

ISSN 2544-4476
e-ISSN 2544-798X

AGRONOMY SCIENCE

wcześniej – formerly

Annales UMCS sectio E Agricultura

VOL. LXXX (1)

2025

UNIwersytet Przyrodniczy w Lublinie

RADA NAUKOWA – SCIENTIFIC BOARD

Imran Aslan (Bingöl, Turcja), Jan Buczek (Polska),
Alessandra Carruba (Palermo, Italy), Dorota Gawęda (Lublin, Polska),
Krzysztof Jankowski (Olsztyn, Polska), Elvyra Jariene (Kowno, Litwa),
Barbara Kołodziej (Lublin, Polska), Ali Hulail Noaema (Al-Muthanna, Irak),
Eleni G. Papazoglou (Ateny, Grecja), Ivan Shuvar (Dublany, Ukraina),
Danuta Sugier (Lublin, Polska), Wiesław Wojciechowski (Wrocław, Polska),
Alena Yakimovich (Mińsk, Białoruś)

REDAKTOR NACZELNY – EDITOR-IN-CHIEF

Aleksandra Głowacka

REDAKTOR WYDAWNICZY – PUBLISHING EDITOR

Renata Zelik
Anna Wypychowska

SKŁAD I ŁAMANIE – TYPESETTING TEXT

Małgorzata Grzesiak

© Copyright by Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie – Wydawnictwo, Lublin 2025

ISSN 2544-4476
e-ISSN 2544-798X

Czasopismo jest indeksowane przez – Covered by:

AGRO, Arianta, EBSCO, CAB Abstracts, DOAJ, EBSCO, EuroPub,
Index Copernicus – ICI Journal Master List, Most Wiedzy, PBN, Sherpa Romeo,
Ulrichsweb Global Serials Directory

WYDAWNICTWO UNIwersYTETU PRZYRODnicZEGO W LUBLINIE

ul. Akademicka 15, 20-950 Lublin, tel. 81-445-66-60,
<https://czasopisma.up.lublin.pl/index.php/as>,
e-mail: agronomy.science@up.lublin.pl

Table of contents Spis treści

DAGMARA STANGIERSKA-MAZURKIEWICZ, IWONA KOWALCZUK, KSENIA JUSZCZAK-SZELAŃGOWSKA, BEATA FORNAL-PIENIAK, TOMASZ PIENIAK	
Polish young adult consumers' purchasing behaviours and preferences towards strawberries	5
Zachowania zakupowe i preferencje polskich młodych konsumentów wobec truskawek	
DARIUSZ JASKULSKI, IWONA JASKULSKA, EMILIAN RÓŹNIAK, MAJA RADZIEMSKA	
Efekty zmian konstrukcyjnych elementów roboczych maszyny do uprawy pasowej. Cz. I: Wydajność eksploatacyjna, zużycie paliwa, emisja CO ₂	21
The effects of design changes to the working elements of a strip-till machine. Part I: Operating efficiency, fuel consumption and CO ₂ emissions	
DARIUSZ JASKULSKI, IWONA JASKULSKA, EMILIAN RÓŹNIAK, MAJA RADZIEMSKA	
Efekty zmian konstrukcyjnych elementów roboczych maszyny do uprawy pasowej. Cz. II: Wzrost i plonowanie roślin, jakość plonów	37
The effects of design changes to the working elements of a strip-till machine. Part II: Plant growth and yield, crop quality	50
SYLWIA JĘDZURA, DARIUSZ MAŃKOWSKI, PRZEMYSŁAW MATYSIK, AGNIESZKA NIEDZIELA	
Zmienność genetyczna i fenotypowa linii jarej pszenicy zwyczajnej (<i>Triticum aestivum</i> L.) o wysokim potencjale hodowlanym	51
Genetic and phenotypic variability of spring common wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) lines with high breeding potential	70
MAREK NIEWĘGŁOWSKI	
Opłacalność produkcji brokułu włoskiego na przykładzie indywidualnego gospodarstwa rolnego	71
Profitability of Italian broccoli production on the example of an individual farm	82
JASPER TEMBECK MBAH, KATARZYNA PENTOS	
Predicting soil compaction from soil electrical conductivity based on scanning methods – a review	83
Wykorzystanie metod skanowania gleby do predykcji jej zwięzłości na podstawie przewodności elektrycznej. Praca przeglądowa	



¹ Department of Pomology and Horticulture Economics, Institute of Horticulture Sciences, Warsaw University of Life Sciences, Nowoursynowska 166, 02-787 Warsaw, Poland

² Department of Food Market and Consumer Research, Institute of Human Nutrition Sciences, Warsaw University of Life Sciences, Nowoursynowska 159C, 02-776 Warsaw, Poland

³ Department of Environmental Protection and Dendrology, Institute of Horticultural Sciences, Warsaw University of Life Sciences, Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa, Poland

⁴ Agroportal Tomasz Pieniak Łubianki 13, 08-300 Sokołów Podlaski, Polska

*e-mail: Dagmara_stangierska@sggw.edu.pl

DAGMARA STANGIERSKA-MAZURKIEWICZ^{1*}, IWONA KOWALCZUK²,
KSENIA JUSZCZAK-SZELĄGOWSKA³, BEATA FORNAL-PIENIAK³,
TOMASZ PIENIAK⁴

Polish young adult consumers' purchasing behaviours and preferences towards strawberries

Zachowania zakupowe i preferencje polskich młodych dorosłych konsumentów
dotyczące truskawek

Abstract. This study surveyed 203 Polish consumers aged 18–25 to analyse their strawberry buying and consumption patterns and preferences. The research employed a quantitative survey (CAWI) and qualitative sensory assessment. The study found that strawberry consumption is highly seasonal, with higher intake in summer, particularly among women, while winter consumption was influenced by income level. Key purchase drivers included the appearance and aroma of strawberries; less important in choosing strawberries were price, type of packaging, place of purchase, and country of origin. Sensory evaluation of four strawberry cultivars – Lycia, Aprica, Giusy, and Klodia – revealed Klodia as the most favourable in sweetness and flavour, though Aprica was visually preferred. These findings suggest that visual preferences do not always align with sensory qualities when selecting strawberries.

Keywords: strawberry consumption, consumer preferences, sensory evaluation, seasonality, purchase behaviour

Citation: Stangierska-Mazurkiewicz D., Kowalczuk I., Juszcak-Szelągowska K., Fornal-Pieniak B., Pieniak T., 2025. Polish young adult consumers' purchasing behaviours and preferences towards strawberries. *Agron. Sci.* 80(1), 5–20. <https://doi.org/10.24326/as.2025.5488>

INTRODUCTION

Fruits and vegetables are a desirable element of our diet. Health organisations recommend their daily consumption; for example, the WHO suggests eating five servings daily, totalling around 400 g [Bieniek 2022]. The primary benefit of consuming fruits and vegetables is their nutritional and health properties. According to Stea et al. [2020], low intake of fruits and vegetables is associated with a higher risk of cardiovascular diseases, type 2 diabetes, and cancer, which ultimately contributes to increased mortality. According to WHO estimates, insufficient fruit consumption contributes globally to approximately 14% of deaths from stomach or intestinal cancer, 11% of deaths from ischemic heart disease, and 9% of deaths due to stroke [Puksza and Platta 2017].

Strawberries are among the fruits that can bring significant health benefits [Giampieri et al. 2013, 2015, Miller et al. 2019]. These fruits are a valuable source of many minerals such as potassium, phosphorus, calcium, magnesium, iron, zinc, manganese [Gondek et al. 2020], and vitamins C, A, B1, B2, B3, B6, E, and folic acid. They provide the body with considerable amounts of pectin and dietary fibre while being low in calories [Kopytowski et al. 2006, Zdrojewicz et al. 2017]. As noted by Abbaspour [2013], the iron found in strawberries is a valuable component for individuals struggling with anaemia, as it supports blood-forming processes. The structure and chemical composition of the fruit makes strawberries versatile for various applications. For example, using strawberry fruit extract can provide a whitening effect on discoloured teeth and is the best alternative compared to synthetic tooth whiteners [Ita et al. 2019]. The high content of vitamin C in strawberries, which is an active antioxidant [Odriozola-Serrano et al. 2008, Janda et al. 2015], as well as other antioxidant compounds such as flavonoids (mainly anthocyanins), ellagic acid [Pinto et al. 2008], and fisetin [Khan et al. 2013], is particularly noteworthy. Ellagic acid is currently attracting attention due to increasing evidence of its chemopreventive and antioxidant effects. At the same time, fisetin is a potent senolytic that slows down ageing processes [Zdrojewicz et al. 2017, Dudkowska 2023], reduces inflammation in the nervous system, protects against stroke and memory disorders, and alleviates symptoms of depression [Kim et al. 2016]. The chemical composition of strawberries accounts for their anti-cancer, anti-inflammatory, antiviral, antibacterial, anti-atherosclerotic, anti-thrombotic, anti-allergic, and anti-cholesterol effects [Puksza and Platta 2017].

Poland is a significant producer of strawberries globally and within the European Union. According to data from the Central Statistical Office [GUS 2024b], in 2023, strawberries accounted for 32.4% of the national production of berry fruits. Between 2010 and 2022, strawberry harvests ranged from 150,000 to 200,000 t, with 96% coming from conventional farming. In 2022, Poland ranked 8th in the world in strawberry production and 2nd in the European Union, right behind Spain [own calculations based on FAO data]. The widespread cultivation of strawberries in Poland is due to favourable climatic and soil conditions for their growth, high demand for fresh strawberries, which comprise more than half of the production volume, and processed strawberries [Zmarlicki and Brzozowski 2020]. Strawberry consumption in Poland is estimated at around 4 kg per person per year. The growing demand for strawberries among Polish consumers is driven by their taste, health benefits, and continuous supply, while the relatively high price is a limiting factor for consumption [Zmarlicki and Brzozowski 2020].

To the authors' knowledge, Polish consumers' purchasing behaviours and preferences in the strawberry market have not yet been analysed.

To fill this gap and additionally explore the alignment between the visual acceptance of strawberries and their sensory evaluation, a study was conducted with the following objectives:

- an analysis of consumer behaviour and preferences regarding strawberries, including consumption frequency, factors influencing fruit choice, preferences for strawberry characteristics (colour, appearance, shape), price levels acceptance, and packaging preferences;
- an evaluation of consumer preferences for selected strawberry cultivars based on their external appearance and sensory characteristics such as taste, aroma, juiciness, and firmness.

In the context of the research objectives presented above, the following research questions were formulated:

1. How does the frequency of strawberry consumption among young consumers vary by season, and to what extent is it influenced by gender, income, and place of residence?
2. Which factors are most important to young consumers when purchasing strawberries, and how do they rank external appearance, aroma, price, packaging type, organic cultivation, and Polish origin in their decision-making process?
3. Do young consumers accept higher prices for strawberries in the winter season compared to summer?
4. What type of strawberry packaging do young consumers prefer, and how do they perceive plastic versus natural packaging materials?
5. Which characteristics of strawberry appearance – such as size, color, and shape – are most preferred by young consumers?
6. Do young consumers' preferences for the external appearance of different strawberry cultivars align with their evaluation of sensory qualities?

MATERIAL AND METHODS

To achieve the research objective, a quantitative study was conducted in the spring of 2024 using the CAWI (Computer Assisted Web Interview) method, and a qualitative research in the summer of 2024 using organoleptic evaluation.

In both studies, the respondents were individuals aged 18–25. There were three main reasons for selecting a sample of young people for the study – first, young people, having constant access via social media to vast amounts of information about the market, products, and consumption behaviour of others, are much more informed than older generations, and, as a result, are more aware of their market choices [Cochoy et al. 2020]. Second – young consumers are more sensitive to environmental issues, which is reflected in their purchasing decisions [Bernaciak et al. 2021]. Third – these consumers will soon form the primary target group for the food market, so understanding their preferences in advance is particularly important [Park 2021]. Both studies involved only individuals who gave informed consent to participate.

Survey research

The research questionnaire consisted of a demographic section, which included questions about gender, place of residence, and income, and a substantive section that addressed the following areas:

- strawberry consumption frequency (in summer and in winter) – closed, nominal scale,
- determinants of strawberry choice – scale from 1 (most important) to 7 (least important), preferences for fruit appearance (colour, shape, size) – closed, nominal scale,
- perception of strawberry characteristics by packaging type (fig. 1) – closed, nominal scale,
- preferences for external features of strawberry varieties (Lycia, Aprica, Giusy, Klodia) – scale from 1 (most preferred) to 4 (least preferred) – fig. 2.



Option 1



Option 2

Fig. 1. Photographs of strawberries in two commercial packages: option 1 in plastic packaging and option 2 in a wooden container



Fig. 2. Strawberry cultivars subjected to preference evaluation: A – Lycia, B – Aprica, C – Giusy, D – Klodia

The study involved 203 respondents. Over 75% of the participants were women. In terms of place of residence, the majority of respondents (over 44%) lived in cities with a population of over 500,000, 30.6% lived in towns with up to 500,000 residents, while

one in four respondents lived in rural areas. As for income, 9.4% of respondents opted not to provide an answer, while the remaining respondents were evenly distributed across three income brackets: up to 2500 PLN per person, from 2500 to 4500 PLN per person, and above 4500 PLN per person (tab. 1).

Table 1. Characteristics of the research sample (data in %)

Gender		Place of residence			Monthly net income per person in the household			
women	men	village	city with up to 500,000 residents	city with over 500,000 residents	up to 2500 PLN	2501–4500 PLN	over 4500 PLN	no answer
75.9	24.1	25.1	30.6	44.3	30.0	30.1	30.5	9.4

The statistical analysis of data obtained from the quantitative study included descriptive statistics and analysis using non-parametric tests. The Kruskal–Wallis ANOVA test (K–W) was used to compare income levels and place of residence for questions constructed using the ordinal scale. In contrast, the Mann–Whitney U test (M–W) was applied for comparisons based on gender. Pearson's Chi-square test (χ^2) was employed for single-choice questions to assess dependencies concerning gender, place of residence, and income. A significance level of $p < 0.05$ was accepted for all tests. The effect size (η^2) was calculated to determine statistically significant results to evaluate the magnitude of the observed effect or the differences between groups. In all instances of statistically significant findings, the effect size was moderate, which suggests a substantial cognitive value in the results obtained [Fritz et al. 2012]. The Statistica 13.3 program was used for the analyses.

Sensory evaluation

The sensory evaluation focused on four cultivars of strawberries: Lycia, Aprica, Giusy, and Klodia. To ensure objectivity in the assessment, each array was represented by samples of strawberries with a uniform level of ripeness, carefully washed and dried. The samples were presented in identical containers (fig. 2).

Each of the 29 participants in the study received samples of strawberries, which they evaluated according to a predetermined set of criteria concerning aroma (sweet, sour, typical strawberry), juiciness, firmness, and taste (sweet, sour, typical strawberry). Participants rated the intensity of each feature on a linear scale of 10 cm, where 0 cm indicated the absence of the analysed feature and 10 cm indicated the highest intensity. As part of the statistical analysis, average ratings for each evaluated feature were calculated, followed by comparisons of results regarding the individual strawberry cultivars. To identify statistically significant differences between cultivars, an analysis of variance (ANOVA) was conducted, and in cases where statistically significant differences were detected, post-hoc tests (Tukey's test) were performed.

RESULTS

Frequency of strawberry consumption in the summer and winter season

In the summer season, the largest group of respondents (49.3%) consumed strawberries several times a week, and over one-third of respondents (34.5%) consumed strawberries once a week. Additionally, 5.9% of participants said they consumed them once a month, 5.4% indicated “once per season” and nearly 5% stated that they consumed strawberries daily. None of the participants reported that they ever consumed strawberries. Statistical analysis showed significant differences in the frequency of strawberry consumption during the summer season based on gender – women reported a higher frequency of strawberry consumption (tab. 2).

Table 2. Frequency of strawberry consumption in the summer season considering gender, place of residence, and income

Frequency of consumption	Responses (%)	Gender (p^* , η^2)	Place of residence (p^{**})	Income (p^{**})
Never	0	0.01	0.79	0.09
Once per season	5.4			
Once a month	5.9			
Once a week	34.5			
Several times a week	49.3			
Daily	4.9			

* Mann–Whitney U test, ** Kruskal–Wallis ANOVA test

In the winter season, more than one-third of respondents (36%) declared that they do not consume strawberries during this time. Nearly 40% of participants consumed strawberries only once during the entire season, and 19.2% consumed them monthly. Higher frequencies of consumption were not reported. In the winter season, income was the determining factor for higher consumption frequency – individuals with incomes between 2500 and 4500 PLN most frequently consumed strawberries during this period (tab. 3).

Table 3. Frequency of strawberry consumption in the winter season considering gender, place of residence, and income

Frequency of consumption	Responses (%)	Gender (p^* , η^2)	Place of residence (p^{**})	Income (p^{**})
Never	36.0	0.54	0.18	0.01
Once per season	39.3			
Once a month	19.2			
Once a week	3.0			
Several times a week	2.5			
Daily	0.0			

* Mann–Whitney U test, ** Kruskal–Wallis ANOVA test

Determinants of strawberry purchasing

The respondents identified the most critical factors for selecting strawberries as appearance (mean score of 3.63) and aroma (3.60). Following these, the factors ranked in order of importance were price (3.77), packaging (3.86), place of purchase (3.94), country of origin (3.98), and place of sale (3.94). The least significant factor for respondents was information on the packaging (4.02). It was noted that the importance of the place of purchase increased with income, and the country of origin of the strawberries was significantly more important for women (tab. 4).

Table 4. Importance of factors influencing strawberry purchases based on gender, place of residence, and income

Important features	Average	Gender (p*)	Place of residence (p**)	Income (p**)
Appearance	3.63	0.86	0.18	0.38
Aroma	3.69	0.25	0.10	0.61
Price	3.77	0.41	0.62	0.52
Packaging	3.86	0.93	0.34	0.71
Place of purchase	3.94	0.75	0.35	0.04
Country of origin	3.98	0.00	0.85	0.93
Information on the packaging/ at the point of sale, e.g. about flavour	4.02	0.84	0.88	0.37

* Mann–Whitney U test, ** Kruskal–Wallis ANOVA test

Willingness to pay for strawberries in summer and winter seasons

In the summer season, the largest group of respondents (31.5%) were willing to pay between 8 and 10 PLN per kilogram of strawberries, while 26.6% preferred prices in the range of 10–12 PLN. A much smaller portion (17.7%) was ready to pay between 6 and 8 PLN, and only 4.9% of respondents indicated the lowest price range – up to 6 PLN (tab. 5).

Table 5. Accepted price per kilogram of strawberries in the summer season

Accepted price per kilogram (PLN/EUR)	Responses (%)
Up to 6/1.39	4.9
6–8/1.39–1.86	17.7
8–10/1.86–2.31	31.5
10–12/2.31–2.77	26.6
12–15/2.77–3.46	9.4
Over 15/3.46	1.0
The price is not necessary to me	7.9
I do not buy during this period	1.0

In the winter season, the highest percentage of respondents (21.2%) indicated a preferred price range of 12 to 17 PLN per kilogram; 11.3% considered a price from 8 to 12 PLN acceptable. In comparison, less than 4% of respondents indicated other price ranges, and more than half (52.7%) declared they did not buy strawberries during this period (tab. 6). No statistically significant relationship was found between gender, place of residence, and income of the respondents and their preferences regarding strawberry price levels.

Table 6. Accepted price per kilogram of strawberries in the winter season

Accepted price per kilogram (PLN/EUR)	Responses (%)
Up to 8/1.86	3.9
8–12/1.86–2.77	11.3
12–17/2.77–3.93	21.2
17–22/3.93–5.08	3.0
Over 22/5.08	1.5
The price is not necessary to me.	6.4
I do not buy during this period.	52.7

Both in the summer and winter seasons, no statistically significant relationship was found between respondents' preferences regarding strawberry price levels and gender, place of residence, and income level.

Preferences towards strawberry packaging

Respondents were asked to evaluate the characteristics of strawberries placed in two different types of packaging – a wooden punnet and a plastic container (fig. 1). Strawberries in the wooden punnet were statistically significant ($p < 0.05$) and more often perceived as being directly from the farmer, associated with Polish origin, considered fresh, and seen as organic. On the other hand, respondents more frequently perceived strawberries in plastic containers as being more expensive (tab. 7). There was no variation in the respondents' opinions based on gender, place of residence, or income level.

Table 7. Perception of strawberry characteristics in plastic packaging and wooden punnet

Strawberry characteristics	Strawberries in plastic packaging (%)	Strawberries in wooden crates (%)
Come from Poland	6.9	93.1
More expensive per kilogram	71.4	28.6
Fresher	9.9	90.1
Organic	14.8	85.2
Straight from the farmer	3.0	97.0

Preferences towards colour, shape and size of strawberries

Respondents were asked to specify their preferences regarding strawberries' colour, shape, and size. Concerning the colour of the fruit, regardless of gender, place of residence, and income, respondents most frequently preferred strawberries in a red colour (74.4%) (tab. 8).

As for the shape, most respondents (66.5%) stated that this feature was irrelevant, while 21.7% indicated a preference for a conical shape (tab. 9).

The size of strawberries was unimportant for 46.8% of respondents, 35% preferred medium-sized fruits, with respondents from cities of up to 500,000 inhabitants significantly more likely to choose this answer, while 17.7% preferred large strawberries (tab. 10).

Table 8. Respondents preferences regarding strawberry colour

Strawberry colour	Responses (%)
Red	74.4
From pink to light red	19.6
Light pink	2.5
Not important	3.5

Table 9. Respondents preferences regarding the shape of strawberries

Strawberry shape	Responses (%)
Conical	21.7
Rounded	1.5
Spindle-shaped	2.4
Irregular	6.4
Spherical	1.5
Not important	66.5

Table 10. Respondents preferences regarding the size of strawberries by gender, place of residence, and income

Strawberry size	Responses (%)
Large	17.7
Medium	35.0
Small	0.5
Not important	46.8

*Pearson Chi² test

There was no variation in the respondents' opinions about the colour, shape, and size of strawberries based on gender, place of residence, or income level.

Evaluation of external characteristics of selected strawberry cultivars

Among the four evaluated by appearance strawberry cultivars (Lycia, Aprica, Giusy, and Klodia) – fig. 2, the most preferred cultivar by respondents was Aprica (mean score 2.12). A lower preference level (2.20) was recorded for the cultivar Giusy, followed by Klodia (2.27). The least accepted variety was Lycia, with a mean score of 3.41. The differences in the ratings of the individual varieties were statistically significant.

Table 11. Respondents visual preferences for selected strawberry cultivars considering gender, place of residence, and income, and the ratings of strawberries by cultivar with p-values for the significance of differences between varieties, gender, place of residence, and income

Cultivars	Average rating	For comparison between cultivars (p^*)	Gender (p^{**})	Place of residence (p^{***})	Income (p^{***})
Lycia	3.41	0.00	0.21	0.49	0.79
Aprica	2.12		0.65	0.95	0.02
Giusy	2.20		0.92	0.11	0.00
Klodia	2.27		0.38	0.98	0.88

* ANOVA Friedman test; ** Mann–Whitney U test, *** Kruskal–Wallis ANOVA test

Considering the demographic and economic characteristics of the respondents, statistically significant variation in the ratings of different cultivars was observed only for the cultivars Aprica and Giusy concerning income level. As income increased, the preference for the Aprica cultivar increased, while the acceptance of the Giusy cultivar decreased (tab. 11).

Evaluation of sensory characteristics of selected strawberry cultivars

As part of the organoleptic study, respondents evaluated the aroma, juiciness, firmness and taste of the strawberry cultivars assessed for appearance in the survey.

The results of the aroma evaluation showed that for the sweet aroma, the highest rating was given to the Klodia cultivar (4.90). At the same time, the lowest score was assigned to the Aprica cultivar (3.57). Aprica received the highest score (3.04) for the sour aroma, and Lycia the lowest (2.44). Regarding the strawberry aroma, the Giusy cultivar was rated the highest (5.16), while Klodia scored the lowest (4.49). The differences in the ratings for all aroma types were not statistically significant. Regarding juiciness, the Lycia variety obtained the highest average rating (6.88), followed by Aprica (6.31), Klodia (5.84), and Giusy (4.30). The differences between cultivars of juiciness were statistically significant.

Giusy received the highest rating (6.22) for firmness, and Lycia the lowest (4.06). The firmness of Klodia was rated at 4.62, and Aprica at 4.11. These differences were statistically significant.

Sweet, sour, and strawberry flavours were considered in terms of taste. For sweetness, Klodia received the highest rating (5.68), while Giusy received the lowest (4.85). The differences in sweetness ratings between the cultivars were not statistically significant. For the sour taste, Aprica was rated the highest (4.74), followed by Lycia (4.56), with

Giusy receiving a score of 3.47 and Klodia 3.16. Regarding the strawberry taste, Klodia was rated the highest (6.44), followed by Lycia (5.78), with Aprica scoring 4.61 and Giusy 4.10. The differences in sour and strawberry taste ratings among the cultivars were statistically significant (tab. 12).

Table 12. Results of the organoleptic evaluation of the strawberry cultivars Lycia, Aprica, Giusy, Klodia

Sensory characteristics		Lycia	Aprica	Giusy	Klodia	p^*
Aroma	sweet	4.64	3.57	4.79	4.9	0.32
	sour	2.44	3.04	2.77	2.49	0.75
	strawberry	4.86	4.55	5.16	4.49	0.83
Juiciness		6.88	6.31	4.30	5.84	0.00
Firmness		4.06	4.11	6.22	4.62	0.00
Taste	sweet	4.94	5.27	4.85	5.68	0.82
	sour	4.56	4.74	3.47	3.16	0.01
	strawberry	5.78	4.61	4.10	6.44	0.00

* Analysis of variance (ANOVA)

To assess the differences between the cultivars, Tukey's HSD (Honestly Significant Difference) test was conducted for characteristics with statistically significant ratings (juiciness, firmness, sour taste, and strawberry taste).

Regarding juiciness, the Giusy cultivar was rated significantly lower than the others. This cultivar was also rated significantly firmer. The Klodia cultivar received a significantly lower rating for sour taste than the Aprica cultivar. Regarding strawberry taste, both the Lycia and Klodia cultivars received the highest ratings. According to the survey participants, the Klodia cultivar was characterised by a more intense strawberry flavour compared to the Aprica and Giusy cultivar. In contrast, the Lycia cultivar had a more robust strawberry flavour than Giusy (tab. 13).

Table 13. Results of Tukey's HSD Tests for juiciness, firmness, sour taste, and strawberry taste for the four analyzed strawberry cultivars

Comparison between cultivars	Juiciness p^*	Firmness p^*	Sour taste p^*	Strawberry taste p^*
Lycia (A) vs Aprica (B)	0.75	1.00	0.99	0.28
Lycia (A) vs Giusy (C)	0.00	0.00	0.20	0.05
Lycia (A) vs Klodia (D)	0.26	0.69	0.06	0.73
Aprica (B) vs Giusy (C)	0.00	0.00	0.10	0.86
Aprica (B) vs Klodia (D)	0.84	0.75	0.03	0.03
Giusy (C) vs Klodia (D)	0.04	0.01	0.95	0.00

* Tukey's honestly significant difference (HSD) test

DISCUSSION

The results obtained allowed for the achievement of the stated research objectives. Regarding consumer behaviours, it was found that during the summer season, strawberries are most often consumed once or several times a week, while in winter, they are consumed once during the season or not at all. The seasonality of strawberry consumption, caused by the higher price of the fruit and the fact that they come from other countries or are grown in tunnels, has also been confirmed by other studies [Bhat et al. 2015, Roalmer 2022]. At the same time, the study conducted by Kamińska [2024] among a group of 189 students showed that, out of 23 fruit species listed in the survey, strawberries were the favourite fruit for as many as 67.2% of young consumers. Additionally, research conducted in 2023 [KZGPOiW 2023] indicated that strawberries are among the most sought-after seasonal fruits.

A statistically significant factor differentiating strawberry consumption in the summer was gender – women declared more frequent consumption. In contrast, in the winter season, respondents with a medium income level declared the most frequent consumption. The influence of gender and income on strawberry consumption was also noted in studies by Bhat et al. [2015], while Stea et al. [2020] reported generally higher fruit and vegetable consumption among women. The place of residence did not differentiate the frequency of strawberry consumption. However, the results of the GUS Household Budgets Survey [GUS 2024a] indicate that residents of large cities declare the highest consumption of berries.

The survey results indicate that for respondents the appearance and aroma of these fruits are considered the most important factors in choosing strawberries; less important determinants of choice were price, type of packaging, organic cultivation of the fruits, and country of origin. Findings on the key importance of taste and smell when buying strawberries are confirmed by other studies [Fan et al. 2021, Aoki and Akai 2023].

Price ranked fourth in strawberry purchasing factors, and its preferred level was lower in the summer than in the winter seasons. The sensitivity of consumers to strawberry prices is supported by research conducted by Sparacino et al. [2024], in which the Price Conscious segment constituted the most significant percentage (35%) of respondents. The variability in price preferences depending on the season is also supported by the study by Bhat [2015].

Packaging ranked fourth among the determinants of strawberry choice, while the information on it was found to be the least significant factor for respondents. The study by Sparacino et al. [2024] also showed the relatively low importance of packaging when purchasing strawberries, while analyses by Ruth and Rumble [2016] indicated a marginal effect of the information on packaging on consumers' purchasing decisions. A survey showed that packaging influences the perception of strawberries: those in wooden crates were seen as domestic, fresh, organic, and farm-sourced, while strawberries in plastic packaging were considered more expensive. The effect of packaging type on the perception of fresh food products was also found in a study by Ruth and Rumble [2016].

The place of purchase was moderately important for young Poles, similar to findings by Bhat et al. [2015] and Wang et al. [2017]. In studies by Bhat et al. [2015] concerning respondents from Germany, it was found that the preferred place to purchase strawberries

is large grocery stores, while Wang et al. [2017] noted that the segment of young consumers in the USA is more inclined than other groups to purchase strawberries at farmers' markets.

The country of origin proved moderately important for Polish consumers. The mild significance of this factor was also noted in studies by Roberts et al. [2021], Saracino et al. [2024], Bhat et al. [2015] and Wang et al. [2017].

Regarding respondents' preference for external features of strawberries, it was noted that young consumers prefer red-coloured, middle-sized, and conical-shaped fruits. The preference for the red colour of strawberries is confirmed by studies conducted by Aoki and Akai [2023] and Stea et al. [2020]. Whereas higher acceptance for oval and large strawberries was also found in studies by Wang et al. [2017] and Bhat et al. [2015].

When evaluating selected strawberry cultivars based on appearance, the respondents participating in the survey found the Aprica cultivar to be the most attractive, with a lower level of preference for the Giusy cultivar, the Klodia cultivar ranked next, and the least acceptable was the Lycia cultivar. However, an analysis of the sensory characteristics (aroma, juiciness, firmness, and taste) of the same fruit cultivars showed that considering the previously identified [Kim et al. 2016, Wendin et al. 2019, Fan et al. 2021], quality traits of strawberries, the most attractive cultivar is Klodia, rated by respondents as the sweetest, with the most intense strawberry flavour, moderately juicy, and the least acidic. The observed discrepancy in respondents' preferences regarding the appearance and sensory characteristics of the fruit suggests that the choice of strawberries based on visual attributes does not align with the preferred sensory properties of these fruits.

CONCLUSIONS

The study on strawberry consumption in Poland revealed significant insights into young consumer behaviour. Significant seasonality in consumption was found, with statistically significant factors differentiating strawberry consumption in the summer gender and income. The survey results also indicate that for young respondents the appearance and aroma of strawberries are the most important factors in choosing the fruit; less important determinants of choice were price, type of packaging, organic cultivation of the fruits, and country of origin. It was found that young respondent's price sensitivity varies by season – they are more willing to pay higher prices for strawberries in winter than in summer. It was also that young consumers' perceptions of strawberry quality depended on the type of package – wooden containers were associated with local and fresh attributes, while the fruit in plastic packaging was considered more expensive. Regarding young respondents' preference for external features of strawberries, it was noted that young consumers prefer red-coloured, middle-sized, and conical-shaped fruits. Sensory evaluation of four new strawberry cultivars – Lycia, Aprica, Giusy, and Klodia – revealed Klodia as the most favourable in sweetness and flavour, though Aprica was visually preferred by young respondents. These findings indicate that visual preferences may not always align with expected sensory qualities when selecting strawberries.

These insights offer valuable guidance for marketing strategies and supply chain management.

This study has several limitations. First, the survey method relied on self-reported data, which may introduce potential biases. Furthermore, the small sample size limits the generalizability of the findings, and the emphasis on young consumers means that the results may not accurately represent other age groups. To enhance future research, it would be beneficial to include a more diverse sample to provide a broader understanding of consumer preferences.

