

توسعه عمودپرواز بدون سرنشین طیف‌نگار برای تصویربرداری هوایی اراضی کشاورزی

نیکروز باقری* - استادیار پژوهش مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۲۹ تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۰۶/۱۶

چکیده

به منظور کاربرد سامانه سنجش‌ازدور هوایی برای پایش و مدیریت اراضی و باغات کشاورزی، عمودپرواز بدون سرنشین طیف‌نگاری (گشتبان) توسعه داده شد. این سامانه شامل دو بخش اصلی هوایی و زمینی است. بخش هوایی شامل اجزای مکانیکی پرواز، بوردهای پایش و کنترل، سامانه OSD، سامانه موقعیت‌یابی جهانی، باتری لیتیوم- پلیمر قابل شارژ، دوربین چندطیفی و سامانه تثبیت دوربین است. بخش زمینی نیز شامل رادیوکنترل، ایستگاه گیرنده زمینی و نرم‌افزار پایش است. ارتباط بخش‌های هوایی و زمینی به صورت دورسنجی با برد یک کیلومتر است. به منظور ارزیابی عمودپرواز، چندین مرحله پرواز انجام گرفت و قدرت مانورپذیری و پایداری دستگاه بررسی شد. همچنین تصاویر چندطیفی برداشت‌شده پردازش و کیفیت آنها ارزیابی شد. براساس نتایج این پژوهش، توان تفکیک زمینی در ارتفاع پروازی ۲۵۰-۱۰ متر برابر با ۹۵-۳/۶ میلی‌متر در پیکسل به دست آمد. همچنین صحت کلی نقشه طبقه‌بندی شده ۹۴ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۰ به دست آمد. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد عمودپرواز بدون سرنشین طیف‌نگار قادر به تصویربرداری هوایی چندطیفی با توان تفکیک مکانی زیاد است.

کلیدواژه‌ها: پرنده بدون سرنشین، سنجش‌ازدور، دوربین چندطیفی، طیف‌نگار، کشاورزی دقیق.

مقدمه

امروزه به کارگیری روش‌های نو برای پایش و مدیریت اراضی کشاورزی به منظور ارتقای کمی و کیفی محصولات، کاهش هزینه‌های تولید و افزایش بهره‌وری ضروری است. از جمله فناوری‌هایی که به منظور پایش اراضی کشاورزی و منابع طبیعی استفاده می‌شود، سنجش‌ازدور است. این فناوری با کاربرد تصاویر ماهواره‌ای و هوایی و تجزیه و تحلیل آنها، قادر به شناسایی و پیش‌بینی تغییرات در مزارع و اعمال مدیریت دقیق است (استافورد، ۲۰۰۰؛ وارن و مترنیخت، ۲۰۰۵). تصاویر ماهواره‌ای با وجود قابلیت‌های فراوان، محدودیت‌هایی دارد که کاربرد آنها را برای پژوهش‌های کشاورزی مشکل می‌کند؛ از جمله زمان‌بر بودن تهیه تصاویر و قیمت زیاد آنها، محدود بودن تعداد برداشت تصویر برخی از ماهواره‌ها در طول فصل رشد گیاه، نیاز به تصحیحات جوی، مشکل بودن همزمانی برداشت تصویر با نمونه‌برداری زمینی و

به‌طور کلی اندک بودن توان تفکیک طیفی، زمانی و مکانی (استافورد، ۲۰۰۰؛ موران و همکاران، ۱۹۹۷). تصویربرداری هوایی به‌طور معمول با استفاده از هواپیماها و بالگردهای سرنشین‌دار صورت می‌گیرد که ضمن زیاد بودن هزینه‌های تصویربرداری و پیچیدگی سامانه‌ها و نیاز به باند پرواز، امکان اجرای عملیات در زمان و مکان مورد نظر نیز محدود است (موران و همکاران، ۱۹۹۷؛ زانگ و همکاران، ۲۰۰۶). از همین رو، در چند سال اخیر، به طراحی سامانه‌های سنجش‌ازدور بدون سرنشین در ارتفاع کم^۱ به‌مثابه رویکردی نو برای تهیه داده‌های زمینی توجه شده است (سووین و همکاران، ۲۰۰۷). این سامانه‌ها قادر به تصویربرداری با توان زیاد تفکیک مکانی^۲ برای مدیریت و پایش محصول به‌ویژه در مزارع کوچک (لیلانگ و همکاران، ۲۰۰۸) و تهیه تصاویر زمان-واقعی^۳ با هزینه کم‌اند (هانت و همکاران، ۲۰۰۵؛ نیبکر و همکاران، ۲۰۰۸؛ رانگو و همکاران، ۲۰۰۹؛ هاردین و هاردین، ۲۰۱۰؛ یانگ و تیان، ۲۰۱۱). در واقع، تصویربرداری هوایی با پرنده‌های بدون سرنشین^۴، پلی میان مشاهدات زمینی و تصاویر سنجش‌ازدور هواپیماها و ماهواره‌هاست (لالی‌برت و همکاران، ۲۰۰۶). تحولات اخیر در زمینه تصویربرداری و پردازش تصاویر، شرایط مناسبی را برای تشخیص ویژگی‌های محصول با توجه به تحلیل بازتاب طیفی پوشش گیاهی و خاک به‌وسیله تصاویر هوایی به‌وجود آورده است (برنی و همکاران، ۲۰۰۹؛ رانگو و همکاران، ۲۰۰۹).

