

Long-term Effectiveness of Flood Spreading Assessed by Differential Trend Analysis of NDWI and NDMI from Sentinel-2 Time Series (Case Study: Soh, Isfahan, Iran)

Mehdi Hashemi¹  Ali Dastranj² 

Received:16-05-2026 Revised: 12-07-2026 Accepted:23-07-2026 Published:31-08-2026

<https://doi.org/10.22034/20.73.1>

Abstract

Introduction

Arid and semi-arid regions worldwide face a persistent double challenge: chronic water scarcity and destructive flash floods. In these fragile landscapes, floodwater spreading has emerged as a promising nature-based solution, diverting seasonal runoff onto permeable lands to recharge groundwater, improve soil moisture, and restore vegetation. Iran, dominated by drylands, has implemented numerous such projects over recent decades, yet their long-term effectiveness has rarely been rigorously proven. Most evaluations relied on scattered field observations without any control site, making it impossible to isolate the project's true impact from natural climatic variability; any observed greening or wetness could simply reflect a sequence of wetter years. Fortunately, advances in satellite remote sensing now offer a robust alternative. Freely available, high-resolution Sentinel-2 imagery enables consistent, repeatable tracking of moisture-related indices across many years. This study directly addresses the evaluation gap by adopting a Control-Impact design and applying a differential trend analysis to NDWI and NDMI time series. Our primary objective was to quantify the lasting influence of floodwater spreading on surface moisture and vegetation water content, effectively separating the human-induced signal from background climate variability. The research not only remedies critical methodological shortcomings of previous work but also delivers a clear, reproducible monitoring and evaluation framework for similar water-harvesting systems well into the future.

Materials and Methods:

The study was conducted at the Soh Meimeh Floodwater Spreading Research Station (Isfahan Province, Iran) and an adjacent control area with similar physiographic conditions but no floodwater reception, spanning from April 2016 to March 2024 (nine years). Sentinel-2 MSI Level-2A imagery was employed, and all processing was carried out on the Google Earth Engine (GEE) platform. After cloud masking and generating monthly median composites, NDWI (using bands B8 and B11) and NDMI (using bands B8 and B12) were calculated for each month, and their mean values within the study and control polygons were extracted. Within a Control-Impact design based on BACI logic, the primary response variables were defined as the concurrent differences between the two sites (Δ NDWI and Δ NDMI). Statistical analyses were performed in R and included: 1) descriptive statistics, boxplots, and histograms to assess index distributions; 2) paired t-test (with normality of differences confirmed by Shapiro-Wilk

1. Assistant Professor, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran. Corresponding author: Email: m_hashemi@areeo.ac.ir

2. Assistant Professor, Khorasan-e-Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mashhad, Iran.

test) and Mann-Whitney U test to examine the significance of mean differences; 3) simple linear trend fitting on individual time series of each site; and 4) linear trend analysis on the differential series using linear regression, with standard errors corrected by the Newey-West method to account for any autocorrelation. Model adequacy was verified through residual analysis and the Durbin-Watson test.

Results and Discussion:

Descriptive statistics showed that the mean NDWI at the spreading site ($M = -0.220$) was higher than the control ($M = -0.226$), and similarly, mean NDMI was higher at the spreading site ($M = -0.103$) compared to the control ($M = -0.116$). The ranges confirmed this advantage, with minimum values in the control (NDWI: -0.267 , NDMI: -0.144) being substantially more negative than those in the spreading site (NDWI: -0.255 , NDMI: -0.126). Boxplots confirmed a systematic upward shift in distributions towards greater moisture at the spreading site. The paired t-test indicated highly significant differences for both indices (NDWI: $t=11.17$, $p<0.001$; NDMI: $t=9.94$, $p<0.001$), and the Mann-Whitney test results were consistent (NDWI: $U=4381$, $p<0.001$; NDMI: $U=4838$, $p<0.001$). Individual linear trends of indices at each site were all non-significant (p-values ranging from 0.218 to 0.992), indicating that background factors produced no discernible directional trend over the study period. The delta trend analysis, as the core of this research, revealed a different picture. Δ NDWI exhibited a significant positive slope of $+0.00073$ per year ($p=0.037$, $R^2=0.054$), signifying a gradual increase in the moisture gap in favor of the spreading area. Conversely, Δ NDMI showed a non-significant negative slope of -0.00063 per year ($p=0.215$, $R^2=0.019$), meaning that the effectiveness of floodwater spreading on deeper moisture (NDMI) remained stable with no decreasing or increasing trend. Examination of residual autocorrelation confirmed model adequacy, and the Newey-West correction did not alter the conclusions. Temporal dynamics analysis also revealed a widening NDWI gap after 2019 and an exceptional spike in the control site in April 2020 (due to heavy rainfall), underscoring the importance of long-term trend analysis.

Conclusion:

The findings provide robust evidence for the positive, sustained effectiveness of floodwater spreading on surface and vegetation moisture. The dual pattern—increasing Δ NDWI with stable Δ NDMI—reveals layered mechanisms: floodwater spreading initially stabilized deep soil moisture (stable Δ NDMI), then through improved soil structure, greater organic matter, and perennial vegetation, generated a positive feedback that specifically boosted surface moisture and active vegetation water content (increasing Δ NDWI). For the first time, these effects were quantitatively documented using a rigorous causal Control-Impact design. The non-significance of individual site trends versus the significant differential trend strongly underscores the necessity of Control-Impact designs and delta analyses; otherwise, the true intervention signal remains masked by high climatic background noise. Several limitations warrant caution. No pre-project satellite data were available, ground calibration was lacking, and R^2 values were relatively low. Additionally, spectral indices are indirect proxies, susceptible to atmospheric dust, sun angle variations, soil differences, and vegetation phenology. The absence of concurrent field soil moisture and biomass measurements further restricts direct validation. Therefore, generalization to other sites or climates should be careful. Nonetheless, the presented framework—combining Sentinel-2 imagery, cloud processing, and delta trend analysis—offers a scientific, cost-effective, and reproducible approach for continuous monitoring of floodwater spreading projects and other dryland restoration interventions. It can support evidence-based decision-making for water resource management and desertification control in Iran's arid and semi-arid regions.

Keywords: Floodwater Spreading, Google Earth Engine (GEE), Groundwater Recharge, Soil Moisture, Arid Regions

Article Type: Research Article

Acknowledgement:

The authors gratefully acknowledge the General Directorate of Natural Resources and Watershed Management of Isfahan Province for its cooperation and for making the data available.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Mehdi Hashemi: Conceptualization, Software, Formal analysis, Writing - original draft preparation

Ali Dastranj: Conceptualization, Validation, Manuscript editing

Citation: Hashemi M, Dastranj A. Long-term Effectiveness of Flood Spreading Assessed by Differential Trend Analysis of NDWI and NDMI from Sentinel-2 Time Series (Case Study: Soh, Isfahan, Iran). *jwmseir* 2026; 20 (72): 1-19

Iran-Watershed Management Science & Engineering, Year 2026, , Vol 20, No 73, PP 1-19

Publisher: Watershed Management Society of Iran



ارزیابی اثربخشی بلندمدت پخش سیلاب با تحلیل روند تفاضلی NDWI و NDMI از سری‌های زمانی سنتینل-۲ (مطالعه موردی: عرصه شه، اصفهان)

مهدی هاشمی^۱، علی دسترنج^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۶ تاریخ داوری: ۱۴۰۵/۰۴/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۹

<https://doi.org/10.22034/20.73.1>

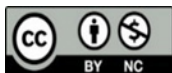
چکیده

پخش سیلاب به‌عنوان راهکاری سازگار با طبیعت در مناطق خشک، با هدایت رواناب‌های فصلی به عرصه‌های نفوذپذیر، به تغذیه آب‌های زیرزمینی، بهبود رطوبت خاک و احیای پوشش گیاهی یاری می‌رساند. با این حال، ارزیابی کمی و بلندمدت اثربخشی این سامانه‌ها با روش‌های سنتی میدانی، به دلیل محدودیت‌های مکانی و زمانی، همواره دشوار بوده است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تأثیر بلندمدت پخش سیلاب بر رطوبت سطحی و رطوبت پوشش گیاهی در ایستگاه تحقیقاتی شه (استان اصفهان) به انجام رسید. در این راستا، سری‌های زمانی ماهانه شاخص‌های NDWI و NDMI از تصاویر سنتینل-۲ طی بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴ (۹ سال) در سامانه گوگل ارث انجین استخراج شد. با بهره‌گیری از طرح شاهد-مداخله، متغیرهای تفاضلی NDWI و Δ NDWI از اختلاف هم‌زمان مقادیر عرصه پخش و منطقه شاهد محاسبه و روند خطی آن‌ها با تحلیل رگرسیون در نرم‌افزار R آزمون شد تا اثر خالص مداخله از نوسانات طبیعی اقلیم تفکیک گردد. نتایج نشان داد میانگین NDWI در عرصه پخش (-0.022) و در شاهد (-0.226) و میانگین NDWI نیز در عرصه پخش (-0.103) و در شاهد (-0.116) است که بیان‌گر مقادیر بالاتر هر دو شاخص در عرصه پخش (-0.022) و در می‌باشد. شیب سالانه Δ NDWI برابر با 0.0073 و از نظر آماری معنی‌دار بود ($p < 0.05$)؛ در حالی که روند Δ NDWI معنی‌داری آماری نشان نداد. این الگوی دوگانه آشکار می‌سازد که پخش سیلاب نخست سطح پایه رطوبت عمقی خاک را افزایش و تثبیت کرده (Δ NDWI پایدار) و سپس، از مسیر بهبود تدریجی ساختمان خاک و توسعه پوشش گیاهی چندساله، رطوبت سطحی و محتوای آب پوشش گیاهی فعال را به شکلی فزاینده تقویت نموده است (Δ NDWI افزایشی). نکته شایان توجه آنکه روندهای انفرادی شاخص‌ها در هر یک از دو عرصه به تنهایی معنی‌دار نبودند؛ این یافته ضرورت بهره‌گیری از تحلیل تفاضلی را برای آشکارسازی اثر واقعی مداخله تأیید می‌کند. چارچوب روش‌شناختی ارائه‌شده، ابزاری کم‌هزینه و تکرارپذیر برای پایش مستمر پروژه‌های پخش سیلاب فراهم می‌آورد. با وجود مزایای روش‌شناختی، محدودیت‌هایی نیز وجود دارد: شاخص‌های طیفی ماهیتی غیرمستقیم دارند و تحت تأثیر عواملی چون گردوغبار، تغییرات زاویه تابش، تفاوت‌های خاک و فتولوژی گیاه قرار می‌گیرند؛ افزون بر آن، فقدان داده‌های میدانی رطوبت خاک و زیست‌توده برای واسنجی مستقیم، از دیگر محدودیت‌های پژوهش است. از این رو، تعمیم نتایج به سایر مناطق باید با احتیاط صورت گیرد.

کلیدواژه‌ها: پخش سیلاب، گوگل ارث انجین، تغذیه آب زیرزمینی، رطوبت خاک، مناطق خشک
نوع مقاله: پژوهشی

استناد: هاشمی مهدی، دسترنج علی. ارزیابی اثربخشی بلندمدت پخش سیلاب با تحلیل روند تفاضلی NDWI و NDMI از سری‌های زمانی سنتینل-۲ (مطالعه موردی: عرصه شه، اصفهان). علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران. ۱۴۰۵؛ ۲۰(۷۳): ۱-۱۹

علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران سال ۱۴۰۵، دوره ۲۰، شماره ۷۳، ۱-۱۹



ناشر: انجمن آب‌خیزداری ایران

۱- استادیار پژوهشی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران. نویسنده مسئول: m_hashemi@areeo.ac.ir

۲- استادیار پژوهشی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.

تغییرات اقلیمی، افزایش نوسان پذیری سامانه های جوی و تشدید رخدادهای حادی در دهه های اخیر، الگوی توزیع زمانی و مکانی بارش را در بسیاری از مناطق جهان، به ویژه در نواحی خشک و نیمه خشک، دگرگون کرده است. در چنین مناطقی، کمبود آب و وقوع سیلاب های ناگهانی، مدیریت منابع آب را به مسئله ای پیچیده و چندان بعلدی تبدیل کرده است. ایران نیز به عنوان کشوری عمدتاً خشک و نیمه خشک، هم زمان با افت منابع آب تجدیدپذیر، فشار بهره برداری از آبخوان ها و افزایش ریسک سیلاب مواجه است؛ بنابراین، توسعه روش های علمی برای پایش اثرات سیلاب و ارزیابی کارایی سازوکارهای مدیریتی، ضرورتی انکارناپذیر دارد. مطالعات نشان داده اند که سامانه های اقلیمی ایران در دهه های اخیر دستخوش نوسان و تغییر معنادار شده اند و این تغییرات می توانند بر تغذیه آبخوان، پایداری پوشش گیاهی و رخداد سیلاب اثر بگذارند [۱۵، ۱۷].

