

EMILIA RADZIMOWSKA¹, JADWIGA TOPCZEWSKA²

¹SKN *AnimalEquus*, Uniwersytet Rzeszowski, ²Zakład Produkcji Zwierzęcej i Oceny Produktów Drobiarskich, Wydział Technologiczno-Przyrodniczy, Uniwersytet Rzeszowski, e-mail: jtopczewska@ur.edu.pl; ORCID:0000-003-3921-5116

ZRÓWNOWAŻONA PRODUKCJA I ZAGOSPODAROWANIE ODPADÓW W PRODUKCJI SADOWNICZEJ

Abstrakt: Celem pracy było wskazanie przykładowych rozwiązań umożliwiających prowadzenie produkcji owoców zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju. Wykorzystanie odmian odpornych, edukacja konsumentów w zakresie decyzji zakupowych a także optymalne nawożenie i ograniczone stosowanie środków ochrony to tylko kilka przykładów. Racjonalne gospodarowanie wodą, a także maksymalne zagospodarowanie odpadów w przemyśle oraz jako źródło energii odnawialnej, przekłada się na długoterminowe korzyści. Wdrożenie sztucznej inteligencji umożliwia nadzorowanie produkcji i szybsze podejmowanie kluczowych decyzji. Dodatkowo racjonalne wykorzystanie ciągników ogranicza koszty oraz emisję gazów cieplarnianych. Wieloletnie uprawy drzewiaste mogą pomóc w redukcji emisji gazów cieplarnianych poprzez sekwestrację węgla a także stanowić naturalne korytarze migracyjne. Produkcja sadownicza ma wiele możliwości w realizacji licznych Celów Zrównoważonego Rozwoju.

Słowa kluczowe: produkcja owoców, odpady, zrównoważony rozwój

SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND WASTE MANAGEMENT IN ORCHARD PRODUCTION

Abstract: The aim of this study was to identify examples of solutions that allow fruit production in accordance with the principles of sustainable development. The use of resistant varieties, consumer education in purchasing decisions, optimal fertilisation and limited use of plant protection products are just a few examples. Rational water management and maximum waste use in industry and as a source of renewable energy directly translate into long-term benefits. The implementation of artificial intelligence enables production monitoring and faster key decision making. Additionally, the rational use of tractor reduces costs and greenhouse gas emissions. Perennial woody crops can help reduce greenhouse gas emissions through carbon sequestration and can also provide natural migration corridors. Fruit production has many opportunities to contribute to the achievement of numerous Sustainable Development Goals.

Keywords: fruit production, waste, sustainable development

I.WSTĘP

Wieloletnie rośliny zdrewniałe, które mają kluczowe znaczenie dla prawidłowego odżywiania i globalnej gospodarki, mogą odegrać istotną rolę w realizacji licznych Celów Zrównoważonego Rozwoju ONZ dotyczących ochrony różnorodności biologicznej, rozwoju społeczno-gospodarczego i łagodzenia zmian klimatu [Martinez-Nuñez i in. 2025]. Produkcja owoców mierzy się z licznymi wyzwaniami, takimi jak kwestie środowiskowe i społeczno-ekonomiczne, a także utrata różnorodności biologicznej, emisja gazów cieplarnianych, zanieczyszczenie wody, niskie dochody rolników i porzucanie terenów wiejskich. W tym kontekście Unia Europejska i jej państwa członkowskie zmierzają w kierunku osiągnięcia równowagi środowiskowej, społecznej i gospodarczej. Szereg rozwiązań i programów w ramach europejskiej polityki rolnej wprowadza zachęty dla rolników do przyjmowania zrównoważonych praktyk w produkcji sadowniczej, zapewniając odpowiednie środki [Baima i in. 2024]. Opłacalność i ograniczony wpływ na środowisko są kluczowymi dla nowoczesnego sadownictwa. To sektor, w którym historycznie występowało wysokie zużycie środków ochrony roślin. Przykładowo, jak wskazują Antal i in. [2024], koszty ochrony upraw owocowych stanowią 18–35% całkowitych kosztów produkcji jabłek.

