



ارزیابی تغییرات مکانی-زمانی تالاب های چغاخور و سولگان با استفاده از تصاویر لندست (۲۰۱۶-۲۰۲۶) آیلین حاتمی سولگانی*^۱

دانشجوی کارشناسی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

نشانی: اصفهان بهارستان - ۸۱۴۳۳۹۶۱۸۶

پست الکترونیکی: ailinhmt8@gmail.com

چکیده:

تالاب چغاخور به عنوان یکی از مهم ترین اکوسیستم های تالابی ایران، در دهه های اخیر تحت تأثیر نوسانات اقلیمی و فشارهای انسانی دچار تغییرات شدید مکانی-زمانی شده است. پژوهش حاضر با هدف پایش همزمان تحولات پوشش گیاهی و پهنه های آبی این تالاب و حوضه آبخیز سولگان طی بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۶ انجام شد. بدین منظور، از سری زمانی تصاویر ماهواره ای لندست ۸ و ۹ استفاده گردید و شاخص های NDVI و NDWI پس از پیش پردازش های لازم محاسبه شدند. نتایج نشان داد که اکوسیستم منطقه الگوی سینوسی مشخصی را تجربه کرده است؛ به طوری که مساحت مناطق بدون پوشش گیاهی از ۹۹,۴۳ کیلومتر مربع در سال ۲۰۱۶ به حداقل مقدار خود (۱۱,۱۰ کیلومتر مربع) در سال ۲۰۲۲ رسید و سپس در سال ۲۰۲۶ مجدداً به ۱۲,۱۴ کیلومتر مربع افزایش یافت. تحلیل شاخص NDWI نیز رابطه معکوس و معناداری میان مساحت پهنه های آبی و خشکی را تأیید کرد که بیانگر وابستگی مستقیم سلامت اکولوژیک تالاب به رژیم هیدرولوژیکی حوضه سولگان است. یافته ها حاکی از آن است که اگرچه ترسالی های متوالی منجر به احیای موقت اکوسیستم در سال ۲۰۲۲ شد، اما افت مجدد شاخص ها در سال ۲۰۲۶ نشان دهنده ناپایداری این بهبود و احتمال نقش تنش های غیر اقلیمی نظیر ریزگردها است. در نهایت، تلفیق تصاویر لندست ۸ و ۹ با رویکرد چندشاخصه، ابزاری کارآمد برای رصد دینامیک تالاب ها در شرایط تغییر اقلیم معرفی می شود و مدیریت پایدار این اکوسیستم نیازمند اتخاذ راهبردهای تطبیقی مبتنی بر پایش مستمر و یکپارچه حوضه آبخیز است.

واژگان کلیدی: تالاب چغاخور، سنجش از دور، NDWI، NDVI، پایش مکانی-زمانی، حوضه سولگان، لندست ۹

۱-مقدمه

تالاب ها به عنوان اکوسیستم های حیاتی و حساس، نقشی کلیدی در تنظیم چرخه هیدرولوژیکی، حفظ تنوع زیستی و ارائه خدمات ارزشمند اکوسیستمی ایفا می کنند (Nouri-Kamari and Karami, 2025). با این حال، این توده های آبی در دهه های اخیر

^۱ نویسنده مسئول: (۱۰ بی نازنین MITRA-B)

تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی نظیر برداشت بی‌رویه آب و توسعه اراضی کشاورزی، نوسانات شدید مکانی-زمانی را تجربه کرده‌اند که پایش مستمر وضعیت آن‌ها را ضروری ساخته است (Eskandari-Damaneh et al., 1402). روش‌های سنتی پایش میدانی اگرچه از دقت بالایی برخوردارند، اما به دلیل محدودیت‌های دسترسی، هزینه‌بر بودن و عدم پوشش پیوسته مکانی-زمانی، کارایی لازم برای رصد دینامیک سریع تالاب‌ها را ندارند (Liu et al., 2023). در مقابل، فناوری سنجش از دور با بهره‌گیری از سری‌های زمانی تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی، امکان استخراج شاخص‌های طیفی نظیر NDVI و NDWI را فراهم آورده است که به عنوان ابزارهایی کارآمد و مقرون‌به‌صرفه، قابلیت ردیابی همزمان تحولات پوشش گیاهی و پهنه‌های آبی را در مقیاس حوضه آبخیز دارا می‌باشند (Ahuja and Soni, 2025). شاخص NDVI معیاری استاندارد برای ارزیابی سلامت و تراکم پوشش گیاهی است و مطالعات انجام‌شده در مراتع نیمه‌استپی استان چهارمحال و بختیاری نشان داده‌اند که اگرچه شاخص‌های متعددی مانند SAVI و EVI وجود دارند، اما NDVI در بازه‌های زمانی مشخص و متناسب با فنولوژی بومی منطقه، همچنان کارایی قابل قبولی در پایش تغییرات پوشش گیاهی دارد (Soreshjani-Samrani et al., 1404). همچنین، تحقیقات اختصاصی روی تالاب چغاخور نشان داده است که برآورد دقیق پارامترهای هیدرولوژیکی این تالاب نیازمند تلفیق داده‌های ماهواره‌ای با مشاهدات زمینی ایستگاه‌های هواشناسی مجاور (مانند ایستگاه ناگرو) است تا خطاهای ناشی از توپوگرافی کوهستانی و سایه‌اندازی کاهش یابد (Salami et al., 1401). از سوی دیگر، شاخص NDWI توانایی بالایی در تفکیک پهنه‌های آبی از سایر عوارض سطح زمین دارد و تلفیق آن با NDVI در مطالعات تالابی، نه تنها تصویر جامعی از تعامل متقابل آب و گیاه ارائه می‌دهد، بلکه امکان تحلیل اثرات تأخیری خشکسالی یا مدیریت حق‌آبه بر احیای اکوسیستم را نیز ممکن می‌سازد (Kalehri et al., 1403).

