

انتخاب روش درون‌یابی مناسب برای پهنه‌بندی افت دانه‌ای کمباین

سمیرا زارعی*^۱، شمس‌اله عبدالله پور^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۸

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۲- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

* مسئول مکاتبه Email: s.zareei@uok.ac.ir

چکیده

گندم یکی از مهمترین محصولات زراعی کشور است و نقش اساسی در تأمین نیاز غذایی مردم دارد. تولید گندم مانند بسیاری محصولات دیگر با ضایعات همراه است که بخش عمده این ضایعات به مرحله برداشت محصول برمی‌گردد. مقدار این افت در ایران بیش از مقدار مجاز جهانی آن است و هر تلاشی برای کاهش این افت، می‌تواند در بهبود عملکرد محصول مؤثر باشد. چنانچه افت‌ها با استفاده از تکنیک‌های کشاورزی دقیق به صورت مکان‌ویژه مورد ارزیابی قرار گیرند، می‌توان اقدامات اصلاحی متناسب با هر مکان برای کاهش افت و افزایش راندمان انجام داد. در مطالعه حاضر سعی شده تا با استفاده از روش درون‌یابی مناسب، نقشه افت مزرعه با دقت قابل قبول تهیه شود. برای این منظور، افت‌های طبیعی، هد و عقب هم‌زمان با تغییر در تنظیمات کمباین، در حین برداشت جمع‌آوری شدند. سپس با استفاده از روش‌های درون‌یابی کریجینگ، وزن‌دهی فاصله معکوس و میانگین متحرک، پهنه‌بندی افت‌های دانه‌ای برداشت در نرم افزار ArcGIS انجام شد. نتایج کراس ولیدیشن و مقایسه دقت روش‌ها نشان داد مقدار میانگین خطای پیش‌بینی افت در تمامی روش‌های درون‌یابی به هم نزدیک هستند. برای مثال، مقدار مجذور میانگین مربعات خطای محاسبه شده (RMSE) در افت هد برای روش وزن‌دهی فاصله معکوس برابر با ۰/۰۰۶۰۱۷ محاسبه شد که کمتر از مقادیر محاسبه شده آن در روش‌های کریجینگ و میانگین متحرک است که به ترتیب برابر با ۰/۰۰۶۷۳۲ و ۰/۰۰۶۰۹۵ به دست آمدند. با توجه به نتایج، به نظر می‌رسد روش وزن‌دهی فاصله معکوس بهترین روش درون‌یابی برای ایجاد پهنه‌های افت دانه است.

کلمات کلیدی: افت دانه، پهنه‌بندی، کریجینگ، میانگین متحرک، وزن‌دهی فاصله معکوس

How to cite:

Samira Zareei, Shamsollah Abdollahpour, N. 2023 Choosing the proper interpolation method for grain loss mapping in combine harvester. Journal of Agricultural Mechanization 8 (2): 47-55.

Choosing the Proper Interpolation Method for Grain Loss Mapping in Combine Harvester

Samira Zareei^{1*}, Shamsollah Abdollahpour²

Received: August 6, 2023

Accepted: September 19, 2023

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

2- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

*Corresponding Author: s.zareei@uok.ac.ir

Abstract

Wheat is one of the most important crops in the world and plays an essential role in meeting the food needs of the people. Like many other products, wheat production is associated with waste, and most of its wastes comes from the harvesting stage. The amount of this loss in Iran is more than the world's allowed amount and any effort to reduce this loss can be effective in improving the product's performance. If losses are evaluated using precision agriculture techniques on site-specific, corrective measures can be taken according to each location to reduce losses and increase efficiency. In the present study, an attempt was made to prepare a grain loss map with acceptable accuracy by using a suitable interpolation method. For this purpose, natural, head and rear losses were collected simultaneously with the change in combine harvester settings during harvesting. Then, using kriging interpolation methods, inverse distance weighting and moving average, the mapping of grain losses was done in ArcGIS software. The results of cross-validation and comparison of the accuracy of the methods showed that the mean value of the loss prediction error in all the interpolation methods is close to each other. For example, the RMSE value in the header loss for the inverse weighting method was calculated as 0.006017, which is lower than the values calculated for the kriging and moving average methods, which were obtained as 0.006732 and 0.006095, respectively. According to the results, the inverse distance weighting method is the best interpolation method for creating grain loss maps.

Keywords: Grain loss, Inverse distance weighting, Kriging, Mapping, Moving average

۱- مقدمه

اصلاح شرایط برداشت و یا بهبود تنظیمات ایجاد کند و منجر به کاهش تلفات دانه شود.

برای تهیه نقشه افت، ابتدا مقادیر افت یا به روش دستی و یا با استفاده از سنسورها به صورت مکان‌ویژه اندازه‌گیری می‌شود. سپس با استفاده از روش‌های درون‌یابی مقادیر افت برای نقاط مجهول تعیین شده و نقشه‌ای با دقت مطلوب پردازش می‌شود (Charvat et al., 2018). در محاسبات عددی، درون‌یابی روشی است برای یافتن مقدار تابع درون یک بازه، زمانی که مقدار تابع در تعدادی از نقاط گسسته معلوم است. یافتن مقدار تابع در خارج از این بازه را برون‌یابی گویند که عموماً از روش‌های مشابهی برای هر دو استفاده می‌شود. در واقع، درون‌یابی تخمین مقادیر بین داده‌های ثبت شده است و در آن تخمین‌هایی بین مشاهدات شناخته شده تولید می‌گردد، اما برون‌یابی در معرض عدم قطعیت بزرگتری است، همچنین خطر بالاتری برای تولید نتایج بی‌معنی دارد.

