مقاله علمی پژوهشی
مجله دوفصل نامه
مهندسی ژنتیک و ایمنی زیستی
ISSN 2588-5073 چاپی
ISSN 2588-5081 online الکترونیکی
دوره ۱۳، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۳
صفحه ۱۱۲-۱۰۰

کاربرد تصویربرداری فراطیفی در بیماری‌شناسی گیاهی

The Application of Hyperspectral Imaging in Plant Pathology

نرجس ملکی[۱] و داود کولیوند[۲]

Narjes Maleki[1] and Davoud Koolivand[2]

۱-کارشناسی ارشد رشته بیماری‌شناسی گیاهی، ۲- دانشیار گروه گیاه‌پزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، ایران

1. Master's degree in Plant Pathology, 2. Associate Professor, Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, Zanjan University, Iran

*Corresponding Author, Email: نویسنده مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی *
d.koolivand@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۲۳- تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۶/۲۹)
Received: 2024/03/05 | Accepted: 2024/09/13 | Published: 2024/09/19

Research Article
Genetic Engineering and Biosafety Journal 2024
Volume 13, Number 1, Pages: 100-112

http://gebsj.ir/

https://ecc.isc.ac/showJournal/23064

10.61186/gebsj.13.1.1

چکیده

Abstract

Annually, a significant portion of agricultural products is lost due to biotic and abiotic stresses, making the identification of plant diseases crucial for crop protection. Laboratory diagnostic methods are time-consuming and not ideal for large-scale applications. Modern agricultural approaches with innovative perspectives have the ability to detect diseases at an early stage before visible symptoms appear, providing an opportunity for intervention to control or prevent the spread of contamination prior to the infection or damage of the entire crop. Hyperspectral imaging technology is one of these approaches that has shown remarkable results in the early identification of plant diseases and stresses as a rapid and non-destructive measurement technology. This technique utilizes various sensors and platforms, combining spectral analysis and image analysis methods to simultaneously evaluate physiological and morphological components. This article focuses on the fundamentals of hyperspectral imaging technology, image acquisition, pre-processing, modeling, and analysis of hyperspectral data, as well as its application in plant pathology.

Keywords: Platforms in Hyperspectral Imaging, Hyperspectral Cameras, Machine Learning

رفرانس دهی این مقاله Citation

Maleki N, Koolivand D. The Application of Hyperspectral Imaging in Plant Pathology. Genetic Engineering and Biosafety Journal 2024; 13 (1) : 100-112
URL: http://gebsj.ir/article-1-471-en.html

ملکی نرجس، کولیوند داود. کاربرد تصویربرداری فراطیفی در بیماری‌شناسی گیاهی (۱۴۰۳). مهندسی ژنتیک و ایمنی زیستی. ۱۳ (۱): ۱۰۰- ۱۱۲

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-01-01]

[DOI: 10.61882/gebsj.13.1.1]

Genetic Engineering and Biosafety Journal
Volume 13, Number 1, 2024

خلاصه

سالانه بخش زیادی از محصولات کشاورزی به دلیل تنش‌های زیستی و غیرزیستی از بین می‌رود و شناسایی دقیق بیماری‌های گیاهی جهت حفاظت از گیاه در تولید محصول بسیار مهم است. از آنجایی‌که روش‌های تشخیصی آزمایشگاهی زمان‌بر هستند و برای مقیاس بزرگ ایده‌آل نیستند، روش‌های کشاورزی مدرن با رویکردهای جدید توانایی شناسایی زودهنگام بیماری قبل از ظهور علائم را دارند و فرصتی برای مداخله جهت کنترل یا جلوگیری از گسترش آلودگی قبل از آلوده‌شدن یا آسیب‌دیدن کل محصولات را فراهم می‌کنند. فناوری تصویربرداری فراطیفی یکی از این روش‌هاست که به‌عنوان یک فناوری سنجش سریع و غیرمخرب، نتایج قابل‌توجهی در شناسایی بیماری‌ها و تنش‌های گیاهی به دست آورده است. در این تکنیک از سنسورها و بسترهای مختلف استفاده می‌شود. این فناوری طیف‌سنجی نوری و روش‌های آنالیز تصویر را ترکیب و امکان ارزیابی هم‌زمان مولفه‌های فیزیولوژیکی و ریخت شناختی را فراهم می‌کند. این مقاله به اصل فناوری تصویربرداری فراطیفی، اکتساب تصویر، پیش‌پردازش، مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل داده‌های فراطیفی، همچنین کاربرد این فناوری در بیماری‌شناسی گیاهی می‌پردازد.

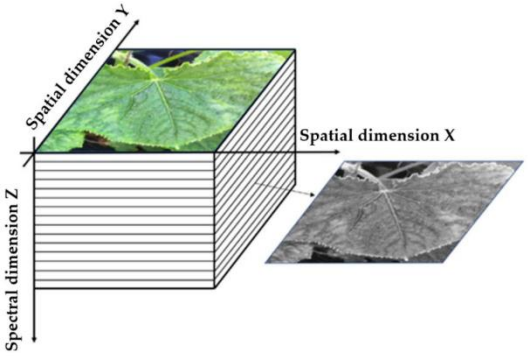
واژگان کلیدی: پلتفرم‌های تصویربرداری، دوربین‌های فراطیفی، شاخص‌های پوشش گیاهی، یادگیری ماشین

مقدمه، نتایج و بحث Introduction, Results and Discussion

ظهور نژادهای جدید بیمارگرها و بیماری‌های جدید از پیامدهای مهم تغییرات اقلیمی در سال‌های اخیر بوده است. از این‌رو شناسایی زودهنگام بیمارگرهای گیاهی، برای جلوگیری از گسترش تنش زیستی ناشی از آن‌ها در کشاورزی ضروری است. اقدامات مربوط به بررسی سلامت گیاه بر بازرسی‌های بصری محصول در مزرعه برای علائمی که به وضوح قابل مشاهده هستند، متکی است و به دنبال آن آزمایش‌های تشخیصی فشرده و پیشرفته در آزمایشگاه‌ها انجام می‌شود. روش‌های تشخیص سنتی زمان‌بر و برای مقیاس بزرگ ایده‌آل نیستند (Nguyen *et al.* 2021). توانایی شناسایی بیماری قبل از ظهور علائم فرصتی برای مداخله زودهنگام جهت کنترل بیماری و جلوگیری از گسترش آلودگی قبل از آسیب دیدن کل گیاهان فراهم می‌کند. امروزه با پیشرفت علوم مهندسی در زمینه‌های هوش مصنوعی، پردازش تصویر و همچنین وجود پایگاه‌های اطلاعاتی آسیب‌های گیاهی را می‌توان زودتر از ظهور علائم تشخیص داد و طبقه‌بندی کرد (Astani *et al.* 2022). سنجش از دور، علم ثبت تصاویر از سطح زمین با استفاده از انواع مختلفی از حسگرها و پلتفرم‌ها است. با توجه به منبع انرژی دو نوع فناوری سنجش از دور وجود دارد، که شامل سنجش از دور غیرفعال و سنجش از دور فعال است. سنجش از دور نوری غیرفعال معمولاً بر اساس وضوح طیفی حسگرها به دو گروه، سنجش از دور چندطیفی و فراطیفی تقسیم می‌شود. حسگرهای چندطیفی اطلاعات را در چند بازتاب باند پهن و گسسته جمع‌آوری می‌کنند در حالی که باندهای فراطیفی اطلاعات را از صدها بازتاب باند باریک و پیوسته جمع‌آوری می‌کنند (Lu *et al.* 2020). فناوری تصویربرداری فراطیفی در کشاورزی، صنایع غذایی، کانی‌شناسی، نجوم، مطالعات زیست محیطی، پزشکی و بسیاری از علوم دیگر استفاده می‌شود (Taghinezhad *et al.* 2023). تصویربرداری فراطیفی شامل چهار فرآیند، تشخیص انرژی از بازتاب نور خورشید، تبدیل انرژی به سیگنال الکتریکی، انتقال سیگنال به زمین و سپس ذخیره در حافظه، و تصحیح و پیش‌پردازش برای تحریف‌هایی که در طول فرآیند رخ می‌دهد، است (Arjoune *et al.* 2022). این فناوری امکان ارزیابی همزمان پارامترهای فیزیولوژیکی و ریخت‌شناختی گیاه را فراهم می‌کند (Cheshkova 2022). بر اساس نتایج تحقیقات مختلف، برای طبقه‌بندی و تشخیص آسیب‌های گیاهی ایجاد بانک اطلاعاتی جامع و کامل شامل کلیه شرایط بیماری و سلامت گیاه، پیش‌پردازش‌های مختلف، تقسیم‌بندی، انتخاب ویژگی و استخراج ویژگی از تصاویر بر اساس شرایط پایگاه داده، انتخاب شاخص‌های مناسب برای تجزیه و تحلیل تصاویر ضروری است (Astani *et al.* 2022). این فناوری اطلاعات

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-01-01]
[DOI: 10.61882/gebsj.13.1.1]

