نشریه علمی

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management
Science & Engineering

Vol. 20, No. 73, Spummer 2026

سال بیستم- شماره ۷۳- تابستان ۱۴۰۵

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 Hashemi[1] Ali Dastranj[2]

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 (ΔNDWI and ΔNDMI). 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.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

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. ΔNDWI 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, ΔNDMI 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 ΔNDWI with stable ΔNDMI—reveals layered mechanisms: floodwater spreading initially stabilized deep soil moisture (stable ΔNDMI), 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 ΔNDWI). 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.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

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

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

ارزیابی اثربخشی بلندمدت پخش سیلاب با تحلیل روند تفاضلی NDWI و NDMI از سری‌های زمانی سنتینل-۲ (مطالعه موردی: عرصه سُه، 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 کمّی و بلندمدت اثربخشی این سامانه‌ها با روش‌های سنّتی 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 سُه (استان اصفهان) به انجام رسید. در این راستا، سری‌های زمانی ماهانه شاخص‌های NDWI و NDMI از تصاویر سنتینل-۲ طی بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲٤ (۹ سال) در سامانه گوگل ارث انجین استخراج شد. با بهره‌گیری از طرح شاهد-مداخله، متغیرهای تفاضلی ΔNDWI و ΔNDMI 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(۰/۰۲۲-) و در شاهد (۰/۲۲٦-) و میانگین NDMI نیز در عرصه پخش (۰/۱۰۳-) و در شاهد (۰/۱۱٦-) است که بیان‌گر مقادیر بالاتر هر دو شاخص در عرصه پخش می‌باشد. شیب سالانه ΔNDWI برابر با ۰/۰۰۰۷۳ و از نظر آماری معنی‌دار بود ($p < ۰/۰۵$)؛ در حالی که روند ΔNDMI معنی‌داری آماری نشان نداد. این الگوی دوگانه آشکار می‌سازد که پخش سیلاب نخست سطح پایه رطوبت عمقی خاک را افزایش و تثبیت کرده (ΔNDMI 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 (ΔNDWI 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 فنولوژی 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.

کلید واژه‌ها: 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 سُه، اصفهان). علوم ومهندسی آبخیزداری ایران. ۱٤۰۵؛ ۲۰(۷۳): ۱-۱۹

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران سال ۱٤۰۵، دوره ۲۰، شماره ۷۳، ۱- ۱۹

ناشر: انجمن آبخیزداری ایران

CC BY NC

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.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

مقدمه

تغییرات اقلیمی، افزایش نوسان‌پذیری سامانه‌های جوی و تشدید رخدادهای حدی در دهه‌های اخیر، الگوی توزیع زمانی و مکانی بارش را در بسیاری از مناطق جهان، به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک، دگرگون کرده است. در چنین مناطقی، کمبود آب و وقوع سیلاب‌های ناگهانی، مدیریت منابع آب را به مسئله‌ای پیچیده و چندبُعدی تبدیل کرده است. ایران نیز به‌عنوان کشوری عمدتاً خشک و نیمه‌خشک، هم‌زمان با افت منابع آب تجدیدپذیر، فشار بهره‌برداری از آبخوان‌ها و افزایش ریسک سیلاب مواجه است؛ بنابراین، توسعه روش‌های علمی برای پایش اثرات سیلاب و ارزیابی کارایی سازوکارهای مدیریتی، ضرورتی انکارناپذیر دارد. مطالعات نشان داده‌اند که سامانه‌های اقلیمی ایران در دهه‌های اخیر دستخوش نوسان و تغییر معنادار شده‌اند و این تغییرات می‌توانند بر تغذیه آبخوان، پایداری پوشش گیاهی و رخداد سیلاب اثر بگذارند [۱۵، ۱۷].

در چنین زمینه‌ای، پخش سیلاب به‌عنوان یک راهبرد و در عین حال کارآمد در زمینه مدیریت آب در مناطق خشک، جایگاه ویژه‌ای دارد. این روش با هدایت سیلاب‌های فصلی به پهنه‌های نفوذپذیر، امکان افزایش تغذیه آب زیرزمینی، بهبود رطوبت خاک، کاهش شدت رواناب، کنترل فرسایش و ارتقای شرایط اکولوژیک را فراهم می‌کند. پژوهش‌های انجام‌شده در ایران نشان داده‌اند که پخش سیلاب فقط یک اقدام هیدرولوژیک نیست، بلکه بر ویژگی‌های خاک، الگوی پوشش گیاهی و حتی ساختار اجتماعی و بهره‌برداری از سرزمین اثر می‌گذارد. برای مثال، قیومیان و همکاران [۵] در حوضه میمه نشان دادند که شناسایی مناطق مناسب برای تغذیه مصنوعی آبخوان، به‌طور مستقیم به ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولوژیک زمین وابسته است و پخش سیلاب می‌تواند به‌عنوان روشی اقتصادی برای بهره‌برداری از رواناب‌های سیلابی مطرح باشد. همچنین هاشمی و همکاران [۹]، نشان دادند که در یک سامانه پخش سیلاب در ایران خشک، بخش قابل‌توجهی از آب سیلابی می‌تواند به تغذیه آبخوان کمک کند، هرچند برداشت بیش‌ازحد آب زیرزمینی ممکن است اثر مثبت آن را تضعیف کند. افزون بر این، قربانی و همکاران [٦] و نیز میرجلیلی و همکاران [١٤] نشان داده‌اند که پخش سیلاب می‌تواند در بلندمدت بر ترکیب گونه‌ای، پوشش گیاهی و برخی ویژگی‌های خاکی اثرگذار باشد؛ بنابراین، ارزیابی اثرات این عملیات باید به‌صورت هم‌زمان آب، خاک و پوشش گیاهی را در نظر بگیرد.