در چند سال اخیر، تنی چند از پژوهشگران کاربرد پرنده‌های بدون سرنشین را در کشاورزی بررسی کرده‌اند. سوگیورا و همکاران (۲۰۰۲) از یک بالگرد بدون سرنشین برای تهیه نقشه محصول استفاده کردند. فوکاگاوا و همکاران (۲۰۰۳) یک بالگرد کنترل‌ازراه‌دور را برای پایش رشد محصول با استفاده از دوربین‌های چندطیفی توسعه دادند. هرویتز و همکاران (۲۰۰۴) از یک پرنده بدون سرنشین خورشیدی برای جمع‌آوری تصاویر با دوربین چندطیفی برای تعیین درجه رسیدگی قهوه استفاده کردند. جمع‌آوری اطلاعات زمینی رابطه مثبتی بین درجه روشنی پوشش گیاهی قهوه و عملکرد آن نشان داد. هانت و همکاران (۲۰۰۵) از یک پرنده بدون سرنشین همراه با دوربین‌های مرئی و مادون قرمز برای پژوهش‌های کشاورزی استفاده کردند. این سامانه امکان پایش وضعیت محصول را در مراحل اولیه رشد نشان داد. زو و همکاران (۲۰۱۰) از یک بالگرد بدون سرنشین کنترل‌ازراه‌دور برای مدیریت علف‌های هرز بهره بردند. یانگ و تیان (۲۰۱۱) از یک بالگرد خودکار سبک همراه با دوربین برای تصویربرداری از چمن استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که سامانه یادشده روشی مطمئن برای سنجش مزارع کشاورزی با توان زیاد تفکیک مکانی و زمانی است. پریمیکیو و همکاران (۲۰۱۲) از یک عمودپرواز برای مدیریت تاکستان با استفاده از تحلیل بازتاب طیفی پوشش گیاهی استفاده کردند. والتنه و همکاران (۲۰۱۲) و نیمار و همکاران (۲۰۱۲) نیز از یک عمودپرواز چهارموتوره برای پژوهش‌های کشاورزی استفاده کردند.

باتوجه به محدودیت‌های تأمین و تهیه تصاویر ماهواره‌ای و هوایی در کشور و ضرورت کاربرد فناوری سنجش‌ازدور در حوزه کشاورزی به‌منظور پایش منابع کشاورزی و مدیریت تولید، هدف از این پژوهش توسعه یک عمودپرواز بدون

1. Low altitude Remote Sensing
2. High Spatial Resolution
3. Real-time
4. Unmanned aerial Vehicle (UAV)

سرنشین^۱ طیف‌نگار با هدف تصویربرداری هوایی از مزارع و باغ‌های کشاورزی با توان زیاد تفکیک زمانی و مکانی است. این فناوری آینده‌فعالیت‌های کشاورزی را تحت تأثیر قرار داده، با فراهم آوردن امکان پایش محصولات زراعی و باغی در مراحل مختلف رشد، امکان تخمین عملکرد محصولات، تشخیص خسارات، تنش‌ها و آفات و بیماری‌های گیاهی و به‌طور کلی مدیریت موضعی را به‌وجود می‌آورد و ضمن کاهش ضایعات، زمینه افزایش کمی و کیفی محصول و ارتقای بهره‌وری در بخش کشاورزی را فراهم می‌کند.

مواد و روش‌ها

عمودپرواز این پژوهش شامل دو بخش اصلی هوایی^۲ و زمینی^۳ است؛ بخش هوایی شامل اجزای مکانیکی پرواز، بوردهای پایش و کنترل، سامانه موقعیت‌یابی جهانی^۴، دوربین، سامانه تثبیت دوربین^۵ و باتری لیتیوم- پلیمر قابل شارژ است. بخش زمینی برای هدایت و کنترل بخش هوایی بوده، رابط کارور و بخش هوایی است. اجزای اصلی این بخش عبارت‌اند از: رادیوکنترل^۶ هشت فرکانسه، ایستگاه زمینی، سامانه پایش وضعیت پرواز و رایانه پرواز همراه با نرم‌افزار پایش و کنترل. اجزای مکانیکی پرواز شامل بدنه، هشت موتور و سامانه کنترل سرعت، ملخ‌ها، قفل‌کننده‌های ملخ، بازوها، پایه‌های فرود و اتصال بار و دیگر اتصالات است. بخش‌های اصلی دستگاه برای داشتن استحکام و انعطاف‌پذیری لازم در جذب ارتعاشات و ضربات از جنس فیبر کربن ساخته شد. از موتورهای الکتریکی DC بدون جاروبک برای تبدیل انرژی الکتریکی ذخیره‌شده در باتری به انرژی مکانیکی برای تولید نیروی بالابرنده استفاده شد. ملخ‌های عمودپرواز - متناسب با دور موتور، توان خروجی و وزن پرنده- از دو نوع سبک ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد با اندازه و گام یکسان انتخاب شد. از قفل‌کننده ملخ‌ها به‌منظور ثابت‌نگه‌داشتن آنها در داخل محور موتورها استفاده شد. پایه فرود از جنس پلاستیک انعطاف‌پذیر انتخاب شد تا از وارد آمدن ضربه و لرزش در هنگام فرود و برخاستن پرنده جلوگیری کند. این سامانه دارای ۲ کیلوگرم (با باتری) وزن، ۷۸ سانتی‌متر طول و عرض در حالت باز بودن بازوها و ۲۹ سانتی‌متر ارتفاع است. بوردهای پایش و کنترل شامل سامانه اندازه‌گیری AHRS و کنترل‌کننده^۷ PID است. کنترل پرواز وظیفه اتخاذ تصمیم‌های کنترلی براساس سرعت زاویه‌ای در سه محور و خروجی حسگر ارتفاع و دستورهای خلبان را دارد و متناسب با این تصمیم‌های، دستور خروجی را به موتورها ارسال می‌کند. وظیفه دیگر این واحد، ارسال اطلاعات دریافتی از راه سامانه دورسنجی و ذخیره‌سازی آنهاست. سامانه سنجش ولتاژ و باتری نیز به کنترل‌کننده متصل شده، از راه چراغ‌های هشدار، خلبان را از وضعیت باتری آگاه می‌سازد. سامانه اندازه‌گیری AHRS^۸ شامل ژيروسکوپ^۹ و شتاب‌سنج^{۱۰}

1. VTOL UAV
2. On-board
3. Ground-Station
4. Global Positioning System (GPS)
5. Camera Mount
6. Radio Control (RC)
7. Proportional Integral Differential
8. Attitude and Heading Reference System
9. Gyroscope
10. Accelerometer

