



طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه سمپاش خودکار به منظور تشخیص برخط

علف‌هرز-گیاه در مزارع چغندر قند

Design, construction and evaluation of an automatic sprayer system online weed-plant detection in sugar beet fields

هادی اورک، سامان آبدانان مهدی‌زاده^{۱*}، محمدمبین آسودار^۲ و الهام الهی فرد^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۰ : تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۳۰

نوع مقاله: پژوهشی

DOI:10.22092/jsb.2022.355302.1298

ه. اورک، س. آبدانان مهدی‌زاده، م.ا. آسودار و ا. الهی‌فرد. ۱۴۰۰. طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه سمپاش خودکار به منظور تشخیص برخط علف‌هرز-گیاه در مزارع چغندر قند. چغندر قند، ۳۷(۲): ۲۳۸-۲۲۳

چکیده

کنترل علف‌های هرز در دوره رشد گیاهان بسیار مورد توجه بوده و روش‌های مختلفی بدین منظور توسعه یافته است. در مبارزه با این گیاهان ناخواسته با روش مرسوم تمام مزرعه و گیاه اصلی نیز مورد حمله علف‌کش قرار می‌گیرد که سبب مصرف بی‌رویه سموم نیز می‌شود. در این پژوهش یک سامانه سمپاش هوشمند به منظور تشخیص علف‌هرز و بررسی میزان کاهش مصرف سم، در مزرعه چغندر قند بر اساس فناوری بینایی ماشین (Machine Vision) ارائه شد. به این منظور ۴۹ ویژگی‌های ظاهری و رنگی چغندر قند و علف‌هرز از تصاویر استخراج و مورد بررسی قرار گرفتند. با پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک (GA) ۱۱ ویژگی که بیشترین دقت در تشخیص را داشتند انتخاب و به منظور افزایش سرعت و بهترین عملکرد پنج ویژگی (ضریب شعاع ناحیه محذب هال، ضریب کرویت، ممان ششم، Lch_c و II2I3_I3) که بیشترین تکرار را در انتخاب ویژگی داشتند، برگزیده شدند. الگوریتم توسعه یافته برای تشخیص علف‌هرز از چغندر قند، دقت بیش از ۹۸ درصد داشت که نشان از قدرت تشخیص بالای این سامانه هوشمند می‌باشد. جهت بررسی میزان کاهش مصرف محلول سم، سامانه سمپاش هوشمند با سمپاش بافرآگری (Buferragri) مورد مقایسه قرار گرفت. سرعت حرکت هشت کیلومتر بر ساعت با تراکتور نوع جان‌دایر و مسافت پیموده شده ۲۷ متر برای هر دو سمپاش ثابت در نظر گرفته شد. در یک مسافت مشخص میزان علف‌کش مصرفی اندازه‌گیری و در نهایت میزان مصرف محلول توسط سمپاش بافرآگری نسبت به سامانه سمپاش هوشمند بیش از ۷۷ درصد بود. این مساله نشان از کارایی این سامانه نسبت به سمپاش‌های معمولی در کاهش مصرف علف‌کش است. نتایج نشان دادند که استفاده از سامانه ارائه شده به صورت سیستم سمپاش هوشمند در مزارع چغندر قند امکان‌پذیر است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، پردازش تصویر، چغندر قند، سمپاش هوشمند، کاهش مصرف سم

۱- کارشناسی ارشد پردازش تصویر، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان. اهواز، ایران.

۲- دانشیار دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان. اهواز، ایران.

*- نویسنده مسئول : saman.abdanan@gmail.com ؛ s.abdanan@asnruckh.ac.ir

۳- استاد دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان. اهواز، ایران.

۴- استادیار دانشکده کشاورزی، گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان. اهواز، ایران.



مقدمه

بر اساس آمار انجمن صنفی کارخانه‌های قند و شکر ایران در سال ۱۴۰۰ سطح زیرکشت چغندر قند در کشور حدود ۱۲۲ هزار هکتار با عملکرد حدود ۴۹/۵۹ تن در هکتار بوده است (Anonymous 2021; FAO 2019).

حضور علف‌های هرز به‌ویژه پهن‌برگ‌های یکساله یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید گیاهان زراعی بخصوص چغندر قند می‌باشد و از جمله مشکلاتی است که کشاورزان هر ساله با آن مواجه‌اند. از حدود ۲۵۰ گونه گیاهی که به عنوان علف‌هرز شناخته شده‌اند، حدود ۶۰ گونه آنها در مناطق چغندرکاری دنیا یافت می‌شوند (Jahadakbar et al. 2004). استفاده از یک روش مدیریتی امروزه در کنترل علف‌های هرز کارایی چندانی نداشته و می‌بایست از تلفیق چندین روش برای مهار علف‌های هرز بهره جست (Zoschke and Quadranti 2002). کنترل علف‌های هرز با توجه به بومی بودن آنها نسبت به محصول کار بسیار دشواری می‌باشد و در مدیریت علف‌های هرز چغندر قند لازم است مراحل مختلف چرخه زندگی و بیولوژی علف‌های هرز لحاظ گردد (Sester et al. 2004). استفاده از علف‌کش‌ها برای مبارزه با علف‌های هرز و کنترل آنها اهمیت بسیار بالایی در کشاورزی دقیق داشته که البته مشکلات بسیاری در این راه وجود دارد؛ از جمله این مشکلات می‌توان به تشخیص نوع علف‌هرز، زمان تشخیص، نوع و میزان پاشش سم اشاره کرد. روش‌های مختلفی برای حل این مشکل اساسی مطرح شده است. یکی از این روش‌ها استفاده از بینایی ماشین (Machine Vision) و طراحی یک سامانه هوشمند است که در بازه زمانی مشخص علف‌هرز را شناسایی، نوع سم مربوط به آن را انتخاب و متناسب با علف‌هرز میزان پاشش را انجام دهد (Abbas et al. 2020). از مزایای استفاده از کشاورزی هوشمند می‌توان به کاهش خستگی راننده، بهبود عملکرد محصولات، کاهش هزینه‌های تولید، به حداقل رساندن علف‌کش‌های مورد نیاز برای کنترل مؤثر علف‌های هرز و کاهش آلودگی محیط زیست اشاره

نمود (Babu et al. 2021). در پژوهشی به منظور جداسازی علف‌هرز از محصول، رنگ سبز مجموعه‌ای از تصاویر گرفته شده از مزرعه را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه ابتدا تصاویر به صورت باینری درآمده و علف‌هرز و محصول به رنگ سفید نشان داده شده‌اند؛ سپس هرگونه سفیدی بین ردیف محصول به‌عنوان علف‌هرز در نظر گرفته شد، دقت تشخیص گزارش شده در این پژوهش ۶۷ تا ۸۴ درصد بود (Guerrero et al. 2012 and 2013). در سمپاش‌های هوشمند، هدف نهایی تشخیص علف‌هرز و گیاه هدف و پاشش علف‌کش تنها بر روی علف‌هرز می‌باشد؛ که از این طریق میزان مصرف علف‌کش و آلودگی محیط زیست نیز به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد (Hasan et al. 2021; Burgos-Artizzu et al. 2011). به منظور تشخیص گیاه و تعیین کیفیت و سلامت آن در علوم باغبانی و کشاورزی فضاهای رنگی مختلف (مانند RGB HIS, HSV و Lab) و همچنین ویژگی‌های بافتی متفاوت مانند:

