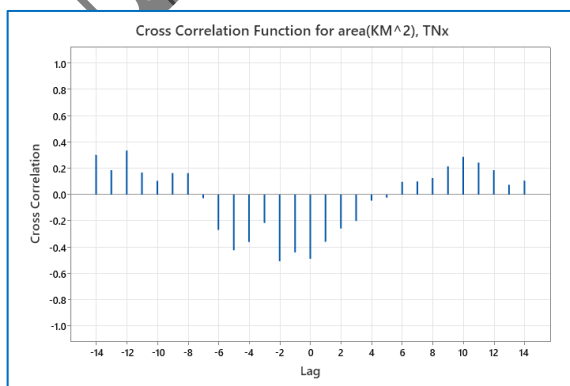


Fig. 10- Cross-correlation curve between the wetland surface and two extreme temperature indices

شکل ۱۰ - منحنی همبستگی متقابل بین سطح تالاب و دو شاخص حدی دما

Table 3- Cross-correlation test between wetland water level and limit indicators to determine the lag time between two time series in terms of years

جدول ۳- آزمون همبستگی متقابل بین سطح آب تالاب و شاخص‌های حدی برای تعیین زمان تأخیر (وقفه) بین دو سری زمانی بر حسب سال

Index	TN _x	TX _x	DTR	TX10p	TX90p	SU25
Lag time(year)	2	1	2	2	.	-

۴- بحث و بررسی

علاوه بر خشک شدن تالاب، دو عامل اصلی دیگر می‌توانند بر تغییرات پارامترهای اقلیمی منطقه‌ای (با حضور یک منبع آبی بزرگ) تأثیرگذار باشند: (۱) گرم شدن جهانی و (۲) اثرات بلندمدت توسعه شهری. برای دستیابی به نتیجه‌ای دقیق، ضروری است که تأثیر هر یک از این عوامل به صورت جداگانه بر شاخص‌های دمایی منطقه مورد ارزیابی قرار گیرد.

• ارزیابی اثرات گرم شدن جهانی بر ویژگی‌های اقلیم محلی

برای درک بهتر تأثیر خشکیدگی تالاب بر ریزاقلیم منطقه اطراف خود، شاخص‌های دمای شدید از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک ساری در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۳ مورد تحلیل قرار گرفتند. شکل ۱۱ موقعیت دو ایستگاه هواشناسی و تالاب میانکاله را نشان می‌دهد.



Fig. 11- Geographic location of Sari and Galouga stations and Miankaleh wetland

شکل ۱۱ - موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های گلوگاه، ساری و تالاب میانکاله

نتایج تحلیل‌های آماری شاخص‌های دمای شدید در ایستگاه ساری نشان داد که تنها دو شاخص TX_x (دمای بیشینه روزانه) و TX10p (فراوانی روزهای سرد) دارای روندهای معنادار آماری هستند و سال ۲۰۱۶ به عنوان سال وقوع جهش برای هر دو شاخص شناسایی شد. شکل ۱۲ سری زمانی و نتایج آزمون t را برای ارزیابی معناداری تفاوت میانگین‌های شاخص TX10p در ایستگاه‌های گلوگاه و ساری، قبل و بعد از سال جهش، نمایش می‌دهد. اختلاف میانگین مقادیر شاخص در دو دوره قبل و بعد از جهش اقلیمی در گلوگاه در سطح ۵ درصد و در ساری در سطح ۱۰ درصد معنی دار شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، تغییرات TX10p بین دو دوره در ایستگاه گلوگاه ۳۸٪ و در ایستگاه ساری ۲۳٪ بوده است. به طور مشابه، شکل ۱۳ تغییرات شاخص TX_x را در همان بازه‌های زمانی نشان می‌دهد که افزایش ۴۰۵٪ در گلوگاه و ۲۰۷٪ در ساری را ثبت کرده است. همانطور که ملاحظه می‌شود اختلاف میانگین دو دوره در مورد شاخص دمای بیشینه روزانه نیز از همان وضعیت شاخص فراوانی