سه محوره برای اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای و شتاب خطی پرنده حول سه محور؛ مغناطیس‌سنج^۱ برای سنجش میدان مغناطیسی و اندازه‌گیری بردار میدان مغناطیسی زمین برای تعیین زاویه Yaw؛ و حسگر فشار بارومتریک^۲ برای اندازه‌گیری ارتفاع از سطح دریاست. کنترل‌کننده PID با استفاده از داده‌های ورودی، ضرایب کنترلی K_p ، K_i و K_d در هر سه درجه آزادی پرنده (زاویه‌های Pitch، Roll و Yaw) را محاسبه می‌کند؛ سپس مقداردهی به موتورها انجام می‌گیرد. از ماژول GPS برای دریافت اطلاعات موقعیت پرنده استفاده شد. دوربین استفاده‌شده در این سامانه از نوع مرئی و چندطیفی^۳ است. در این پژوهش، از یک دوربین چندطیفی مدل ADC-Micro محصول شرکت تتراکم^۴ با محدوده طیفی ۹۲۰-۵۲۰ نانومتر (شامل باندهای سبز در محدوده طیفی ۶۰۰-۵۲۰ نانومتر، قرمز در محدوده طیفی ۶۹۰-۶۳۰ نانومتر و مادون قرمز نزدیک در محدوده طیفی ۹۲۰-۷۶۰ نانومتر) استفاده شد. این دوربین دارای حسگر CMOS ۳/۲ مگاپیکسل، ولتاژ ۱۲-۶ ولت و کارت حافظه با ظرفیت ۲ گیگابایت است. از سامانه تثبیت دوربین^۵ فیکرکرنی (مناسب با ابعاد و مشخصات دوربین استفاده‌شده) با دو عدد سروموتور برای حمل دوربین و کاهش لرزش‌ها و ارتعاشات وارده به دوربین استفاده شد. این سامانه امکان تغییر زاویه دوربین (زاویه‌های صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه) و کنترل جهت آن در حین پرواز از ایستگاه گیرنده زمینی را فراهم می‌کند. به دلیل زیاد بودن موتورها و جریان زیاد آنها، از باتری‌های لیتیوم-پلیمر سه سلولی با جریان دهی ۵۰۰۰ میلی‌آمپر بر ساعت و ولتاژ ۱۱/۱ ولت استفاده شد. این باتری دارای سرعت زیادی در شارژ بوده، قادر به تأمین یک جریان پیوسته خروجی در حین پرواز است.

بخش زمینی عمودپرواز بدون سرنشین شامل ایستگاه زمینی، رادیوکنترل، سامانه پایش وضعیت پرواز و رایانه پرواز همراه با نرم‌افزار پایش و کنترل است. وظایف اصلی ایستگاه زمینی مشاهده موقعیت پرنده و شاخص‌های مهم پروازی، مشاهده و تنظیم شاخص‌های اولیه پرواز، مشاهده اطلاعات ذخیره‌شده و پیگیری لحظه‌به‌لحظه عملیات است. برای ارسال بی‌درنگ تصاویر به ایستگاه زمینی از یک دوربین CCD و برای حک اطلاعات روی تصویر از سامانه OSD^۶ استفاده شد. از رادیوکنترل PCM^۷ هشت‌کاناله با بسامد کاری ۲/۴ گیگاهرتز برای ارسال دستورهای خلبان استفاده شد. این گیرنده در مواقع قطع ارتباط با فرستنده یا ضعیف شدن باتری گیرنده، براساس دستوری عمل می‌کند که از پیش برای آن تعریف شده است.

سامانه دورسنجی^۸ (با باند فرکانسی ۹۰۰ مگاهرتز) به منظور برقراری ارتباط بخش‌های هوایی و زمینی با یکدیگر در نظر گرفته شد. این سامانه وظیفه ارسال بی‌درنگ اطلاعات پروازی اعم از وضعیت اطلاعات ورودی و خروجی، مقادیر حسگرها، مقدار مصرف باتری، موقعیت پرنده و همچنین ذخیره داده‌ها و تصویر را دارد. برای سامانه دورسنجی سه لینک ارتباطی در نظر گرفته شد که شامل رادیوکنترل برای هدایت عمودپرواز براساس دستورهای خلبان، ارسال برخط داده‌ها و

1. Magnetometer
2. Barometer
3. Multispectral
4. Tetracam
5. Camera Mount
6. On Screen Display
7. Pulse Code Modulation
8. Telemetry

برقراری ارتباط بین پرنده و ایستگاه زمینی و ارسال ویدیویی بی‌سیم^۱ تصاویر برخط از موقعیت تصویربرداری به ایستگاه گیرنده زمینی با استفاده از یک دوربین CCD است.

برای ارزیابی عملکرد عمودپرواز بدون سرنشین، چند مرحله تصویربرداری از مزرعه تحقیقاتی «مؤسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر» واقع در محمدمشهر کرج با مختصات جغرافیایی ۳۵°۴۷' طول شمالی و ۵۰°۵۵' عرض شرقی در ساعت ۱۰ صبح تا ۱۲ ظهر (در تاریخ ۲۶ اسفند ۹۱، ۲۲ مرداد ۹۲، ۱۲ آذر ۹۲، ۱ اردیبهشت ۹۳، ۱۱ خرداد ۹۳ و ۲۵ شهریور ۹۳) انجام گرفت و شاخص‌هایی از جمله مداومت پروازی^۲، بیشینه وزن محموله قابل حمل^۳، کمینه و بیشینه سرعت پرنده و بیشینه سرعت باد برای پرواز امن پرنده، دامنه پرواز، عملکرد سامانه تثبیت دوربین، توان تفکیک مکانی^۴ و توان تفکیک زمانی^۵ ارزیابی شد. همچنین تصاویر برداشت‌شده (در تاریخ ۱۲ آذر ۹۲ و ۱۱ خرداد ۹۳) پردازش و شاخص NDVI محاسبه و نقشه طبقه‌بندی پوشش گیاهی استخراج شد. با استفاده از جدول ماتریس خطا و صحت رده‌های طبقه‌بندی و مقدار ضریب کاپا، کیفیت تصاویر برداشت‌شده ارزیابی شد. روش اجرای آزمون‌ها به شرح زیر است:

- قدرت مانورپذیری و پایداری پرنده: از راه اعمال شاخص‌های اولیه پروازی و ضرایب کنترلی مورد نظر خلبان در مسیر حرکتی مشخصی و بررسی عملکرد سامانه در تأمین آن زاویه‌ها به وسیله نرم‌افزار ایستگاه زمینی؛
- مداومت پروازی: ثبت مدت زمان پرواز پرنده (با کورنومتر) در حال استفاده از باتری کاملاً شارژ تا زمان تخلیه باتری؛

- بیشینه وزن محموله قابل حمل^۶: با اتصال وزنه‌های مختلف و سپس پرواز پرنده و ارزیابی پایداری آن؛
- کمینه و بیشینه سرعت پرنده: پرواز پرنده در سرعت‌های حرکتی متفاوت (سرعت پرنده به صورت هم‌زمان در ایستگاه زمینی مشاهده می‌شود) و بررسی نحوه عملکرد پرنده؛ همچنین بیشینه سرعت باد برای پرواز ایمن پرنده با استعلام سرعت باد منطقه از اداره هواشناسی و تعیین تجربی باتوجه به عملکرد پرنده است؛
- دامنه پرواز: بیشینه و کمینه ارتفاع پرواز با استفاده از ثبت داده‌های مربوط به بارومتر (برحسب متر)؛
- عملکرد سامانه تثبیت دوربین: از راه تغییر دستی زاویه سامانه تثبیت و مشاهده عملکرد سروموتورها و همچنین ارزیابی تصاویر برداشت‌شده؛

- قدرت تفکیک مکانی: به صورت اندازه‌گیری متر در هر پیکسل در ارتفاع مشخصی از پرواز بر روی زمین و تصویر؛

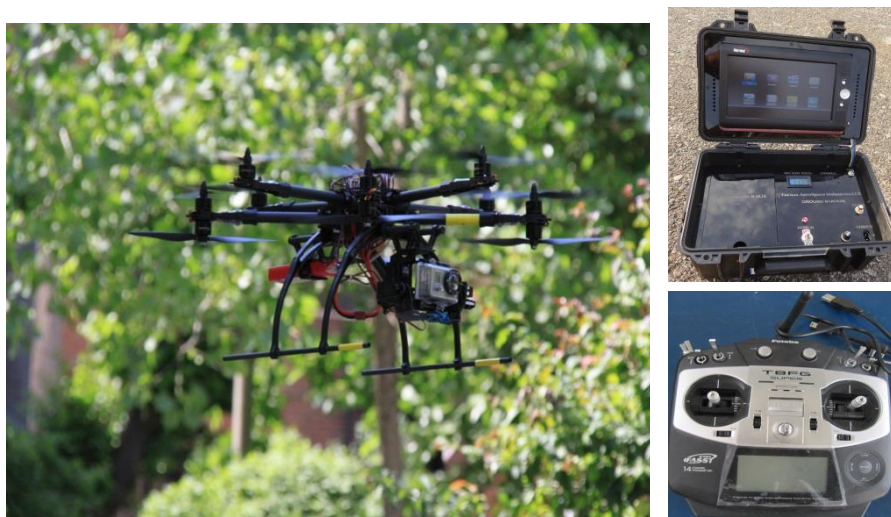
- قدرت تفکیک زمانی: از راه شمارش تعداد تصاویر برداشت‌شده در فاصله زمانی مشخص؛

- ارزیابی کیفیت تصاویر برداشت‌شده: از راه پردازش‌های مختلف بر روی تصاویر و تجزیه و تحلیل طیفی تصاویر با

استفاده از نرم‌افزارهای ENVI4.5 و PW2.

1. Wireless Video Transmitter
2. Endurance
3. Weight Payload
4. Spatial Resolution
5. Temporal Resolution
6. Weight Payload

همچنین نقشه شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده^۱ برای تصاویر تهیه شد. برای طبقه‌بندی نظارت شده پوشش گیاهی از روش بیشترین شباهت استفاده شد. این روش طی سه مرحله صورت می‌پذیرد که عبارت است از: محاسبه بردار میانگین، واریانس و همبستگی برای رده‌ها در نمونه‌های آموزشی؛ لحاظ کردن پراکندگی پیکسل‌های اطراف بردار میانگین از راه تابع احتمالات و معرفی کل داده‌ها به رده‌هایی که بیشترین احتمال عضویت در آن رده را داشته باشند؛ و در پایان، طبقه‌بندی پس از ارزیابی احتمال تعلق هر پیکسل به هر یک از رده‌های تعریف شده. به منظور ارزیابی دقت طبقه‌بندی، ماتریس خطا و ضریب کاپا محاسبه و صحت تفکیک رده‌ها تعیین شد. همچنین، نتایج با نقشه واقعیت زمینی با استفاده از نوزده نقطه کنترل به روش تصادفی ساده به مثابه نمونه‌های زمینی مقایسه شد. بخش‌های هوایی و زمینی عمودپرواز بدون سرنشین طیف‌نگار در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. بخش هوایی و زمینی عمودپرواز بدون سرنشین طیف‌نگار

یافته‌های پژوهش

نتایج پژوهش شامل ارزیابی عملکرد عمودپرواز بدون سرنشین طیف‌نگار و همچنین ارزیابی و پردازش تصاویر چندطیفی برداشت شده به شرح زیر است:

- براساس نتایج آزمون بررسی زمان مداومت پروازی پرنده، میانگین مداومت پروازی در حال حمل دوربین و در حال روشن بودن همه قطعات الکترونیکی سامانه از جمله سامانه موقعیت‌یابی جهانی، دوربین CCD، دوربین چندطیفی و سامانه OSD برابر با ۱۰ دقیقه به دست آمد.
- براساس نتایج آزمون‌های پروازی انجام گرفته، وزن محموله قابل حمل سامانه (اعم از باتری و دوربین) حداکثر برابر با یک کیلوگرم به دست آمد.