با وجود اهمیت بالای پخش سیلاب، ارزیابی میدانی آن در مقیاس زمانی بلندمدت با محدودیت‌هایی مانند پراکندگی مکانی پهنه‌ها، هزینه بالای نمونه‌برداری، فقدان داده‌های پیوسته و دشواری تفکیک اثر عملیات از نوسانات طبیعی اقلیم همراه است. در چنین شرایطی، سنجش از دور به‌سبب توانایی در پایش غیرمخرب، گسترده و تکرارپذیر سطح زمین، به ابزاری کلیدی برای تحلیل اثرات پخش سیلاب تبدیل شده است. در واقع، داده‌های ماهواره‌ای این امکان را فراهم می‌کنند 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[1])، امکان مدیریت و تحلیل حجم عظیمی از تصاویر چندزمانه را با سرعت و دقت بالا فراهم کرده‌اند و به همین دلیل در مطالعات پایش سیلاب، خشکسالی، رطوبت خاک و پوشش گیاهی بسیار پرکاربرد شده‌اند [۸، ۱۹]. در واقع، ترکیب سنجش از دور و پردازش ابری، زمینه را برای تحلیل‌های بلندمدت و مقایسه‌ای در سامانه‌های پخش سیلاب فراهم می‌کند.

در میان شاخص‌های طیفی، NDWI[2] و NDMI[3] دو شاخص مکمل و بسیار مهم برای تحلیل اثرات پخش سیلاب به شمار می‌روند. NDWI که نخستین‌بار توسط McFeeters [۱۲] معرفی شد، با استفاده از باند سبز و فروسرخ نزدیک طراحی شده و هدف آن آشکارسازی آب‌های سطحی و تفکیک پهنه‌های آبی از خاک و پوشش گیاهی است. این شاخص در مناطق دارای آب آزاد، پهنه‌های آب‌گرفته و کانال‌های سیلابی عملکرد مناسبی دارد و به‌ویژه برای آشکارسازی تغییرات سریع سطح آب در رخدادهای سیلابی مفید است. در مقابل، NDMI که در ادبیات سنجش از دور به‌عنوان شاخصی برای برآورد محتوای آب در پوشش گیاهی مطرح است، بر پایه نسبت فروسرخ نزدیک به فروسرخ کوتاه‌موج تعریف می‌شود و نسبت به وضعیت رطوبتی گیاه و تنش آبی حساس است. بنابراین، NDWI بُعد آب سطحی را برجسته می‌کند، در حالی‌که NDMI بُعد رطوبت پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. همین تمایز باعث می‌شود که این دو شاخص در کنار هم بتوانند تصویری چندلایه از پاسخ محیطی به پخش سیلاب ارائه دهند؛ تصویری که هم آب‌گرفتگی مستقیم و هم تغییرات پساشیبی در رطوبت خاک و پوشش گیاهی را بازتاب می‌دهد [۱۲، ۲٤، ۲۳ و ٤].

نکته مهم آن است که NDWI و NDMI را نباید به‌صورت شاخص‌هایی رقیب، بلکه باید به‌عنوان دو ابزار مکمل تفسیر کرد. NDWI برای تشخیص آب‌های سطحی و پهنه‌های غرقابی بسیار مناسب است، اما در برخی شرایط مانند سطوح تیره، سایه‌ها، آب‌های گل‌آلود یا محیط‌های 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 به‌تنهایی برای جداسازی آب سطحی کفایت ندارد. از همین‌رو، ترکیب این دو شاخص در یک طراحی تحلیلی می‌تواند هم گسترش آب سطحی و هم پاسخ رطوبتی بوم‌سازگان را آشکار کند. در ادبیات علمی نیز نشان داده شده است که شاخص‌های آب‌محور و رطوبتی در کنار هم، به‌ویژه در داده‌های Sentinel-2 ، دقت تفسیر رخدادهای سیلابی را افزایش می‌دهند و در بسیاری از مطالعات، رویکردهای

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

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

چندشاخصی یا چندمنبعی نسبت به تحلیل تک‌شاخصی برتری داشته‌اند [۲٤، 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 قابل‌تکرارتر 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 ۲۰۱٦ تا ۲۰۲٤ برای بررسی اثرات پخش سیلاب در سُه در 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. پاکپرور 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 گریبایگان نشان دادند که پخش سیلاب می‌تواند در بلندمدت به بهبود پوشش زراعی کمک کند. قربانی و همکاران [٦] 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 [۱۸،۳، ٦ 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 سُه در 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 ۲۰۱٦ تا ۲۰۲٤ 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 [۱٦، ۱۷].