۲- مبانی نظری و پیشینه تجربی:

بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که پژوهش‌های متعددی با رویکردهای مختلف به پایش منابع آب و پوشش گیاهی پرداخته‌اند که هر یک ابعاد متفاوتی از دینامیک اکوسیستم‌های تالابی را روشن ساخته‌اند. برای نمونه، Eskandari-Damaneh et al. (2023) در مطالعه‌ای بر جنوب غرب ایران، کارایی تلفیق شاخص‌های MNDWI و NDVI حاصل از تصاویر لندست ۸ را برای پایش سیلاب‌های سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ اثبات کردند. آن‌ها با طبقه‌بندی مقادیر شاخص‌ها به پنج کلاس مساوی و مقایسه فصلی تصاویر، نشان دادند که استفاده همزمان از این دو شاخص، دقت تفکیک آب از سایه‌های کوهستانی و خاک‌های مرطوب را در مناطق مرطوب و تالابی به شدت افزایش می‌دهد؛ به طوری که در فوریه و مارس ۲۰۱۹، بیش از ۶۸ درصد مساحت منطقه در کلاس‌های آبی قرار گرفت که با الگوی فضایی سیلاب مطابقت داشت. این یافته مستقیماً با شرایط توپوگرافی حوضه چغاخور همخوانی دارد، جایی که سایه‌اندازی دامنه‌های زاگرس و نوسانات رطوبت خاک می‌تواند تفسیر تصاویر را با چالش مواجه کند. در گام بعدی، تمرکز بر یکپارچه‌سازی منابع داده‌ای برای درک جامع‌تر از خشکسالی اکولوژیک قرار گرفت. Kalehri et al. (۲۰۲۵) در دشت همدان، با بهره‌گیری از پلتفرم Google Earth Engine، داده‌های ماهواره‌ای GRACE (برای آب زیرزمینی)، MODIS (برای پوشش گیاهی) و Landsat8 را همزمان پردازش کردند و شاخص VCI را به عنوان معیاری از سلامت گیاهی محاسبه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که افت ۲۹ تا ۵ سانتی‌متری سطح آب زیرزمینی در بازه ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۶، همبستگی مستقیمی با گسترش شرایط خشکسالی متوسط تا شدید در نقشه‌های NDVI دارد. این رویکرد چندمنبعه ثابت کرد که نوسانات یک تالاب را نمی‌توان صرفاً با نگاه به سطح آب آن تفسیر کرد، بلکه باید رژیم کلی آب حوضه آبخیز و ذخایر زیرسطحی نیز به‌طور همزمان پایش شوند؛ نکته‌ای که

برای تالاب چغاخور که به شدت به ورودی‌های رودخانه سولگان و سفره‌های مجاور وابسته است، اهمیت راهبردی دارد. از سوی دیگر، تبیین روابط علی و معلولی میان این نوسانات و عوامل اقلیمی یا غیراقلیمی، عمق پژوهش را دوجندان می‌کند. Rezaei et al (۲۰۲۵) در کلان‌شهر کرمانشاه، با به کارگیری آزمون‌های مان-کندال و تیل-سن بر سری زمانی NDVI و EVI در بازه ۱۳۷ تا ۱۴۰، روند تغییرات فضای سبز را کمی‌سازی کردند. یافته قابل توجه آن‌ها این بود که اگرچه روند کلی نزولی اما از نظر آماری غیرمعنادار است، اما بیشترین همبستگی مثبت بین پوشش گیاهی و مجموع بارش «یک ماه قبل» از اوج سرسبزی وجود دارد؛ نکته‌ای تحلیلی که اهمیت بررسی تأخیر زمانی (Time-lag) اثر حق‌آبه و بارش بر احیای زیستگاه‌های اطراف تالاب را برجسته می‌کند. همچنین، نقش عوامل غیراقلیمی مانند ریزگردها نباید نادیده گرفته شود؛ Goldani et al (۲۰۲۴) در خوزستان با طبقه‌بندی نظارت‌شده کاربری اراضی، ثابت کردند که غلظت PM10 همبستگی منفی معناداری با تغییرات پوشش گیاهی (dNDVI) دارد و این رابطه در فصل تابستان به اوج خود می‌رسد که با توجه به موقعیت جغرافیایی چغاخور در معرض گردوغبار، یک متغیر کنترلی مهم محسوب می‌شود. نهایتاً، اعتبارسنجی منطقه‌ای انتخاب شاخص‌ها نیز حیاتی است؛ Soreshjani-Samrani et al (۲۰۲۵) در مراتع نیمه‌استپی تنگ صیاد چهارمحال و بختیاری نشان دادند که اگرچه NDVI پرکاربردترین شاخص است، اما برای گونه‌های عتارمی و مرتعی خاص استان، شاخص‌هایی مانند WDI و EVI در فصول مختلف عملکرد متفاوتی دارند و انتخاب شاخص باید مبتنی بر فنولوژی و نوع پوشش گیاهی بومی منطقه باشد.

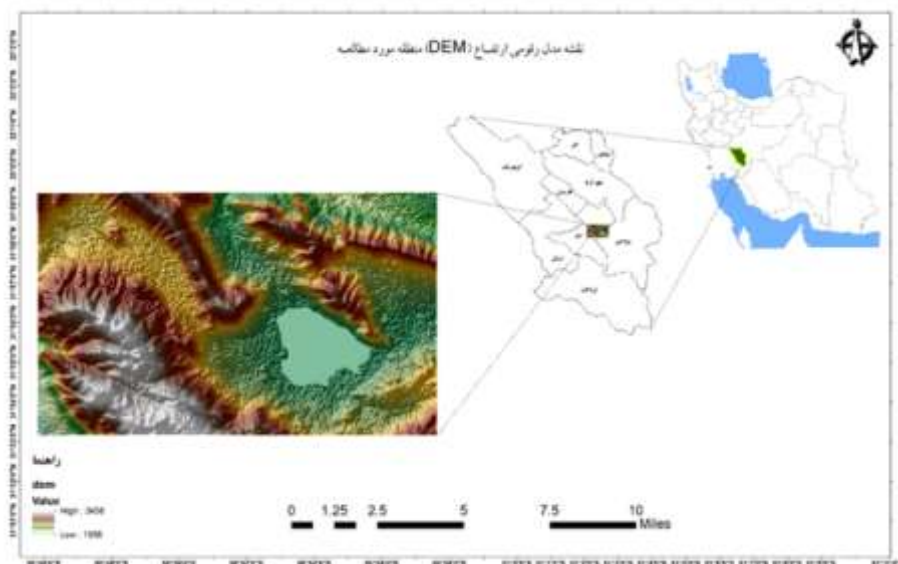
علی‌رغم ارزشمند بودن مطالعات فوق، فقدان پژوهشی که به صورت همزمان و در یک بازه زمانی بلندمدت (مانند ۲۰۱۶-۲۰۲۶)، تعامل دینامیک پهنه‌های آبی (NDWI) و سلامت پوشش گیاهی (NDVI) را در اکوسیستم بین‌المللی تالاب چغاخور و حوضه آبخیز منتهی به آن (سولگان) با رویکرد تحلیل روند آماری معنادار بررسی کرده باشد، احساس می‌شود. بیشتر پژوهش‌های پیشین یا بر یک مؤلفه تمرکز داشته‌اند و یا در مناطق جغرافیایی متفاوتی انجام شده‌اند که تعمیم نتایج آن‌ها به این تالاب خاص دشوار است. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف پایش تغییرات مکانی-زمانی شاخص‌های NDVI و NDWI در تالاب چغاخور و حوضه سولگان و تحلیل ارتباط آن‌ها با نوسانات هیدرولوژیکی و اقلیمی منطقه انجام شده است تا الگوی پاسخ‌دهی این اکوسیستم به محرک‌های طبیعی و انسانی را آشکار سازد.