در چنین زمینه ای، پخش سیلاب به عنوان یک راهبرد و در عین حال کارآمد در زمینه مدیریت آب در مناطق خشک، جایگاه ویژه ای دارد. این روش با هدایت سیلاب های فصلی به پهنه های نفوذپذیر، امکان افزایش تغذیه آب زیرزمینی، بهبود رطوبت خاک، کاهش شدت رواناب، کنترل فرسایش و ارتقای شرایط اکولوژیک را فراهم می کند. پژوهش های انجام شده در ایران نشان داده اند که پخش سیلاب فقط یک اقدام هیدرولوژیک نیست، بلکه بر ویژگی های خاک، الگوی پوشش گیاهی و حتی ساختار اجتماعی و بهره برداری از سرزمین اثر می گذارد. برای مثال، قیومیان و همکاران [۵] در حوضه میمه نشان دادند که شناسایی مناطق مناسب برای تغذیه مصنوعی آبخوان، به طور مستقیم به ویژگی های فیزیکی و هیدرولوژیک زمین وابسته است و پخش سیلاب می تواند به عنوان روشی اقتصادی برای بهره برداری از رواناب های سیلابی مطرح باشد. همچنین هاشمی و همکاران [۹]، نشان دادند که در یک سامانه پخش سیلاب در ایران خشک، بخش قابل توجهی از آب سیلابی می تواند به تغذیه آبخوان کمک کند، هرچند برداشت بیش از حد آب زیرزمینی ممکن است اثر مثبت آن را تضعیف کند. افزون بر این، قربانی و همکاران [۶] و نیز میرجلیلی و همکاران [۱۴] نشان داده اند که پخش سیلاب می تواند در بلندمدت بر ترکیب گونه ای، پوشش گیاهی و برخی ویژگی های خاکی اثرگذار باشد؛ بنابراین، ارزیابی اثرات این عملیات باید به صورت هم زمان آب، خاک و پوشش گیاهی را در نظر بگیرد.

با وجود اهمیت بالای پخش سیلاب، ارزیابی میدانی آن در مقیاس زمانی بلندمدت با محدودیت هایی مانند پراکندگی مکانی پهنه ها، هزینه بالای نمونه برداری، فقدان داده های پیوسته و دشواری تفکیک اثر عملیات از نوسانات طبیعی اقلیم همراه است. در چنین شرایطی، سنجش از دور به سبب توانایی در پایش غیرمخرب، گسترده و تکرارپذیر سطح زمین، به ابزاری کلیدی برای تحلیل اثرات پخش سیلاب تبدیل شده است. در واقع، داده های ماهواره ای این امکان را

فراهم می کنند که تغییرات ناشی از یک مداخله مدیریتی نه فقط در یک زمان خاص، بلکه در طول یک سری زمانی چندساله بررسی شود. از سوی دیگر، بسترهای پردازش ابری مانند گوگل ارث انجین (GEE^۱)، امکان مدیریت و تحلیل حجم عظیمی از تصاویر چندزمانه را با سرعت و دقت بالا فراهم کرده اند و به همین دلیل در مطالعات پایش سیلاب، خشکسالی، رطوبت خاک و پوشش گیاهی بسیار پرکاربرد شده اند [۸، ۱۹]. در واقع، ترکیب سنجش از دور و پردازش ابری، زمینه را برای تحلیل های بلندمدت و مقایسه ای در سامانه های پخش سیلاب فراهم می کند.

در میان شاخص های طیفی، NDWI^۲ و NDMI^۳ دو شاخص مکمل و بسیار مهم برای تحلیل اثرات پخش سیلاب به شمار می روند. NDWI که نخستین بار توسط McFeeters [۱۲] معرفی شد، با استفاده از باند سبز و فروسرخ نزدیک طراحی شده و هدف آن آشکارسازی آب های سطحی و تفکیک پهنه های آبی از خاک و پوشش گیاهی است. این شاخص در مناطق دارای آب آزاد، پهنه های آب گرفته و کانال های سیلابی عملکرد مناسبی دارد و به ویژه برای آشکارسازی تغییرات سریع سطح آب در رخدادهای سیلابی مفید است. در مقابل، NDMI که در ادبیات سنجش از دور به عنوان شاخصی برای برآورد محتوای آب در پوشش گیاهی مطرح است، بر پایه نسبت فروسرخ نزدیک به فروسرخ کوتاه موج تعریف می شود و نسبت به وضعیت رطوبتی گیاه و تنش آبی حساس است. بنابراین، NDWI بعد آب سطحی را برجسته می کند، در حالی که NDMI بعد رطوبت پوشش گیاهی را نشان می دهد. همین تمایز باعث می شود که این دو شاخص در کنار هم بتوانند تصویری چندلایه از پاسخ محیطی به پخش سیلاب ارائه دهند؛ تصویری که هم آب گرفتگی مستقیم و هم تغییرات پساشیبی در رطوبت خاک و پوشش گیاهی را بازتاب می دهد [۱۲، ۲۴، ۲۳ و ۴].

نکته مهم آن است که NDWI و NDMI را نباید به صورت شاخص هایی رقیب، بلکه باید به عنوان دو ابزار مکمل تفسیر کرد. NDWI برای تشخیص آب های سطحی و پهنه های غرقابی بسیار مناسب است، اما در برخی شرایط مانند سطوح تیره، سایه ها، آب های گل آلود یا محیط های دارای بازتاب پیچیده ممکن است دقت آن کاهش یابد. NDMI نیز گرچه برای برآورد رطوبت پوشش گیاهی و آشکارسازی تنش خشکی ابزار ارزشمندی است، اما به تنهایی برای جداسازی آب سطحی کفایت ندارد. از همین رو، ترکیب این دو شاخص در یک طراحی تحلیلی می تواند هم گسترش آب سطحی و هم پاسخ رطوبتی بوم سازگان را آشکار کند. در ادبیات علمی نیز نشان داده شده است که شاخص های آب محور و رطوبتی در کنار هم، به ویژه در داده های Sentinel-2، دقت تفسیر رخدادهای سیلابی را افزایش می دهند و در بسیاری از مطالعات، رویکردهای

1. Google Earth Engine (GEE)
2. Normalized Difference Water Index (NDWI)
3. Normalized Difference Moisture Index (NDMI)

چندشاخصی یا چندمنبعی نسبت به تحلیل تکشاخصی برتری داشته‌اند [۲۴، ۷ و ۲]. این منطق برای ارزیابی اثرات پخش سیلاب در عرصه‌هایی مانند سه‌در میمه نیز کاملاً قابل دفاع است.

انتخاب Sentinel-2 برای چنین مطالعه‌ای از منظر علمی بسیار مناسب است، زیرا این سامانه با پوشش بازدید مناسب، تفکیک مکانی مطلوب و وجود باندهای طیفی لازم برای محاسبه شاخص‌های آب و رطوبت، امکان تحلیل دقیق تغییرات سطح زمین را فراهم می‌کند. پژوهش‌های مروری و کاربردی نشان داده‌اند که Sentinel-2 در پایش خشکسالی، پوشش گیاهی، آب سطحی و رخداد‌های سیلابی، به‌ویژه در مقیاس محلی و نیمه‌منطقه‌ای، قابلیت بالایی دارد. از سوی دیگر، ترکیب Sentinel-2 با پردازش ابری در Google Earth Engine، تحلیل سری‌های زمانی چندساله را ساده‌تر، سریع‌تر و قابل تکرارتر می‌کند؛ مزیتی که در پژوهش‌های مربوط به سیلاب، پویایی پوشش زمین و تغییرات رطوبتی بارها تأیید شده است [۸، ۲۱، ۳ و ۱۹]. بنابراین، استفاده از تصاویر Sentinel-2 در بازه ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴ برای بررسی اثرات پخش سیلاب در سه‌در میمه، از نظر روش‌شناختی و علمی، انتخابی دقیق و به‌روز است.

در ایران نیز مطالعات متعددی نشان داده‌اند که پخش سیلاب می‌تواند آثار قابل‌توجهی بر آبخوان، پوشش گیاهی و خاک بر جای بگذارد. هاشمی و همکاران [۹] در تحلیل پخش سیلاب در مناطق خشک ایران، نقش این روش را در تغذیه مصنوعی آبخوان برجسته کردند. پاکپور و همکاران [۱۸] نیز با رویکردی تلفیقی نشان دادند که ارزیابی اثر تغذیه مصنوعی ناشی از پخش سیلاب، نیازمند داده‌های محدود ولی هدفمند و تلفیق آن‌ها در یک چارچوب تحلیلی است. مصباح و همکاران [۱۳] در بررسی بلندمدت دشت گریباگان نشان دادند که پخش سیلاب می‌تواند در بلندمدت به بهبود پوشش زراعی کمک کند. قربانی و همکاران [۶] نیز در یک مرتع خشک، تغییرات آشکار در پوشش گیاهی و خصوصیات خاک را در محدوده پخش سیلاب نسبت به منطقه شاهد گزارش کردند. این شواهد به‌روشنی نشان می‌دهد که مقایسه عرصه پخش سیلاب با منطقه شاهد هم‌شرایط یک راهبرد مناسب برای تشخیص اثر واقعی مداخله است و به کاهش خطای ناشی از نوسانات طبیعی اقلیم کمک می‌کند [۳، ۱۸، ۶ و ۱۳].

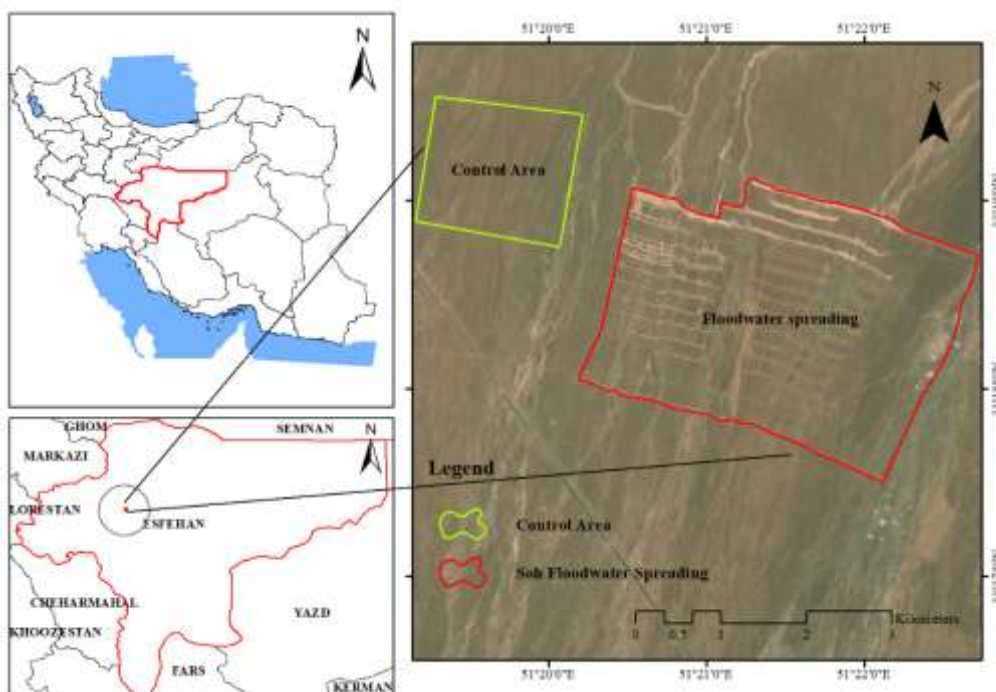
با وجود این پیشینه ارزشمند، هنوز شکاف پژوهشی مهمی در ارزیابی هم‌زمان NDWI و NDMI برای سنجش اثرات پخش سیلاب در عرصه‌های خشک ایران وجود دارد. بیشتر پژوهش‌های پیشین یا بر یک رخداد سیلابی منفرد متمرکز بوده‌اند، یا تنها یکی از ابعاد آب سطحی، خاک یا پوشش گیاهی را بررسی کرده‌اند. در مقابل، ارزیابی بلندمدت اثر پخش سیلاب بر اساس سری زمانی چندساله، همراه با مقایسه منطقه مداخله و منطقه شاهد، می‌تواند تصویری دقیق‌تر از کارکرد این سامانه ارائه دهد. اهمیت این موضوع در عرصه پخش سیلاب سه‌در میمه از آن جهت بیشتر است که این عرصه، در اقلیم خشک اصفهان قرار دارد و پخش سیلاب در آن

به‌عنوان یکی از ابزارهای مدیریت منابع آب و احیای پوشش محیطی به کار گرفته شده است. بنابراین، تحلیل تغییرات NDWI و NDMI طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴ می‌تواند هم به ارزیابی اثر هیدرولوژیک پخش سیلاب و هم به تفسیر پاسخ اکولوژیک آن کمک کند. این رویکرد با توصیه‌های جدید در مدیریت ریسک سیلاب در مناطق خشک نیز هم‌راستا است، زیرا بر پایش مستمر، تصمیم‌گیری مبتنی بر داده و استفاده از فناوری‌های سنجش از دور تأکید دارد [۱۶، ۱۷]. بر این اساس، هدف این پژوهش، ارزیابی علمی اثرات پخش سیلاب بر عرصه سه‌در میمه در استان اصفهان با استفاده از شاخص‌های NDWI و NDMI استخراج‌شده از تصاویر Sentinel-2 در بستر Google Earth Engine و در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴ است. در این مطالعه، منطقه پخش سیلاب و یک منطقه شاهد مشابه از نظر شرایط محیطی و مکانی مقایسه می‌شوند تا اثر مداخله از نوسانات طبیعی تفکیک شود. نوآوری اصلی پژوهش در تلفیق سه عنصر نهفته است: نخست، به‌کارگیری هم‌زمان دو شاخص مکمل برای سنجش آب سطحی و رطوبت پوشش گیاهی؛ دوم، تحلیل بلندمدت و چندساله به‌جای ارزیابی کوتاه‌مدت؛ و سوم، استفاده از طراحی مقایسه‌ای با منطقه شاهد برای افزایش اعتبار استنتاج‌ها. از این منظر، پژوهش حاضر می‌تواند به توسعه چارچوبی کاربردی برای پایش اثرات پخش سیلاب در مناطق خشک ایران کمک کند و در عین حال، به تصمیم‌سازی علمی در حوزه مدیریت آب، تغذیه آبخوان و ارزیابی اثربخشی طرح‌های پخش سیلاب یاری رساند [۸، ۷ و ۲۱].