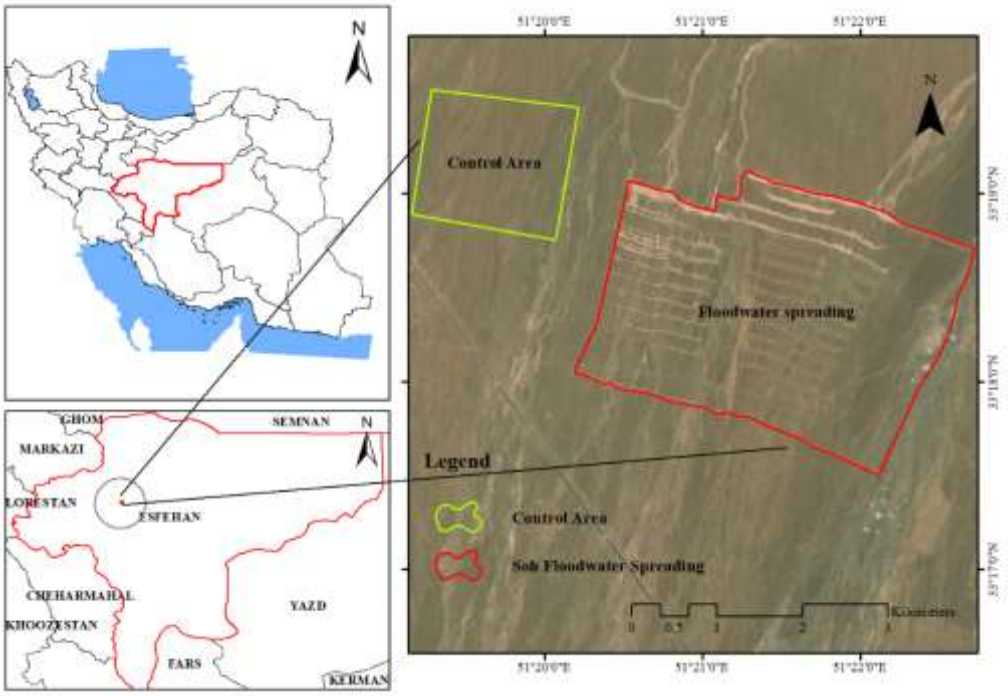
بر این اساس، هدف این پژوهش، ارزیابی علمی اثرات پخش سیلاب بر عرصه سُه در میمه در استان اصفهان با استفاده از شاخص‌های NDWI و NDMI استخراج‌شده از تصاویر Sentinel-2 در بستر Google Earth Engine و در بازه زمانی ۲۰۱٦ تا ۲۰۲٤ است. در این مطالعه، منطقه پخش سیلاب و یک منطقه شاهد مشابه از نظر شرایط محیطی و مکانی 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 سُه (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.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]



شکل۱- موقعیت ایستگاه پخش سیلاب سه(Sol)

Soh floodwater spreading station Fig1. Location of the

داده‌های ماهواره‌ای و پیش‌پردازش

در این پژوهش از تصاویر ماهواره Sentinel-2 MSI Level-2A متعلق به برنامه کوپرنیک آژانس فضایی اروپا استفاده شد. محصول Level-2Aبازتابندگی سطح زمین[1] را پس از تصحیح اتمسفری با الگوریتم Sen2Cor ارائه می‌دهد و از دقت بالایی برای تحلیل‌های کمّی 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 پویایی‌های پوشش گیاهی و رطوبت فراهم می‌کنند [۱]. بازه زمانی مطالعه از **فروردین** ۱۳۹۵ (آوریل ۲۰۱۶) تا اسفند ۱۴۰۳ (مارس ۲۰۲۴) به‌مدت ۹ سال شمسی تعیین شد.

تمامی مراحل پیش‌پردازش و پردازش تصاویر در محیط Google Earth Engine (GEE) با زبان PythonScript پیاده‌سازی شد. ابتدا پیکسل‌های آلوده به ابر و سایه ابر با استفاده از باند کیفیQA60 از هر تصویر حذف شدند. برای حصول اطمینان بیشتر، تنها تصاویری با پوشش ابری کمتر از پنج درصد در محدوده پلیگون‌ها وارد تحلیل شدند. سپس، برای کاهش نویزهای باقی‌مانده، حذف مقادیر پرت ناشی از سایه‌های پنهان یا ذرات معلق جوی، و ایجاد یک سری زمانی منظم و همگن، از روش ترکیب میانه ماهانه [2] استفاده شد. در این روش، برای هر ماه شمسی، میانه تمامی پیکسل‌های معتبر موجود در آن ماه محاسبه شده و یک تصویر ترکیبی تولید می‌شود [۲]. این راهکار در مقایسه با میانگین‌گیری، اثر پیکسل‌های پرت را به حداقل می‌رساند و برای تحلیل روند در مناطق خشک که تغییرات طیفی شدید است توصیه شده است. نتیجه این مرحله تولید ۱۰۸ تصویر ماهانه (۹ سال × ۱۲ ماه) برای هر باند بود که مبنای محاسبه شاخص‌های طیفی قرار گرفت.

محاسبه شاخص‌های طیفی رطوبت

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

شاخص تفاضلی نرمال‌شده 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 می‌کند. برای تصاویر سنتینل-۲، NDWI از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

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

که در آن B8 باند ۸ (NIR، طول‌موج مرکزی ۸۴۲ نانومتر) و B11 باند ۱۱ (SWIR1، طول‌موج مرکزی ۱۶۱۰ نانومتر) است. افزایش مقادیر این شاخص (مقادیر نزدیک‌تر به صفر یا مثبت) نشان‌دهنده افزایش رطوبت در پوشش گیاهی و خاک سطحی هست.

شاخص تفاضلی نرمال‌شده رطوبت(NDMI)

این شاخص با ساختاری مشابه اما با استفاده از باند فروسرخ

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

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

موج کوتاه دوم(SWIR2) ، برای نخستین بار توسط Hardisky (1983)پیشنهاد و سپس توسط Jin و Sader [۱۰] 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:

رابطه(۲) $NDMI=(B8-B12)/(B8+B12)$

در این رابطه B12 باند ۱۲ (SWIR2، طول‌موج مرکزی ۲۱۹۰ نانومتر) است. کاهش مقادیر NDMI (منفی‌تر 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 علّی 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 [۲۰]. 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 ٤ تهیه شد.