۳-روش تحقیق:

۱-۲-منطقه مورد مطالعه:

محدوده مطالعاتی این پژوهش شامل اکوسیستم بین‌المللی تالاب چغاخور و حوضه آبخیز منتهی به آن (سد و تالاب غربی سولگان) در استان چهارمحال و بختیاری است. این منطقه از نظر توپوگرافی در دامنه شمالی رشته‌کوه زاگرس مرکزی و در یک دشت میان‌کوهستانی واقع شده است که توسط ارتفاعات مرتفع (با بیشینه ارتفاع حدود ۳۴۵۸ متر طبق مدل رقومی ارتفاع) احاطه شده است. مختصات جغرافیایی هسته اصلی تالاب تقریباً بین طول‌های شرقی ۴۶°۵۰' تا ۴۶°۵۱' و عرض‌های شمالی ۵۱°۳۱' تا ۳۰°۳۲' قرار دارد (شکل ۱). این موقعیت خاص کاسه‌مانند و محصور شدن توسط شیب‌های تند در سه جهت شمال، غرب و جنوب، موجب شکل‌گیری یک سیستم هیدرولوژیکی بسته شده است که نوسانات پوشش گیاهی (NDVI) و پهنه‌های آبی (NDWI) در آن وابستگی مستقیمی به رواناب‌های فصلی و تغذیه زیرسطحی از ارتفاعات بالادست دارد. به منظور تحلیل دقیق‌تر دینامیک مکانی-زمانی شاخص‌های طیفی، علاوه بر محدوده اصلی تالاب چغاخور (با مساحت تقریبی ۱۴۵ هکتار) نوری کم‌ری و کرمی، (۲۰۲۵)، کل حوضه آبخیز سولگان نیز در گستره مطالعاتی لحاظ گردیده

است. انتخاب این گستره وسیع تر ضروری بود زیرا رژیم هیدرولوژیکی و اکولوژیکی تالاب چغاخور به شدت تحت تأثیر کاربری اراضی، فرسایش خاک و تغییرات پوشش گیاهی در بالادست حوضه سولگان قرار دارد. تنوع ارتفاعی قابل توجه منطقه (از حدود ۱۹۵۶ متر در کف تالاب تا بیش از ۳۴۰۰ متر در قله‌ها) باعث ایجاد میکروکلیمهای محلی و تفاوت معنادار در توزیع فضایی NDVI شده است؛ به‌طوری‌که مناطق پایین‌دست و حاشیه تالاب عمدتاً دارای پوشش گیاهی آب‌دوست و مراتع انبوه هستند، در حالی که با افزایش شیب و ارتفاع، نوع پوشش گیاهی به سمت گونه‌های مقاوم به خشکی و عتارمی تغییر می‌کند. بنابراین، تمرکز صرف بر مرزهای سیاسی یا اداری تالاب بدون در نظر گرفتن پیوستگی اکولوژیکی و توپوگرافی حوضه سولگان، می‌تواند منجر به خطا در تفسیر روندهای بلندمدت شاخص‌های سنجش از دور گردد. (شکل ۱)



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه مورد مطالعه. منبع: نویسنده

۲-۲- روش تحقیق:

به منظور پایش تغییرات مکانی-زمانی پوشش گیاهی و پهنه‌های آبی تالاب چغاخور و حوضه سولگان، از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ (OLI/TIRS) و لندست ۹ (OLI-2/TIRS-2) استفاده شد. تصاویر مربوط به چهار بازه زمانی منتخب شامل سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۹، ۲۰۲۲ و ۲۰۲۶ از پایگاه داده مرکز زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) دریافت گردید. معیار اصلی انتخاب تصاویر، پوشش ابری کمتر از ۱۰ درصد و تطابق زمانی با اوج فصل رشد گیاهی (ماه‌های اردیبهشت تا خرداد) بود تا خطاهای ناشی از نوسانات فنولوژیک به حداقل برسد و مقایسه بین سالانه امکان‌پذیر گردد (رضایی و همکاران، ۲۰۲۵؛ نوری‌کمری و کرمی، ۲۰۲۵). همچنین جهت تحلیل ویژگی‌های توپوگرافی مؤثر بر توزیع آب و پوشش گیاهی، از مدل رقومی ارتفاع (DEM) با تفکیک مکانی ۳۰ متر از پایگاه داده مرکز زمین‌شناسی ایالات متحده دریافت شد.

تصاویر خام پس از دانلود، وارد محیط نرم افزار ArcGIS 10.8 شدند. ابتدا عملیات اصلاح هندسی و انطباق مختصات بر روی سامانه تصویربرداری جهانی WGS_1984_UTM_Zone_39N انجام گرفت. سپس جهت حذف اثرات جوی (پراکندگی و جذب) و افزایش دقت مقادیر بازتابی سطوح، تصحیح اتمسفری اعمال گردید. این مرحله برای محاسبه دقیق شاخص‌های طیفی و مقایسه‌پذیری داده‌ها در بازه‌های زمانی مختلف ضروری است (اسکندری دامنه و همکاران، ۲۰۲۳).

به منظور کمی‌سازی وضعیت اکوسیستم، دو شاخص اصلی محاسبه گردید:

شاخص پوشش گیاهی تفاضل نرمال شده (NDVI): این شاخص که از رابطه بین باند مادون قرمز نزدیک (NIR - باند ۵ در لندست ۸ و ۹) و باند قرمز (Red - باند ۴) حاصل می‌شود، معیاری استاندارد برای ارزیابی سلامت، تراکم و فعالیت فتوسنتزی پوشش گیاهی است. مقادیر NDVI در بازه ۱- تا ۱+ متغیر است؛ به طوری که مقادیر مثبت بالاتر نشان‌دهنده فتوسنتز فعال و تراکم بیشتر گیاهان است (سبحانی و ملانوری، ۲۰۳). رابطه محاسبه NDVI به صورت زیر است:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (۱)$$

