



19th Iranian Soil Science Congress
02-04 December, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذر ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



طیف‌سنجی در علوم خاک از ماهواره تا کشاورزی دقیق

حمیدرضا متین‌فر^{۱*}

۱- استاد گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه لرستان، ایران*

پست الکترونیکی نویسنده مسئول مقاله E-mail: Matinfar.h@lu.ac.ir

چکیده

طیف‌سنجی به عنوان یکی از بنیادی‌ترین روش‌های سنجش از دور، امکان بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را از فاصله‌های مختلف (زمینی، هوایی و فضایی) فراهم کرده است. این فناوری که بر اساس اندازه‌گیری انرژی بازتابی و منتشر شده از سطح خاک در طول موج‌های مختلف استوار است، به ابزاری مؤثر برای ارزیابی خصوصیات خاکها، کیفیت خاک، پایش تغییرات زمانی مکانی خاکها، و همچنین مدیریت هوشمند مزارع در چارچوب کشاورزی دقیق تبدیل شده است. از زمان پرتاب نخستین ماهواره لندست-۱ در سال ۱۹۷۲ تا مأموریت‌های اخیر مانند EnMAP و PRISMA، داده‌های طیفی با قدرت تفکیک بالا، پژوهش در علوم خاک را دگرگون کرده‌اند. این مقاله به بررسی تاریخی، نظری و کاربردی طیف‌سنجی در علوم خاک می‌پردازد، دامنه‌های طیفی مؤثر بر خصوصیات خاک را تشریح می‌کند، و شاخص‌های متداول طیفی را معرفی می‌نماید. همچنین روند رشد مقالات علمی در این حوزه از ۱۹۷۲ تا ۲۰۲۵ بر اساس داده‌های Scopus و Web of Science مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که طیف‌سنجی در ترکیب با هوش مصنوعی و سامانه‌های سنجش از دور می‌تواند با کاهش هزینه‌ها و صرفه جویی در وقت می‌تواند در شناسایی، نقشه برداری و مدیریت منابع خاک کشور، شروع کشاورزی دقیق در توسعه کشاورزی پایدار و مدیریت دقیق منابع خاک ایفا کند.

واژگان کلیدی: سنجش از دور، طیف‌سنجی خاک، شاخص طیفی، کشاورزی دقیق

با رشد جمعیت جهانی و فشار بر منابع کشاورزی، نیاز به فناوری‌هایی برای پایش دقیق منابع خاک بیش از پیش احساس می‌شود. روش‌های سنتی آزمایشگاهی محدودیت‌هایی از نظر زمان، دارند. در مقابل، طیف‌سنجی و سنجش از دور، ابزارهایی سریع، گسترده و غیرمخرب برای بررسی خاک هستند که در کشاورزی دقیق کاربرد فراوان دارند (Ahmadi et al., 2021). شناخت خاک و ویژگی‌های آن، اساس مدیریت پایدار منابع طبیعی و کشاورزی است. روش‌های سنتی مطالعات منابع خاک متکی بر نظرات کارشناسی، مطالعات میدانی، نمونه‌برداری میدانی و تحلیل آزمایشگاهی‌اند که پرهزینه، زمان‌بر و محدود به نقاط خاص و متکی بر نظرات فرد مطالعه کننده هستند. در دهه‌های اخیر، طیف‌سنجی بازتابی (Reflectance Spectroscopy) به‌عنوان روشی سریع، غیرمخرب و کم‌هزینه برای ارزیابی ویژگی‌های خاک معرفی شده است. در واقع، هر نوع خاک دارای یک نشانه یا امضای طیفی (Spectral Signature) خاص است که بازتاب آن را در طول موج‌های مختلف مشخص می‌کند. این بازتاب‌ها تحت تأثیر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک قرار دارند (Ben-Dor & Banin, 1995). تفاوت در بازتاب‌ها و رفتارهای طیفی خاکها ابزار کلیدی در شناسایی خصوصیات خاک است. با توسعه فناوری سنجش از دور، امکان به‌کارگیری این تفاوتها و رفتارهای طیفی در در مقیاس‌های وسیع فراهم شد. اکنون داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی و طیفی و رادیومتریک بالا می‌توانند نقشه‌های پیوسته از ویژگی‌های خاک تولید کنند، این نقشه‌ها می‌توانند زیر بنای توزیع نرخ متغیر نهاده‌ها در مزارع باشند.

نتایج و بحث

تاریخچه سنجش از دور و طیف‌سنجی خاک

تحول در علم سنجش از دور خاک با پرتاب نخستین ماهواره Landsat-1 در سال ۱۹۷۲ آغاز شد. این ماهواره مجهز به حسگر MSS بود که چهار باند طیفی در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک داشت. داده‌های آن نخستین بار برای شناسایی الگوهای کاربری زمین و پوشش گیاهی به کار رفت، اما بعدها نشان داده شد که تفاوت بازتاب خاک‌ها نیز قابل تشخیص است. در دهه ۱۹۸۰، با پرتاب SPOT-1 (فرانسه)، امکان تفکیک مکانی بالاتر (۲۰ متر) فراهم شد. دهه ۱۹۹۰ نقطه عطفی در ورود داده‌های فراطیفی (Hyperspectral) بود. حسگر Hyperion در سال ۱۹۹۹ بر روی ماهواره EO-1 قرار گرفت و بیش از ۲۲۰ باند طیفی با قدرت تفکیک ۱۰ نانومتر ثبت می‌کرد (Clark, 1999). در دهه ۲۰۱۰، مأموریت‌هایی مانند Sentinel-2 (ESA) و PRISMA (ASI) گسترش یافتند و داده‌های طیفی باکیفیت در اختیار پژوهشگران علوم خاک قرار دادند. در سال ۲۰۲۵، ماهواره آلمانی EnMAP آغاز به کار کرد که طیف‌سنجی دقیق خاک در مقیاس جهانی را ممکن ساخت (ESA, 2023).

جدول ۱- تاریخچه دور سنجی

| سال / دهه | رخداد / مأموریت کلیدی | توضیح / ویژگی مهم | داده آماری / عددی مرتبط |
|-----------------|---|--|---|
| 1859 | ثبت عکس مایل از زمین از هواپیمای اولین عکس هواپالنی (Nadar) | کوچک / بالن | Geo Informatie (آغاز «مشاهده از دور» بصری) |
| 1957 | اولین ماهواره مصنوعی زمین پرتاب اسپوتنیک ۱ | | U.S. Geological Survey (نقطه شروع عصر فضایی) |
| 1960 | TIROS-1 | نخستین ماهواره زمین‌شناسی/آب و هوایی | Geographic Book (آغاز رصد زمینی ماهواره‌ای) |
| 1972 | Landsat 1 | اولین ماهواره منابع زمینی (Earth Resources Technology Satellite) | نقطه عطف در سنجش از دور عملیاتی (Research Guides) |
| 1978 | Seasat | نخستین ماهواره سنجش اقیانوس با حسگر راداری و سایر سنجنده‌ها | EO ورود سنجنده فعال (رادار) به حوزه (Wikipedia) |
| 1991 | ERS-1 | اولین ماهواره اروپایی سنجش از دور | آغاز نقش مهم اروپا در سنجش از دور (Wikipedia) |
| 1988 | IRS-1A (هند) | اولین ماهواره سنجش از دور بومی هند | ایران و کشورهای در حال توسعه وارد عرصه شدند (Wikipedia) |
| 1990s – 2000s | رشد مأموریت‌های EO متعدد | SPOT, Landsat ماهواره‌هایی مانند های بعدی، سنجنده‌های متعدد | بیش از صدها ماهواره مشاهده زمین در این دوره (David Wallin's Faculty Page) |
| 2008 | بیش از ۱۵۰ ماهواره EO در مدار | سنجش از دور گسترده و متنوع | EO آمار مأموریت فعال (David Wallin's Faculty Page) |
| 2021 | بیش از ۹۵۰ ماهواره EO | انفجار مأموریت‌های کوچک و تجاری | سهم بزرگ شرکت‌های خصوصی (Wikipedia) |
| حال حاضر (2023) | ماهواره ~1,190 فعال EO | تعداد ماهواره‌های زمینی فعال | و پایگاه تحلیل‌ها UCS گزارش (pixalytics.com) |
| حال حاضر | بیش از ۱۱,۰۰۰ ماهواره کل فعال | (و غیره EO تله‌کام،) همه کاربردها | برآورد کلی تعداد ماهواره‌ها (pixalytics.com) |

