



Anomalies detection and cause analysis of autumn crops in individual croplands using timeseries of Sentinel-2 satellite data (Case Study: Golestan province)

Mostafa Dazi¹ | Mohammad Javad Valadanziej^{2✉} | Alireza Safdarinezhad³

1. Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology Tehran, Iran.

E-mail: Mostafa.Dazi@email.kntu.ac.ir

2. Corresponding Author, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology Tehran,

Iran. E-mail: valadanziej@kntu.ac.ir

3. Department of Geodesy and Surveying Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran.

E-mail: safdarinezhad@tafreshu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: June. 4, 2023

Revised: July. 11, 2023

Accepted: July. 24, 2023

Published online: Sep. 23, 2023

Keywords:

Anomaly detection,
Cumulative time series,
Remote sensing,
RX algorithm,
Sentinel-2.

ABSTRACT

One way to ensure food security is to produce strategic agricultural products on a large scale using industrial methods. Managing large-scale farms consistently and cohesively is a challenging task that requires the utilization of modern technologies. Crop anomalies refer to uncommon and limited factors during agricultural production, leading to localized differentiation in the crop cultivation process. Factors contributing to crop anomalies in agriculture include imbalances in soil nutrients and fertilizers, grazing during crop growth, pests, variations in soil texture and slope in pastures, weed growth, and drought. Detecting and remediating factors limiting crop growth in vast agricultural lands is difficult and these issues are often noticed at harvest time. This article suggests a solution for continuously monitoring of large agricultural fields by analyzing the time series of Sentinel-2 satellite images. The effectiveness of this solution in detecting various anomalies of farms, in agrarian areas has been demonstrated by the results. The proposed solution offers features such as timely diagnosis, the ability to monitor the continuation of irregularities, and the measurement of compensatory measures' effectiveness. The method has successfully identified over five types of anomalies in the selected farms, achieving a detection accuracy of 95.60%.

Cite this article: Dazi, M., Valadanziej, M., & Safdarinezhad, A. (2023). Anomalies detection and cause analysis of autumn crops in individual croplands using timeseries of Sentinel-2 satellite data (Case Study: Golestan province), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (7), 1063-1078. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.360333.669508>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.360333.669508>



آشکارسازی و ریشه‌یابی ناهنجاری‌های رشد محصولات پاییزه در زمین‌های زراعی منفرد با استفاده از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ (منطقه مورد مطالعه: استان گلستان)

مصطفی دازی^۱ | محمدجواد ولدان زوج^۲ | علیرضا صفدری نژاد^۳۱. گروه سنجش از دور و فوتوگرامتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: Mostafa.Dazi@email.kntu.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه سنجش از دور و فوتوگرامتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه:

valadanouzj@kntu.ac.ir۳. گروه ژئودزی و مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران. رایانامه: safdarinezhad@tafreshu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۴/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۷/۱

واژه‌های کلیدی:

سنجش از دور،

تشخیص ناهنجاری،

سنتینل-۲،

سری زمانی تجمعی،

الگوریتم RX.

تولید محصولات راهبردی کشاورزی در ابعاد وسیع و به‌صورت صنعتی یکی از جنبه‌های دستیابی به امنیت غذایی است. مدیریت پیوسته و یکپارچه مزارع وسیع امری دشوار بوده و نیازمند بهره‌گیری از فناوری‌های نوین است. ناهنجاری در کشت محصولات زراعی به هر رخداد نامتعارف و محدودی اطلاق شده که موجب تمایز در روند کشت محصول به‌صورت موضعی گردد. عواملی همچون توزیع نامتوازن بذر و کود، چرای دام در زمان رشد محصول، آفات، تمایز بافت خاک و شیب زمین در مزرعه، رشد علف‌های هرز و خشکسالی برخی از عوامل بروز ناهنجاری در مزارع کشاورزی هستند. آشکارسازی و اصلاح عوامل بروز ناهنجاری برای زمین‌های زراعی وسیع امری دشوار بوده و تشخیص این موضوع عموماً در زمان برداشت محصول اتفاق می‌افتد. در این مقاله راهکاری به‌منظور پایش مستمر مزارع کشاورزی وسیع از طریق تحلیل سری‌های زمانی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ پیشنهاد شده است. نتایج این راهکار حاکی از عملکرد مؤثر آن در تشخیص ناهنجاری‌های مختلف در مزارع کشاورزی بوده است. تشخیص به‌نگام، امکان پایش تداوم ناهنجاری و سنجش اثربخش بودن اقدامات جبرانی از ویژگی‌های راهکار پیشنهادی است. این روش بیش از ۵ نوع ناهنجاری را در مزارع منتخب شناسایی نموده و دقت آشکارسازی ۹۵/۶۰ درصدی را تأمین ساخته است.

استناد: دازی، مصطفی؛ ولدان زوج، محمدجواد؛ و صفدری نژاد، علیرضا (۱۴۰۲). آشکارسازی و ریشه‌یابی ناهنجاری‌های مرتبط با رشد محصولات پاییزه در زمین‌های زراعی منفرد بر پایه استفاده از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ (منطقه مورد مطالعه: استان گلستان)، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴ (۷)، ۱۰۷۸-۱۰۶۳

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.360333.669508>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.360333.669508>

مقدمه

به‌کارگیری فنون کشاورزی دقیق راهکار افزایش بهره‌وری و ارتقاء کیفی و کمی در تولید محصولات کشاورزی است (Aslan, Durdu, Sabanci, Ropelewska, & Gültekin, 2022). عدم وجود بسترهای فنی و اطلاعاتی گسترده در سطح عمومی، توسعه این رویداد را در کشور با کندی روبرو ساخته است. در این راستا، علاوه بر تجهیزات و امکانات مدرن کشاورزی، دسترسی بهنگام و دقیق به اطلاعات نیز می‌تواند زمینه مدیریت سریع و صحیح مخاطرات را فراهم آورده و از اتلاف منابع و کاهش بهره‌وری جلوگیری نماید (باقری و جوادی، ۱۴۰۱). محصولات کشاورزی راهبردی در ایران گندم، جو، برنج و دانه‌های روغنی بوده که از حمایت‌های دولتی برخوردارند (باقری و جوادی، ۱۴۰۱). این محصولات به شکل‌های صنعتی و سنتی کشت‌شده که ضمانت تولید پایدار آن در بعد سنتی از طریق سیاست‌های تشویقی همچون خرید تضمینی و خدمات مهندسی با تعرفه‌های دولتی به اجرا می‌رسد (میرپناهی و جوادی، ۱۴۰۱). از سوی دیگر، وسعت کشت بالا در مورد محصولات راهبردی منجر به صعوبت پایش مستمر آن‌ها برای کشاورز در طول دوره رشد می‌گردد. اختلال در روند آبیاری، آفات، توزیع نامتوازن کود و سموم، یخ‌زدگی و ناهمگونی در شاخص‌های حاصلخیزی خاک در سطح مزرعه از عواملی تلقی شده که یکنواختی کیفیت و کمیت کشت محصولات کشاورزی را در سطح مزارع بزرگ مخدوش می‌سازد (San Bautista et al., 2022). تلاش برای رفع اختلالات مذکور نیازمند دسترسی بهنگام به اطلاعات مرتبط با ناهنجاری‌های رخ داده در سطح مزرعه بوده تا کشاورز در فرصت مقتضی اقدامات جبرانی را برنامه‌ریزی نماید. دسترسی گسترده به تصاویر اخذشده توسط سنجنده‌های چند طیفی فضایی با توان تفکیک مکانی، طیفی و زمانی مطلوب می‌تواند در توسعه کم‌هزینه سامانه‌های اعلان هشدار در مدیریت مزارع کشاورزی مؤثر باشد. ناهنجاری به هرگونه اختلال و انحراف در روند عمومی و متعارف اطلاق شده که در حوزه‌های مختلف اجتماعی، آماری، صنعتی، علوم زیستی و علوم زمین مورد مطالعه قرار می‌گیرد (Racetin & Krtalić, 2021). ناهنجاری در علوم مرتبط با زمین دامن‌های گسترده‌ای از وقایع را در برداشته که اختلالات موضعی و محدود در روند رشد و سبزیگی گیاهان زراعی نمونه‌ای از آن قلمداد می‌شود. در این تحقیق تلاش شده تا با استفاده از این تصاویر ماهواره‌ای، چندین مزرعه مربوط به محصولات کشاورزی راهبردی (گندم، جو و کلزا) در طول دوره‌ی کشت پاییزه از نظر بروز ناهنجاری مورد پایش قرار گیرد. تجربیات کسب‌شده در این تحقیق می‌تواند زمینه‌ی توسعه‌ی سامانه‌های پایش محصولات کشاورزی در سطح مزرعه را به کمک پتانسیل تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی در دسترس، فراهم آورد. کشف ناهنجاری در مزارع کشاورزی یکی از رویکردهای اعلان هشدار در فنون مرتبط با کشاورزی دقیق بوده که در دستور کار تحقیقات متعددی قرار داشته است. در ادامه نمونه‌هایی از آن‌ها مرور شده است.