روزهای سرد برخوردار است. از منظر دیگر، پیش از سال ۲۰۱۶، تفاوت شاخص TXx بین ساری و گلوگاه بیش از ۳۰٪ بود؛ اما این فاصله پس از سال ۲۰۱۶ (سال جهش) به ۱۰٪ کاهش یافت که این امر به معنای تسریع روند گرم شدن گلوگاه نسبت به ساری در دوره مطالعاتی است. در واقع، میزان تغییر شاخص TXx در ایستگاه گلوگاه ۱۰۶ برابر بیشتر از ایستگاه ساری بوده و تغییرات شاخص TX10p نیز در گلوگاه ۱۰۷ برابر بیشتر بوده است.

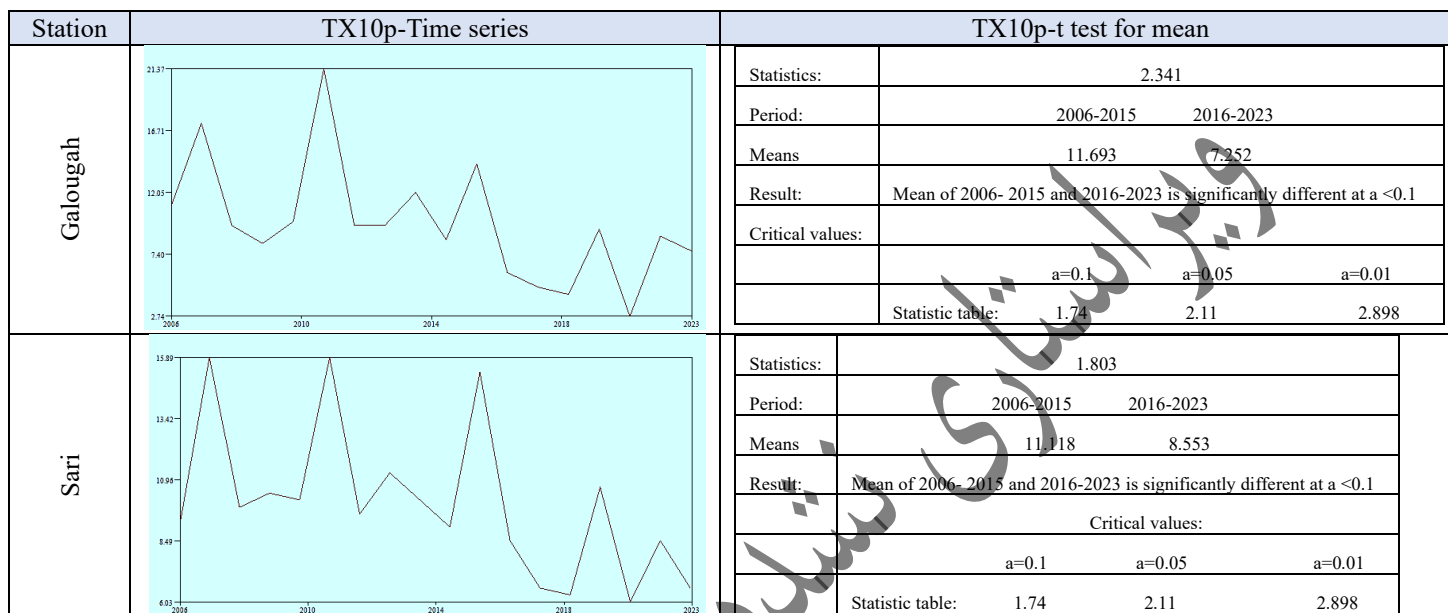


Fig. 12- Time series and t-test results for the TX10p index at Galougah and Sari stations