Z perspektywy konsumentów, lokalna i ekologiczna produkcja jest ściśle powiązana z naturalną żywnością [Hueppe i Zander 2024]. Aby zwiększyć akceptację produktów uzyskiwanych z produkcji zrównoważonej, ważna jest edukacja konsumentów, ponieważ wybór żywności ma wpływ na sposób produkcji. Owoce z drobnymi wadami, np. skórki, nadal cechują się dobrą jakością. Wybory zakupowe mogą przyczynić się do zwiększenia zrównoważonego wykorzystania zasobów i bioróżnorodności. Uprawy wieloletnie często kolidują z ochroną naturalnych siedlisk, które zastępują. Jednak ich heterogeniczne struktury, obejmujące wiele warstw roślinności, oferują szeroki wachlarz mikro- i makrosiedlisk, które mogą sprzyjać dużej różnorodności, w tym rodzimym gatunkom roślin w okrywie zielnej (na przykład sady jabłoniowe), drzewom dającym cień oraz mieszanym zbiorowiskom gatunkowym. W rezultacie w tych agroekosystemach może współistnieć duża liczba taksonów kręgowców i bezkręgowców [Borek i in. 2023]. Uprawy wieloletnie zajmują grunty przez wiele lat, zapewniając stosunkowo stabilne siedliska w ciągu roku i na przestrzeni lat. W rezultacie różnorodność siedlisk i gatunków można łatwiej utrzymać w systemach upraw wieloletnich niż w systemach upraw polowych. Wiele roślin wieloletnich ma rozległe struktury korzeniowe i dostarcza dużo ściółki, co oznacza, że mogą one zmniejszyć erozję gleby, zwiększyć jej żyzność, zminimalizować wypłukiwanie składników odżywczych i zapewnić stałe siedliska dla wielu gatunków przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej produktywności. Ponadto wieloletnie uprawy drzewiaste mogą pomóc w redukcji emisji gazów cieplarnianych poprzez sekwestrację węgla a także stanowić naturalne korytarze migracyjne. Mogą również stanowić bufor dla obszarów chronionych i innych siedlisk w intensywnie zarządzanych krajobrazach rolniczych.

Zrównoważona produkcja sadownicza (ZPS) jest systemem opartym na zasadach Integrowanej Produkcji Roślin, którego głównym celem jest dostarczenie konsumentom owoców wysokiej jakości, spełniających kryterium „zero pozostałości”. System ten osiąga minimalizację wpływu na środowisko naturalne poprzez racjonalne gospodarowanie nawozami i środkami ochrony, w tym wprowadzanie innowacyjnych technologii, co bezpośrednio przekłada się na długoterminowe korzyści ekonomiczne dla producenta i wzrost akceptacji społecznej dla sektora sadowniczego [Niemczyk 2002]. Należy zwrócić uwagę, że produkty pochodzące z takiej produkcji nie wykazują przekroczeń dopuszczalnych poziomów pozostałości środków ochrony roślin, metali ciężkich, azotanów i innych pierwiastków oraz substancji szkodliwych.

Każda produkcja, również sadownicza generuje produkty odpadowe. To gałęzie i pędy, usunięte w celach pielęgnacyjnych lub sanitarnych, liście a także owoce nie nadające się do sprzedaży, natomiast w przemyśle przetwórczym obierki, pulpa. Mogą być efektywnie wykorzystane w procesach przynoszących zarówno korzyści ekologiczne, jak i finansowe, np. w przemyśle paszowym, fermentacyjnym, w tym w biogazowniach rolniczych, w procesach biotechnologicznych do ekstrakcji cennych związków (np. barwniki, aromaty i pektyny) [Madelä 2022, Klugmann-Radziemska i Januszewicz, 2023].