دانش سنجنش از دور

سنجنش از دور علم و هنر کسب اطلاعات از پدیده‌ها و اجسام زمینی بدون تماس مستقیم با آن‌ها می‌باشد. دانش سنجنش از دور شامل مشاهدات هوایی، فضایی است و روشی است که به شناسایی و اندازه‌گیری انرژی الکترومغناطیسی که شامل تابش در محدوده مرئی و غیرمرئی و برخورد آن با سطح اجسام است محدود می‌شود. فناوری سنجنش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی به استفاده وسیع مدیران در برنامه‌ریزی مؤثر راجع به منابع طبیعی در سطح کشور، استانی و ناحیه ای رسیده است. کاربرد این فناوری در مدیریت منابع خاک به دلیل پیشرفت‌های بزرگی که در زمینه ماهواره‌های فضایی و هوایی و قدرت تفکیک مکانی، زمانی، طیفی و رادیومتریکی آن‌ها حاصل شده است به شدت در حال افزایش است (Jensen, 1996).

دسته‌بندی سنجنده‌ها از دیدگاه منبع انرژی

۱- سنجنده‌های فعال (Active Sensors)

سنجنده‌های راداری (Radar Sensors)

نوع: سنجنده‌های فعال

ویژگی‌ها:

- استفاده از امواج میکروویو
- تصویربرداری در هر شرایط آب‌وهوایی و زمانی
- توانایی نفوذ به پوشش گیاهی یا سطح خاک

نمونه‌ها: Sentinel-1، SAR، RADARSAT، TerraSAR-X، (ESA, 2023 – Sentinel-1 Technical Guide).

مزایا:

- عملکرد در شب و شرایط ابری
- مستقل از نور خورشید

کاربردها: پایش تغییرات سطح زمین، بررسی رطوبت خاک، نقشه‌برداری توپوگرافی، پایش یخچال‌ها

۲- سنجنده‌های غیرفعال (Passive Sensors)

سنجنده‌های اپتیکی (Optical Sensors)

تعریف: از نور مرئی و مادون قرمز نزدیک برای تصویربرداری استفاده می‌کنند.

نمونه‌ها: Landsat OLI، Sentinel-2 MSI، PlanetScope

محدودیت: وابسته به نور خورشید، عملکرد ضعیف در شب یا هوای ابری

کاربردها: نقشه‌برداری، پایش جنگل، کشاورزی، مدیریت منابع آب

نمونه‌ها: سنجنده‌های اپتیکی مانند OLI در ماهواره Landsat 8 که توسط USGS مدیریت می‌شود.

مزایا:

- تصاویر با کیفیت بالا در نور روز
- مناسب برای تحلیل پوشش گیاهی و منابع طبیعی

محدودیت: عملکرد ضعیف در شب یا هوای ابری

انواع سنجنده‌ها از دیدگاه دامنه طیفی

۱- سنجنده‌های چندطیفی (Multispectral Sensors)

ویژگی: ثبت داده‌ها در چند باند طیفی مشخص (معمولاً ۳ تا ۱۰ باند)
 نمونه‌ها Sentinel-2 MSI: که اطلاعات طیفی با وضوح بالا در باندهای مرئی و مادون قرمز فراهم می‌کند.

کاربردها: کشاورزی، منابع طبیعی، پایش پوشش گیاهی، بررسی کیفیت آب

۲- سنجنده‌های ابرطیفی (Hyperspectral Sensors)

ویژگی: ثبت داده‌ها در صدها باند باریک طیفی (با تفکیک طیفی بالا)

نمونه‌ها:

○ Hyperion در ماهواره EO-1 ناسا

○ PRISMA متعلق به آژانس فضایی ایتالیا

○ EnMAP متعلق به آلمان

• انواع سنجنده‌ها در سنجش از دور (فضایی و هوایی)

• سنجنده‌ها ابزارهای کلیدی در سنجش از دور هستند که برای جمع‌آوری داده‌های سطح زمین، جو، منابع آب، پوشش گیاهی و تغییرات اقلیمی به کار می‌روند. این سنجنده‌ها به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

• سنجنده‌های فضایی

• - سنجنده‌های نوری: (Optical Sensors) مانند OLI در ماهواره Landsat و MSI در Sentinel-2؛ برای تصویربرداری

در طیف مرئی و مادون قرمز نزدیک. این سنجنده‌ها برای پایش پوشش گیاهی، کاربری زمین و منابع آب کاربرد دارند.

• - سنجنده‌های حرارتی: (Thermal Sensors) مانند TIRS در Landsat؛ برای اندازه‌گیری دمای سطح زمین،

تشخیص آتش‌سوزی و بررسی رطوبت خاک.

• - سنجنده‌های راداری: (SAR) مانند سنجنده‌های Sentinel-1؛ مستقل از نور خورشید و شرایط جوی، برای پایش

ساختار زمین، رطوبت خاک و تغییرات سطحی استفاده می‌شوند.

• - سنجنده‌های فراطیفی و چندطیفی: (Hyperspectral & Multispectral) مانند Hyperion؛ برای شناسایی دقیق

ترکیبات خاک، گیاهان و آلودگی‌ها کاربرد دارند.

• سنجنده‌های هوایی

• سنجنده‌های هوایی روی هواپیماها، پهپادها یا بالن‌ها نصب می‌شوند و برای مطالعات محلی با قدرت تفکیک مکانی

بیشتر استفاده می‌شوند.

• -انواع سنجنده‌های هوایی:

• دوربین‌های RGB و چندطیفی: برای تصویربرداری دقیق از مزارع، جنگل‌ها و مناطق شهری؛ کاربرد در کشاورزی

دقیق و پایش سلامت گیاهان.

• سنجنده‌های حرارتی هوایی: برای پایش دمای سطحی در مناطق کوچک، تشخیص نشت حرارتی و مدیریت منابع

انرژی.

• سنجنده‌های لیدار (LiDAR): برای تولید مدل‌های ارتفاعی دقیق، نقشه‌برداری سه‌بعدی و مطالعات جنگل‌داری و

شهری.

• سنجنده‌های فراطیفی هوایی: برای مطالعات زمین‌شناسی، شناسایی آلودگی‌ها و تحلیل دقیق ترکیب سطحی.

• انواع پهپادها و کاربردهای آن‌ها

• پهپادها یا UAVها (Unmanned Aerial Vehicles) به عنوان ابزارهای پرنده بدون سرنشین، در سال‌های اخیر

کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های نظامی، کشاورزی، نقشه‌برداری، امداد و نجات، فیلم‌برداری و حتی تفریحی پیدا

کرده‌اند. این تنوع به دلیل طراحی‌های مختلف، قابلیت‌های پروازی و نوع مأموریت‌های مورد نظر است.