Neighborhood Gray-Tone Difference Matrix, NGTDM

Grey Level Co-occurrence Matrix, GLCM

Grey Level Run Length Matrix, GLRLM

Grey Level Difference Method, GLDM

توصیه و با موفقیت پیاده‌سازی شده‌اند (Nadafzadeh and Mehdi-zadeh 2019). در پژوهشی دیگر، محققین یک سامانه تشخیص علف‌هرز در مزارع ذرت را توسعه دادند. آنها فضاهای رنگی مختلف (LST و XYZ, Luv, Lab, HSI) را به منظور بهینه‌سازی طیف سبزی مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج گزارش شده فضای رنگی HIS بالاترین تمایز میان ذرت و علف‌هرز را داشت (Chapron et al. 1999). در تحقیقی با بررسی، تجزیه و تحلیل ۱۰ فضای رنگی استاندارد (HLS, HSV, YCrCb, YUV, Lab, Luv, TSL, RGB, I1I2I3 و XYZ) با استفاده از بینایی کامپیوتر به تقسیم‌بندی خودکار کاهو پرداخته شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده در میان فضاهای

مواد و روش‌ها

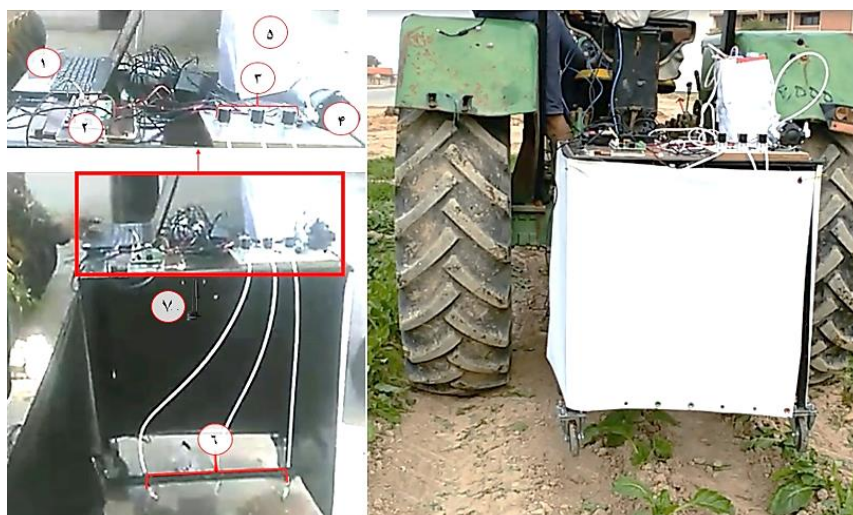
سامانه سمپاش هوشمند

سامانه سمپاش هوشمند از سه نازل با فواصل ۵۰ سانتی‌متر، یک دوربین به منظور تصویر برداری در فاصله ۱۶۰ سانتی‌متری از سطح زمین (دلیل انتخاب این فاصله پوشش یک خط کشت و دو جوی در مزرعه به‌صورت همزمان بود)، لامپ LED (دلیل انتخاب نوسانات کم و یکنواختی مناسب در نور پردازی بود)، مالبند برای اتصال به تراکتور (ASAE Standards) S217.12; ISO 730:2009)، مدار کنترلی برای دریافت سیگنال و ارسال فرمان به شیرهای برقی، پمپ، مبدل جهت تغذیه تجهیزات برقی از باتری تراکتور، دی‌سنج جهت اندازه‌گیری میزان سم مصرفی، مخزن و رایانه به منظور تجزیه و تحلیل و ارسال سیگنال به مدار کنترلی تشکیل شده است. جدول ۱ مشخصات فنی تجهیزات استفاده شده در سامانه سمپاش هوشمند و شکل ۱ اجزا آن را نشان می‌دهد.

رنگی استفاده شده در تشخیص کاهو از خاک و تقسیم‌بندی گیاهی، Lab بهترین فضای رنگی برای گونه‌های مورد مطالعه، با دقت طبقه‌بندی صحیح ۹۹/۲ درصد گزارش گردید (García-Mateosa et al. 2015). به‌طور کلی فضاهای رنگی مطلوب به ویژگی‌های خاص یک محیط وابسته است. علاوه بر این، بینایی کامپیوتر مشکلات بیشتری از قبیل سایه‌ها، درجه تباین کم در روزهای ابری یا بارانی، تغییرات دوربین و غیره را به همراه دارد که این عوامل می‌تواند تغییرات اساسی در ثبت رنگ‌های محصولات کشاورزی و خاک داشته و مانع تقسیم‌بندی درست شود. لذا ترکیب ویژگی‌های رنگی و مورفولوژیکی امکان موفقیت سامانه را به صورت چشمگیری افزایش می‌دهد. در این راستا هدف از این پژوهش طراحی، ساخت و ارزیابی یک سامانه هوشمند تشخیص گیاه زراعی چغندرقد از علف هرز بر اساس شکل ظاهری و شدت رنگ می‌باشد، که با کاهش مصرف سم علاوه بر کاهش آلودگی‌های زیست محیطی سبب تولید محصولات سالم‌تری گردد.

جدول ۱ مشخصات فنی تجهیزات استفاده شده در سامانه سمپاش هوشمند

نام تجهیزات	مشخصات فنی
رایانه	(Dell Inspiron 5110-N, Intel (R) Core (TM) i7-2670 QM CPU@ 3.10 GHz, RAM 16 GB)
دوربین	لاجیتک مدل C930e و ساخت کشور تایوان
لامپ	پروژکتور ال‌ای‌دی ۵۶ وات،
مدار کنترلی	مدار کنترلی چهار کاناله، هر کانال با قابلیت تصمیم‌گیری جداگانه
شیرهای برقی	مدل E247، ۱۲ ولت، ساخت کشور چین
مبدل	مبدل برق خودرو ویلیون مدل Green- 1500W
مخزن	مخزن پلاستیکی به حجم ۵ لیتر
نازل	TEE JET ۱۱۰۰۲ ساخت ایران
پمپ	SOFT WATER مدل DY 2500، ۲۴ ولت، ساخت کشور تایوان
دی‌سنج	YF-S201C، ساخت کشور چین
چرخ‌ها	پلاستیکی با قطر ۱۲/۵ cm و تحمل وزن ۷۰ kg
اتصال	قطر بین اتصال بالا ۰/۰۲۲ متر، قطر بین‌های اتصال پایین ۰/۰۱۹ متر، طول محور بالا ۰/۰۶۳ متر، طول محور پایین ۰/۴۸۲ متر و ارتفاع بین دو محور بالا و پایین ۰/۶۶۰ متر



شکل ۱ سامانه سمپاش هوشمند: ۱- کامپیوتر، ۲- مدار کنترلی، ۳- شیرهای برقی، ۴- پمپ، ۵. مخزن، ۶- نازل، ۷- دوربین

اخذ تصویر

به منظور اخذ تصاویر از یک دوربین لاجیتک (جدول ۱) که از فن آوری (RightLight 2) کمپانی برخوردار است، استفاده گردید. این فن آوری تصویر را برای بهبود کیفیت دید در شرایط نور کم، به طور خودکار تنظیم می کند. این دوربین با میدان دید عریض ۹۰ درجه، تصاویری با کیفیت Full HD 1080p در رزولوشن 1920×1080 پیکسل با سرعت ۳۰ فریم در ثانیه اخذ می نماید. شکل ۲ نمونه ای از تصویر اخذ شده توسط این وب کم را نمایش می دهد.