REFERENCES

- Aoki K., Akai K.A., 2023. A comparison between Spain and Japan concerning the colour, expected taste scale, and sustainability of strawberries: A Choice Experiment. *Food Qual. Prefer.* 103, 104671. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2022.104671>
- Bhat R., Geppert J., Funken E., Stamminger R., 2015. Consumers perceptions and preference for strawberries – a case study from Germany. *Int. J. Fruit Sci.* 15(4), 405–424. <https://doi.org/10.1080/15538362.2015.1021408>
- Bieniek M., 2022. Konsumpcja owoców i warzyw w Unii Europejskiej oraz jej potencjalne środowiskowe i zdrowotne konsekwencje. *Zag. Doradztwa Rol.* 1(107), 22–40 [in Polish].
- Bernaciak A., Beanaciak A., Janicka M. 2021. The field of study as a factor differentiating students' level of environmental awareness. *Ekon. Środ.* 77(2), 144–161. <https://doi.org/10.34659/2021/2/17>
- Cochoy F., Licoppe C., Petersson McIntyre M., Sörum N., 2020. Digitalizing consumer society. Equipment and devices of digital consumption. *J. Cult. Econ.* 13, 1–11. <https://doi.org/10.1080/17530350.2019.1702576>
- Dudkowska M., 2023. Związki pochodzenia naturalnego w przeciwdziałaniu starzenia. *Kosmos. Probl. Nauk Biol.* 72(4), 503–516. https://doi.org/10.36921/kos.2023_2970
- Fan Z., Hasing T., Johnson T.S., Garner D.M., Barbey C.R., Colquhoun T.A., Sims C.A., Resende M.F.R., Whitaker V.M., 2021. Strawberry sweetness and consumer preference are enhanced by specific volatile compounds. *Hortic. Res.* 8(66). <https://doi.org/10.1038/s41438-021-00502-5>
- Fritz C.O., Morris P.E., Richler J.J., 2012. Effect size estimates: current use, calculations, and interpretation. *J. Experim. Psychol. Gen.* 141(1), 2–18.
- Giampieri F., Alvarez-Suarez J.M., Mazzoni L., Romandini S., Bompadre S., Diamanti J., Capocasa F., Mezzetti B., Quiles J.L., Ferreiro M.S., Tulipani S., Battino M., 2013. The potential impact of strawberry on human health. *Nat. Prod. Res.* 27(4–5), 448–455.
- Giampieri F., Forbes-Hernandez T.Y., Gasparrini M., Alvarez-Suarez J.M., Afrin S., Bompadre S., Quiles J.L., Mezzetti B., Battino M., 2015. Strawberry as a health promoter: an evidence based review. *Food Function* 6(5), 1386–1398.
- Gondek K., Gondek K., Kopeć M., Mierzwa-Hersztek M., Jarosz R., Zaleski T., Bogdał S., Bieniasz M., Kaczmarczyk E., Knaga J., Nawrocki J., Pniak M., Kowalczyk B., Błaszczuk J., 2020. Mineral composition of fruits and leaves of San Andreas® everbearing strawberry in soilless cultivation. *J. Elementol.* 4. <https://doi.org/10.5601/jelem.2020.25.2.2013>
- GUS, 2024a. Budżety gospodarstw domowych w 2023 r. [Household budget survey in 2023]. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/warunki-zycia/dochody-wydatki-i-warunki-zycia-ludnosci/budzety-gospodarstw-domowych-w-2023-roku,9,22.html> [access: 6.07.2024].
- GUS, 2024b. Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej 2024 [Statistical yearbook of the Republic of Poland 2024]. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/roczniki-statystyczne/roczniki-statystyczne/rocznik-statystyczny-rzeczypospolitej-polskiej-2024,2,24.html> [access: 7.07.2024].
- Ita Y., Ita A.K., Rahaju B., 2019. Strawberry extract as a tooth stain remover. *Health Notions* 3(1), 28–31. <https://doi.org/10.33846/hn.v3i1.300>

- Janda K., Kasprzak M., Wolska J., 2015. Witamina C – budowa, właściwości, funkcje i występowanie [Vitamin C – structure, properties, occurrence and functions]. *Pomerian J. Life Sci.* 61(4), 419–425 [in Polish].
- Kamińska K., 2024. Preferencje studentów w zakresie spożycia świeżych owoców. Praca inżynierska, SGGW w Warszawie, 35 [in Polish].
- Khan N., Syed D., Ahmad N., Mukhtar H., 2013. Fisetin. A dietary antioxidant for health promotion. *Antioxid. Redox Signal* 19(2), 151–162. <https://doi.org/10.1089/ars.2012.4901>
- Kim S., Choi K.J., Cho S.J., Yun S.M., Jeon J.P., Koh Y.H., Song J., Johnson G.V.W., Jo C., 2016. Fisetin stimulates autophagic degradation of phosphorylated tau via the activation of TFEB and Nrf2 transcription factors. *Int. J. Sci. Rep.* 6, 24933. <https://doi.org/10.1038/srep24933>
- Kopytowski J., Kawecki Z., Bojarska J.E., Stanys V., 2006. Ocena plonowania i jakości owoców kilku odmian truskawki uprawianej na Warmii [Yielding and fruit quality of some strawberry cultivars cultivated in the Warmia region]. *Zesz. Nauk. Instyt. Sad. Kwiac.* 14, 53–64.
- KZGPOiW, 2023. Truskawki z rekordami konsumpcji w każdym kolejnym miesiącu lata – Kantar. <https://polskiesuperowoce.pl/264813-truskawki-z-rekordami-konsumpcji-w-kazdym-kolejnym-miesiacu-lata-kantar> [access: 24.02.2025].
- Miller K., Feucht W., Schmid M., 2019. Bioactive compounds of strawberry and blueberry and their potential health effects based on human intervention studies: A brief overview. *Nutrients* 11(7), 1510.
- Odrizola-Serrano I., Soliva-Fortuny R., Gimeno-Ano V., Martin-Belloso O., 2008. Kinetic study of anthocyanins, vitamin C, and antioxidant capacity in strawberry juices treated by high-intensity pulsed electric fields. *J. Agri. Food Chem.* 56(18), 8387.
- Park H., 2021. Financial behavior among young adult consumers: the influence of self-determination and financial psychology. *Young Consumers* 22(4), 597–613. <https://doi.org/10.1108/YC-12-2020-1263>
- Pinto M.S., Lajolo F.M., Genovese M.I., 2008. Bioactive compounds and quantification of total ellagic acid in strawberries (*Fragaria* × *ananasa* Duch.). *J. Agric. Food Chem.* 107, 1629–1635. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.10.038>
- Pukszta T., Platta A., 2017. Truskawki jako źródło składników bioaktywnych wspomagających profilaktykę chorób nowotworowych [Strawberries as the source of bioactive ingredients supporting prevention of cancers]. *Bromat. Chem. Toksikol* 3, 234–240.
- Roalmer, 2022. Consumer report: the strawberry season. <https://www.roamler.com/consumer-report-the-strawberry-season/> [access: 5.07.2024].
- Roberts R.E., Eslick B., KC D., 2021. Understanding consumer preferences for new market entry: A study of strawberry consumption in Jakarta. *Acta Hortic.* 1309, 1053–1062. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1309.149>
- Ruth T.K., Rumble J.N., 2016. Branding the berries: consumers' strawberry purchasing intent and their attitude toward Florida strawberries. *J. Appl. Commun.* 100(2), 26–42. <https://doi.org/10.4148/1051-0834.1028>
- Seram N.P., 2014. Berry fruits: compositional elements, biochemical activities, and the impact of their intake on human health, performance, and disease. *J. Agric. Food Chem.* 62(18), 3839–3841. <https://doi.org/10.1021/jf071988k>
- Sparacino A., Ollani S., Baima L., Oliviero M., Borra D., Rui M., Mastromonaco G., 2024. Analyzing strawberry preferences: Best–worst scaling methodology and purchase styles. *Foods* 13(10), 1474. <https://doi.org/10.3390/foods13101474>
- Stea T.H., Nordheim O., Bere E., Stornes P., Eikemo T.A. 2020. Fruit and vegetable consumption in Europe according to gender, educational attainment and regional affiliation – A cross-sectional study in 21 European countries. *PLoS One* 15(5), e0232521. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232521>

- Wang J., Yue C., Gallardo K., McCracken V., Luby J., McFerson J., 2017. What consumers are looking for in strawberries: Implications from market segmentation analysis. *Agribusiness* 33, 56–69. <https://doi.org/10.1002/agr.21473>
- Wendin K., Egan P.A., Olsson V., Forsberg S., Nilsson A., Stenberg J.A., 2019. Is there a best woodland strawberry? A consumer survey of preferred sensory properties and cultivation characteristics. *Int. J. Gastronomy Food Sci.* 16, 100151.
- Zdrojewicz Z., Bieszczad N., Gąsior P., Rogoza A., 2017. Eating strawberries – you will be healthier. *Med. Rodz.* 20(1), 48–52.
- Zmarlicki K., Brozowski P., 2020. Perspektywy, szanse i zagrożenia dla produkcji truskawek, jagody kamczackiej i aronii. Instytut Ogrodnictwa, Skierniewice [in Polish]. http://www.inhort.pl/files/program_wieloletni/PW_2015_2020_IO/spr_2020/5.1_Zmarlicki_Raport_2020.pdf

The source of funding: Warsaw University of Life Sciences.

Received: 28.10.2024

Accepted: 6.03.2025

Published: 19.05.2025



¹ Katedra Agronomii, Wydział Rolnictwa i Biotechnologii, Politechnika Bydgoska,
ul. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska

² Centrum Badawczo-Rozwojowe, ul. Kościelna 1, Śmielin, 89-110 Sadki, Polska

³ Instytut Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie,
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, Polska

* e-mail: darekjas@pbs.edu.pl

DARIUSZ JASKULSKI^{1*}, IWONA JASKULSKA¹,
EMILIAN RÓŹNIAK², MAJA RADZIEMSKA³

Efekty zmian konstrukcyjnych elementów roboczych maszyny do uprawy pasowej. Cz. I: Wydajność eksploatacyjna, zużycie paliwa, emisja CO₂

The effects of design changes to the working elements of a strip-till machine.
Part I: Operating efficiency, fuel consumption and CO₂ emissions

Abstrakt. Innowacyjne rozwiązania materiałowe i konstrukcyjne czynią maszyny rolnicze bardziej doskonałymi, rozwijają ich rynek i umożliwiają wprowadzanie nowych technologii do polowej produkcji roślinnej. Wzrastające zainteresowanie nauki i praktyki rolniczej pasową uprawą roli z jednoczesną aplikacją nawozów i siewem nasion upoważnia do badań nad konstrukcją elementów roboczych maszyny do uprawy strip-till one-pass dostosowywanymi je do pracy w warunkach glebowo-klimatycznych Polski i Europy Środkowo-Wschodniej. W efekcie badań przemysłowych i prac rozwojowych zmieniono kształt zębów uprawowo-aplikujących i redlic siewnych hybrydowej maszyny Mzuri. Powierzchnia elementów pracujących w glebie została utwardzona przez napawanie węglikiem spiekany w celu poprawy parametrów pracy w porównaniu z maszyną standardową. Efektem wprowadzonych zmian było zmniejszenie zużycia oleju napędowego o 3,4–3,8 dm³·ha⁻¹ i emisji dwutlenku węgla do atmosfery o 9,3–10,5 kg CO₂·ha⁻¹ w agrotechnice pszenicy ozimej, rzepaku ozimego, jęczmienia jarego, grochu i kukurydzy. Zmiany konstrukcyjne elementów roboczych zwiększyły wydajność maszyny o szerokości roboczej 4 m o 28,8%, a o szerokości 6 m o 34,0% w porównaniu z maszyną standardową.

Słowa kluczowe: uprawa pasowa, elementy robocze maszyny, wydajność eksploatacyjna, zużycie paliwa, emisja CO₂

Cytowanie: Jaskulski D., Jaskulska I., Różniak E., Radziemska M., 2025. Efekty zmian konstrukcyjnych elementów roboczych maszyny do uprawy pasowej. Cz. I: Wydajność eksploatacyjna, zużycie paliwa, emisja CO₂. *Agron. Sci.* 80(1), 21–35. <https://doi.org/10.24326/as.2025.5471>

WSTĘP

Jednym z warunków doskonalenia technologii uprawy roślin i wykorzystania efektów hodowli jest postęp techniczny, mechanizacyjny, w wyniku którego zwiększa się rynkowy asortyment innowacyjnych narzędzi i maszyn rolniczych [Jiang i in. 2021, Sandhu i in. 2021, Danda 2023]. Badania i prace rozwojowe w tym zakresie obejmują wszystkie etapy powstawania nowych rozwiązań [Wang i Zhang 2019]. Innowacje dotyczą wyboru i modyfikacji materiałów [Gulyarenko i Bembenek 2022], konstrukcji elementów roboczych [Radin i in. 2023], budowy i funkcjonalności podzespołów oraz całych maszyn [Talarczyk i Łowiński 2016]. Trend ten obejmuje również maszyny do uprawy pasowej [Benincasa i in. 2017, Matin i in. 2021, Yang i in. 2023].

Ocena nowych lub dalece zmodernizowanych maszyn może być prowadzona pod różnym kątem, nie tylko konstrukcyjnym, ale również ekonomicznym i oddziaływania na środowisko [Hafezalkotob i in. 2018]. Dla bezpośredniego, końcowego użytkownika, tj. rolnika ważna jest ich wydajność, a także wydajność w stosunku do nakładów i kosztów eksploatacji. Banasiak [2008] definiuje wydajność maszyny jako ilość pracy wykonanej w jednostce czasu lub przypadającej na jednostkę nakładu energii. Taka analiza pozwala wnioskować o wykorzystaniu maszyny w określonych warunkach organizacyjno-produkcyjnych gospodarstwa, w tym ocenę możliwości dotrzymania optymalnych terminów agrotechnicznych, a także o ekonomicznej zasadności inwestycji.

Zmiana konstrukcji maszyn pozwala zwiększyć ich wydajność, poprawić jakość pracy, zmniejszyć zużycie paliwa, a tym samym ograniczyć emisję CO₂ do atmosfery. Dotyczy to zarówno narzędzi do uprawy roli [Celik i in. 2007], jak i siewu czy nawożenia [Bulgakov i in. 2021, Javaid i in. 2023]. Często już niewielkie modyfikacje materiałowo-konstrukcyjne samych elementów roboczych tych maszyn poprawiają wskaźniki eksploatacyjne. Według Astafyev i in. [2021] zmiany konstrukcji zębów brony zwiększyły wydajność roboczą narzędzia o 4–5%, przy jednocześnie mniejszym o 4–5% zużyciu paliwa. Według Zbytka [2010] zamiana konstrukcji pługa z lemiesza i odkładnicy na ząb głębosza uzupełniony zębami kultywatora i talerzami, mimo spalania do tej samej głębokości, pozwoliła zmniejszyć zużycie paliwa o 4,6 dm³·ha⁻¹. Z kolei Aduov i in. [2020] szacują, że zastosowanie w maszynie do siewu bezpośredniego redlic dwutarczowych w kombinacji z dłutowymi i kultywatorowymi pozwala zmniejszyć zużycie paliwa o 10% w porównaniu z tradycyjnymi redlicami rzędowymi. Mniejsze zużycie paliwa ogranicza emisję CO₂ do atmosfery, gdyż podczas spalania 1 dm³ paliwa powstaje według różnych źródeł 2,64–3,76 kg CO₂ [Howey i in. 2011, Manzone i Calvo 2016, Auzins i in. 2021]. Dwutlenek węgla powstający wskutek zużycia paliwa jest częścią całkowitej puli emisji gazów cieplarnianych związanej w połowę produkcją roślinną [Stośić i in. 2021]. Konstrukcja maszyn musi uwzględniać również środowiskowe warunki pracy, tak aby założone cele agrotechniczne i eksploatacyjne mogły być osiągnięte w różnych, często trudnych warunkach, np. glebowych czy klimatycznych [Yazıcı 2024, Zhang i in. 2024].

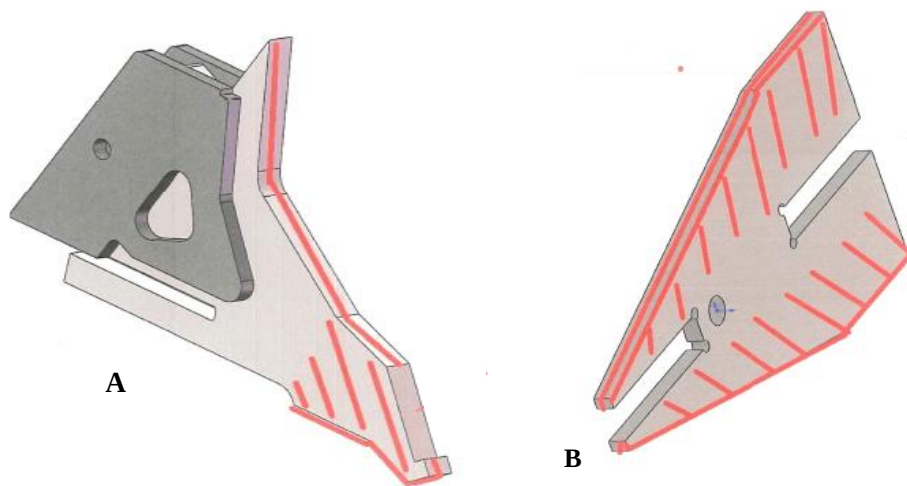
Wobec powyższego można zatem hipotetycznie zakładać, że zmiany konstrukcyjne maszyn rolniczych, także tych do uprawy pasowej, a nawet ich elementów roboczych powodują nie tylko zwiększenie wydajności, ale pozwalają ograniczyć zużycie paliwa i emisję CO₂ do atmosfery. Celem badań była ocena wpływu zmian konstrukcyjnych zębów

spulchniających pasy gleby i aplikujących nawozy mineralne oraz redlic wysiewających nasiona na wydajność maszyny Mzuri Pro-Til pracującej w technologii strip-till one-pass, na zużycie paliwa i emisję CO₂.

MATERIAŁ I METODY

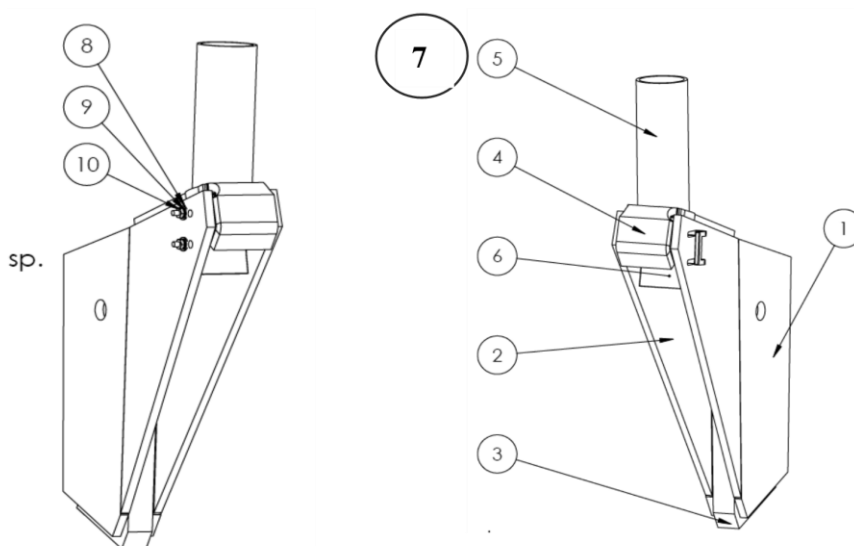
Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane w ramach projektu ^{\$}PB POIR.01.01.01-00-0910/17 wykonano w latach 2018–2022. W pierwszym etapie dokonano zmian konstrukcyjnych w obrębie zębów spulchniających pasy gleby i aplikujących nawozy mineralne oraz redlic siewnych. Dotychczasowe standardowe zęby spulchniające i aplikujące nawozy ze skrzydłami mieszającymi glebę o szerokości do 15 cm posiadały krótki korpus i kąt natarcia do 5°. Elementy te aplikowały strumień nawozu w strefę spulchnianej gleby bez możliwości regulowania kierunku przepływu. Z kolei redlice siewne, jednakowe do siewu różnych gatunków roślin, posiadały skrzydła boczne formujące bruzdę siewną wyprofilowane łącznie z powierzchniami czołowymi. Materiał konstrukcyjny części roboczych zębów i redlic był utwardzany jedynie przez hartowanie. W efekcie prac projektowych elementom bezpośrednio rozcinającym i mieszającym glebę nadano wydłużone i opływowe kształty, a ich powierzchnie utwardzono przez napawanie węglikiem spiekany (ryc. 1). Wyprofilowano i utwardzono również ściany elementu aplikującego nawóz mineralny, a zastosowanie osłony czołowej i kierownicy (ryc. 2) pozwala na regulowanie jego strumienia w zależności od warunków glebowych i wymagań agrotechnicznych uprawianych roślin. W konstrukcji redlic wysiewających nasiona zastosowano płaskie powierzchnie rozcinające glebę, które utwardzono węglikiem spiekany (ryc. 3). Tak zmienione elementy robocze spulchniające głęboko (do 30 cm) wąskie (do 12 cm) pasy gleby, jednocześnie aplikujące startową dawkę nawozów mineralnych oraz wysiewające nasiona roślin uprawnych zamontowano w hybrydowej maszynie Mzuri, w modelach Pro-Til 4T (szerokość robocza 4 m) oraz Pro-Til 6T XZACT (szerokość robocza 6 m), pracującej w technologii strip-till one-pass.

W drugim etapie badań zweryfikowano pracę nowo skonstruowanych, zmodyfikowanych elementów roboczych (ST-WP) w warunkach pól uprawnych w Centrum Badawczo-Rozwojowym firmy Agro-Land w Śmielinie, województwo kujawsko-pomorskie, Polska (53°09'04.0"N, 17°29'10.7"E; 93,8 m n.p.m.). W dwóch kolejnych latach porównano wydajność eksploatacyjną maszyn Mzuri Pro-Til 4T (szerokość robocza 4 m) w agrotechnice pszenicy ozimej, rzepaku ozimego, jęczmienia jarego i grochu siewnego i Mzuri Pro-Til 6T XZACT (szerokość robocza 6 m) w agrotechnice kukurydzy z wydajnością tych modeli maszyny wyposażonych w tradycyjne, standardowe elementy robocze (ST-T) na plantacjach o powierzchni min. 10 ha. Maszyny współpracowały z ciągnikiem rolniczym Claas Axion 850. Badania przeprowadzono na obszarze objętym klimatem kontynentalnym wilgotnym, klasyfikowanym przez Köppena-Geigera [Peel i in. 2007] jako zimny, bez pory suchej z ciepłym latem (Dfb). Średnia roczna temperatura powietrza w miejscu badań w ostatnich dekadach wynosiła 8,1°C, a suma opadów 485 mm.



Ryc. 1. Schemat napawania zęba spulchniającego (A) i jego wymiennych skrzydeł (B) węglikiem spiekany (linie czerwone)

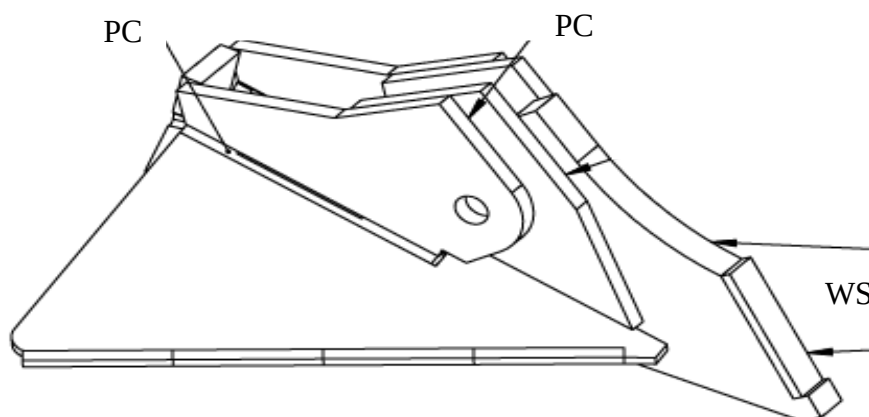
Fig. 1. Diagram of hardfacing of the loosening tooth (A) and its replaceable wings (B) with sintered carbide (red lines)



Ryc. 2. Widok ogólny aplikatora nawozów (7) z kierownicą strumienia: 1, 2 – ścianki boczne, 3 – blacha dystansowa, 4 – osłona czołowa, 5 – rura centralna, 6 – kierownica, 8 – podkładka kolistą, 9 – nakrętka, 10 – sprężyna kierownicy

Fig. 2. General view of the fertilisers applicator (7) with a flow guide: 1, 2 – side walls, 3 – spacer plate, 4 – front cover, 5 – central pipe, 6 – guide, 8 – round washer, 9 – nut, 10 – guide spring

W trakcie badań polowych określono wydajność eksploatacyjną maszyn ($\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$) poprzez bezpośredni pomiar czasu pracy niezbędnego do starannego wykonania czynności agrotechnicznych, takich jak jednoczesne spulchnianie pasów gleby, aplikacja nawozu startowego, siew nasion. Za właściwą jakość pracy maszyny przyjmowano: brak gromadzenia się resztek pozbiorowych przedplonu pomiędzy elementami roboczymi, uformowanie i zagęszczenie gleby w pasach siewnych, brak widocznego nawozu na powierzchni gleby, równomierna zadana głębokość siewu – brak nasion na powierzchni gleby. Zużycie paliwa ($\text{dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) oceniono metodą pełnego zbiornika. Maksymalnie napełniony wypoziomowany zbiornik ciągnika uzupełniano paliwem przy użyciu naczynia miarowego po zakończonej pracy na określonej powierzchni pola rejestrowanej przez komputer pokładowy maszyny.



Ryc. 3. Redlica siewna z płaskimi powierzchniami czołowymi (PC) utwardzonymi węglikiem spiekany (WS)

Fig. 3. Sowing coulter with flat front surfaces (PC) hardened with sintered carbide (WS)

Wyniki wyrażono w jednostkach bezwzględnych, odpowiednio dla wydajności ($\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$) i zużycia paliwa ($\text{dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$). Miarą względną efektu zmian konstrukcyjnych elementów roboczych maszyny była procentowa różnica (+/-) mierzonych wielkości, przyjmując za 100% wielkość właściwą dla maszyny przed zmianami konstrukcyjnymi (standardowe elementy robocze).

Emisję CO_2 ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) podczas uprawy roli, nawożenia przedsiewnego i siewu roślin ozimych oraz jarych będącą efektem zużycia paliwa przez współpracujący ciągnik rolniczy wyliczono, przyjmując, że w wyniku spalania 1 dm^3 oleju napędowego powstaje $2,75 \text{ kg CO}_2$ [Shires i in. 2009].

WYNIKI

Wydajność standardowej maszyny używanej w technologii uprawy roślin ozimych wynosiła w zależności od roku badań i gatunku 2,34–2,56 $\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$ (tab. 1). Użycie zmodyfikowanych elementów roboczych zwiększyło wydajność maszyny o 0,67 $\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$ – uprawa pszenicy ozimej i o 0,66 $\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$ – rzepak ozimy. Względny, średnio w latach badań, wzrost wydajności wyniósł odpowiednio 27,3% i 26,7%.

Tabela 1. Wydajność eksploatacyjna ($\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$) wielofunkcyjnej maszyny do uprawy roli, aplikacji nawozów i siewu w zależności od konstrukcji elementów roboczych – agrotechnika roślin ozimych
Table 1. Operating efficiency ($\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$) of a multifunctional machine for tillage, fertilisers application and sowing depending on the design of working elements – agrotechnics of winter crops

Uprawa Crop	Elementy robocze maszyny Working elements of the machine		Różnica względna Relative difference (+/- %)
	ST-WP	ST-T	100(ST-WP/ ST-T) – 100
pierwszy rok/ first year			
Pszenica ozima Winter wheat	3,13	2,56	+22,3
Rzepak ozimy Winter rapeseed	3,07	2,50	+22,8
drugi rok/ second year			
Pszenica ozima Winter wheat	3,11	2,34	+32,9
Rzepak ozimy Winter rapeseed	3,19	2,43	+31,3
średnio w latach/ average in years			
Pszenica ozima Winter wheat	3,12	2,45	+27,3
Rzepak ozimy Winter rapeseed	3,13	2,47	+26,7

ST-WP – zmodyfikowane elementy robocze/ modified working elements;

ST-T – standardowe elementy robocze/ standard working elements

Jeszcze większy wzrost wydajności maszyny do uprawy w technologii strip-till one-pass po zastosowaniu nowo skonstruowanych elementów roboczych do spulchniania pasów gleby, aplikacji nawozów i wysiewu nasion miał miejsce w agrotechnice roślin jarych (tab. 2). Średnio w latach badań wyniósł on od 27,5% – uprawa grochu do 34,0% – agrotechnika kukurydzy.

Tabela 2. Wydajność eksploatacyjna ($\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$) wielofunkcyjnej maszyny do uprawy roli, aplikacji nawozów i siewu w zależności od konstrukcji elementów roboczych – agrotechnika roślin jarych
 Table 2. Operating efficiency ($\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$) of a multifunctional machine for tillage, fertilisers application and sowing depending on the design of working elements – agrotechnics of spring crops

Uprawa Crop	Elementy robocze maszyny Working elements of the machine		Różnica względna Relative difference (+/- %)
	ST-WP	ST-T	$100(\text{ST-WP}/\text{ST-T}) - 100$
pierwszy rok/ first year			
Jęczmień jary Spring barley	3,17	2,44	+29,9
Groch siewny Pea	3,21	2,73	+17,6
Kukurydza Corn	3,95	2,99	+32,1
drugi rok/ second year			
Jęczmień jary Spring barley	3,37	2,46	+37,0
Groch siewny Pea	3,09	2,21	+39,8
Kukurydza Corn	3,61	2,64	+36,7
średnio w latach/ average in years			
Jęczmień jary Spring barley	3,27	2,45	+33,5
Groch siewny Pea	3,15	2,47	+27,5
Kukurydza Corn	3,78	2,82	+34,0

ST-WP – zmodyfikowane elementy robocze/ modified working elements;

ST-T – standardowe elementy robocze/ standard working elements

Zużycie paliwa podczas pracy wielofunkcyjnej maszyny wyposażonej w tradycyjne elementy robocze uprawiające pasy gleby, aplikujące startową dawkę nawozów i wysiewające nasiona wynosiło w zależności od roku badań i uprawianej rośliny od $16,6 \text{ dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ do $17,9 \text{ dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ – rośliny ozime (tab. 3) i od $15,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ do $17,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ – rośliny jare (tab. 4). Zastosowanie zmodyfikowanych elementów roboczych zmniejszyło zużycie paliwa w uprawie wszystkich gatunków roślin, w każdym roku badań. Średnio względne ograniczenie zużycia paliwa w agrotechnice roślin ozimych wyniosło 19,7% – pszenica ozima i 20,0% – rzepak ozimy (tab. 3). Jeszcze większa redukcja nakładu paliwa miała miejsce w agrotechnice roślin jarych, tj. kukurydzy 21,4%, jęczmienia jarego 22,0% i grochu 22,2% (tab. 4).

Tabela 3. Zużycie paliwa ($\text{dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) na jednoczesną uprawę roli, nawożenie i siew roślin ozimych w zależności od konstrukcji elementów roboczych wielofunkcyjnej maszyny
 Table 3. Fuel consumption ($\text{dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) for simultaneous tillage, fertilisation and sowing of winter crops depending on the design of the working elements of the multifunctional machine

Uprawa Crop	Elementy robocze maszyny Working elements of the machine		Różnica względna Relative difference (+/- %)
	ST-WP	ST-T	$100(\text{ST-WP} / \text{ST-T}) - 100$
pierwszy rok/ first year			
Pszenica ozima Winter wheat	14,1	17,8	-20,8
Rzepak ozimy Winter rapeseed	14,8	17,9	-17,3
drugi rok/ second year			
Pszenica ozima Winter wheat	13,7	16,6	-17,5
Rzepak ozimy Winter rapeseed	13,1	17,0	-22,9
średnio w latach/ average in years			
Pszenica ozima Winter wheat	13,9	17,3	-19,7
Rzepak ozimy Winter rapeseed	14,0	17,5	-20,0

ST-WP – zmodyfikowane elementy robocze/ modified working elements;

ST-T – standardowe elementy robocze/ standard working elements

Zmiany konstrukcyjno-materiałowe elementów roboczych maszyny spowodowały zmniejszenie emisji dwutlenku węgla będącej skutkiem zużycia paliwa przez współpracujący ciągnik rolniczy. Redukcja emisji CO_2 miała miejsce w agrotechnice każdego gatunku roślin ozimych i jarych w obu latach badań (tab. 5). Średnio zmniejszenie emisji dwutlenku węgla wyniosło od $9,3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ – kukurydza do $10,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ – jęczmień jary.

Tabela 4. Zużycie paliwa ($\text{dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) na jednoczesną uprawę roli, nawożenie i siew roślin jarych w zależności od konstrukcji elementów roboczych wielofunkcyjnej maszyny
 Table 4. Fuel consumption ($\text{dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) for simultaneous tillage, fertilisation and sowing of spring crops depending on the design of the working elements of the multifunctional machine

Uprawa Crop	Elementy robocze maszyny Working elements of the machine		Różnica względna Relative difference (+/- %)
	ST-WP	ST-T	$100(\text{ST-WP} / \text{ST-T}) - 100$
pierwszy rok/ first year			
Jęczmień jary Spring barley	13,1	17,1	-23,4
Groch siewny Pea	13,0	16,5	-21,2
Kukurydza Corn	12,1	15,5	-21,9
drugi rok/ second year			
Jęczmień jary Spring barley	13,8	17,5	-21,1
Groch siewny Pea	12,9	16,9	-23,7
Kukurydza Corn	12,8	16,3	-21,5
średnio w latach/ average in years			
Jęczmień jary Spring barley	13,5	17,3	-22,0
Groch siewny Pea	13,0	16,7	-22,2
Kukurydza Corn	12,5	15,9	-21,4

ST-WP – zmodyfikowane elementy robocze/ modified working elements;

ST-T – standardowe elementy robocze/ standard working elements

Tabela 5. Emisja CO₂ (kg·ha⁻¹) podczas uprawy roli, nawożenia i siewu roślin ozimych i jarych w zależności od konstrukcji elementów roboczych wielofunkcyjnej maszyny
 Table 5. CO₂ emission (kg·ha⁻¹) during tillage, fertilisation and sowing of winter and spring crops depending on the design of the working elements of the multifunctional machine

Uprawa Crop	Elementy robocze maszyny/ Working elements of the machine					
	ST-WP	ST-T	ST-WP	ST-T	ST-WP	ST-T
	pierwszy rok badań first year of research		drugi rok badań second year of research		średnio average	
Pszenica ozima Winter wheat	38,8	49,0	37,7	45,7	38,2	47,6
Rzepak ozimy Winter rapeseed	40,7	49,2	36,0	46,8	38,5	48,1
Jęczmień jary Spring barley	36,0	47,0	38,0	48,1	37,1	47,6
Groch siewny Pea	35,8	45,4	35,5	46,5	35,8	45,9
Kukurydza Corn	33,3	42,6	35,2	44,8	34,4	43,7

ST-WP – zmodyfikowane elementy robocze/ modified working elements;

ST-T – standardowe elementy robocze/ standard working elements

DYSKUSJA

Znacząca redukcja nakładów na polową produkcję roślinną, poprawa efektu ekonomicznego i zmniejszenie jej presji na środowisko są możliwe w pierwszej kolejności przez zmianę technologii. W odniesieniu do uprawy roli oznacza to na przykład zastąpienie klasycznej uprawy płużnej przez uprawę bezpłużną czy siew bezpośredni [Šarauskis i in. 2012]. Drugim działaniem pozwalającym osiągnąć powyższe cele jest doskonalenie elementów roboczych maszyn i narzędzi, zwłaszcza pracujących bezpośrednio w warstwie uprawianej gleby. Według Abbaspour-Gilandeh i in. [2020] nie tylko parametry pracy, tj. głębokość i prędkość, ale również konstrukcja elementów roboczych wpływają znacząco na wskaźniki pracy kultywatorów, tj. zużycie energii i siłę uciągu ciągnika. Innowacje technologiczne i techniczne nie mogą jednak ograniczać produkcji. Wielkość, a zwłaszcza jakość płodów rolnych oraz oddziaływanie na środowisko są warunkiem akceptacji uproszczonych technologii we współczesnym rolnictwie [Woźniak i Rachoń 2020]. Zachowaniu bezpieczeństwa żywnościowego przy jednocześnie wysokim stopniu realizacji rolnictwa prośrodowiskowego służy również pasowa uprawa roli i roślin [Husti i in. 2016].

Relatywnie krótka historia uprawy pasowej (ang. strip-till), od drugiej połowy XX w., sprawia, że aktualnie prowadzone są intensywne badania nad jej doskonaleniem, zwłaszcza w odniesieniu do technologii one-pass, czyli pojedynczego przejazdu [Różewicz 2022]. Prowadzone są również liczne, zagraniczne i krajowe, prace konstrukcyjne oraz testy polowe w zakresie maszyn do jednoczesnej uprawy pasów gleby, aplikacji nawozów i siewu nasion [Talarczyk i Łowiński 2018, Wang i in. 2023], w który to nurt wpisują się również badania własne autorów [Jaskulska i Jaskulski 2020]. Ich uzasadnieniem są wyniki eksperymentów, wskazujące na istotną zależność wskaźników eksploatacyjnych maszyn do uprawy roli od budowy i regulacji ich elementów roboczych. Według Malvajerdi [2023] materiał i rodzaj powierzchni elementów roboczych narzędzi uprawowych oraz parametry ich ustawienia mogą zmieniać siłę trakcyjną nawet o 40–50%. W warunkach intensywnej polowej produkcji roślinnej koniecznym jest ograniczenie tempa zużycia elementów roboczych narzędzi i maszyn do uprawy roli. Wynika to zarówno z przesłanek ekonomicznych, jak i środowiskowych, a jednym z powszechnie stosowanych sposobów wydłużenia ich żywotności jest napawanie [Aramide i in. 2021]. Także w pracach własnych napawano i utwardzano powierzchnie węglikiem spiekany w celu zwiększenia trwałości powierzchni zębów spulchniających pasy gleby oraz redlic umieszczających nasiona w łożu siewnym. Działanie to miało z założenia także zwiększyć wydajność maszyny i ograniczyć zużycie paliwa współpracującego ciągnika rolniczego. Słuszność takiej hipotezy wynika z analizy wcześniejszych badań nad doskonaleniem technologii i techniki strip-till. Lekavičienė i in. [2019] wykazali, że siła trakcyjna, zużycie paliwa i emisja CO₂ przez współpracujący ciągnik z maszyną do uprawy pasowej zależały nie tylko od głębokości pracy zębów spulchniających i prędkości agregatu, ale także od konstrukcji i regulacji elementów roboczych. Wymienione wskaźniki były tym większe, im większy był kąt natarcia między tarczami czyszczącymi pasy spulchnianej gleby z resztek poźniowych, choć wpływ ten był nieistotny statystycznie i mniejszy niż oddziaływanie prędkości i głębokości pracy. Jednak jak wskazują wyniki badań Šarausis i in. [2017], możliwość zmiany wielkości oddziaływania elementu maszyny nawet o niewielkim wpływie na zużycie paliwa i emisję CO₂ pozwala w powiązaniu z innymi optymalizować parametry jej pracy w celu istotnej poprawy efektów eksploatacyjnych i środowiskowych. Matin i in. [2015] udowodnili, że zmiana geometrii ostrza konwencjonalnego noża-zęba stosowanego w uprawie pasowej i pracującego nie na powierzchni, ale głęboko w glebie, pozwoliła zaoszczędzić 20–25% mocy ciągnika.