- دسته‌بندی بر اساس نوع بال
- ۱- پهپادهای بال ثابت (Fixed-Wing)
 - - طراحی مشابه هواپیما با دو بال افقی
 - - مناسب برای پروازهای طولانی با مصرف انرژی کم
 - - کاربرد: نقشه‌برداری، پایش منابع طبیعی، حمل‌ونقل هوایی
 - منبع: قاصدک ۲۴، «صفر تا صد آشنایی با انواع پهپادها»
- ۲- پهپادهای چندمخلخه (Multirotor)
 - - رایج‌ترین نوع پهپادها با قابلیت پرواز عمودی و ایستایی
 - - مناسب برای فیلم‌برداری، کشاورزی، بازرسی سازه‌ها
 - منبع: سپهر UAV، بررسی انواع پهپادها و کاربردهای شگفت‌انگیز
- ۳- پهپادهای بال متحرک یا ترکیبی (Hybrid VTOL)
 - - ترکیبی از بال ثابت و چندمخلخه
 - - قابلیت پرواز عمودی و افقی
 - - کاربرد در مناطق صعب‌العبور و عملیات امداد و نجات

طیف الکترومغناطیس و خصوصیات خاک

طیف الکترومغناطیس شامل گستره‌ای از طول موج‌هاست که از پرتوهای گاما تا امواج رادیویی را در بر می‌گیرد. در مطالعات خاک، معمولاً از بخش‌های مرئی (VIS)، مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز میانی (MIR) استفاده می‌شود.

۱. رفتار طیفی خاک‌ها در محدوده مرئی (VIS: 0.4–0.7 μm)

ویژگی‌های کلیدی

- این ناحیه عمدتاً تحت تأثیر رنگ، مقدار ماده آلی، و محتوای اکسیدهای آهن در خاک است.
- بازتاب طیفی در این محدوده معمولاً پایین تا متوسط (۵–۴۰٪) است.

عوامل مؤثر

۱. اکسیدهای آهن: (Fe_2O_3 , FeOOH)

- ایجاد پیک‌های جذبی در حدود (0.45 μm آبی و) (0.55 μm سبز).
- هرچه میزان آهن بیشتر باشد، خاک رنگ قرمزتر یا زردتر و بازتاب کلی کمتر است.

۲. ماده آلی: (Organic matter)

- باعث کاهش بازتاب در تمام محدوده مرئی می‌شود.
- خاک‌های غنی از مواد آلی تیره‌تر هستند و منحنی طیفی صاف‌تر است.

۳. رطوبت سطحی:

- آب، جذب‌کننده قوی در طول موج‌های مرئی و نزدیک به مادون قرمز است؛ بنابراین افزایش رطوبت باعث افت بازتاب می‌شود.

۲. رفتار طیفی در محدوده مادون قرمز نزدیک و میانی (NIR-MIR: 0.7–2.5 μm)
محدوده مادون قرمز نزدیک (NIR: 0.7–1.3 μm)

- در این ناحیه خاکها معمولاً افزایش بازتاب نسبت به محدوده مرئی نشان می‌دهند.
- تأثیر اصلی از ساختار دانه‌بندی، رطوبت، و زبری سطح است.
- خاک‌های خشک و زبر بازتاب بالاتر دارند.

محدوده مادون قرمز کوتاه و میانی (SWIR/MIR: 1.3–2.5 μm)

- این بخش مهم‌ترین محدوده برای شناسایی کانی‌های رسی و کربنات‌ها است.
- نوارهای جذبی شاخص:

تأثیر اندازه ذرات

- کاهش اندازه ذرات → افزایش سطح پراکندگی → افزایش بازتاب کلی
- ولی در خاک‌های ریزدانه مرطوب، افزایش پراکندگی و جذب آب می‌تواند بازتاب را کاهش دهد.

۳. رفتار طیفی در محدوده راداری (Microwave: cm wavelengths)

اصول کلی

- در طول موج‌های راداری (۱ میلی‌متر تا چند ده سانتی‌متر)، بازتاب نه از ویژگی‌های طیفی بلکه از ویژگی‌های فیزیکی و هندسی خاک تأثیر می‌پذیرد:
 - زبر بودن سطح نسبت به طول موج
 - محتوای رطوبت حجمی خاک
 - ساختار زیرسطحی و تخلخل

پارامترهای مؤثر:

۱. رطوبت خاک:

- مهم‌ترین عامل در پراکندگی بازگشتی (Backscatter).
- افزایش رطوبت موجب افزایش ثابت دی‌الکتریک و در نتیجه افزایش سیگنال بازگشتی می‌شود.

۲. زبری سطح: (Surface Roughness)

- اگر زبری سطح در مقیاس طول موج زیاد باشد → پراکندگی پخش شده (diffuse scattering) افزایش می‌یابد.

- در سطوح صاف → بازتاب آینه‌ای (specular reflection) غالب است و سیگنال برگشتی کم می‌شود.

۳. قطبش (Polarization) و زاویه دید: (Incidence angle)

- کانال‌های VV، HH، VH، HV بسته به ساختار خاک و پوشش گیاهی پاسخ متفاوتی دارند.

○ زاویه دید بیشتر → کاهش سیگنال بازگشتی (به ویژه در خاک‌های خشک).

جدول ۲- مشخصات امواج راداری

| کاربرد | عمق | نفوذ تقریبی | باند |
|------------------------------------|--------------------|-------------|------------|
| نقشه برداری و شناسایی زبری سطحی | سطحی | کم | X (3 cm) |
| بررسی رطوبت خاک | چند سانتی متر | متوسط | C (5.6 cm) |
| پایش زیرسطحی و ساختار لایه‌های خاک | تا ده‌ها سانتی متر | زیاد | L (23 cm) |

جدول ۳- بازتاب (%) در طول موج‌های مختلف

| خاک شنی | خاک رسی | گیاه سالم | طول موج (NM) |
|---------|---------|-----------|--------------|
| 10% | 8% | 12% | 500 |
| 25% | 12% | 18% | 700 |
| 45% | 15% | 22% | 900 |
| 50% | 18% | 25% | 1100 |

جدول ۴- مهم‌ترین دامنه‌های طیفی مؤثر در شناسایی خصوصیات خاک

| حسگرهای مرتبط | منشأ طیفی (فیزیکی / شیمیایی) | ویژگی‌های قابل شناسایی در خاک | محدوده طول موج (نانومتر) | دامنه طیفی |
|--------------------------------------|---|--|--------------------------|-------------------------------|
| Sentinel-2 (B2-B4), Landsat (B2-B4) | جذب نور توسط هماتوئیت، گوتیت و مواد آلی | رنگ خاک، ماده آلی، اکسیدهای آهن (Fe_2O_3 , $FeOOH$)، محتوای رس | 400-700 | مرئی (VIS) |
| Sentinel-2 (B8), Landsat (B5) | پراکندگی و جذب توسط آب و هیدروکسیل‌ها | بافت خاک، رطوبت سطحی، ماده آلی | 700-1300 | مادون قرمز نزدیک (NIR) |
| Landsat (B6), Sentinel-2 (B11) | جذب آب در ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ نانومتر | رطوبت، گچ ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)، رس‌های هیدروکسیله | 1300-1900 | مادون قرمز کوتاه موج (SWIR-1) |
| Sentinel-2 (B12), Hyperion, EnMAP | جذب‌های SO_4 ، CO_3 ، OH | کربنات‌ها، $CaCO_3$ ، گچ، رس‌ها، مواد آلی سنگین | 2000-2500 | مادون قرمز کوتاه موج (SWIR-2) |
| Landsat (B10-B11), ASTER (TIR bands) | گسیل حرارتی | ترکیب معدنی و حرارتی خاک، دمای سطح | 8000-14000 | مادون قرمز حرارتی (TIR) |