شکل ۲ نمونه ای از تصاویر گرفته شده توسط دوربین

پردازش تصویر

تصاویر اخذ شده از ردیف محصول چغندر قند برای توسعه سامانه هوشمند مورد بررسی قرار گرفتند. بدین منظور ابتدا بر روی تصاویر عملیات پیش پردازش از قبیل: یکنواخت سازی هیستوگرام تصویر و حذف نویزهای موجود در تصویر (در این پژوهش به دلیل وجود نویز فلفل نمکی از فیلتر میانه استفاده شد) صورت پذیرفت. سپس به منظور جداسازی گیاه (محصول و علف هرز) از پس زمینه (خاک) از ترکیب خطی فضای رنگی RGB طبق رابطه ۱ استفاده گردید. با آستانه گذاری بر روی مقادیر تصویر خاکستری به دست آمده گیاه از پس زمینه جدا گردید.

$$EXG = 2 \times Green - Red - Blue \quad (1)$$

که Green، Red و Blue به ترتیب نشان دهنده کانال های رنگی سبز، قرمز و آبی در تصویر می باشند.

پس از جداسازی گیاه از پس زمینه نویزهایی بر روی تصاویر مشاهده گردید که به منظور حذف این نویزها از فیلترگذاری بر روی مساحت (520 pixel^2) استفاده شد. عدد مذکور به روش سعی و خطا به دست آمد. سپس با ضرب تصویر باینری حاصل از آستانه گذاری در تصویر اصلی، گیاه (هدف) باقی مانده و خاک (پس زمینه) حذف گردید. پس از این عملیات

، HSV، I1I2I3 و RGB) مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۳ نمونه‌ای از انتقال تصویر به فضاهاى رنگى مختلف آورده شده است. در مجموع ۳۳ ویژگی از ۱۱ فضای رنگی استخراج گردید که معادل میانگین هر کانال در تصویر می‌باشند.

استخراج ویژگی‌های ظاهری

ویژگی‌های مورفولوژی دیجیتال به‌طور کلی شامل ویژگی‌های هندسی و گشتاورهای ثابت هستند. ویژگی‌های هندسی معرف نسبت ابعاد، مستطیلی بودن، مساحت ناحیه محدب، محیط ناحیه محدب، ضریب کرویت، خارج از مرکز بودن، نسبت منظر و غیره است. ویژگی‌های ظاهری و ممان سطح استخراج شده از تصاویر در روابط ۲-۱۶ آمده است (Du et al. 2007).

$$AR = \frac{D_{Max}}{D_{Min}} \quad (2) \quad \text{نسبت منظر (نسبت طول به قطر)}$$

که در این رابطه D_{Max} قطر ماکزیمم علف‌هز و D_{Min} قطر مینیمم علف‌هز می‌باشد.

$$R = \frac{A_{ROI}}{D_{Max} \times D_{Min}} \quad (3) \quad \text{نسبت مستطیلی}$$

که در این رابطه R نسبت مستطیلی و A_{ROI} مساحت گیاه می‌باشد.

$$C_A = \frac{A_{ROI}}{A_C} \quad (4) \quad \text{ضریب شعاع ناحیه محدب هال}$$

که در این رابطه C_A ضریب شعاع ناحیه محدب هال و A_C مساحت ناحیه محدب هال می‌باشد.

$$C_P = \frac{P_{ROI}}{P_C} \quad (5) \quad \text{ضریب شعاع محیطی محدب هال}$$

که در این رابطه C_P ضریب شعاع محیطی محدب هال، P_{ROI} محیط علف‌هز و P_C محیط ناحیه محدب هال می‌باشد.

$$S = \frac{I_i}{I_c} \quad (6) \quad \text{ضریب کرویت}$$

که در این رابطه S ضریب کرویت، I_i شعاع دایره محاطی داخلی و I_c شعاع دایره محیط شده خارجی می‌باشد.

ویژگی‌های ظاهری و رنگی محصول و علف‌هز از تصاویر حاصل استخراج شدند.

استخراج ویژگی‌ها

به منظور استخراج بهترین ویژگی‌ها و استفاده از روش خوشه‌بندی k-mean، ۳۰۰ عدد تصویر به‌صورت تصادفی از ردیف کشت محصول چغندرقد در روز هفدهم بعد از جوانه‌زنی گیاه زراعی اخذ شد. مطابق پژوهش کریستنسن و همکاران (Christensen et al. 1996) مؤثرترین زمان استفاده از علف‌کش‌های پس‌رویشی بین روزهای ۷-۲۱ بعد از جوانه‌زنی گیاه زراعی می‌باشد. لذا در روز موردنظر از تصاویر اخذ شده از ردیف کشت ۱۰۰ تصویر علف‌هز و ۱۰۰ تصویر چغندرقد جداسازی و به‌منظور استخراج ویژگی‌های ظاهری و رنگی مورد بررسی قرار گرفتند.

استخراج فضاهاى رنگى

رنگ از ویژگی‌های کلیدی است که به منظور تشخیص اهداف مختلف از جمله گیاهان، میوه‌ها، سبزیجات و غیره به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. در این راستا، مطالعات متعددی صورت پذیرفته و مشخص شده است که در شرایط و مسائل مختلف فضای رنگی خروجی متفاوتی از خود داشته‌اند (Lin and Hu 2012). لذا با توجه به اهمیت استفاده از انتخاب فضای رنگی بهینه برای تشخیص کلیه فضاهاى رنگى پیشنهاد شده در پژوهش‌های پیشین (XYZ, CMYK, Lab, Lch,)، $YCbCr$ ، YIQ ، uvl ، xyl ، $YCbCr$ ، YIQ ، uvl ، xyl ، Lch ، $CMYK$ ، Lab ، XYZ) به‌منظور بهینه‌سازی الگوریتم تشخیص و انتخاب بهترین ویژگی به‌منظور تشخیص حداکثری علف‌هز از گیاه زراعی مورد بررسی قرار گرفتند (Liu and Bruch et al. 2020). هدف استفاده از فضاهاى رنگى یافتن بهترین فضای ممکن در تشخیص محصول از علف‌هز می‌باشد. در این پژوهش ۱۱ فضای رنگی $YCbCr$ ، YIQ ، uvl ، xyl ، Lch ، $CMYK$ ، Lab ، XYZ)