مقدار پذیرفته شده جهانی افت دانه‌ای کمباین زیر ۵ درصد است در حالی که افت دانه‌ای کمباین در ایران بیش از این مقدار است. زمان برداشت، شرایط زمین، رقم محصول و تنظیمات کمباین برداشت، از

در سال‌های اخیر، فناوری کشاورزی دقیق در بین محققان محبوبیت بیشتری پیدا کرده است. کشاورزی دقیق با استفاده از اطلاعات مکانی و ماهواره‌ها، حسگرها و نقشه‌ها انجام می‌شود و هدف آن کنترل نهاده‌ها در مزرعه برای کاهش ضایعات و افزایش درآمد است (Auernhammer, 2001; Stampach et al., 2015; Van Wart et al., 2013). غلات، به ویژه گندم، یکی از محصولات استراتژیک و ماده غذایی اصلی در سفره غذایی مردم است که با توجه به افزایش روز-افزون جمعیت، مصرف آن مدام در حال افزایش است. بنابراین، توجه به مراحل مختلف تولید و کاهش ضایعات آن امری ضروری است. برداشت یکی از حساس‌ترین مراحل تولید محصول است که می‌تواند عملکرد محصول را تا حد زیادی تحت تأثیر قرار دهد. به طور کلی تلفات را نمی‌توان به صفر کاهش داد، اما نرخ تلفات را می‌توان از طریق اقدامات اصلاحی مناسب تا حد قابل قبولی کاهش داد. تهیه نقشه افت دانه در برداشت با کمباین با استفاده از تکنیک‌های کشاورزی دقیق می‌تواند دید بهتری برای برنامه‌ریزی‌ها در جهت

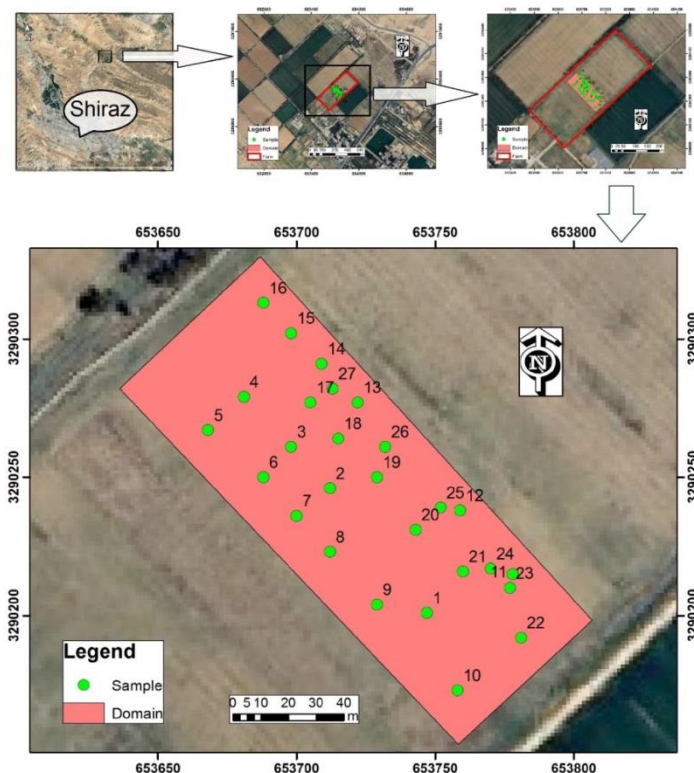
با استفاده از سنسورها ثبت شده و نقشه افت عقب در GIS تولید شده است و در مورد روش درون یابی مناسب برای افزایش دقت نقشه بررسی صورت نگرفته است (Al-Sammarraie and Alhadithi, 2021). هدف از مطالعه حاضر استفاده از سه روش مختلف درون یابی برای تهیه نقشه افت های کمباینی شامل افت هد و افت عقب و نیز نقشه افت طبیعی است.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در ۱۸ کیلومتری شمال شهر شیراز (منطقه باجگاه) با ارتفاع ۱۸۱۰ متر از سطح دریا، طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۴۶ دقیقه و عرض ۲۹ درجه و ۵۰ دقیقه و در اقلیم نیمه خشک واقع گردیده است. وسعت مزرعه مورد مطالعه یک هکتار بوده و به کشت گندم آبی رقم پاییزه شیراز اختصاص یافته بود. شکل (۱) موقعیت منطقه و نقاط نمونه برداری را بر روی نقشه و Google Earth نشان می دهد.

جمله عواملی هستند که بر میزان افت محصول تأثیر می گذارند. به منظور تعیین مقدار افت محصول در زمان برداشت، معمولاً در هر مزرعه افت را به تفکیک افت طبیعی، افت هد و افت عقب اندازه گیری و محاسبه می کنند. روش معمول اندازه گیری افت، استفاده از انداختن قاب های روکش دار و بدون روکش در ابعاد مختلف در ناحیه مورد نظر است. البته اندازه گیری افت در قسمت های داخلی کمباین یا افت عقب، با استفاده از حسگر نیز انجام می شود. در سال های اخیر تحقیقات زیادی در داخل و خارج کشور برای تعیین و کاهش میزان افت دانه در برداشت کمباینی صورت پذیرفته است. از جمله این مطالعات می توان به بررسی تأثیر تنظیمات کاری مختلف کمباین بر افت محصول (Ebrahimi Nik et al., 2007; Mahdinia et al., 2007)؛ مدل سازی و ارائه سیستم های کنترل افت کمباین (Odori et al., 2008)؛ Mesri Gundoshmian, 2009; Zareei and Abdollahpour, 2016) اشاره کرد. در مورد استفاده از کشاورزی دقیق در برداشت کمباینی محصولات، اغلب مطالعات انجام شده به تهیه نقشه عملکرد محصول به روش های مختلف پرداخته اند (Gomez-Gil et al., 2011)؛ Souza et al., 2016; Reznik et al., 2020; Stettmer et al., 2022) و در خصوص تهیه نقشه افت کمباین طبق بررسی منابع انجام شده، تنها یک مورد مطالعه انجام شده و در آن فقط افت عقب کمباین