طیفی یک جسم را در یک مکعب طیفی که حاوی اطلاعات مکانی و صدها طول موج پیوسته در بعد سوم است، می‌گیرد و ذخیره می‌کند. در واقع این تصاویر مکعب‌های سه بعدی داده (شکل ۱) هستند که شامل دو بعد فضایی و یک بعد طیفی یا طول‌موج هستند. طیف‌های الکترومغناطیس برای تمام پیکسل‌های یک تصویر ثبت می‌شود. تصاویر فراطیفی برای تشخیص زودهنگام بیماری‌ها و تنش‌های زیستی و غیرزیستی مناسب هستند و این پتانسیل را دارند که به عنوان یک روش سریع و غیرمخرب، برگ‌های آلوده را در مدت زمان کوتاه (یعنی ۴۸ ساعت) در مقایسه با بازرسی‌های مزرعه‌ای و روش‌های مولکولی (۵ تا ۱۱ روز) شناسایی کنند (Zhu *et al.* 2017). به محض آلوده شدن گیاه به بیمارگر، سیستم دفاعی گیاه فعال می‌شود. خواص بیوشیمیایی و بیوفیزیکی گیاه آسیب‌دیده تغییر می‌کند و باعث تغییر ویژگی‌های طیفی گیاهان سالم می‌شود که این تغییرات ظریف در بازتاب طیفی توسط حسگرهای فراطیفی ثبت خواهد شد. بازتاب در طول موج‌های مرئی اطلاعاتی را در مورد رنگدانه‌های برگ فراهم می‌کند، درحالی‌که بازتاب در طول‌موج‌های مادون قرمز نشان دهنده وضعیت فیزیولوژیکی گیاه است (Kuska *et al.* 2022).



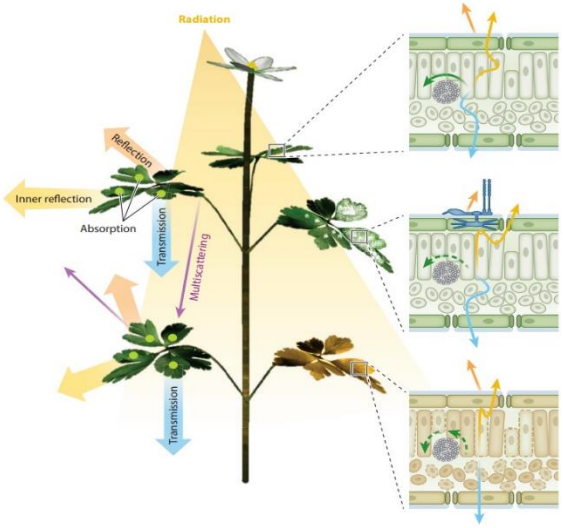
شکل ۱- ساختار یک مکعب داده تصویر فراطیفی (Wan *et al.* 2022).
Fig 1. The structure of a hyperspectral image data cube (Wan et al. 2022).

در مطالعات بسیاری از تصویربرداری فراطیفی برای شناسایی زودهنگام بیماری‌ها و آسیب‌های گیاهی در مقیاس‌های مکانی، طیفی و زمانی مختلف استفاده شده است. به‌عنوان‌مثال از سیستم‌های حسگر فراطیفی برای تشخیص و تمایز بیماری‌های گیاهی ناشی از *Cercospora beticola*, *Erysiphe betae*, *Uromyces betae* در چغندرقند استفاده شده است (Mahlein *et al.* 2010). از تصاویر فراطیفی برای تشخیص بیماری بلایت زودرس ناشی از *Alternaria solani* در سیب‌زمینی قبل از ظاهر شدن علائم بیماری استفاده شده است (Atherton *et al.* 2017). تشخیص آلودگی گیاهان سیب‌زمینی به *Potato virus Y*، تشخیص آنتراکنوز در گیاهان چای قبل از ظهور علائم، تشخیص زودهنگام زردی انگور که توسط دو فیتوپلاسما ایجاد می‌شود، شناسایی دو بیمارگر *Xanthomonas perforans* و *Corynespora cassicola* روی گیاه گوجه‌فرنگی و تشخیص غده‌های سیب‌زمینی آلوده به *Meloidogyne luci* با استفاده از تصویربرداری فراطیفی و یادگیری عمیق بررسی شده است (Polder *et al.* 2019; Yuan *et al.* 2019; Bendel *et al.* 2020; Abdulridha *et al.* 2020; Žibrat *et al.* 2021). این مقاله به معرفی تصویربرداری فراطیفی و کاربردهای آن در بیماری‌شناسی گیاهی می پردازد.

برهم‌کنش بین نور (تابش الکترومغناطیسی) و گیاه:

برهم‌کنش بین بافت گیاه و نور را می‌توان به انواع انتقال، جذب، پراکندگی و بازتاب طبقه‌بندی کرد (شکل ۲) (Mishra *et al.* 2017). بازتاب به ترکیبات بیوشیمیایی موجود در برگ‌ها و ویژگی‌های فیزیکی برگ‌ها بستگی دارد. برهمکنش بین نور و بافت گیاه به طول موج هم وابسته است. در محدوده طول موج مرئی، گیاه به دلیل جذب نور توسط رنگدانه‌های فتوسنتزی (کلروفیل، آنتوسیانین و کاروتنوئید) دارای بازتاب کم است. در مادون قرمز نزدیک، بازتاب به دلیل پراکندگی نور در فضای بین‌سلولی افزایش می‌یابد. در محدوده مادون قرمز موج کوتاه، گیاهان سالم به دلیل جذب نور توسط آب، پروتئین‌ها و سایر اجزای کربنی، بازتاب کمی دارند (Cheshkova 2022).

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-01-01]
[DOI: 10.61882/gebsj.13.1.1]

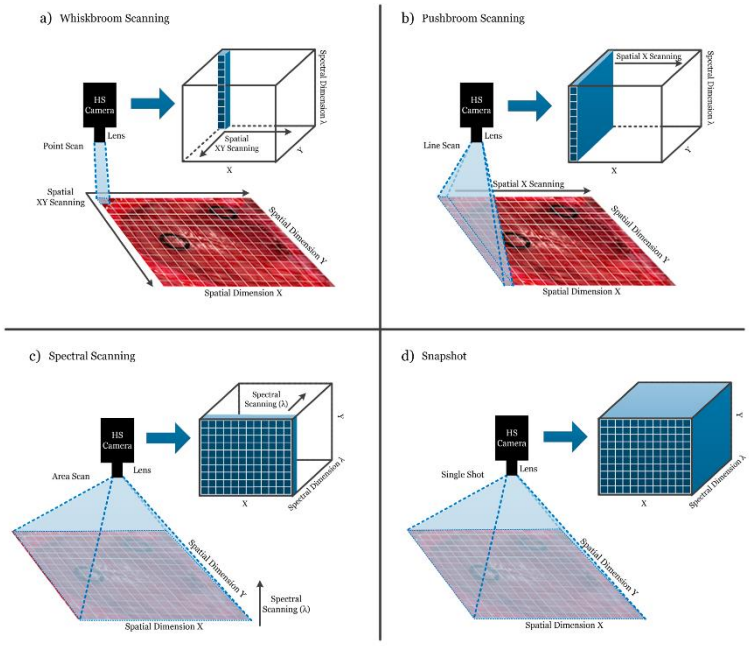


شکل ۲- برهم‌کنش بین بافت گیاه و نور (Mahlein *et al.* 2018).
Fig 2. Interaction between plant tissue and light (Mahlein et al. 2018).

حسگرها و پلتفرم‌های مورد استفاده در تصویربرداری فراطیفی:

حسگرهای طیفی را می‌توان با توجه به وضوح طیفی آن‌ها (تعداد و عرض باندهای اندازه گیری) و مقیاس‌های طیفی (فرابنفش، مرئی، فروسرخ نزدیک، فروسرخ موج کوتاه) طبقه‌بندی کرد. حسگرهای فراطیفی می‌توانند باند مرئی طیف الکترومغناطیسی را از ٤٠٠ نانومتر تا ۷۰۰ نانومتر، باند مادون قرمز نزدیک از ۷۰۰ نانومتر تا ۱۰۰۰ نانومتر و باند مادون قرمز موج کوتاه از ۱۰۰۰ نانومتر تا ۲۵۰۰ نانومتر را پوشش دهند (Wan *et al.* 2022). عامل دیگری که بر کیفیت داده‌ها تأثیر می‌گذارد، فاصله بین جسم و سنسور است. بنابراین شناسایی فاصله‌ی مناسب برای هر سنسور از اهمیت بالایی برخوردار است (Mahlein *et al.* 2019). دو نوع سنسور وجود دارد: سنسورهای تصویربرداری و سنسورهای غیرتصویربرداری. حسگرهای فراطیفی تصویربرداری، باندهای طیفی را برای هر پیکسل از تصویر ایجاد شده اندازه‌گیری می‌کنند و در نتیجه وضوح طیفی و فضایی را با هم ترکیب می‌کنند. سنسورهای غیرتصویربرداری میانگین بازتاب طیفی را در ناحیه خاصی از یک سطح بدون ذخیره اطلاعات مکانی اندازه‌گیری می‌کنند. اندازه ناحیه میانگین به فاصله کانونی، زاویه دید و فاصله تا جسم بستگی دارد (Thomas *et al.* 2018b). یک حسگر فراطیفی تا چند صد باند از طیف الکترومغناطیسی را در محدوده طول موج سنسور اندازه‌گیری می‌کند. هر یک از این باندهای طیفی تنها چند نانومتر از طیف الکترومغناطیسی را پوشش می‌دهند که منجر به وضوح طیفی بالای حسگر فراطیفی می‌شود. بسته به نوع حسگرهای مورد استفاده، چهار روش برای به دست آوردن یک فرامکعب از داده‌ها وجود دارد (شکل ۳): اسکن نقطه‌ای (Whisk-broom) ، اسکن خطی (Push-broom) ، اسکن ناحیه‌ای (Spectral scanning)، و عکس فوری (non-scanning) (Thomas *et al.* 2018b; Mishra *et al.* 2017).