شکل ۳ نمایش فضاهای رنگی مختلف گیاه چغندر قند

$$\mu_{pq} = \sum_x \sum_y I(x, y) \quad (10)$$

$$Hu_1 = \mu_{20} + \mu_{02} \quad (11)$$

$$Hu_2 = (\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2 \quad (12)$$

$$Hu_3 = (\mu_{30} - 3\mu_{12})^2 + (\mu_{03} - 3\mu_{21})^2 \quad (13)$$

$$Hu_4 = (\mu_{30} + \mu_{12})^2 + (\mu_{03} + \mu_{21})^2 \quad (14)$$

$$Hu_5 = \frac{(\mu_{30} - 3\mu_{12})(\mu_{30} + \mu_{12})}{[\mu_{30} - 3\mu_{03}]} + (3\mu_{21} - \mu_{03})(\mu_{21} + \mu_{03})[3(\mu_{30} - \mu_{03})]$$

$$C = \frac{\mu_R}{\sigma_R} \quad (7) \text{ ضریب مدور بودن}$$

که در این رابطه C ضریب مدور بودن، μ_R فاصله نقاط از لبه‌های جسم تا مرکز و σ_R واریانس نقاط می‌باشد.

$$F = \frac{4\pi A_{ROI}}{P^2_{ROI}} \quad (8) \text{ ضریب تشکیل شکل}$$

$$E = \frac{E_A}{E_B} \quad (9) \text{ گریز از مرکز}$$

که در این رابطه E گریز از مرکز بودن، E_A میزان انحراف از محور اصلی و E_B کوچک‌ترین میزان انحراف از محور می‌باشد.

کار با گرفتن میانگین در هر خوشه می‌توان مراکز خوشه و به دنبال آن خوشه‌های جدید را ایجاد نمود. بدین منظور در این پژوهش پس از بهبود تصویر و استخراج ویژگی از خوشه‌بندی k-means (Cao et al. 2012) در تقسیم‌بندی N مشاهده از خوشه‌بندی مشخص شده توسط کاربر استفاده شد. در این روش، هر پیکسل در هر تصویر به یک خوشه که به بردار میانگین نزدیک‌تر است اختصاص داده می‌شود. این روش تا زمانی که تغییر قابل توجهی در محل بردار میانگین بین تکرارهای پی‌درپی از الگوریتم وجود نداشته باشد، ادامه می‌یابد (Kanungo et al. 2002). در این مطالعه، دو خوشه تعریف گردید، یکی برای علف‌هرز و دیگری برای چغندرقد. الگوریتم خوشه‌بندی در رابطه (۱۷) تعریف شده است:

$$W(c) = \sum_{k=1}^k N_K \sum_{c(i)=k} \{|x_i - m_k|\} \quad (17)$$

که در آن، m_k بردار میانگین خوشه k ام است. N_K تعداد مشاهدات در مشاهده k ام، بردار x_i به یک و تنها یک خوشه اختصاص داده می‌شود. عدم تشابه بر اساس فاصله اقلیدسی اندازه‌گیری گردید. مراحل مختلف روش خوشه‌بندی شامل: (۱) محاسبه توزیع شدت در تصاویر (هیستوگرام نیز نامیده می‌شود)، (۲) مقداردهی اولیه مراکز با k شدت تصادفی، (۳) تکرار تا زمانی که برچسب‌های مجموعه پیکسل‌های تصویر تغییر نکند ادامه می‌یابد و در نهایت (۴) خوشه‌بندی نقاط بر اساس فاصله شدت نقاط از مرکز شدت با استفاده از رابطه (۱۸):

$$C_i = \underset{j}{\operatorname{argmin}} \{|x_i - m_j|^2\} \quad (18)$$

مرکز ثقل را برای هر یک از خوشه‌ها با استفاده از رابطه (۱۹) به دست می‌آید:

$$m_k = \frac{\sum_{k=1}^m 1\{C_k=j\}x_k}{\sum_{k=1}^m 1\{C_k=j\}} \quad (19)$$

$$Hu6 = (\mu_{20} - \mu_{02})[(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{03} + \mu_{21})^2] \quad (15)$$

$$Hu7 = \frac{4\mu_{11}(\mu_{30} + \mu_{12})(\mu_{03} + \mu_{21})}{3\mu_{21} - \mu_{03}}(\mu_{30} + \mu_{12}) \quad (16)$$

$$+ (\mu_{30} - 3\mu_{03}) + (3\mu_{21} - \mu_{03})(\mu_{21} + \mu_{03})[3(\mu_{30} - \mu_{03})]$$

که در روابط فوق p توان x و q توان y می‌باشد.

انتخاب بهترین ویژگی

به منظور انتخاب بهترین ویژگی از روش پیشنهاد شده توسط اولولای و همکاران استفاده گردید (Oluleye et al. 2014). بدین منظور از الگوریتم ژنتیک با مشخصات جدول ۲ استفاده شد. کروموزوم‌ها حاوی ارقام دوتایی بودند. بر اساس پیشنهاد اولولای و همکاران (2014) اندازه جمعیت برابر مقدار طول کروموزوم در نظر گرفته شد به طوری که کروموزوم‌ها در هر جمعیت فضای جستجو را پوشش می‌دهد. تابع برازندگی مورد استفاده در پژوهش حاضر تابع هدف، خطای خوشه‌بند k-means در نظر گرفته شد.

جدول ۲ پارامترهای الگوریتم ژنتیک و مقادیر آنها

مقادیر	پارامترهای الگوریتم ژنتیک
۱۰۰	اندازه جمعیت
۱۰۰	طول ژنوم
بیت رشته‌ای	نوع جمعیت
k-means Error	تابع برازندگی
۳۰۰	تعداد نسل‌ها
Arithmetic Crossover	Crossover
۰/۸	Crossover Probability
چپش یکنواخت	نوع چپش
۰/۱	احتمال چپش
Tournament of size 2	انتخاب طرح
۲	EliteCount

خوشه‌بندی k-means

روش k-means در آمار و یادگیری ماشینی، یکی از شاخه‌های یادگیری بی‌نظارت می‌باشد. روش کار به این صورت است که ابتدا به تعداد دلخواه نقاطی به عنوان مرکز خوشه در نظر گرفته می‌شود. سپس با بررسی هر داده، هریک از آنها به نزدیک‌ترین مرکز خوشه نسبت داده می‌شود. پس از اتمام این

که در آن CSR نرخ پاشش درست، N_{CSP} تعداد علف‌هرز سمپاشی شده، N_{FSP} تعداد دفعات پاشش بدون علف‌هرز، FSR نرخ پاشش نادرست، N_{SP} تعداد دفعات پاشش و HRR میزان کاهش مصرف علف‌کش است. در ارزیابی و آزمایش سامانه سمپاش از روش پیشنهادی لی و همکاران استفاده شد (Tewari et al. 2020).