Cięcia pielęgnacyjne, stanowiące nieodłączny i cykliczny element agrotechniki sadowniczej dla gatunków takich jak jabłoni czy wiśni, generują znaczącą ilość biomasy, której zagospodarowanie jest kluczowe dla zrównoważonego rozwoju. Tradycyjnie stosowane metody obejmują składanie gałęzi na pryzmach, prowadzące często do strat energetycznych i zagrożenia pożarowego poprzez spalanie. Inną możliwością jest rozdrobnienie i pozostawienie w sadzie jako naturalna ściółka będącej źródłem próchnicy, co przyczynia się do poprawy jakości gleby i ograniczenia zachwaszczenia. Alternatywnym i bardziej wartościowym kierunkiem jest wykorzystanie jako źródła energii [Klugmann-Radziemska i Januszewicz 2023]. Pozostałości te mogą być bezpośrednio spalane w odpowiednio przystosowanych kotłach, zarówno w lokalnych instalacjach domowych, jak i w większych kotłowniach, po wcześniejszym zbelowaniu lub rozdrobnieniu do postaci zrębków. Najbardziej zaawansowaną metodą jest przetworzenie zebranych gałęzi w paliwa zagęszczone, czyli brykiety lub pellety. Proces ten znacząco podnosi ich wartość dzięki zwiększeniu gęstości energetycznej i standaryzację wilgotności materiału, umożliwiając wydajne spalanie w kotłach automatycznych z zachowaniem rygorystycznych norm emisyjnych [Chudy i in. 2021].

Celem pracy było wskazanie przykładowych rozwiązań umożliwiających prowadzenie produkcji owoców zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju.

II. MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Dokonano przeglądu dostępnej w bazie Google Scholar literatury z uwzględnieniem obszarów uznanych za istotne dla wyznaczonego celu pracy. Wyszukiwano według słów kluczowych takich jak: zrównoważony rozwój, produkcja owoców i warzyw, sadownictwo, wykorzystanie odpadów, nowe technologie. Analiza wybranych prac wskazała na korzyści w aspekcie założonego kryterium dla rozwoju zrównoważonej produkcji sadowniczej oraz korzyści płynących z zagospodarowania odpadów.

III. WYNIKI I DYSKUSJA

Agroekologia w produkcji sadowniczej

Koncepcje agroekologiczne dobrze wpisują się w gospodarstwa sadownicze, przyczyniając się do ich rozwoju [Dupre i in. 2017]. Konieczność znalezienia systemu produkcji o mniejszym wpływie na środowisko wynika również ze zmiany popytu wśród konsumentów owoców [Bonaventura Forleo i in. 2016]. Podejście to obejmuje wykorzystanie odpornych odmian, np. odmiany o wysokiej odporności na konkretną chorobę grzybową, np. parcha jabłoni wywołanego przez *Venturia inaequalis*, powodującego uszkodzenia i pojawianie się czarnych plam, uszkodzenia skórki i miąższu owoców, a tym samym znaczne obniżenie wielkości produkcji i deprecjację produktu [Antal i in. 2024], wdrożenie mikrodawkowania nawozów i zintegrowanych strategii zarządzania ochroną przed patogenami, szkodnikami i chwastami [Mia i in. 2020]. Uprawa odmian odpornych oznacza tym samym mniejszą potrzebę zabiegów w celu uzyskania produktu o odpowiedniej jakości handlowej. Ponadto w badaniach Mia i in. [2020] stwierdzono, że zintegrowane, mechaniczne metody zwalczania chwastów zwiększyły bioróżnorodność sadów i nie miały

negatywnego wpływu na wzrost drzew, plony i jakość owoców. Jednocześnie w takim systemie produkcji w sadach najwyższe zużycie energii wiąże się z wykorzystaniem maszyn, co wynika ze skali zabiegów agrotechnicznych w celu zastąpienia środków ochrony chemicznej w zwalczaniu chwastów.

Należy podkreślić, że agroekologia kładzie silny nacisk na opłacalność produkcji wysokiej jakości produktów, cenionych przez konsumentów [Varaldo i in. 2022]. Agroekologia to dziedzina interdyscyplinarna, która integruje innowacyjne rozwiązania z ekologicznymi praktykami w systemach rolniczych. Ma duży potencjał ekonomiczny, ponieważ utrzymuje poziom zatrudnienia i zwiększa dochody [van der Ploeg i in. 2019]. Wezel i in. [2009] konceptualizują agroekologię jako dziedzinę o trzech filarach: jako dyscyplinę naukową, ruch społeczny i zbiór praktyk. Te trzy aspekty mają różną wagę w różnych kontekstach: we Francji silnie akcentowana jest praktyka, w Niemczech dyscyplina naukowa, a w Brazylii ruch społeczny. Istnieje potrzeba zintegrowanego rozwoju wszystkich trzech wymiarów dla wdrożenia ich do praktyki rolniczej.

