



برآورد سطح زیر کشت گندم دیم با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲، مطالعه موردی: منطقه سجاس رود شهرستان خدابنده، استان زنجان

سید احمد موسوی^{۱*}، نادیا عباس زاده طهرانی^۲، میلاد جانعلی پور^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، واحد الکترونیکی دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری

چکیده

گندم در ایران و جهان، از جمله محصولات کشاورزی استراتژیک محسوب می‌شود. داشتن آمار و اطلاعات از سطح زیر کشت این محصول و برآورد میزان تولید آن در یک سال زراعی، می‌تواند به برنامه‌ریزان بخش کشاورزی و صنعت به منظور مدیریت هرچه مؤثرتر تولید و مصرف محصول مذکور کمک شایانی بکند. یکی از ابزارهایی که در کمترین زمان و با هزینه پایین و دقت مناسب می‌تواند سطح زیر کشت گندم را محاسبه کند سامانه پایش مبتنی بر علم و فناوری سنجش از دور است. در این تحقیق، سطح زیر کشت محصول گندم دیم دهستان سجاس رود شهرستان خدابنده زنجان با استفاده از تصاویر چند زمانه ماهواره‌ای سنجنده سنتینل-۲ برآورد و نتایج آن با نقشه کاداستر زراعی سال ۱۳۹۷-۱۳۹۶ مقایسه شد. از طبقه‌بندی نظارت‌شده و از دو روش ماشین بردار پشتیبان و حداکثر احتمال برای استخراج اطلاعات استفاده شد. با مقایسه دو روش، مناسب‌ترین روش انتخاب و پیشنهاد شد. برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی از ماتریس خطا استفاده شد. دقت کلی در روش ماشین بردار پشتیبان ۸۹٪ با ضریب کاپای ۰/۸۰ و در روش حداکثر احتمال ۸۸٪ با ضریب کاپای ۰/۷۹ به دست آمد. نتایج ارزیابی نشان داد که روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان نسبت به حداکثر احتمال از دقت بالاتری برخوردار است. بنابراین، برای استخراج سطح زیرکشت در منطقه مورد مطالعه، روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان پیشنهاد می‌شود. مقایسه نتایج سطح زیر کشت با آمارهای جهاد کشاورزی، انحراف ۱۸٪ را نشان داد و میزان محصول گندم نیز با استفاده از سطح زیر کشت به دست آمده از روش طبقه‌بندی، با آمارهای سازمان تعاونی روستایی مقایسه شد که میزان انحراف ۱۷٪ را نشان داد. نتایج تحقیق نشان داد که طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان روشی قابل قبول و مناسب برای شناسایی و تفکیک گندم از سایر محصولات کشاورزی است.

کلید واژه‌ها: سطح زیر کشت، گندم، سنجش از دور، طبقه‌بندی، سنتینل-۲



Estimation of the train wheat under cultivation area using Sentinel-2 satellite images (Case study: Sojasroud region, Khodabandeh city, Zanjan province)

Seyed Ahmad Mousavi¹, Nadia Abbaszadeh Tehrani^{2*}, Milad Janalipour²

- 1- MSc Student in Remote Sensing and Geographic Information System, Islamic Azad University, Tehran, Iran
- 2- Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and technology, Tehran, Iran

Abstract

Wheat is one of the strategic agricultural products in Iran and the world. Having statistics data and information about the area under cultivation of this crop and estimating the amount of its production in one crop year can help the planners of agriculture and industry parts in order to manage the production and consumption of the mentioned product as effectively as possible. One of the tools that can calculate the area under wheat cultivation in the shortest time and with low cost and appropriate accuracy is the remote sensing system. In this study, the area under cultivation of rain wheat crop in Sojasroud village of Khodabandeh city of Zanjan province was estimated using multi-time satellite images of Sentinel-2 measuring satellite and its results were compared with the agricultural cadastral map of 2017-2018. Supervised classification and two methods of support vector machine and maximum likelihood were used to extract information and by comparing the two methods, the most appropriate method was selected and suggested. The error matrix was used to evaluate the accuracy of the classification. The overall accuracy of the support vector machine method was 89% with a kappa coefficient of 0.80 and in the maximum likelihood method it was 88% with a kappa coefficient of 0.79. The evaluation results showed that the support vector machine classification method has a higher accuracy than the maximum likelihood, so to extract the area under cultivation in the study area, the support vector Machine classification method is proposed. Comparison of the results of the area under cultivation with the statistics of Jihad Keshavarzi showed a deviation of 18% and the amount of wheat crop using the area under cultivation obtained by classification method was compared with the statistics of the Rural Cooperative Organization which showed a deviation of 17%. The results showed that the classification of the support vector machine is an acceptable and appropriate method for identifying and separating wheat from other agricultural crops.

Keywords: Area under cultivation, Wheat, Remote sensing, Classification, Sentinel-2

* Corresponding author E-mail address: Tehrani@ari.ac.ir

مقدمه

گندم یکی از مهم‌ترین محصولات استراتژیک در جهان و بخصوص در ایران است و از زمان‌های قدیم به‌عنوان اصلی‌ترین منبع تغذیه اصلی ایرانیان مطرح بوده است. داشتن آمار و اطلاعات مناسب از زمین‌های تحت کشت گندم و برآورد میزان تولید آن در یک سال زراعی می‌تواند به برنامه‌ریزان بخش کشاورزی و صنعت کمک شایانی نماید تا برنامه‌ریزی‌های لازم را برای تولید، توزیع، ذخیره، واردات یا صادرات آن انجام دهند. با توجه به گستردگی کشت این محصول در مناطق مختلف کشور و پراکندگی زمین‌های تحت کشت، نیاز به ابزاری است که در کمترین زمان ممکن و با هزینه کمتر و دقت مناسب‌تر بتواند برآوردی از میزان محصول در یک سال زراعی را در اختیار برنامه‌ریزان قرار دهد (عباس‌زاده تهرانی و همکاران، ۱۳۹۰). برای برآورد سطح زیر کشت روش‌های مختلفی وجود دارد و به‌طور کلی به دو روش کلی سنتی و روش نوین تقسیم می‌شود. در روش سنتی کارشناسان به‌صورت مستقیم در منطقه حضور یافته و فهرست برداری انجام می‌دهند که در ایران نیز بیشتر از این روش استفاده می‌شود بررسی‌ها نشان داده است که این روش دارای خطاهای زیادی است (ریاحی و همکاران، ۱۳۹۷). در روش نوین معمولاً از ابزارهای جدید و پیشرفته استفاده می‌شود، یکی از این ابزارها سیستم سنجش‌ازدور و تصاویر به‌دست آمده از آن باشد که در سال‌های اخیر اهمیت زیادی پیدا کرده است (لی^۱ و همکاران، ۲۰۱۱). با استفاده از داده‌های سنجش از دوری می‌توان بدون مراجعه مستمر به مزارع کشاورزی با صرف زمان و هزینه کمتری نسبت به سایر روش‌های معمول، سطح زیر کشت اراضی را با دقت مناسبی برآورد کرد (علیپور، ۱۳۹۳). سامانه‌های سنجش‌ازدوری به دلیل تناوب در اخذ تصاویر یک ناحیه، تصویربرداری در طول موج‌های مختلف در یک‌زمان و درنهایت امکان پردازش و تفسیر سریع این اطلاعات، به‌طور گسترده در تجزیه‌وتحلیل داده‌های کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند (علیپور، ۱۳۹۳).

