

UNIwersytet Zielonogórski

Instytut Inżynierii Mechanicznej

Dziedzina: Nauk Inżynieryjno-Technicznych

Dyscyplina naukowa: Inżynieria Mechaniczna

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Hanna Łosyk

**Modelowanie i ocena poziomu zrównoważonego rozwoju
w przedsiębiorstwach produkcyjnych branży metalowej**

**Modeling and assessment of the level of sustainability
in metal manufacturing companies**

Promotor: *dr hab. inż. Justyna Patalas-Maliszewska prof. UZ*

Pracę akceptuję:

.....

Zielona Góra, 2022

WYKAZ SKRÓTÓW

- AHP- Analytic Hierarchy Process (Hierarchiczna analiza problemów decyzyjnych)
- ANP- Analytic Network Process (Analityczny proces sieciowy)
- BWS- Best-Worst Scaling (Najlepsze i najgorsze skalowanie)
- DT- Decision Tree (Drzewo decyzyjne)
- F-AHP- Fuzzy Analytical Hierarchy Process (Rozmyta hierarchiczna analiza problemów decyzyjnych)
- F-TOPSIS- Fuzzy Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (Rozmyta technika kolejności preferencji poprzez podobieństwo do idealnego rozwiązania)
- GRI- Global Reporting Initiative (Globalna inicjatywa raportowania)
- HSC- Hazardous Substances Centre (Centrum substancji niebezpiecznych)
- IFNs- Intuitionistic fuzzy numbers (Intuicjonistyczne liczby rozmyte)
- IFWA- Intuitionistic fuzzy weighted averaging (Intuicjonistyczne rozmyte uśrednianie ważone)
- KPI- Key Performance Indicators (Kluczowe wskaźniki efektywności)
- LCA - Life Cycle Assesment (Środowiskowa ocena cyklu życia)
- MAUT- Multi Attribute Utility Theory (Teoria użyteczności wielu atrybutów)
- MCDM- Multiple-criteria Decision-Making (Metody wielokryterialne wspomaganie decyzji)
- MCDA- Multi Criteria Decision Analysis (Wielokryterialna analiza decyzyjna)
- SD- Sustainable Development (Zrównoważony rozwój)
- SDG- Sustainable Development Goals (Cele zrównoważonego rozwoju)
- SP- Sustainable Production (Zrównoważona produkcja)
- OZE- Odnawialne źródła energii (Renewable energy sources)
- TFN- Triangular fuzzy numer (Trójkątna liczba rozmyta)
- TBL- Tiple bottom line (Potrójna linia graniczna)
- TOPSIS- Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (Technika kolejności preferencji poprzez podobieństwo do idealnego rozwiązania)
- VSM-Value stream mapping (Mapa strumienia wartości)

Spis treści

1. Wprowadzenie.....	1
1.1. Geneza problemu badawczego.....	1
1.2. Problem badawczy i metody badawcze	2
1.3. Cel i zakres pracy	4
1.4. Hipotezy badawcze.....	5
2. Koncepcja zrównoważonego rozwoju w przedsiębiorstwach produkcyjnych	7
2.1. Cele i wskaźniki zrównoważonego rozwoju	8
2.2. Charakterystyka metod i narzędzi do oceny poziomu ZR	14
2.3. Podsumowanie i wnioski.....	17
3. Zastosowanie metod analizy wielokryterialnej i drzew decyzyjnych w obszarze ZR w przedsiębiorstwach produkcyjnych	19
3.1. Wybrane metody wielokryterialnego wspomagania decyzji.....	19
3.1.1. Wielokryterialna metoda hierarchicznej analizy problemów decyzyjnych	20
3.1.2. Rozmyta wielokryterialna metoda hierarchicznej analizy problemów decyzyjnych	21
3.1.3. Technika kolejności preferencji poprzez podobieństwo do idealnego rozwiązania ..	23
3.1.4. Rozmyta technika kolejności preferencji poprzez podobieństwo do idealnego rozwiązania.....	25
3.2. Zastosowanie drzew decyzyjnych w obszarze ZR.....	29
3.3. Podsumowanie i wnioski.....	35
4. Metoda oceny poziomu ZR dla przedsiębiorstw produkcyjnych z branży metalowej MŚP.....	39
4.1. Wartości wskaźników ZR w przedsiębiorstwach produkcyjnych branży metalowej MŚP... ..	42
4.1.1. Model referencyjny	42
4.1.2. Zdefiniowanie obszarów aktywności dla ZR w przedsiębiorstwach produkcyjnych .	42
4.1.3. Zdefiniowanie celów i wskaźników ZR dla przedsiębiorstw produkcyjnych z branży metalowej	43
4.1.4. Zastosowanie wybranych metod analizy wielokryterialnej do wyznaczenia kluczowych wskaźników ZR.....	44
4.1.5. Badania empiryczne w przedsiębiorstwach zgodnych z modelem referencyjnym	62
4.2. Model wspomagający podejmowanie decyzji w obszarze ZR.....	76
4.2.1. Model oceny zrównoważonego rozwoju za pomocą drzew decyzyjnych	76

4.2.2. Opracowanie scenariuszy działań wspomagających realizację celów ZR	79
4.3. Predykcja działań skierowanych na wzrost poziomu ZR.....	83
4.3.1. Ocena poziomu ZR w wybranych przedsiębiorstwach produkcyjnych	83
4.3.2. Rekomendacje działań dla menadżerów przedsiębiorstw produkcyjnych	83
4.4 Metodyka oceny poziomu ZR	93
4.5. Podsumowanie i wnioski.....	94
5. Weryfikacja metodyki do oceny poziomu zrównoważonego rozwoju w przedsiębiorstwie zgodnym z modelem referencyjnym	97
5.1. Charakterystyka przedsiębiorstwa produkcyjnego sektora MŚP branży metalowej.....	97
5.2. Zastosowanie metodyki oceny poziomu ZR w rzeczywistym przedsiębiorstwie produkcyjnym.....	103
5.2.1. Metodyka oceny poziomu ZR dla wybranych wyrobów	103
5.2.2. Zgromadzenie danych: wartości wskaźników ZR.....	107
5.2.3. Budowa scenariuszy działań skierowanych na wzrost poziomu ZR za pomocą modelu drzew decyzyjnych.....	110
5.3. Podsumowanie i wnioski.....	117
6. Wnioski końcowe i kierunki dalszych prac.....	119
Literatura	121
Spis rysunków	130
Spis tabel	133
Załącznik nr 1. Kwestionariusz ankiety na temat poziomu realizacji koncepcji ZR w organizacji	135
Załącznik nr 2. Wyniki badań uzyskane z kwestionariuszy ankiet.....	141

Streszczenie

W pracy podjęto próbę opracowania metodyki oceny zrównoważonego rozwoju dla przedsiębiorstw produkcyjnych sektora małych i średnich przedsiębiorstw z branży metalowej. Wskazuje się bowiem, że dotychczasowe działania prowadzone w zakresie realizowania koncepcji zrównoważonego rozwoju koncentrują się wyłącznie na trzech tradycyjnych jego wymiarach: środowiskowym, społecznym i ekonomicznym. Poszukuje się zatem kompleksowej metodyki w zakresie zrównoważonego rozwoju, która uwzględniałaby specyfikę procesów produkcyjnych oraz wspierała proces wdrożenia i realizacji własnych zrównoważonych strategii działania. Potrzeba wdrożenia narzędzi do oceny poziomu zrównoważonego rozwoju wynika głównie z nacisku na przedsiębiorstwa produkcyjne oraz ścisłych wymagań prawnych w zakresie prowadzonych praktyk produkcyjnych w aspekcie ochrony środowiska naturalnego i dób społecznych. Praca składa się z sześciu głównych rozdziałów.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie. W rozdziale tym wskazano genezę problemu badawczego, przedstawiono problem badawczy i metody badawcze, zdefiniowano cel i zakres pracy, a także postawiono hipotezy badawcze.

Rozdział drugi stanowi opracowanie dostępnej literatury przedmiotu w zakresie koncepcji zrównoważonego rozwoju w przedsiębiorstwach produkcyjnych. Dokonano analizy literatury w zakresie celów i wskaźników zrównoważonego rozwoju oraz przedstawiono charakterystykę metod i narzędzi do oceny poziomu zrównoważonego rozwoju.

Rozdział trzeci przedstawia krytyczną analizę literatury w zakresie zastosowania metod analizy wielokryterialnej. W rozdziale tym omówiono możliwości zastosowania drzew decyzyjnych w obszarze zrównoważonego rozwoju w przedsiębiorstwach produkcyjnych. Dokonano również doboru odpowiedniej metody do dalszych prac badawczych oraz przeprowadzono charakterystykę algorytmów budowania drzew decyzyjnych.

W rozdziale czwartym opracowano metodę oceny poziomu zrównoważonego rozwoju dla przedsiębiorstw produkcyjnych z branży metalowej, zbudowaną z następujących elementów: (1) wartości wskaźników zrównoważonego rozwoju w przedsiębiorstwach produkcyjnych branży metalowej sektora małych i średnich przedsiębiorstw, (2) model wspomagający podejmowanie decyzji w obszarze zrównoważonego rozwoju (3) predykcja scenariuszy działań prowadzących do poprawy poziomu zrównoważonego poziomu. W podrozdziałach rozdziału szczegółowo opisano poszczególne etapy metodyki.

Rozdział piąty stanowi weryfikację autorskiej metodyki do oceny poziomu zrównoważonego rozwoju w przedsiębiorstwie zgodnym z modelem referencyjnym. W tej części pracy przeprowadzono weryfikację opracowanego modelu poprzez wdrożenie rozwiązania w polskim przedsiębiorstwie produkcyjnym branży metalowej. Efektem końcowym wdrożenia było określenie poziomu zrównoważonego rozwoju w badanym przedsiębiorstwie produkcyjnym oraz wskazanie rekomendacji dla menadżera.

Rozdział szósty stanowi podsumowanie pracy. W rozdziale wskazano także planowane kierunki dalszych prac.

Słowa kluczowe: poziom i ocena zrównoważonego rozwoju, przedsiębiorstwo produkcyjne, sektor MŚP, branża metalowa, analiza wielokryterialna, drzewa decyzyjne, metoda oceny zrównoważonego rozwoju.

Abstract

The paper attempted to develop a methodology for assessing sustainable development for manufacturing companies of small and medium-sized in the metal industry. It is pointed out that the existing activities carried out in the field of implementing the concept of sustainable development focus only on three traditional dimensions: environmental, social and economic. Therefore, a comprehensive methodology in the field of sustainable development is being sought, which would take into account the specificity of production processes and support the process of developing and implementing our own sustainable strategies. The need to implement tools to assess the level of sustainability is mainly due to the emphasis on manufacturing companies and strict legal requirements for production practices. The work consists of six main chapters.

The first chapter is an introduction. This chapter indicates the genesis of the research problem, presents the research problem and research methods, defines the purpose and scope of work, and puts forward research hypotheses.

The second chapter is the development of the available literature on the concept of sustainable development in manufacturing enterprises. An analysis of the literature on sustainable development objectives and indicators was carried out and the characteristics of methods and tools for assessing the level of Sustainable Development were presented.

The third chapter presents a critical analysis of the literature on the application of multi-criteria analysis methods and discusses the possibilities of using decision trees in the area of sustainable development in manufacturing enterprises.

The fourth chapter builds a method for assessing the level of sustainable development for manufacturing companies in the metal industry, built from the following elements: (1) values of Sustainable Development indicators in manufacturing companies of small and medium-sized in the metal industry, (2) a model supporting decision-making in the area of Sustainable Development (3) prediction of scenarios of activities leading to an improvement in the level of Sustainable Development. The subsections of the chapter describe in detail the individual stages of the methodology.

The fifth chapter is a verification of the author's methodology for assessing the level of sustainable development in a company in accordance with the reference model. In this part of the work, the developed model was verified thanks to the implementation of the solution in a Polish metal manufacturing company. The final effect of the implementation was to determine the level of sustainable development in the examined company and to indicate recommendations for the manager.

Chapter six is a summary of the work. The chapter also indicates the planned directions of further work.

Keywords: level of sustainable development and sustainability assessment, manufacturing company, SME sector, metal industry, multi-criteria analysis methods, decision tree, method of assessing sustainable development.

1. Wprowadzenie

1.1. Geneza problemu badawczego

Rozwój cywilizacyjny XXI wieku, związany z dynamicznym wzrostem produkcji przemysłowej oraz wzrostem liczby ludności, spowodował ogromne zmiany w przyrodzie i zasobach naturalnych. Branża produkcji wyrobów metalowych jest liderem w przemyśle w zapotrzebowaniu na energię elektryczną oraz surowce i materiały wykorzystywane w procesach produkcyjnych. Niezbędne jest, więc wprowadzanie zmian, zarówno na poziomie lokalnym, jak i globalnym, które pozwolą na zmniejszenie negatywnego oddziaływania gospodarek na środowisko przyrodnicze, przy jednoczesnej możliwości czerpania korzyści ze wzrostu gospodarczego. Odpowiedzią na potrzebę prowadzenia zintegrowanych działań w obszarze gospodarczym, społecznym i środowiskowym jest koncepcja definiowana jako Sustainable Development (*dalej skrót: SD*), tj. zrównoważony rozwój (*dalej skrót: ZR*).

Koncepcja ZR pojawiła się już na początku lat 70. XX wieku. Podejście to zakłada dążenie do zharmonizowanego rozwoju społeczno-ekonomicznego z dbałością o środowisko naturalne. ZR można zdefiniować jako „rozwój, w którym potrzeby obecnego pokolenia mogą być zaspokojone bez umniejszania szans przyszłych pokoleń na ich zaspokojenie” (Ministerstwo Rozwoju i Technologii). Nadrzędnym celem ZR jest realizacja celów ekonomicznych, środowiskowych i społecznych, nazywanych potrójną linią dolną (*dalej skrót: TBL*), filary zrównoważonego rozwoju czy też 3P - zysk, planeta, ludzie (Kaldas i in., 2020).

Przedstawione dane w raporcie zrównoważonego rozwoju (SDG) z 2020 roku wskazują, że w Polsce tylko ok. 10% materiałów zużywanych rocznie w procesach produkcyjnych stanowią te, które zostały odzyskane i wprowadzone powtórnie do obiegu gospodarki. Natomiast średnio w Unii Europejskiej odsetek ten jest nieco wyższy i wynosi ok. 12% (Raport SDG, 2020). W konsekwencji nadrzędnym zadaniem europejskich producentów stała się konieczność promowania i wytwarzania produktów oraz procesów produkcyjnych, przy minimalizowaniu negatywnego wpływu na środowisku i przy jednoczesnym zachowaniu dobrobytu społecznego i ekonomicznego (Eslami i in., 2019). Przedsiębiorstwa produkcyjne stoją, więc przed wyzwaniem zaplanowania i przyjęcia nowych strategii działania, takich jak ZR, aby skutecznie reagować na potrzeby współczesnego rynku i zapotrzebowanie klientów na zrównoważone produkty.

Wskazuje się, że ilość surowców wymagana do zaspokojenia światowej konsumpcji w ciągu roku (ślad materiałowy) wynosi 92 mld ton, a faktyczne zużycie materiałów (konsumpcja

materialna) jest zbliżone do tej wartości (Raport SDG, 2020). Europejski sektor produkcyjny jest odpowiedzialny za zużycie surowców naturalnych, mimo iż odgrywa kluczową rolę społeczną w zakresie tworzenia miejsc pracy.

Realizacja założeń koncepcji ZR staje się zatem kluczowym wymogiem dla europejskich producentów ze względu na coraz bardziej rygorystyczne przepisy prawa w zakresie produkcji oraz rosnącą świadomość klientów dotyczących produktów (Swarnakar i in., 2020); (Swarnakar i in., 2021). Analiza literatury (Elsami i in., 2018); (Kumar i Mani, 2021) wykazała, że dotychczasowe prowadzone i proponowane działania w zakresie realizowania koncepcji ZR skupiały się głównie na trzech tradycyjnych jego wymiarach: środowiskowym, ekonomicznym i społecznym. Brak jest szczegółowego spojrzenia na te wymiary w aspekcie procesów produkcyjnych, które pomogłyby przedsiębiorstwom produkcyjnym nakreślić własne zrównoważone strategie działania.

Wskazuje się, że głównym problemem w zakresie ZR jest brak sformułowanych kompleksowych ram oceny zrównoważonego rozwoju dla przedsiębiorstw produkcyjnych, które obejmują potrójny wynik końcowy wraz z całkowitymi etapami cyklu życia (Kaldas i in., 2020). Jest to szczególnie istotna kwestia, gdyż organizacje stają w obliczu coraz silniejszej presji zmiany tradycyjnych modeli produkcji na zrównoważoną, co wzmacnia potrzebę oceny ich wyników pod kątem realizacji celów ZR.

1.2. Problem badawczy i metody badawcze

Analiza literatury wskazuje lukę w zakresie kompleksowego i praktycznego narzędzia wspomagającego realizację, monitorowanie i ocenę stopnia osiągnięcia celów ZR przez przedsiębiorstwa produkcyjne. Mimo wsparcia zaangażowania przedsiębiorstw w realizację celów ZR za pomocą takich zasobów jak Kompas celów ZR (GRI, 2015), branżowa matryca celów ZR (KPMG International, 2015), wskaźniki celów ZR (UN, 2020), to wciąż trudno jest określić cele, do których się przyczyniają bezpośrednio i pośrednio. Wskazuje się bowiem, że spośród 250 największych przedsiębiorstw na świecie mniej niż połowa (43%) powiązała swoje działania w zakresie społecznej odpowiedzialności biznesu z celami ZR w 2017 roku (Hatayama, 2022). Najniższy odsetek takich powiązań wykazano m.in. w branży produkcji metali (30%) oraz ropy i gazu (27%). Przemysł metalowy stanowi także źródło negatywnych skutków społecznych i środowiskowych w łańcuchu dostaw. Dyskusyjnym tematem w tym zakresie jest konieczność redukcji emisji CO₂ w przemyśle metalowym ze względu na wysoko energochłonny proces produkcji (Pauliuk i Heeren, 2021).

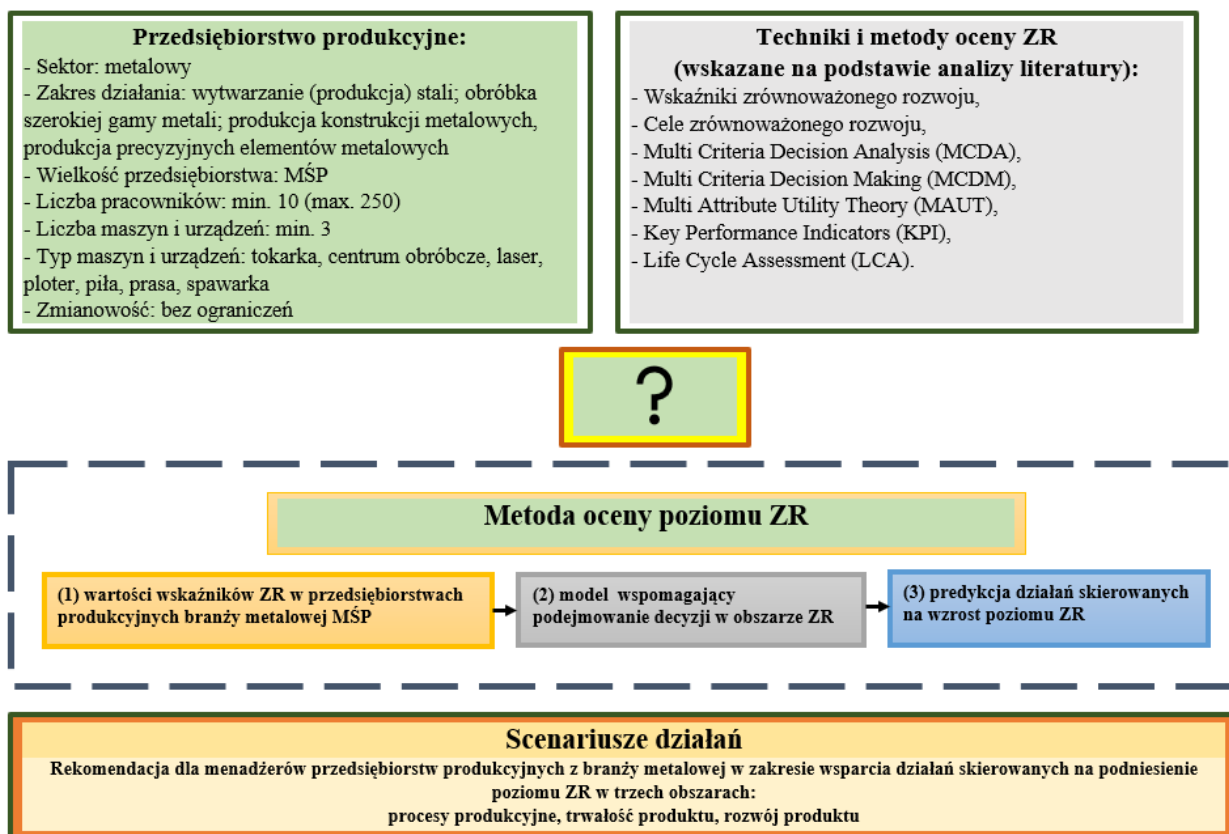
Branża metalowa stanowi kluczową rolę gałęzi przemysłu. W województwie lubuskim przemysł metalowy był zawsze ważną częścią potencjału gospodarczego, a jego aktualny potencjał jest nadal istotny. Zasadne wydaje się, więc podjęcie działań adresowanych do przedsiębiorstw produkcyjnych branży metalowej w zakresie wsparcia realizacji celów ZR.

Z jednej strony istnieje przedsiębiorstwo produkcyjne z branży metalowej z sektora MŚP realizujące procesy typu wytwarzanie (produkcja) stali, obróbka szerokiej gamy metali, produkcja konstrukcji metalowych, produkcja precyzyjnych elementów metalowych.

Z drugiej istnieją techniki i metody oceny poziomu ZR w danych przedsiębiorstwach, jednakże stanowią one ogólne wytyczne, nie wskazując możliwości działania, a jedynie ramy.

Przedsiębiorstwa produkcyjne wciąż stoją przed wyzwaniami związanymi z oceną zrównoważonego rozwoju w realizowanych procesach produkcyjnych (Swarnakar i in., 2021). Poszukiwana jest, zatem metoda oceny poziomu ZR w obszarach charakterystycznych dla przedsiębiorstw produkcyjnych takich jak: procesy produkcyjne, trwałość produktu, rozwój produktu oraz scenariuszy działań pozwalających na poprawę poziomu ZR.

Rys.1. przedstawia w formie graficznej postawiony przez autorkę problem badawczy niniejszej rozprawy.



Rys. 1. Problem badawczy

1.3. Cel i zakres pracy

W pracy cel główny zdefiniowano następująco:

Opracowanie metody oceny poziomu zrównoważonego rozwoju dla przedsiębiorstw produkcyjnych branży metalowej.

W pracy postawiono także następujące cele szczegółowe:

- 1) Przeprowadzenie analizy literatury przedmiotu w obszarze ZR w przedsiębiorstwach produkcyjnych.
- 2) Przeprowadzenie analizy literatury przedmiotu w obszarze metod i narzędzi do oceny poziomu ZR w przedsiębiorstwach produkcyjnych.
- 3) Przeprowadzenie analizy literatury w obszarze metod analizy wielokryterialnej stosowanych do oceny poziomu ZR.
- 4) Zbudowanie modelu referencyjnego dla przedsiębiorstwa produkcyjnego z branży metalowej.
- 5) Zbudowanie metody oceny poziomu ZR dla przedsiębiorstw produkcyjnych z branży metalowej z sektora MŚP.
- 6) Opracowanie metodyki oceny poziomu ZR dla przedsiębiorstw produkcyjnych z branży metalowej z sektora MŚP.
- 7) Przeprowadzenie badań empirycznych w Polsce zachodniej dla przedsiębiorstw produkcyjnych z branży metalowej z sektora MŚP.
- 8) Weryfikacja proponowanej metody w rzeczywistym przedsiębiorstwie produkcyjnym z branży metalowej zgodnym z modelem referencyjnym.
- 9) Sformułowanie rekomendacji dla menadżerów produkcji w obszarze podniesienia poziomu ZR.

Zakres pracy w pierwszych jej etapach obejmował analizę aktualnej literatury przedmiotu w zakresie ZR i metod jego oceny w przedsiębiorstwach produkcyjnych. Etap ten pozwolił na przegląd dostępnych rozwiązań, a tym samym na wyznaczenie luki badawczej. Analiza literatury stanowiła podstawę do zdefiniowania obszarów ZR oraz przypisania im celów i wskaźników charakterystycznych dla przedsiębiorstw produkcyjnych. Kolejnym krokiem w pracy był wybór odpowiednich metod wielokryterialnych wspomagania decyzji (*dalej skrót: MCDM*) umożliwiających wyznaczenie kluczowych celów dla przedsiębiorstw produkcyjnych. Autorka pracy po przeglądzie dostępnych metod MCDM wybrała metodę Analytic Hierarchy Process (*dalej skrót: AHP*) oraz metodę Fuzzy Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (*dalej skrót: F-TOPSIS*). Następnie przeprowadzono badania empiryczne w przedsiębiorstwach produkcyjnych z branży metalowej zgodnych z modelem referencyjnym.

Wyniki uzyskane w toku przeprowadzonych badań pozwoliły na zbudowanie modelu oceny poziomu ZR za pomocą drzew decyzyjnych. W oparciu o zbudowany model oceny poziomu ZR opracowano, a następnie przypisano scenariusze działań dla zdefiniowanych celów ZR. Ostatni etap pracy stanowił weryfikację proponowanego modelu poprzez jego implementację w rzeczywistym przedsiębiorstwie zgodnym z przyjętym modelem referencyjnym.

Zakres niniejszej pracy obejmuje zatem następujące działania:

- 1) Zdefiniowanie obszarów ZR w przedsiębiorstwach produkcyjnych.
- 2) Zdefiniowanie celów ZR dla przedsiębiorstw produkcyjnych na podstawie analizy literatury przedmiotu.
- 3) Przypisanie wskaźników ZR dla przedsiębiorstw produkcyjnych.
- 4) Określenie docelowej grupy oraz budowa modelu referencyjnego: przedsiębiorstwa produkcyjne z branży metalowej.
- 5) Wybór wielokryterialnej metody wspomagania decyzji do wyznaczenia kluczowych celów i wskaźników ZR dla przedsiębiorstw zgodnych z modelem referencyjnym.
- 6) Zastosowanie metody AHP w celu wyznaczenia kluczowych celów i wskaźników ZR dla przedsiębiorstw zgodnych z modelem referencyjnym.
- 7) Zastosowanie metody F-TOPSIS i operatora IFWA w celu wyznaczenia kluczowych celów i wskaźników ZR dla przedsiębiorstw zgodnych z modelem referencyjnym.
- 8) Przeprowadzenie badań empirycznych w przedsiębiorstwach zgodnych z modelem referencyjnym.
- 9) Budowa modelu oceny poziomu ZR przy zastosowaniu drzew decyzyjnych dla przedsiębiorstw zgodnych z modelem referencyjnym.
- 10) Opracowanie scenariuszy działań wspomagających realizację celów ZR w przedsiębiorstwach zgodnych z modelem referencyjnym.
- 11) Weryfikacja proponowanej metody oceny ZR poprzez jego implementację w rzeczywistym przedsiębiorstwie zgodnym z modelem referencyjnym.

1.4. Hipotezy badawcze

Analiza literatury przedmiotu, postawiony problem badawczy oraz opracowana metodyka oceny poziomu ZR w przedsiębiorstwach produkcyjnych zakładają weryfikację postawionych w pracy hipotez badawczych:

- 1) Implementacja wielokryterialnych metod wspomagania decyzji gwarantuje wyznaczenie kluczowych celów i wskaźników ZR, których zastosowanie umożliwia ocenę poziomu zrównoważonego rozwoju w przedsiębiorstwach sektora MŚP branży metalowej.

- 2) Zastosowanie drzew decyzyjnych pozwala na zbudowanie prognozy działań skierowanych na uzyskanie poprawy poziomu ZR w przedsiębiorstwach sektora MŚP branży metalowej.

2. Koncepcja zrównoważonego rozwoju w przedsiębiorstwach produkcyjnych

Realizacja i osiągnięcie celów ZR w przedsiębiorstwach produkcyjnych polega na zwiększeniu produktywności poprzez minimalizację zużycia zasobów i emisji odpadów, promowaniu idei racjonalnej i świadomej konsumpcji, a także na ochronie środowiska naturalnego (Zalewska, 2015). Wskazuje się, że integracja produkcji i ZR pozwala na zbudowanie skutecznej i wydajnej infrastruktury przemysłu, skierowanej na wzrost odpowiedzialności społecznej, świadomości środowiskowej i konkurencyjności gospodarczej (Nagarajan i in., 2018), jednakże warunkiem do osiągnięcia zrównoważonych decyzji produkcyjnych jest zachowanie równowagi między trzema niezależnymi i współlistniejącymi filarami ZR: środowiskowym, ekonomicznym i społecznym (Haapala i in., 2013). Sektor produkcyjny musi zrozumieć swój wkład w skutki wybiegające poza produkcję i skupić się na wdrożeniu nowych, efektywnych praktyk produkcyjnych. Zrównoważone praktyki produkcyjne definiowane jako Sustainable Production (*dalej skrót: SP*), tj. zrównoważona produkcja (*dalej skrót: ZP*) to tworzenie produktów wytwarzanych za pomocą ekonomicznie uzasadnionych procesów, które minimalizują negatywny wpływ na środowisko, jednocześnie oszczędzając energię i zasoby pracowników. ZP nie stanowi zatem zamkniętych ram ograniczonych wyłącznie na ochronę środowiska, zakres jej obejmuje także działania skierowane na wzrost poziomu bezpieczeństwa pracowników, społeczności i procesu (Kulatunga i in., 2015).

W procesie adaptacji koncepcji ZR niezbędne jest planowanie i podejmowanie decyzji już na etapie projektowania i rozwoju produktu, ponieważ wskazuje się, że 80% decyzji wpływających na jej realizację jest podejmowanych już na etapie projektowania i rozwoju produktu (Kulatunga i in., 2015).

Propozycje ram oceny ZR w przedsiębiorstwach produkcyjnych można odnaleźć w literaturze przedmiotu. Singh i in. (Singh i in., 2016) w swojej pracy przedstawili propozycję wskaźnika trwałości dla przemysłu stalowego. Natomiast Swarnakar i in. (Swarnakar i in., 2021) przedstawiają koncepcję metody oceny zrównoważonych procesów produkcyjnych opartych na włączeniu nowej grupy wskaźników ZR do procesu mapowania strumienia wartości. Shang i in. (Shang i in., 2021) opracowali narzędzie do prognozowania zużycia energii w wirtualnym procesie produkcyjnym z uwzględnieniem śladu węglowego i kompleksowych kosztów procesów. Proponowane rozwiązanie skierowane jest na poprawę

trwałości narzędzi obróbki skrawaniem. Kulatunga i in. (Kulatunga i in., 2015) przedstawiają propozycję modelu wspomagania ZP w oparciu o koncepcje środowiskowej oceny cyklu życia (*dalej skrót: LCA*) i EcoDesign, podkreślając, że pożądaną wydajność produktu można uzyskać poprzez odpowiednie planowanie na etapie projektowania i rozwoju produktu. Natomiast w pracy (Ndubisi i in., 2021) zdefiniowano czynniki wpływające na wyniki środowiskowe, społeczne i finansowe przedsiębiorstw dla MŚP w sektorze wytwórczym, które przyczyniają się do realizacji założeń ZR.

2.1. Cele i wskaźniki zrównoważonego rozwoju

Globalne cele ZR znaleźć można m.in. w międzynarodowym wzorcu raportowania odpowiedzialnego biznesu i zrównoważonego rozwoju dla firm Global Reporting Initiative (GRI). Opracowania GRI, takie jak (GRI, 2016) wskazują wytyczne dla firm w zakresie sprawozdawczości realizacji celów ZR. „Wytyczne G4 zawierają globalne wskazówki dotyczące standardowego podejścia do raportowania, promując przejrzystość i spójność informacji, które są niezbędne dla uzyskania przydatnych i wiarygodnych treści dla rynku jak i społeczeństwa” (GRI, 2016). W Tab.1. przedstawiono cele i wskaźniki ZR w trzech jego wymiarach ZR: ekonomicznym, środowiskowym i społecznym.

Tabela 1. Cele i wskaźniki ZR w wybranych jego wymiarach wg wytycznych GRI (źródło: opracowanie własne na podstawie: GRI, 2016)

Wymiary ZR	Cele ZR	Wskaźniki ZR
Ekonomiczny	Dobre wyniki ekonomiczne	– bezpośrednia wartość ekonomiczna wytworzona i podzielona, – implikacje finansowe i inne ryzyka oraz szanse dla działań organizacji wynikające ze zmian klimatycznych, – pomoc finansowa uzyskana od państwa.
	Stabilna pozycja na rynku	– stosunek wynagrodzenia pracowników najniższego szczebla w podziale na płęć w stosunku do płacy minimalnej na danym rynku w głównych lokalizacjach prowadzenia działalności, – odsetek osób pochodzących z lokalnej społeczności na wyższych stanowiskach kierowniczych w głównych lokalizacjach prowadzenia działalności

	Pośredni wpływ ekonomiczny	– rozwój oraz wpływ inwestycji w infrastrukturę i usługi, – znaczący pośredni wpływ ekonomiczny, w tym skala tego wpływu,
	Uczciwe praktyki handlowe	– odsetek wydatków na lokalnych dostawców w głównych lokalizacjach prowadzenia działalności.
Środowiskowy	Racjonalne materiały/surowce	– wykorzystywane materiały/surowce wg masy lub objętości (stosowane materiały/surowce nieodnawialne; stosowane materiały surowce odnawialne), – procent wykorzystywanych materiałów, które stanowią przetworzone materiały początkowe.
	Spadek zużycia energii	– zużycie energii wewnątrz organizacji, – zużycie energii na zewnątrz organizacji, – intensywność zużycia energii, – zmniejszenie zużycia energii.
	Spadek zużycia wody	– całkowity pobór wody według źródła, – procent oraz całkowita objętość wody przetwarzanej i ponownie wykorzystywanej.
	Bioróżnorodność	– opis znaczącego wpływu działań, produktów i usług na bioróżnorodność na obszarach chronionych i obszarach o dużej wartości pod względem bioróżnorodności znajdujących się poza obszarami chronionymi.
	Redukcja emisji	– bezpośrednie emisje gazów cieplarnianych, – pośrednie emisje gazów cieplarnianych, – intensywność emisji gazów cieplarnianych, – emisje tlenków azotu, tlenków siarki i innych znaczących emisji do powietrza.
	Odpowiedzialne zarządzanie ściekami i odpadami	– całkowita waga odpadów według rodzaju odpadu oraz metody postępowania z odpadem, – waga transportowanych, importowanych, eksportowanych lub przetworzonych odpadów uznanych za niebezpieczne.
	Zrównoważone produkty i usługi	– stopień ograniczenia oddziaływania produktów i usług na środowisko,

		– procent odzyskanych materiałów ze sprzedawanych produktów i ich opakowań, według kategorii materiału,
	Zgodność z regulacjami	– kwota istotnych kar oraz całkowita liczba sankcji pozafinansowych z tytułu nieprzestrzegania prawa i regulacji dotyczących ochrony środowiska.
	Odpowiedzialny transport	– znaczący wpływ transportu produktów i innych towarów potrzebnych do prowadzenia przez organizację działalności oraz transportu pracowników na środowisko.
	Zrównoważeni dostawcy	– procent nowych dostawców, którzy zostali dobrani pod kątem spełnienia kryteriów środowiskowych, – znaczący rzeczywisty i potencjalnie negatywny wpływ na środowisko w łańcuchu dostaw oraz podjęte działania.
	Mechanizmy skargowe dotyczące kwestii środowiskowych	– liczba skarg dotyczących wpływu na środowisko złożonych, rozpatrzonych i rozwiązanych w ramach formalnych mechanizmów skargowych.
Spoleczna Podkategoria: Praktyki zatrudniania i godnej pracy	Godne zatrudnienie	– całkowita liczba i wskaźniki zatrudnienia nowych pracowników oraz rotacji pracowników w podziale na grupy wiekowe, płeć i region, – wskaźniki powrotu do pracy i utrzymania zatrudnienia po urlopie macierzyńskim/ tacierzyńskim w podziale na płeć.
	Dobre stosunki pomiędzy pracownikami a kadrą zarządzającą	– minimalne okresy wypowiedzenia w związku ze zmianami operacyjnymi, z uwzględnieniem informacji, czy są one określone w umowach zbiorowych.
	Wysoki standard bezpieczeństwa i higieny pracy	– rodzaj urazów oraz wskaźnik urazów, chorób zawodowych, dni straconych i nieobecności w pracy oraz wypadków śmiertelnych związanych z pracą, z podziałem na regiony i płeć, – kwestie bezpieczeństwa i higieny pracy uwzględnione w formalnych porozumieniach zawartych ze związkami zawodowymi.

	Rozwój pracowników	– średnia liczba godzin szkoleniowych w roku przypadająca na pracownika w podziale na płeć oraz na kategorię pracowników, – programy rozwoju umiejętności menedżerskich i kształcenia ustawicznego, które wspierają ciągłość zatrudnienia pracowników oraz ułatwiają zarządzanie końcem kariery zawodowej.
	Różnorodność i równość szans	– skład ciał zarządzających i kadry pracowniczej w podziale na kategorie według płci, wieku, przynależności do mniejszości oraz innych wskaźników różnorodności.
	Równość wynagrodzenia kobiet i mężczyzn	– stosunek pensji podstawowej i wynagrodzenia kobiet i mężczyzn w podziale na kategorie pracowników i główne lokalizacje prowadzenia działalności.
	Brak dyskryminacji	– całkowita liczba przypadków dyskryminacji (incydentów o charakterze dyskryminacyjnym) i podjętych działań naprawczych.
	Wzrost udziału praktyk w zakresie bezpieczeństwa	– procent personelu ochrony przeszkolonego w zakresie obowiązujących w organizacji polityk lub procedur związanych z prawami człowieka.
Spoleczna Podkategoria Spoleczeństwo	Brak korupcji	– komunikacja i szkolenia poświęcone politykom i procedurom antykorupcyjnym.
	Zachowania antykonkurencyjne	– całkowita liczba podjętych wobec organizacji kroków prawnych dotyczących przypadków naruszeń zasad wolnej konkurencji, praktyk monopolistycznych oraz ich skutki.
	Zgodność z regulacjami	– kwota istotnych kar oraz całkowita liczba sankcji pozafinansowych z tytułu niezgodności z prawem i regulacjami.
Spoleczna Podkategoria	Zdrowie i bezpieczeństwo klientów	– procent istotnych kategorii produktów i usług, w przypadku których poddaje się ocenie ich wpływ na zdrowie i bezpieczeństwo w celu poprawy wskaźników.

Odpowiedzialność za produkt	Znakowanie produktów i usług	– rodzaj informacji o produktach i usługach wymaganych na mocy procedur organizacji oraz procent istotnych kategorii produktów i usług podlegających takim wymogom – wyniki badań pomiaru satysfakcji klientów.
	Zrównoważona komunikacja marketingowa	– sprzedaż produktów zakazanych lub wywołujących kontrowersje.
	Prywatność klienta na wysokim poziomie	– całkowita liczba uzasadnionych skarg dotyczących naruszenia prywatności klienta i utraty danych klientów.

Tab. 1 została zbudowana z trzech kolumn: kategoria, aspekty, wskaźniki. Do poszczególnych aspektów przypisano wskaźniki stanowiące informacje na temat ekonomicznych, środowiskowych i społecznych wyników lub oddziaływania organizacji w danym aspekcie (GRI, 2016). Wskazania GRI mogą stanowić ramy dla przedsiębiorstw do wyznaczenia własnych celów i wskaźników ZR charakterystycznych dla danej branży z uwzględnieniem globalnych standardów.

Przegląd literatury pozwolił na wyznaczenie wskaźników ZR w trzech jego wymiarach charakterystycznych dla sektora produkcji:

- 1) wymiar ekonomiczny, obejmujący działania związane z produkcją, dystrybucją, dostawą i konsumpcją (Chang i Cheng, 2019). Do wskaźników ZR w aspekcie ekonomicznym należą m.in. (Erol i in., 2011); (Lee i Saen 2012); (Swarnakar i in., 2022):
 - koszty produkcji,
 - koszty zamówienia,
 - zapewnienie jakości,
 - poziom technologii,
 - możliwości projektowe,
 - zyski,
 - koszt usługi,
 - zwrot inwestycji,
 - koszty pracy.
- 2) wymiar społeczny, który koncentruje się na zaangażowaniu pracowników/społeczeństwa, w tym warunki miejsca pracy, bezpieczeństwo oraz ochrona pracowników i społeczeństwa podczas prowadzonych procesów produkcyjnych (Chang i Cheng, 2019). Do wskaźników

ZR w aspekcie społecznym należą m.in. (Govidan i in. 2013); (Tseng, 2013); (Erol i in., 2011); (Swarnakar i in., 2022):

- zwiększenie możliwości zatrudnienia dla lokalnej społeczności,
- zielony wizerunek,
- zaangażowanie menadżerów w zarządzaniu zielonym łańcuchem dostaw,
- szkolenia pracowników w zakresie ochrony środowiska,
- warunki zatrudnienia (umowy o pracę, świadczenia, wynagrodzenie za pracę, możliwości rozwoju),
- stosowane praktyki w zakresie bezpieczeństwa,
- bezpieczeństwo i zdrowie,
- wskaźnik wypadkowości,
- wpływ na społeczeństwo lokalne (zdarzenia w zakresie bezpieczeństwa, wspieranie instytucji edukacyjnych, usługi, wsparcie projektów społecznych),
- wskaźnik rotacji personelu,
- liczba reklamacji,
- liczba zwrotów,
- ergonomia pracy,
- benefity dla pracowników,
- zadowolenie pracowników,
- satysfakcja klienta.

3) wymiar środowiskowy, który odnosi się do warunków otaczających życie ludzkie (Chang i Cheng, 2019). Do wskaźników ZR w aspekcie środowiskowym należą m.in. (Erol i in., 2011); (Lee i Saen 2012); (Swarnakar i in., 2022); (Swarnakar i in., 2020); (Govidan i in. 2013); (Tseng, 2013); (Jabbour i in., 2013):

- ograniczenie użycia substancji niebezpiecznych,
- ograniczenie użycia substancji szkodliwych,
- zmniejszenie zużycia energii,
- spadek użycia energii pochodzącej ze źródeł konwencjonalnych,
- ograniczenie emisji gazów cieplarnianych,
- projektowanie zielonych produktów w tym m.in.: podlegających naprawie, recyklingowi bądź możliwości ponownego wykorzystania, emisja hałasu, monitorowanie dostawców, wykorzystanie surowców przyjaznych dla środowiska, liczba roślin,
- 6R (*ang. Refuse- Reduce-Reuse-Repair-Recycle-Rot*),

- żywotność produktu,
- utylizacja odpadów,
- segregacja odpadów,
- serwis produktów,
- powtórne wykorzystanie surowców.

Działania na rzecz ZR w przedsiębiorstwach produkcyjnych powinny podlegać stałej ocenie i kontroli. W tym celu poszukuje się kluczowych narzędzi monitoringu ZR. Literatura wskazuje różnorodne narzędzia kontroli i metody oceny ZR, jednakże najbardziej wymiernym narzędziem kontroli, które w sposób rzeczywisty oddaje stan ZR jest poziom realizacji celów i wskaźników ZR.

Zbiór przedstawionych celów i wskaźników wskazanych w literaturze wskazuje na potrzebę ich uporządkowania i sporządzenia ich rankingu w kontekście przedsiębiorstw produkcyjnych. Tak liczby zbiór celów i wskaźników jest dużym wyzwaniem dla organizacji, dlatego zaleca się ograniczenie zbioru, co w znaczący sposób ułatwi praktyczne wdrożenie działań na rzecz ZR i ich kontrolę w przedsiębiorstwach produkcyjnych. Założono także, że wyznaczenie kluczowych celów ZR pozwoli na wskazanie głównych wskaźników strategicznych w danym obszarze, a następnie pośrednich wskaźników, których realizacja, w kolejności zgodnej z priorytetami przedsiębiorstw, pozwoli na wzrost poziomu ZR.

2.2. Charakterystyka metod i narzędzi do oceny poziomu ZR

Ocena zrównoważonego rozwoju stanowi narzędzie wspomagania decyzji, które ukierunkowuje ich podejmowanie na zrównoważony rozwój (Bond i Morrison-Saunders, 2013). Termin ten używany jest powszechnie dla różnych procedur, praktyk, procesów, metodologii, metod, ram i narzędzi, które koncentrują się na pomiarach czy też promocji ZR na różnych poziomach np. kraju, miasta i organizacji (Moldavska i Welo, 2019).

Opracowania literaturowe wskazują różnorodne klasyfikacje metod ocen ZR. Ciekawą propozycję klasyfikacji metod ocen ZR można odnaleźć w pracy (Chebaeva, 2021), w której wskazuje się następujące jej rodzaje:

- listy kontrolne, które służą do identyfikacji czynników wpływających na ZR,
- karty awarii, które umożliwiają ocenę istotności skutków w oparciu o przyjęte kryteria,
- macierze, które są wykorzystywane głównie do wskazywania powiązań pomiędzy źródłami wpływu a ich skutkami, a także do wstępnej oceny wielkości i charakterystyki oddziaływań,
- schematy blokowe i sieci, które wskazują bezpośrednie i pośrednie związki przyczynowe pomiędzy źródłami wpływu a ich oddziaływaniem.

- eksperckie metody oceny, które obejmują gromadzenie i agregowanie ocen wielu ekspertów w danej dziedzinie,
- scenariusze, które przedstawiają możliwości dalszego rozwoju,
- modele matematyczne i statystyczne, w których matematyczne funkcje są stosowane do ilościowej oceny wpływów (deterministyczny lub probabilistyczny).

W pracy (Morrison-Saunders i in., 2015) autorzy zaproponowali umieszczenie narzędzi oceny ZR w trzech wymiarach:

- 1) narzędzia leżące u podstaw dyskursu na temat zrównoważonego rozwoju,
- 2) narzędzia stanowiące reprezentacje zrównoważonego rozwoju w procesie oceny,
- 3) w kontekście podejmowania decyzji.

Przegląd literatury pozwolił na analizę dostępnych metod i narzędzi do oceny ZR stosowanych w przedsiębiorstwach produkcyjnych. Jedną z metod oceny poziomu ZR przedstawia praca (Swarnakar i in., 2021). Przedstawiona metoda opiera się na wyznaczeniu kluczowych wskaźników wydajności ZR za pomocą metody AHP i Kluczowych Wskaźników Efektywności (*dalej skrót: KPI*). Proponowana metoda pozwala na określenie wag wskaźników oraz określenie poziomu ZR w trzech tradycyjnych obszarach: środowiskowym, ekonomicznym i społecznym. Natomiast praca (Singh i in., 2021) przedstawia metodę oceny poziomu ZR w oparciu o integrację narzędzi Lean Manufacturing (*dalej skrót: VSM*) i wskaźników zrównoważonego rozwoju. Wskazano, iż narzędzia VSM pozwalają na poprawę wielu aspektów funkcjonowania organizacji, w tym wskaźników wydajności, wyników finansowych czy też realizacji założeń ZR. W toku badań wyznaczono wskaźniki ZR za pomocą ankiet przeprowadzonych w przedsiębiorstwach produkcyjnych. Ponadto zintegrowano wskaźniki z VSM. Następnie opracowane ramy umożliwiły przeprowadzenie oceny ZR oraz zidentyfikowanie możliwych ulepszeń w organizacji. Inną koncepcję ram dla oceny poziomu ZR przedstawiono w pracy (Kumar i Mani, 2021). Autorzy założyli, iż wdrożenie strategii w zakresie gospodarki o obiegu zamkniętym pozwoli na wzrost efektywności poziomu ZR w organizacji. W pracy wykorzystano narzędzie Life Cycle Assessment (*dalej skrót: LCA*). Przeprowadzona ocena proponowaną metodykę pozwala na wyznaczenie działań dla organizacji w zakresie wzrostu ZR. Ciekawe stanowisko w zakresie oceny ZR przedstawiono w pracy (Swarnakar i in., 2022). Autorzy wskazują potrzebę sporządzenia rankingu wskaźników ZR z uwzględnieniem TBL w celu harmonizacji procesu oceny ZR w środowisku produkcyjnym. W celu określenia zestawu wskaźników zastosowano kwestionariusz ankiety oparty na podejściu Best-Worst Scaling (*dalej skrót: BWS*), a następnie metodę MCDA. Inne prace wskazują na wykorzystanie do oceny poziomu ZR:

wieloatrybutowych metody użyteczności, w tym normalizacja wskaźników i ramy ważenia (BuHamdan i in., 2019), analiza ABC (Loucanov i Nosalov, 2020), oceny rynku (Abbati i in., 2018) czy też listy kontrolnej (Woodhouse i in., 2018).