پیشینه پژوهش

(Leon-Lopez et al., 2022)، با استفاده از مدل زنجیره‌های پنهان مارکوف (HMM^۱)، ناهنجاری در زمین‌های زراعی را در زمان دسترسی به سری‌های زمانی مربوط به یک سال زراعی شناسایی نمودند. این اقدام در قالب یک فرایند طبقه‌بندی به اجرا رسیده است. به‌منظور تفکیک انواع ناهنجاری، تفکیک نمونه‌های سری زمانی مربوط به مزارع کشاورزی به کلاس‌های نواحی دیررس، پیری زودرس، پیری دیررس و سایر (مانند نواحی مرزی، محصول غیر منطبق و تأثیرات سایه) به اجرا رسیده است. (Castillo-Villamor et al., 2021)، با فرض وجود توزیع نرمال در شاخص‌های گیاهی مستخرج از مزارع با کشت مشابه، روندی مبتنی بر آستانه گذاری پویا به‌منظور شناسایی نمونه‌های ناهنجار ارائه دادند. در این روند، شناسایی و حذف نمونه‌های ناهنجار تا دستیابی به توزیع نرمال در نمونه‌های باقی‌مانده ادامه می‌یابد. سنجش نرمال بودن توزیع نمونه‌ها از طریق شاخص چولگی به اجرا رسیده است. (Mouret et al., 2020) Mouret et al., (2021)، آشکارسازی ناهنجاری در زمین‌های زراعی گندم و کلزا را به کمک تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ و ۲ را به کمک پردازش‌های آماری در سطح پیکسل‌های واقع در مزارع کشاورزی به اجرا رساندند. شاخص طیفی NDVI، شاخص‌های تفاضلی آب مبتنی بر باندهای سبز و SWIR، شاخص گیاهی بهینه‌شده نسبت به اثر خاک (OSAVI^۲) و شاخص گیاهی مبتنی بر باندهای قرمز و سبز از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲- و بازپخش‌های ثبت‌شده در دو کانال VV و VH از سنجنده SAR نصب شده در سکوی سنتینل ۱- شاخص‌ها و داده‌های مورد استفاده در روند آشکارسازی ناهنجاری بوده‌اند. نتایج حاکی از کسب دقت‌های نزدیک به ۹۵ درصدی در کشف ناهنجاری در مزارع کشاورزی بوده است.

1. Hidden Markov Model

2. Optimized Soil Adjusted Vegetation Index

Sen2- Defourny et al., (2019) در این حوزه سامانه‌های مرتبط با کشاورزی با امکان دسترسی عمومی نیز توسعه یافته است. Agri یک سامانه‌ی تولید محصولات مرتبط با کشاورزی و سبزی‌نگی بوده که توسط سازمان فضایی اتحادیه اروپا طراحی و در دسترس قرار گرفته است. در این سامانه از طریق الگوریتم‌های یادگیری ماشین و اندازه‌گیری‌های میدانی محصولاتی همچون نقشه‌های دودویی زمین‌های زراعی، پهنه‌بندی نوع محصولات کشاورزی و شاخص‌های گیاهی متنوع مرتبط با فنولوژی و سبزی‌نگی گیاهان تولید می‌شود. داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در این سامانه شامل تصاویر سنتینل ۲- و لندست ۸- هستند. بهره‌برداری مستقیم و یا بومی‌سازی چنین سامانه‌هایی می‌تواند زمینه دسترسی فراگیر به راه‌حل‌های سنجش از دوری را برای مدیریت بهتر منابع و پایش مستمر اراضی کشاورزی میسر سازد.

Albughdadi et al., (2017) نیز روشی سه مرحله‌ای برای تشخیص ناهنجاری در روند رشد محصولات کشاورزی بر پایه تصاویر چند طیفی ماهواره‌ای ارائه نمودند. تولید سری‌های زمانی از شاخص سطح برگ (LAI^۱)، شاخص بخش جذب‌شده از تابش خورشید ناشی از فعالیت فتوسنتز گیاه (FAPAR^۲) و شاخص محتوای کلروفیل (CHL^۳) اولین مرحله محسوب می‌شود. حذف نویز و ترمیم داده‌های زمانی از دست‌رفته ناشی از ابر و عوامل دیگر، دومین اقدام پردازشی و پالایشی از این روند می‌باشد. برای تشخیص ناهنجاری از روش خوشه‌بندی نظارت‌نشده‌ی جابه‌جایی میانگین^۴ استفاده شده است. ناهنجاری‌های شناسایی شده در این روش مربوط به تمایز و ناهمگونی در بذر و تنش‌های گیاهی بوده است.

Lasaponara et al., (2006) به منظور آشکارسازی ناهنجاری در سری زمانی شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI^۵) از تبدیل خطی تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA^۶) استفاده نمودند. این مطالعه در مناطق دارای پوشش گیاهی طبیعی و همچنین اراضی کشاورزی به منظور شناسایی ناهنجاری‌های ناشی از تغییرات طبیعی و یا احداث سازه‌های دست‌ساز بشر استفاده شده است.

Rodriguez Perez et al., (2004) با هدف پایش مستمر روند رشد و تشخیص ناهنجاری محصولات کشاورزی در طول دوره کشت، یک سامانه‌ی سنجش از دوری توسعه دادند. در این سامانه، نقشه‌های مبنایی به‌عنوان لایه‌های ثابت و شاخص‌های گیاهی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای NOAA و IRS به ترتیب در مقاطع زمانی روزانه و ماهانه به‌عنوان لایه‌های پویای اطلاعاتی در پایش پیوسته‌ی زمین‌های زارعی استفاده شده‌اند. در این سامانه با تجمیع تمامی منابع اطلاعاتی، رشد محصول در بازه‌های ده‌روزه رصد شده و انحرافات احتمالی و موضعی در آن قابل پایش است. در این تحقیق، یک راهکار ساده و آماری به‌منظور هشدار بهنگام ناهنجاری در مزارع کشاورزی گندم، جو و کلزا با استفاده از سری زمانی شاخص‌ها و باندهای طیفی سنجنده سنتینل ۲- پیشنهاد شده است. سازوکار این روش مبتنی بر سنجش آماری سری زمانی نمونه‌های (پیکسل‌های) واقع در زمین‌های زراعی منفرد در طول دوره کشت است. برخلاف رویکردهای سنتی که آماره‌های مینا در سنجش ناهنجاری از سراسر تصویر استخراج می‌شود؛ رویکرد پیشنهادی باهدف ایجاد خلوص بیشتر در آماره‌های مینا، روند استخراج آن‌ها را به ازای هر مزرعه و در هر مقطع زمانی به اجرا می‌رساند. از دیگر ویژگی‌های این تحقیق، پیگیری میدانی دلایل رخداد ناهنجاری بوده که ضمن صحت‌سنجی نتایج، عوامل بروز آن را واکاوی می‌نماید. رویکرد این تحقیق نیز برخلاف برخی از مطالعات گذشته، برچسبگذاری مزارع به هنجار و ناهنجار نبوده و متناسب با توان تفکیک مکانی تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده، نواحی ناهنجار احتمالی پهنه‌بندی شده‌اند.

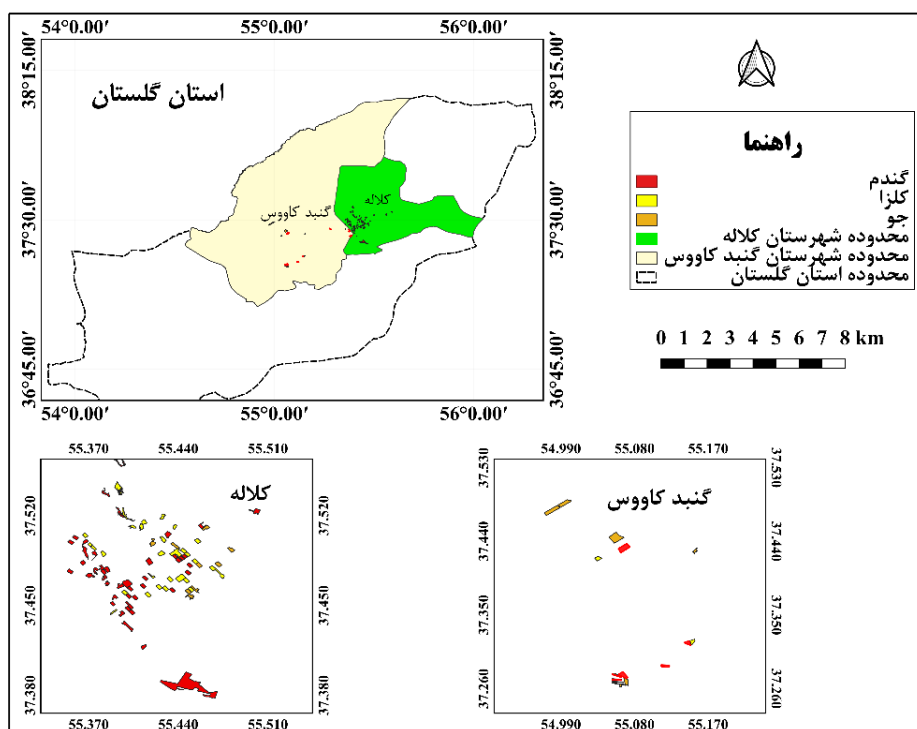
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

مطابق آمارنامه کشاورزی، استان گلستان بیش از ششصد هزار هکتار زمین آبی و دیم، زیر کشت دارد (معاونت آمار مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات، ۱۴۰۱). در گذشته کشت پنبه مهم‌ترین محصول کشاورزی این استان بوده که با افزایش هزینه‌های تولید این محصول در دهه‌های اخیر، کشت گندم و کلزا جایگزین آن شده است. از این رو، گندم و کلزا به‌عنوان مهم‌ترین محصولات کشت پاییزه و شالی، گوجه‌فرنگی و صیفی‌جات، محصولات رایج در کشت بهاره این استان هستند. زمین‌های زراعی این استان دامنه تغییرات بالایی را از نظر وسعت برخوردار

1. Leaf Area Index
2. Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation
3. Chlorophyll Index
4. Mean Shift Clustering
5. Normalized Difference Vegetation Index
6. Principal Components Analysis

بوده و محصولات کشاورزی در آن به دو شکل صنعتی و سنتی کشت می‌شود. مطابق با گزارش‌های جهاد کشاورزی، تا سال ۱۴۰۱ پیشرفت ۱۰ درصدی در تهیه نقشه‌های کاداستر زراعی این استان اتفاق افتاده است. به‌طور کلی، پایش کشت و هدایت کشاورزان بومی در این استان به کمک مروجین کشاورزی صورت می‌پذیرد و آمارهای سالیانه کشاورزی این استان نیز از این طریق تولید می‌گردد. با بررسی‌های میدانی صورت گرفته، ناهمگونی عملکرد مزارع کشاورزی وسیع، دغدغه برخی از کشاورزان این استان بوده که انگیزه توسعه راهکارهای سنجش از دوری برای شناسایی ناهنجاری‌های محصولات کشاورزی را در این تحقیق فراهم آورده است. موقعیت جغرافیایی این استان به همراه زمین‌های زراعی منتخب در این تحقیق در شکل (۱) نمایش یافته است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان گلستان و زمین‌های زراعی مورد بررسی در آن

زمین‌های زراعی ارائه شده در شکل (۱) بر اساس قابلیت دسترسی به کشاورز و امکان مراجعه‌ی میدانی محقق و با مشورت کارشناسان جهاد کشاورزی استان گلستان انتخاب شده‌اند. اطلاعات آماری مرتبط با مزارع منتخب در جدول (۱) گزارش شده است.