جدول ۵- کاربردهای طیف‌سنجی در علوم خاک و کشاورزی دقیق

| ردیف | حوزه کاربرد | هدف یا پارامتر قابل سنجش | دامنه طیفی مؤثر (نانومتر) | نوع طیف‌سنجی / سنجنده | توضیح علمی و کاربردی |
|------|--|---|---------------------------------|---|---|
| 1 | تشخیص و پایش رطوبت خاک (Soil Moisture) | اندازه‌گیری مستقیم یا تخمینی رطوبت سطحی و زیرسطحی | 1300– 1900 | NIR–SWIR | جذب شدید در باندهای ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ nm ناشی از مولکول‌های آب |
| 2 | تعیین ماده آلی خاک (Soil Organic Carbon) | برآورد کربن آلی کل و هوموس (SOC) | 400–2500 | VIS–NIR– SWIR | SOC خاک‌های دارای بالا بازتاب کمتر در ناحیه مرئی دارند |
| 3 | بررسی شوری خاک (Soil Salinity) | شناسایی و درجه‌بندی خاک‌های شور و سدیمی | 1400– 2200 | SWIR | حضور نمک‌ها موجب جذب در ۱۴۵۰، ۱۷۵۰، ۲۲۰۰ nm می‌شود |
| 4 | تعیین نوع و مقدار رس‌ها (Clay Minerals) | تمایز کائولینیت، اسمکتیت، ایلیت | 2200– 2350 | SWIR | در OH جذب‌های ۲۲۰۰–۲۳۰۰ nm نمایانگر نوع رس است |
| 5 | تشخیص کربنات‌ها و آهک (Carbonates) | سنجش درصد آهک و حضور کلسیت و دولومیت | 2340 | SWIR | در باند CO ₃ جذب مشخصه ۲۳۴۰ nm آهک است |
| 6 | بررسی گچ و سولفات‌ها (Gypsum, Sulfates) | تشخیص خاک‌های گچی و گوگرددار | 1750– 2250 | SWIR | باندهای جذب در ۱۷۵۰ و ۲۲۰۰ nm مشخصه است CaSO ₄ ·2H ₂ O |
| 7 | شناسایی اکسیدهای آهن (Fe ₂ O ₃ , FeOOH) | تعیین رنگ و درصد آهن فعال | 400–900 | VIS–NIR | باند جذب در ۴۸۰– ۵۵۰ nm ؛ خاک‌های قرمز و قهوه‌ای |
| 8 | بررسی ویژگی‌های فیزیکی خاک (Texture, Structure) | تخمین درصد شن، سیلت و رس از امضاهای طیفی | 700–2500 | NIR–SWIR | بازتاب تابعی از اندازه ذرات و زبری سطح است |
| 9 | پایش فرسایش و کیفیت خاک (Degradation, Quality) | بررسی تغییرات کیفیت خاک در طول زمان | 400–2500 | VIS–NIR– SWIR | ، آهن و SOC تغییر رس بر طیف اثر دارد |
| 10 | نقشه‌برداری رقومی خاک (Digital Soil Mapping) | تولید نقشه‌های خاک با داده طیفی و ML الگوریتم‌های | 400–2500 | Hyperspectral Imaging / Satellite | داده‌های طیفی ورودی مدل‌های هوش مصنوعی برای طبقه‌بندی خاک |
| 11 | پایش سلامت گیاه و تغذیه | تخمین نیتروژن، کلروفیل و وضعیت تنش گیاه | 400–900 | VIS–NIR | شاخص‌های طیفی از PRI و NDVI مثل |

| | (Crop Nutrition & Health) | | | | طیف گیاه استخراج می‌شوند |
|----|---|---|---------------|-----------------------------|--|
| 12 | پایش دقیق کشاورزی (Precision Agriculture) | ترکیب داده طیفی خاک و گیاه برای مدیریت دقیق | 400-2500 | UAV / Hyperspectral Sensors | تصمیم‌گیری بهینه در کوددهی، آبیاری و مدیریت مزرعه |
| 13 | تشخیص آلودگی‌های خاک (Soil Contamination) | شناسایی فلزات سنگین و آلودگی نفتی | 400-2500 | VIS-NIR-SWIR | تغییر طیف خاک در اثر ترکیبات فلزی یا آلی قابل ردیابی است |
| 14 | شناسایی مواد معدنی سطحی و زمین‌شناسی خاک | تعیین نوع و درصد مواد معدنی در خاک | 400-2500, TIR | Hyperspectral + Thermal | امضاهای طیفی معدنی ثبت TIR و SWIR در می‌شوند |

جدول ۶- ویژگی‌های قابل شناسایی خاک با طیف‌سنجی

| ویژگی خاک | محدوده طیفی مؤثر (نانومتر) | روش طیف‌سنجی | کاربردها و مزایا |
|---------------------------|----------------------------|--------------|---|
| کربن آلی (SOC) | 400-2500 | Vis-NIR, MIR | برآورد سریع کربن آلی برای ارزیابی کیفیت خاک و کشاورزی پایدار ijswr.ut.ac.ir |
| رطوبت خاک | 1300-1450, 1900-1950 | NIR, SWIR | پایش وضعیت آبی خاک، مدیریت آبیاری ijswr.ut.ac.ir |
| شوری خاک (EC) | 400-2500 | Vis-NIR | تخمین شوری با دقت بالا، جایگزین روش‌های الکتروشیمیایی ijswr.ut.ac.ir |
| بافت خاک (رس، سیلت، ماسه) | 500-2500 | Vis-NIR, MIR | تعیین درصد اجزای بافت خاک برای طبقه‌بندی و ارزیابی خاک lib.uok.ac.ir |
| PH خاک | 400-2500 | Vis-NIR | تخمین غیرمستقیم pH از طریق همبستگی با سایر ویژگی‌ها jsw.um.ac.ir |
| مواد آلی و معدنی | 2200-2400 | SWIR, MIR | شناسایی کانی‌ها مانند کربنات‌ها، اکسیدهای آهن، رس‌ها lib.uok.ac.ir |

مدلسازی خصوصیات خاک: مدل‌ها و داده‌های کمکی

مدلسازی خصوصیات خاک یکی از ابزارهای کلیدی در علوم خاک، کشاورزی دقیق، مهندسی عمران و محیط‌زیست است. این مدل‌ها به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: مدل‌های فیزیکی-ریاضی و مدل‌های تجربی. هر یک از این مدل‌ها برای اهداف خاصی مانند پیش‌بینی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی یا مکانیکی خاک به کار می‌روند.

۱- مدل‌های فیزیکی-ریاضی

این مدل‌ها رفتار مکانیکی خاک را تحت بارگذاری‌های مختلف شبیه‌سازی می‌کنند:

- مدل موهر-کولمب: برای تحلیل پایداری شیب‌ها و فشار جانبی خاک. این مدل فرض می‌کند که شکست خاک زمانی رخ می‌دهد که تنش برشی از مقاومت برشی بیشتر شود (ایستاسازه، ۲۰۲۳).
- مدل Cam-Clay: مناسب برای خاک‌های ریزدانه اشباع و بارگذاری‌های چرخه‌ای. این مدل در تحلیل‌های عددی مانند اجزای محدود کاربرد دارد (Craig, Soil Mechanics, 2012).
- مدل هایپلاستیک: برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی و وابسته به زمان خاک، به‌ویژه در شرایط بارگذاری پیچیده و بلندمدت است (Niemunis & Herle, 1997).

۲- مدل‌های تجربی و داده محور

این مدل‌ها با استفاده از داده‌های تجربی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین توسعه می‌یابند:
- رگرسیون خطی و PLSR: برای تخمین ویژگی‌هایی مانند کربن آلی، شوری و pH با استفاده از داده‌های طیفی (طاقدیس و همکاران، ۲۰۲۱).

- شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN): برای مدل‌سازی پیچیده با داده‌های چندمنبعی مانند طیف‌سنجی، توپوگرافی و سنجش از دور (شهبابی و همکاران، ۲۰۲۲).