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و انتخاب عرصه شاهد

این مطالعه در ایستگاه تحقیقاتی پخش سیلاب سه‌در (Soh) در میمه، واقع در استان اصفهان، انجام گرفت (شکل ۱). این عرصه با اقلیم خشک تا نیمه‌خشک و پوشش گیاهی مرتعی شناخته می‌شود. رواناب‌های فصلی از طریق شبکه‌ای از کانال‌ها و پشته‌های خاکی بر سطح عرصه گسترده می‌شوند تا ضمن تغذیه سفره آب زیرزمینی، رطوبت خاک و وضعیت پوشش گیاهی بهبود یابد. به‌منظور تفکیک اثر مداخله پخش سیلاب از نوسانات طبیعی اقلیمی که می‌توانند به‌طور هم‌زمان هر دو منطقه را تحت تأثیر قرار دهند، یک منطقه شاهد در مجاورت عرصه پخش سیلاب و در همان واحد فیزیوگرافی انتخاب شد. معیارهای گزینش شاهد شامل تشابه کامل در جنس زمین‌شناسی، نوع خاک، شیب و جهت شیب با عرصه پخش و همچنین عدم دریافت رواناب ناشی از عملیات پخش (خارج از شبکه انحرافی) بود. فاصله دو پلیگون به‌گونه‌ای تعیین شد که هیچ‌گونه تأثیر هیدرولوژیکی مستقیم از پخش سیلاب به شاهد منتقل نشود، درحالی‌که رژیم بارش و دما به دلیل نزدیکی کاملاً همگن باقی بماند.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه پخش سیلاب سه (Sol)
Soh floodwater spreading station Fig1. Location of the

موجود در آن ماه محاسبه شده و یک تصویر ترکیبی تولید می شود [۲]. این راهکار در مقایسه با میانگین گیری، اثر پیکسل های پرت را به حداقل می رساند و برای تحلیل روند در مناطق خشک که تغییرات طیفی شدید است توصیه شده است. نتیجه این مرحله تولید ۱۰۸ تصویر ماهانه (۹ سال $\times$ ۱۲ ماه) برای هر باند بود که مبنای محاسبه شاخص های طیفی قرار گرفت.

محاسبه شاخص های طیفی رطوبت

دو شاخص طیفی که مستقیماً با محتوای آب پوشش گیاهی و رطوبت خاک مرتبط هستند، بر روی تک تک تصاویر ترکیبی ماهانه محاسبه شدند.

شاخص تفاضلی نرمال شده آب (NDWI)

این شاخص که نخستین بار توسط Gao (1996) معرفی شد، با استفاده از نسبت تفاضلی بین باند فروسرخ نزدیک و فروسرخ موج کوتاه، محتوای آب مایع در تاج پوشش گیاهی و لایه سطحی خاک را برآورد می کند. برای تصاویر سنتینل-۲، NDWI از رابطه (۱) محاسبه می شود.

$$NDWI = (B8 - B11) / (B8 + B11) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن B8 باند ۸ (NIR، طول موج مرکزی ۸۴۲ نانومتر) و B11 باند ۱۱ (SWIR1، طول موج مرکزی ۱۶۱۰ نانومتر) است. افزایش مقادیر این شاخص (مقادیر نزدیک تر به صفر یا مثبت) نشان دهنده افزایش رطوبت در پوشش گیاهی و خاک سطحی هست.

شاخص تفاضلی نرمال شده رطوبت (NDMI)

این شاخص با ساختاری مشابه اما با استفاده از باند فروسرخ

داده های ماهواره ای و پیش پردازش

در این پژوهش از تصاویر ماهواره Sentinel-2 MSI Level-2A مربوط به برنامه کوپرنیک آژانس فضایی اروپا استفاده شد. محصول Level-2A بازتابندگی سطح زمین^۱ را پس از تصحیح اتمسفری با الگوریتم Sen2Cor ارائه می دهد و از دقت بالایی برای تحلیل های کمی برخوردار است [۱۱]. این تصاویر با حد تفکیک مکانی ۱۰ متر در باندهای مرئی و فروسرخ نزدیک (NIR) و ۲۰ متر در باندهای فروسرخ موج کوتاه (SWIR)، و با دوره بازدید ۵ روزه، پوشش زمانی متراکم و مناسبی را برای پایش پویایی های پوشش گیاهی و رطوبت فراهم می کنند [۱]. بازه زمانی مطالعه از فروردین ۱۳۹۵ (آوریل ۲۰۱۶) تا اسفند ۱۴۰۳ (مارس ۲۰۲۴) به مدت ۹ سال شمسی تعیین شد.

تمامی مراحل پیش پردازش و پردازش تصاویر در محیط Google Earth Engine (GEE) با زبان PythonScript پیاده سازی شد. ابتدا پیکسل های آلوده به ابر و سایه ابر با استفاده از باند کیفی QA60 از هر تصویر حذف شدند. برای حصول اطمینان بیشتر، تنها تصاویری با پوشش ابری کمتر از پنج درصد در محدوده پلیگون ها وارد تحلیل شدند. سپس، برای کاهش نویزهای باقی مانده، حذف مقادیر پرت ناشی از سایه های پنهان یا ذرات معلق جوی، و ایجاد یک سری زمانی منظم و همگن، از روش ترکیب میانه ماهانه^۲ استفاده شد. در این روش، برای هر ماه شمسی، میانه تمامی پیکسل های معتبر

1. Bottom-of-Atmosphere
2. Monthly Median Composite

موج کوتاه دوم (SWIR2)، برای نخستین بار توسط Hardisky (1983) پیشنهاد و سپس توسط Jin و Sader [10] برای پایش رطوبت پوشش گیاهی استانداردسازی شد NDMI به تغییرات رطوبت در ماده گیاهی و خاک حساسیت بالایی دارد و با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$\text{NDMI} = (B8 - B12) / (B8 + B12) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه B12 باند ۱۲ (SWIR2)، طول موج مرکزی ۲۱۹۰ نانومتر) است. کاهش مقادیر NDMI (منفی تر شدن) با افت رطوبت و افزایش تنش آبی متناظر است.

پس از محاسبه شاخص‌ها برای هر ماه، با استفاده از توابع کاهش‌دهنده GEE، میانگین تمامی پیکسل‌ها (Mean reducer) در درون پلیگون‌های عرصه پخش و شاهد به‌طور جداگانه استخراج و به‌صورت سری‌های زمانی NDWI_study، NDWI_control، NDMI_study و NDMI_control ذخیره شد.

طراحی آزمایش شاهد - مداخله و استخراج متغیر پاسخ

برای دستیابی به یک استنتاج علی معتبر و حذف اثر تغییرات اقلیمی زمینه‌ای که ممکن است به‌اشتباه به‌عنوان تأثیر پخش سیلاب تفسیر شود، از طرح شاهد- مداخله (Control-Impact, CI) استفاده شد [20]. با تکیه بر همگنی ثابت‌شده ذاتی دو عرصه و تمرکز بر تحلیل هم‌زمان اختلاف‌ها استفاده شد. این نسخه تطبیق‌یافته که-Control-Impact با سری زمانی نامیده می‌شود، در ارزیابی مداخلات محیطی فاقد داده‌های پایه معتبر کاربرد فراوان دارد. بر اساس این طرح، برای هر نقطه زمانی t (متناظر با یک ماه-سال مشخص)، اختلاف خالص شاخص بین عرصه پخش و شاهد به‌عنوان متغیر پاسخ اصلی محاسبه شد. بر اساس روابط ۳ و ۴ تهیه شد.

$$\Delta \text{NDWI}_t = \text{NDWI}_{(\text{study}, t)} - \text{NDWI}_{(\text{control}, t)} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\Delta \text{NDMI}_t = \text{NDMI}_{(\text{study}, t)} - \text{NDMI}_{(\text{control}, t)} \quad \text{رابطه (۴)}$$

این سری‌های تفاضلی (Δ) تأثیر خالص پخش سیلاب را، پس از کسر نوسانات مشترک اقلیمی (خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها)، کمی می‌کنند. در صورت عدم اثربخشی پخش سیلاب، انتظار می‌رود مقادیر دلتا حول صفر نوسان کنند و روند معنی‌داری از خود نشان ندهند.

تحلیل‌های آماری

تمامی تحلیل‌ها در نرم‌افزار R نسخه ۴.۳.۱ و با استفاده از کتابخانه‌های پایه، lmtest و sandwich برای محاسبه خطاهای استاندارد مقاوم، به انجام رسید. سطح معنی‌داری $\alpha=0.05$ برای کلیه آزمون‌ها مبنا قرار گرفت.

ارزیابی اثر کلی (تفاوت میانگین بلندمدت)

برای آزمون این فرضیه که پخش سیلاب در طول دوره ۹ ساله منجر به بهبود میانگین رطوبت نسبت به شاهد شده است، از دو آزمون مکمل استفاده شد.

آزمون t زوجی: با توجه به جفت‌شدگی طبیعی داده‌ها در هر ماه (هر دو عرصه در زمان یکسان اندازه‌گیری شده‌اند)، این آزمون پارامتری برای مقایسه میانگین تفاوت‌های هم‌زمان به‌کار رفت. پیش‌فرض نرمال بودن توزیع تفاوت‌ها با آزمون Shapiro-Wilk بررسی و تأیید شد.

آزمون ناپارامتری من - ویتنی: برای اطمینان از عدم حساسیت نتایج به شکل توزیع داده‌ها، این آزمون نیز برای مقایسه توزیع کلی مقادیر دو گروه (مطالعه و شاهد) اجرا شد.

تحلیل روند بلندمدت تفاضلی^۳

برای پاسخ به پرسش محوری پژوهش مبنی بر پایداری، افزایش یا کاهش اثربخشی پخش سیلاب در طول زمان، مدل‌های رگرسیون خطی ساده به سری‌های زمانی ΔNDWI و ΔNDMI برازش داده شدند (رابطه ۵).

$$\Delta \text{Index}_t = \beta_0 + \beta_1 \times \text{Time}_t + \varepsilon_t \quad \text{رابطه (۵)}$$

متغیر زمان (Time_t) به‌صورت عددی پیوسته بر حسب سال شمسی تعریف شده است. ضریب شیب β_1 نرخ تغییر سالانه در اختلاف عرصه پخش و شاهد را نشان می‌دهد و تفسیر آن چنین است، $\beta_1 > 0$ و معنی‌دار گویای افزایش اثربخشی، β_1 غیرمعنی‌دار به‌معنای پایداری، و $\beta_1 < 0$ معنی‌دار نشانه کاهش اثربخشی در طول زمان است. علاوه بر مقدار p شیب، ضریب تعیین (R^2) و خطای استاندارد شیب نیز گزارش شد تا قدرت تبیین‌کنندگی زمان و دقت برآورد روند مشخص شود.