جدول ۱- گزارش آماری از مزارع منتخب مربوط به استان گلستان

نوع محصول	گندم	جو	کلزا
تعداد زمین مورد بررسی	۷۴	۷	۱۰
سطح زیر کشت (هکتار)	۱۲۷۵/۳۴	۳۵۹/۶۰	۱۶۱/۹۴
کمترین وسعت مزارع (هکتار)	۷/۲۶	۸/۴۳	۹/۵۶
متوسط وسعت مزارع (هکتار)	۱۵/۵۱	۴۰/۷۶	۱۱/۶۴
بیشترین وسعت مزارع (هکتار)	۲۵۵/۹۵	۱۲۴/۲۴	۳۲/۰۱

داده‌های مورد استفاده

در این بررسی از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ مربوط به مزارع کشاورزی مورد مطالعه در سال زراعی ۱۴۰۰-۰۱ استفاده شده است. با توسعه زیرساخت‌های عمومی و مبتنی بر پایگاه داده‌ای همچون موتور زمین گوگل (GEE)، دسترسی آسان به پایگاه‌های داده و امکانات پردازشی متنوع در حوزه سنجش از دور برای متخصصین فراهم شده است. بی‌نیاز شدن از اقدامات زمان‌بر و فرسایشی مرتبط با جمع‌آوری، پیش‌پردازش و آماده‌سازی داده‌های سنجش از دوری در روند توسعه کاربردهای سنجش از دوری از مزایای به‌کارگیری این

پایگاه محسوب می‌شود (Gorelick et al., 2017). در این تحقیق نیز داده‌های ماهواره‌ای مورد نیاز از این پایگاه استخراج شده است. توان تفکیک زمانی توأمان سنجنده‌های چندطیفی نصب‌شده در سکوی‌های ماهواره‌ای سنتینل-۲ (2A و 2B)، امکان تولید سری زمانی ۳ تا ۵ روزه را فراهم آورده که به‌طور طبیعی در مقاطعی از سال به دلیل عوامل محیطی و فنی (ابر، برف و پوشش ناکامل تصاویر) دچار انقطاع است. سری‌های زمانی باندهای طیفی مستخرج برای هر زمین زراعی پس از پردازش، رفع نویز و ترمیم زمان‌های منقطع شده برای تولید شاخص‌های گیاهی استفاده شده‌اند. در بخش روش‌شناسی مدل مفهومی تحقیق به همراه جزئیات اجرایی مرتبط به تفصیل تشریح شده است.

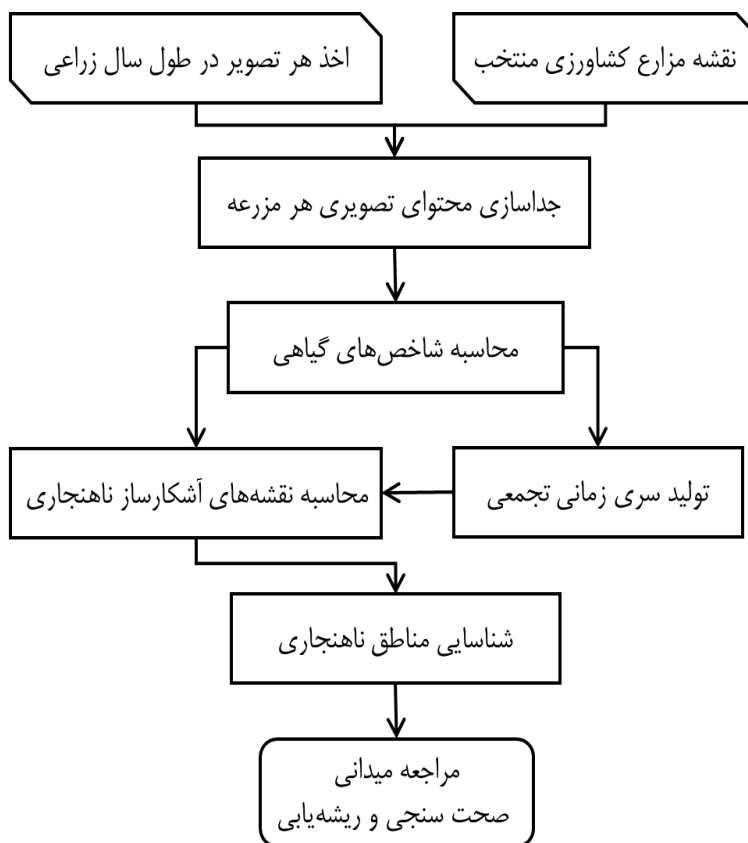
روش‌شناسی پژوهش

آشکارسازی ناهنجاری رویکردی رایج در حوزه‌ی مطالعه رفتار پدیده‌هایی است که انتظار عمومی مشخصی از آن‌ها وجود دارد. بروز اغتشاش غیرمتعارف و خلاف انتظار در رفتار چنین پدیده‌هایی، ناهنجاری تلقی شده که الگوریتم‌های آشکارسازی در این حوزه سعی بر شناسایی آن‌ها دارند (Chandola, Banerjee, & Kumar, 2009). این ناهنجاری‌ها می‌توانند ناشی از عوامل مختلفی مانند توزیع نامتوازن بذر، ناهمگونی در شاخص‌های خاک، آبیاری نامتوازن، بروز بیماری‌ها، آفت‌ها و ... باشند. پایش میدانی مستمر مزارع پرهزینه و پرچالش بوده و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند راهکاری کم‌هزینه و بهنگام برای پایش مزارع باشد. تجربیات کسب‌شده در این تحقیق می‌تواند زمینه‌ی توسعه‌ی سامانه‌های پایش محصولات کشاورزی در سطح مزرعه را به کمک پتانسیل تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی در دسترس، فراهم آورد.

روش این تحقیق بر پایه‌ی کشف ناهنجاری در تصاویر چندطیفی ماهواره‌ای و به‌طور موازی، کسب اطلاعات میدانی از کشاورزان زمین‌های زراعی منتخب در قالب تکمیل پرسشنامه است. در این تحقیق دو رویکرد متمایز برای آشکارسازی ناهنجاری در دستورکار قرار گرفته است. در رویکرد نخست، تصاویر اخذ شده به ازای هر مقطع زمانی از دوره‌ی کشت به‌طور منفرد از منظر بروز ناهنجاری موردبررسی قرار می‌گیرند. در رویکرد دوم، سری زمانی تمامی تصاویر اخذشده تا هر مقطع از سال زراعی، مبنای روند آشکارسازی ناهنجاری قرار دارد. این موضوع با هدف ارزیابی حساسیت و پایداری این دو رویکرد اتخاذ شده است. از دیگر موارد لحاظ شده در این تحقیق به‌کارگیری صرفاً نمونه‌های واقع در هر مزرعه در ارزیابی و سنجش وقوع ناهنجاری است. به عبارت بهتر، کشف ناهنجاری در هر مزرعه منوط به تمایز رفتار هر نمونه نسبت به تمامی نمونه‌های سنجش شده در آن مزرعه خواهد بود. این موضوع برخلاف رویکرد عمومی الگوریتم‌های آشکارسازی ناهنجاری بوده که تمامی نمونه‌های مربوط به صحنه‌ی تصویر یا تمامی قطعات تصویری مرتبط به‌صورت هم‌زمان در روند سنجش ناهنجاری استفاده می‌شوند. مزیت این اقدام مستقل ساختن روند آشکارسازی ناهنجاری از سایر پدیده‌های موجود در صحنه‌ی تصویر و حتی تمایزات مربوط به نوع بذر، تقویم زراعی، اقلیم و الگوی داشت محصولات در مزارع کشاورزی مختلف می‌باشد. بر این اساس، انتظار می‌رود این روش با ایجاد خلوص بیشتر در فضای ویژگی برای توزیع نمونه‌های پس‌زمینه (نمونه‌های فاقد ناهنجاری)، روند آشکارسازی ناهنجاری را تسهیل نماید. پیاده‌سازی این رویکرد در ابعاد گسترده به‌سادگی در هنگام دسترسی به لایه‌ی کاداستر زراعی قابل اجرا خواهد بود. با این حال در تحقیق حاضر محدوده‌ی مزارع انتخاب شده با مشورت و راهنمایی کارشناسان جهاد کشاورزی شهرستان های کلاله و گنبدکاووس همچنین عملیات نقشه‌برداری میدانی تعیین موقعیت شده‌اند.