1. Normilized Difference Vegetation Index (NDVI)
2. Supervised Classification

- براساس آزمون‌های انجام‌گرفته، محدوده سرعت حرکتی که امکان انجام دادن عملیات در آن وجود دارد، ۴۰-۰ کیلومتر در ساعت به‌دست آمد. سرعت‌های بیشتر پرنده، کیفیت تصاویر اخذشده را تحت تأثیر قرار می‌داد. همچنین، نتایج آزمون‌های پروازی نشان داد که بیشینه سرعت باد برای پرواز ایمن پرنده در شرایط باد ثابت ۱۵ کیلومتر در ساعت بود؛ به‌عبارت‌دیگر، در سرعت‌های پروازی بیشتر، پایداری پرنده کاهش می‌یافت.
- نتایج آزمون‌ها نشان داد باتوجه‌به برد یک کیلومتری سامانه دورسنجی، امکان تصویربرداری تا شعاع یک کیلومتر وجود دارد. از طرفی، در کنترل دستی عمودپرواز، دامنه افقی پرواز بسته به دید چشمی خلبان، شفافیت هوا و شرایط جوی، در محدوده ۲۰۰-۵۰ متر محدود می‌شود. بنابراین، برای تصویربرداری بهتر (به‌ویژه در روش کنترل دستی پرنده) لازم است خلبان در مکان مشخصی ثابت‌نماند و همزمان با پرنده حرکت کند. استفاده از سامانه‌های خلبان خودکار برای جبران این محدودیت و افزایش دامنه پرواز بسیار مؤثر است. دامنه ارتفاعی پرواز نیز در شرایط مختلف متفاوت است و به‌طور کلی، براساس نتایج با هدف تصویربرداری هوایی از مزارع در شرایط باد کم، ارتفاع پروازی ۲۰۰ متر و در شرایط باد زیاد، ارتفاع پروازی ۵۰ متر توصیه می‌شود. همچنین، نتایج آزمایش تغییر دستی زاویه قرارگیری عمودپرواز نسبت به زمین و مشاهده تغییر زاویه سامانه حاکی از آن بود که زاویه قرارگیری سامانه تثبیت‌دوربین متناسب با تغییر وضعیت استقرار عمودپرواز تغییر می‌یافت؛ به‌طوری‌که لنز دوربین همواره در جهت تنظیم‌شده قرار می‌گرفت.
- باتوجه‌به عرض تصویر و ارتفاع پرواز، توان تفکیک زمینی در ارتفاع پروازی از ۱۰ تا ۲۵۰ متر به‌دست آمد که در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. توان تفکیک زمینی در ارتفاع پروازی مختلف

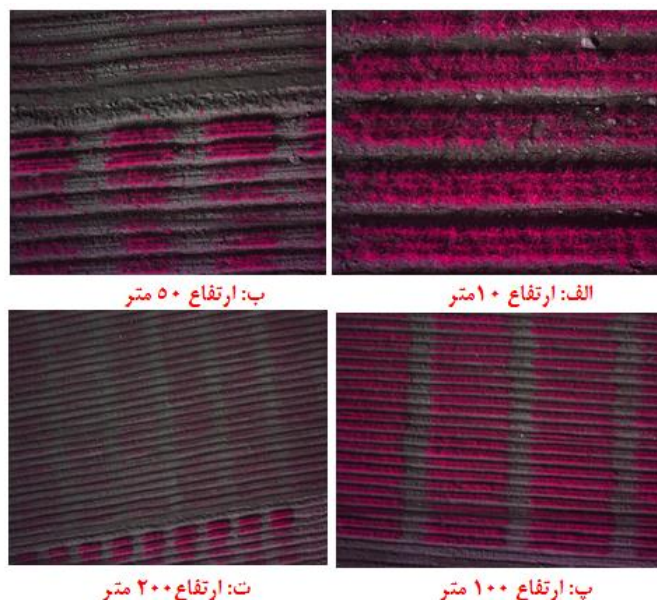
ردیف	ارتفاع پرواز (متر)	عرض تصویر (متر)	توان تفکیک (میلی‌متر در هر پیکسل)
۱	۱۰	۷/۴	۳/۶
۲	۲۰	۱۵/۲	۷/۴
۳	۳۰	۲۳/۰	۱۱/۲
۴	۴۰	۳۰/۸	۱۵/۰
۵	۵۰	۳۸/۵	۱۸/۸
۶	۱۰۰	۷۷/۴	۳۷/۸
۷	۱۵۰	۱۱۶/۳	۵۶/۸
۸	۲۰۰	۱۵۵/۱	۷۵/۷
۹	۲۵۰	۱۹۴/۰	۹۴/۷

باتوجه‌به ابعاد ۲۰۴۸ در ۱۵۳۵ تصاویر در ارتفاع ۲۵۰ متری، مساحت برداشت‌شده در هر تصویر، ۲/۸ هکتار به‌دست آمد. باتوجه‌به مدت‌زمان تصویربرداری ۸ دقیقه در هر پرواز و بیشینه فاصله زمانی ۸ ثانیه برای برداشت هر تصویر و ذخیره آن، امکان برداشت شصت تصویر در هر پرواز وجود دارد و چنانچه هم‌پوشانی تصاویر به‌طورمتوسط چهل درصد درنظر گرفته شود، بیشترین سطح برداشت تصویر در هر پرواز، ۱۰۰ هکتار به‌دست می‌آید. با افزایش تعداد پروازها در یک روز کاری می‌توان مساحت تصویربرداری را افزایش داد.