Przykłady rozwiązań dla zrównoważonej produkcji sadowniczej

Rozwój zrównoważonych rozwiązań w zakresie gospodarowania odpadami owocowo-warzywnymi stał się niezwykle ważny. Dlatego też konieczne jest opracowanie technologii, które mogłyby w pełni wykorzystać potencjał tych odpadów i wspierać osiąganie korzyści społecznych, środowiskowych i ekonomicznych. Ponadto, wykorzystanie odpadów owocowo-warzywnych, a zwłaszcza skórek, do opracowywania produktów o wartości dodanej, takich jak folie jadalne, probiotyki, nanocząsteczki, biowęgiel i biosorbenty, będzie ekologicznym i zrównoważonym sposobem na tworzenie nowych możliwości biznesowych, a także na przetwarzanie odpadów do dalszego wykorzystania [Kumar i in. 2020, Kaszuba i Samsonowska 2024]. Ze względu na obecność substancji fenolowych o doskonałych właściwościach przeciwutleniających, skórki owoców i warzyw są uważane za odpowiednie materiały do produkcji powłok jadalnych. Korzystne bioaktywne związki, takie jak alkaloidy, aminokwasy, enzymy, fenole, białka, polisacharydy, garbniki, saponiny, witaminy i terpenoidy oraz inne związki obecne w odpadach owocowych i warzywnych, działają na ogół jako czynniki redukujące w syntezie nanocząstek metali [Ghosh i in. 2017]. W konsekwencji ze względu na ich charakterystyczne właściwości fizykochemiczne znajdują zastosowanie w różnych dziedzinach biomedycyny i farmaceutyki (potwierdzona aktywność przeciwbakteryjna przeciwko *Salmonella* sp., *Escherichia coli*, *Pseudomonas* sp., *Aeromonas hydrophila*; aktywność przeciwgrzybicza przeciwko *Fusarium* sp.; cytotoksyczność wobec ludzkich komórek raka piersi MCF-7) [Naganathan i Thirunavukkarasu 2017]. Odpady rolno-przemysłowe z przemysłu gruszkowego, w tym resztki gruszek, gałązki i zużyte torby papierowe, stanowią obiecujący surowiec do produkcji polihydroksyalkanianów (PHA) w biorafineriach (bioplastiku) ze względu na ich dużą dostępność i potencjał w zakresie łagodzenia problemów związanych z utylizacją odpadów [Sawant i in. 2024].

Produkty uboczne generowane w przetwórstwie owocowo-warzywnym stanowią cenne źródło surowców wtórnych, a ich zagospodarowanie wykracza poza tradycyjne zastosowanie jako nawóz lub pasza dla zwierząt gospodarskich [Grela i in. 2023]. Powszechnie stosowaną metodą jest kompostowanie, które prowadzi do powstania naturalnego i łatwo przyswajalnego nawozu [Żary-Sikorska 2024]. Ponadto, materiały te są wykorzystywane w procesach biotechnologicznych, a zawarte w odpadach węglowodany służą do produkcji alkoholu etylowego i kwasów organicznych (m.in. cytrynowego i mlekowego), a także etanolu i butanolu [Kaszuba i Samsonowska 2024]. Kluczowym kierunkiem jest również odzysk wartościowych substancji bioaktywnych, w tym antocyjanów, związków fenolowych, antyoksydantów, flawonoidów oraz prowitamin i kwasu askorbinowego,