Ocena ZR musi być odpowiednio dostosowana do indywidualnych cech i potrzeb organizacji. Przed przystąpieniem do jej budowy czy też wyboru należy określić zatem pewne kryteria. W Tab. 2 przedstawiono przegląd możliwych cech istotnych dla wyboru odpowiedniej metodologii oceny ZR.

Tabela 2. Przegląd możliwych cech istotnych przy wyborze metodologii oceny ZR (źródło: opracowanie własne na podstawie: Chebaeva i in., 2020)

Ocena zrównoważonego rozwoju			
Problematyka	Możliwości/Warianty		
Obiekt badań	polityka	projekt	produkt/wyrób
Poziom	region (macro)	organizacja (meso)	funkcja (mikro)
Obszar ZR	społeczny	środowiskowy	ekonomiczny
Wpływ	aspekty ekonomiczne	aspekty środowiskowe	zasoby naturalne
Rodzaj	ocena proceduralna (formalna)		ocena analityczna
Horyzont czasowy	przyszły		przeszły
Charakter wyników	jakościowe		ilościowe

Należy podkreślić, że ocena zrównoważonego rozwoju jest procesem iteracyjnym, dynamicznym, dlatego też wdrażanie korekt należy przeprowadzać na różnych etapach procesu oceny (Gabriel i in., 2017). W proponowanej metodyce oceny zrównoważonego rozwoju przyjęto trzy obszary charakterystyczne dla przedsiębiorstw produkcyjnych: procesy produkcyjne, trwałość produktu, rozwój produktu. Obszary aktywności ZR dla przedsiębiorstw produkcyjnych przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2. Obszary aktywności ZR

W dalszej części pracy przyjęto następujące oznaczenia dla wybranych obszarów aktywności ZR:

- O1: Procesy produkcyjne,
- O2: Trwałość produktu,
- O3: Rozwój produktu.

2.3. Podsumowanie i wnioski

Liczne dyskusje i badania przedstawione w literaturze przedmiotu w zakresie ZR wskazują, że poszukiwane są rozwiązania, które umożliwiają wspomaganie działań w kierunku realizacji celów ZR w przedsiębiorstwach. Znaczenie ZR wzrasta przede wszystkim wśród europejskich producentów, co związane jest z wdrażaniem restrykcyjnych przepisów w trzech wymiarach ZR oraz większą świadomością społeczeństwa w zakresie zrównoważonych produktów i usług.

Cele ZR wyznaczone przez Organizację Narodów Zjednoczonych (*dalej skrót: ONZ*) jako część Agendy 2030 są uznawane za ramy dla zrównoważonej przyszłości. Agenda wskazuje, że „wszystkie kraje i wszystkie zainteresowane strony, działając we współpracy partnerskiej, wdrożą ten plan” (ONZ, 2015). Strategie i praktyki opracowywane są, więc na różnych szczeblach organizacyjnych, w tym przez: rząd, samorządy lokalne, przemysł, które uważane są za interesariuszy w programie podmiotów zobowiązanych do realizacji celów ZR.

W celu wsparcia przedsiębiorstw produkcyjnych w realizacji celów ZR przeprowadzono analizę literatury w zakresie celów i oceny ZR w przedsiębiorstwach z sektora produkcji. Cele ZR, które najczęściej znajdowały się w analizowanej literaturze dla przedsiębiorstw z sektora produkcji to przede wszystkim:

- ograniczenie zużycia energii elektrycznej oraz wykorzystanie alternatywnych rozwiązań jej wytwarzania (OZE),
- wdrożenie innowacyjnych technologii,
- działania na rzecz ochrony klimatu,
- redukcja odpadów produkcyjnych i opakowań,
- zadowolenie i bezpieczeństwo pracowników,
- możliwość serwisu/naprawy oraz powtórne wykorzystanie surowców.

Przegląd literatury (García-Sánchez i in., 2020); (van Zanten i van Tulder R., 2021) w zakresie ZR wskazuje zróżnicowanie nacisku na poszczególne cele ZR wśród sektorów oraz wskazuje, iż kraje rozwinięte zwracają szczególną uwagę na działania na rzecz czynników społecznych i środowiskowych, natomiast kraje rozwijające się kierują swe działania na rzecz rozwoju ekonomicznego.

3. Zastosowanie metod analizy wielokryterialnej i drzew decyzyjnych w obszarze ZR w przedsiębiorstwach produkcyjnych

W warunkach niepewności rynkowej kierownictwo musi podejmować decyzje zarówno w wymiarze operacyjnym jak i strategicznym. W celu wsparcia decydentów wykorzystuje się metody MCDM. Metody te stanowią dziedzinę badań skoncentrowaną na opracowaniu procedur matematycznych i zaawansowanych metod komputerowych, które wspierają decydentów

w rozwiązywaniu wielokryterialnych problemów decyzyjnych (Żak i Węgliński, 2014). MCDM stają się przydatnym narzędziem w sferze produkcyjnej stwarzającym podstawy do podjęcia optymalnej decyzji przez najwyższe kierownictwo, minimalizując jednocześnie ryzyko ich skutków. Literatura przedmiotu (Santos i in., 2019) wskazuje, że integracja technik MCDM wzrosła w procesie podejmowania decyzji na rzecz zrównoważonego rozwoju. W przeciwieństwie do klasycznych technik badań operacyjnych, metody wielokryterialne nie dają rozwiązań „obiektywnie najlepszych”, a szukają rozwiązań kompromisowych uwzględniających zarówno przyjęte kryteria, jak i preferencje decydentów (Żak i Węgliński, 2014). Duża liczba dostępnych metod analizy wielokryterialnej sprawia, że wybór najlepszej metody jest procesem trudnym, bowiem jej prawidłowy wybór zależny jest od wielu różnych aspektów, do których należy zarówno charakter rozważanego problemu decyzyjnego, możliwości narzędzia oraz jego percepcji, łatwości użytkowania i elastyczność zastosowania. Można, więc stwierdzić, że wybór metody sam w sobie stanowi problem o charakterze wielokryterialnym. W dalszej części pracy przedstawiono analizę wybranych metod MCDM/A w celu wyboru metody najlepszej w kontekście tematyki pracy.

3.1. Wybrane metody wielokryterialnego wspomagania decyzji

Wskazuje się, iż istnieją metody MCDM/A o sprawdzonym, uniwersalnym charakterze. Jedną z najbardziej popularnych jest metoda AHP oraz analiza sieciowa procesów (*dalej skrót: ANP*) (PZTP, 2010). To właśnie metoda AHP wskazywana jest jako najczęściej stosowana metoda MCDM w obszarze ZR, gdzie stanowi aż 27% zastosowań (Diaz-Balteiro i in., 2017). Metoda ANP mimo swojej uniwersalności znajduje zastosowanie tylko w 4% badań w zakresie ZR (Diaz-Balteiro i in., 2017). Pozycje literatury wskazują trend łączenia metod MCDM z technikami rozmytymi w celu dokonania oceny wydajności ZR (Mardani i in., 2015.; Diaz-Balteiro i in., 2017). Metodę F-ANP stosować można m.in. do określania wag wskaźników

efektywności dla zrównoważonej produkcji (Tseng i in., 2009), określania wag kryteriów w celu oceny zrównoważonej produkcji (Amrinai in., 2016), ustalenia wagi kryteriów w odniesieniu do wydajności wyłącznie zielonych aspektów zrównoważonego rozwoju (Uygun i Dede, 2016). Wskazuje się, że F-ANP jest najczęściej stosowaną metodą stosowaną do określenia wag wskaźników w obszarze ZR (Wicher i in., 2019).

3.1.1. Wielokryterialna metoda hierarchicznej analizy problemów decyzyjnych

Jak wskazano w powyższej części pracy, jedną z powszechnie wykorzystywanych metod MCDM w zarządzaniu procesem produkcji jest metoda AHP. Metoda ta znajduje zastosowanie m.in.: w projektowaniu linii produkcyjnych, kształtowaniu kultury organizacyjnej, w ocenie projektów inwestycyjnych czy ocenie innowacyjności technologii. Metoda AHP „umożliwia przedstawienie problemu w postaci struktury hierarchicznej, na szczycie której znajduje się cel, pod nim kryteria, a na samym dole warianty decyzyjne (Tułeczki i Król, 2007)”. Wykorzystanie metody AHP pozwoli na wsparcie procesu podejmowania decyzji w przypadku, gdy szereg wybranych kryteriów jest niekoniecznie mierzalny (kryteria społeczne, środowiskowe, społeczne). Zastosowanie metody AHP polega na dekompozycji danego problemu na prostsze elementy, a następnie ich porównaniu parami, tym samym umożliwia dokonanie najlepszego rozwiązania spośród wybranych wariantów. „Decydent ocenia możliwe warianty wyboru pod względem określonych kryteriów na możliwość oceny wartości tych kryteriów pod kątem celu wg swojej wiedzy i uznania opartego na doświadczeniu” (Tułeczki i Król, 2007). Znalezienie najlepszego rozwiązania metodą AHP polega na skonstruowaniu macierzy porównań parami. Macierz przyjmuje wymiary $N \times N$, gdzie N oznacza liczbę elementów przyjętych na danym poziomie. Macierz ta charakteryzuje się tym, że (Tułeczki i Król, 2007): wyrazy umieszczone na przekątnej macierzy przyjmują wartość $a_{ii}=1$, wartości umieszczone nad przekątną a_{ij} to wynik porównania dwóch kryteriów (a_{ij}), natomiast wyrazy umieszczone poniżej przekątnej stanowią odwrotność tych porównań (a_{ji}). W dalszej kolejności przeprowadzona zostaje procedura wyznaczania lokalnych wag, którą wykonuje się następująco: 1) wyznaczenie sumy wartości ocen w każdej kolumnie; 2) każdą otrzymaną ocenę należy podzielić przez liczbę elementów. Suma uzyskanych wag powinna wynosić 1,0. Na podstawie otrzymanych wag wskazywane są rangi ważności wybranych wariantów. W celu sprawdzenia poprawności działań, po otrzymaniu wartości wag należy dokonać miary zgodności porównań, która reprezentuje proporcjonalność preferencji. W tym celu konstruuje się indeks niezgodności (CI), a następnie współczynnik niezgodności (CR). Przyjęto, że porównania są konsekwentne

wówczas, gdy $CR \leq 10\%$ (dla $n \leq 5$). Jeśli współczynnik niezgodności jest nieakceptowany wówczas należy powtórzyć wszystkie lub niektóre porównania.

Mimo, iż metoda AHP jest powszechnie stosowana przez specjalistów w zakresie wspomagania decyzji, literatura przedmiotu (Kabierz i in., 2006); (Castro i Parrerias, 2018); (Saaty, 2005) wskazuje także jej ograniczenia, m.in.: umowny, sztywny zakres ocen (wg skali Saaty'ego); liczba porównywalnych problemów (zaleca się ograniczoną liczbę wariantów w celu otrzymania rzetelnych wyników); potrzeba współpracy z ekspertami zewnętrznymi (brak zaangażowania w realizację celów firmy); założenia pełnej porównywalności przyjętych kryteriów i wariantów oceny.

Zastosowanie metody AHP w zakresie oceny ZR w przedsiębiorstwie przedstawiono w pracy (Swarnakar i in., 2021). Na podstawie wybranych wskaźników ZR poprzez KPI opracowano model oceny wydajności organizacji w zakresie ZR oparty na metodzie AHP. Autorzy pracy zbudowali model hierarchiczny składający się z trzech poziomów: cel, wymiary ZR, wskaźniki ZR. Następnie ważność wskaźników KPI została obliczona na podstawie danych wejściowych dostarczonych przez ekspertów w macierzy parami przy użyciu metodologii AHP. Model zaimplementowano w pięciu przedsiębiorstwach z branży automotive. Zastosowanie metody AHP w zakresie ZR przedstawiono także w pracy (Ahmad, 2014). Badania dotyczyły wyboru odnawialnych źródeł energii dla zrównoważonego rozwoju systemu wytwarzania energii elektrycznej. Celem pracy było opracowanie modelu oceny w celu określenia priorytetów dostępnych źródeł energii odnawialnej. Model opracowano na podstawie przeprowadzonej metody AHP, gdzie uwzględniono cztery główne kryteria (aspekty techniczne, ekonomiczne, społeczne i środowiskowe) oraz kryteriów podrzędnych. Wynikiem badań jest opracowanie modelu, który pozwolił na nadanie priorytetów wybranym zasobom, a także wskazuje, iż każdy z zasobów jest nastawiony na określone kryterium. Proponowane przez autorów rozwiązanie może posłużyć do formułowania długoterminowej polityki energetycznej ukierunkowanej na realizację celów ZR.

3.1.2. Rozmyta wielokryterialna metoda hierarchicznej analizy problemów decyzyjnych

Ze względu na przedstawione powyżej ograniczenia metody AHP powstała nowa, wzmocniona teoria decyzji zwana rozmytą wielokryterialną metodą hierarchicznej analizy problemów decyzyjnych (F-AHP). F-AHP jest rozwinięciem metody AHP o teorię rozmytą. Główną koncepcją F-AHP pozostaje opracowanie preferencyjnej wagi każdej alternatywnej decyzji, gdzie preferencje określone są za pomocą języka naturalnego bądź wartości liczbowych

w celu ustalenia ważności każdego z atrybutów (Kusumawardani i Agintiara, 2015). Różnicą między AHP a F-AHP jest wykorzystanie trójkątnych liczb rozmytych (*dalej skrót: TFN*) (Anggraeni i in., 2014). Metoda F-AHP składa się z następujących kroków:

1. Podmiot podejmujący decyzje (decydent) porównuje kryteria lub alternatywy za pomocą terminów językowych

$$\tilde{A}^k = \begin{bmatrix} \tilde{d}_{11}^k & \tilde{d}_{12}^k & \dots & \tilde{d}_{1n}^k \\ \tilde{d}_{21}^k & \dots & \dots & \tilde{d}_{2n}^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{d}_{n1}^k & \dots & \dots & \tilde{d}_{nn}^k \end{bmatrix} \quad (1)$$

2. Jeśli jest więcej niż jeden decydent, preferencje każdego decydenta ($\tilde{d}_{ij}^k$) są uśrednione i oblicza się za pomocą równania:

$$\widetilde{d}_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^K \tilde{d}_{ij}^k}{K} \quad (2)$$

gdzie:

K- liczba decydentów

3. Zgodnie z uśrednionymi preferencjami macierz wygląda następująco:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \tilde{d}_{11} & \dots & \tilde{d}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{d}_{n1} & \dots & \tilde{d}_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

4. Średnią geometryczną rozmytych wartości porównawczych dla każdego kryterium według Buckleya oblicza się za pomocą następującego równania:

$$\tilde{r}_i = (\prod_{j=1}^n \widetilde{d}_{ij}), i=1,2,\dots,n \quad (4)$$

5. Rozmyte wagi każdego kryterium można znaleźć za pomocą równania 4 włączając kolejne 3 punkty.

5.1. Znajdź sumę wektorową każdego $\tilde{r}_i$.

5.2. Znajdź (-1) moc wektora sumowania. Zastąp rozmytą liczbę trójkątną, aby przeprowadzić działania w kolejności rosnącej.

5.3. Aby odnaleźć rozmytą wagę kryterium ($\widetilde{w}_i$) należy pomnożyć każdą ($\tilde{r}_i$) przez wektor odwrotny:

$$\widetilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} = (lw_i, mw_i, uw_i) \quad (5)$$

6. Ponieważ w_i są w dalszym ciągu trójkątnymi liczbami rozmytymi, należy wykorzystać metodę centrum obszaru za pomocą:

$$M_i = \frac{lw_i + mw_i + uw_i}{3}$$

7. M_i jest liczbą nierozmytą. Należy ją jednak znormalizować przy pomocy:

$$N_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (6)$$

Praca (Santos i in., 2019) wskazuje, że F-AHP jest preferowanym narzędziem wspierającym decyzje dotyczące ZR, co potwierdza jej liczne zastosowania w opracowaniach.

Przykładem zastosowania metody F-AHP w zakresie ZR jest praca (Gani in., 2021), gdzie autorzy podjęli próbę identyfikacji wskaźników niezbędnych do poprawy poziomu ZR w organizacji. Zestaw wskaźników został dobrany i skategoryzowany w oparciu o trzy podstawowe wymiary ZR (środowiskowy, gospodarczy i społeczny). W celu wyznaczenia priorytetowych wskaźników wykorzystano metodę F-AHP. Natomiast Chawla i in. (Chawla i in., 2021) przeprowadzili badania w zakresie zarządzania zrównoważonymi „zielonymi” procesami w oparciu o F-AHP. Autorzy pracy porównali przyjęte globalne wskaźniki celowości dla ekologicznych i konwencjonalnych praktyk zarządzania zielonymi procesami w przemyśle wytwórczym. Następnie oceniono praktyki zarządzania zielonymi procesami. Proponowane podejście może być wykorzystane w różnych organizacjach przez kadrę zarządzającą w celu ponownego przeanalizowania i przeprojektowania polityki zarządzania dla wykorzystania trwałych zysków w działalności biznesowej organizacji bez negatywnego wpływu na środowisko.

3.1.3. Technika kolejności preferencji poprzez podobieństwo do idealnego rozwiązania

Najpopularniejszą metodą stosowaną w rozwiązywaniu wielokryterialnych zadań dyskretnych jest TOPSIS. Podejście opracowane przez Hwang i Yoon ma na celu znalezienie najlepszej alternatywy, która ma najkrótszą drogę od pozytywnego idealnego rozwiązania i najdalszą od negatywnego idealnego rozwiązania (Piwowarki i in., 2018):

1. Normalizacja zmiennych

Normalizację zmiennych można wykonywać przy użyciu kilku metod. Jedną z nich jest wykorzystanie następującego wzoru:

$$x_{ij}^n = \frac{x'_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x'^2_{ij}}} \quad (7)$$

dla których $A_i=0$ (przesunięcie znormalizowanych wartości w stosunku do zera) i B_i (podstawa normalizacja i -tej zmiennej) jest określone wzorem:

$$B_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n x'^2_{ij}} \quad (8)$$

gdzie:

x''_{ij} - wartość i -tej zmiennej dla j -tego obiektu po normalizacji,

x'_{ij} - wartość i -tej zmiennej dla j -tego obiektu po przesunięciu i przeskalowaniu zestawu punktów.

2. Obliczenie znormalizowanych zmiennych dla określonych wag

$$v_{ij} = x''_{ij} \times w_i \quad (9)$$

gdzie:

w_i - wartość wagi dla i -tego obiektu

3. Określenie idealnego pozytywnego rozwiązania oraz idealnego negatywnego rozwiązania

Idealne rozwiązanie określa się na podstawie zależności:

$$v_i^+ = \begin{cases} \max v_{ij} & \text{dla bodźca} \\ \min v_{ij} & \text{dla antybodźca} \end{cases} \quad (10)$$

Anty-idealne rozwiązanie określa się na podstawie zależności:

$$v_i^- = \begin{cases} \min v_{ij} & \text{dla bodźca} \\ \max v_{ij} & \text{dla antybodźca} \end{cases} \quad (11)$$

4. Obliczenie odległości od obiektu

Odległość od wzorcowego obiektu (idealnego rozwiązania) jest obliczana zgodnie ze

$$\text{wzorem: } d_{ij}^+ = \sqrt[p]{\sum_{i=0}^m |v_{ij} - v_i^+|^p} \quad (12)$$

Odległość od anty-idealnego idealnego rozwiązania jest obliczana zgodnie ze wzorem:

$$d_{ij}^- = \sqrt[p]{\sum_{i=0}^m |v_{ij} - v_i^-|^p} \quad (13)$$

5. Określenie wartości miary

Wartość miary określana jest za pomocą wzoru:

$$S_j = \frac{d_j^-}{d_j^+ + d_j^-} \quad (14)$$

gdzie:

S_j jest wartością od 0 do 1, gdzie 0 oznacza najgorszy obiekt, a 1 najlepszy obiekt.

Zastosowanie metody TOPSIS w obszarze ZR przedstawiono w pracy (Zhou i in., 2021).

Autorzy zaznaczyli w swej pracy rosnące wymagania klientów w zakresie zrównoważonych produktów. W celu poprawy efektywności środowiskowej produktów założyli konieczność uwzględnienia różnorodnych czynników ekonomicznych, społecznych i środowiskowych na wczesnym etapie projektowania produktu. W pracy wskazano występowanie niepewności epistemiologicznej wśród klientów i ekspertów związanej z tymi czynnikami. Dlatego też autorzy proponują nową metodę TOPSIS w celu uzyskania optymalnego schematu

projektowego, w którym uwzględniono preferencje klientów w zakresie zrównoważonych produktów oraz oceny ekspertów dotyczące parametrów i zmiennych występujących w procesie produkcyjnym. Proponowane podejście pozwala na optymalizację procesu projektowania zrównoważonych produktów biorąc pod uwagę zarówno potrzeby klientów jak i możliwości procesów produkcyjnych.

3.1.4. Rozmyta technika kolejności preferencji poprzez podobieństwo do idealnego rozwiązania

Metoda F-TOPSIS została przedstawiona przez (Boran i in., 2009). Wdrożenie metody F-TOPSIS wymaga wyznaczenia:

- zbioru kryterium: $K = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$,
- zbioru sub-kryterium: $SK = \{SK_1, SK_2, \dots, SK_p\}$,
- zbioru alternatyw: $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$.

Krok I. Obliczenie wag dla wytypowanych decydentów

Zakłada się, że grupa zawiera l decydentów (*dalej skrót: DM*). Ważność poszczególnych decydentów przedstawić można za pomocą Intuitionistic Fuzzy Numbers (*dalej skrót: IFN*). Przymiując, że $D_k = [\mu_k, \nu_k, \pi_k]$ to IFN przedstawiająca całosciowe znaczenie DM w ranking. Wagę n -tego DM oblicza się za pomocą następującego wzoru:

$$\lambda_k = \frac{\left(\mu_k + \pi_k \left(\frac{\mu_k}{\mu_k + \nu_k} \right) \right)}{\sum_{k=1}^l \left(\mu_k + \pi_k \left(\frac{\mu_k}{\mu_k + \nu_k} \right) \right)}, \text{ gdzie:} \quad (15)$$

Zakładając, że: $\sum_{k=1}^l \lambda_k = 1$

Krok II. Budowa zagregowanej intuicjonistycznej rozmytej matrycy decyzji zgodnie z opiniami DM.

Założono, że zagregowana intuicjonistyczna rozmyta matrycy decyzji poszczególnego decydenta przyjmuje postać $R^{(k)} = (r_{ij}^{(k)})_{m \times n}$. $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_l\}$ to wagi poszczególnych DM i $\sum_{k=1}^l \lambda_k = 1$, $\lambda \in [0,1]$. Wszystkie opinie członków należy połączyć w decyzję grupową. „W tym celu wykorzystano operator Intuitionistic Fuzzy Weighted Averaging (*dalej skrót: IFWA*) zaproponowany przez (Xu, 2007) zakładając, że:

$$R^{(k)} = (r_{ij}^{(k)})_{m \times n}$$

$$r_{ij} = IFWA_{\lambda} (r_{ij}^{(1)}, r_{ij}^{(2)}, \dots, r_{ij}^{(l)}) = \lambda_1 r_{ij}^{(1)} \oplus \lambda_2 r_{ij}^{(2)} \oplus \dots \oplus \lambda_l r_{ij}^{(l)}$$

$$= [1 - \prod_{k=1}^l (1 - \mu_{ij}^{(k)})^{\lambda_k}, \prod_{k=1}^l (v_{ij}^{(k)})^{\lambda_k}, \prod_{k=1}^l (1 - \mu_{ij}^{(k)})^{\lambda_k} - \prod_{k=1}^l (v_{ij}^{(k)})^{\lambda_k}] \quad (16)$$

i

$$r_{ij} = ((\mu_{Ai}(x_j), v_{Ai}(x_j), \pi_{Ai}(x_j))) \quad (i = (1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n))$$

Następnie zagregowaną macierz decyzyjną IF można przedstawić jako:

$$R = \begin{bmatrix} \mu_{A1}(x1), v_{A1}(x1), \pi_{A1}(x1) & \mu_{A1}(x2), v_{A1}(x2), \pi_{A1}(x2) & \cdots & \mu_{A1}(x3), v_{A1}(x3), \pi_{A1}(x3) \\ \mu_{A2}(x1), v_{A2}(x1), \pi_{A2}(x1) & \mu_{A2}(x2), v_{A2}(x2), \pi_{A2}(x2) & \cdots & \mu_{A2}(x3), v_{A2}(x3), \pi_{A2}(x3) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{Am}(x1), v_{Am}(x1), \pi_{Am}(x1) & \mu_{Am}(x2), v_{Am}(x2), \pi_{Am}(x2) & \cdots & \mu_{Am}(xn), v_{Am}(xn), \pi_{Am}(xn) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Krok III. Określenie wag kryteriów i podkryteriów

Ponieważ, nie można założyć, że wszystkie kryteria i subkryteria są tak samo ważne, należy wyznaczyć dla nich stopień ważności W . Aby uzyskać parametr W opinie poszczególnych DM dotyczące ważności kryteriów i subkryteriów muszą zostać połączone w jedną ocenę.

Przypuśćmy, że $w_j^{(k)} = [\mu_j^{(k)}, v_j^{(k)}, \pi_j^{(k)}]$ to IFN przypisane dla kryterium X_j przez k_{th} DM.

Następnie waga dla poszczególnego kryterium i subkryterium wyznaczana jest za pomocą operatora IFWA:

$$w_{ij} = IFWA_{\lambda}(w_j^{(1)}, w_j^{(2)}, \dots, w_j^{(l)}) = \lambda_1 w_j^{(1)} \oplus \lambda_2 w_j^{(2)} \oplus \dots \oplus \lambda_l w_j^{(l)} \\ = [1 - \prod_{k=1}^l (1 - \mu_{ij}^{(k)})^{\lambda_k}, \prod_{k=1}^l (v_{ij}^{(k)})^{\lambda_k}, \prod_{k=1}^l (1 - \mu_{ij}^{(k)})^{\lambda_k} - \prod_{k=1}^l (v_{ij}^{(k)})^{\lambda_k}] \quad (19)$$

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_j]. \quad (20)$$

gdzie:

$$w_j = (\mu_j, v_j, \pi_j) \quad (j = 1, 2, \dots, n). \quad (21)$$

Następnie w celu połączenia wag każdego kryterium z odpowiadającym mu subkryteriów wykorzystuje się mnożenie składowych macierzy poprzez zastosowanie wzoru 14.

Krok IV. Budowa zagregowanej ważonej intuicjonistycznej rozmytej macierzy decyzyjnej

Obliczenie wag kryteriów i subryteriów (W) umożliwia zbudowanie zagregowanej ważonej intuicjonistycznej rozmytej macierzy decyzyjnej. Macierz ta budowana jest na podstawie (Atanassov, 1986):

$$R \otimes W = \{x, \mu_{Ai}(x) \cdot \mu_W(x), v_{Ai}(x) + v_W(x) - v_{Ai}(x) + v_W(x) | x \in X \quad (22)$$

i

$$\pi_{Ai \cdot W} = 1 - v_{Ai}(x) - v_W(x) - \mu_{Ai}(x) \cdot \mu_W(x) + v_{Ai}(x) + v_W(x) \quad (23)$$

Krok V. Wyznaczenie intuicjonistycznego rozmytego rozwiązania idealnego i antyidealnego

Należy określić kryterium typu stymulant oraz typu destymulant. Przyjmuje się, że J1 określa kryterium typu stymulant, natomiast J2 określa kryterium typu destymulant.

A⁺ to intuicjonistyczne rozmyte rozwiązanie idealne, natomiast A⁻ to intuicjonistyczne rozmyte rozwiązanie anty-idealne. W celu wyznaczenia A⁺ i A⁻ należy zastosować poniższe wzory:

$$A^+ = (\mu_{A+W}(x_j), v_{A+W}(x_j)) \text{ i } A^- = (\mu_{A-W}(x_j), v_{A-W}(x_j)) \quad (24)$$

gdzie:

$$\mu_{A+W}(x_j) = ((\max_i \mu_{AiW}(x_j) | j \in J1), (\min_i \mu_{AiW}(x_j) | j \in J2)), \quad (25)$$

$$v_{A+W}(x_j) = ((\min_i v_{AiW}(x_j) | j \in J1), (\max_i v_{AiW}(x_j) | j \in J2)), \quad (26)$$

$$\mu_{A-W}(x_j) = ((\min_i \mu_{AiW}(x_j) | j \in J1), (\max_i \mu_{AiW}(x_j) | j \in J2)), \quad (27)$$

$$v_{A-W}(x_j) = ((\max_i v_{AiW}(x_j) | j \in J1), (\min_i v_{AiW}(x_j) | j \in J2)), \quad (28)$$

Krok VI. Obliczenie miary separacji i współczynnika bliskości

Zmierzenie miary separacji między alternatywami w intuicjonistycznym zbiorze rozmytym można wykonać poprzez wykorzystanie liczby miar odległości zaproponowany przez (Szmidt i Kacprzyk, 2000; Grzegorzewski, 2004) bądź (Atanassov, 1999), w tym odległości Hamming'a odległości Euklidesowej i jej znormalizowane miary odległości (Aloini i in., 2014). Po wyborze współczynnika bliskości (S_i⁺) i współczynnika separacji (S_i⁻) dla każdej alternatywny w celu wyznaczenia intuicjonistycznego rozmytego rozwiązanie idealnego i anty-idealnego zostaje określony wybór. Zgodnie z pracą (Szmidt i Kacprzyk, 2000) zaleca się zastosowanie znormalizowanej odległości Euklidesowej:

$$S^+ = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n [(\mu_{AiW}(x_j) - \mu_{A+W}(x_j))^2 + (v_{AiW}(x_j)^2 - v_{A+W}(x_j))^2 + (\pi_{AiW}(x_j)^2 - \pi_{A+W}(x_j))^2]}. \quad (29)$$

$$S^- = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n [(\mu_{AiW}(x_j) - \mu_{A-W}(x_j))^2 + (v_{AiW}(x_j)^2 - v_{A-W}(x_j))^2 + (\pi_{AiW}(x_j)^2 - \pi_{A-W}(x_j))^2]}. \quad (30)$$

Następnie należy wyznaczyć względny współczynnik bliskości do idealnego rozwiązania za pomocą poniższego wzoru:

$$C_i = \frac{S_{i-}}{S_{i-} + S_{i+}} \text{ gdzie: } 0 \leq C_i \leq 1. \quad (31)$$

Krok VII. Ranking alternatyw

Po obliczeniu względnego współczynnika bliskości dla każdej z alternatyw, należy wykonać ranking alternatywy w oparciu o malejącą wartości współczynnika C_i .

Zastosowanie metody F-TOPSIS w zakresie ZR przedstawiono w pracy (Patalas-Maliszewska i Łosyk, 2021). Autorzy przedstawili nowatorskie podejście do oceny poziomu ZR w kontekście przemysłu 4.0. Wyznaczono trzy obszary ZR w przedsiębiorstwach produkcyjnych, dla których przyjęto cele i wskaźniki ZR. Następnie wskazano funkcjonalność systemu ERP i możliwość jego wspomagania realizacji ZR w organizacji. Metoda F-TOPSIS została zastosowana wraz z operatorem IFWA w celu wyznaczenia kluczowych celów ZR. Wartości kluczowych celów ZR zostały kolejno porównane z przypisanymi wartościami referencyjnymi. Porównanie wartości pozwoliło na ocenę poziomu ZR, a następnie rekomendację działań wspomagających realizację założeń ZR w przyjętych obszarach. Ciekawą pracę z zastosowaniem metody F-TOPSIS w zakresie ZR przedstawia także Memari i in. (Memari i in., 2019). Autorzy przedstawiają wybór zrównoważonego dostawy za pomocą metody F-TOPSIS, w której przyjęto dziewięć kryteriów oraz trzydzieści podkryteriów stawianych producentom zamiennych części samochodowych. Proponowane w pracy podejście to rozwiązanie wspomagające podejmowanie decyzji w zakresie wyboru zrównoważonego dostawcy poprzez sporządzenie rankingu dostawców opartego na ocenie przyjętych kryteriów i podkryteriów. Inne zastosowanie metody F-TOPSIS w obszarze ZR można znaleźć także m.in. w zarządzaniu zielonym łańcuchem dostaw (Govindan i in., 2013); (Büyükoçkan i Çifçi, 2012); (Kannani in., 2013), wyborze alternatywnych źródeł energii (Sengüli in., 2015); (Kaya i Kahraman, 2011).

3.2. Zastosowanie drzew decyzyjnych w obszarze ZR

Drzewo decyzyjne (*dalej skrót: DT*) stanowi narzędzie decyzyjne. DT oparte jest na klasyfikacji poprzez uczenie maszynowe i eksploracje danych (Guggari i in., 2018). Ujęcie matematyczne definiuje drzewa decyzyjne jako skierowane grafy mające jeden wyróżniony wierzchołek tzw. korzeń będący początkiem drzewa. Drzewo decyzyjne składa się z wierzchołków i łączących je krawędzi skierowanych (prowadzących tylko w jednym kierunku). W drzewie decyzyjnym wierzchołki nazywa się też węzłami, a krawędzie gałęziami (IBSPAN, 2013). Jeśli od węzła skierowane są gałęzie do innych węzłów, mówi się, iż węzeł jest rodzicem innych węzłów (tzw. dzieci). Węzły końcowe (nie mające dzieci) nazywa się liściem.

Cała próba ucząca skupiona jest w korzeniach drzew. W konsekwencji podziałów – najpierw korzenia, a następnie kolejnych węzłów, badana próba jest dzielona, a jej części trafiają od górnych do niższych węzłów, ostatecznie docierając aż do liści (IBSPAN, 2013).

Zadanie klasyfikacji na poziomie każdego węzła powoduje dokonywania podziału podzbioru na próby, który do niego nie dotarł, na mniejsze podzbiory. Podzbiory tworzą w ten sposób węzły- dzieci. Każdy węzeł, który nie jest liściem, stanowi podział obserwacji na pewne kryterium.

Modele drzew decyzyjnych umożliwiają tworzenie systemów klasyfikacji. Klasyfikacja i analiza segmentacji odbywa się poprzez zastosowanie dostępnych algorytmów. Zasadniczo wszystkie algorytmy realizują to samo zadanie: przewidują lub klasyfikują przyszłe obserwacje na podstawie zestawu reguł decyzyjnych. Zadanie to realizowane jest poprzez podział danych na kolejne podgrupy, analizując wszystkie zmienne w zbiorze danych poprzez znalezienie zmiennej, która zapewni najlepszą klasyfikację czy też predykcję. Proces ten jest rekursywny, powstałe grupy dzielone są na coraz mniejsze jednostki aż do ukończenia budowy drzewa (według przyjętego kryterium zatrzymania). W zależności od zastosowanego do budowy drzewa algorytmu zmienne wejściowe i przewidywane mogą mieć charakter ilościowy (przedział liczbowy) lub jakościowy. W przypadku, gdy przyjęta zmienna przewidywana ma charakter ilościowy, wówczas generowane jest drzewo regresji, w przypadku zmiennej przewidywanej o charakterze jakościowym, generowane jest drzewo klasyfikacji.

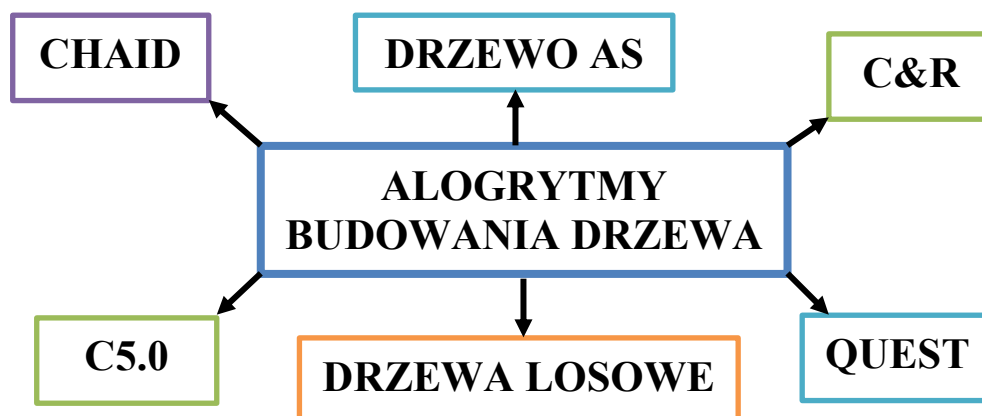
Wśród klasycznych algorytmów budowania drzewa (Rys.3.) wyróżnia się m.in.:

- węzeł Klasyfikacja i regresja (C&R)-pozwala na predykcję lub klasyfikację przyszłych obserwacji. „Zmienne przewidywane oraz wejściowe mogą być zakresami liczbowymi lub jakościowymi”, z czego wszystkie podziały są binarne. CART dzieli zestaw danych na

podstawie indeksu gini. CART buduje drzewa regresji i przewiduje etykietę klasy na podstawie średniej ważonej (Guggari i in., 2018); (Rokach i Maimon, 2001).

- węzeł CHAID- generuje drzewa decyzyjne poprzez zastosowanie statystyk chi-kwadrat, która umożliwia identyfikację optymalnych podziałów. Węzeł CHAID, w odróżnieniu od węzłów C&R i węzłów QUEST, może generować drzewa niebinarne, co oznacza, że niektóre podziały mają więcej niż dwie gałęzie. Przyjęta do budowy drzewa zmienna przewidywana i wejściowa może stanowić zakres jakościowy bądź liczbowy (ciągły). Dokładniejsze badanie wszystkich możliwych podziałów umożliwia zastosowanie modyfikacji CHAID- wyczerpujący CHAID. Należy podkreślić, że obliczenia w przypadku wyczerpującego CHAID zajmą więcej czasu.
- węzeł QUEST- budowa drzew oparta jest na metodzie klasyfikacji binarnej, której celem jest redukcja czasu przetwarzania analiz dużych drzew decyzyjnych C&R oraz redukcja tendencji obecnej w metodach drzew klasyfikacji do preferowania danych wejściowych dopuszczających więcej podziałów. Zastosowanie tego algorytmu wymaga, aby zmienna przewidywana miała charakter jakościowy, natomiast zmienne wejściowe mogą być zakresem liczbowym (ciągłym). Wszystkie generowane podziały w tym przypadku są binarne.
- węzeł C5.0 – pozwala na budowę drzewa decyzyjnego lub zestawu reguł. Algorytm ten opiera się na podziale próby na podstawie zmiennej oferującej maksimum korzyści z informacji na każdym z poziomów. Wymaga się, aby zmienna przewidywana miała charakter jakościowy. Dozwolonych jest wiele podziałów na więcej niż dwie podgrupy.
- węzeł Drzewo-AS (wyczerpujący CHAID) – węzeł ten przeznaczony do przetwarzania dużych zbiorów w celu utworzenia pojedynczego drzewa. Węzeł generuje drzewo decyzyjne stosując statystyki chi-kwadrat (CHAID) w celu określenia optymalnych podziałów. Możliwość generowania drzew niebinarnych oznacza, że niektóre podziały mają więcej niż dwie gałęzie. Przyjęte zmienne przewidywana i wejściowa mogą mieć charakter jakościowy lub stanowić zakres liczbowy (ciągły). Węzeł Drzewo-AS stanowi modyfikację CHAID umożliwiającą dokładniejsze badanie wszystkich możliwych podziałów. Obliczenia w przypadku zastosowania tego algorytmu zajmują więcej czasu niż w przypadku obliczeń tradycyjnego CHAID.
- węzeł Drzewa losowe- przeznaczony jest do przetwarzania dużych zbiorów danych w celu utworzenia pojedynczego drzewa i wyświetla model wynikowy w przeglądarce wyników. Węzeł Drzewa losowe generuje drzewo decyzyjne umożliwiające predykcję lub

klasyfikację przyszłych obserwacji. W metodzie zastosowano rekursywny podział rekordów na segmenty przez minimalizację zanieczyszczeń w każdym kroku. Węzeł w drzewie uważany jest za czysty, w przypadku gdy 100% obserwacji w węźle przypada na konkretną kategorię zmiennej przewidywanej. Zmienne przewidywana i wejściowa mogą być zakresami liczbowymi lub jakościowymi (nominalnymi, porządkowymi lub flagami). Wszystkie powstałe podziały są binarne (tylko dwie podgrupy).



Rys. 3. Klasyczne algorytmy budowania drzewa

Wskazane algorytmy budowania drzew decyzyjnych tworzą systemy klasyfikacji w oparciu o zestaw reguł decyzyjnych. Zestaw reguł sprawia, iż proces wnioskowania będący zapleczem modelu jest oczywisty dla osoby przeglądającej drzewo.

Dla potrzeb pracy dokonano przeglądu literatury z zakresu stosowania narzędzi i metod wspomagania decyzji w obszarze produkcji. Podsumowanie analizy literatury przedstawiono w Tab.3.

Tabela 3. Analiza literatury w zakresie zastosowania metod i narzędzi wspomagających decyzję w sektorze produkcyjnym

Metody i narzędzia	Oprogramowanie	Obszar	Ograniczenia	Obszar ZR	Źródło
CSA	-	- wydajność produkcji - kwestie: środowiskowe, gospodarcze, społeczne - ulepszanie praktyk ZR	-	Tak	Moldavska i Welo, 2019
IoT model	Wi-Fi	- optymalizacja produkcji, - rzeczywista kontrola czujników, - Wydajność	- brak połączenia Internetowego uniemożliwia pracę całego systemu	Nie	Esposito i in. 2017

DESIRES (DEcision Support IntegRating Economic, Environmental and Social Sustainability); LCC; LCA; SLCA; MCDA; zrównoważone scenariusze; Narzędzie oceny SSAT; metoda MAVT	Web-HIPRE	- projektowanie zrównoważonych zakładów produkcyjnych, - zrównoważone zużycie energii, surowców - strategię dla SD w aspekcie: społecznym, środowiskowym, ekonomicznym	- możliwość wykluczania się wzajemnie decyzji (najlepsza decyzja dla jednego kryterium może wpływać negatywnie na inne kryterium), konieczność kompromisów; - duża liczba decydentów wpływa na możliwość wystąpienia konfliktów w wyborze preferencji	Tak	Azapagic i in., 2016
Sztuczne sieci neuronowe	ERP, CRM	- sprzedaż produktów, - planowanie produkcji, - gospodarka magazynowa	- model oparty wyłącznie na prognozowanej sprzedaży produktów, nie uwzględnia kosztów ich produkcji i zysków dla firmy	Nie	Zhang i in., 2019
LCR; Methods-Energy Measurement (MEM); Maintenance Total Cost of Ownership (M-TCO)	ERP	- planowanie produkcji pod względem ekonomicznym i środowiskowym	- ograniczona pamięć systemów sterowania maszyn i urządzeń (ograniczony dostęp czasowy do informacji) - niepewność mnożników (zależność od czasu) - ograniczenie aspektu środowiskowego do Eko-kosztów - branża motoryzacja	Nie	Müller i in., 2018
MCDA; HRC	-	- automatyzacja procesów, - przepustowość produkcji	- w zależności od typu MCDA	Nie	Neb i Remling, 2019
LPS learning factory	Appsist system	- szkolenia pracowników - komunikacja i współpraca - wpływ na organizację pracy		Nie	Oberc i Reuter, 2017
Cyfrowy bliźniak; automatyczny	MES, ERP	- zarządzanie zamówieniami	- wysokie koszty, - nierozwiązane pytania w zakresie	Nie	Kunath i Winkler, 2018

generator modeli			bezpieczeństwa danych, - niska jakość danych, - wykorzystanie danych wyłącznie gromadzonych za pomocą narzędzi informatycznych		
techniki regresji; modele liniowe; drzewa decyzyjne; metoda PPC ; metoda ML	MES	- prognozowanie LT, - zarządzanie produkcją, - kontrola produkcji, - symulacja przepływu zasobów	- na dokładność prognozy wpływa częstotliwość ponownego uczenia modelu. W przypadku zbyt częstych przekwalifikowań modele oparte będą na niereprezentatywnych podzbiorach danych produkcyjnych, tym samym prognozy nie będą spełniać požądanej dokładności	Nie	Gyluai i in., 2018
DSS; wywiady	BPMN2.0	-zarządzanie SDP (ang. Service Delivery Process), - poprawa świadczenia usług	-	Nie	Sala i in., 2019
Extract features; drzewa decyzyjne; model RF	Matlab	- wykorzystanie eksploracji danych w zakresie utrzymania produkcji	- nieprawidłowa integracja danych prowadzi do nierzetelnego DS. - jakość decyzji zależna od jakości danych	Nie	Gandhi i Schmidt, 2018
Dyskretna symulacja zdarzeń (DES); dynamiczne systemy, narzędzia symulacji ARENA; wykres Gantt'a	Simul8; Excel	- łańcuch dostaw; - długoterminowe/strategiczne kwestie planowania produkcji	-	Nie	Belil i in., 2019
Architektura RESTful; współczynnik awarii rozproszonej Poissona; Java Spring; web server; OPC UA (Open Platform	System FPR	-wyprowadzenie optymalnego wspólnego czasu cyklu, który utrzymuje minima całkowitych wydatków; - zbadano różnorodne cechy outsourcingu w	- założenie deterministycznej stopy popytu; - polityka ciągłego wydawania produktów końcowych	Nie	Wang Chiu i in., 2020

Communication s Unified Architecture)		firmach produkcyjnych, łańcuchach dostaw i przedsiębiorstwach			
Returnable Transit Item (RTI)	smaRTI (smart Returnable Transit Item); Cyber Physical Systems (CPSs); software package "Node-Red"	- inteligentne produkty; - improwizowanie zdolności logistycznych i obniżenie kosztów; - inteligentne usługi kontenerowe		Nie	Neal i in., 2019
Narzędzie analizy spawania (WeldANA)	SOLIDWORKS	- wymagania dotyczące możliwości produkcyjnych dla procesu spawania konstrukcji	- to narzędzie wspomagające podejmowanie decyzji analizuje projekt z procesu spawania, a nie z perspektywy wydajności; - obecne narzędzie istnieje jako wtyczka do SOLID- WORKS	Nie	Simon i in., 2019
ProcSI (Process Sustainability Index); współczynnik korelacji rang Spearmana; Dominacja Pareto	-	- zrównoważony harmonogram; - minimalizacja maksymalnego czasu realizacji ; - całkowity czas realizacji; - średnia i wariancja czasu przepływu oraz spóźnienie/wczesność	- przypisanie wag może być bardzo subiektywne, - rozwiązywalność proponowanego kompromisowego modelu programowania zależy od wielkości problemu i zastosowanych badań operacyjnych	Tak	Lopes i in., 2019
Teoria zbiorów rozmytych (ang. FST); metoda TOPSIS; metody MCDM	-	- wybór zrównoważonego dostawcy poprzez analizę wielokryterialną	- nie uwzględniono współzależności między kryteriami i podkryteriami. Uwzględnienie współzależności między kryteriami i podkryteriami może mieć wpływ na wyniki	Tak	Memari i in., 2019

Drzewa decyzyjne (DT);Uczenie Maszynowe; algorytm HoeffdingTree; algorytm LMT	WEKATM	- optymalizacja procesów produkcyjnych poprzez przedstawienie najlepszych praktyk wyznaczonych w drodze algorytmu	-	Tak	Koulinas i in. 2020
LCC; LCA; SLCA; DEcision Support IntegRating Economic Environmental and Social Sustainability (Desires)		- projektowanie zrównoważonych zakładów produkcyjnych, - opracowywanie strategii w zakresie wspomagania celów ZR	- ogólny charakter badań	Nie	Azapagic i in., 2016

3.3. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzona analiza literatury dotycząca zastosowania metod MCDM/A w zakresie wspierania decyzji wielokryterialnych w zakresie zrównoważonego rozwoju wskazuje na ich szerokie zastosowanie w wielu branżach przemysłu (Patalas-Maliszewska i Łosyk, 2021); (Zhou i in., 2021); (Patalas-Maliszewska i in., 2020); (Gani i in., 2021); (Chawla i in., 2021); (Swarnakar i in., 2021); (Memari i in., 2019); (Kaganski i in., 2018); (Wolnowska i Konicki, 2019); (Ligus i Peternek, 2018); (Saad i Khamkhan, 2018); (Piwowarski i in., 2018); (Ma i in., 2019); (Pirola i in., 2019); (Mzougui i Felsoufi, 2019); (Balusa i Gorai, 2019); (Hamdan i Cheaitou, 2017). Przegląd obecnych badań w tym zakresie przedstawiono w Tab. 4.