- فاصله بین هر دو برداشت تصویر به سرعت حرکت پرنده و قابلیت دوربین بستگی دارد. دوربین به کارگرفته شده دارای قالب‌های RAW8، RAW10 و DCM10 بیت در ذخیره تصویر است. قالب RAW10 بیت، سریع‌ترین قالب برای تصویربرداری است که ذخیره تصویر (با حجم ۶ مگابایت) بسته به سرعت کارت حافظه، ۲-۳ ثانیه طول می‌کشد. قالب RAW8 (با حجم ۳ مگابایت) ۲/۵-۳/۵ ثانیه زمان برای برداشت هر تصویر نیاز دارد. این قالب برای مواقعی کاربرد دارد که برداشت تعداد بیشتر تصاویر صرف‌نظر از دقت، هدف باشد. تصاویر در قالب DCM بیشترین کیفیت را دارد و حجم تصویر برداشت‌شده ۲/۳ مگابایت است و به حداکثر ۵ ثانیه زمان برای برداشت تصویر نیاز دارد؛ اگر این قالب، پیش‌فرض ذخیره تصاویر در نظر گرفته شود، باید سرعت حرکت پرنده در هنگام تصویربرداری کاهش یابد. این نکته را باید در تنظیم فاصله زمانی بین برداشت دو تصویر^۱ در وضعیت تصویربرداری پیوسته^۲ مد نظر قرار داد.

ارزیابی کیفیت تصاویر چندطیفی برداشت‌شده

تصاویر هوایی چندطیفی کاذب^۳ با ترکیب باندهای مادون قرمز نزدیک (NIR)، قرمز (R) و سبز (G) از عوارض کشاورزی در ارتفاع‌های پروازی مختلف در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. تصاویر مربوط به مزرعه گندم پاییزه، در تاریخ ۱۲ آذر ۱۳۹۲ و تصاویر مربوط به مزرعه گندم بهار، در تاریخ ۱۱ خرداد ۹۳ برداشت شده است. این تصاویر در ساعت ۱۰ صبح تا ۱۲ ظهر برداشت شده است.



شکل ۲. تصاویر هوایی چندطیفی (NIR، R و G) محصول گندم پاییزه در ارتفاع ۱۰-۲۰۰ متر

1. Exposure Time
2. Continues Mode
3. False Color composite



ب: ارتفاع ۱۰۰ متر

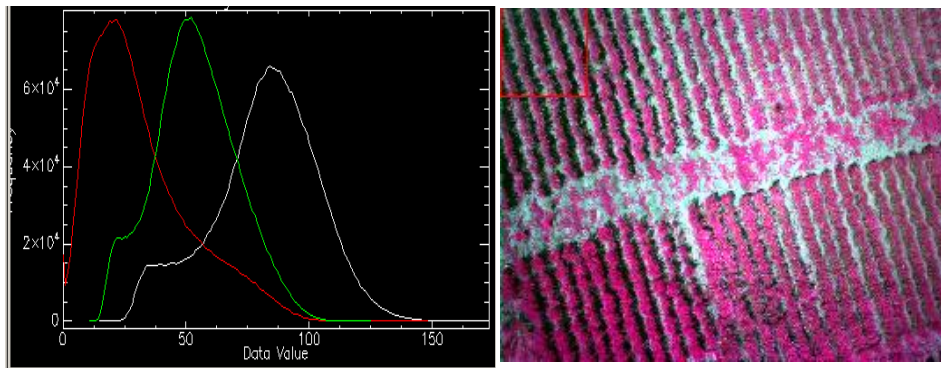
الف: ارتفاع ۱۰ متر

شکل ۳. تصاویر هوایی چندطیفی (G و R، NIR) گندم بهاره در ارتفاع‌های ۱۰ و ۱۰۰ متر

براساس شکل‌های ۲ و ۳، تصاویر چندطیفی برداشت‌شده با استفاده از عمودپرواز بدون سرنشین طیف‌نگار در زمان‌ها و شرایط مختلف دارای وضوح کافی و بدون اعوجاج است که علت آن، پایداری پرنده در حین پرواز و عملکرد سامانه تثبیت دوربین است.

بهبود کنتراست تصویر

برای ارزیابی تصاویر چندطیفی برداشت‌شده، هیستوگرام باندهای یک تا سه تصویر در شکل ۴ و مقادیر آماری باندها شامل کمترین، میانه و بیشترین مقادیر درجه روشنایی پیکسل‌ها (۲۵۵-۰) و همچنین انحراف‌معیار مقادیر باندهای طیفی، در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۴. هیستوگرام باندهای یک تا سه (رنگ سفید باند سبز، رنگ سبز باند قرمز و رنگ قرمز باند مادون قرمز نزدیک)

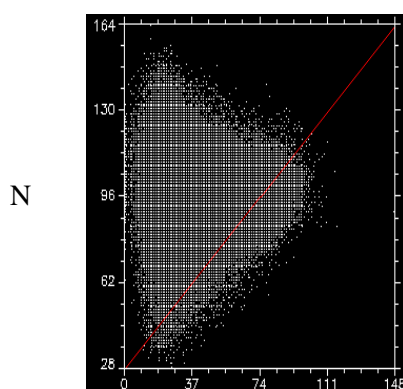
جدول ۲. مقادیر آماری باندهای تصویر

ردیف	کمترین	بیشترین	میانه	انحراف‌معیار
باند ۱	۱۵	۱۷۳	۸۱/۹	۲۱/۶
باند ۲	۰	۱۴۸	۳۱/۴	۲۰/۱
باند ۳	۱۱	۱۲۵	۵۳/۸	۱۶/۸

براساس شکل ۴ و جدول ۲، باتوجه به مقادیر آماری باندها، افزایش کنتراست و بسط هیستوگرام به روش بسط خطی هیستوگرام به منظور بارزسازی، افزایش وضوح و آشکارسازی پدیده‌های با تباين کم انجام گرفت. با استفاده از این روش، ضمن افزایش واریانس تصویر، وضوح و کیفیت رادیومتری آن نیز افزایش یافت.

پراکنش دوبعدی باندهای طیفی تصویر

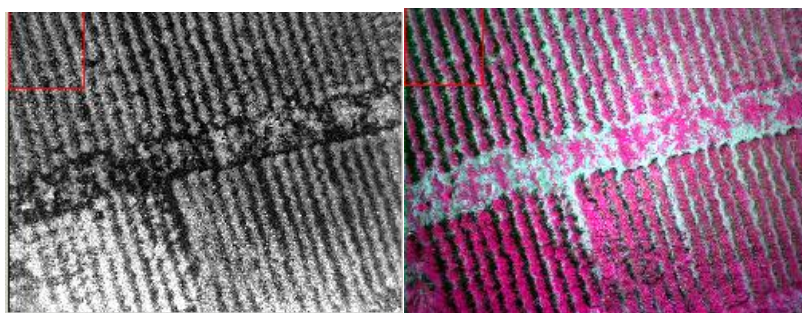
نمودار پراکنش دوبعدی باندهای NIR و R تصویر شکل ۴ در شکل ۵ نشان داده شده است. فاصله مقادیر طیفی تصویر از سمت خط خاک به سمت محور NIR نشان‌دهنده سبزیگی و تراکم زیاد پوشش گیاهی است.