تحقیقات مرتبط بسیاری در این زمینه انجام شده است. داتتا^۲ و همکاران در کشور هندوستان با به‌کارگیری تصاویر چند زمانه ماه‌های ژانویه، مارس و آوریل سال ۱۹۹۷ سنجنده LISS III ماهواره IRS، برای تفکیک محصول گندم از سایر محصولات استفاده کردند که میزان دقت طبقه‌بندی برای محصول گندم ۹۴ درصد به‌دست آمده است (داتتا و همکاران، ۱۹۹۸). لوبل^۳ و همکاران در مکزیک با ترکیب دانش فنولوژی رشد محصول و تصاویر سری زمانی لندست که مربوط به سال ۲۰۰۰ بود میزان محصول را برآورد کردند. بررسی آن‌ها نشان داد که نتایج پیش‌بینی محصولات در مقیاس محلی تا ۲۰ درصد متغیر است. همچنین شاخص‌های پوشش گیاهی نظیر NDVI برای تعیین میزان محصول مناسب هستند (لوبل و همکاران، ۲۰۰۳). در پژوهشی در کوردوبای آرژانتین بوکو^۴ و همکاران به بررسی روند زمانی داده‌های شاخص‌های گیاهی برای طبقه‌بندی مزارع کشاورزی شامل: یونجه، ذرت، ذرت خوشه‌ای، سویا زمین‌های آیش و گندم با استفاده از ۱۳ تصویر MODIS با قدرت تفکیک ۲۵۰ متر که بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۶ تهیه شده بود، پرداخته و با توجه به روندهای زمانی متفاوت شاخص‌های EVI و NDVI کلاس‌های مختلف را از هم تفکیک کردند (بوکو و همکاران، ۲۰۰۷). اوتیوکی^۵ و بلاسچک^۶ در منطقه‌ای در اوگاندا شرقی به ارزیابی تغییرات پوشش زمین با استفاده تصاویر لندست TM با سه الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، درخت تصمیم و حداکثر احتمال پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد هر سه مدل دقت قابل قبولی برای منطقه مورد مطالعه داشته و به ترتیب روش ماشین بردار پشتیبان با دقت کلی ۹۴٪ با ضریب کاپای ۰/۹۲، حداکثر احتمال با دقت کلی ۹۴٪ با ضریب کاپای ۰/۹۳ و درخت تصمیم با دقت کلی ۹۴٪ با ضریب کاپای ۰/۹۳ برای ارزیابی تغییرات پوشش زمین مناسب بوده است (اوتاکاکی و بلاسچک، ۲۰۱۰). زوستر^۷ و همکاران از سه روش شبکه عصبی، ماشین بردار پشتیبان و حداکثر احتمال برای تهیه نقشه کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ASTER با قدرت تفکیک ۱۵ متر در جزیره کوچک تایی از کوه تائو در تایلند پرداختند و نتیجه گرفتند که روش ماشین بردار پشتیبان با دقت کلی ۹۶٪ و ضریب کاپای ۰/۹۴ نسبت به روش‌های شبکه عصبی با دقت کلی ۹۵٪ با ضریب کاپای ۰/۹۳ و حداکثر احتمال با دقت کلی ۹۴٪ با ضریب کاپای ۰/۹۱ از دقت بالاتری برای تهیه نقشه کاربری بهره‌مند است (زوستر و همکاران، ۲۰۱۱). فتیجی^۸ زاده و همکاران برای تهیه کاربری اراضی منطقه میمه شهرستان دهلران استان لرستان به ارزیابی و مقایسه روش‌های طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان با کرنل‌های خطی، چندجمله‌ای و پایه شعاعی با شبکه عصبی مصنوعی و با استفاده از داده‌های ETM+ لندست پرداختند. نتایج نشان داد که میانگین دقت کل و ضریب کاپا الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان شامل کرنل خطی، چندجمله‌ای و شعاعی به ترتیب با ۹۴٪ و ۰/۹۲

1. LI
2. Dutta
3. Lobell
4. Bocco
5. Otukey
6. Blaschke
7. Szuster

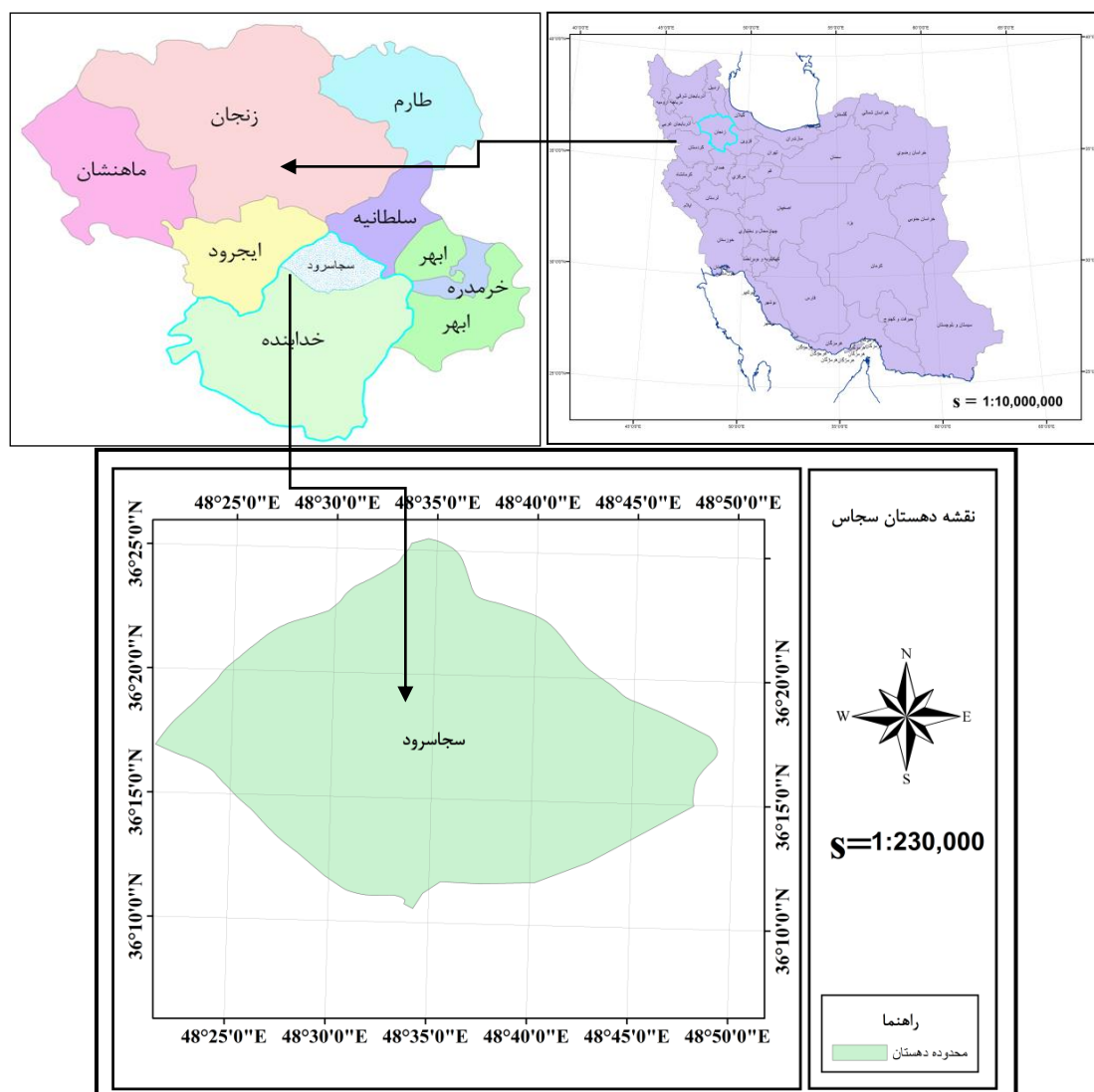
نسبت به روش طبقه‌بندی شبکه عصبی مصنوعی با دقت کلی ۸۵٪ با ضریب کاپای ۰/۸۰ بهتر عمل کرده‌اند که از نظر دقت کل حدود (۰/۹) و ضریب کاپا حدود (۰/۱۲) برتری دارد (فتحی‌زاد و همکاران، ۱۳۹۵). احسانی و شاکر یاری برای تعیین پوشش اراضی تالاب بین‌المللی هامون با مقایسه الگوریتم‌های شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان با به‌کارگیری داده‌های ماهواره سنجه OLI سال ۲۰۱۴ در طی یک دوره ۲۶ ساله، پوشش اراضی منطقه را به پنج کلاس آب، پوشش گیاهی، نیزار، اراضی بایر و اراضی شور طبقه‌بندی کردند. آن‌ها به منظور ارزیابی دقت کار با استفاده از دقت کاربر، صحت تولیدکننده، صحت کلی، ضریب کاپا و ماتریس خطا، نقشه ایجاد شده را با نقشه واقعیت زمینی ایجادشده توسط GPS و تصاویر گوگل ارث و بازدیدهای صحرائی مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که روش آرتمپ فازی بیش‌ترین میزان دقت را با دقت کل ۹۴/۶۸ و ضریب کاپای ۰/۹۱ نسبت به دو روش شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه با دقت کل ۹۲/۹۹ و ضریب کاپای ۰/۸۹ و ماشین بردار پشتیبان با دقت کل ۹۳/۹۰ و ضریب کاپای ۰/۸۵ در طبقه‌بندی داده‌های ماهواره‌ای دارد (احسانی و شاکریاری ۱۳۹۷). در تحقیقی دیگر علیزاده و همکاران جهت برآورد سطح زیر کشت محصول گندم و سویا در غرب استان گلستان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست که طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ تهیه گردیده بود به مقایسه روش‌های طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی مصنوعی، حداکثر احتمال، حداکثر فاصله و متوازی‌السطوح پرداختند که نتایج آن نشان داد صحت کلی محاسبه شده و ضریب کاپا در همه تصاویر به ترتیب بیشتر از ۰/۸۰ و بیش از ۰/۸ هست (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۷). در تحقیقی کامکار و همکاران به منظور شناسایی، تفکیک و ارزیابی سطح زیر کشت دو محصول تابستانه برنج و سویا در سطح مورد مطالعه، از دو تصویر ماهواره سنتینل ۲ مربوط به ماه‌های مرداد و شهریور سال ۱۳۹۵ استفاده کردند. این پژوهش در سطح ۴ حوضه آبخیز زرین گل، محمدآباد، قره‌سو و قرن‌آباد از استان گلستان انجام شد. نتایج نشان داد که با توجه به ضریب کاپا و صحت کلی که به ترتیب معادل ۰/۹۲ و ۹۵٪ است روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال به‌عنوان روش منتخب طبقه‌بندی در برنج انتخاب و سطح زیر کشت برنج تخمین زده شد. همچنین جهت تخمین و برآورد سطح زیر کشت محصول سویا ضریب کاپا و صحت کلی روش طبقه‌بندی کم‌ترین فاصله از میانگین با بالاترین دقت به ترتیب معادل ۰/۸۸ و ۹۵٪ استفاده شد (کامکار و همکاران، ۱۳۹۸).