نتایج

آمار توصیفی و مقایسه کلی شاخص‌های رطوبت

به منظور ارائه یک دید کلی از وضعیت رطوبت در طول دوره ۹ ساله، ابتدا آمار توصیفی شاخص‌های NDWI و NDMI برای هر دو عرصه محاسبه شد. نتایج کامل در جدول ۱ ارائه شده است. میانگین شاخص NDWI در عرصه پخش سیلاب ($M = -0.220$)، $SD = 0.018$) بالاتر از منطقه شاهد ($M = -0.226$ ، $SD = 0.020$) به دست آمد. با توجه به ماهیت این شاخص که افزایش مقادیر آن (نزدیک‌تر شدن به صفر) به معنی افزایش محتوای آب در پوشش گیاهی و رطوبت سطحی خاک تعبیر می‌شود [۴]، این اختلاف ۰/۰۰۶ واحدی نشان‌دهنده بهبود نسبی و پایدار شرایط رطوبتی در عرصه پخش سیلاب نسبت به منطقه شاهد است. دامنه تغییرات NDWI در عرصه پخش از ۰/۲۵۵- تا ۰/۰۹۲- و در شاهد از ۰/۲۶۷- تا ۰/۰۹۵- متغیر بود که حاکی از آن است که حتی در خشک‌ترین ماه‌ها (کمینه‌ها) نیز عرصه پخش وضعیت مطلوب‌تری داشته است. انحراف معیار تقریباً مشابه دو عرصه (۰/۱۸) در مقابل ۰/۲۰) نشان می‌دهد که پخش سیلاب منجر به افزایش ناهمگنی فضایی یا نوسانات بیشتر در مقادیر پیکسل‌های NDWI نشده و

1. Paired t-test
2. Mann-Whitney U
3. Delta Trend Analysis

Table 1. Descriptive statistics of NDWI and NDMI indices for the floodwater spreading site and the control area (2016–2024)

Index / شاخص	Site / عرصه	Mean / میانگین	SD / انحراف معیار	درصد ضریب تغییرات / CV	Min / کمینه	Max / بیشینه
NDWI	Floodwater spreading (پخش سیلاب)	-0.220	0.018	8.18	-0.255	-0.092
NDWI	Control (شاهد)	-0.226	0.020	8.85	-0.267	-0.095
NDMI	Floodwater spreading (پخش سیلاب)	-0.103	0.018	17.48	-0.126	0.051
NDMI	Control (شاهد)	-0.116	0.021	18.10	-0.144	0.1

می‌سازد. جابه‌جایی مثبت کلی توزیع هر دو شاخص در عرصه پخش نسبت به شاهد که دلالت بر تأثیر سیستماتیک پخش سیلاب بر بهبود رطوبت دارد؛ کاهش اندک پراکندگی در عرصه پخش که از تثبیت شرایط رطوبتی حکایت می‌کند؛ و عدم تقارن در نقاط پرت که نشان‌دهنده تعدیل پاسخ به بارش‌های سنگین در عرصه پخش است. همچنین شکل ۳ هیستوگرام‌های فراوانی هر دو شاخص را با برازش منحنی چگالی نرمال به نمایش می‌گذارند. توزیع NDWI در عرصه پخش اندکی چوله به راست (مقادیر رطوبت بالاتر) و در شاهد متقارن‌تر است. جابه‌جایی کل منحنی توزیع NDWI و NDMI به سمت مقادیر بالاتر (کمتر منفی) در عرصه پخش نسبت به شاهد، بازتاب بصری همان یافته‌های توصیفی است. این جابه‌جایی سیستماتیک که در کل دامنه داده‌ها دیده می‌شود و نه فقط در یک ناحیه خاص، نخستین شواهد را برای وجود یک اثر ساختاری (ناشی از مداخله) به‌جای تغییرات تصادفی، فراهم می‌کند. مقادیر ضریب چولگی برای NDWI در عرصه پخش ۰/۳۲- (چولگی به راست، نشان‌دهنده تمایل به رطوبت بیشتر) و در شاهد ۰/۰۵- (نزدیک به متقارن) محاسبه شد. برای NDMI، ضریب چولگی در عرصه پخش ۰/۴۵- و در شاهد ۰/۰۵+ به دست آمد که بیانگر توزیع متقارن‌تر در عرصه پخش است. این کاهش چولگی در عرصه پخش حاکی از تعدیل شرایط حدی رطوبتی در اثر مداخله هستند.

نتایج آزمون‌های آماری تفاوت میانگین بلندمدت

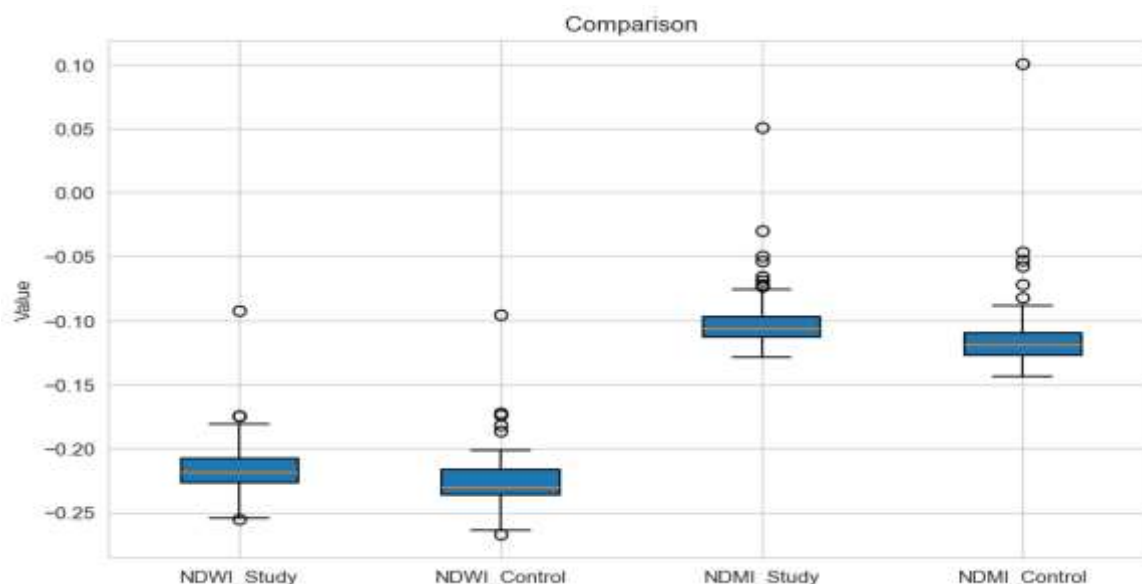
برای بررسی این فرضیه که مداخله پخش سیلاب به‌طور میانگین منجر به بهبود معنی‌دار رطوبت سطحی و رطوبت پوشش گیاهی نسبت به منطقه شاهد شده است، از دو آزمون استنباطی مکمل بهره گرفته شد، آزمون پارامتری t زوجی (Paired t-test) و آزمون ناپارامتری من-ویتنی (Mann-Whitney U). با به‌کارگیری دو آزمون متفاوت، می‌توان نتایج را از دو زاویه بررسی کرد و مطمئن شد که نتیجه‌گیری نهایی، وابسته به پیش‌فرض‌های آماری یک آزمون خاص نیست.

آزمون t زوجی

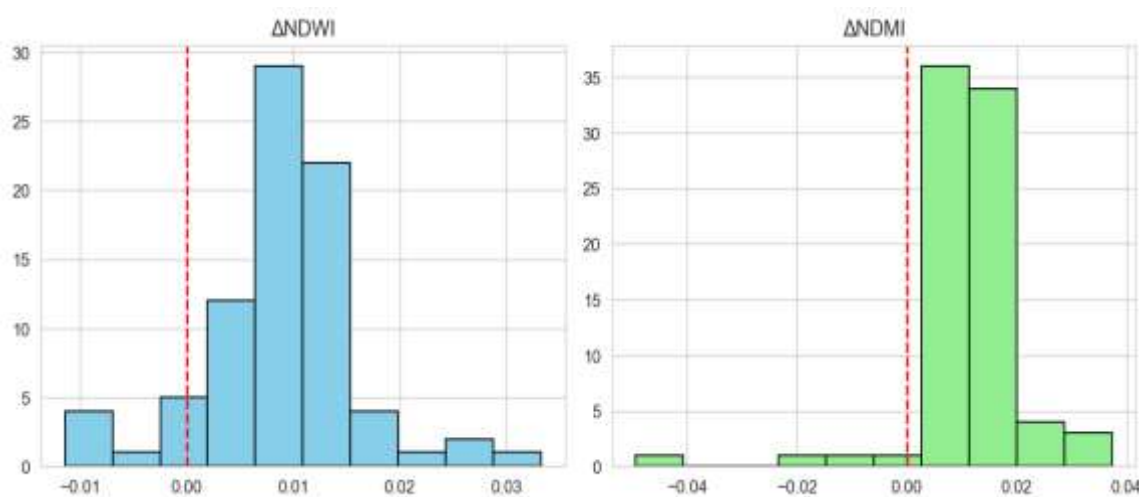
با توجه به ساختار طرح پژوهش که در آن مقادیر شاخص‌های دو عرصه به‌صورت هم‌زمان و در یک ماه تقویمی یکسان (جفت‌شده)

تغییرپذیری آن را در محدوده طبیعی حفظ کرده است. برای شاخص NDMI، میانگین در عرصه پخش سیلاب ۰/۱۰۳- و در شاهد ۰/۱۱۶- ($SD = 0.018$) و در شاهد ۰/۱۱۶- ($SD = 0.021$) محاسبه شد. این اختلاف ۰/۰۱۳ واحدی نیز تأیید می‌کند که محتوای رطوبت ماده گیاهی و لایه سطحی خاک در عرصه پخش نسبت به شاهد بیشتر است. نکته جالب توجه، مشاهده مقادیر بیشینه مثبت (به ترتیب ۰/۰۵۱ و ۰/۱۰۰) در هر دو عرصه است که به ماه‌های استثنایی با بارش بالا اشاره دارد، اما کمینه شاهد (۰/۱۴۴-) به‌مراتب منفی‌تر از کمینه عرصه پخش (۰/۱۲۶-) است که شدت خشکی بیشتر در ماه‌های بحرانی را برای منطقه شاهد آشکار می‌سازد. همچنین ضریب تغییرات (CV) نشان‌دهنده نوسان‌پذیری نسبی هر شاخص است. کاهش جزیی CV در عرصه پخش نسبت به شاهد برای هر دو شاخص، بیانگر تثبیت نسبی شرایط رطوبتی در اثر مداخله پخش سیلاب است. این یافته حاکی از آن است که پخش سیلاب توانسته است نه تنها میانگین، بلکه شرایط حدی خشکی را نیز تعدیل کند. برای تشریح بهتر تفاوت‌های توزیع، نمودارهای جعبه‌ای^۱ و هیستوگرام^۲ برای هر دو شاخص ترسیم شدند. شکل ۲ نمودارهای جعبه‌ای NDWI و NDMI را به تفکیک عرصه نشان می‌دهد. در این نمودارها، جعبه مربوط به عرصه پخش سیلاب (Study) در موقعیت بالاتری نسبت به شاهد (Control) قرار گرفته است. میانه NDWI در عرصه پخش بالاتر از چارک سوم شاهد است که اختلاف مرکزی قوی‌تری را نسبت به میانگین‌ها آشکار می‌سازد. همچنین گستره میان‌چارکی^۳ برای NDWI در عرصه پخش نسبتاً مشابه شاهد اما کمی فشرده‌تر است، درحالی‌که برای NDMI، IQR شاهد بزرگ‌تر بوده که نشانگر نوسانات طبیعی بیشتر رطوبت در غیاب پخش سیلاب است. وجود نقاط پرت عمدتاً در ناحیه بالایی نمودارها (مقادیر رطوبت استثنایی بالا) مشاهده می‌شود که به ماه‌های ترسالی یا خطاهای باقی‌مانده ابر مربوط بوده و با توجه به استفاده از میانه‌های ماهانه، اثر آن‌ها بر تحلیل‌های بعدی کنترل شده است. در مجموع، تحلیل بصری نمودارهای جعبه‌ای سه یافته کلیدی را برجسته

- 1 Boxplot
- 2 Histogram
- 3 IQR



شکل ۲- نمودار جعبه‌ای مقایسه شاخص‌های NDWI و NDMI بین عرصه پخش سیلاب (Study) و منطقه شاهد (Control)
Fig 2. Boxplot comparing NDWI and NDMI indices between the floodwater spreading site (Study) and the control area (Control)



شکل ۳- هیستوگرام توزیع فراوانی و منحنی چگالی نرمال برای NDWI و NDMI در دو عرصه پخش سیلاب و شاهد
Fig 3. Histogram of frequency distribution and normal density curve for NDWI and NDMI in the floodwater spreading and control areas

پارامتری مجاز است.
نتایج آزمون t زوجی در جدول ۲ ارائه شده است. با در نظر گرفتن سطح معنی‌داری $\alpha = 0.05$ ، هر دو شاخص تفاوت میانگین معنی‌داری را بین عرصه پخش سیلاب و شاهد نشان می‌دهند ($p > 0.001$). به عبارت دیگر، شواهد قوی آماری نشان می‌دهد که پخش سیلاب به‌طور سیستماتیک رطوبت سطحی و محتوای آب پوشش گیاهی را نسبت به شرایط طبیعی بدون مداخله افزایش داده است.
آزمون من - ویتنی:

اندازه‌گیری شده‌اند، آزمون t زوجی مناسب‌ترین آزمون برای مقایسه میانگین این جفت‌ها است. این آزمون، تفاوت بین دو مقدار متناظر را برای هر نقطه زمانی محاسبه کرده و میانگین این تفاوت‌ها را می‌آزماید. پیش‌نیاز اصلی این آزمون، نرمال بودن توزیع تفاوت‌هاست که با استفاده از آزمون شاپیرو - ویلک (Shapiro-Wilk) بررسی شد. نتایج این آزمون برای تفاوت‌های NDWI ($W = 0.987$, $p = 0.394$) و NDMI ($W = 0.985$, $p = 0.289$) نشان داد که توزیع تفاوت‌ها، انحراف معنی‌داری از نرمال ندارد و استفاده از آزمون

اگرچه آزمون t زوجی به دلیل بهره‌گیری از ساختار جفت‌شده توان آماری بالاتری دارد، اما ممکن است تحت تأثیر نقض فرض نرمال بودن در نمونه‌های کوچک یا وجود داده‌های پرت حساس باشد. لذا، به‌عنوان یک رویه اعتبارسنجی مقاوم، آزمون ناپارامتری من-ویتنی (Mann-Whitney U) که بدون هیچ‌گونه پیش‌فرض توزیعی، صرفاً ترتیب رتبه‌ای داده‌ها را مقایسه می‌کند، اجرا شد. این آزمون به‌طور خاص برای مقایسه توزیع کلی دو نمونه مستقل به کار می‌رود و مشخص می‌کند که آیا مقادیر یک گروه به‌طور سیستماتیک بزرگ‌تر از گروه دیگر است یا خیر.