Stwierdzone w badaniach własnych korzystne wskaźniki eksploatacyjne i środowiskowe maszyny do uprawy pasowej po zmianach konstrukcyjnych jej elementów roboczych mają potwierdzenie w pracach innych autorów. Zwiększenie wydajności maszyny o 26,7–34,0% i zmniejszenie zużycia paliwa o 19,7–22,2% są relatywnie duże, ale osiągnięte nawet po niewielkich zmianach konstrukcyjnych maszyn rolniczych. Li i in. [2022] w efekcie wprowadzenia do agrotechniki pszenicy w technologii uprawy zerowej siewnika z obrotowym elementem spulchniającym pasy gleby typu C o małym promieniu tworzącym bruzdę siewną szerokości 50–60 mm i głębokości 30–50 mm, a także dwa koła gumowane zamiast wałka dociskowego oraz łańcuch stalowy w celu przykrycia ziarna i wyrównania gleby osiągnęli istotnie lepsze parametry pracy w porównaniu z eksploatacją nie tylko tradycyjnej maszyny do głębokiej uprawy, ale i siewnikiem tarczowym z płytką uprawą. Siewnik z innowacyjnymi elementami roboczymi zmniejszył zużycie energii w stosunku do wymienionych maszyn odpowiednio o 51,3% i 24,5%. Z kolei analiza przeprowadzona przez Koguta [2011] i Sarkar i in. [2021] wykazała silnie zróżnicowaną

energochłonność biernych i czynnych narzędzi do uprawy roli wyposażonych w elementy robocze o różnej konstrukcji. Pierwszy z cytowanych autorów, dokonując szerokiego przeglądu elementów roboczych bron talerzowych, spulchniaczy obrotowych, bron aktywnych i kultywatorów w aspekcie ich pracy w warunkach dużej ilości materiału roślinnego (mulczu), czyli w warunkach analogicznych do pracy elementów roboczych maszyn do uprawy pasowej, wskazuje na istotne zróżnicowanie zużycia paliwa i wydajności narzędzi w zależności od konstrukcji talerzy i zębów pracujących w glebie. Najmniej energochłonne podczas pracy na polach mulczowanych są narzędzia bierne. Ich pracę cechuje nawet 4-krotnie mniejsze zużycie paliwa na jednostkę powierzchni uprawianej gleby i jednocześnie wielokrotnie większa wydajność. Według Koguta [2011] narzędzia wyposażone w talerze są właściwe do mulczującej uprawy gleb optymalnie uwilgotnionych na głębokość 4–15 cm. Do głębszej uprawy, 10–25 cm, czyli takiej jaka jest stosowana przy spulchnianiu pasów gleby w technologii strip-till należy stosować kultywatory. Zęby kultywatora lepiej się zagłębiają w glebę, zwłaszcza zwięzłą i przesuszoną.

WNIOSKI

Przeprowadzone prace laboratoryjno-warsztatowe i badania polowe wykazały, że zmiany konstrukcyjne i materiałowe mogą być istotnym, choć często niedocenianym i niedoszacowanym, sposobem doskonalenia maszyn i narzędzi rolniczych. Działania te powinny dotyczyć również elementów roboczych wieloczynnościowych maszyn do pasowej uprawy gleby, aplikacji nawozów i siewu nasion w jednym przejeździe. Badania wykazały, że redukcja i utwardzenie powierzchni bezpośrednio rozcinających i spulchniających glebę zębów uprawowych i redlic wysiewających nasiona zwiększyło wydajność maszyny i zmniejszyło nakład paliwa zużywanego na jednostkę powierzchni pola. W agrotechnice roślin ozimych, pszenica i rzepak, redukcja zużycia oleju napędowego wyniosła średnio w latach testów polowych odpowiednio $3,4 \text{ dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ i $3,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, a w uprawie roślin jarych – jęczmień, groch, kukurydza – $3,4\text{--}3,8 \text{ dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$. Skutkiem mniejszego zużycia paliwa było ograniczenie emisji dwutlenku węgla do atmosfery o $9,3\text{--}10,5 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$. Zmiany konstrukcyjne elementów roboczych zwiększyły również wydajność zarówno maszyny o szerokości roboczej 4 m (28,8%), jak i agregatu o szerokości 6 m (34,0%). Powyższe wskaźniki eksploatacyjne i środowiskowe pracy maszyny po zmianach w obrębie jej elementów roboczych obrazują osiągnięcie zakładanych celów naukowych i użytkowych, ale są jednocześnie wskazaniem potrzeby dalszych prac.

PIŚMIENNICTWO

- Abbaspour-Gilandeh Y., Fazeli M., Roshanianfard A., Hernández-Hernández J.L., Fuentes Penna A., Herrera-Miranda I., 2020. Effect of different working and tool parameters on performance of several types of cultivators. *Agriculture* 10(5), 145. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050145>
- Aduov M., Nukusheva S., Kaspakov E., Isenov K., Volodya K., Tulegenov T., 2020. Seed drills with combined coulters in No-till technology in soil and climate zone conditions of Kazakhstan. *Acta Agric. Scand. – B Soil Plant Sci.* 70(6), 525–531. <https://doi.org/10.1080/09064710.2020.1784994>

- Aramide B., Pityana S., Sadiku R., Jamiru T., Popoola P., 2021. Improving the durability of tillage tools through surface modification – a review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 116, 83–98. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07487-4>
- Astafyev V.L., Kurach A.A., Amantayev M.A., 2021. The influence of scheme and tillage tool parameters on the material consumption and performance of chain tooth harrow. *J. Water Land Dev.* 50(6–9), 69–73. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.138162>
- Auzins A., Kazotnieks J., Leimane I., Miglavs A., 2021. Assessment of carbon dioxide emissions from different tillage systems. In: *Proceedings of the 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development Proceedings*, Jelgava, Latvia 2021, 26–28. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF332>
- Banasiak J., 2008. Wydajnościowa analiza w procesach eksploatacji maszyn rolniczych. *Inżynieria Rolnicza* 4(102), 63–68.
- Benincasa P., Zorzi A., Panella F., Tosti G., Trevini M., 2017. Strip tillage and sowing: Is precision planting indispensable in silage maize?. *Int. J. Plant Prod.* 11(4), 577–588. <http://dx.doi.org/10.22069/ijpp.2017.3719>
- Bulgakov V., Adamchuk O., Pascuzzi S., Santoro F., Olt J., 2021. Research into engineering and operating parameters of mineral fertilizer application machine with new fertilizer spreading tools. *Agron. Res.* 19(S1), 676–686. <https://doi.org/10.15159/AR.21.040>
- Celik A., Boydas M.G., Turgut N., 2007. Comparison of the energy requirements of an experimental plow, a moldboard plow and a disk plow. *Philipp. Agric. Sci.* 90(2), 173–178.
- Danda R.R., 2023. Innovations in agricultural machinery: assessing the impact of advanced technologies on farm efficiency. *J. Artif. Intell. Big Data*, 3(1), 29–48. <https://doi.org/10.31586/jaibd.2023.1156>
- Gulyarenko A., Bembenek M., 2022. The method of calculating ploughshares durability in agricultural machines verified on plasma-hardened parts. *Agriculture* 12(6), 841. <https://doi.org/10.3390/agriculture12060841>
- Hafezalkotob A., Hami-Dindar A., Rabie N., Hafezalkotob A., 2018. A decision support system for agricultural machines and equipment selection: A case study on olive harvester machines. *Comput. Electron. Agric.* 148, 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.012>
- Howey D.A., Martinez-Botas R.F., Cussons B., Lytton L., 2011. Comparative measurements of the energy consumption of 51 electric, hybrid and internal combustion engine vehicles. *Transp. Res. D Transp. Environ.* 16(6), 459–464. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.04.001>
- Husti I., Daróczy M., Kovács I., Béres K., 2016. Strip till: an economic alternative for the Hungarian agriculture. *Hung. Agric. Eng.* 29, 21–23. <http://dx.doi.org/10.17676/HAE.2016.29.21>
- Jaskulska I., Jaskulski D., 2020. Strip-till one-pass technology in Central and Eastern Europe: A MZURI pro-til hybrid machine case study. *Agronomy* 10(7), 925. <https://doi.org/10.3390/agronomy10070925>
- Javaid M.A., Zia-Ul-Haq H.S.M., Iqbal T., Ansar M., Mehmood T., Yaseen G., Asam H.M., Husain M., Islam M.A., Ali I., 2023. Design, development and testing of different shapes of flails for Pak-seeder. *Pure Appl. Biol.* 12(4), 1587–1600. <http://dx.doi.org/10.19045/bspab.2023.120160>
- Jiang S., Wang Q., Zhong G., Tong Z., Wang X., Xu J., 2021. Brief review of minimum or no-till seeders in China. *AgriEngineering* 3(3), 605–621. <https://doi.org/10.3390/agriengineering3030039>
- Kogut Z., 2011. Jakość pracy narzędzi w uprawie gleby z wykorzystaniem mulczu. *Post. Nauk Rol.* 3, 89–102.
- Lekavičienė K., Šarausis E., Naujokienė S., Buragienė S., Kriauciūnienė Z., 2019. The effect of the strip tillage machine parameters on the traction force, diesel consumption and CO₂ emissions. *Soil Tillage Res.* 192, 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.002>
- Li C.S., Tang Y.L., McHugh A.D., Wu X.L., Liu M., Li M., Xiong T., Ling D., Tang Q., Liao M., Du S., Zhu J., Huang Y., 2022. Development and performance evaluation of a wet-resistant

- strip-till seeder for sowing wheat following rice. *Biosyst. Eng.* 220, 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.05.019>
- Malvajerdi A.S., 2023. Wear and coating of tillage tools: A review. *Heliyon* 9(6), e116669. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e116669>
- Manzone M., Calvo A., 2016. Energy and CO₂ analysis of poplar and maize crops for biomass production in north Italy. *Renew. Energy* 86, 675–681. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.047>
- Matin M.A., Fielke J.M., Desbiolles J.M.A., 2015. Torque and energy characteristics for strip-tillage cultivation when cutting furrows using three designs of rotary blade. *Biosyst. Eng.* 129, 329–340. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.11.008>
- Matin M.A., Hossain M.I., Gathala M.K., Timsina J., Krupnik T.J., 2021. Optimal design and setting of rotary strip-tiller blades to intensify dry season cropping in Asian wet clay soil conditions. *Soil Tillage Res.* 207, 104854. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104854>
- Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11(5), 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Radin S., Shubkin S., Buneev S., Yeletsikh S., 2023. Improving reliability and efficiency of cultivators with S-shape racks. W: A. Beskopylny, M. Shamtsyan, V. Artiukh (red.), XV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2022”. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 575. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2_107
- Rózewicz M., 2022. Review of current knowledge on strip-till cultivation and possibilities of its popularization in Poland. *Pol. J. Agron.* 49(49), 20–30. <https://doi.org/10.26114/pja.iung.488.2022.49.03>
- Sandhu N., Yadav S., Kumar Singh V., Kumar A., 2021. Effective crop management and modern breeding strategies to ensure higher crop productivity under direct seeded rice cultivation system: a review. *Agronomy* 11(7), 1264. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071264>
- Sarkar P., Upadhyay G., Raheman H., 2021. Active-passive and passive-passive configurations of combined tillage implements for improved tillage and tractive performance: A review. *Span. J. Agric. Res.* 19(4), e02R01. <https://doi.org/10.5424/sjar/2021194-18387>
- Šarauskis E., Buragienė S., Romaneckas K., Sakalauskas A., Jasinskas A., Vaiciukevicius E., Karayel D., 2012. Working time, fuel consumption and economic analysis of different tillage and sowing systems in Lithuania. 11th International Scientific Conference ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT. *Proceedings*, Vol. 11, May 24–25, 2012, 52–59.
- Šarauskis E., Vaitauskienė K., Romaneckas K., Jasinskas A., Butkus V., Kriaučiūnienė Z., 2017. Fuel consumption and CO₂ emission analysis in different strip tillage scenarios. *Energy* 118, 957–968. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.121>
- Shires T.M., Loughran C.J., Jones S., Hopkins E., 2009. *Compendium of greenhouse gas emissions methodologies for the oil and natural gas industry*. Prepared by URS Corporation for the American Petroleum Institute (API). API, Washington DC
- Štošić M., Ivezić V., Tadić V., 2021. Tillage systems as a function of greenhouse gas (GHG) emission and fuel consumption mitigation. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 16492–16503. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12211-y>
- Talarczyk W., Łowiński Ł., 2016. Maszyny uprawowe i uprawowo-siewne opracowane w Przemysłowym Instytucie Maszyn Rolniczych w Poznaniu. *Techn. Rol. Ogród. Leśna* 2, 18–21.
- Talarczyk W., Łowiński Ł., 2018. Uprawa pasowa, nawożenie zlokalizowane i siew według zasad rolnictwa precyzyjnego. *Techn. Rol. Ogród. Leśna* 1, 8–10.
- Wang Q., Wang B., Sun M., Sun X., Zhou W., Tang H., Wang J., 2023. Design and testing of an automatic strip-till machine for conservation tillage of corn. *Agronomy* 13(9), 2357. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092357>
- Wang J.W., Zhang J.M., 2019. Research on innovative design and evaluation of agricultural machinery products. *Math. Probl. Eng.* 1, 8179851. <https://doi.org/10.1155/2019/8179851>

- Woźniak A., Rachoń L., 2020. Effect of tillage systems on the yield and quality of winter wheat grain and soil properties. *Agriculture* 10(9), 405. <https://doi.org/10.3390/agriculture10090405>
- Yang Y., Hu Z., Gu F., Ding Q., 2023. Simulation and experimental study of the tillage mechanism for the optimal design of wheat rotary strip-tiller blades. *Agriculture* 13(3), 632. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030632>
- Yazıcı A., 2024. Wear on steel tillage tools: A review of material, soil and dynamic conditions. *Soil Tillage Res.* 242, 106161. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106161>
- Zbytek Z., 2010. Work quality index and energy consumption index for two-layer cultivation and deep plough. *J. Res. Appl. Agric.* 55(1), 120–123.
- Zhang B., Jia Y., Fan H., Guo C., Fu J., Li S., Li M., Liu B., Ma R., 2024. Soil compaction due to agricultural machinery impact: A systematic review. *Land Degrad. Dev.* 35(10), 3256–3273. <https://doi.org/10.1002/ldr.5144>

Źródło finansowania: Pracę wykonano w ramach badań przemysłowych i prac rozwojowych współfinansowanych ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego (1.1. Projekt Badawczo-Rozwojowy; 1.1.1. Badania Przemysłowe i Prace Rozwojowe Realizowane przez Przedsiębiorstwa, Program Operacyjny Inteligentny Rozwój) w ramach projektu „Prace badawczo – rozwojowe nad innowacyjnym sposobem pasowej uprawy roli i siewu prowadzące do opracowania wysoce zaawansowanego rozwiązania dostosowanego do warunków panujących w Europie środkowo-wschodniej. Projekt nr: PB POIR.01.01.01-00-0910/17. Beneficjentem projektu była firma Mzuri World sp. z o.o.

Abstract. Innovative material and construction solutions improve agricultural machines, develop their market and enable the introduction of new technologies to field crop production. The growing interest of agricultural science and practice in strip tillage with simultaneous application of fertilisers and sowing of seeds authorizes research on the design of working elements of the strip-till one-pass cultivation machine, adapting them to work in the soil and climatic conditions of Poland and Central and Eastern Europe. As a result of industrial research and development work, the shape of the cultivation-application tines and seeding coulters of the Mzuri hybrid machine was changed. The surface of the elements working in the soil has been hardened by hardfacing with sintered carbide in order to improve the machine's operating parameters compared to a standard machine. The effect of the introduced changes was a reduction in diesel oil consumption by 3.4–3.8 dm³ ha⁻¹ and carbon dioxide emissions into the atmosphere by 9.3–10.5 kg CO₂ ha⁻¹ in the technology of cultivation of winter wheat, winter rapeseed, spring barley, peas and maize. Design changes to the working elements increased the efficiency of the 4 m working width machine by 28.8% and of the 6 m working width machine by 34.0% compared to the standard machine.

Keywords: strip-till, machine working elements, operating efficiency, fuel consumption, CO₂ emissions

Otrzymano/Received: 21.12.2024
Zaakceptowano/Accepted: 27.03.2025
Opublikowano/Published: 19.05.2025



¹ Katedra Agronomii, Wydział Rolnictwa i Biotechnologii, Politechnika Bydgoska,
ul. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska

² Centrum Badawczo-Rozwojowe ul. Kościelna 1, Śmielin, 89-110 Sadki, Polska

³ Instytut Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie,
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, Polska

*e-mail: darekjas@pbs.edu.pl

DARIUSZ JASKULSKI^{1*}, IWONA JASKULSKA¹,
EMILIAN RÓŹNIAK², MAJA RADZIEMSKA³

Efekty zmian konstrukcyjnych elementów roboczych maszyny do uprawy pasowej. Cz. II. Wzrost i plonowanie roślin, jakość plonów

The effects of design changes to the working elements of a strip-till machine.
Part II. Plant growth and yield, crop quality

Abstrakt. Postęp biologiczny i agrotechniczny w polowej produkcji roślinnej wymuszają nowe rozwiązania w budowie i eksploatacji maszyn rolniczych. Uprawa pasowa roli z jednoczesną aplikacją nawozu i siewem nasion wymaga specjalistycznych maszyn z elementami roboczymi dostosowanymi do warunków pracy. W wyniku badań i prac rozwojowych opracowano udoskonalone materiałowo i konstrukcyjnie zęby spulchniające glebę, aplikatory nawozów i redlice siewne hybrydowej maszyny pracującej w technologii jednego przejazdu. W doświadczeniach polowych oceniono efekty ich użycia w agrotechnice roślin ozimych i jarych. Określono wzrost, plonowanie i jakość plonów ozimych form pszenicy i rzepaku, a także jęczmienia jarego, grochu i kukurydzy. Plony tych roślin uprawianych z użyciem maszyny wyposażonej w innowacyjne elementy robocze były większe, w zależności od gatunku, o 2,7–6,9% od plonów z obiektów uprawianych maszyną standardową. Różnica plonów wynikała głównie z większej polowej zdolności wschodów roślin. Większe były również obsada roślin przed zbiorem i kłosów zbóż, a u kukurydzy masa ziarna z rośliny. Nasiona grochu uprawianego innowacyjną maszyną zawierały o 0,4 punktu procentowego więcej białka, a nasiona rzepaku o 0,4 p.p. tłuszczu niż nasiona roślin wysiewanych maszyną bez zmian konstrukcyjnych.

Słowa kluczowe: uprawa pasowa, elementy robocze maszyny, wschody roślin, plon, zawartość białka, zawartość tłuszczu

Cytowanie: Jaskulski D., Jaskulska I., Różniak E., Radziemska M., 2025. Efekty zmian konstrukcyjnych elementów roboczych maszyny do uprawy pasowej. Cz. II. Wzrost i plonowanie roślin, jakość plonów. *Agron. Sci.* 80(1), 37–50. <https://doi.org/10.24326/as.2025.5472>

WSTĘP

Rozwój technologii uprawy pasowej, zwłaszcza z jednoczesną aplikacją nawozów i siewem nasion, wymusza postęp w zakresie techniki rolniczej [Benincasa i in. 2017]. Rynek maszyn i narzędzi do uprawy roślin w technologii strip-till one-pass zarówno światowy, jak i polski sukcesywnie się zwiększa [Piechota 2017, Vaitauskienė i in. 2017]. Powstają nowe uniwersalne maszyny [Jaskulska i Jaskulski 2020], specjalistyczne rozwiązania dedykowane do uprawy określonych gatunków lub grup roślin [Mirzaev i in. 2022], narzędzia pozwalające na realizację tylko niektórych elementów technologii, np. spulchnianie pasów gleby bez jednoczesnego wysiewu nasion [Nadykto i in. 2023] czy jednocześnie uprawy i nawożenia [Mitev i Bratov 2017]. Ciągłym pracom rozwojowym podlegają również sekcje wysiewające nasiona [Melnyk i in. 2021]. Wiele prac nakierowanych jest na doskonalenie elementów roboczych spulchniających pasy gleby w warunkach dużej ilości resztek roślinnych [Kumar i in. 2023]. Konstruowane są nie tylko pojedyncze elementy czynne i bierne [Yang i in. 2023, Liu i in. 2024], ale również wieloelementowe zautomatyzowane sekcje uprawiające pasy gleby po uprzednim usunięciu materiału roślinnego. Sekcja taka, prezentowana przez Wang i in. [2023], składa się podstawowych elementów konstrukcyjnych, a ponadto z: elementu tnącego słomę, redlicy spulchniającej glebę, koła w kształcie litery V kruszącego spulchnioną glebę. W jej skład wchodzi także: skrzynka sterownicza, przewody przesyłowe, układ sterowania głębokością i szerokością pasa uprawianej gleby, automatyczny system czyszczenia rzędów. Z kolei sekcja Kuhn Gladiator 1200 umożliwiająca oprócz uprawy pasów gleby także aplikację nawozów składa się z: elementu tnącego resztki roślinne, dyskowej czyszczarki pasów gleby, zęba spulchniającego, aplikatora nawozów (stałe, płynne, gazowe), tarcz zamykających szczelinę spulchnionej gleby, łańcuchowych kół zagęszczających [Shargorodskiy i Halanskyi 2024].

Korzystne oddziaływanie uprawy pasowej, zwłaszcza one-pass, na właściwości gleby i warunki wzrostu roślin wynika z jej istoty. Głęboko spulchniane pasy gleby stanowią łącznie ok. 1/3 lub mniej powierzchni pola. Pozostała jego część, międzyrzędzia w łanie roślin, jest nienaruszona i przykryta resztkami roślinnymi przedplonu lub/i międzyplonu [Morris i in. 2010, Townsend i in. 2016]. Taki sposób przygotowania łoża siewnego i jednoczesna aplikacja nawozów oraz wysiew nasion w jednym przejeździe maszyny ogranicza erozję gleby i bezproduktywne straty wody [Tabatabaekoloor 2011, Williams i in. 2016]. Prowadzi to do zwiększenia ilości materii organicznej w glebie, liczby i aktywności mikroorganizmów oraz dżdżownic [Leskovar i in. 2016, Jaskulska i in. 2020]. Tworzą się korzystne warunki dla polowej produkcji roślinnej. Plony roślin są często, choć nie zawsze, większe niż po klasycznej płuźnej uprawie roli lub po uprawie bezpłuźnej czy w siewie bezpośrednim [Cheng i in. 2024, Różewicz i in. 2024]. Ponadto technologia strip-till one-pass poprawia wynik ekonomiczny produkcji, gdyż pozwala ograniczyć nakłady i koszty paliwa, nawozów, materiału siewnego [Bojarszczuk i Książak 2023]. Dlatego technologia ta coraz częściej stosowana jest w agrotechnice wielu gatunków roślin rolniczych [Potratz i in. 2020, Jankowski i in. 2024] i ogrodniczych [Pieper i in. 2015].

Każda zmiana technologii, w tym użycie nowo konstruowanych maszyn lub ich elementów roboczych, wymaga sprawdzenia zakładanego korzystnego oddziaływania na wzrost i plonowanie roślin, co przyjęto jako hipotezę roboczą również w badaniach własnych. Podstawową metodą badawczą weryfikującą założenie o korzystnym wpływie technologii uprawy pasowej i używanych w niej maszynach na warunki i efekty polowej

uprawy roślin są doświadczenia polowe [Yang i in. 2018], a zwłaszcza eksperymenty wielokrotne i wieloletnie [Fernández i in. 2015]. Celem przeprowadzonych badań była ocena wpływu zmian konstrukcyjnych elementów roboczych maszyny do uprawy pasowej na wzrost, plonowanie i jakość plonów roślin ozimych – pszenica, rzepak i jarych – jęczmień, groch, kukurydza.

MATERIAŁ I METODY

Badania polowe wykonano w ramach prac eksperymentalnych projektu \$PB POIR.01.01.01-00-0910/17 realizowanego w latach 2018–2022. Efektem pierwszego etapu projektu, w tym badań przemysłowych, było opracowanie zęba spulchniającego glebę z aplikatorem nawozów granulowanych oraz redlicy wysiewającej nasiona do maszyny Mzuri, modelu Pro-Til 4T oraz Pro-Til 6T XZACT (ryc. 1). Założenia konstrukcyjne i użyte materiały zagwarantowały mniejsze opory i dłuższą żywotność podczas pracy w glebie, zwłaszcza z dużym udziałem frakcji piasku w uziarnieniu w porównaniu ze standardowymi elementami roboczymi. Innowacja dotyczyła m.in. szerokości wymienionych skrzydeł zębów spulchniających glebę, utwardzania węglikiem spiekany powierzchnie roboczych zębów i redlic, regulowanej kierownicy aplikatora nawozów, co szczegółowo przedstawiono w pierwszej części opracowania.



Ryc. 1. Widok ogólny zęba spulchniającego z aplikatorem nawozów (z lewej)
i redlica wysiewająca nasiona (z prawej)

Fig. 1. General view of the loosening tine with fertiliser applicator (left) and the seed sowing coulter (right)

W cyklach uprawy roślin 2019/2020 i 2020/2021 wykonano testy w formie doświadczeń polowych w celu porównania wzrostu i plonowania roślin uprawianych w technologii strip-till one-pass przy użyciu maszyny wyposażonej w innowacyjne elementy robocze i maszyny standardowej. Doświadczenia zlokalizowano w Centrum Badawczo-Rozwojowym firmy Agro-Land w Śmielinie (woj. kujawsko-pomorskie, Polska, 53°09'04.0"N, 17°29'10.7"E). Obszar ten objęty jest klimatem klasyfikowanym przez Köppena–Geigera [Peel i in. 2007] jako Dfb, czyli zimny, bez pory suchej z ciepłym latem. Miesięczne sumy opadów i średnią temperaturę powietrza w latach badań polowych na tle wielolecia przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Miesięczne sumy opadów i średnia temperatura powietrza w latach badań polowych i w wieloleciu

Table 1. Monthly precipitation totals and average air temperature in the years of field studies and in the many-year period

Miesiąc/Month	2019	2020	2021	Wielolecie Many-year
Opady/ Precipitation (mm)				
Styczeń/January	32,6	37,7	28,3	26,8
Luty/February	18,1	36,0	0,8	20,7
Marzec/March	28,8	26,1	21,7	31,9
Kwiecień/April	1,5	0,7	30,7	27,0
Maj/May	89,2	34,2	75,2	49,3
Czerwiec/June	17,7	142,0	30,1	52,8
Lipiec/July	22,4	67,2	61,7	69,8
Sierpień/August	37,7	114,4	38,1	62,6
Wrzesień/September	98,5	66,7	23,0	46,0
Październik/October	35,9	72,9	32,4	31,5
Listopad/November	69,6	12,4	40,8	32,4
Grudzień/December	21,1	33,8	38,2	34,0
Temperatura powietrza/ Air temperature (°C)				
Styczeń/January	−0,7	2,6	−1,1	−1,8
Luty/February	2,6	3,6	−1,8	−0,9
Marzec/March	5,4	3,9	3,7	2,5
Kwiecień/April	9,3	8,2	6,2	7,9
Maj/May	12,1	11,2	12,2	13,3
Czerwiec/June	21,9	17,9	20,1	16,1
Lipiec/July	18,6	18,3	20,9	18,6
Sierpień/August	19,7	19,9	17,4	17,9
Wrzesień/September	13,5	15,1	14,6	13,1
Październik/October	9,8	10,5	9,6	8,2
Listopad/November	5,5	6,0	5,3	2,9
Grudzień/December	2,7	1,8	−1,1	−0,6

W obu latach badań każdą roślinę (pszenica ozima, rzepak ozimy, jęczmień jary, groch siewny, kukurydza) wysiewano na plantacjach (każda o powierzchni min. 10 ha). W obrębie każdej plantacji wyznaczano pasy (bloki) w sześciu powtórzeniach, w których wysiewano daną roślinę naprzemiennie po dwie szerokości robocze maszyny z innowacyjnymi i standardowymi elementami roboczymi. Maszyny współpracowały z ciągnikiem rolniczym Claas Axion 850. Do zbioru wyznaczono pasy o jednakowej długości, tj. odpowiednio do gatunku uprawianej rośliny: 450 m, 400 m, 350 m, 300 m i 500 m. Zbiór wykonano kombajnem Claas Lexion 650. W obrębie każdego powtórzenia wszystkich obiektów doświadczalnych wyznaczono losowo 3 miejsca do ocen biometrycznych. Po wschodach na podstawie obsady roślin określono połowę zdolność wschodów, a przed zbiorem obsadę roślin – rzepak, groch, kukurydza oraz obsadę kłosów – pszenica, jęczmień. Bezpośrednio przed zbiorem z tych miejsc pobrano po 20 roślin w celu oceny masy nasion/ziarna z rośliny – rzepak, groch, kukurydza lub z kłosa – pszenica, jęczmień. Ocenę zawartości białka w ziarnie/nasionach oraz tłuszczu w nasionach rzepaku określono w próbkach pobranych z plonu ogólnego w trakcie zbioru. Analizę wykonano aparatem Foss Infratec Nova wykorzystującym absorpcję promieniowania bliskiej podczerwieni.

Wyniki opracowano matematycznie i statystycznie, oddzielnie dla każdej rośliny. Wykonano analizę wariancji według modelu właściwego dla doświadczeń jednoczynnikowych w układzie losowanych bloków, z sześcioma powtórzeniami obiektów. Do oceny istotności różnic między średnimi obiektowymi użyto testu Tukeya przy $p = 0,05$. Grupy jednorodnych wyników zaznaczono takimi samymi literami (a, b). Do analizy wykorzystano program Statistica 12 [TIBCO Software INC, 2017]. Ponadto średnie wyniki z lat badań wyrażono w jednostkach względnych (%). Miarą efektu zmian konstrukcyjnych elementów roboczych maszyny była procentowa różnica (+/-) wielkości poszczególnych cech biometrycznych roślin względem wielkości właściwej dla maszyny standardowej, którą przyjęto jako 100%.

WYNIKI BADAŃ

Użycie zmodyfikowanych zębów spulchniających pasy gleby i aplikujących nawozy oraz redlic wysiewających nasiona w maszynie do uprawy pasowej spowodowało średnio w latach badań 11,5% poprawę polowej zdolności wschodów pszenicy ozimej. Większa o blisko 7% obsada kłosów skutkowała ponad 3-procentowym wzrostem plonu ziarna, który w drugim roku badań był istotnie większy od uzyskanego przy wykorzystaniu maszyny standardowej (tab. 2).

Korzystny wpływ innowacyjnych elementów roboczych maszyny ujawnił się również w obsadzie roślin rzepaku ozimego. Zarówno połowa zdolność wschodów, jak i obsada roślin przed zbiorem były w obu latach badań istotnie większe niż po siewie maszyną standardową. Względne zwiększenie wielkości tych cech wyniosło odpowiednio 9,6% i 12,3% (tab. 3). Skutkiem tych zmian był istotnie większy plon nasion w porównaniu z rzepakiem ozimym uprawianym przy użyciu maszyny z niezmienionymi konstrukcyjnie zębami spulchniająco-aplikującymi i redlicami siewnymi.

Tabela 2. Efekt zmiany elementów roboczych maszyny do uprawy pasowej
w agrotechnice pszenicy ozimej
Table 2. The effect of changing the working elements of the strip tillage machine
in the agrotechnics of winter wheat

Cecha Feature	Jednostka Unit	Elementy robocze Working elements	Rok badań/ Year of research		
			pierwszy first	drugi second	średnio average
Połowa zdolność wschodów Field emergence capacity	%	ST-WP	83,6 ^{a*}	82,5 ^a	+11,5
		ST-T	79,6 ^a	69,3 ^b	100,0
Obsada kłosów Ear density	szt. · m ⁻²	ST-WP	689,8 ^a	633,0 ^a	+6,8
		ST-T	643,4 ^b	595,3 ^b	100,0
Masa ziarna z kłosa Grain weight per ear	g	ST-WP	1,22 ^a	1,35 ^a	+0,8
		ST-T	1,19 ^a	1,36 ^a	100,0
Plon ziarna Grain yield	t · ha ⁻¹	ST-WP	8,11 ^a	8,43 ^a	+3,4
		ST-T	7,92 ^a	8,07 ^b	100,0
Zawartość białka w ziarnie Protein content in grain	g · kg ⁻¹	ST-WP	133,0 ^a	127,0 ^a	-0,8
		ST-T	133,0 ^a	128,0 ^a	100,0

ST-WP – zmodyfikowane elementy robocze maszyny/ modified working elements of the machine

ST-T – standardowe elementy robocze maszyny/ standard working elements of the machine

* różne litery (a, b) przy średnich wartościach w kolumnach oznaczają istotne zróżnicowanie danej cechy (p = 0,05)/
different letters (a, b) at the average values in the columns indicate significant differences in a given feature
(p = 0.05)

Tabela 3. Efekt zmiany elementów roboczych maszyny do uprawy pasowej
w agrotechnice rzepaku ozimego
Table 3. The effect of changing the working elements of the strip tillage machine
in the agrotechnics of winter rape

Cecha Feature	Jednostka Unit	Elementy robocze Working elements	Rok badań/ Year of research		
			pierwszy first	drugi second	średnio average
Połowa zdolność wschodów Field emergence capacity	%	ST-WP	85,1 ^a	81,9 ^a	+9,6
		ST-T	78,0 ^b	74,3 ^b	100,0
Obsada roślin przed zbiorem Plant density before harvest	szt. · m ⁻²	ST-WP	41,3 ^a	35,5 ^a	+12,3
		ST-T	36,5 ^b	31,6 ^b	100,0
Masa nasion z rośliny Seed weight per plant	g	ST-WP	9,73 ^a	15,22 ^a	0,0
		ST-T	9,76 ^a	15,20 ^a	100,0
Plon nasion Seed yield	t · ha ⁻¹	ST-WP	3,64 ^a	4,22 ^a	+6,2
		ST-T	3,46 ^b	3,94 ^b	100,0
Zawartość tłuszczu w nasionach Fat content in seeds	g · kg ⁻¹	ST-WP	402,0 ^a	423,0 ^a	+1,0
		ST-T	400,0 ^a	418,0 ^a	100,0

Objaśnienia jak w tab. 2./ Explanation as in tab. 2.

Nowe konstrukcje elementów roboczych maszyny do uprawy pasowej, mimo korzystnego wpływu na wschody jęczmienia jarego (tab. 4) oraz grochu siewnego (tab. 5) nie spowodowały istotnego zwiększenia plonu ziarna i nasion tych roślin. Średnio w dwuletnim okresie badań względne zwiększenie polowej zdolności wschodów obu gatunków roślin jarych wyniosło odpowiednio 17,1% i 10,8%. Plon jęczmienia jarego w efekcie uprawy przy użyciu maszyny ze zmodyfikowanymi elementami roboczymi był większy o 3,4% od plonu roślin uprawianych z wykorzystaniem maszyny standardowej, głównie w wyniku większej obsady kłosów w pierwszym roku badań. Różnica plonów w żadnym roku nie była jednak istotna statystycznie. Jeszcze mniejsze zróżnicowanie plonu miało miejsce w agrotechnice grochu siewnego. Jednak względna różnica jego wielkości w drugim roku badań – 6,1% była istotna statystycznie.

Tabela 4. Efekt zmiany elementów roboczych maszyny do uprawy pasowej
w agrotechnice jęczmienia jarego

Table 4. The effect of changing the working elements of the strip tillage machine
in the agrotechnics of spring barley

Cecha Feature	Jednostka Unit	Elementy robocze Working elements	Rok badań/ Year of research		
			pierwszy first	drugi second	średnio average
Polowa zdolność wschodów Field emergence capacity	%	ST-WP	84,1 ^a	92,4 ^a	+17,1
		ST-T	77,6 ^b	73,1 ^b	100,0
Obsada kłosów Ear density	szt. · m ⁻²	ST-WP	845,2 ^a	684,1 ^a	+3,7
		ST-T	809,4 ^b	664,8 ^a	100,0
Masa ziarna z kłosa Grain weight per ear	g	ST-WP	0,76 ^a	1,06 ^a	0,0
		ST-T	0,76 ^a	1,05 ^a	100,0
Plon ziarna Grain yield	t · ha ⁻¹	ST-WP	6,37 ^a	6,83 ^a	+3,4
		ST-T	6,14 ^a	6,61 ^a	100,0
Zawartość białka w ziarnie Protein content in grain	g · kg ⁻¹	ST-WP	115,0 ^a	109,0 ^a	+0,9
		ST-T	115,0 ^a	107,0 ^a	100,0

Objaśnienia jak w tab. 2./ Explanation as in tab. 2.

Największa i istotna statystycznie w obu latach badań zmiana wielkości plonu w efekcie użycia maszyny wyposażonej w innowacyjne elementy robocze wystąpiła w agrotechnice kukurydzy (tab. 6). Średnio w dwuleciu plon ziarna był większy o 6,9% od plonu z obiektu uprawianego maszyną standardową. Stwierdzona różnica wynikała głównie z większej masy ziarna z rośliny i w mniejszym stopniu z większej, ale tylko o 2,7%, polowej zdolności wschodów nie przekładającej się jednak na istotnie większą obsadę roślin przed zbiorem.

