

Na prawach rękopisu

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechniki Wrocławskiej

**METODYKA OCENY RYZYKA
ZAWODOWEGO PRAC PROWADZONYCH
Z WYKORZYSTANIEM RUSZTOWAŃ
BUDOWLANYCH**

Raport serii PRE nr 9/2022

Praca doktorska

Mgr inż. Tomasz Nowobilski

Słowa kluczowe:

budownictwo,
rusztowanie,
bezpieczeństwo pracy,
ocena ryzyka zawodowego,
wypadkowość

Promotor: Prof. dr hab. inż. Bożena Hoła

Wrocław, czerwiec 2022 r.

Autor:

mgr inż. Tomasz Nowobilski

.....

Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Katedra Inżynierii Materiałów i Procesów Budowlanych
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
tel. 71 320 23 45, tel./fax. 71 320 36 45, tel. 604 506 432
e-mail: tomasz.nowobilski@pwr.edu.pl

Raport został złożony w Redakcji Wydawnictw Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej w czerwcu 2022 r.

Lista odbiorców:

Recenzenci	2 egz.
Promotor	1 egz.
Autor	1 egz.
CWiINT PWr	1 egz.
Archiwum W-2	1 egz.

Razem 6 egz.

*Składam najserdeczniejsze podziękowania
Pani Profesor dr hab. inż. Bożenie Hole
za opiekę merytoryczną, cenne uwagi i wskazówki
udzielone w trakcie pisania pracy doktorskiej.*

*Dziękuję również wszystkim osobom,
które chętnie dzieliły się cennymi uwagami
i przyczyniły się do podniesienia jakości pracy.*

*Niniejszą pracę doktorską dedykuję moim rodzicom:
Jolancie i Bronisławowi Nowobilskim*

*W pracy doktorskiej wykorzystano wyniki badań uzyskane w ramach realizacji projektu
badawczego nr 244388 „Model oceny ryzyka wystąpienia katastrof budowlanych, wypadków
i zdarzeń niebezpiecznych na stanowiskach pracy z wykorzystaniem rusztowań budowlanych”
finansowanego przez NCBiR w ramach Programu Badań Stosowanych na podstawie umowy
nr PBS3/A2/19/2015.*

Spis treści

Wykaz oznaczeń stosowanych w pracy.....	9
Indeksy.....	10
Wykaz najważniejszych definicji stosowanych w pracy.....	11
1. Wstęp.....	15
1.1. Przedmiot pracy	15
1.2. Cel pracy	16
1.3. Przegląd treści pracy.....	17
2. Przegląd literatury przedmiotu.....	19
2.1. Wypadkowość w budownictwie	20
2.1.1. Przyczyny wypadków przy pracy	21
2.1.2. Modele stosowane w analizach wypadkowości.....	24
2.1.3. Źródła informacji o wypadkach przy pracy.....	26
2.2. Zarządzanie ryzykiem.....	27
2.2.1. Definicja, rodzaje i źródła ryzyka	27
2.2.2. Struktura procesu zarządzania ryzykiem.....	33
2.2.3. Ocena ryzyka zawodowego	37
2.2.4. Ewaluacja ryzyka zawodowego	54
2.2.5. Wybrane metody oceny ryzyka zawodowego	55
2.3. Specyfika prac na rusztowaniach budowlanych	65
2.3.1. Rodzaje i budowa rusztowań	66
2.3.2. Uwarunkowania formalno-prawne użytkowania rusztowań	68
2.4. Podsumowanie	69
3. Metodyka i zakres badań własnych.....	71
3.1. Etap I – Analiza zagrożenia dla bezpieczeństwa pracy na rusztowaniach budowlanych	74
3.2. Etap II – Pozyskanie danych badawczych.....	74