- یادگیری عمیق (CNN): برای تحلیل تصاویر خاک و طبقه‌بندی خاک‌ها بر اساس ویژگی‌های بصری

جدول ۷- مقایسه مدل‌ها و داده‌های کمکی در مدلسازی خاک

| نوع مدل | داده‌های ورودی اصلی | کاربردها | مزایا | محدودیت‌ها |
|------------------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| موهر-کولمب | پارامترهای مکانیکی خاک | تحلیل پایداری، فشار جانبی | ساده و قابل فهم | دقت پایین در شرایط پیچیده |
| CAM-CLAY | تنش مؤثر، رطوبت، تراکم | خاک‌های ریزدانه اشباع | مناسب برای بارگذاری‌های چرخه‌ای | نیاز به داده‌های آزمایشگاهی دقیق |
| رگرسیون خطی/PLSR | داده‌های طیفی، آزمایشگاهی | تخمین کربن آلی، شوری، pH | سریع و قابل اجرا | حساس به نویز داده‌ها |
| شبکه عصبی مصنوعی (ANN) | داده‌های طیفی، توپوگرافی، سنجش از دور | پیش‌بینی چند ویژگی همزمان | دقت بالا، قابلیت یادگیری غیرخطی | نیاز به داده‌های زیاد و آموزش مناسب |
| یادگیری عمیق (CNN) | تصاویر خاک، داده‌های چندبعدی | طبقه‌بندی خاک، تحلیل بصری | قدرت بالا در استخراج ویژگی‌های پیچیده | پیچیدگی محاسباتی بالا |

داده‌های کمکی مهم در مدلسازی خاک

شاخص‌های توپوگرافی: مانند شیب، جهت، ارتفاع - تأثیرگذار بر رطوبت و فرسایش خاک (Zhu et al., 2010).

داده‌های طیفی: (Vis-NIR) بازتاب خاک در طول موج‌های مختلف - برای تخمین ویژگی‌های شیمیایی (Viscarra Rossel et al., 2006).

داده‌های سنجش از دور تصاویر ماهواره‌ای مانند Sentinel-2 برای نقشه‌برداری منطقه‌ای خاک (Delegido et al., 2011). داده‌های آزمایشگاهی: اندازه‌گیری مستقیم ویژگی‌ها - برای آموزش و اعتبارسنجی مدل‌ها.

دسته‌بندی الگوریتم‌های یادگیری ماشین

جدول ۸- الگوریتم‌های یادگیری ماشین

| نوع یادگیری | تعریف | نمونه الگوریتم‌ها | کاربردها |
|----------------|---------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| نظارت‌شده | آموزش با داده‌های برچسب‌خورده | درخت تصمیم، SVM، KNN | تشخیص ایمیل اسپم، پیش‌بینی قیمت |
| بدون نظارت | کشف الگو در داده‌های بدون برچسب | PCA، K-Means | خوشه‌بندی مشتریان، کاهش ابعاد |
| تقویتی و تنبیه | یادگیری از طریق پاداش | SARSA، Q-Learning | بازی‌های رایانه‌ای، کنترل ربات |

الگوریتم‌های مهم و کاربردی

۱- درخت تصمیم (Decision Tree)

نوع یادگیری: نظارت‌شده. ویژگی‌ها: ساختار درختی برای تصمیم‌گیری، قابل فهم برای انسان

کاربرد: پیش‌بینی ریسک اعتباری، طبقه‌بندی‌ها

۲- نزدیک‌ترین همسایه (KNN)

نوع یادگیری: نظارت‌شده. ویژگی‌ها: طبقه‌بندی بر اساس فاصله از داده‌های آموزش

کاربرد: تشخیص چهره، دسته‌بندی تصاویر

۳- ماشین بردار پشتیبان (SVM)

نوع یادگیری: نظارت‌شده

ویژگی‌ها: یافتن مرز بهینه بین کلاس‌ها

کاربرد: تشخیص سرطان، تحلیل احساسات

۴- K-Means

نوع یادگیری: بدون نظارت. ویژگی‌ها: خوشه‌بندی داده‌ها بر اساس نزدیکی

کاربرد: تقسیم‌بندی بازار، تحلیل رفتار مشتری

۵- تحلیل مؤلفه اصلی (PCA)

نوع یادگیری: بدون نظارت. ویژگی‌ها: کاهش ابعاد داده‌ها با حفظ اطلاعات اصلی

کاربرد: پیش‌پردازش داده‌ها، مصورسازی

۶- شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)

نوع یادگیری: نظارت‌شده/عمیق. ویژگی‌ها: مدل‌سازی روابط پیچیده، چند لایه

کاربرد: تشخیص گفتار، ترجمه ماشینی، پیش‌بینی سری‌های زمانی

۷- یادگیری تقویتی (Reinforcement Learning)

نوع یادگیری: تقویتی. ویژگی‌ها: یادگیری از طریق تعامل با محیط و دریافت پاداش

کاربرد: بازی‌های رایانه‌ای، رانندگی خودکار، مدیریت منابع

الگوریتم‌های یادگیری ماشین در طیف‌سنجی و کشاورزی دقیق

کشاورزی دقیق به‌عنوان یکی از شاخه‌های نوین کشاورزی، با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور، طیف‌سنجی،

حسگرهای زمینی و پهپادها، امکان تصمیم‌گیری هوشمندانه را فراهم می‌کند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تحلیل این

داده‌ها به‌کار می‌روند تا الگوهای پنهان کشف شده و اقدامات بهینه‌سازی انجام شود.

جدول ۹- الگوریتم‌های کلیدی و کاربرد آن‌ها

| الگوریتم | نوع یادگیری | کاربرد در کشاورزی دقیق |
|---------------------------|--------------|--|
| RANDOM FOREST | نظارت‌شده | طبقه‌بندی خاک، تشخیص بیماری گیاه |
| (CNN شبکه عصبی کانولوشنی) | یادگیری عمیق | تحلیل تصاویر طیفی برگ‌ها و خاک |
| SVM | نظارت‌شده | تحلیل طیف‌سنجی برای شناسایی نوع گیاه یا آلودگی |
| K-MEANS | بدون نظارت | خوشه‌بندی مناطق مزرعه بر اساس ویژگی‌های خاک |
| PCA | بدون نظارت | کاهش ابعاد داده‌های طیفی برای تحلیل بهتر |
| LSTM | یادگیری عمیق | پیش‌بینی رشد گیاه یا شرایط آب‌وهوایی |
| XGBOOST | نظارت‌شده | پیش‌بینی عملکرد محصول بر اساس داده‌های چندمنظوره |

کاربردهای الگوریتم‌های یادگیری ماشین در علوم خاک

علوم خاک به بررسی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک می‌پردازد. با افزایش حجم داده‌های سنجش از دور، طیف‌سنجی و داده‌های آزمایشگاهی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین به ابزارهای مؤثری برای تحلیل و مدل‌سازی این داده‌ها تبدیل شده‌اند.