نتایج آزمون من-ویتنی نیز به‌طور قاطع یافته‌های آزمون t را تأیید نمود (جدول ۲). برای NDWI، آماره $U = 4381$ با $p\text{-value} = 0.0002$ و برای NDMI، آماره $U = 4838$ با $p\text{-value}$ کمتر از 0.0001 به‌دست آمد. هر دو مقدار p بسیار کمتر از 0.05 هستند، لذا فرض صفر یکسان بودن توزیع دو عرصه قویاً رد می‌شود. هم‌خوانی کامل نتایج آزمون t زوجی و آزمون من-ویتنی، اطمینان بالایی به معناداری تفاوت مشاهده‌شده می‌بخشد و نشان می‌دهد که این اختلاف ناشی از نوسانات تصادفی یا نقض مفروضات یک آزمون خاص نیست.

در مجموع، تحلیل‌های استنباطی مؤید آن است که در طول نه سال مورد بررسی، میانگین NDWI و NDMI در عرصه پخش سیلاب به‌طور معنی‌داری از منطقه شاهد بالاتر بوده است. این یافته، که هم با آزمون پارامتری و هم ناپارامتری تأیید شده، پایه‌ای مستحکم برای گام تحلیلی بعدی، یعنی واکاوی پویایی این تفاوت در طول زمان (تحلیل روند تفاضلی) فراهم می‌کند. به‌عبارت دیگر، اکنون مشخص شده که پخش سیلاب اثری مثبت و میانگین بر جای گذاشته است و در ادامه بررسی می‌شود که آیا این اثر در گذر زمان تقویت شده، تضعیف شده یا ثابت مانده است.

پویایی زمانی شاخص‌ها و نوسانات فصلی در طول دوره مطالعه

سری‌های زمانی ماهانه هر دو شاخص برای عرصه پخش سیلاب و منطقه شاهد در شکل ۴ ترسیم شده است. این نمودارها رفتار رطوبت سطحی (NDWI) و محتوای آب پوشش گیاهی (NDMI) را به‌صورت نقطه‌ای (مقادیر میانه ماهانه) نمایش می‌دهند.

الف) الگوی فصلی: هر دو شاخص در هر دو عرصه یک نوسان فصلی آشکار با تناوب تقریباً یک‌ساله نشان می‌دهند. مقادیر NDWI و NDMI معمولاً در اواخر زمستان و اوایل بهار (بهمن تا فروردین) به بیشینه خود می‌رسند و سپس با شروع فصل گرم، روند کاهشی را تا اواخر تابستان و اوایل پاییز (مرداد تا مهر) طی می‌کنند. این رفتار با رژیم بارش حاکم بر منطقه کاملاً هماهنگ است که در آن بخش عمده نزولات در فصول سرد متمرکز است و به‌دنبال آن، با افزایش دما و تبخیر-تعرق، رطوبت خاک و گیاه در طول تابستان افت می‌کند. هماهنگی کامل فاز و دامنه این نوسان‌های فصلی در دو عرصه، تأییدی بر همگنی اقلیمی آن‌ها و درستی انتخاب منطقه شاهد است.

ب) شکاف میان عرصه پخش و شاهد: در اکثر قریب به اتفاق ماه‌ها، منحنی شاخص‌های عرصه پخش سیلاب بالاتر از منحنی شاهد (خط قرمز) قرار دارد. این فاصله عمودی، بیانگر آن است که مداخله پخش سیلاب منجر به افزایش سیستماتیک رطوبت نسبت به شرایط طبیعی مشابه شده است. با این حال، شکاف مذکور ثابت نیست و در طول زمان الگویی پویا دارد. در ابتدای دوره (۱۳۹۵-۱۳۹۶)، شکاف نسبتاً کم است و در برخی ماه‌ها دو منحنی بر هم منطبق می‌شوند. از سال ۱۳۹۸ به بعد، در NDWI، شاهد بزرگ‌تر شدن تدریجی این شکاف هستیم که در سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ به اوج خود می‌رسد. این مشاهده با تحلیل روند تفاضلی هم‌خوانی دارد و افزایش اثربخشی پخش سیلاب در طول زمان را نشان می‌دهد. برای NDMI، شکاف در برخی مقاطع مانند ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ چشمگیر است، اما در سال‌های اخیر نوسانات بیشتری نشان می‌دهد و پایداری افزایش آن به اندازه NDWI مشهود نیست.

ج) رخدادهای استثنایی و بی‌نظمی‌های بین‌ساله: یک واقعه جالب توجه در فروردین ۱۳۹۹ رخ داده است که در آن هر دو شاخص، به‌ویژه NDMI، یک جهش مثبت ناگهانی و کم‌سابقه را در منطقه شاهد تجربه کرده‌اند (مقادیر مثبت NDMI تا ۰.۱۰۰). در این ماه خاص، منحنی شاهد به‌طور موقت از منحنی عرصه پخش فراتر رفته است. این پدیده به احتمال زیاد ناشی از یک بارندگی سنگین و کوتاه‌مدت است که در عرصه شاهد، به دلیل نبود پوشش گیاهی متراکم و ساختار خاک متفاوت، پاسخ طیفی سریع‌تر و شدیدتری ایجاد کرده است. این رویداد، اهمیت رویکرد تفاضلی و تحلیل روند

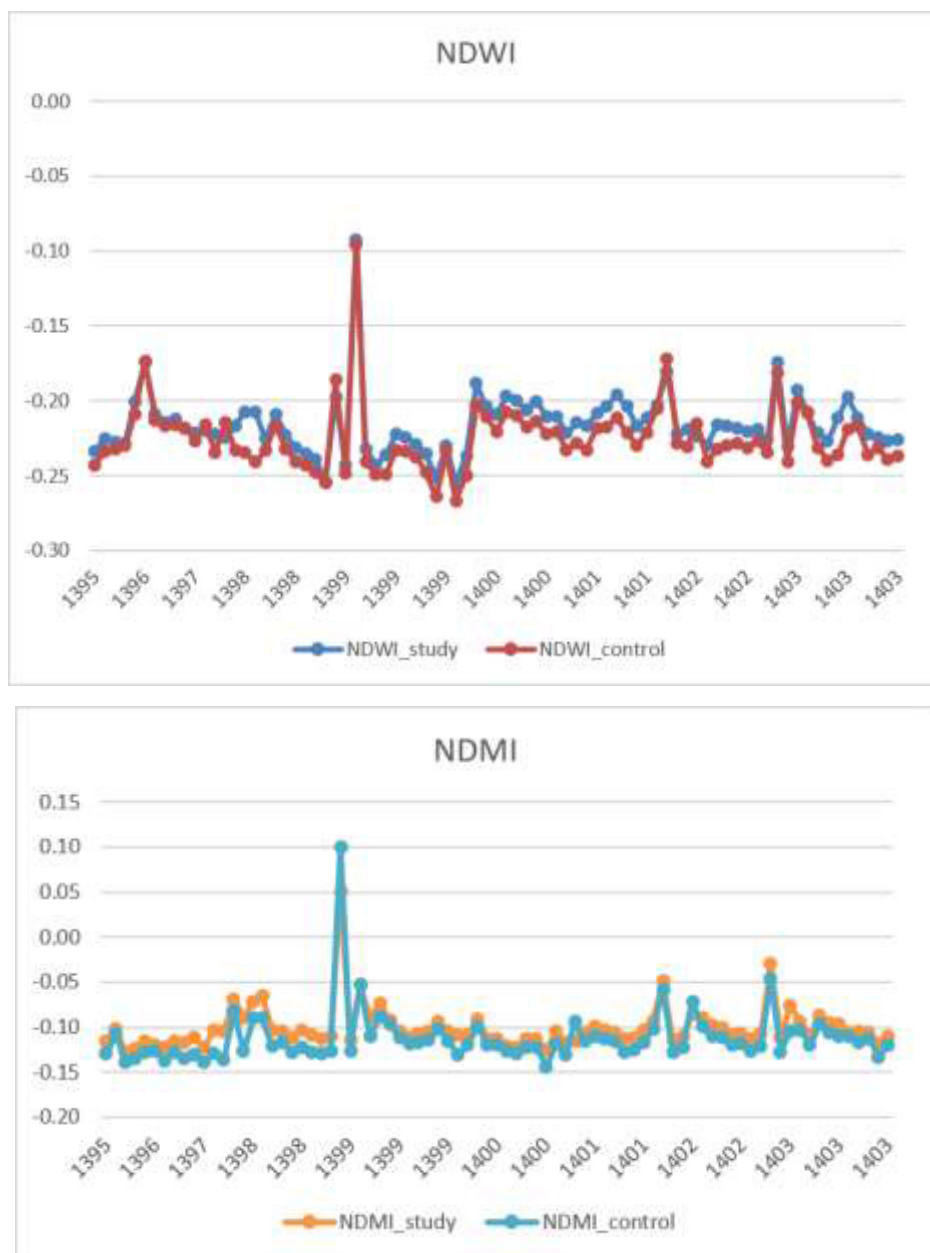
جدول ۲- نتایج آزمون‌های آماری مقایسه میانگین بلندمدت شاخص‌های رطوبت بین عرصه پخش سیلاب و شاهد (۲۰۱۶-۲۰۲۴)

Table 2. Results of statistical tests comparing the long-term means of moisture indices between the floodwater spreading site and the control area (2016–2024)

Index / شاخص	Paired t-test (t) / آزمون t زوجی (t)	df / آزادی	p-value (t-test) / مقدار (t-test) p	Mann-Whitney U / آزمون من-ویتنی (U)	p-value (M-W) / مقدار (M-W) p
NDWI	11.17	107	<0.001	4381	<0.001
NDMI	9.94	107	<0.001	4838	<0.001

بلندمدت را (به جای تکیه بر تک نقاط) برجسته می‌کند، زیرا یک استثناء مقطعی می‌تواند تأثیر میانگین بلندمدت را مخدوش کند، اما تحلیل روند، اثر سیستماتیک را آشکار می‌سازد. در مجموع، تحلیل پویایی زمانی تصویری گویا از اثربخشی پخش سیلاب ارائه می‌دهد. رطوبت در عرصه پخش نه تنها تقریباً همیشه بالاتر از شاهد است، بلکه این برتری در سال‌های اخیر برای NDWI پررنگ‌تر شده و در مقابل، شاهد نوسانات شدیدتری را تجربه می‌کند.

روندهای خطی انفرادی شاخص‌ها در عرصه پخش و شاهد پیش از ورود به تحلیل تفاضلی (Δ) که هسته اصلی آزمون فرضیات پژوهش را تشکیل می‌دهد، روندهای خطی ساده برای سری‌های زمانی اصلی هر شاخص در هر یک از دو عرصه به‌طور جداگانه برازش شد. هدف از این تحلیل مقدماتی، پاسخ به این پرسش است که آیا رطوبت سطحی (NDWI) و رطوبت پوشش گیاهی (NDMI) در طول دوره نه ساله، فارغ از مقایسه با شاهد، دستخوش تغییرات جهت‌دار و سیستماتیک شده‌اند یا خیر. نتایج این تحلیل در جدول ۳ خلاصه شده است. سطح معنی‌داری $\alpha = 0.05$ است.



شکل ۴- سری‌های زمانی ماهانه شاخص‌های NDWI و NDMI برای عرصه پخش سیلاب و منطقه شاهد طی دوره ۱۳۹۵-۱۴۰۳
Fig 4. Monthly time series of NDWI and NDMI indices for the floodwater spreading site and the control area during the period (2016–2024)

Table 3. Simple linear trend analysis results for NDWI and NDMI indices at the floodwater spreading site and the control area (2016–2024)

Index / شاخص	Site / عرصه	Annual Slope (β_1) / شیب سالانه	t / آماره t	p-value / مقدار p	R ² / ضریب تعیین
NDWI	Floodwater spreading (پخش سیلاب)	0.00074	0.71	0.476	0.005
NDWI	Control (شاهد)	0.00001	0.01	0.992	0.000
NDMI	Floodwater spreading (پخش سیلاب)	0.00119	1.00	0.317	0.010
NDMI	Control (شاهد)	0.00182	1.24	0	0.015

شاخص NDWI

برای شاخص NDWI، شیب سالانه برآوردشده در عرصه پخش سیلاب ($\beta_1 = +0.00074$) مثبت و در منطقه شاهد ($\beta_1 = +0.00001$) اساساً صفر است. با این حال، مقدار p برای عرصه پخش (۰/۴۷۶) و شاهد (۰/۹۹۲) هر دو بسیار فراتر از سطح معنی‌داری ۰/۰۵ قرار دارند. همچنین ضریب تعیین (R^2) برای عرصه پخش تنها ۰/۰۰۵ و برای شاهد نزدیک به صفر است، به این معنا که عملاً هیچ‌یک از تغییرات NDWI در طول زمان توسط مدل خطی تبیین نمی‌شود. بنابراین، هیچ روند معنی‌دار مه ساله‌ای در NDWI هیچ‌یک از دو عرصه به صورت مجزا مشاهده نمی‌شود.