به منظور مقایسه سامانه سمپاش هوشمند و میزان کاهش مصرف علف‌کش، سمپاش بافرآگری (Buferagri) با مشخصات زیر با تعداد ۳ نازل استفاده شد. در هر دو حالت سمپاشی از دبی سنج جهت اندازه‌گیری میزان سم مصرفی استفاده گردید.

جدول ۳ مشخصات سمپاش بافرآگری (Buferagri)

کشور سازنده	حجم مخزن (لیتر)	نوع نازل	فاصل نازل‌ها (متر)
ترکیه	۴۰۰	Cone Nozzle	۰/۵

نتایج و بحث

پس از استخراج ویژگی‌ها (مورفولوژی و رنگ)، داده‌ها به‌منظور انتخاب بهترین ویژگی‌ها و بهینه‌کردن الگوریتم سامانه سمپاش هوشمند، وارد الگوریتم انتخاب ویژگی (GA) شدند. خروجی الگوریتم انتخاب ویژگی ۱۲ ویژگی (ضریب شعاع ناحیه محدب هال، ضریب کرویت، خارج از مرکز بودن، ممان ششم، G از RGB، I3 از I1I2I3، هر ۳ کانال از فضاهای رنگی Lch، Lab، و k از CMYK) بود که به‌منظور بهینه‌کردن زمان عملکرد، پنج ویژگی پر تکرار (ضریب شعاع ناحیه محدب هال، ضریب کرویت، ممان ششم، I1I2I3_I3 و Lch_c) به‌عنوان بهترین ویژگی‌ها برای تشخیص و جداسازی در نظر گرفته شدند. شکل ۴ نمودار مربوط به تکرار برای تمامی ویژگی‌ها آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص شده در ۵۰۰۰ تکرار صورت گرفته پنج ویژگی ضریب شعاع ناحیه محدب هال، ضریب

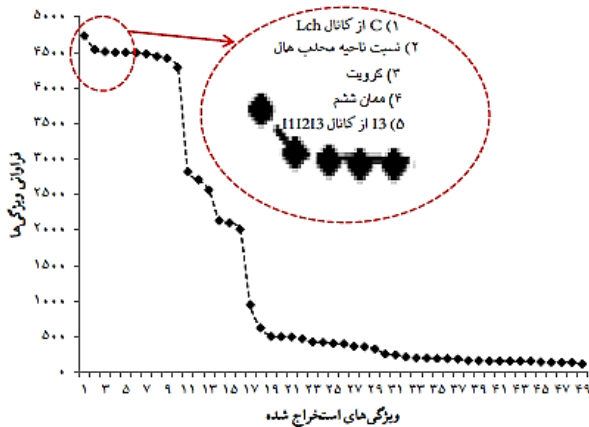
ارزیابی سمپاش هوشمند در تشخیص علف‌هرز از چغندر قند

به‌منظور ارزیابی سامانه سمپاش توسعه داده شده آزمایش مزرعه‌ای بر پایه طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی و در سه تکرار صورت پذیرفت (Montazeri et al. 2013). این آزمایش در مزارع کشاورزی دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان انجام پذیرفت. تیمارهای آزمایش تأثیر چهار سطح مختلف سرعت (سرعت‌های ۴، ۶، ۸ و ۱۰ کیلومتر بر ساعت) بر دقت سامانه سمپاش در نظر گرفته شد (Subr et al. 2020). به‌منظور داده‌برداری از کوادرات مربعی شکل $۰/۵ \times ۰/۵$ در خط وسط کشت استفاده گردید (Chitband et al. 2017) و داده‌برداری همزمان با عملیات سمپاشی صورت پذیرفت. جهت یکنواختی داده‌برداری طول ردیف کشت به چهار قسمت تقسیم شد و چهار کوادرات بر روی هر کدام از ردیف‌های کشت تعبیه گردید. سامانه سمپاش به محض رسیدن به کوادرات‌ها عملیات سمپاشی و داده‌برداری را انجام می‌داد. این فواصل برای سه تکرار (ردیف‌های کشت) ثابت در نظر گرفته شدند (Chitband et al. 2018). به‌منظور فعال‌سازی سامانه سمپاش در محدوده کوادرات‌ها از چهارچوب مربعی قرمز رنگ استفاده گردید و سامانه هوشمند با تشخیص کوادرات‌های رنگی به محض وارد شدن به این محدوده‌ها عملیات سمپاشی و داده‌برداری را آغاز می‌نمود. طول ردیف‌های کشت ۲۷ متر در نظر گرفته شد. تعداد گیاه و علف‌های هرز توسط فرد خبره در هر ردیف در هر کوادرات تعیین گردید و دستگاه بعد از سوار شدن بر روی تراکتور وارد زمین شد. نرخ اسپری درست، نرخ اسپری نادرست و میزان کاهش مصرف علف‌کش از روابط ۲۰-۲۲ محاسبه شد.

$$CSR = \frac{N_{CSP}}{N_{SP}} \times 100 \quad (20)$$

$$FSR = \frac{N_{FSP}}{N_{SP}} \times 100 \quad (21)$$

$$HRR = \left(1 - \frac{N_{SP}}{N_B}\right) \times 100 \quad (22)$$



شکل ۴ نمودار ویژگی‌های استخراج شده و تعداد تکرار آنها در الگوریتم انتخاب ویژگی

جدول ۴ تجزیه واریانس اثر ردیف کشت و سرعت پیروی بر دقت تشخیص علف‌هرز

F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییرات
۰/۷۲ ^{ns}	۰/۸۴	۱/۶۹	۲	ردیف کشت محصول
۷۵/۵۹ ^{**}	۸۸/۰۸	۲۶۴/۲۵	۳	سرعت پیروی
	۱/۱۶	۶/۹۹	۶	خطا (E)
			۱۱	کل (G)

^{ns} و ^{**} به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد

هوشمند انتخاب گردد و مطابق نتایج به دست آمده (عدم معنی‌داری سطوح سرعت ۴، ۶ و ۸ کیلومتر بر ساعت) سرعت هشت کیلومتر بر ساعت به عنوان سرعت پیروی انتخاب گردید (Subr et al. 2020; Mohammad Zamani et al. 2013; Ohta 1980; sabzi et al. 2018)

جدول ۵ مقایسه میانگین مربوط به میزان دقت تشخیص باتوجه به سرعت پیروی

تیمار	میزان سرعت بر حسب کیلومتر بر ساعت		
	۱۰	۸	۶
دقت تشخیص (درصد)	۸۶/۵۰ ^b	۹۶/۷۲ ^a	۹۷/۲۵ ^a

حروف مشترک نشان‌دهنده عدم معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد

کرویت، ممان ششم، I3 از I1I2I3 و c از Lch به ترتیب با ۴۵۴۲، ۴۵۱۲، ۴۴۹۸، ۴۴۹۶ و ۴۷۳۸ تکرار به عنوان مؤثرترین ویژگی‌ها انتخاب شدند.