Tabela 4. Analiza zastosowania metod MCDM/A w obszarze ZR

Źródło	Metody MCDM/A	Obszar zastosowania	ZR	Zastosowanie w sektorze produkcji
Zhou i in., 2021	TOPSIS	Zrównoważone projektowanie	Tak	Tak
Patalas-Maliszewska i Łosyk, 2021	F-TOPSIS	Wyznaczenie kluczowych wskaźników ZR; rekomendacja działań w zakresie wspomagania realizacji założeń ZR	Tak	Tak
Patalas-Maliszewska i in., 2020	AHP	Ocena poziomu ZR; rekomendacja działań w zakresie wspomagania realizacji założeń ZR	Tak	Tak
Gani i in., 2021	F-AHP	Wyznaczenie kluczowych wskaźników ZR	Tak	Tak

Chawla i in., 2021	F-AHP	Zarządzanie zielonymi procesami	Tak	Tak
Memari i in., 2019	F-TOPSIS; IFNs;	Zrównoważone zarządzanie łańcuchem dostaw	Tak	Tak
Swarnakar i in., 2021	AHP	Ocena wydajności organizacji w zakresie ZR	Tak	Nie
Ahmad i Tahar, 2014	AHP	Polityka energetyczna w kontekście realizacji ZR	Tak	Nie
Kaganski i in., 2018	AHP; SMARTER	Wyznaczenie kluczowych wskaźników efektywności	Nie	Tak
Ligus i Peternek, 2018	F-TOPSIS; F-AHP	Optymalizacja alternatyw energetycznych	Tak	Nie
Saad i Khamkhan, 2018	AHP; Six-Sigma	Zarządzanie jakością	Nie	Tak
Piwowski i in., 2018	TOPSIS; VIKOR	Badanie poziomu ZR	Tak	Nie
Ma i in., 2019	TOPSIS	Ulepszenie systemów produkcyjnych	Nie	Tak
Pirola i in., 2019	TOPSIS; Pugh; EVA	Wsparcie systemu produktów i usług; Zwiększenie przychodów i lojalności klientów	Nie	Tak
Mzougui i Felsoufi, 2019	AHP; FMEA; AFD	Poprawa niezawodności produktu	Nie	Tak
Hamdan i Cheaitou, 2017	F-TOPSIS; AHP	Zarządzanie zrównoważonych łańcuchem dostaw; Wybór zielonego dostawy; Optymalizacja procesu wyboru dostawy	Tak	Tak

Przedstawione w Tab. 4 przykłady zastosowań metod MCDM/A w obszarze ZR wskazują na ich szerokie możliwości implikacji w obszarach funkcjonowania organizacji. Wybór metod MCDM w zbudowaniu modelu oceny poziomu ZR w przedsiębiorstwach produkcyjnych, wydaje się więc uzasadniony.

Modele drzew decyzyjnych umożliwiają tworzenie systemów, które klasyfikują (bądź przewidują) obserwacje na podstawie opracowanego zestawu reguł decyzyjnych. Zgromadzone dane organizacji w określonym zakresie mogą zostać zastosowane do budowy reguł klasyfikujących z maksymalną dokładnością.

Drzewa decyzyjne ze względu na swój uniwersalny charakter znajdują szerokie zastosowanie w procesie wspomagania decyzji. Wykorzystywane są w wielu dziedzinach życia, w tym w sektorze bankowym do oceny zdolności kredytowej (Sun i Lang, 2018), w energetyce do pomiaru efektywności energetycznej (Mikucionene, 2014) oraz do monitorowania produkcji poprzez wykorzystanie systemów eksperckich (Elangovan, 2011). Drzewa decyzyjne wykorzystywane są również w procesach produkcyjnych do przeprowadzania analiz jakościowych, optymalizacji procesów, minimalizacji kosztów, redukcji awarii, a także do wspomagania procesów decyzyjnych w Lean Maintenance Management, czyli systemie wspomagania decyzji w przewidywaniu wydajności produkcji (Antosz i in., 2019); (Bhattacharyya i Cheliyan, 2019); (Deradjat i Minshall, 2018); (Le i in., 2022); (Varga, 2008). Zastosowanie podejścia opartego na drzewie decyzyjnym w zakresie ZR w przedsiębiorstwach produkcyjnych może przyczynić się do poprawy wyników firmy w trzech aspektach: środowiskowym, społecznym i ekonomicznym, przy jednoczesnym wspieraniu działań związanych z procesem produkcyjnym, a także czynnościami związanymi z rozwojem produktu i trwałością produktu. Poza tym wykorzystanie drzewa decyzyjnego daje możliwość zaoszczędzenia czasu (Pekel, 2020).

Ze względu na konieczność oceny ZR w kontekście problemu wielokryterialnego, poszukuje się narzędzi wspomagających w tym zakresie. Analiza literatury wskazuje na szerokie zastosowanie drzew decyzyjnych w systemach i narzędziach wspomagania decyzji (Bockstaller i in., 2017); (Chen i in., 2021); (Fiarni i in., 2019); (Mirza i in., 2018); (Suner i in., 2015). Wykorzystanie drzew decyzyjnych w zakresie ZR można znaleźć także w pracach takich autorów jak (Buchert i in., 2014); (Doubravský i in., 2018).

W dostępnej literaturze przedmiotu nie znaleziono jednak kompleksowego narzędzia do oceny i monitorowania ZR w przedsiębiorstwach opartego na drzewach decyzyjnych. W Tab. 4 przedstawiono i omówiono przegląd powiązanych prac w zakresie zastosowania metod i narzędzi wspomagających decyzje, wskazując ich mocne i słabe. Wybór metody DT wydaje się zatem uzasadniony.

4. Metoda oceny poziomu ZR dla przedsiębiorstw produkcyjnych z branży metalowej MŚP

Mimo, iż agenda 2030 opracowana przez Organizację Narodów Zjednoczonych wzywa do realizacji celów ZR wszystkich interesariuszy, to zaangażowanie w te działania uznawane jest za szczególnie pilne dla prywatnych przedsiębiorstw w kontekście inwestycji środowiskowych, społecznych i zarządzania. Niewiele badań dostarcza kompleksowej i dogłębnej analizy zaangażowania przemysłu metalowego w realizację celów zrównoważonego rozwoju. Badania przedstawione w pracy (Hatayama, 2022) wskazują, że przemysł ten rzadziej niż inne sektory zgłaszał zaangażowanie w realizację celów zrównoważonego rozwoju. Model oceny poziomu ZR skierowano, więc dla przedsiębiorstw z branży metalowej. Wskazuje się także (Hatayama, 2022) trendy wśród producentów metali w odniesieniu do powiązań z celami zrównoważonego rozwoju przyjętymi przez ONZ. Proponowana metoda oceny poziomu zrównoważonego rozwoju dla przemysłu metalowego skierowana jest, więc do przedsiębiorstw produkcyjnych z branży metalowej. Narzędzie może stanowić praktyczne źródło wiedzy i narzędzie wspomagające zaangażowanie i realizację celów ZR.

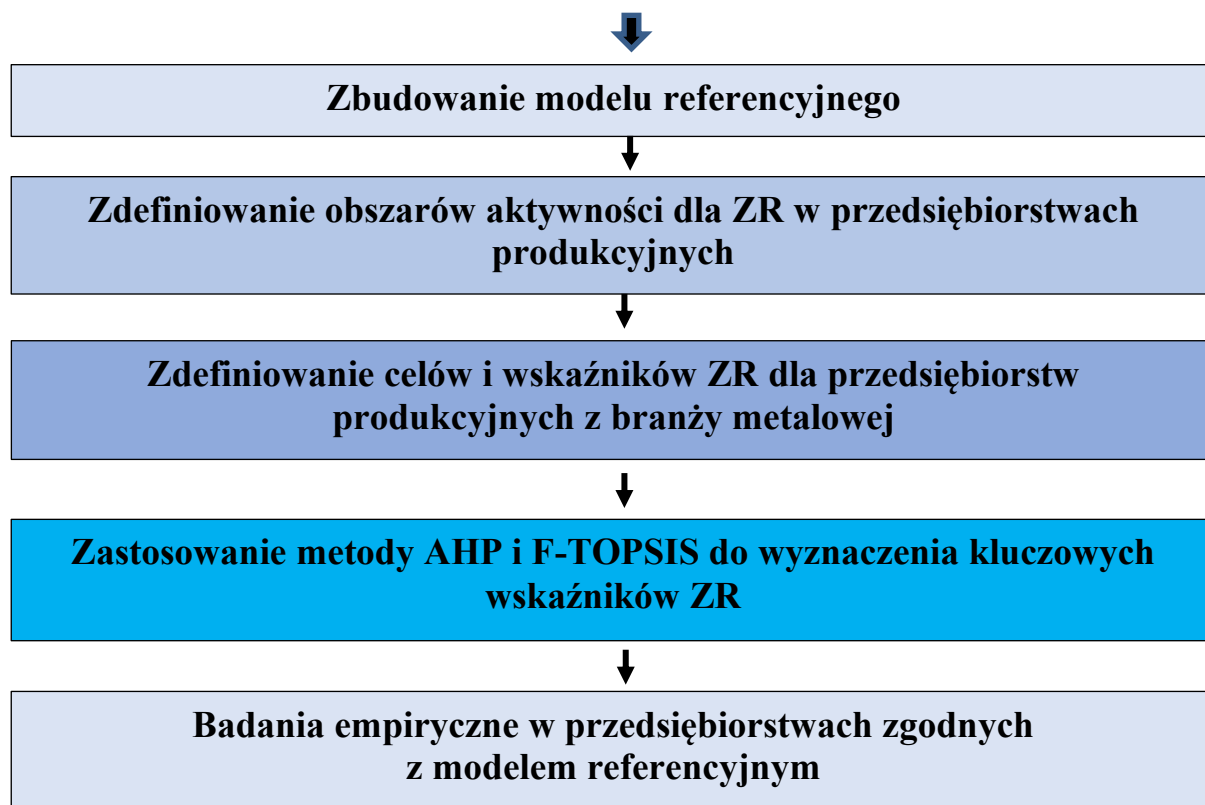
Potrzeba wdrożenia narzędzi do oceny poziomu zrównoważonego rozwoju wynika głównie z nacisku na przedsiębiorstwa produkcyjne oraz ścisłych wymagań prawnych w zakresie prowadzonych praktyk produkcyjnych (Kaldas i in., 2021). Sektor produkcji musi zrozumieć swoją rolę w realizacji celów ZR wykraczający poza granice produkcji i opracować skuteczne praktyki działania. Dotychczasowe narzędzia wykazują jedynie wąskie ramy, ograniczone do wybranych aspektów ZR (Kumar i Mani, 2021); (Elsami i in., 2018).

Realizacja celów ZR przez przemysł wytwórczy i metalowy przyczyni się do poprawy efektywności wykorzystania zasobów i tworzenia nowych możliwości biznesowych (Wang i in. 2020). Analiza literatury (Mancici i Sala, 2018) wykazała jednakże, że wiele celów ZR wyznaczonych przez ONZ nie może zostać osiągniętych przez działania branż związanych z wydobywaniem i przetwarzaniem minerałów i metali, które napędzają sektor produkcyjny i ograniczają stopę bezrobocia tworząc miejsca pracy. Przegląd literatury pozwala na stwierdzenie, iż brak jest kompleksowych i praktycznych narzędzi wspomagających realizację celów ZR w branży metalowej.

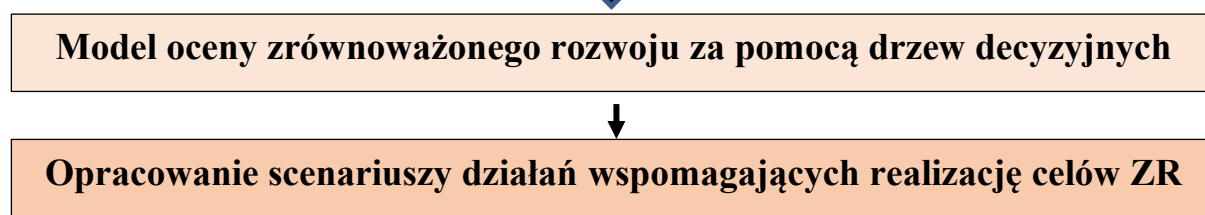
Podstawa teoretyczna odegrała kluczową rolę w opracowaniu metody oceny ZR. Proponowane ramy opierają się na klasycznych wymiarach ZR rozszerzonych o wskazywane braki w literaturze. Liczne publikacje i badania pozwoliły na sporządzenie charakterystyki ZR w kontekście przedsiębiorstw produkcyjnych, a także na zdefiniowanie celów

z uwzględnieniem specyfiki realizowanych działań. Ważnym elementem metody jest mierzalność celów poprzez przypisanie do nich odpowiednich wskaźników. Zakres opracowanej metodyki uwzględnia trzy tradycyjne wymiary ZR, a także jego trzy obszary funkcjonowania w kontekście przedsiębiorstw produkcyjnych. W przeciwieństwie do dostępnych narzędzi, proponowana metoda uwzględnia zarówno oddziaływanie produktu/wyrobu występujące w trakcie fazy produkcji, jak i poza nią. Uwzględniono także aktywne działania organizacji skierowane na poprawę wyników na poziomie ZR.

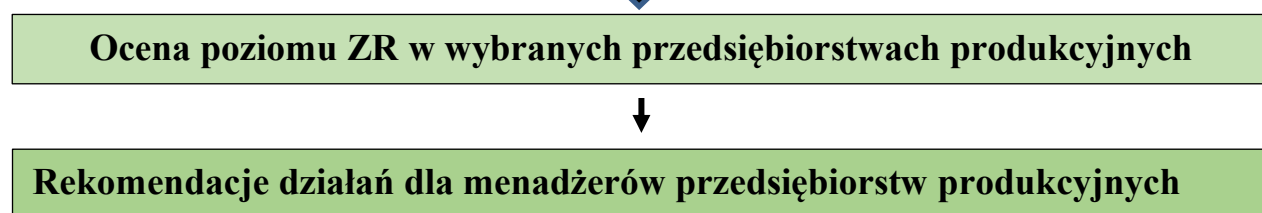
I. Wartości wskaźników ZR w przedsiębiorstwach produkcyjnych



II. Model wspomagający podejmowanie decyzji w obszarze ZR



III. Predykcja scenariuszy działań skierowanych na wzrost poziomu



Rys. 4. Metoda oceny poziomu ZR dla przedsiębiorstw produkcyjnych z branży metalowej

4.1. Wartości wskaźników ZR w przedsiębiorstwach produkcyjnych branży metalowej MŚP

4.1.1. Model referencyjny

Proponowana metodyka ma zastosowanie dla przedsiębiorstw produkcyjnych branży metalowej zgodnych z modelem referencyjnym, tj.: spełnia następujące założenia:

- Branża: metalowy.
- Zakres działania: obróbka szerokiej gamy metali; produkcja konstrukcji metalowych, produkcja precyzyjnych elementów metalowych.
- Wielkość przedsiębiorstwa: MŚP.
- Liczba pracowników: min. 10 (max. 250).
- Liczba maszyn i urządzeń: min. 3.
- Zmianowość pracy: bez ograniczeń.

4.1.2. Zdefiniowanie obszarów aktywności dla ZR w przedsiębiorstwach produkcyjnych

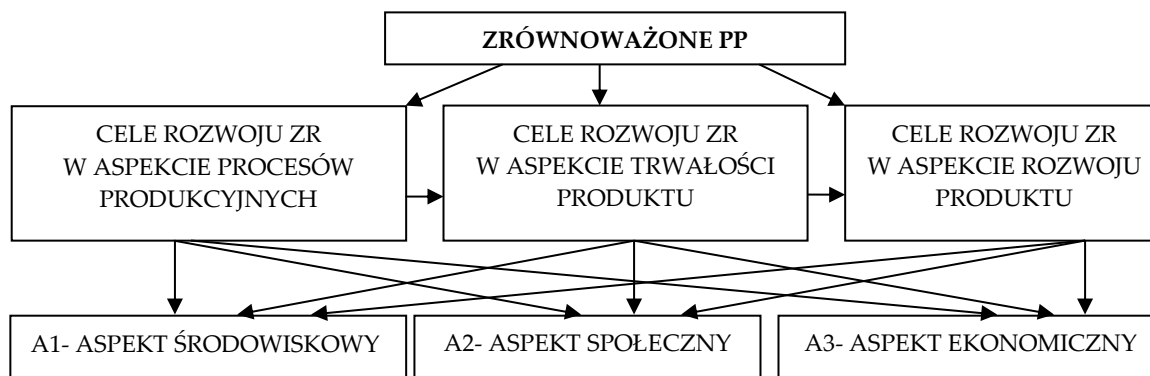
Zdefiniowano trzy obszary działania charakterystyczne dla przedsiębiorstw produkcyjnych: proces produkcyjny (O1), trwałość produkcji (O2), rozwój produktu (O3). Zdefiniowane obszary działania charakteryzują określone parametry:

O1: Procesy produkcyjne dotyczą przekształcania szeregu zasobów, według potrzeb rynku. Przekształcanie zasobów odbywa się poprzez wykorzystania budynków, maszyn i urządzeń, komputerów i ludzi. W tym obszarze główne parametry to: zużycie i typ energii, innowacyjność procesów, jakość procesów, redukcja generowania odpadów produkcyjnych.

O2: Trwałość produktu to przede wszystkim potrzeba utrzymania maksymalnego okresu fizycznej zdolności wyrobu do funkcjonowania. Ważnym parametrem w tym obszarze jest jakość, która znajduje odzwierciedlenie w zastosowaniu produktu.

O3: Rozwój produktu odnosi się wszystkich etapów wejścia w życie produktu, od koncepcji po wprowadzanie produktu na rynek. Istotnym aspektem jest tu satysfakcja klienta, zadowolenie pracowników, wpływ produktu na środowisko czy też bezpieczeństwo zarówno produkcji jak i użytkowania produktu.

Zdefiniowane obszary aktywności dla ZR w przedsiębiorstwach produkcyjnych oddziałują na trzy aspekty ZR: środowiskowe, społeczne i ekonomiczne.



Rys. 5. Zrównoważone przedsiębiorstwo produkcyjne

4.1.3. Zdefiniowanie celów i wskaźników ZR dla przedsiębiorstw produkcyjnych z branży metalowej

Sektor produkcyjny charakteryzuje się intensywnym rozwojem, innowacyjnością oraz potrzebą włączenia ZR w strategię przedsiębiorstwa, gdzie należy uwzględnić m.in. możliwość ulepszenia struktury organizacyjnej, optymalizację procesów technologicznych czy też koordynację działań organizacji z dobrem środowiska naturalnego.

Poszukując celów i wskaźników ZR charakterystycznych dla przedsiębiorstw produkcyjnych przeprowadzono analizę aktualnej literatury przedmiotu (Swarnakar i in., 2021); (Zhang i in., 2021); (Moldavska i Welo, 2019); (Patalas-Maliszewska i Łosyk, 2020); (Swarnakar i in., 2020) oraz dostępnych analiz opracowanych przez GRI. Przyjęto najczęściej wskazywane cele i wskaźniki w zakresie ZR (Swarnakar i in., 2021); (Zhang i in., 2021); (Moldavska i Welo, 2019); (Patalas-Maliszewska i Łosyk, 2020); (Kaldas i in. 2020); (Machado i in., 2019); (Moldavska i in., 2018); (Global Reporting Initiative (GRI)), (Moldavska i in., 2019); (Moldavska i in., 2016); (Rajak i in., 2015); (Singh i in., 2016); (Shibin, 2016); (Wass i in., 2014); (Chang i in., 2019); (Goncalves i in., 2019); (Leszczyńska, 2014); (Nagarajan, 2018); (Nowak-Lewandowska, 2011); (GSA); (SDG, 2019); (Manager).

Zdefiniowane cele oraz przypisane dla nich wskaźniki przedstawiono w Tab. 5.

Tabela 5. Przyjęte cele i wskaźniki ZR w poszczególnych obszarach

Obszar	Cele ZR	Wskaźniki ZR
Procesy produkcyjne (O1)	Redukcja zużycia energii (C _{PP1})	W _{pp1} - Zużycie energii (kWh) W _{pp2} – Energia odnawialna
	Wzrost innowacyjności (C _{PP2})	W _{pp3} – Modernizacja parku technologicznego
	Wzrost jakości procesów (C _{PP3})	W _{pp4} - Liczba reklamacji W _{pp5} - Liczba braków
	Redukcja generowania odpadów produkcyjnych (C _{PP4})	W _{pp6} -Możliwość ponownego wykorzystania w procesach produkcyjnych złomu produkcyjnego/odpadów produkcyjnych
Trwałość produktu (O2)	Wysoka jakość produktu w porównaniu z konkurencją (C _{TP1})	W _{TP1} - Wdrożenie auditów zarządzania jakością
	Możliwość ponownego przetworzenia produktu (C _{TP2})	W _{TP2} – Możliwość recyklingu produktu po zużyciu
	Konserwacja/serwis (C _{TP3})	W _{TP3} - Serwis posprzedażowy
Rozwój produktu (O3)	Satysfakcja klienta i pracowników (C _{RP1})	W _{RP1} – Ocena satysfakcji klienta W _{RP2} - Ocena satysfakcji pracownika
	Bezpieczne i ergonomiczne warunki pracy (C _{RP2})	W _{RP3} -Liczba wypadków
	Bezpieczeństwo procesów i produktów (C _{RP3})	W _{RP4} - Użycie niebezpiecznych substancji/materiałów w procesach produkcyjnych W _{RP5} - Użycie niebezpiecznych substancji/materiałów w produktach
	Ochrona środowiska i klimatu (C _{RP4})	W _{RP6} - Wdrożenie strategii zarządzania klimatem/działań na rzecz ochrony klimatu W _{RP7} - Kontrola emisji gazów cieplarnianych w przedsiębiorstwie

4.1.4. Zastosowanie wybranych metod analizy wielokryterialnej do wyznaczenia kluczowych wskaźników ZR

Niezbędnym działaniem do wyznaczenia kluczowych celów i wskaźników ZR było przeprowadzenie badań wstępnych w przedsiębiorstwie zgodnym z modelem referencyjnym. Ze względu na wielokryterialny charakter ZR w badaniach zastosowano metody MCDM/A. Wskazuje się, bowiem że w przeciwieństwie do klasycznych technik badań operacyjnych, metody wielokryterialne nie dają rozwiązań „obiektywnie najlepszych”, a szukają rozwiązań

kompromisowych uwzględniających zarówno przyjęte kryteria, jak i preferencje decydentów. Badania wstępne, mające na celu zbudowanie rankingu wskaźników do pomiaru oceny ZR, przeprowadzono poprzez zastosowanie metody AHP oraz metody F-TOPSIS. Dobrano metodę AHP z uwagi na możliwość dekompozycji złożonego problemu decyzyjnego (w naszym podejściu trzy analizowane obszary: O1, O2, O3) oraz na możliwość zbudowania rankingu dla skończonego zbioru wariantów (w naszym przypadku ranking wskaźników). Z kolei metoda F-TOPSIS stanowi metodę, która zalecana jest w przypadku złożonych problemów decyzyjnych opartych na grupowym podejmowaniu decyzji. Założono więc, że metody te będą odpowiednie do wyznaczenia kluczowych celów i wskaźników ZR.

Metoda AHP

Wybór zastosowania metody AHP w procesie wyboru kluczowych celów ZR uzasadnia się następująco:

- metoda ta pozwala na uchwycenie atrybutów ilościowych, jak i jakościowych w prosty sposób,
- charakteryzuje się prostotą wykonania i interpretacji,
- wykazuje zdolność do obsługi danych rzadkich lub niskiej jakości,
- wykonanie testu spójności zapewnienia jakości osądów.

Agregacja oceny ekspertów w przypadku metody AHP polega na współpracy przy ocenie relacji między atrybutami rozpatrywanej grupy. W wyniku wymiany opinii, poszczególni eksperci przyporządkowują relacjom znaczenia, w przypadku niniejszej rozprawy, zdefiniowanym celom i wskaźnikom ZR.

Metoda AHP została przeprowadzona w ramach badań wstępnych. Badania polegały na porównaniu parami poszczególnych wskaźników i celów ZR w trzech zdefiniowanych obszarów przez wytypowanych ekspertów. W badaniach wstępnych wytypowano dwóch ekspertów: właściciela przedsiębiorstwa produkcyjnego z branży metalowej oraz kierownika produkcji. Wybór ekspertów uzasadnia się wieloletnim doświadczeniem w dziedzinie zarządzania w sektorze stanowiącym obszar zainteresowań badawczych w niniejszej rozprawie.

Metodę AHP przeprowadzono w następujących etapach:

Etap I. Opracowanie macierzy porównań parami

W pracy przyjęto skalę ważności, na podstawie której wykonano macierz porównywania parami w trzech przyjętych obszarach. W procesie porównywania przyjęto fundamentalną skalę Satty'ego (Tab. 6).

Tabela 6. Fundamentalna skala Satty'ego (źródło: opracowanie własne na podstawie: Saaty, 1990)

Skala ważności	Interpretacja
1	Tak samo istotne- brak przewagi jednego wariantu nad drugim
3	Trochę ważniejsze- umiarkowana przewaga wariantu A nad wariantem B
5	Zdecydowanie ważniejsze- istotna lub silna przewaga wariantu A nad wariantem B
7	Znacznie ważniejsze- bardzo silna przewaga wariantu A nad wariantem B
9	Krańcowo ważniejsze- ekstremalna przewaga wariantu A nad wariantem B
2,4,6,8	Wartości pośrednie pomiędzy powyższymi
Odwrotność skali	jeżeli element <i>i</i> otrzyma ocenę z powyższej skali, będącą porównaniem z elementem <i>j</i> , wówczas <i>j</i> ma odwrotną wartość

Etap II. Obliczanie wag dla poszczególnych wariantów

Etap III. Wyznaczenie wskaźnika niespójności $\lambda_{\max}$

Etap IV. Wyznaczenie wartości współczynnika zgodności macierzy CI

Wartość współczynnika niezgodności macierzy CI obliczono przy zastosowaniu wzoru:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n-1)}, \text{ gdzie:}$$

$\lambda_{\max}$ - wskaźnik niespójności

n- wyraz macierzy

Etap V. Wyznaczenie wartości współczynnika niezgodności CR

Wartość współczynnika niezgodności macierzy CR obliczono przy zastosowaniu wzoru:

$$CR = \frac{100\% \cdot CI}{RI}, \text{ gdzie:}$$

CI- indeks niezgodności

RI- indeks losowy wg Satty'ego (dla n=11)

Obszar 1. Procesy produkcyjne

Tabela 7. Macierz porównań parami dla obszaru: procesy produkcyjne

W	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆	SUMA
W ₁	1,00	1,00	3,00	1,00	1,00	2,00	9,0
W ₂	1,00	1,00	1,00	0,33	1,00	3,00	7,3
W ₃	0,33	1,00	1,00	0,50	1,00	1,00	4,8
W ₄	1,00	3,00	2,00	1,00	1,00	1,00	9,0
W ₅	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	6,0
W ₆	0,50	0,33	1,00	1,00	1,00	1,00	4,8
SUMA	4,8	7,3	9,0	4,8	6,0	9,0	41,00

Tabela 8. Wyznaczanie wag dla poszczególnych wariantów w obszarze: procesy produkcyjne

W	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆
W ₁	0,21	0,14	0,33	0,21	0,17	0,22
W ₂	0,21	0,14	0,11	0,07	0,17	0,33
W ₃	0,07	0,14	0,11	0,10	0,17	0,11
W ₄	0,21	0,41	0,22	0,21	0,17	0,11
W ₅	0,21	0,14	0,11	0,21	0,17	0,11
W ₆	0,10	0,05	0,11	0,21	0,17	0,11

Tabela 9. Ranking przyjętych wariantów dla obszaru: procesy produkcyjne

Wariant	Waga	Ranking
W ₁	0,21	2
W ₂	0,17	3
W ₃	0,12	5
W ₄	0,22	1
W ₅	0,16	4
W ₆	0,12	5
SUMA	1,000	-

Tabela 10. Wyznaczenie wskaźnika niespójności dla obszaru: procesy produkcyjne

Wariant	Suma ocen	Waga	$\lambda_{\max}$
W ₁	4,8	0,21	1,02
W ₂	7,3	0,17	1,25
W ₃	9,0	0,12	1,05
W ₄	4,8	0,22	1,07
W ₅	6,0	0,16	0,94
W ₆	9,0	0,12	1,12
SUMA			6,44

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n-1)} = \frac{6,44 - 6}{(6-5)} = 0,09$$

$$CR = \frac{100\% \cdot CI}{RI} = \frac{100\% \cdot 0,09}{1,25} = 7,2\%$$

Uzyskana wartość wskaźnika CR (7, 2%) świadczy, że przy porównywaniu elementów przyjętych dla obszaru procesy produkcyjne zachowano logikę ocen.

Obszar 2. Trwałość produktu

Tabela 11. Macierz porównań parami dla obszaru: trwałość produktu

W	W ₁	W ₂	W ₃	SUMA
W ₁	1,00	0,33	0,50	1,8
W ₂	3,00	1,00	2,00	6,0
W ₃	2,00	0,50	1,00	3,5
SUMA	6,0	1,8	3,5	11,33

Tabela 12. Wyznaczanie wag dla poszczególnych wariantów w obszarze: trwałość produktu

W	W ₁	W ₂	W ₃
W ₁	0,17	0,18	0,14
W ₂	0,50	0,55	0,57
W ₃	0,33	0,27	0,29

Tabela 13. Ranking przyjętych wariantów dla obszaru: trwałość produktu

Wariant	Waga	Ranking
W ₁	0,16	3
W ₂	0,54	1
W ₃	0,30	2
SUMA	1,000	-

Tabela 14. Wyznaczenie wskaźnika niespójności dla obszaru: trwałość produktu

Wariant	Suma ocen	Waga	$\lambda_{\max}$
W ₁	6,0	0,16	0,98
W ₂	1,8	0,54	1,0
W ₃	3,5	0,30	1,04
SUMA			3,01

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n-1)} = \frac{3,01 - 3}{(3-1)} = 0,01$$

$$CR = \frac{100\% \cdot CI}{RI} = \frac{100\% \cdot 0,01}{0,52} = 1,92\%$$

Uzyskana wartość wskaźnika CR (1,92%) świadczy, że przy porównywaniu elementów przyjętych dla obszaru trwałość produktu zachowano logikę ocen.

Obszar 3. Rozwój produktu

Tabela 15. Macierz porównań parami dla obszaru: rozwój produktu

W	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	SUMA
W1	1,00	1,00	1,00	0,33	0,33	3,00	2,00	8,7
W2	1,00	1,00	0,50	0,50	2,00	3,00	2,00	10,0
W3	1,00	2,00	1,00	0,33	0,33	3,00	3,00	10,7
W4	3,00	2,00	3,00	1,00	1,00	2,00	2,00	14,0
W5	3,00	2,00	3,00	1,00	1,00	2,00	2,00	14,0
W6	0,33	0,33	0,33	0,50	0,50	1,00	1,00	4,0
W7	0,50	0,50	0,33	0,50	0,50	1,00	1,00	4,3
SUMA	9,8	8,8	9,2	4,2	5,7	15,0	13,0	65,67

Tabela 16. Wyznaczanie wag dla poszczególnych wariantów w obszarze: rozwój produktu

W	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7
W ₁	0,10	0,11	0,11	0,08	0,06	0,20	0,15
W ₂	0,10	0,11	0,05	0,12	0,35	0,20	0,15
W ₃	0,10	0,23	0,11	0,08	0,06	0,20	0,23
W ₄	0,31	0,23	0,33	0,24	0,18	0,13	0,15
W ₅	0,31	0,23	0,33	0,24	0,18	0,13	0,15
W ₆	0,03	0,04	0,04	0,12	0,09	0,07	0,08
W ₇	0,05	0,06	0,04	0,12	0,09	0,07	0,08

Tabela 17. Ranking przyjętych wariantów dla obszaru: rozwój produktu

Wariant	Waga	Ranking
W ₁	0,12	4
W ₂	0,16	2
W ₃	0,14	3
W ₄	0,22	1
W ₅	0,22	1
W ₆	0,07	5
W ₇	0,07	5
SUMA	1,000	-

Tabela 18. Wyznaczenie wskaźnika niespójności dla obszaru: rozwój produktu

Wariant	Suma ocen	Waga	$\lambda_{\max}$
W ₁	9,8	0,12	1,15
W ₂	8,8	0,16	1,4
W ₃	9,2	0,14	1,32
W ₄	4,2	0,22	0,93
W ₅	5,7	0,22	1,26
W ₆	15,0	0,07	0,99
W ₇	13,0	0,07	0,92
SUMA			7,95

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{(n-1)} = \frac{7,95 - 7}{(7-1)} = 0,16$$

$$CR = \frac{100\% * CI}{RI} = \frac{100\% * 0,16}{1,35} = 8,15\%$$

Uzyskana wartość wskaźnika CR (8,15%) świadczy, że przy porównywaniu elementów przyjętych dla obszaru rozwój produktu zachowano logikę ocen.

F-TOPSIS

Zastosowanie metody F-TOPSIS wymagało zdefiniowania następujących elementów:

Element 1- zbiór kryteriów: $C = \{C_{pp1}, C_{pp2}, \dots, C_{TP7}\}$,

Element 2- zbiór podkryteriów: $W = \{W_{pp1}, W_{pp2}, \dots, W_{TP7}\}$,

Element 3- zbiór alternatyw: $A = \{A1, A2, A3\}$,

Element 4- zbiór ekspertów: $DMs = \{DM1, DM2\}$.

Zbiór kryteriów i podkryteriów stanowi przyjęte cele i wskaźniki ZR przedstawione w Tab.5.

Zbiór alternatyw: $A = \{A1, A2, A3\}$ określono jako poziomy zarządzania w przedsiębiorstwie przyjmując, że: A1- operacyjny, A2- taktyczny, A3- strategiczny. Jako ekspertów przyjęto właściciela firmy oraz kierownika produkcji.

Wyznaczanie zagregowanych ocen w przypadku metody F-TOPSIS wiąże się z całkowitą autonomią poszczególnych ekspertów w dokonywaniu ocen. W celu agregacji ocen ekspertów zastosowano operator IFWA.

Metodę F-TOPSIS przeprowadzono w następujących etapach:

Etap I. Obliczono wagi decydentów

Wagi decydentów zostały ocenione na podstawie wzoru (15) oraz przyjętych terminów językowych oraz IFNs (Tab. 19).

Tabela 19. Przyjęte terminy językowe dla rankingu decydentów, kryteriów i subkryteriów

Terminy językowe	IFNs
Mało ważny (LC)	(0.10, 0.90)
Średnio ważny (MC)	(0.25, 0.70)
Ważny (I)	(0.45, 0.50)
Bardzo ważny (VI)	(0.75, 0.20)
Kluczowy (C)	(0.90, 0.10)

Wagi poszczególnych decydentów przedstawiono w Tab. 20.

Tabela 20. Znaczenie decydentów oraz ich wagi

	DM1	DM2
Terminy językowe	Kluczowy	Bardzo ważny
Waga	0,539	0,461

W kolejnym kroku określono terminy językowe i IFN dla przyjętych alternatyw (Tab. 21)

Tabela 21. Terminy językowe dla rankingu alternatyw

Terminy językowe	IFNs
Bardzo ważny poziom (VHL)	[1,00;0,00]
Ważny poziom (HL)	[0,75;0,25]
Znaczący poziom (SL)	[0,55;0,35]
Średni poziom (ML)	[0,40;0,50]
Mało istotny poziom (IL)	[0,20;0,65]
Nieznaczący poziom (NL)	[0,00;1,00]

Na podstawie Tab.19 eksperci ocenili przyjęte kryteria (zdefiniowane cele ZR) w odniesieniu do przyjętych alternatyw (Tab.22).

Tabela 22. Ranking przyjętych alternatyw

Obszar	Kryteria	Poziom zarządzania przedsiębiorstwem	DMs	
			DM1	DM2
O1	C _{pp1}	ST	VHL	VHL
		TA	SL	HL
		OP	IL	ML
	C _{pp2}	ST	VHL	VHL
		TA	HL	HL
		OP	IL	IL
	C _{pp3}	ST	SL	HL
		TA	HL	VHL
		OP	ML	ML
	C _{pp4}	ST	HL	HL

		TA	VHL	VHL
		OP	IL	ML
O2	C _{TP1}	ST	HL	HL
		TA	VHL	VHL
		OP	IL	IL
	C _{TP2}	ST	SL	HL
		TA	HL	VHL
		OP	ML	SL
	C _{TP3}	ST	VHL	VHL
		TA	HL	HL
		OP	IL	NL
O3	C _{RP1}	ST	VHL	VHL
		TA	HL	SL
		OP	IL	ML
	C _{RP2}	ST	HL	VHL
		TA	ML	ML
		OP	NL	NL
	C _{RP3}	ST	VHL	VHL
		TA	VHL	VHL
		OP	IL	ML
	C _{RP4}	ST	HL	SL
		TA	SL	HL
		OP	IL	NL

W Tab. 23 przedstawiono ranking alternatyw w oparciu o IFN.

Tabela 23. Ranking przyjętych alternatyw w oparciu o IFNs

Obszar	Kryteria	Poziom zarządzania przedsiębiorstwem	DMs	
			DM1	DM2
O1	C _{pp1}	ST	(1.00 , 0.00)	(1.00 , 0.00)
		TA	(0.55, 0.35)	(0.75, 0.25)
		OP	(0.20, 0.65)	(0.40, 0.50)
	C _{pp2}	ST	(1.00 , 0.00)	(1.00 , 0.00)
		TA	(0.75, 0.25)	(0.75, 0.25)
		OP	(0.20, 0.65)	(0.20, 0.65)
	C _{pp3}	ST	(0.55, 0.35)	(0.75, 0.25)
		TA	(0.75, 0.25)	(1.00 , 0.00)
		OP	(0.40, 0.50)	(0.40, 0.50)
	C _{pp4}	ST	(0.75, 0.25)	(0.75, 0.25)
		TA	(1.00 , 0.00)	(1.00 , 0.00)
		OP	(0.20, 0.65)	(0.40, 0.50)
O2	C _{TP1}	ST	(0.75, 0.25)	(0.75, 0.25)
		TA	(1.00 , 0.00)	(1.00 , 0.00)
		OP	(0.20, 0.65)	(0.20, 0.65)
	C _{TP2}	ST	(0.55, 0.35)	(0.75, 0.25)
		TA	(0.75, 0.25)	(1.00 , 0.00)
		OP	(0.40, 0.50)	(0.55, 0.35)
	C _{TP3}	ST	(1.00 , 0.00)	(1.00 , 0.00)
		TA	(0.75, 0.25)	(0.75, 0.25)
		OP	(0.20, 0.65)	(0.00, 1.00)
O3	C _{RP1}	ST	(1.00 , 0.00)	(1.00 , 0.00)
		TA	(0.75, 0.25)	(0.55, 0.45)
		OP	(0.20, 0.65)	(0.40, 0.50)
	C _{RP2}	ST	(0.75, 0.25)	(1.00 , 0.00)
		TA	(0.40, 0.50)	(0.40, 0.50)

	C_{RP3}	OP	(0.00, 1.00)	(0.00, 1.00)
		ST	(1.00, 0.00)	(1.00, 0.00)
		TA	(1.00, 0.00)	(1.00, 0.00)
		OP	(0.20, 0.65)	(0.40, 0.50)
	C_{RP4}	ST	(0.75, 0.25)	(0.55, 0.35)
		TA	(0.55, 0.35)	(0.75, 0.25)
		OP	(0.20, 0.65)	(0.00, 1.00)

Etap II. Budowa zagregowanej intuicjonistycznej rozmytej macierzy w oparciu o opinie decydentów

Zagregowana intuicjonistyczna rozmyta macierz zbudowaną w oparciu o opinie decydentów przedstawiono w Tab. 24.

Tabela 24. Zagregowana intuicjonistyczna rozmyta macierz

R=		ST	TA	OP
	C_{pp1}	(1.000, 0.000, 0.000)	(0.656, 0.210, 0.043)	(0.299, 0.576, 0.124)
	C_{pp2}	(1.000, 0.000, 0.000)	(0.750, 0.250, 0.000)	(0.200, 0.650, 0.150)
	C_{pp3}	(0.657, 0.299, 0.043)	(1.000, 0.000, 0.000)	(0.400, 0.500, 0.100)
	C_{pp4}	(0.750, 0.250, 0.000)	(1.000, 0.000, 0.000)	(0.299, 0.576, 0.125)
	C_{RP1}	(0.750, 0.250, 0.000)	(1.000, 0.000, 0.000)	(0.200, 0.650, 0.150)
	C_{RP2}	(0.656, 0.210, 0.043)	(1.000, 0.000, 0.000)	(0.475, 0.424, 0.101)
	C_{RP3}	(1.000, 0.000, 0.000)	(0.750, 0.250, 0.000)	(0.113, 0.792, 0.093)
	C_{TP1}	(1.000, 0.000, 0.000)	(0.672, 0.291, 0.036)	(0.299, 0.576, 0.125)
	C_{TP2}	(1.000, 0.000, 0.000)	(0.400, 0.500, 0.100)	(0.000, 1.000, 0.000)
	C_{TP3}	(1.000, 0.000, 0.000)	(1.000, 0.000, 0.000)	(0.299, 0.576, 0.125)
	C_{TP4}	(0.672, 0.291, 0.036)	(0.656, 0.210, 0.043)	(0.133, 0.793, 0.094)

Etap III. Wyznaczenie wag kryteriów i podkryteriów

Decydenci ocenili przyjęte kryteria i podkryteria przy zastosowaniu terminów językowych (Tab.19, Tab. 21). Opinie otrzymane w formie terminów językowych zostały następnie przedstawione przy wykorzystaniu IFNs (Tab.25, Tab. 26).

Tabela 25. Ważność kryteriów według opinii DMs

Obszar	Kryteria	DMs	
		DM1	DM2
O1	C _{pp1}	C	VI
	C _{pp2}	C	C
	C _{pp3}	VI	C
	C _{pp4}	VI	VI
O2	C _{RP1}	I	MC
	C _{RP2}	MC	I
	C _{RP3}	VI	VI
O3	C _{TP1}	C	C
	C _{TP2}	VI	C
	C _{TP3}	VI	VI
	C _{TP4}	MC	I

Tabela 26. Ważność subkryteriów według opinii DMs

Obszar	Subkryteria	DMs	
		DM1	DM2
O1	W _{pp1}	C	VI
	W _{pp2}	VI	VI
	W _{pp3}	VI	VI
	W _{pp4}	VI	VI
	W _{pp5}	VI	VI
	W _{pp6}	VI	VI
O2	W _{TP1}	MC	LC
	W _{TP2}	I	I
	W _{TP3}	I	VI
O3	W _{RP1}	C	C
	W _{RP2}	C	C
	W _{RP3}	C	VI
	W _{RP4}	I	VI

	W_{RP5}	C	VI
	W_{RP6}	MC	LC
	W_{RP7}	MC	MC

Tabela 27. Ocena kryteriów opartych na IFNs

Obszar	Kryteria	DMs	
		DM1	DM2
O1	C_{pp1}	(0.90, 0.10)	(0.75, 0.25)
	C_{pp2}	(0.90, 0.10)	(0.90, 0.10)
	C_{pp3}	(0.75, 0.25)	(0.90, 0.10)
	C_{pp4}	(0.75, 0.25)	(0.75, 0.25)
O2	C_{RP1}	(0.45, 0.55)	(0.25, 0.75)
	C_{RP2}	(0.25, 0.75)	(0.45, 0.55)
	C_{RP3}	(0.75, 0.25)	(0.75, 0.25)
O3	C_{TP1}	(0.90, 0.10)	(0.90, 0.10)
	C_{TP2}	(0.75, 0.25)	(0.90, 0.10)
	C_{TP3}	(0.75, 0.25)	(0.75, 0.25)
	C_{TP4}	(0.25, 0.75)	(0.45, 0.55)

Tabela 28. Ocena podkryteriów opartych na IFNs

Obszar	Subkryteria	DMs	
		DM1	DM2
O1	W_{pp1}	(0.90, 0.10)	(0.75, 0.25)
	W_{pp2}	(0.75, 0.25)	(0.75, 0.25)
	W_{pp3}	(0.75, 0.25)	(0.75, 0.25)
	W_{pp4}	(0.75, 0.25)	(0.75, 0.25)
	W_{pp5}	(0.75, 0.25)	(0.75, 0.25)
	W_{pp6}	(0.75, 0.25)	(0.75, 0.25)
O2	W_{TP1}	(0.25, 0.75)	(0.10, 0.90)
	W_{TP2}	(0.45, 0.55)	(0.45, 0.55)
	W_{TP3}	(0.45, 0.55)	(0.75, 0.25)
O3	W_{RP1}	(0.90, 0.10)	(0.90, 0.10)
	W_{RP2}	(0.90, 0.10)	(0.90, 0.10)
	W_{RP3}	(0.90, 0.10)	(0.75, 0.25)
	W_{RP4}	(0.45, 0.55)	(0.75, 0.25)
	W_{RP5}	(0.90, 0.10)	(0.75, 0.25)
	W_{RP6}	(0.25, 0.75)	(0.10, 0.90)
	W_{RP7}	(0.25, 0.75)	(0.25, 0.75)

Etap IV. Wyznaczenie zagregowanych wag dla przyjętych kryteriów i podkryteriów

Agregację ważności przyjętych kryteriów i podkryteriów wyznaczono zgodnie z opiniami DMs na podstawie wzoru (14). Wyniki przedstawiono w Tab. 29.

Tabela 29. Zagregowana ocena ważności kryteriów i podkryteriów

Obszar	Kryteria	DMs	
		DM1	DM2
O1	C _{pp} 1	(0.90, 0.10)	(0.75, 0.20)
	C _{pp} 2	(0.75, 0.20)	(0.75, 0.20)
	C _{pp} 3	(0.75, 0.20)	(0.90, 0.10)
	C _{pp} 4	(0.45, 0.50)	(0.75, 0.20)
O2	C _{RP} 1	(0.25, 0.70)	(0.10, 0.90)
	C _{RP} 2	(0.25, 0.70)	(0.45, 0.55)
	C _{RP} 3	(0.75, 0.20)	(0.75, 0.20)
O3	C _{TP} 1	(0.90, 0.10)	(0.75, 0.20)
	C _{TP} 2	(0.45, 0.50)	(0.75, 0.20)
	C _{TP} 3	(0.75, 0.20)	(0.75, 0.20)
	C _{TP} 4	(0.25, 0.70)	(0.10, 0.90)

Ostateczne wagi zagregowanych kryteriów i podkryteriów (ACW) wyznaczono za pomocą wzoru (19). Wyniki przedstawiono w Tab. 30.