تاکنون روش‌های مختلفی به‌منظور آشکارسازی ناهنجاری توسعه‌یافته است (Matteoli, Diani, & Corsini, 2010). این روش‌ها را می‌توان در شش دسته متمایز قرار داد. ۱- روش‌های آماری که با فرض معلوم بودن توزیع نمونه‌های پس‌زمینه توسعه‌یافته‌اند (مانند روش‌های RX) (Reed & Yu, 1990)؛ ۲- راهکارهای مبتنی بر خوشه‌بندی در فضای ویژگی (مانند روش DBSCAN, SAM یا جابجایی میانگین) (Comaniciu & Meer, 2002; Ester, Kriegel, Sander, & Xu, 1996)؛ ۳- روش‌های مبتنی بر نگاشت‌های خطی و غیرخطی (مانند PCA, NL-PCA و SAM) (Hotelling, 1933; Scholz, Kaplan, Guy, Kopka, & Selbig, 2005)؛ ۴- رویکردهای به‌کارگیری یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی مصنوعی (Filho, Brandão, Fernandes, & Maciel, 2022; Nassif, 2021)؛ ۵- روش‌های مبتنی بر مفاهیم تخمین تنک و حسگری فشرده (Bruckstein, Donoho, & Talib, Nasir, & Dakalbab, 2021)؛ ۶- روش‌های ترکیبی (Elad, 2009) و (Ghrib, Jaziri, & Romdhane, 2020; Kayode Saheed, Harazeem Abdulganiyu, & Ait Tchakoucht, 2023). روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی، خوشه‌بندی و تخمین تنک به دلیل نیازمندی به نمونه‌های متعدد، هنگام مواجهه با نمونه‌های محدود توزیع یافته در فضای ویژگی دچار افت کارایی می‌شوند. انتخاب زمین‌های زراعی منفرد علی‌رغم برخورداری از مزایای مطرح‌شده، امکان به‌کارگیری این روش‌ها را با محدودیت مواجه می‌سازد. از این رو، در این تحقیق از دو رویکرد

آماری RX^1 و نگاشت زاویه‌ی طیفی (SAM^2) برای کشف ناهنجاری در سطح مزارع کشاورزی استفاده شده است. شکل (چارچوب کلی روش‌شناسی این تحقیق را در آشکارسازی بهنگام ناهنجاری و ریشه‌یابی علل آن در روند رشد محصولات پاییزه برای زمین‌های زراعی منفرد نشان می‌دهد.



شکل ۲- چارچوب کلی روش‌شناسی تحقیق

مطابق با روندنما ارائه‌شده در شکل (، تمامی تصاویر اخذشده از منطقه مورد مطالعه در طول دوره‌ی کشت پاییزه‌ی سال زراعی ۱۴۰۰-۰۱ به دو شکل تجمعی و مجزا در روند آشکارسازی ناهنجاری استفاده می‌شوند. در روند آشکارسازی مجزا، باندهای طیفی و شاخص‌های گیاهی مستخرج از هر تصویر اخذشده توسط سنجنده‌ی سنتینل-۲ مبنای تولید نقشه‌های آشکارسازی ناهنجاری قرار دارد. در رویکرد تجمعی نیز برای جلوگیری از افزایش بیش از حد بُعد فضای ویژگی صرفاً از مشارکت شاخص‌های طیفی استفاده شده است. آشکارسازی ناهنجاری در فرا مکعب‌های رستری تولیدشده برای هر قطعه زمین زراعی به کمک دو الگوریتم آشکارساز ناهنجاری RX و $MedSAM$ به اجرا رسیده و نتایج به‌دست‌آمده با بازبازدیدهای میدانی انطباق‌سنجی شده‌اند. در ادامه مبنای نظری مرتبط با دو الگوریتم آشکارساز ناهنجاری تشریح شده است.

الگوریتم آشکارساز ناهنجاری RX

از معروف‌ترین الگوریتم‌های تشخیص ناهنجاری RX است که در سال ۱۹۹۰ توسط رید و یو ارائه شد (Reed & Yu, 1990). این الگوریتم یکی از بنیادی‌ترین الگوریتم‌ها در زمینه تشخیص ناهنجاری است. در این روش فرض توزیع گوسی در فضای ویژگی برای نمونه‌های همگون لحاظ می‌شود. در صورتیکه $\vec{r}_i = [r_1, r_2, \dots, r_m]^T$ بردار ویژگی مربوط به نمونه i ام در فضای ویژگی باشد، ماتریس کوواریانس تبیین‌کننده توزیع آماره‌های n نمونه همگون در فضای ویژگی به صورت رابطه‌ی (۱) قابل‌محاسبه خواهد بود.

1 Reed-Xiaoli

2 Spectral angle mapper

$$[C]_{m \times m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\vec{r}_i - \bar{r}) \times (\vec{r}_i - \bar{r})^T \quad \text{(رابطه ۱)}$$

در رابطه‌ی (۱)، \bar{r} بردار مرکز ثقل (میانگین) نمونه‌ها است. ماتریس C به کمک تمامی نمونه‌های مربوط به هر مزرعه محاسبه شده و انتظار می‌رود با فرض احتمال اندک در رخداد ناهنجاری این آماره مرتبه‌ی دوم تأثیر محسوسی از نمونه‌های احتمالی ناهنجاری نپذیرد. بر این اساس، با در نظر گرفتن معکوس ماتریس کوواریانس به‌عنوان تنسور محاسبه‌ی فاصله، قرابت نمونه‌ها از توزیع گوسی تبیین شده توسط ماتریس C اندازه‌گیری می‌شوند (رابطه‌ی ۲).

$$d = (\vec{r} - \bar{r})^T \times C^{-1} \times (\vec{r} - \bar{r}) \quad \text{(رابطه ۲)}$$

محاسبه و مقایسه‌ی نسبی شاخص d برای تمامی نمونه‌های مستخرج از یک مزرعه، امکان شناسایی نمونه‌های ناهنجار و منحرف از توزیع گوسی را فراهم می‌آورد. محدودیت اصلی در پیاده‌سازی الگوریتم RX محاسبه‌ی ماتریس معکوس کوواریانس است. عواملی همچون نبود نمونه‌های کافی در برآورد ماتریس کوواریانس ($n < m$) و یا وجود ارتباط خطی میان مؤلفه‌های بردار ویژگی برای نمونه‌های هر مزرعه می‌تواند کاهش رتبه‌ی ماتریس کوواریانس را به دنبال داشته و امکان محاسبه‌ی معکوس آن را با اختلال روبرو سازد. وجود ارتباط خطی میان مؤلفه‌های بردار ویژگی امری محتمل و غیرقابل کنترل بوده که به‌کارگیری راهکارهای معکوس‌گیری مبتنی بر برآورد بردارها و مقادیر ویژه می‌تواند برای رفع این چالش راهگشا باشد (Alter, Brown, & Botstein, 2000). نبود تعداد کافی نمونه‌ها را نیز می‌توان با انتخاب مزارع با وسعت کافی جبران نمود. از این رو، وسعت مزرعه یکی از محدودیت‌های قابل جبران در روش‌های آماری قلمداد شده که در صورت به‌کارگیری تصاویر با توان تفکیک مکانی بالاتر امکان اجرای آن‌ها در مزارع کوچک‌تر نیز فراهم می‌آید. در رویکرد به‌کارگیری تصاویر مجزا، ابعاد فضای ویژگی در هر مقطع زمانی از دوره‌ی کشت ثابت بوده (۱۱ باند طیفی + ۴ شاخص طیفی) اما در روش تجمعی، بعد فضای ویژگی در طول دوره‌ی کشت افزایش می‌یابد. با توجه به هدف این تحقیق در مقایسه رویکرد به‌کارگیری مجزا و تجمعی تصاویر ماهواره‌ای در سنجش ناهنجاری، مزارع موردبررسی به نحوی انتخاب شده‌اند که حداقل نمونه‌های لازم را برای تشکیل ماتریس کوواریانس در بالاترین بعد ممکن از بردارهای ویژگی برخوردار باشند. با در نظر گرفتن بازه زمانی کشت محصولات پاییزه (۱۵ مهر تا ۳۰ خرداد) و توان تفکیک زمانی قابل استحصال از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ در دو سکوی فضایی 2A و 2B (تقریباً ۵ روز)، حداکثر بعد فضای ویژگی در رویکرد تجمعی به ازای هر شاخص گیاهی معادل با ۶۴ بوده و به همین دلیل از انتخاب مزارعی که وسعت تأمین حداقل ۷۰۰ نمونه را نداشتند اجتناب شده است. با توجه به کشت محصولات راهبردی در زمین‌های وسیع و توان تفکیک مکانی باندهای مؤثر در تولید شاخص‌های گیاهی از سنجنده‌ی سنتینل-۲ (باندهای ۲، ۳، ۴ و ۸)، چالش مربوط به کمبود نمونه‌های کافی در مورد این محصولات از احتمال بالایی برخوردار نبوده اما در مورد محصولات بهاره و با توجه به ماهیت خرده مالکی زمین‌های کشاورزی در ایران، احتمال این رخداد بیشتر خواهد بود.

الگوریتم آشکارساز ناهنجاری MedSAM

این روش آشکارسازی ناهنجاری از دو جزء تخمین استوار امضای پس‌زمینه و اندازه‌گیری انحراف زاویه‌ای نمونه‌ها نسبت به آن تشکیل شده است. برخلاف روش RX که در آن انحراف وزن‌دار هر نمونه از میانگین نمونه‌ها ملاک سنجش ناهنجاری قرار دارد؛ در این روش بردار میانه نمونه‌های واقع در هر مزرعه به‌عنوان آماره‌ی کم تأثیر نسبت ناهنجاری مبنای مقایسه با سایر نمونه‌ها قرار داشته و میزان انحراف به کمک نگاشت زاویه طیفی اندازه‌گیری می‌شود. با در نظر گرفتن بردار \vec{r} به‌عنوان بردار میانه نمونه‌های واقع در یک مزرعه، نگاشت زاویه‌ی طیفی یک نمونه (\vec{r}) به‌صورت رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود.