مطابق نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس (جدول ۴) پراکندگی و غیریکنواختی تراکم علف‌های هرز تأثیر معنی‌داری در تشخیص سامانه هوشمند ندارد. برخلاف ردیف‌های کشت که بر عملکرد و دقت سامانه سمپاش تأثیر معنی‌داری نداشته است، سرعت پیروی در سطح آماری یک درصد معنی‌دار بوده و مستقیماً بر عملکرد سامانه تأثیرگذار است (Sabzi et al. 2020).

مطابق جدول (۵) باتوجه به آزمون مقایسه میانگین انجام شده میانگین دقت تشخیص سامانه در سرعت‌های ۴، ۶، ۸ و ۱۰ کیلومتر بر ساعت به ترتیب برابر ۹۷/۹۲، ۹۷/۲۵، ۹۶/۷۲ و ۸۶/۵۰ درصد حاصل شد. نتایج نشان داد بین سرعت‌های ۴، ۶ و ۸ کیلومتر بر ساعت تفاوت معنی‌داری در دقت تشخیص سامانه وجود ندارد. اگرچه دقت تشخیص سامانه در سرعت ۱۰ کیلومتر بر ساعت با مقدار ۸۶/۵۰ درصد نیز می‌تواند قابل قبول می‌باشد اما علت تفاوت معنی‌دار در این سرعت نسبت به سایر سرعت‌های ذکر شده وجود ناهمواری و تسطیح نبودن مزرعه می‌باشد (عملیات تصویربرداری با مشکل مواجه می‌شد) و انتظار می‌رود در صورت تسطیح مزرعه دقت تشخیص در سرعت ۱۰ کیلومتر بر ساعت نیز افزایش یابد. در ارزیابی سامانه سمپاش هوشمند سعی گردید سرعت ماکزیمم جهت به چالش کشیدن سامانه

پژوهش‌های دوتا و همکاران (Dutta et al. 2022) و پریز و همکاران (Perez et al. 2000) می‌باشد. پس از جدا شدن گیاه (علف هرز و چغندر قند) از خاک (شکل ۵b) و اعمال خوشه‌بندی بر روی تصاویر، محصول (شکل ۵c) از علف‌هرز (شکل ۵d) تشخیص داده شده و نهایتاً سبب فعال‌سازی نازل مربوط به ناحیه‌ای که علف‌هرز در آن قرار دارد گردید.

مطابق با آنالیز آماری صورت گرفته از میان ویژگی‌های استخراج شده از علف‌هرز و گیاه ممان سطح (ویژگی هندسی)، نسبت مساحت محدب جسم و کرویت اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد وجود دارد. این مساله نشان از اولویت بیشتر این ویژگی‌ها در تشخیص علف‌هرز در مزارع غلات می‌باشد (Perez et al. 2000; Philipp and Rath 2002, Dutta et al. 2022; Jin et al. 2022; Rani et al. 2022). به‌علاوه ویژگی‌های استخراج شده در این تحقیق مطابق با



شکل ۵ (a) تصویر اصلی، (b) تصویر جداسازی علف‌هرز و چغندر قند از خاک، (c) تشخیص محصول از علف‌هرز و (d) تشخیص علف‌هرز

از ۶۰ علف‌هرز تمامی آنها (نرخ تشخیص ۱۰۰ درصد) به درستی تشخیص داده شدند.

جدول ۶ عملکرد سامانه سمپاش هوشمند (۶۰ علف‌هرز و ۱۸۰ چغندر قند)

نوع	تعداد	تعداد تشخیص صحیح	تعداد تشخیص نادرست	نرخ تشخیص درست (درصد)	نرخ تشخیص نادرست (درصد)
چغندر قند	۱۸۰	۱۷۸	۲	۹۸/۸۸	۱/۱۲
علف‌هرز	۶۰	۶۰	۰	۱۰۰	۰

پس از تعیین سرعت پیش‌روی به‌منظور بررسی دقیق صحت تشخیص توأم با عملیات سمپاشی، ردیف کشتی به‌صورت جداگانه (۱۸۰ بوته محصول و ۶۰ علف‌هرز) در نظر گرفته شد. علف‌های هرز به‌صورت پراکنده در بین محصول و خارج از ردیف کشت برچسب‌گذاری شدند. جدول ۶ خروجی حاصل از خوشه‌بند k-means را در تشخیص ۶۰ علف‌هرز و ۱۸۰ گیاه چغندر قند را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج به‌دست آمده از ۱۸۰ چغندر قند تعداد ۱۷۹ عدد (نرخ تشخیص ۹۸/۸۸ درصد) و

با توجه به این مساله که سمپاش بافرآگری در تمامی مسیر عمل سمپاشی را انجام می‌دهد میزان پاشش بیشتری (میزان پاشش ۰/۵۷۸ لیتر) نسبت به سامانه سمپاش هوشمند (میزان پاشش ۰/۱۲۸ لیتر) داشت.

جدول ۷ مقایسه سامانه سمپاش هوشمند با سمپاش بافرآگری (۶۰ علف‌هرز و ۱۸۰ چغندر قند)

نوع سمپاش	نرخ پاشش صحیح (درصد)	نرخ پاشش نادرست (درصد)	میزان پاشش (لیتر)	کاهش مصرف علف‌کش (درصد)
سامانه سمپاش هوشمند	۹۶/۷۷	۳/۲۲	۰/۱۲۸	۷۷/۸۵
سمپاش بافرآگری	-	-	۰/۵۷۸	-

کاهش میزان علف‌کش (۷۷/۸۵ درصد) نیز در مسیر پیموده شده توسط این دو سمپاش بسیار قابل توجه می‌باشد. در صورتی که این مقادیر در سطح کشت بالا ارزیابی شوند سمپاش پیشنهاد شده علاوه بر کاهش سم مصرفی که سبب کاهش هزینه‌های کشاورزی می‌شود سبب کاهش آلودگی‌های زیست محیطی شده و محصول سالمتری تولید می‌گردد. سامانه سمپاش هوشمند با الگوریتم توسعه یافته در شرایط واقعی با تشخیص بیش از ۹۸ درصد علف‌هرز و کاهش مصرف علف‌کش بیش از ۷۷ درصد می‌تواند به عنوان سمپاش هوشمند در مزارع چغندر قند استفاده شود. در پژوهشی دیگر محققین در راستای کاهش میزان علف‌کش مصرفی در مزارع چمن، از بینایی ماشین مبتنی بر دو روش مورفولوژی و طبقه‌بندی استفاده کردند. مطابق گزارش آنها میزان از بین بردن علف‌های هرز به ترتیب با روش مورفولوژی و طبقه‌بندی بیز ۷۲/۸۰ و ۶۳/۸۰ درصد و کاهش مصرف علف‌کش‌ها را بین ۶-۱۰ درصد گزارش کردند (Watchareeruetai et al. 2006). پژوهشی دیگر از سامانه سمپاش توسعه یافته با نرخ متغیر (خروجی میزان علف‌کش در تراکم بالای علف‌هرز ۴۰ لیتر در هکتار و در تراکم پایین علف-هرز ۲۰ لیتر در هکتار تنظیم شده بود) استفاده گردید. در این

بر اساس نتایج ارائه شده مشخص گردید که الگوریتمی ارائه شده قادر به جداسازی علف‌های هرز از گیاه چغندر قند در شرایط مختلف نوری (خواه در نور مستقیم آفتاب، سایه برگ‌ها یا دستگاه) می‌باشد و نرخ نهایی جداسازی در روشنایی و سایه به ترتیب ۸۸/۵ و ۸۱/۸ درصد به دست آمد (Du et al. 2007; Tang et al. 2017; Hamuda et al. 2017; Jafari et al. 2006).