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-01-01]
[DOI: 10.61882/gebsj.13.1.1]



شکل ۳- رویکردهای اکتساب تصاویر فراطیفی. مناطق آبی داده‌هایی را نشان می‌دهد که هر بار به دست می‌آیند (Halicek *et al.* 2019).

Fig 3. Hyperspectral image acquisition approaches. The blue areas indicate the data acquired at each instance (Halicek et al. 2019).

در یک سیستم اسکن نقطه‌ای، طیف کامل به‌صورت متوالی برای هر نقطه به دست می‌آید. در روش اسکن خطی، طیف یک خط کامل از پیکسل‌ها به طور هم‌زمان به دست می‌آید. در این دو روش برای ایجاد تصویر فراطیفی، شیء موردنظر از طریق حرکت یا چرخش اسکن می‌شود. این دوربین‌ها در آزمایشگاه، گلخانه و زمین زراعی روی پلتفرم‌های متحرک تخصصی (مانند سیستم‌های ریلی ثابت، وسایل نقلیه، پهپادها) نصب می‌شوند که باعث حرکت خطی و تثبیت دوربین می‌شود. نقطه‌ضعف این سنسورها طولانی بودن گرفتن تصویر است که عکس‌برداری از اجسام متحرک را پیچیده می‌کند. در اسکن طیفی، اطلاعات صحنه از یک میدان دید ثابت به‌عنوان یک تصویر تک‌رنگ دوبعدی در یک طول‌موج در یک‌زمان به دست می‌آید. در روش عکس فوری هر دو اطلاعات فضایی و طیفی به طور همزمان ثبت می‌شود (Cheshkova 2022). سیستم‌های تصویربرداری طیفی مبتنی بر فیلتر دارای قابلیت حمل، تنظیم سریع، کنترل راحت، کیفیت تصویر خوب و هزینه کم هستند. این حسگرها باندهای طول موج را انتخاب می‌کنند، که به سرعت در طول عکس‌برداری تغییر می‌کنند. تصاویر فضایی دوبعدی را هر بار برای یک طول موج می‌گیرند و سپس داده‌ها را در یک مکعب تصویر سه‌بعدی بازسازی می‌کنند. برای به دست آوردن یک فرامکعب به وسایل مکانیکی متحرک متکی نیستند. این حسگر معمولاً سریعتر از اسکن نقطه‌ای و خطی است (Wang *et al.* 2018). دوربین-های عکس فوری با هر نوردهی امکان ثبت اطلاعات فضایی و طیفی را در یک اکتساب می‌دهد و یک مکعب فراطیفی سه بعدی کامل را در یک مرحله ایجاد می‌کند. همه ی باندها به طور همزمان در یک نوردهی یکسان گرفته می‌شوند، بنابراین مکعب کامل تصویر بدون فرآیند اسکن ثبت می‌شود. کوتاه بودن زمان دریافت تصویر، تولید داده های کوچک‌تر و توانایی ایجاد تصاویر فراطیفی متوالی از یک جسم متحرک، آنها را برای استفاده مناسب می‌کند. با این حال در مقایسه با سایر اسکنرهای فراطیفی، وضوح فضایی کمتری از تصویر فراطیفی دارند (Hu *et al.* 2023). حسگرهای فراطیفی را می‌توان روی پلتفرم‌های مختلف مانند ماهواره‌ها، هواپیماها، پهپادها و پلت‌فرم‌های برد نزدیک میدانی یا آزمایشگاهی، سیستم‌های ریلی، سیستم‌های سوار بر خودرو و تراکتور نصب کرد تا تصاویری با وضوح‌های مکانی و زمانی متفاوت به دست آورند. هر کدام از این پلتفرم‌ها ویژگی‌ها، مزایا و معایبی دارند. برخی از حسگرها نیز دستی هستند و به پلتفرم نیازی ندارند. پلتفرم‌های سنجش از دور می‌توانند رفتار گیاهان را در نواحی بزرگ نظارت کنند و داده‌های مختلف را به طور همزمان، بر اساس داده‌های طیفی ظریف و طول‌موج‌های وسیع اندازه‌گیری کنند. این پلتفرم‌ها بر اساس مشخصات مختلفی مانند سرعت، ظرفیت بار، سنسور نصب شده و حداکثر

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-01-01]
[DOI: 10.61882/gebsj.13.1.1]

زمان پرواز با طیف گسترده‌ای از قیمت‌ها در بازار طبقه‌بندی می‌شوند (Jang *et al.* 2020). سیستم‌های ماهواره‌ای معمولاً از نظر هندسی و رادیومتری کاملاً کالیبره می‌شوند. تصاویر ماهواره‌ای و تصاویر به‌دست‌آمده از هواپیماهای سرنشین‌دار می‌توانند مستقیماً منطقه وسیعی از مزارع را پوشش دهند، زیرا ارتفاع پرواز (یا مدارهای) آنها بسیار بالاتر از پهپادها است. بنابراین، وضوح فضایی تصاویر ماهواره‌ها و هواپیماهای سرنشین‌دار ممکن است بسیار کمتر از تصاویر پهپادها باشد. اکثر حسگرهای فراطیفی مبتنی بر ماهواره دارای وضوح فضایی متوسطی هستند، و این وضوح فضایی برای پایش محصولات کشاورزی کافی نیست (Huang *et al.* 2023). وضوح زمانی عامل دیگری است که می‌تواند کاربرد تصاویر فراطیفی مبتنی‌بر ماهواره را در کشاورزی محدود کند. کیفیت پایین داده نیز موضوعی است که بر عملکرد تصویربرداری فراطیفی مبتنی بر ماهواره برای بررسی ویژگی‌های کشاورزی تأثیر می‌گذارد. همچنین نسبت به سایر پلتفرم‌ها داده‌های محدودی دارند (Lu *et al.* 2020). حسگرهای ماهواره‌ای چرخه‌های بازبینی طولانی دارند، بنابراین ممکن است سیگنال‌های اولیه تنش در محصول به موقع تشخیص داده نشود و شرایط آب‌وهوایی نامساعد این چالش را پیچیده‌تر می‌کند (Kuska *et al.* 2022). تصاویر به دست آمده از هواپیما دارای وضوح فضایی بالا تا متوسط هستند. تصویربرداری معمولاً به برنامه‌ریزی از مدت‌ها قبل نیاز دارد و عملیات پروازی گران هستند. همچنین برای جبران تاثیر ارتعاشات هواپیما، تغییر جهت هواپیما یا ثبت اطلاعات جهت برای تصحیح تصویر می‌توان از دستگاه‌های اندازه‌گیری اینرسی با دقت بالا استفاده نمود، اما هزینه و پیچیدگی سیستم افزایش می‌یابد (Hruska *et al.* 2012). ارتفاع پروازی هلیکوپترها نسبت به هواپیماها انعطاف پذیری بیشتری دارد و می‌توانند تصاویری با وضوح مکانی بالا در مناطق بزرگ به دست آورند. یک شرکت هوانوردی با هلیکوپتر سرنشین‌دار برای تصویربرداری مورد نیاز است، که نیاز به حمایت مالی زیاد و برنامه‌ریزی از قبل دارد (Lu *et al.* 2020). پهپادها را می‌توان در ارتفاعات پایین (۵۰ تا ۲۰۰ متر) به‌کار برد، بنابراین تصاویری با وضوح فضایی فوق‌العاده بالا به دست می‌آورند و داده‌ها را با وضوح زمانی، مکانی و طیفی بالاتر ارائه می‌دهند. در مقایسه با سایر پلتفرم‌های سنجش از دور (مانند ماهواره‌ها و هواپیماها)، پهپادها از نظر شرایط آب‌وهوایی محدودیت بیشتری دارند و کم‌هزینه‌تر هستند. همچنین برای برنامه‌ریزی یک عملیات پروازی انعطاف‌پذیری بیشتری دارند. وضوح فضایی فوق‌العاده بالای تصاویر نیز چالش‌هایی را ایجاد می‌کند (Huang *et al.* 2023). در استفاده از پهپاد، محققان باید اندازه، وزن و قدرت پهپاد، پوشش جغرافیایی، زمان ارتفاع، ارتفاع و سایر متغیرها را در نظر بگیرند. همچنین برای مجوز پرواز از یک مقام هوانوردی و خرید بیمه پرواز مناسب پهپاد اغدام می‌کنند. علاوه بر این، پهپادها باید در طول ماموریت‌های پروازی قابل مشاهده باشند تا خلبان بتواند تماس بصری دائمی با آن داشته باشد و تنها می‌توانند یک منطقه کوچک را به دلیل استقامت محدود باتری پوشش دهند (Lu *et al.* 2020). پلتفرم تصویربرداری فراطیفی با برد نزدیک، تصاویر فراطیفی با وضوح فضایی فوق‌العاده بالا به دست می‌آورد، که در زمین زراعی و آزمایشگاه می‌توان از آن استفاده نمود و برای بررسی ویژگی‌های محصول یا خاک در مقیاس ریز حیاتی است. سنسورها بر روی پلتفرم‌های متحرک یا ساکن نصب می‌شوند. این پلتفرم‌ها اطلاعات دقیقی در مورد فرآیندهای بیوفیزیکی و بیوشیمیایی گیاه و نحوه واکنش گیاهان به تنش‌ها و بیماری‌های محیطی ارائه می‌دهند. برهمکنش نور با هندسه پیچیده گیاهان همیشه منجر به پدیده‌هایی مانند پراکندگی نور، سایه، بازتاب‌های متعدد و مخلوط پیچیده می‌شود (Mishra *et al.* 2020). در نظر گرفتن عوامل متعدد مانند هزینه‌ها، منطقه پرواز، وزن سنسور، وضوح فضایی مورد نیاز برای مطالعه، ظرفیت بار پلتفرم، استقامت پلتفرم برای پرواز و قوانین پرواز برای انجام پروژه‌های تحقیقاتی ضروری است.