شکل ۵. نمودار پراکنش دوبعدی باندهای NIR و R تصویر

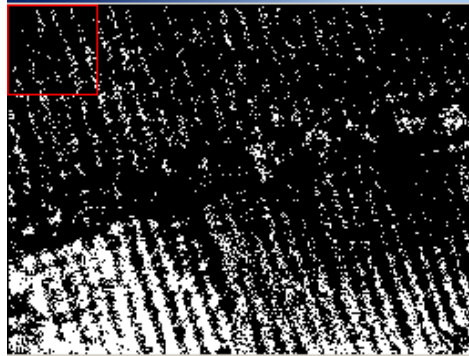
محاسبه شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده

نقشه شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده تصویر در شکل ۶ نشان داده شده است. در این تصویر، مناطق با بازتاب بیشتر، شاخص NDVI بیشتری دارد که به علت زیادتر بودن سبزیگی و تراکم پوشش گیاهی است. مناطقی که در نقشه NDVI رنگ تیره‌تری دارد، NDVI کمتری داشته، مناطق خاکی و سایه گیاهان را شامل می‌شود.



شکل ۶. نقشه شاخص NDVI در مزرعه گندم (راست، تصویر FCC و چپ، نقشه NDVI)

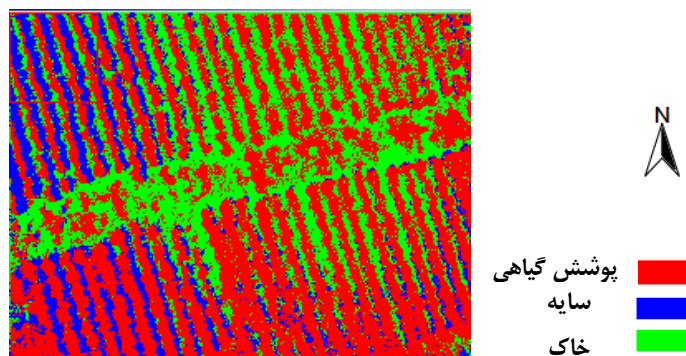
همچنین با اعمال ماسک تصویر، بخش‌های دارای مقدار شاخص NDVI ۱-۰/۵ مزرعه استخراج شد. این نواحی دارای پوشش گیاهی متراکم‌تر و محصول با سبزیگی بیشتری بود. نقشه ماسک NDVI در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. نقشه ماسک NDVI مزرعه گندم برای مقادیر ۱-۰/۵

نقشه طبقه‌بندی پوشش گیاهی

نقشه طبقه‌بندی نظارت‌شده پوشش گیاهی گندم در مرحله پنجه‌زنی با روش بیشترین شباهت^۱ در شکل ۸ نشان داده شده است. در این تصویر، رنگ قرمز پوشش گیاهی، رنگ سبز خاک و رنگ آبی دیگر عوارض (اعم از سایه) است. به‌منظور ارزیابی دقت طبقه‌بندی، ماتریس خطا و صحت رده‌های تفکیک‌شده محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است. براساس این ماتریس، صحت کلی ۹۳/۹ درصد و ضریب کاپای ۰/۹۰ به‌دست آمد. زیاد بودن صحت کلی و ضریب کاپای به‌دست‌آمده برای تصویر طبقه‌بندی‌شده و انطباق زیاد با واقعیت‌های زمینی نشان می‌دهد که عمودپرواز بدون سرنشین طیف‌نگار، قادر به تصویربرداری مناسب از منطقه پژوهش است و تصاویر برداشت‌شده با واقعیت‌های زمینی با دقت زیادی انطباق دارد.



شکل ۸. نقشه طبقه‌بندی نظارت‌شده پوشش گیاهی محصول گندم

جدول ۳. جدول ماتریس خطا و صحت رده‌های تفکیک‌شده نقشه پوشش گیاهی گندم

عنوان	رده اول پوشش گیاهی	رده دوم خاک	رده سوم دیگر موارد	صحت تولیدکننده (%)	صحت کارور (%)
رده اول پوشش گیاهی	۹۳/۷۵	۵/۹	۵/۶۲	۹۳/۷۵	۹۱/۶۳
رده دوم خاک	۴/۹۱	۹۴/۱۰	۰	۹۴/۱۰	۹۵/۶۹
رده سوم دیگر موارد	۱/۳۴	۰	۹۴/۳۸	۹۴/۳۸	۹۵/۵۶
صحت کلی	۹۳/۹ درصد				
ضریب کاپا	۰/۸۹۹۶				

نتیجه‌گیری

به‌منظور انجام دادن پژوهش‌های کشاورزی بر مبنای طیف‌سنجی و طیف‌نگاری با هدف پایش و مدیریت اراضی کشاورزی و منابع طبیعی، یک عمودپرواز بدون سرنشین طیف‌نگار (کشتبان) توسعه داده شد. نتایج کلی این پژوهش عبارت است از:

- براساس نتایج آزمون‌ها، مانورپذیری و پایداری پرنده در حین پرواز و در وضعیت بلند شدن و نشست مناسب بود. میانگین مداومت پروازی پرنده در حالت روشن بودن همه قطعات الکترونیکی، ۱۰ دقیقه و بیشینه وزن محموله قابل حمل پرنده، یک کیلوگرم به‌دست آمد.

- بیشینه سرعت باد برای پرواز امن پرنده، در شرایط باد ثابت ۱۵ کیلومتر در ساعت و محدوده سرعت حرکتی پرنده ۴۰-۰ کیلومتر در ساعت به‌دست آمد.