Zmodyfikowane zęby spulchniające glebę i aplikujące nawozy oraz redlice wysiewające nasiona nie miały istotnego korzystnego wpływu na jakość ziarna i nasion roślin uprawianych w technologii pasowej one-pass (tab. 2–6). W rezultacie ich uprawy za pomocą maszyny wyposażonej w innowacyjne elementy robocze, w porównaniu z maszyną standardową, największy względny wzrost zawartości białka miał miejsce u grochu – 1,9%. Podobnie nieistotną różnicę stwierdzono w zawartości tłuszczu w nasionach rzepaku ozimego.

Tabela 5. Efekt zmiany elementów roboczych maszyny do uprawy pasowej w agrotechnice grochu siewnego

Table 5. The effect of changing the working elements of the strip tillage machine in the agrotechnics of field pea

Cecha Feature	Jednostka Unit	Elementy robocze Working elements	Rok badań/ Year of research		
			pierwszy first	drugi second	średnio average
Polowa zdolność wschodów Field emergence capacity	%	ST-WP	83,5 ^a	91,5 ^a	+10,8
		ST-T	75,7 ^b	82,3 ^b	100,0
Obsada roślin przed zbiorem Plant density before harvest	szt. · m ⁻²	ST-WP	80,3 ^a	82,4 ^a	+8,1
		ST-T	71,9 ^b	78,7 ^a	100,0
Masa nasion z rośliny Seed weight per plant	g	ST-WP	5,06 ^a	4,02 ^a	-0,4
		ST-T	5,16 ^a	3,95 ^a	100,0
Plon nasion Seed yield	t · ha ⁻¹	ST-WP	3,70 ^a	3,15 ^a	+2,7
		ST-T	3,71 ^a	2,97 ^b	100,0
Zawartość białka w nasionach Protein content in seeds	g · kg ⁻¹	ST-WP	218,0 ^a	209,0 ^a	+1,9
		ST-T	215,0 ^a	205,0 ^a	100,0

Objaśnienia jak w tab. 2./ Explanation as in tab. 2.

Tabela 6. Efekt zmiany elementów roboczych maszyny do uprawy pasowej w agrotechnice kukurydzy

Table 6. The effect of changing the working elements of the strip tillage machine in the agrotechnics of corn

Cecha Feature	Jednostka Unit	Elementy robocze Working elements	Rok badań/ Year of research		
			pierwszy first	drugi second	średnio average
Polowa zdolność wschodów Field emergence capacity	%	ST-WP	88,2 ^a	99,8 ^a	+2,7
		ST-T	83,3 ^a	99,6 ^a	100,0
Obsada roślin przed zbiorem Plant density before harvest	szt. · m ⁻²	ST-WP	6,28 ^a	6,84 ^a	+0,3
		ST-T	6,31 ^a	6,76 ^a	100,0
Masa ziarna z rośliny Grain weight per plant	g	ST-WP	183,5 ^a	147,6 ^a	+6,6
		ST-T	172,1 ^b	138,4 ^b	100,0
Plon ziarna Grain yield	t · ha ⁻¹	ST-WP	11,08 ^a	9,63 ^a	+6,9
		ST-T	10,51 ^b	8,86 ^b	100,0
Zawartość białka w ziarnie Protein content in grain	g · kg ⁻¹	ST-WP	93,0 ^a	88,0 ^a	0,0
		ST-T	94,0 ^a	88,0 ^a	100,0

Objaśnienia jak w tab. 2./ Explanation as in tab. 2.

DYSKUSJA

Uprawa roli jako element technologii polowej uprawy roślin nie jest celem samym w sobie. Powodowane przez nią zmiany właściwości gleby, oprócz jej ochrony przed degradacją, mają przede wszystkim przygotować jak najlepsze warunki dla wzrostu i plonowania roślin. Uzasadnione są więc badania doskonalące elementy agrotechniki, ze szczególnym uwzględnieniem przygotowania łoża siewnego [Lamichhane i Soltani 2020], w tym nad nowymi konstrukcjami maszyn i narzędzi realizującymi to zadanie z poszanowaniem środowiska [Lovarelli i Bacenetti 2017, Hegazy i in. 2021]. W tak realizowany postęp techniczny i technologiczny wpisują się niniejsze badania dotyczące elementów roboczych maszyny do uprawy pasowej one-pass.

Sposób uprawy gleby poprzez zmianę jej właściwości wpływa na wschody, dalszy wzrost, produktywność, plony roślin i ich jakość, co uzasadnia przeprowadzone testy polowe z nowo skonstruowanymi elementami maszyny do pasowej uprawy gleby z jednoczesnym nawożeniem i siewem. W badaniach Barut i Ozdemir [2024] różnica polowej zdolności wschodów pszenicy wysianej w glebę przygotowaną klasycznie z udziałem pługa odkładnicowego, brony talerzowej i wału oraz bezpłużnie (rototiller), a także w efekcie siewu bezpośredniego wyniosła 7,6–8,0 punktów procentowych. Sposób uprawy i siewu pszenicy zróżnicował również, o 1,35 dnia, średni czas wschodów. Różne tempo wschodów nasila efekty konkurencji między siewkami, która według Korohou i in. [2022] zachodzi już od pierwszych faz wzrostowo-rozwojowych i może być przyczyną zmniejszenia plonów. Autorzy stwierdzili, że odległość między ziarniakami i sposób ich umieszczenia w glebie wpływają istotnie na zdolność i tempo wschodów oraz na długość i masę korzeni, powierzchnię liści, suchą masę części nadziemnej. Zróżnicowanie polowej zdolności wschodów roślin i ich tempa zależy szczególnie od właściwości gleby łoża siewnego. Wyniki kompleksowych, wieloetapowych badań szwedzkich jako czynniki determinujące wschody wskazują m.in.: temperaturę [Håkansson i in. 2011a], strukturę agregatową gleby i jej wilgotność [Håkansson i in. 2011b], zawartość tlenu w glebie [Håkansson i in. 2011c]. Nie mniej ważne są parametry i warunki siewu, w tym głębokość, zagęszczenie gleby po siewie czy ryzyko powstania skorupy glebowej [Håkansson i in. 2011d, Håkansson i in. 2011e].

Warunki glebowe wynikające z przygotowania łoża siewnego, a w konsekwencji wschody roślin, ich wzrost i plony, zależą również od parametrów pracy maszyn i narzędzi używanych do uprawy gleby zgodnie z określonym systemem, w tym strip-till [Boydas i Turgut 2007, Trevini i in. 2013]. Spulchnianie gleby w uprawie pasowej może być realizowane za pomocą czynnych, a także biernych elementów roboczych, w tym zespolonych w sekcje do jednoczesnej aplikacji nawozów i siewu nasion [Barut i Ozdemir 2024], tak jak to miało miejsce w testowanej maszynie Mzuri. Według Celik i in. [2013] zmiana szerokości spulchnianych pasów gleby w uprawie słonecznika z 37,5 cm do 30,0 cm i 22,5 cm w efekcie zmiany ustawienia rotacyjnych noży w kształcie litery C i użycia różnej liczby kołnierzy wpłynęła istotnie na wschody roślin. Ich odsetek zmniejszył się od 93% do 67% wraz ze zwężaniem pasów uprawianej gleby, co było prawdopodobnie wynikiem niższej jej temperatury w strefie kiełkowania nasion mimo większej wilgotności. Plon biomasy, a także nasion roślin rosnących w najszerszej spulchnianych pasach gleby był o 12,8% większy niż roślin wysianych w pasach o szerokości 22,5 cm. W badaniach własnych zmiana konstrukcyjna elementów roboczych maszyny polegała natomiast m.in.

na zwężeniu skrzydeł zębów spulchniających, przez co pasy uprawianej gleby były węższe niż po pracy zębów standardowych. W tak uprawianej glebie wschody roślin były jednak lepsze niż po siewie w szerzej spulchnianych pasach, nawet o 17,1%. Trzeba jednak podkreślić, że w okresie siewu zarówno roślin ozimych, jak i jarych w miejscu realizacji doświadczeń polowych średnia miesięczna suma opadów wynosiła ok. 30–50 mm. W takich warunkach rozwiązanie ograniczające utratę wody z gleby spulchnianej mogło przyczynić się do lepszych wschodów roślin. Natomiast w wyżej cytowanych badaniach słonecznik był uprawiany w rejonie, gdzie opady miesięczne w okresie przygotowania gleby, siewu i początkowego wzrostu wynosiły 60–70 mm, a temperatura była niższa niż w okresie siewu roślin, zwłaszcza ozimych, w badaniach będących przedmiotem niniejszego opracowania. Kriaučiūnienė i in. [2023, 2024] wykazali natomiast, że użycie siewników o różnych elementach roboczych dedykowanych do uprawy pasowej i siewu bezpośredniego, mimo takiego samego sposobu wcześniej wykonanej podstawowej uprawy gleby, zróżnicowało plon ziarna pszenicy i nasion rzepaku. Różnica nie była jednak duża, w przypadku pszenicy nie przekroczyła 3,6%. Bečka i in. [2021], stosując w agrotechnice rzepaku ozimego po jednakowo wykonanej podstawowej uprawie płuźnej siewniki o różnych redlicach, stwierdzili zróżnicowanie obsady roślin i plonu nasion. Po użyciu redlic przystosowanych do siewu w glebę dobrze uprawioną, bez resztek roślinnych obsada roślin po wschodach wynosiła 41 szt. $\cdot$ m⁻², a plon nasion 5,06 t $\cdot$ ha⁻¹. Redlice głęboko spulchniające glebę i wysiewające nasiona w maszynie strip-till spowodowały, że powyższe parametry były istotnie większe, odpowiednio 49 szt. $\cdot$ m⁻² i 5,53 t $\cdot$ ha⁻¹. Względna różnica wyniosła 19,5% i 9,3%. Użyte w badaniach własnych innowacyjne elementy robocze maszyny do uprawy pasowej przyczyniły się do zwiększenia plonu uprawianych gatunków roślin ozimych i jarych, z wyjątkiem jęczmienia, choć nie w każdym roku w stopniu istotnym. Największy przyrost plonu, o 6,9%, w porównaniu z plonem uzyskanym w efekcie pracy maszyny ze standardowymi zębami i redlicami miał miejsce w agrotechnice kukurydzy.

Czynnikiem różnicującym wschody roślin, ich dalszy wzrost i plony w technologii pasowej może być również sposób aplikacji nawozów, na co wskazują wyniki badań Adee i in. [2016]. Autorzy, wysiewając rząd ziaren kukurydzy w odległości 0, 10 cm, 20 cm i 38 cm od rzędu aplikowanych nawozów N, P i K w dawce odpowiednio 134 kg $\cdot$ ha⁻¹, 34 kg $\cdot$ ha⁻¹, 11 kg $\cdot$ ha⁻¹, stwierdzili istotny wpływ tego czynnika na obsadę roślin przed zbiorem i plon ziarna, choć przy różnej reakcji kukurydzy w poszczególnych pięciu latach badań. Brak poziomej odległości między rzędem ziarna a nawozu wpłynął niekorzystnie na obsadę roślin i plon ziarna w porównaniu z siewem ziarna w odległości 10 cm od strumienia nawozów. Największa względna różnica tych cech łanu w okresie badań wyniosła 6,9% – liczba roślin na 1 ha i 8,5% – plon ziarna. W testowanej maszynie Mzuri nowo skonstruowany ząb spulchniająco-aplikujący dzięki zastosowanej kierownicy strumienia nawozu dokładnie rozpraszał go w przestrzeni uprawianego pasa gleby. Nie było więc ryzyka bezpośredniego kontaktu wysiewanych nasion z dużą masą nawozu, co by mogło ograniczać kiełkowanie nasion i wschody roślin.

WNIOSKI

Wzrost i plonowanie roślin zależą od zmiennych warunków siedliskowych i agrotechnicznych w latach uprawy. Przeprowadzone badania wskazują, że na wschody, elementy plonowania, plony i ich jakość może wpływać, często w stopniu istotnym, nawet zmiana elementów roboczych maszyny użytej do uprawy gleby, aplikacji nawozów i siewu. Reakcja roślin ozimych i jarych w przeprowadzonych eksperymentach polowych zależała od gatunku, ocenianej cechy charakteryzującej wzrost i plonowanie i była zmienna w latach. Największa względna różnica polowej zdolności wschodów w efekcie użycia maszyny z innowacyjnymi elementami roboczymi wystąpiła u jęczmienia jarego i wyniosła 17,1%. Istotny przyrost plonu, średnio w latach badań ponad 6,0%, miał miejsce w agrotechnice rzepaku ozimego i kukurydzy. Wyniki takie wskazują na zasadność testowania nowo konstruowanych maszyn i narzędzi rolniczych zgodnie z metodyką eksperymentów polowych. Badania realizowane w warunkach polowej produkcji roślinnej mogą przedstawiać rzeczywisty postęp techniczny oraz technologiczny i rekomendować go do praktyki rolniczej. Jednocześnie wskazują na konieczność badań kompleksowych i wieloetapowych pozwalających na właściwą interpretację obserwowanych reakcji roślin na zmiany w obrębie poszczególnych elementów agrotechniki, w tym używanej techniki rolniczej.

PIŚMIENNICTWO

- Adee E., Hansel F.D., Ruiz Diaz D.A., Janssen K., 2016. Corn response as affected by planting distance from the center of strip-till fertilized rows. *Front. Plant Sci.* 7, 1232. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01232>
- Barut Z.B., Ozdemir S., 2024a. The effect of different tillage methods on plant emergence parameters for wheat. W: E. Cavallo, F. Auat Cheein, F. Marinello, K. Saçılık, K. Muthukumarappan, P.C. Abhilash (red.), 15th International Congress on Agricultural Mechanization and Energy in Agriculture. Cham: Springer Nature Switzerland, 51–59. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51579-8_6
- Barut Z.B., Ozdemir S., 2024b. Design approaches of one-pass strip-till machines. W: E. Cavallo, F. Auat Cheein, F. Marinello, K. Saçılık, K. Muthukumarappan, P.C. Abhilash (red.), 15th International Congress on Agricultural Mechanization and Energy in Agriculture. Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51579-8_7
- Bečka D., Bečková L., Kuchtová P., Cihlár P., Pazderů K., Mikšík V., Vašák J., 2021. Growth and yield of winter oilseed rape under strip-tillage compared to conventional tillage. *Plant Soil Environ.* 67(2), 85–91. <https://doi.org/10.17221/492/2020-PSE>
- Benincasa P., Zorzi A., Panella F., Tosti G., Trevini M., 2017. Strip tillage and sowing: is precision planting indispensable in silage maize?. *Int. J. Plant Prod.* 11(4), 577–588. <http://dx.doi.org/10.22069/ijpp.2017.3719>
- Bojarszczuk J., Księżak J., 2023. Efektywność ekonomiczna uprawy soi w zależności od sposobu uprawy. *Ann. Pol. Assoc. Agric. Aribus. Econ.* 25(4), 26–34. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.9739>
- Boydas M.G., Turgut N., 2007. Effect of tillage implements and operating speeds on soil physical properties and wheat emergence. *Turk. J. Agric. For.* 31(6), 399–412. <https://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/vol31/iss6/6>
- Celik A., Altikat S., Way T.R., 2013. Strip tillage width effects on sunflower seed emergence and yield. *Soil Tillage Res.* 131, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.03.004>

- Cheng Z., Bai L., Wang Z., Wang F., Wang Y., Liang H., Wang Y., Rong M., Wang Z., 2024. Strip-till farming: combining controlled-release blended fertilizer to enhance rainfed maize yield while reducing greenhouse gas emissions. *Agronomy* 14(1), 136. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010136>
- Fernández F.G., Sorensen B.A., Villamil M.B., 2015. A comparison of soil properties after five years of no-till and strip-till. *Agron. J.* 107(4), 1339–1346. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0549>
- Håkansson I., Arvidsson J., Keller T., Rydberg T., 2011a. Effects of seedbed properties on crop emergence: 1. Temporal effects of temperature and sowing depth in seedbeds with favourable properties. *Acta Agric. Scand. B Soil Plant Sci.* 61(5), 458–468. <https://doi.org/10.1080/09064710.2010.506446>
- Håkansson I., Arvidsson J., Rydberg T., 2011b. Effects of seedbed properties on crop emergence: 2. Effects of aggregate size, sowing depth and initial water content under dry weather conditions. *Acta Agric. Scand. B Soil Plant Sci.* 61(5), 469–479. <https://doi.org/10.1080/09064710.2010.506447>
- Håkansson I., Keller T., Arvidsson J., Rydberg T., 2011c. Effects of seedbed properties on crop emergence. 4. Inhibitory effects of oxygen deficiency. *Acta Agric. Scand. B Soil Plant Sci.* 62(2), 166–171. <https://doi.org/10.1080/09064710.2011.597423>
- Håkansson I., Keller T., Arvidsson J., Rydberg T., 2011d. Effects of seedbed properties on crop emergence. 5. Effects of aggregate size, sowing depth and simulated rainfall after sowing on harmful surface-layer hardening. *Acta Agric. Scand. B Soil Plant Sci.* 62(4), 362–373. <https://doi.org/10.1080/09064710.2011.622291>
- Håkansson I., Rydberg T., Keller T., Arvidsson J., 2011e. Effects of seedbed properties on crop emergence: 3. Effects of firming of seedbeds with various sowing depths and water contents. *Acta Agric. Scand. B Soil Plant Sci.* 61(8), 701–710. <https://doi.org/10.1080/09064710.2010.544668>
- Hegazy R., Abd-Rabou A., Elsergany A.M., Abdelmouteleb I., 2021. Development and testing mounted multi-use agricultural seedbed preparation machine for Egyptian soils. *J. Sus. Agric. Sci.* 47(3), 13–26. <http://dx.doi.org/10.21608/jsas.2020.50579.1251>
- Jankowski K.J., Sokółski M., Szatkowski A., Załuski D., 2024. The effects of tillage systems on the management of agronomic factors in winter oilseed rape cultivation: a case study in north-eastern Poland. *Agronomy* 14(3), 437. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030437>
- Jaskulska I., Jaskulski D., 2020. Strip-till one-pass technology in central and eastern Europe: A MZURI pro-til hybrid machine case study. *Agronomy* 10(7), 925. <https://doi.org/10.3390/agronomy10070925>
- Jaskulska I., Romanekas K., Jaskulski D., Gałęzewski L., Breza-Boruta B., Dębska B., Lemanowicz J., 2020. Soil properties after eight years of the use of strip-till one-pass technology. *Agronomy* 10(10), 1596. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101596>
- Korohou T., Okinda C., Li H., Torotwa I., Ding Q., Abbas A., 2022. Effect of no-till precise seeding on wheat (*Triticum aestivum* L.) population quality at the emergence stage. *J. Anim. Plant Sci.* 32(1), 186–198. <https://doi.org/10.36899/JAPS.2022.1.0414>
- Kriaučiūnienė Z., Saldukaitė L., Buragienė S., Adamavičienė A., Zabrodskiy A., Šarausis E., 2023. Effect of strip tillage and direct seeding on winter wheat yield, diesel consumption and environment. *Actual Tasks on Agricultural Engineering. Proceedings of the 49th International Symposium Opatija, Croatia, 28th February – 2nd March 2023*, 41–49. https://atae.agr.hr/49th_ATAE_proceedings.pdf
- Kriaučiūnienė Z., Saldukaitė-Sribikė L., Zabrodskiy A., Adamavičienė A., Buragienė S., Šarausis E., 2024. Impact of strip-till and no-till systems on soil, crop, and environment. W: *Abstract proceedings for the: 22nd International Soil Tillage Research Organisation Conference, Virginia Beach, Virginia, United States of America, 22–27 September 2024*, 48–49. <https://hdl.handle.net/20.500.12259/271281>
- Kumar D.V., Ramana C., Reddy K.V.S., Kaleemullah S., Reddy B.R., 2023. Optimization of machine and operational parameters in the development of stubble manager cum crop planter. *Int. J. Plant Soil Sci.* 35(16), 12–23. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i163124>

- Lamichhane J., Soltani E., 2020. Sowing and seedbed management methods to improve establishment and yield of maize, rice and wheat across drought-prone regions: A review. *J. Agric. Food Res.* 2, 100089. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100089>
- Leskovar D., Othman Y., Dong X., 2016. Strip tillage improves soil biological activity, fruit yield and sugar content of triploid watermelon. *Soil Tillage Res.* 163, 266–273. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.06.007>
- Liu L., Wang X., Zhong X., Zhang X., Geng Y., Zhou H., Chen T., 2024. Design and experiment of furrow side pick-up soil blade for wheat strip-till planter using the discrete element method. *J. Agric. Eng.* 55(1), 1546. <http://dx.doi.org/10.4081/jae.2023.1546>
- Lovarelli D., Bacenetti J., 2017. Seedbed preparation for arable crops: Environmental impact of alternative mechanical solutions. *Soil Tillage Res.* 174, 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.06.006>
- Melnyk V., Artiymov M., Tsyganenko M., Romanashenko O., Anikeev O., 2021. Test results of co-seeding technology for forage production in Mix-Cropps farming system. W: *Proceedings of 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development*, May 26–28, 2021. Latvia University of Life Sciences and Technologies, 451–456. <http://dx.doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF095>
- Mirzaev B.S., Ergashov G.H., Maiviatov F.M., Ravshanova N.B., Toshtemirov S.J., Begimkulova M.F., 2022. Justification of the parameters of the lister body. W: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1076, 1, 012022. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1076/1/012022>
- Mitev G.V., Bratov K., 2017. Experimental study of strip till machine. *Int. Sci. J. Mech. Agric. Conserv. Resour.* 63(1), 21–25.
- Morris N.L., Miller P.C.H., Orson J.H., Froud-Williams R.J., 2010. The adoption of noninversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment – A review. *Soil Tillage Res.* 108(1–2), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.03.004>
- Nadykto V., Domeika R., Golub G., Kukharets S., Chorna T., Čėsna J., Hutsol T., 2023. Research on a machine–tractor unit for strip-till technology. *AgriEngineering* 5(4), 2184–2195. <https://doi.org/10.3390/agriengineering5040134>
- Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A., 2007. Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11(5), 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Piechota T., 2017. Przegląd rynku maszyn do pasowej uprawy roli (strip-till). *Technika Rolnicza, Ogrodnicza, Leśna* 4, 2–4.
- Pieper J.R., Brown R.N., Amador J.A., 2015. Effects of three conservation tillage strategies on yields and soil health in a mixed vegetable production system. *HortScience* 50(12), 1770–1776. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.12.1770>
- Potratz D.J., Mourtzinis S., Gaska J., Lauer J., Arriaga F.J., Conley S.P., 2020. Strip-till, other management strategies, and their interactive effects on corn grain and soybean seed yield. *Agron. J.* 112(1), 72–80. <https://doi.org/10.1002/agj2.20067>
- Rózewicz M., Grabiński J., Wyzińska M., 2024. Effect of strip-till and cultivar on photosynthetic parameters and grain yield of winter wheat. *Int. Agrophys.* 38, 279–291. <http://dx.doi.org/10.31545/intagr/188352>
- Shargorodskiy S., Halanskyi V., 2024. Justification of construction and technological parameters of the strip-till section for strip tillage with the application of fertilizers. *Eng. Energy Trans. AIC* 1(124), 47–55. <http://dx.doi.org/10.37128/2520-6168-2024-1-6>
- Statistica 12. Data Analysis Software System, Version 12. TIBCO Software INC: Palo Alto, CA, USA, 2017. <http://statistica.io>
- Tabatabaekolour R., 2011. Soil characteristics at the in-row and inter-row zones after strip-tillage. *Afr. J. Agric. Res.* 6, 6598–6603. <http://dx.doi.org/10.5897/AJAR11.722>
- Townsend T.J., Ramsden S.J., Wilson P., 2016. How do we cultivate in England? Tillage practices in crop production systems. *Soil Use Manag.* 32(1), 106–117. <https://doi.org/10.1111/sum.12241>

- Trevini M., Benincasa P., Guiducci M., 2013. Strip tillage effect on seedbed tilth and maize production in Northern Italy as case study for the Southern Europe environment. *Eur. J. Agron.* 48, 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.02.007>
- Vaitauskienė K., Šarauskis E., Romaneckas K., Jasinskas A., 2017. Design, development and field evaluation of row-cleaners for strip tillage in conservation farming. *Soil Tillage Res.* 174, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.006>
- Wang Q., Wang B., Sun M., Sun X., Zhou W., Tang H., Wang J., 2023. Design and testing of an automatic strip-till machine for conservation tillage of corn. *Agronomy* 13(9), 2357. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092357>
- Williams A., Davis A.S., Ewing P.M., Grandy A.S., Kane D.A., Koide R.T., Mortensen D.A., Smith R.G., Snapp S.S., Spokas K.A., Yannarell A.C., Jordan N.R., 2016. A comparison of soil hydrothermal properties in zonal and uniform tillage systems across the US Corn Belt. *Geoderma* 273, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.010>
- Yang Y., Fielke J., Ding Q., He R., 2018. Field experimental study on optimal design of the rotary strip-till tools applied in rice-wheat rotation cropping system. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 11(2), 88–94. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181102.3347>
- Yang Y., Hu Z., Gu F., Ding Q., 2023. Simulation and experimental study of the tillage mechanism for the optimal design of wheat rotary strip-tiller blades. *Agriculture* 13(3), 632. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030632>

Źródło finansowania. Pracę wykonano w ramach badań przemysłowych i prac rozwojowych współfinansowanych ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego (1.1. Projekty Badawczo-Rozwojowe; 1.1.1. Badania Przemysłowe i Prace Rozwojowe Realizowane przez Przedsiębiorstwa, Program Operacyjny Inteligentny Rozwój) w ramach projektu „Prace badawczo – rozwojowe nad innowacyjnym sposobem pasowej uprawy roli i siewu prowadzące do opracowania wysoce zaawansowanego rozwiązania dostosowanego do warunków panujących w Europie środkowo-wschodniej. Projekt nr: PB POIR.01.01.01-00-0910/17 Beneficjentem projektu była firma Mzuri World sp. z o.o.

Abstract. Biological and agrotechnical progress in field crop production requires new solutions in the construction and operation of agricultural machines. Strip tillage with simultaneous fertiliser application and seed sowing requires specialised machines with working elements adapted to working conditions. As a result of research and development work, the soil loosening tines, fertiliser applicators and seeding coulters of a hybrid machine operating in a single-pass technology were developed, with improved material and construction. The effects of their use in winter and spring plant agrotechnology were assessed in field experiments. The growth, yield and quality of winter wheat and rapeseed crops, as well as spring barley, peas and maize were determined. The yields of these plants cultivated using a machine equipped with innovative working elements were 2.7–6.9% higher (depending on species) than the yields from plots cultivated using a standard machine. The difference in yields was mainly due to the greater field emergence capacity of plants. The density of plants before harvest and ears of cereals was also higher, as was the mass of grain per plant in maize. Pea seeds grown with the innovative machine contained 0.4 percentage points (pp) more protein, and rapeseed seeds contained 0.4 pp more fat than seeds grown with the machine without any structural changes.

Keywords: strip-till, machine working elements, plant emergence, yield, protein content, fat content

Otrzymano/Received: 21.12.2024

Zaakceptowano/Accepted: 5.03.2025

Opublikowano/Published: 19.05.2025



¹ Hodowla Roślin Strzelce Sp. z o.o., Grupa IHAR, Główna 20, 99-307 Strzelce, Polska

² Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin – Państwowy Instytut Badawczy, Radzików,
05-870 Błonie, Polska

* e-mail: a.niedziela@ihar.edu.pl

SYLWIA JĘDZURA¹, DARIUSZ MAŃKOWSKI²,
PRZEMYSŁAW MATYSIK¹, AGNIESZKA NIEDZIELA^{2*}

Zmienność genetyczna i fenotypowa linii jarej pszenicy zwyczajnej (*Triticum aestivum* L.) o wysokim potencjale hodowlanym

Genetic and phenotypic variability of spring common wheat
(*Triticum aestivum* L.) lines with high breeding potential

Abstrakt. W pracy przedstawiono ocenę zróżnicowania genetycznego oraz zmienności fenotypowej 38. linii jarej pszenicy zwyczajnej pochodzących z Hodowli Roślin Strzelce Sp. z o.o., Grupa IHAR. Do genotypowania wykorzystano markery dominujące silicoDArT oraz kodominujące SNP. Największy dystans genetyczny obserwowano na podstawie polimorfizmu markerów SNP pomiędzy liniami: STH_12 i STH_37 (0,579), natomiast na podstawie polimorfizmu markerów silicoDArT pomiędzy liniami: STH_1 i STH_33 (0,728). Analiza struktury przeprowadzona metodą grupowania Bayesowskiego wykazała obecność trzech genetycznie odrębnych grup (K = 3) na podstawie segregacji alleli SNP oraz sześciu odrębnych grup (K = 6) na podstawie segregacji alleli silicoDArT. Największym współczynnikiem zmienności spośród analizowanych cech użytkowych charakteryzowały się: plon ziarna z poletka (18,0%) oraz termin kłoszenia (17,5%). Obserwowano istotne zróżnicowanie średnich wartości terminu kłoszenia, masy hektolitra i liczby ziaren z kłosa pomiędzy grupami, do których zostały przypisane badane linie hodowlane na podstawie analizy struktury populacji.

Słowa kluczowe: pszenica, zróżnicowanie genetyczne, ocena fenotypowa

Cytowanie: Jędzura S., Mańkowski D., Matysik P., Niedziela A., 2025. Zmienność genetyczna i fenotypowa linii jarej pszenicy zwyczajnej (*Triticum aestivum* L.) o wysokim potencjale hodowlanym. Agron. Sci. 80(1), 51–70. <https://doi.org/10.24326/as.2025.5470>

WSTĘP

W Polsce pszenica zwyczajna jest najważniejszym i najczęściej uprawianym zbożem na cele konsumpcyjne oraz paszowe. Powierzchnia jej uprawy wynosi 2,4 mln ha, co stanowi ok. 33,3% powierzchni upraw wszystkich zbóż w kraju [GUS 2024]. Uprawa pszenicy jarej jest mniej popularna niż ozimej, o czym świadczy niski, stanowiący 8,7-procentowy udział w powierzchni zasiewów gatunku [GUS 2024]. Formy jare mają wysokie wymagania środowiskowe i agrotechniczne [Sulek 2004, Woźniak 2006]. W uprawie pszenicy ważny jest wczesny siew, który pozwala roślinom wykształcić mocny system korzeniowy i uniknąć wiosennych niedoborów wody w glebie, co w znacznym stopniu decyduje o wielkości przyszłych plonów [Rudnicki i in. 1999, Mazurek i Sulek 2000]. Pszenica jara jest bardzo dobrą alternatywą jako roślina następcza dla późno schodzących z pola gatunków, takich jak kukurydza czy buraki, a krótszy okres wegetacji może sprzyjać obniżeniu kosztów uprawy ze względu na krótszy czas narażenia na patogeny, szkodniki i niektóre chwasty. Ziarno pszenicy jarej przeznaczone jest przede wszystkim na cele konsumpcyjne ze względu na wyższą zawartość lipidów i błonnika oraz niższą włókna surowego w stosunku do ziarna form ozimych [Biel i Maciorowski 2012]. Z kolei wyższa zawartość i jakość białka, w tym glutenu, wpływają korzystnie na wartość wypiekową mąki [Wenda-Piesik i in. 2017, Jędzura i in. 2023].

Priorytetem w hodowli nowych odmian pszenicy, podobnie jak innych zbóż, jest poprawa plenności, która w największym stopniu decyduje o opłacalności uprawy. Jednak pełne wykorzystanie potencjału plonotwórczego jest w dużym stopniu ograniczone przez stresy biotyczne i abiotyczne, na które narażone są rośliny podczas wegetacji. Dlatego też nowo wytworzone odmiany powinny charakteryzować się nie tylko wysokim plonem, ale również dobrą odpornością na patogeny oraz zmienne warunki pogodowe, takie jak: okresowe niedobory wody, przymrozki czy zakwaszenie podłoża. Różnorodność genetyczna jest jednym z ważniejszych czynników wpływających na poprawę plonowania. Stanowi również podstawę przetrwania roślin w przyrodzie [Booy i in. 2000, Raza i in. 2009]. Umożliwia hodowcom wybór genotypów o pożądanych cechach, które można następnie wykorzystać jako materiał wyjściowy w programach hodowlanych [Swarup i in. 2020]. Jej źródło mogą stanowić mutacje, przepływ genów, rekombinacje materiału genetycznego oraz dryf genetyczny [Brown 1983].

Informacje dotyczące różnorodności genetycznej populacji lub gatunku można uzyskać na podstawie danych genotypowych opartych na różnicach sekwencji nukleotydowych DNA, danych fenotypowych lub za pomocą rzadko współcześnie stosowanej metody wykorzystującej allozymy [Tang i in. 2007, Kirk i Freeland 2011, Tagliotti i in. 2018]. Obecnie na uwagę zasługują metody genotypowania bazujące na sekwencjonowaniu nowej generacji, które w krótkim czasie dostarczają dziesiątki tysięcy polimorfizmów pojedynczego nukleotydu (SNP, ang. single nucleotide polymorphism) obejmujących cały genom lub znaczną jego część. Do takich metod należy zaliczyć technologię DArTseq [Sansaloni i in. 2011] oraz GBS [Poland i Rife 2012]. DArTseq, oprócz markerów SNP o charakterze kodominującym dających możliwość odróżnienia homozygot od heterozygot, dostarcza jednocześnie dużej puli markerów silicoDArT, które cechuje dominujący charakter. Ocena dystansów genetycznych pomiędzy badanymi genotypami powinna uwzględniać różne systemy markerowe, gdyż każdy z nich może wykrywać polimorfizm w innych obszarach genomu [Bolibok i in. 2005, Stojalowski 2007]. Markery silicoDArT oraz SNP zostały

wykorzystane do badania różnorodności genetycznej i struktury populacji ponad 79 tys. genotypów pszenic zgromadzonych w banku genów CIMMYT oraz ICARDA, w tym ponad 56 tys. form heksaploidalnych *Triticum aestivum* L. *aestivum* [Sansaloni i in. 2020]. Analiza admiksji za pomocą algorytmu Bayesa oraz analiza skupień MRD (ang. modified Roger's distance) [Soleimani i in. 2020] wykazały obecność ośmiu odrębnych genetycznie grup w obrębie badanych pszenic heksaploidalnych. Na podstawie uzyskanych wyników wynioskowano, że duża część zmienności genetycznej obecna w odmianach lub populacjach lokalnych nie została dotychczas włączona do hodowli. Tomkowiak i in. [2019, 2020] testowali przydatność markerów uzyskanych za pomocą technologii DArTseq, jak również markerów AFLP, RAPD i SSR do oceny stopnia podobieństwa między liniami wsobnymi kukurydzy. Autorzy wykazali, że właściwy dobór systemu markerowego, a także miary dystansu genetycznego mają wpływ na grupowanie badanych linii i są istotnie powiązane z wyborem komponentów matecznych do hodowli mieszańcowej.

Badania opisane w tej pracy miały na celu ocenę zróżnicowania genetycznego materiałów kolekcyjnych jarej pszenicy zwyczajnej z uwzględnieniem dwóch typów markerów (SNP i silicoDArT) oraz ustalenie jego powiązania ze zmiennością obserwowaną na poziomie fenotypowym.

MATERIAŁ I METODY

Materiał badawczy stanowiło 38 linii jarej pszenicy zwyczajnej (STH_01 – STH_38) pokolenia F7-F8 pochodzących z Hodowli Roślin Strzelce Sp. z o.o., Grupa IHAR. Linie wybrano na podstawie najlepszych wyników plonowania uzyskanych w doświadczeniach wyższych (doświadczenie wstępne, doświadczenie przedwstępne, badania rejestrowe Centralnego Ośrodka Badania Odmian Roślin Uprawnych) przeprowadzonych w 2022 r. Doświadczenie polowe w 2023 r. założono w Strzelcach (52°18'57.1"N, 19°24'09.6"E), w układzie losowanych bloków kompletnych, w trzech powtórzeniach, na poletkach o powierzchni 2 m². Rośliny rosły na glebie brunatnej właściwej zaliczonej do kompleksu pszennego dobrego, klasy bonitacyjnej III a. Przeprowadzono ocenę fenotypową badanych linii pod względem cech ilościowych, takich jak: średnia liczba (LZK) oraz masa (MZK) ziaren z 10 kłosów, masa hektolitra (kg·hl⁻¹), średni plon z trzech poletek o powierzchni 2 m² (kg), masa tysiąca ziaren (g), wysokość roślin (cm) i termin kłoszenia, biorąc pod uwagę liczbę dni od 1 czerwca. Podatność na porażenie mączniakiem prawdziwym oceniano trzykrotnie podczas sezonu wegetacyjnego, stosując dziewięciostopniową skalę bonitacyjną (9 – brak porażenia, 1 – bardzo silne porażenie). Ocenę ziarna pod względem zawartości białka, glutenu i skrobi wyrażono w g·kg⁻¹, jego wodochłonność (WA) wyrażono w procentach (%), a także indeks twardości ziarna (HI) wykonano przy użyciu analizatora NIRSTM DS2500 firmy FOSS. Współczynnik zmienności (CV, %) oraz wariancję poszczególnych cech w obrębie badanych linii obliczono w programie Statistica v.13.3 [TIBCO Software Inc. 2017].