3.3.	Etap III – Oszacowanie populacji rusztowań budowlanych.....	75
3.4.	Etap IV – Analiza przyczyn wypadków na rusztowaniach budowlanych.....	76
3.5.	Etap V – Oszacowanie parametrów ryzyka zawodowego.....	76
3.6.	Etap VI – Badania na modelach i analiza wyników.....	77
3.7.	Etap VII – Wnioski i kierunki dalszych badań	77
4.	Analiza zagrożeń dla bezpieczeństwa pracy na rusztowaniach budowlanych	79
4.1.	Źródła zagrożeń dla bezpieczeństwa pracy	79
4.1.1.	Zagrożenia techniczne	79
4.1.2.	Zagrożenia organizacyjne.....	82
4.1.3.	Zagrożenia ludzkie	83
4.2.	Wybrane wypadki z udziałem rusztowań	84
5.	Pozyskiwanie danych badawczych	85
5.1.	Państwowa Inspekcja Pracy (PIP).....	85
5.2.	Główny Urząd Statystyczny (GUS)	87
5.3.	Badania empiryczne	89
6.	Oszacowanie populacji rusztowań budowlanych.....	95
6.1.	Empiryczne określenie liczby użytkowanych rusztowań.....	95
6.2.	Wskaźniki gospodarcze wpływające na liczbę rusztowań budowlanych.....	97
6.3.	Klasyfikacja gmin pod kątem rozwoju społeczno-gospodarczego	99
6.4.	Modele predykcji liczby eksploatowanych rusztowań budowlanych	105
6.4.1.	Model liniowy dla grupy <i>Gr 1</i>	107
6.4.2.	Model liniowy dla grupy <i>Gr 2</i>	109
6.4.3.	Model liniowy dla grupy <i>Gr 3</i>	110
6.4.4.	Model liniowy dla grupy <i>Gr 4</i>	111
6.5.	Weryfikacja opracowanych modeli – model zespołu sieci neuronowych.....	112
6.6.	Oszacowanie liczby rusztowań budowlanych i analiza wyników	121
7.	Analiza przyczyn wypadków na rusztowaniach budowlanych.....	123

7.1.	Identyfikacja istotnych przyczyn wypadków.....	123
7.1.1.	Przyczyny techniczne	126
7.1.2.	Przyczyny organizacyjne	128
7.1.3.	Przyczyny ludzkie	130
8.	Oszacowanie parametrów ryzyka zawodowego	135
8.1.	Parametr „prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku”	135
8.2.	Parametr „potencjalny skutek wypadku”	140
8.3.	Matryca ryzyka.....	149
8.4.	waluacja ryzyka.....	150
9.	Badania na modelach i analiza wyników.....	153
9.1.	Ocena ryzyka zawodowego na rzeczywistym rusztowaniu budowlanym.....	153
9.1.1.	Określenie wartości parametru „prawdopodobieństw wystąpienia wypadku”.154	
9.1.2.	Określenie wartości parametru „potencjalny skutek wypadku”	155
9.1.3.	Określenie poziomu ryzyka zawodowego i ewaluacja ryzyka	158
10.	Wnioski i kierunki dalszych badań	159
10.1.	Wnioski.....	159
10.2.	Kierunki dalszych badań.....	162
11.	Podsumowanie	163
12.	Załączniki.....	165
	Literatura.....	167
	Streszczenie.....	183
	Summary	185

Wykaz oznaczeń stosowanych w pracy

- A – zbiór wypadków przy pracy związanych z rusztowaniami budowlanymi
- A' – zbiór osób poszkodowanych w wypadkach przy pracy ($A' \subset A$) – tzw. zdarzenia wypadkowe
- Ar' – grupa zdarzeń wypadkowych
- C – zbiór przyczyn wypadku przy pracy
- C_{eu} – grupa rodzajowa przyczyn wypadku przy pracy – według klasyfikacji EUROSTATU
- C_I – niewłaściwy stan czynnika materialnego
- C_{II} – niewłaściwa ogólna organizacja pracy
- C_{III} – niewłaściwa organizacja stanowiska pracy
- C_{IV} – brak odpowiednich czynników materialnych lub niewłaściwe posługiwanie się tymi czynnikami
- C_V – nieużywanie sprzętu ochronnego przez pracownika
- C_{VI} – niewłaściwe samowolne zachowanie się pracownika
- C_{VII} – stan psychofizyczny pracownika niezapewniający bezpiecznego wykonania pracy
- C_{VIII} – nieprawidłowe zachowanie się pracownika
- c – szczegółowa przyczyna wypadku przy pracy
- E_f – skutek wypadku przy pracy
- G – zbiór gmin
- Gr – grupa gmin
- I_n – wskaźnik gospodarczy
- K – teoretyczna kombinacja istotnych przyczyn wypadku przy pracy
- L – ludzka przyczyna wypadku (znaczenie ogólne)
- L_R – liczba rusztowań budowlanych przypadająca na powierzchnię zabudowaną