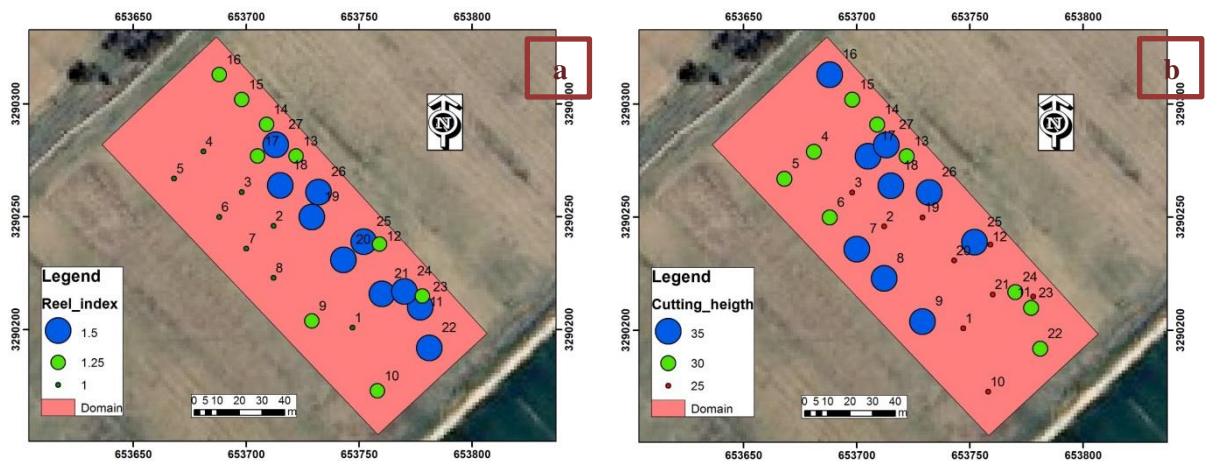
شکل ۱- موقعیت مزرعه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری

Fig 1. Location of the studied farm and sampling points

مقدار افت، ارتفاع برش و شاخص سینماتیک چرخ فلک (نسبت سرعت محیطی چرخ فلک به سرعت پیشروی کمباین) هر یک در سه سطح با استفاده از آزمایش فاکتوریل بر مبنای طرح کاملاً تصادفی تغییر داده شدند. برای افزایش دقت، آزمایشات در سه تکرار انجام شدند. مقادیر سطوح انتخابی برای ارتفاع برش ۲۵، ۳۰ و ۳۵ سانتی متر و مقادیر انتخابی برای سطوح شاخص چرخ فلک ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵ بودند. تعداد ۲۷ آزمایش با ترکیب‌های مختلف از تنظیم کمباین برای اندازه‌گیری افت تعیین شدند (شکل ۲).

۲-۲- اندازه‌گیری افت‌های دانه‌ای

آزمون‌های مزرعه برای اندازه‌گیری افت‌های دانه‌ای به تفکیک افت طبیعی، افت هد و افت عقب انجام شد. برای انجام این آزمایش‌ها از قاب‌های یک در یک متر مربع در دو نوع روکش‌دار برای اندازه‌گیری افت عقب کمباین و بدون روکش برای اندازه‌گیری افت هد و افت طبیعی استفاده شد. از یک کمباین CLAAS مدل Lexion510 برای برداشت محصول استفاده شد. برای بررسی تأثیر تنظیمات کمباین بر

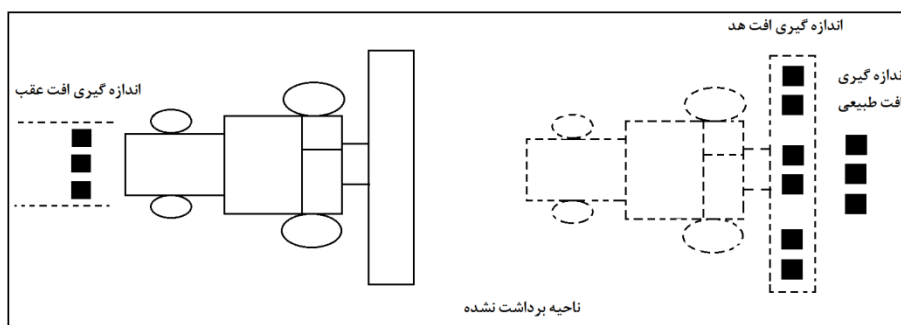


شکل ۲- موقعیت نقاط نمونه‌برداری هم‌زمان با تغییر در (a) شاخص چرخ فلک و (b) ارتفاع برداشت

Fig 2. The location of the sampling points simultaneously with the change in a) reel index and b) cutting height

مشخص قبل از ورود کمباین به مزرعه و جمع‌آوری دانه‌ها و خوشه‌های موجود در آن این افت محاسبه می‌شود. موقعیت‌های مناسب برای انداختن قاب و اندازه‌گیری افت‌های مختلف در شکل (۳) نشان داده شده است.

افت طبیعی، قبل از ورود کمباین به مزرعه و با انداختن قاب چوبی در نقاط تعیین شده در مزرعه اندازه‌گیری شد. دانه‌ها یا خوشه‌هایی که به علت عوامل جوی (بادزدگی، خوابدگی) روی زمین ریخته شده و همچنین خوشه‌های کوتاهی که کمباین قادر به برداشت آنها نیست، تلفات طبیعی محسوب می‌شوند. با انداختن قاب چوبی در نقاط



شکل ۳- نقاط مناسب برای نمونه‌برداری از افت طبیعی، افت هد و افت عقب کمباین

Fig 3. Suitable points for sampling from natural loss, header loss and rear loss

تلفات در کمباین، مربوط به تنظیم نبودن قسمت‌های مختلف هد کمباین است (Javidi, 2005). برای اندازه‌گیری افت هد، پس از این-که کمباین سطحی از مزرعه را برداشت نمود و به حالت پایدار کار خود

تلفات هد یا سکوی برش کمباین، دانه‌هایی هستند که همراه با کاه از کف سکوی برش و یا به صورت خوشه‌های کامل یا خوشه‌های همراه با ساقه از جلوی سکوی برش بیرون می‌ریزند. قسمت اعظم

برای اندازه‌گیری افت عقب کمباین، هنگامی که کمباین در حال کار است، قاب روکش‌دار با یک حرکت سریع بین چرخ‌های جلو و عقب در زیر و وسط کمباین قرار داده می‌شود. قاب روکش‌دار مورد استفاده در اندازه‌گیری افت عقب کمباین در شکل (۴) نشان داده شده است. پس از عبور کمباین دانه‌ها، خوشه‌های کوبیده نشده و نیم‌کوب موجود در قاب جمع‌آوری و توزین می‌شوند.