رابطه(۳) $\Delta NDWI_t=NDWI_{(study,t)}-NDWI_{(control,t)}$

رابطه(٤) $\Delta NDMI_t=NDMI_{(study,t)}-NDMI_{(control,t)}$

این سری‌های تفاضلی (Δ) تأثیر خالص پخش سیلاب را، پس از کسر نوسانات مشترک اقلیمی (خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها)، کمّی 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 ٤.٣.١ 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 :[1] 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[2]: 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[3]

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).

رابطه (۵) $\Delta Index_t=\beta_0+\beta_1\times Time_t+\varepsilon_t$

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 [٤]، این اختلاف ۰/۰۰٦ واحدی نشان‌دهنده بهبود نسبی و پایدار شرایط رطوبتی در عرصه پخش سیلاب نسبت به منطقه شاهد است. دامنه تغییرات NDWIدر عرصه پخش از ۰/۲۵۵- تا ۰/۰۹۲- و در شاهد از ۰/۲٦۷- 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 (۰/۰۱۸ در مقابل ۰/۰۲۰) 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

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

جدول ۱- آمار توصیفی شاخص‌های NDWI و NDMI برای عرصه پخش سیلاب و منطقه شاهد (۲۰۱۶–۲۰۲۴)

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

تغییرپذیری آن را در محدوده طبیعی حفظ کرده است.

برای شاخص NDMI، میانگین در عرصه پخش سیلاب ۰/۱۰۳- (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 نه‌تنها میانگین، بلکه شرایط حدی خشکی را نیز تعدیل کند.

برای تشریح بهتر تفاوت‌های توزیع، نمودارهای جعبه‌ای [1] و هیستوگرام [2] 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 [3] 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 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 ۰/۵۱+ 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

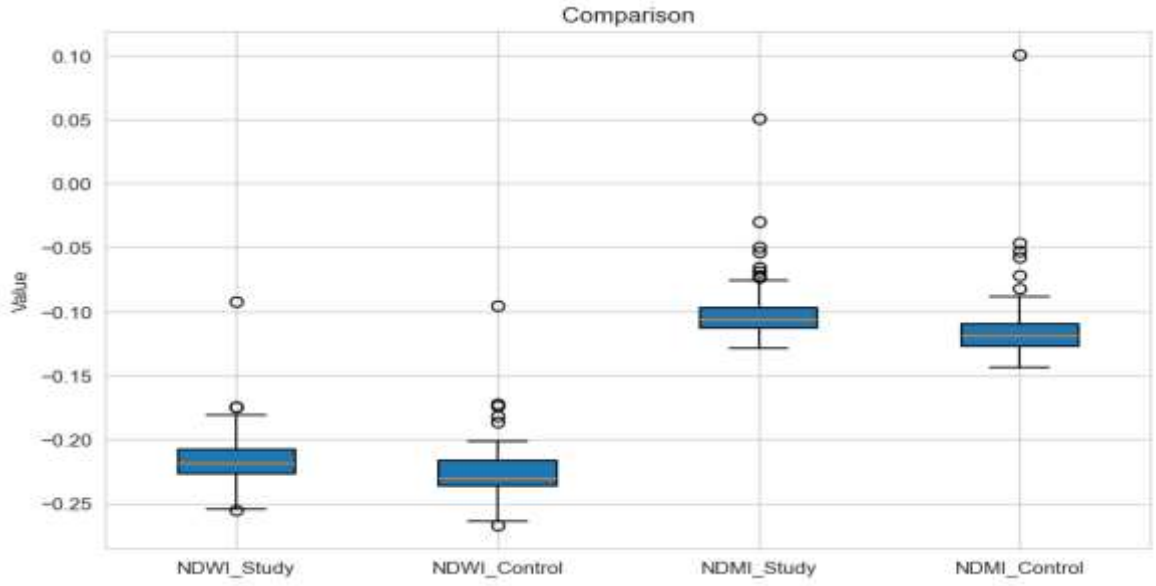
برای بررسی این فرضیه که مداخله پخش سیلاب به‌طور میانگین منجر به بهبود معنی‌دار رطوبت سطحی و رطوبت پوشش گیاهی نسبت به منطقه شاهد شده است، از دو آزمون استنباطی مکمل بهره گرفته شد، آزمون پارامتری t زوجی (Paired t-test) و آزمون ناپارامتری من -ویتنی(Mann-Whitney U). با به‌کارگیری دو آزمون متفاوت، می‌توان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