wykorzystywanych np. jako składniki suplementów diety. Wytłoki jabłkowe i gruszkowe są intensywnie wykorzystywane zarówno na cele paszowe (w postaci świeżej lub kiszonki) [Grela i in. 2023], jak i do nawożenia sadów po uprzednim wapnowaniu. Stanowią one również główny surowiec do produkcji pektyn – naturalnych stabilizatorów żeli owocowych – oraz preparatów błonnikowych, a także podłoże do mikrobiologicznego uzyskiwania enzymów. Wytłoki z owoców kolorowych są cenione jako surowiec winiarski i do produkcji naturalnych czerwonych barwników (antocyjanów), a po wysuszeniu mogą służyć jako ekologiczne paliwo [Kawecka i Galus 2021]. Nasiona i pestki są szczególnie cenne. Odpady zawierające nasiona (np. winogron, pomidorów, dyni) są bazą do pozyskania wartościowych olejów, a śruta pozostała po tłoczeniu (bogata w białko) staje się paszą dla drobiu i bydła. Całe pestki mogą być przetwarzane na biopaliwo, stanowić dodatek paszowy lub być wykorzystywane jako wypełnienie poduszek rehabilitacyjnych. Skorupy pestek znajdują zastosowanie w produkcji węgla aktywowanego, wypełniaczy do klejów oraz jako czyszcivo polernicze, natomiast ich jądra pozwalają na produkcję masy percepanowej i benzaldehydu, oddzielanego przez destylację z parą wodną.

W badaniach Sayadi-Gmada i in. [2025] gospodarowanie odpadami roślinnymi wytwarzanymi w gospodarstwach ogrodniczych zostało uznane za kluczową kwestię dla zrównoważonego rozwoju. Autorzy przeanalizowali różne alternatywne systemy, które mogą zagospodarować odpady w sposób bardziej zrównoważony. Uwzględniono ich wpływ na gospodarkę, społeczeństwo i środowisko. Stwierdzono, że zaangażowanie podmiotów w gospodarkę odpadami pozwala osiągnąć zrównoważony rozwój w różnych wymiarach. Jednak nie wszystkie alternatywy są równie skuteczne i mogą występować pewne kompromisy między wynikami ekonomicznymi, środowiskowymi i społecznymi. Rafinowany bioprodukt pochodzący z odpadów z sadów jabłkowych przyczynia się do pokrycia zapotrzebowania na zasoby i energię, obejmując biometan, bioetanol, biopaliwa, bionawozy, biowęgiel oraz biochemikalia, takie jak kwasy organiczne i enzymy [Duan i in. 2021].

Według Martelliego i in. [2023], określenie emisji ciągników sadowniczych /winnicowych może być strategicznym krokiem w kierunku redukcji emisji gazów cieplarnianych w rolnictwie europejskim. Autorzy przeprowadzili ocenę oddziaływania na środowisko ciągnika specjalistycznego do prac sadowniczych, eksploatowanego w Europie, zgodnie ze standardowym podejściem LCA, zdefiniowanym w serii norm ISO 14040. Stwierdzili, że główny udział w emisjach miało spalanie oleju napędowego w fazie użytkowania. Drastyczna redukcja zużycia oleju napędowego została uznana za najlepsze rozwiązanie w celu dekarbonizacji cyklu życia ciągnika sadowniczego. Strategie mające na celu obniżenie zużycia oleju napędowego można podzielić na trzy kategorie: poprawa wydajności silnika i skrzyni biegów, czystsza produkcja oleju napędowego oraz optymalizacja masy pojazdu.

Minimalizowanie zużycia wody w ogrodnictwie przy jednoczesnym utrzymaniu produkcji (w tym plonów i jakości) stało się kwestią krytyczną przy jej deficycie. Ferreira i in. [2024] podkreślili, że innowacyjne praktyki zarządzania i technologie nawadniania mogą usprawnić zarządzanie zużyciem wody. Rozwiązania powszechnie znane w ogrodnictwie jak ściółkowanie, organiczne dodatki, hydrożele i inne zmniejszają zapotrzebowanie na nawadnianie, ale informacje dotyczące ich skuteczności w różnych systemach produkcyjnych i regionach są mało dostępne chociaż obiecujące. Ściółki organiczne, takie jak słoma, kora, wióry drzewne i kompost, poprawiają właściwości fizyczne gleby (np. zmniejszając gęstość objętościową gleby i zwiększając porowatość), sprzyjając infiltracji wody i zwiększając zawartość materii organicznej w glebie, co dodatkowo pomaga w retencji wody [Gholami i in. 2023]. Nowe i recyklingowane źródła wody (np. oczyszczone ścieki, odsalanie) wydają się obiecującymi