- l_R – liczba rusztowań budowlanych przypadająca na reprezentatywny obszar podczas badań empirycznych
- O – organizacyjna przyczyna wypadku (znaczenie ogólne)
- O_g – obszar danej gminy, na którym występują zabudowanie [km^2]
- o_g – obszar zliczania w danej gminie, na którym wykonano zliczanie rusztowań budowlanych [km^2]
- P_G – zbiór parametrów opisujących analizowany zbiór gmin G
- P_n – wartość wskaźnika gospodarczego I_n
- p – zmienna instrumentalna
- q – miernik Grabińskiego
- R – współczynnik korelacji Pearsona
- s – funkcja agregacji
- T – techniczna przyczyna wypadku (znaczenie ogólne)
- wa – współczynnik sieci neuronowej (tzw. „waga”)
- x – informacja przekazywana pomiędzy elementami sieci neuronowej
- y – funkcja aktywacji

Indeksy

- d – odległości pomiędzy kolejnymi wiązaniami obiektów w analizie skupień
- e – numer elementu (neuronu) w strukturze sieci neuronowej, z którego sygnał (informacja x) jest pobierany
- eu – numer grupy rodzajowej przyczyn – według klasyfikacji EUROSTATU
- g – gmina
- h – numer elementu (neuronu) w strukturze sieci neuronowej, do którego sygnał (informacja x) jest przekazywana

- f – charakter skutków wypadku przy pracy ($f = 1$ – wypadek lekki, $f = 2$ – wypadek ciężki, $f = 3$ – wypadek śmiertelny),
- k – liczba skupień obiektów w analizie skupień
- kw – kwartał roku
- m – miesiąc
- n – rodzaj wskaźnika gospodarczego
- r – rok
- w – województwo
- β – parametry modelu / współczynniki regresji
- γ – numer szczegółowej przyczyny technicznej
- δ – numer szczegółowej przyczyny organizacyjnej
- ε – składnik losowy
- σ – odchylenie standardowe
- τ – numer szczegółowej przyczyny ludzkiej

Wykaz najważniejszych definicji stosowanych w pracy

- | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| czynnik wypadkowy | – w analizach dotyczących stanu bezpieczeństwa pracy przez czynnik wypadkowy, należy rozumieć wszelkiego rodzaju działania materialne oraz niematerialne, które w sposób bezpośredni lub pośredni wywierają wpływ na zjawisko wypadkowości |
| ocena ryzyka | – całościowy proces identyfikacji, analizy i ewaluacji ryzyka |
| parametr „potencjalny skutek wypadku” | – jeden z parametrów zaproponowanej w dysertacji metodyki oceny ryzyka zawodowego, pozwalający na określenie potencjalnych skutków wypadku na |