Tabela 30. Zagregowana ocena wag kryteriów podkryteriów (ACW)

W=	AC _{pp} W1	(0.8474, 0.1525, 0.0001)
	AC _{pp} W2	(0.7500, 0.2500, 0.0000)
	AC _{pp} W3	(0.8361, 0.1638, 0.0001)
	AC _{pp} W4	(0.6176, 0.3823, 0.0391)
	AC _{pp} W5	(0.6405, 0.3596, 0.0001)
	AC _{pp} W6	(0.6176, 0.3823, 0.0001)
	AC _{TP} W1	(0.1842, 0.8157, 0.0001)
	AC _{TP} W2	(0.3499, 0.6501, 0.0000)
	AC _{TP} W3	(0.7500, 0.2500, 0.0000)
	AC _{RP} W1	(0.8474, 0.1525, 0.0001)
	AC _{RP} W2	(0.6176, 0.3823, 0.0001)
	AC _{RP} W3	(0.7500, 0.2500, 0.0000)
	AC _{RP} W4	(0.1842, 0.8157, 0.0001)

	AC _{RP} W5	(0.6404, 0.3596, 0.0000)
	AC _{RP} W6	(0.8474, 0.1525, 0.0001)
	AC _{RP} W7	(0.9000, 0.1000, 0.0000)

Etap V. Budowa zagregowanej ważonej intuicjonistycznej rozmytej macierzy decyzyjnej

Na podstawie zagregowanej intuicjonistycznej rozmytej macierzy decyzji (Tab. 31) oraz wag kryteriów i podkryteriów (W) stworzono zagregowaną ważoną intuicjonistyczną rozmytą macierz decyzyjną, gdzie zastosowano wzory (22), (23).

Tabela 31. Zagregowana ważona intuicjonistyczna rozmyta macierz decyzyjna

R'=		ST	TA	OP
	C _{pp} 1	(0.874,0.153,0.001)	(0.556, 0.330,0.114)	(0.253, 0.641,0.106)
	C _{pp} 2	(0.750,0.250,0.000)	(0.563,0.434,0.003)	(0.150,0.738,0.012)
	C _{pp} 3	(0.549,0.414,0.037)	(0.836,0.164,0.000)	(0.334,0.582,0.084)
	C _{pp} 4	(0.493,0.519,0.042)	(0.618,0.382,0.000)	(0.131,0.728,0.141)
	C _{TP} 1	(0.138,0.862,0.000)	(0.184,0.816,0.002)	(0.037,0.935,0.028)
	C _{TP} 2	(0.229,0.724,0.047)	(0.349,0.650,0.001)	(0.166,0.798,0.036)
	C _{TP} 3	(0.750,0.250,0.000)	(0.563,0.437,0.000)	(0.085,0.844,0.071)
	C _{RP} 1	(0.847,0.153,0.000)	(0.569,0.399,0.032)	(0.253,0.641,0.106)
	C _{RP} 2	(0.618,0.382,0.000)	(0.247,0.691,0.062)	(0.000,1.000,0.000)
	C _{RP} 3	(0.750,0.250,0.000)	(0.750,0.250,0.000)	(0.224,0.682,0.094)
	C _{RP} 4	(0.124,0.869,0.007)	(0.121,0.854,0.025)	(0.024,0.962,0.014)

Etap VI. Wyznaczenie intuicjonistycznego rozmytego rozwiązania idealnego i antyidealnego

W pracy przyjęto podział wskaźników na dwa typy: *stymulanty* i *destymulanty*. Wskaźnik określony jako *stymulanty* oznacza, że im wyższa wartość wskaźnika, tym lepiej (wyższy poziom ZR). Natomiast wskaźnik określony jako *destymulanty*, oznacza, że im niższa wartość wskaźnika tym lepiej.

Tabela 32. Określenie typu wskaźników

Obszar	Wskaźniki	Typ	
		S	DS
O1	C _{pp} 1		x
	C _{pp} 2	x	
	C _{pp} 3	x	
	C _{pp} 4		x
O2	C _{TP} 1	x	
	C _{TP} 2	x	
	C _{TP} 3	x	
O3	C _{RP} 1	x	
	C _{RP} 2	x	
	C _{RP} 3	x	
	C _{RP} 4	x	

Zgodnie z podziałem przedstawionym w Tab. 32 wybrane kryteria należą odpowiednio do:

$$J1 = \{ C_{pp2}, C_{pp3}, C_{TP1}, C_{TP2}, C_{TP3}, C_{RP1}, C_{RP2}, C_{RP3}, C_{RP4} \}$$

$$J2 = \{ C_{pp1}, C_{pp4} \}$$

gdzie:

J1- stymulanty

J2- destymulanty

Do wyznaczenia intuicjonistycznego rozmytego rozwiązania idealnego i antyidealnego wykorzystano wzory 24-28.

$$A^+ = \begin{pmatrix} (0.253, 0.641, 0.106) & (0.750, 0.250, 0.000) & (0.836, 0.164, 0.000) & (0.131, 0.780, 0.089) \\ & (0.185, 0.816, 0.000) & (0.349, 0.650, 0.001) & (0.750, 0.250, 0.000) \\ (0.847, 0.153, 0.000) & (0.618, 0.382, 0.000) & (0.750, 0.250, 0.000) & (0.124, 0.869, 0.007) \end{pmatrix}$$

$$A^- = \begin{pmatrix} (0.847, 0.153, 0.000) & (0.150, 0.738, 0.112) & (0.334, 0.582, 0.084) & (0.618, 0.382, 0.000) \\ & (0.037, 0.935, 0.028) & (0.166, 0.798, 0.036) & (0.085, 0.844, 0.071) \\ (0.253, 0.641, 0.106) & (0.000, 1.000, 0.000) & (0.224, 0.682, 0.094) & (0.024, 0.962, 0.014) \end{pmatrix}$$

Etap VII. Obliczenie miary separacji i współczynnika bliskości

Pomiar separacji między alternatywami w intuicjonistycznym zbiorze rozmytym został wykonany przy użyciu znormalizowanej odległości euklidesowej (29-30). Następnie wyznaczono względny współczynnik bliskości do rozwiązania idealnego na podstawie wzoru (31). Wyniki przedstawiono w Tab. 33.

Tabela 33. Współczynnik względnej bliskości i miary separacji dla przyjętych poziomów zarządzania

Poziom zarządzania	S^+	S^-	Ci^*	Ranking
ST	0.044	0.154	0.222	1
TA	0.046	0.098	0.319	2
OP	0.175	0.045	0.795	3

Etap VIII. Ranking wariantów decyzyjnych

Aby uszeregować alternatywy, najpierw obliczono współczynnik Ci^* , a następnie uszeregowano alternatywy w porządku malejącym Ci^* . W studium przypadku przyjęto trzy poziomy, które zostały ułożone w następujący sposób $ST < TA < OP$. W wyniku obliczeń na podstawie współczynnika względnej bliskości i miary separacji poziom ST został uznany za kluczowy dla badanej firmy. Następnie, na podstawie wyników zagregowanej ważonej intuicjonistycznej macierzy decyzji rozmytych, kluczowe cele ZR zostały wybrane dla poziomu ST w kolejności malejącej parametru μ .

Tabela 34. Kluczowe cele ZR dla zdefiniowanego poziomu zarządzania

Ranking	Cele ZR = Kryteria	Obszar
1	C_{pp1}	O1
2	C_{rp1}	O3
3	C_{pp2}	O1
3	C_{rp3}	O3
3	C_{tp3}	O2
4	C_{rp2}	O3
5	C_{pp3}	O1
6	C_{pp4}	O1
7	C_{tp2}	O2
8	C_{rp4}	O3

Weryfikacja wybranych metod

Zastosowanie metody AHP i F-TOPSIS umożliwiło zbadanie i ocenę zestawu wskaźników zrównoważonego rozwoju, w konsekwencji otrzymując uporządkowany ich ranking w zdefiniowanych obszarach aktywności ZR charakterystycznych dla przedsiębiorstw produkcyjnych. Badania wstępne stanowiły podstawę do harmonizacji oceny ZR w środowisku produkcyjnym. Następnie poddano weryfikacji zastosowane metody poprzez ich porównanie (Tab. 35).

Tabela 35. Weryfikacja rozwiązań

Metoda AHP	Metoda F-TOPSIS
Ograniczenie wyłącznie do „hard opinions”	Zastosowanie „soft opinions”
Weryfikacja logiczności (współczynnik CR)	Określenie idealnego i anty-idealnego wzorca
Zaleca się ograniczoną liczbę wariantów w celu otrzymania rzetelnych wyników	Brak zalecanych ograniczeń
Sztywny zakres ocen	Brak sztywnego zakresu ocen
Założenie pełnej porównywalności elementów	Przyjęcie wag dla zdefiniowanych elementów
Założenie pełnej porównywalności decyzji ekspertów	Przyjęcie wag dla ekspertów

W procesie weryfikacji wybranych metod MCDM w dalszej części pracy zastosowano metodę F-TOPSIS ze względu na występowanie niepewności i nieprecyzyjności ocen wariantów decyzyjnych względem przyjętych kryteriów w kontekście wieloaspektowości ZR.

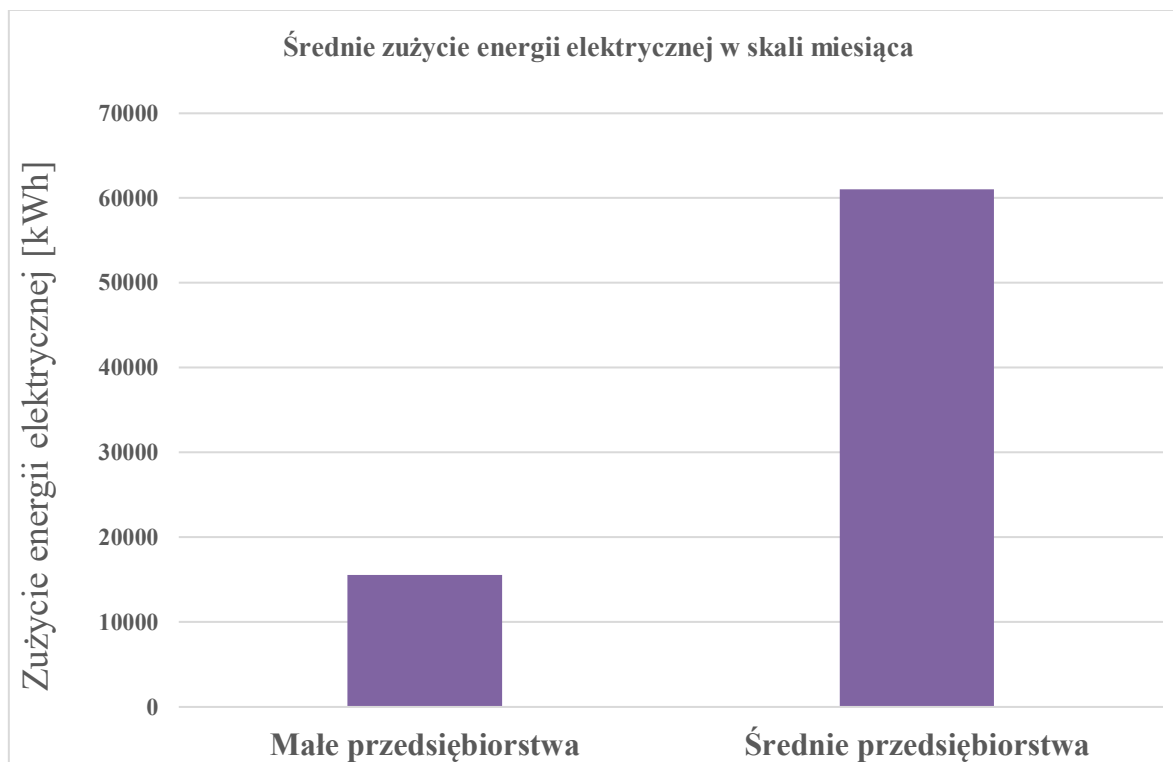
4.1.5. Badania empiryczne w przedsiębiorstwach zgodnych z modelem referencyjnym

W badaniach empirycznych zastosowano podejście dwuetapowe. W pierwszym etapie przeprowadzono analizę wyników metody F-TOPSIS, stanowiących podstawę do opracowania kwestionariuszy ankiety. Kwestionariusz ankiety (Załącznik nr 1) został opracowany na podstawie wyników metody F-TOPSIS, tj. w celu uzyskania wartości kluczowych wskaźników do oceny poziomu ZR. Założono, że ograniczona liczba pytań w kwestionariuszu ankiety daje większe szanse powodzenia uzyskania odpowiedzi od respondentów. Opracowany formularz ankiety składa się z 34 pytań dotyczących parametrów i działań przedsiębiorstw w zakresie przyjętych celów ZR (Tab.1).

Kwestionariusze ankiet zostały zastosowane w celu przeprowadzania badań empirycznych w przedsiębiorstwach zgodnych z modelem referencyjnym. Badania przeprowadzono wśród 100 polskich przedsiębiorstw z branży metalowej w styczniu 2022r. Przyjęta grupa badawcza

stanowi 1% grupy reprezentacyjnej. Kwestionariusze ankiet zostały skierowane do szczebla kierowniczego w badanych przedsiębiorstwach.

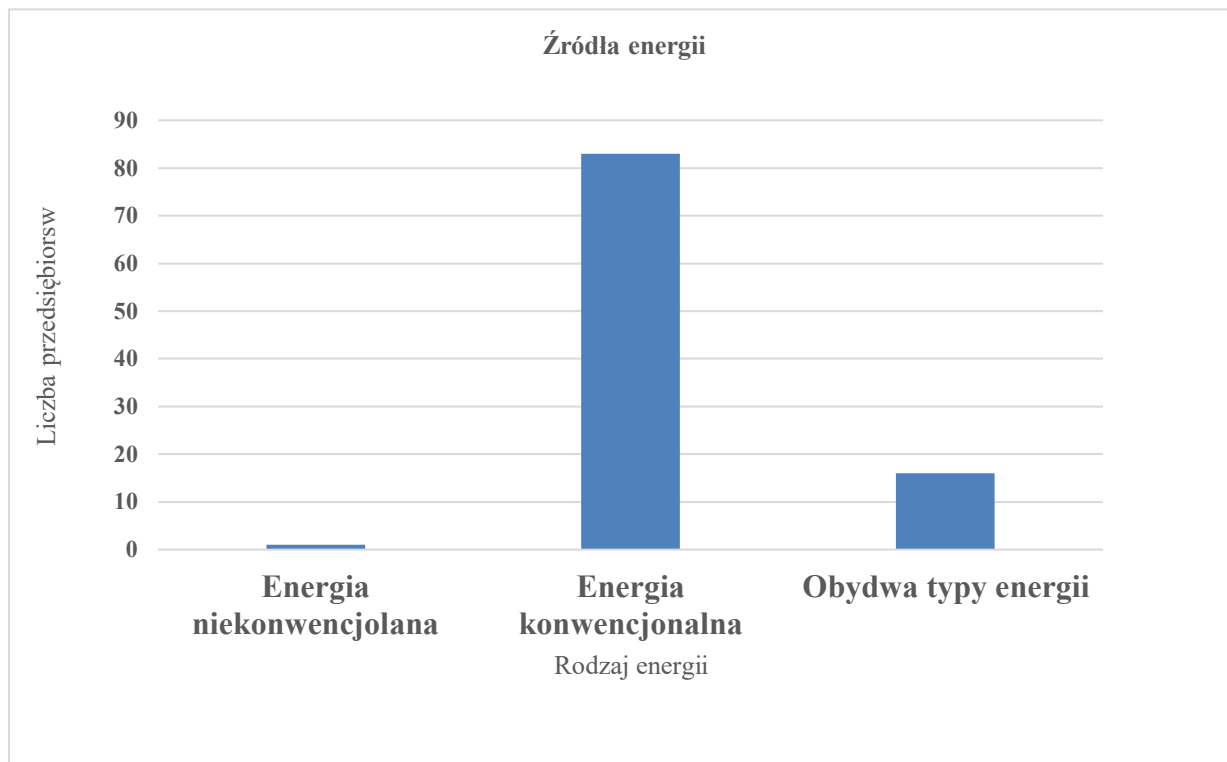
W dalszej części pracy przedstawiono wyłącznie wyniki otrzymane w zakresie celów i wskaźników ZR wyznaczonych metodą F-TOPSIS. Pozostałe uzyskane wyniki otrzymane z kwestionariuszy ankiet stanowią Załącznik nr 2.



Rys. 6. Średnie zużycie energii elektrycznej w skali miesiąca

Rys.6 przedstawia średnie zużycie energii elektrycznej (W_{ppl}) w skali miesiąca w badanych klasach przedsiębiorstw. Otrzymane wyniki wskazują na oczywistą zależność w przypadku klasyfikacji przedsiębiorstw pod względem pracowników- im większe przedsiębiorstwo (większa liczba zatrudniona) tym zużycie energii elektrycznej jest większe. Otrzymane wyniki wskazują, że średnie miesięczne zużycie energii elektrycznej dla małych przedsiębiorstw to 15569 kWh, natomiast dla średnich przedsiębiorstw to 61063 kWh. Zrównoważone zużycie energii służy poprawie jakości życia, a wydajne i niezawodne wytwarzanie oraz wykorzystywanie energii sprzyja tworzeniu spójności w trzech wymiarach ZR: społecznym, ekonomicznym i środowiskowym. Na zużycie energii elektrycznej w przedsiębiorstwach produkcyjnych ma wpływ wiele czynników, w tym m.in. stan budynku/hali, rodzaj oświetlenia/ogrzewania, stan maszyn i urządzeń, typ maszyn i urządzeń, liczba zmian roboczych, nośniki energii czy też wielkość produkcji. Fundamentem koncepcji ZR jest

redukcja zużycia energii elektrycznej, dlatego też przedsiębiorstwa stoją przed wyzwaniem identyfikacji źródeł zużycia energii oraz wdrożeniem zmian umożliwiających redukcję zużycia.



Rys. 7. Źródła energii w badanych przedsiębiorstwach

Rys.7 przedstawia źródła energii (W_{pp2}) w badanych przedsiębiorstwach. Zaledwie 16% badanych przedsiębiorstw wykazało wykorzystanie dwóch źródeł energii w zakładzie, natomiast w 1% przedsiębiorstw wykorzystuje się wyłącznie energię niekonwencjonalną. Przeważająca liczba (83%) przedsiębiorstw wciąż deklaruje wykorzystanie jednego źródła energii w postaci energii konwencjonalnej, mimo iż energia odnawialna odgrywa szczególną rolę w budowaniu zrównoważonego rozwoju energetyki. Kluczowym czynnikiem motywującym przedsiębiorstwa do zmiany źródeł energii powinny być dynamiczne podwyżki cen energii elektrycznej, które w znacznym stopniu obciążają budżet organizacji. Ceny energii są, bowiem czynnikiem współokreślającym koszty wytwarzania produktów, tym samym ceny wyrobów końcowych. Zmiana źródła energii elektrycznej na źródła odnawialne bezpośrednio wpływa, więc na jakość życia społeczeństwa – począwszy od korzyści finansowych po korzyści zdrowotne. Zmiana źródła energii w przedsiębiorstwach produkcyjnych stanowiłaby także ważny element strategii działań na rzecz klimatu, bowiem branża Energii jest odpowiedzialna aż za 77% emisji gazów cieplarnianych w UE (Europarlament).



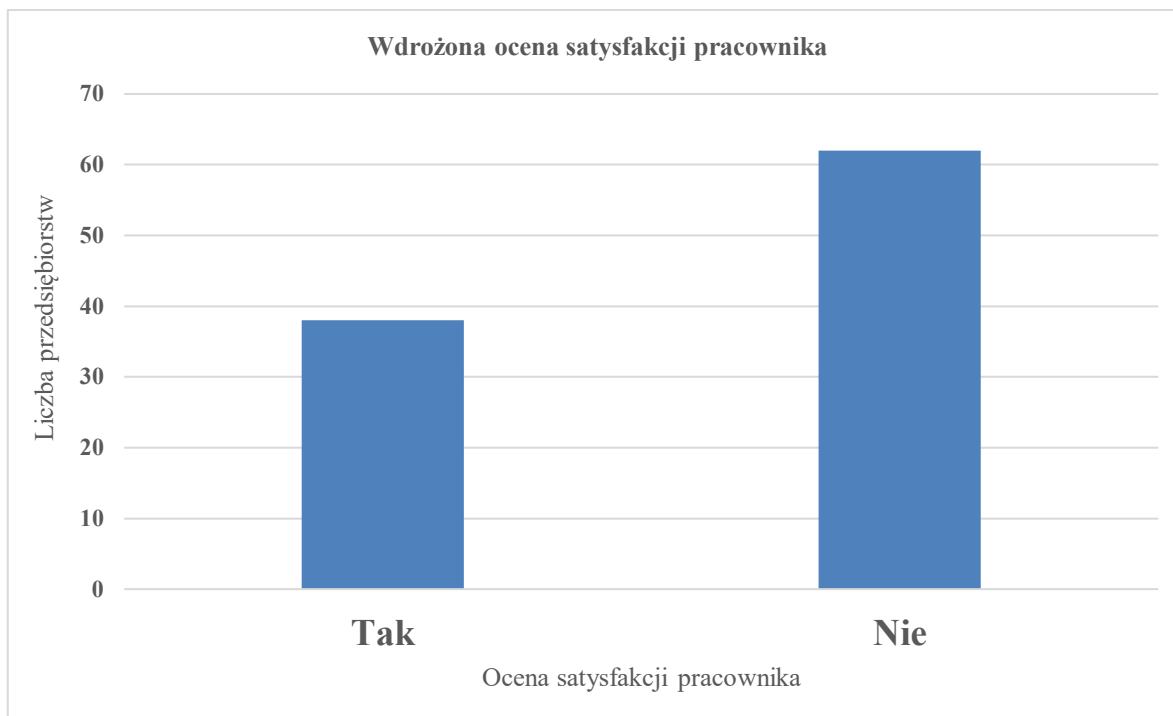
Rys. 8. Wdrożona ocena satysfakcji klienta

Jak wskazano na Rys.8 zaledwie w 58% badanych przedsiębiorstwach wdrożona jest ocena satysfakcji klienta (W_{RP1}).

Badanie oceny satysfakcji klienta pozwala na obiektywną ocenę klienta dotyczącą świadczonych usług czy też oferowanych produktów. Poziom zadowolenia klienta jest ważnym wykładnikiem skuteczności wdrożonych mechanizmów i praktyk w zakresie obsługi klienta i budowania wizerunku firmy. Istotę badania satysfakcji klienta najlepiej przedstawiają wyniki badań przedstawionych przez (Flyonthecloud), które wskazują, że:

- 39% firm nie pyta swoich klientów o feedback, a 70% firm, które świadczą obsługę na wysokim poziomie (według ocen klientów), deklaruje, że zbiera i korzysta z feedbacku klientów,
- 86% klientów jest w stanie zapłacić więcej, jeśli za ceną idzie gwarancja dobrej obsługi,
- utrzymanie obecnego klienta jest 6 razy tańsze niż pozyskanie nowego,
- 54% niezadowolonych klientów dzieli się z bliskimi swoją opinią, kiedy o pozytywnych doświadczeniach opowiada 33%,
- 89% klientów rezygnuje ze współpracy i przechodzi do konkurencji, gdy spotyka się z obsługą na niskim poziomie.

Przedstawione dane w zakresie ważności badania satysfakcji klientów wskazują korzyści ekonomiczne z wdrożenia takiego rozwiązania w organizacji.

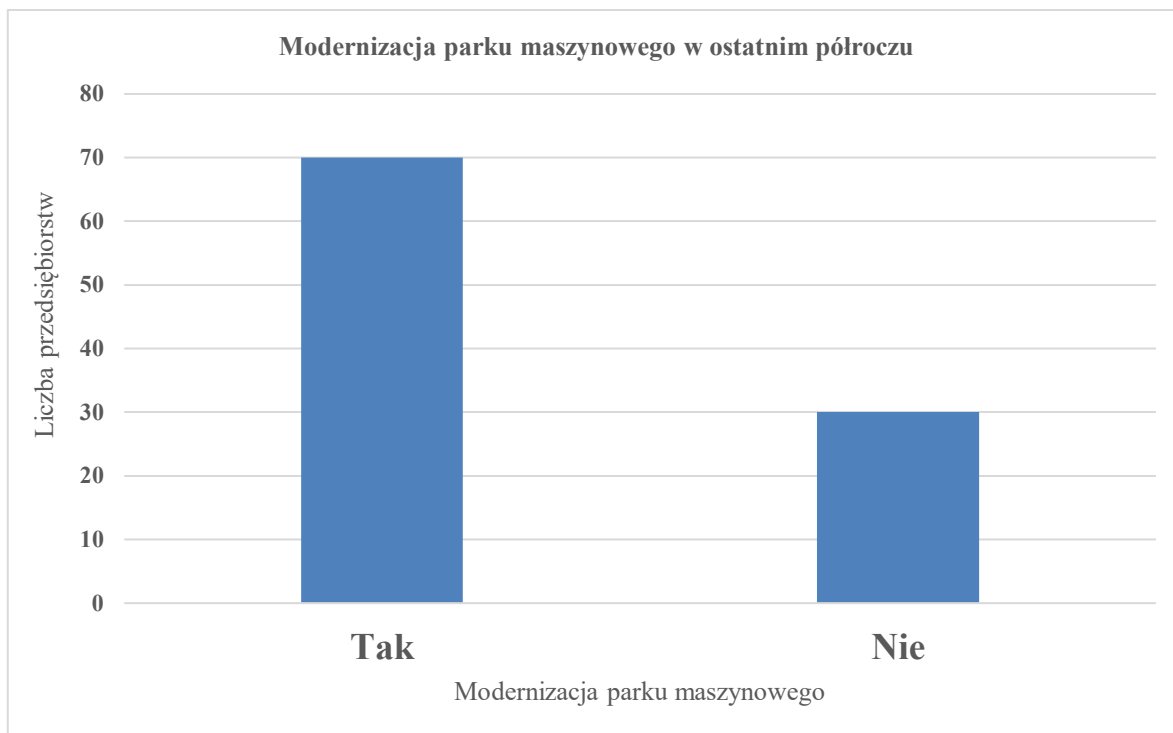


Rys. 9. Wdrożona ocena satysfakcji pracownika

Na Rys.9 przedstawiono wyniki w zakresie wdrożenia oceny satysfakcji pracowników (W_{RP2}) w badanych przedsiębiorstwach. Wyniki wskazują, że przeważająca liczba przedsiębiorstw (62%) nie praktykuje oceny satysfakcji pracowników.

Ocena satysfakcji pracownika jest narzędziem pozwalającym na pomiar *pulse check* w organizacji, dlatego też otrzymane wyniki wskazują na małe zaangażowanie badanej grupy przedsiębiorstw w tym zakresie. Badanie nastroju i potrzeb pracowników wydaje się szczególnie ważne w dobie wirusa Sars-Covid2. Jak wskazują, bowiem dane zawarte w raporcie *Global Human Capital Trends 2020* (Deloitte, 2020):

- 95% ankietowanych w Polsce (globalnie: 93%) przyznało, że poczucie przynależności ma pozytywny wpływ na wyniki osiągnięte przez organizację - jest to jeden z najwyższych wskaźników jednomyślności, jaki odnotowano w raporcie *Global Human Capital Trends* w ciągu dekady. W tym celu wzmacniają relacje między pracownikami i ich zespołami oraz wspierają ich poczucie wnoszenia wkładu w osiągnięcie wspólnych istotnych celów.
- 71% organizacji (globalnie: 80%) deklaruje, że dobre samopoczucie pracowników jest ważne lub bardzo ważne dla osiągnięcia przez nie sukcesu.



Rys. 10. Modernizacja parku maszynowego w ostatnim półroczu

Na Rys.10 przedstawiono odpowiedzi respondentów na temat modernizacji parku (W_{PP3}) maszynowego w ich przedsiębiorstwach w ostatnim półroczu. Aż 70% respondentów wskazała, że w ich przedsiębiorstwie w ostatnim półroczu nastąpiła modernizacja parku maszynowego, natomiast 30% wskazało, że nie odbyła się modernizacja parku maszynowego. Jako modernizację parku maszynowego przyjęto wdrożenie nowych urządzeń materiałów/substancji stosowanych w procesach bądź zakup nowych maszyn/urządzeń w ostatnim półroczu.

Wskaźniki sprawności i efektywności maszyny i urządzenia z czasem ich użytkowania ulegają obniżeniu. W codziennej eksploatacji niezbędny jest systematyczny serwis maszyn i urządzeń, jednakże nie jest on w stanie w pełni zapobiec skutkom związanych z tysiącami roboczogodzin. Z czasem koszt awarii i usterek może przewyższać koszty modernizacji parku maszynowego. Modernizacja umożliwia przywrócenie pierwotnej sprawności i efektywności działania oraz zwiększenia innowacyjności przedsiębiorstwa.



Rys. 11. Zastosowanie niebezpiecznych substancji/materiałów w produkcji

Rys.11 przedstawia odpowiedzi respondentów w zakresie zastosowania niebezpiecznych substancji/materiałów (W_{RP5}) w ich produktach. Otrzymane wyniki wskazują, że przeważająca liczba producentów (76%) nie stosuje niebezpiecznych substancji/materiałów w swoich produktach.

Zastosowanie niebezpiecznych substancji/materiałów w produkcji stanowi zagrożenie zarówno dla życia ludzkiego jak i dla środowiska naturalnego. Bezpośrednim zagrożeniem dla użytkownika jest możliwość uwalniania się substancji toksycznych w trakcie cyklu życia produktu, które mogą przedostawać się i utrzymywać w organizmie człowieka oraz w środowisku naturalnym. Innym negatywnym skutkiem zastosowania niebezpiecznych substancji i materiałów w produkcji jest wykluczenie możliwości ponownego wykorzystania produktów czy też ich recyklingu. Przedsiębiorstwa produkcyjne zgodnie z ideą zrównoważonego rozwoju powinny dążyć do całkowitego wykluczenia zastosowania substancji/materiałów niebezpiecznych w produkcji, bądź gdy jest to niemożliwe ze względów technologicznych/konstrukcyjnych, dążyć do zmniejszenia możliwych skutków poprzez zastosowanie substancji/materiałów o mniejszym poziomie niebezpieczeństwa. Zastosowanie materiałów/substancji niebezpiecznych w produktach stanowi także rozwój gospodarki obiegowej. Brak zastosowania takich substancji/materiałów w produktach byłoby bardziej efektywne pod względem wykorzystania zasobów, ponieważ bezpieczniejsze substancje mogłyby zostać ponownie wprowadzone do obiegu materiałowego.



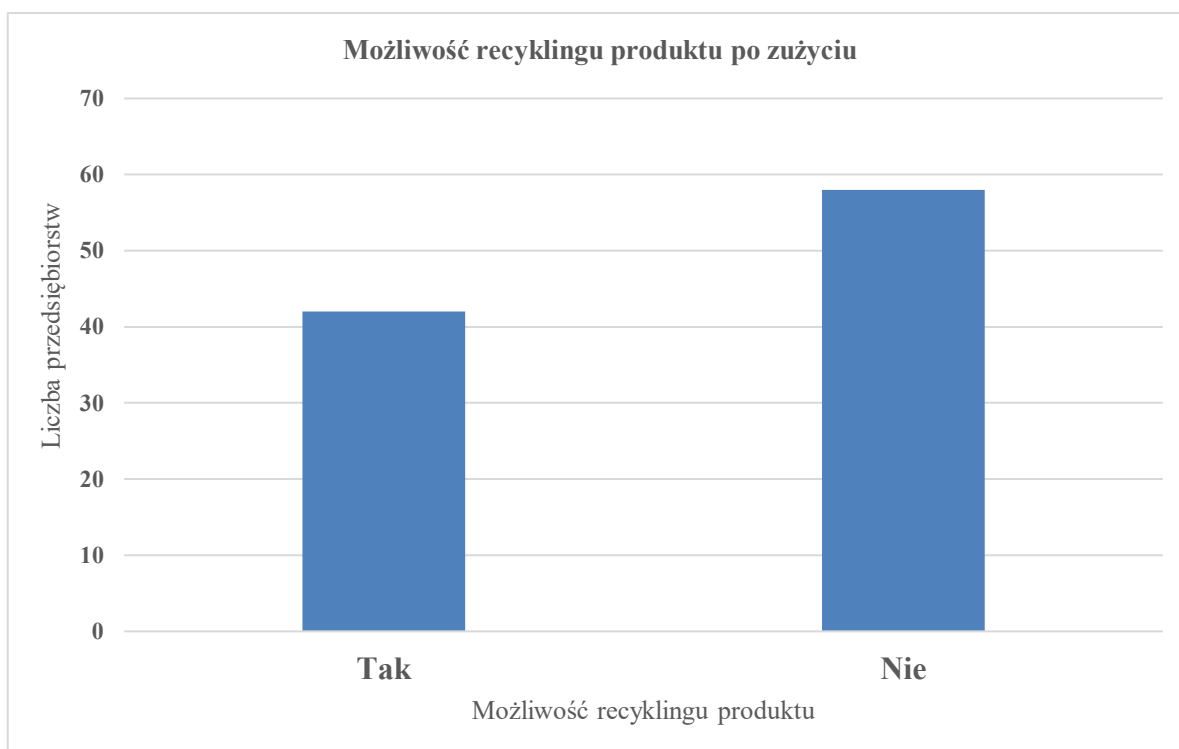
Rys. 12. Zastosowanie niebezpiecznych substancji/materiałów w procesach technologicznych

Na Rys.12 przedstawiono odpowiedzi uzyskane od respondentów w zakresie zastosowania niebezpiecznych substancji/materiałów w realizowanych procesach technologicznych (WRP5). 61% przedsiębiorstw wskazało, że nie stosuje niebezpiecznych substancji/materiałów w swoich procesach technologicznych, natomiast 39% przedsiębiorstw wskazuje, że stosuje niebezpieczne substancje/materiały w swoich procesach. Przedsiębiorstwa stosujące substancje/materiały niebezpieczne stanowią wciąż dużą część badanych przedsiębiorstw. Powolna tendencja spadkowa jest niepokojąca szczególnie ze względu na dane podane w globalnym raporcie przez ONZ wskazujące, że co 15 sekund jeden pracownik umiera z powodu narażenia na kontakt z substancjami niebezpiecznymi (ONZ 2018, Raport Globalny).



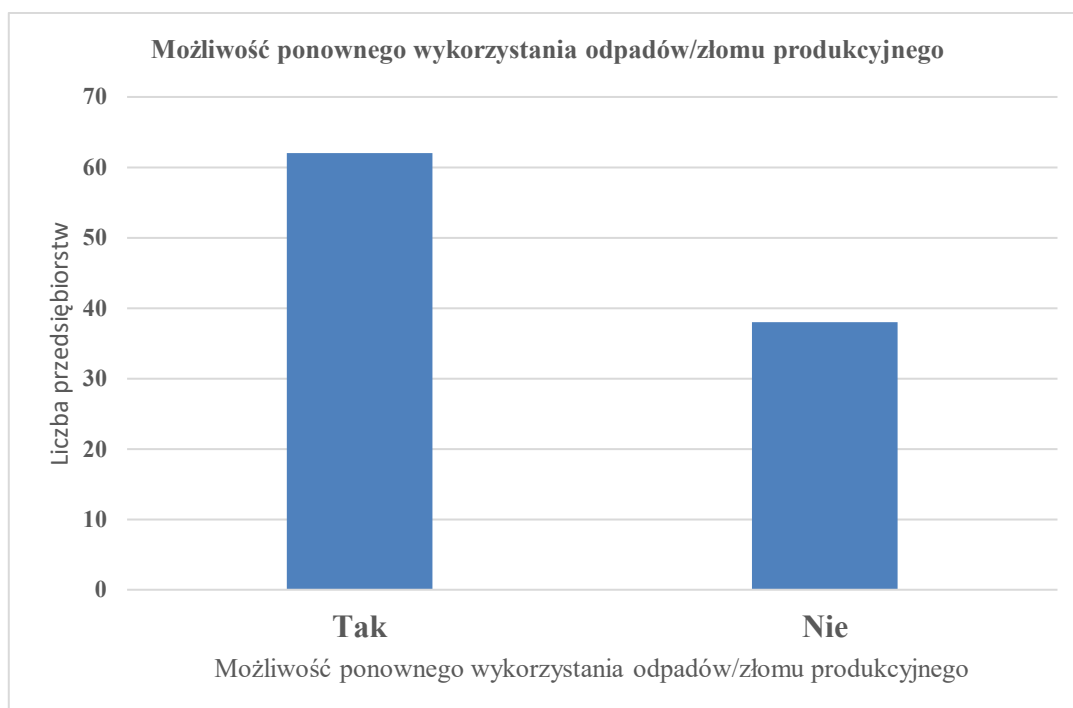
Rys. 13. Kontrola emisji gazów cieplarnianych w badanych przedsiębiorstwach

Wyniki badań przedstawione na Rys.13 wskazują, że 73% badanych przedsiębiorstw nie monitoruje emisji gazów cieplarnianych (W_{RP7}) w swoich zakładach. Monitorowanie i kontrola emisji gazów cieplarnianych w sektorze produkcji powinna stanowić nieodłączny element funkcjonowania przedsiębiorstw z sektora, gdyż jak wskazuje raport przygotowany przez Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu procesy przemysłowe i wykorzystanie produktów odpowiadają na 9,1% emisji gazów cieplarnianych w UE (Europarlament). Wprowadzenie konieczności monitorowania emisji gazów cieplarnianych pozwoliłoby na faktyczne zarządzanie przedsiębiorstw w zakresie wpływu ich działań na klimat oraz stałe zmniejszanie negatywnego wpływu poprzez redukcję emisji gazów cieplarnianych. Wdrożenie zmian w zakresie emisji gazów cieplarnianych jest konieczne w celu zmniejszenia tempa powstających zmian klimatycznych oraz jest szansą na realizację postawionych celów wspólnotowych UE, jakim jest redukcja emisji gazów cieplarnianych o 40% do roku 2030 w stosunku do roku 1990 oraz redukcja o 80-95% do 2050 roku. Istotnym jest także podnoszenie świadomości pracowników i interesariuszy w zakresie emisji gazów cieplarnianych wywołanych bezpośrednio lub pośrednio przez organizację.



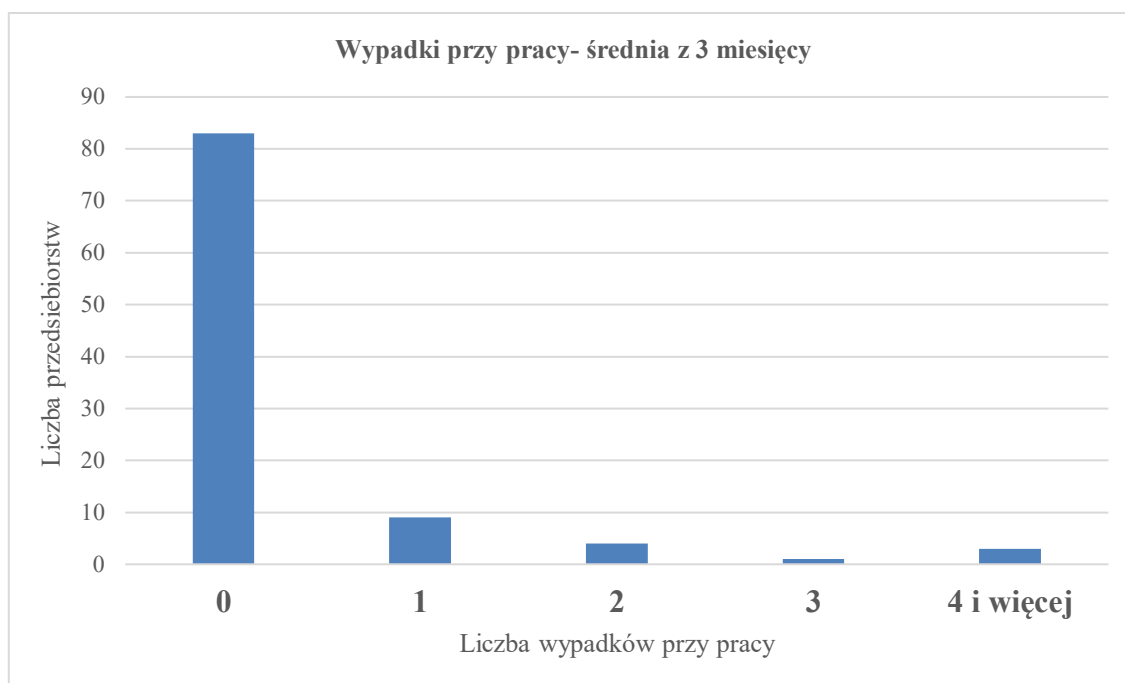
Rys. 14. Możliwość recyklingu produktu po zużyciu

Na Rys.14 przedstawiono odpowiedzi otrzymane na pytanie dotyczące możliwości recyklingu produktu po jego zużyciu (W_{TP2}). 58% przedsiębiorstw wskazało, że ich produkty po zużyciu nie nadają się do recyklingu. Obecnie recykling odgrywa istotną rolę na rynku, gdyż bez jego udziału nie byłoby możliwe zaspokojenie ogromnych potrzeb wszystkich gałęzi rynku, a zwłaszcza przemysłu. Recykling w branży metalowej to skuteczny sposób na zminimalizowanie kosztów produktów nowych wyrobów. Wytworzenie metali ze złóż naturalnych pochłania znacznie więcej energii i jest wielokrotnie droższe niż ich recykling. Przykładem może być aluminium, którego recykling umożliwia zaoszczędzenie nawet 95% energii w stosunku do produkcji aluminium ze złóż. Do tego dochodzi jeszcze kwestia nadmiernej eksploatacji naturalnych zasobów. Te surowce w wielu przypadkach są nieodnawialne. Przykładem może być boksyt, którego 4 tony należy zużyć do wytworzenia 1 tony aluminium. Podsumowując, mimo iż recykling metali nieżelaznych i żelaznych wymaga dużego wysiłku, jest on i tak zdecydowanie bardziej korzystny ekonomicznie, niż produkcja metali ze złóż. Ma on przy tym charakter nieomal bezstratny, dostarcza metale dobrej jakości, a odzysk może być wielokrotnie powtarzany.



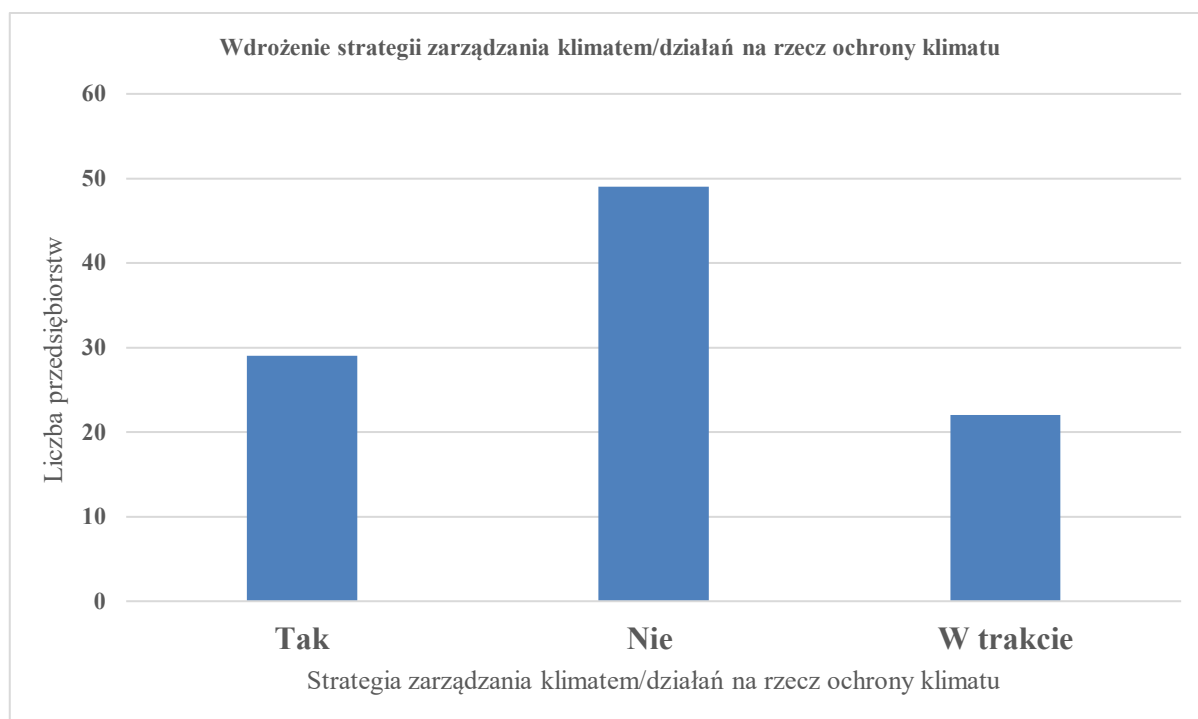
Rys. 15. Możliwość ponownego wykorzystania odpadów/złomu produkcyjnego

Na Rys.15 przedstawiono możliwość ponownego wykorzystania odpadów/złomu produkcyjnego (W_{PP6}) w badanych przedsiębiorstwach. Większość ankietowanych przedsiębiorstw (62%) wskazało, że produkowane przez nie odpady/złom produkcyjny nadaje się do ponownego wykorzystania w procesach wytwórczych. Ilość odpadów/złomu produkcyjnego rozpatrywana jest w wielu przedsiębiorstwach jako wskaźnik nieefektywnego wykorzystania materiałów. Ich utylizacja ma niekorzystny wpływ na środowisko, a ich powstawanie zwiększa koszty związane z zaopatrzeniem w surowce i materiały. Koncepcja ZR prowadzi do zamykania obiegów materiałów w procesach produkcyjnych poprzez ich recykling i włączanie ich ponownie do procesu produkcyjnego. Jednakże istotnym warunkiem powstania zamkniętych obiegów jest stosowanie materiałów podatnych na recykling.



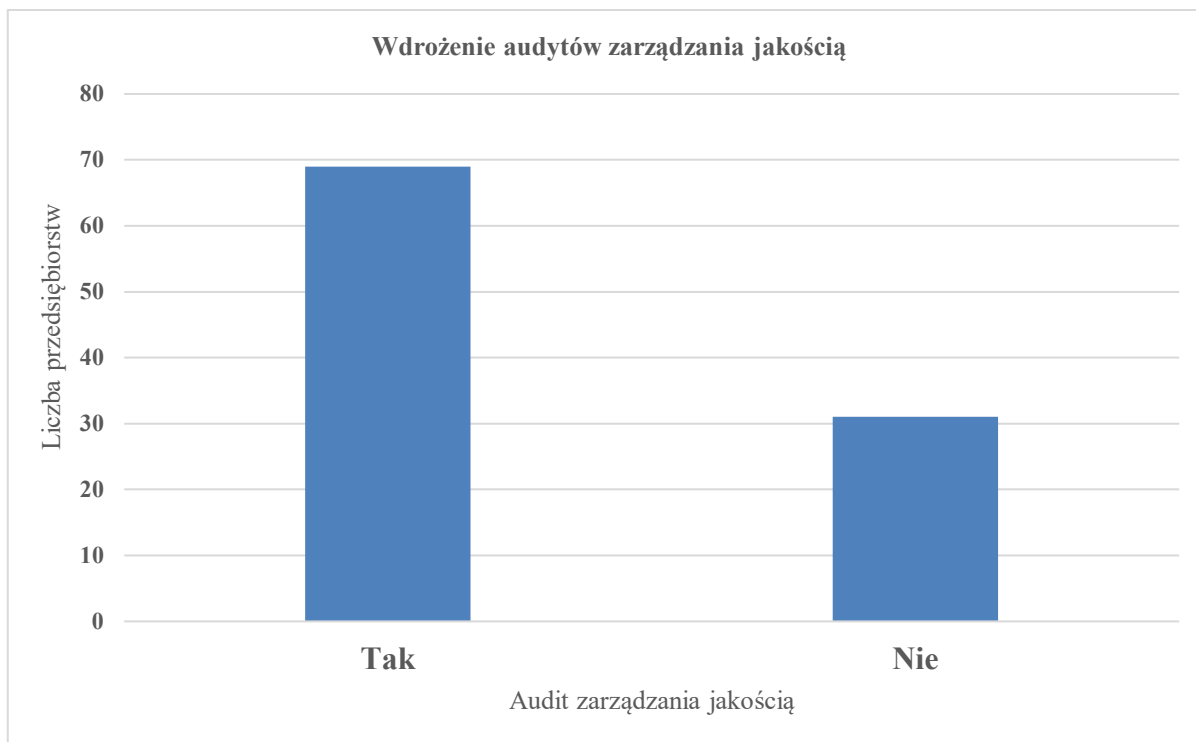
Rys. 16 .Zarejestrowane wypadki przy pracy- średnia z 3 miesięcy

W badanych przedsiębiorstwach poproszono o wskazanie średniej liczby zarejestrowanych wypadków przy pracy (W_{RP3}) z ostatnich 3 miesięcy (Rys. 16). 83% procent przedsiębiorstw wskazało, że w ostatnich 3 miesiącach nie zarejestrowano żadnego wypadku przy pracy, 9% wskazało, że zarejestrowało 1 wypadek przy pracy, pozostałe 8% przedsiębiorstw wskazało, że zarejestrowało ponad 1 wypadek w ostatnich trzech miesiącach. Bezpieczne środowisko pracy stanowi ważny element zrównoważonego rozwoju w trzech jego podstawowych aspektach: ekonomicznym, środowiskowym i społecznym. Istotnym jest kształcenie pracowników, klientów oraz partnerów biznesowych w zakresie praktyk i rozwiązań inżynierskich/organizacyjnych umożliwiających budowanie bezpieczeństwa dla wszystkich. Dotyczy to zarówno ochrony pracowników, jak i ochrony środowiska oraz społeczeństwa przed niebezpiecznymi, szkodliwymi czy też uciążliwymi skutkami procesów pracy oraz użytkowania produktów.