تجزیه و تحلیل داده‌های تصویربرداری فراطیفی:

فرآیند تجزیه و تحلیل تصاویر فراطیفی معمولاً شامل مراحل جمع‌آوری و پیش‌پردازش تصویر، استخراج و پردازش داده‌ها، مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل داده‌ها است. انتخاب و تنظیم صحیح سنسورها و پلتفرم‌ها، تنظیم صحیح وضوح فضایی و طیفی، منبع روشنایی، سرعت اسکن و زمان نوردهی پیش‌نیازهای دستیابی به تصاویر مناسب هستند (Wu and Sun 2013). تصاویر فراطیفی که توسط پلتفرم‌ها و حسگرهای مختلف به دست می‌آیند معمولاً در قالب اعداد خام ارائه می‌شوند که برای بازیابی اطلاعات دقیق طیفی باید پردازش شوند.

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-01-01]

[DOI: 10.61882/gebsj.13.1.1]

محققان از یک یا چند شاخص هوش مصنوعی برای آنالیز داده‌ها استفاده می‌کنند (Lu *et al.* 2020). در داده‌های طیفی مقادیر اشتباه داده (معروف به پیکسل‌های مرده یا بد که اغلب دارای مقدار سیگنال صفر یا حداکثر هستند) و مشاهداتی که با کل مجموعه داده ناسازگار هستند، وجود دارند. همچنین تصاویر فراطیفی معمولاً از هزاران یا حتی میلیون‌ها داده تشکیل شده‌اند. این مقدار اطلاعات به فضای ذخیره سازی زیاد، پهنای باند انتقال زیاد و زمان انتقال طولانی نیاز دارد. بنابراین، برای حفظ اطلاعات مورد نیاز، فشرده‌سازی تصویر انجام می‌شود. تکنیک‌ها و الگوریتم‌های زیادی برای پیش‌پردازش تصاویر وجود دارد و کاربرد و عملکرد آنها به نوع تصویر اندازه‌گیری شده، دستگاه مورد استفاده و اطلاعاتی که انتظار می‌رود با تجزیه‌وتحلیل به دست آید بستگی دارد (Vidal and Amigo 2012). داده‌های بدست آمده به دلیل عواملی مانند نویز حسگر، اثرات جوی، پراکندگی نور با تغییر آشکارساز، تغییرات در اندازه نمونه و نویزهای ناشی از دما، اطلاعات پس زمینه اضافی و وضوح کم دارای ناخالصی هستند. نویز حسگر با درجات مختلف باعث خراب شدن باندهای طیفی می‌شود. این باندهای خراب قبل از پردازش بیشتر از داده‌ها حذف می‌شوند (Taghinezhad *et al.* 2023). روش‌های مختلفی برای پیش‌پردازش تصاویر فراطیفی با توجه به اهداف مختلف توسعه یافته است. با این حال، انتخاب روش مناسب پیش‌پردازش با آزمون و خطا قابل تعیین است. بنابراین، یک روش پیش‌پردازش خاص برای همه داده‌ها قابل اجرا نیست. در پیش‌پردازش تصحیح هندسی، تصحیح رادیومتری، حذف نویز انجام می‌شود. پس از جمع‌آوری تصاویر فراطیفی، برای تبدیل شدت نور به دست آمده به مقدار بازتاب استاندارد و حذف سیگنال‌های نویز تصادفی (جریان تاریک) کالیبراسیون تصاویر فراطیفی در سطح پیکسل انجام می‌شود. انواع عمده کالیبراسیون شامل کالیبراسیون طول‌موج، کالیبراسیون فضایی و کالیبراسیون انحنا است. برای تصحیح تأثیر جریان تاریک، دو تصویر مرجع به نام‌های سفید و تاریک به‌صورت جداگانه و با روش‌های خاصی از موقعیت‌های روشنایی شدید گرفته می‌شوند. از این دو تصویر مرجع برای تصحیح تصاویر فراطیفی خام با استفاده از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$R=\frac{I_m-I_d}{I_r-I_d}\times Rr$$

در این معادله R تصویر فراطیفی اصلاح شده، I_m تصویر فراطیفی خام، I_d تصویر تاریک و I_r تصویر مرجع سفید است. این روش پرکاربردترین روش برای تصحیح نویز در جریان‌های تاریک است (Wu and Sun 2013). نویز تصادفی در بعد طیفی اغلب با استفاده از فیلتر Savitzky-Golay (SG) حذف می‌شود (Li *et al.* 2020). تصحیح رادیومتریک شامل تصحیح اتمسفر، تصحیح ارتفاع خورشید، و تصحیح فاصله زمین–خورشید، نرمال‌سازی رادیومتریک و یکسان‌سازی هیستوگرام و تبدیل اعداد دیجیتال به مقادیر تابش (یا بازتاب) است (Gašparović 2020). برای اصلاح اثرات جوی که بخار آب، غبار اتمسفر و سایر عناصر جوی به تصاویر اضافه می‌کنند از مدل‌های تجربی و مبتنی بر مدل‌های انتقال تابشی استفاده می‌شود. دسته اول روش‌ها مبتنی بر استفاده از اطلاعات قبلی در مورد جسم است که با آن می‌توان تصحیح تابشی را بدون مدل‌سازی دقیق انتقال تابشی انجام داد. دسته دوم روش‌ها دقیق‌تر و نیازمند محاسبات پیچیده‌تر و زمان‌بر هستند. از روش‌های رایج فشرده‌سازی تصاویر رمزگذاری بایت، انتخاب متغیر و پیوند داده‌ها را می توان نام برد (Vidal and Amigo 2012).

پردازش داده‌های فراطیفی:

بعد از انجام پیش‌پردازش، می‌توان از روش‌های تحلیلی برای تجزیه و تحلیل اطلاعات فراطیفی و بررسی ویژگی‌های مختلف کشاورزی استفاده کرد. یکی از محبوب‌ترین و گسترده‌ترین شاخص‌ها، شاخص پوشش گیاهی است که به طور مستقیم یا غیرمستقیم برای بررسی ویژگی‌های بیوشیمیایی و بیوفیزیکی پوشش گیاهی یا محصولات استفاده می‌شود. بیش از ۱۰۰ شاخص پوشش گیاهی وجود دارد، شاخص تفاوت پوشش گیاهی ((Difference Vegetation Index(DVI))، شاخص تفاوت نرمال شده پوشش گیاهی ((Normalized Difference Vegetation Index (NDVI))، شاخص بازتاب فتوسنتزی ((Photosynthetic Reflectance Index (PRI))، شاخص پوشش گیاهی افزایش یافته ((enhanced vegetation index (EVI))، شاخص گیاهی بهینه‌شده با خاک ((optimized soil-adjusted vegetation index (OSAVI)) و شاخص پوشش گیاهی تغییرشکل یافته ((modified transformed vegetation index (MTVI2)) از انواع آن هستند. شاخص‌های پوشش

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-01-01]
[DOI: 10.61882/gebsj.13.1.1]