شکل ۱۲- سری زمانی و نتایج آزمون t برای شاخص TX10p در ایستگاههای گلوگاه و ساری

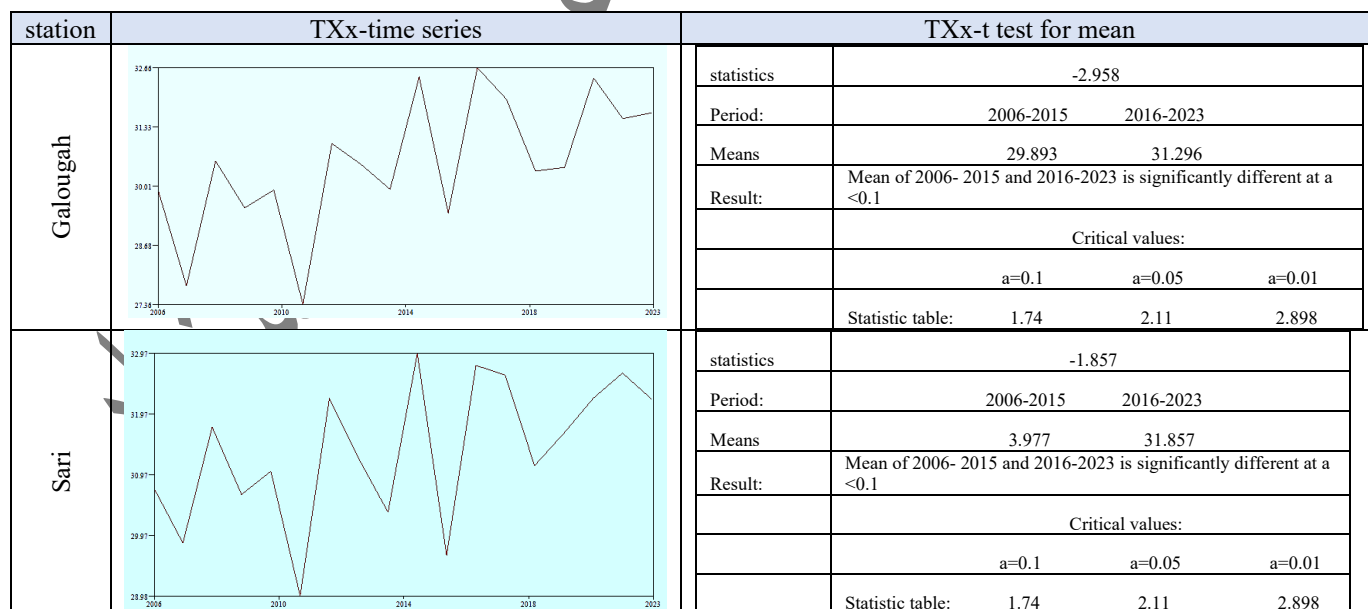


Fig. 13- Time series and t-test results for the TXx index at Galougah and Sari stations

شکل ۱۳- سری زمانی و نتایج آزمون t برای شاخص TXx در ایستگاههای گلوگاه و ساری

تغییرات ناگهانی مشاهده شده در شاخص های دمای شدید در این مطالعه نشان می دهند که این تغییرات نه تنها تحت تأثیر تغییرات اقلیمی جهانی هستند، بلکه از خشک شدن تدریجی تالاب نیز تأثیر پذیرفته اند. یافته ها نشان می دهند که اگرچه تغییرات اقلیمی هر دو منطقه ساری (به عنوان

منطقه‌ای نزدیک) و میانکاله را تحت تأثیر قرار داده‌اند و روند گرم‌شدن در هر دو مشاهده شده است، اما منطقه تحت تأثیر تالاب میانکاله تغییرات شدیدتری را تجربه کرده و نسبتاً گرم‌تر شده است. با وجود نبود تفاوت‌های اقلیمی یا جغرافیایی قابل توجه بین این دو منطقه، اختلاف مشاهده شده را می‌توان به خشک شدن تالاب میانکاله و کاهش نقش تعدیل‌کننده آن در کنترل دماهای شدید منطقه‌ای نسبت داد.