sposobami na zmniejszenie zależności od naturalnych zasobów wodnych. Praktyki nawadniania, w tym częściowe osuszanie strefy korzeniowej i regulowane nawadnianie deficytowe, przynoszą znaczące korzyści w zakresie efektywności wykorzystania wody, ale wymagają znacznego doświadczenia w celu skutecznego wdrożenia. Bardziej zaawansowane aplikacje, w tym IoT i AI (np. czujniki, duże zbiory danych, analiza danych), mają udowodniony potencjał we wspieraniu inteligentnego (na podstawie harmonogramowania) i precyzyjnego nawadniania. W metodach zarządzania wodą, takich jak nawadnianie deficytowe, można zastosować kilka form zautomatyzowanych systemów mikronawadniania, w tym nawadnianie kropelkowe [Chachar i in. 2023, Wen i in. 2024]. W nawadnianiu podziemnym woda jest dostarczana do strefy korzeniowej roślin za pomocą systemu rur ułożonych pod warstwą powierzchniową. Ta metoda zmniejsza głębokie przesiąkanie i parowanie gleby oraz poprawia efektywność wykorzystania wody [Guo i in. 2023]. Postęp w dziedzinie ogrodnictwa obejmuje również projektowanie inteligentnych systemów sterowania siecią nawadniania kropelkowego, które mogą monitorować wilgotność gleby, temperaturę powietrza i światło oraz zapewniać sprzężenie zwrotne za pomocą bezprzewodowych sieci czujników [Ferreira i in. 2024].

Nowe możliwości w aspekcie zrównoważonej produkcji sadowniczej mogą być związane z wykorzystaniem rozwiązań Przemysłu 4.0. W produkcji sadowniczej można wdrożyć inteligentny system monitorowania na podstawie Internetu Rzeczy (IoT) z globalnym pakietem usług radiowych (GPRS) i protokołem komunikacyjnym Zigbee do ostrzegania o szkodnikach, konieczności wykonania prac sadzeniowych i kontroli jakości produkcji z pomocą czujników glebowych, meteorologicznych i systemu kamer [Salgado-Salazar i in. 2018]. Aby zmniejszyć stosowanie pestycydów oraz przewidywać pojawienie się szkodników, stworzono system wczesnego ostrzegania [Kumar i in. 2022]. Technologie soft-computing służą do identyfikacji owoców poprzez połączenie trzech podstawowych cech obiektu, tj. koloru, kształtu i tekstury. W rezultacie połączone i znormalizowane cechy obrazu zapewniają lepszą dokładność klasyfikacji [Rajasekar i Sharmila 2019]. Algorytmy sztucznej inteligencji można wdrożyć w ogrodnictwie do różnych zastosowań, w tym wykrywania owoców, szkodników, chorób, chwastów, stresu roślin i przewidywania plonów za pomocą systemu spektroskopii i kamer. Drony z technologią wizyjną i sztuczną inteligencją umożliwiają wykrywanie chwastów i identyfikację etapów wzrostu roślin przed zbiorami, podczas zbiorów i po zbiorach. Drony mogą być wykorzystywane do monitorowania jakości, oceny i klasyfikacji upraw ogrodniczych w celu zminimalizowania uszkodzeń i strat produktu podczas transportu i przechowywania [Singh i in. 2022].

IV. PODSUMOWANIE

Uprawy sadownicze wieloletnie mogą odegrać kluczową rolę w osiągnięciu Celów Zrównoważonego Rozwoju, jeśli będą odpowiednio zarządzane. Należy wykorzystać każdą z możliwości, jakie wnoszą innowacyjne rozwiązania i technologie oraz praktyki, które będą sprzyjać rozwojowi zrównoważonych produkcji oraz optymalnego wykorzystania odpadów. Istnieje potrzeba dalszych badań dotyczących zarówno integracji różnych rozwiązań jak i ich dopasowania do lokalnych warunków środowiskowych, ekonomicznych i społecznych.

BIBLIOGRAFIA

1. Antal G., Szabó S., Szarvas P., Holb I. J. 2024. Yield and cost–benefit analyses for apple scab sanitation practices in integrated and organic apple management systems. *Plants, People, Planet*. 6(2). 470-489.