همان‌طور که مشاهده می‌شود روش‌های مختلفی برای تعیین سطح زیر کشت گندم ارائه شده‌اند اما روش‌های مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای از منطقه‌ای به منطقه دیگر کارایی متفاوت دارند. با توجه به اینکه در منطقه مورد مطالعه -دهستان سجاس رود از توابع شهرستان خدابنده استان زنجان- عمده محصول گندم دیم کشت می‌شود و تاکنون تحقیقی بر پایه تصاویر ماهواره‌ای و سنجش‌ازدور جهت برآورد سطح زیر کشت و تولید محصول در منطقه مذکور انجام نشده است، در این تحقیق دو هدف اصلی دنبال شده است: ۱- برآورد میزان سطح زیر کشت محصول گندم با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ در منطقه دهستان سجاس رود استان زنجان ۲- برآورد میزان تولید محصول گندم در یک سال زراعی با استفاده از میانگین عملکرد در واحد سطح در منطقه مذکور. استفاده از تصاویر سری زمانی سنتینل-۲ در منطقه مورد مطالعه یکی از نوآوری‌هایی است که برای تفکیک محصولات مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

مواد و روش‌ها

• منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، دهستان سجاس رود از توابع شهرستان خدابنده استان زنجان است در شمال غرب کشور ایران بین طول‌های جغرافیایی ۱۴' ۲۱' ۴۸" تا ۱۲' ۴۹' ۴۸" درجه و شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۱۴' ۱۱' ۳۶" تا ۲۹' ۲۵' ۳۶" شمالی با متوسط بارندگی ۳۹۷ میلی‌متر با میانگین دمای ۳ درجه سانتی‌گراد و ارتفاع متوسط ۱۸۵۰ متر از سطح دریا و با مساحت تقریبی ۶۳۳۵۰ هکتار قرار دارد که منطقه قطب کشاورزی استان و بیشتر مزارع آن زیر کشت گندم دیم قرار هستند. این منطقه به‌عنوان یک منطقه خشک و نیمه‌خشک در نظر گرفته شده است که اوضاع جوی و شرایط اقلیمی آن برحسب پستی‌وبلندی بسیار متغیر بوده است. شکل (۱) منطقه مورد مطالعه را نمایش می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه سجاج رود شهرستان خدابنده

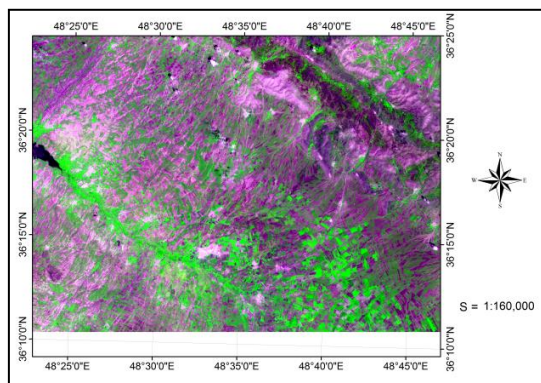
• داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده

- تصاویر ماهواره‌ای: سه تصویر سنتینل ۲ در تاریخ ۱۱ خرداد، ۱۹ تیر و ۲ شهریور سال ۹۷ از سایت USGS^۱ اخذ شد. این تصاویر با قدرت تفکیک طیفی ۱۳ بیت و همچنین توان تفکیک مکانی ۱۰ متر برای باندهای آبی و سبز و قرمز و مادون قرمز از تصاویر با قدرت تفکیک متوسط به حساب می‌آید که برای کاربردهای کشاورزی بخصوص تعیین سطح زیر کشت مناسب هست (کلیورز^۲ و همکاران، ۲۰۱۷). تاریخ‌های اخذ تصاویر بر اساس تقویم زراعی منطقه و برای زمان‌هایی که بیشترین سبزی‌نگی، رسیدگی کامل و برداشت محصول گندم در منطقه انتخاب شده است. شکل (۲) تصویر سنتینل ۲ منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.
- داده‌های کمکی: به منظور تعلیم طبقه‌بندی کننده‌ها از داده‌های آموزشی که از نقشه کاداستر زراعی منطقه که توسط امور اراضی سازمان جهاد کشاورزی استان زنجان برای سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۷ تهیه شده، استفاده شده است.
- تقویم زراعی منطقه: تقویم زراعی منطقه جهت اطلاع از زمان کشت و برداشت انواع محصولات، از جهاد کشاورزی شهرستان خدابنده اخذ شده است که در جدول (۱) ارائه شده است.

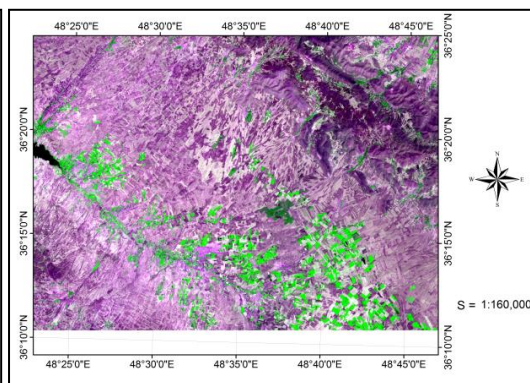
1. U.S. Geological Survey.
2. Clevers

جدول ۱- تقویم زراعی منطقه سجاس رود (اخذ شده از جهاد کشاورزی شهرستان خدابنده)

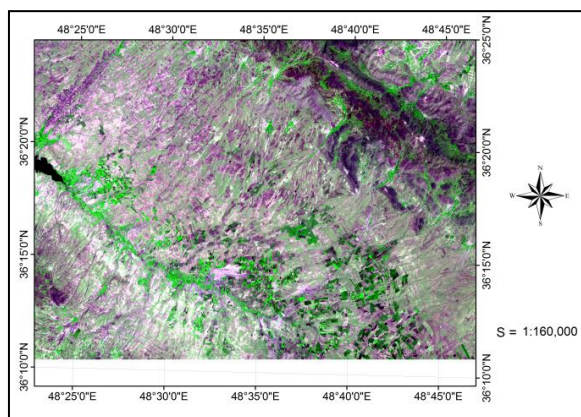
نام محصول	تاریخ شروع کاشت	اوج سبزیگی	تاریخ شروع برداشت	متوسط عملکرد در هر هکتار (کیلوگرم)
گندم دیم	اوایل مهر	اواخر خرداد	اوایل مرداد	۱۵۴۰
گندم آبی	اواسط مهر	اواخر خرداد	اوایل مرداد	۵۰۵۰
لوبیا	اوایل اردیبهشت	اوایل مرداد	اوایل شهریور	۳۲۵۰
یونجه	به دلیل چندساله بودن و چند چین در یک سال تاریخها مشخص نیست			