• بررسی اثرات شهرنشینی بر ویژگی‌های اقلیم محلی

ساده‌ترین روش برای ارزیابی تأثیر توسعه شهری بر دمای منطقه‌ای، تحلیل گسترش شهر به دلیل رشد جمعیت است. شهرنشینی می‌تواند با افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی برای گرمایش ساختمان‌ها و حمل‌ونقل درون‌شهری، به افزایش دما کمک کند. واضح است که هرچه اندازه شهر و جمعیت بیشتر باشد، اثرات منفی مصرف سوخت‌های فسیلی بر اقلیم منطقه‌ای (روندی که در بسیاری از کلان‌شهرهای کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه مشاهده شده است) نیز بیشتر خواهد بود. برای ارزیابی دقیق تغییرات دما، پایش شاخص‌های دمایی در سطح شهری ضروری است. چنین ابزاری در منطقه مورد مطالعه در دسترس نیست و بنابراین رویکرد جایگزینی اتخاذ شده که شامل ارزیابی‌های میدانی و مقایسه اندازه شهر و جمعیت در طول زمان است. همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده، مرزهای جغرافیایی شهر در سال‌های نزدیک به زمان جهش تقریباً بدون تغییر باقی مانده‌اند. همچنین داده‌های آماری نشان می‌دهند که جمعیت شهری در سال‌های اخیر ثابت مانده و افزایش چندانی را تجربه نکرده است. علت این امر را می‌توان عمدتاً محدودیت‌های اعمال شده بر فعالیت‌های کشاورزی ناشی از کمبود منابع آبی دانست. با توجه به این یافته‌ها می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دمای اخیر در منطقه مورد مطالعه را نمی‌توان به گسترش یا توسعه شهری نسبت داد. بدیهی است که این امر نیازمند مطالعات بیشتری است که می‌تواند دستمایه تحقیقاتی دیگر در این زمینه باشد.