شاخص تفاوت نرمال شده آب (NDWI): جهت جداسازی دقیق پهنه‌های آبی از سایر عوارض سطح زمین (مانند سایه کوهستان و خاک مرطوب)، از شاخص NDWI استفاده شد. این شاخص با بهره‌گیری از باند سبز (Green - باند ۳) و باند مادون قرمز نزدیک (NIR)، حساسیت بالایی در تشخیص رطوبت و منابع آب سطحی دارد. استفاده از باند سبز به جای NIR در مخرج کسر، باعث تقویت سیگنال آب و تضعیف سیگنال پوشش گیاهی می‌شود که برای مناطق تالابی با پوشش گیاهی حاشیه‌ای مانند چغاخور بسیار کارآمد است (آهوجا و سونی، ۲۰۲). مقادیر مثبت NDWI معمولاً نشان‌دهنده حضور آب هستند. رابطه محاسبه NDWI به صورت زیر است:

$$NDWI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (۲)$$

پس از محاسبه شاخص‌ها، به منظور تسهیل در تفسیر بصری و تحلیل کمی تغییرات اکوسیستم، مقادیر پیوسته NDVI با استفاده از روش Natural Breaks (Jenks) در چهار کلاس مجزا شامل «بدون پوشش گیاهی»، «پوشش گیاهی تنک»، «پوشش گیاهی متوسط» و «پوشش گیاهی معمولی» طبقه‌بندی شد. این روش مرزهای طبیعی داده‌ها را شناسایی کرده و برای نمایش نوسانات سلامت اکوسیستم تالاب چغاخور و حوضه سولگان در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۶ مناسب است.

دانلود تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 OLI/TIRS و Landsat 9 OLI-2/TIRS (سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۹، ۲۰۲۲، ۲۰۲۶)

پایگاه داده مرکز زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS)

دانلود مدل رقومی ارتفاع (DEM) با تفکیک مکانی ۳۰ متر

وارد کردن تصاویر به محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8

اصلاح هندسی و انطباق مختصات روی سیستم UTM Zone 39N

انجام تصحیح اتمسفری

و نمودار روند، همراه با نتیجه‌گیری NDVI/NDWI نمایش نقشه‌های

مدیریتی و پیشنهادات پژوهشی

محاسبه شاخص NDWI

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$$

محاسبه شاخص NDVI

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

تحلیل کمی و مکانی:

استخراج مساحت طبقات و تولید نقشه‌ها و نمودارهای تغییرات زمانی.

شکل ۲. فلوجارت مراحل پژوهش

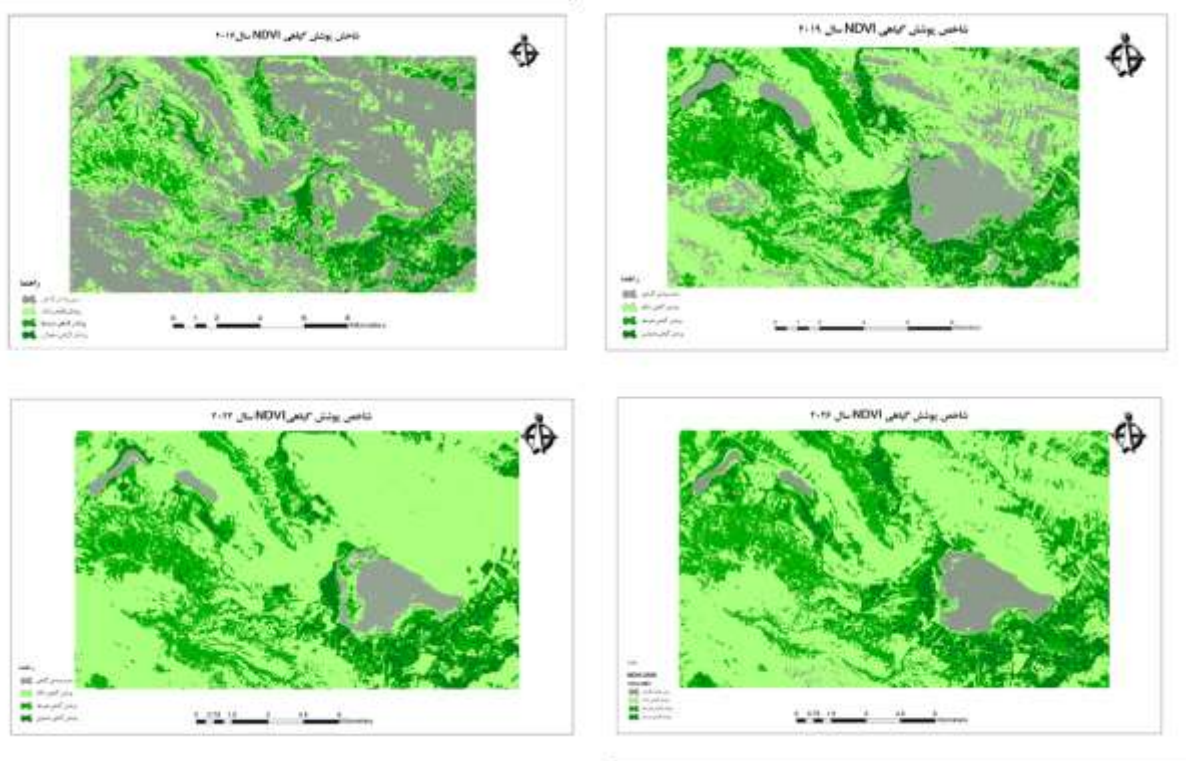
۴- یافته ها:

بررسی الگوی توزیع مکانی شاخص NDVI در چهار بازه زمانی منتخب (شکل ۳) نشان دهنده نوسانات شدید و معنادار در سلامت اکوسیستم تالاب چغاخور و حوضه سولگان طی دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۶ است. همان طور که در نقشه سال ۲۰۱۶ مشاهده می شود، بخش وسیعی از منطقه (حدود ۹۹,۴۳ کیلومتر مربع) فاقد پوشش گیاهی بوده که بیانگر شرایط بحرانی هیدرولوژیکی یا خشکسالی شدید در آن سال است؛ یافته ای که با نتایج مطالعات بلندمدت Nouri-Kamari and Karami (۲۰۲۵) درباره کاهش سطح آب و پوشش گیاهی تالاب چغاخور پس از سال ۲۰۱۷ همخوانی کامل دارد. در مقابل، نقشه سال ۲۰۲۲ نمایانگر نقطه عطف احیای اکولوژیک منطقه است؛ به طوری که مساحت کلاس «پوشش گیاهی تنک» با رشدی چشمگیر به ۱۳۷,۳۱ کیلومتر مربع رسیده و همزمان مساحت مناطق بدون پوشش به حداقل خود (۱۱,۱ کیلومتر مربع) تقلیل یافته است. این بهبود ناگهانی احتمالاً ناشی از ترسالی های متوالی و مدیریت بهینه حق آبه در آن بازه زمانی بوده که تأثیر مستقیم آن بر رویش گیاهان آب دوست حاشیه تالاب مشهود است.