شاخص NDMI

برای شاخص NDMI، شیب‌های مثبت نسبتاً بزرگ‌تری نسبت به NDWI برآورد شده است: ۰/۰۰۱۱۹ برای عرصه پخش و ۰/۰۰۱۸۲ برای شاهد. جالب توجه آنکه شیب شاهد از شیب عرصه پخش اندکی بزرگ‌تر است، اما این اختلاف ناچیز بوده و اساساً هیچ‌یک از این روندها نیز از نظر آماری معنی‌دار نیستند. مقدار p برای عرصه پخش ۰/۳۱۷ و برای شاهد ۰/۲۱۸ است. R^2 بسیار پایین (۰/۰۱۰) و ۰/۰۱۵ تأکید می‌کند که سیگنال روند، در صورت وجود، در میان نوسانات شدید فصلی و بین‌سالی گم شده است.

نتایج این تحلیل چند نکته کلیدی را روشن می‌سازد، فقدان روندهای معنی‌دار در خود عرصه‌ها: عدم مشاهده روند معنی‌دار در خود عرصه‌ها نشان می‌دهد که عوامل پس‌زمینه‌ای (از جمله تغییرات اقلیمی بلندمدت، نوسانات بارش، یا تغییرات مدیریتی) در طول نه سال گذشته هیچ روند جهت‌دار قوی و قابل تشخیصی در این منطقه ایجاد نکرده‌اند. به عبارت دیگر، بوم‌سازگان در مقیاس کلان در یک وضعیت نوسانی حول یک میانگین ثابت قرار داشته است. **تحلیل تفاضلی (Δ):** اگر صرفاً به روندهای انفرادی تکیه می‌شد، ممکن بود به اشتباه نتیجه گرفته شود که پخش سیلاب فاقد هرگونه اثربخشی بلندمدت است. اما آنچه در این پژوهش هدف اصلی است، نه روند مطلق، بلکه روند تفاضل بین دو عرصه است. چرا که پخش سیلاب در بستری از نوسانات طبیعی عمل می‌کند و بهبود ناشی از

آن ممکن است به صورت یک سیگنال ضعیف اما پایدار در اختلاف دو منحنی ظاهر شود، سیگنالی که در پس‌زمینه پرنوسان سری‌های اصلی محو می‌شود. این منطق، دقیقاً همان چیزی است که ضرورت تحلیل روند NDWI و ΔNDMI را توجیه می‌کند.

نوسانات فصلی و پراکندگی بالا، توان آماری آزمون روند خطی ساده روی سری‌های انفرادی را محدود می‌کند و جدا کردن روند از نویز، نیازمند طرح‌های تحلیلی قوی‌تری مانند تفاضل‌گیری و تحلیل Δ است که با حذف اثر نوسانات مشترک (نویز هم‌بسته)، قدرت تشخیص سیگنال را به شدت افزایش می‌دهد. در مجموع، نتایج این بخش زمینه‌ساز تحلیل اصلی پژوهش یعنی تحلیل تفاضلی است و نشان می‌دهد که هرگونه قضاوت در مورد پایداری و اثربخشی بلندمدت پخش سیلاب، مستلزم فراتر رفتن از نگاه انفرادی به عرصه‌ها و به‌کارگیری رویکرد تفاضلی مبتنی بر شاهد است.

تحلیل روند تفاضلی (Delta Trend): ارزیابی پایداری اثربخشی

پخش سیلاب

پس از تأیید وجود اختلاف میانگین معنی‌دار بین عرصه پخش سیلاب و شاهد و نشان‌دادن فقدان روندهای معنی‌دار در سری‌های انفرادی، محوری‌ترین پرسش پژوهش به این صورت قابل طرح است، آیا اثربخشی پخش سیلاب بر بهبود رطوبت در طول نه سال مورد مطالعه پایدار مانده، افزایش یافته، یا کاهش پیدا کرده است؟ برای پاسخ به این پرسش، تحلیل روند خطی بر روی سری‌های زمانی تفاضلی (ΔNDWI و ΔNDMI) به‌عنوان متغیرهای پاسخ اصلی اجرا شد. این متغیرها که از تفاضل مقادیر هم‌زمان عرصه پخش و شاهد (مطالعه - شاهد) در هر ماه محاسبه شده‌اند، اثر خالص پخش سیلاب را پس از حذف نوسانات مشترک اقلیمی کمی می‌کنند.

بررسی پیش‌فرض‌ها و اعتبارسنجی مدل‌ها

پیش از آنکه بتوان به ضرایب روند استناد کرد، لازم بود از معتبر بودن مدل‌های رگرسیون خطی اطمینان حاصل کرد. برای این منظور، باقی‌مانده‌های مدل تحلیل شدند. نتیجه آزمون شاپیرو-ویلک برای مدل $\Delta NDWI$ ($p = 0.542$) و $W = 989.0$ و مدل $\Delta NDMI$ ($p = 0.378$) و $W = 986.0$ تأیید کرد که پسماندها توزیعی نزدیک به

1. Residuals

جدول ۴- نتایج تحلیل روند تفاضلی (Delta Trend) برای $\Delta NDWI$ و $\Delta NDMI$ (۱۳۹۵-۱۴۰۳)

Table 4. Results of delta trend analysis for $\Delta NDWI$ and $\Delta NDMI$ (2016-2024)

Index	شاخص	Annual Slope (β_1)	HAC SE	t آماره t	p-value	R ²	Trend Interpretation
		(β_1) شیب سالانه	خطای استاندارد		p مقدار	ضریب تعیین	تفسیر روند
$\Delta NDWI$		+0.00073	0.00034	2.15	0.037*	0.054	Significant increase (افزایشی معنی دار)
$\Delta NDMI$		-0.00063	0.00050	-1.25	0.215	0.019	Stable / no trend (پایدار / بدون روند)

افزایشی داشته است. به عبارت دیگر، شکاف رطوبتی بین عرصه پخش و شاهد به مرور زمان بیشتر شده است. این می تواند ناشی از اثرات تجمعی پخش سیلاب بر بهبود ساختار خاک، افزایش ماده آلی، توسعه تدریجی پوشش گیاهی چندساله و در نتیجه افزایش ظرفیت نگهداشت آب در عرصه پخش باشد.

نتایج روند تفاضلی $\Delta NDMI$

نتایج تحلیل روند برای $\Delta NDMI$ در جدول ۴ و شکل ۵ ارائه شده است. بر خلاف $\Delta NDWI$ ، شیب برآوردشده برای $\Delta NDMI$ منفی و برابر با -0.00063 در سال به دست آمد. این شیب منفی اگر معنی دار بود، به کاهش تدریجی اثربخشی پخش سیلاب بر $NDMI$ اشاره می کرد. با این حال، مقدار p محاسبه شده برای این شیب برابر با 0.215 است که بسیار فراتر از سطح معنی داری 0.05 قرار دارد. لذا فرض صفر «نبود روند» برای $\Delta NDMI$ رد نمی شود. به عبارت دیگر، هیچ شواهد آماری مبنی بر افزایش یا کاهش معنادار $\Delta NDMI$ در طول زمان وجود ندارد. ضریب تعیین (R^2) برای این مدل نیز بسیار ناچیز و برابر با 0.019 است، به این معنا که زمان عملاً قادر به تبیین تغییرات $\Delta NDMI$ نیست. بر این اساس، نتیجه گیری می شود که اثربخشی پخش سیلاب بر $NDMI$ (رطوبت عمقی تر ماده گیاهی و خاک) در طول دوره مطالعه پایدار بوده است. میانگین $\Delta NDMI$ مثبت و معنی دار است اما این برتری در طول زمان روند مشخصی (نه افزایشی و نه کاهشی) نشان نمی دهد.

تحلیل مقایسه ای و تفسیر یکپارچه $\Delta NDWI$ و $\Delta NDMI$

تفاوت در رفتار روند $\Delta NDWI$ (افزایشی معنی دار) و $\Delta NDMI$ (پایدار بدون روند) دارای پیام های اکوهیدرولوژیکی مهمی است. $NDWI$ با استفاده از باند $SWIR1$ (حساس به آب در مزوفیل برگ و لایه بسیار سطحی خاک) بیشتر به تغییرات سریع و سطحی رطوبت پاسخ می دهد. روند افزایشی آن نشان می دهد که پخش سیلاب به تدریج منجر به بهبود وضعیت رطوبت در لایه سطحی خاک و پوشش گیاهی فعال (عمدتاً علفی و درختچه ای) شده است و این بهبود با گذشت زمان شتاب گرفته است. در مقابل، $NDMI$ که از باند $SWIR2$ (طول موج بلندتر با نفوذ بیشتر و حساسیت به رطوبت ساختاری گیاه و خاک) بهره می برد؛ احتمالاً رطوبت را در عمق بیشتری از تاج پوشش و نیمرخ خاک منعکس می کند. پایدار بودن $\Delta NDMI$ (میانگین مثبت اما بدون روند) نشان می دهد که سطح پایه رطوبت عمقی تر در عرصه پخش نسبت به شاهد در یک وضعیت تعادل جدید قرار گرفته و در طول نه سال این مزیت نسبی ثابت

نرمال دارند و انحراف معنی داری از آن دیده نمی شود. همچنین، نمودار پسماندها در برابر مقادیر پیش بینی شده الگوی خاصی (مانند قیفی شدن) نشان نداد، بنابراین شرط یکنواختی واریانس نیز برقرار تشخیص داده شد. گام بعدی، بررسی خودهمبستگی سریالی میان پسماندها بود. وجود چنین همبستگی ای می تواند خطای استاندارد ضرایب را کمتر از مقدار واقعی برآورد کند و به اشتباه، روندی را معنی دار نشان دهد. برای این بررسی از آزمون دوربین-واتسون استفاده شد. مقدار این آماره برای مدل $\Delta NDWI$ برابر با $1/87$ به دست آمد که نزدیک به 2 (مقدار ایده آل) بوده و نشان می دهد خودهمبستگی مرتبه اول معنی داری در کار نیست. برای مدل $\Delta NDMI$ ، این مقدار $1/64$ بود که اندکی از دو فاصله دارد و در ناحیه مرزی قرار می گیرد.

نتایج روند تفاضلی $\Delta NDWI$

نتایج کامل تحلیل روند برای $\Delta NDWI$ در جدول ۴ و شکل ۵ ارائه شده است. شیب برآوردشده (β_1) برای $\Delta NDWI$ برابر با $+0.00073$ در سال (معادل تقریباً $+0.00006$ در ماه) به دست آمد. این شیب مثبت بدین معناست که اختلاف $NDWI$ بین عرصه پخش و شاهد در طول زمان به طور متوسط سالانه حدود 0.00073 واحد افزایش یافته است. از آنجا که دامنه تغییرات $NDWI$ در این منطقه حدود 0.18 واحد است (جدول ۱)، این نرخ افزایش سالانه معادل تقریباً 0.4 درصد از دامنه کل در سال است که در طول نه سال به تجمعی حدود 0.0066 واحد ($3/6$ از دامنه) رسیده است. از نظر آماری، این شیب مثبت در سطح اطمینان 95% معنی دار است ($p = 0.037$). با توجه به اینکه مقدار p کمتر از 0.05 است، فرض صفر «نبود روند در اختلاف دو عرصه» رد می شود و شواهد کافی برای پذیرش وجود یک روند افزایشی ملایم اما سیستماتیک در $\Delta NDWI$ وجود دارد. ضریب تعیین (R^2) مدل برابر با 0.054 محاسبه شد که نشان می دهد حدود $5/4\%$ از واریانس $\Delta NDWI$ توسط متغیر زمان تبیین می شود. اگرچه این مقدار R^2 پایین به نظر می رسد، اما در تحلیل سری های زمانی محیطی با نوسانات شدید فصلی و بین سالی، دستیابی به R^2 های پایین امری رایج است و معنی داری آماری شیب، نشان دهنده وجود یک سیگنال واقعی در میان نویز بالای زمینه ای است.

تفسیر نتایج این بخش این را نشان می دهد که؛ اثربخشی پخش سیلاب بر بهبود $NDWI$ (محتوای آب پوشش گیاهی و رطوبت سطحی خاک) نه تنها در طول نه سال حفظ شده، بلکه روندی

مانده است.