Izolacja genomowego DNA została wykonana z dziesięciu równych wagowo fragmentów liści reprezentujących każdą z linii zgodnie z procedurą rekomendowaną przez dostawcę zestawów do izolacji (Plant DNeasy MiniKit 250, Qiagen). Do genotypowania zastosowano platformę DArTseq (Diversity Arrays Technology Pty Ltd, Canberra, Australia). Przed przystąpieniem do analiz markery filtrowano ze względu na częstość występowania

rzadkiego allelu (ang. minor allele frequency; $MAF > 0,05$) oraz liczbę brakujących obserwacji (ang. call rate; $CR > 0,95\%$).

Współczynnik informacji polimorficznej PIC (ang. polymorphism information content) dla markerów kodominujących SNP oszacowano stosując wzór zaproponowany przez Nei [Nei i Li 1979], natomiast dla markerów dominujących silicoDArT wzór wg Roldan-Ruiz i in. [2020]. Zgodnie z zastosowanymi wzorami wartość PIC dla markerów kodominujących mieści się w zakresie 0–1,0, natomiast dla markerów dominujących 0–0,5.

W programie GenAlex v.6.5 [Peakall i Smouse 2012] wyliczono następujące parametry genetyki populacyjnej: udział procentowy loci polimorficznych (PPL), liczbę alleli obserwowanych (N_a), efektywną liczbę alleli (N_e), wskaźnik Shannona (I), heterozygotyczność oczekiwaną wynikającą z założeń prawa Hardy’ego-Weinberga (H_e), heterozygotyczność obserwowaną (H_o) oraz nieobciążoną oczekiwaną heterozygotyczność (uH_e). Dla analizowanych linii jarej pszenicy zwyczajnej określono współczynniki dystansu genetycznego (GD) według wyskalowanej metody euklidesowej zaimplementowanej do pakietu dartR [Georges 2022] w programie R [<http://www.rproject.org>]. Pakiet ten uwzględnia różnice w sposobie kodowania danych, dając możliwość zastosowania odległości euklidesowej dla obu typów markerów. W zapisie wyników silicoDArT „0” oznacza brak, a „1” obecność markera, natomiast podczas generowania wyników SNP obie wartości oznaczają obecność polimorfizmu w stanie homozygotycznym (0 – homozygota referencyjna; 1 – homozygota SNP), natomiast 2 oznacza heterozygotę.

Na bazie macierzy dystansu genetycznego wykreślono dendrogram obrazujący podobieństwo badanych pszenic. Jako metodę aglomeracji wybrano metodę średnich połączeń UPGMA (ang. unweighted pair group method with arithmetic mean). Linie hodowlane tworzące poszczególne grupy zaznaczono odrębnymi kolorami na dendrogramach.

W celu dokładnego zidentyfikowania grup genetycznie zróżnicowanych populacji wykonano obliczenia w programie Structure v.2.3.3 [Pritchard i in. 2000]. Najbardziej prawdopodobną wartość K wyznaczono na podstawie zobrazowanej graficznie wartości delta K (ΔK), pokazującej wyraźny szczyt przy prawidłowej liczbie grup [Evanno i in. 2005]. Przeprowadzono łącznie dziewięć symulacji przypisania osobników do grup genetycznych, zakładając, że analizowana pula osobników stanowi jedną grupę ($K = 1$), a następnie, że obecne są grupy od $K = 2$ do $K = 9$. Zastosowano model dla skorelowanych frekwencji alleli, wykonano 100 000 interakcji i 100 000 powtórzeń zgodnie z algorytmem MCMC (ang. Markov chain Monte Carlo). Wyniki zobrazowano w programie CLUMPAK [Kopelman i in. 2015]. Pomiędzy wyodrębnionymi grupami obliczono dystans genetyczny (GD) według Neia z zastosowaniem programu GenAlex v.6.5. [Peakall i Smouse 2007].

W celu porównania wartości średnich cech użytkowych oraz sposobu ich kształtowania się w zależności od grupy, do której przypisano dany genotyp, wykonano analizę wariancji (ANOVA). Wzajemne zależności pomiędzy cechami fenotypowymi określano za pomocą analizy korelacji liniowej Pearsona oraz analizy składowych głównych (PCA) wykonanych w programie Statistica v.13.3 [TIBCO Software Inc. 2017].

WYNIKI

Genotypowanie badanych linii jarej pszenicy zwyczajnej pozwoliło na uzyskanie 41 480 markerów SNP oraz 50 343 markerów silicoDArT. Po filtrowaniu do analiz wykorzystano odpowiednio 10 219 SNP i 7 285 silicoDArT. Wartości PIC dla markerów kodominujących kształtowały się na poziomie 0,012–1,0, natomiast dla markerów dominujących: 0,152–0,5. Średnia wartość współczynnika PIC po filtrowaniu była równa 0,380 dla SNP i 0,375 dla silicoDArT (tab. 1). Wszystkie badane loci prezentowały 100% polimorfizmu, a liczba obserwowanych alleli w locus (Na) wynosiła 2,0 bez względu na zastosowany system markerowy. Efektywna liczba alleli oraz indeks Shanona dla badanej populacji były wyższe w przypadku zastosowania markerów kodominujących ($N_e = 1,570$; $I = 0,570$) niż gdy do analiz zastosowano markery dominujące ($N_e = 1,409$; $I = 0,432$). Średnia obserwowana wartość heterozygotyczności (H_o) była równa 0,122 dla loci SNP i znacznie różniła się od wartości średnich oczekiwanej częstości heterozygot ($H_e = 0,388$) oraz nieobciążonej oczekiwanej częstości heterozygot ($uH_e = 0,393$) – tab. 1.

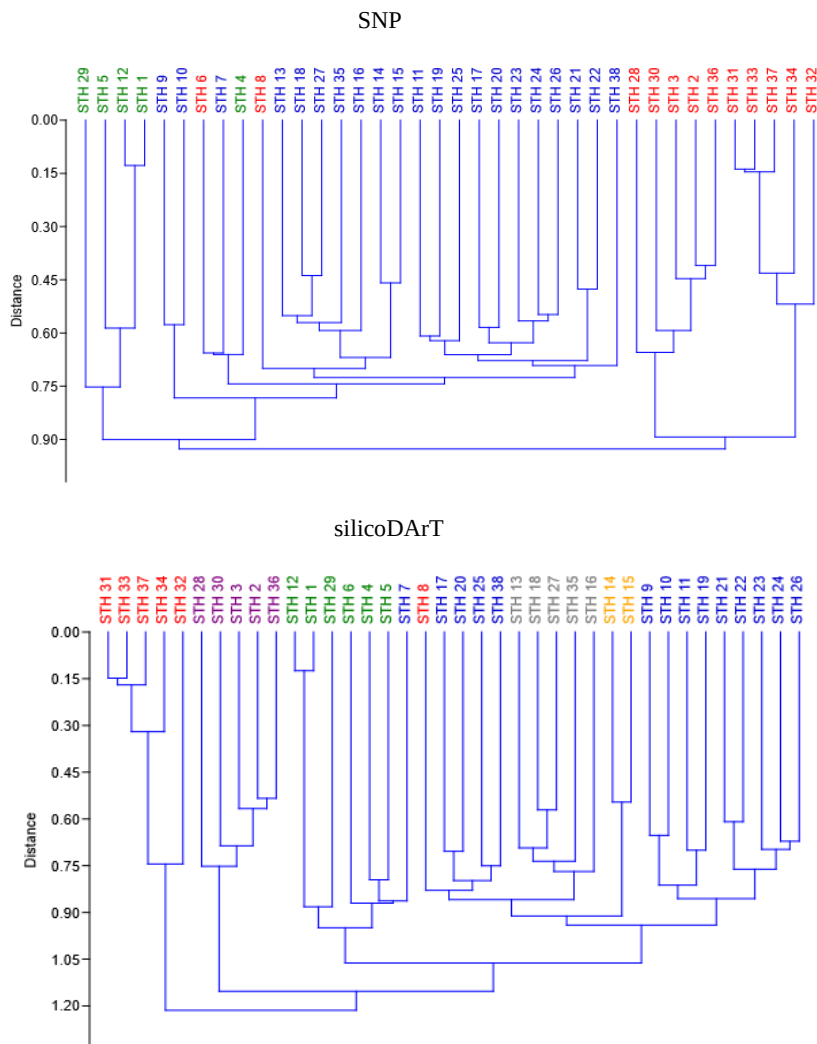
Tabela 1. Współczynnik informacji polimorficznej (PIC) oraz parametry charakteryzujące zmienność genetyczną
Table 1. Polymorphic information content (PIC) and parameters characterizing genetic variability

System markerowy Marker system	PIC	PPL (%)	Na	Ne	I	He	uHe	Ho
SNP	0,380	100%	2,000	1,570	0,570	0,388	0,393	0,122
silicoDArT	0,375	100%	2,000	1,409	0,432	0,270	0,274	

PIC – indeks stopnia polimorfizmu, PPL – udział procentowy loci polimorficznych, Na – liczba alleli, Ne – efektywna liczba alleli, I – wskaźnik Shannona, He – heterozygotyczność oczekiwana, Ho – heterozygotyczność obserwowana, uHe – nieobciążona oczekiwana heterozygotyczność

PIC – polymorphic information content, PPL – percentage of polymorphic loci, Na – number of alleles, Ne – effective number of alleles, I – Shannon index, He – expected heterozygosity, Ho – observed heterozygosity, uHe – unbiased expected heterozygosity

W przeprowadzonych analizach największą wartość dystansu genetycznego wyznaczonego w oparciu o polimorfizm markerów SNP według metody euklidesowej obserwowano pomiędzy liniami STH_12 i STH_37 (0,579), natomiast dla markerów silicoDArT pomiędzy liniami STH_1 i STH_33 (0,728). Najbardziej podobne były linie STH_12 i STH_1 (0,090) oraz STH_31 i STH_33 (0,098) niezależnie od zastosowanego systemu markerowego. Na podstawie macierzy odległości genetycznych przeprowadzono analizę skupień, która wykazała obecność dwóch (SNP) i trzech (silicoDArT) głównych skupień. Dziesięć linii (STH_2, STH_3, STH_28, STH_30, STH_31, STH_32, STH_33, STH_34, STH_36 i STH_37) było wyraźnie oddzielonych od pozostałej grupy bez względu na zastosowany system markerowy (ryc. 1).



Odrębnymi kolorami zaznaczono linie przypisane do poszczególnych grup na podstawie wyników programu Structure: niebieski – G1, czerwony – G2, zielony – G3, fioletowy – G4, pomarańczowy – G5, szary – G6
 Lines assigned to particular groups based on the results of the Structure program remarked in separate colours
 (blue – G1, red – G2, green – G3, purple – G4, orange – G5, grey – G6)

Ryc. 1. Dendrogramy 38 linii jarej pszenicy zwyczajnej otrzymane metodą UPGMA
 Fig. 1. Dendrograms for 38 spring wheat lines generated by UPGMA clustering analysis

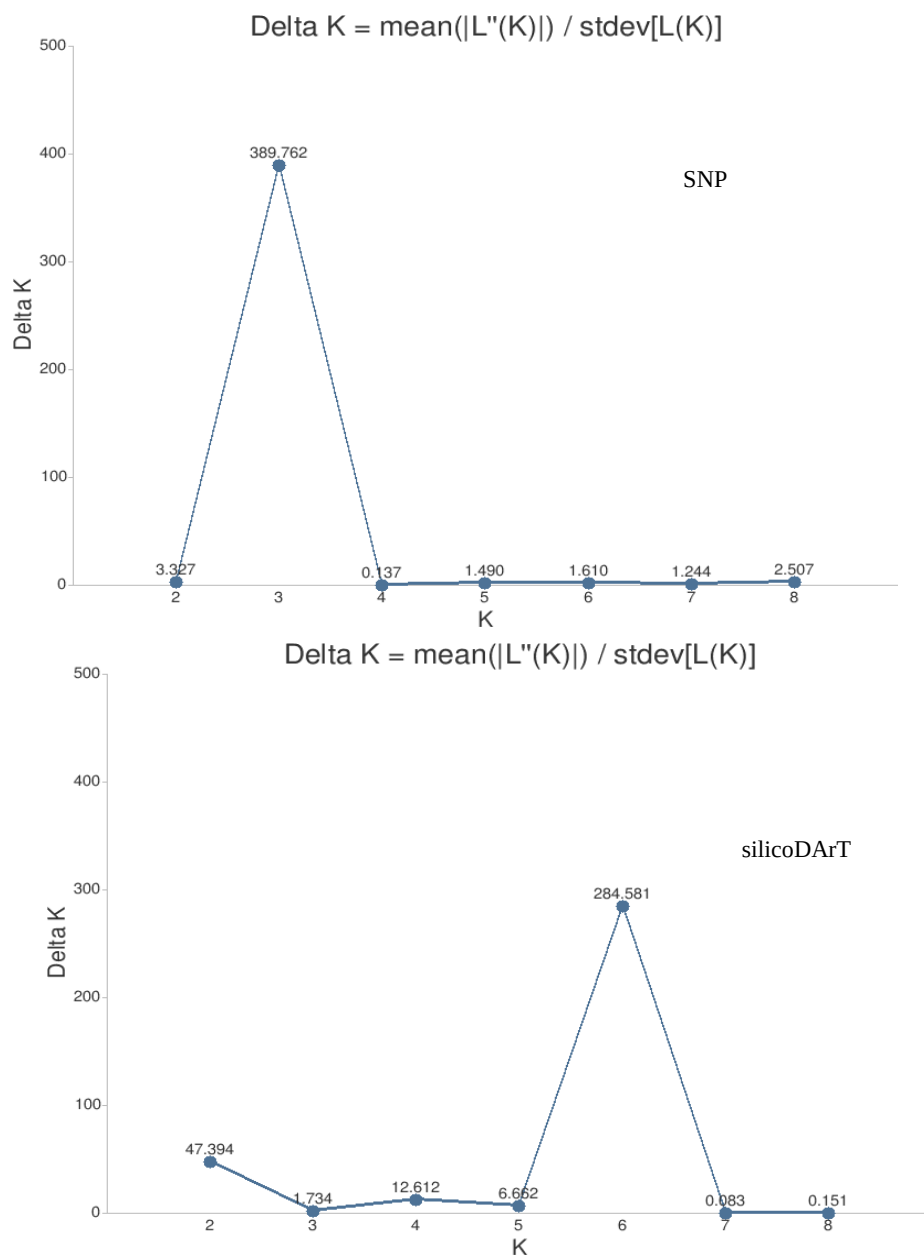
Analiza struktury zmienności genetycznej badanej populacji pszenicy przeprowadzona metodą grupowania Bayesowskiego z wykorzystaniem oprogramowania Structure ver. 2.3.4 wyodrębniła trzy genetycznie odrębne grupy ($K = 3$) na podstawie analizy segregacji alleli SNP oraz sześciu grup ($K = 6$) na podstawie analizy segregacji alleli silicoDArT (ryc. 2). W analizowanej populacji wartości ΔK wskazujące na liczbę grup były niskie ($\Delta K = 389$ dla SNP; $\Delta K = 285$ dla silicoDArT), co wskazywało na grupowanie linii należących do co najmniej kilku klas w obrębie jednej grupy. Przy założeniu istnienia trzech grup, 42,1% roślin zostało praktycznie jednoznacznie przypisanych do jednej z nich (wartości $Q > 0.950$) na podstawie danych otrzymanych dla SNP, podczas gdy wartość ta była niższa dla silicoDArT i wynosiła 18,4% przy założeniu istnienia sześciu grup (ryc. 3). Linie STH_1, STH_12, STH_21, STH_24, STH_31, STH_33 i STH_37 charakteryzowały się wysokimi wartościami $Q (> 0.95)$ niezależnie od wykorzystanego systemu markerowego oraz zakładanej najbardziej prawdopodobnej liczby grup. Wartości dystansu genetycznego pomiędzy uzyskanymi grupami określonymi za pomocą analizy Bayesa wahały się od 0,10 (G2 vs G3) do 0,35 (G6 vs G1 i G5) dla analizy z zastosowaniem markerów SNP oraz od 0,13 (G1 vs G2) do 0,24 (G2 vs G3) dla markerów silicoDArT (tab. 2).

Na podstawie wstępnej oceny fenotypowej stwierdzono zróżnicowanie wartości badanych cech użytkowych w obrębie 38 linii pszenicy jarej (tab. 3). Największą zmiennością charakteryzował się plon ziarna z poletka ($CV = 18,0\%$) oraz termin kłoszenia ($CV = 17,5\%$). Najmniejszą zmienność stwierdzono dla zawartości skrobi w ziarnie ($CV = 1,9\%$) i masy hektolitra ($CV = 2,8\%$). Najwyższą wartość plonu ziarna z poletka uzyskano dla linii STH_11 (0,75 kg), a najniższą dla linii STH_3 (0,39 kg), podczas gdy masa tysiąca ziaren była najwyższa dla linii STH_3 (51,9 g), a najniższa dla linii STH_11 (40,5 g). Najwyższą zawartością białka w ziarnie ($125\text{--}128\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) charakteryzowały się następujące linie hodowlane: STH_4, STH_17 i STH_25. Cecha ta była ujemnie skorelowana z plonem ($r = -0,54$; $p < 0,05$).

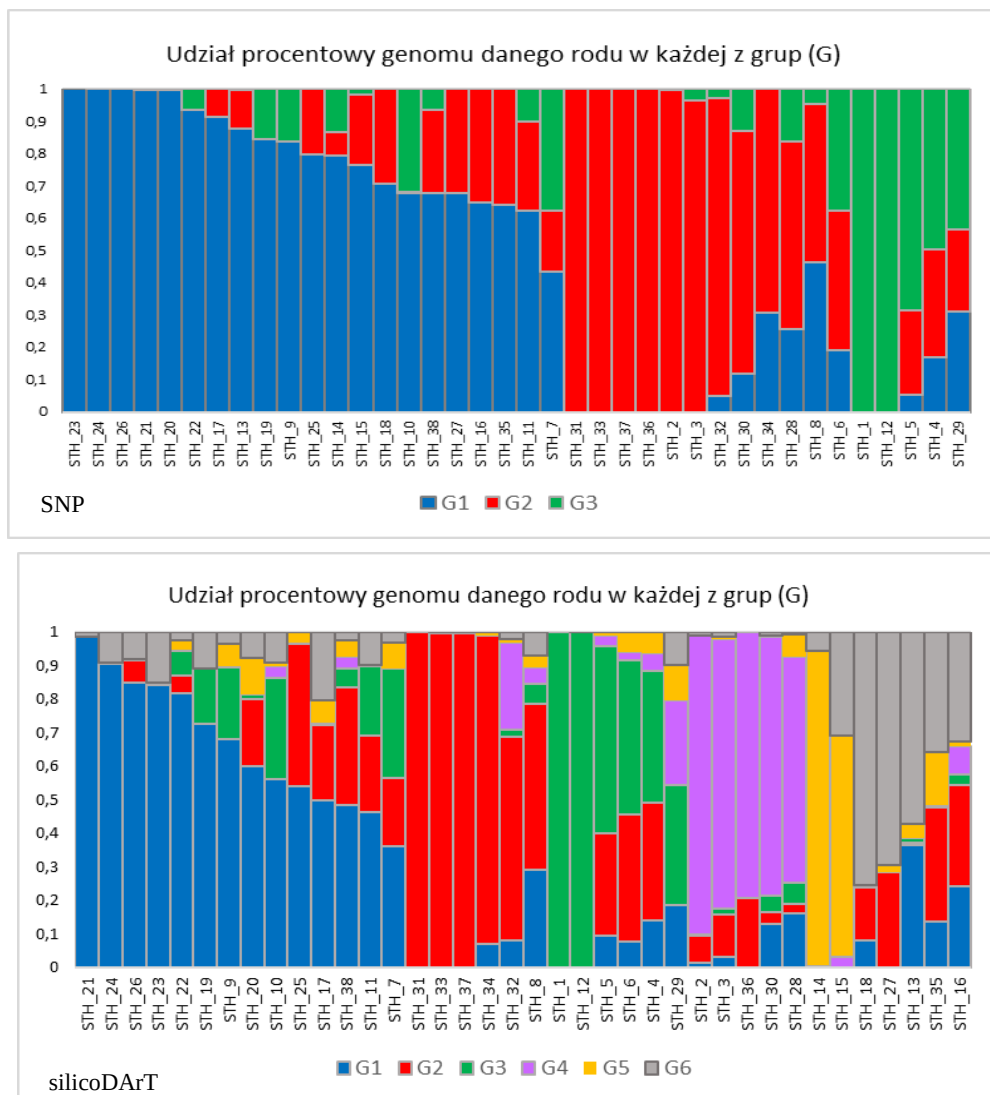
Tabela 2. Macierz wartości dystansów genetycznych pomiędzy populacjami na podstawie współczynnika Nei na podstawie analizy z wykorzystaniem markerów SNP (powyżej przekątnej) i silicoDArT (poniżej przekątnej)

Table 2. Pairwise population matrix of Nei genetic distance between populations evaluated using SNP (above the diagonal) and silicoDArT markers (below the diagonal)

	G1	G2	G3	G4	G5	G6
G1	–	0,132	0,188	–	–	–
G2	0,158	–	0,240	–	–	–
G3	0,231	0,100	–	–	–	–
G4	0,177	0,150	0,254	–	–	–
G5	0,208	0,186	0,175	0,307	–	–
G6	0,349	0,249	0,274	0,236	0,354	–



Ryc. 2. Wykresy wartości Delta K
Fig. 2. Plot of Delta K values



Odrębnymi kolorami zaznaczono linie przypisane do poszczególnych grup na podstawie wyników programu Structure

Lines assigned to particular groups based on the results of the Structure program remarked in separate colours

Ryc. 3. Struktura genetyczna populacji 38 linii pszenicy zwyczajnej

Fig. 3. Genetic structure of 38 spring wheat lines population

Tabela 3. Wartości średnie, zakresy zmienności i współczynniki zmienności (CV) dla badanych cech użytkowych 38 linii jarej pszenicy zwyczajnej

Table 3. Mean values, range of variables, and coefficient of variation (CV) for analysed traits of 38 spring common wheat lines

Badana cecha Examined trait	Minimum	Maksimum Maximum	Średnia Mean	Wariancja Variance	Współczynnik zmienności Coefficient of variation (%)
Termin kłoszenia (liczba dni od 1 czerwca) Heading date (number of days from 1 June)	7	12	9,24	2,62	17,52
Wysokość roślin (cm) Plant height	67	97	82,9	46,9	8,25
Mączniak prawdziwy (skala 9-stopniowa) Powdery mildew (9-degree scale)	7	9	8,49	0,42	7,62
Masa 1000 ziaren (g) 1000 grain weight	40,52	51,94	45,5	7,09	5,85
Masa hektolitra ($\text{kg} \cdot \text{hl}^{-1}$) Hectoliter weight	72,3	81,4	76,5	4,66	2,82
Plon ziarna (kg) Grain yield	0,38	0,76	0,57	0,01	18,01
Liczba ziaren w kłosie Number of grains per spike	44,1	66,5	55,2	29,9	9,91
Masa ziarna z kłosa (g) Weight of grains per spike	2,232	3,264	2,7	0,07	9,88
Zawartość białka w ziarnie ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) Protein content in grain	98	128	112	0,66	7,26
Zawartość glutenu ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) Gluten content	206	300	254	5,51	9,24
Zawartość skrobi ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) Starch content	571	617	596	1,27	1,89
Wodochłonność (%) Water absorption	49,64	59,81	54,1	5,34	4,27
Indeks twardości ziarna Grain hardness index	46,1	68,2	56,6	23,4	8,56

Analiza wariancji (ANOVA) w obrębie grup, do których zostały przypisane badane linie hodowlane pszenicy zwyczajnej na podstawie analizy struktury populacji wykazała istotne zróżnicowanie wartości średnich niektórych cech fenotypowych (tab. 4). Dla analizy wykonanej na podstawie markerów silicoDArT skrajne wartości terminu kłoszenia i masy hektolitra odnotowano dla pszenic przypisanych do grup G1 oraz G2, natomiast dla masy ziaren z kłosa – dla grup G2 i G5. Odrębne średnie wartości liczby ziaren z kłosa otrzymano pomiędzy grupami G1 i G2 oraz G5. Należy jednak podkreślić, że do grupy G5 należą tylko dwie linie hodowlane, co może mieć wpływ na uzyskany wynik. Z kolei analiza z zastosowaniem markerów SNP wykazała istotne różnice średnich wartości terminu kłoszenia, wysokości roślin, masy hektolitra oraz liczby ziaren z kłosa pomiędzy pszenicami przypisanymi do grupy G1 i G2 (tab. 4).

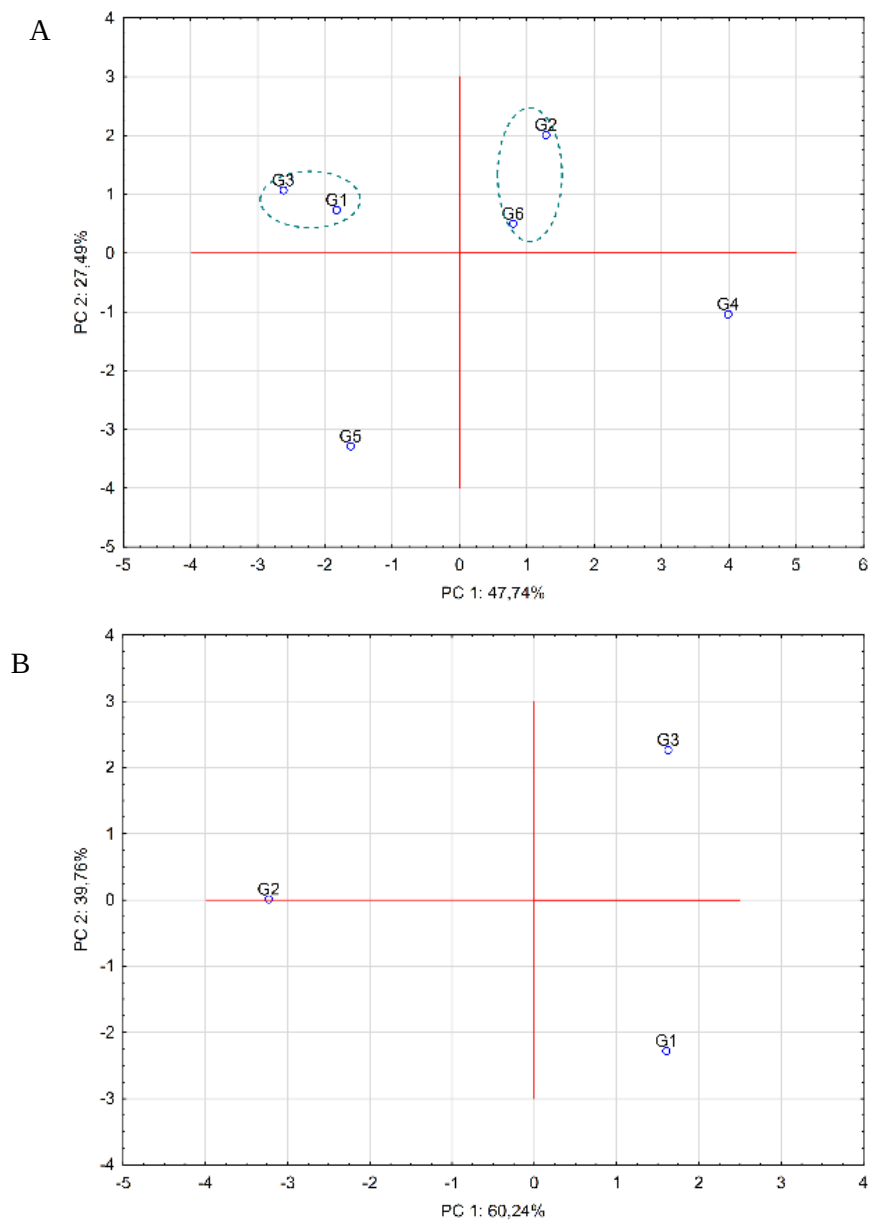
Analiza składowych głównych pozwoliła na wydzielenie dwóch składowych odpowiadających odpowiednio za 60,2% i 39,7% objaśnianej zmienności pomiędzy grupami z zastosowaniem markerów SNP (ryc. 4A). Dla pierwszej składowej głównej stwierdzono dodatnią korelację z wysokością roślin (0,937), masą hektolitra (0,954), plonem ziarna (0,985), liczbą (0,998) i masą ziaren z 10 kłosów (0,679) oraz indeksem twardości ziarna (0,991). Pozostałe cechy wykazywały ujemne korelacje z PC1. Druga składowa główna była dodatnio skorelowana z wodochłonnością ziarna (0,942), ujemnie zaś przede wszystkim z porażeniem mączniakiem prawdziwym –0,814, masą tysiąca ziaren (–0,736), masą ziaren z 10 kłosów (–0,735), zawartością białka (–0,747), glutenu (–0,778) i skrobi (–0,999) w ziarnie (tab. 4). Wszystkie trzy grupy tworzyły odrębne skupienia (ryc. 2A). Tożsama analiza dla grup wyodrębnionych z zastosowaniem markerów silicoDArT pozwoliła na wydzielenie trzech składowych odpowiadających odpowiednio za 47,7%, 27,5% oraz 17,3% objaśnianej zmienności pomiędzy grupami (ryc. 4B). Pierwsza składowa główna (PC 1) była silnie dodatnio skorelowana z terminem kłoszenia (0,924), stopniem porażenia mączniakiem prawdziwym (0,865), masą tysiąca ziaren (0,703), zawartością białka w ziarnie (0,686) oraz zawartością glutenu (0,796) – tab. 5. Wysokie wartości ujemnych korelacji z PC 1 wykazywały takie cechy, jak: wysokość roślin (–0,884), masa hektolitra (–0,811), plon ziarna (–0,968) i liczba ziaren w kłosie (–0,620). Dla drugiej składowej głównej (PC 2) stwierdzono dodatnią korelację z zawartością skrobi w ziarnie (0,768), natomiast ujemną korelację z liczbą ziaren w kłosie (–0,742), masą tysiąca ziaren (–0,906) oraz wodochłonnością ziarna (–0,887). Za wartości trzeciej składowej głównej (PC 3) odpowiadały ze znakiem dodatnim: zawartość białka (0,642) i glutenu w ziarnie (0,539) oraz indeks twardości ziarna (0,826). Z przestrzennego rozmieszczenia opisywanych grup w układzie dwóch pierwszych składowych głównych (ryc. 2B) wynika, że grupy G1 i G3 tworzą jedno skupienie, podobnie jak G2 i G6, natomiast grupy G4 oraz G5 są od nich wyraźnie odrębne.

Tabela 4. Analiza wariancji (AMOVA) średnich wartości cech uzyskanych w obrębie grup wyodrębnionych w programie Structure
Table 4. Analysis of variance (AMOVA) for mean values of the traits among groups evaluated in Structure

Wyszczególnienie	Markery										
	silicoDARt							SNP			
Grupa Group	G1	G2	G3	G4	G5	G6	F-statistic	G1	G2	G3	F-statistic
Termin kłoszenia Heading date	8,00 ^a	10,29 ^b	9,00 ^{ab}	11,20 ^b	8,50 ^{ab}	10,00 ^{ab}	7,46***	8,57 ^a	10,42 ^b	9,20 ^{ab}	6,42**
Wysokość roślin (cm) Plant height	86,64	79,14	83,17	77,2	85,00	82,25	2,37 n.s.	85,33 ^b	78,66 ^{ab}	83,00 ^{ab}	4,26*
Mączniak prawdziwy Powdery mildew	8,47	8,58	8,22	8,73	8,50	8,58	0,42 n.s.	8,51	8,53	8,33	0,47 n.s.
MTZ (g)	45,01	45,98	45,84	46,83	46,60	46,69	1,1 n.s.	45,58	46,09	43,80	1,35 n.s.
Masa hektolitra (kg·hl ⁻¹) Hectoliter weight	77,88 ^b	74,50 ^a	77,00 ^{ab}	75,18 ^{ab}	77,50 ^{ab}	75,25 ^{ab}	4,69**	77,23 ^b	75,08 ^a	76,58 ^{ab}	4,49*
Plon ziarna (kg) Grain yield	0,59	0,54	0,59	0,48	0,60	0,56	1,23 n.s.	0,58	0,52	0,59	2,32 n.s.
LZK	55,35 ^a	52,35 ^a	56,91 ^{ab}	53,06 ^{ab}	62,75 ^b	55,87 ^{ab}	5,42***	56,23 ^b	52,80 ^a	56,50 ^{ab}	6,15**
MZK (g)	2,61 ^{ab}	2,65 ^a	2,74 ^{ab}	22,79 ^{ab}	3,08 ^b	2,79 ^{ab}	3,94**	2,71	2,70	2,70	0,99 n.s.
Białko (g·kg ⁻¹) Protein	112,7	110,4	108,8	116,6	111,0	110,3	5,9 n.s.	111,9	112,4	110,2	8,8 n.s.
Gluten (g·kg ⁻¹)	257,1	252,4	240,7	266,2	247,5	252,2	7,2 n.s.	254,4	255,7	247,6	2,1 n.s.
Skrobia (g·kg ⁻¹) Starch	600,0	595,5	596,1	589,8	588,0	591,5	9,8 n.s.	597,1	594,7	592,2	6,5 n.s.
WA (%)	53,81	52,88	54,49	56,11	56,35	53,36	1,89 n.s.	53,87	54,42	54,55	0,75 n.s.
HI	57,62	55,70	56,01	56,80	57,05	54,57	0,31 n.s.	56,80	56,07	56,70	0,92 n.s.