ب: تصویر بارنگ کاذب ۱۹ تیر



الف: تصویر بارنگ کاذب ۱۱ خرداد

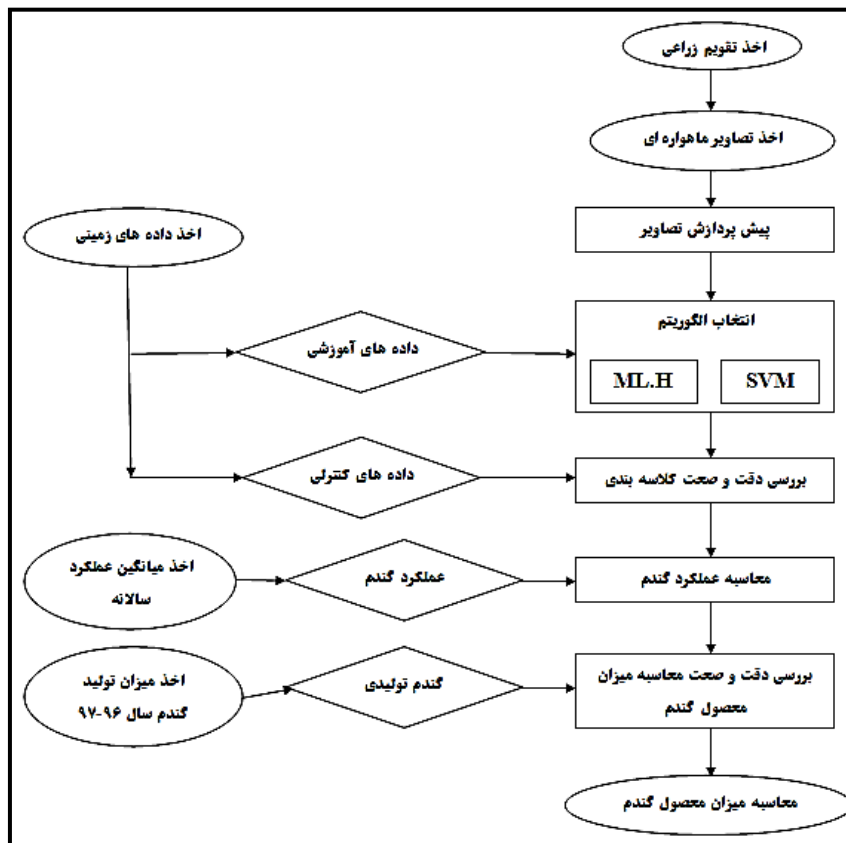


ج: تصویر بارنگ کاذب ۲ شهریور

شکل ۲- تصاویر سنتینل-۲ اخذ شده از سایت USGS در ۳ زمان مختلف برای منطقه مورد مطالعه

مواد و روشها

در این تحقیق، ابتدا تقویم زراعی منطقه با کمک کارشناسان پهنه مشخص گردید و با توجه به این تقویم و پارامترهایی همچون عدم ابری بودن تصاویر و موجود بودن آن‌ها در سایت USGS، سه تصویر برای تعیین سطح زیر کشت گندم و از سایت فوق دریافت گردید. سپس برای آماده‌سازی تصاویر پیش‌پردازش لازم از قبیل تصحیحات اتمسفری بر روی تصاویر انجام گردید و برای طبقه‌بندی و تفکیک کلاس‌ها روش‌های طبقه‌بندی حداکثر احتمال و ماشین بردار پشتیبان در نرم‌افزار ENVI استفاده گردید است. داده‌های آموزشی مورد استفاده از نقشه کاداستر زراعی به صورت شیب فایل به تعداد مناسب (۳۲۰ پلی‌گون) در نرم‌افزار Arc GIS انتخاب و برای تعلیم الگوریتم‌های طبقه‌بندی در نرم‌افزار ENVI بکار گرفته شد. برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی از ماتریس خطا استفاده شده است و با مقایسه دو روش ماشین بردار پشتیبان و حداکثر احتمال بهترین الگوریتم برای منطقه انتخاب و براساس آن سطح زیر کشت منطقه در نرم‌افزار Arc GIS استخراج گردید و از روی آن میزان محصول گندم تولیدی برای سال زراعی موردنظر محاسبه و در نهایت با مقایسه با آمارهای سازمان تعاون روستایی انحراف این روش به دست آمده است؛ که مراحل آن در شکل (۳) مشاهده می‌گردد و در زیر به صورت خلاصه به هر کدام پرداخته می‌شود.



شکل ۳- روش پیشنهادی به منظور استخراج سطح زیر کشت و میزان محصول از تصاویر ماهواره‌ای

• پیش پردازش

در این مرحله ابتدا، باندهای طیفی ۳، ۴، ۵ و ۸ سه تصاویر اخذ شده انتخاب و با لایر استک^۱ کردن به یک تصویر چند طیفی تبدیل می‌شود با توجه به اینکه فرمت تصاویر سنتینل ۲ طوری که برای لایر استک کردن نیاز به تغییراتی در روی تصویر هست که این کار با ذخیره سازی دوباره تک تک باندها در نرم افزار ENVI-5.1 انجام گردیده است سپس تصحیح تبدیل درجه خاکستری به بازتابندگی سطح با به کارگیری رابطه (۱) انجام گردیده است (کامکار و همکاران، ۱۳۹۸).

$$X = \begin{cases} 0 & \text{if } DN < 0 \\ 1 & \text{if } DN > 10000 \\ \frac{DN}{10000} & \text{if } 0 < DN < 10000 \end{cases} \quad \text{رابطه (۱)}$$

برای تصحیح اتمسفری تصاویر ماهواره‌ای از الگوریتم QUAC استفاده شده است. این الگوریتم از باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک برای تصحیح اتمسفری استفاده می‌کند الگوریتم QUAC یک تقریب از تصحیح اتمسفری FLAASH است که با دقت مناسب بازتابندگی سطح اشیاء را در اختیار قرار می‌دهد (برنستین^۲ و همکاران، ۲۰۱۲).

• تعیین میزان سطح زیر کشت محصول گندم

جهت تفکیک گندم از سایر محصولات روش‌های مختلفی وجود دارد که در این تحقیق از روش کلاسه بندی تصاویر به صورت نظارت شده با استفاده از داده‌های زمینی (نقشه کاداستر زراعی) انجام گرفته است.

• طبقه بندی حداکثر احتمال

یکی از روش‌ها استخراج اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای روش طبقه بندی است که خود دسته‌های مختلفی دارد. یکی از این روش‌های روش طبقه بندی "حداکثر احتمال" است که در آن فرض می‌شود توزیع پیکسل‌ها در هر کلاس نرمال است. بر اساس رابطه (۲)، پیکسلی به

1. Layer Stake
2. Bernstein

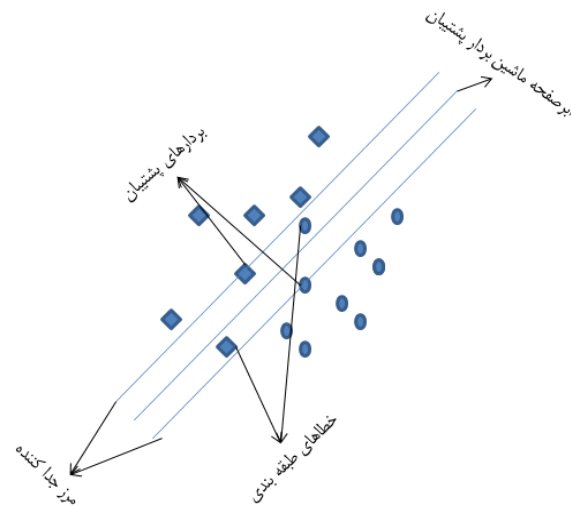
کلاس i اختصاص داده می‌شود اگر احتمال مؤخر آن نسبت به تمامی کلاس‌های دیگر بیشتر باشد. به عبارت دیگر، پیکسل به کلاسی اختصاص می‌یابد که بیشترین شباهت را به آن، نسبت به سایر کلاس‌ها داشته باشد (اسمالا^۱، ۲۰۱۲).