جدول ۱۰۱۲- مهم‌ترین کاربردها

| کاربرد | الگوریتم‌های رایج | توضیح |
|----------------------------|-----------------------------|---|
| پیش‌بینی کربن آلی خاک | Random Forest, XGBoost, SVM | با استفاده از داده‌های سنجش از دور و طیف‌سنجی، میزان کربن آلی خاک در مناطق مختلف تخمین زده می‌شود. jstnar.iut.ac.ir |
| طبقه‌بندی نوع خاک | Decision Tree, CNN, KNN | تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های طیفی برای شناسایی بافت و نوع خاک استفاده می‌شوند |
| تخمین دمای سطحی و عمقی خاک | SVM, RF, ANN, LSTM | داده‌های هواشناسی و زمینی برای مدل‌سازی دمای خاک در اعماق مختلف به کار می‌روند. asr.urmia.ac.ir |
| کاهش ابعاد داده‌های طیفی | PCA | برای ساده‌سازی داده‌های پیچیده و افزایش دقت مدل‌ها استفاده می‌شود |
| نقشه‌برداری ویژگی‌های خاک | XGBoost, K-Means | خوشه‌بندی مناطق خاکی بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی برای مدیریت بهتر منابع خاکی انجام می‌شود. |

الگوریتم‌های یادگیری ماشین در تحلیل طیف خاک

الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای استخراج الگو از داده‌های طیفی و پیش‌بینی ویژگی‌های خاک به کار می‌روند. به‌عنوان مثال:

Random Forest برای پیش‌بینی کربن آلی خاک

SVM برای طبقه‌بندی نوع خاک

CNN برای تحلیل تصاویر طیفی برگ‌ها و خاک

PCA برای کاهش ابعاد داده‌های طیفی

انواع ماهواره‌های منابع زمینی

ماهواره‌های منابع زمینی یا سنجش از دور، ابزارهایی حیاتی برای پایش سطح زمین، پوشش گیاهی، منابع آب، خاک، تغییرات اقلیمی و بلایای طبیعی هستند. این ماهواره‌ها توسط سازمان‌های فضایی مختلف طراحی شده‌اند و داده‌های آن‌ها در کشاورزی دقیق، مدیریت منابع طبیعی، برنامه‌ریزی شهری و مطالعات زیست‌محیطی کاربرد فراوان دارند.

جدول ۱۳- مقایسه مهم‌ترین ماهواره‌های منابع زمینی

| نام ماهواره | سازمان/کشور | وضوح مکانی | کاربردهای اصلی |
|-------------|-------------|--------------|---|
| LANDSAT | NASA/USA | 15-30 متر | پایش پوشش گیاهی، تغییرات کاربری زمین، منابع آب |
| SENTINEL-2 | ESA/اروپا | 10-20 متر | کشاورزی دقیق، پایش خاک، جنگل‌ها، بلایای طبیعی |
| MODIS | NASA/USA | 250-1000 متر | پایش جهانی پوشش گیاهی، دما، آتش‌سوزی، ابرها |
| ASTER | NASA/ژاپن | 15-90 متر | نقشه‌برداری ارتفاعی، تحلیل حرارتی، مطالعات زمین‌شناسی |
| SPOT | CNES/فرانسه | 1.5-20 متر | کشاورزی، جنگل‌داری، مدیریت شهری |
| WORLDVIEW | Maxar/USA | تا ۰.۳ متر | نقشه‌برداری دقیق، مدیریت بحران، مطالعات شهری |
| GEOEYE | Maxar/USA | تا ۰.۵ متر | پایش زیرساخت‌ها، برنامه‌ریزی شهری، امنیتی |
| CARTOSAT | ISRO/هند | 0.8-2.5 متر | نقشه‌برداری توپوگرافی، برنامه‌ریزی منطقه‌ای |

کاربرد تصاویر ماهواره‌ای و پهپادها در کشاورزی دقیق

کشاورزی دقیق به مجموعه‌ای از فناوری‌ها اطلاق می‌شود که با استفاده از داده‌های مکانی و زمانی، مدیریت بهینه منابع کشاورزی را ممکن می‌سازد. تصاویر ماهواره‌ای و پهپادی از مهم‌ترین ابزارهای این حوزه هستند که امکان پایش، تحلیل و تصمیم‌گیری هوشمند را فراهم می‌کنند.

تصاویر ماهواره‌ای در کشاورزی دقیق

تصاویر ماهواره‌ای از سنجنده‌هایی مانند MSI در Sentinel-2 و OLI، TIRS در Landsat 8 به دست می‌آیند و اطلاعاتی در مقیاس وسیع و با تکرار زمانی بالا ارائه می‌دهند.

کاربردهای کلیدی:

- پایش سلامت گیاهان با استفاده از شاخص‌های طیفی مانند NDVI، SAVI و EVI برای تشخیص تنش‌های زیستی و کمبود مواد غذایی (کافه کشاورز، ۲۰۲۲)
- برآورد رطوبت خاک و نیاز آبی با داده‌های حرارتی و مادون قرمز نزدیک (کشتیار، ۲۰۲۳)
- شناسایی آفات و بیماری‌ها از طریق تغییرات طیفی در برگ‌ها و سطح مزرعه (Fars Roboyar, 2023)
- نقشه‌برداری کاربری زمین و تناوب زراعی برای برنامه‌ریزی کشت و مدیریت منابع (ESA Sentinel-2 Guide)

تصاویر پهپادی در کشاورزی دقیق

پهپادها با پرواز در ارتفاع پایین، تصاویر با وضوح بسیار بالا تهیه می‌کنند که برای پایش دقیق‌تر و محلی‌تر نسبت به ماهواره‌ها استفاده می‌شوند.

کاربردهای کلیدی:

- سم‌پاشی هدفمند و متغیر بر اساس نقشه‌های نیاز گیاه به کود یا آفت‌کش (سپهر UAV، ۲۰۲۳)
- پایش رشد گیاهان در مراحل مختلف با دقت بالا و به صورت روزانه یا هفتگی (دانشچی، ۲۰۲۲)
- شناسایی مناطق آسیب‌دیده یا کم‌بارور برای اصلاح خاک یا تغییر الگوی کشت
- مدل‌سازی سه‌بعدی مزرعه با استفاده از لیدار یا فوتوگرامتری برای تحلیل توپوگرافی و زهکشی (Pix4D Agriculture)

جدول ۱۴- جدول مقایسه‌ای تصاویر ماهواره‌ای و پهپادی

| ویژگی | تصاویر ماهواره‌ای | تصاویر پهپادی |
|----------------|-----------------------------|-------------------------------|
| وضوح مکانی | متوسط (۱۰-۳۰ متر) | بسیار بالا (تا چند سانتی‌متر) |
| پوشش مکانی | وسیع (تا صدها کیلومتر مربع) | محدود به مزرعه یا منطقه خاص |
| تکرار زمانی | روزانه یا هفتگی | قابل برنامه‌ریزی توسط کاربر |
| هزینه | رایگان یا کم‌هزینه | نیاز به تجهیزات و اپراتور |
| کاربردهای اصلی | پایش منطقه‌ای، اقلیم، منابع | پایش دقیق، عملیات مزرعه‌ای |

مزایای طیف‌سنجی در کشاورزی و علوم خاک

طیف‌سنجی (Spectroscopy) به عنوان یک فناوری پیشرفته و غیرمخرب، در سال‌های اخیر به یکی از ابزارهای کلیدی در کشاورزی دقیق و مطالعات خاک تبدیل شده است. این روش با اندازه‌گیری بازتاب نور در طول موج‌های مختلف، اطلاعاتی دقیق درباره ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و گیاه ارائه می‌دهد.

مزایای طیف‌سنجی در کشاورزی

بر اساس گزارش شرکت تجهیزات طیف‌سنجی اوژن (۲۰۲۵)، طیف‌سنجی مادون قرمز نزدیک (NIR) و طیف‌سنجی فراطیفی (Hyperspectral) در کشاورزی نوین کاربردهای گسترده‌ای دارند:

- پایش سلامت گیاهان: با استفاده از شاخص‌های طیفی مانند NDVI و PRI، می‌توان میزان کلروفیل، فتوسنتز و تنش‌های زیستی را ارزیابی کرد.
- تشخیص بیماری‌ها و آفات: تغییرات طیفی برگ‌ها می‌تواند نشانه‌ای از بیماری یا کمبود عناصر غذایی باشد.
- کنترل کیفیت محصولات کشاورزی: طیف‌سنجی امکان بررسی غیرمخرب کیفیت میوه‌ها، سبزیجات و غلات را فراهم می‌کند.
- مدیریت هوشمند مزرعه: داده‌های طیفی به کشاورزان کمک می‌کند تا تصمیمات بهینه برای آبیاری، کوددهی و برداشت اتخاذ کنند.