Objaśnienia: MTZ – masa 1000 ziaren, LZK – liczba ziaren w kłosie, MZK – masa ziarna z kłosa, WA – wodochłonność, HI – indeks twardości ziarna; * P < 0.05, ** P < 0.01, *** P < 0.001; n.s. – różnice nieistotne. Wartości oznaczone różnymi literami różnią się statystycznie istotnie

Explanations: MTZ – 1000 grain weight, LZK – number of grains per spike, MZK – weight of grains per spike, WA – water absorption, HI – grain hardness index; *P < 0.05, ** P < 0.01, *** P < 0.001; n.s. – not significant differences. Values followed by different letters are statistically different



Ryc. 4. Przestrzenne rozmieszczenie grup wyodrębnionych z zastosowaniem analizy struktury populacji w układzie dwóch pierwszych składowych głównych: A) SNP, B) silicoDArT

Fig. 4. Spatial distribution of groups identified using population structure analysis in the first two principal components: A) SNP, B) silicoDArT

Tabela 5. Współczynniki korelacji między cechami a każdą ze składowych głównych (PC) tłumaczących największy poziom objaśnianej zmienności pomiędzy grupami
 Table 5. Correlation coefficients between evaluated traits and each of the principal components (PC) explaining the greatest level of variability between groups

Cecha Trait	silicoDArT			SNP	
	PC 1	PC 2	PC 3	PC 1	PC 2
Termin kłoszenia Heading date	0,9235	0,1505	−0,2667	−0,9409	0,3385
Wysokość roślin (cm) Plant height	−0,8835	−0,1741	0,2092	0,9373	−0,3483
Mączniak prawdziwy Powdery mildew	0,8650	−0,2967	0,1576	−0,5811	−0,8137
Masa 1000 ziaren (g) 1000 grain weight	0,7026	−0,4980	−0,2035	−0,6765	−0,7363
Masa hektolitra (kg·hl ^{−1}) Hectoliter weight	−0,8112	−0,3759	0,4290	0,9544	−0,2983
Plon ziarna (kg) Grain yield	−0,9681	−0,0689	−0,0998	0,9851	−0,1716
Liczba ziaren w kłosie Number of grains per spike	−0,6203	−0,7422	−0,2452	0,9982	0,0598
Masa ziarna z kłosa (g) Weight of grains per spike	−0,0926	−0,9059	−0,4101	0,6785	−0,7345
Zawartość białka (g·kg ^{−1}) Protein content	0,6860	−0,3224	0,6421	−0,6648	−0,7470
Zawartość glutenu (g·kg ^{−1}) Gluten content	0,7963	−0,0840	0,5386	−0,6279	−0,7782
Zawartość skrobi (g·kg ^{−1}) Starch content	−0,4213	0,7678	0,4783	−0,0278	−0,9996
Wodochłonność (%) Water absorption	0,0962	−0,8867	0,1604	−0,3365	0,9416
Indeks twardości ziarna Grain hardness index	−0,2231	−0,4237	0,8257	0,9913	−0,1309

DYSKUSJA

Zmienność genetyczna jest jedną z najważniejszych cech charakteryzujących każdą populację, a odpowiednio wysoka różnorodność genetyczna jest podstawą zachowania jej zdolności adaptacyjnych [Sokal i in 1989]. Technologia DArTseq stanowi wydajne narzędzie-

dzie diagnostyczne do badania zmienności genetycznej i struktury populacji roślin użytkowych [Tomkowiak i in. 2019, Sansaloni i in. 2020]. Generuje ona jednorazowo od kilkuset do kilku tysięcy markerów, z których zwykle ok. 60–70% spełnia wymogi stawiane przez techniki analityczne pod warunkiem, że liczba badanych osobników przekracza 100 [Mourad i in. 2020, Sansaloni i in. 2020]. Ograniczenie wielkości badanej populacji roślin w obecnym doświadczeniu do 38 linii miało wpływ na obniżenie tych wartości do 24,6% dla SNP i 14,5% dla silicoDART poprzez wzrost liczebności markerów monomorficznych. Wciąż jednak pula markerów, którą wykorzystano do analiz liczyła kilka tysięcy, a uzyskane dla nich średnie wartości współczynnika PIC świadczyły o wysokiej (silicoDART, PIC = 0,375) bądź średniej (SNP, PIC = 0,380) zdolności do wykrywania polimorfizmu wśród osobników badanej populacji [Serrote i in. 2020].

Ocena heterozygotyczności badanych materiałów wykazała duże różnice pomiędzy obserwowaną ($H_o = 0,122$) a oczekiwaną ($H_e = 0,388$) częstością występowania heterozygot. Mogło to wynikać zarówno z niewielkiej liczebności badanej populacji pszenic, jak i ściśle ukierunkowanej selekcji na określone cechy [Akhunov i in. 2010, Tyrka i in. 2021]. Niskie wartości heterozygotyczności obserwowanej są charakterystyczne dla gatunków samopylnych, do których należy pszenica. Podobne wyniki ($H_o = 0,110$) otrzymał Tyrka i in. [2021], badając 277 ozimych odmian pszenicy zarejestrowanych w Niemczech, Polsce i Wielkiej Brytanii oraz 232 zaawansowanych linii hodowlanych. Jeszcze niższy poziom heterozygotyczności (0,074) uzyskał Hussain i in. [2022], badając zróżnicowanie genetyczne 184 odmian pszenicy jarej pochodzących z Pakistanu. Wartości H_e i uH_e wynikające z częstości występowania alleli silicoDART w badanej populacji pszenicy wynosiły odpowiednio 0,270 oraz 0,274, co lokowało je na niskim poziomie w stosunku do średnich wartości uzyskanych dla materiałów pochodzących z Chorwacji, Belgii i Australii (0,360–0,411) [Novoselovic i in. 2016, El-Esawi i in. 2018].

Otrzymane w wyniku analizy skupień grupy w znacznym stopniu pokrywały się z wynikami otrzymanymi metodą grupowania Bayesowskiego. Przynależność poszczególnych linii do genetycznie odrębnych grup miała związek z ich pochodzeniem. Dziesięć linii, które w swoim pochodzeniu mają odmianę Tybalt (grupa G2) było wyraźnie oddzielonych od pozostałych bez względu na zastosowany system markerowy. Ponadto po zastosowaniu markerów silicoDART z grupy G2 wydzielili się grupa G4, której obiekty w pochodzeniu posiadały również komponent ozimy. W grupie G1 znalazły się linie będące wynikiem krzyżowania odmian zagranicznych (jarych i ozimych). Po zastosowaniu markerów silicoDART z grupy tej wydzielili się G5 i G6. Pierwsza skupiała genotypy posiadające w pochodzeniu odmianę ościstą zagraniczną, a druga odmianę KWS Westfield. Grupa G3 połączyła ze sobą w osobnym skupieniu genotypy, które w pochodzeniu mają odmianę Harenda. Nieliczne obserwowane niezgodności w klasyfikacji niektórych linii (STH_4, STH_6, STH_8) do poszczególnych genetycznie odrębnych grupy mogły wynikać z różnych parametrów, które biorą pod uwagę użyte metody statystyczne [Pritchard i in. 2000, Mańkowski i in. 2011] oraz z zastosowania dwóch niezależnych systemów markerowych [Bolibok i in. 2005, Stojalowski 2007]. Wartości Q analizy Bayesa w okolicach 0,5 odnotowane dla tych linii wskazywały na wymianę materiału genetycznego w obrębie badanej populacji, co znalazło potwierdzenie w ich rodowodzie. Przykładowo linia STH_6 jest

krzyżówką złożoną, zawierającą odmianę Tybalt i Harenda stąd jej możliwa przynależność zarówno do G2, jak i G3. Takie niejednoznaczne przypisanie poszczególnych obiektów do poszczególnych grup na skutek intensywnej wymiany materiału genetycznego w trakcie realizacji programów hodowlanych jest często spotykane w podobnych pracach [Sansaloni i in. 2020, Hussain i in. 2022, Tang i in. 2023].

Wysokie parametry dystansu genetycznego pomiędzy wyodrębnionymi grupami mogą być wskazówką dla Hodowli co do wyboru materiałów do dalszych krzyżowań [Tomkowiak i in. 2020], podobnie jak dane z oceny różnorodności fenotypowej posiadanej kolekcji. Wśród 38 linii jarych pszenicy największą zmienność fenotypową obserwowano dla plonu ziarna z poletka ($CV = 18,0\%$) oraz terminu kłoszenia ($CV = 17,5\%$). Podobne badania prowadzone przez Studnickiego i in. [2009] dla 149 obiektów z kolekcji roboczej pszenicy jarej wykazały o połowę niższy współczynnik zmienności w odniesieniu do plonu oraz zawartości skrobi w ziarnie w porównaniu z liniami pochodzącymi z Hodowli Roślin Strzelce Sp. z o.o., Grupa IHAR, a także trzykrotnie niższy współczynnik zmienności dla terminu kłoszenia. Dla tej ostatniej cechy przytaczana różnica może wynikać z rozbieżności w przyjętym terminie rozpoczęcia oceny oraz obserwowanym przez Studnickiego i in. [2009] wyższym zakresie zmienności cechy. W badaniach własnych obserwowano również bardzo typową odwrotnie proporcjonalną zależność wielkości plonu i masy tysiąca ziaren [Beral i in. 2022]. Według Beral i in. [2022] zależność ta wynika przede wszystkim ze wzrostu udziału kłosów wtórnych lub ziaren znajdujących się w dystalnych miejscach każdego kłosa w genotypach charakteryzujących się wysokim plonem. Kolejną bardzo istotną cechą w hodowli nowych odmian pszenicy jest skład chemiczny ziarna. Białko stanowi podstawowe kryterium oceny wartości wypiekowej ziarna pszenicy, a jego zawartość kształtuje się na poziomie $70\text{--}170\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ i jest zależna od czynników pogodowych i agrotechnicznych [Geyer i in. 2022]. Taka negatywna zależność stanowi jedną z głównych przeszkód w produkcji pszenicy wypiekowej i jest dobrze udokumentowana w literaturze [Oury i Godin 2007, Geyer i in. 2022].

Podobieństwo roślin pod względem fenotypowym zwykle tylko w niewielkim stopniu jest skorelowane z podobieństwem genotypowym [Vinu i in. 2013]. Jest to spowodowane przede wszystkim obecnością różnych genów, które mogą mieć wpływ na podobną ekspresję fenotypową, a także lokalizacją markerów DNA głównie w regionach niekodujących genomu. Zastosowanie w badaniach technologii DArTseq pozwala na wygenerowanie markerów, które w ok. 30% (silicoDArT) i ponad 70% (SNP) lokalizują się w rejonach kodujących genomu [Szőke-Pázsik i in. 2024]. Taka lokalizacja, szczególnie markerów SNP, mogła spowodować uwidocznienie korelacji wyników uzyskanych dla niektórych cech fenotypowych z wynikami genotypowania.

WNIOSKI

1. Podział genotypów uzyskany z wykorzystaniem markerów silicoDArT bardziej szczegółowo charakteryzował badany materiał niż ten uzyskany z wykorzystaniem markerów SNP, pozwalając wychwycić subtelne różnice związane z jego pochodzeniem.

2. Wyniki analizy Bayesa wraz z oceną dystansu genetycznego pomiędzy uzyskanymi genetycznie odrębnymi grupami pszenic mogą stanowić cenną wskazówkę podczas wyboru materiałów do dalszych krzyżowań.

3. Badane linie hodowlane jarej pszenicy zwyczajnej odznaczały się dużą zmiennością fenotypową obiektów dla rozpatrywanych cech użytkowych szczególnie pod względem uzyskanego plonu ziarna oraz terminu kłoszenia.

4. Zastosowanie do badań technologii DArTseq generującej markery zlokalizowane w rejonach kodujących genomu pozwoliło na uzyskanie korelacji wyników fenotypowania związanych z plonowaniem oraz wczesnością pszenicy z wynikami grupowania materiału uzyskanymi za pomocą metody Bayesa.

PIŚMIENNICTWO

- Akhunov E.D., Akhunova A.R., Anderson O.D., Anderson J.A., Blake N., Clegg M.T., Coleman-Derr D., Conley E.J., Crossman C.C., Deal K.R., Dubcovsky J., Gill B.S., Gu Y.Q., Hadam J., Heo H., Huo N., Lazo G.R., Luo M.-C., Ma Y.Q., Matthews D.E., McGuire P.E., Morrell P.L., Qualset C.O., Renfro J., Tabanao D., Talbert L.E., Tian C., Toleno D.M., Warburton M.L., You F.M., Zhang W., Dvorak J., 2010. Nucleotide diversity maps reveal variation in diversity among wheat genomes and chromosomes. *BMC Genomics* 14(11), 702. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-11-702>
- Beral A., Girousse C., Le Gouis J., Allard V., Slafer G.A., 2022. Physiological bases of cultivar differences in average grain weight in wheat: Scaling down from plot to individual grain in elite material. *Field Crops Res.* 289, 108713. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108713>
- Biel W., Maciorowski R., 2012. Ocena wartości odżywczej ziarna wybranych odmian pszenicy. *Żywn. Nauka Technol. Jakość* 2(81), 45–55.
- Bolibok H., Rakoczy-Trojanowska M., Hromada A., Pietrzykowaski R., 2005. Efficiency of different PCR-based marker systems in assessing genetic diversity among winter rye (*Secale cereale* L.) inbred lines. *Euphytica* 146, 109–116. <https://doi.org/10.1007/s10681-005-0548-0>
- Booy G., Hendriks R.J.J., Smulders M.J.M., Groenendaal J.M., Vosman B., 2000. Genetic diversity and the survival of populations. *Plant Biol.* 2(4), 379–395. <https://doi.org/10.1055/s-2000-5958>
- Brown W.L., 1983. Genetic diversity and genetic vulnerability-An appraisal. *Econ. Bot.* 37(4), 12. <https://doi.org/10.1007/BF02859301>
- El-Esawi M.A., Witczak J., Abomohra A.E.-F., Ali H.M., Elshikh M.S., Ahmad M., 2018. Analysis of the genetic diversity and population structure of Austrian and Belgian wheat germplasm within a regional context based on DArT markers. *Genes* 9(1), 47. <https://doi.org/10.3390/genes9010047>
- Evanno G., Regnaut S., Goudet J., 2005. Detecting the number of clusters of individuals using the software STRUCTURE: a simulation study. *Mol Ecol.* 14, 2611–2620. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2005.02553.x>
- Georges A., 2022. TechNote: distance and visualization in population genetics. http://georges.biomatix.org/storage/app/media/uploaded-files/TECHNICAL_NOTE_Genetic_Distance_27-Feb-22.pdf [dostęp: 08.05.2025 r.].
- Geyer M., Mohler V., Hartl L., 2022. Genetics of the inverse relationship between grain yield and grain protein content in common wheat. *Plants* 11(16), 2146. <https://doi.org/10.3390/plants11162146>
- GUS, 2024. Wynikowy szacunek głównych ziemioplodów rolnych i ogrodniczych w 2024 r. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/rolnictwo-lesnictwo/uprawy-rolne-i-ogrodnicze/wynikowy-szacunek-glownych-ziemioplodow-rolnych-i-ogrodniczych-w-2024-roku,5,23.html>

- Hussain S., Habib M., Ahmed Z., Sadia B., Bernardo A., Amand P., Bai G., Ghori N., Khan A.I., Awan F.S., Maqbool R., 2022. Genotyping-by sequencing based molecular genetic diversity of Pakistani bread wheat (*Triticum aestivum* L.) accessions. *Front. Genet.* 13, 772517 <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.772517>
- Jędzura S., Bocianowski J., Matysik P., 2023. The AMMI model application to analyze the genotype-environmental interaction of spring wheat grain yield for the breeding program purposes. *Cereal Res. Commun.* 51, 197–205. <https://doi.org/10.1007/s42976-022-00296-9>
- Kirk H., Freeland J.R., 2011. Applications and implications of neutral versus non-neutral markers in molecular ecology. *Int. J. Mol. Sci.* 12, 3966–3988. <https://doi.org/10.3390/ijms12063966>
- Kopelman N.M., Mayzel J., Jakobsson M., Rosenberg N.A., Mayrose I., 2015. CLUMPAK: A program for identifying clustering modes and packaging population structure inferences across K. *Mol. Ecol. Resour.* 15(5), 1179–1191. <https://doi.org/10.1111/1755-0998.12387>
- Mańkowski D., Laudański Z., Janaszek Z., 2011. Przydatność wybranych miar podobieństwa dla danych binarnych do analiz wielocechowych w badaniach molekularnych. *Biul. IHAR* 262, 155–173. <https://orcid.org/0000-0002-7499-8016>
- Mazurek J., Sułek A., 2000. Plon i cechy struktury plonu odmian i rodów pszenicy jarej w zależności od terminu siewu. *Biul. IHAR* 214, 79–83.
- Mourad A.M.I., Belamkar V., Baenziger P.S., 2020. Molecular genetic analysis of spring wheat core collection using genetic diversity, population structure, and linkage disequilibrium. *BMC Genomics* 21, 434. <https://doi.org/10.1186/s12864-020-06835-0>
- Nei M., Li W.-H., 1979. Mathematical model for studying genetic variation in terms of restriction endonucleases. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 76, 5269–5273.
- Novoselovic D., Bentley A.R., Šimek R., Dvojkovic K., Sorrells M.E., Gosman N., Horsnell R., Drezner G., Šatovic Z., 2016. Characterizing Croatian wheat germplasm diversity and structure in a European context by DArT markers. *Front. Plant Sci.* 7, 184. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00184>
- Oury F.X., Godin C., 2007. Yield and grain protein concentration in bread wheat: How to use the negative relationship between the two characters to identify favourable genotypes?. *Euphytica* 157, 45–57. <https://doi.org/10.1007/s10681-007-9395-5>
- Peakall R., Smouse P., 2012. Appendix 1 – Methods and statistics in GenAlEx 6.1. <https://1library.co/document/9yn73vjz-appendix-methods-statistics-genalex-rod-peakall-peter-smouse.html> [dostęp: 8.05.2025 r.]
- Poland J.A., Rife T.W., 2012. Genotyping-by-sequencing for plant breeding and genetics. *Plant Genome* 5, 92–102. <https://doi.org/10.3835/plantgenome2012.05.0005>
- Pritchard J.K., Stephens M., Donnelly P., 2000. Inference of population structure using multilocus genotype data: dominant markers and null alleles. *Genetics* 155, 574–578. <https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2007.01758.x>
- Raza A., Razzaq A., Mehmood S.S., Zou X., Zhang X., Lv Y., Xu J., 2019. Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A review. *Plants* 8(2), 34. <https://doi.org/10.3390/plants8020034>
- Roldan-Ruiz I., Dendaauw J., Van Bockstaele E., Depicker A., De Loose M., 2000. AFLP markers reveal high polymorphic rates in ryegrasses (*Lolium* spp.). *Mol. Breed.* 6, 125–134. <https://doi.org/10.1023/A:1009680614564>
- Rudnicki F., Jaskulski D., Dębowski G., 1999. Reakcje odmian pszenicy jarej na termin siewu i nawożenie azotem w warunkach posusznych. *Rocz. Nauk Roln. Ser. A* 114, 3–4, 97–107.
- Sansaloni C., Franco J., Santos B., Percival-Alwyn L., Singh S., Petroli C., Campos J., Dreher K., Payne T., Marshall D., Kilian B., Milne I., Raubach S., Shaw P., Stephen G., Carling J., Saint Pierre C., Burgueño J., Crosa J., Li H., Guzman C., Kehel Z., Amri A., Kilian A., Wenzl P.,

- Uauy C., Banziger M., Caccamo M., Pixley K., 2020. Diversity analysis of 80,000 wheat accessions reveals consequences and opportunities of selection footprints. *Nat Commun.* 11, 4572. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18404-w>
- Sansaloni C., Petroli C., Jaccoud D., Carling J., Detering F., Grattapaglia D., Kilian A., 2011. Diversity Arrays Technology (DARt) and next-generation sequencing combined: genome-wide, high throughput, highly informative genotyping for molecular breeding of Eucalyptus. *BMC Proc.* 5(Suppl 7), P54. <https://doi.org/10.1186/1753-6561-5-S7-P54>
- Serrote CML, Reiniger LRS, Silva KB, Rabaiolli SMD, Stefanel CM., 2020. Determining the polymorphism information content of a molecular marker. *Gene* 5, 726, 144175. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2019.144175>
- Sokal R.R., Jacquez G.M., Wooten M.C., 1989. Spatial autocorrelation analysis of migration and selection. *Genetics* 121(4), 845–855. <https://doi.org/10.1093/genetics/121.4.845>
- Soleimani B., Lehnert H., Keilwagen J., Plieske J., Ordon F., Naseri Rad S., Ganai M., Beier S., Perovic D., 2020. Comparison between core set selection methods using different illumina marker platforms: a case study of assessment of diversity in wheat. *Front. Plant Sci.* 11, 1040. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01040>
- Stojałowski S., 2007. Polimorfizm markerów STS i SSR w obrębie linii wsobnych żyta. *Biul. IHAR* 244, 161–172. <https://doi.org/10.37317/biul-2007-0054>
- Studnicki M., Mądry W., Śmiałowski T., 2009. Wielocechowa analiza różnorodności fenotypowej w kolekcji roboczej pszenicy jarej. *Biul. IHAR* 252, 91–104. <https://doi.org/10.37317/biul-2009-0059>
- Sulek A., 2004. Określenie reakcji nowych rodów i odmian pszenicy jarej na wybrane czynniki agrotechniczne. *Biul. IHAR* 231, 139–145.
- Swarup S., Cargill E.J., Crosby K., Flagel L., Kniskern J., Glenn K.C., 2020. Genetic diversity is indispensable for plant breeding to improve crops. *Crop Sci.* 61, 839–852. <https://doi.org/10.1002/csc2.20377>
- Szőke-Páizi K., Kruppa K., Tulpová Z., Kalapos B., Türkösi E., Gaál E., Darkó E., Said M., Farkas A., Kovács P., Ivanizs L., Doležel J., Rabanus-Wallace M.T., Molnár I., Szakács E., 2024. DARtseq genotyping facilitates the transfer of “exotic” chromatin from a *Secale cereale* × *S. strictum* hybrid into wheat. *Front. Plant Sci.* 15, 1407840. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1407840>
- Tagliotti M.E., Deperi S.I., Bedogni M.C., Zhang R., Carpintero N.M., Coombs J., Douches D., Huarte M.A., 2018. Use of easy measurable phenotypic traits as a complementary approach to evaluate the population structure and diversity in a high heterozygous panel of tetraploid clones and cultivars. *BMC Genet.* 19, 8. <https://doi.org/10.1186/s12863-017-0556-9>
- Tang S., Wei X., Jiang Y., Brar D., Khush G., 2007. Genetic diversity based on allozyme alleles of Chinese cultivated rice. *Agric. Sci. China* 6, 641–646. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(07\)60094-7](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(07)60094-7)
- Tang W., Dong Z., Gao L., Wang X., Li T., Sun C., Chu Z., Cui D., 2023. Genetic diversity and population structure of modern wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars in Henan Province of China based on SNP markers. *BMC Plant Biol.* 23, 542. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04537-9>
- TIBCO Software Inc., 2017. Statistica (data analysis software system), version 13. <http://statistica.io>
- Tomkowiak A., Bocianowski J., Kwiatek M., Kowalczewski P.Ł., 2020. Dependence of the heterosis effect on genetic distance, determined using various molecular markers. *Open Life Sci.* 28(15), 1–11. <https://doi.org/10.1515/biol-2020-0001>
- Tomkowiak A., Bocianowski J., Radzikowska D., Kowalczewski P.Ł., 2019. Selection of parental material to maximize heterosis using SNP and SilicoDARt markers in maize. *Plants* 14, 8(9), 349. <https://doi.org/10.3390/plants8090349>
- Tyrka M., Mokrzycka M., Bakera B., Tyrka D., Szeliga M., Stojałowski S., Matysik P., Rokicki M., Rakoczy-Trojanowska M., Krajewski P., 2021. Evaluation of genetic structure in European wheat cultivars and advanced breeding lines using high-density genotyping-by-sequencing approach. *BMC Genomics* 22(1), 81. <https://doi.org/10.1186/s12864-020-07351-x>

- Vinu V., Singh N., Vasudev S., Yadava D.K., Kumar S., Naresh S., Bhat S.R., Prabhu K.V., 2013. Assessment of genetic diversity in *Brassica juncea* (Brassicaceae) genotypes using phenotypic differences and SSR markers. *Rev. Biol. Trop.* 61(4), 1919–1934.
- Wenda-Piesik A., Knapowski T., Ropińska P., Kazek M., 2017. Jakość ziarna jarych odmian pszenicy zwyczajnej (*Triticum aestivum* L. EMEND. FIORI ET PAOL.) wysiewanych późną jesienią i wiosną. *Acta Agroph.* 24(4), 613–624.
- Woźniak A., 2006. Plonowanie i jakość ziarna pszenicy jarej zwyczajnej (*Triticum aestivum* L.) i twardej (*Triticum durum* Desf.) w zależności od poziomu agrotechniki. *Acta Agroph.* 8(3), 755–763.

Źródło finansowania: Badania przeprowadzono w ramach projektu: „Uzyskanie nowej generacji polskich odmian rzepaku, zbóż oraz bobowatych odpornych na nowe rasy agrofagów, o lepszych zdolnościach mitygacji i adaptacji do zmian klimatu, o odpowiednich cechach technologicznych wymaganych przez konsumentów i przemysł”; Wsparcie prac przemysłowych – jakość ziarna zbóż. Numer Projektu: POIR. 01.01.01-00-0782/16-00.

Abstract. Genetic diversity and phenotypic variability of 38 spring wheat lines from Plant Breeding Strzelce Sp. z o.o., IHAR Group was evaluated in this paper. The highest genetic distance based on the polymorphism of SNP markers was observed between the STH_12 and STH_37 breeding lines (0.579) and for silicoDArT markers between the STH_1 and STH_33 breeding lines (0.728). Structure analysis using Bayesian clustering method showed the presence of three genetically separate groups ($K = 3$) based on the segregation of SNP alleles and six separate groups ($K = 6$) based on the segregation of silicoDArT alleles. The highest variability coefficient among the analyzed useful traits was demonstrated by grain yield per plot (18.0%) and heading date (17.5%). Analysis of variance (AMOVA) showed significant differences in the mean values of heading date, hectoliter weight and number of grains per spike between the groups to which the studied breeding lines were assigned based on the population structure analysis using both marker types.

Keywords: wheat, genetic diversity, phenotypic assessment

Otrzymano/Received: 20.12.2024

Zaakceptowano/Accepted: 25.03.2025

Opublikowano/Published: 19.05.2025



Instytut Rolnictwa i Ogrodnictwa, Uniwersytet w Siedlcach, ul. Prusa 14, 08-110 Siedlce, Polska

* e-mail: marek.nieweglowski@uws.edu.pl

MAREK NIEWĘGŁOWSKI *, MATEUSZ OLIZARUK 

Oplacalność produkcji brokołu włoskiego na przykładzie indywidualnego gospodarstwa rolnego

Profitability of Italian broccoli production on the example of an individual farm

Abstrakt. Celem pracy była ocena opłacalności uprawy brokołu włoskiego w indywidualnym gospodarstwie rolnym. Wykorzystane metody badawcze obejmowały analizę opłacalności, a wyniki przedstawiono metodą tabelaryczno-opisową. Do analizy opłacalności produkcji brokołu wykorzystano wyniki indywidualnego gospodarstwa rolnego z lat 2021–2023. Uwzględniono czynniki wpływające na opłacalność, takie jak wartość produkcji oraz koszty poniesione w czasie produkcji. Analizą objęto także efekty ekonomiczne, których miernikiem były kategorie dochodowe, analizowane bez dopłat oraz po uwzględnieniu tego wsparcia, tj. nadwyżka bezpośrednia i dochód z działalności. W gospodarstwie widoczny był pozytywny trend wzrostowy dochodów w kolejnych latach. Również wskaźnik opłacalności, rosnący w badanych latach od 145,88% (w 2021 r.) do 169,16% (w 2023 r.), świadczył o korzystnej tendencji w prowadzonej uprawie, mimo gorszego roku 2022 (127,15%). Wysoki poziom wskaźnika opłacalności szczególnie w ostatnim roku wskazywał na coraz bardziej opłacalną produkcję oraz poprawę efektów ekonomicznych gospodarstwa. Wyzwania stojące przed producentami brokołu włoskiego obejmują nie tylko zapewnienie wysokiej jakości i ilości plonów, ale również kwestię opłacalności. Działania produkcyjne muszą być nastawione na maksymalizację dochodów przy jednoczesnej minimalizacji kosztów związanych z założeniem plantacji, zbiorem oraz logistyką.

Słowa kluczowe: brokuł włoski, wskaźnik opłacalności produkcji, technologia produkcji, gospodarstwo rolne

Cytowanie: Niewęglowski M., Olizaruk M., 2025. Oplacalność produkcji brokołu włoskiego na przykładzie indywidualnego gospodarstwa rolnego. *Agron. Sci.* 80(1), 71–82. <https://doi.org/10.24326/as.2025.5477>

WSTĘP

Uprawa brokułu włoskiego stanowi istotny aspekt produkcji warzyw w Polsce. Wartości odżywcze brokułu, wszechstronność kulinarna oraz rosnące zapotrzebowanie na zdrowe surowce spożywcze czynią go ważnym produktem na rynku. Brokuł włoski (*Brassica oleracea* var. *italica*) należy do warzyw, jest rośliną z rodziny kapustowatych (*Brassicaceae*). By osiągnąć jego optymalny wzrost i zdrowe plony, należy przestrzegać wy-mogów uprawy [Orłowski 2000].

Popularność brokułu w Polsce rośnie. Jeszcze niedawno należał do mało znanych u nas warzyw, mimo że jego uprawa nie należy do trudnych. Szczególnie ceniony jest jako surowiec dla przemysłu chłodniczego [Gajewski 2005]. Produkcja brokułu włoskiego w Polsce dynamicznie się zwiększa, odzwierciedlając zmieniające się preferencje konsu-menckie oraz rosnące zainteresowanie zdrowym stylem życia. Wzrost świadomości spo-łecznej na temat korzyści zdrowotnych związanych z dietą bogatą w warzywa sprawia, że brokuł włoski staje się coraz częstszym wyborem konsumentów na polskim rynku spo-żywczym. Współczesny konsument coraz częściej poszukuje produktów o wysokiej war-tości odżywczej i niskiej zawartości kalorii, co sprawia że brokuł włoski jest atrakcyjną opcją dla osób dbających o zdrowie i kondycję fizyczną. To zjawisko napędza rozwój rynku tego warzywa w Polsce – jest zachętą do jego produkcji i zwiększania obszarów upraw[Sikorska-Zimny 2010, Kapusta 2011].

Jednak oprócz zapewnienia wysokiej jakości i ilości plonów producenci muszą także skupić się na kwestii opłacalności. Podejmowane przez nich działania związane z produkcją muszą mieć na celu osiągnięcie jak największego zysku przy minimalizowaniu kosztów po-niesionych na założenie plantacji, zbiór oraz logistykę [Filipiak 2010, Skarżyńska 2019b].

Analiza opłacalności uprawy warzyw, w tym brokułu, oraz doskonalenie procesów produkcji mają na celu nie tylko zwiększenie efektywności gospodarstwa, ale również przyczynienie się do rozwoju tej ważnej gałęzi przemysłu rolniczego. Poprzez bardziej kompleksowe zrozumienie i świadomość tematyki uprawy można skuteczniej odpowia-dać na wyzwania współczesnego rynku żywnościowego [Fosińska i in. 2015].

Celem pracy była ocena opłacalności uprawy brokułu włoskiego w indywidualnym gospodarstwie rolnym. W analizie uwzględnione zostały czynniki wpływające na jej opła-calność, takie jak wartość produkcji, różne rodzaje kosztów poniesionych w czasie pro-dukcji oraz efekty ekonomiczne. Wśród obecnie powstających publikacji brakuje opraco-wań dotyczących wyników ekonomicznych produkcji warzyw w Polsce. Uzupełnieniem tej luki są zaprezentowane w opracowaniu badania dotyczące brokułu włoskiego.

MATERIAŁ I METODY

Do analizy opłacalności produkcji brokułu włoskiego wykorzystano dane pochodzące z indywidualnego gospodarstwa rolnego położonego we wschodniej części województwa mazowieckiego, na terenie powiatu łosickiego, w Gminie Stara Kornica, we wsi Czebe-raki. Gospodarstwo rolne o powierzchni 13,38 ha specjalizowało się w produkcji roślinnej. W pracy przeanalizowano dane obejmujące trzy lata – od roku 2021 do 2023.

Analizę opłacalności produkcji przeprowadzono zgodnie z metodyką systemu AGROKOSZTY [Metodyka... 2023], opracowaną przez Instytut Ekonomiki Rolnictwa

i Gospodarki Żywnościowej (IERiGŻ) [Skarżyńska 2019a]. Kalkulację rozpoczęto od obliczenia pierwszej kategorii dochodowej w rachunku kosztów – nadwyżki bezpośredniej. Przyjęte założenia metodyczne rachunku nadwyżki zostały zdefiniowane w kontekście obliczeń standardowej nadwyżki bezpośredniej (z ang. standard gross margin – SGM). Odejmując od wartości potencjalnie towarowej produkcji koszty bezpośrednie, uzyskano kategorię nadwyżki bezpośredniej. Analizą objęto przychody (wartość produkcji potencjalnie towarowej przypadająca na 1 ha uprawy), koszty oraz efekty ekonomiczne. Miernikiem oceny uzyskanych efektów były kategorie dochodowe (analizowane bez dopłat oraz po uwzględnieniu tego wsparcia), tj. nadwyżka bezpośrednia i dochód z działalności. Obliczeń dokonano następująco [Skarżyńska 2017]:

$$\begin{aligned}\text{nadwyżka bezpośrednia} &= \text{wartość produkcji} - \text{koszty bezpośrednie} \\ \text{dochód z działalności} &= \text{wartość produkcji} - \text{koszty ogółem}\end{aligned}$$

Ostatnią czynnością było obliczenie wskaźnika opłacalności. Wskaźniki obliczono, korzystając ze wzoru [Fereniec 1999]:

$$\text{wskaźnik opłacalności} = \frac{P}{K} \cdot 100$$

gdzie:

P – wartość produkcji,

K – wysokość kosztów całkowitych (ogółem).

Wskaźnik opłacalności wyrażamy jako procentowy stosunek wartości produkcji do wszystkich kosztów ponoszonych na daną produkcję [Brzozowski i Zmarlicki 2015].

Wykorzystane w pracy metody badawcze obejmowały analizę opłacalności, a wyniki przedstawiono z zastosowaniem metody tabelaryczno-opisowej. W opracowaniu wykorzystano także publikacje z zakresu problematyki przedmiotu.

METODYKA UPRAWY BROKUŁU WŁOSKIEGO

W analizowanym gospodarstwie wśród upraw poza brokułem dominowała produkcja zbóż. W strukturze upraw w 2023 r. przeważała pszenica ozima – 37,1%. Na drugim miejscu był brokuł – 32,1%. Pozostałe zboża stanowiły 26,2%, a całość uzupełniały trwałe użytki zielone (TUZ) – 4,6%.

Gleby w gospodarstwie w przeważającej części były dobre (95%), klas IIIb oraz IVa i IVb. Planowanie uprawy brokołu w gospodarstwie rozpoczęto od odpowiedniego doboru stanowiska pod uprawę, uwzględniającego zasobność gleby w składniki pokarmowe, takie jak azot (N), fosfor (P), potas (K), wapń (Ca), magnez (Mg) oraz mikroelementy. Przed podjęciem działań uprawowych przeprowadzono analizę gleby oraz stosowano zabiegi agrotechniczne, mające na celu optymalizację warunków wzrostu. Następnie w optymalnym terminie stosowano nawożenie organiczne obornikiem bydlęcym, który był od razu przyorywany w celu zmniejszenia strat jego cennych składników.

Wczesną wiosną przeprowadzano bronowanie broną ciężką, którego celem było przerwanie parowania i wyrównanie powierzchni pola. Następnie stosowano nawożenie wapniowe kredą, by uzyskać optymalne pH gleby. Kolejnym etapem było nawożenie potasowe, zwykle w postaci soli potasowej, dostarczającej niezbędne składniki na okres całej wegetacji roślin.

Aby zapobiec presji chwastów, przed wysadzeniem rozsady mechanicznie je usuwano, dbając jednocześnie by nadmiernie nie przesuszać gleby. Około tygodnia przed sadzeniem stosowano nawożenie fosforowe w postaci superfosfatów oraz nawożenie azotowe.

Rosadę brokułu pozyskiwano z własnej uprawy, z siewu przeprowadzonego około 1,5 miesiąca przed planowanym wysadzeniem. W badanym gospodarstwie głównie uprawiane były odmiany brokułów Monclano F₁ i McLaren F₁. Odmiany te zostały poddane praktycznym testom i sprawdziły się w warunkach analizowanego gospodarstwa.

Aby zachować ciągłość produkcji, stosowano cykliczny wysiew co dwa tygodnie. Po wysiewie nasion były one okrywane agrowłókniną i nawadniane wodą z własnej studni głębinowej.

W okresie wegetacji na rozsadniku prowadzono kontrolę zachwaszczenia, dokonując ręcznego pielenia. W optymalnym momencie wzrostu rozsadę wyrwano i przygotowywano do wysadzenia na polu. Sadzenie odbywało się z użyciem specjalistycznej sadzarki dwurzędowej, a nasadzenie wykonywano w optymalnie uprawioną i wyrównaną glebę. Podczas wzrostu monitorowano występowanie szkodników oraz kontrolowano zachwaszczenie. W celu optymalizacji kosztów uprawy stosowano specjalistyczny pielnik z podsiewem nawozu, który jednocześnie usuwał chwasty i nawoził azotem bezpośrednio pod roślinę.

Najczęściej występującymi szkodnikami w trakcie uprawy były bielinki, mszyce, mączlik warzywny, tantniś krzyżowiaczek oraz śmietka kapuściana. Z uwagi na dużą presję chorób grzybowych stosowano zabiegi profilaktyczne zwalczające takie choroby, jak alternarioza, zgnilizna twardzikowa, szara pleśń czy czarna zgnilizna.

Pierwsze zbiory brokułu przypadały zwykle na początek września, około 3 miesięcy od wysadzenia do gruntu. Zbiory brokułów odbywały się cyklicznie aż do pojawienia się pierwszych mrozów, a sezon zazwyczaj kończył się w listopadzie. Po ścięciu różyczek przez pracowników na polu były one transportowane na przyczepach do gospodarstwa, gdzie następował proces ich obróbki na taśmie produkcyjnej. W trakcie sezonu zatrudnionych było około 12 pracowników, którzy zaangażowani byli przez cały czas uprawy i zbioru brokułu.