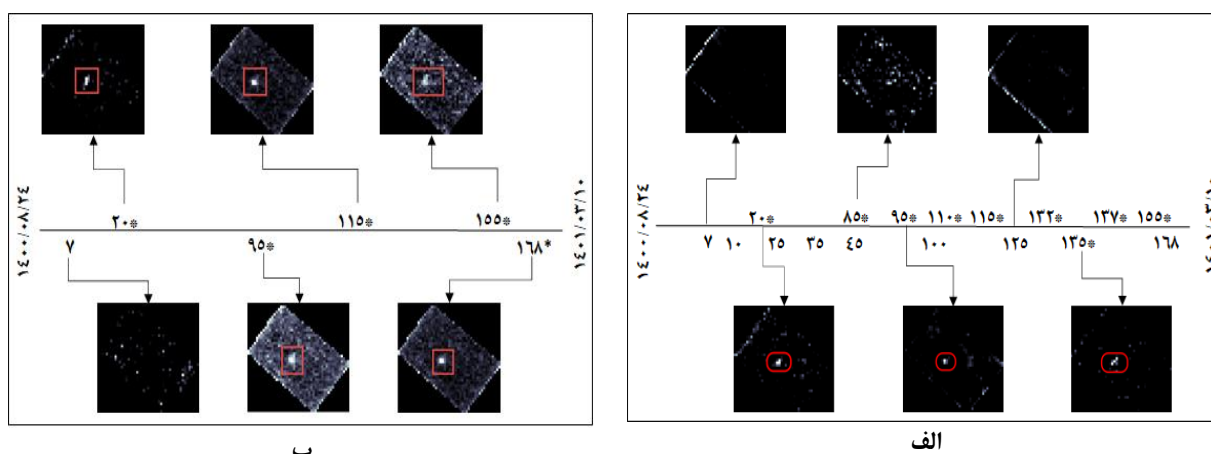
$$\alpha = \frac{\langle \vec{r} \cdot \vec{r} \rangle}{\|\vec{r}\| \|\vec{r}\|} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

در رابطه‌ی ۳، $\langle \cdot \rangle$ عملگر ضرب نقطه‌ای و $\|\cdot\|$ نیز عملگر محاسبه‌ی طول یک بردار هستند. مقدار کمیت α در بازه‌ی $[-1, 1]$ قرار داشته که نزدیک بودن آن به مقدار یک مبین افزایش شباهت بین دو بردار \vec{r} و \vec{r} می‌باشد. از این رو، در این روش مقدار عددی $1-\alpha$ برای ایجاد همبستگی مستقیم به‌عنوان آشکارساز ناهنجاری استفاده می‌شود. مزیت این روش عدم نیاز به محاسبه و معکوس‌گیری ماتریس کوواریانس بوده و می‌توان در هنگام وجود نمونه‌های کمتر نیز مورد استفاده قرار گیرد.

یافته‌های پژوهشی و بحث

همان‌طور که در بخش روش‌شناسی به آن اشاره شده این تحقیق در دو سطح به‌کارگیری تصاویر تک زمانه و سری‌های زمانی تجمعی پیاده‌سازی شده است. در تصاویر تک زمانه نقشه‌ی شدت ناهنجاری به ازای باندهای طیفی هر مقطع زمانی تولید شده و در سری زمانی تجمعی این اتفاق به ازای فرامکعب تجمعی در هر مقطع زمانی تکرار شده است. هدف این رویکرد، ارزیابی و سنجش کیفیت و پایداری نقشه‌های ناهنجاری بوده است. لازم به ذکر است که به‌منظور جلوگیری از افزایش شدید ابعاد فضای ویژگی و به‌تبع آن رخداد چالش‌های فنی مرتبط با فضاهای با بعد بالا (Jia, Sun, Lian, & Hou, 2022) تولید فرامکعب مربوط به سری‌های زمانی تجمعی صرفاً از طریق تولید شاخص گیاهی $NDVI^1$ ، EVI^2 ، $NDRE^3$ و $SAVI^3$ دنبال شده است. انتخاب این شاخص‌های گیاهی بر پایه به‌کارگیری بالاترین توان تفکیک مکانی باندهای طیفی سنجنده‌ی سنتینل-۲ صورت گرفته است.

شکل (نقشه‌ی شدت ناهنجاری یک مزرعه در زمان‌های مختلفی از سال زراعی ۱۴۰۰-۰۱ را هنگام استفاده از این دو رویکرد نشان می‌دهد. در محور افقی (زمان) این شکل برخی از زمان‌های مشاهده‌ی ناهنجاری در تصاویر تک زمانه با ستاره مشخص شده است. شکل (۳-الف) رویکرد به‌کارگیری تصاویر تک زمانه و شکل (۳-ب) رویکرد استفاده از سری‌های زمانی تجمعی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- آشکارسازی ناهنجاری در یک زمین زراعی گندم در طول یک سال زراعی با دو رویکرد تصاویر تک زمانه و سری‌های زمانی تجمعی

مطابق با بررسی‌های میدانی، زمین زراعی ارائه شده در شکل (در محدوده‌ی ناهنجاری دچار فوزاریوم خوشه بوده و هنگام برداشت محصول در آن سال عملکرد خوبی را نداشته است. منطقه‌ی توأم با پاسخ شدید آشکارساز با محدوده‌ی گزارش شده توسط کشاورز مشابه است. در این مزرعه، مطابق با نتایج کسب شده از میان ۴۹ تصویر تک زمانه، صرفاً در ۱۲ تصویر از سال زراعی شواهدی از وجود ناهنجاری در موقعیت آفت‌زده دیده شده که برخی از زمان‌های آن با ستاره در شکل (۳-الف) مشخص شده است. وقوع نامنظم ناهنجاری و عدم تداوم زمانی در آشکارسازی آن از چالش‌هایی است که استفاده از تصاویر تک‌زمانه برخوردارند. اما همان‌طور که در شکل (۳-ب) نمایان است؛ در سری‌های زمانی تجمعی، ناهنجاری به‌طور پیوسته از اولین تاریخ مشاهده‌ی ناهنجاری در تصاویر تک زمانه ظاهر شده و آشکارسازی آن تا انتهای سال زراعی تداوم یافته است.

در این تحقیق ضمن پیاده‌سازی هر دو رویکرد تک‌زمانه و سری‌های زمانی تجمعی و همچنین به‌کارگیری دو آشکارساز RX و MedSAM، پرسشنامه‌هایی از کشاورزان در زمین‌های زراعی منتخب تهیه و با استناد به گزارش‌های به‌دست آمده، زمین‌های زراعی توأم با ناهنجاری در طول سال زراعی ۱۴۰۰-۰۱ شناسایی شده‌اند. در بین ۹۱ زمین زراعی منتخب، ۱۳ مزرعه دچار اختلال گزارش شده است. کاهش محلی عملکرد محصول و یا وجود محصول آفت‌زده به‌صورت موضعی، مبنای برچسب‌گذاری مزارع به‌عنوان مزارع ناهنجار بوده است. مطابق با گزارشات میدانی، جزئیات مرتبط با ناهنجاری در ۱۳ مزرعه ناهنجار در جدول ارائه شده است.

1 Enhanced Vegetation Index
2 Normalized Difference Red Edge Index
3 Soil Adjusted Vegetation Index

جدول ۲- جزئیات مربوط به وقوع ناهنجاری در مزارع ناهنجر مطابق با گزارش‌های میدانی

ردیف	موقعیت جغرافیایی	نوع کشت	وسعت مزرعه	دلیل ناهنجاری	اثر ناهنجاری
۱	$\varphi = 37^{\circ}25'4''$ $\lambda = 55^{\circ}24'47''$	گندم (دیم)	۹ هکتار	ناهنجاری ناشی از بافت خاک و شیب زمین	کاهش عملکرد
۲	$\varphi = 37^{\circ}30'4.2''$ $\lambda = 55^{\circ}21'27''$	گندم(دیم)	۱۰ هکتار	قارچ (فوزاریوم خوشه) و یولاف وحشی	کاهش عملکرد
۳	$\varphi = 37^{\circ}24'59''$ $\lambda = 55^{\circ}22'56''$	گندم(دیم)	۱۰ هکتار	ناهنجاری ناشی از بافت خاک و شیب زمین	کاهش عملکرد
۴	$\varphi = 37^{\circ}29'22''$ $\lambda = 55^{\circ}21'10''$	گندم(دیم)	۱۰ هکتار	یولاف وحشی	افت کیفیت محصول
۵	$\varphi = 37^{\circ}29'23''$ $\lambda = 55^{\circ}26'49''$	کلزا(دیم)	۱۱ هکتار	گل جالیز و کرم کلم	از بین رفتن محصول
۶	$\varphi = 37^{\circ}30'2.5''$ $\lambda = 55^{\circ}25'43''$	کلزا(دیم)	۱۲ هکتار	گل جالیز	از بین رفتن محصول
۷	$\varphi = 37^{\circ}29'27''$ $\lambda = 55^{\circ}22'3.5''$	گندم(دیم)	۲۳ هکتار	قارچ (فوزاریوم خوشه)	افت کیفیت محصول
۸	$\varphi = 37^{\circ}29'33''$ $\lambda = 55^{\circ}26'17''$	گندم(دیم)	۲۸ هکتار	قارچ (فوزاریوم خوشه)	افت کیفیت محصول
۹	$\varphi = 37^{\circ}25'6''$ $\lambda = 55^{\circ}02'03''$	جو(دیم)	۳۰ هکتار	یولاف وحشی	افت کیفیت محصول
۱۰	$\varphi = 37^{\circ}29'21''$ $\lambda = 55^{\circ}00'4.3''$	جو(دیم)	۶۲ هکتار	خشکسالی	از بین رفتن محصول
۱۱	$\varphi = 37^{\circ}28'25''$ $\lambda = 54^{\circ}58'16''$	جو(دیم)	۸۲ هکتار	خشکسالی	از بین رفتن محصول
۱۲	$\varphi = 37^{\circ}26'42''$ $\lambda = 55^{\circ}03'20''$	جو(دیم)	۱۳۰ هکتار	چرای دام در زمان رشد محصول، نقص فنی ادوات کشاورزی و شلمی	کاهش عملکرد به میزان قابل توجه
۱۳	$\varphi = 37^{\circ}23'22''$ $\lambda = 55^{\circ}26'45''$	گندم(دیم)	۲۵۶ هکتار	توزیع نامتوازن بذر، یولاف وحشی و شلمی	کاهش عملکرد و افت کیفیت محصول