	rusztowaniu budowlanym, na podstawie zidentyfikowanych przyczyn
parametr „prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku”	– jeden z parametrów zaproponowanej w dysertacji metodyki oceny ryzyka zawodowego, pozwalający na określenie prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku na rusztowaniu budowlanym, na podstawie lokalizacji i okresu użytkowania rusztowania
przyczyna wypadku	– czynnik lub zespół warunków wywołujący wypadek przy pracy jako swój skutek
rusztowanie budowlane	– tymczasowa konstrukcja budowlana, służąca do wykonywania prac na wysokości, umożliwiająca utrzymanie osób, materiałów i sprzętu
ryzyko zawodowe	– kombinacja prawdopodobieństwa wystąpienia niepożądanych zdarzeń związanych z wykonywaną pracą, powodujących straty materialne i niematerialne oraz konsekwencji zdarzenia
skutek wypadku	– następstwo wypadku przy pracy: śmierć osoby poszkodowanej, ciężkie uszkodzenia ciała lub lekkie uszkodzenia ciała
wypadek ciężki	– wypadek w wyniku którego nastąpiło ciężkie uszkodzenie ciała, takie jak (m.in.): utrata wzroku, słuchu, mowy lub inne uszkodzenie ciała albo rozstrój zdrowia, naruszające podstawowe funkcje organizmu
wypadek lekki	– wypadek, którego następstwem nie jest śmierć osoby poszkodowanej, ani ciężkie uszkodzenia ciała
wypadek przy pracy	– nagle zdarzenie wywołane przyczyną zewnętrzną powodujące uraz lub śmierć osoby poszkodowanej, które nastąpiło w związku z pracą, tj.: podczas lub w związku z wykonywaniem przez pracownika zwykłych czynności lub poleceń przełożonych; podczas lub w związku z wykonywaniem przez pracownika czynności na rzecz pracodawcy, nawet bez polecenia; w czasie pozostawiania pracownika

w dyspozycji pracodawcy w drodze między siedzibą pracodawcy, a miejscem wykonywania obowiązku wynikającego ze stosunku pracy.

wypadek śmiertelny

– wypadek, w wyniku którego nastąpiła śmierć poszkodowanego w okresie nieprzekraczającym 6 miesięcy od wypadku

wypadek zbiorowy

– wypadek, w wyniku którego poszkodowane zostały co najmniej dwie osoby

1. Wstęp

1.1. Przedmiot pracy

Branża budowlana zaliczana jest do jednej z najbardziej niebezpiecznych gałęzi gospodarki na świecie [1]. Przykładowo, w 2018 roku na terenie całej Unii Europejskiej, na każde 100 000 osób zatrudnionych w branży budowlanej, aż 3319 pracowników uczestniczyło w wypadku o lekkich lub ciężkich konsekwencjach [2] – dane te nie obejmują wypadków śmiertelnych. W Polsce w 2019 roku średnie prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku przy pracy w budownictwie wyniosło 0,53% [3]. Przyjmując powyższe prawdopodobieństwo za stałe i przeliczając je na okres zatrudnienia przeciętnej osoby związanej z branżą budowlaną (statystyczny Polak pracuje 34 lata swojego życia [2]), to prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku w trakcie całej kariery zawodowej wynosi ponad 18%. Oznacza to, że statystycznie prawie co piąta osoba zatrudniona w budownictwie, w trakcie swojej kariery zawodowej ulegnie wypadkowi przy pracy. Należy również podkreślić, że wypadki przy pracy generują znaczne straty zarówno o charakterze materialnym jak i niematerialnym. Koszty ponoszone z tytułu wypadków przy pracy są bardzo trudne do oszacowania. Szacuje się, że tylko około 1/3 spośród tych kosztów jest identyfikowana i szacowana [4]. Pozostała część jest trudna do uchwycenia. Ponadto, w powyższych analizach nie uwzględnia się kosztów społecznych związanych z ludzkimi dramatami oraz stratami moralnymi, które niewątpliwie są konsekwencją każdego wypadku przy pracy na budowie.

Niekorzystna sytuacja w budownictwie spowodowana jest faktem, że na przebieg prac budowlanych wpływa wiele zmieniających się czynników związanych z warunkami realizacji obiektów budowlanych, rodzajem prowadzonych robót, jak również wynikających z tempa rozwoju gospodarczego danego regionu. Ponadto, w porównaniu do innych gałęzi przemysłu, branża budowlana jest w dużo mniejszym stopniu zautomatyzowana, przez co większość prac w dalszym ciągu wykonywana jest bezpośrednio przez człowieka.