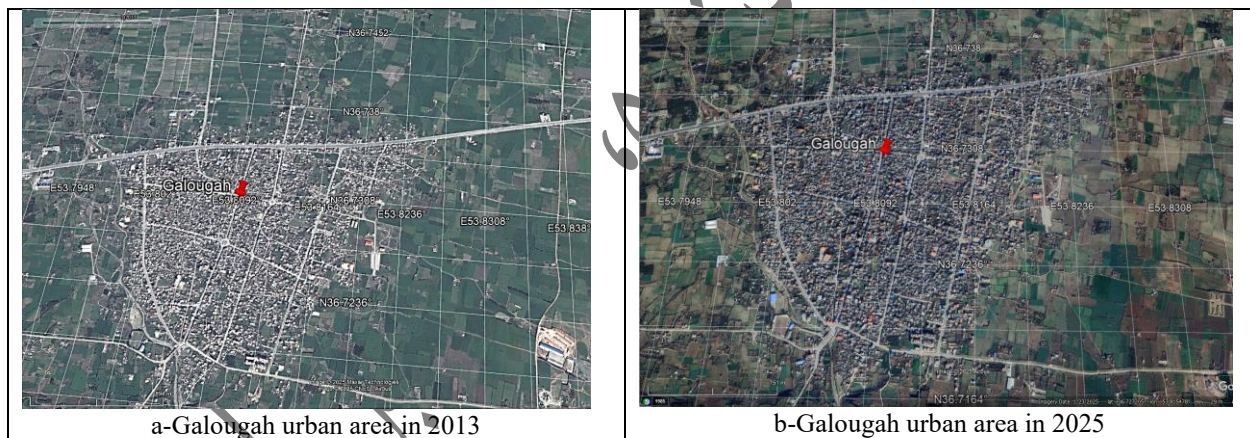


Fig. 14- Comparison of the urban area of Galougah city in 2013 and 2025

شکل ۱۴- مقایسه منطقه شهری در شهر گلوگاه در سالهای ۲۰۲۵ و ۲۰۱۳

۵. نتیجه‌گیری

این پژوهش با تلفیق داده‌های سنجش‌ازدور و تحلیل‌های آماری انجام شده بر روی شاخص‌های دمایی و بارشی شدید و همچنین بهره‌گیری از بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که خشکیدگی تالاب میانکاله به‌عنوان یک محرک هیدرو-اقلیمی، نقشی تعیین‌کننده در تغییرات ریزاقلیم منطقه‌ای ایفا کرده است. کاهش ۴۶٪ سطح آبی تالاب و خلیج گرگان طی ۲۵ سال گذشته، هم‌زمان با افت حدود ۲ متری سطح آب دریای خزر، موجب بروز جهش‌های آماری در شاخص‌های دمایی شدید شده است. از میان ۱۸ شاخص بررسی شده، ۶ شاخص روند معنادار داشته‌اند که ۵ مورد از آن‌ها (TX90p، TNx، TXx، DTR، SU) روند افزایشی و تنها TX10p روند کاهشی نشان داده‌اند. تغییرات ناگهانی شاخص‌های حدی دمای منطقه نشان می‌دهند که این تغییرات نه‌تنها تحت تأثیر تغییرات اقلیمی جهانی هستند، بلکه متأثر از خشک شدن تدریجی تالاب نیز بوده‌اند. مقایسه ایستگاه گلوگاه (در مجاورت تالاب) با ایستگاه ساری (فاقد تأثیر مستقیم تالاب) که شدت تغییرات دمایی در گلوگاه ۱۰۶ تا ۱۰۷ برابر بیشتر بوده است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که اگرچه تغییر شرایط اقلیمی، هر دو منطقه ساری و گلوگاه را تحت تأثیر قرار داده و روند گرم‌شدن در هر

دو مشاهده شده است، اما منطقه مجاور تالاب میانکاله تغییرات شدیدتری را متحمل شده است. با وجود نبود تفاوت‌های اقلیمی یا جغرافیایی قابل توجه بین این دو منطقه، اختلاف مشاهده شده را می‌توان به خشک شدن تالاب میانکاله و کاهش نقش تعدیل‌کننده آن یا همان (Lake effect)، در کنترل رخدادهای حدی دما در منطقه نسبت داد. آزمون‌های تشخیص نقطه تغییر، سال ۲۰۱۴ را به عنوان سال جهش در سطح آب تالاب و سال ۲۰۱۶ را برای شاخص‌های دمایی شناسایی کردند. تحلیل همبستگی متقاطع، وقفه دو ساله بین تغییرات هیدرولوژیکی و پاسخ اقلیمی را تأیید می‌کند. این امر با نتایج مطالعه Arij et al. (2025) بر روی همین تالاب همخوانی دارد. این تأخیر فاز را می‌توان به تفاوت ظرفیت گرمایی ویژه آب و خاک خشک نسبت داد؛ با کاهش سطح بدنه آبی، توان تالاب در تعدیل دمای محلی کاهش یافته و خاک خشک با جذب سریع‌تر انرژی خورشیدی، موجب افزایش دمای هوا شده است. در بررسی‌های به عمل آمده از نظر توسعه مناطق شهری مجاور تالاب مشخص شد که این عامل نیز در این منطقه نقش قابل توجهی نداشته است. بنابراین، اثر ترکیبی خشک شدن تالاب را می‌توان عامل اصلی تغییرات اقلیمی منطقه‌ای است.

مشاهدات میدانی و مصاحبه با ذینفعان کشاورزی، وقوع خساراتی نظیر گلدهی خارج از فصل، ترکیدن میوه‌ها، ریزش مرکبات، تنش آبی و هجوم آفات را تأیید می‌کنند. در سطح اجتماعی، خشک شدن تالاب موجب تغییر کاربری اراضی، ظهور کانون‌های گرد و غبار، کاهش جمعیت پرندگان مهاجر، تخریب اکوتوریسم و کاهش درآمد جوامع محلی شده است. تداوم این روند، ذخیره‌گاه ژنتیکی انار وحشی، گونه‌های پرند ارزشمند مانند قرقاول خزری و خوتکای اوراسیایی، و زیستگاه‌های تخم‌ریزی ماهیان بومی دریای خزر را به طور جدی تهدید می‌کند. به نظر می‌رسد کاهش ادامه‌دار تراز دریای کاسپین و به تبع آن کاهش پهنه آبی این اکوسیستم ارزشمند، آنرا به یک بوم سازگان خشکی تبدیل نماید. این موضوع در پژوهشهای Sharbaty and Ghanghermeh, (2016)، Sharbaty (2016,2018)، نیز مورد توجه قرار گرفته است.