Pracownicy przy linii produkcyjnej dbali o optymalny kształt różyczki, spełniający oczekiwania odbiorcy oraz usuwali wszelkie zanieczyszczenia, takie jak listki czy resztki łodyg. Najbardziej pożądanym kształtem różyczki był ten o maksymalnej średnicy 6 cm i długości korzonka od 2,5 do 4 cm. Różyczki nie mogły być rozluźnione ani przebarwione, a także nie mogły zawierać pozostałości pestycydów. Przed dostarczeniem surowca do zakładu pobierana była próba, która po przeanalizowaniu w laboratorium musiała potwierdzić, że normy dotyczące zawartości substancji szkodliwych nie były przekroczone. Surowiec spełniający wymagania był umieszczany w skrzynkach, które składowano na paletach. Odbiór przez pośrednika następował tego samego dnia, co gwarantowało świeżość produktu, a jego głównym przeznaczeniem były mrożonki.

Ze względu na różnice w tempie wzrostu różyczek na różnych częściach plantacji oraz ze względu na obecność odmian, które wykazywały tzw. odrosty – małe różyczki wyrastające po ścięciu głównej różyczki – zbiór na każdym fragmencie plantacji przeprowadzany był kilkakrotnie. Dzięki temu zapewniano kompletność zbioru oraz zbieranie różyczek o odpowiednim stopniu dojrzałości.

W celu zachowania ciągłości produkcji po eksploatacji plantacji pozostałości roślin mieszane były z glebą, a następnie wykonywano orkę i przygotowywano pole pod nową uprawę – pszenicy ozimej lub jęczmienia jarego – w zależności od terminów agrotechnicznych. Planowanie uprawy brokułu w gospodarstwie uwzględniało kompleksowy proces, rozpoczynający się od starannego przygotowania gleby, przez odpowiednie nawożenie, kontrolę szkodników i chorób, po zbiór oraz zapewnienie ciągłości produkcji przez cały sezon wegetacyjny.

WYNIKI I DYSKUSJA

W badanym gospodarstwie analizowano trzyletni okres – od 2021 do 2023 r. Analizę rozpoczęto od kosztów produkcji. W jej ramach uwzględniono wszystkie koszty produkcji związane z uprawą i przeliczono na powierzchnię jednego hektara uprawy. Koszty produkcji brokułów, które analizowano przy kalkulacji opłacalności, podzielono na koszty bezpośrednie (tab. 1) i pośrednie (tab. 2).

Wśród kosztów bezpośrednich (tab. 1) wyszczególniono wydatki niezbędne do samej produkcji, takie jak zakup nasion, nawozów, środków ochrony roślin oraz koszty specjalistyczne, związane z zatrudnieniem oraz usługami zewnętrznymi, takimi jak badania gleby czy usługi agrotechniczne. Do kosztów bezpośrednich dodano też inne koszty, które można było przypisać bez żadnej wątpliwości do produkcji brokułu.

Koszty pośrednie, których nie jesteśmy w stanie w chwili ich powstania przypisać do danej działalności, dzielimy na koszty pośrednie rzeczywiste i szacunkowe. Do kosztów pośrednich rzeczywistych zalicza się koszty ogólnogospodarcze (np. energia elektryczna, opał, paliwo napędowe, remonty, usługi, ubezpieczenie itp.) i koszty pośrednie szacunkowe obejmujące amortyzację [Hajduga 2015]. Tabela kosztów pośrednich pomaga zrozumieć dodatkowe wydatki, które nie są bezpośrednio związane z prowadzeniem uprawy, a które mają istotny wpływ na ogólny koszt produkcji (tab. 2).

Uzupełnienie całego procesu uprawy brokułów o znajomość struktury kosztów produkcji pozwalała zidentyfikować obszary, gdzie potencjalnie można dokonać optymalizacji kosztów. W tabeli 3 zestawiono koszty ponoszone przez gospodarstwo w całym analizowanym okresie.

W analizowanych latach można było zauważyć wyraźny wzrost kosztów bezpośrednich w 2022 r., które wyniosły 17 086 zł. Było to spowodowane zakupem nawozów w późniejszym terminie, gdy ich ceny były wysokie. W 2023 r., gdy ceny nawozów się ustabilizowały, koszty bezpośrednie obniżyły się do poziomu 14 854 zł. Natomiast koszty pośrednie lekko wzrosły. Miał na to wpływ wzrost kosztów utrzymania parku maszynowego. Zakup taśmociągu znacząco zredukował czas zbioru, co pozwoliło na optymalizację kosztów zatrudnienia, będących częścią kosztów bezpośrednich, poprzez efektywne

wykorzystanie dostępnych technologii i sprzętu. Gospodarstwo wykazało zdolność do adaptacji i optymalizacji wydatków, co pozytywnie prognozowało na przyszłość. Wzrost kosztów w 2022 r. wynikał z niekorzystnych warunków rynkowych, takich jak wysokie ceny nawozów. Zwiększona presja chorób grzybowych, która wystąpiła na plantacji brokułu, również spowodowała zwiększenie kosztów. Jednak podejmowane działania usprawniające proces zbioru przyczyniły się do częściowej redukcji kosztów zatrudnienia, co znacząco poprawiło efektywność gospodarstwa.

Tabela 1. Wartość kosztów bezpośrednich produkcji brokułu w badanym gospodarstwie w latach 2021–2023 (zł)

Table 1. The value of direct costs in broccoli production on the surveyed farm in 2021–2023 (PLN)

Wyszczególnienie Specification	2021	2022	2023
Materiał siewny Seed material	3150,00	3300,00	3600,00
Nawożenie/Fertilization:			
N	247,00	720,00	360,00
P	164,00	330,00	229,00
K	231,00	580,00	550,00
Inne/Other	–	184,00	180,00
Środki ochrony roślin/ Plant protection products			
Cyperkill Max 500 EC	14,00	13,00	14,00
Coragen 200 SC	170,00	157,00	166,00
Mospilan 20 SP	24,00	16,00	20,00
Movento 100 SC	420,00	–	375,00
Benevia 100 OD	–	588,00	–
Zatrudnienie pracowników Employment of employees	9657,00	10 440,00	9016,00
Inne koszty specjalistyczne Other specialist costs	550,00	670,00	220,00
Pozostałe koszty bezpośrednie Other direct costs	72,00	88,00	124,00
Suma kosztów bezpośrednich Total direct costs	14 699,00	17 086,00	14 854,00

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z gospodarstwa.

Source: own study based on farm data.

Tabela 2. Koszty pośrednie produkcji brokołu w badanym gospodarstwie w latach 2021–2023 (zł)

Table 2. Indirect costs of broccoli production on the surveyed farm in 2021–2023 (PLN)

Wyszczególnienie Specification	2021	2022	2023
Koszty ogólnogospodarcze General economic costs	1479,00	1708,00	1985,00
Utrzymanie parku maszynowego Maintenance of the machinery park	5710,00	5780,00	5920,00
Razem koszty pośrednie Total indirect costs	7189,00	7488,00	7905,00

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z gospodarstwa.
Source: own study based on farm data.

Tabela 3. Suma kosztów produkcji brokołu w badanym gospodarstwie na 1 ha (zł)

Table 3. Total costs of broccoli production in the surveyed farm per 1 ha (PLN)

Koszty Costs	2021	2022	2023
Bezpośrednie/Direct	14 699,00	17 086,00	14 854,00
Pośrednie/Indirect	7189,00	7488,00	7905,00
Koszty ogółem/Total costs	2 1888,00	24 574,00	22 759,00

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z gospodarstwa.
Source: own study based on farm data.

Kontrola kosztów bezpośrednich i pośrednich pokazała, że zarządzający gospodarstwem mieli świadomość potrzeby ciągłego monitorowania i dostosowywania wydatków do zmieniających się warunków rynkowych. Uzyskiwane wyniki sugerują, że dążyli do poprawy rentowności przez kontrolę kosztów i efektywne zarządzanie zasobami.

Kolejnym etapem prowadzonej kalkulacji produkcji było określenie wartości produkcji (tab. 4). Wartość produkcji brokułów, wyrażona w faktycznej masie mierzzonej w kilogramach lub tonach na hektar uprawy, jest kluczowym wskaźnikiem przy ocenie efektywności działalności rolniczej. Jest to wartość, która odzwierciedla ilość zbieranego plonu z jednego hektara, a także wpływa na dochód z działalności [Pawlak 2016, Ściubeł 2021].

Dane zawarte w tabeli 4 wskazują na zmienność średniej ilości zebranych ton z hektara w poszczególnych latach. Rok 2022 był czasem szczególnym, charakteryzował się niekorzystnymi czynnikami zewnętrznymi oraz zwiększoną presją chorób, co w rezultacie doprowadziło do zmniejszenia plonu i wartości produkcji z hektara. Natomiast rok 2023 przyniósł dużą poprawę, głównie dzięki wzrostowi produkcji i ceny jednostkowej 1 kg produktu o 0,25 zł. Ten wzrost, w połączeniu z lepiej zaplanowanym nawożeniem i korzystniejszymi warunkami pogodowymi, znacząco wpłynął na wzrost wartości produkcji.

Mając wartość produkcji, możemy obliczyć wskaźnik opłacalności [Augustyńska i Czułowska 2021], który wyrażamy jako procentowy stosunek wartości produkcji do kosztów produkcji związanych z daną uprawą.

Tabela 4. Wartość produkcji brokołu na 1 ha uprawy
Table 4. The value of broccoli production per 1 ha of crop

Rok Year	Masa Mass (t·ha ⁻¹)	Cena jednostkowa (zł·t ⁻¹) Unit price (PLN·t ⁻¹)	Wartość produkcji (zł) Production value (PLN)
2021	12,0	2600,00	31 200,00
2022	11,5	2650,00	30 475,00
2023	13,0	2900,00	37 700,00

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z gospodarstwa.
Source: own study based on farm data.

Przy obliczaniu wskaźnika opłacalności należało uwzględnić wszystkie koszty związane z produkcją, czyli koszty ogółem (całkowite). W tabeli 5 przedstawiono kalkulację opłacalności produkcji brokołu w badanym gospodarstwie. Analizując dane zawarte w tabeli, można wyciągnąć wnioski dotyczące ekonomicznej wydajności gospodarstwa rolnego w latach 2021–2023. Dochód z działalności bez dopłat wykazywał zmienność, zmniejszając się w 2022 r. do kwoty 5901 zł, a następnie znacznie wzrastając w 2023 r. do 14 941 zł. Wzrost dochodu w 2023 r. wskazywał na znaczną poprawę efektywności produkcji i lepsze zarządzanie gospodarstwem. Udział dopłat, które obejmowały tylko dopłaty obszarowe, w całkowitym dochodzie nie był duży. Wahał się w przedziale od 5% w 2023 r. do 11,5% w 2022 r., jednak stanowił dodatkowe wsparcie finansowe dla gospodarstwa. Dochód z działalności, wliczając dopłaty, wzrósł znacząco w 2023 r. Wzrost ten odzwierciedlał pozytywne zmiany w gospodarstwie, takie jak usprawnienie produkcji, kontrola i redukcja kosztów.

Wskaźnik opłacalności był najwyższy w 2023 r. (169,16%), co oznacza, że gospodarstwo osiągnęło wówczas najlepsze wyniki ekonomiczne w analizowanym okresie. Najniższy poziom tego wskaźnika był w 2022 r. i wyniósł 127,15%. Wynikał głównie z wpływu niekorzystnych warunków zewnętrznych. Jednak w 2023 r. dzięki obniżeniu cen środków do produkcji i poprawie agrotechniki udało się skutecznie przezwyciężyć te trudności. Zanotowano prawie 21-procentową poprawę wartości produkcji, która wzrosła z 31 200 zł w 2021 r. do 37 700 zł w 2023 r. Wzrosły również dochody – o prawie 57%. Koszty bezpośrednie, które wzrosły w 2022 r. do 17 086 zł, obniżono w 2023 r. do 14 854 zł m.in. dzięki zmniejszeniu kosztów zatrudnienia. Mniejsze koszty zatrudnienia w 2023 r. niż w 2022 r. świadczyły o tym, że zarządzający gospodarstwem świadomie monitorowali i dostosowywali wydatki do zmieniających się warunków rynkowych poprzez kontrolę kosztów ogółem i ich redukcję w 2023 r. Takie wyniki sugerują, że gospodarstwo jest na dobrej drodze do dalszego zwiększania swojej efektywności dzięki dalszej poprawie zarządzania zasobami i optymalizacji kosztów.

Tabela 5. Kalkulacja opłacalności uprawy 1 ha brokołu w latach 2021–2023
 Table 5. Calculation of profitability of growing 1 ha of broccoli in 2021–2023

Wyszczególnienie Specification	2021	2022	2023
Wartość produkcji (zł) Production value (PLN)	31 200,00	30 475,00	37 700,00
Koszty bezpośrednie (zł) Direct costs (PLN)	14 699,00	17 086,00	14 854,00
Nadwyżka bezpośrednia (zł) Gross surplus (PLN)	16 501,00	13 389,00	22 846,00
Koszty ogółem (zł) Total costs (PLN)	21 888,00	24 574,00	22 759,00
Dochód z działalności (zł) Income from business	9312,00	5901,00	14 941,00
Dopłaty do produkcji (zł) Production subsidies (PLN)	730,00	770,00	800,00
Dochód z działalności z dopłatami (zł) Income from business with subsidies (PLN)	10 042,00	6671,00	15 741,00
Wskaźnik opłacalności (%) Profitability indicator (%)	145,88	127,15	169,16

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych gospodarstwa.
 Source: own study based on farm data.

Tabela 6 przedstawia dane finansowe dotyczące całego areálu produkcji brokołu w analizowanym gospodarstwie. Na przestrzeni lat 2021–2023 areál uprawy w gospodarstwie sukcesywnie się zwiększał. Początkowy areál wynoszący 3,66 ha w 2021 r. zwiększył się do 4,29 ha w 2023 r., co oznacza wzrost o 17,2%. Ten wzrost powierzchni uprawy był wynikiem płodozmianu oraz chęci powiększenia produkcji przy niższych nakładach, możliwych do uzyskania dzięki poprawie wydajności przerobu surowca. Dochód gospodarstwa wykazywał wahania w analizowanym okresie, co świadczyło o zróżnicowanych kosztach, cenach i warunkach produkcji w badanym czasie. Najbardziej wyraźny wzrost wartości produkcji zaobserwowano w 2023 r., kiedy wyniosła ona 161 733 zł. Koszty produkcji w analizowanym okresie miały tendencję wzrostową, co można było zaobserwować szczególnie w 2022 r. Związane to było ze wzrostem cen nawozów, środków produkcji oraz zwiększonymi wydatkami na zabiegi ochrony roślin. Jednak w 2023 r. koszty produkcji obniżyły się do 97 636,11 zł, co wynikało z optymalizacji procesów produkcyjnych oraz poprawy warunków rynkowych, takich jak ustabilizowanie cen nawozów. Wystąpiła też mniejsza presja chorób i szkodników na plantacji. Dochód z działalności bez uwzględnienia dopłat był najwyższy w 2023 r. i wyniósł 64 096,89 zł. To znaczny wzrost w porównaniu z dochodem w poprzednich analizowanych latach (o 160% w stosunku do 2022 r.). Dopłaty przyczyniły się do dodatkowego zwiększenia dochodów.

Tabela 6. Obliczenie dochodu z produkcji brokołu w analizowanym gospodarstwie w latach 2021–2023
 Table 6. Calculation of income from broccoli production on the analyzed farm in 2021–2023

Wyszczególnienie Specification	2021	2022	2023
Areał uprawy (ha) Area under cultivation (ha)	3,66	4,17	4,29
Wartość produkcji (zł) Production value (PLN)	114 192,00	127 080,75	161 733,00
Koszty bezpośrednie (zł) Direct costs (PLN)	53 798,34	71 248,62	63 723,66
Nadwyżka bezpośrednia (zł) Gross surplus (PLN)	60 393,66	55 832,13	98 009,34
Koszty ogółem (zł) Total costs (PLN)	80 110,08	102 473,58	97 636,11
Dochód z działalności (zł) Income from business (PLN)	34 081,92	24 607,17	64 096,89
Dopłaty (zł) Additional payments (PLN)	2671,80	3210,90	3432,00
Dochód z działalności z dopłatami (zł) Income from business with subsidies (PLN)	36 753,72	27 818,07	67 528,89

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych gospodarstwa.
 Source: own study based on farm data.

Systematyczny wzrost areału uprawy wskazuje na rozwój produkcji brokołu w gospodarstwie. Zwiększenie areału jest świadectwem rosnących możliwości produkcyjnych i organizacyjnych gospodarstwa. Znaczące zwiększenie dochodów w 2023 r. świadczy o poprawie efektywności produkcji, dzięki lepszej technice uprawy, bardziej precyzyjnemu nawożeniu, usprawnionemu planowaniu i zarządzaniu, a także korzystniejszym warunkom rynkowym. Pomimo wzrostu kosztów produkcji w 2022 r. gospodarstwo zdołało je obniżyć w 2023 r., co pozytywnie wpłynęło na dochód z działalności. Oznacza to dużą świadomość w analizie kosztów i skuteczne nimi zarządzanie.

Gospodarstwo wykazało dużą zdolność adaptacyjną do zmieniających się warunków rynkowych i środowiskowych, co jest podstawą długoterminowego sukcesu. Aspekty te przyczyniły się do poprawy wyników finansowych, co świadczy o pozytywnym trendzie w działalności gospodarstwa i jego zdolności do dalszego rozwoju.

PODSUMOWANIE

Ocena opłacalności uprawy brokołu włoskiego w indywidualnym gospodarstwie rolnym jest próbą uzupełnienia publikacji dotyczących wyników ekonomicznych produkcji warzyw w Polsce. W analizie uwzględnione zostały czynniki wpływające na jej opłacalność, takie jak wartość produkcji, różne rodzaje kosztów poniesionych w czasie produkcji oraz efekty ekonomiczne.

Analiza opłacalności produkcji brokułów w indywidualnym gospodarstwie rolnym na podstawie danych z lat 2021–2023 pozwalała ocenić dochodowość, opłacalność i wynik ekonomiczny badanej działalności. Koszty produkcji w 2022 r. wzrosły o 27,5% w porównaniu z kosztami produkcji w 2021 r., co było spowodowane m.in. niesprzyjającymi warunkami zewnętrznymi oraz zwiększoną presją chorób roślin. Jednak w 2023 r., dzięki lepszemu zarządzaniu zasobami oraz stabilizacji cen nawozów, koszty zostały zoptymalizowane, a ich poziom w stosunku do roku 2022 zmniejszył się o 5%.

Koszty produkcji rosły w niższym tempie niż przychody. Warto zauważyć, że mimo zwiększenia areálu uprawy koszty nie rosły proporcjonalnie, co spowodowało wzrost dochodów. Kontrola kosztów produkcji jest kluczowym czynnikiem wpływającym na ostateczny wynik finansowy.

W gospodarstwie widoczny był pozytywny trend wzrostowy dochodów w kolejnych latach. Dochody z działalności gospodarstwa w 2023 r. były o 52,7% wyższe niż uzyskane w 2021 r. Wzrost areálu uprawy, który został zaplanowany i zrealizowany, przyczynił się do poprawy dochodów. Jest to pozytywny sygnał świadczący o efektywności prowadzonych działań oraz odpowiednim wykorzystaniu dostępnych zasobów. Zwiększenie skali produkcji pozwoliło na osiągnięcie większej produkcji, co wpłynęło na wzrost wartości produkcji.

Wskaźnik opłacalności, rosnący w badanych latach od 145,88% (w 2021 r.) do 169,16% (w 2023 r.), świadczy o korzystnej tendencji w prowadzonej uprawie mimo gorszego roku 2022 (127,15%). Wysoki poziom wskaźnika opłacalności szczególnie w ostatnim roku wskazuje, że działalność była coraz bardziej opłacalna i poprawiły się jej wyniki ekonomiczne.

Podsumowując opłacalność produkcji brokułów na przestrzeni lat 2021–2023, można zauważyć, że w badanym gospodarstwie rolnym skutecznie prowadzono produkcję brokułów i kontrolowano koszty produkcji, co przekładało się na wzrost dochodów. Efektywne wykorzystanie nawozów zmniejszało koszty, a lepsza zdrowotność roślin wpływała pozytywnie na poziom stosowania środków ochrony roślin. Zmniejszenie roboczogodzin przy zbiorze, a także optymalne planowanie terminów sadzenia i zbioru przyczyniły się do poprawy sytuacji ekonomicznej gospodarstwa.

PIŚMIENNICTWO

- Augustyńska I., Czulowska M., 2021. Efektywność produkcji wybranych zbóż w Polsce w latach 2018–2020. *Zagadnienia Doradztwa Rolniczego* 103(1), 5–22.
- Brzozowski P., Zmarlicki K., 2015. Koszty i opłacalność produkcji warzyw polowych w latach 2012–2015. *Zesz. Nauk. Inst. Ogród.* 23, 5–16.
- Fereniec J., 1999. *Ekonomika i organizacja rolnictwa*. Wyd. Key Text, Warszawa.
- Filipiak T., 2010. Przetwórstwo warzyw w Polsce i w wybranych krajach UE. *Rocz. Nauk. SERiA* 12(1), 53–59.
- Fosińska M., Nowicki A., Czart A., 2015. Analiza produkcji wybranych gatunków warzyw w Polsce oraz grupy produkcyjnej *Daucus* w latach 2011–2014. *Infr. Ekol. Ter. Wiej.* 3(1), 691–699. <http://dx.medra.org/10.14597/infraeco.2015.3.1.055>
- Gajewski M., 2005. *Przechowalnictwo warzyw*. Wyd. SGGW, Warszawa.
- Hajduga E., 2015. Klasyfikacja kosztów na potrzeby rachunkowości rolnej. *Pr. Nauk. WSZiP* 32(4), 95–107.

- Kapusta F., 2011. Zmiany produkcji warzyw i owoców oraz ich przetwórstwa w Polsce. *Nauki Inż. Technol.* 3, 97–113.
- Metodyka i zakres danych, 2023. www.agrokoszty.pl/metodyka-i-zakres-danych/ [dostęp: 2.10.2024].
- Orłowski M. (red.), 2000. *Polowa uprawa warzyw*. Wyd. Brasika, Szczecin, 5–75.
- Pawlak J., 2016. Wartość produkcji a nakłady i koszty energii w rolnictwie. *Zag. Ekon. Rol.* 1(346), 80–96. <https://doi.org/10.5604/00441600.1196365>
- Sikorska-Zimny K., 2010. Składniki prozdrowotne w warzywach kapustnych. *Now. Warzyw.* 51, 51–63.
- Skarżyńska A., 2017. Koszty jednostkowe i dochody wybranych produktów w 2015 roku – wyniki badań w systemie AGROKOSZTY. *Zag. Ekon. Rol.* 2(351), 178–203. <https://doi.org/10.5604/00441600.1240801>
- Skarżyńska A., 2019a. Koszty jednostkowe i dochody wybranych produktów w 2017 roku – wyniki badań w systemie AGROKOSZTY. *Zag. Ekon. Rol.* (2) 359, 100–120. <https://doi.org/10.30858/zer/109928>
- Skarżyńska A., 2019b. Sytuacja ekonomiczna gospodarstw specjalizujących się w uprawach polowych w Polsce na tle wybranych krajów UE. *Zesz. Nauk. SGGW w Warszawie, Probl. Rol. Świat.* 19(2), 162–173. <https://doi.org/10.22630/PRS.2019.19.2.32>
- Ściubeł A., 2021. Produktowność czynników produkcji w rolnictwie Polski i w wybranych krajach Unii Europejskiej z uwzględnieniem płatności Wspólnej Polityki Rolnej. *Zag. Ekon. Rol.* 1(366), 46–58. <https://doi.org/10.30858/zer/134229>

Źródło finansowania: Badania przeprowadzone w ramach zadania badawczego nr 162/23/B zostały sfinansowane z dotacji na naukę przyznanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Abstract. The aim of the study was assess the profitability of growing Italian broccoli on an individual farm. The research methods used included profitability analysis, and the results were presented using a tabular-descriptive method. The profitability analysis was based on data from an individual farm for the years 2021–2023. Factors influencing profitability, such as production value and production costs incurred, were taken into account. The analysis also included economic outcomes, measured by income categories, both excluding and including subsidies, such as gross margin and farm income. The farm exhibited a positive upward trend in income over the analyzed years. The profitability index, which increased from 145.88% in 2021 to 169.16% in 2023, also indicated a favorable trend in cultivation, despite a weaker year in 2022 (127.15%). The high level of the profitability index, especially in the last year, pointed to increasingly profitable production and improved economic performance of the farm. The challenges for Italian broccoli producers include not only ensuring high quality and quantity of crops, but also the issue of profitability. Production activities must focus on maximizing income while minimizing costs related to planting, harvesting, and logistics.

Keywords: Italian broccoli, production profitability index, production technology, farm

Otrzymano/Received: 3.01.2025

Zaakceptowano/Accepted: 6.03.2025

Opublikowano/Published: 19.05.2025



Institute of Agricultural Engineering, Wrocław University of Environmental and Life Sciences,
Chelmońskiego 37b, 51-630 Wrocław, Poland

* e-mail: jasper.mbah@upwr.edu.pl

JASPER TEMBECK MBAH ^{*}, KATARZYNA PENTOŚ 

Predicting soil compaction from soil electrical conductivity based on scanning methods. A review

Wykorzystanie metod skanowania gleby do predykcji jej zwięzłości
na podstawie przewodności elektrycznej. Praca przeglądowa

Abstract. Soil compaction is a crucial agricultural issue impacting plant growth, water infiltration, and soil health. Because of its sensitivity to soil variables such as texture, moisture content, and salinity, soil electrical conductivity (ECa) has emerged as a promising indirect predictor of soil compaction. This review summarizes selected studies on the relationship between soil compaction and apparent electrical conductivity and examines various prediction approaches. It also considers the potential applications and limitations of using ECa to estimate soil compaction, including methods based on machine learning. Future advancements in technology, modeling, and data integration will be key to fully realizing the potential of ECa in soil compaction management.

Keywords: soil, electrical parameters, estimation, soil compaction

INTRODUCTION

Soil electrical conductivity (ECa) is a measure of the soil's ability to conduct an electric current. ECa plays an important part in understanding soil characteristics, including salinity, moisture content, and nutrient availability. ECa is a quick, reliable, easy-to-take

Citation: Tembeck Mbah J., Pentoś K., 2025. Predicting soil compaction from soil electrical conductivity based on scanning methods. A review. *Agron. Sci.* 80(1), 83–99. <https://doi.org/10.24326/as.2025.5463>

soil measurement that often relates to crop yield [Corwin and Lesch 2005, Sudduth et al. 2005]. Geophysical techniques such as electrode-based electrical resistivity tomography (ERT), and electromagnetic induction (EMI) have emerged as promising non-invasive tools for assessing soil properties. ECa maps are better known for representing an agricultural field based on nutrient needs [Vrindts et al. 2005, Barbosa and Overstreet 2022]. Accurate soil ECa prediction and mapping are critical for precision agriculture, soil health monitoring, and environmental management. Electromagnetic induction (EMI) is one of the most useful tools for obtaining spatial parameters influencing crop productivity. Its depth of inquiry, longevity, and link to crop growth parameters make it useful in precision agriculture [Corwin and Lesch 2003, Grisso et al. 2005, Pentoś et al. 2022].

Soil ECa measurements are directly related to soil texture, moisture, and salinity [Corwin and Lesch 2003], while Othaman et al. [2021] and Vrindts et al. [2005] opined that soil ECa is directly related to nutrient concentration and inversely proportional to the soil depth. Soil texture is an important factor in crop yields because it relates to water-holding capacity, cation-exchange capacity, rooting depths, drainage, and other properties that influence crop production [Corwin and Lesch 2005, Lund 2008]. Soil ECa is widely used as an indirect indicator of a soil profile's physical and chemical properties [Vrindts et al. 2005]. It is also used to map spatial variations of edaphic properties: soil salinity, soil particle content, soil water content, and organic matter, as well as anthropogenic properties of soils; leaching, irrigation, drainage patterns, and compaction [Corwin and Lesch 2005].

ECa is influenced by a combination of physicochemical properties including soluble salts, clay content and mineralogy, soil moisture content, bulk density, organic matter, cation exchange capacity, soil pore size and distribution, and soil temperature [McNeill 1992, Corwin and Lesch 2005, Sudduth et al. 2005, Othaman et al. 2021]. Soil ECa can be measured by physical direct contact (contact sensor) of a minimum of four electrodes with soil or by electromagnetic induction (noncontact sensor) that uses a transmitter coil to induce a magnetic field into the soil with a receiver coil to measure the response [Sudduth et al. 2005, Hemmat and Adamchuk 2008]. EMI is one of the most used techniques for obtaining spatial parameters influencing crop productivity [Corwin and Lesch 2003]. Lund [2008] stated that soil ECa expressed in millisiemens (mS) is the inverse of soil resistance reported in ohms (W). Conductivity and resistivity are two sides of the same coin; if the soil has high conductivity, it will have low resistance.

The need to improve agricultural yields has led to the development and widespread use of heavy machinery, exacerbating several agrarian problems such as soil compaction. Soil compaction refers to the reduction in soil volume caused by external influences that reduce soil production and environmental quality [Duiker 2005, Hemmat and Adamchuk 2008, McKenzie 2010]. It occurs when a force compresses the earth, pushing air and water out, and causing it to become dense and lose its inherent resistance to equipment movement [Hoorman et al. 2009]. Soil compaction can be classified into topsoil and subsoil, and both reduce yields [Duiker 2005, Hoorman et al. 2009, Tekin and Yalçın 2019]. Compression from machinery or stock trampling, agricultural/land-use intensification, and foot and vehicle traffic are the main causes of soil compaction [Duiker 2005, Tekin and Yalçın 2019, Hu et al. 2021].

According to Hemmat et al. [2008], soil compaction is a key issue in agriculture and land management, resulting in variable growth in agricultural areas, impeded water infiltration, and overall soil health, inadequate root systems, and low yields affect trees, reduced soil fertility, and increase soil erosion [Nawaz et al. 2013]. Soil compaction also

reduces soil porosity, increases soil density and root penetration resistance, decreases vertical microporosity, increases nitrogen dioxide emissions, decreases infiltration, and slows plant germination [Duiker 2005, McKenzie 2010, Nawaz et al. 2013, Peralta et al. 2021, Yue et al. 2021]. According to Nawaz et al. [2013], the key factors influencing soil compaction are soil organic matter content, moisture content, and soil texture. Friedman [2005] and Tekin and Yalçın [2019] stated that soil strength is the primary determinant of soil compaction, influenced by soil variables (bulk density, moisture, and soil texture). The impact of soil compaction is determined by the amount of root zone compacted, the continuity of the compacted zone, and crop vulnerability [Nawaz et al. 2013, Tekin and Yalçın 2019].

Soil compaction has been investigated using direct methods such as penetration resistance tests or bulk density measurements, which are both time-consuming and labor-intensive. For the reason that soil compaction impacts many of the same elements as ECa, such as water content and soil structure, ECa has the potential to be used as a soil compaction indicator [Pentoś et al. 2022].

Because of its efficiency and cost-effectiveness, there has recently been an increased interest in using soil electrical conductivity as a proxy to anticipate soil compaction. This paper reviews the relationship between soil compaction and soil electrical conductivity, various scanning methods, and assesses their usefulness and limitations.

MECHANISM LINKING SOIL ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND SOIL COMPACTION

Soil structure relating to compaction, particularly the collapse of macropores, leads to a more conducive environment for electrical currents. This is especially visible in clay-rich soils, where compaction can greatly boost ECa values.

Compacted soils have a higher bulk density and lower porosity. ECa measures correlate strongly with bulk density because compaction modifies the soil matrix, affecting conductivity.

Compacted soils have reduced pore space, resulting in poorer moisture retention and electrical conductivity. Higher compaction reduces pore space, affecting how quickly water and ions travel through the soil, which can be determined with ECa tests.

METHODS OF ESTIMATING SOIL ELECTRICAL CONDUCTIVITY (ECA)

Several methodologies, such as sensor-based mapping, machine learning algorithms, and integrating data with soil properties, have been advanced for predicting soil compaction from electrical conductivity data. Sensor-based electromagnetic induction (EMI) mappings employing EM38, DUALEM, and galvanic contact resistivity (GCR) employing Veris are widely employed in mapping electrical conductivity over large areas. A data logging station is mounted to record data for all scanners with scanner-specific softwares (tab. 1).

EM38 is an EMI conductivity meter and movable field instrument used in approximating soil electrical parameters (electrical conductivity and magnetic susceptibility) in the rooting zone (1.5 m in depth). Its rapidity and accuracy make it ideal for large-scale soil conductivity measurements. EM38 measures electrical parameters vertically (EM38V) at a depth of about 1.5 m and horizontally (EM38H) at 1 m. It is assisted by

a GPS receiver, which tracks the locations of all soil electrical parameter measurement sites in the field. EM38 must be positioned on a non-metallic cart to prevent sensor signal interference. It measures the voltage difference between a source and a sensor electrode. EMI does not make direct contact with the soil, instead, it uses a transmitter coil to generate a magnetic field in the soil and has a receiver coil that measures the reaction. The electrode configuration is called the Wenner array configuration; four electrodes are equidistantly spaced in a straight line at the soil surface, with the two outer electrodes acting as transmission electrodes and the two inner electrodes serving as receivers. The electrical current's penetration depth and measurement volume are directly related to the distance between the transmission and receiving electrodes. The larger the spacing, the deeper and larger the electrical measurements. The advantages of EM-38 include being non-invasive, allowing for quick data collection over large areas, and providing high sensitivity to detect subtle soil variations. It is versatile and works in different soil types and conditions. However, it has limitations, such as measuring only shallow soil layers (up to 1.5 meters), requiring proper calibration for accurate results, and being prone to interference from other objects, which can affect the accuracy of readings [McNeill 1980, Corwin and Lesch 2003, Lund 2008, Siqueira et al. 2014, Su and Adamchuk 2023].

Table 1. Specification of instruments used; adapted from Su and Adamchuk [2023]

Specification	VERIS	EM-38	DUALEM-21S	Topsoil Mapper
Method	GCR/DC	EMI	EMI	EMI
Dimension (m)	$1.43 \times 1.50 \times 0.69$	$1.06 \times 0.13 \times 0.3$	$2.41 \times 0.09 \times 0.09$	$1.67 \times 0.34 \times 0.265$
Mass (kg)	136	3	5	24
Power supply	12 V DC external	9 V DC internal	12 V DC external	12 V DC external
Number of depths	2	2	4	4
Operating frequency	20 Hz	14.6 kHz	9 kHz	9 kHz
Data output rate	1 Hz	14 Hz	5 Hz	5 Hz

DUALEM consists of a 2.41 m long tube with one transmitter coil and four receiving coils. Two of these four receiving coils form a horizontal coplanar (HCP) array at 1 m (DUALEMHCP-1) and 2 m (DUALEMHCP-2) distances, while the other two form a perpendicular coplanar (PRP) array at 1.1 m (DUALEMPRP-1.1) and 2.1 m (DUALEMPRP-2.1) distances. DUALEM is a frequency-domain multi-receiver EMI sensor with a single frequency of 9 kHz. It has two pairs of horizontal coplanar and perpendicular (PRP) receiver coil arrays that measure electrical parameters in distinct soil volumes at the same time. The transmitter is at one end and is shared by all reception coils at distances of 1.1 m and 2.1 m for PRP coil configurations and 1 m and 2 m for HCP configurations. The depth of exploration is expressed in terms of coil spacing and array orientation. It is equipped with a GPS receiver that tracks the locations of all soil electrical parameter measurement sites in the field. High-resolution, depth-specific readings, a non-invasive approach to soil

research, and the ability to gather data quickly over wide areas are some of its benefits. Also, it is quite adaptable and works well in a variety of soil types and situations. The DUALEM scanner does have certain drawbacks, though, such as its sensitivity to soil heterogeneity, which may compromise measurement accuracy. Additionally, it needs to be properly calibrated to guarantee accurate findings, and environmental elements like moisture and temperature may have an impact, reducing its usefulness in some circumstances [McNeill 1980, Su and Adamchuk 2023].