Rys. 17. Wdrożenie strategii zarządzania klimatem/działań na rzecz ochrony klimatu

Na Rys.17 przedstawiono odpowiedzi na pytanie czy w przedsiębiorstwie została wdrożona strategia zarządzania klimatem/działań na rzecz ochrony klimatu (W_{RP6}). Funkcjonowanie strategii w przedsiębiorstwie zadeklarowało zaledwie 29% respondentów, w trakcie wdrażania 22%, natomiast aż 49% badanych przedsiębiorstw wskazało, że strategia nie funkcjonuje ani nie jest w trakcie wdrażania w zakładzie. Otrzymane wyniki nie są optymistyczne, gdyż to właśnie branża metalowa odpowiada za 7-8% światowego zużycia energii, a także ma poważny wpływ na środowisko (United Nations Environment Programme).



Rys. 18. Wdrożenie audytów zarządzania jakością

Rys.18 przedstawia analizę wyników w zakresie wdrożenia audytów zarządzania jakością (W_{TP1}) w badanych przedsiębiorstwach. 69% badanych zadeklarowało, że w ich przedsiębiorstwach zostały wdrożone audyty zarządzania jakością, natomiast 31% wskazuje, że nie wdrożyło w swoim zakładzie audytów zarządzania jakością. Otrzymane wyniki wskazują na pozytywny trend w tym zakresie.

Audyty zarządzania jakością stanowią ważny element celów zrównoważonego rozwoju, gdyż bezpośrednio wpływają na jakość prowadzonych procesów technologicznych i wytwarzanych produktów. Wdrożenie audytów umożliwia przeprowadzenie identyfikacji, a następnie określenie procesów w zakresie jakości występujących w danym zakładzie. Ze względu na charakter i specyfikę każde przedsiębiorstwo może zidentyfikować inne procesy w zakresie jakości. Audyt, jako narzędzie do niezależnej i bezstronnej oceny przebiegu procesów w organizacji, pozwala na wskazanie i analizę mocnych i słabych stron. Analiza ta umożliwia wdrożenie zmian w celu eliminacji słabych punktów, prowadząc tym samym do ciągłego doskonalenia działań organizacji. Audyt zarządzania jakością to ważny element budowania relacji z klientem oraz spełnienia wymogów prawa, gdyż stanowi także ocenę zgodności z kryteriami w stosunku do obowiązujących norm i regulacji. Wykrycie odstępstw pozwala na wskazanie niezgodności w prowadzonych działaniach, co w rezultacie umożliwia wprowadzenie zmian i eliminację wykrytych odstępstw.

4.2. Model wspomagający podejmowanie decyzji w obszarze ZR

4.2.1 Model oceny zrównoważonego rozwoju za pomocą drzew decyzyjnych

Do opracowania modelu oceny ZR zastosowano drzewa decyzyjne, gdyż w ocenie tej konieczne jest uwzględnienie wzajemnych zależności pomiędzy zdefiniowanymi obszarami ZR, zbiorem celów i wskaźników, ich wartościami oraz wartościami referencyjnymi. Założono, że budowa modelu oceny ZR na regułach decyzyjnych jest narzędziem dobrym i elastycznym.

Drzewo decyzyjne zbudowano na podstawie analizy danych zgromadzonych w toku badań empirycznych oraz zdefiniowanych zmiennych. Dane zaimplementowano do programu Statistica 13.1.

W pracy zdefiniowano następujące zmienne:

Zmienna 1: Wskaźniki, gdzie: $W_{pp} = \{W_{pp1}, W_{pp2}, \dots, W_{pp6}\}$, $W_{TP} = \{W_{TP1}, W_{TP2}, W_{TP3}\}$, $W_{RP} = \{W_{RP1}, W_{RP2}, \dots, W_{RP7}\}$.

Zmienna 2: Wartości wskaźników, gdzie: należy wprowadzić wartości uzyskane z kwestionariusza ankiety

Zmienna 3: Wartości referencyjne wskaźników, gdzie należy wprowadzić wartości referencyjne

Zmienna 4: Zgodność wartości

Zmienna 5: Scenariusz działań, gdzie $SD = \{SD1, SD2, \dots, SD16\}$.

Zmienna 6: Poziom zarządzania, gdzie: PS- strategiczny; PT- taktyczny; PO-operacyjny

Tabela 36. Poziomy zarządzania dla poszczególnych celów ZR

Obszar	Cel	Poziom		
		PS	PT	PO
O1	C _{pp1}	x		
	C _{pp2}	x		
	C _{pp3}	x		
	C _{pp4}	x		
O2	C _{TP1}		x	
	C _{TP2}		x	
	C _{TP3}		x	
O3	C _{RP1}	x		
	C _{RP2}	x		
	C _{RP3}	x		
	C _{RPV4}	x		

Zmienna 7: Typ wskaźnika, gdzie: S- stymulanty; DS- destymulanty; ND- nie dotyczy*.

*wartość wskaźnika stanowi opis słowny

Określenie wskaźnika typu „S” oznacza, że im wyższa wartość (a także wzrost) wskaźnika tym lepiej.

Określenie wskaźnika typu „DS” oznacza, że im niższa (a także spadek) wartość wskaźnika tym lepiej.

Określenie wskaźnika typu „ND” oznacza, że wartość wskaźnika powinna być zgodna z wartością referencyjną.

Tabela 37. Typy poszczególnych wskaźników

Obszar	Wskaźniki	Typ		
		S	DS	ND
O1	W _{pp1}		x	
	W _{pp2}			x
	W _{pp3}			x
	W _{pp4}	x		
	W _{pp5}	x		
	W _{pp6}			x
O2	W _{TP1}			x
	W _{TP2}			x
	W _{TP3}			x
O3	W _{RP1}			x
	W _{RP2}			x
	W _{RP3}		x	
	W _{RP4}			x
	W _{RP5}			x
	W _{RP6}			x
	W _{RP7}			x

Zmienna 8: Obszar, gdzie: O1- procesy produkcyjne; O2- trwałość produktu; O3- rozwój produktu.

Zmienna 9: Punkty: gdzie: dla wskaźnika typu S: 1- wartość $\geq$ wartości referencyjnej; 0- wartość $< \neq$ wartości referencyjnej; dla wskaźnika typu DS: 1- wartość $\leq$ wartości referencyjnej; 0- wartość $> \neq$ wartości referencyjnej; . dla wskaźnika typu ND: 1- wartość = wartości referencyjnej; 0- wartość $\neq$ wartości referencyjnej;

Określone zmienne oraz przypisane im symbole i numer etykiety przedstawiono w Tab. 38.

Tabela 38. Zdefiniowane zmienne

Wskaźnik	Symbol	Numer etykiety	Opis
Zużycie energii	W_{pp1}	101	Zużycie w kWh
Energia odnawialna	W_{pp2}	102	Energia konwencjonalna/Energia niekonwencjonalna
Modernizacja parku maszynowego	W_{pp3}	103	Modernizacja/wdrożeni/zakup nowych urządzeń/materiałów/substancji stosowanych w procesach w ostatnich 3 miesiącach
Liczba reklamacji	W_{pp4}	104	Liczba reklamacji z ostatnich 3 miesięcy
Liczba produktów z defektem	W_{pp5}	105	Liczba produktów z defektem z ostatnich 3 miesięcy
Możliwość ponownego wykorzystania złomu produkcyjnego/odpadów produkcyjnych	W_{pp6}	106	Tak/Nie
Wdrożenie audytów zarządzania jakością	W_{TP1}	107	Tak/Nie
Możliwość recyklingu produktu po zużyciu	W_{TP2}	108	Tak/Nie
Serwis posprzedażowy	W_{TP3}	109	Tak/Nie
Wdrożona ocena satysfakcji klienta	W_{RP1}	110	Tak/Nie
Wdrożona ocena satysfakcji pracownika	W_{RP2}	111	Tak/Nie
Liczba wypadków przy pracy w skali miesiąca	W_{RP3}	112	Liczba zdarzeń w ostatnim miesiącu
Użycie niebezpiecznych substancji/materiałów w procesie produkcyjnym	W_{RP4}	113	Tak/Nie
Użycie niebezpiecznych substancji/materiałów w produkcji	W_{RP5}	114	Tak/Nie
Wdrożenie strategii zarządzania ryzykiem związanym z klimatem	W_{RP6}	115	Tak/Nie
Kontrola emisji gazów cieplarnianych	W_{RP7}	116	Tak/Nie

Na tym etapie określono także wartości referencyjne zgodne z celami i założeniami ZR (Tab. 39).

Tabela 39. Wartości referencyjne

Wskaźnik	Wartość referencyjna
W_{pp1}	≥ 747 kWh na pracownika*
W_{pp2}	Energia niekonwencjonalna
W_{pp3}	Tak
W_{pp4}	0
W_{pp5}	0
W_{pp6}	Tak
W_{TP1}	Tak
W_{TP2}	Tak
W_{TP3}	Tak
W_{RP1}	Tak
W_{RP2}	Nie
W_{RP3}	0
W_{RP4}	Nie
W_{RP5}	Nie
W_{RP6}	Tak
W_{RP7}	Tak

*wartość referencyjna dla W_{pp1} została określona poprzez średnie zużycie energii elektrycznej przypadającego na jednego pracownika według zgromadzonych danych ze 100 przedsiębiorstw produkcyjnych z branży metalowej

4.2.2. Opracowanie scenariuszy działań wspomagających realizację celów ZR

Etap ten wymaga zdefiniowania scenariuszy działań (SD) dla przyjętego zbioru celów i wskaźników skierowanych na wzrost poziomu ZR w trzech podstawowych wymiarach ZR:

- 1) Ekonomicznym (E);
- 2) Środowiskowym (Ś);
- 3) Społecznym (S).

W pracy zdefiniowano i przyjęto 16 scenariuszy działań:

— SD1

E: Wdrożenie normy ISO 50001; Optymalizacja maszyn i urządzeń, Monitorowanie zużycia energii w poszczególnych obszarach zużycia (oświetlenie, system grzewczy, maszyny i urządzenia);

Ś: Wzrost udziału energii odnawialnej poprzez zastosowanie jednej z dostępnych jej form, w tym inwestycja w panele fotowoltaiczne/farmę wiatrową/biogaz; Rezygnacja z konwencjonalnych nośników energii, Przegląd i modernizacja oświetlenia hali produkcyjnej, w tym wymiana źródeł oświetlenia na energooszczędne oprawy oświetleniowe; Wdrożenie środków energooszczędnych w poszczególnych obszarach zużycia energii, Przegląd urządzeń elektrycznych;

S: Szkolenia z zarządzania energią w celu poprawy świadomości w zakresie efektywnego wykorzystania energii.

— SD2

E: Zakup energii z certyfikatem pochodzenia; Ograniczenie kosztów zakupu energii oraz zmniejszenie i uniezależnienie ich od wzrostu cen energii i możliwych przerw w zasilaniu, Kalkulacja kosztów inwestycji w wybrane OZE a rzeczywistych kosztów za energię elektryczną; W przypadku braku opłacalności inwestycji zakup energii z certyfikatem pochodzenia; Ograniczenie kosztów zakupu energii;

Ś: Konsultacja doradcza w celu doboru indywidualnych rozwiązań OZE pod kątem wykorzystania energii na własne potrzeby produkcyjne, dostosowanych do sposobu gospodarki energią;

S: Rozwijanie i popularyzowanie wiedzy w organizacji na temat potrzeb i specyfiki wykorzystania energii.

— SD3

E: Monitorowanie urządzeń pod kątem utrzymania ruchu; Monitorowanie stopnia zużycia części, Kalkulacja kosztów związanych z awarią/przestojem maszyny;

Ś: Przekazanie wybrakowanych produktów gotowych (półproduktów) z magazynu do produkcji w celu dokonania ich naprawy; Elektroniczne gromadzenie danych; Czujniki parametrów maszyn i urządzeń, Czujniki parametrów środowiska pracy;

S: Szkolenia pracowników w zakresie użytkowania maszyn i urządzeń.

— SD4, SD5

E: Analiza zdolności procesów, Kontrola zgodności wyrobów; Lista Kontrolna procesu oraz kontroli wyrobów, Analiza zwrotu zainwestowanego kapitału ROI;

Ś: Wdrożenie narzędzi i technik nowoczesnego planowania produkcji bazujących na filozofii Lean Manufacturing (Poka Yoke, Kazein, Kanban, Jidoka); Stosowanie materiałów bezpiecznych dla środowiska i dobrej jakości;

S: Wdrożenie jasnych procedur dot. jakości wyrobów; System premiowania pracowników za niski wskaźnik wadliwych wyrobów; Szkolenie wewnętrzne pracowników w zakresie

planowania jakości, jak również zrozumienia wymagań klientów, czy też nowoczesnych technik zarządzania; Działania badawczo-marketingowe.

— SD6

E: Ograniczenie opakowań; Podpisanie umowy z lokalnym skupem/hutą na sprzedaż odpadów produkcyjnych/złomu produkcyjnego;

Ś: Prowadzenie selektywnej zbiórki odpadów; Optymalizacja produkcji oraz wzrost dostępność narzędzi informatycznych (np. SAP) w celu redukcji wartości odpadów; Wdrożenie polityki „zero odpadów na składowiska”; Dostosowanie wykorzystywanych w produkcji materiałów podatnych na recykling;

S: Zatrudnienie firmy zewnętrznej w celu doradztwa w zakresie rozwiązań technologiczno-logistycznych oraz raportowaniu środowiskowym; Wzrost świadomości ekologicznej wśród pracowników.

— SD7

E: Dobór materiałów i technologii, Kalibracja przyrządów pomiarowych, Opracowanie mapy procesu na podstawie dokumentacji procesowej, Opracowanie checklisty dla weryfikacji wykonania produktu zgodnie ze specyfikacją;

Ś: Opracowanie i wdrożenie procedur testowania produktów, Opracowanie procedur kontroli, Opracowanie procedur dot. zarządzania wyrobem niezgodnym, Podział audytów na 3 grupy: proces, produkt, zarządzanie;

S: Certyfikat ISO 9001:2015/ OHSAS 180001; Analiza potrzeb i oczekiwań klientów.

— SD8

E: Przyjmowanie zużytych produktów w celu ich ponownego przetworzenia;

Ś: Wybór materiałów podlegających procesowi recyklingu; Stosowanie materiałów i procesów bezpiecznych dla środowiska podczas produkcji oraz w trakcie użycia; Wdrożenie koncepcji projektowania dla recyklingu mającej na celu zmianę materiałów, w miarę możliwości technologicznych i konstrukcyjnych, podlegających procesom recyklingu;

S: Zamieszczanie informacji dla konsumentów o możliwościach zagospodarowania produktu po zużyciu.

— SD9

E: Kalkulacja kosztów inwestycji w serwis posprzedażowy; W przypadku rentownej inwestycji utworzenie serwisu posprzedażowego będącego częścią budynku produkcyjnego; W przypadku braku opłacalności utworzenia serwisu posprzedażowego wskazanie konsumentom punktów, w których mogą dokonać ewentualnych napraw/wymian/modernizacji produktu;

Ś: W miarę możliwości stosowanie materiałów „z odzysku” czy też odpadów poprodukcyjnych;

S: Szkolenie pracowników w zakresie obsługi klienta.

— SD10

E: Opracowanie indywidualnej oferty oraz ustalenie profitów dla klienta na podstawie analizy potrzeb i oczekiwań oraz skali zaopatrzenia w produkty;

Ś: Zastąpienie tradycyjnej formy papierowej korespondencji oraz obiegu dokumentów poprzez formę elektroniczną;

S: Budowa indywidualnego profilu klienta; Okresowa ocena zadowolenia Klienta; Szkolenia pracowników w zakresie obsługi klienta.

— SD11

E: Przyznanie benefitów na podstawie analizy potrzeb i oczekiwań pracowników; Refundacja szkoleń w zakresie podnoszenia kompetencji i kwalifikacji zawodowych;

Ś: Cyfryzacja akt osobowych oraz historii pracowniczej;

S: Okresowa ocena zadowolenia pracowników; Szkolenia pracowników w zakresie bezpieczeństwa.

— SD12

Ś: Systematyczne wykonywanie badań środowiskowych;

S: Zapewnienie właściwej organizacji środowiska pracy; Stosowanie najlepszych możliwych zabezpieczeń procesowo-technicznych i zdrowotnych; Doskonalenie systemu identyfikacji zagrożeń i szacowania ryzyka w układzie człowiek - maszyna – otoczenie; Prowadzenie systematycznej działalności doradczo-nadzorczo-kontrolnej; Organizowanie praktycznych szkoleń i warsztatów tematycznych podnoszących kwalifikacje zawodowe pracowników.

— SD13, SD14

Ś: Opracowanie zmian na poziomie projektu procesu/produktu umożliwienie eliminację użycia substancji chemicznych/niebezpiecznych; W przypadku braku możliwości eliminacji użycia substancji chemicznych/niebezpiecznych opracowanie zmian mających na celu ograniczenie/zmianę substancji na mniej szkodliwą; Wdrożenie procesów kontroli substancji niebezpiecznych (HSC); Badania surowców i chemikaliów używanych w produkcji zamiast końcowego produktu pod kątem zawartości substancji niebezpiecznych;

S: Kurs szkoleniowy, mający na celu pokierowanie przedsiębiorstw z branży metalowej przez proces kontroli substancji niebezpiecznych (HSC), Kształtowanie kultury prewencji.

— SD15,SD16

E: Poprawa izolacji budynków; Optymalizacja zużycia wody;

Ś: Zmiana źródeł energii na OZE; Wdrożenie zasad w myśl gospodarki o obiegu zamkniętym; Działania zmierzające do zmniejszenia liczby odpadów zgodnie z Dyrektywą 2019/1004; Ograniczenie ilości odpadów niebezpiecznych; Optymalizacja procesów technologicznych w kierunku zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych; Sprawozdawczość zgodna z zasadami GHG Protocol; Wdrożenie kryteriów zgodnych z normą ISO 14001;

S: Promowanie dobrych praktyk w zakresie ochrony klimatu np. poprzez akcje „zasadź drzewo”, „wspólna podróż”; Partnerstwo z organizacjami z misją ochrony klimatu.

4.3. Predykcja działań skierowanych na wzrost poziomu ZR

4.3.1. Ocena poziomu ZR w wybranych przedsiębiorstwach produkcyjnych

Etap ten polega na porównaniu poszczególnych wskaźników z przypisanymi dla nich wartościami referencyjnymi. Na podstawie poziomu zgodności rzeczywistych wartości wskaźników z wartościami referencyjnym dokonuje się oceny poziomu ZR w danym przedsiębiorstwie. Od poziomu zgodności wartości poszczególnych wskaźników zostają przypisane punkty, które stanowią bazę do oceny poziomu ZR. Poziom ZR w przedsiębiorstwie zależy od zdobytej liczby punktów.

Przyjęto następujące ramy do określenia oceny poziomu ZR:

- Poziom 1 (niski poziom) dla łącznej liczby zdobytych punktów < 50%
- Poziom 2 (średni poziom) dla łącznej liczby zdobytych punktów 50-65%
- Poziom 3 (dobry poziom) dla łącznej liczby zdobytych punktów 71-80%
- Poziom 4 (bardzo dobry poziom) dla łącznej liczby zdobytych punktów 81-95%
- Poziom 5 (doskonały poziom) dla łącznej liczby zdobytych punktów 96-100%.

W wybranej metodyce przyjęto następującą skalę punktacji:

- 0 punktów, gdy wartość wskaźnika jest niezgodna z wartością referencyjną.
- 1 punkt, gdy wartość wskaźnika jest zgodna z wartością referencyjną.

W proponowanej metodyce max. liczba punktów wynosi 16, co stanowi sumę przyjętych do oceny wskaźników ZR.

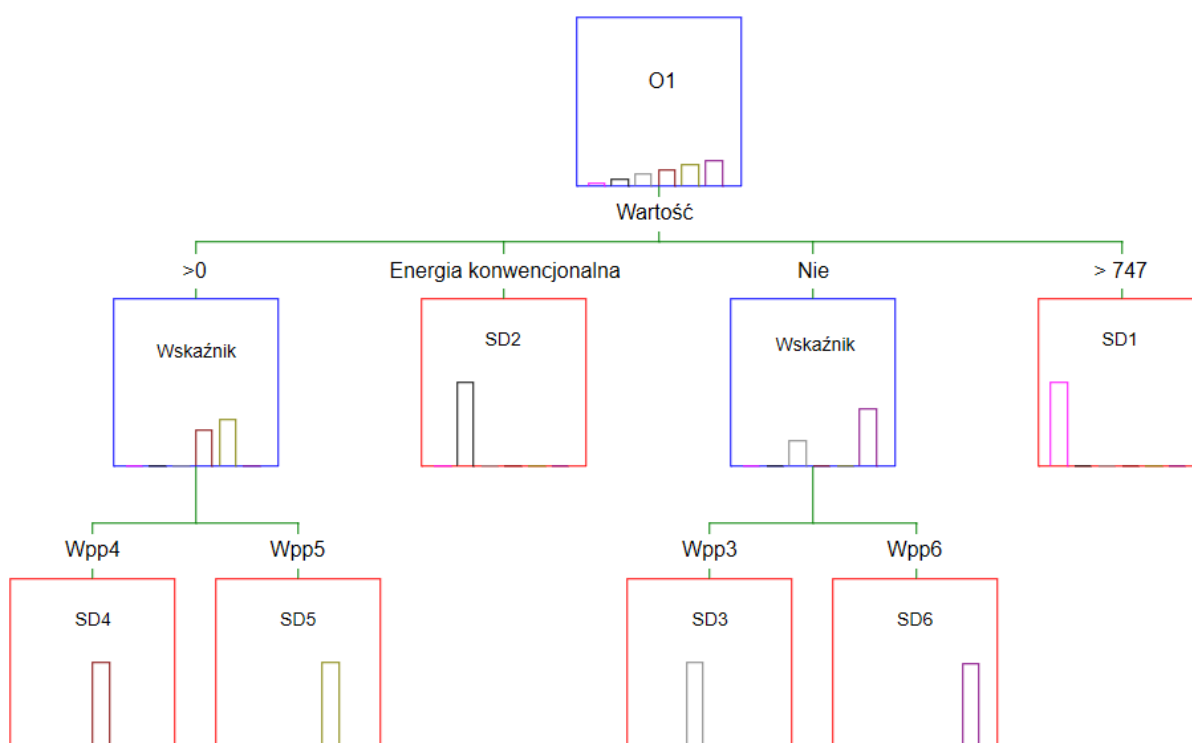
4.3.2. Rekomendacje działań dla menadżerów przedsiębiorstw produkcyjnych

Rekomendacje działań dla menadżerów przedsiębiorstw produkcyjnych wskazywane są za pomocą drzew decyzyjnych. Podstawą do wygenerowania drzew decyzyjnych były wyniki

przeprowadzonych badań empirycznych, stanowiące przypadki, oraz przyjęte kryteria, stanowiące zmienne.

W celu wygenerowania drzew decyzyjnych w programie Statistica 13.1. w poszczególnych obszarach (O1, O2, O3) podzielono zgromadzone dane na 3 arkusze.

W obszarze O1 poddano analizie 6 wyznaczonych kluczowych wskaźników ZR- W_{pp1} , W_{pp2} , W_{pp3} , W_{pp4} , W_{pp5} oraz W_{pp6} . Dla poszczególnych wskaźników określono referencyjne wartości wskazane w powyższej części pracy. Implementacja danych pozwoliła na wygenerowanie drzewa, które wskazuje menadżerom zalecane scenariusze działań (ZR) dla poszczególnych wskaźników w przypadku braku zgodności wartości wskaźników z przyjętymi wartościami referencyjnymi.



Rys. 19.Rekomendacje działań dla obszaru O1

Zgodnie z wytycznymi przedstawionymi na Rys. 19 rekomenduje się wdrożenie następujących scenariuszy działań w obszarze procesy produkcyjne (O1):

W przypadku, gdy wartości wskaźnika $W_{pp1} > 747$ kWh na pracownika zaleca się wdrożenie działań zgodnych z SD1:

- wzrost udziału energii odnawialnej poprzez zastosowanie jednej z dostępnych jej form, w tym inwestycja w panele fotowoltaiczne/farmę wiatrową/biogaz;

- modernizacja oświetlenia hali produkcyjnej, w tym wymiana źródeł oświetlenia na energooszczędne oprawy oświetleniowe;
- przegląd i konserwacja maszyn i urządzeń;
- monitorowanie zużycia energii w poszczególnych obszarach jej zużycia, w tym systemu grzewczego, eksploatacji maszyn i urządzeń, oświetlenia;
- wdrożenie działań normy ISO 50001.

W przypadku wskazania braku zastosowania energii odnawialnej (Wpp2) w przedsiębiorstwie zaleca się wdrożenie działań zgodnych z SD2:

- konsultacja doradcza w celu doboru indywidualnych rozwiązań OZE pod kątem wykorzystania energii na własne potrzeby produkcyjne, dostosowanych do sposobu gospodarki energią;
- kalkulacja kosztów inwestycji w wybrane OZE a rzeczywistych kosztów za energię elektryczną;
- rozpatrzenie inwestycji w OZE pod względem Ochrony Środowiska.

W przypadku wskazania braku modernizacji parku maszynowego w ostatnich trzech miesiącach (Wpp3) w przedsiębiorstwie zaleca się wdrożenie działań zgodnych z SD3:

- monitorowanie urządzeń pod kątem utrzymania ruchu oraz pod kątem stopnia zużycia części;
- wdrożenie systemów umożliwiających elektroniczne gromadzenie danych;
- montaż czujników parametrów maszyn i urządzeń;
- montaż czujników parametrów środowiska pracy;
- wycena kluczowych podzespołów maszyn i urządzeń/przebudowy maszyn i urządzeń;
- kalkulacja kosztów związanych z awarią/przestojem maszyny;
- szkolenia pracowników w zakresie użytkowania maszyn i urządzeń.

W przypadku niezgodności wartości wskaźnika Wpp4 oraz Wpp5 z wartością referencyjną w przedsiębiorstwie zaleca się wdrożenie zgodnych z SD4, SD5:

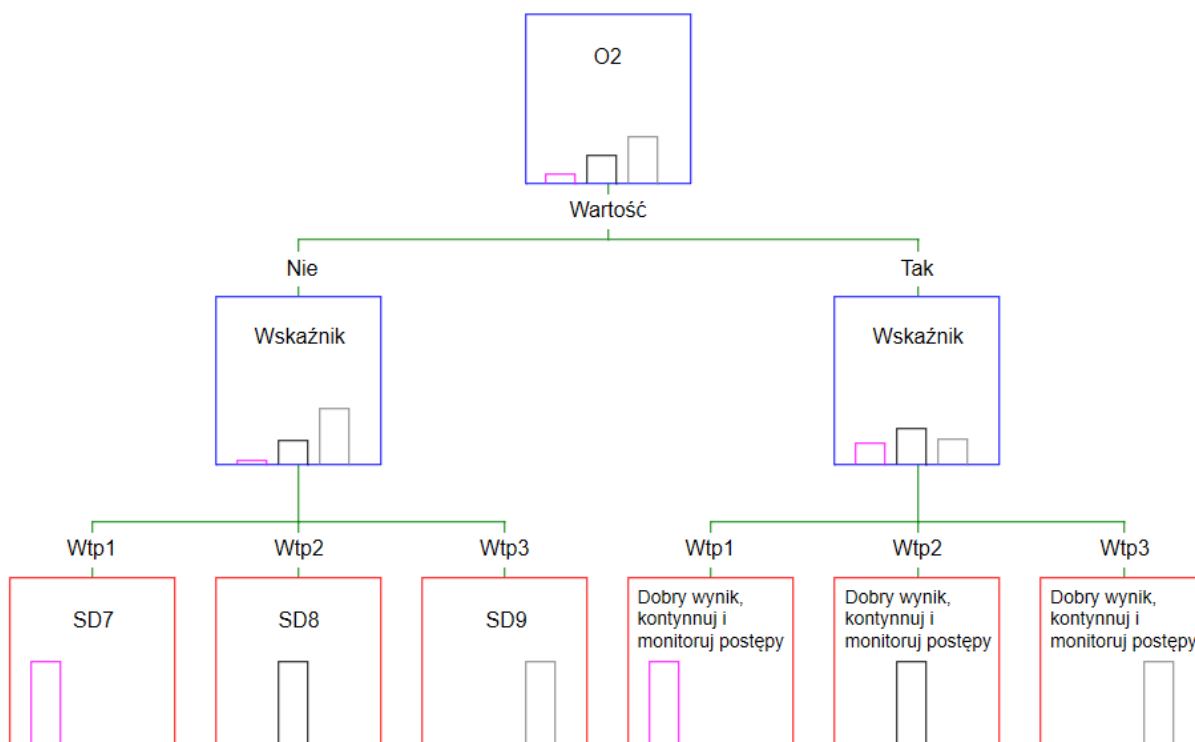
- przekazanie wybrakowanych produktów gotowych (półproduktów) z magazynu do produkcji w celu dokonania ich naprawy;
- wdrożenie systemu zarządzania jakością według normy ISO;
- szkolenie wewnętrzne pracowników w zakresie planowania jakości, jak również zrozumienia wymagań klientów, czy też nowoczesnych technik zarządzania;
- działania badawczo-marketingowe;

- wdrożenie narzędzi i technik nowoczesnego planowania produkcji bazujących na filozofii Lean Manufacturing (Poka Yoke, Kazein, Kanban, Jidoka);
- analiza zwrotu zainwestowanego kapitału ROI.

W przypadku wskazania braku możliwości ponownego wykorzystania złomu produkcyjnego/odpadów produkcyjnych (Wpp6) w przedsiębiorstwie zaleca się wdrożenie działań zgodnych z SD6:

- prowadzenie selektywnej zbiórki odpadów;
- podpisanie umowy z lokalnym skupem/hutą na sprzedaż odpadów produkcyjnych/złomu produkcyjnego;
- optymalizacja produkcji oraz wzrost dostępność narzędzi informatycznych (np. SAP) w celu redukcji wartości odpadów;
- wdrożenie polityki „zero odpadów na składowiska”;
- ograniczenie opakowań;
- dostosowanie wykorzystywanych w produkcji materiałów podatnych na recyklingów;
- zatrudnienie firmy zewnętrznej w celu doradztwa w zakresie rozwiązań technologiczno-logistycznych oraz raportowaniu środowiskowym;
- wzrost świadomości ekologicznej wśród pracowników.

W przypadku obszaru O2 wyznaczono trzy kluczowe wskaźniki SD- W_{TP1} , W_{TP2} oraz W_{TP3} . Założono, że dla każdego z trzech przyjętych wskaźników wartość referencyjna stanowi wskazanie odpowiedzi „Tak” w opracowanym kwestionariuszu ankiety. Rys.19 przedstawia drzewo zbudowane z trzech węzłów dzielonych oraz sześciu węzłów końcowych. Węzły końcowe stanowią „odpowiedź” drzewa dla menadżerów na wartości poszczególnych wskaźników w ich przedsiębiorstwach. W przypadku, gdy wartość wskaźnika z obszaru O2 będzie równa „Nie”, wówczas drzewo kieruje do odpowiedniego scenariusza działań, który definiuje działania skierowane ku podniesienie poziomu ZR.



Rys. 20. Rekomendacje działań dla obszaru O2

Zgodnie z wytycznymi przedstawionymi na Rys. 20 rekomenduje się wdrożenie następujących scenariuszy działań w obszarze trwałość produktu (O2):

W przypadku wskazania braku wdrożenia audytów zarządzania jakością (W_{TP1}) w przedsiębiorstwie zaleca się wdrożenie działań zgodnych z SD7:

- dobór materiałów i technologii;
- kalibracja przyrządów pomiarowych;
- opracowanie mapy procesów na podstawie dokumentacji procesowej;
- opracowanie checklisty dla weryfikacji wykonania produktu zgodnie ze specyfikacją;
- opracowanie i wdrożenie procedur testowania produktów;
- opracowanie procedur kontroli;
- opracowanie procedur dot. zarządzania wyrobem niezgodnym;
- podział audytów na 3 grupy: proces, produkt, zarządzanie;
- implementacja działań pozwalających na zdobycie certyfikatu ISO 9001:2015/ OHSAS 180001;
- przeprowadzenie analizy potrzeb i oczekiwań klientów.

W przypadku wskazania braku możliwości recyklingu po zużyciu (W_{TP2}) w przedsiębiorstwie zaleca się wdrożenie działań zgodnych z SD8:

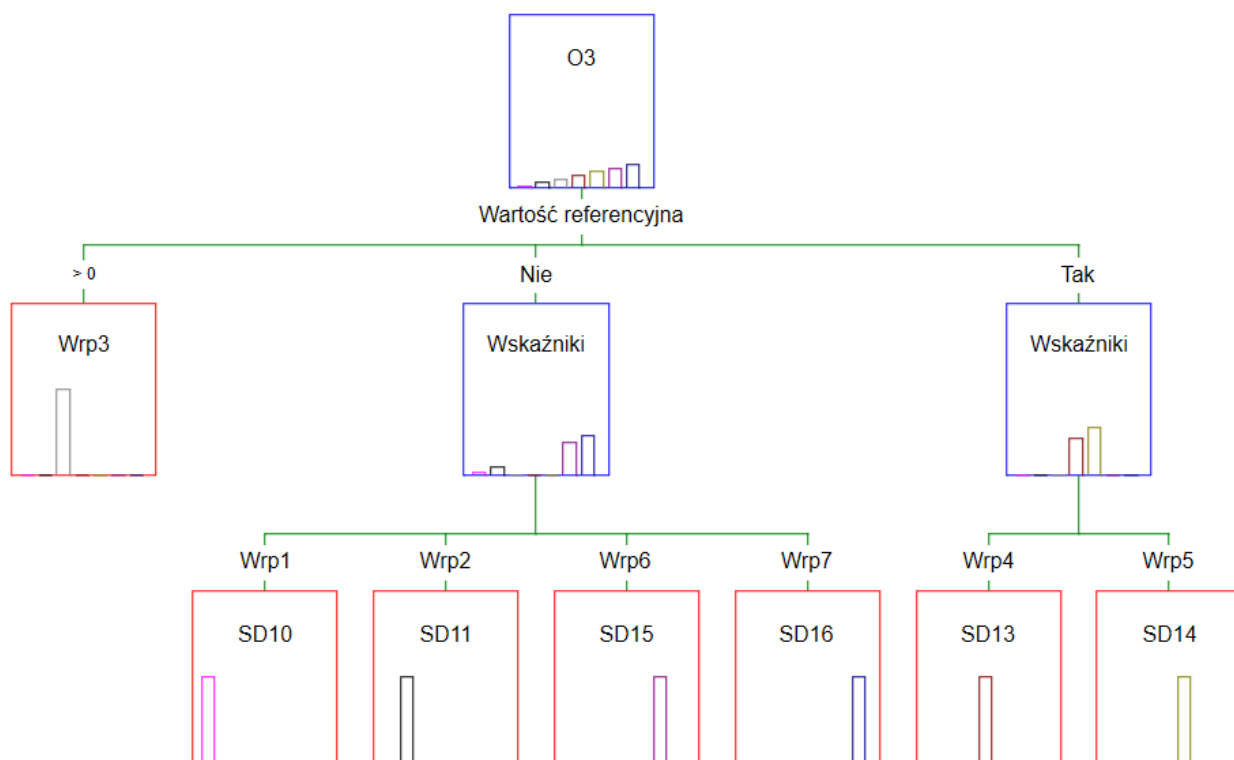
- przyjmowanie zużytych produktów w celu ich ponownego przetworzenia;

- wdrożenie koncepcji projektowanie dla recyklingu mającej na celu zmianę materiałów, w miarę możliwości technologicznych i konstrukcyjnych, podlegających procesowi recyklingu;
- stosowanie materiałów i procesów bezpiecznych dla środowiska podczas produkcji oraz w trakcie użycia;
- zamieszczanie informacji dla konsumentów o możliwościach zagospodarowania produktu po zużyciu.

W przypadku wskazania braku prowadzenia serwisu posprzedażowego (W_{TP3}) w przedsiębiorstwie zaleca się wdrożenie działań zgodnych z SD9:

- w pierwszym etapie kalkulacja kosztów inwestycji w serwis posprzedażowy;
- w przypadku rentownej inwestycji utworzenie serwisu posprzedażowego będącego częścią budynku produkcyjnego;
- w przypadku braku opłacalności utworzenia serwisu posprzedażowego wskazanie konsumentom punktów, w których mogą dokonać ewentualnych napraw/wymian/modernizacji produktu;
- w miarę możliwości stosowanie materiałów „z odzysku” czy też odpadów poprodukcyjnych;
- szkolenie pracowników w zakresie obsługi klienta.

W przypadku obszaru O3 wyznaczono siedem kluczowych wskaźników- W_{RP1} , W_{RP2} , W_{RP3} , W_{RP4} , W_{RP5} , W_{RP6} oraz W_{RP7} . Dla poszczególnych wskaźników przyjęto wartość referencyjną. Na Rys. 21 przedstawiono drzewo zbudowane z trzech węzłów dzielonych oraz siedmiu węzłów końcowych. Podobnie jak w przypadku przedstawionego przypadku dla obszaru O2 (Rys. 20) węzły końcowe stanowią „odповідь” drzewa dla menadżerów na wartości poszczególnych wskaźników w ich przedsiębiorstwach.



Rys. 21. Rekomendacje działań dla obszaru O3

Zgodnie z wytycznymi przedstawionymi na Rys. 21 rekomenduje się wdrożenie następujących scenariuszy działań w obszarze rozwój produktu (O3):

W przypadku wskazania nie wdrożenia oceny satysfakcji klienta (W_{RP1}) w przedsiębiorstwie zaleca się wdrożenie działań zgodnych z SD10:

- opracowanie indywidualnej oferty oraz ustalenie profitów dla klienta na podstawie analizy potrzeb i oczekiwań oraz skali zaopatrzenia w produkty;
- zastąpienie tradycyjnej formy papierowej korespondencji oraz obiegu dokumentów poprzez formę elektroniczną;
- budowa indywidualnego profilu klienta;
- wdrożenie okresowej oceny zadowolenia klienta;
- szkolenia pracowników w zakresie obsługi klienta.

W przypadku wskazania nie wdrożenia oceny satysfakcji pracownika (W_{RP2}) w przedsiębiorstwie zaleca się wdrożenie działań zgodnych z SD11:

- przyznanie benefitów na podstawie analizy potrzeb i oczekiwań pracowników;
- refundacja szkoleń w zakresie podnoszenia kompetencji i kwalifikacji zawodowych;
- cyfryzacja akt osobowych oraz historii pracowniczej;
- wdrożenie okresowej oceny zadowolenia pracowników.

W przypadku wskazania liczby zarejestrowanych wypadków (W_{RP3}) większej niż wartość referencyjna w przedsiębiorstwie zaleca się wdrożenie działań zgodnych z SD12:

- zapewnienie właściwej organizacji środowiska pracy;
- systematyczne wykonywanie badań środowiskowych;
- stosowanie najlepszych możliwych zabezpieczeń procesowo-technicznych i zdrowotnych;
- doskonalenie systemu identyfikacji zagrożeń i szacowania ryzyka w układzie człowiek - maszyna – otoczenie;
- prowadzenie systematycznej działalności doradczo-nadzorczo- kontrolnej;
- organizowanie praktycznych szkoleń i warsztatów tematycznych podnoszących kwalifikacje zawodowe pracowników;
- podnoszenie świadomości i zaangażowania pracowników wpływające na wzrost kultury bezpieczeństwa pracy.

W przypadku wskazania użycia substancji niebezpiecznych w procesie (W_{RP4}) bądź substancji chemicznych w produkcie (W_{RP5}) w przedsiębiorstwie zaleca się wdrożenie działań zgodnych z SD13,SD14:

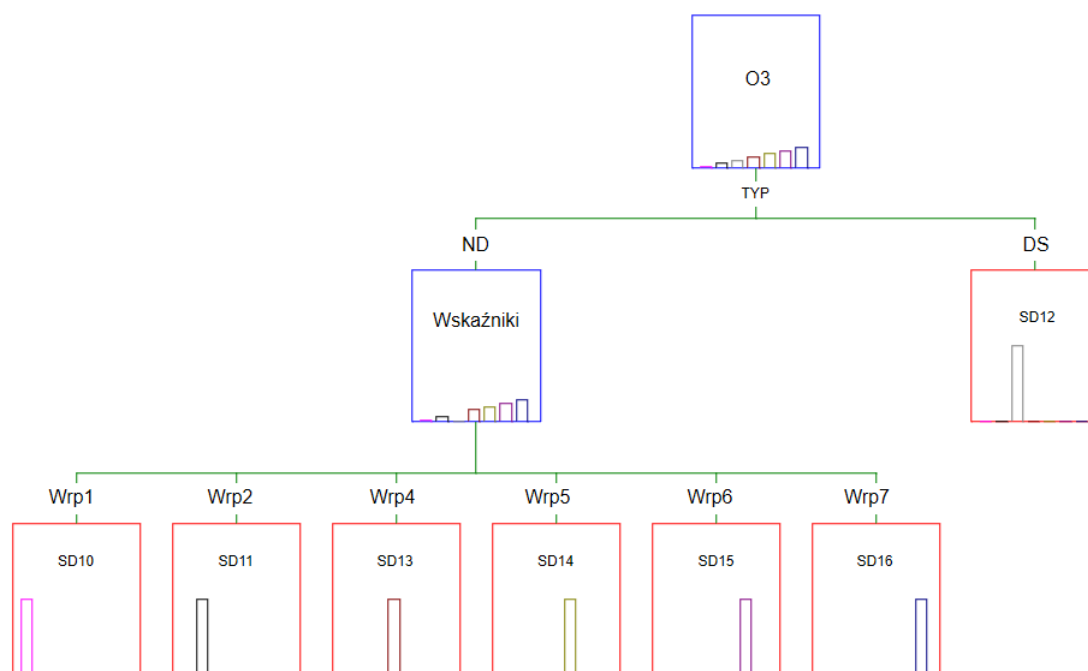
- opracowanie zmian na poziomie projektu procesu/produktu umożliwienie eliminację użycia substancji chemicznych/niebezpiecznych;
- w przypadku braku możliwości eliminacji użycia substancji chemicznych/niebezpiecznych opracowanie zmian mających na celu ograniczenie/zmianę substancji na mniej szkodliwą;
- wdrożenie procesów kontroli substancji niebezpiecznych (HSC);
- badania surowców i chemikaliów używanych w produkcji zamiast końcowego produktu pod kątem zawartości substancji niebezpiecznych;
- kurs szkoleniowy, mający na celu pokierowanie przedsiębiorstw z branży metalowej przez proces kontroli substancji niebezpiecznych (HSC);
- budowa kultury prewencji.

W przypadku wskazania braku wdrożenia strategii zarządzania ryzykiem związanym z klimatem (W_{RP6}) oraz braku prowadzenia kontroli emisji gazów cieplarnianych (W_{RP7}) w przedsiębiorstwie zaleca się wdrożenie działań zgodnych z SD15,SD16:

- optymalizacja zużycia wody;
- zmiana źródeł energii na OZE;
- wdrożenie zasad w myśl gospodarki o obiegu zamkniętym;
- działania zmierzające do zmniejszenia liczby odpadów zgodnie z Dyrektywą 2019/1004;

- eliminacja/redukcja odpadów niebezpiecznych;
- optymalizacja procesów technologicznych w kierunku zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych;
- poprawa izolacji budynków;
- promowanie dobrych praktyk w zakresie ochrony klimatu;
- sprawozdawczość zgodna z zasadami GHG Protocol;
- wdrożenie kryteriów zgodnych z normą ISO 14001;
- partnerstwo z organizacjami z misją ochrony klimatu.

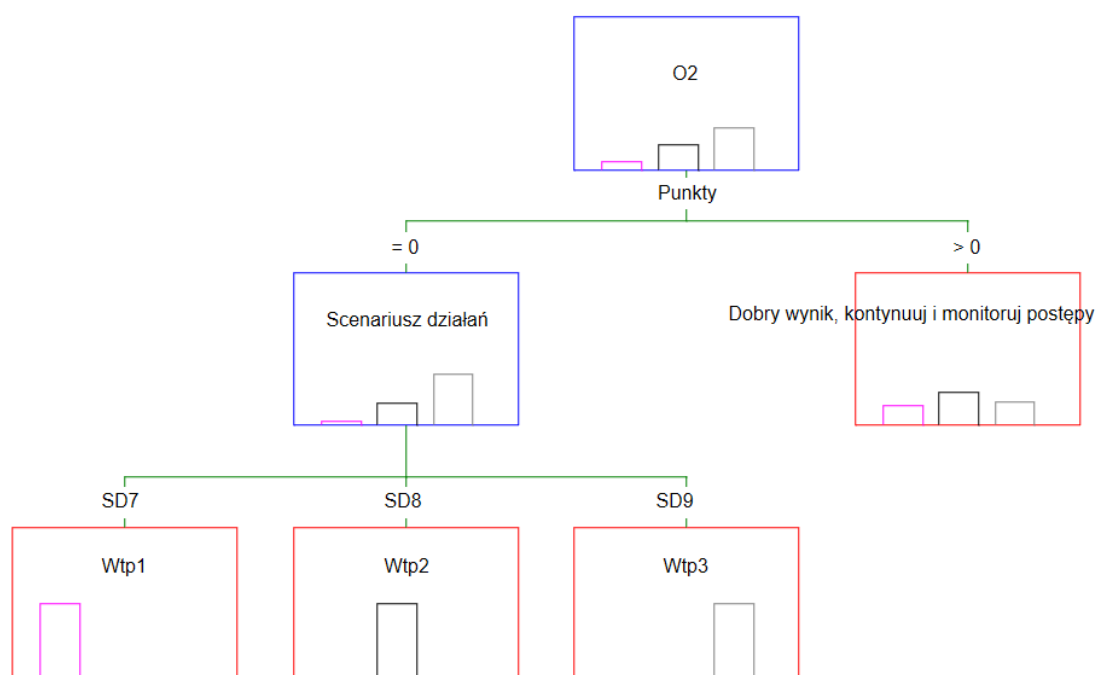
Przyjęcie określonych zmiennych oraz zastosowanie proponowanych reguł w programie Statistica 13.1. pozwala także na wygenerowanie drzew decyzyjnych przy uwzględnieniu przyjętych typów wskaźników (S, DS, ND). Rys.22 przedstawia przykład tego typu drzewa dla obszaru O3, w którym wyróżnić można dwa typy wskaźników: DS oraz ND. W przypadku wskaźnika typu DS taki podział umożliwia systematyczne monitorowanie wdrożonych postępów zgodnie z przyjętymi scenariuszami działań, gdyż spadek wartości wskaźnika typu DS wskazuje, że następuje jego poprawa- wzrost poziomu wskaźnika w zakresie ZR.