نتایج مندرج در جدول بر اساس سازوکاری خودکار تولید شده است. در تصاویر تک زمانه اگر در بیش از ده درصد مقاطع زمانی مربوط به یک سال زراعی شواهدی مبنی بر وقوع ناهنجاری وجود داشته باشد آن مزرعه در زمره مزارع ناهنجر دسته‌بندی شده است. در مورد روش آشکارسازی تجمعی نیز ملاک سری زمانی کل سال زراعی بوده است. مزارعی که پاسخ آشکارساز در حداقل ۹ پیکسل آن‌ها (۹۰ مترمربع) از $\mu + 3\sigma$ بزرگ‌تر باشد به‌عنوان مزرعه ناهنجر دسته‌بندی شده‌اند. در این رابطه μ و σ به ترتیب میانگین و انحراف استاندارد پاسخ آشکارساز در مورد پیکسل‌های واقع در هر مزرعه هستند. مطابق با نتایج گزارش شده در جدول (۳)، روش‌های کشف ناهنجاری مبتنی بر تصاویر تک زمانی در هر دو روش آشکارسازی RX و MedSAM نتایج مطلوبی را از خود نشان ندادند. این موضوع به‌واسطه‌ی ماهیت ناپایدار رخداد ناهنجاری در طول یک سال زراعی در مورد مزارع کشاورزی بوده که استفاده از روش‌های مبتنی بر سری‌های زمانی توانسته تا حد زیادی به این چالش غلبه نماید. روش MedSAM نیز در مقایسه با روش RX در کسب نتایج موفق‌تر بوده است.

جدول ۳- ماتریس‌های دقت مربوط به کشف ناهنجاری در مزارع منتخب

الف: تصاویر تک زمانه و روش RX			ب: تصاویر تک زمانه و روش MedSAM		
نتایج آشکارسازی	سالم	ناهنجار	نتایج آشکارسازی	سالم	ناهنجار
واقعیّت زمینی سالم	۵۰	۶	واقعیّت زمینی سالم	۷۷	۱۲
واقعیّت زمینی ناهنجر	۲۸	۷	واقعیّت زمینی ناهنجر	۱	۱
ب: سری‌زمانی تجمعی و روش RX			ت: سری‌زمانی تجمعی و روش MedSAM		
نتایج آشکارسازی	سالم	ناهنجار	نتایج آشکارسازی	سالم	ناهنجار
واقعیّت زمینی سالم	۷۲	۷	واقعیّت زمینی سالم	۷۵	۱
واقعیّت زمینی ناهنجر	۶	۶	واقعیّت زمینی ناهنجر	۳	۱۲

جدول (۴) گزارشی از شاخص‌های آماری دقت مستخرج از ماتریس درهم‌ریختگی را برای روش‌های مورد استفاده ارائه می‌دهد. در

این جدول شاخص‌های صحت کلی (OA)، دقت (P)، ضریب F1^۱ و ضریب کاپا^۲ (Japkowicz & Shah, 2011) گزارش شده‌اند. مطابق با نتایج ارائه‌شده در جدول (۴) عملکرد روش سری‌زمانی تجمعی با آشکارساز MedSAM بهترین نتایج را از منظر شاخص‌های دقت کسب کرده است. البته ناگفته نماند که هدف از رویکردهای آشکارسازی ناهنجاری صرفاً برچسب‌گذاری نبوده و تأمین شرایط تفسیر بصری برای کاربر در طول زمان می‌تواند در روند پیش‌مستمر مزارع مؤثر باشد. نتایج بهتر در جدول (۴) می‌تواند در انتخاب روش بهینه هنگام برچسب‌گذاری سالانه برای یک محصول مفید باشد که در این شرایط به‌کارگیری روش سری‌زمانی تجمعی با آشکارساز MedSAM توصیه می‌شود.

جدول ۴- شاخص‌های آماری دقت مستخرج از ماتریس‌های درهم‌ریختگی

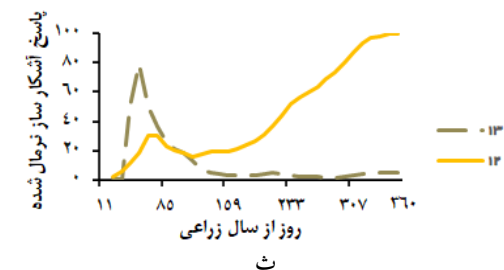
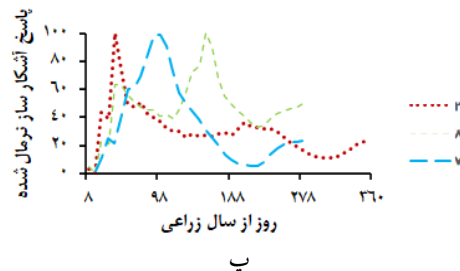
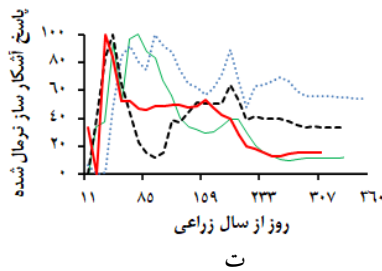
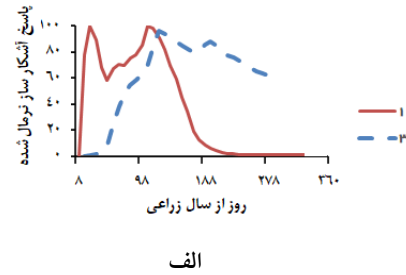
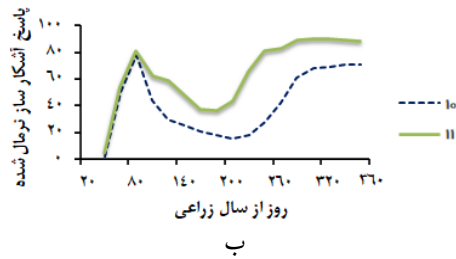
Kappa%	F1_Score%	P%	OA%	رویکردهای تشخیص ناهنجاری
۸۳/۱۳	۸۵/۷۱	۸۰	۹۵/۶۰	سری‌زمانی تجمعی و روش MedSAM
۳۹/۷۳	۴۸/۰۱	۵۰	۸۵/۱۴	سری‌زمانی تجمعی و روش RX
۳۹/۶۵	۴۴/۴۴	۸۰	۸۹/۰۱	تصاویر تک‌زمانه و روش MedSAM
۲۷/۷۵	۴۳/۱۳	۲۸/۹۴	۶۸/۱۳	تصاویر تک‌زمانه و روش RX

نتایج گزارش‌شده در جدول (۴) صرفاً عملکرد روش‌های آشکارسازی ناهنجاری را در دو حالت تصاویر تک‌زمانه و سری‌های زمانی تجمعی سنجش نموده است. با در نظر گرفتن روش آشکارسازی ناهنجاری در سری‌زمانی تجمعی و آشکارساز MedSAM به‌عنوان بهترین نتیجه‌ی کسب‌شده، در مزارع ناهنجاری که به‌درستی شناسایی شده‌اند مشکلات مختلفی مانند ۱- توزیع نامتوازن بذر و کود (۲ مورد)، ۲- چرای دام در زمان رشد محصول (۱ مورد)، ۳- آفت و قارچ محصول (۳ مورد)، ۴- تمایز بافت خاک و شیب زمین (۲ مورد)، ۵- رشد علف‌های هرز (۷ مورد) و ۶- خشکسالی (۲ مورد)، عامل بروز ناهنجاری گزارش شده‌اند. این موضوع نویدبخش وجود ارتباط معنادار بین نتایج آشکارسازی ناهنجاری و طیف متنوعی از عوامل مخرب در روند داشت محصولات کشاورزی بوده که می‌تواند با توسعه‌ی سامانه‌های پیش‌در اطلاع‌رسانی مناسب به کشاورزان مؤثر باشد. با این حال، روش‌های کشف ناهنجاری صرفاً ابزار هشدار دهی تلقی شده و نمی‌توان انتظار طبقه‌بندی نوع ناهنجاری را از این روش‌ها داشت. از سوی دیگر، آستانه‌ی انتخاب شده در برچسب‌دهی مزارع سالم و ناهنجار تجربی بوده و کماکان پیش‌بصری نقشه‌ی پاسخ آشکارساز بهترین روش در سنجش وقوع ناهنجاری خواهد بود.

در ادامه‌ی بررسی نتایج کسب‌شده، روند زمانی پاسخ آشکارساز MedSAM در محل ناهنجاری برای انواع ناهنجاری‌های موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه، بصورت نمودارهای شکل (۵) تولید گردید. هر نمودار مربوط به یک نوع ناهنجاری بوده و هر یک از این نمودارها به‌طور مستقل در بازه‌ی صفر تا ۱۰۰ نرمال شده‌اند.