Przykładem prac, które w dużym stopniu wykonywane są bezpośrednio przez pracowników budowlanych, są roboty prowadzone na wysokości, m.in. z wykorzystaniem rusztowań budowlanych. Jak pokazują dotychczasowe badania naukowe, znaczna część wypadków w budownictwie związana jest właśnie z pracą na tego typu stanowiskach pracy [5], a średnio co trzeci wypadek śmiertelny na budowie związany jest z pracą na rusztowaniu budowlanym [6].

Uwzględniając powyższe, należy stwierdzić, że wypadkowość w budownictwie jest zjawiskiem bardzo negatywnym i należy podejmować wszelkie możliwe działania zmierzające do jej minimalizacji. Wymaga to stałych i wnikliwych analiz istniejącego stanu bezpieczeństwa oraz naukowego podejścia do rozwiązywania zauważanych problemów w celu osiągnięcia stanu „zero wypadków”.

Przedmiotem badań naukowych przedstawionych w dysertacji jest opracowanie metodyki oceny ryzyka zawodowego prac prowadzonych z wykorzystaniem rusztowań budowlanych. Podjęty temat badań jest bardzo istotnym elementem, wspierającym prowadzenie działań prewencyjnych, mających na celu ograniczenie liczby wypadków w budownictwie, w szczególności w aspekcie prac związanych z rusztowaniami budowlanymi.

Na podstawie przeprowadzonej, wnikliwej analizy literatury przedmiotu nie zidentyfikowano naukowych metod oceny ryzyka zawodowego skoncentrowanych na stanowiskach pracy związanych z użytkowaniem rusztowań budowlanych.

Przeprowadzone i przedstawione w dysertacji badania są wynikiem pracy własnej autora pracy. Ponadto, w opracowaniu częściowo wykorzystano wyniki badań uzyskanych w trakcie realizacji projektu badawczego nr 244388 „*Model oceny ryzyka wystąpienia katastrof budowlanych, wypadków i zdarzeń niebezpiecznych na stanowiskach pracy z wykorzystaniem rusztowań budowlanych*” finansowanego przez NCBiR w ramach Programu Badań Stosowanych na podstawie umowy nr PBS3/A2/19/2015, którego autor dysertacji był współwykonawcą.

1.2. Cel pracy

Celem naukowym pracy jest:

1. Dokonanie krytycznego przeglądu literatury przedmiotu, na podstawie którego możliwe jest przedstawienie aktualnego stanu wiedzy na temat omawianych zjawisk.
2. Pozyskanie i opracowanie bazy danych stanowiącej materiał badawczy.
3. Opracowanie kompleksowej metodyki oceny ryzyka zawodowego prac prowadzonych z wykorzystaniem rusztowań budowlanych uwzględniającej fakt, że prace te prowadzone są w różnych lokalizacjach i w zmieniających się warunkach.
4. Opracowanie metodyki szacowania populacji rusztowań budowlanych stosowanych w wybranych województwach kraju, na podstawie danych statystycznych oraz badań empirycznych polegających na zliczaniu rusztowań w terenie.

5. Szczegółowa analiza ilościowa i jakościowa zdarzeń wypadkowych związanych z użytkowaniem rusztowań budowlanych
6. Oszacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku z udziałem rusztowania budowlanego
7. Opracowanie metodyki szacowania konsekwencji wypadku z udziałem rusztowania budowlanego na podstawie przyczyn technicznych, organizacyjnych i ludzkich.
8. Oszacowanie ciężkości skutków wypadku z udziałem rusztowania budowlanego
9. Ocena ryzyka na podstawie oszacowanych parametrów

Celem aplikacyjnym pracy jest:

1. Opracowanie algorytmu pozwalającego na precyzyjne wyznaczenie parametrów ryzyka, a mianowicie:
 - a. prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku na rusztowaniu budowlanym w konkretnej lokalizacji i czasie;
 - b. potencjalnych skutków wypadku.
2. Opracowanie macierzy ryzyka pozwalającej na wyznaczenie jednego z pięciu poziomów ryzyka:
 - a. Poziom I – ryzyko bardzo niskie;
 - b. Poziom II – ryzyko niskie;
 - c. Poziom III – ryzyko umiarkowane
 - d. Poziom IV – ryzyko wysokie;
 - e. Poziom V – ryzyko bardzo wysokie.