بررسی نتایج حاصل از انجام این روش بر روی تصاویر جمع‌آوری شده از شرایط واقعی مزرعه نشان داد که دقت کلی الگوریتم ۹۱/۶۵ درصد می‌باشد. بر اساس گزارش صورت گرفته روش پیشنهادی توانایی تشخیص علف‌هرز را در مزرعه چغندر قند با دقت ۹۷/۷ درصد را دارا بود (Abouzahir et al. 2021; Bakhshipour Ziyaratgahi et al. 2017).

همانطور که نتایج نشان دادند، پژوهش حاضر با دقت بیش از ۹۸ درصد عملکرد بهتری داشته است. علت این مساله را می‌توان به ترکیب ویژگی‌های رنگی و مورفولوژیکی نسبت داد. همچنین انتخاب مؤثرترین ویژگی از میان تمامی ویژگی‌های به دست آمده نیز دلیل دیگر موفقیت روش پیشنهاد شده در این پژوهش می‌باشد. علاوه بر این، پژوهش‌های ذکر شده به صورت ایستا می‌باشند، در حالی که پژوهش حاضر به صورت بر خط و با سرعت واقعی سمپاشی می‌باشد.

پس از انتخاب سمپاش برای مقایسه، تعداد ۶۰ عدد علف‌هرز به منظور تشخیص و سمپاشی در روی ردیف و بین ردیف‌های کشت مورد بررسی قرار گرفتند، سپس سامانه سمپاش هوشمند و سمپاش انتخاب شده به ترتیب وارد مزرعه گردیدند. سرعت حرکت هشت کیلومتر بر ساعت، مسافت ۲۷ متر و نوع تراکتور جان‌دایر (John deere 3140) برای هر دو سمپاش ثابت در نظر گرفته شد. پس از انجام عملیات سمپاشی توسط دو سمپاش، نتایج مطابق با جدول ۷ حاصل گردید.

سرعت و بهترین عملکرد پنج ویژگی (ضریب شعاع ناحیه محدب حال، ضریب کرویت، ممان ششم، Lch_c و $II2I3_I3$) که بیشترین تکرار را در داشتند، برگزیده شدند. بر اساس نتایج در حالت ایستادگیت تشخیص سامانه بیش از ۹۸ درصد به دست آمد. به علاوه سامانه پیشنهادی با نرخ پاشش صحیح ۹۶/۷۷ درصد و کاهش مصرف علفکش ۷۷/۸۵ درصد عملکرد موفقی در شرایط واقعی از خود نشان داد. لذا سامانه سمپاش هوشمند ارائه شده می‌تواند جایگزین مناسبی برای استفاده از سمپاش‌های معمولی گردد و علاوه بر کاهش هزینه‌های ناشی از مصرف علفکش سبب کاهش آلودگی محیط زیست نیز می‌گردد. در استفاده از سامانه سمپاش هوشمند ارائه شده می‌بایست مواردی از قبیل: ارتفاع دوربین تا سطح زمین (به منظور پوشش‌دهی مناسب)، بررسی عملکرد دوربین و اتصالات، اطمینان از روشنایی پروژکتور (یکنواخت بودن نورپردازی) و استفاده از سرعت پیش‌روی یکنواخت را مدنظر داشت.

پژوهش تنها علف‌های هرز بین ردیف‌های کشت مورد بررسی قرار می‌گرفتند و نتایج نشان‌دهنده کاهش ۳۶ درصدی میزان مصرف علفکش‌ها در کنترل علف‌های هرز بود. گزارش این پژوهشگر نشان از عدم اختلاف قابل توجه روش مرسوم و روش ارائه شده در کنترل علف‌های هرز بود. (Dammer 2016).

نتیجه‌گیری

باتوجه به اهمیت اقتصادی کشت چغندر قند و با آگاهی نسبت به مضرات سموم شیمیایی و عواقب آنها بر روی سلامتی انسان، استفاده از فناوری‌های جدید به منظور کاهش استفاده از سموم شیمیایی امری الزامی خواهد بود. بدین منظور یک سامانه سمپاش هوشمند برای تشخیص علف‌هرز-گیاه در مزرعه چغندر قند بر اساس تکنولوژی بینایی ماشین طراحی و ساخته شد. جهت طبقه‌بندی گیاه و علف‌هرز ۴۹ ویژگی ظاهری و رنگی چغندر قند و علف‌هرز از تصاویر استخراج گردید که با پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک ۱۱ ویژگی انتخاب شدند. به منظور افزایش

References:

منابع مورد استفاده:

- Abbas I, Liu J, Faheem M, Noor RS, Shaikh SA, Solangi KA, Raza SM. Different real-time sensor technologies for the application of variable-rate spraying in agriculture. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020. 112265.
- Abouzahir S, Sadik M, Sabir E. Bag-of-visual-words-augmented histogram of oriented gradients for efficient weed detection. *Biosystems Engineering*. 2021; 202: 179-194.
- Anonymous. Yield and cultivated area of Iranian sugar beet in 2021. Iranian Sugar Factories Syndicate. 2021. <http://www.isfs.ir> (in Persian)
- ASAE Standards S 217.12; Three-Point Free-Link Attachment for hitching implements to agricultural wheel tractors. American Society of Agricultural and Biological Engineers: St. Joseph, MI, USA, 2001.
- Babu LG. Smart agriculture system with E- Carbage using Iot. *International Journal of Modern Agriculture*. 2021; 10(1): 928-931.
- Bakhsipour Ziyaratgahi A, Jafari A, Emam Y, Nasiri SM, Kamgar S, Zare D. Use of modified huff in detection of sugar beet plant from grassland using machine vision. *Journal of Agricultural Machinery*. 2017; 7 (1): 73-85. (in Persian with English abstract)