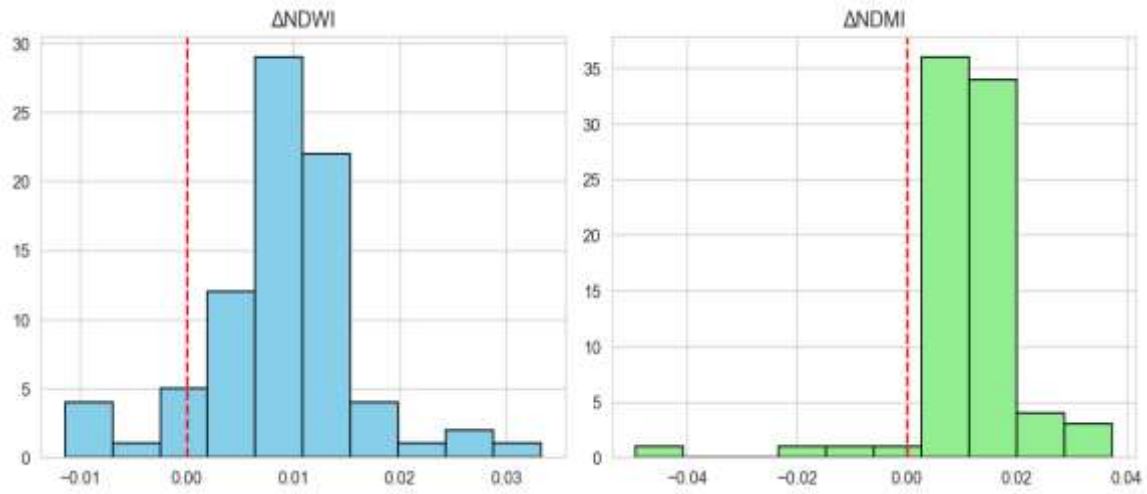
1 Boxplot
2 Histogram
3 IQR

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]



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

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 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 می دهد 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:

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

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-value 0.0002 و برای NDMI ، آماره U = 4838 با p-value کمتر از 0.0001 به‌دست آمد. هر دو مقدار p بسیار کمتر از 0.05 هستند، لذا فرض صفرِ 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 ٤ 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 (۱۳۹۵–۱۳۹٦)، شکاف نسبتاً کم است و در برخی ماه‌ها دو منحنی بر هم منطبق می‌شوند. از سال ۱۳۹۸ به بعد، درNDWI ، شاهده بزرگ‌تر شدن تدریجی این شکاف هستیم که در سال‌های ۱٤۰۲ و ۱٤۰۳ 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 بین‌سالی: 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 (۲۰۱٦–۲۰۲٤)

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 / درجه آزادی	p-value (t-test) / مقدار p (t-test)	Mann–Whitney U / آزمون من–ویتنی(U)	p-value (M–W) / مقدار p (M–W)
NDWI	11.17	107	<0.001	4381	<0.001
NDMI	9.94	107	<0.001	4838	<0.001

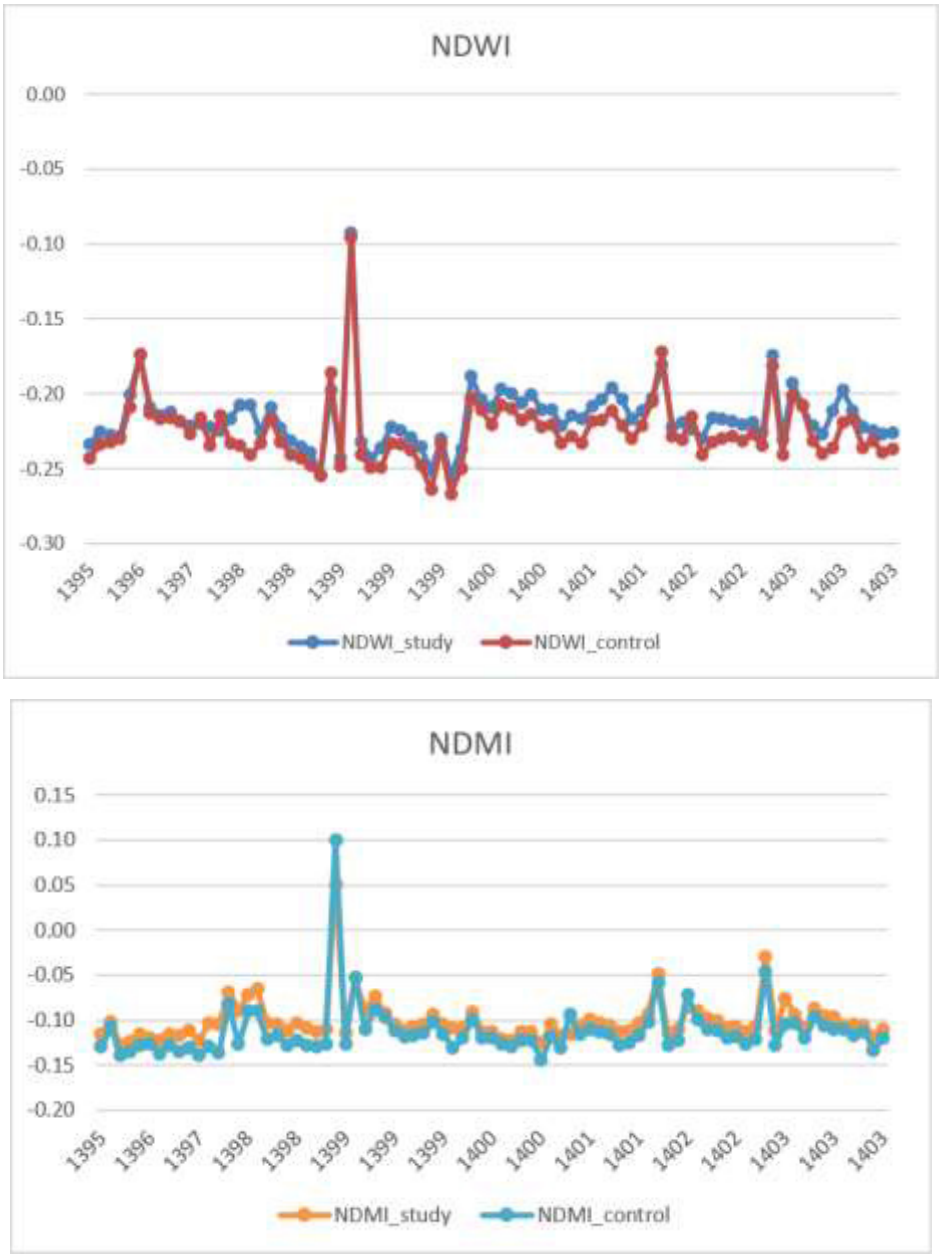
[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