Rys. 22. Rekomendacja działań dla obszaru O3 z uwzględnieniem typu wskaźników

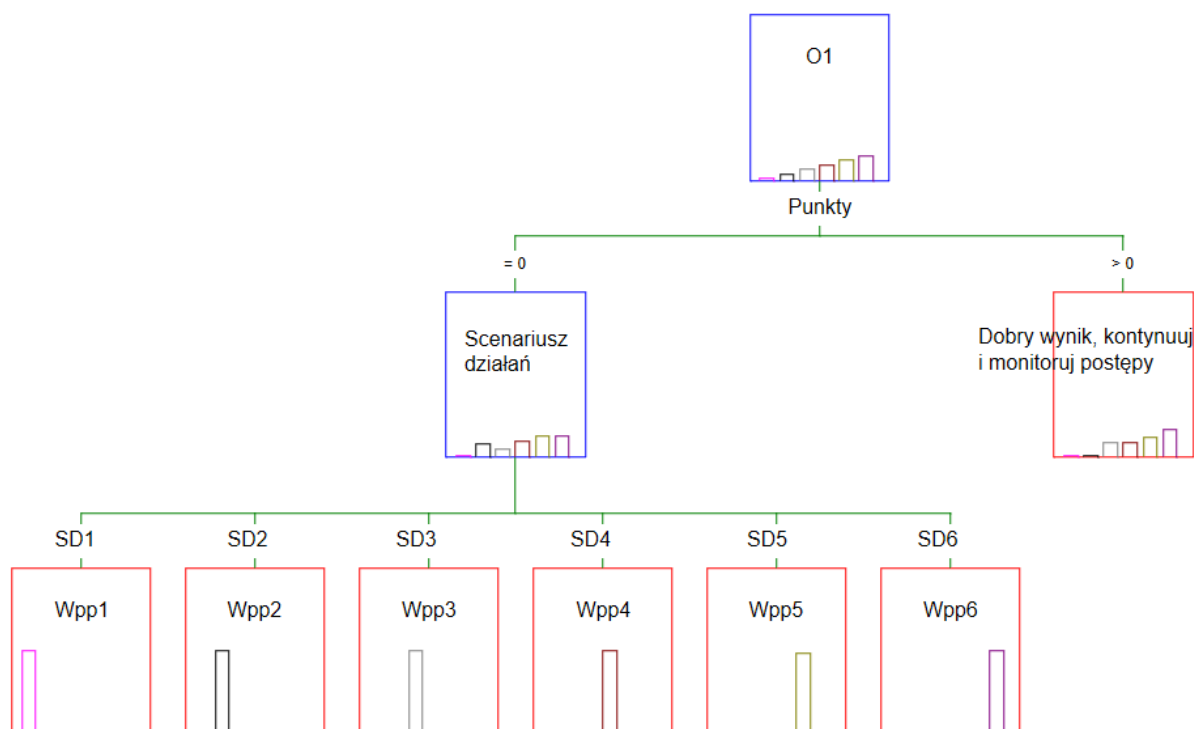
Proponowana metodyka pozwala na określenie poziomu ZR w przedsiębiorstwie. Implementacja reguł pozwala, więc na wygenerowanie drzewa wskazującego zalecane działania dla organizacji w przypadku przyznania „1” punktu (zgodność wartości wskaźnika

z przyjętą wartością referencyjną) bądź „0” punktów (brak zgodności wartości wskaźnika z przyjętą wartością referencyjną).



Rys. 23. Rekomendacja działań dla obszaru O2 z uwzględnieniem przyznanej liczby punktów

Na Rys. 23 przedstawiono drzewo decyzyjne dla obszaru O2 wskazujące rekomendację działań w uwzględnieniu przyznanej liczby punktów. Drzewo zbudowane jest z dwóch węzłów dzielonych (rozpatrywane są dwie możliwości przyznania punktów: „0” punktów bądź > 0 punktu) oraz czterech węzłów końcowych stanowiących „odpowiedź” dla menadżerów.



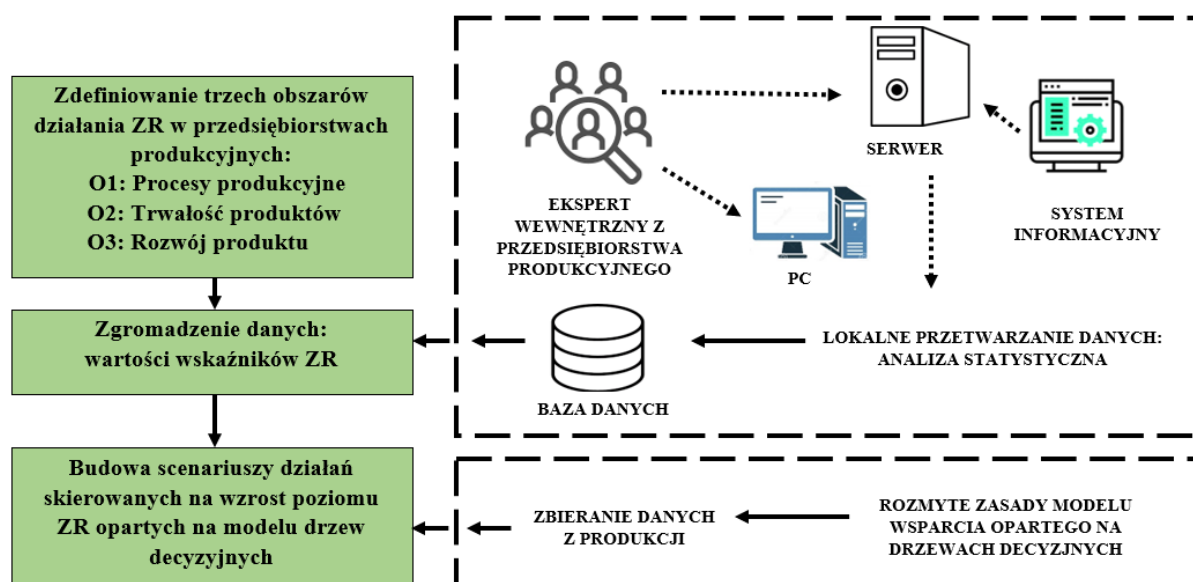
Rys. 24. Rekomendacja działań dla obszaru O1 z uwzględnieniem przyznanej liczby punktów

Na Rys. 24 przedstawiono drzewo decyzyjne dla obszaru O1 wskazujące rekomendację działań w uwzględnieniu przyznanej liczby punktów w tym obszarze. Drzewo zbudowane jest z dwóch węzłów dzielonych oraz siedmiu węzłów końcowych, z czego sześć węzłów stanowi scenariusz działań przypisany dla poszczególnych wskaźników w przypadku uzyskania „0” punktów i jeden węzeł wskazujący na zalecaną kontynuację działań w przypadku uzyskania > 0 punktu.

4.4. Metodyka oceny poziomu ZR

Opracowano również metodykę oceny poziomu ZR w przedsiębiorstwie produkcyjnym branży metalowej z sektora MŚP. Zasadniczą częścią metodyki jest ciągłość informacji zwrotnych oraz poprawa poziomu ZR na poziomie całej organizacji.

Proponowaną metodykę oceny poziomu ZR przedstawiono w formie graficznej na Rys. 25.



Rys. 25. Metodyka oceny poziomu ZR

4.5. Podsumowanie i wnioski

Zastosowanie metodyki oceny poziomu ZR, której integralną częścią jest oryginalna metoda rekomendacji scenariuszy działań w oparciu o drzewa decyzyjne, która pozwala na wsparcie menadżerów przedsiębiorstw zgodnych z modelem referencyjnym w zakresie realizacji ZR. Zbiór kluczowych celów i wskaźników ZR pozwolił na harmonizację ram oceny ZR. Badania empiryczne przeprowadzone na podstawie kwestionariusza ankiety umożliwiły zgromadzenie wartości rzeczywistych w przedsiębiorstwach zgodnych z modelem referencyjnym, które zostały porównane z wartościami referencyjnymi. Porównanie tych wartości pozwoliło na zbudowanie reguł, które odpowiedzialne są za wskazanie „odpowiedzi” dla menadżerów przedsiębiorstw produkcyjnych. „Odpowiedzi” stanowią opracowane w trzech wymiarach ZR scenariusze działań oraz komunikat o uzyskaniu poziomu oczekiwanej wartości dla danego wskaźnika. Wszelkie działania muszą być uzasadnione ekonomicznie oraz technologicznie, co zostało uwzględnione w opracowanych scenariuszach działań. Wdrożenie rekomendacji działań może wspomóc działania menadżerów skierowanych na realizację celów ZR.

Proponowany model ma zastosowanie praktyczne, jego implikacja w rzeczywistych przedsiębiorstwach pozwala na uzyskanie korzyści w trzech aspektach ZR:

- korzyści ekonomiczne wynikające ze spadku zużycia energii elektrycznej, redukcji generowania strat materiałowych, zastosowaniu nowych technologii, spadku wypadkowości;

- korzyści środowiskowe wynikające z ograniczenia/wykluczenia stosowania substancji/materiałów niebezpiecznych z procesów produkcyjnych/produktów, wdrożenia strategii ochrony klimatu, kontroli emisji gazów cieplarnianych;
- korzyści społecznych wynikających z budowania pozytywnego wizerunku przedsiębiorstwa poprzez budowanie relacji z klientami i obsługą klienta na wysokim poziomie oraz tworzenie godnych warunków pracy dla pracowników.

Zaletą proponowanej metodyki jest możliwość łatwej rozbudowy przyjętych celów i wskaźników ZR dla przedsiębiorstw produkcyjnych z branży metalowej.

5. Weryfikacja metodyki do oceny poziomu zrównoważonego rozwoju w przedsiębiorstwie zgodnym z modelem referencyjnym

5.1. Charakterystyka przedsiębiorstwa produkcyjnego sektora MŚP branży metalowej

Autorską metodykę do oceny poziomu ZR zastosowano w rzeczywistym przedsiębiorstwie zgodnym z modelem referencyjnym.

Badania zostały przeprowadzone w polskim przedsiębiorstwie produkcyjnym z branży metalowej, specjalizującym się w produkcji konstrukcji metalowych oraz w produkcji precyzyjnych elementów metalowych. Przedsiębiorstwo koncentruje swoje działania na koncepcji długoterminowego ZR. Priorytetem jest ograniczanie negatywnego wpływu na środowisko naturalne oraz zapewnienie wysokiego standardu obsługi klientów.

Na Rys. 26-29 przedstawiono przykładowe wyroby gotowe wytworzone w badanym przedsiębiorstwie produkcyjnym.



Rys. 26. Wyrób gotowy w badanym przedsiębiorstwie- podtrzymka ramienia



Rys. 27. Wyrób gotowy w badanym przedsiębiorstwie- profil U



Rys. 28. Wyrób gotowy w badanym przedsiębiorstwie- rama



Rys. 29. Wyrób gotowy w badanym przedsiębiorstwie- złącze kątowe

Ponadto w przedsiębiorstwie wykonywane są następujące usługi:

- Frezowanie CNC,
- Toczenie CNC,
- Cięcie laserem,
- Płyty na wymiar i obróbka tworzyw sztucznych,
- Usługi projektowe CAD trójwymiarowe i płaskie,
- Projektowanie elementów pojedynczych,
- Projektowanie złożeń podzespołów,
- Gięcie blach,
- Spawanie TIG MAG,
- Cięcie piłą.

Analizowane przedsiębiorstwo zatrudnia w dziale produkcyjnym 16 pracowników. Ze względu na liczbę zatrudnionych przedsiębiorstwo należy do sektora małych przedsiębiorstw. W zakładzie pracy obowiązuje jedna zmiana robocza. Obszar zakładu zajmuje 1200 m².

Badane przedsiębiorstwo posiada następujący park maszynowy:

- Tokarka Haas SL-20 LHE (Rys.30),



Rys. 30. Tokarka Hass SL-20 LHE

- Takisawa TMM-250M1 z napędzanymi narzędziami,
- Automat tokarski STAR SB-20R typ E (Rys.31),



Rys. 31. Automat tokarski STAR SB-20R typ E

- 5 osiowe centrum obróbcze Hermle C600U (Rys.32),



Rys. 32.5 osiowe centrum obróbcze Hermle C600U

- 4 osiowe centrum obróbcze Hermle U1130,
- 3 osiowe centrum obróbcze HARTFORD PRO 800,
- 3 osiowe centrum obróbcze Feeler FV 600 SE,
- Laser Trumpf TLC 4050,
- Laser Trumpf TruLaser 3530 (Rys.33),



Rys. 33.Laser Trumpf TruLaser 3530

- Bramowy ploter przemysłowy Kimla BPF 2131,
- Prasa krawędziowa AMADA ITPS 80,
- Piła taśmowa Bomar Ergonomic,
- Piła formatowa Altendorf F45 (Rys.34),



Rys. 34. Piła formatowa Altendorf F45

- Spawarka ESAB TIG 2200i,
- Spawarka ESAB TIG 3001i,
- Spawarka ESAB Warrior 400i CC/CV z podajnikiem Feed 304w.

Przedsiębiorstwo na bieżąco modernizuje park maszynowy i wyposaża go w maszyny i urządzenia o wysokich standardach. Przykładowo laser firmy Trumpf model TruLaser 3530 wyposażony jest w moduł załadunkowy Liftmaster, który ładuje arkusze blachy na moduł zmieniający palety. Funkcja ta wspomaga pracę operatora poprzez zapewnienie optymalnej pracy maszyny, ale także minimalizuje ryzyko uszkodzenia wrażliwych materiałów, tym samym redukuje ryzyko powstania strat produkcyjnych. Jednostka sterująca lasera została także ulepszona o funkcję PierceLine, która obniża czas cyklu przebijania, oszczędzając w ten sposób materiał i zmniejszając zużycie maszyny.

Przedsiębiorstwo jest zgodne z przyjętym modelem referencyjnym, gdyż spełnia następujące założenia:

- przedsiębiorstwo należy do branży metalowej,
- przeważający zakres działania przedsiębiorstwa to produkcja konstrukcji metalowych oraz produkcja precyzyjnych elementów metalowych,
- przedsiębiorstwo należy do sektora małych przedsiębiorstw- łączna liczba zatrudnionych pracowników wynosi 18 osób, w tym 16 osób stanowi pracowników produkcyjnych,
- park maszynowy przedsiębiorstwa składa się z 16 maszyn i urządzeń,
- w przedsiębiorstwie obowiązuje jedna zmiana robocza.

5.2. Zastosowanie metodyki oceny poziomu ZR w rzeczywistym przedsiębiorstwie produkcyjnym

5.2.1. Metodyka oceny poziomu ZR dla wybranych wyrobów

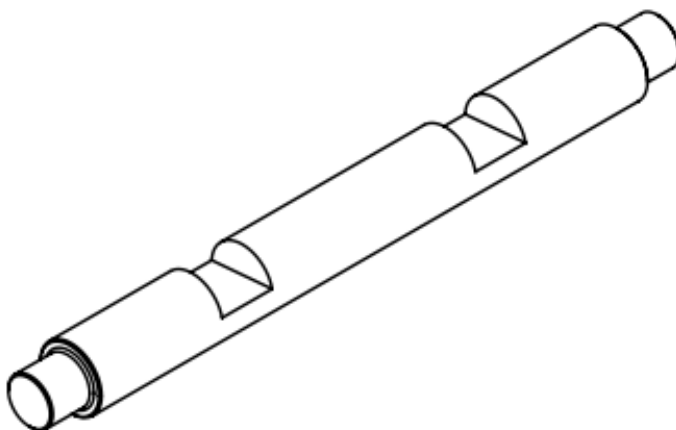
W celu weryfikacji proponowanej metodyki w badanym przedsiębiorstwie produkcyjnym wybrano dwa wyroby, dla których ją wdrożono:

1) Oś główna D22/L226 (Rys. 35, 36)

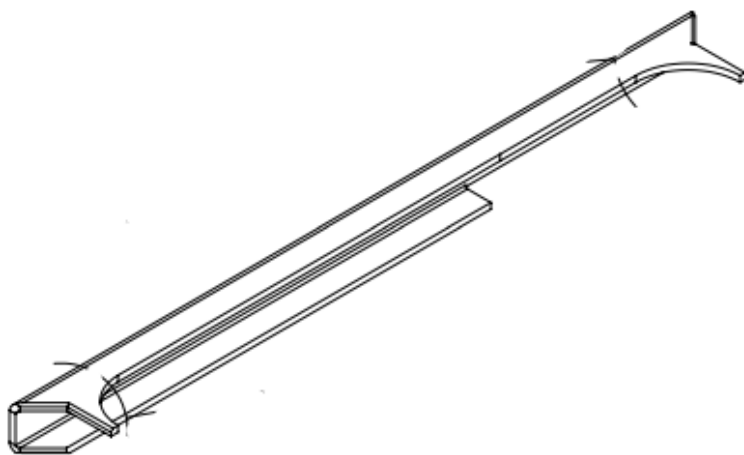
Materiał: S355J2G3 C - niestopowa stal konstrukcyjna

Masa: 0,59 kg

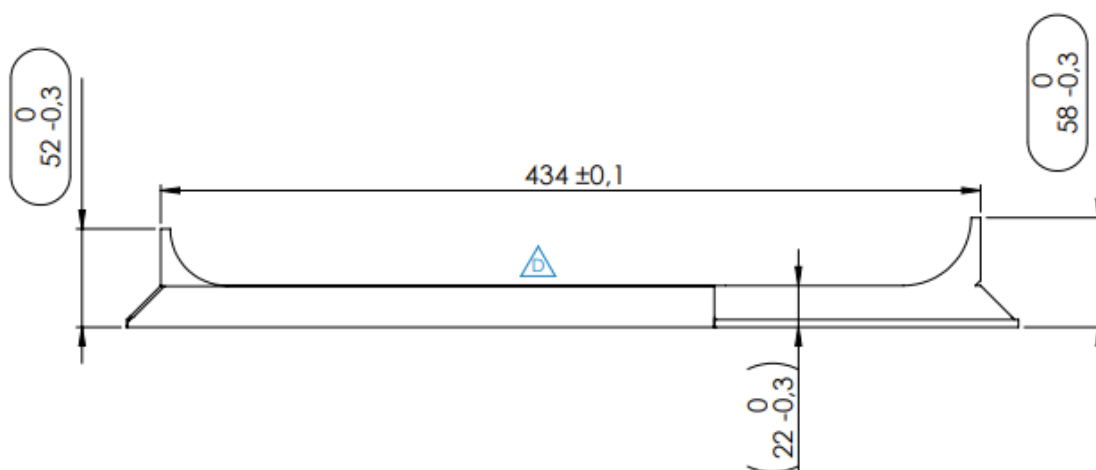
Specyfikacja techniczna wyrobu zgodna z normą: PN-EN 10277-2:2009 :Wyroby stalowe o powierzchni jasnej -Warunki techniczne dostawy -Część 2: Stale konstrukcyjne ogólnego stosowania.



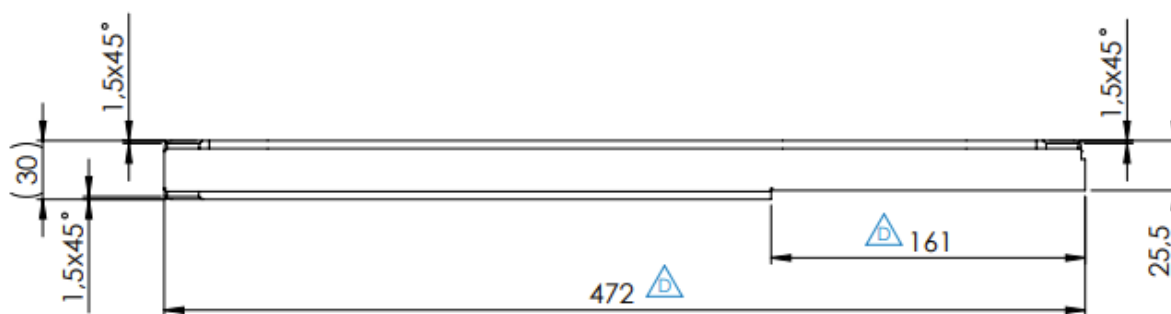
Rys. 35. Oś główna- rysunek poglądowy



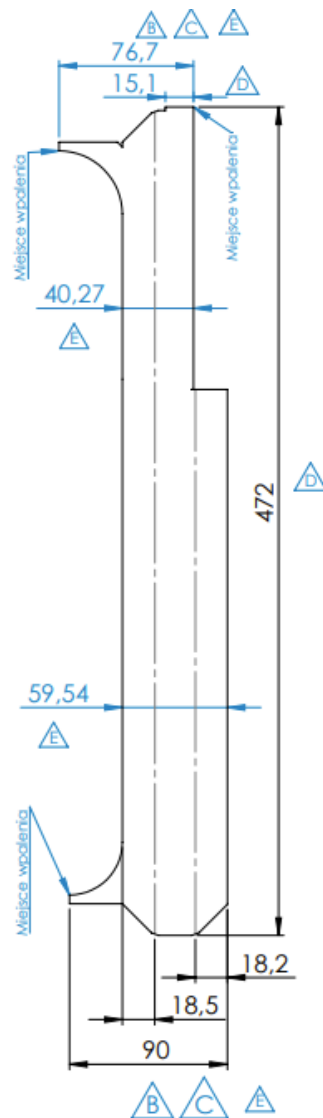
Rys. 37. Profil U- rysunek poglądowy



Rys. 38. Profil U- wyciąg z rysunku technicznego, widok z przodu



Rys. 39. Profil U- wyciąg z rysunku technicznego, widok z góry



Rys. 40. Profil U- wyciąg z rysunku technicznego, widok z boku

Operacja dla wyrobu profil U:

- 1) wyrób wstępny: arkusz blachy 1500x3000mm
- 2) operacja I: cięcie laserowe- ustawienia parametrów detalu zgodne ze specyfikacją klienta; uzyskanie 104 szt. detalu
- 3) operacja II: gięcie detalu przy zastosowaniu prasy krawędziowej zgodnie ze specyfikacją klienta przy zastosowaniu prasy krawędziowej
- 4) operacja III: frezowanie ręczne detalu
- 5) operacja IV: ręczne gratowanie detalu
- 6) operacja V: kontrola jakości

5.2.2. Zgromadzenie danych: wartości wskaźników ZR

Otrzymane dane z realizowanych operacji produkcyjnych wybranych wyrobów przedstawiono w Tab. 40 oraz w Tab.41. Zgromadzone dane dla przedsiębiorstwa przedstawiono w Tab. 42. W przypadku wybranych wyrobów ograniczono się wyłącznie do analizy realizowanych operacji produkcyjnych.

Tabela 40. Wartości wskaźników ZR dla procesu produkcyjnego detalu „oś główna”

Wskaźnik	Wartość wskaźnika	Wartość referencyjna	Zgodność wartości	Scenariusz działań	Poziom zarządzania	Typ wskaźnika	Obszar ZR	Punkty
W _{PP1}	-	747	-	SD1	PS	DS	O1	-
W _{PP2}	Nie	Tak	Przejdź do SD	SD2	PS	ND	O1	0
W _{PP4}	0	0	Dobry wynik, kontynuuj i monitoruj postępy	SD4	PS	DS	O1	1
W _{PP5}	1	0	Przejdź do SD	SD5	PS	DS	O1	0
W _{PP6}	Tak	Tak	Dobry wynik, kontynuuj i monitoruj postępy	SD6	PS	ND	O1	1
W _{TP1}	Nie	Tak	Przejdź do SD	SD7	PT	ND	O2	0
W _{TP2}	Tak	Tak	Dobry wynik, kontynuuj i monitoruj postępy	SD8	PT	ND	O2	1
W _{RP3}	0	0	Dobry wynik, kontynuuj i monitoruj postępy	SD12	PS	DS	O3	1
W _{RP4}	Tak	Nie	Przejdź do SD	SD13	PS	ND	O3	0
W _{RP5}	Nie	Nie	Dobry wynik, kontynuuj i monitoruj postępy	SD14	PS	ND	O3	1

Tabela 41. Wartości wskaźników ZR dla procesu produkcyjnego detalu „profil U”

Wskaźnik	Wartość wskaźnika	Wartość referencyjna	Zgodność wartości	Scenariusz działań	Poziom zarządzania	Typ wskaźnika	Obszar ZR	Punkty
W _{PP1}	-	747	-	SD1	PS	DS	O1	-
W _{PP2}	Nie	Tak	Przejdź do SD	SD2	PS	ND	O1	0
W _{PP4}	0	0	Dobry wynik, kontynuuj i monitoruj postępy	SD4	PS	DS	O1	1
W _{PP5}	0	0	Dobry wynik, kontynuuj i monitoruj postępy	SD5	PS	DS	O1	1
W _{PP6}	Tak	Tak	Dobry wynik, kontynuuj i monitoruj postępy	SD6	PS	ND	O1	1
W _{TP1}	Nie	Tak	Przejdź do SD	SD7	PT	ND	O2	0
W _{TP2}	Tak	Tak	Dobry wynik, kontynuuj i monitoruj postępy	SD8	PT	ND	O2	1
W _{RP3}	0	0	Dobry wynik, kontynuuj i monitoruj postępy	SD12	PS	DS	O3	1
W _{RP4}	Nie	Nie	Dobry wynik, kontynuuj i monitoruj postępy	SD13	PS	ND	O3	1
W _{RP5}	Nie	Nie	Dobry wynik, kontynuuj i monitoruj postępy	SD14	PS	ND	O3	1

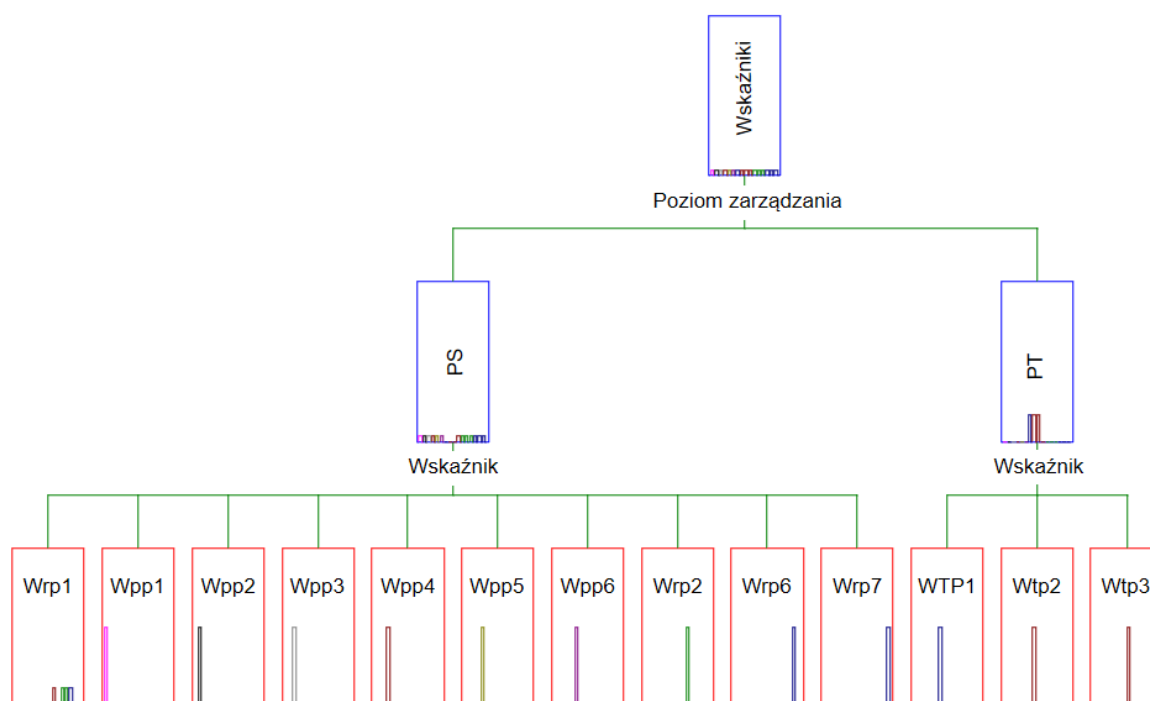
Tabela 42. Zgromadzone dane z badań empirycznych w studium przypadku

Wskaźnik	Wartość wskaźnika	Wartość referencyjna	Zgodność wartości	Scenariusz działań	Poziom zarządzania	Typ wskaźnika	Obszar ZR	Punkty
W _{PP1}	572	747	Dobry wynik, kontynuuj i monitoruj postępy	SD1	PS	DS	O1	1
W _{PP2}	Nie	Tak	Przejdź do SD	SD2	PS	ND	O1	0
W _{PP3}	Tak	Tak	Dobry wynik, kontynuuj i monitoruj postępy	SD3	PS	ND	O1	1
W _{PP4}	0,01	0	Przejdź do SD	SD4	PS	DS	O1	0
W _{PP5}	3	0	Przejdź do SD	SD5	PS	DS	O1	0
W _{PP6}	Nie	Tak	Przejdź do SD	SD6	PS	ND	O1	0
W _{TP1}	Nie	Tak	Przejdź do SD	SD7	PT	ND	O2	0
W _{TP2}	Tak	Tak	Dobry wynik, kontynuuj i monitoruj postępy	SD8	PT	ND	O2	1
W _{TP3}	Nie	Tak	Przejdź do SD	SD9	PT	ND	O2	0
W _{RP1}	Tak	Tak	Dobry wynik, kontynuuj i monitoruj postępy	SD10	PS	ND	O3	1
W _{RP2}	Nie	Tak	Przejdź do SD	SD11	PS	ND	O3	0
W _{RP3}	0	0	Dobry wynik, kontynuuj i monitoruj postępy	SD12	PS	DS	O3	1
W _{RP4}	Tak	Nie	Przejdź do SD	SD13	PS	ND	O3	0
W _{RP5}	Nie	Nie	Dobry wynik, kontynuuj i monitoruj postępy	SD14	PS	ND	O3	1
W _{RP6}	Nie	Tak	Przejdź do SD	SD15	PS	ND	O3	0
W _{RP7}	Nie	Tak	Przejdź do SD	SD16	PS	ND	O3	0

5.2.3. Budowa scenariuszy działań skierowanych na wzrost poziomu ZR za pomocą modelu drzew decyzyjnych

Przyjęte zmienne i opracowane reguły decyzyjne umożliwiły wygenerowanie drzew decyzyjnych w różnych kombinacjach.

Rys. 41 przedstawia drzewo decyzyjne uwzględniające podział przyjętych wskaźników na poziomy zarządzania w badanym przedsiębiorstwie.



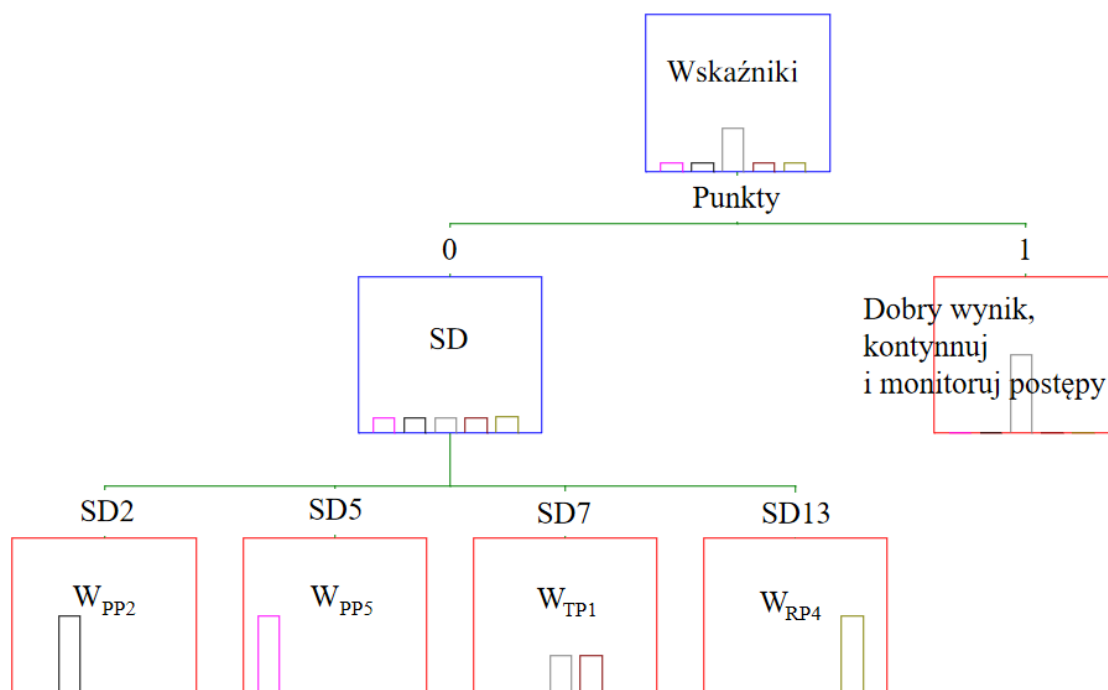
Rys. 41. Poziom zarządzania-Wskaźnik

Proponowany model pozwala zarówno na ogólną ocenę poziomu ZR w organizacji, jak i zawężenie oceny do wybranego procesu produkcyjnego. W przypadku oceny procesu produkcyjnego/wyrobu analizę ograniczono do 10 wskaźników dotyczących wyłącznie procesu produkcyjnego/wyrobu.

Na podstawie wyników przedstawionych w Tab. 42 wygenerowano drzewo decyzyjne dla detalu oś główna. Na Rys. 42 przedstawiono **predykcję działań oraz liczbę przyznanych punktów w procesie produkcyjnym osi głównej**. Dla procesu produkcji osi głównej wskazuje się, że cztery z dziesięciu przyjętych wskaźników wymagają wdrożenia działań, gdyż ich wartość jest niezgodna z wartością referencyjną. Wskaźnikom, które nie osiągają wartości referencyjnym przypisano 0 pkt. Jak wskazuje Rys. 42 menadżerowi badanego

przedsiębiorstwa w celu podniesienia poziomu ZR rekomenduje się wdrożenie następujących scenariuszy działań:

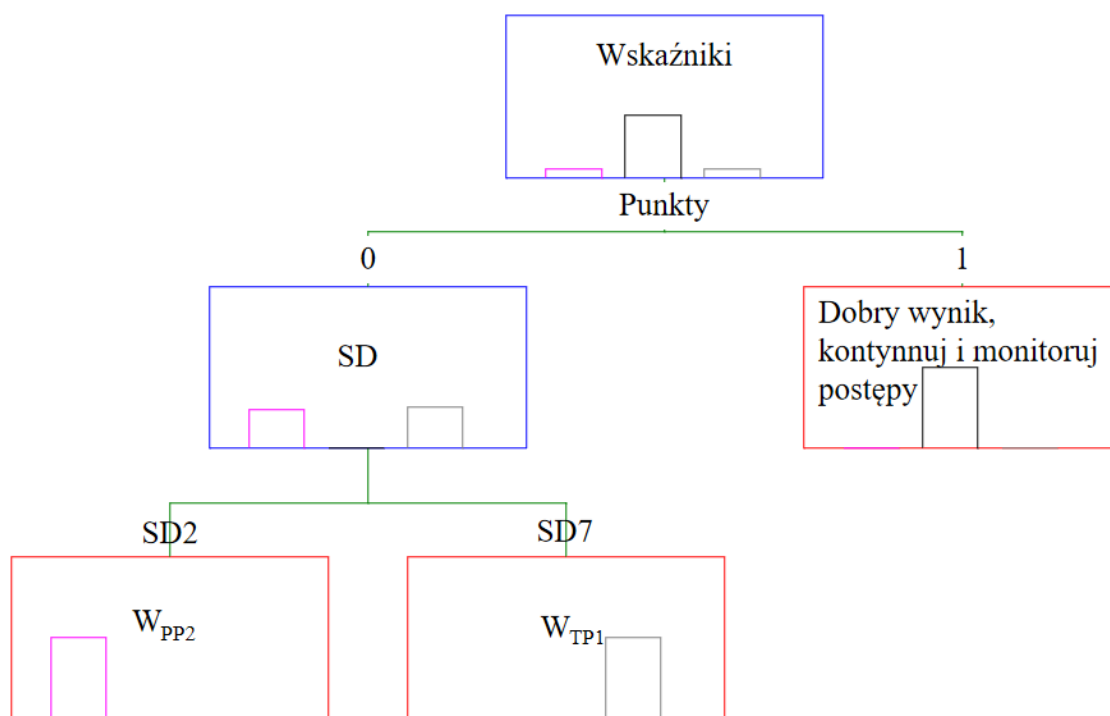
- SD2 dla wskaźnika W_{PP2} ,
- SD5 dla wskaźnika W_{PP5} ,
- SD7 dla wskaźnika W_{TP1} .
- SD13 dla wskaźnika W_{RP4} .



Rys. 42. Scenariusze działań dla procesu produkcyjnego detalu- oś główna

Na podstawie wyników przedstawionych w Tab. 43 wygenerowano drzewo decyzyjne dla detalu profil U. Na Rys. 43 **przedstawiono predykcję działań oraz liczbę przyznanych punktów w procesie produkcyjnym profilu U**. Dla procesu produkcji profilu U wskazuje się, że dwa z dziesięciu przyjętych wskaźników wymagają wdrożenia działań, gdyż ich wartość jest niezgodna z wartością referencyjną. Jak wskazuje Rys. 43 menadżerowi badanego przedsiębiorstwa w celu podniesienia poziomu ZR rekomenduje się wdrożenie następujących scenariuszy działań:

- SD2 dla wskaźnika W_{PP2} ,
- SD7 dla wskaźnika W_{TP1} .

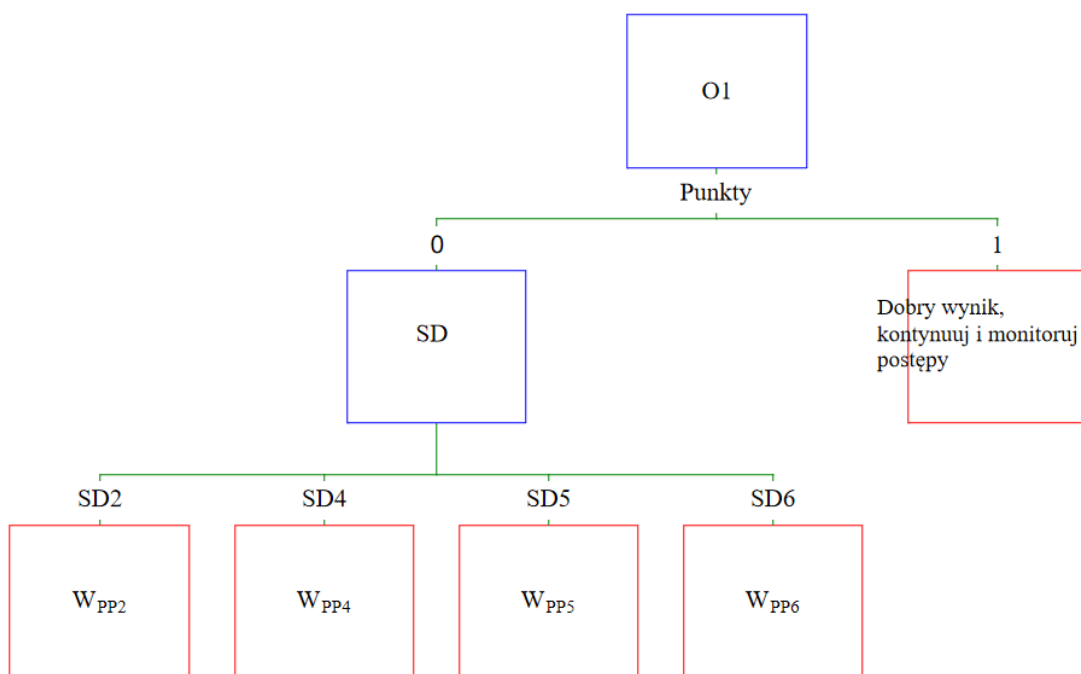


Rys. 43. Scenariusze działań dla procesu produkcyjnego detalu- profil U

Na podstawie wygenerowanych drzew decyzyjnych przeprowadzono ocenę poziomu ZR w trzech przyjętych obszarach ZR: O1, O2, O3.

W obszarze O1 wskazuje się, że cztery z sześciu przyjętych wskaźników wymagają wdrożenia działań, gdyż ich wartość jest niezgodna z wartością referencyjną. Jak wskazuje Rys. 44 menadżerowi badanego przedsiębiorstwa w celu podniesienia poziomu ZR rekomenduje się wdrożenie następujących scenariuszy działań:

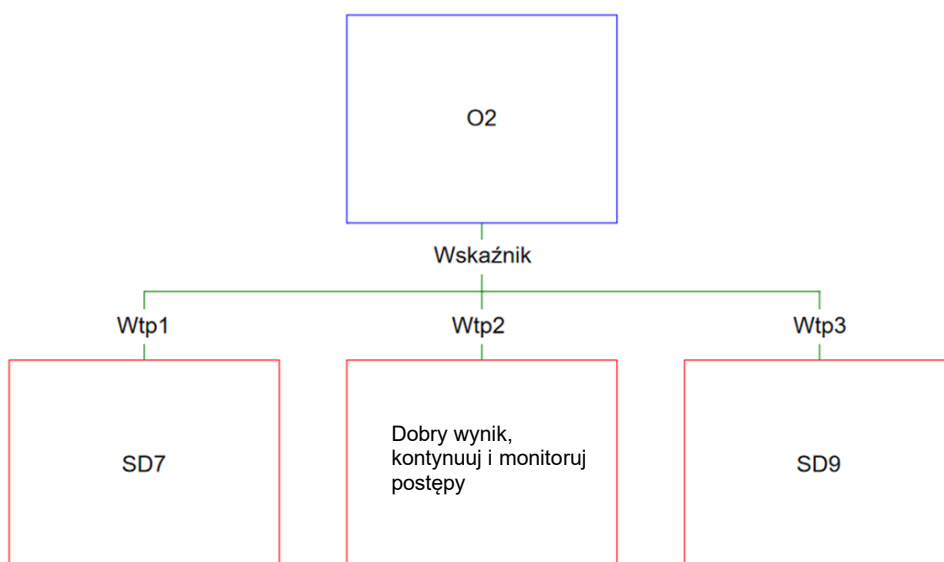
- SD2 dla wskaźnika W_{pp2} ,
- SD4 dla wskaźnika W_{pp4} ,
- SD5 dla wskaźnika W_{pp5} ,
- SD6 dla wskaźnika W_{pp6} .



Rys. 44. Ocena poziomu ZR i rekomendacja działań w obszarze O1

W obszarze O2 wskazuje się, że dwa z trzech przyjętych wskaźników wymagają wdrożenia działań, gdyż ich wartość jest niezgodna z wartością referencyjną. Jak wskazuje Rys. 45 jedynie wartość wskaźnika W_{TP2} jest na zalecany poziomie, natomiast dla pozostałych wskaźników w tym obszarze rekomenduje się wdrożenie następujących scenariuszy działań:

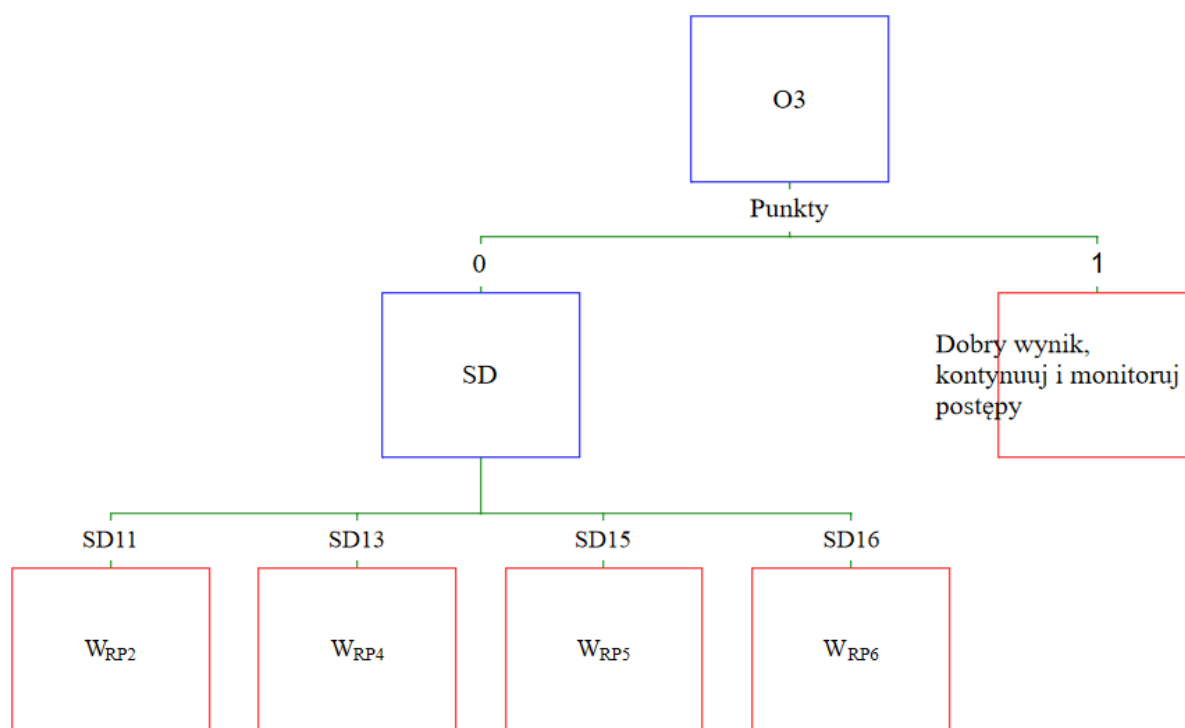
- SD7 dla wskaźnika W_{TP1} ,
- SD9 dla wskaźnika W_{TP3} .



Rys. 45. Rekomendacja działań w obszarze O2

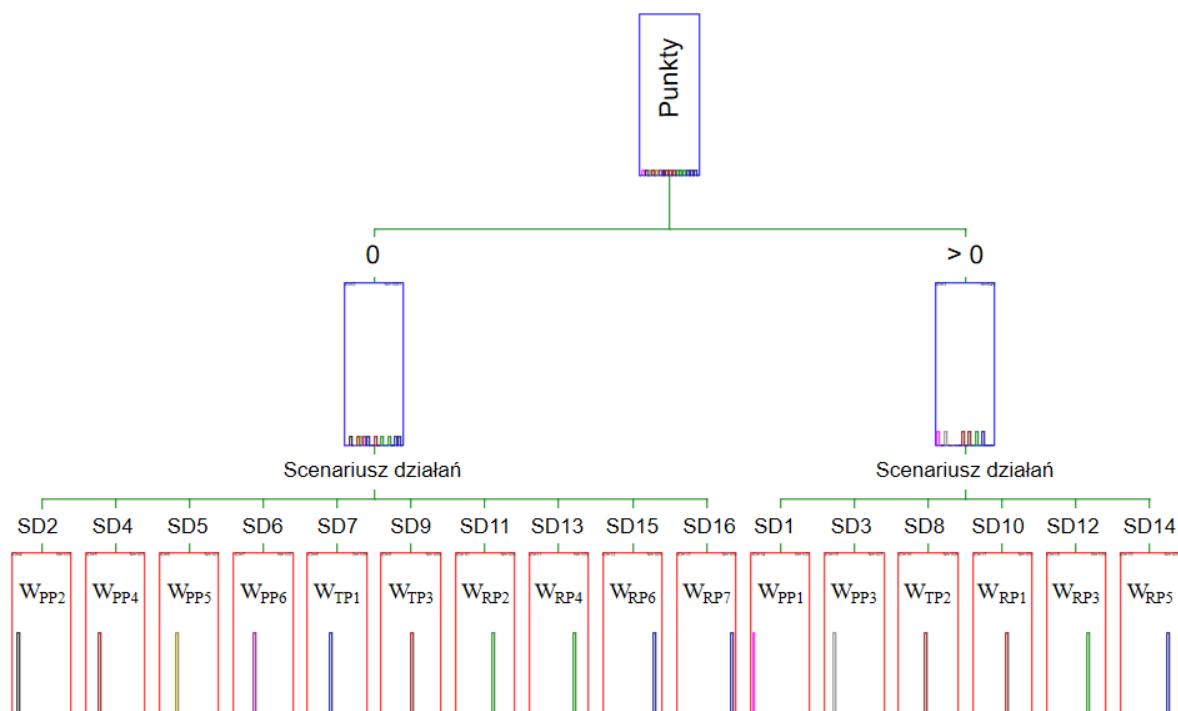
W obszarze O3 wskazuje się, że cztery z siedmiu przyjętych wskaźników wymagają wdrożenia działań, gdyż ich wartość jest niezgodna z wartością referencyjną. Wskaźnikom, które nie osiągają wartości referencyjnym przypisano 0 pkt. Jak wskazuje Rys. 46 w celu podniesienia poziomu ZR rekomenduje się wdrożenie następujących scenariuszy działań:

- SD1 dla wskaźnika W_{RP2} ,
- SD13 dla wskaźnika W_{RP4} ,
- SD15 dla wskaźnika W_{RP5} ,
- SD16 dla wskaźnika W_{RP6} .