- Burgos- Artizzu XP, Ribeiro A, Guijarro M, Pajares G. Real-time image processing for crop-weed discrimination in maize fields. *Computer and Electronic in Agriculture*. 2011; 75(2): 337–346.
- Cao X, Ning B, Yan P, Li X. Selecting key poses on manifold for pair-wise action recognition. *Industrial Informatics, IEEE Transactions*. 2012; 8(1): 168-177.
- Chapron M, Requena-Esteso M, Boissard P, Assemat L. A method for recognizing vegetal species from multispectral images. 2nd European Conference on Precision Agriculture Odense Congress Centre, Denmark. 1999.
- Chitband S, Kalali B, Ghaemi A, Jahadipoor S. Evaluation of weed control methods on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield at different levels of nitrogen. *Journal of Plant Protection*. 2017; 30(40):664-676. (in Persian with English abstract)
- Chitband S, Nabizadeh M, Ghorbani R. Joint action of sugar beet selective herbicides in *Portulaca oleracea* L. and *Chenopodium album* L. weeds. *Journal of Sugar Beet*. 2018; 34(1): 93- 109. (in Persian with English abstract)
- Christensen S, Heisel T, Walter M. Patch spraying in cereals. *Proc. of Second Int. Weed Control Congress, Copenhagen, Denmark*. 1996; pp. 963–938.
- Dammer KH. Real-time variable-rate herbicide application for weed control in carrots. *Weed research*; 2016. 56(3): 237-246.
- Du JX, Wang XF, zhang GJ. Leaf shape based plant species Recognition. *Applied Mathematics and Computation*. 2007; 185: 883-893.
- Dutta K, Talukdar D, Bora SS. Segmentation of unhealthy leaves in cruciferous crops for early disease detection using vegetative indices and Otsu thresholding of aerial images. *Measurement*. 2022; 189, 110478.
- Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. FAOSTAT statistical database. 2019.
- Garcia-Mateos G, Hernandez-Hernandez JL, Escarabajal- Henarejos D, Jaen-Terrones S, Molina-Martinez J M. Study and comparison of color models for automatic image analysis in irrigation management applications. *Agricultural Water Management*. 2015; 151, 158-66.
- Guerrero JM, Guijarro M, Montalvo M, Romo J, Emmi L, Ribeiro A, Pajares G. Automatic expert system based on images for accuracy crop row detection in maize Fields. *Expert Systems with Applications*. 2013; 40: 656-664.
- Guerrero JM, Pajares G, Montalvo M, Romo J, Guijarro M. Support vector machines for crop/weeds identification in maize fields. *Expert Systems with Applications*. 2012; 39: 11149-11155.
- Hamuda E, Mc Ginley B, Glavin M, Jones E. Automatic crop detection under field conditions using the HSV colour space and morphological operations. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017; 133: 97–107.
- Hasan AM, Sohel F, Diepeveen D, Laga H, Jones MG. A survey of deep learning techniques for weed detection from images. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021; 184, 106067.
- HunterLab. Application note. *Insight on Color*. 2001; 13: 1-4.
- ISO 730. Agricultural Wheeled Tractors—Rear-Mounted Three-Point Linkage Categories 1N, 1, 2N, 2, 3N, 3, 4N and 4. American Society of Agricultural and Biological Engineers: St. Joseph, MI, USA, 2009; 1.

- Jafari A, Mohtasebi SS, Eghbali Jahromi H, Omid M. Presenting a suitable algorithm for separating weeds from sugar beet in real field conditions using image processing. *International Journal of Agriculture and Biology*. 2006; 8(5):602–605.
- Jahada Akbar MR, Tabatabaei Nimavard R, Ebrahimian HD. Investigation of the critical period of sugar beet weed control in Kabutarabad Isfahan. *Journal of Sugar Beet*. 2004; 20(1): 73-92. (in Persian with English abstract)
- Jin X, Bagavathiannan M, Maity A, Chen Y, Yu J. Deep learning for detecting herbicide weed control spectrum in turfgrass. *Plant Methods*. 2022; 18(1): 1-11.
- Kanungo T, Mount DM, Netanyahu NS, Piatko CD, Silverman R, Wu AY. An efficient k-means clustering algorithm: Analysis and implementation. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions*, 2002; 24(7): 881–892.
- Lin WM, Hu YT. Image segmentation method based on YUV color space for tomato harvesting robot. *Trans. Chin. Society of Agricultural Engineering*. 2012; 43(12): 176–180.
- Liu B, Bruch R. Weed detection for selective spraying: A review. *Current Robotics Reports*. 2020; 1(1): 19-26.
- Mohammad Zamani D, Minaei S, Alimardani R, Almasi M, Norouz poordeilami H, Rostami A. Design and fabrication of a map- based VRA system for a tractor- mounted boom-type field sprayer. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*. 2013; 43(2): 111-123. (in Persian with English abstract)
- Montazeri EZ, Jodaii A, Zomorodi S, Hanaeh M, Habibi R. Investigating the effects of nitrogen and animal manure (poultry manure) and their mutual effects on the quantity and quality of tomatoes. *Soil and Water Research Institute*. Plan No. 102-15-19-82-059. 2013. (in Persian)
- Nadafzadeh M, Mehdizadeh SA. Design and fabrication of an intelligent control system for determination of watering time for turfgrass plant using computer vision system and artificial neural network. *Precision Agriculture*. 2019; 20(5): 857-879.
- Ohta Y, Kanade T, Sakai T. Color information for region segmentation. *Computer. Graphics Image Process*, 1980; 13(3): 222–241.
- Oluleye B, Leisa A, Leng L, Dean D. A Genetic Algorithm-Based Feature Selection. *International Journal of Electronics Communication and Computer Engineering*. 2014; 5(4) 2249–071.
- Perez AJ, Lopez F, Benlloch JV, Christensen S. Color and shape analysis techniques for weed detection in cereal fields. *Computer and Electronic in Agriculture*. 2000; 25(3): 197–212.
- Philipp I, Rath T. Improving plant discrimination in image processing by use of different colour space transformations. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2002; 35: 1–15.
- Rani SV, Kumar PS, Priyadharsini R, Srividya SJ, Harshana S. Automated weed detection system in smart farming for developing sustainable agriculture. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2021; 1-12.

- Sabzi S, Abbaspour-Gilandeh Y, Arribas JI. an automatic visible-range video weed detection. Segmentation and classification prototype in potato field, *Heliyon*. 2020; 6(5): 03685.
- Sabzi S, Abbaspour-Gilandeh Y, García-Mateos G. A fast and accurate expert system for weed identification in potato crops using metaheuristic algorithms. *Computers in Industry*. 2018; 98: 80–89.
- Sester M, Delanoy M, Colbach N, Darmency H. Crop and density effect on weed beet growth and reproduction. *Weed Research*. 2004; 44: 50–59.
- Subr A, Parafiniuk S, Milanowski M, Krawczuk A, Kachel M. Study of deposited spray quality of spraying agents with different physical properties. *Plant archives*. 2020; 20(2): 6109-6114.
- Tang J, Wang D, Zhang Z, He L, Xin J, Xu Y. Weed identification based on K-means feature learning combined with convolutional neural network. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017; 135: 63–70.
- Tewari VK, Pareek CM, Lal G, Dhruw LK, Singh N. Image processing based real-time variable-rate chemical spraying system for disease control in paddy crop. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2020; 4: 21-30.
- Watchareeruetai U, Takeuchi Y, Matsumoto T, Kudo H, Ohnishi N. Computer vision based methods for detecting weeds in lawns. *Machine Vision and Applications*. 2006; 17(5): 287-296.
- Zoschke A, Quadranti M. Integrated weed management: Quo vadis. *Weed Biology*. 2002; 2: 1-10.