شماره‌ی هر منحنی از نمودارهای شکل (۵) منطبق بر شماره‌ی ردیف در جدول شماره (۲) است. پس از بررسی و مقایسه‌ی رفتار زمانی واکنش آشکارساز ناهنجاری به گونه‌های مختلف از ناهنجاری، نتایج معناداری استحصال شد. در برخی از عوامل همچون یکی از حالت‌های بافت خاک و شیب زمین و یا آفاتی که از طریق سم‌پاشی امکان مهار آن‌ها وجود دارد؛ رفتار زمانی پاسخ آشکارساز نزولی است. این بدان معناست که ناهنجاری رخ داده در این مزارع پایدار نبوده و تا حد زیادی در طول زمان جبران شده است. به‌عنوان مثال در نمودار (۵-الف) دو نمودار متمایز از بروز ناهنجاری برای دو مزرعه ناشی از بافت خاک و شیب زمین دیده می‌شود. در نمودار مربوط به مزرعه شماره (۱)، بافت خاک در محل ناهنجاری سنگلاخی بوده ولی در مزرعه شماره (۳) شیب متمایز زمین باعث بروز ناهنجاری شده است. در زمین سنگلاخی در طول سال زراعی امکان رشد محصول میسر نبوده اما در مزرعه توأم با شیب متمایز، در طول زمان با تراکم و نرخ کمتری محصول رشد کرده است. از این رو، این دو نمودار علیرغم برخورداری از عوامل ناهنجاری مشابه، رفتار زمانی متمایزی را نشان می‌دهند.

1 Overall accuracy
2 Precision
3 F1_score
4 Kappa Coefficient



الف) ناهنجاری ناشی از بافت خاک و شیب زمین
ب) ناهنجاری ناشی از خشکسالی
پ) ناهنجاری ناشی از آفت و قارچ
ت) ناهنجاری ناشی از علف‌های هرز
ث) ناهنجاری‌های چند متغیره

شکل ۵- نمودار رفتار زمانی ناهنجاری‌های مختلف مربوط به مزارع ناهنجار (جدول ۲)

از سوی دیگر، خشکسالی و همچنین علف‌های هرز در مورد زمین‌های زراعی منطقه مورد مطالعه در زمهری عواملی تلقی شده که منجر به کاهش شدید عملکرد محصول شده‌اند. علف‌های هرز با رشد سریع‌تر، گوی سبقت را در رقابت جذب منابع غذایی و نور از محصول کشاورزی ربوده و این موضوع باعث کاهش شدید عملکرد محصول شده است. باینکه روند کلی نمودارهای شکل (۵-ت) حاکی از یک‌روند نزولی است؛ اما تغییر ماهیت گیاه غالب در مزرعه از محصول کشاورزی به علف هرز منجر به کاهش شدید پاسخ آشکار ساز نشده است. بدیهی است که در صورت رخداد وسیع علف‌های هرز احتمال آشکار سازی آن در روش‌های منتخب آشکار سازی ناهنجاری کاهش می‌یابد. پیش شرط موفقیت روش‌های آشکار سازی ناهنجاری وقوع پرتکرار عوامل پس‌زمینه بوده که در صورت رشد یکنواخت علف هرز در سراسر مزرعه این موضوع به‌عنوان یک‌روند طبیعی تلقی شده و آشکار سازی صورت نمی‌پذیرد. در بین مزارع توأم با ناهنجاری ناشی از علف هرز، مزرعه شماره (۵) به دلیل وقوع هم‌زمان گل جالیز و کرم کلم و عدم امکان مهار هر دو (سموم مربوط به مهار گل جالیز به‌عنوان یک گیاه پهن‌برگ منجر به از بین رفتن کلزا نیز می‌شود) روند ناهنجاری تا انتهای سال زراعی تداوم یافته و این موضوع تخریب کامل محصول را در محدوده ناهنجاری به دنبال داشته است. این موضوع با روند پایدار پاسخ ناهنجاری ارتباط معناداری را نشان می‌دهد. خشکسالی جالب‌ترین رخداد در آشکار سازی ناهنجاری در مزارع منتخب بوده است. کاهش عملکرد سراسری در اثر کاهش نزولات آسمانی منجر شده که بخش‌های زیادی از مزرعه حاوی محصول نباشد. در این شرایط، وجود زمین بایر به‌عنوان روند زمینه تلقی شده و لکه‌هایی که به دلیل برخورداری از خاک مرغوب رشد محصول را به دنبال داشته‌اند به‌عنوان ناهنجاری آشکار سازی شده‌اند. نمودارهای شکل (۵-پ) روند آشکار سازی مزارع گندم را نشان داده که قارچ فوزاریوم خوشه عامل اصلی ناهنجاری بوده است. استفاده از سموم شیمیایی (تیلت و فالکن) به‌طور مؤثری موجب کاهش این آفات شده و محصول در نواحی ناهنجاری و در انتهای سال زراعی صرفاً با کاهش کیفیت روبرو بوده است. دو مزرعه شماره ۱۲ و ۱۳ جزء مزارعی بوده که در آن عوامل مختلفی باعث بروز ناهنجاری شده است (جدول ۲). در مزرعه شماره ۱۲، عدم کاشت محصول در چند مسیر به دلیل نقص در تجهیزات کشاورزی باعث فقدان قطعی محصول شده و این موضوع موجب پایداری رفتار متمایز این نواحی نسبت به رفتار پس‌زمینه شده است. اما در زمین زراعی ردیف (۱۳) توزیع نامتوازن بذر باعث ناهمگونی در تراکم محصول شده که در فصل بهار سبزی‌نگی ناشی از علف‌های هرز رفتار متمایز آنرا جبران کرده است. از این‌رو روند زمانی این مزرعه

در ناحیه ناهنجار نزولی دیده می‌شود.

بر پایه نتایج کسب‌شده از تحلیل نمودارهای زمانی مربوط به آشکارساز ناهنجاری به نظر می‌رسد روش بکار گرفته‌شده توان تولید اطلاعات مفیدی را برای کشاورزان در زمین‌های زراعی وسیع داشته باشد. یکی از چالش‌های فعلی کشاورزان در چنین مزارعی عدم اطلاع از وضعیت و عملکرد گیاهان کشت شده در سراسر مزرعه است. وقوع ناهنجاری عموماً منجر به تخریب محصول و یا کاهش عملکرد آن شده و کشف این موضوع در زمان برداشت بروز ضررهای مالی را برای کشاورزان به دنبال دارد. توسعه سامانه‌های سنجش از دوری مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای رایگان (همچون سنتینل-۲) می‌تواند در آگاه‌سازی بهنگام کشاورزان از بروز اختلال مفید باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که روش‌های آماری آشکارسازی ناهنجاری و بکارگیری تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ پتانسیل کافی برای پایش سلامت کشت در طول سال زراعی را در مزارع کشاورزی وسیع برخوردارند. در چهار آزمایش انجام شده در این مقاله روش آشکارسازی MedSAM بر روی تصاویر سری زمانی بهترین نتیجه را کسب نموده است. این راهکار نشان داد که بررسی روند پاسخ آشکارساز در نواحی ناهنجار را می‌توان مبنایی برای بررسی جبران یا تشدید ناهنجاری در طول زمان قلمداد نمود. توسعه‌ی زیرساخت‌های پایش تحت وب برای چنین روش‌هایی همانند سامانه‌های توسعه‌یافته در (Defourny et al., 2019; Rodriguez Perez et al., 2004) می‌تواند در بهبود مدیریت مزارع کشاورزی موثر باشد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

استفاده از فناوری سنجش از دور یک راهکار مؤثر در مدیریت منابع کشاورزی است. بروز ناهنجاری یک اتفاق پرتکرار در مزارع کشاورزی است که عوامل مختلفی باعث بروز آن هستند. در این مقاله از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ به منظور آشکارسازی اختلالات کشت محصولات پاییزه در سطح مزرعه استفاده شد. نتایج نشان داد که به‌کارگیری سری‌های زمانی تجمعی می‌تواند در مورد آشکارسازی و همچنین ارزیابی میزان پایداری ناهنجاری‌ها از روش‌های تک زمانه عملکرد بهتری را داشته باشد. تحلیل روند زمانی پاسخ آشکارساز ناهنجاری می‌تواند شاخصی از میزان اثربخشی اقدامات جبرانی در هنگام بروز ناهنجاری باشد. مزارع منتخب در این تحقیق عموماً مربوط به کشت پاییزه و دیم بوده و بررسی راهکار این تحقیق در مورد محصولات بهاره (به دلیل بازه‌ی زمانی متراکم‌تر از رشد) و همچنین محصولات آبی مانند برنج در افق تحقیقاتی پیش‌روی نویسندگان این مقاله است.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- باقری، نیکروز؛ جوادی، ارژنگ. (۱۴۰۱). ارزیابی سطح فناوری در تولید محصولات راهبردی کشاورزی ایران. فصلنامه توسعه تکنولوژی صنعتی میرپناهی، صاحب؛ جوادی، ارژنگ. (۱۴۰۱). لزوم تغییرات اساسی سطح کشاورزی سنتی ایران در عصر کشاورزی هوشمند و کشاورزی روباتیک. هفتمین کنگره بین‌المللی توسعه کشاورزی و محیط زیست با تاکید بر برنامه توسعه ملل. معاونت آمار مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات. (۱۴۰۰). آمارنامه کشاورزی سال ۱۴۰۰، جلد اول، محصولات زراعی
- <https://amar.maj.ir/Dorsapax/userfiles/Sub65/amar99-1400.pdf>

REFERENCES

- Albughdadi, M., Kouamé, D., Rieu, G., & Tourneret, J. Y. (2017, 23-28 July 2017). Missing data reconstruction and anomaly detection in crop development using agronomic indicators derived from multispectral satellite images. *Paper presented at the 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*.
- Aslan, M. F., Durdu, A., Sabanci, K., Ropelewska, E., & Gültekin, S. S. (2022). A comprehensive survey of the recent studies with uav for precision agriculture in open fields and greenhouses. *Applied Sciences*, 12(3), 1047 .
- Bagheri, N., & Javadi, A. (2022). Assessing the level of technology in the production of strategic agricultural products of IRAN. *Industrial Technology Development Quarterly*. (inPersian)
- Castillo-Villamor, L., Hardy, A., Bunting, P., Llanos-Peralta, W., Zamora, M., Rodriguez, Y., & Gomez-Latorre, D. A. (2021). The Earth Observation-based Anomaly Detection (EOAD) system: A simple, scalable approach to mapping in-field and farm-scale anomalies using widely available satellite imagery .