گیاهی امکان ارزیابی و مشاهده تغییرات در تاج‌پوش یا سایبان کانوپی، شاخص سطح برگ ((Leaf Area Index (LAI)، غلظت کلروفیل، و تابش فعال فتوسنتزی ((Photosynthetically active radiation (PAR)، زیست‌توده، طبقه‌بندی پوشش گیاهی و تنش گیاهی را فراهم می‌کند (Zhao *et al.* 2020). در پژوهشی چهارده شاخص پوشش گیاهی مربوط به رشد محصول، تنوع رنگدانه، محتوای آب و نیتروژن، فعالیت فتوسنتزی و بیماری‌های محصول برای تشخیص زنگ زرد انتخاب شده‌اند (Guo *et al.* 2019). یکی دیگر از تکنیک‌های تجزیه و تحلیل داده‌های تصویربرداری فراطیفی یادگیری ماشین است. روش‌های یادگیری ماشین مدرن برای تحقق تجزیه و تحلیل سریع داده‌های پیچیده توسعه یافته‌اند (Kuska *et al.* 2022). از یادگیری ماشین برای پیش‌بینی عملکرد و کیفیت محصول، تشخیص بیماری، تشخیص علف‌های هرز و شناسایی گونه، مدیریت خاک و آب، رفاه حیوانات و مدیریت دام استفاده می‌شود. کاربرد یادگیری ماشین معمولاً بسته به نوع یادگیری (با نظارت، بدون نظارت)، مدل‌های یادگیری (طبقه‌بندی، رگرسیون، خوشه‌بندی و کاهش ابعاد) به دسته‌های مختلف طبقه‌بندی می‌شوند. انواع مدل‌های یادگیری ماشین شامل رگرسیون، خوشه‌بندی، مدل‌های Bayesian (BM)، مدل‌های Instance Based، Decision Trees، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، ماشین بردار پشتیبانی (Support vector machine) و Ensemble learning هستند (Liakos *et al.* 2018). در سال‌های اخیر، فناوری‌های یادگیری عمیق، به طور گسترده در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از سه روش یادگیری ماشین برای تشخیص بیماری زنگ گندم با دقت طبقه‌بندی بالا استفاده شده است (Ashourloo *et al.* 2016). برای آموزش مدل‌های پیش‌بینی جهت ارزیابی شدت عفونت قارچی از روش‌های یادگیری ماشین استفاده شده است (Brdar *et al.* 2021). هشت بیماری گیاهی مختلف با مدل‌های پیشرفته یادگیری عمیق شناسایی شده‌اند (Türkoğlu and Hanbay 2019). برای تشخیص پژمردگی فوزاریوم در تربچه از تکنیک یادگیری ماشین، از جمله یادگیری عمیق، برای پردازش تصاویر گرفته شده توسط پهپاد استفاده شده است. تصاویر ابتدا از طریق طبقه‌بندی‌کننده و خوشه‌بندی به سه ناحیه متمایز (تربچه، زمین برهنه و فیلم مالچ‌پاشی) تقسیم و سپس، مناطق شناسایی شده تربچه با استفاده از شبکه عصبی عمیق (CNN) به تربچه سالم و پژمردگی فوزاریوم تربچه طبقه‌بندی شدند (Ha *et al.* 2017).

کاربرد تصویربرداری فراطیفی:

تصویربرداری فراطیفی در بیماری‌شناسی گیاهی برای اهداف وسیعی استفاده شده است. سیگنال‌های فراطیفی نسبت به تغییرات وضعیت رشد محصول حساس هستند و می‌توانند وقوع بیماری یا استرس محصول را نشان دهند. با این حال، با توجه به اینکه وضعیت محصول می‌تواند تحت تأثیر عوامل دیگر مانند کمبود مواد مغذی قرار گیرد، تجزیه‌وتحلیل همراه با مدل‌سازی قوی برای تشخیص دقیق و به موقع بیماری یا استرس محصول حیاتی است. برای تشخیص زودهنگام بیماری ویروسی گیاهی ناشی از ویروس Grapevine vein-clearing virus (GVCV) از تصویربرداری فراطیفی و یادگیری عمیق استفاده شده است. شاخص‌های پوشش گیاهی مربوط به رنگدانه، ساختار، فیزیولوژی و محتوای آب بررسی شده‌اند (Nguyen *et al.* 2021). در یک مطالعه از یک سیستم تصویربرداری فراطیفی در آزمایشگاه و از همان سیستم در پهپاد برای تشخیص شانکر مرکبات درختان یک باغ استفاده شده است. تصویربرداری آزمایشگاهی و تکنیک مبتنی بر پهپاد آلودگی به شانکر را در مراحل مختلف رشد بیماری تشخیص دادند. ۳۱ شاخص پوشش گیاهی برای شناسایی بیماری شانکر مرکبات بر اساس کاهش کلروفیل، محتوای آب، نیتروژن، رنگدانه‌ها و آسیب سلولی برگ انتخاب شدند (Abdulridha *et al.* 2019). برای تشخیص آلودگی نماتد ریشه گرهی *Meloidogyne luci* در غده‌های سیب‌زمینی روش‌های سنجش از دور فراطیفی کاربرد داشته است (Žibrat *et al.* 2021). فناوری تصویربرداری فراطیفی مبتنی بر پهپاد برای تشخیص زنگ زرد گندم به کار برده شد. شاخص‌های پوشش گیاهی (۱۵ شاخص پوشش گیاهی مربوط به رشد محصول، رنگدانه، کلروفیل، نیتروژن، محتوای آب و ساختار سلولی داخل برگ) و ویژگی‌های بافت استخراج‌شده از تصاویر فراطیفی مبتنی بر پهپاد و ترکیب آن‌ها برای ایجاد مدل‌های پایش بیماری مبتنی بر رگرسیون حداقل مربعات جزئی ((PLSR) partial least squares regression) در دوره‌های مختلف آلودگی استفاده شدند (Guo *et al.* 2021). دانه دو رقم گندم تلقیح شده با *Fusarium graminearum*، *F. culmorum* و *F. poae* توسط تصویربرداری فراطیفی برای ارزیابی آلودگی فوزاریوم و آلودگی به مایکوتوکسین دانه و آرد

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-01-01]

[DOI: 10.61882/gebsj.13.1.1]