- نتایج آزمون‌های ارزیابی عمودپرواز و همچنین ارزیابی تصاویر برداشت‌شده نشان داد که سامانه تثبیت دوربین دارای عملکرد مناسبی است.

- توان تفکیک زمینی در ارتفاع پروازی ۱۰ متر، ۳/۶ میلی‌متر در پیکسل و در ارتفاع پرواز ۲۵۰ متر، ۹۵ میلی‌متر در پیکسل به‌دست آمد. همچنین، توان تفکیک زمانی تصویر بسته به قالب ذخیره فایل از ۲ تا ۵ ثانیه متغیر بود.

نتایج پردازش تصاویر هوایی نشان داد که این تصاویر ضمن دارا بودن وضوح پذیرفتنی، فاقد اعوجاج بوده، قابلیت پردازش و تحلیل داده‌های طیفی را دارد. نقشه NDVI و نقشه طبقه‌بندی‌شده با صحت کلی ۹۴ درصد و ضریب کاپای ۰/۹۰ نکته‌های یادشده را تأیید می‌کند. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که عمودپرواز بدون سرنشین طیف‌نگار قادر به تصویربرداری هوایی چندطیفی با توان زیاد تفکیک مکانی است.

منابع

- Berni, J., Zarco-Tejada, P. J., Suarez, L., and Fereres, E. (2009). "Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 47: 722–738.
- Fukagawa, T., Ishii, K., Noguchi, N., and Terao, H. (2003). "Detecting crop growth by a multispectral imaging sensor". *ASAE Paper*. No. 033125. St. Joseph, Mich: ASABE.
- Hardin, P.J. and Hardin, T.J. (2010). "Small-scale remotely piloted vehicles in environmental research". *Geography Compass*. 4: 1297–1311.
- Herwitz, S.R., Johnson, L.F., Dunagan, S.E., Higgins, R.G., Sullivan, D.V., Zheng, J., Lobitz, B.M., Leung, J.G., Gallmeyer, B.A., Aoyagi, M., Slye, R.E. and Brass, J.A. (2004). "Imaging from an unmanned aerial vehicle: Agricultural surveillance and decision support". *Computers and Electronics in Agriculture*. 44: 49–61.
- Hunt, E.R., Walthall, C.L., Daughtry, C.S. T., Fujikawa, S.J., Yoel, D., Khorrami, F., and Tranchitella, M. (2005). "High resolution multispectral digital photography using unmanned airborne vehicles". In *Proc. 20th Biennial Workshop on aerial photography, Videography, and high resolution digital imagery for Resource Assessment*. Weslaco, TX: ASPRS: 1536-1539.
- Laliberte, A., Rango, A., and Slaughter, A. (2006). "Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for rangeland remote sensing". In *Proc. 3rd. Annual symposium research Insights in Semiarid Ecosystems RISE, USDA-ARS Walnut Gulch Experimental Watershed*.
- Lelong, C.D., Burger, P., Jubelin, G., Roux, B., Labbé, S. and Baret, F. (2008). "Assessment of Unmanned Aerial Vehicles Imagery for Quantitative Monitoring of Wheat Crop in Small Plots". *Sensors*. 8: 3557-3585.
- Moran, M.S., Inoue, Y. and Barnes, E.M. (1997). "Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management". *Remote Sensing of Environment*. 61: 319–346.
- Nebiker, S. Annen, A., Scherrer, M. and Oesch, D. (2008). "A light-weight multispectral sensor for micro UAV: Opportunities for very high resolution airborne remote sensing". *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B1: 1193–1200.
- Niethammer, U., James, M.R., Rothmund, S., Travelletti, J. and Joswig, M. (2012). "UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results". *Engineering Geology*. 128: 2–11.
- Primicerio, J., Gennaro, S.F.D., Fiorillo, E., Genesio, L., Lugato, E., Matese, A. and Vaccari, F.P (2012). "A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture". *Precision Agriculture*. 13: 517–523.
- Rango, A., Laliberte, A., Herrick, J.E., Winters, C., Havstad, K., and Steele, C. and Browning, D. (2009). "Unmanned aerial vehicle-based remote sensing for rangeland assessment, monitoring, and management". *Journal of Applied Remote Sensing*. 3 (1): 033542.
- Stafford, J.V. (2000). "Implementing precision agriculture in the 21st century". *Journal of Agricultural Engineering Research*. 76: 267–275.
- Sugiura, R., Noguchi, N., Ishii, K. and Terao, H. (2002). "The development of remote sensing system using unmanned helicopter". In *Proc. Automation technology for off-road Equipment Conference*. Chicago. IL: ASAE.
- Swain, K.C., Jayasuriya, H.P.W. and Salokhe, V.M. (2007). "Suitability of low-altitude remote sensing images for estimating nitrogen treatment variations in rice cropping for precision agriculture adoption". *Journal of Applied Remote Sensing*. 1: 013547.
- Valente, J., Sanz, D., Cerro, J.D., Barrientos, A., Miguel, A. and Frutos, A.D. (2012). "Near-optimal overage trajectories for image mosaicing using a mini quad-rotor over irregular-shaped fields". *Precision Agriculture*. 14: 115–132.
- Warren, G. and Metternicht, G. (2005). "Agricultural applications of high-resolution digital multispectral imagery: Evaluating within-field spatial variability of canola (*Brassica napus*) in Western Australia". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 71: 595–602.

- Xiang, H. and Tian, L. (2011). "Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV)". *Biosystem Engineering*. 108 (2): 174-190.
- Zhang, J.H., Wang, K., Bailey, J.S. and Wang, R.C. (2006). "Predicting nitrogen status of rice using multispectral data at canopy scale". *Pedosphere*. 16: 108-117.
- Zhu, H., Lan, Y., Wu, W., Hoffmann, W.C., Huang, Y., Xue, X. Liang, J. and Fritz, B. (2010). "Development of a PWM Precision Spraying Controller for Unmanned Aerial Vehicles". *Journal of Bionic Engineering*. 7 (3): 276-283.