$$x \in i \text{ if } P(i|\omega) > P(j|\omega) \text{ for all } j \neq i$$

رابطه (۲)

• طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان

روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان یک روش آماری غیر پارامتریک نظارت شده است و با این فرض عمل می‌کند که هیچ‌گونه اطلاعاتی از چگونگی توزیع مجموعه داده‌ها وجود ندارد (مانتورو^۲ و همکاران، ۲۰۰۵). اگر مجموعه پیکسل $\{(x_1, c_1), (x_2, c_2), \dots, (x_n, c_n)\}$ موجود باشند و هدف طبقه‌بندی هر یک از آن‌ها به دو کلاس $c_i = \{-1, 1\}$ باشد که در آن x_i یک بردار p بعدی از مقادیر حقیقی ویژگی‌های مختلف سنجش‌ازدور مربوط به هر پیکسل هست. روش‌های طبقه‌بندی به دنبال برازش یک منحنی مناسب جهت تفکیک آن دو کلاس از یکدیگر خواهد بود. امکان برازش بی‌نهایت منحنی به داده‌ها وجود دارد. روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان به شکلی ابر صفحه (منحنی) را به نقاط برازش می‌دهد که بر اساس شکل (۴) بیشترین تفکیک‌پذیری میان دو کلاس ایجاد شود. این برازش در یک مرحله بهینه‌سازی با استفاده از نمونه‌های مرزی انجام می‌شود (مونتراکیس^۳ و همکاران، ۲۰۱۱).



شکل ۴- برازش ابر صفحه بهینه با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان به نمونه‌های دو کلاس (مونتراکیس و همکاران، ۲۰۱۱)

به منظور تفکیک کلاس‌ها از یکدیگر، استفاده از ابر صفحه‌های خطی و غیرخطی در روش ماشین بردار پشتیبان امکان‌پذیر است. استفاده از نوع خطی و غیرخطی در هر پروژه‌ای وابسته به پیچیدگی فضای ویژگی در تفکیک کلاس‌ها از یکدیگر است. کرنل‌های خطی صفحه‌ای و کرنل‌های غیرخطی نظیر گوسین، سینوسی و کسینوسی و RBF از جمله مورد استفاده شده کرنل‌ها در تحقیقات پیشین بوده‌اند (سوکینز^۴ و واندوال^۵، ۱۹۹۹).

• اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از روش‌های طبقه‌بندی بیشترین احتمال و ماشین بردار پشتیبان در شناسایی گندم، تعدادی نمونه واقعیت زمینی که از پلی‌گون نقشه کاداستر زراعی منطقه مورد مطالعه تهیه شد استخراج شدند. سپس با استفاده از آماره‌های کاپا و صحت کلی مطابق رابطه‌های (۳ و ۴)، اعتبار نتایج ارزیابی شد. مقادیر بالا و نزدیک به عدد یک آماره‌ها، نشان‌دهنده نتایج با اعتبار بالا است (پونتوس^۶ و میلونز^۷، ۲۰۱۱).

1. Asmla
2. Mantero
3. Mountrakis
4. Suykens
5. Vandewalle
6. Pontius
7. Millone

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^n m_{ii} - \sum_{i=1}^n G_i C_i}{N^2 - \sum_{i=1}^n G_i C_i} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^n m_{ii}}{N} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این روابط K ضریب کاپا، m_{ii} تعداد نمونه‌هایی که واقعیت زمینی کلاس i بوده که در مقادیر اختصاص یافته نیز همان کلاس را دارند، G_i تعداد نمونه‌های واقعیت زمینی در کلاس i ، C_i ، تعداد نمونه‌های اختصاص داده شده به کلاس i و n تعداد کلاس‌ها، i شماره کلاس و N تعداد کل نمونه و OA صحت کلی هست. به‌منظور اعتبارسنجی سطح زیر کشت میزان محصول گندم از تصاویر ماهواره‌ای، آمارها و اطلاعات به‌دست آمده از جهاد کشاورزی استفاده شده است.

• برآورد میزان تولید گندم در یک سال زراعی

برای برآورد میزان تولید گندم روش‌های مختلفی وجود دارد در این تحقیق میزان تولید گندم در یک سال از حاصل ضرب متوسط عملکرد محصول هر هکتار در سطح کل زیر کشت محاسبه گردیده است (دانشورکاخی و همکاران، ۱۳۸۶). بنابراین برای محاسبه میزان تولید سالانه محصول گندم نیاز به متوسط عملکرد محصول هست که داده‌های آن از صندوق بیمه کشاورزی استان اخذ گردیده است. لازم به ذکر است، سطح زیر کشت از روش‌های طبقه‌بندی قابل استخراج است.

یافته‌های پژوهش

پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای براساس روش تحقیق در نرم‌افزار ENVI انجام شد. برای پیاده‌سازی روش‌های طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان و حداکثر احتمال نیاز به نمونه‌های آموزشی است. علاوه بر این برای اعتبارسنجی نتایج نیاز به داده‌های ارزیابی است. بدین منظور، در این تحقیق از شیب فایل (فایل برداری) کاداستر زراعی منطقه که در سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ تهیه شده استفاده و برای جداسازی نمونه تعلیمی و ارزیابی از نرم‌افزار Arc GIS 10.3 استفاده شده است. بدین منظور مراحل ذیل پیاده‌سازی شدند. ابتدا با استفاده نقشه کاداستر زراعی در نرم‌افزار Arc GIS داده‌های آموزشی سه کلاس شامل گندم، زراعت آبی و آیش جداسازی شدند.

ب- سپس این لایه روی تصویر پیش‌پردازش شده در مرحله قبل قرار گرفت و به‌صورت بصری وضعیت آن‌ها از لحاظ کشت شدن یا آیش بررسی قرار گرفت و پلی‌گون‌های مشکوک حذف شدند.

ت- تعداد ۱۳۰ پلی‌گون گندم، ۱۰۶ پلی‌گون آیش و ۸۵ پلی‌گون زراعت آبی انتخاب شدند به‌طوری‌که در کل منطقه این پلی‌گون‌ها پراکنده باشند.

ث- از ۱۳۰ نمونه گندم انتخاب شده در مرحله قبل، ۷۷ پلی‌گون به‌عنوان نمونه‌های آموزشی ۵۳ پلی‌گون به‌عنوان نمونه‌های اعتبارسنجی طبقه‌بندی انتخاب شد.

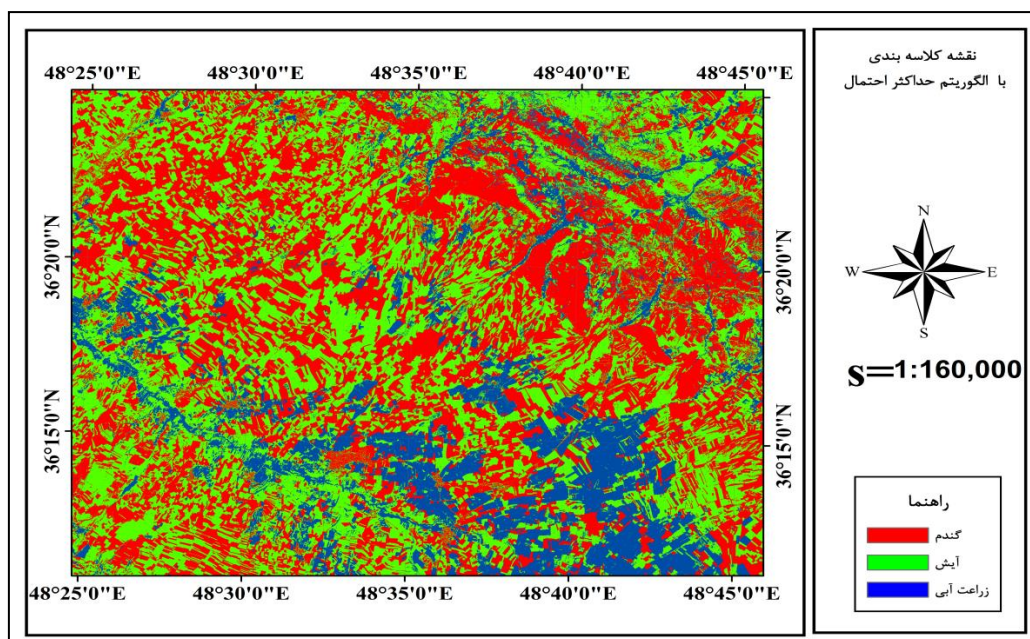
ج- از ۱۰۶ نمونه آیش انتخاب شده در مرحله قبل، ۶۴ پلی‌گون به‌عنوان نمونه‌های آموزشی ۴۲ پلی‌گون به‌عنوان نمونه‌های اعتبارسنجی طبقه‌بندی انتخاب شد.