International journal of applied earth observation and geoinformation, 104, 102535.

- Defourny, P., Bontemps, S., Bellemans, N., Cara, C., Dedieu, G., Guzzonato, E., . . . Koetz, B. (2019). Near real-time agriculture monitoring at national scale at parcel resolution: Performance assessment of the Sen2-Agri automated system in various cropping systems around the world. *Remote sensing of environment*, 221, 551-568. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.007>
- 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 .
- Lasaponara, R. (2006). On the use of principal component analysis (PCA) for evaluating interannual vegetation anomalies from SPOT/VEGETATION NDVI temporal series. *Ecological modelling*, 194(4), 429-434. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.10.035>
- León-López, K. M., Mouret, F., Arguello, H., & Tourneret, J.-Y. (2021). Anomaly detection and classification in multispectral time series based on hidden Markov models. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 60, 1-11 .
- Mir Panahi, S., & Javadi, A. (2022). The need for fundamental changes in Iran's traditional agricultural level in the era of smart agriculture and robotic agriculture. *Paper presented at the The 7th International Congress of Agricultural Development and Environment with an emphasis on the development program of nations*(inPersian). <https://civilica.com/doc/1492777>
- Mouret, F., Albughdadi, M., Duthoit, S., Kouamé, D., Poilvé, H., Rieu, G., & Tourneret, J.-Y. (2020). Unsupervised crop anomaly detection at the parcel-level using optical and SAR images: application to wheat and rapeseed crops .
- Mouret, F., Albughdadi, M., Duthoit, S., Kouamé, D., Rieu, G., & Tourneret, J.-Y. (2021). Outlier detection at the parcel-level in wheat and rapeseed crops using multispectral and SAR time series. *Remote sensing*, 13(5), 956 .
- Racetin, I., & Krtalić, A. (2021). Systematic review of anomaly detection in hyperspectral remote sensing applications. *Applied Sciences*, 11(11), 4878 .
- Rodriguez Perez, A. J., Louakfaoui, E. M., Munoz Rastrero, A., Rubio Perez, L. A., & de Pablos Epalza, C. (2004). S.I.I.A. for monitoring crop evolution and anomaly detection in Andalusia by remote sensing (Vol. 5232): SPIE.
- San Bautista, A., Fita, D., Franch, B., Castiñeira-Ibáñez, S., Arizo, P., Sánchez-Torres, M. J., . . . Rubio, C. (2022). Crop Monitoring Strategy Based on Remote Sensing Data (Sentinel-2 and Planet), Study Case in a Rice Field after Applying Glycinebetaine. *Agronomy*, 12(3), 708 .
- Alter, O., Brown, P. O., & Botstein, D. (2000). Singular value decomposition for genome-wide expression data processing and modeling. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(18), 10101-10106.
- Bruckstein, A. M., Donoho, D. L., & Elad, M. (2009). From sparse solutions of systems of equations to sparse modeling of signals and images. *SIAM review*, 51(1), 34-81.
- Chandola, V., Banerjee, A., & Kumar, V. (2009). Anomaly detection: A survey. *ACM computing surveys (CSUR)*, 41(3), 1-58.
- Comaniciu, D., & Meer, P. (2002). Mean shift: A robust approach toward feature space analysis. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 24(5), 603-619.
- Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., & Xu, X. (1996). A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. Paper presented at the kdd.
- Filho, J. E. A., Brandão, L. C. P., Fernandes, B. J. T., & Maciel, A. M. A. (2022). A Review of Neural Networks for Anomaly Detection. *Ieee Access*, 1-1. doi:10.1109/ACCESS.2022.3216007
- Ghrib, Z., Jaziri, R., & Romdhane, R. (2020, 19-24 July 2020). Hybrid approach for Anomaly Detection in Time Series Data. Paper presented at the 2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN).
- Hotelling, H. (1933). Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of educational psychology*, 24(6), 417.
- Japkowicz, N., & Shah, M. (2011). *Evaluating Learning Algorithms: A Classification Perspective*: Cambridge University Press.
- Jia, W., Sun, M., Lian, J., & Hou, S. (2022). Feature dimensionality reduction: a review. *Complex & Intelligent Systems*, 8(3), 2663-2693.
- Kayode Saheed, Y., Harazeem Abdulganiyu, O., & Ait Tchakoucht, T. (2023). A Novel Hybrid Ensemble Learning for Anomaly Detection in Industrial Sensor Networks and SCADA Systems for Smart City Infrastructures. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.03.010>

- Matteoli, S., Diani, M., & Corsini, G. (2010). A tutorial overview of anomaly detection in hyperspectral images. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 25(7), 5-28.
- Nassif, A. B., Talib, M. A., Nasir, Q., & Dakalbab, F. M. (2021). Machine learning for anomaly detection: A systematic review. *Ieee Access*, 9, 78658-78700.
- Reed, I. S., & Yu, X. (1990). Adaptive multiple-band CFAR detection of an optical pattern with unknown spectral distribution. *IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing*, 38(10), 1760-1770.
- Scholz, M., Kaplan, F., Guy, C. L., Kopka, J., & Selbig, J. (2005). Non-linear PCA: a missing data approach. *Bioinformatics*, 21(20), 3887-3895.



Anomalies detection and cause analysis of autumn crops in individual croplands using time series of Sentinel-2 satellite data (Case Study: Golestan province)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Agriculture plays a crucial role in sustaining human livelihood by supplying essential resources such as food, fuel, and raw materials. Given the challenges posed by population growth and limited resources, effective agricultural management becomes imperative in order to fulfill fundamental human requirements. Satellite imagery and remote sensing technology serve as valuable tools for enhancing agricultural product management. These images encompass optical and radar data, which are extensively employed to examine vegetation conditions and, notably, to monitor crop progression. In the realm of agricultural product production, the effective management of factors such as soil, pests, climatic conditions, and unforeseen risks holds significant importance in ensuring sustainable agricultural productivity. In the context of remote sensing images, anomaly detection methods employ unsupervised learning techniques to autonomously identify and uncover uncommon attributes within spectral images. These methods operate in the absence of any prior knowledge about the target scene or spectrum. They rely on the assumption that certain patterns in the input space are more frequently observed, while others occur less frequently. The primary objective of these methods is to uncover and examine these patterns. Anomaly detection techniques can be applied to reflectance, radiance, and other measurement units. Essentially, these methods aim to create a model of the image background and identify pixels that deviate from the background model as anomalies.

Materials and Methods

In this study, the time series data from Sentinel-2 satellite images pertaining to agricultural fields were utilized. The high temporal resolution offered by the dual multispectral sensors present in the Sentinel-2 satellite platforms (2A and 2B) enabled the generation of a 5-day time series. This research methodology revolves around identifying anomalies in multispectral satellite images and simultaneously gathering field information from farmers through the completion of questionnaires for the selected agricultural lands. This research focuses on two distinct approaches for detecting anomalies. Firstly, individual analysis of images captured at each-time point during the cultivation periods is conducted to identify abnormalities. In the second part, the series of images captured at different stages of the crop year are examined to understand the anomaly formation process. The objective is to assess the effectiveness and sustainability of these two methodologies.

Results and Discussion

Based on the field investigations, agricultural lands experiencing anomalies exhibited poor performance during the corresponding year's harvest. The irregular occurrence of anomalies and the absence of temporal continuity in their detection pose challenges when relying solely on individual time-based images. Based on the cumulative series, anomalies have exhibited continuous presence from the initial detection date throughout the entire observation period, persisting until the end of the agricultural year. Numerous factors have been identified as contributing to the occurrence of farm anomalies. These factors can be categorized into five distinct groups: 1) Anomalies attributed to soil texture and land slope, 2) Anomalies resulting from drought conditions, 3) Anomalies caused by pests and fungi, 4) Anomalies associated with weed infestations, and 5) Multivariate anomalies. Each of these factors exerts its effects, leading to anomalies and their consequences, either persistently or intermittently. Based on the reported findings, anomaly detection methods relying on individual time-based images yielded unfavorable outcomes in both RX and MedSAM detection methods. This challenge arises from the unpredictable occurrence of anomalies throughout a crop year in agricultural fields. However, the utilization of time series-based methods has significantly mitigated this issue. Moreover, the MedSAM method has demonstrated greater success in producing results compared to the RX method.

Conclusion

Utilizing remote sensing technology is a viable and efficient approach to agricultural resource management. anomalies are a common phenomenon observed in agricultural fields, resulting from diverse factors. This article employs the time series data of Sentinel-2 satellite images to investigate the anomalies in autumn crop cultivation at the field level. The results revealed that the utilization of cumulative time series proves to be more effective in detecting and assessing the stability of anomalies compared to methods that analyze individual time points. Examining the temporal pattern of the anomaly detector's response can serve as a potential indicator for assessing the effectiveness of remedial measures in response to anomaly occurrences. The fields chosen for this research predominantly pertain to autumn and dry farming, and the authors of this article have set their research sights on investigating the applicability of this approach to spring crops (which have a more condensed growth period) and water-intensive crops like rice.

Keywords: Anomaly detection, Cumulative time series, Remote sensing, RX algorithm, Sentinel-2.