بلندمدت را (به‌جای تکیه بر تک‌نقاط) 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 نه‌تنها تقریباً همیشه بالاتر از شاهد است، بلکه این برتری در سال‌های اخیر برای NDWIپررنگ‌تر 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 ٤- 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)

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

جدول ۳- نتایج تحلیل روند خطی ساده (انفرادی) شاخص‌های NDWI و NDMI در عرصه پخش سیلاب و منطقه شاهد (۱۳۹۵-۱۴۰۳)

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

شاخص / Index	عرصه / Site	شیب سالانه (β_1) / Annual Slope (β_1)	آماره t / t	مقدار p / p-value	ضریب تعیین / R^2
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. **ضرورت 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 ΔNDWI 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 Δاست 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 (ΔNDWIو 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 کمّی 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[1] تحلیل شدند. نتیجه آزمون شاپیرو–ویلک برای مدل ΔNDWI (W = ۰/۹۸۹،۰ p= ۰/۵۴۲) و مدل ΔNDMI (۰/۳۷۸ W =/ ۹۸۶،۰ p=) تأیید کرد که پسماندها توزیعی نزدیک به

1. Residuals

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

جدول ٤- نتایج تحلیل روند تفاضلی (Delta Trend) برای ΔNDWI و ΔNDMI (۱۳۹۵-۱۴۰۳)

Table 4. Results of delta trend analysis for ΔNDWI and ΔNDMI (2016–2024)

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

نرمال دارند و انحراف معنی‌داری از آن دیده نمی‌شود. همچنین، نمودار پسماندها در برابر مقادیر پیش‌بینی‌شده الگوی خاصی (مانند قیفی‌شدن) نشان نداد، بنابراین شرط یکنواختی واریانس نیز برقرار تشخیص داده شد. گام بعدی، بررسی خودهمبستگی سریالی میان پسماندها بود. وجود چنین همبستگی‌ای می‌تواند خطای استاندارد ضرایب را کمتر از مقدار واقعی برآورد کند و به اشتباه، روندی را معنی‌دار نشان دهد. برای این بررسی از آزمون دوربین- واتسون استفاده شد. مقدار این آماره برای مدل ΔNDWI برابر با ۱/۸۷ به‌دست آمد که نزدیک به ۲ (مقدار ایده‌آل) بوده و نشان می‌دهد خودهمبستگی مرتبه اول معنی‌داری در کار نیست. برای مدل ΔNDMI، این مقدار ۱/٦٤ بود که اندکی از دو فاصله دارد و در ناحیه مرزی قرار می‌گیرد.

نتایج روند تفاضلی ΔNDWI

نتایج کامل تحلیل روند برای ΔNDWI در جدول ٤ و شکل ۵ ارائه شده شده است. شیب برآوردشده (β_1) برای ΔNDWI برابر با ۰/۰۰۰۷۳ + در سال (معادل تقریباً ۰/۰۰۰۰٦+ در ماه) به‌دست آمد. این شیب مثبت بدین معناست که اختلاف NDWI بین عرصه پخش و شاهد در طول زمان به‌طور متوسط سالانه حدود ۰/۰۰۰۷۳ واحد افزایش یافته است. از آنجا که دامنه تغییرات NDWI در این منطقه حدود ۰/۱۸ واحد است (جدول ۱)، این نرخ افزایش سالانه معادل تقریباً ۰/٤ درصد از دامنه کل در سال است که در طول نه سال به تجمعی حدود ۰/۰۰٦٦ واحد (۳/٦ ٪ از دامنه) رسیده است. از نظر آماری، این شیب مثبت در سطح اطمینان ۹۵ ٪ معنی‌دار است($p = 0.037$). با توجه به اینکه مقدار p کمتر از ۰/۰۵ است، فرض صفرِ «نبود روند در اختلاف دو عرصه» رد می‌شود و شواهد کافی برای پذیرش وجود یک روند افزایشی ملایم اما سیستماتیک در ΔNDWI وجود دارد. ضریب تعیین (R^2) مدل برابر با ۰/۰۵٤ محاسبه شد که نشان می‌دهد حدود ۵/٤ ٪ از واریانس ΔNDWI توسط متغیر زمان تبیین می‌شود. اگرچه این مقدار R^2 پایین به نظر می‌رسد، اما در تحلیل سری‌های زمانی محیطی با نوسانات شدید فصلی و بین‌سالی، دست‌یابی به R^2 های پایین امری رایج است و معنی‌داری آماری شیب، نشان‌دهنده وجود یک سیگنال واقعی در میان نویز بالای زمینه‌ای 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) نه‌تنها در طول نه سال حفظ شده، بلکه روندی افزایشی داشته است. به عبارت دیگر، شکاف رطوبتی بین عرصه پخش و شاهد به مرور زمان بیشتر شده است. این می‌تواند 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 ΔNDMI