2. Baima L., Nari L., Nari D., Bossolasco A., Blanc S., Brun F. 2024. Sustainability analysis of apple orchards: Integrating environmental and economic perspectives. *Heliyon*. 10(19). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38397>
3. Bonaventura Forleo M., De Boni A., Di Cesare C., Roma R., Salvatori G. 2016. Conventional and organic food styles in a multidimensional perspective of sustainability. *Italian Review of Agricultural Economics*. 71(1). 347-357.
4. Borek R., Smreczak B., Jędrejek A., Kozak M., Radzikowski P. 2023. Usługi agroekosystemów. W: Usługi ekosystemowe w zarządzaniu układami przyrodniczymi. (red.) M. Stępniewska, A. Mizgajski. Bogucki Wydawnictwo Naukowe Poznań. 41-64.
5. Chachar M., Ahmed S., Murtazac G., Jillanib P.S.A.N.S., Balocha H., Hakroa, R. A. 2023. The Impact of Climate Change on Horticulture: A Global Perspective and Adaptation Strategies. *Global Research in Environment and Sustainability*. 1(10). 19-27.
6. Chudy R., Szulecki K., Siry J., Grala R. 2021. Biomasa drzewna jako surowiec dla energetyki. *ACADEMIA. Magazyn Polskiej Akademii Nauk*. 62-65.
7. Duan Y., Mehariya S., Kumar A., Singh E., Yang J., Kumar S., Kumar Awasthi M. 2021. Apple orchard waste recycling and valorization of valuable product-A review. *Bioengineered*. 12(1). 476–495. <https://doi.org/10.1080/21655979.2021.1872905>.
8. Dupré M., Michels T., Le Gal P. Y. 2017. Diverse dynamics in agroecological transitions on fruit tree farms. *European Journal of Agronomy*. 90. 23-33.
9. Ferreira C. S., Soares P. R., Guilherme R., Vitali G., Boulet A., Harrison M. T., Ferreira A. J. 2024. Sustainable water management in horticulture: problems, premises, and promises. *Horticulturae*. 10(9). 951. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10090951>.
10. Gholami R., Hoveizeh N. F., Zahedi S. M., Arji I. 2023. Effect of organic and synthetic mulches on some morpho-physiological and yield parameters of 'Zard'olive cultivar subjected to three irrigation levels in field conditions. *South African Journal of Botany*. 162. 749-760.
11. Ghosh P. R., Fawcett D., Sharma S. B., Poinern G. E. 2017. Production of high-value nanoparticles via biogenic processes using aquacultural and horticultural food waste. *Materials*. 10(8). 852. <https://doi.org/10.3390/ma10080852>.
12. Grela E. R., Zaworska-Zakrzewska A., Milewski S. 2023. Wartość pokarmowa i przydatność paszowa ubocznych produktów z gospodarstw ekologicznych w żywieniu zwierząt. *Wiadomości Zootechniczne*. R. LXI. 1-2. 38-48.
13. Guo J., Zheng L., Ma J., Li X., Chen R. 2023. Meta-analysis of the effect of subsurface irrigation on crop yield and water productivity. *Sustainability*. 15(22). 15716. <https://doi.org/10.3390/su152215716>.
14. Hueppe R., Zander K. 2024. Perfect apples or sustainable production? Consumer perspectives from Germany. *Journal of Consumer Behaviour*. 23(2). 698-710.
15. Kaszuba A., Samsonowska K. 2024. Sposoby zagospodarowania odpadów z przetwórstwa jabłek. *Przemysł Fermentacyjny i Owocowo-Warzywny*. 6. 26-27.
16. Kawecka L., Galus S. 2021. Wytłoki owocowe–charakterystyka i możliwości zagospodarowania. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*. 1. 156-167.
17. Klugmann-Radziemska E., Januszewicz K. 2023. Metody generowania energii. Napędy i sterowanie. 9. 76-96.
18. Kumar H., Bhardwaj K., Sharma R., Nepovimova E., Kuča K., Dhanjal D. S., Kumar D. 2020. Fruit and vegetable peels: utilization of high value horticultural waste in novel industrial applications. *Molecules*. 25(12). 2812. <https://doi.org/10.3390/molecules25122812>.
19. Kumar M., Pal Y., Gangadharan S.M.P., Chakraborty K., Yadav C. S., Kumar H., Tiwari B. 2022. Apple Sweetness Measurement and Fruit Disease Prediction Using Image Processing