شکل ۴- قاب چوبی روکش‌دار استفاده شده در آزمون مزرعه‌ای برای اندازه‌گیری افت عقب کمباین
Fig 4. Covered wooden frame used in the field test to measure the rear loss of the combine

وزن‌دهی فاصله معکوس، کریجینگ و میانگین متحرک برای بررسی بیشتر انتخاب شدند.

۱-۳-۲- روش وزن دهی فاصله معکوس

در روش درون‌یابی معکوس فاصله (IDW)، فرض اساسی برای این است که میزان همبستگی و تشابه بین همسایه‌ها با فاصله بین آن‌ها متناسب است، که می‌توان آن را به صورت تابعی با معکوس فاصله از هر نقطه‌ای از نقاط همسایه تعریف کرد. شعاع همسایگی و توان مربوط به تابع عکس فاصله از مسائل مهم در این روش محسوب می‌شود. خروجی روش درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله منطبق با مقادیر ورودی محدود می‌شود. به این دلیل که این روش میانگین وزنی فاصله‌ای را در نظر می‌گیرد. بنابراین میانگین نمی‌تواند بزرگتر از بیشترین مقدار ورودی و یا کوچکتر از کمترین آن‌ها باشد.

بهترین نتایج از روش درون‌یابی وزن‌دهی فاصله معکوس زمانی به دست می‌آید که تعداد نمونه‌های اندازه‌گیری شده به اندازه کافی متراکم باشد. اگر نمونه‌برداری از نقاط ورودی کم باشد، نتایج ممکن است به اندازه کافی سطح مورد نظر را نشان ندهند. در روش وزن‌دهی فاصله معکوس فرض بر این است که تاثیر هر پدیده متناسب با توانی از معکوس فاصله آن است، بنابراین وزن نقاطی که نزدیکتر به نقطه مجهول هستند بیشتر از آن‌هایی که دور هستند محاسبه می‌شود (Li and Heap, 2010). به عبارت دیگر، هرچه قدر نقاط معلوم به نقطه مجهول نزدیکتر باشند در درون‌یابی تاثیر بیشتری خواهند داشت. در

رسید، قاب چوبی در چند نقطه از قسمت‌های برداشت شده که تنها سکوی برش از روی آن عبور می‌کند و مواد خارج شده از عقب کمباین به داخل آن ریخته نمی‌شود، قرار داده شد و دانه‌ها و خوشه‌های موجود در قاب جمع‌آوری و توزین گردیدند. معمولاً بیش‌ترین افت ناشی از برداشت با کمباین در این قسمت اتفاق می‌افتد.

۳-۲- درون‌یابی

ارزیابی تمام موقعیت‌های موجود در یک منطقه مورد مطالعه جهت اندازه‌گیری یک متغیر یا پدیده معمولاً سخت و پرهزینه است. به جای این کار می‌توان از اطلاعات نقاط نمونه‌برداری شده استفاده کرد و برای سایر نقاط بر اساس ارزش‌های نقاط معلوم، ارزش نقاط مجهول را برآورد کرد. نقاط معلوم می‌توانند به صورت تصادفی یا بصورت سیستماتیک، نمونه‌برداری شده باشند. اگر بین ارزش هر نقطه و مختصات آن و ارزش‌های سایر نقاط و مختصات آن‌ها همبستگی مکانی وجود داشته باشد، می‌توان از درون‌یابی به عنوان یک روش مناسب برای برآورد اطلاعات سایر نقاط در محدوده مورد مطالعه استفاده نمود (Li and Heap, 2010; Lee et al., 2016). به عبارت دیگر، درون‌یابی به معنی تهیه داده‌های پیوسته از روی داده‌های گسسته است. روش‌های درون‌یابی مختلفی در ArcGIS وجود دارد که هر یک فرضیات و تئوری‌ها و الگوریتم‌های متفاوتی برای برآورد مقدار سایر نقاط در بین و اطراف نقاط نمونه‌برداری شده ورودی دارند. متناسب با نحوه توزیع مکانی پدیده‌های مختلف و پراکنش نقاط نمونه‌برداری شده در سطح محدوده مورد مطالعه یکی از روش‌های درون‌یابی ممکن است برآورد بهتری را برای نقاط مجهول ایجاد کند. در این مطالعه سه روش از روش‌های پرکاربرد درون‌یابی شامل روش

گیری شده هر افت با مقدار تخمین زده شده توسط روش‌های درون-یابی مقایسه می‌شود. رابطه (۳) برای محاسبه شاخص مورد استفاده قرار می‌گیرد (Krivoruchko, 2011).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{z}(s_0) - z(s_i))^2}{n}} \quad (3)$$

که در آن $\hat{z}(s_0)$ مقدار تخمین زده شده، $z(s_i)$ مقدار اندازه-گیری شده و n تعداد نمونه است. هر چه مقادیر تخمین زده شده به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر باشند، مقدار این شاخص به صفر نزدیک می‌شود. به عبارت دیگر هر چه عدد این شاخص کوچکتر باشد به این معنی است که روش درون‌یابی در پیش‌بینی مقادیر نقاط مشخص موفق‌تر عمل کرده است. باید به این نکته نیز توجه داشت که این شاخص نسبت به موارد پرت حساس است، زیرا وزن زیادی بر روی خطاهای بزرگ می‌گذارد.