با وجود فوریت بحران، تاکنون هیچ راهبرد جامع، علمی و چندبخشی برای مقابله با این چالش‌ها تدوین نشده است. راه‌حل‌های موجود اغلب نقطه‌ای، تک‌هدفه و فاقد ارزیابی اثرات جانبی از منظر توسعه پایدار هستند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که تغییرات اکوسیستم تالاب در چارچوبی یکپارچه شامل ابعاد محیط زیستی، اقتصادی و اجتماعی، به‌ویژه در قالب مدیریت یکپارچه منابع آب (IWRM11)، مورد ارزیابی قرار گیرد. تأکید باید بر عملکردهای کلیدی اکوسیستم تالاب باشد تا سرمایه‌گذاری‌های هدفمند، مبتنی بر شواهد و راهبردهای عملی برای کاهش چالش‌های حال و آینده هدایت شوند. در همین راستا پیشنهاد می‌شود آسایش اقلیمی و مصرف انرژی که مرتبط با تغییرات حدی دما در محیط شهری می‌باشند بررسی گردد. همچنین پژوهشی برای سازگاری با خشکی زدگی این تالاب و تالابهای مشابه بجای مقابله با آن، جهت کاهش پیامدهای مختلف آن صورت گیرد. ادامه این مسیر پژوهشی می‌تواند زمینه‌ساز توسعه مدل‌های پیش‌بینی خرداقلیم در تالاب‌های در معرض خشکیدگی و طراحی سیاست‌های تطبیقی در مدیریت منابع آب و اکوسیستم‌های حساس باشد.

۶- پی‌نوشت‌ها

1. International Union for Conservation of Nature
2. Expert Team on Climate Change Detection and Indices
3. Normalized Difference Water Index
4. Google Earth Engine
5. Near Infra-Red
6. Convective Condensation Level
7. Climate and Ocean: Variability, Predictability and Change
8. World Climate Research Program
9. Cumulative Deviation
10. Worsley Likelihood
11. Integrated Water Resources Management

۷- مراجع:

- Arij N, Latifi H, Fakhri A, Esmaili R (2025) Four decades of spatio-temporal trends in Miankaleh Wetland's water body and vegetation as revealed by remote sensing time series. *Ecological Informatics* 9103374. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103374>
- Barani-Pasian V, Pourakrami M, Fotouhi-Mehrabani B, Pourakrami S (2017) Analysis of the drying trend of Lake Urmia and its major impacts on surrounding settlements. *Journal of Rural Research*, 8(4): 587–606. <https://doi.org/10.22059/jrur.2017.63473> (In Persian)
- Bararkhanpour S, Ghorbani Kh, Salarijazi M, Rezaie Ghaleh L (2019) Analysis of Seasonal Changes in Extreme Temperatures Using Quantile Regression (Case Study: Hashem Abad Synoptic Meteorological Station, Gorgan). *J. Meteorol. Atmos. Sci.* 2(2):114-128 (In Persian)
- Bogale GA, Kassa AK, Maja MM (2025) Changes in climate extreme indices and agricultural drought monitoring in the semi-arid areas of Borana zone, southern Ethiopia. *Heliyon* 11. e42041 <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42041>
- Dashti S, Sabzghabaei GR, Jafarzadeh K, Bazmara Baleshti M (2019) Changes Detection Assessment of Miankaleh Coastal wetland by Landuse Planning Approach. *Wetland Ecobiology*, 10 (4): 5-20 <http://jweb.ahvaz.iau.ir/article-1-728-fa.html> (In Persian)
- Dixon M, Loh J, Davidson N, Beltrame C, Freeman R, Walpole M (2016) Tracking global change in ecosystem area: The Wetland Extent Trends index. *Biological Conservation*, 193: 27-35 DOI: [10.1016/j.biocon.2015.10.023](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.10.023)
- Ebrahimi Khoramabadi MJ, Baaghdeh m, Entezari A (2024) Evaluation of the trend of extreme temperature and precipitation indices in the central desert of Iran. *Journal of Environmental Sciences Studies* 9(3): 8961-8971 10.22034/jess.2024.412872.2108
- Ghorbani K, Ghanbarzadeh G, Salari Jazi M, Rezaei Ghaleh L, Valizadeh E (2023) Investigating the trends of extreme temperature events (case study: Hashemabad Gorgan Station). In *Proc. of 3rd National Conference on Environmental Changes (Coastal Water Resources Management)*, 27 Dec., Sari, Iran <https://civilica.com/doc/1927281> (In Persian)
- Guo YT, Chan KH, Qiu H, Wong EL.Y., Ho KF (2024) The risk of hospitalization associated with hot nights and excess nighttime heat in a subtropical metropolis: A time-series study in Hong Kong, 2000–2019. *The Lancet Regional Health - Western Pacific*, 51 <https://doi.org/10.1016/j.lanwpc.2024.101168>
- Hamzeh S, Torabi O (2022) Investigating the changes in the water body of Gorgan Bay and its relationship with precipitation and water level of the Caspian Sea by using remote sensing data, *Iranian Journal of Eco Hydrology*, 8(2): 475-484 DOI: [10.22059/ije.2021.302811.1335](https://doi.org/10.22059/ije.2021.302811.1335) (In Persian)
- Hassan WH, Khazaal ST, al-shammari MH (2024) Effect of Climate Change on Wetland Areas in West Iraq Using Satellite Data and GIS Techniques. *Civil Engineering Journal*.10(9): 2966-2978 DOI: [10.28991/CEJ-2024-010-09-013](https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-09-013)
- Junk WJ, An S, Finlayson C, Gopal B, Květ J, Mitchell S A., . . . Robarts R D (2013) Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: a synthesis. *Aquatic sciences* 75: 151-167 DOI: [10.1007/s00027-012-0278-z](https://doi.org/10.1007/s00027-012-0278-z)
- Karimi M, Shokoohi A (2025) Development of a Quantitative–Qualitative Model for Determining the Environmental Water Requirement of Wetlands. *Wetlands* 45, 109 <https://doi.org/10.1007/s13157-025-01984-y>
- Khoshnavan H (2020) Spatial and temporal variations of Coastal habitats in Gorgan Bay resulting from fluctuations in the Caspian Sea. *Scientific - Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 29(115): 127-138 <https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.47885> (In Persian)