Veris soil scanner is a three-sensor system platform that can measure acidity (pH), organic matter percentage, electrical conductivity, and altitudes in a single operation. In this electrode-based approach, sensors are pushed across the fields, establishing direct soil contact, and measurements are recorded concurrently utilizing six rolling colters as electrodes, producing two simultaneous ECa values. Its collectors collect soil electrical conductivity readings from two depths every second. One pair of disc electrodes injects current into the soil, while the change in voltage is monitored across the other two pairs of disc electrodes, resulting in simultaneous ECa values for the top three feet of soil. The Veris usually consists of 3 pairs of rolling colters, and it is generally used for shallow (0–30 cm) soil ECa measurements [Adhikari et al. 2009]. A Global Positioning System (GPS) receiver fitted on the Veris unit tracks the location of each ECa measurement site in the field. The Veris scanner offers several advantages, including accurate and reliable measurement of soil ECa, which helps identify variations in soil texture. It enables precise soil mapping, supports variable-rate applications, and reduces the need for extensive soil sampling, saving time and costs. However, the device has limitations, such as reduced effectiveness in dry, sandy soils with low conductivity. It requires consistent soil contact for accurate data, making it less effective on rocky or uneven terrains. Additionally, the Veris scanner is expensive, and proper training is needed for data interpretation and application [Grisso et al. 2005, Adhikari et al. 2009, Su and Adamchuk 2023].

The Topsoil Mapper (Topsoil Mapper SoilXplorer AgXtend; Geoprospectors GmbH, Traiskirchen, Austria) is an advanced soil scanning device designed to provide non-contact, on-the-go soil analysis for agriculture, including texture, compaction, moisture content, and organic matter content. It utilizes electromagnetic induction technology to measure the soil ECa, offering non-invasive and precise analysis without physical sampling. The device is mounted on a tractor, allowing for continuous measurement during field operations. It is integrated with AgXtend technology, enabling real-time tillage depth adjustments based on site-specific soil conditions. This scanner utilizes a multi-coil electromagnetic induction (EMI) array configuration. It consists of four induction coils that serve as both transmitters and receivers. These coils are arranged to measure soil conductivity at different depths, ranging from 0 to 55 cm (from shallow to deeper soil layers). The effective measurement depth reaches 1.5 meters, and it can operate in either basic mode or pro mode. The device examines the soil structure at three different depths and provides information such as soil type, relative soil moisture, and soil compaction. The Topsoil Mapper also delivers insights into heterogeneity at individual depths, identifying zones such as sand and clay, as well as relative humidity and compaction. It can function in all conditions and is capable of providing ECa values at various depths. A Global Positioning System (GPS) receiver fitted tracks and records the location of each ECa measurement site in the field. Fast, non-invasive soil data collection and high-resolution mapping of soil property variations are two of its benefits. When recognizing regions with different soil fertility and moisture content, it works very well. Some drawbacks of the Topsoil Mapper

include its limited depth penetration, which usually only measures thin soil layers. Additionally, soil heterogeneity may impact the precision of its data, necessitating meticulous calibration and perhaps being impacted by external elements such as soil moisture and temperature [Trinks et al. 2016, De Feudis et al. 2025]. The characteristics of the selected methods for estimating soil electrical conductivity are presented in table 2.

Table 2. Instruments and recorded measurement; adapted from Su and Adamchuk [2023]

Measurement	Instrument	Array configuration	Distance (m)	Effective sensing depth (m)
Veris- EC	Veris	wenner	0.25	0.30
EM-38 _{HCP-1}	EM-38	horizontal colplanar	1.00	1.55
EM-38 _{VCP-1}	EM-38	vertical coplanar	1.00	1.0
DUALEM _{HCP-1}	DUALEM	horizontal coplanar	1.00	1.55
DUALEM _{PRP-1.1}	DUALEM	perpendicular coplanar	1.10	0.54
DUALEM _{HCP-2}	DUALEM	horizontal coplanar	2.00	3.18
DUALEM _{PRP-2.1}	DUALEM	perpendicular coplanar	2.10	1.03
EMI	Topsoil mapper	multi-coil array	1.68	1.5

Soiloptix sensor technology is a non-contact, pre-calibrated sensor that measures natural geological properties emitted from soil decay. It offers a wide range of individual soil mapping layers that give an in-depth look at soil aspects such as physical properties, macronutrients, micronutrients, and soil health. Soiloptix eliminates limitations typical of other scanners (contact and noncontact scanners). It faces no interference from crop residues, field vegetation, soil moisture, frozen ground, or light snow (5-inch thick) cover [Adamchuk 2015]. Gamma-ray detectors are typically composed of closely packed crystal blocks and collide with electrons as they pass through the crystals. These collisions create charged particles that can be detected [Peterson 2003]. Using Soiloptix sensors to scan soil involves four stages: soil mapping/scanning, extraction of soil samples, data processing, and retrieving results. About 25 layers of soil variables can be shown on maps. A GPS receiver tracks the location of each ECa measurement site in the field. One of its benefits is that it offers accurate, real-time data on soil variability, enabling highly accurate, detailed mapping across wide areas. It is perfect for precision agriculture since it is quick, non-invasive, and adaptable. Its limited depth of measurement, which usually only works for superficial soil layers, is one of its drawbacks. Furthermore, soil heterogeneity may impact its performance, and accurate calibration is necessary to guarantee accuracy, especially under a variety of environmental circumstances. The technological differences between the selected instruments are contained in table 3.

Table 3. Technology differences; adapted from Adamchuk [2015]

Specification	Grid Sampling	EC – Zone Sampling	SoilOptix
Measuring	soil nutrients	electrical conductivity	gamma radiation
Frequency	every crop cycle	– year 1 – ec survey – zone sample after (yearly or every crop cycle)	– survey year one – good for 10 years – soil sample every year or every crop cycle
Collection process	industry standard – 1 sample per 2.5 acres	– 40’–80’ swath widths – soil samples after zones have been determined	– 40’ swaths (narrower on special cases) – soil sample done immediately after the survey of the field is complete – sample locations derived from in-field radiation variability
Data resolution	statistics fill in data between points	– 1 sample per zone – 3–7 zones per field	– 1 sample per 8 acres surveyed – 335 data points per acre

Advancements in machine learning have enabled the development of predictive algorithms that use ECa data to anticipate soil compaction levels. This technique combines ECa measurements with other soil and environmental characteristics, resulting in reliable forecasts across a wide range of soil types and conditions. Technologies such as remote sensing and scanning approaches are used to quantify and analyze soil compaction on a geographical and temporal scale. Moreover, Infrared (IR) models accurately analyze soil particle-size distribution by relying on variables such as soil preparation, technology (sedimentation, laser), settling durations, and pertinent soil properties. Machine learning can relate a wide range of independent variables that may affect near-infrared spectroscopy to evaluate the particle-size distribution [Parent et al. 2021].

SELECTED METHODS FOR PREDICTING SOIL COMPACTION

Over the years, numerous sensor systems used in predicting soil features linked to soil compaction have been devised and refined [Hemmat and Adamchuk 2008, McKenzie 2010]. There are many sensor systems used to estimate soil compaction.

The technique of using bulk density to predict soil compaction involves measuring a soil core’s diameter and length to determine its volume. To obtain the dry weight, the soil core is oven-dried. Soil bulk density is defined as the dry weight of soil divided by its volume expressed in grams per cubic centimeter (g cm^{-3}). Soil bulk density has an indirect relationship with pore space and varies with freezing and thawing, wetting, and drying cycles. In addition to offering a straightforward and accurate measurement of soil porosity, a critical component in comprehending soil compaction, using bulk density to assess soil compaction has other benefits. It assists in evaluating the soil’s capacity to hold water and air, which affects plant development. Bulk density also provides quantitative data that is

easy to quantify. The possibility of sampling disruption, which could compromise accuracy, is one of its disadvantages. Also, because it disregards soil structure and variability at different depths, bulk density might not give a comprehensive picture of soil compaction [Bache et al. 2008, Hemmat and Adamchuk 2008, McKenzie 2010].

Another method of measuring soil compaction is using a penetrometer, which gives faster field results in a short time. Expressed in kilopascals (kPa), it is used to measure soil compaction by assessing the resistance of soil to penetration. It is useful in finding hard layers that obstruct root penetration and water flow through the soil. Penetrometers estimate soil strength and soil resistance to root penetration. Factors affecting penetration resistance measured by penetrometers include cone angle, cone diameter (surface area), and soil penetration rate. A penetrometer is equipped with a load cell and a depth cell. Measurements are conducted using a cone with a base area of 0.0001 m² and an angle of 60 degrees. With the use of data analytics and technological advancements, penetrometers have been developed and improved. These devices assess soil resistance when a probe penetrates the ground, with sensors gathering force and depth data. Modern penetrometers use digital interfaces for instantaneous analysis, GPS for accurate location tracking, and electronic sensors for real-time data collection. Data from these sensors are analyzed using advanced algorithms, providing insights into soil strength, density, and compaction. Penetrometers provide quick, cost-effective assessments of soil compaction, offering real-time data for decision-making. However, their accuracy can be affected by operator technique, soil moisture, and heterogeneity. They struggle in rocky or very dry soils and primarily measure surface compaction, potentially overlooking deeper soil conditions [Hemmat and Adamchuk 2008, Pentós et al. 2022].

Soil probe is another tool used to detect soil compaction, and it is subject to content and soil density. A drier soil will probe harder than wet soil. Soil probes can be used effectively to monitor differences in the soil moisture profile. Soil probes are simple, cost-effective tools for sampling and assessing soil properties like moisture and texture. They provide quick, direct access to soil profiles. However, they can be difficult to use in hard, compacted, or rocky soils, may disturb samples, and provide limited data. Soil probe devices have replaced simpler manual probes as the primary means of forecasting soil characteristics associated with compaction. At first, soil samples were extracted using basic metal rods, but with the introduction of GPS and electronic sensors, it became possible to gather accurate, real-time data on soil density and texture. To provide more precise evaluations of compaction, soil probes incorporate pressure sensors that measure resistance as they penetrate the soil. This method is much more refined because of data analytics and wireless connection, which make it possible to process, visualize, and integrate data into precision agriculture for better soil management [Vaz 2008, Hemmat and Adamchuk 2008, Jeschke and Lutt 2018].

Soil strength is the ability of soil to resist stresses causing compaction, and it is directly related to compaction [van den Akker et al. 2023]. Soil strength sensors are applicable in mapping soil compaction in a general or localized, specific soil layer. This is done by measuring the vertical force of a reference tool. A draft/vertical force is the force required to pull a tillage tool through the soil. Soil strength sensors are also used to sense soil strength profiles throughout an agricultural field and involve time-based soil sensors. Factors that affect soil strength are water content, structure, and bulk density. Soil strength sensors measure the resistance of soil to penetration, providing valuable data on compaction levels. These sensors, often integrated with penetrometers, load cells, or strain gauges,

have been refined through advancements in real-time data collection, GPS integration, and machine learning algorithms. They help predict soil features like density, porosity, and moisture content, improving precision agriculture practices. Its advantages include offering real-time, high-resolution data, enabling targeted soil management, and reducing fuel use. Its disadvantages are that variability in soil conditions affects accuracy, and sensor calibration is required. Additionally, high costs and complex data interpretation can limit accessibility for small-scale farmers [Hemmat and Adamchuk 2008, Abbaspour-Gilandeh and Khalilian 2011].

Modeling complicated interactions in agriculture, including soil parameters, artificial intelligence, and machine learning techniques, is widely used. Dynamic field probes that monitor the mechanical properties of agricultural soils have a special function in this context and allow for the evaluation of soil compactness, defined as cone penetrometer resistance in both horizontal and vertical planes, spanning numerous layers. For more precise in-situ measurements, dynamic field probe methods predict compaction-related soil characteristics. These probes used manual impact techniques, recording the quantity of hammer blows needed to penetrate the soil. The system has undergone an upgrade to include electronic sensors and GPS technology. Its advantages include providing rapid, in-situ measurements of soil compaction, effective for large-scale assessments. Also, it is easy to use, portable, and offers real-time data. However, their accuracy is influenced by soil moisture, heterogeneity, and operator technique. It also struggles to penetrate hard or rocky soils and focuses on surface compaction. Also, interpreting data can be complex, requiring proper calibration and experience [Naderi-Boldaji et al. 2013, Niedbała 2019, Pentoś et al. 2020, Piekutowska et al. 2021, Pentoś et al. 2022, Hara et al. 2023].

Remote sensing is another tool used to determine soil properties. According to Abdulraheem et al. [(2023)] and Ben-Dor et al. [2009], remote sensing is a valuable instrument for obtaining precise and relevant soil data by detecting its characteristics through acoustic and electromagnetic techniques. It provides global coverage, allowing monitoring and analysis of soil parameters on a larger scale across various landscapes and locations. It offers a non-intrusive method to test soil without affecting the ecosystem. With the development of satellite and aerial imaging technology, remote sensing systems for forecasting soil characteristics associated with compaction have changed. In the beginning, remote sensing evaluated surface conditions indirectly associated with compaction using visible or infrared imaging. The incorporation of multispectral and hyperspectral sensors has improved these systems over time, making it possible to identify minute changes in moisture content and soil texture. Machine learning algorithms and data analytics have further improved the precision of interpretation, enabling more accurate forecasts. Advantages of using remote sensing to predict soil compaction include its ability to cover large areas quickly and non-invasively, providing detailed, high-resolution data across diverse terrains, and cost-efficient tools for studying soil compaction. It also allows for continuous monitoring and detecting subtle changes in soil properties and minimizes the need for frequent field visits. Its disadvantages include reliance on environmental conditions, such as weather or vegetation cover, which can affect the accuracy of data. Also, it does not directly measure soil compaction but infers it from surface features, which can sometimes lead to less precise results [Ben-Dor et al. 2009, Ghazali et al. 2020, Ebrahimzadeh et al. 2023].

OVERVIEW OF THE USE OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY IN PREDICTING SOIL COMPACTION

Increased compaction has been linked to fluctuations in ECa, especially in fine-textured soils where compaction alters the soil's moisture-holding capacity. In sandy soils, where the texture allows for greater drainage, changes in ECa caused by compaction may be less severe. Kumar et al. [2021] employed ECa sensors to predict soil compaction in clay loam soils and discovered a strong relationship between ECa values and soil bulk density. When paired with moisture data, ECa data predicted compaction levels with great accuracy. The researchers also stated that soil ECa is essential for understanding soil qualities, which have a direct impact on agricultural production, allowing for better soil management approaches, such as site-specific irrigation and fertilization schemes. Sudduth et al. [2005] emphasized that apparent soil electrical conductivity is a useful tool for indirectly forecasting many soil physical and chemical properties. ECa sensors are efficient and cost-effective, gathering not just ECa data but also providing information on soil types, management plans, and weather conditions. According to their findings, soil electrical conductivity is most closely connected to clay content and cation exchange capacity, both of which are important markers of soil fertility and structure. Moisture, silt, sand, and organic content all have a lower connection with ECa than clay and cation exchange capacity. These findings demonstrate the utility of ECa in precision agriculture for soil characterization and management.

Pentoś et al. [2022] stated that developing management zones in modern agriculture is critical for yield maximization, cost minimization, and reducing environmental impact. Furthermore, researchers concluded that data from dynamic soil electrical conductivity and magnetic susceptibility probe measurements have potential alternative uses in estimating mechanical parameters, such as soil compaction in different soil layers. This is essential for conserving and protecting agricultural soils from both natural and anthropogenic erosion, including over-compaction. Moreover, according to Abbaspour-Gilandeh and Khalilian [2011], there is a substantial link between soil electrical conductivity and soil compaction. The use of ECa data for the identification of zones of high and low drag force (the force required to draw a tillage tool through the soil) is useful for the overall reduction in energy consumption during tillage. Even though draft force changes with soil texture, using soil ECa data to identify zones with high or low draft force in precision agricultural management is advantageous. Galambosová et al. [2020], in their study on using electrical conductivity to assess trafficked areas in silty clay soil, stated that an increase in machinery size and random traffic in fields leads to soil compaction, which harms soil structure and diminishes soil function. The researchers concluded that using electrical conductivity data to forecast trafficked areas in agricultural fields can effectively identify compacted areas in silty clay soil; however, data from nearby areas should also be considered. Nogués et al. [2006] discovered that ECa measurements in sandy soils might more accurately identify compacted areas in agricultural fields than traditional soil sample methods. The study found that ECa mapping could save up to 60% of the time and money compared to manual compaction testing.

Pathirana et al. [2024] while using random forest (RF), simple linear regression (SLR), and multiple linear regression (MLR) from ECa and dielectric constant (Kr) data to predict soil bulk density, found that geophysical methods- ground-penetrating radar (GPR) and electromagnetic induction to be very useful in assessing soil properties and

variables in agriculture. This is because of their ability to overcome the limitations of traditional methods. Also, according to Ding et al. [2020], in their study of using EMI observation data and machine learning algorithms to predict soil ECa and analyze its variations in the spatial distribution in oasis agroecosystems and desert-oasis ecotones, stated that electrical conductivity data provide a reliable and cost-effective tool for obtaining high-resolution soil maps that can be used for better land evaluation and soil improvement at larger scales. As electrical conductivity depth increased, soil-related variables diminished in influence, while climate-related variables grew more significant. According to the study, climate-related variables have the most substantial impact on ECa fluctuations, followed by vegetation-related variables and then soil-related variables. Heil et al. [2017] state that rapid and accurate assessments of within-field variation are crucial for identifying field-wide heterogeneity, which can lead to improved agricultural land management. The interpretation and use of apparent soil electrical conductivity readings are highly site- and soil-dependent; therefore, understanding the soil characteristics that affect ECa measurements is essential. The researchers also noted that ECa applications are necessary to achieve sustainable agriculture, maximize economic returns, and protect the environment, particularly soil health. In their study, Grisso et al. [2005] found that accurate soil property maps are essential for making effective precision farming decisions. Soil property segregation and classification are challenged by insufficient sampling density and the high costs of traditional soil sampling and analysis. Additionally, soil ECa maps can be utilized to establish management zones and reveal clear patterns in soil parameters. Su and Adamchuk [2023], while measuring apparent soil electrical conductivity using galvanic contact resistivity (Veris) and electromagnetic induction (EM38 and DUALEM) techniques, stated that Veris and DUALEM electrical conductivity measurements are more stable over short periods and resistant to temporal drift and operational noise over time and are frequently conducted to reveal spatial soil heterogeneity.

ADVANTAGES OF USING ECA DATA FOR SOIL COMPACTION PREDICTION

Using ECa data for predicting soil compaction offers significant advantages in precision agriculture. ECa data provides a non-invasive, real-time assessment of soil properties that are closely linked to compaction levels. By identifying compacted areas accurately, farmers can adjust tillage practices, optimize machinery use, and reduce energy consumption, leading to increased productivity and cost savings. ECa-based mapping minimizes the need for extensive physical sampling, saving time and resources while ensuring more precise, site-specific soil management. ECa data enhances decision-making, supports sustainable farming, and improves soil health.

Data from dynamic soil ECa measurements have the potential to estimate mechanical soil parameters, such as soil compaction. This is crucial for conserving agricultural soils from natural and human-induced erosion and over-compaction [Pentoš et al. 2022]. Soil ECa sensors provide real-time data, enabling quick assessments of compaction and facilitating precise tillage or repair treatments in affected areas [Sudduth et al. 2005, Su and Adamchuk 2023, Sanches et al. 2025]. EMIs, a type of non-contact ECa sensor, can rapidly map large fields, offering a significant advantage over traditional point-based soil

compaction testing [Heil et al. 2017]. Once calibrated, these sensors provide a cost-effective method for monitoring soil compaction and creating spatial variability maps, which aid in planning variable-depth tillage to optimize energy consumption and operational costs [Deng et al. 2020, Pentoś et al. 2022].

Continual monitoring using ECa sensors helps farmers implement preventive measures, such as adjusting tillage operations or applying targeted aeration, to mitigate compaction-related yield losses [Maharjan et al. 2018]. The ability to predict soil compaction levels based on soil electrical conductivity is particularly useful when scaling from small plots to entire fields [Korsaeth 2005, Brogi et al. 2020]. Technologies like Veris and DUALEM electrical conductivity sensors have proven stable over short periods, showing resistance to temporal drift and operational noise, ensuring reliable long-term data collection [Su and Adamchuk 2023].

CHALLENGES IN USING ECA DATA FOR COMPACTION PREDICTION

For agricultural soil mapping, conventional near-surface geophysical prospection systems have either relied on electromagnetic induction measurements using EMI devices or on earth resistance measurements using electrode disks that require soil contact, both of which have shortcomings. The relationship between ECa and soil compaction is highly dependent on soil type. Accurate predictions require detailed knowledge of the soil's physical properties, including texture, bulk density, porosity, moisture content, and organic matter. Soil texture, which includes the proportions of sand, silt, and clay, influences water retention and compaction levels, thereby affecting accuracy. Both bulk density and porosity determine the movement of air and water, impacting predictions about soil structure. Moisture content alters both conductivity and strength, which affects sensor readings. Additionally, organic matter enhances soil aggregation, influencing estimates of compaction and aeration [Dexter 2004, Silva et al. 2018].

Because soil moisture significantly affects ECa, predictions of soil compaction based on ECa readings can be skewed by natural moisture variations. This makes it necessary to correct or account for moisture content in real-time measurements to ensure accuracy [Su and Adamchuk 2023]. For ECa data to serve as a reliable predictor of soil compaction, it must be calibrated against direct compaction measurements, such as bulk density and penetration resistance. However, calibration models may differ depending on soil type, field conditions, and farming practices [Su and Adamchuk 2023]. ECa's sensitivity to soil texture also reduces its reliability in heterogeneous soils, such as those with mixed sand and clay layers, necessitating separate calibrations for different soil compositions [Siqueira et al. 2014, Su and Adamchuk 2023, Sanches et al. 2025].

Soil ECa measurements are not always trustworthy, particularly when high amounts of manure or fertilizers have been applied. In such cases, excessive salts from these additives can distort ECa readings, making them reflect changes in soil amendments rather than actual soil conductivity. This can lead to misleading compaction maps if not properly accounted for [Corwin and Lesch 2005, Grisso et al. 2005, Sanches et al. 2025]. The interpretation and utility of ECa readings are highly dependent on location and soil characteristics, requiring a clear understanding of the specific soil properties influencing the measurements to ensure their effective use in agricultural management [Su and Adamchuk 2023].

FUTURE DIRECTIONS AND CONCLUSIONS

Machine learning algorithms can enhance the accuracy of soil compaction predictions based on ECa data by incorporating additional variables, such as soil texture and moisture content. Advanced techniques that assess multiple factors simultaneously can produce more precise, localized compaction estimates, potentially reducing the need for direct soil sampling. Integrating ECa sensors with other soil health indicators, such as moisture and texture sensors and penetrometers, can further improve prediction accuracy, providing a more comprehensive understanding of compaction and related issues. Moreover, combining ECa measurements with remote sensing technology enables large-scale monitoring of soil compaction across agricultural fields. Automating ECa sensor calibration using drone or satellite data could reduce the need for extensive fieldwork, making ECa-based compaction prediction more scalable. Advances in real-time sensor technology also facilitate dynamic soil compaction monitoring, offering farmers and land managers valuable data to optimize field management practices.

Overall, soil ECa is a promising tool for predicting soil compaction, particularly when combined with other monitoring technologies and properly calibrated. It provides a scalable, efficient, and cost-effective alternative for managing soil compaction in agricultural fields in real-time. Predicting soil compaction with ECa data can be a faster and less expensive approach compared to traditional methods, yet it has limitations. Factors like soil type variability, moisture dependence, and the need for thorough calibration can reduce ECa's reliability as a standalone predictor. Continued research and advancements in precision agriculture are essential to improve ECa's accuracy and practical use. Addressing challenges like soil type variability, moisture fluctuations, and calibration issues is crucial for wider adoption. Ongoing research is needed to strengthen the link between soil ECa and compaction, enabling more effective and sustainable soil management in agriculture.

REFERENCES

- Abbaspour-Gilandeh A., Khalilian F.H., 2011. Use of soil EC data for zoning the production field by artificial neural network for applying the precision tillage. *J. Agr. Machinery Sci.* 7(1), 27–31.
- Abdulraheem M., Zhang W., Li S., Moshayedi A., Farooque A., Hu J., 2023. Advancement of remote sensing for soil measurements and applications: A comprehensive review. *Sustainability* 15(21), 15444. <https://doi.org/10.3390/su152115444>
- Adamchuk V., 2015. Soil technology comparison. Grid Sampling vs. Electrical Conductivity vs. SoilOptix®. Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, <https://soiloptix.com/wp-content/uploads/2021/11/SoilOptix-Technology-Comparison-Study.pdf> [access: 20.11.2024].
- Adhikari K., Carre F., Toth G., Montanarella L., 2009. Site Specific Land Management: General Concepts and Applications. EUR 23978 EN. European Commission, JRC53692.
- Bache B., Chesworth W., Chesworth W., Gessa C., Lewis D.T., 2008. Bulk density. In: W. Chesworth (ed.), *Encyclopedia of soil science*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3995-9_80
- Barbosa R., Overstreet C., 2022. What is soil electrical conductivity? LSU AgCenter Pub. 3185, <https://www.lsuagcenter.com/nr/rdonlyres/e57e82a0-3b99-4dee-99b5-cf2ad7c43aef/77101/pub3185whatissoilelectricalconductivityhighres.pdf> [access: 4.15.2024].

- Ben-Dor E., Chabrilat S., Demattè J., Taylor G., Hill J., Whiting M., Sommer S., 2009. Using Imaging Spectroscopy to study soil properties. *Remote Sens. Environ.* 113, 38–55. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.09.019>
- Brogi C., Huisman J., Herbst M., Weihermüller L., Klosterhalfen A., Montzka C., Reichenau T.G., Vereecken H., 2020. Simulation of spatial variability in crop leaf area index and yield using agroecosystem modeling and geophysics-based quantitative soil information. *Vadose Zone J.* 19, e20009. <https://doi.org/10.1002/uar2.20009>
- Corwin D., Lesch S., 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles, and guidelines. *Agron. J.* 95, 455–471.
- Corwin D., Lesch S., 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Comp. Electron. Agric.* 46, 11–43. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.10.005>
- De Feudis C., Ferré C., Comolli R., 2025. Practical insights for ECa-based soil mapping: Case studies in croplands and vineyards. *Smart Agric. Technol.* 10, 100697. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100697>
- Deng X., Gu H., Yang L., Lyu H., Cheng Y., Pan L., Fu Z., Cui L., Zhang L., 2020. A method of electrical conductivity compensation in a low-cost soil moisture sensing measurement based on capacitance. *Measurement* 150, 107052. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107052>
- Ding J., Yang S., Shi Q., Wei Y., Wang F., 2020. Using apparent electrical conductivity as an indicator for investigating potential spatial variation of soil salinity across seven oases along Tarim River in Southern Xinjiang, China. *Remote Sens.* 12(16), 2601. <https://doi.org/10.3390/rs12162601>
- Dexter A.R., 2004. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120, 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>
- Duiker S.W., 2005. Effects of soil compaction. College of Agricultural Sciences. Agricultural Research and Cooperative Extension. <https://extension.psu.edu/effects-of-soil-compaction> [access: 19.10.2024].
- Ebrahimzadeh G., Mahabadi N., Bayat H., MatinFar H., 2023. Estimating pre-compression stress in agricultural soils: Integrating spectral indices and soil properties through machine learning. *Comp. Electron. Agric.* 215. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108393>
- Friedman S., 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Comp. Electron. Agric.* 46, 45–70. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.001>
- Galambosová J., Macák M., Rataj V., Barát M., Misiewicz P., 2020. Determining trafficked areas using soil electrical conductivity – a pilot study. *Acta Technol. Agric.* 23, 1–6. <https://doi.org/10.2478/ata-2020-0001>
- Ghazali M.F., Wikantika K., Harto A.B., Kondoh A., 2020. Generating soil salinity, soil moisture, soil pH from satellite imagery and its analysis. *Inf. Process. Agric.* 7(2), 294–306. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.08.003>
- Grisso R.D., Alley M.M., Holshouser D.L., Thomason W.E., 2005. Precision farming tools. Soil electrical conductivity. Virginia Cooperative Extension 442–508, https://www.researchgate.net/publication/285309866_Precision_Farming_Tools_Soil_Electrical_Conductivity_Virginia_Cooperative_Extension [access: 19.10.2024].
- Hara P., Piekutowska M., Niedbała G., 2023. Prediction of pea (*Pisum sativum* L.) seeds yield using artificial neural networks. *Agriculture* 13(3), 661. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030661>
- Heil K., Schmidhalter U., 2017. The Application of EM38: Determination of soil parameters, selection of soil sampling points and use in agriculture and archaeology. *Sensors* 17(11), 2540. <https://doi.org/10.3390/s17112540>

- Hemmat A., Adamchuk V., 2008. Sensor systems for measuring soil compaction: Review and analysis. *Comp. Electron. Agric.* 63, 89–103. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.03.001>
- Hoorman J., de Moraes Sá J.C., Reeder R., 2009. The biology of soil compaction. *Agriculture and Natural Resources*. <https://ohioline.osu.edu/factsheet/SAG-10> [access: 4.15.2024].
- Hu W., Drewry J., Beare M., Eger A., Muller K., 2021. Compaction induced soil structural degradation affects productivity and environmental outcomes: A review and New Zealand case study. *Geoderma* 395, 115035. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115035>
- Jeschke M., Lutt N., 2018. Soil compaction in agricultural production. *Pioneer*, <https://www.pioneer.com/us/agronomy/soil-compaction-ag-production.html> [access: 4.15.2024].
- Korsaeth A., 2005. Soil apparent electrical conductivity (EC_a) as a means of monitoring changes in soil inorganic N on heterogeneous morainic soils in SE Norway during two growing seasons. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 72, 213–227. <https://doi.org/10.1007/s10705-005-1668-6>
- Kumar P., Kumar P., Shukla A., 2021. Spatial modeling of some selected soil nutrients using geo-statistical approach for Jhandutta Block (Bilaspur District), Himachal Pradesh, India. *Agric. Res.* 10, 262–273. <https://doi.org/10.1007/s40003-020-00494-z>
- Lund E.D., 2008. Soil electrical conductivity. In: C.D. Logsdon S., Moore D., Tsegaye T. (ed.), *Soil science step-by-step field analysis*. Soil Science Society of America, Inc., 137–146.
- Maharjan G.R., Prescher A., Nendel C., Ewert F., Mboh C.M., Gaiser T., Sabine S.J., 2018. Approaches to model the impact of tillage implements on soil physical and nutrient properties in different agro-ecosystem models. *Soil Till. Res.* 180, 210–221. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.03.009>.
- McKenzie R.H., 2010. Agricultural soil compaction: causes and management. *Agri-facts*. [https://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/agdex13331/\\$file/510-1.pdf](https://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/agdex13331/$file/510-1.pdf) [access: 4.15.2024].
- McNeill J.D., 1980. Electromagnetic terrain conductivity at low induction numbers. Technical Note TN-6 G. Limited, Ontario, Canada.
- McNeill J.D., 1992. Rapid, accurate mapping of soil-salinity by electromagnetic ground conductivity meters. In: *Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice*. 209–229. Wiley. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub30>
- Naderi-Boldaji M., Alimardani R., Hemmat A., Sharifi A., Keyhani A., Tekeste M.Z., Keller T., 2013. 3D finite element simulation of a single-tip horizontal penetrometer-soil interaction. Part I: Development of the model and evaluation of the model parameters. *Soil Till. Res.* 134, 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.08.002>
- Nawaz M.F., Bourrie G., Trolard F., 2013. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33(2), 291–309. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>
- Niedbała G., 2019. Application of artificial neural networks for multi-criteria yield prediction of winter rapeseed. *Sustainability* 11(2), 533. <https://doi.org/10.3390/su11020533>
- Nogués J., Robinson D., Herrero J., 2006. Incorporating electromagnetic induction methods into regional soil salinity survey of irrigation districts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 2075–2085. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0405>
- Othaman N.N.C., Isa M.N.M., Hussin R., Ismail R.C., Naziri S.Z.M., Murad S.A.Z., Harun A., Ahmad M.I., 2021. Development of soil electrical conductivity (EC) sensing system in paddy field. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1755, 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1755/1/012005>
- Parent E., Parent S., Parent L., 2021. Determining soil particle-size distribution from infrared spectra using machine learning predictions: Methodology and modeling. *Plos One* 17(8), e0233242. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233242>

- Pathirana S., Lambot S., Krishnapillai M., Cheema M., Smeaton C., Galagedara L., 2024. Integrated ground-penetrating radar and electromagnetic induction offer a non-destructive approach to predict soil bulk density in boreal podzolic soil. *Geoderma* 450, 117028. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117028>
- Pentoś K., Mbah J.T., Pieczarka K., Niedbała G., Wojciechowski T., 2022. Evaluation of multiple linear regression and machine learning approaches to predict soil compaction and shear stress based on electrical parameters. *Appl. Sci.* 12(17). <https://doi.org/10.3390/app12178791>
- Pentoś K., Pieczarka K., Lejman K., 2020. Application of soft computing techniques for the analysis of tractive properties of a low-power agricultural tractor under various soil conditions. *Complexity* 2020, 7607545. <https://doi.org/10.1155/2020/7607545>
- Peralta G., Alvarez C., Taboada M., 2021. Soil compaction alleviation by deep non-inversion tillage and crop yield responses in no-tilled soils of the Pampas region of Argentina. A meta-analysis. *Soil Till. Res.* 211, 105022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105022>
- Piekutowska M., Niedbała G., Piskier T., Lenartowicz T., Pilarski K., Wojciechowski T., Pilarska A.A., Czechowska-Kosacka A., 2021. The application of multiple linear regression and artificial neural network models for yield prediction of very early potato cultivars before harvest. *Agronomy* 11(5), 885. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050885>
- Peterson B.M., Mathur S., Osmer P.S., Vestergaard M., 2003. Quasars. In: *Encyclopedia of physical science and technology* (third ed.), Academic Press, 465–480. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00629-3>
- Sanches G. M., Faria H. M., Otto R., Neto A. S., Corá, J. E., 2025. using soil apparent electrical conductivity (eca) to assess responsiveness of nitrogen rates and yield in Brazilian sugarcane fields. *Agronomy* 15(3), 606. <https://doi.org/10.3390/agronomy15030606>
- Silva S., de Barros N., de Novais R., Comerford N., 2018. Eucalyptus growth and phosphorus nutritional efficiency as affected by soil compaction and phosphorus fertilization. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 49, 2700–2714. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1538372>
- Siqueira G.M., Dafonte J.D., Bueno Lema J., Valcárcel Armesto M., Silva Ê., 2014. using soil apparent electrical conductivity to optimize sampling of soil penetration resistance and to improve the estimations of spatial patterns of soil compaction. *Sci. World J.* 1, 269480. <https://doi.org/10.1155/2014/269480>
- Su A., Adamchuk V., 2023. Temporal and operation-induced instability of apparent soil electrical conductivity measurements. *Front. Soil Sci.* 3. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2023.1137731>
- Sudduth K., Kitchen N., Wiebold W., Batchelor W., Bollero G., Bullock D., Clay D., Palm H.L., Pierce F.J., Schuler R.T., Thelen K.D., 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Comp. Electron. Agric.* 46, 263–283.
- Tekin A., Yalçın H., 2019. Design and development of a front-mounted on-the-go soil strength profile sensor. *Turkish J. Agric. Forest.* 43, 151–163. <https://doi.org/10.3906/tar-1803-64>
- Trinks I., Pregesbauer M., 2016. Efficient mapping of agricultural soils using a novel electromagnetic measurement system. Conference: EGU. At: X1.169, vol. 18.
- van den Akker J.J.H., ten Damme L., Lamandé M., Keller T., 2023. Compaction. In: *Encyclopedia of soils in the environment* (second ed.). Academic Press, 85–99. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00225-1>
- Vaz C.M.P., 2003. Use of a combined penetrometer-TDR moisture probe for soil compaction studies. College on Soil Physics, <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20946976> [access: 19.10.2024]

- Vrindts E., Mouazen A.M., Reyniers M., Maertens K., Maleki M.R., Ramon H., De Baerdemaeker J., 2005. Management zones based on correlation between soil compaction, yield and crop data. *Biosyst. Eng.* 92(4), 419–428. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.08.010>
- Yue L.K., Wang Y., Wang L., Yao S.H., Cong C., Ren L.D., Zhang B., 2021. Impacts of soil compaction and historical soybean variety growth on soil macropore structure. *Soil Till. Res.* 214, 105166. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105166>

The source of research funding: UPWr Doctoral School.

Received: 11.12.2024

Accepted: 7.04.2025

Published: 19.05.2025