Rys. 46. Ocena poziomu ZR i rekomendacja działań w obszarze O3

Wskazanie przeprowadzonej oceny poziomu ZR osobno dla każdego obszaru pozwala na czytelną interpretację otrzymanych wyników oraz rekomendację działań.



Rys. 47. Ocena ZR w badanym przedsiębiorstwie w trzech przyjętych obszarach

W końcowym etapie w celu podsumowania zdobytych punktów w trzech badanych obszarach wygenerowano drzewo stanowiące podstawę do określenia poziomu ZR w trzech przyjętych obszarach (Rys. 47). W badanym studium przypadku przedsiębiorstwo zdobyło 6 punktów, co oznacza, że poziom ZR jest na poziomie 1 (niski poziom). Drzewo wskazuje potrzebę wdrożenia scenariuszy działań dla 10 wskaźników, w tym dla:

- O1: Wpp2 (SD2), Wpp4 (SD4), Wpp5 (SD5), Wpp6 (SD6);
- O2: WTP1 (SD7), WTP3 (SD9);
- O3: WRP2 (SD11), WRP4 (SD13), WRP6 (SD15), WRP7 (SD16).

Dla 10 wskaźników ZR, dla których wskazano potrzebę wdrożenia scenariuszy działań wskazuje się następujące wartości:

1) Obszar O1:

- Wpp2 (SD2) = NIE
- Wpp4 (SD4) = 0,01
- Wpp5 (SD5) = 3
- Wpp6 (SD6) = Nie

Po wdrożeniu rekomendowanych działań, po roku wartości te powinny być na poziomie:

- Wpp2 (SD2) = TAK, spadek opłat za energię elektryczną zależny od udziału energii odnawialnej w całkowitym zapotrzebowaniu.

— Wpp4 (SD4) = 0, spadek o 100%.

— Wpp5 (SD5) = 0, spadek o 100%.

— Wpp6 (SD6) = TAK

2) Obszar O2:

— WTP1 (SD7) = NIE

— WTP3 (SD9) = NIE

Po wdrożeniu rekomendowanych działań, po roku wartości te powinny być na poziomie:

— WTP1 (SD7) = TAK, spadek wadliwych produktów do 0 sztuk, spadek reklamacji o 100%, wzrost konkurencyjności.

— WTP3 (SD9) = TAK, budowa wizerunku specjalistów na rynku; motywacja dla klientów do dokonania kolejnych zakupów- 6-krotnie mniejszy koszt niż w przypadku pozyskania nowego klienta.

3) Obszar O3:

— WRP2 (SD11) = NIE

— WRP4 (SD13) = TAK

— WRP6 (SD15) = NIE

— WRP7 (SD16) = NIE

Po wdrożeniu rekomendowanych działań, po roku wartości te powinny być na poziomie:

— WRP2 (SD11) = TAK, lepsze wykorzystanie potencjału pracowników; poprawi komunikację między przełożonym i pracownikiem; feedback efektów pracy pracowników; wymagań przełożonych, możliwości rozwoju.

— WRP4 (SD13) = NIE, wzrost ochrony zdrowia ludzkiego i środowiska; wzrost jakości produktów; brak ograniczeń stosowania substancji w procesie produkcyjnym w świetle przepisów prawa.

— WRP6 (SD15) = TAK, realizacja działań zgodnych ze Strategią Neutralności Klimatycznej; wsparcie w uzyskaniu Certyfikatu „Biznes z Klimatem”; finansowanie inwestycji ze środków UE w zakresie wparcia transformacji; optymalizacja zużycia wody, energii, materiałów i odpadów oraz kosztów za media.

— WRP7 (SD16) = TAK, niższe koszty związane z uprawnieniami do emisji CO₂ (EU-ETS); wzrost konkurencyjności klimatycznej.

Możliwość zastosowania modelu dla wybranego procesu produkcyjnego/produktu pozwala na dekompozycję realizowanych działań. W pracy porównano dwa procesy produkcyjne, które

wykazały różne wartości przyjętych wskaźników ZR. W przypadku procesu produkcyjnego osi głównej (Rys. 43) wykazano wdrożenia scenariuszy działań dla następujących wskaźników:

- Wpp2 (SD2) = NIE
- WPP5 (SD5) = 1 sztuka (błędne wymiary detalu)
- WTP1 (SD7) = NIE
- WRP4 (SD13) = TAK (chłodziwo)

W przypadku procesu produkcyjnego profilu U (Rys. 44) wykazano konieczność wdrożenia scenariuszy działań dla następujących wskaźników:

- Wpp2 (SD2) = NIE
- WTP1 (SD7) = TAK

Tak przedstawiony proces produkcyjny pozwala na sprecyzowanie problematycznych obszarów w zakresie realizacji celów ZR w badanym przedsiębiorstwie. Analiza otrzymanych danych wskazuje menadżerom możliwe działania w zakresie organizacyjnym (np. możliwość zastosowania dodatkowych źródeł energii w postaci energii odnawialnej) oraz wyklucza działania pod względem technicznym (np. brak możliwości zastosowania chłodziwa w realizowanym procesie obróbki).

5.3. Podsumowanie i wnioski

Wdrożenie SD należy przyjąć w określonym horyzoncie czasowym uwzględniając możliwości finansowe, techniczne i organizacyjne danego przedsiębiorstwa (horyzont czasowy zalecany zgodnie z wytycznymi dla poszczególnych typów zarządzania).

Wdrożenie wskazanych rekomendacji w przedsiębiorstwie pozwoli przede wszystkim na:

- ograniczenie kosztów zakupu energii oraz zmniejszenie i uniezależnienie ich od wzrostu cen energii i możliwych przerw w zasilaniu;
- ograniczenie kosztów stałych związanych z eksploatacją budynku (ogrzewanie, oświetlenie, zużycie wody)- oszczędność rzędu 10-30% w zależności od zakresu modernizacji;
- zmniejszenie problemów logistycznych związanych z magazynowaniem i transportem odpadów produkcyjnych/złomu produkcyjnego;
- wzrost wydajności operacyjnej poprzez uzyskanie certyfikatu ISO 9001:2015;
- mniejszą ilość generowania odpadów i zwiększenie efektywności organizacji;
- wzrost zaufania zainteresowanych stron;
- poprawę poziomu zgodności z przepisami dotyczącymi ochrony środowiska;

- zwiększenie prawdopodobieństwa powrotu klienta;
- spadek rotacji i absencji pracowników.

Korzyści wynikające z zastosowania proponowanej metodyki oceny ZR w przedsiębiorstwach produkcyjnych przedstawiono w formie graficznej na Rys. 48.



Rys. 48. Korzyści zastosowania proponowanej metodyki oceny zrównoważonego rozwoju w przedsiębiorstwach produkcyjnych

6. Wnioski końcowe i kierunki dalszych prac

Proponowana metoda oceny poziomu ZR w przedsiębiorstwach produkcyjnych z branży metalowej jest aktualnie poszukiwanym narzędziem, na co wskazują liczne pozycje literaturowe oraz raporty ZR wykazane w pracy, a także zapotrzebowanie zgłoszone ze strony przedsiębiorstw.

Jako oryginalne osiągnięcia w pracy, które wnoszą znaczący wkład do dyscypliny inżynieria mechaniczna można uznać:

- zbudowanie nowego podejścia do oceny poziomu ZR w przedsiębiorstwach produkcyjnych branży metalowej sektora MŚP;
- zbudowanie metody do oceny poziomu ZR, której zastosowanie umożliwi automatyczne generowanie rekomendacji w zakresie działań koniecznych do podwyższenia poziomu zrównoważonego rozwoju w przedsiębiorstwach produkcyjnych branży metalowej;
- opracowanie narzędzia w postaci metodyki oceny poziomu ZR wspierającego podejmowanie decyzji w zakresie realizacji procesów produkcyjnych pod względem ich energochłonności i efektywności wykorzystania zasobów;
- przedstawiona weryfikacja znaczenia utylitarnego opracowanego modelu oceny zrównoważonego rozwoju pozwala na zaangażowanie przemysłu metalowego do realizacji globalnych celów zrównoważonego rozwoju poprzez predykcję scenariuszy działań skierowanych na wzrost jego poziomu.

Głównym celem proponowanej metodyki jest stałe podnoszenie poziomu ZR poprzez wspomaganie działań w trzech wymiarach ZR: społecznym, środowiskowym i ekonomicznym w zdefiniowanych obszarach charakterystycznych dla przedsiębiorstw produkcyjnych. Scenariusze działań skierowanych ku wspomaganie w osiągnięciu celów ZR oparte są na:

- utrzymaniu i ciągłym doskonaleniu systemu zarządzania zgodnie z normami ISO 9001:2015 oraz ISO 14001:2015;
- analizie potrzeb klientów i nadążanie za rosnącymi wymaganiami;
- pełnym zaangażowaniu kierownictwa oraz wszystkich pracowników do realizacji ustalonych celów przedsiębiorstwa w zakresie ZR;
- zapewnieniu właściwych zasobów oraz infrastruktury dla osiągnięcia zgodności świadczonych wyrobów i usług z oczekiwaniami klientów oraz wymaganiami prawa;
- edukacji personelu w zakresie ZR i bezpieczeństwa pracy oraz na podnoszeniu jego kompetencji i kwalifikacji.

Kolejnym kluczowym aspektem metodyki jest możliwość otrzymania scenariusza działań w trzech wymiarach ZR: środowiskowym, ekonomicznym i społecznym. Zaletą proponowanej metodyki jest możliwość łatwej rozbudowy przyjętych celów i wskaźników ZR dla przedsiębiorstw produkcyjnych z branży metalowej.

Dalszy kierunek prac skierowany jest na rozwinięciu obszarów ZR w przedsiębiorstwach zgodnych z modelem referencyjnym o obszar recyklingu. Świadomość ekologiczna społeczeństwa wzrasta, a przepisy prawa stawiają coraz to szersze przepisy w tym zakresie, szczególnie dla przedsiębiorstw produkcyjnych. Obszar ten dotyczy m.in. gospodarki cyrkularnej, odpowiedzialnego gospodarowania odpadami czy też projektowanie dla recyklingu. Są to hasła, które coraz częściej pojawiają się w raportach oraz strategiach przedsiębiorstw w różnych gałęziach przemysłu.

W kolejnych etapach badań zgromadzone dane mogą także posłużyć do określenia wzorców i cech zrównoważonych przedsiębiorstw produkcyjnych branży metalowej, tworząc kompleksowe i zharmonizowane ramy.

Literatura

- [1] Abbati De Assis, C.; Greca, L.G.; Ago, M.; Balakshin; M.Y., Jameel, H.; Gonzalez, R., Rojas, O.J. Techno-economic assessment, scalability, and applications of aerosol lignin micro- and nanoparticles. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 6 (9), 2018, s. 11853-11868.
- [2] Abedini, A.; Li, W.; Badurdeen, F.; Jawahir, I.S. A metric-based framework for sustainable production scheduling, *Journal of Manufacturing Systems* 54, 2020, s. 174-185.
- [3] Ahmad, S.; Tahar, R.M. Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of Malaysia. *Renewable Energy* 63, 2014, s. 458-466.
- [4] Aloini, D.; Dulmin, R.; Mininno, V. A peer IF-TOPSIS based decision support system for packaging machine selection, *Expert Systems with Applications* 41 (2014), s. 2157-2165.
- [5] Amrina, E., Ramadhani, C., Vilsu, A.L., 2016. A fuzzy multi criteria approach for sustainable manufacturing evaluation in cement industry. *Procedia CIRP* 40, s. 619-624.
- [6] Anggraeni, W.; Kusumawardani, R.P.; Ardianto, R. Penerapan fuzzy analytical hierarchy process pada sistem penilaian pegawai di rumah sakit onkologi Surabaya, *Seminar Nasional Sistem Informasi Indonesia*, September 2014.
- [7] Azapagic, A.; Stamford, L.; Youds, L.; Barteczko-Hibbert, C. Towards sustainable production and consumption: A novel DEcision-Support Framework IntegRating Economic, Environmental and Social Sustainability (DESIREs), *Computers & Chemical Engineering* 91, 2016, s. 93-103.
- [8] Atanassov, K. T. Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 20, 1986, s. 87–96.
- [9] Bhattacharyya, S.K.; Cheluyan, A.S. Optimization of a subsea production system for cost and reliability using its fault tree model, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 185, May 2019, s. 213-219.
- [10] Bond, A.; Morrison-Saunders, A. Challenges in determining the effectiveness of sustainability assessment. *Routledge, Taylor & Francis Group*, 2013.
- [11] Boran, F.E.; Genc, S.; Kurt, M.; Akay, D. A multi-criteria intuitionistic fuzzy group decision making for supplier selection with TOPSIS method, *Expert Systems with Applications* 36 (8), 2009, s. 11363-11368.
- [12] BuHamdan, S.; Alwisay, A.; Bouferguene, A.; Al-Hussein, M.; The application of multi-attribute utility theory for a market share-based design evaluation. *Int. J. Hous. Mark. Anal.* 12 (6), 2019, s. 985-1003.

- [13] Büyüközkan, G.; Çifçi, G. A novel hybrid MCDM approach based on fuzzy DEMATEL, fuzzy ANP and fuzzy TOPSIS to evaluate green suppliers. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 2020, s. 3000-3011.
- [14] Castro, D.M.; Parrerias, F.S. A review on multi-criteria decision-making for energy efficiency in automotive engineering, *Applied Computing and Informatics* 2018.
- [15] Chang, A.; Cheng, Y. Analysis model of the sustainability development of manufacturing small and medium- sized enterprises in Taiwan. *Journal of Cleaner Production* 207, 2019, s. 458-473.
- [16] Chawla, V.K; Chhabra, D.; Gupta, P.; Shaivi, A.; Vinita, N.; Shrikant karanda, V. Evaluation of green operations management by fuzzy analytical hierarchy process. *Materials Today: Proceedings* 38 (1), 2021, s. 274-279.
- [17] Chebaeva, N.; Lettner, M.; Wenger, J.; Schoggl, J. Dealing with the eco-design paradox in research and development projects: The concept of sustainability assessment levels. *Journal of Cleaner Production* 281, 2021, s. 125232.
- [18] Dai, W.; Ji, W. A MapReduce Implementation of C4.5 Decision Tree Algorithm, *International Journal of Database Theory and Application* 83 (1), 2014, s. 49-60.
- [19] Deloitte, <https://www2.deloitte.com/pl/pl/pages/human-capital/articles/raport-trendy-hr-2020.html>, dostęp: 05.12.2021r.
- [20] Deradjat, D.; Minshall, T. *Decision trees for implementing rapid manufacturing for mass customisation*, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Volume 23, 2018, s. 156-171.
- [21] Diaz-Balteiro, L.; Gonzalez-Pachon, J.; Romero, C. Measuring systems sustainability with multi-criteria methods: a critical review. *Eur. J. Oper. Res.* 258 (2), 2017, s. 607-616.
- [22] Elangovan, M. Evaluation of expert system for condition monitoring of a single point cutting tool using principle component analysis and decision tree algorithm. *Expert Systems with Applications* 38 (4), 2011, s. 4450-4459.
- [23] Elsami, Y.; Dassisti, M.; Lezoche, M.; Panetto, H. A survey on sustainability in manufacturing organisations: dimensions and future insights. *International Journal of Production Research* 57, 2018, s. 5194-5214.
- [24] Esposito, S.; Cafierob, A.; Gianninoc, F.; Mazzolenic, S.; Diano, M. A Monitoring, Modeling and Decision Support System (DSS) for a Microalgae Production Plant based on Internet of Things Structure, *Procedia Computer Science* 113, 2017, s. 519–524.
- [25] Erol, I.; Sencer, S.; Sari, R. A new fuzzy multi-criteria framework for measuring sustainability performance of a supply chain. *Ecol. Econ.* 70 (6), 2011, s. 1088-1100.

- [26] Europarlament, <https://www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/society/20180301STO98928/infografika>, dostęp: 07.03.2021r.
- [27] Filipowicz-Chomko, M.; Roszkowska, E. Ocena realizacji koncepcji zrównoważonego rozwoju województw Polski w zakresie poziomu rozwoju społecznego w roku 2005 oraz 2013, OPTIMUM, Studia Ekonomiczne nr 3 (81), 2016.
- [28] Gabriel, M.; Schoggl, J.P.; Posch, A. Early Front-End Innovation Decisions for Self-Organized Industrial Symbiosis Dynamics—A Case Study on Lignin Utilization, 2017.
- [29] Gani, A.; Asjad, M., Talib, F. Prioritization and Ranking of indicators of sustainable manufacturing in Indian MSMEs using fuzzy AHP approach. Materials Today: Proceedings 46 (15), 2021, s. 6631-6637.
- [30] García-Sánchez, I.M.; Amor-Esteban, V.; Galindo-Álvarez, D. Communication strategies for the 2030 agenda commitments: a multivariate approach. Sustainability 12, 2020, s. 10554.
- [31] Gonçalves Machado, C.; Despeisse, M.; Winroth, M.; Silva, E. Additive manufacturing from the sustainability perspective: proposal for a self-assessment tool. Procedia CIRP, 2019, s. 482-487.
- [32] GOV, <https://www.gov.pl/web/rozwoj-praca-technologie/zrownowazony-rozwoj>, dostęp: 04.01.2021r.
- [33] Govindan, K.; Khodaverdi, R.; Jafarian, A. A fuzzy multi criteria approach for measuring sustainability performance of a supplier based on triple bottom line approach. J. Clean. Prod. 47, 2013, s. 345-354.
- [34] GRI, <https://www.globalreporting.org/>, dostęp: 14.01.2021r.
- [35] GRI 2016, G4 Wytyczne dotyczące raportowania
- [36] Grzegorzewski, P. Distances between intuitionistic fuzzy sets and/or interval-valued fuzzy sets based on the Hausdorff metric. Fuzzy Sets and Systems 148, 2004, s. 319–328.
- [37] Guggari, S.; Kadappa, V.; Umadevi, V. Non-sequential partitioning approaches to decision tree classifier, Future Computing and Informatics Journal 3, 2018, s. 275-28.
- [38] Gyluai, D.; Pfeiffer, A.; Bergmann, J.; Gallina, V. Online lead time prediction supporting situation-aware production control, CIRP 78, 2018, s. 190–195.
- [39] Haapala, K.; Zhao, F.; Camelio, J.; Sutherland, J. A Review of Engineering Research in Sustainable Manufacturing. Journal of Manufacturing Science and Engineering 135, 2013.
- [40] Hassan, R. Mastery-Humility Model for the Teaching of Sustainability, International Journal of Engineering Science Invention 10 (4), 2021, s. 7-13.

- [41] Hatayama, H., The metals industry and the Sustainable Development Goals: The relationship explored based on SDG reporting. *Resources, Conservation and Recycling* 178, 2022, s. 106081.
- [42] Ican,
<https://www.ican.pl/b/zrownowazony-rozwoj-zaczyna-sie-odpracownikow/Pjv0aYoOQ>,
dostęp: 21.08.2021r.
- [43] International Federation of Robotics 2020, World Robotics Report .
- [44] ISO, <http://www.iso14001.wroc.pl/czym-jest-iso-14001.html>, dostęp: 02.02.2021r.
- [45] Kabierz, J.; Turek, M.; Drzewiecki, J.; Makówka, J. Ocena innowacyjności technologii eksploatacji węgla kamiennego metoda AHP. 2006.
- [46] Kaldas, O.; Shihata, L.; Kiefer, J. An index-based sustainability assessment framework for manufacturing organizations. *Procedia CIRP* 97, 2020, s. 235-240.
- [47] Kannan, D.; Khodaverdi, R.; Olfat, L.; Jafarian, A.; Diabat, A. Integrated fuzzy multi criteria decision making method and multi-objective programming approach for supplier selection and order allocation in a green supply chain. *Journal of Cleaner Production* 47, 2013, s. 355- 367.
- [48] Kaya, T.; Kahraman, C. Multicriteria decision making in energy planning using a modified fuzzy TO.PSIS methodology. *Expert Systems with Applications* 38(6), 2011, s. 6577-6585.
- [49] Koulinas, G.; Paraschos ,P.; Koulouriotis ,D. A Decision Trees-based knowledge mining approach for controlling a complex production system. *Procedia Manufacturing* 51, 2020, s. 1439-1445.
- [50] Kulatunga, A.K.; Karunatilake, N.; Weerasinghe, N.; Ihalawatta. R.K. Sustainable Manufacturing based Decision Support Model for Product Design and Development Process. *Procedia CIRP*, 2015, s. 87-92.
- [51] Kumar, M.; Mani, M. Towards an interdisciplinary framework for effective sustainability assessment in manufacturing. *Procedia CIRP* 98, 2021, s. 79–84.
- [52] Kunath, M.; Winkler, H. Integrating the Digital Twin of the manufacturing system into a decision support system for improving the order management process, *Procedia Manufacturing* 72, 2018, s. 225-231 .
- [53] Kusumawardani, R.P.; Agintiara, M. Application of Fuzzy AHP-TOPSIS Method for Decision Making in Human Resource Manager Selection Process, *Procedia Computer Science* 72, 2015, s. 638 – 646.

- [54] Lee, K.H.; Saen, R.F. Measuring corporate sustainability management: a data envelopment analysis approach. *Int. J. Prod. Econ.* 140 (1), 2012, s. 219-226.
- [55] Loucanova, E.; Nosalova, M. Eco-innovation performance in Slovakia: assessment based on ABC analysis of eco-innovation indicators. *BioResources* 15 (3), 2020, s. 5355-5365.
- [56] Maik, R. Jakość produktów w świetle idei zrównoważonego rozwoju. *Marketing i Zarządzanie* nr 2 (48), 2017, s. 373–385.
- [57] Mancini, L.; Sala, S. Social impact assessment in the mining sector: Review and comparison of indicators frameworks. *Resources Policy* 57, 2018, s. 98-111.
- [58] Mardani, A.; Jusoh, A.; Zavadskas, E.K. Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications: two decades review from 1994 to 2014. *Expert Syst. Appl.* 42 (8), 2015, 4126-4148 .
- [59] Manager, <http://manageronline.pl/optimalizacja-i-doskonaleniekluczowych-procesow-w-przedsiębiorstwach-emisje-gazow-cieplarnianych-w-unii-europejskiej>, dostęp: 04.11.2020r.
- [60] Memari, A.; Dargi, A.; Jokar, M.; Ahmad, R.; Rahim, A. Sustainable supplier selection: A multi-criteria intuitionistic fuzzy TOPSIS method. *Journal of Manufacturing Systems*, 50, 2019, s. 9-24.
- [61] Ministerstwo Technologii i Rozwoju, Zrównoważony Rozwój, <https://www.gov.pl/web/rozwoj-praca-technologie/zrownowazony-rozwoj>, dostęp: 14.11.2021r.
- [62] Moldavska, A.; Welo, T. Development of manufacturing sustainability assessment using systems thinking. *Sustainability* 8, 2016.
- [63] Moldavska, A.; Welo, T. A Holistic approach to corporate sustainability assessment: Incorporating sustainable development goals into sustainable manufacturing performance Evaluation. *Journal of Manufacturing Systems* 50, 2019, s. 53-68.
- [64] Morrison-Saunders, A.; Pope, J.; Bond, A. Handbook of sustainability assessment. Edward Elgar Publishing, Incorporated, 2015.
- [65] Müller, D.P.; Hiete, M. Visualization supported corporate decision making for life cycle sustainability assessment – Illustrated using a case study for selecting a sustainable packaging system for self-leveling compounds. *Journal of Cleaner Production* 313, 2021, s. 1879-1786.
- [66] Müller, A.; Bornschlegl, M.; Mantwill, F. Life Cycle Rating –An approach to support the decision-making process of manufacturing systems, *Procedia Manufacturing* 21, 2018, s. 305–312.

- [67] Nagarajan, H.P.N.; Raman, A.S.; Haapala, K.R. A Sustainability Assessment Framework for Dynamic Cloud-based Distributed Manufacturing. *Procedia CIRP* 69, 2018, s. 136-141.
- [68] Neb, A.; Remling, D. Quantification and Evaluation of Automation Concepts based on a MultiCriteria Decision Analysis, *Procedia CIRP* 84, 2019, s. 624–629.
- [69] Ndubisi, N.O.; Zhai, X.; Lai, K. Small and medium manufacturing enterprises and Asia's sustainable economic development, *International Journal of Production Economics* 233, 2021, s. 107971.
- [70] Oberc, H.; Reuter, M. Development of a learning factory concept to train participants regarding digital and human centered decision suport, *Procedia Manufacturin*, 2017.
- [71] Odpowiedzialny biznes,
<https://odpowiedzialnybiznes.pl/aktualno%C5%9Bci/innowacyjne-rozwiazania-kluczem-do-zrownowazonego-rozwoju/>, dostęp: 07.12.2020r.
- [72] ONZ 2015, Raport Globalny.
- [73] ONZ 2018, Raport Globalny.
- [74] Patalas-Maliszewska, J.; Łosyk, H., Jasiulewicz-Kaczmarek, M. A Sustainable Development Evaluation Card for a Manufacturing Company. *IFAC PapersOnline*, 52(2), 2020, s. 10468-10473.
- [75] Patalas-Maliszewska, J.; Łosyk, H. Improving the Level of Sustainable Development in Industry 4.0 Context: A New Approach. *European Research Studies Journal* XXIV (4), 2021, s. 75-84.
- [76] Pekel, E. Estimation of soil moisture using decision tree regression. *Theoretical and Applied Climatology* 139, 2020, s. 1111–1119.
- [77] Piwowarki, M.; Miłaszewicz, D.; Łatuszyńska, M.; Borawski, M.; Nermied, K. TOPSIS and VIKOR methods in study of sustainable development in the EU countries, *Procedia Computer Science* 126, 2018, s. 1683-1692.
- [78] Rajak, S.; Vinodh, S. Application of fuzzy logic for social sustainability performance evaluation: A case study of an Indian automotive component manufacturing organization. *Journal of Cleaner Production*, 2015, s. 108-119.
- [79] Raport SDG, 2020, <https://raportsdg.stat.gov.pl/2020/cel12.html>, dostęp: 11.02.2021r.
- [80] Saaty, T.L. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making, in: *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, International Series in Operations Research & Management Science, vol. 78, Springer, New York, 2005, s. 345–405.

- [81] Saaty, T. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process, European Journal of Operational Research 4, 8North Holland, 1990, s. 9-26.
- [82] Santos, P.H.; Neves, S.M.; Ornaghi, D.; Henrique de Oliveira C.; Carvalho, H.D. The analytic hierarchy process supporting decision making for sustainable development: An overview of applications. Journal of Cleaner Production 212, 2019, s. 119-138.
- [83] SDG a, http://sdg.gov.pl/statistics_nat/12-1-a, dostę: 15.07.2021r.
- [84] SDG c, http://sdg.gov.pl/statistics_nat/12-1-c, dostę: 15.07.2021r.
- [85] Sengül, Ü.; Eren, M.; Shiraz, S. E.; Gezder, V.; Sengül, A. B. Fuzzy TOPSIS method for ranking renewable energy supply systems in Turkey. Renewable Energy 75, 2015, s. 617-625.
- [86] Shang Z.; Dong, G.; Zhipeng, J.; Yong, L. A multi-perspective analysis of sustainability of machining processes based on a new extended virtual manufacturing framework, Energy 225, 2021, s. 120257.
- [87] Shubin, K.T. Enablers of Sustainable Manufacturing Overview. Strategic Management of Sustainable Manufacturing Operations. IGI Global. India, 2016, s. 22.
- [88] Singh, M.; Tatsuki, O.; Rajiv, A. Green and Sustainable Manufacturing of Advanced. Material. Elsevier Inc. 2016.
- [89] Swarnakar, V.; Singh, A. R.; Antony, J.; Jayaraman, R.; Tiwari, A.K.; Rathi, R.; Cudney, E. Prioritizing Indicators for Sustainability Assessment in Manufacturing Process: An Integrated Approach. Sustainability 14, 2022, s. 3264.
- [90] Swarnakar, V.; Singh, A.R.; Tiwari, A. Evaluation of key performance indicators for sustainability assessment in automotive component manufacturing organization. Materials Today: Proceedings, 2021.
- [91] Swarnakar, V.; Singh, A.R.; Antony, J.; Tiwari, A.; Cudney, E. Development of a conceptual method for sustainability assessment in manufacturing. Computers and Industrial Engineering 158, 2021.
- [92] Swarnakar, V.; Towar, A.K.; Singh, A.R. Evaluating critical failure factors for implementing sustainable lean six sigma framework in manufacturing organization, Int. J. Lean Six Sigma, 2020.
- [93] Sun, J.; Lang, J.; Fujita, H.; Li, H. Imbalanced enterprise credit evaluation with DTE-SBD: Decision tree ensemble based on SMOTE and bagging with differentiated sampling rates, Information Sciences 425, 2018, s. 76-91.
- [94] Szmidt, E.; Kacprzyk, J. Distances between intuitionistic fuzzy sets. Fuzzy Sets and Systems, 114, 2000, s. 505–518.

- [95] Tseng, M.L. Modeling sustainable production indicators with linguistic preferences. *J. Clean. Prod.* 40, 2013, s. 46-56.
- [96] Tseng, M.L.; Divinagracia, L.; Divinagracia, R. Evaluating firm's sustainable production indicators in uncertainty. *Comput. Ind. Eng.* 57 (4), 2009, s. 1393-1403.
- [97] Tulecki, A.; Król, S. Modele decyzyjne z wykorzystaniem metody Analytic Hierarchy Process (AHP) w obszarze transportu, *Problemy Eksploatacji* 2-2007, Politechnika Krakowska, Kraków 2007, s. 171.
- [98] United Nations Environment Programme (UNEP), *Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles*
- [99] Uygun, O.; Dede, A. Performance evaluation of green supply chain management using integrated fuzzy multi-criteria decision making techniques. *Comput. Ind. Eng.* 102, 2016, s. 502-511.
- [100] Waas, T.; Hugé, J.; Block, T.; Wright, T.; Benitez-Capistros, F.; Verbruggen, A. Sustainability Assessment and Indicators: Tools in a Decision-Making Strategy for Sustainable Development. *Sustainability* 6, 2014, s. 5512-5534.
- [101] Wang, H.; Schandl, H.; Wang, X.; Ma, F.; Yue, Q.; Wang, G.; Wang, Y.; Wie, Y.; Zhang, Z.; Zheng, R. Measuring progress of China's circular economy. *Resour. Conserv. Recycl.* 163, 2020, s. 105070.
- [102] Wicher, P.; Zapletal, F.; Lenort, R. Sustainability performance assessment of industrial corporation Rusing Fuzzy Analytic Network Process, *Journal of Cleaner Production* 241, 2019, s. 118132.
- [103] World Robotics Report 2020, International Federation of Robotics 2020.
- [104] Woodhouse, A.; Davis, J.; Penicaud, C.; Ostergren, K. Sustainability checklist in € support of the design of food processing. *Sustainable Production and Consumption* 16, 2018, s. 110-120.
- [105] van Zanten, J.A.; van Tulder, R. Towards nexus-based governance: defining interactions between economic activities and Sustainable Development Goals (SDGs). *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.* 28, 2021, s. 210-226.
- [106] Varga, T. Decision tree based qualitative analysis of operating regimes in industrial production processes, *Computer Aided Chemical Engineering* 25, 2008, s. 1039-1044.
- [107] Zalewska, M. Sustainable consumption and production - inequalities in European Union countries. *Social Inequality and Economic Growth* 42(2), 2015.
- [108] Zhang, Q.; Hu, Y.; Mu, R.; Zhang, Z.; Liu, C. Measurement of sustainable development index in China's manufacturing industry based on Er-xiang Dual theory, *AEJ*, 60(6), 2021.

- [109] Zhang, Y.; Zhang, R.; Wang, Y.; Guo, H.; Qu, T.; Li, Z. Big data driven decision-making for batch-based production systems, *Procedia CIRP* 83, 2019, s. 814–818.
- [110] Zhou, J.; Xiahou, T.; Liu, Y. Multi-objective optimization-based TOPSIS method for sustainable product design under epistemic uncertainty. *Applied Soft Computing* 98, 2021, s. 106850.
- [111] Zieliński, L. Zdarzenia potencjalnie wypadkowe. *ATEST- Ochrona Pracy* 1/2016, s. 33.
- [112] Żak J.; Węgliński, S. The selection of the logistics center location based on MCDM/A methodology, *Transportation Research Procedia* 3, 2014, s. 555- 564.
- [113] Xu, Z. Intuitionistic fuzzy aggregation operators. *IEEE Transaction of Fuzzy Systems*, 15(6), 2007, s. 1179-1187.

Spis rysunków

Rys. 1. Problem badawczy	3
Rys. 2. Obszary aktywności ZR	17
Rys. 3. Klasyczne algorytmy budowania drzewa.....	31
Rys. 4. Metoda oceny poziomu ZR dla przedsiębiorstw produkcyjnych z branży metalowej	41
Rys. 5. Zrównoważone przedsiębiorstwo produkcyjne.....	43
Rys. 6. Średnie zużycie energii elektrycznej w skali miesiąca	63
Rys. 7. Źródła energii w badanych przedsiębiorstwach.....	64
Rys. 8. Wdrożona ocena satysfakcji klienta.....	65
Rys. 9. Wdrożona ocena satysfakcji pracownika	66
Rys. 10. Modernizacja parku maszynowego w ostatnim półroczu	67
Rys. 11. Zastosowanie niebezpiecznych substancji/materiałów w produkcji	68
Rys. 12. Zastosowanie niebezpiecznych substancji/materiałów w procesach technologicznych	69
Rys. 13. Kontrola emisji gazów cieplarnianych w badanych przedsiębiorstwach.....	70
Rys. 14. Możliwość recyklingu produktu po zużyciu	71
Rys. 15. Możliwość ponownego wykorzystania odpadów/złomu produkcyjnego	72
Rys. 16. Zarejestrowane wypadki przy pracy- średnia z 3 miesięcy	73
Rys. 17. Wdrożenie strategii zarządzania klimatem/działań na rzecz ochrony klimatu	74
Rys. 18. Wdrożenie audytów zarządzania jakością	75
Rys. 19. Rekomendacje działań dla obszaru O1	84
Rys. 20. Rekomendacje działań dla obszaru O2	87
Rys. 21. Rekomendacje działań dla obszaru O3	89
Rys. 22. Rekomendacja działań dla obszaru O3 z uwzględnieniem typu wskaźników	91

Rys. 23.Rekomendacja działań dla obszaru O2 z uwzględnieniem przyznanej liczby punktów	92
Rys. 24.Rekomendacja działań dla obszaru O1z uwzględnieniem przyznanej liczby punktów	93
Rys. 25.Metodyka oceny poziomu ZR	94
Rys. 26. Wyrób gotowy w badanym przedsiębiorstwie- podtrzymka ramienia	97
Rys. 27.Wyrób gotowy w badanym przedsiębiorstwie- profil U.....	98
Rys. 28.Wyrób gotowy w badanym przedsiębiorstwie- rama.....	98
Rys. 29. Wyrób gotowy w badanym przedsiębiorstwie- złącze kątowe	99
Rys. 30.Tokarka Hass SL-20 LHE.....	100
Rys. 31.Automat tokarski STAR SB-20R typ E	100
Rys. 32.5 osiowe centrum obróbcze Hermle C600U	101
Rys. 33.Laser Trumpf TruLaser 3530	101
Rys. 34.Piła formatowa Altendorf F45	102
Rys. 35. Oś główna- rysunek poglądowy.....	103
Rys. 36. Oś główna- wyciąg z rysunku technicznego.....	104
Rys. 37. Profil U- rysunek poglądowy	105
Rys. 38. Profil U- wyciąg z rysunku technicznego, widok z przodu	105
Rys. 39. Profil U- wyciąg z rysunku technicznego, widok z góry	105
Rys. 40. Profil U- wyciąg z rysunku technicznego, widok z boku	106
Rys. 41.Poziom zarządzania-Wskaźnik	110
Rys. 42. Scenariusze działań dla procesu produkcyjnego detalu- oś główna	111
Rys. 43. Scenariusze działań dla procesu produkcyjnego detalu- profil U.....	112
Rys. 44.Ocena poziomu ZR i rekomendacja działań w obszarze O1.....	113
Rys. 45.Rekomendacja działań w obszarze O2.....	113

Rys. 46. Ocena poziomu ZR i rekomendacja działań w obszarze O3.....	114
Rys. 47. Ocena ZR w badanym przedsiębiorstwie w trzech przyjętych obszarach	115
Rys. 48. Korzyści zastosowania proponowanej metodyki oceny zrównoważonego rozwoju w przedsiębiorstwach produkcyjnych	118
Rys. 49. Podział badanych przedsiębiorstw produkcyjnych ze względu na liczbę zatrudnionych	141
Rys. 50. Obowiązujący system czasu pracy w badanych przedsiębiorstwach.....	142
Rys. 51. Stopień automatyzacji w przedsiębiorstwie	143
Rys. 52. Zarejestrowane zdarzenia potencjalnie wypadkowe- średnia z 3 miesięcy	144
Rys. 53. Terminowość realizacji zamówień wśród badanych przedsiębiorstw	145
Rys. 54. Wdrożenie innowacyjnych rozwiązań w ostatnim półroczu.....	146
Rys. 55. Wskaźnik braków- średnia z trzech miesięcy	147
Rys. 56. Czas szkolenia załogi- średnia z ostatnich trzech miesięcy	148
Rys. 57. Zastosowanie systemów wspomagania w przedsiębiorstwie.....	149
Rys. 58. Liczba robotów/półrobotów przypadająca na jednego zatrudnionego.....	150
Rys. 59. Ocena realizacji celów ZR w obszarze procesów produkcyjnych.....	151
Rys. 60. Ocena realizacji celów ZR w obszarze trwałość produktu	152
Rys. 61. Ocena realizacji celów ZR w obszarze rozwój produktu.....	153

Spis tabel

Tabela 1. Cele i wskaźniki ZR w wybranych jego wymiarach wg wytycznych GRI.....	8
Tabela 2. Przegląd możliwych cech istotnych przy wyborze metodologii oceny ZR	16
Tabela 3. Analiza literatury w zakresie zastosowania metod i narzędzi wspomagających decyzję w sektorze produkcyjnym	31
Tabela 4. Analiza zastosowania metod MCDM/A w obszarze ZR.....	35
Tabela 5. Przyjęte cele i wskaźniki ZR w poszczególnych obszarach.....	44
Tabela 6. Fundamentalna skala Satty’ego	46
Tabela 7. Macierz porównań parami dla obszaru: procesy produkcyjne	47
Tabela 8. Wyznaczanie wag dla poszczególnych wariantów w obszarze: procesy produkcyjne	47
Tabela 9. Ranking przyjętych wariantów dla obszaru: procesy produkcyjne.....	47
Tabela 10. Wyznaczenie wskaźnika niespójności dla obszaru: procesy produkcyjne.....	48
Tabela 11. Macierz porównań parami dla obszaru: trwałość produktu	48
Tabela 12. Wyznaczanie wag dla poszczególnych wariantów w obszarze: trwałość produktu	48
Tabela 13. Ranking przyjętych wariantów dla obszaru: trwałość produktu	49
Tabela 14. Wyznaczenie wskaźnika niespójności dla obszaru: trwałość produktu	49
Tabela 15. Macierz porównań parami dla obszaru: rozwój produktu.....	49
Tabela 16. Wyznaczanie wag dla poszczególnych wariantów w obszarze: rozwój produktu .	50
Tabela 17. Ranking przyjętych wariantów dla obszaru: rozwój produktu.....	50
Tabela 18. Wyznaczenie wskaźnika niespójności dla obszaru: rozwój produktu.....	50
Tabela 19. Przyjęte terminy językowe dla rankingu decydentów, kryteriów i subkryteriów ..	51
Tabela 20. Znaczenie decydentów oraz ich wagi.....	52
Tabela 21. Terminy językowe dla rankingu alternatyw	52

Tabela 22. Ranking przyjętych alternatyw	52
Tabela 23. Ranking przyjętych alternatyw w oparciu o IFNs	54
Tabela 24. Zagregowana intuicjonistyczna rozmyta macierz	55
Tabela 25. Ważność kryteriów według opinii DMs	56
Tabela 26. Ważność subkryteriów według opinii DMs	56
Tabela 27. Ocena kryteriów opartych na IFNs	57
Tabela 28. Ocena podkryteriów opartych na IFNs	57
Tabela 29. Zagregowana ocena ważności kryteriów i podkryteriów	58
Tabela 30. Zagregowana ocena wag kryteriów podkryteriów (ACW)	58
Tabela 31. Zagregowana ważona intuicjonistyczna rozmyta macierz decyzyjna	59
Tabela 32. Określenie typu wskaźników	60
Tabela 33. Współczynnik względnej bliskości i miary separacji dla przyjętych poziomów zarządzania	61
Tabela 34. Kluczowe cele ZR dla zdefiniowanego poziomu zarządzania	61
Tabela 35. Weryfikacja rozwiązań	62
Tabela 36. Poziomy zarządzania dla poszczególnych celów ZR	76
Tabela 37. Typy poszczególnych wskaźników	77
Tabela 38. Zdefiniowane zmienne	78
Tabela 39. Wartości referencyjne	79
Tabela 41. Wartości wskaźników ZR dla procesu produkcyjnego detalu „oś główna”	107
Tabela 42. Wartości wskaźników ZR dla procesu produkcyjnego detalu „profil U”	108
Tabela 43. Zgromadzone dane z badań empirycznych w studium przypadku	109

Załącznik nr 1. Kwestionariusz ankiety na temat poziomu realizacji koncepcji ZR w organizacji

Metryczka	
Rodzaj wyrobów	Produkcja stali
	Obróbka szerokiej gamy metali
	Sprzedaż wyrobów stalowych
	Realizacja konstrukcji metalowych
	Produkcja precyzyjnych elementów metalowych
	Inne, jakie?
Powierzchnia zakładu (m ²)	
Liczba pracowników zakładu	
Liczba zmian roboczych	
Lokalizacja przedsiębiorstwa (województwo)	
Stanowisko służbowe osoby wypełniającej kwestionariusz ankiety	

1. Zużycie energii elektrycznej dla całego zakładu w skali miesiącakWh
2. Źródła energii w zakładzie:
 - a) Energia konwencjonalna
 - b) Energia niekonwencjonalna
 - c) Obydwa typy energii
3. Kontrola emisji gazów cieplarnianych w zakładzie:
 - a) Tak
 - b) Nie
4. Liczba reklamacji - średnia z ostatnich trzech miesięcy
5. Liczba sprzedanych sztuk produktu - średnia z ostatnich trzech miesięcy
6. Liczba odpadów/złomu produkcyjnego oddanego do recyklingu

- średnia z ostatnich trzech miesięcykg

7. Liczba odpadów/złomu produkcyjnego powstałego w toku produkcji
- średnia z ostatnich trzech miesięcy kg
8. Możliwość recyklingu po zużyciu produktu:
- a) Tak
 - b) Nie
9. Możliwość ponownego wykorzystania odpadów/złomu produkcyjnego:
- a) Tak
 - b) Nie
10. Wdrożona ocena satysfakcji klienta:
- a) Tak
 - b) Nie
11. Wdrożona ocena satysfakcji pracownika:
- a) Tak
 - b) Nie
12. Zarejestrowane zdarzenia potencjalnie wypadkowe (średnia z ostatnich trzech miesięcy)
13. Zarejestrowane wypadki przy pracy (średnia z ostatnich trzech miesięcy)
14. Terminowość realizacji zamówień:
- a) 96-100%
 - b) 86-95%
 - c) 75-85%
 - d) Poniżej 75%
15. Zastosowanie niebezpiecznych substancji/materiałów w produkcji
- a) Tak
 - b) Nie

16. Zastosowanie niebezpiecznych substancji/materiałów w procesach technologicznych

a) Tak

b) Nie

17. Wdrożenie strategii zarządzania klimatem/działań na rzecz ochrony klimatu

a) Tak

b) Nie

c) W trakcie

18. Wdrożenie innowacyjnych rozwiązań w ostatnim półroczu

a) Tak

b) Nie

19. Modernizacja parku maszynowego w ostatnim półroczu

a) Tak

b) Nie

20. Wskaźnik braków (ilość sztuk niezgodnych/ ilość sztuk wyprodukowanych)

- średnia z ostatnich trzech miesięcy

21. Wdrożenie audytów zarządzania jakością

a) Tak

b) Nie

22. Zatrzymania linii produkcyjnych (łączny czas zatrzymania linii)

- średnia z ostatnich trzech miesięcyh

23. Czas szkolenia załogi (podnoszenie świadomości, przypomnienie bhp,...)

- średnia z ostatnich trzech miesięcyh

24. Proszę o określenie stopnia automatyzacji w Pańskiej firmie:

a) Procesy ręczne (manualne)

- b) Procesy ręczno-maszynowe (mieszane) *Operacje, w których cykl produkcyjny wykonuje maszyna, a operator decyduje o jego uruchomieniu i zatrzymaniu"
- c) Procesy ręczno-maszynowe (mieszane) *Operacje, w których maszyna automatycznie rozpoczyna i kończy cykl produkcyjny"
- d) Procesy zautomatyzowane *Praca operatora sprowadza się do nadzorowania maszyny. Operator bezpośrednio nie bierze udziału w wytworzeniu wyrobu finalnego.
- e) Procesy zautomatyzowane *Praca operatora sprowadza się wyłącznie do nadzorowania. Przepływ materiału pomiędzy gniazdami jest zautomatyzowany

25. Czy w Pańskiej firmie zostały wdrożone systemy wspomagania (np. ERP, SAP,...)?

- a) Tak
- b) Nie

26. Proszę o wskazanie ile robotów/półrobotów przysługuje na jednego zatrudnionego w Pańskiej firmie?

27. Jak oceniają Państwo poziom zrównoważonego rozwoju w obszarze procesy produkcyjne w Pańskim zakładzie?

- a) 1-bardzo nisko
- b) 2-nisko
- c) 3-średnio
- d) 4-dobrze
- e) 5- bardzo dobrze

28. Jak oceniają Państwo poziom zrównoważonego rozwoju w trwałość produktu produkcyjne w Pańskim zakładzie?

- a) 1-bardzo nisko
- b) 2-nisko
- c) 3-średnio

d) 4-dobrze

e) 5- bardzo dobrze

29. Jak oceniają Państwo poziom zrównoważonego rozwoju w obszarze rozwój produktu w Pańskim zakładzie?

a) 1-bardzo nisko

b) 2-nisko

c) 3-średnio

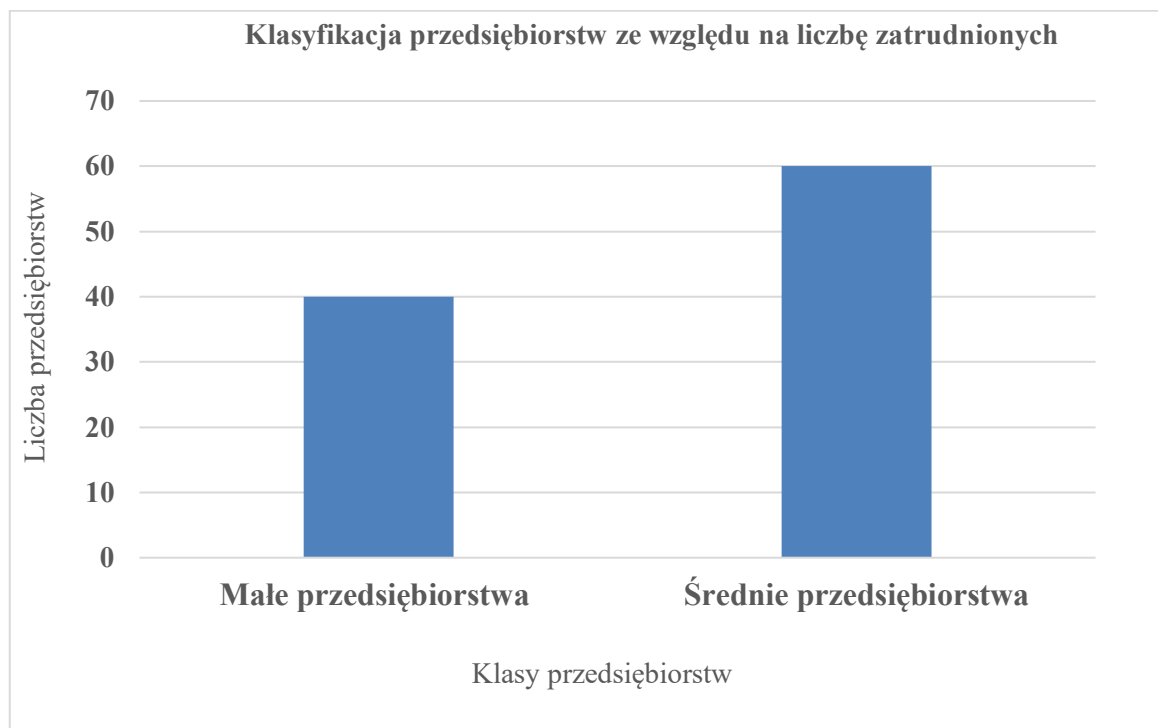
d) 4-dobrze

e) 5- bardzo dobrze

Załącznik nr 2. Wyniki badań uzyskane z kwestionariuszy ankiet

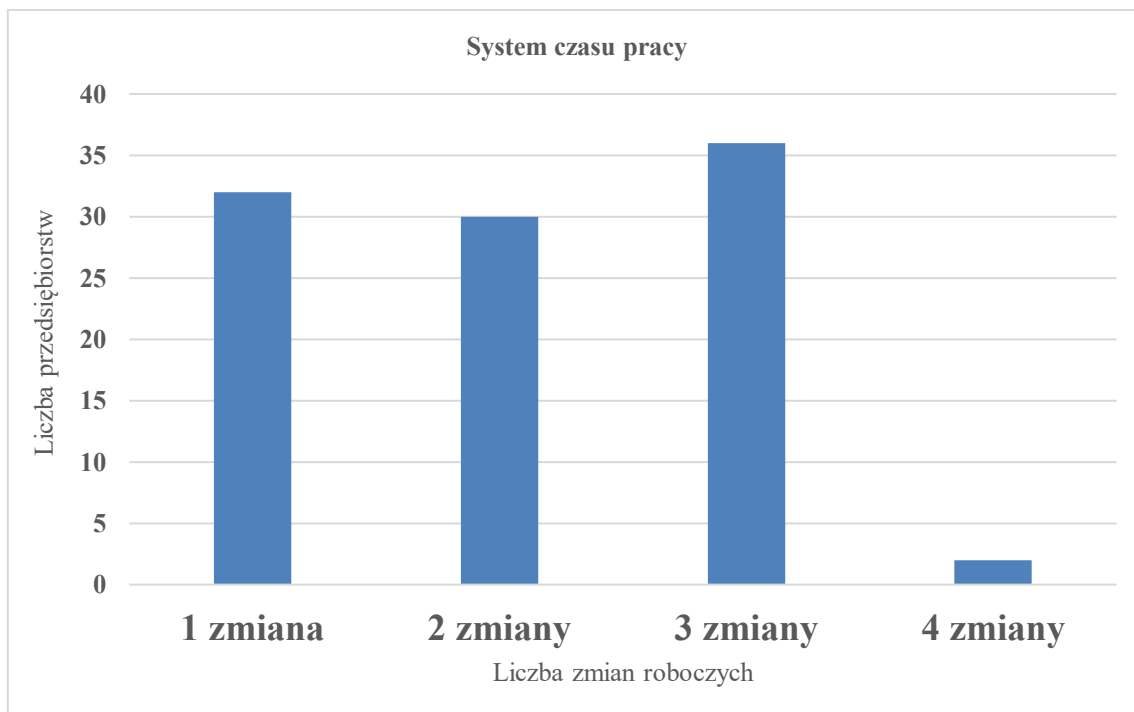
W pracy dokonano klasyfikacji przedsiębiorstw ze względu na liczbę zatrudnionych. Podziału dokonano na podstawie przyjętych kryteriów według następujących zasad:

- małe przedsiębiorstwa- zatrudniają od 10 do 49 pracowników.
- średnie przedsiębiorstwa- zatrudniają od 50 do 249 pracowników.