شاخص میانگین خطای پیش‌بینی (MPE) را می‌توان با استفاده از رابطه (۴) محاسبه کرد. اما از آنجا که تخمین‌های مثبت و منفی یکدیگر را خنثی می‌کنند، ممکن است این شاخص خطا را کمتر برآورد کند و باید در این مورد احتیاط کرد.

$$MPE = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{z}(s_0) - z(s_i))}{n} \quad (4)$$

که در آن $\hat{z}(s_0)$ مقدار تخمین زده شده، $z(s_i)$ مقدار اندازه-گیری شده و n تعداد نمونه اندازه‌گیری شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- توصیف نمونه‌های افت

جدول (۱) توصیف آماری نمونه‌های افت دانه‌ای به تفکیک افت طبیعی، افت هد، افت عقب و افت کل را نشان می‌دهد. مقادیر محاسبه شده میانگین، انحراف استاندارد، چولگی و کشیدگی به همراه مقادیر حداقل، حداکثر و میانه داده‌ها در این جدول قابل مشاهده است. با توجه به مقادیر چولگی و کشیدگی به دست آمده، بجز افت طبیعی که مقدار چولگی آن زیر یک است و توزیع نرمالی دارد، سایر افت‌های اندازه‌گیری شده توزیع نرمال نداشتند. برای استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ به داده‌های نرمال نیاز است که برای نزدیک کردن توزیع داده‌ها به توزیع نرمال، از تبدیل و نرمال‌سازی داده‌ها استفاده می‌شود. نرمال نبودن توزیع داده‌های افت دانه‌ای کمباین می‌تواند به دلیل تغییرات در تنظیمات کمباین (تغییر در شاخص چرخ‌فلک و ارتفاع

روش وزن‌دهی فاصله معکوس، مقادیر مجهول با استفاده از رابطه (۱) تخمین زده می‌شوند.

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n z_i d_i^{-n}}{\sum_{i=1}^n d_i^{-n}} \quad (1)$$

که در آن Z_0 مقدار تخمین زده شده، Z_i مقدار اندازه‌گیری شده نمونه در نقطه i ، d_i فاصله نقطه اندازه‌گیری شده تا نقطه مورد تخمین و n ضریبی که وزن را بر اساس فاصله تعیین می‌کند.

۲-۳-۲- روش کریجینگ

روش کریجینگ از جایگاه ویژه‌ای در بین روش‌های درون‌یابی برخوردار است. این روش از میانگین وزنی داده‌های معلوم برای محاسبه مقادیر مجهول استفاده می‌کند. وزن هر نمونه بر اساس واریانس مربوط به فاصله و یا به عبارت دیگر بر اساس واریوگرام تعیین می‌شود. بنابراین، نقاط نزدیک‌تر، سهم و تأثیر بیشتری در تخمین مقادیر مجهول دارند. در این روش نیاز است که مقادیر اندازه‌گیری شده از توزیع تقریباً نرمال برخوردار باشند و در صورت نداشتن توزیع نرمال باید با استفاده از تبدیل‌های مختلف آن‌ها را به نرمال نزدیک کرد (Uoseffi and Kord, 2020). مقادیر مجهول در روش کریجینگ از رابطه (۲) تخمین زده می‌شوند (Hassani Pak, 2010).

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(s_i) \quad (2)$$

که در آن $\hat{Z}(s_0)$ مقدار تخمین زده شده، $Z(s_i)$ مقدار متغیر مکانی اندازه‌گیری شده در نقطه i ، n تعداد نمونه اندازه‌گیری شده و λ_i وزن کمیت وابسته به نقطه i است.

۲-۳-۳- روش میانگین متحرک

در روش میانگین متحرک، یک محدوده بیضی شکل تعریف می‌شود و با استفاده از میانگین داده‌های معلوم درون محدوده بیضی، مقادیر نقاط مجهول خارج از محدوده بیضی تعیین می‌شود. این روش برای تهیه نقشه از تعداد نمونه‌های کم توصیه نمی‌شود و برای تعداد داده‌های بیشتر، بهتر عمل می‌کند. این روش همچنین برای مواقعی که حداقل و حداکثر مقدار متغیر مورد نظر در محدوده مورد مطالعه وجود داشته باشد مناسب است (ILWIS, 2001). از این روش درون‌یابی نیز برای پهنه‌بندی افت‌های دانه‌ای استفاده شد.

۲-۴- ارزیابی روش‌های درون‌یابی

به منظور ارزیابی دقت و مقایسه روش‌های درون‌یابی از دو شاخص ریشه میانگین مربعات خطای پیش‌بینی (RMSE) و میانگین خطای پیش‌بینی (MPE) استفاده می‌شود. در شاخص RMSE مقدار اندازه-

برش) ایجاد شده باشد. با توجه به جدول، بیشترین مقدار میانگین افت هم مربوط به افت هد کمباین است.

جدول ۱- آمار توصیفی افت‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه

Table 1. Descriptive statistics of measured losses in the field

متغیر Variable	تعداد اندازه‌گیری Number of measurements	مینیمم Minimum	ماکزیمم Maximum	میانگین Mean	میانه Median	کشیدگی Kurtosis	چولگی Skewness	انحراف معیار Standard deviation
افت طبیعی Natural loss	27	0.00034572	0.0036301	0.0018829	0.0019879	2.6402	0.16593	0.000078471
افت هد Header loss	27	0	0.0208	0.0044881	0.0019	4.0776	1.4889	0.0061682
افت عقب Rear loss	27	0	0.0101	0.0016656	0.0008	8.7205	2.4304	0.0022783
افت کل Total loss	27	0.0016422	0.024238	0.0080366	0.0047743	3.1108	1.2385	0.0071043

جدول ۲- نتایج به دست آمده برای انواع افت دانه‌ای با استفاده از روش‌های درون‌یابی

Table 2. The results obtained for different types of grain loss using interpolation methods

روش درون‌یابی Interpolation method	متغیر Variable	RMSE	میانگین مشاهداتی Observed average	میانگین محاسباتی Computational average	MPE
وزن‌دهی فاصله معکوس Inverse distance weighting	افت طبیعی Natural loss	0.000837	0.001882903	0.001852427	0.000030476
	افت هد Header loss	0.006017	0.004488148	0.004158588	0.00032956
	افت عقب Rear loss	0.002229	0.001665556	0.001882845	0.00021729
	افت کل Total loss	0.06073	0.020988458	0.021949751	0.00096129
	افت طبیعی Natural loss	0.000928	0.001882903	0.001895278	0.000012375
کریجینگ Kriging	افت هد Header loss	0.006732	0.004488148	0.004551619	0.000063471
	افت عقب Rear loss	0.002415	0.001665556	0.00183684	0.00017128
	افت کل Total loss	0.065837	0.020988458	0.02126082	0.00027236
	افت طبیعی Natural loss	0.000853	0.001882903	0.001859572	0.000023331
	افت هد Header loss	0.006095	0.004488148	0.004060262	0.000427886
میانگین متحرک Moving average	افت عقب Rear loss	0.002301	0.001665556	0.001676844	0.00011288
	افت کل Total loss	0.060855	0.02090988458	0.023658526	0.00274864