گندم مورد بررسی قرار گرفت. امضای طیفی دانه‌های آلوده به فوزاریوم با توجه به واریته گندم، گونه فوزاریوم و تراکم اسپور و ارتباط بین داده‌های طیفی دانه‌های آلوده و آرد مربوطه، DNA قارچی و مایکوتوکسین‌های هر یک ثبت شد. در نهایت مایکوتوکسین‌های فوزاریومی شناسایی شدند که با کمی‌سازی DNA قارچ تأیید شد (Alisaac *et al.* 2019). روشی برای تشخیص و تمایز زنگ قهوه‌ای (*Puccinia triticina*) و زنگ زرد گندم (*P. striiformis*) بر اساس تصویربرداری فراطیفی ارائه شد. آزمایش در مقیاس برگ در شرایط آزمایشگاهی کنترل شده انجام و از طیف خالص هاگ‌های زنگ استفاده شده است (Bohnenkamp *et al.* 2019). در ارزیابی شدت بیماری‌گیاهی اغلب با توجه به عوامل بیماری‌زا و علائم ایجاد شده، مقایسه‌ی محتوای مواد بیوشیمیایی، محتوای رنگدانه، محتوای آب و حتی پارامترهای ساختاری اغلب به عنوان معیارهای ارزیابی غیرمستقیم در نظر گرفته می‌شوند (Cheshkova 2022). طی پژوهشی سفیدک پودری در شش رقم جو از طریق تصویربرداری فراطیفی تا ۳۰ روز پس از تلقیح مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی شدت بیماری برای همه ارقام هر روز انجام شده است (Thomas *et al.* 2018a). شاخص‌های بافت تفاوت نرمال شده ((Normalized Difference Texture Indices (NDTIs) و شاخص‌های پوشش گیاهی بررسی شدند تا تفاوت بین گندم آلوده به سفیدک پودری و سالم را نشان دهند. سپس، از تحلیل تبعیض خطی حداقل مربعات جزئی برای تشخیص سفیدک پودری استفاده شد. علاوه بر این، یک مدل رگرسیون روی رگرسیون حداقل مربعات جزئی برای تخمین شدت بیماری مورد استفاده قرار گرفت (Khan *et al.* 2021). از تصویربرداری فراطیفی برای تشخیص زودهنگام بیماری ناشی از *Sclerotinia sclerotiorum* در گیاه گوجه‌فرنگی استفاده شده است (Zhou *et al.* 2022). یکی از کاربردهای مهم تصویربرداری فراطیفی در کشاورزی، نظارت بر شرایط محصول از طریق بررسی خواص بیوشیمیایی و بیوفیزیکی محصول مانند محتوای آب، محتوای کلروفیل، محتوای نیتروژن و لیگنین، رنگدانه کاروتنوئیدی، تنش زیستی گیاهی، رطوبت گیاه، تنوع در رنگدانه‌های برگ، تشخیص تغییرات پوشش گیاهی، درصد سبز محصولات است (Taghinezhad *et al.* 2023). همچنین ارزیابی وضعیت مواد مغذی محصول و ارائه توصیه‌هایی در مورد مدیریت منابع با توجه به نیازهای محصول ضروری است. به عنوان مثال، محتوای کلروفیل برگ یک ویژگی بیوشیمیایی ضروری است که بر ظرفیت فتوسنتزی پوشش گیاهی و کنترل بهره‌وری محصول تأثیر می‌گذارد (Jarmer 2013). از تصاویر فراطیفی برای بررسی تأثیر دامنه‌های مختلف تابش UV بر غلظت رنگدانه آنتوسیانین، کلروفیل و کاروتنوئید در برگ گیاه و ویژگی‌های بازتابی برگ و ارائه یک ارزیابی کلی از تاثیر پرتوهای فرابنفش بر وضعیت تنش در گیاهان مورد مطالعه استفاده شد (Proshkin *et al.* 2021). داده‌های فراطیفی برای تعیین کمیت غلظت نیتروژن تاج پوش نیشکر و درصد بقایای گیاهی محصول مورد استفاده قرار گرفته است (Wang *et al.* 2023; Miphokasap and Wannasiri 2018). همچنین، برای تخمین عملکرد محصول و زیست‌توده تصویربرداری فراطیفی به کار برده شده است (Li *et al.* 2022). وضعیت آب در یک تاکستان تجاری با استفاده از داده‌های فراطیفی مبتنی بر پهپاد مورد ارزیابی قرار گرفت و طول موج‌های حساس به محتوای آب تاج‌پوش تعیین شده‌اند (Izzo *et al.* 2019). تصاویر فراطیفی علاوه بر موارد ذکر شده، برای تمایز انواع محصولات، شناسایی مراحل رشد گیاه، طبقه‌بندی و شناسایی علف‌های هرز استفاده شده است. پوشش‌های مختلف زمین کشاورزی یا انواع محصولات دارای ویژگی‌های طیفی متفاوتی هستند. از این رو، تصاویر فراطیفی می‌توانند این ویژگی‌ها را طبقه‌بندی کنند (Lu *et al.* 2020). تصویربرداری فراطیفی برای تمایز ارقام، مراحل رشد و شناسایی اندام‌های گیاهی کنف استفاده شد (Lu *et al.* 2022). برای تصاویر فراطیفی مبتنی بر پهپاد، رویکردهای مبتنی بر سوپرپیکسل چند مقیاسی جهت طبقه‌بندی دقیق محصولات کاربرد داشته است (Tian *et al.* 2022). برای طبقه‌بندی انواع محصول و تمایز هویج و سه گونه علف هرز در مزرعه از تصاویر فراطیفی هوابرد استفاده شده است (Liu *et al.* 2019). طی پژوهشی برای طبقه‌بندی علف‌های هرز مقاوم به علف‌کش در مزارع مختلف زراعی (مانند جو، ذرت و نخود) تصاویر فراطیفی زمینی و مبتنی بر پهپاد و الگوریتم یادگیری ماشین شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفته است (Scherrer *et al.* 2019). مقاومت پنج ژنوتیپ مختلف چغندرقند آلوده به لکه برگی *Cercospora* را مورد ارزیابی قرار گرفت. ضایعات لکه برگی سرکوسپورا با روش‌های کمی و کیفی کلاسیک در ترکیب با تصویربرداری فراطیفی آزمایشگاهی ارزیابی شد. مشخص شد که ویژگی‌های طیفی مناطق برگ آسیب‌دیده به تراکم اسپورهای پاتوژن در سطح و توزیع فضایی آن‌ها بستگی دارد. بر این اساس، تعداد کنیدی‌ها در سطح برگ بیمار روی گیاه مقاوم کمتر بود. ارزیابی فنوتیپ‌های

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-01-01]

[DOI: 10.61882/gebsj.13.1.1]

بیماری با تصویربرداری فراطیفی با توجه به هاگ‌زایی ممکن است روش مناسبی برای شناسایی تفاوت‌های ظریف ژنوتیپ‌ها در مقاومت به بیماری باشد (Leucker *et al.* 2016). ویژگی‌های خاک کشاورزی، از جمله رطوبت خاک، مواد آلی خاک، شوری و زبری خاک، عوامل مهمی هستند که بر رشد محصول و تولید نهایی تأثیر می‌گذارند (Shoshany *et al.* 2013). محتوای رطوبت خاک توسط تصویربرداری فراطیفی برای انواع خاک مخلوط با ترکیب برخی از فن‌آوری‌های پردازش طیفی و آنالیز مؤلفه اصلی (PCA) بررسی شد. طیف‌های اولیه توسط Wavelet Packet Transform (WPT)، دیفرانسیل مرتبه اول ((First-Order Differential (FOD)) و تجزیه هارمونیک ((HD) Harmonic Decomposition) به طور متوالی پردازش شدند و سپس از PCA برای کاهش ابعاد استفاده شد. بر این اساس، سه مدل رگرسیون، رگرسیون مؤلفه اصلی (PCR)، رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) و شبکه عصبی پس از انتشار ((Back Propagation (BP)) برای مقایسه توانایی پیش‌بینی محتوای رطوبت خاک پارامترهای مختلف استفاده شده است (Jiang *et al.* 2022). کربن آلی خاک یک جزء مهم در حاصلخیزی خاک است که رشد و عملکرد محصولات را به شدت کنترل می‌کند. با استفاده از تصویربرداری فراطیفی هوابرد و حسگرهای غیرتصویربرداری اندازه ذرات و مواد آلی خاک در لایه سطحی خاک‌های گرمسیری ارزیابی شده‌اند و رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) برای بررسی خاک رس، سیلت، ماسه و مواد آلی خاک استفاده شده است (Nanni *et al.* 2021). داده‌های طیفی به‌دست‌آمده از سیستم‌های تصویربرداری فراطیفی آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل شیمی‌سنجی برای پیش‌بینی بخش‌های ماده آلی خاک، کربن کل، کربن معدنی و کربن آلی در جنگل مورد استفاده قرار گرفته‌اند (O'rourke and Holden 2012). طی پژوهشی داده‌های فراطیفی و طیف‌سنجی میدانی برای تخمین غلظت مس خاک مزرعه به کار برده شده‌اند. طیف بازتاب خاک‌ها برای مدل‌سازی رابطه بین غلظت مس در خاک و داده‌های بازتابی بازتاب مادون قرمز موج کوتاه مرئی اندازه‌گیری شد. شاخص طیفی نسبت به محتوای مس در خاک حساس بود و پیش‌بینی با استفاده از رگرسیون حداقل مربعات جزئی انجام شده است. نتایج نشان داد که استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای نقشه‌برداری کمی ناهنجاری مس خاک با شاخص طیفی ساده امکان‌پذیر است (Yin *et al.* 2021). از تصویربرداری فراطیفی هوابرد برای تعیین محتوای نیتروژن خاک و تهیه نقشه نیتروژن خاک بر اساس پیکسل استفاده کردند و کاربرد رگرسیون حداقل مربعات جزئی به عنوان یک روش مفید برای پیش‌بینی ویژگی‌های خاک در تصاویر فراطیفی مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس مدل توسعه‌یافته برای تعیین مقدار نیتروژن کل پیش‌بینی‌شده خاک در تصویر فراطیفی استفاده شد (Pechanec *et al.* 2021). محتوای پتاسیم موجود در خاک دارچین با استفاده از فناوری تصویربرداری فراطیفی مادون قرمز نزدیک بررسی شد (Wen-jun *et al.* 2019). مجموعه‌ای از تصاویر گرفته شده در طول سه سال مورد بررسی قرار گرفت که به صورت رادیومتری ارجاع داده شده بود و امکان مقایسه کمی تغییرات در سلامت پوشش گیاهی و استفاده از زمین را فراهم می‌کرد. این ناهنجاری‌های موضعی به عنوان یک پروکسی برای تشخیص نشت CO2 استفاده شد (McCann *et al.* 2017). برخلاف عملکرد فوق‌العاده، در چند دهه گذشته تصویربرداری فراطیفی به دلیل تغییر بیماری در طول زمان، تشابه بیماری‌ها، هزینه بالای سنسورها و موانع قانونی مانند مجوز پرواز از یک مقام هوانوردی برای تصویربرداری، چالش‌های فنی مختلف و داده‌های زیاد نسبتاً کمتر در کشاورزی استفاده شده است. بیشتر مطالعات در شرایط کنترل شده انجام شده است. شرایط روشنایی در میدان بسیار متفاوت از شرایط آزمایشگاهی است. با این حال، تغییرات در شدت روشنایی، جهت‌گیری خورشید یا حسگر، و یا بازتاب خاک پس‌زمینه، بازیابی اطلاعات با کیفیت را مختل می‌کند. سیستم‌های فراطیفی هوابرد و ماهواره‌ای بر تاج‌پوش نظارت دارند و در این صورت بیماری‌هایی که از بخش‌های پایینی گیاه شروع می‌شوند، ممکن است نادیده گرفته شوند. برای منطقه‌ای که فاقد اطلاعات مربوطه است، دستیابی به یک نتیجه قابل اعتماد و دقیق چالش برانگیز است. بسیاری از پاتوژن‌ها و همچنین عوامل استرس‌زای غیرزنده، علائم مشابهی دارند و در نتیجه دارای ویژگی طیفی مشابهی هستند. همچنین در شرایط مزرعه که در آن چندین عامل استرس‌زای محصول ممکن است به طور همزمان رخ دهند تشخیص دقیق یک بیماری خاص مشکل است . برهمکنش پاتوژن و گیاه و تغییراتی که به واسطه ی وجود یک نوع پاتوژن در بیوشیمی و ساختار گیاه اتفاق می‌افتد، باید به خوبی مشخص و تعریف شود تا تجزیه و تحلیل داده‌ها را آسان کند.