- Kouhshahi R, Shahedi K, Alipour A (2019) Investigation of extreme precipitation indices as indicators of climate change in Mazandaran Province. In Proc. of 7th National Conference on Rainwater Catchment Systems, 962-971, 20-21 Feb., Tehran, Iran (In Persian)
- Liu Z, Qiu R, Zhang Q (2025) Differences in effects of varying compound extreme temperature and precipitation events on summer maize yield in North China. *Agricultural Water Management* 307: 109237 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109237>
- Modabberi H, Shokoohi A (2020) Determining the Environmental Water Needs of Amirkalayeh Wetland Based on a Holistic Approach Regarding Contradiction between Water Use for Agriculture and Wetland Conservation. *Iran-Water Resources Research* 16(3): 282-305 (In Persian)
- Modabberi H, Shokoohi A (2019) Determining Anzali Wetland Environmental Water Requirement Using Eco-Hydrologic Methods. *Iran-Water Resources Research* 15(3): 91-104 (In Persian)
- Nasaji Zavareh M, Ghermezcheshmeh B (2023) Assessment of spatial and temporal variability of extreme temperature by ETCCDI indices (North and West of Iran). *Journal of Environmental Water Engineering*, 9(1): 95-108 <https://doi.org/10.22034/jewe.2022.322509.1706> (In Persian)
- Rahimi M, Hejazi S (2018) Spatial and temporal analysis of trends in extreme temperature indices in Iran over the period 1960–2014. *International Journal of Climatology* 38(1): 272–282 <https://doi.org/10.1002/joc.5175> (In Persian)
- Sankaran A, Madhusudanan SG, Ndehedehe C, Nair ANGR (2024) Spatio-temporal Variability of Trends in Extreme Climatic Indices across India. *KSCE Journal of Civil Engineering* 28(6):2537-2551 DOI:[10.1007/s12205-024-1192-3](https://doi.org/10.1007/s12205-024-1192-3)
- Sharbaty S (2016) Review necessity of the Caspian Sea water level decreasing effects on the Gorgan Bay situation and solutions offer for the crisis overcoming in future years. *Journal of Utilization and Cultivation of Aquatics* 5(1): 83-105 DOI: [10.22069/japu.2017.11452.1310](https://doi.org/10.22069/japu.2017.11452.1310) (In Persian)
- sharbaty S (2018) Investigating the probable future of the Gorgan Bay after separation from the Caspian Sea from the perspective of ecological succession. *Journal of Utilization and Cultivation of Aquatics* 6(4): 41-53 DOI: [10.22069/japu.2018.14612.1426](https://doi.org/10.22069/japu.2018.14612.1426) (In Persian)
- Sharbaty S, Ghanghermeh A (2016) Forecasting the effect of decreasing long time trend of caspian sea water level on the life of gorgan bay. *Journal of environmental science and technology* 4 (67): 45-59 <https://sid.ir/paper/87176/en> (In Persian)
- Sharma N, Saini DK, Pushkar S, Somayanda I, Jagadish SVK, Anand A (2024) Reprogramming assimilate partitioning in the second half of the night supports grain filling in inferior spikelets under high night temperature stress in rice. *Rice Science* 31(5): 572–586 <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2024.06.003>
- Small C, Sloan S, Horton R (2001) Changes in surface air temperature caused by desiccation of the Aral Sea. *Journal of Climate* 14(3): 284–299 [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<0284:cisatc>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<0284:cisatc>2.0.co;2)
- Tsyganskaya V, Martinis S, Marzahn P, Ludwig R (2018) Detection of temporary flooded vegetation using Sentinel-1 time series data. *Remote Sensing* 10(8):1286 <https://doi.org/10.3390/rs10081286>
- WWF (2020) Living Planet Report 2020 - Bending the curve of biodiversity loss. WWF, Gland, Switzerland, 83 p
- Yin, H, Sun Y (2018) Characteristics of extreme temperature and precipitation in China in 2017 based on ETCCDI indices. *Advances in Climate Change Research* 9(4): 218-226 <https://doi.org/10.1016/j.accre.2019.01.001>

The Local Microclimate Response to Wetland Desiccation Based on Climate Extreme Indices (Case Study: Miankaleh Wetland)

Abstract:

This study investigates the impact of the desiccation of the Miankaleh Wetland on local climatic conditions. Analysis of satellite imagery and meteorological data from the Galogah Station over the period 2000 to 2024 indicates a 46% reduction in the wetland's area. An evaluation of 15 temperature extreme indices, including DTR, TXx, TNx, TX90p, SU, and TX10p, during the same period reveals a significant increasing trend in indices such as the warmest days, warmest nights, summer days, and the frequency of warm days. A two-year lag was identified between the year of a significant leap in wetland desiccation (2014) and the year of abrupt change in the aforementioned temperature indices (2016). This short temporal delay between the reduction in wetland area and the climatic response underscores the sensitivity of the regional ecosystem. Results from the Student's t-test at the 5% significance level demonstrate that the rate of change for the TXx and TX10p indices at the Galogah Station was 1.59 and 1.73 times greater, respectively, compared to the Sari Station during the year of the abrupt shift in these indices (2016). This comparison, along with an examination of urban development, suggests that the severe climatic changes in Galogah are primarily attributable to the wetland's desiccation, rather than global climate change or urbanization effects. The study concludes that the drying of the Miankaleh Wetland has played a direct and decisive role in intensifying local warming trends and disrupting the region's ecological balance.

Keywords: Miankaleh Wetland, Wetland Dedication, Extreme Temperature Indices, Regional Climate Responsiveness, Global Warming