- Techniques Based on Human-Computer Interaction for Industry 4.0. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 1. 5760595. <https://doi.org/10.1155/2022/5760595>.
20. Madela M. 2022. Bioodpady jako biosorbenty w ujęciu gospodarki cyrkulacyjnej. W: *Inżynieria środowiska i biotechnologia wyzwania i nowe technologie*. (red.) A. Rosińska, B. Karwowska, M. Madela. Wyd. Politechniki Częstochowskiej. 175-189.
 21. Martelli S., Mocera F., Somà A. 2023. Carbon footprint of an orchard tractor through a life-cycle assessment approach. *Agriculture*. 13(6). 1210. <https://doi.org/10.3390/agriculture13061210>.
 22. Martinez-Nuñez C., Velado-Alonso E., Avelino J. et al. 2025. Tailored policies for perennial woody crops are crucial to advance sustainable development. *Nature Sustainability*. 8. 133-141. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01483-8>.
 23. Mia M. J., Massetani F., Murri G., Facchi J., Monaci E., Amadio L., Neri D. 2020. Integrated weed management in high density fruit orchards. *Agronomy*. 10(10). 1492. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101492>.
 24. Naganathan K., Thirunavukkarasu S. 2017. Green way genesis of silver nanoparticles using multiple fruit peels waste and its antimicrobial, anti-oxidant and anti-tumor cell line studies. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 191. No. 1. 012009. IOP Publishing.
 25. Niemczyk E. 2002. Jedenaście lat integrowanej produkcji owoców w Polsce. *Progress in Plant Protection*. 42(1). 33-38.
 26. Rajasekar L., Sharmila D. 2019. Performance analysis of soft computing techniques for the automatic classification of fruits dataset. *Soft Computing*. 23(8). 2773-2788.
 27. Salgado-Salazar C., Shiskoff N., Daughtrey M., Palmer C. L., Crouch J. A. 2018. Downy mildew: A serious disease threat to rose health worldwide. *Plant disease*. 102(10). 1873-1882.
 28. Sawant S.S., Bhapkar S.R., Song J., Seo H.J. 2024. Sustainable bioplastics: harnessing pear agro-industrial waste for polyhydroxyalkanoates production: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 21. 7341-7352. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05493-z>.
 29. Sayadi-Gmada S., Parra-López C., Carmona-Torres C., Garcia-Garcia G. 2025. Exploring alternative solutions for sustainable waste management in the horticultural greenhouse sector. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10163-025-02246-z>.
 30. Singh R., Singh R., Gehlot A., Akram S. V., Priyadarshi N., Twala B. 2022. Horticulture 4.0: adoption of industry 4.0 technologies in horticulture for meeting sustainable farming. *Applied Sciences*. 12(24). 12557. <https://doi.org/10.3390/app122412557>.
 31. Van der Ploeg J. D., Barjolle D., Bruil J., Brunori G., Madureira L. M. C., Dessein J., Wezel A. 2019. The economic potential of agroecology: Empirical evidence from Europe. *Journal of Rural Studies*. 71. 46-61.
 32. Varaldo A., Borra D., Vassallo E., Massimelli F., Massaglia S., Merlino V. M. 2022. A study on perceptions towards organic and local production, and individuals' socio-demographic and geographical affiliation influencing fruit and vegetable purchasing preferences of EU households. *Horticulturae*. 8(8). 670. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8080670>.
 33. Wen S., Cui N., Wang Y., Gong D., Xing L., Wu Z., Wang Z. 2024. Optimizing deficit drip irrigation to improve yield, quality, and water productivity of apple in Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*. 296. 108798. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108798>.
 34. Wezel A., Bellon S., Doré T., Francis C., Vallod D., David C. 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for sustainable development*. 29(4). 503-515.
 35. Żary-Sikorska E. 2024. Odpady z przetwórstwa owoców i warzyw-charakterystyka problemu. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*. 19(1.1). 93-106.