ح- از ۸۵ نمونه زراعت آبی انتخاب شده در مرحله قبل، ۵۷ پلی‌گون به‌عنوان نمونه‌های آموزشی و ۲۸ پلی‌گون به‌عنوان نمونه اعتبارسنجی طبقه‌بندی انتخاب شد.

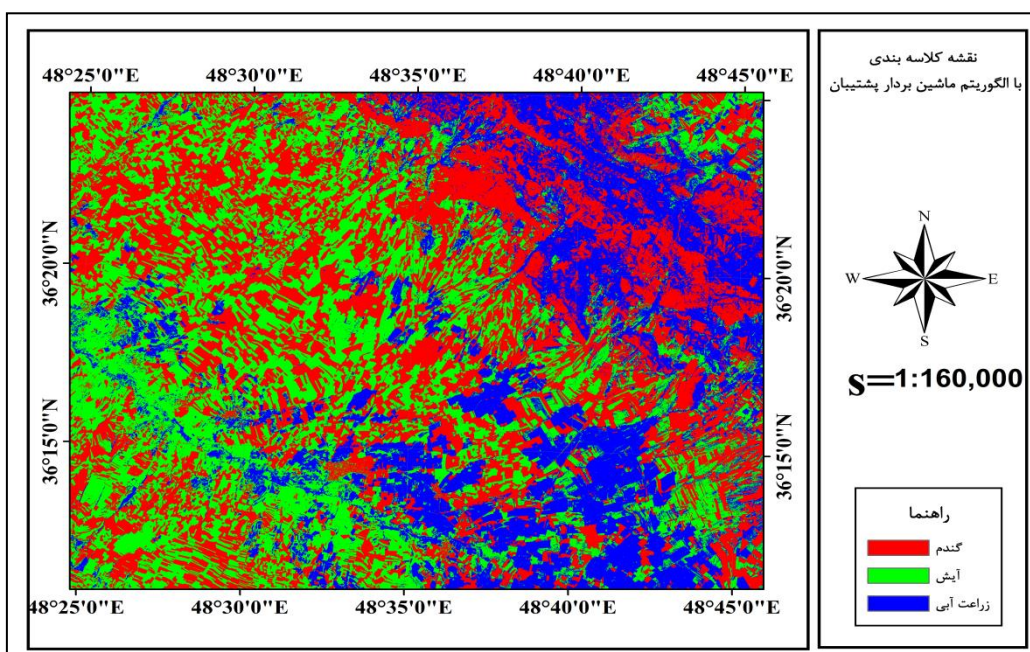
به‌منظور ارزیابی اثر تعداد نمونه‌های تعلیمی بر نتایج طبقه‌بندی کننده‌ها از دو سری داده تعلیمی استفاده شد. نکته قابل توجه پس از اجرای برنامه، وابستگی زمان اجرا برنامه به تعداد نمونه‌های تعلیمی است. روش ماشین بردار پشتیبان با ۱۰ پلی‌گون تعلیمی در مدت یک ساعت نیم اجرا می‌شود. درحالی‌که اجرای این روش با ۶۵ نمونه چهار برابر قبل زمان نیاز داشت. برخلاف روش ماشین بردار پشتیبان، روش حداکثر احتمال در ۵ تا ۱۰ دقیقه اجرا می‌شود که نشان‌دهنده سرعت بالای این روش است. علاوه بر این سرعت اجرای روش ماشین بردار پشتیبان به دلیل برازش یک ابر صفحه بهینه به نمونه‌های مرزی کلاس‌ها با افزایش تعداد نمونه‌های تعلیمی افزایش می‌یابد. نخستین بار روش‌های طبقه‌بندی با ۱۰ داده آموزشی برای گندم و ۹ داده آموزشی برای آیش و ۱۰ داده آموزشی برای زراعت آبی اجرا شدند. نتایج برای روش ماشین بردار پشتیبان با صحت کلی ۸۴/۵٪ با ضریب کاپای ۰/۷۳ و برای روش حداکثر احتمال صحت کلی ۸۵/۷٪ با ضریب کاپای ۰/۷۵ به دست آمدند.

در آزمایش دوم، روش‌های طبقه‌بندی با ۷۷ داده آموزشی برای گندم و ۶۴ داده آموزشی برای آیش و ۵۷ داده آموزشی برای زراعت آبی

کلاسه‌بندی پیاده‌سازی شد. دقت کلی برای روش ماشین بردار پشتیبان برابر ۰/۸۸/۶٪ و ضریب کاپای آن ۰/۸۰ و برای روش حداکثر احتمال دقت کلی ۰/۸۸/۵۴٪ با کاپای ۰/۷۹ به دست آمد. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش تعداد نمونه‌های تعلیمی سبب افزایش ۳ تا ۴ درصدی صحت نتایج طبقه‌بندی کننده‌ها می‌شود. نتیجه طبقه‌بندی حداکثر احتمال و ماشین بردار پشتیبان در منطقه مورد مطالعه در شکل‌های (۵ و ۶) نمایش داده شده‌اند.



شکل ۵- نقشه تفکیکی محصولات زراعی توسط روش حداکثر احتمال (آیش، گندم دیم و زراعت آبی)



شکل ۶- نقشه تفکیکی محصولات زراعی توسط روش ماشین بردار پشتیبان (آیش، گندم، دیم و زراعت آبی)

برای اعتبارسنجی نتایج دوطبقه بندی کننده ماشین بردار پشتیبان و حداکثر احتمال از نمونه‌های ارزیابی استفاده می‌شود. برای ارزیابی نتایج، ۵۳ پلی گون گندم دیم، ۴۲ پلی گون آیش و ۲۸ پلی گون زراعت آبی انتخاب گردید. ماتریس خطا هر یک از طبقه‌بندی کننده‌ها در جداول (۲ و ۳) نمایش داده شده‌اند. مطابق نتایج دقت تفکیک کلاس‌ها از یکدیگر با ماشین بردار پشتیبان حدود ۸۸ درصد است که

عددی قابل قبول و مناسب ارزیابی می‌شود. بالاترین دقت کاربر و تولیدکننده مربوط به کلاس گندم دیم است که حدود ۹۳٪ است. این موضوع نشان می‌دهد که گندم دیم از سایر کلاس‌ها تمایز بیشتری دارد. این در حالی است که بیشترین خطا در کلاس زراعت آبی مشاهده می‌شود. دقت کاربر و تولیدکننده کلاس زراعت آبی به ترتیب ۷۱٪ و ۷۸٪ محاسبه شد.

جدول ۲- ماتریس خطای روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان

کلاس	آیش	گندم دیم	زراعت آبی	جمع	دقت کاربر
آیش (خاک لخت)	۲۰۴۹۲	۱۱۴۸	۱۴۹۷	۲۳۱۳۷	٪۸۸
گندم دیم	۱۵۹۶	۴۳۰۷۴	۱۳۹۹	۴۶۰۶۹	٪۹۳
زراعت آبی	۱۴۸۶	۲۵۵۶	۹۹۸۶	۱۴۰۲۸	٪۷۱
جمع	۲۳۵۷۴	۴۶۷۷۸	۱۲۸۸۲	۸۳۲۳۴	
دقت کلی	٪۸۸.۶۰				
ضریب کاپا	۰.۸۰				
دقت تولیدکننده	٪۸۷	٪۹۲	٪۷۸		

همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌گردد تعداد پیکسل‌های گندم که به درستی توسط طبقه‌بندی انتخاب شده‌اند ۴۳۰۷۴ پیکسل از کل پیکسل‌های گندم (۴۶۰۶۹) است که با دقت ۹۳٪ انتخاب گردیده است؛ و تعداد ۱۵۹۶ پیکسل مربوط به پیکسل‌های گندم به نادرستی به آیش و تعداد ۱۳۹۹ پیکسل از آن به زراعت آبی اختصاص یافته است. این خطا نشان‌دهنده خطای آمیشن^۱ است. همچنین تعداد ۱۱۴۸ پیکسل از کلاس آیش به کلاس گندم دیم اختصاص پیدا کرده است در صورتی که در واقعیت گندم نبوده‌اند و ۲۵۵۶ پیکسل از کلاس زراعت آبی به کلاس گندم دیم اختصاص یافته است. این خطا نشان‌دهنده خطای کامیشن^۲ است. این خطاها می‌تواند به دلیل درست انتخاب نشدن داده‌های آموزشی و کنترلی برای هر کلاس باشد.