Rys. 49. Podział badanych przedsiębiorstw produkcyjnych ze względu na liczbę zatrudnionych

Jak wskazuje Rys. 49 w badanej grupie respondentów 60% stanowiły średnie przedsiębiorstwa produkcyjne, 40% małe przedsiębiorstwa.



Rys. 50. Obowiązujący system czasu pracy w badanych przedsiębiorstwach

Rys. 50 przedstawia obowiązujący system czasu pracy w badanych przedsiębiorstwach. W 32% badanych przedsiębiorstwach produkcyjnych nie obowiązuje system pracy zmianowej. Pozostałe przedsiębiorstwa (68%) stosują systemu czasu pracy zmianowej, w tym system dwu-zmianowy (30%), trzy-zmianowy (36%) oraz czterobrygadowy (2%). System pracy zmianowej wpływa na wiele czynników funkcjonowania organizacji. Jednym z pozytywnych czynników systemów pracy jest możliwość korzystania przez przedsiębiorstwa z nocnej stawki cenowej na energię elektryczną, co jest szczególnie istotne w dobie podwyżek cen energii elektrycznej od 01.01.2022r. Innym istotnym aspektem systemu pracy zmianowej jest elastyczność godzin pracy. Jednakże system pracy zmianowej może także wpływać negatywnie na stan zdrowia pracowników poprzez brak regularności i pracę w porach nocnych.

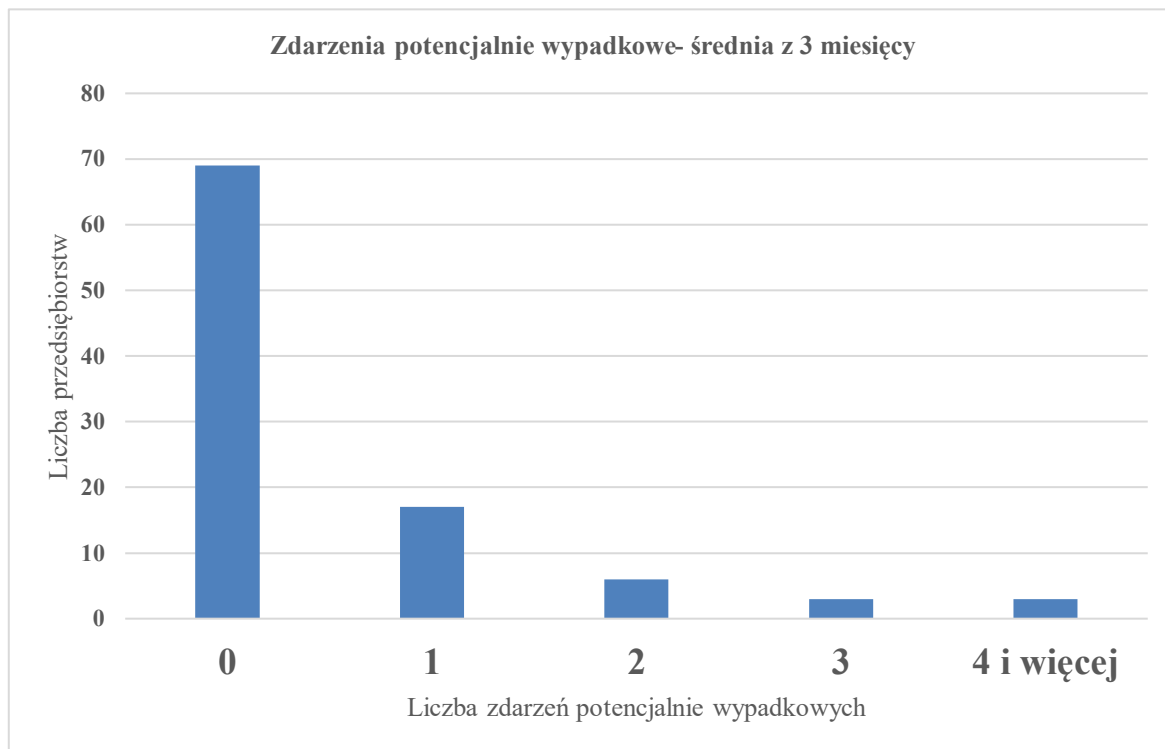


Rys. 51. Stopień automatyzacji w przedsiębiorstwie

Rys.51 przedstawia analizę wyników dotyczącą stopnia automatyzacji wśród respondentów. Respondenci zostali poproszeni o wybór stopnia automatyzacji spośród 5 możliwości, gdzie: (1) Procesy ręczne (manualne); (2) Procesy ręczno-maszynowe (mieszane), gdzie operacje, w których cykl produkcyjny wykonuje maszyna, a operator decyduje o jego uruchomieniu i zatrzymaniu; (3) Procesy ręczno-maszynowe (mieszane), gdzie operacje, w których maszyna automatycznie rozpoczyna i kończy cykl produkcyjny; (4) Procesy zautomatyzowane, gdzie praca operatora sprowadza się do nadzorowania maszyny. Operator bezpośrednio nie bierze udziału w wytworzeniu wyrobu finalnego; (5) Procesy zautomatyzowane, gdzie praca operatora sprowadza się wyłącznie do nadzorowania. Przepływ materiału pomiędzy gniazdami jest zautomatyzowany. Zdecydowana większość badanych przedsiębiorstw (77%) wskazała, stopień automatyzacji na poziomie 2, 9% badanych określiło stopień automatyzacji na poziomie 1, natomiast 7% wskazało stopień automatyzacji na poziomie 3 i 4. Żadne z badanych przedsiębiorstw nie wskazało stopnia automatyzacji na poziomie 5.

Wraz z erą Przemysłu 4.0 wzrost poziomu automatyzacji staje się wymogiem na konkurencyjnym i dynamicznie zmieniającym się rynku. Nowe technologie, w tym technologie oparte na druku 3D, są uznawane za technologie przyszłości, których zastosowanie zwiększa bezpieczeństwo pracy, efektywność czasu pracy i wykorzystania zasobów oraz pozwala na zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych w wyniki wytwarzania produktów. Jednakże wiele

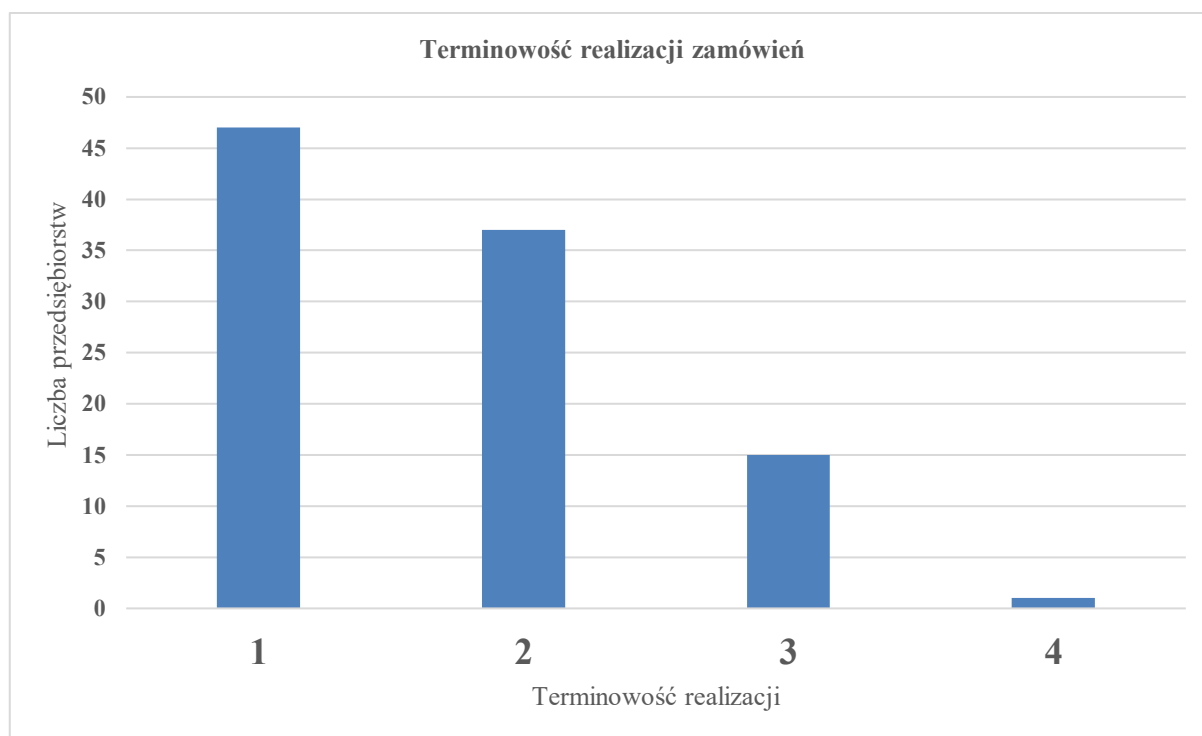
branż wciąż opiera swoje działania na procesach manualnych, w których automatyzacja procesów jest niemożliwa czy też zwyczajnie nieopłacalna pod względem ekonomicznym.



Rys. 52. Zarejestrowane zdarzenia potencjalnie wypadkowe- średnia z 3 miesięcy

Rys.52 przedstawia dane w zakresie zarejestrowanych zdarzeń potencjalnie wypadkowych w badanych przedsiębiorstwach. Respondentów poproszono o wpisanie średnich danych z 3 miesięcy. Otrzymane wyniki wskazują pozytywny trend, bowiem 69% wskazało brak zarejestrowanych zdarzeń potencjalnie wypadkowych w ostatnich 3 miesiącach.

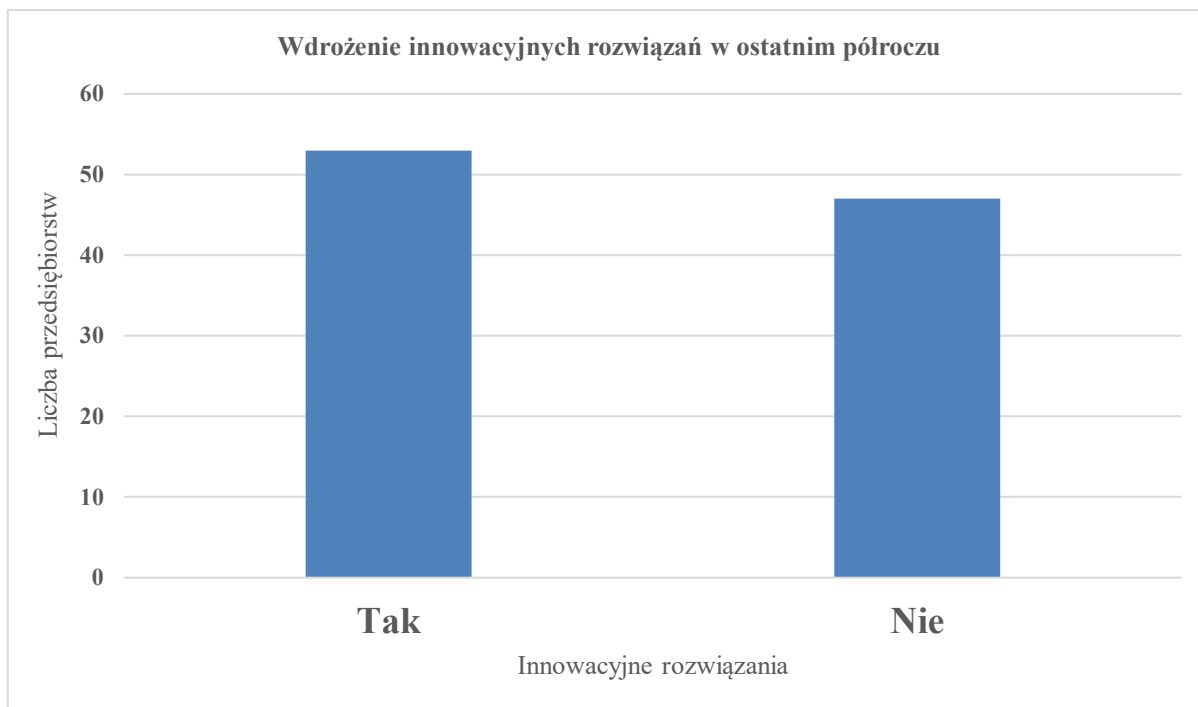
Wiele firm bagatelizuje rejestrowanie zdarzeń potencjalnie wypadkowych, mimo, że liczba wypadków przy pracy jest proporcjonalna do liczby zaistniałych zdarzeń potencjalnie wypadkowych, a straty nimi spowodowane często znacznie przekraczają straty z tytułu wypadków (Zieliński, 2016). Z punktu widzenia bezpieczeństwa pracowników profilaktyka zapobiegania wypadkom przy pracy będzie tym skuteczniejsza, im więcej zdarzeń potencjalnie wypadkowych będzie zarejestrowanych, przeanalizowanych i podsumowanych wyciągnięciem odpowiednich wniosków.



Rys. 53. Terminowość realizacji zamówień wśród badanych przedsiębiorstw

Na Rys.53 przedstawiono w formie graficznej wyniki otrzymane w zakresie terminowości realizacji zamówień w badanym przedsiębiorstwie. Przyjęto cztery zakresy odpowiedzi, gdzie terminowość zamówień oznaczono następująco: (1) 96-100%, (2) 86-95%, (3) 75-85%, (4) poniżej 75%. Otrzymane wyniki wskazują, że zaledwie 47% badanych przedsiębiorstw realizuje zamówienia w wyznaczonych terminach, 37% wskazuje, że nie jest w stanie realizować wszystkich zamówień w wyznaczonych terminach, 15% przedsiębiorstw nie realizuje dużej części zamówień w terminach, a 1% przedsiębiorstw wskazało, że w terminie realizuje zaledwie poniżej $\frac{3}{4}$ łącznych zamówień.

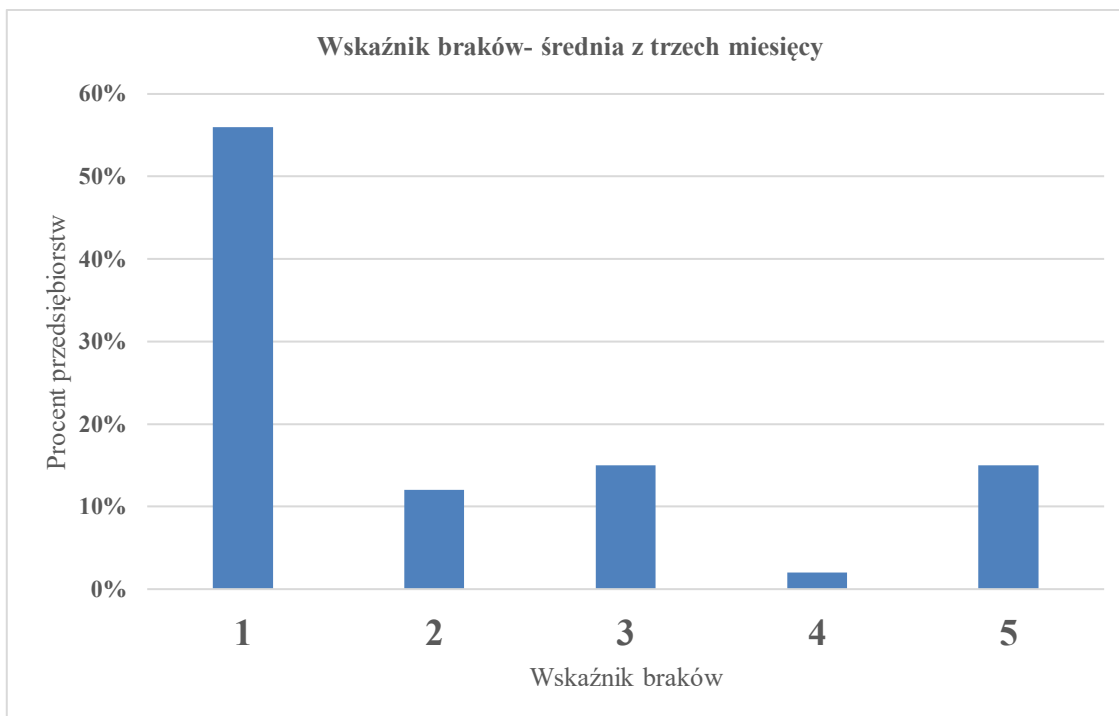
W kontekście zrównoważonego rozwoju koniecznością wydaje się komplementarne podejście w zakresie procesów logistycznych przedsiębiorstwa, zwłaszcza w zakresie *realizacji zamówień* oraz optymalizacji łańcucha dostaw. Jest to także istotny czynnik w obszarze ekonomicznym, gdyż odpowiada za zapewnienie płynności finansowej przedsiębiorstwa. Szczególnie w czasach pandemii wirusem SarS-Covid2, gdy dostawy komponentów i materiałów są znacznie wydłużone, a ich ceny niestabilne.



Rys. 54. Wdrożenie innowacyjnych rozwiązań w ostatnim półroczu

Rys.54 przedstawia w formie graficznej poziom wdrożenia innowacyjnych rozwiązań na przestrzeni ostatniego półrocza wśród badanych firm. 53% respondentów wskazała, że wdrożyła w tym czasie w swoich zakładach innowacyjne rozwiązania, natomiast pozostałe 47% zadeklarowało, że takich rozwiązań nie wdrożyło.

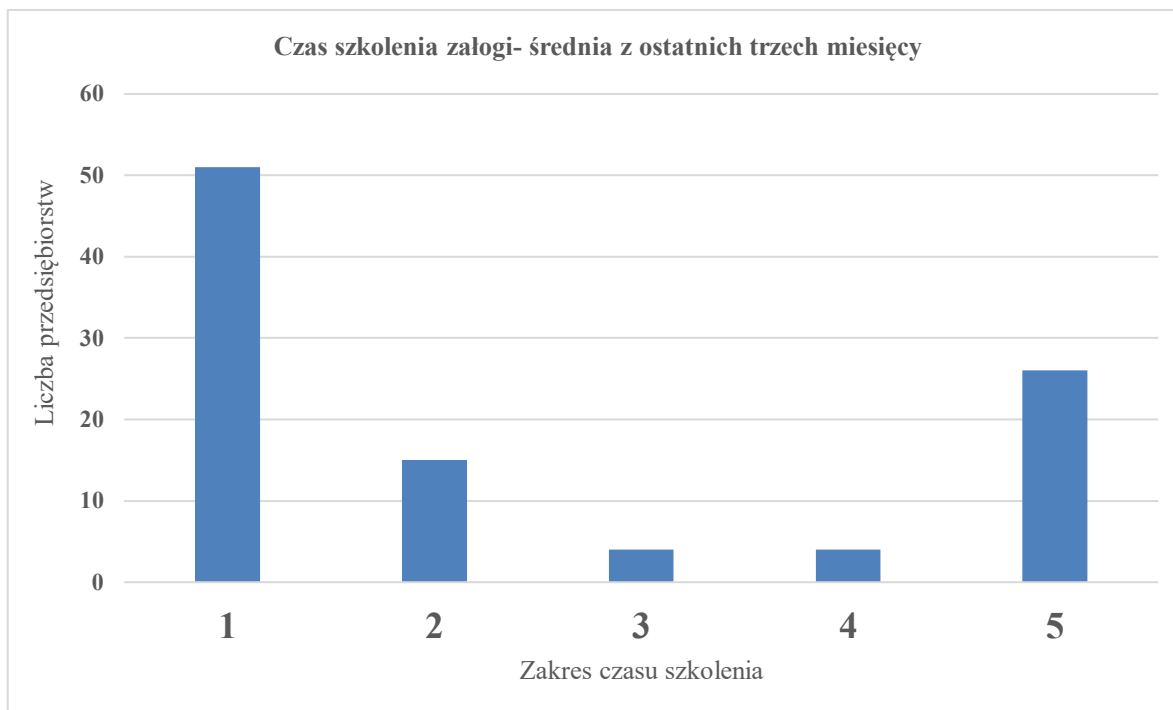
Wspieranie innowacyjności stanowi element 9 celu Zrównoważonego Rozwoju sformułowanego w ramach Agendy 2030 (ONZ, Agenda 2030). Co ważne, wskazuje się, że w początkowych fazach industrializacji najważniejszym czynnikiem tworzącym gospodarkę są małe i średniej wielkości przedsiębiorstwa, szczególnie prowadzące działalność produkcyjną i przetwórczą, bowiem tworzą 90% światowego biznesu, zatrudniając 50-60% siły roboczej (Odpowiedzialny biznes). Innowacyjność to ciągła potrzeba rozwoju i dążenia do optymalizacji pracy, dlatego stanowi ważny filar budowania zrównoważonej przyszłości.



Rys. 55. Wskaźnik braków- średnia z trzech miesięcy

Rys.55 przedstawia wskaźniki braków w badanych przedsiębiorstwach w ostatnich trzech miesiącach. Przyjęto następujące podziały ze względu na wartości wskaźników: 0%- 1; <1%- 2; 1-5%- 3; <5%- 4; trudno powiedzieć- 5. Otrzymane wyniki wskazują, że przeważająca liczba badanych (56%) uzyskuje wskaźnik braków na bardzo dobrym poziomie. Wskaźnik braków na dobrym poziomie (<1%) deklaruje 12% badanych, na średnim poziomie (1-5%) 15% badanych, natomiast na niskim poziomie (<5%) zaledwie 2% badanych. 15% przedsiębiorstw wskazało odpowiedź 5 (trudno powiedzieć), co może świadczyć o braku analizy wskaźnika braków w zakładzie pracy.

Wskaźnik braków bazuje na produktach, których nie da się naprawić czy też poprawić. Każdy brak zarejestrowany w zakładzie prowadzi, więc do powstania straty materialnej przedsiębiorstwa, gdyż generuje wyłącznie koszty i straty materiałowe. W przypadku braku możliwości wykorzystania ponownie materiałów bądź ich recyklingu każdy brak wpływa także negatywnie na środowisko, gdyż stanowi odpad. Wskaźnik braków należy do grupy wskaźników jakościowych i stanowi jeden z podstawowych jej mierników w procesach wytwarzania.

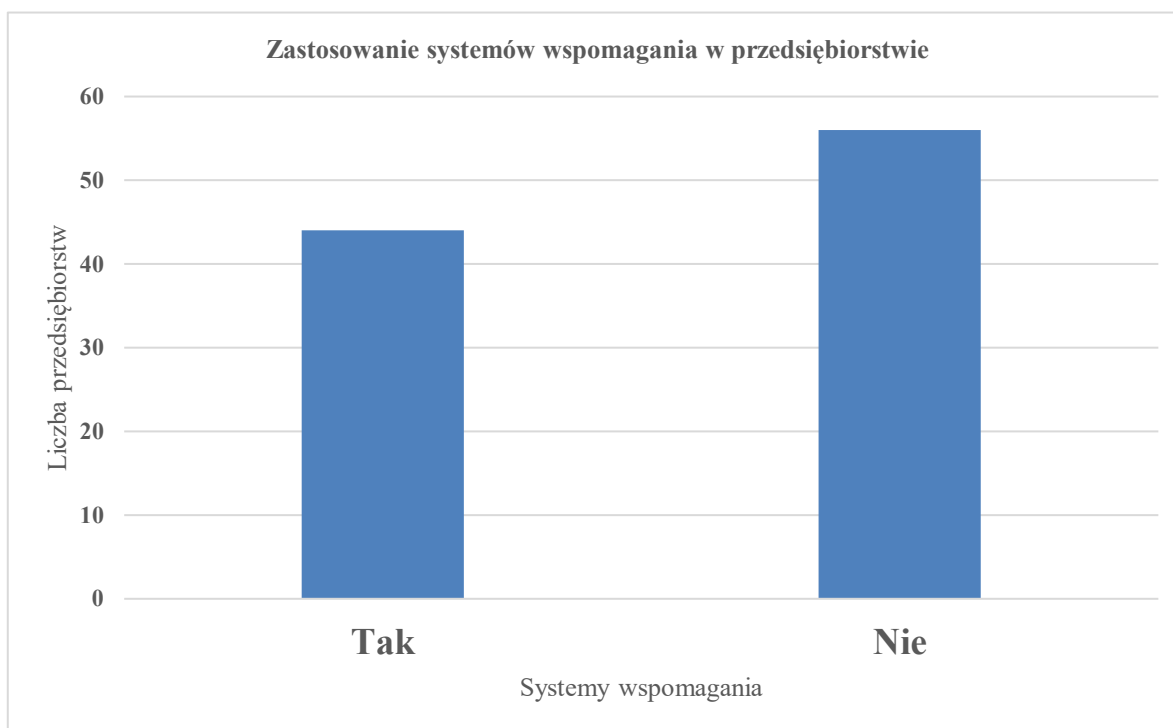


Rys. 56. Czas szkolenia załogi- średnia z ostatnich trzech miesięcy

Rys.56 przedstawia w formie graficznej czas szkoleń załogi w badanych przedsiębiorstwach. Respondenci zostali poproszeni o wskazanie średniego czasu szkoleń pracowników w zakresie podnoszenia kwalifikacji, kompetencji i wiedzy z ostatnich trzech miesięcy. Przyjęto średnią liczbę godzin roboczych w badanych przedsiębiorstwach w ostatnich trzech miesiącach o łącznej sumie 960h. Przyjęto 5 zakresów możliwych odpowiedzi, gdzie: 1- >9,6h (>1%), 2- 9,7-48h (1-5%), 3- 49-96h (5-10%), 4- >97h (>10%), 5- trudno powiedzieć. Otrzymane wyniki wskazują, że zdecydowana większość (51%) badanych przedsiębiorstw poświęciła na szkolenia załogi poniżej 1% czasu roboczego. 15% respondentów wskazała, że czas poświęcony szkoleniom waha się pomiędzy 1-5% czasu roboczego przedsiębiorstwa. Natomiast 5-10% czasu roboczego poświęconego na szkolenia zadeklarowało 4% badanych, ten sam procent badanych zadeklarował szkolenia zajmujące powyżej 10% czasu roboczego. 26% respondentów odpowiedziało, że trudno powiedzieć jaki jest średni czas szkoleń załogi w ich przedsiębiorstwie.

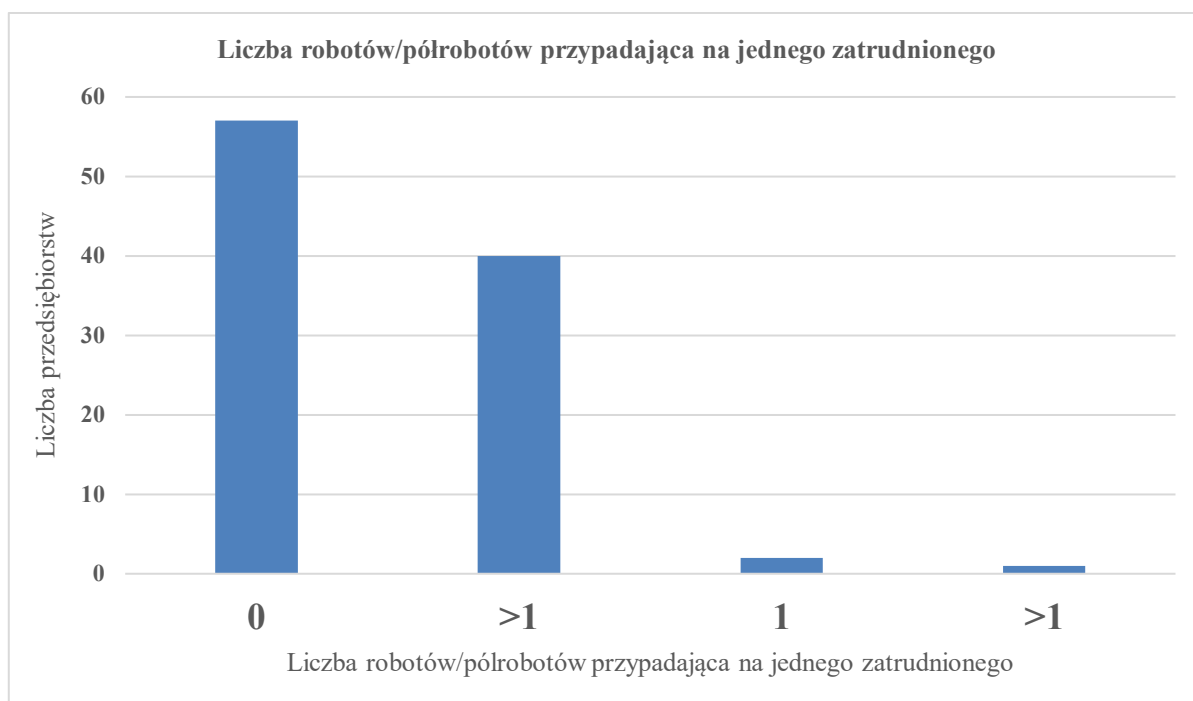
Twierdzi się, że zrównoważony rozwój zaczyna się od pracowników (Ican_ZR). Podstawą założeń zrównoważonego rozwoju jest świadomość społeczeństwa na temat wpływu prowadzonych działań. Wiedza pracowników w zakresie prowadzonych procesów w przedsiębiorstwie oraz związanych z nimi zagrożeń budowana jest na podstawie doświadczenia oraz prowadzonych szkoleń edukacyjnych. Istotnym jest także tworzenie możliwości rozwoju kwalifikacji i kompetencji pracowników w celu zwiększenia

bezpieczeństwa i efektywności wykonywanej przez nich pracy w organizacji. Czas szkolenia załogi wydaje się być istotnym elementem tworzenia zrównoważonego przedsiębiorstwa, a inwestycja w szkolenia uzasadniona.



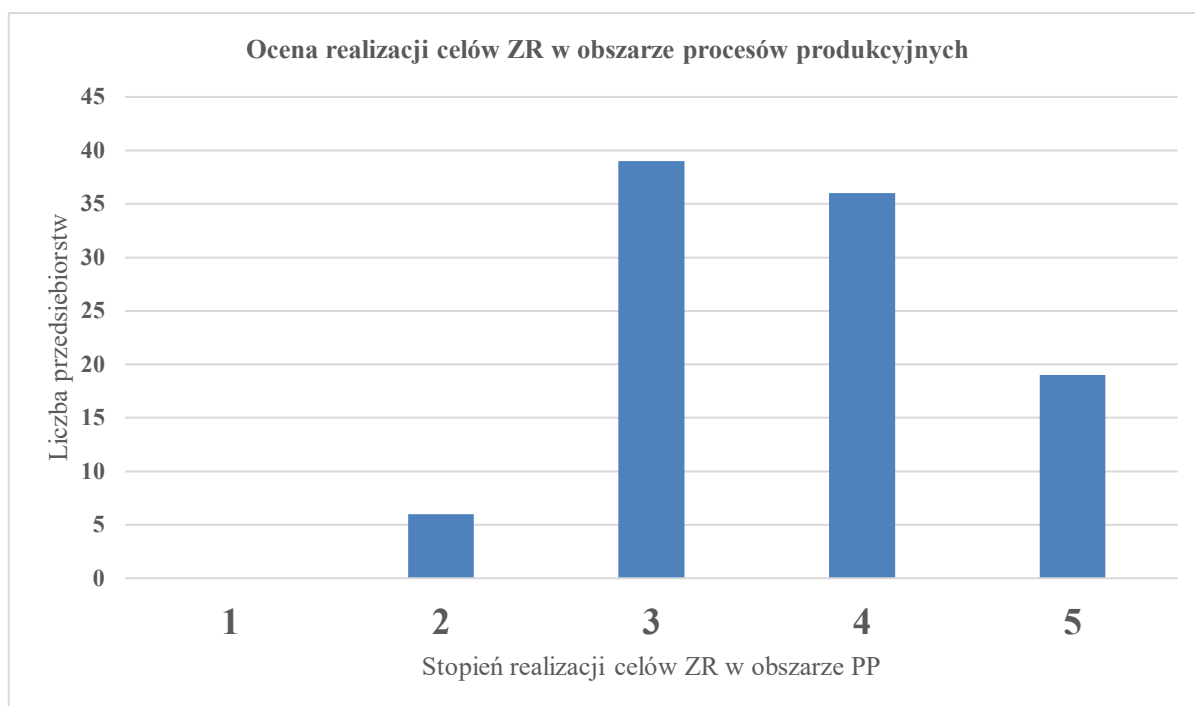
Rys. 57. Zastosowanie systemów wspomagania w przedsiębiorstwie

Rys. 57 przedstawia analizę wyników w zakresie wdrożenia systemów wspomagania w badanych przedsiębiorstwach. Załedwie 44% badanych respondentów wskazało, że systemy zarządzania zostały wdrożone w ich przedsiębiorstwie, natomiast ponad połowa (56%) wskazała, że nie wykorzystują w swoich przedsiębiorstwach systemów wspomagania. Otrzymane wyniki wskazują, że wciąż mniejszość przedsiębiorstw z badanej grupy wspomaga swoje działania poprzez dostępne systemy. Mimo rosnącej cyfryzacji i dostępnych informatycznych systemów wspomagania zarządzania organizacją otrzymane wyniki wskazują, że wciąż mniejszość przedsiębiorstw z badanej grupy wspomaga swoje działania poprzez dostępne systemy. Przykładowo system klasy ERP stanowi narzędzie wspomagania pracy przedsiębiorstw w wielu jego aspektach, m.in. sprzedaży, kontroli i planowaniu produkcji, działu HR, marketingu. System pozwala także na tworzenie harmonogramów produkcji, planowanie serwisów i przebrojeń oraz kontrolę stanów magazynowych, co realnie wpływa na sferę finansową przedsiębiorstw. Informatyczne systemy wspomagania mogą, więc stanowić efektywne narzędzie do akwizycji informacji dla potrzeb wspomagania zarządzania przedsiębiorstwem.



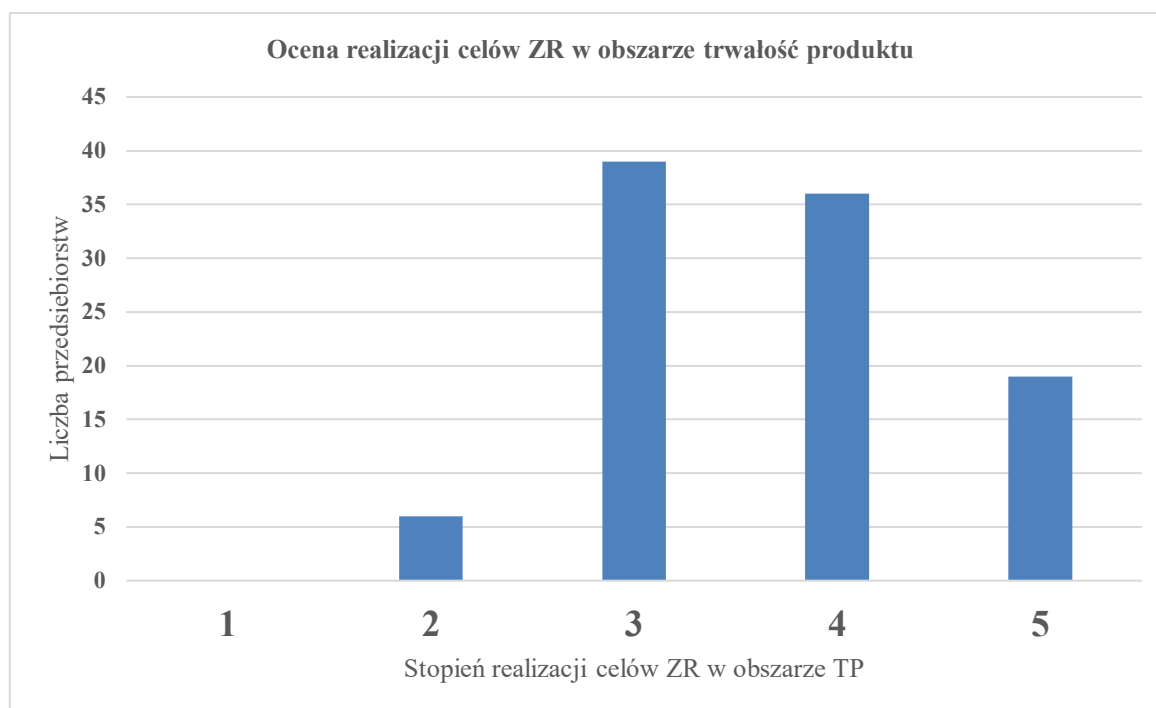
Rys. 58. Liczba robotów/półrobotów przypadająca na jednego zatrudnionego

Na Rys.58 przedstawiono w formie graficznej liczbę przypadających robotów/półrobotów na jednego zatrudnionego wśród badanych przedsiębiorstw. Przeważająca liczba respondentów (57%) wskazała, że w ich zakładzie nie ma robotów/półrobotów. W 40% badanych przedsiębiorstwach na jednego pracownika przypada poniżej jednego robota/półrobot, w 2% na jednego pracownika przypada jeden robot/półrobot, natomiast w 1% przedsiębiorstw na jednego pracownika przypada więcej niż jeden robot/półrobot. Otrzymane dane wskazują tendencję do gęstości robotyzacji w Polskich przedsiębiorstwach. Potwierdza to raport opublikowany przez Międzynarodową Federację Robotyki (z ang. *International Federation of Robotics*) (World Robotics Report, 2020), według którego gęstość robotyzacji w Polsce wzrosła do 52 jednostek na 10 tysięcy pracowników w przemyśle. Pandemia spowolniła wzrost nowych robotów, bowiem w 2020 odnotowano 19% spadek liczby zainstalowanych robotów w porównaniu z rokiem 2019. Największy spadek w tym zakresie odnotowano w branży motoryzacyjnej, natomiast przemysł metalowy i maszynowy odnotował wzrost o 4%. Rok 2020 pokazał przedsiębiorstwom jak korzystne może być projektowanie linii podatnych na modyfikacje, a automatyzacja i wprowadzenie robotów do produkcji może znacząco wspomóc te działania. W raporcie wskazuje się także, że głównym powodem zmian metod produkcji będzie sytuacja na rynku pracy- wzrost kosztów pracy, a przede wszystkim realny brak pracowników.



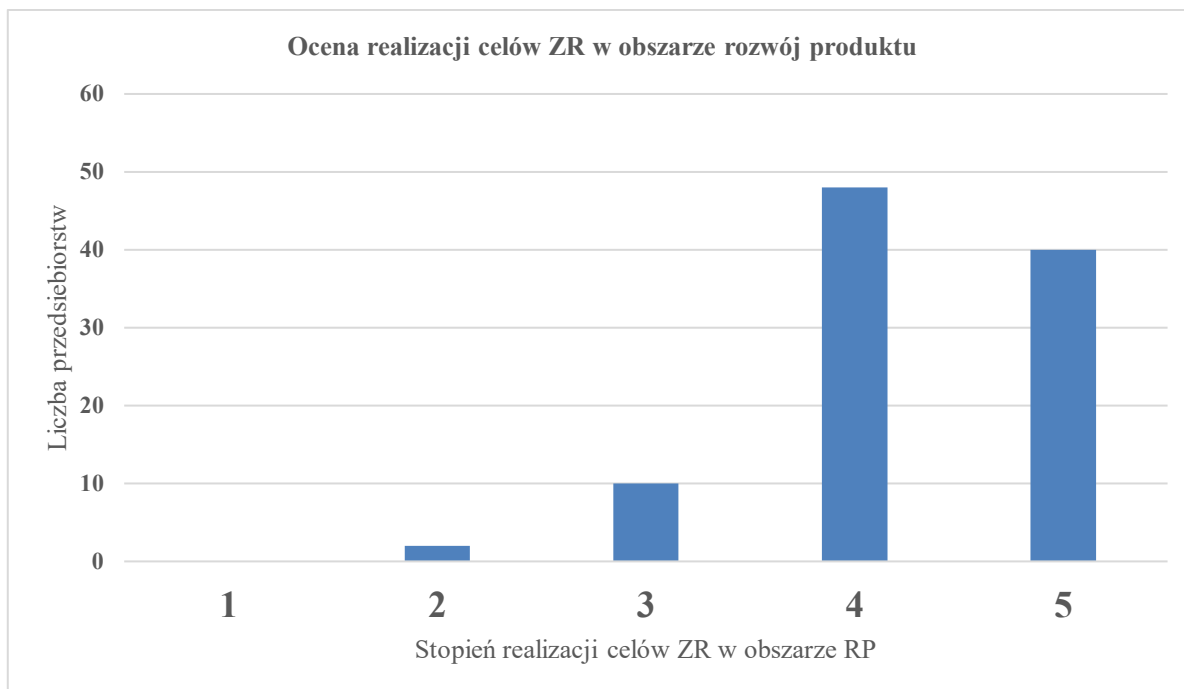
Rys. 59. Ocena realizacji celów ZR w obszarze procesów produkcyjnych

Na Rys.59 przedstawiono wyniki w oceny badanych przedsiębiorstw w realizacji celów ZR w obszarze procesów produkcyjnych. Respondenci zostali poproszeni o wskazanie jednej z pięciu możliwych odpowiedzi, gdzie: 1-bardzo nisko; 2-nisko; 3-średnio; 4-dobrze; 5- bardzo dobrze. 39% badanych przedsiębiorstw oceniło realizację celów ZR w tym obszarze na średnim poziomie (3), 36% wskazało, że dobrze realizują cele (4), natomiast 19% czuje, że realizuje te cele na bardzo dobrym poziomie (5). 6% określiło, że realizacja zadań ZR w tym obszarze jest na niskim poziomie (2). Żadne z badanych przedsiębiorstw nie określiło poziomu realizacji celów ZR w obszarze procesów produkcyjnych jako bardzo niskiego (1). Należy wskazać, że w tym obszarze ZR przedsiębiorstwa koncentrują swoje działania na wytwarzaniu towarów i usług, które wykorzystują procesy o możliwie najmniej szkodliwym działaniu na środowisko, oszczędzając energię elektryczną oraz surowce. Zmiany w tym obszarze wymagają od przedsiębiorstw produkcyjnych, zwłaszcza w branży metalowej, analizy prowadzonych procesów i stosowanych materiałów oraz substancji, identyfikacji procesów energochłonnych i substancji/materiałów niebezpiecznych oraz opracowanie strategii działania w celu ograniczenia szkodliwych skutków działań w zakresie wytwarzania produktów.



Rys. 60. Ocena realizacji celów ZR w obszarze trwałość produktu

Na Rys.60 przedstawiono wyniki badanych przedsiębiorstw w zakresie oceny realizacji celów ZR w obszarze trwałość produktu. Podobnie jak w przypadku oceny realizacji celów ZR w obszarze procesów produkcyjnych przyjęto pięciostopniową skalę. Przeważająca liczba respondentów (60%) ocenia realizację celów ZR w tym obszarze na bardzo dobrym poziomie (5), a 32% na dobrym poziomie (4). Zaledwie 8% badanych deklaruje średni poziom (3) realizacji celów w obszarze trwałości produktu, a żadne z przedsiębiorstw nie wskazuje na poziom niski (2) bądź bardzo niski (1). Obszar trwałości produktu jest ściśle powiązany z jakością produktów, ich awaryjnością oraz możliwością ich naprawy/serwisu. Jednakże ostatnie lata charakteryzują się skróconym cyklem życia produktu, zarówno ze względów jakościowych jak i zmieniających się potrzeb konsumentów. Na rynku obserwuje się od wielu lat zjawisko obniżania jakości oferowanych dóbr oraz pogłębiający się konsumpcjonizm. Takie działania są przeciwieństwem koncepcji ZR, gdyż mogą skutkować m.in. wzrostem zużycia zasobów naturalnych, narastającym problemem z utylizacją produktów zużytych oraz opakowań czy też przyspieszonym tempem wyczerpywania nieodnawialnych zasobów.



Rys. 61. Ocena realizacji celów ZR w obszarze rozwój produktu

Rys.61 przedstawia wyniki oceny badanych przedsiębiorstw w zakresie realizacji celów ZR w obszarze rozwój produktu. Podobnie jak w przypadku oceny obszaru procesy produkcyjne i trwałość produktu zastosowano skalę pięciostopniową. 48% przedsiębiorstw ocenia realizację celów ZR w tym zakresie na dobrym poziomie (4), 40% na bardzo dobrym poziomie (5), 10% respondentów ocenia poziom realizacji w stopniu średnim (3), a zaledwie 2% wskazuje, że poziom realizacji w ich przedsiębiorstwie jest niski (2). Obszar rozwój produktów jest ściśle powiązany z innowacjami i modernizacjami wdrażanymi w przedsiębiorstwie, budowaniem relacji z pracownikami i klientami w zakresie zaspakajania ich potrzeb i oczekiwań, przedsięwzięć w zakresie ochrony klimatu. Analiza wyników otrzymanych za pomocą formularza ankiety stanowiły podstawę do zastosowania drzew decyzyjnych w ocenie poziomu ZR.