1.3. Przegląd treści pracy

Wprowadzenie do dysertacji stanowi spis treści oraz wykaz stosowanych w pracy oznaczeń oraz definicji. Rozprawa podzielona została na 12 rozdziałów.

W pierwszym rozdziale przedstawiono motywację do podjęcia tematu rozprawy, cele naukowe, praktyczne, a także cząstkowe. Dodatkowo, zakończenie rozdziału stanowi syntetyczny przegląd treści pracy.

Rozdział drugi obejmuje przegląd literatury w zakresie omawianego zagadnienia, w szczególności: wypadkowości w budownictwie, zarządzania ryzykiem zawodowym oraz obszaru użytkowania rusztowań budowlanych. W każdym z powyższych zagadnień

przedstawiono najważniejsze definicje stosowane w danym obszarze, obecny stan wiedzy oraz stosowane w praktyce inżynierskiej rozwiązania.

Rozdział trzeci w usystematyzowany sposób przedstawia metodykę prowadzonych badań, ich zakres, a także przyjęte ograniczenia. Każdy z etapów zaproponowanej metodyki został przedstawiony w powyższym rozdziale w sposób syntetyczny, ze zwróceniem szczególnej uwagi na najważniejsze aspekty.

Rozdziały od czwartego do dziesiątego stanowią szczegółowe rozwinięcie poszczególnych etapów badań. I tak, rozdział czwarty przedstawia analizę podstawowych źródeł zagrożeń dla bezpieczeństwa pracy oraz wybrane wypadki z udziałem rusztowań budowlanych, które wydarzyły się w przeszłości. Rozdział piąty prezentuje i omawia źródła danych z jakich skorzystano w trakcie badań. W szóstym rozdziale zaprezentowano obszerne wyniki badań związanych z szacowaniem populacji rusztowań budowlanych, w tym zaproponowane modele służące do predykcji liczby rusztowań. W siódmym rozdziale przedstawiono wyniki analiz prowadzonych nad przyczynami wypadków na rusztowaniach. Elementem łączącym wyniki badań z poprzednich rozdziałów są parametry ryzyka, które zostały przedstawione i scharakteryzowane w rozdziale ósmym. Rozdział dziewiąty stanowi przedstawienie wyników praktycznej implementacji zaproponowanej metodyki, na rzeczywistym przykładzie, a wyniki i kierunki dalszych badań zostały przedstawione w rozdziale dziesiątym.