جدول ۳- ماتریس خطای روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال

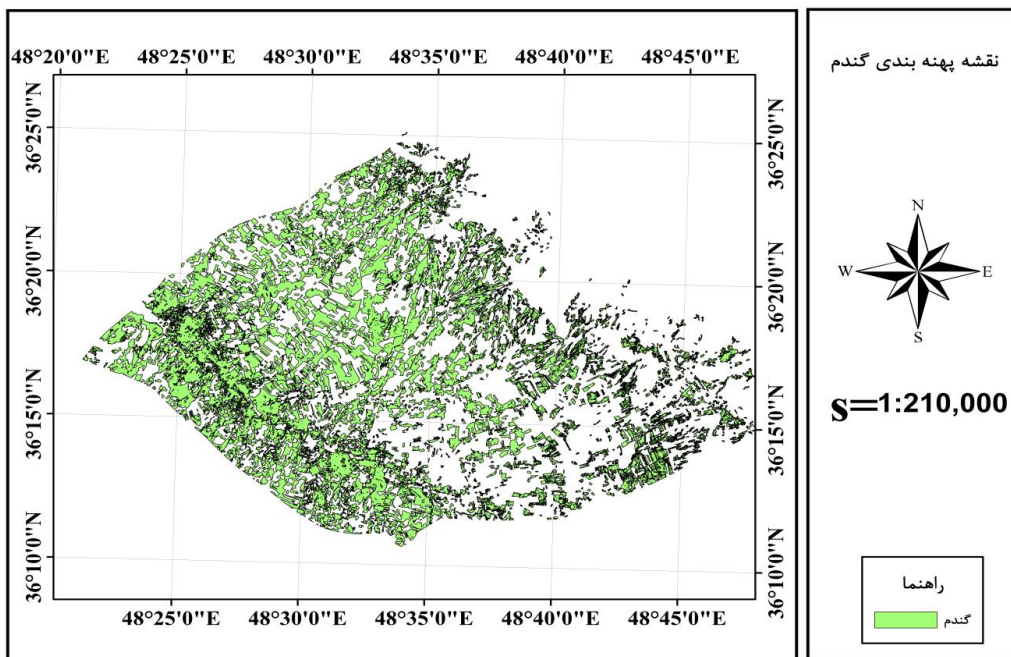
کلاس	آیش	گندم دیم	زراعت آبی	جمع	دقت کاربر
آیش (خاک لخت)	۲۰۲۴۶	۱۴۵۷	۱۶۵۴	۲۳۳۵۷	٪۸۷
گندم دیم	۱۵۹۴	۴۳۴۲۳	۱۵۵۸	۴۶۵۷۵	٪۹۳
زراعت آبی	۱۷۳۴	۱۸۹۸	۹۶۷۰	۱۳۳۰۲	٪۷۳
جمع	۲۳۵۷۴	۴۶۷۷۸	۱۲۸۸۲		
دقت کلی	٪۸۸.۵۴				
ضریب کاپا	۰.۷۹				
دقت تولیدکننده	٪۸۶	٪۹۳	٪۷۵		

همان‌طوری که در جدول (۳) مشاهده می‌گردد تعداد پیکسل‌های گندم دیم که به درستی توسط طبقه‌بندی انتخاب شده‌اند ۴۳۴۲۳ پیکسل از کل پیکسل‌های گندم (۴۶۵۷۵) است که با دقت ۹۳٪ انتخاب گردیده است؛ و تعداد ۱۵۹۴ پیکسل مربوط به پیکسل‌های گندم به نادرستی به آیش و تعداد ۱۵۵۸ پیکسل از آن به زراعت آبی اختصاص یافته است. همچنین تعداد ۱۴۵۷ پیکسل از کلاس آیش به کلاس گندم دیم اختصاص پیدا کرده است در صورتی که در واقعیت گندم نبوده‌اند و ۱۸۹۸ پیکسل از کلاس زراعت آبی به کلاس گندم اختصاص یافته است.

با توجه به اینکه دقت کلی و ضریب کاپای روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان برای منطقه مورد مطالعه بهتر از روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال است لذا برای به دست آوردن سطح زیر کشت این روش انتخاب گردیده است. در بسیاری از تحقیقات پیشین نیز روش ماشین بردار پشتیبان به‌عنوان روشی موفق در زمینه‌ی استخراج اراضی کشاورزی معرفی شده

1. Ommision
2. Commision

است. بریان^۱ و همکاران با مقایسه سه روش ماشین بردار پشتیبان، حداکثر احتمال و شبکه عصبی مصنوعی به تولید نقشه کاربری اراضی کشاورزی پرداختند که نتایج آن‌ها نشان داد روش ماشین بردار پشتیبان بهتر از دو روش دیگر است (بریان و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین نتایج مطالعه رحیم زادگان و پور غلام در شهرستان تربت حیدریه جهت شناسایی سطح زیر کشت زعفران نشان داد که روش ماشین بردار پشتیبان با دقت کلی ۹۵٪ و ضریب کاپای ۰/۹۰ روش قابل اعتمادی است (رحیم زادگان و پور غلام، ۱۳۹۵). پس از به دست آوردن نتایج طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان، خروجی به صورت برداری درآمده و ذخیره شد. شکل (۷) پلی گون‌های گندم استخراج شده از روش پیشنهادی را نمایش می‌دهد. براساس نتایج به دست آمده، سطح زیر کشت گندم دیم برابر ۲۲۶۸۵ هکتار برآورد شد.



شکل ۷- نقشه گندم دیم به دست آمده از روش ماشین بردار پشتیبان

برای محاسبه میزان تولید سالانه محصول گندم نیاز به "متوسط عملکرد محصول" هست که داده‌های آن از صندوق بیمه کشاورزی استان اخذ گردید. متوسط عملکرد محصول گندم برای منطقه مورد مطالعه ۱/۵۴ تن در هر هکتار هست. با ضرب متوسط عملکرد محصول در سطح زیر کشت به دست آمد از نقشه طبقه‌بندی شده میزان تولید سالانه به دست می‌آید.

$$\text{میزان تولید گندم در سال زراعی } ۱۳۹۷ - ۱۳۹۶ = ۲۲۶۸۵ \times ۱/۵۴ = ۳۴۹۳۵ \text{ تن}$$

نتایج سطح زیر کشت به دست آمده از تحقیق با میزان سطح زیر کشت که در سالنامه سازمان جهاد کشاورزی استان برای سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ به ثبت رسیده است مقایسه شد که نتایج ۱۸٪ اختلاف را نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از دو عامل باشد. اولاً میزان سطح زیر کشت در سالنامه‌های جهاد کشاورزی براساس خود اظهاری خود کشاورزان تهیه شده است (۲۷۵۷۰ هکتار) که معمولاً به خاطر گرفتن کود شیمیایی و دیگر نهاده‌های کشاورزی سطح زیر کشت را بالاتر از میزان واقعی اعلام می‌نمایند. ثانیاً به دلیل خطای موجود در طبقه‌بندی که ۱۲٪ پیکسل‌ها را نتوانسته به درستی طبقه‌بندی نماید. با توجه به اینکه در حال حاضر هیچ منبعی جهت رد یا تأیید خطا وجود ندارد، این روش می‌تواند بهترین روش حساب شود. برای مقایسه میزان تولید، خریدهای گندم سازمان تعاونی روستایی در سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ مآخذ قرار گرفت که میزان ۱۷٪ انحراف دارد و این دو دلیل می‌تواند داشته باشد اولاً بعضی از کشاورزان ممکن است برای مصرف خود مقداری از محصول را نگه‌دارند. ثانیاً برخی از کشاورزان محصول خود را به سازمان تعاون و روستایی نمی‌فروشند و به خریداران خصوصی که در خرید و فروش گندم کار هستند عرضه می‌کنند.