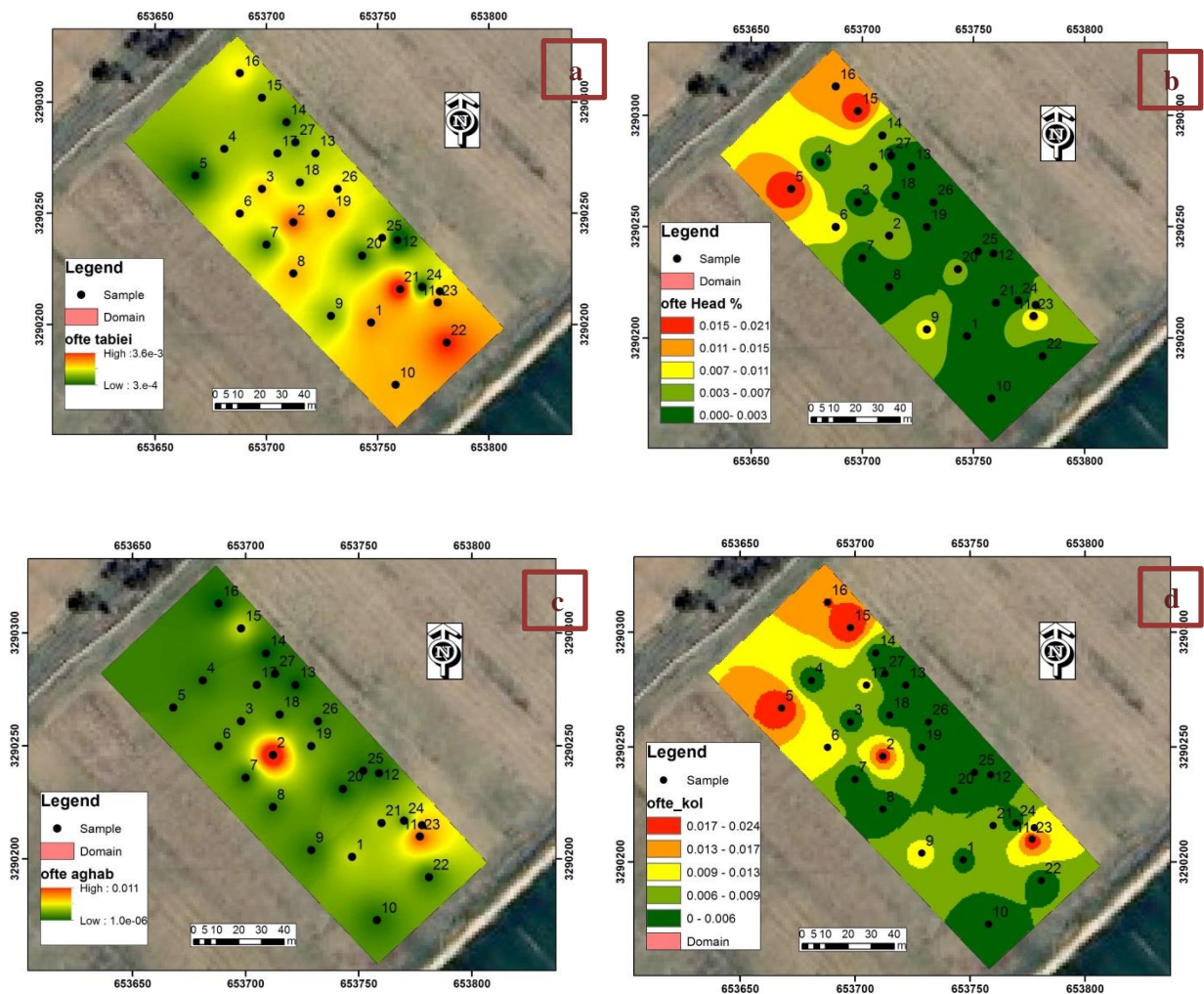
برای افت کل در همه روش‌های درون‌یابی نسبت به سایر افت‌ها بیشتر است که این نتیجه کاملاً قابل انتظار است چون افت کل از جمع سایر افت‌ها محاسبه می‌شود و در خطای محاسبه شده برای آن نیز خطای سایر افت‌ها سهیم هستند. در تعدادی از مطالعات دیگر نیز محققان روش‌های درون‌یابی وزن‌دهی فاصله معکوس و کریجینگ را هم مقایسه کرده‌اند و در برخی از آن‌ها عملکرد وزن‌دهی فاصله معکوس بهتر از کریجینگ گزارش شده است (Souza et al., 2016; Reznik et al., 2020).

۳-۳- پهنه‌بندی افت دانه‌ای

نقشه‌های افت طبیعی، افت هد، افت عقب و افت کل که مجموع سه افت قبلی است با استفاده از روش درون‌یابی وزن‌دهی فاصله معکوس که به‌عنوان روش درون‌یابی مناسب انتخاب شد، در نرم افزار ArcGIS تولید شدند (شکل ۵).