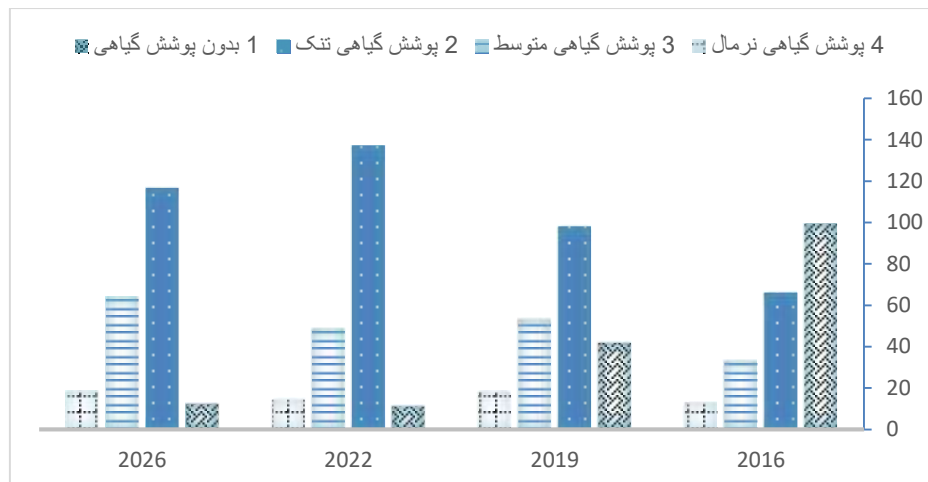
با وجود وضعیت مطلوب سال ۲۰۲۲، نقشه سال ۲۰۲۶ نشان دهنده آغاز یک روند نزولی نسبی است؛ مساحت پوشش تنک از حداکثر مقدار خود در سال قبل (۱۳۷,۳۱ کیلومتر مربع) به ۱۱۶,۷ کیلومتر مربع کاهش یافته و مساحت «بدون پوشش گیاهی» مجدداً از حداقل مقدار خود (۱۱,۱۰ کیلومتر مربع) به ۱۲,۱۴ کیلومتر مربع افزایش پیدا کرده است. این نوسان در حالی رخ داده که کلاس «پوشش گیاهی معمولی» کمترین تغییرات مطلق را تجربه کرده و همواره بین ۱۲,۹۲ تا ۱۸,۶۴ کیلومتر مربع در نوسان بوده است. تحلیل روند تغییرات مساحت طبقات مختلف در نمودار ۱ نیز این الگوی سینوسی را تأیید می کند؛ به گونه ای که قله نمودار مربوط به پوشش تنک در سال ۲۰۲۲ و دره عمیق مربوط به مناطق بدون پوشش نیز در همین سال دیده می شود. مقایسه این یافته ها با پژوهش Eskandari-Damaneh et al (۲۰۲۳) نشان می دهد که تلفیق شاخص های آبی و گیاهی در جنوب غرب ایران، حساسیت بالایی نسبت به نوسانات فصلی و سالانه داشته و تغییرات ثبت شده در نقشه ها، بازتاب واقعی دینامیک اکوسیستم تالابی است.

همچنین، با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقه در معرض گردوغبار، افت نسبی پوشش گیاهی در سال ۲۰۲۶ ممکن است تحت تأثیر تنش های غیراقلیمی نیز باشد. همان طور که Goldani et al (۲۰۲۴) در خوزستان اثبات کردند، غلظت PM10 همبستگی منفی معناداری با تغییرات NDVI دارد و این رابطه در فصول گرم به اوج می رسد؛ بنابراین کاهش مساحت پوشش تنک در سال ۲۰۲۶ لزوماً تنها ناشی از کم آبی نیست و می تواند ترکیبی از عوامل اقلیمی و آلودگی هوا باشد. علاوه بر این، مطالعه Kalehri et al (۲۰۲۵) تأکید می کند که نوسانات تالاب ها را نمی توان بدون در نظر گرفتن رژیم کلی آب حوضه تفسیر کرد؛ لذا بهبود و زوال مشاهده شده در نقشه های NDVI، واکنشی هماهنگ به تغییرات ذخیره آب زیرزمینی و رواناب های ورودی از حوضه سولگان است.

در مجموع، تلفیق نقشه‌های فضایی و نمودار تغییرات زمانی نشان می‌دهد که اکوسیستم تالاب چغاخور و حوضه سولگان در بازه ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۶ از یک فاز بحران (۲۰۱۶) به یک فاز احیا (۲۰۲۲) و سپس به یک فاز تثبیت با نشانه‌های تنش مجدد (۲۰۲۶) وارد شده است. این الگوی پاسخ‌دهی، اهمیت پایش مستمر و چندمنبعه را برای مدیریت پایدار این اکوسیستم بین‌المللی دوچندان می‌کند (شکل ۳).



شکل ۳. نقشه‌های توزیع مکانی طبقات پوشش گیاهی (NDVI) در تالاب چغاخور و حوضه سولگان طی دوره ۲۰۱۶ تا



نمودار ۱. نمودار تغییرات زمانی مساحت (کیلومتر مربع) طبقات مختلف پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه

طی بازه ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۶

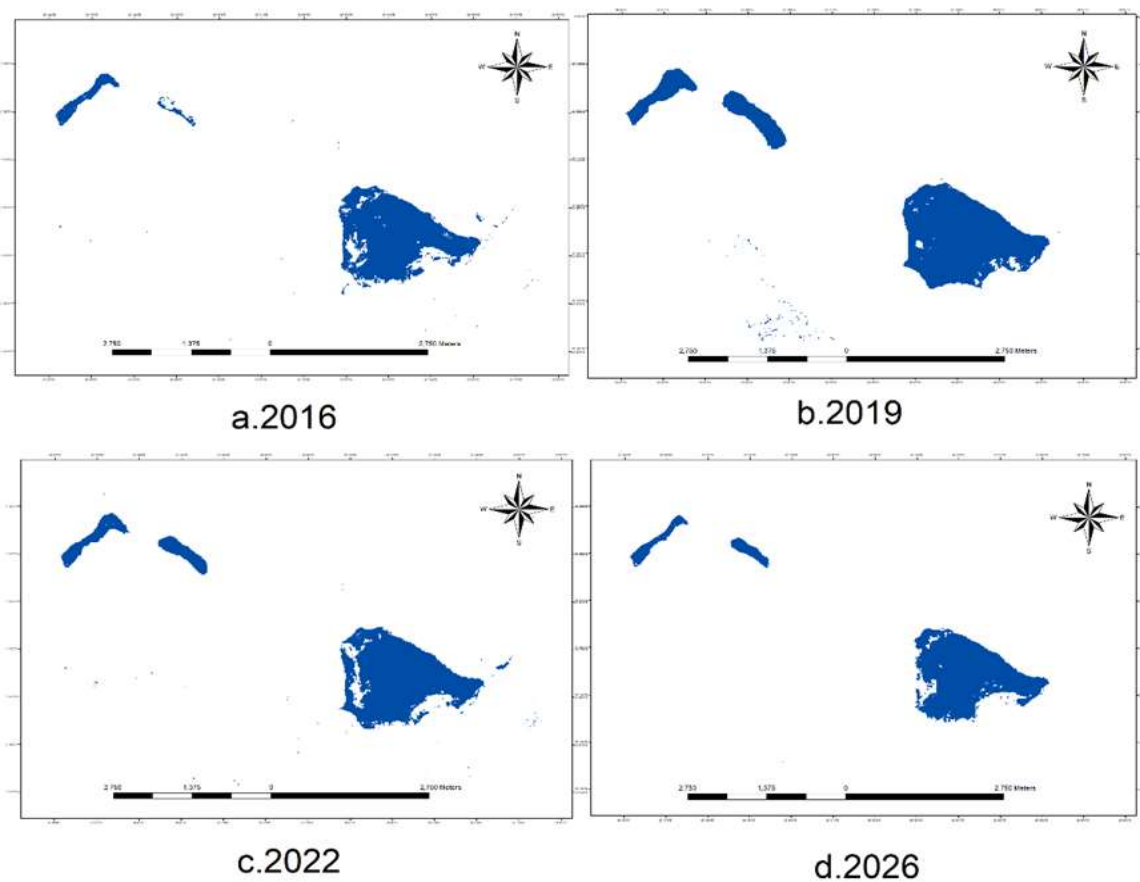
پایش مکانی-زمانی پهنه‌های آبی (NDWI)

تحلیل سری زمانی شاخص NDWI در چهار بازه زمانی منتخب (شکل ۴) نشان‌دهنده نوسانات شدید هیدرولوژیکی در تالاب چغاخور و حوضه سولگان طی دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۶ است. همان‌طور که در نقشه سال ۲۰۱۶ مشاهده می‌شود، مساحت پهنه آبی اصلی تالاب به حداقل مقدار خود رسیده بود که بیانگر خشکسالی هیدرولوژیکی شدید و کاهش ورودی‌های رواناب در آن سال است؛ یافته‌ای که با نتایج پژوهش Nouri-Kamari and Karami (۲۰۲۵) درباره کاهش سطح آب تالاب چغاخور پس از سال ۲۰۰۷ همخوانی کامل دارد. در مقابل، نقشه سال ۲۰۲۲ نمایانگر نقطه عطف احیای هیدرولوژیکی منطقه است؛ به‌طوری‌که مساحت پهنه آبی تالاب چغاخور و مخزن سد سولگان با رشدی چشمگیر افزایش یافت و مرزهای آبی به طور واضحی گسترش پیدا کردند. این بهبود ناگهانی احتمالاً ناشی از ترسالی‌های متوالی و مدیریت بهینه حق‌آبه در آن بازه زمانی بوده که تأثیر مستقیم آن بر گسترش زیستگاه‌های آبی مشهود است.

با وجود وضعیت مطلوب سال ۲۰۲۲، نقشه سال ۲۰۲۶ نشان‌دهنده آغاز یک روند نزولی نسبی در سطح آب است؛ مساحت پهنه آبی نسبت به سال پایه کاهش یافته و حاشیه‌های تالاب مجدداً دچار عقب‌نشینی شده‌اند. تحلیل روند تغییرات مساحت پهنه‌های آبی در نمودار ۲ نیز این الگوی سینوسی را تأیید می‌کند؛ به‌گونه‌ای که قله نمودار مربوط به حداکثر مساحت آب در سال ۲۰۲۲ و دره عمیق مربوط به کمترین مساحت در سال ۲۰۲۶ دیده می‌شود. مقایسه این یافته‌ها با پژوهش Eskandari-Damaneh et al. (۲۰۲۳) نشان می‌دهد که تلفیق شاخص‌های آبی و گیاهی در جنوب غرب ایران، حساسیت بالایی نسبت به نوسانات فصلی و سالانه داشته و تغییرات ثبت‌شده در نقشه‌های NDWI، بازتاب واقعی دینامیک هیدرولوژیکی اکوسیستم تالابی است.

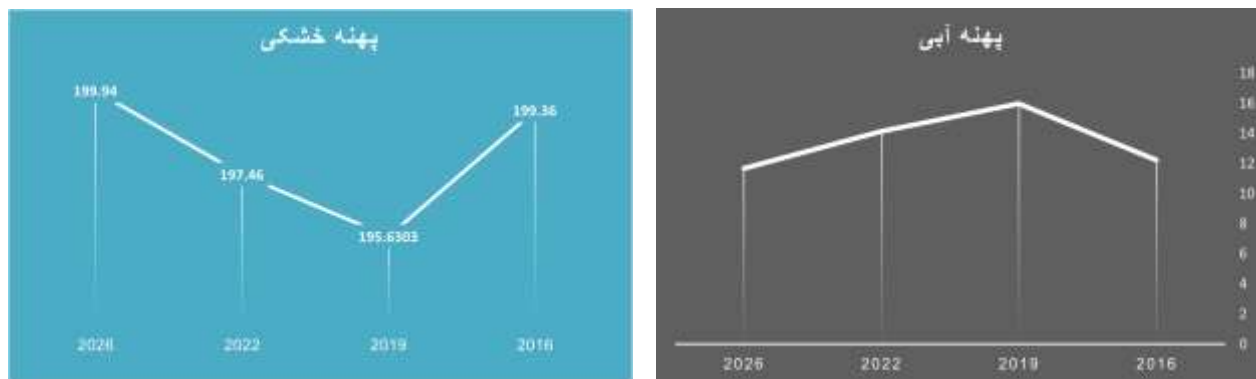
همچنین، بررسی نقشه ترکیبی با مدل رقومی ارتفاع (DEM) نشان داد که نوسانات هیدرولوژیکی نه تنها محدود به تالاب اصلی است، بلکه مخزن سد سولگان و تالاب غربی سولگان را نیز تحت تأثیر قرار داده است. این امر ضرورت نگاه حوضه‌آبخیزی به مدیریت تالاب چغاخور را برجسته می‌کند؛ چرا که همان‌طور که Kalehri et al. (۲۰۲۵) تأکید کرده‌اند،

نوسانات تالاب‌ها را نمی‌توان بدون در نظر گرفتن رژیم کلی آب حوضه و ذخایر زیرسطحی تفسیر کرد. لذا بهبود و زوال مشاهده‌شده در نقشه‌های NDWI، واکنشی هماهنگ به تغییرات ذخیره آب زیرزمینی و رواناب‌های ورودی از حوضه سولگان است و پایش مستمر این پهنه‌ها برای مدیریت پایدار منابع آب در شرایط تغییر اقلیم اجتناب‌ناپذیر است (شکل ۴) (نمودار ۲).