1. Brian

نتیجه گیری

در این تحقیق سعی شده است با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با به‌کارگیری دو روش طبقه‌بندی نظارت‌شده به تولید آمار و اطلاعات کشاورزی پرداخته شود. با توجه به نتایج این مطالعه در صورت انتخاب تصاویر در زمانه‌ای مناسب با توجه به مراحل رشد گیاه می‌توان تصاویر را برای تفکیک محصولات زراعی و تهیه پراکندگی و برآورد سطح زیر کشت با دقت مناسبی بکار برد با توجه به نتایج هر دو روش ماشین بردار پشتیبان و حداکثر احتمال روش‌های مناسبی برای استخراج سطح زیر کشت در منطقه مورد مطالعه هستند. در این تحقیق برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی از ماتریس خطا استفاده شده است. نتایج ارزیابی نشان داد که روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان نسبت به روش حداکثر احتمال دقت بالاتری برای منطقه مورد مطالعه دارد؛ بنابراین برای استخراج سطح زیر کشت روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان انتخاب و پیشنهاد شد. میزان سطح زیر کشت به‌دست آمده از روش طبقه‌بندی پیشنهادی نسبت به میزان به‌دست‌آمده از نقشه کاداستر زراعی ۱۸٪ کمتر برآورد شده است؛ یعنی با دقت بیش از ۸۲٪ از این روش طبقه‌بندی می‌توان برای برآورد سطح زیر کشت محصولات منطقه استفاده نمود. مقایسه میزان تولید محصول گندم محاسبه شده از تصاویر با میزان واقعی تولیدی که آمار جهاد کشاورزی به‌دست‌آمده است نشان‌دهنده ۱۷٪ انحراف است. پیشنهاد می‌شود برای یک سال زراعی از روش شناسایی تغییرات در دو زمان اوج سبزیگی و زمان شروع برداشت گندم استفاده شده و شاخص‌های گیاهی محاسبه و با روش طبقه‌بندی پیشنهادی مقایسه شوند. همچنین بهتر است با استفاده از شاخص‌های گیاهی موجود و ایجاد رابطه بین آن‌ها و عملکرد گندم و روش رگرسیون خطی، میزان تأثیر هر کدام از شاخص‌ها بررسی و تابعی برای پیش‌بینی عملکرد گندم مشخص شده و با عملکرد واقعی مقایسه شود.

منابع

- احسانی، امیر هوشنگ؛ یاری، شاکر (۱۳۹۷). تعیین روش بهینه طبقه‌بندی و نقشه‌سازی کاربری/پوشش اراضی با مقایسه الگوریتم‌های شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای (مطالعه موردی: تالاب بین‌المللی هامون). فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۲۰، ۱۹۳-۲۰۸.
- دانشور کاخکی، محمود؛ دهقانپان، سیاوش؛ هاتف، حکیمه؛ سروری، علی‌اکبر (۱۳۸۶). بررسی نحوه تعیین قیمت تضمینی گندم و پیش‌بینی آن. علوم و صنایع کشاورزی، ۲۱(۲) (ویژه اقتصاد و توسعه کشاورزی).
- رحیم زادگان، مجید؛ پور غلام، مصطفی (۱۳۹۵). تعیین سطح زیر کشت گیاه زعفران با استفاده از تصاویر لندست (مطالعه موردی: شهرستان تربت‌حیدریه). کاربرد سنجش‌ازدور و GIS در علوم منابع طبیعی، دوره ۷، شماره ۳، صفحه ۹۷ تا ۱۱۵.
- ریاحی، وحید؛ ضیائی‌ان فیروزآبادی، پرویز؛ عزیز پور، فرهاد؛ دارویی، پرستو (۱۳۹۷). تعیین و بررسی سطح زیر کشت محصولات زراعی در ناحیه لنجانان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۹، ۱۴۷-۱۶۹.
- عباس زاده تهرانی، نادیا؛ بهشتی فر، محمدرضا؛ مربی، محمد (۱۳۹۰). برآورد سطح زیر کشت محصول در استان قزوین با به‌کارگیری تصاویر چند زمانه IRS-LISS III. پژوهش‌های محیط‌زیست، سال ۲، شماره ۳، صفحه ۸۷ تا ۹۶.
- علیپور، فریده؛ آقاخانی، محمدحسین؛ عباسپور فرد، محمدحسین؛ سپهر، عادل (۱۳۹۳). تفکیک محدوده و تخمین سطح زیر کشت محصولات کشاورزی به کمک تصاویر ماهواره‌ای ETM⁺ (مطالعه موردی: مزرعه نمونه آستان قدس رضوی)، نشریه ماشین‌های کشاورزی، ۲(۲): ۲۴۴-۲۵۴.
- علیزاده، پریسا؛ کامکار، بهنام؛ شتایی جویباری، شعبان؛ کاظمی، حسین (۱۳۹۷). برآورد تغییرات سطح زیر کشت گندم و سویا با استفاده از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای در غرب استان گلستان، نشریه پژوهش‌های کاربردی زراعی، ۲۱(۲): ۴۱-۶۱.
- فتحی زاد، حسن؛ صفری، عطا؛ بازگیر، مسعود؛ خسروی، غلامرضا (۱۳۹۵). ارزیابی و مقایسه روش‌های ماشین بردار پشتیبان با کرنل‌های خطی، چندجمله‌ای و پایه شعاعی با شبکه عصبی مصنوعی جهت طبقه‌بندی کاربری اراضی، تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۲۳، ۷۲۹-۷۴۳.
- کامکار، بهنام؛ دشتی مرویلی، محمد؛ کاظمی، حسین. (۱۳۹۸). تفکیک اراضی زیر کشت برنج و سویا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ در الگوهای کاشت تابستانه جهت تحلیل تغییرات سطح زیر کشت دو محصول در چهار حوضه آبخیز استان گلستان، مجله پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک، ۲۶، ۱۵۱-۱۶۷.
- Asmala, A. (2012). Analysis of maximum likelihood classification on multispectral data. *Applied Mathematical Sciences*, 6, 6425-6436
- Bernstein, L.S., Jin, X., Gregor, B., & Adler-Golden, S.M. (2012). Quick Atmospheric Correction Code: Algorithm Description and Recent Upgrades. *Optical Engineering*, 51, 111719.

- Bocco, M., Ovando, G., Sayago, S., & Willington, E. (2007). Neural network models for land cover classification from satellite images. *Agriculture Technica*, 67, 414-421
- Brian W, S., Chen, Q., & Borger, M. (2011). A comparison of classification techniques to support land cover and land use analysis in tropical coastal zones. *Applied Geography*, 31, 525-532.
- Clevers, J.G., & Gitelson, A.A. (2013). Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and-3. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23, 344-351
- Clevers, J.G., Kooistra, L., & Van den Brande, M.M. (2017). Using Sentinel-2 data for retrieving LAI and leaf and canopy chlorophyll content of a potato crop. *Remote Sensing*, 9, 405.
- Dutta, S., Patel, N., Medhavy, T., Srivastava, S., Mishra, N., & Singh, K. (1998). Wheat crop classification using multirate IRS LISS-I data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 14 -26, 7.
- LI, W.-g., Hua, L., & ZHAO, L.-h. (2011). Estimating rice yield by HJ-1A satellite images. *Rice Science*, 18, 142-147.
- Lobell, D.B., Asner, G.P., Ortiz-Monasterio, J.I., & Benning, T.L. (2003). Remote sensing of regional crop production in the Yaqui Valley, Mexico: estimates and uncertainties. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 94, 205-220.
- Mantero, P., Moser, G., & Serpico, S.B. (2005). Partially supervised classification of remote sensing images through SVM-based probability density estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43, 559-570.
- Mountrakis, G., Im, J., & Ogole, C. (2011). Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66, 247-259.
- Otukei, J.R., & Blaschke, T. (2010). Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, S27-S31.
- Pontius Jr, R.G., & Millones, M. (2011). Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 32, 4407-4429.
- Suykens, J.A., & Vandewalle, J. (1999). Chaos control using least- squares support vector machines. *International journal of circuit theory and applications*, 27, 605-615.
- Szuster, B.W., Chen, Q., & Borger, M. (2011). A comparison of classification techniques to support land cover and land use analysis in tropical coastal zones. *Applied Geography*, 31, 525-532.