نتیجه‌گیری:

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-01-01]

[DOI: 10.61882/gebsj.13.1.1]

نظارت بر سلامت گیاه و تشخیص بیماری‌های گیاهی برای کشاورزی پایدار حیاتی است. روش‌های مختلفی برای تشخیص بیماری‌ها وجود دارد، یکی از روش‌های سریع، کارآمد و قابل‌اعتماد برای تشخیص و شناسایی بیماری‌های گیاهی، استفاده از سنسورهای فراطیفی است. تصویربرداری فراطیفی به دلیل جمع‌آوری حجم زیادی از داده‌های طیفی و دریافت بازتاب طیفی از گیاه، پتانسیل زیادی برای کاربرد در بیماری‌شناسی گیاهی دارد. به لطف هوش مصنوعی به‌خصوص الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین تجزیه و تحلیل داده‌های فراطیفی آسان‌تر شده است. تجزیه و تحلیل طیف بازتاب ویژگی‌های بیوفیزیکی و بیوشیمیایی بافت گیاهی امکان طبقه‌بندی گیاهان سالم و بیمار، ارزیابی شدت بیماری و شناسایی تنش‌های زیستی را در مراحل قبل از ظهور علائم بیماری ممکن می‌سازد.

References

منابع

Abdulridha, J., Ampatzidis, Y., Kakarla, S.C., & Roberts, P. (2020). Detection of target spot and bacterial spot diseases in tomato using UAV-based and benchtop-based hyperspectral imaging techniques. Precision Agriculture, 21 (5), 955-978.

Abdulridha, J., Batuman, O., & Ampatzidis, Y. (2019). UAV-based remote sensing technique to detect citrus canker disease utilizing hyperspectral imaging and machine learning. Remote Sensing, 11 (11), 1373.

Alisaac, E., Behmann, J., Rathgeb, A., Karlovsky, P., Dehne, H.-W., & Mahlein, A.-K. (2019). Assessment of Fusarium infection and mycotoxin contamination of wheat kernels and flour using hyperspectral imaging. Toxins, 11 (10), 556.

Arjoune, Y., Sugunaraj, N., Peri, S., Nair, S.V., Skurdal, A., Ranganathan, P., & Johnson, B. (2022). Soybean cyst nematode detection and management: a review. Plant Methods, 18 (1), 1-39.

Ashourloo, D., Aghighi, H., Matkan, A.A., Mobasheri, M.R., & Rad, A.M. (2016). An investigation into machine learning regression techniques for the leaf rust disease detection using hyperspectral measurement. IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing, 9 (9), 4344-4351.

Astani, M., Hasheminejad, M., & Vaghefi, M. (2022). A diverse ensemble classifier for tomato disease recognition. Computers Electronics in Agriculture, 198107054.

Atherton, D., Choudhary, R., & Watson, D. Hyperspectral remote sensing for advanced detection of early blight (Alternaria solani) disease in potato (Solanum tuberosum) plants prior to visual disease symptoms. In: 2017 ASABE Annual International Meeting, 2017. American Society of Agricultural and Biological Engineers, p 1. http://dx.doi.org/10.13031/aim.201701010

Bendel, N., Backhaus, A., Kicherer, A., Köckerling, J., Maixner, M., Jarausch, B., Biancu, S., Klück, H.-C., Seiffert, U., Voegele, R.T., & Töpfer, R. (2020). Detection of Two Different Grapevine Yellows in Vitis vinifera Using Hyperspectral Imaging. Remote Sensing, 12 (24), 4151.

Bohnenkamp, D., Kuska, M., Mahlein, A.K., & Behmann, J. (2019). Hyperspectral signal decomposition and symptom detection of wheat rust disease at the leaf scale using pure fungal spore spectra as reference. Plant Pathology, 68 (6), 1188-1195.

Brdar, S., Panić, M., Hogeveen-van Echtelt, E., Mensink, M., Grbović, Ž., Woltering, E., & Chauhan, A. (2021). Predicting sensitivity of recently harvested tomatoes and tomato sepals to future fungal infections. Scientific Reports, 11 (1), 1-17.

Cheshkova, A. (2022). A review of hyperspectral image analysis techniques for plant disease detection and identif ication. Vavilov Journal of Genetics and Breeding, 26 (2), 202-213.

Gašparović, M. (2020) Urban growth pattern detection and analysis. In: Urban Ecology. Elsevier, pp 35-48.

Guo, A., Huang, W., Dong, Y., Ye, H., Ma, H., Liu, B., Wu, W., Ren, Y., Ruan, C., & Geng, Y. (2021). Wheat yellow rust detection using UAV-based hyperspectral technology. Remote Sensing, 13 (1), 123.

Guo, L., Zhang, H., Shi, T., Chen, Y., Jiang, Q., & Linderman, M. (2019). Prediction of soil organic carbon stock by laboratory spectral data and airborne hyperspectral images. Geoderma, 33732-41.

Ha, J.G., Moon, H., Kwak, J.T., Hassan, S.I., Dang, M., Lee, O.N., & Park, H.Y. (2017). Deep convolutional neural network for classifying Fusarium wilt of radish from unmanned aerial vehicles. Journal of Applied Remote Sensing, 11 (4), 042621-042621.

Halicek, M., Fabelo, H., Ortega, S., Callico, G.M., & Fei, B. (2019). In-vivo and ex-vivo tissue analysis through hyperspectral imaging techniques: revealing the invisible features of cancer. Cancers, 11 (6), 756.

Hruska, R., Mitchell, J., Anderson, M., & Glenn, N.F. (2012). Radiometric and Geometric Analysis of Hyperspectral Imagery Acquired from an Unmanned Aerial Vehicle. Remote Sensing, 4 (9), 2736-2752.

Hu, Y., Chang, J., Li, Y., Zhang, W., Lai, X., & Mu, Q. (2023). High Zoom Ratio Foveated Snapshot

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-01-01]

[DOI: 10.61882/gebsj.13.1.1]

Hyperspectral Imaging for Fruit Pest Monitoring. Journal of Spectroscopy, 2023.

Huang, Y., Feng, G., Tewolde, H., & Shankle, M.W. (2023). Remote Sensing from Different Sources for Crop Growth Monitoring in the Area of the Lower Northern Mississippi. Challenges, 14 (1), 12.

Izzo, R.R., Lakso, A.N., Marcellus, E.D., Bauch, T.D., Raqueño, N.G., & van Aardt, J. An initial analysis of real-time sUAS-based detection of grapevine water status in the Finger Lakes Wine Country of Upstate New York. In: Autonomous Air and Ground Sensing Systems for Agricultural Optimization and Phenotyping IV, 2019. SPIE, pp 276-293.

Jang, G., Kim, J., Yu, J.-K., Kim, H.-J., Kim, Y., Kim, D.-W., Kim, K.-H., Lee, C.W., & Chung, Y.S. (2020). Cost-effective unmanned aerial vehicle (UAV) platform for field plant breeding application. Remote Sensing, 12 (6), 998.

Jarmer, T. (2013). Spectroscopy and hyperspectral imagery for monitoring summer barley. International journal of remote sensing, 34 (17), 6067-6078.

Jiang, X., Luo, S., Ye, Q., Li, X., & Jiao, W. (2022). Hyperspectral Estimates of Soil Moisture Content Incorporating Harmonic Indicators and Machine Learning. Agriculture, 12 (8), 1188.

Khan, I.H., Liu, H., Li, W., Cao, A., Wang, X., Liu, H., Cheng, T., Tian, Y., Zhu, Y., & Cao, W. (2021). Early detection of powdery mildew disease and accurate quantification of its severity using hyperspectral images in wheat. Remote Sensing, 13 (18), 3612.

Kuska, M.T., Heim, R.H., Geedicke, I., Gold, K.M., Brugger, A., & Paulus, S. (2022). Digital plant pathology: a foundation and guide to modern agriculture. Journal of Plant Diseases and Protection, 129 (3), 457-468.

Leucker, M., Mahlein, A.-K., Steiner, U., & Oerke, E.-C. (2016). Improvement of lesion phenotyping in Cercospora beticola-sugar beet interaction by hyperspectral imaging. Phytopathology, 106 (2), 177-184.

Li, K.-Y., Sampaio de Lima, R., Burnside, N.G., Vahtmäe, E., Kutser, T., Sepp, K., Cabral Pinheiro, V.H., Yang, M.-D., Vain, A., & Sepp, K. (2022). Toward automated machine learning-based hyperspectral image analysis in crop yield and biomass estimation. Remote Sensing, 14 (5), 1114.