شکل ۴. نقشه‌های توزیع مکانی پهنه‌های آبی تالاب چغاخور و حوضه سولگان در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۶

NDWI با استفاده از شاخص



نمودار ۲. نمودار تغییرات زمانی مساحت پهنه‌های آبی و خشکی در منطقه مورد مطالعه طی دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۶ (حاصل از شاخص NDWI)

۵- نتیجه گیری:

پایش همزمان NDVI و NDWI در بازه ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۶ نشان داد که اکوسیستم تالاب چغاخور رفتاری کاملاً وابسته به نوسانات هیدرولوژیکی-اقلیمی دارد و تغییرات پوشش گیاهی واکنشی فوری به رژیم بارش و سطح آب است. همزمانی کاهش پهنه آبی در سال ۲۰۱۶ با غالبیت کلاس «بدون پوشش گیاهی» (۹۹,۴ کیلومتر مربع)، الگوی خشکسالی هیدرولوژیکی-اکولوژیکی را تأیید میکند. نقطه عطف احیا در ۲۰۲۲ نشاندهنده ظرفیت بازیابی طبیعی است، اما افت مجدد در ۲۰۲۶ هشدار میدهد که این احیا پاسخی موقت به ترسالیهای گذرا بوده و ثبات بلندمدت ندارد. تحلیل رابطه معکوس آب و خشکی، حساسیت شدید زیستگاههای حاشیهای را آشکار ساخت و تأکید کرد که تفسیر کلی NDVI بدون تفکیک طبقات پوششی و ویژگیهای بومی، گمراه کننده خواهد بود.

کاربرد عملی این یافته ها، تدوین سیستم هشدار سریع برای مدیریت حقایق تالاب بر اساس پیش بینی های فصلی بارش است. همچنین نتایج میتواند در بازنگری طرح های احیای دریاچه ها و تالاب های زاگرس به عنوان شاخصی برای تشخیص احیای واقعی از احیای کاذب اقلیمی به کار رود. نویسندگان پیشنهاد میکنند در پژوهش های آتی، بررسی تأخیر زمانی اثر بارش بر NDVI و نیز اعتبارسنجی زمینی شاخص ها با تمرکز بر گونه های شاخص منطقه در اولویت قرار گیرد. بهره گیری از پلتفرم GEE برای تحلیل های چندمنبعه بلندمدت نیز رویکردی کارآمد خواهد بود. از محدودیت های تحقیق میتوان به وابستگی داده ها به تصاویر ماهواره های بدون پیمایش میدانی همزمان اشاره کرد؛ با این حال، استفاده همزمان از دو سنجنده لندست ۸ و ۹ و تلفیق دو شاخص گیاهی و آبی، نقطه قوت روش شناختی این پژوهش محسوب میشود که اعتبار تفکیک کلاس ها را افزایش داده است.

۶- منابع:

۱. عباس‌نژاد، احمد، مرادی، مسعود، و خسروی، فرشته. (۱۴۰۱). بررسی روند تغییرات سربسزی پوشش گیاهی (Greening و Browning) با استفاده از سری زمانی MODIS-NDVI در استان مازندران. مطالعات علوم محیط زیست، ۹(۳)، ۴۸۸۱-۴۸۸۸.
۲. ارخیا، سعید، سواسری، محمدباقر، و عماددیان، سعید. (۱۴۰۱). بررسی شاخص‌های ناشی از فناوری سنجش از دور در ارزیابی خشکسالی با استفاده از تصاویر مادیس (مطالعه موردی: استان‌های قم، اصفهان، چهارمحال و بختیاری و مرکزی). فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۱(۳)، ۱۸۹-۲۲۴.
۳. اسکندری دامنه، هادی، برخوری، سعید، اژدری، زهرا، ناوکی، عبدالوحد، اسکندری دامنه، حامد، و خسروی، حسن. (۱۴۰۲). پایش تغییرات مکانی و زمانی سیلاب و پهنه‌های آبی با استفاده از شاخص‌های مستخرج از ماهواره لندست (مطالعه موردی: جنوب غرب ایران). مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۳(۳)، ۴۹-۶۲.
۴. بهرامی، حسین، قارفرد، حسن، ملکیان، آرش، غلامی، حمید، و طهماسبی، پژمان. (۱۳۹۵). روش تحلیل عاملی در اولویت‌بندی معیارهای سنجش تخریب سرزمین در حوضه آبخیز کارون. مجله برنامه ریزی و آمایش فضا، ۲۰(۲)، ۸۷-۱۱۱.
۵. خدائی، عطا، و زندی، رحمان. (۱۴۰۲). پایش تغییرات پوشش گیاهی و ارتباط آن با دمای سطح زمین و کاربری اراضی در شهرستان خداآفرین و کلیبر با استفاده از فناوری سنجش از دور. نشریه محیط زیست طبیعی، ۷۷(۱)، ۵۹-۷۳.
۶. رایگانی، بهزاد، ارزانی، حسین، حیدری علمدارلو، اسماعیل، و مقدمی، محمد مهدی. (۱۳۹۸). کاربرد سنجش از دور به منظور ارزیابی تغییر اقلیم بر تولید و فنولوژی گیاهان (منطقه مورد مطالعه: استان تهران). مرتع، ۱۳(۳)، ۴۴۹-۴۶۰.
۷. رضانی قوام‌آبادی، محمدحسین، و سنایی‌پور، سعید. (۱۳۹۲). بررسی حقوقی پابندی ایران به تعهد استفاده معقول از دریاچه ارومیه با تأکید بر کنوانسیون رامسر. مجله مطالعات حقوقی دانشگاه شیراز، ۵(۳)، ۱-۲۴.