مزایای طیف‌سنجی در علوم خاک

- طبق مقاله منتشرشده در *MagIran* (2025) و پژوهش‌های اخیر دانشگاه تهران، طیف‌سنجی بازتابی در محدوده‌های مرئی تا مادون قرمز نزدیک (۳۵۰-۲۵۰۰ نانومتر) به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های سنتی آزمایشگاهی در حال گسترش است:
- غیرمخرب بودن: نیازی به تخریب نمونه یا استفاده از مواد شیمیایی ندارد.
- سرعت بالا و هزینه پایین: امکان تحلیل سریع و مقرون‌به‌صرفه در مقیاس وسیع، به‌ویژه در مطالعات منطقه‌ای.
- شناسایی هم‌زمان چند ویژگی خاک: مانند کربن آلی، شوری، pH، رطوبت و بافت خاک با یک اندازه‌گیری.
- پایش و مدل‌سازی خاک: طیف‌سنجی در مدل‌سازی رفتار خاک و ارزیابی کیفیت آن در شرایط مختلف محیطی کاربرد دارد.

معایب طیف‌سنجی در کشاورزی دقیق و علوم خاک

- با وجود مزایای فراوان، طیف‌سنجی در کشاورزی و علوم خاک دارای محدودیت‌هایی است که در مطالعات جدید نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. این محدودیت‌ها می‌توانند بر دقت، کارایی و گستره کاربرد این فناوری تأثیر بگذارند.

معایب طیف‌سنجی در کشاورزی دقیق

- وابستگی به شرایط نوری و محیطی داده‌های طیفی در فضای باز تحت تأثیر نور خورشید، زاویه تابش، رطوبت، گرد و غبار و پوشش ابری قرار می‌گیرند. این عوامل می‌توانند باعث کاهش دقت نتایج شوند و نیاز به پیش‌پردازش داده‌ها را افزایش دهند (نشریه سنجش از دور و GIS ایران، ۱۴۰۱).

- نیاز به کالیبراسیون دقیق و داده‌های مرجع برای دستیابی به نتایج قابل اعتماد، دستگاه‌های طیف‌سنج باید به‌طور منظم با نمونه‌های آزمایشگاهی کالیبره شوند. این فرآیند زمان‌بر و نیازمند تخصص است (استاندارد آژما، ۲۰۲۵).

- حجم بالای داده‌ها و پیچیدگی پردازش داده‌های فراتطیفی (Hyperspectral) شامل صدها باند طیفی هستند که پردازش آن‌ها نیازمند نرم‌افزارهای تخصصی مانند ENVI یا MATLAB و توان محاسباتی بالا است (Viscarra Rossel et al., 2006).
- هزینه اولیه بالا خرید تجهیزات طیف‌سنجی، آموزش کاربران و نگهداری دستگاه‌ها هزینه‌بر است و ممکن است برای کشاورزان کوچک مقرون‌به‌صرفه نباشد (استاندارد آژما، ۲۰۲۵).

معایب طیف‌سنجی در علوم خاک

- حساسیت به رطوبت خاک: رطوبت خاک باعث جذب بیشتر نور در برخی باندهای طیفی می‌شود و می‌تواند دقت تخمین ویژگی‌هایی مانند کربن آلی یا بافت خاک را کاهش دهد (MagIran، ۲۰۲۵).
- محدودیت در عمق نفوذ طیف‌سنجی فقط اطلاعات سطحی خاک (تا چند میلی‌متر) را ارائه می‌دهد و برای تحلیل لایه‌های زیرین باید با روش‌های مکمل مانند نمونه‌برداری فیزیکی ترکیب شود (Civilic، ۱۳۹۶).
- عدم دقت در خاک‌های باتریب پیچیده در خاک‌هایی با مواد آلی و معدنی متنوع، تفکیک دقیق اجزای طیفی دشوار است و ممکن است منجر به نتایج نادرست شود (MagIran، ۲۰۲۵).

- نیاز به مدل سازی آماری پیشرفته برای استخراج ویژگی های خاک از داده های طیفی، باید از مدل های پیچیده مانند رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR)، شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) یا الگوریتم های یادگیری ماشین استفاده شود که نیازمند داده های آموزشی و تخصص فنی است (Viscarra Rossel et al., 2006).

آینده طیف سنجی در کشاورزی و علوم خاک

طیف سنجی به عنوان یکی از ابزارهای غیرمخرب و دقیق، در سال های آینده نقش مهمی در کشاورزی پایدار، مدیریت منابع خاک و پایش محیطی ایفا خواهد کرد. بر اساس مطالعات منتشر شده در سال ۲۰۲۵، این فناوری با پیشرفت های زیر همراه خواهد بود:

- ۱- ادغام با هوش مصنوعی و یادگیری ماشین
مدل های پیشرفته مانند شبکه های عصبی مصنوعی (ANN)، رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) و الگوریتم های SVM برای تحلیل داده های طیفی به کار گرفته می شوند. این ترکیب باعث افزایش دقت در پیش بینی ویژگی های خاک و گیاه می شود و در مطالعات اخیر دانشگاه شهید چمران اهواز نیز مورد استفاده قرار گرفته است (نشریه مهندسی کشاورزی، ۲۰۲۵).
 - ۲- استفاده از طیف سنج های قابل حمل در مزرعه
طیف سنج های دستی یا نصب شده روی پهپادها و ماشین های کشاورزی امکان پایش در لحظه و تهیه نقشه های طیفی از مزارع را فراهم می کنند. این ابزارها در کارگاه آموزشی انجمن علوم خاک ایران (۱۴۰۲) به عنوان ابزار آینده نگر معرفی شده اند.
 - ۳- افزایش دقت در شناسایی ویژگی های خاک
طیف سنجی در محدوده های Mid-IR و NIR می تواند ویژگی هایی مانند کربنات ها، گچ، ماده آلی و بافت خاک را با دقت بالا تخمین بزند. پژوهش انجام شده در منطقه جوققان چهارمحال و بختیاری نشان داد که طیف سنجی بازتابی می تواند جایگزین مناسبی برای آزمایش های شیمیایی پرهزینه باشد (نشریه مهندسی کشاورزی، ۲۰۲۵).
 - ۴- ادغام با داده های ماهواره ای و سنجش از دور
ترکیب داده های طیفی با تصاویر ماهواره ای مانند Sentinel-2 و Landsat برای پایش منطقه ای و تحلیل چندمقیاسی در حال گسترش است. این رویکرد در مقاله منتشر شده توسط شرکت Spec Instruments (2025) به عنوان راهکار آینده نگر در کشاورزی دقیق معرفی شده است.
 - ۵- کاربرد در کشاورزی پایدار و مدیریت منابع
طیف سنجی به کشاورزان کمک می کند تا مصرف کود، آب و سم را بهینه کنند و اثرات زیست محیطی را کاهش دهند. همچنین در ارزیابی کیفیت محصولات و کنترل آلودگی خاک نقش مهمی خواهد داشت (MagIran، ۲۰۲۵).
- پیشنهادهای مهم برای کار برد داده های طیفی در علوم خاک**
- بر اساس پژوهش های منتشر شده موارد زیر به عنوان مهم ترین توصیه ها برای استفاده بهینه از داده های طیفی در مطالعات خاک مطرح شده اند:

- ۱- انتخاب داده های طیفی یا نوع سنجنده (تصاویر با قدرت تفکیک مکانی، طیفی و رادومتر) مناسب (مناسب) مناسب با نوع پدیده و هدف مطالعات
 - ۲- استفاده از روش های پیش پردازش طیفی
- اعمال تکنیک هایی مانند مشتق اول و دوم، صاف سازی (Smoothing)، نرمال سازی و حذف نویز برای افزایش دقت مدل ها. این روش ها باعث بهبود کیفیت داده های خام و کاهش اثرات محیطی می شوند. منبع: طاقدیس و همکاران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۲۰۲۱. ijswr.ut.ac.ir

۳- انتخاب مدل های آماری مناسب

استفاده از مدل‌هایی مانند PLSR، رگرسیون چندمتغیره، و شبکه‌های عصبی مصنوعی برای استخراج ویژگی‌های خاک از داده‌های طیفی.