نتایج تحلیل روند برای ΔNDMI در جدول ٤ و شکل۵ ارائه شده است. بر خلاف ΔNDWI ، شیب برآوردشده برای ΔNDMI منفی و برابر با ۰/۰۰۰٦۳- در سال به‌دست آمد. این شیب منفی اگر معنی‌دار بود، به کاهش تدریجی اثربخشی پخش سیلاب بر NDMI اشاره می‌کرد. با این حال، مقدار p محاسبه‌شده برای این شیب برابر با ۰/۲۱۵ است که بسیار فراتر از سطح معنی‌داری ۰۵/۰۵ قرار دارد. لذا فرض صفر «نبود روند» برای ΔNDMI رد نمی‌شود. به عبارت دیگر، هیچ شواهد آماری مبنی بر افزایش یا کاهش معنادار ΔNDMI در طول زمان وجود ندارد. ضریب تعیین (R^2) برای این مدل نیز بسیار ناچیز و برابر با ۰/۰۱۹ است، به این معنا که زمان عملاً قادر به تبیین تغییرات ΔNDMI نیست. بر این اساس، نتیجه‌گیری می‌شود که اثربخشی پخش سیلاب بر NDMI (رطوبت عمقی‌تر ماده گیاهی و خاک) در طول دوره مطالعه پایدار بوده است. میانگین ΔNDMI مثبت و معنی‌دار است اما این برتری در طول زمان روند مشخصی (نه افزایشی و نه کاهشی) نشان نمی‌دهد.

تحلیل مقایسه‌ای و تفسیر یکپارچه ΔNDWI و ΔNDMI

تفاوت در رفتار روند ΔNDWI (افزایشی معنی‌دار) و ΔNDMI (پایدار بدون روند) دارای پیام های اکوهیدرولوژیکی مهمی است. NDWIبا استفاده از باند SWIR1 (حساس به آب در مزوفیل برگ و لایه بسیار سطحی خاک) بیشتر به تغییرات سریع و سطحی رطوبت پاسخ می‌دهد. روند افزایشی آن نشان می‌دهد که پخش سیلاب به تدریج منجر به بهبود وضعیت رطوبت در لایه سطحی خاک و پوشش گیاهی فعال (عمدتاً علفی و درختچه‌ای) شده است و این بهبود با گذشت زمان شتاب گرفته است. در مقابل، NDMIکه از باند SWIR2 (طول موج بلندتر با نفوذ بیشتر و حساسیت به رطوبت ساختاری گیاه و خاک) بهره می‌برد؛ احتمالاً رطوبت را در عمق بیشتری از تاج پوشش و نیمرخ خاک منعکس می‌کند. پایدار بودن ΔNDMI(میانگین مثبت اما بدون روند) نشان می‌دهد که سطح پایه رطوبت عمقی‌تر در عرصه پخش نسبت به شاهد در یک وضعیت تعادل جدید قرار گرفته و در طول نه سال این مزیت نسبی ثابت

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

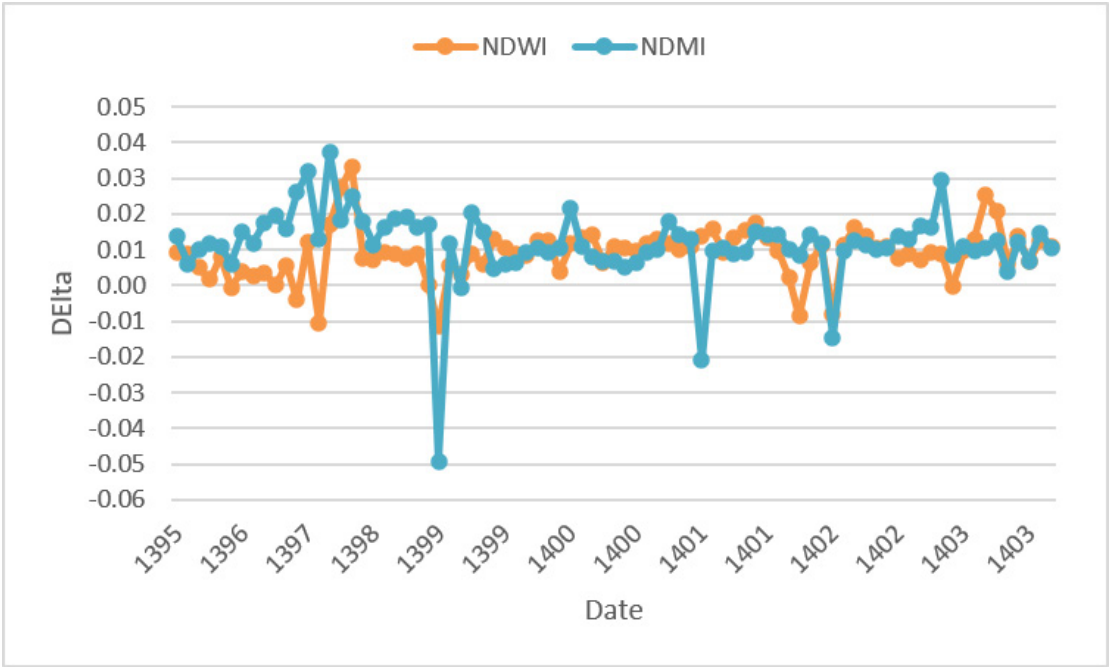
مانده است.

این الگوی دوگانه (افزایش NDWI سطحی + پایداری NDMI عمقی‌تر) می‌تواند بیانگر آن باشد که پخش سیلاب ابتدا یک جهش اولیه در رطوبت کلی ایجاد کرده (که در میانگین ΔNDMI مثبت دیده می‌شود) و سپس با توسعه تدریجی پوشش گیاهی و بهبود ساختمان خاک سطحی، اثرات ثانویه‌ای مانند افزایش ماده آلی، بهبود نفوذپذیری و کاهش تبخیر سطحی پدید آمده که به‌طور خاص NDWI (شاخص حساس‌تر به شرایط سطحی و پوشش گیاهی فعال) را به‌صورت فزاینده‌ای بهبود بخشیده است.

بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی بلندمدت تأثیرات پخش سیلاب بر رطوبت سطحی و رطوبت پوشش گیاهی، با بهره‌گیری از شاخص‌های NDWI و NDMI مستخرج از تصاویر سنتینل-۲ در یک طرح شاهد-مداخله، طی دوره ۹ ساله ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۳ در عرصه سه‌در میمه به اجرا درآمد. تحلیل‌های آماری در سه سطح توصیفی، استنباطی و روند تفاضلی سازماندهی شدند تا تصویری چندبُعدی از کمّیت، معنی‌داری و پایداری اثربخشی پروژه به دست دهند. آمار توصیفی (جدول ۱) نخستین نشانه‌ها از بهبود شرایط رطوبتی در عرصه پخش را آشکار ساخت: میانگین NDWI در عرصه پخش (۰/۲۲-) به‌طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر از شاهد (۰/۲۲۶-) و میانگین NDMIنیز در عرصه پخش (۰/۱۰۳-) در مقایسه با شاهد (۰/۱۱۶-) بهبود یافته بود. دامنه تغییرات نیز این برتری را تأیید می‌کرد؛ کمینه NDWI و NDMI در شاهد (به ترتیب ۰/۲۶۷ - و ۰/۱۴۴-) به‌مراتب منفی‌تر از عرصه پخش (به ترتیب ۰/۲۵۵-و ۰/۱۲۶-) بود، که حاکی از آن است که پخش سیلاب حتی در خشک‌ترین ماه‌ها نیز توانسته است شدت خشکی را تعدیل کند. نمودارهای جعبه‌ای (شکل ۱) این اختلاف را به‌صورت بصری تأیید کردند و نشان دادند که جعبه‌های مربوط به عرصه پخش به‌طور 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 آزمون‌های استنباطی (جدول ۲) این مشاهدات توصیفی و بصری را با پشتوانه آماری قوی تأیید نمودند. آزمون t زوجی اختلاف میانگین بسیار معنی‌داری را برای هر دو شاخص بین دو عرصه نشان داد. استفاده هم‌زمان از آزمون ناپارامتری من-ویتنی نیز نتایج یکسانی به دست داد؛ که نشان می‌دهد این تفاوت‌ها نه به پیش‌فرض‌های توزیعی وابسته است و نه به داده‌های پرت حساساست. میانگین تفاوت (مطالعه - شاهد) برای NDWI معادل ۰/۰۸۶ و برای NDMI معادل ۰/۰۱۳ محاسبه شد که اگرچه در نگاه اول ممکن است کوچک به نظر برسند، اما هر دو در بافت شاخص‌های طیفی استاندارد که دامنه تغییرات آن‌ها در این منطقه حدود ۰/۱۸ واحد است، نشان‌دهنده بهبود نسبی قابل‌توجه هستند. این شواهد قوی آماری به‌روشنی تأیید می‌کنند که پخش سیلاب در طول نه سال گذشته به‌طور سیستماتیک و فراتر از نوسانات طبیعی،



شکل ۵- سری زمانی تفاضل (دلتا) بین عرصه پخش سیلاب و شاهد برای ΔNDWI و ΔNDMI از ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۳

Fig5. Time series of the difference (delta) between the floodwater spreading site and the control area for ΔNDWI and ΔNDMI from (2016–2024)

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

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 نخستین‌بار به‌طور کمّی و با یک طرح علّی 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 ΔNDWI نشان داد که این متغیر دارای شیب مثبت و معنی‌دار برابر با ۰٫۰۰۰۷۳+ در سال است ($p = 0.037, R^2 = 0.054$).این یافته بیانگر آن است که اختلاف NDWIبین عرصه پخش و شاهد در طول نه سال نه‌تنها 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 بدین‌ترتیب 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^2این 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 ΔNDMI شیب منفی اما غیرمعنی‌دار در سال، را نشان داد. با توجه به معنی‌داری میانگین ΔNDMI 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 (ΔNDMI پایدار) و سپس، از طریق اثرات ثانویه اکولوژیکی، به تدریج رطوبت سطحی و پوشش گیاهی فعال را بیش از پیش تقویت نموده است (ΔNDWIافزایشی). 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 علّی و تحلیل‌های تفاضلی در ارزیابی مداخلات محیطی تأکید می‌کند و هم‌سو با توصیه‌های Smokorowskiو 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 تفاضل‌ها می‌تواند پویایی اثربخشی را آشکار سازد و بینش عمیق‌تری در مورد پایداری، افزایش یا کاهش

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

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 محدودیت های 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 دیگه؛ R^2 پایین مدل‌های روند نشان می‌دهد که بخش عمده واریانس ΔNDWI توسط عوامل تصادفی، چرخه‌های فصلی، یا نوسانات بین‌سالی بارش تبیین می‌شود و روند تشخیص‌داده‌شده 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 BACI[1] 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 آرشیوی 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 آرشیوی 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 کمّی بین روند ΔNDWI و ΔNDMI 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 کمّی، مستند و قابل اعتمادی برای اثربخشی بلندمدت پخش سیلاب بر بهبود رطوبت سطحی و رطوبت پوشش گیاهی در عرصه سُه در میمه فراهم آورد. پخش سیلاب نه‌تنها 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، می‌توانند 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 فزاینده 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 بدین‌ترتیب، 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 سُه 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 به عنوان 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

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

تضاد منافع نویسندگان

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

دسترسی به داده‌ها

داده ها 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/آماری، نگارش نسخهٔ اولیهٔ 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.

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.

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

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]

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.

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.

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.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-10-14]