۲-۳- مقایسه روش‌های درون‌یابی در پهنه‌بندی افت

پهنه‌بندی افت‌های دانه‌ای برداشت با سه روش درون‌یابی شامل روش‌های وزن‌دهی فاصله معکوس، کریجینگ و میانگین متحرک که از روش‌های پرکاربرد درون‌یابی در کشاورزی دقیق هستند انجام شد. نتایج کراس ولیدیشن و مقایسه دقت روش‌ها در جدول (۲) ارائه شده است. مقادیر میانگین‌های محاسباتی و مشاهده‌ای برای همه انواع افت در تمامی روش‌های درون‌یابی بسیار به هم نزدیک هستند و مقدار میانگین خطای پیش‌بینی هم در همه مدل‌ها بسیار کم به دست آمده است. مقادیر مجذور میانگین مربعات خطای محاسبه شده (RMSE) نشان می‌دهد که در کل مقدار خطای روش‌های درون‌یابی کم و عملکرد آن‌ها تقریباً شبیه به هم است. از دلایل این موضوع می‌تواند شبکه داده برداری تقریباً منظم و دامنه محدود متغیرها باشد. با این حال در بین روش‌ها به نظر می‌رسد که روش وزن‌دهی فاصله معکوس بهترین عملکرد را داشته است. همچنین با توجه به جدول، مقدار خطا



شکل ۵- نقشه‌های افت دانه تولید شده با استفاده از روش درون‌یابی IDW برای (a) افت طبیعی، (b) افت هد، (c) افت عقب و (d) افت کل

Fig 5. Grain loss maps produced using IDW interpolation method for a) natural loss, b) header loss, c) rear loss and d) total loss

نقشه افت کل کمباین که از جمع افت‌های دانه‌ای حاصل شده است نشان می‌دهد که این افت بیشترین تأثیر را از افت هد پذیرفته است. همان‌طور که در شکل (۵) نیز مشخص است افت هد سهم بیشتری از افت کل را به خود اختصاص داده است. این نتیجه نیز با نتایج سایر مطالعات افت دانه‌ای کمباین تطابق دارد (Chinsuwan et al., 2004; Oduori et al., 2008; Zareei et al., 2012). البته همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، افت دانه‌ای متغیری است که به عوامل بسیاری از جمله شرایط محیطی، توپوگرافی و وضعیت ناهمواری زمین، رقم و رطوبت محصول و تنظیمات کمباین وابسته است. لذا با بررسی چند عامل از عوامل فوق نمی‌توان ادعای دقیقی درباره میزان افت داشت. در این مطالعه نیز هدف، تولید نقشه‌های افت دانه با روش درون‌یابی مناسب بود که از نظر بصری دید بهتری نسبت به افت‌های دانه‌ای ایجاد کند که در برنامه‌ریزی‌های بعدی مورد استفاده قرار گیرد.

۴- نتیجه گیری کلی

به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که هر سه روش درون‌یابی مورد استفاده برای تولید نقشه‌های افت دانه از دقت بالایی برخوردار بودند و روش وزن‌دهی فاصله معکوس با اختلاف کمی نسبت به روش‌های کریجینگ و میانگین متحرک، روش بهتری تشخیص داده شد و جهت تولید نقشه‌های افت مورد استفاده قرار گرفت. هر چند عوامل دیگری مانند تعداد داده اولیه می‌تواند بر عملکرد روش‌های درون‌یابی موثر باشد و این روش برای ۲۷ نقطه اندازه‌گیری و مزرعه مورد مطالعه مناسب تشخیص داده شد. بررسی نقشه‌های افت دانه‌ای به تفکیک افت طبیعی، افت هد، افت عقب و افت کل نشان داد که افت طبیعی چون قبل از ورود کمباین به مزرعه اندازه‌گیری می‌شود ارتباط معنی داری با مقادیر افت هد و افت عقب نداشت و صرفاً به شرایط جوی و محیطی وابسته است. تغییرات افت هد تا حدی به تغییر در تنظیمات چرخ فلک و ارتفاع برش وابسته بود که شاخص چرخ‌فلک تأثیر بیشتری را بر این افت نشان داد و در مجموع نیز مقدار افت هد از سایر افت‌های دانه‌ای بیشتر بود. افت عقب کمباین هم تا حدی وابسته به ارتفاع برش تغییر کرده بود و با کاهش ارتفاع برش و افزایش ورود مواد غیردانه‌ای به داخل کمباین، این افت افزایش یافته بود.

بر اساس شکل فوق، بین افت طبیعی که قبل از برداشت با کمباین اندازه‌گیری می‌شود، ارتباط معنی‌داری با سایر افت‌ها مشاهده نمی‌شود. افت طبیعی بیش از هر چیز به عوامل جوی وابسته است و مطابق با اطلاعاتی که کمباین از رطوبت محصول در نقاط مختلف مزرعه در حین برداشت ثبت کرده است، برخی از نواحی با رطوبت کمتر در معرض ریزش طبیعی بیشتری بوده اند. نقاط ۲ و ۶ در اندازه‌گیری‌های افت، نقاطی هستند که کمباین کمترین میزان رطوبت محصول را برای آن‌ها ثبت کرده است و این نقاط در نقشه افت طبیعی جزو مناطق با ریزش طبیعی بالا هستند. با وجود این تطابق‌های نقطه‌ای، در برخی نقاط دیگر میزان رطوبت با میزان ریزش طبیعی هم‌خوانی ندارد که ریزش بالا در آن ماطق می‌تواند دلایل محیطی و جوی دیگری داشته باشد.

با توجه به نقشه افت هد در شکل (۵)، نقاط ۵ و ۱۵ بیشترین مقدار افت هد را داشته‌اند که انتظار می‌رود بیش از هر چیز، از تغییرات در تنظیمات چرخ‌فلک و ارتفاع برش ناشی شده باشد. با توجه به نقشه تنظیمات کمباین در شکل (۲) می‌توان میزان افت هد را به شاخص چرخ‌فلک بیشتر مرتبط دانست. شاخص چرخ‌فلک که خود از دو عامل مهم سرعت دورانی چرخ‌فلک و سرعت پیشروی کمباین تأثیر می‌پذیرد، در میزان ریزش هد نقش بسزایی داشته است و با توجه به نقشه تولیدی نیز مشخص است که در مناطقی که شاخص چرخ‌فلک ۱/۵ بوده است افت هد کمتری مشاهده شده است و تأثیر این شاخص نسبت به ارتفاع برش، در میزان افت هد بیشتر بوده است. این نتیجه با نتایج مطالعات دیگر بر روی میزان افت هد هم‌خوانی دارد و در تحقیقات انجام شده بر روی افت هد کمباین همواره شاخص چرخ‌فلک به عنوان یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر افت هد معرفی شده است (Oduori et al., 2008; Zareei et al., 2012).