Li, X., Chen, K., & He, Y. (2020). In situ and non-destructive detection of the lipid concentration of Scenedesmus obliquus using hyperspectral imaging technique. Algal Research, 45101680.

Liakos, K.G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine Learning in Agriculture: A Review. Sensors, 18 (8), 2674.

Liu, B., Li, R., Li, H., You, G., Yan, S., & Tong, Q. (2019). Crop/Weed Discrimination Using a Field Imaging Spectrometer System. Sensors, 19 (23), 5154.

Lu, B., Dao, P.D., Liu, J., He, Y., & Shang, J. (2020). Recent advances of hyperspectral imaging technology and applications in agriculture. Remote Sensing, 12 (16), 2659.

Lu, Y., Young, S., Linder, E., Whipker, B., & Suchoff, D. (2022). Hyperspectral imaging with machine learning to differentiate cultivars, growth stages, flowers, and leaves of industrial hemp (Cannabis sativa L.). Frontiers in Plant Science, 123392.

Mahlein, A.-K., Alisaac, E., Al Masri, A., Behmann, J., Dehne, H.-W., & Oerke, E.-C. (2019). Comparison and combination of thermal, fluorescence, and hyperspectral imaging for monitoring fusarium head blight of wheat on spikelet scale. Sensors, 19 (10), 2281.

Mahlein, A.-K., Kuska, M.T., Behmann, J., Polder, G., & Walter, A. (2018). Hyperspectral sensors and imaging technologies in phytopathology: state of the art. Annual review of phytopathology, 56535-558.

Mahlein, A.-K., Steiner, U., Dehne, H.-W., & Oerke, E.-C. (2010). Spectral signatures of sugar beet leaves for the detection and differentiation of diseases. Precision Agriculture, 11 (4), 413-431.

McCann, C., Repasky, K.S., Lawrence, R., & Powell, S. (2017). Multi-temporal mesoscale hyperspectral data of mixed agricultural and grassland regions for anomaly detection. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 131121-133.

Miphokasap, P., & Wannasiri, W. (2018). Estimations of Nitrogen Concentration in Sugarcane Using Hyperspectral Imagery. Sustainability, 10 (4), 1266.

Mishra, P., Asaari, M.S.M., Herrero-Langreo, A., Lohumi, S., Diezma, B., & Scheunders, P. (2017). Close range hyperspectral imaging of plants: A review. Biosystems Engineering, 16449-67.

Mishra, P., Lohumi, S., Khan, H.A., & Nordon, A .(2020). Close-range hyperspectral imaging of whole plants for digital phenotyping: Recent applications and illumination correction approaches. Computers and Electronics in Agriculture, 178105780.

Nanni, M.R., Demattê, J.A.M., Rodrigues, M., Santos, G.L.A.A.d., Reis, A.S., Oliveira, K.M.d., Cezar, E., Furlanetto, R.H., Crusiol, L.G.T., & Sun, L. (2021). Mapping Particle Size and Soil Organic Matter in Tropical Soil Based on Hyperspectral Imaging and Non-Imaging Sensors. Remote Sensing, 13 (9), 1782.

Nguyen, C., Sagan, V., Maimaitiyiming, M., Maimaitijiang, M., Bhadra, S., & Kwasniewski, M.T. (2021). Early Detection of Plant Viral Disease Using Hyperspectral Imaging and Deep Learning. Sensors, 21 (3).

O'rourke, S., & Holden, N. (2012). Determination of soil organic matter and carbon fractions in forest top soils using spectral data acquired from visible-near infrared hyperspectral images. Soil Science Society of America Journal 76 (2), 586-596.

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-01-01]
[DOI: 10.61882/gebsj.13.1.1]

Pechanec, V., Mráz, A., Rozkošný, L., & Vyvlečka, P. (2021). Usage of airborne hyperspectral imaging data for identifying spatial variability of soil nitrogen content. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10 (6), 355.

Polder, G., Blok, P.M., De Villiers, H.A., Van der Wolf, J.M., & Kamp, J. (2019). Potato virus Y detection in seed potatoes using deep learning on hyperspectral images. Frontiers in Plant Science, 10209.

Proshkin, Y.A., Smirnov, A.A., Semenova, N.A., Dorokhov, A.S., Burynin, D.A., Ivanitskikh, A.S., & Panchenko, V.A. (2021). Assessment of ultraviolet impact on main pigment content in purple basil (Ocimum basilicum L.) by the spectrometric method and hyperspectral images analysis. Applied Sciences, 11 (19), 8804.

Scherrer, B., Sheppard, J., Jha, P., & Shaw, J.A. (2019). Hyperspectral imaging and neural networks to classify herbicide-resistant weeds. Journal of Applied Remote Sensing, 13(4), 044516.

Shoshany, M., Goldshleger, N., & Chudnovsky, A. (2013). Monitoring of agricultural soil degradation by remote-sensing methods: A review. International Journal of Remote Sensing, 34 (17), 6152-6181.

Taghinezhad, E., Szumny, A., & Figiel, A. (2023). The Application of Hyperspectral Imaging Technologies for the Prediction and Measurement of the Moisture Content of Various Agricultural Crops during the Drying Process. Molecules, 28 (7), 2930.

Thomas, S., Behmann, J., Steier, A., Kraska, T., Muller, O., Rascher, U., & Mahlein, A.-K. (2018a). Quantitative assessment of disease severity and rating of barley cultivars based on hyperspectral imaging in a non-invasive, automated phenotyping platform. Plant methods, 14 (1), 1-12.

Thomas, S., Kuska, M.T., Bohnenkamp, D., Brugger, A., Alisaac, E., Wahabzada, M., Behmann, J., & Mahlein, A.-K. (2018b). Benefits of hyperspectral imaging for plant disease detection and plant protection: a technical perspective. Journal of Plant Diseases and Protection, 1255-20.

Tian, S., Lu, Q., & Wei, L. (2022). Multiscale Superpixel-Based Fine Classification of Crops in the UAV-Based Hyperspectral Imagery. Remote Sensing, 14 (14), 3292.

Türkoğlu, M., & Hanbay, D. (2019). Plant disease and pest detection using deep learning-based features. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 27 (3), 1636-1651.

Vidal, M., & Amigo, J.M. (2012). Pre-processing of hyperspectral images. Essential steps before image analysis. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 117138-148.

Wan, L., Li, H., Li, C., Wang, A., Yang, Y., & Wang, P. (2022). Hyperspectral Sensing of Plant Diseases: Principle and Methods. Agronomy, 12 (6).

Wang, S., Guan, K., Zhang, C., Zhou, Q., Wang, S., Wu, X., Jiang, C., Peng, B., Mei, W., & Li, K. (2023). Cross-scale sensing of field-level crop residue cover: Integrating field photos, airborne hyperspectral imaging, and satellite data. Remote Sensing of Environment.

Wang, X., Zhang, Y., Ma, X., Xu, T., & Arce, G.R. (2018). Compressive spectral imaging system based on liquid crystal tunable filter. Optics express, 26 (19), 25226-25243.

Wen-jun, W., Zhi-wei, L., Can, W., De-cong, Z., & Hui-ling, D. (2019). Prediction of Available Potassium Content in Cinnamon Soil Using Hyperspectral Imaging Technology. Spectroscopy and Spectral Analysis 39 (5), 1579-1585. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)05-1579-07

Wu, D., & Sun, D.-W. (2013). Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: A review-Part I: Fundamentals. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 191-14.

Yin, F., Wu, M., Liu, L., Zhu, Y., Feng, J., Yin, D., Yin, C., & Yin, C. (2021). Predicting the abundance of copper in soil using reflectance spectroscopy and GF5 hyperspectral imagery. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 102102420.

Yuan, L., Yan, P., Han, W., Huang, Y., Wang, B., Zhang, J., Zhang, H., & Bao, Z. (2019). Detection of anthracnose in tea plants based on hyperspectral imaging. Computers and Electronics in Agriculture, 167105039.

Zhao, H., Yang, C., Guo, W., Zhang, L., & Zhang, D. (2020). Automatic estimation of crop disease severity levels based on vegetation index normalization. Remote Sensing, 12 (12), 1930.

Zhou, Y., Chen, J., Ma, J., Han, X., Chen, B., Li, G., Xiong, Z., & Huang, F. (2022). Early warning and diagnostic visualization of Sclerotinia infected tomato based on hyperspectral imaging. Scientific Reports, 12 (1), 21140.

Zhu, H., Chu, B., Zhang, C., Liu, F., Jiang, L., & He, Y. (2017). Hyperspectral imaging for presymptomatic detection of tobacco disease with successive projections algorithm and machine-learning classifiers. Scientific Reports, 7 (1), 1-12.

Žibrat, U., Gerič Stare, B., Knapič, M., Susič, N., Lapajne, J., & Širca, S. (2021). Detection of root-knot nematode Meloidogyne luci infestation of potato tubers using hyperspectral remote sensing and real-time PCR molecular methods. Remote Sensing, 13 (10), 1996.

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-01-01]

[DOI: 10.61882/gebsj.13.1.1]