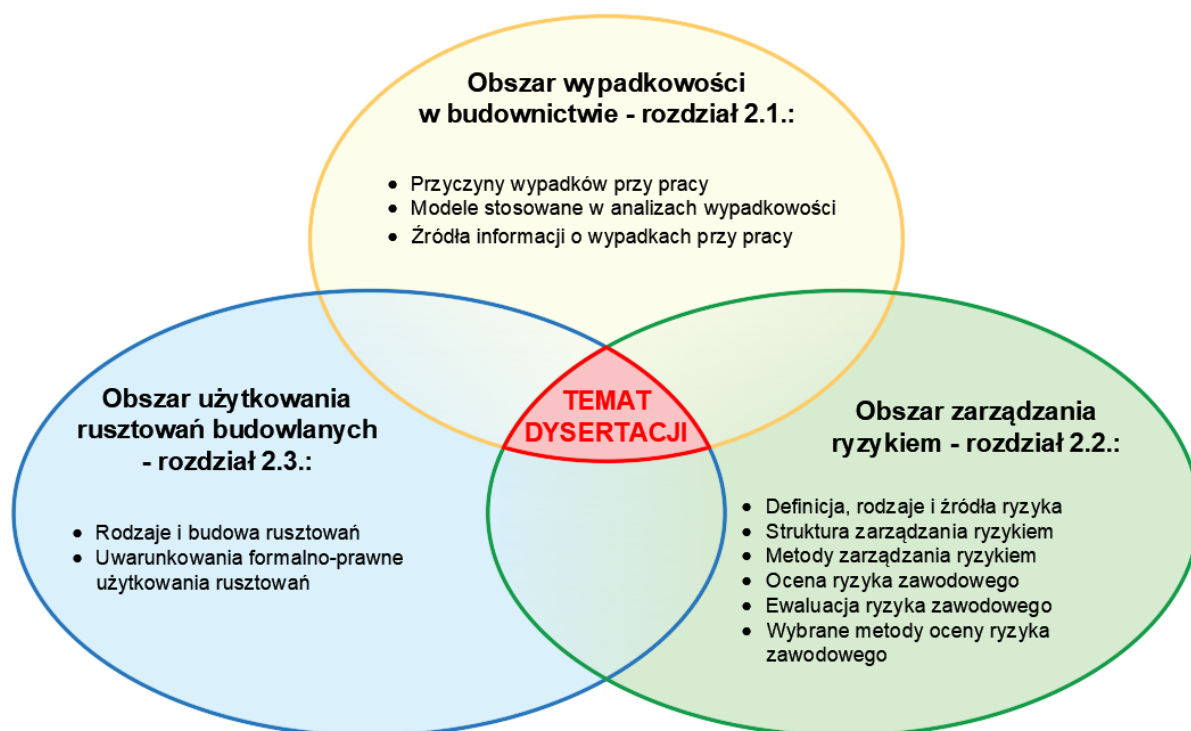
Rozdział jedenasty stanowi syntetyczne podsumowanie całej dysertacji, a w dwunastym rozdziale zestawiono załączniki do pracy.

2. Przegląd literatury przedmiotu

Branża budowlana stanowi zróżnicowany i bardzo złożony obszar działalności człowieka i jest jednym z najważniejszych sektorów dla gospodarki każdego kraju. Należy zaznaczyć, że działalność budowlana obejmuje m.in.: wznoszenie kompletnych obiektów budowlanych oraz prace polegające na: przebudowie, rozbudowie, odbudowie, remoncie, modernizacji, konserwacji i użytkowaniu stałych i tymczasowych obiektów budowlanych [7]. Tak duża różnorodność robót budowlanych, a także wpływ na ich przebieg zmieniających się warunków realizacji, powoduje powstawanie dużej liczby zagrożeń dla bezpieczeństwa pracy [8]. Obszar badań związany z bezpieczeństwem pracy jest bardzo złożony i stanowi przedmiot wielu badań na całym świecie. W celu poznania obecnego stanu wiedzy w obszarach bezpośrednio związanych z tematem dysertacji, dokonano wnikliwego i ukierunkowanego przeglądu literatury przedmiotu, który obejmował w szczególności następujące zagadnienia:

- wypadkowość w budownictwie,
- zarządzanie ryzykiem zawodowym,
- użytkowanie rusztowań budowlanych.

Na rys. 2.1 przedstawiono szczegółowe informacje na temat aspektów poruszanych w poszczególnych rozdziałach.



Rys. 2.1 Aspekty przeglądu literatury przedmiotu (opracowanie własne)