۸. زارع خورمیزی، هادی، و غفاریان مالمیری، حمیدرضا. (۱۳۹۹). بررسی تغییرات مؤلفه‌های فنولوژیک پوشش گیاهی ایران در پاسخ به تغییرات اقلیمی با استفاده از NDVI سنجنده AVHRR در دوره زمانی ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۸. سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۱(۴)، ۸۷-۱۱۳.
۹. سلطانی، هژیر، مهدوی، سیده خدیجه، عبدالله‌زاده، غلامحسین، و سوری، مهشید. (۱۴۰۲). تعیین کننده‌های پایداری اجتماعی مدیریت مرتع در بین بهره‌برداران حوزه آبخیز چغاخور استان چهارمحال و بختیاری. نشریه حفاظت زیست بوم گیاهان، ۱۱(۲۲)، ۱۸-۳۳.
۱۰. سورشجانی سامانی، راضیه، نقی‌پور، علی‌اصغر، طهماسبی، پژمان، و حیدری قهفرخی، زهرا. (۱۴۰۴). ارزیابی قابلیت تصاویر ماهواره‌ای لندست در برآورد تولید و پوشش اشکال مختلف رویشی. نشریه حفاظت زیست بوم گیاهان، ۱۳(۲۷)، ۱۳۹-۱۲۵.
۱۱. شیرازی، میترا، اخوان، محمد، متین‌فر، حمیدرضا، و نخکش، منصور. (۱۳۹۹). مقایسه روش‌های کاهش مقیاس تصویر MODIS و OLI برای تشخیص گردوغبار صنعتی. تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۲۷(۳)، ۱-۱۵.
۱۲. صوفی، مجید، و علیجانی، بهلول. (۱۳۹۱). تغییر اقلیم در ناهمواری‌های زاگرس. فصلنامه سرزمین، ۹(۳۴)، ۴۷-۶۶.
۱۳. طهماسبی، پژمان، ابراهیمی، عطاله، فعال، مهدی، و یارعلی، نبی. (۱۳۹۰). بررسی مدل‌های رگرسیونی در برآورد تولید گیاهان مرتعی. مجله علمی پژوهشی مرتع، ۵(۲)، ۱۳۷-۱۴۶.
۱۴. عطاقر، رسول، اسلامی، ابراهیم، پیرصاحب، مهدی، و اسدی، فرهاد. (۱۳۹۳). بررسی روند تغییرات غلظت ذرات معلق (PM10) و تعیین شاخص کیفیت هوا در شهر کرمانشاه. فصلنامه بهداشت در عرصه، ۲(۱)، ۱۹-۲۸.
۱۵. کابلی‌زاده، مصطفی، رنگزن، کاظم، و محمدی، شاهین. (۱۳۹۷). کاربرد تلفیق تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ و سنتینل-۲ در پایش محیطی. سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۹(۳)، ۱-۱۵.
۱۶. گلدانی، مجتبی، شاد، روزبه، و دانش، شهناز. (۱۴۰۳). ارزیابی تأثیر PM10 بر روی تغییرات NDVI بر اساس پردازش تصاویر ماهواره‌ای در استان خوزستان. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۸(۳)، ۴۷۷-۴۸۸.
۱۷. میراحمدی، اکبر، یزدان‌پناه، حجت‌اله، و مومنی شهرکی، مهدی. (۱۴۰۰). ارزیابی روش‌های هموارسازی برای بازسازی سری زمانی NDVI و برآورد فنولوژی از داده‌های ماهواره لندست ۸. فصلنامه جغرافیا، ۱۹(۷۱)، ۱۰۹-۱۲۷.
۱۸. نجفی، زینب، درویش‌صفی، علی‌اصغر، فاتحی، پرویز، و عطارد، پدرام. (۱۳۹۹). بررسی روند پویایی پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر ماهواره لندست در کلانشهر تهران. مجله جنگل ایران، ۱۲(۲)، ۲۵۷-۲۷۰.
۱۹. نیک‌پور، نورالله، نگارش، حسین، فتوحی، صمد، حسینی، زین‌العابدین، و بهرامی، شهرام. (۱۳۹۷). پایش روند تغییرات شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، یکی از مهمترین شاخص‌های تخریب سرزمین در استان ایلام. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۵(۴)، ۲۱-۴۸.
۲۰. نوری‌کمری، عباس، و کرمی، حمیدرضا. (۱۴۴). پایش بلندمدت تغییرات سطح آب و پوشش گیاهی تالاب بین‌المللی چغاخور با استفاده از شاخص SPI و سنجش از دور. مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۶(۱)، ۱-۲۰.

21. Ahuja, A., & Soni, R. (2025). Seasonal dynamics of land surface temperature and its relationship with vegetation (NDVI), water (NDWI) and built-up (NDBI) across Indore city, India. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1579, 012003.

22. Bala, R., Pratap Yadav, V., Nagesh Kumar, D., & Prasad, R. (2024). Exploring the relationship of land surface parameters and air pollutants with land surface temperature in different cities using satellite data. *Advances in Space Research*, 74(7), 2958-2975.
23. Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., Wagner, W., Naeimi, V., Bartalis, Z., & Hasenauer, S. (2010). Improving runoff prediction through the assimilation of the ASCAT soil moisture product. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(10), 1881-1893.
24. Chen, S., Zhang, L., Hu, X., Meng, Q., Qian, J., & Gao, J. (2023). A spatiotemporal fusion model of land surface temperature based on pixel long time-series regression: Expanding inputs for efficient generation of robust fused results. *Remote Sensing*, 15(21), 5211.
25. Chetty, V., Sabarinath, D., & Manonmani, I. K. (2024). Urban Heat Island effect and Urban Thermal Field Variance Index phenomenon at the heart of 'Chicken's Neck Corridor' of India. *Urban Climate*, 54, 1-18.
26. Jönsson, P., & Eklundh, L. (2004). TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, 30(8), 833-845.
27. Liu, Z., Chen, Y., & Chen, C. (2023). Analysis of the spatiotemporal characteristics and influencing factors of the NDVI based on the GEE cloud platform and Landsat images. *Remote Sensing*, 15(20), 4980.
28. Moltó, E. (2022). Fusion of different image sources for improved monitoring of agricultural plots. *Sensors*, 22(17), 6642.
29. Salami, M., Ghorbani, B., Radfar, M., & Samadi-Boroujeni, H. (2022). Investigation and Sensitivity analysis of experimental methods for estimating evaporation from free surface of Choghakhor lake. *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(3), 31-45.
30. Vanzyl, W. H., De Jager, J. M., & Maree, C. J. (1989). The relationship between daylight evaporation from short vegetation and the USWB Class A pan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 46(1-2), 107-118.
31. Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033.
32. Zhou, J., Chen, J., Chen, X., Zhu, X., Qiu, Y., Song, H., ... & Cui, X. (2021). Sensitivity of six typical spatiotemporal fusion methods to different influential factors: A comparative study for a normalized difference vegetation index time series reconstruction. *Remote Sensing of Environment*, 252, 112130.