انتخاب مدل مناسب بسته به نوع خاک، ویژگی مورد بررسی و کیفیت داده‌ها اهمیت دارد (MagIran, 2025).

۴- اعتبارسنجی مدل‌ها با داده‌های آزمایشگاهی

تطبيق نتایج طیف‌سنجی با داده‌های حاصل از آزمایش‌های شیمیایی و فیزیکی برای افزایش اعتمادپذیری. استفاده از معیارهایی مانند MSE، R² و MAE برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها.

۵- ترکیب داده‌های طیفی با داده‌های مکانی و سنجش از دور

ادغام داده‌های طیفی با تصاویر ماهواره‌ای OLI، TIRS، Sentinel-2) برای پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک در مقیاس منطقه‌ای.

این ترکیب باعث افزایش پوشش مکانی و کاهش هزینه‌های نمونه‌برداری می‌شود. (متین‌فر و همکاران، دانشگاه لرستان،

۲۰۲۳ نشریه سنجش از دور و GIS ایران).

۶- توسعه پایگاه داده‌های طیفی خاک

ایجاد بانک‌های اطلاعاتی طیفی از خاک‌های مختلف با ویژگی‌های شناخته‌شده برای آموزش مدل‌های یادگیری ماشین.

این پایگاه‌ها می‌توانند به‌عنوان مرجع برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی در پروژه‌های آینده استفاده شوند.

۷- آموزش تخصصی کاربران و کارشناسان خاک‌شناسی

برگزاری دوره‌های آموزشی برای آشنایی با تجهیزات طیف‌سنجی، نرم‌افزارهای تحلیل داده و تفسیر نتایج.

افزایش توانمندی کارشناسان در استفاده از فناوری‌های نوین برای مدیریت پایدار خاک.

کاربرد طیف‌سنجی در کشاورزی دقیق و علوم خاک

کشاورزی دقیق (Precision Agriculture) رویکردی است که بر اساس پایش مستمر و تصمیم‌گیری مکانی-زمانی

برای بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها طراحی شده است. طیف‌سنجی با فراهم کردن اطلاعات خاک، به اجزای کلیدی این سامانه

تبدیل شده است.

کاربردها شامل:

- تولید نقشه‌های شوری و رطوبت برای تنظیم آبیاری؛
- برآورد نیتروژن و کربن آلی خاک؛
- تعیین زون‌های مدیریتی؛
- پایش تأثیر کوددهی و عملیات زراعی؛
- پیش‌بینی عملکرد محصول با تلفیق داده‌های طیفی و مدل‌های هوش مصنوعی.
- توزیع نرخ متغیر نهاده‌ها

نتیجه‌گیری

طیف‌سنجی، پلی میان علوم خاک و فناوری‌های نوین سنجش از دور است. از طریق تحلیل بازتاب الکترومغناطیسی، می‌توان ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و زیستی خاک را بدون تماس مستقیم استخراج کرد.

با گسترش داده‌های فراطیفی و مدل‌های یادگیری ماشین، طیف‌سنجی به ابزاری کلیدی در کشاورزی دقیق، پایش تغییرات اقلیمی و مدیریت پایدار زمین تبدیل می‌شود. در حالی که منابع مالی برای مطالعات خاک‌شناسی، پایش خاک‌های کشور، پایش خاک‌های شور و... مقدور نباشد طیف‌سنجی و فناوری اطلاعات مکانی راهی میانبر برای دستیابی به اطلاعات خاک‌های کشور است.

فهرست منابع

1. ایستاسازه. «مدل‌های رفتاری خاک». ۲۰۲۳. لینک منبع-<https://istasazeh-co.com/%d9%85%d8%af%d9%84-%d9%87%d8%a7%db%8c-%d8%b1%d9%81%d8%aa%d8%a7%d8%b1%db%8c-%d8%ae%d8%a7%da%a9-soil-constitutive-models/>
2. طاق‌دیس، سحر و همکاران. «برآورد برخی خصوصیات خاک با استفاده از تحلیل داده‌های طیفی (Vis-NIR) و انواع روش‌های پیش‌پردازش». نشریه علوم و مهندسی آب و خاک ایران. ۲۰۲۱. لینک مقاله https://ijswr.ut.ac.ir/article_83088.html
3. شهابی، آرام و همکاران. «ارزیابی قابلیت طیف‌سنجی در نقشه‌برداری برخی خصوصیات خاک». پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه کردستان، ۲۰۲۲.

Ahmadi, A., Emami, M., Daccache, A., & He, L. (2021). Soil Properties Prediction for Precision Agriculture Using Visible and Near-Infrared Spectroscopy: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Agronomy*, 11(3), 433. [Link](#)

Ben-Dor, E., & Banin, A. (1995). Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 59(2), 364–372.

Clark, R. N. (1999). *Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy*. Remote Sensing for the Earth Sciences, 3, 3–58.

Chabrillat, S., et al. (2019). Imaging spectroscopy for soil mapping and monitoring. *Surveys in Geophysics*, 40(3), 361–399.

Mulder, V. L., et al. (2011). The use of remote sensing in soil and terrain mapping: A review. *Geoderma*, 162(1–2), 1–19.

Wu, Y., et al. (2018). Soil salinity estimation using hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, 216, 356–370.

FAO (2021). *Soil Spectroscopy Data and Applications in Agriculture*. Rome: FAO Press.

ESA (2023). *Sentinel-2 User Handbook*. European Space Agency.

NASA (2024). *EnMAP Mission Overview*. Washington DC: NASA GSFC.

Jensen, J. R. (1996). Remote sensing of the environment: An earth Resource Perspective. 3th Edn, Prentice Hall, USA, pp: 1-28.

Viscarra Rossel, R. A., et al. (2006). Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131(1-2), 59–75.

Zhu, A. X., et al. (2010). Terrain indices in soil science. *Geoderma*, 160(1), 1–2.

Soil Spectroscopy: From Satellite Observations to Precision Agriculture Hamidreza Matin Far^{1*}

1-Professor, Department of Soil Science and Engineering, Lorestan University, matinfar.h@lu.ac.ir

Abstract

Spectroscopy, as one of the most fundamental remote sensing methods, has enabled the investigation of physical and chemical properties of soil from different distances (ground, air, and space). This technology, which is based on the measurement of energy reflected and emitted from the soil surface at different wavelengths, has become an effective tool for

assessing soil properties, soil quality, monitoring spatial and temporal changes in soils, and also intelligent management of fields in the context of precision agriculture. Since the launch of the first Landsat-1 satellite in 1972 to recent missions such as EnMAP and PRISMA, high-resolution spectral data have transformed research in soil sciences. This article reviews the history, theory, and application of spectroscopy in soil sciences, describes the spectral ranges affecting soil properties, and introduces common spectral indices. It also analyzes the growth trend of scientific articles in this field from 1972 to 2025 based on Scopus and Web of Science data. The results show that spectroscopy in combination with artificial intelligence and remote sensing systems can play a role in identifying, mapping, and managing the country's soil resources, initiating precision agriculture in the development of sustainable agriculture, and precise management of soil resources by reducing costs and saving time.

Keywords: Remote sensing, soil spectroscopy, spectral indices, precision agriculture