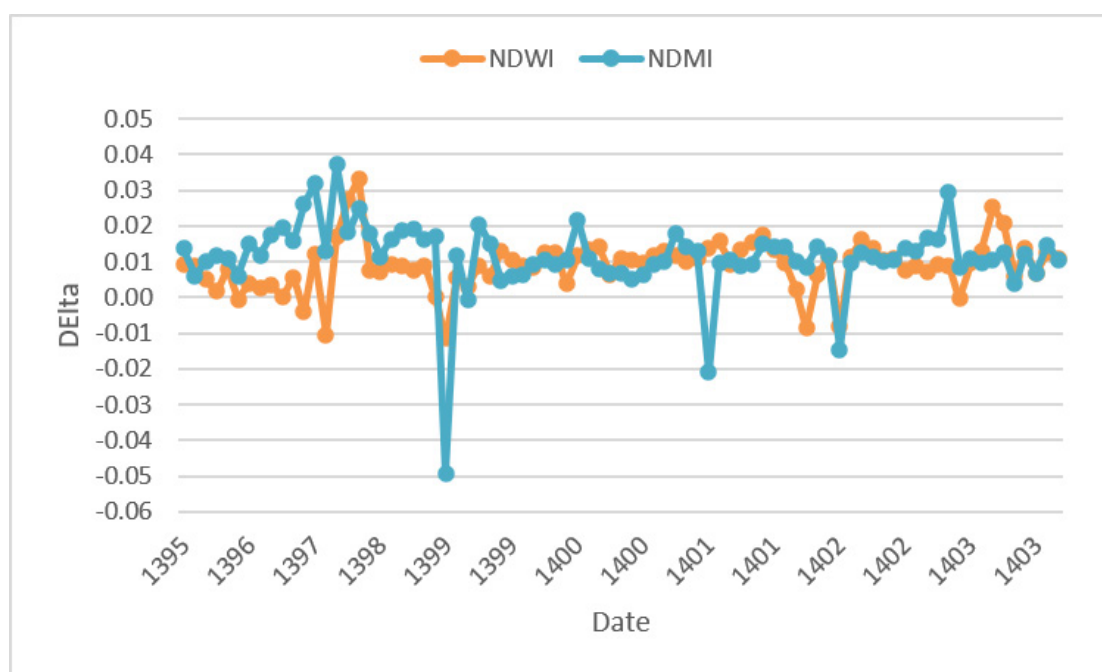
این الگوی دوگانه (افزایش NDWI سطحی + پایداری NDMI عمقی تر) می تواند بیانگر آن باشد که پخش سیلاب ابتدا یک جهش اولیه در رطوبت کلی ایجاد کرده (که در میانگین $\Delta NDMI$ مثبت دیده می شود) و سپس با توسعه تدریجی پوشش گیاهی و بهبود ساختمان خاک سطحی، اثرات ثانویه ای مانند افزایش ماده آلی، بهبود نفوذپذیری و کاهش تبخیر سطحی پدید آمده که به طور خاص NDWI (شاخص حساس تر به شرایط سطحی و پوشش گیاهی فعال) را به صورت فزاینده ای بهبود بخشیده است.

بحث و نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی بلندمدت تأثیرات پخش سیلاب بر رطوبت سطحی و رطوبت پوشش گیاهی، با بهره گیری از شاخص های NDWI و NDMI مستخرج از تصاویر سنتینل-۲ در یک طرح شاهد-مداخله، طی دوره ۹ ساله ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۳ در عرصه سه در میمه به اجرا درآمد. تحلیل های آماری در سه سطح توصیفی، استنباطی و روند تفاضلی سازماندهی شدند تا تصویری چندبُعدی از کمیت، معنی داری و پایداری اثربخشی پروژه به دست دهند. آمار توصیفی (جدول ۱) نخستین نشانه ها از بهبود شرایط رطوبتی در عرصه پخش را آشکار ساخت: میانگین NDWI در عرصه پخش (-0.22) به طور قابل ملاحظه ای بالاتر از شاهد (-0.26) و میانگین NDMI نیز در عرصه پخش (-0.13) در مقایسه با شاهد (-0.16) بهبود یافته بود. دامنه تغییرات نیز این برتری را تأیید می کرد؛

کمینه NDWI و NDMI در شاهد (به ترتیب 0.267 و -0.144) به مراتب منفی تر از عرصه پخش (به ترتیب 0.255 و -0.126) بود، که حاکی از آن است که پخش سیلاب حتی در خشک ترین ماه ها نیز توانسته است شدت خشکی را تعدیل کند. نمودارهای جعبه ای (شکل ۱) این اختلاف را به صورت بصری تأیید کردند و نشان دادند که جعبه های مربوط به عرصه پخش به طور سیستماتیک در موقعیت بالاتری نسبت به شاهد قرار دارند و میانه NDWI در عرصه پخش حتی از چارک سوم شاهد نیز فراتر رفته است. این الگو گویای آن است که بهبود رطوبت محدود به چند ماه خاص نبوده، بلکه یک پدیده فراگیر در سراسر دوره مطالعه است.

نتایج آزمون های استنباطی (جدول ۲) این مشاهدات توصیفی و بصری را با پشتوانه آماری قوی تأیید نمودند. آزمون t زوجی اختلاف میانگین بسیار معنی داری را برای هر دو شاخص بین دو عرصه نشان داد. استفاده هم زمان از آزمون ناپارامتری من-ویتنی نیز نتایج یکسانی به دست داد؛ که نشان می دهد این تفاوت ها نه به پیش فرض های توزیعی وابسته است و نه به داده های پرت حساس است. میانگین تفاوت (مطالعه - شاهد) برای NDWI معادل 0.086 و برای NDMI معادل 0.013 محاسبه شد که اگرچه در نگاه اول ممکن است کوچک به نظر برسند، اما هر دو در بافت شاخص های طیفی استاندارد که دامنه تغییرات آن ها در این منطقه حدود 0.18 واحد است، نشان دهنده بهبود نسبی قابل توجه هستند. این شواهد قوی آماری به روشنی تأیید می کنند که پخش سیلاب در طول نه سال گذشته به طور سیستماتیک و فراتر از نوسانات طبیعی،



شکل ۵- سری زمانی تفاضل (دلتا) بین عرصه پخش سیلاب و شاهد برای $\Delta NDWI$ و $\Delta NDMI$ از ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۳

Fig5. Time series of the difference (delta) between the floodwater spreading site and the control area for $\Delta NDWI$ and $\Delta NDMI$ from (2016–2024)

رطوبت سطحی و محتوای آب پوشش گیاهی را در عرصه تحت تأثیر خود بهبود بخشیده است. این یافته‌ها با نتایج مطالعات پیشین که بر افزایش رطوبت خاک و بهبود پوشش گیاهی در عرصه‌های پخش سیلاب تأکید داشته‌اند [۹، ۱۳ و ۱۸] هم‌خوانی کامل دارد، با این تفاوت که در پژوهش حاضر، این بهبود برای نخستین بار به‌طور کمی و با یک طرح علمی مبتنی بر شاهد مستندسازی شده است.

تحلیل پویایی زمانی لایه دیگری از اطلاعات را آشکار ساخت. سری‌های زمانی ماهانه هر دو شاخص، الگوی فصلی منظمی با اوج رطوبت در اواخر زمستان و بهار و افت در تابستان نشان دادند که با رژیم بارش مدیترانه‌ای منطقه انطباق کامل دارد. این هم‌فازی کامل میان دو منحنی، گواه محکمی بر همگنی اقلیمی دو عرصه و درستی انتخاب منطقه شاهد است. فراتر از نوسانات فصلی، یک الگوی بلندمدت نیز به تدریج نمایان شد. شکاف میان دو منحنی در طول زمان برای NDWI در حال افزایش بود، به‌ویژه پس از سال ۱۳۹۸ که فاصله عمودی بین دو منحنی به‌طور محسوسی بزرگ‌تر شد و در سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ به اوج خود رسید. برای NDMI نیز شکاف مثبت بود اما نوسانات بیشتری داشت و افزایش نظام‌مند مشابه NDWI در آن دیده نمی‌شد. یک واقعه جالب توجه، جهش ناگهانی و کم‌سابقه NDMI شاهد در فروردین ۱۳۹۹ (مقادیر مثبت تا ۰/۱) بود که به احتمال زیاد ناشی از یک بارندگی سنگین و کوتاه‌مدت بوده و پاسخ سریع‌تر و شدیدتر خاک فاقد پوشش گیاهی متراکم را نشان می‌دهد. این رویداد اهمیت تحلیل روند بلندمدت و رویکرد تفاضلی را برجسته می‌کند، زیرا تکیه بر تک‌نقاط می‌تواند به نتیجه‌گیری‌های گمراه‌کننده منجر شود.

هسته تحلیلی اصلی این پژوهش، یعنی تحلیل روند تفاضلی (Δ Trend)، بینش جدیدی در مورد پایداری و پویایی اثربخشی پخش سیلاب فراهم آورد. تحلیل روند خطی Δ NDWI نشان داد که این متغیر دارای شیب مثبت و معنی‌دار برابر با $+0.00073$ در سال است ($p = 0.037, R^2 = 0.054$). این یافته بیانگر آن است که اختلاف NDWI بین عرصه پخش و شاهد در طول نه سال نه تنها پایدار مانده، بلکه به‌طور ملایم اما معنی‌دار افزایش یافته است. به عبارت دیگر، اثربخشی پخش سیلاب بر رطوبت سطحی و محتوای آب پوشش گیاهی (NDWI) دارای روند فزاینده بوده است. این افزایش تدریجی را می‌توان به سازوکارهای ثانویه و تجمعی پروژه نسبت داد. با گذشت زمان، ورود مستمر سیلاب و افزایش رطوبت خاک احتمالاً به بهبود ساختمان خاک، افزایش ماده آلی، و توسعه تدریجی پوشش گیاهی چندساله انجامیده است [۱۳ و ۱۸]. این تغییرات به‌نوبه خود ظرفیت نگهداشت آب در لایه سطحی را افزایش داده، نفوذپذیری را بهبود بخشیده و تبخیر سطحی را کاهش داده‌اند، و بدین ترتیب یک چرخه بازخوردی مثبت ایجاد کرده‌اند که در شاخص (NDWI) به‌عنوان شاخصی که به‌طور خاص به رطوبت سطحی و پوشش گیاهی فعال حساس است؛ نمود یافته است. اگرچه R^2 این مدل پایین (۰/۰۵۴) است، اما این امر در تحلیل سری‌های

زمانی محیطی با نوسانات شدید فصلی امری رایج است و معنی‌داری آماری شیب نشان‌دهنده وجود یک سیگنال واقعی و سیستماتیک در میان نویز بالای زمینه‌ای است. در مقابل، تحلیل روند Δ NDMI شیب منفی اما غیرمعنی‌دار در سال، را نشان داد. با توجه به معنی‌داری میانگین Δ NDMI و غیرمعنی‌داری روند آن، می‌توان نتیجه گرفت که اثربخشی پخش سیلاب بر NDMI (رطوبت عمقی‌تر ماده گیاهی و خاک) در طول دوره مطالعه پایدار بوده و شواهدی دال بر کاهش یا افزایش معنی‌دار آن وجود ندارد. این تفاوت رفتاری بین دو شاخص را می‌توان بر اساس حساسیت طیفی متفاوت آن‌ها تفسیر نمود. NDMI با بهره‌گیری از باند SWIR2 (طول موج ۲۱۹۰ نانومتر) به رطوبت ساختاری گیاه و لایه‌های عمیق‌تر خاک حساس است و تغییرات آن معمولاً آهسته‌تر رخ می‌دهد. احتمالاً پخش سیلاب در سال‌های اولیه اجرا، یک جهش در سطح پایه رطوبت عمقی ایجاد کرده و این سطح جدید در ادامه تثبیت شده است، بدون آنکه روند صعودی یا نزولی قابل تشخیصی از خود نشان دهد. تلفیق این دو یافته تصویری پویا از سازوکارهای چندلایه اثربخشی پخش سیلاب ترسیم می‌کند. پروژه ابتدا یک بهبود پایه‌ای و پایدار در رطوبت کلی خاک و گیاه ایجاد کرده (Δ NDMI پایدار) و سپس، از طریق اثرات ثانویه اکولوژیکی، به تدریج رطوبت سطحی و پوشش گیاهی فعال را بیش از پیش تقویت نموده است (Δ NDWI افزایشی). این بینش نوین در خصوص مسیرهای متفاوت پاسخ شاخص‌های رطوبتی، در مطالعات پیشین مغفول مانده و از دستاوردهای مفهومی این پژوهش است.