نقشه افت عقب کمباین، بیشترین ریزش را در نقاط ۲ و ۲۳ نشان داده است که تا حد زیادی به تغییر در تنظیمات کمباین و ارتفاع برش برمی‌گردد. در هر دوی این نقاط ارتفاع برش در کمترین مقدار تنظیم شده یعنی ۲۵ سانتی‌متر است. ارتفاع برش کمتر به معنی ورود مواد غیر دانه‌ای بیشتر به داخل کمباین و بیش بار شدن قسمت‌های داخلی کمباین است. افزایش ورود مواد غیردانه‌ای به داخل کمباین می‌تواند باعث بیشتر شدن افت دانه از عقب کمباین شود.

منابع

- Journal of Scientific and Engineering Research, 8 (1): 196-202.
 Auernhammer, H. 2001. *Precision farming – the environmental challenge*. Computer and Electronic in Agriculture, 30 (1-3): 31-43.

- Al-Sammarraie, M.A.J. and Alhadithi, S.A. 2021. *Determination of grain losses on combine harvester*.

- Stampach, R., Kubicek, P. and Herman, L. 2015. *Dynamic visualization of sensor measurements: context based approach*. *Quaestiones Geographicae*, 34(3): 117-128.
- Stettmer, M., Mittermayer, M., Maidl, F.X., Schwarzensteiner, J., Hülsbergen, K.J. and Bernhardt, H. 2022. *Three methods of site-specific yield mapping as a data source for the delineation of management zones in winter wheat*. *Agriculture*, 12(8): 1128.
- Van Wart, J., Kersebaum, K.C., Peng, S., Milner, M. and Cassman, K.G. 2013. *Estimating crop yield productivity zones at regional to national scales*. *Field Crops Research*, 143(1): 34-43.
- Uoseffi, N. and Kord, M. 2020. *The validation of results of groundwater monitoring network optimization for Dehgolan Plain*. *Hydrogeology*, 5(1): 73-82. (In persian)
- Zareei, S. and Abdollahpour, S. 2016. *Modeling the optimal factors affecting combine harvester header losses*. *Agricultural Engineering International: CIGR Ejournal*, 18(2): 60-65.
- Zareei, S., Abdollahpour, S., Moghaddam, M. and Sahrayan, H. 2012. *Regression and neuro-fuzzy models for prediction of combine header loss*. *ISESCO Journal of Science and Technology*, 8(14): 43-47.
- Charvat, K., Charvat, K.J., Reznik, T., Lukas, V., Jedlicka, K., Palma, R. and Berzins, R. 2018. *Advanced visualisation of big data for agriculture as part of databio development*. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 415-418.
- Chinsuwan, W., Pongjan, N., Chuan-Udom, S. and Phayom, W. 2004. *Effects of reel index on gathering loss of rice combine harvester*. *Thai Society of Agricultural Engineering Journal*, 11(1): 7-9.
- Ebrahimi Nik, M., Khaled Hosseini, N., Mahdinia, A., Kazemi, N., and Alemi Saeed, Kh. 2007. *The effect of speed and effective wide of cutter bar on rear loss and header loss (John Deer 955)*. 5th National Congress of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering, September 27, 2007. Mashhad. (In persian)
- Gomez-Gil, J., Lopez-Lopez, L.J., Navas-Gracia, L.M. and Ruiz-Ruiz, G. 2011. *The spatial low-pass filtering as an alternative to interpolation methods in the generation of combine harvester yield maps*. *Applied Engineering in Agriculture*, 27 (6): 1087-1097.
- Hassani Pak, A.A. 2010. *Geostatistics*. Tehran University Press, Tehran, 328 Pages. (In persian)
- ILWIS 3.0 *Academic, Users Guide*, 2001.
- Javidi, M. 2005. *Simulation of a fuzzy control-warning system for a grain harvester*. M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture, Urmia University. (In persian)
- Krivoruchko, K. 2011. *Spatial Statistical Data Analysis for GIS Users*. 1st ed. ESRI Press, Redlands.
- Lee, K.H., Chung, S.O., Choi, M. C., Kim, Y. J., Lee, J. S. and Kim, S. K. 2016. *Post processing software for grain yield monitoring systems suitable to Korean full-feed combines*. *Proceedings of the 13th International Conference on Precision Agriculture*, 1-15.
- Li, J. and Heap, A.D. 2010. *A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: performance and impact factors*. *Ecological Information*, 6(3-4): 228-241.
- Mahdinia, A., Kordestani, M., Parhizgar, S.A., Sajjadi, S.S., Saki, H.R. and Dehghan Nayeri, A. 2007. *Comparison and evaluation of losses in two common domestically made combines (Jandeere 955 and Sahand)*. 5th National Congress of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering, September 27, 2007. Mashhad. (In persian)
- Mesri Gundoshmian, T. 2009. *Optimizing harvester loss using intelligent systems*. PhD Thesis, Faculty of Agriculture, University of Tabriz. (In persian)
- Oduori, M.F., Mbuya, O.T., Sakai, J. and Inoue, E. 2008. *Shattered rice grain loss attributable to the combine harvester reel: Model formulation and fitting to field data*. *Agricultural Engineering International: CIGR Ejournal*, 10: 1-25.
- Reznik, T., Herman, L., Trojanova, K., Pavelka, T. and Leitgeb, S. 2020. *Interpolation of data measured by field harvesters: deployment, comparison and verification*. *Environmental Software Systems. Data Science in Action*, 554: 258-270.
- Souza, E.G., Bazzi, C.L., Khosla, R., Uribe-Opazo, M.A. and Reich, R.M. 2016. *Interpolation type and data computation of crop yield maps is important for precision crop production*. *Journal of Plant Nutrition*, 39 (4): 531-538.