از منظر روش‌شناختی، این پژوهش با چند نوآوری مهم همراه بوده است. نخست، به‌کارگیری طرح شاهد-مداخله (Control-Impact) به‌جای تحلیل منفرد عرصه پخش، امکان تفکیک اثر مداخله از نوسانات طبیعی اقلیم را فراهم ساخت. شاهد این ادعا آنکه روندهای خطی انفرادی شاخص‌ها در هر یک از دو عرصه به‌تنهایی فاقد معنی‌داری آماری بودند. اگر صرفاً به این روندهای انفرادی اتکا می‌شد، ممکن بود به اشتباه نتیجه گرفته شود که پخش سیلاب فاقد هرگونه اثربخشی بلندمدت است. اما تحلیل تفاضلی، با حذف نوسانات مشترک (نویز هم‌بسته)، سیگنال ضعیف اما واقعی بهبود فزاینده NDWI را آشکار ساخت. این یافته به‌روشنی بر ضرورت به‌کارگیری طرح‌های علمی و تحلیل‌های تفاضلی در ارزیابی مداخلات محیطی تأکید می‌کند و هم‌سو با توصیه‌های Smokorowski و همکاران [۲۰ و ۲۲] در خصوص الزام استفاده از طرح‌های شاهد - مداخله برای حصول استنتاج‌های معتبر است. دومین نوآوری، تحلیل روند تفاضلی به‌جای مقایسه مقطعی میانگین‌ها بود. اغلب پژوهش‌های پیشین در زمینه پخش سیلاب بر مقایسه وضعیت قبل و بعد از اجرا یا مقایسه میانگین شاخص‌ها با شاهد (در صورت وجود) متمرکز بوده‌اند. پژوهش حاضر نشان داد که افزودن بُعد زمان به تحلیل تفاضلی می‌تواند پویایی اثربخشی را آشکار سازد و بینش عمیق‌تری در مورد پایداری، افزایش یا کاهش

منافع پروژه در طول زمان فراهم آورد. سوم، کاربرد هم‌زمان NDWI و NDMI امکان تفکیک پاسخ‌های مختلف رطوبتی را میسر ساخت و نشان داد که شاخص‌های طیفی مختلف ممکن است مسیرهای زمانی متفاوتی را در پاسخ به یک مداخله واحد طی کنند.

از جمله محدودیت‌های این پژوهش این است که؛ ماهیت غیرمستقیم شاخص‌های طیفی است. NDWI و NDMI اگرچه در مطالعات متعدد همبستگی قابل‌قبولی با اندازه‌گیری‌های زمینی رطوبت نشان داده‌اند. اما ذاتاً تحت تأثیر عوامل مخدوش‌کننده‌ای مانند گردوغبار اتمسفری، تغییرات زاویه تابش خورشید، تفاوت‌های ظریف در نوع و بافت خاک، و اثرات فنولوژیکی پوشش گیاهی قرار دارند. نبود داده‌های میدانی هم‌زمان رطوبت خاک و زیست‌توده گیاهی برای واسنجی و اعتبارسنجی مستقیم این شاخص‌ها، از دیگر محدودیت‌های این مطالعه است. از سوی دیگر؛ R^2 پایین مدل‌های روند نشان می‌دهد که بخش عمده واریانس NDWI توسط عوامل تصادفی، چرخه‌های فصلی، یا نوسانات بین‌سالی بارش تبیین می‌شود و روند تشخیص داده‌شده یک سیگنال نسبتاً ضعیف در پس‌زمینه‌ای پرنویز است. بنابراین، تعمیم‌دهی این نتایج به سایر ایستگاه‌های پخش سیلاب یا مناطق با شرایط اقلیمی متفاوت باید با احتیاط صورت گیرد. علاوه بر موارد فوق، یکی دیگر از محدودیت‌های اساسی این پژوهش، عدم دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای مربوط به دوره قبل از اجرای پروژه پخش سیلاب (پیش‌پروژه) است. این امر امکان اجرای طرح کامل BACI¹ را فراهم نمی‌ساخت. از این رو، توصیه می‌شود در مطالعات آینده، با تلفیق تصاویر راداری سنتینل-۱ (جهت برآورد مستقیم‌تر رطوبت خاک و نفوذ به ابر) و تصاویر آرشویو لندست (برای پوشش دوره زمانی طولانی‌تر و پیش از اجرای پروژه)، تحلیل کامل‌تری از اثرات بلندمدت پخش سیلاب انجام شود.

با این وجود، چارچوب روش‌شناختی ارائه‌شده در این پژوهش، شامل تلفیق تصاویر رایگان و با قدرت تفکیک بالای سنتینل-۲، پردازش ابری در گوگل ارث انجین، و تحلیل روند تفاضلی در یک طرح شاهد-مداخله، یک الگوی علمی، کم‌هزینه و تکرارپذیر برای پایش مستمر اثربخشی پروژه‌های پخش سیلاب و سایر مداخلات احیای اراضی خشک فراهم می‌آورد. این چارچوب می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای ایجاد یک شبکه پایش ملی برای ارزیابی عملکرد ایستگاه‌های تغذیه مصنوعی و پروژه‌های مقابله با بیابان‌زایی در ایران و مناطق مشابه اقلیمی مورد استفاده قرار گیرد. برای تکمیل و توسعه یافته‌های پژوهش حاضر، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، تصاویر سنتینل-۲ با داده‌های راداری سنتینل-۱ (جهت برآورد مستقیم‌تر رطوبت خاک و نفوذ به زیر پوشش ابر) و همچنین با تصاویر آرشویو لندست (برای پوشش دوره قبل از احداث پروژه و اجرای طرح) تلفیق شود. همچنین، انجام اندازه‌گیری‌های میدانی هم‌زمان رطوبت خاک در اعماق مختلف و زیست‌توده گیاهی برای

واسنجی دقیق شاخص‌های طیفی، و نیز بررسی ارتباط کمی بین روند NDWI و Δ NDMI با متغیرهای مدیریتی مانند حجم و تواتر سیلاب‌های هدایت‌شده، گام‌های ضروری بعدی برای درک عمیق‌تر سازوکارهای حاکم و بهینه‌سازی بهره‌برداری از این سامانه‌ها خواهد بود.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش شواهد کمی، مستند و قابل اعتمادی برای اثربخشی بلندمدت پخش سیلاب بر بهبود رطوبت سطحی و رطوبت پوشش گیاهی در عرصه سه در میمه فراهم آورد. پخش سیلاب نه تنها به‌طور میانگین و در مقایسه با شرایط طبیعی شاهد، وضعیت رطوبتی را ارتقا داده، بلکه در طول زمان، این مزیت برای NDWI روندی افزایشی و برای NDMI روندی پایدار نشان داده است. این الگوی دوگانه، مبین آن است که پروژه‌های پخش سیلاب، فراتر از یک مداخله هیدرولوژیکی مقطعی، می‌تواند با فعال‌سازی تدریجی سازوکارهای ثانویه اکولوژیکی مانند بهبود خاک و توسعه پوشش گیاهی، روندی خودتقویت‌کننده از احیای اراضی خشک را آغاز کنند که منافع آن در بلندمدت فراینده خواهد بود. این بینش می‌تواند در ارزیابی‌های اقتصادی و تحلیل‌های هزینه-فایده این پروژه‌ها نیز لحاظ شود، چرا که ارزیابی‌های کوتاه‌مدت ممکن است ارزش کامل آن‌ها را کمتر از واقع برآورد کنند. چارچوب تحلیلی ارائه‌شده می‌تواند به‌عنوان یک الگوی استاندارد برای پایش و ارزیابی علمی سایر پروژه‌های تغذیه مصنوعی و احیای اراضی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به کار گرفته شود و بدین ترتیب، گامی مؤثر در جهت تصمیم‌سازی آگاهانه و مبتنی بر شواهد در مدیریت پایدار منابع آب و مقابله با بیابان‌زایی برداشته شود. لازم به ذکر است که نتایج این پژوهش صرفاً مربوط به عرصه پخش سیلاب سه در استان اصفهان با شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک و بازه زمانی ۹ ساله (۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴) است. تعمیم این یافته‌ها به کل ایران یا سایر مناطق با اقلیم‌های متفاوت (مانند مناطق مرطوب یا فراخشک) بدون مطالعات تکمیلی مجاز نیست. هرگونه تعمیم باید با در نظر گرفتن تفاوت‌های محلی در نوع خاک، رژیم بارش، جنس رواناب، سن پروژه و تاریخچه عملیات پخش سیلاب انجام شود. این پژوهش یک چارچوب روش‌شناختی ارائه می‌دهد، نه مقادیر عددی که در سایر مناطق تعمیم‌پذیر باشد. برای مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب و بیابان‌زدایی، این پژوهش نشان می‌دهد که پایش مستمر پروژه‌های پخش سیلاب با استفاده از داده‌های رایگان ماهواره‌ای و تحلیل روند تفاضلی، می‌تواند به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌یار کم‌هزینه برای ارزیابی اثربخشی بلندمدت، تخصیص بهینه اعتبارات و اصلاح به‌نگام عملیات اجرایی مورد استفاده قرار گیرد.

سپاسگزاری

نویسندگان مراتب سپاسگزاری خود را از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان به خاطر همکاری و تأمین داده‌ها اعلام می‌دارند.

1. Before-After-Control-Impact

8. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.

9. Hashemi, H., Berndtsson, R., & Persson, M. (2015). Artificial recharge by floodwater spreading estimated by water balances and groundwater modelling in arid Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 60(2), 336–350. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.881485>.

10. Jin, S., & Sader, S. A. (2005). Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. *Remote Sensing of Environment*, 94(3), 364–372. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.10.012>

11. Main-Knorn, M., Pflug, B., Louis, J., Debaecker, V., Müller-Wilm, U., & Gascon, F. (2017). Sen2Cor for Sentinel-2. *Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII*, 10427, 37–48. SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2278218>.

12. McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.

13. Mesbah, S. H., Mohammadnia, M., & Kowsar, S. A. (2016). Long-term improvement of agricultural vegetation by floodwater spreading in the Gareh Bygone Plain, Iran. *Hydrogeology Journal*, 24(2), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1354-y>.

14. Mirjalili, A., Tabatabaeizadeh, M., Hakimzadeh, M. R., & Mashhadi, N. (2016). Investigation effect of floodwater spreading on vegetation and soil (Case study: Floodwater spreading of Miankooh, Yazd). *Desert Management*, 4(7), 26–34. <https://doi.org/10.22034/jdmal.2016.22241>.

15. Moshir Panahi, D., Kalantari, Z., Ghajarnia, N., Seifollahi-Aghmiuni, S., & Destouni, G. (2020). Variability and change in the hydro-climate and water resources of Iran over a recent 30-year period. *Scientific Reports*, 10, 7450. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64089-y>.

16. Mostafaei, A., Kalantari, N., & Kheirkhah Zarkesh, M. (2016). Assessing the success of floodwater spreading projects using a fuzzy approach. *Water Science and Technology*, 74(8), 1980–1991. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.394>.

17. Nabinejad, S., & Schüttrumpf, H. (2023). Flood risk management in arid and semi-arid areas: A comprehensive review of challenges, needs, and opportunities. *Water*, 15(17), 3113. <https://doi.org/10.3390/w15173113>.

18. Pakparvar, M., Walraevens, K., Cheraghi, S. A. M., Ghahari, G., Cornelis, W., Gabriels, D., & Kowsar, S. A. (2017). Assessment

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچگونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

مهدی هاشمی: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله.

علی دسترنج: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج.

منابع مورد استفاده

1. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>.

2. Farhadi, H., Ebadi, H., Kiani, A., & Asgary, A. (2025). Introducing a new index for flood mapping using Sentinel-2 imagery. *Computers & Geosciences*, 194, 105742. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2024.105742>.

3. Flood, N. (2013). Seasonal composite Landsat TM/ETM+ images using the medoid (a multi-dimensional median). *Remote Sensing*, 5(12), 6481–6500. <https://doi.org/10.3390/rs5126481>

4. Gao, B.-C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3).

5. Ghayoumian, J., Ghermezcheshmeh, B., Feiznia, S., & Noroozi, A. A. (2005). Integrating GIS and DSS for identification of suitable areas for artificial recharge, case study Meimeh Basin, Isfahan, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 47(4), 493–500. <https://doi.org/10.1007/s00254-004-1169-y>.

6. Ghorbani, J., Dowlati, P., & Heydari, G. (2015). Effects of floodwater spreading on the vegetation and soil in an arid rangeland. *Arid Land Research and Management*, 29(4), 473–486. <https://doi.org/10.1080/15324982.2015.1019160>.

7. Goffi, A., Stroppiana, D., Brivio, P. A., & Bordogna, G. (2019). Towards an automated approach to map flooded areas from Sentinel-2 MSI data and soft integration of water spectral features. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 84, 101951. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101951>.

22. Watson, C. S., King, O., Miles, E. S., & Quincey, D. J. (2018). Optimising NDWI supraglacial pond classification on Himalayan debris-covered glaciers. *Remote sensing of environment*, 217, 414-425. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.020>.
23. Wilson, E. H., & Sader, S. A. (2002). Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*, 80(3), 385-396. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00318-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00318-2).
24. 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. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>.
- of groundwater recharge influenced by floodwater spreading: An integrated approach with limited accessible data. *Hydrological Sciences Journal*, 62(1), 147-164. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1183164>.
19. Shelestov, A., Lavreniuk, M., Kussul, N., Novikov, A., & Skakun, S. (2017). Exploring Google Earth Engine platform for big data processing: Classification of multi-temporal satellite imagery for crop mapping. *Frontiers in Earth Science*, 5, 17. <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00017>.
20. Smokorowski, K. E., & Randall, R. G. (2017). Cautions on using the Before-After-Control-Impact design in environmental effects monitoring programs. *Facets*, 2(1), 212-232. <https://doi.org/10.1139/facets-2016-0058>.
21. Varghese, D., Radulovic, M., Ćuković, S., & Crnojević, V. (2021). Reviewing the potential of Sentinel-2 in assessing drought. *Remote Sensing*, 13(17), 3355. <https://doi.org/10.3390/rs13173355>.