2.1. Wypadkowość w budownictwie

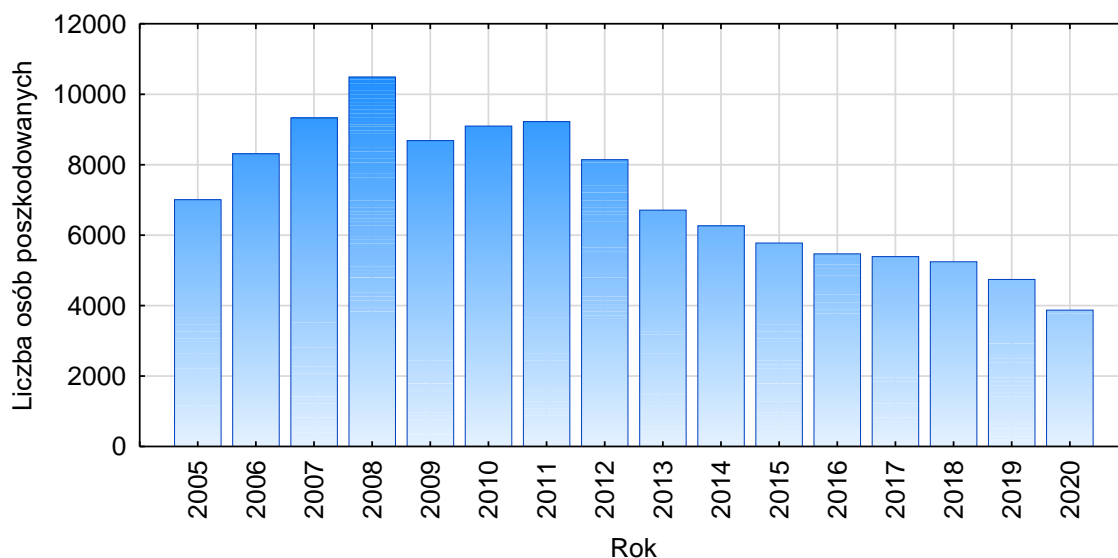
Duża i niekontrolowana liczba zagrożeń dla bezpieczeństwa pracy, która występuje podczas prowadzonych prac budowlanych, może w konsekwencji prowadzić do powstawania wypadków przy pracy lub sytuacji niebezpiecznych (tzw. zdarzeń potencjalnie wypadkowych). Wypadek przy pracy jest zdarzeniem niepożądanym powodującym straty materialne oraz niematerialne [9]. Ustawa z dnia 30 października 2002 r. o ubezpieczeniu społecznym z tytułu wypadków przy pracy i chorób zawodowych [10] definiuje wypadek przy pracy jako: „nagle zdarzenie wywołane przyczyną zewnętrzną powodujące uraz lub śmierć, które nastąpiło w związku z pracą: podczas lub w związku z wykonywaniem przez pracownika zwykłych czynności lub poleceń przełożonych; podczas lub w związku z wykonywaniem przez pracownika czynności na rzecz pracodawcy, nawet bez polecenia; w czasie pozostawania pracownika w dyspozycji pracodawcy w drodze między siedzibą pracodawcy, a miejscem wykonywania obowiązku wynikającego ze stosunku pracy”.

Z kolei zdarzenie potencjalnie wypadkowe, zgodnie z normą PN-N 18001:2004 [11], definiowane jest jako: „niebezpieczne zdarzenie, związane z wykonywaną pracą, podczas którego nie dochodzi do urazów lub pogorszenia stanu zdrowia”.

W analizach związanych z bezpieczeństwem pracy spotykany jest jeszcze termin: wypadkowość. Według słownika języka polskiego wypadkowość oznacza „obliczoną statystycznie liczbę wypadków”. Inną definicję można natomiast znaleźć w pracach [12], [13], według których wypadkowość jest „zjawiskiem ulegania pracowników wypadkom w pracy”.

Wypadki przy pracy i zdarzenia potencjalnie wypadkowe są zjawiskami niepożądanymi, ponieważ generują straty materialne i moralne, a także wpływają negatywnie na rozwój gospodarczy [4]. Zjawisko wypadkowości w branży budowlanej stanowi duży problem. Potwierdzają to m.in. wyniki badań danych statystycznych, wg których budownictwo zaliczane jest do jednej z najbardziej niebezpiecznych gałęzi gospodarki w większości krajów świata [1], [14], [15]. Przykładowo, wskaźnik częstości wypadków śmiertelnych w polskim budownictwie w 2017 roku wyniósł 6,4 osób poszkodowanych na każde 100 tys. osób pracujących, w Austrii 7,5 osób poszkodowanych na każde 100 tys. osób pracujących, natomiast w Portugalii 13,7 osób poszkodowanych na każde 100 tys. osób pracujących [16]. W Polsce, według danych statystycznych opublikowanych przez Główny Urząd Statystyczny [17], tylko w 2020 roku w wypadkach przy pracy w budownictwie poszkodowane zostały 3872 osoby, a 39 osób straciło życie. Wprawdzie w ostatnich latach wskaźniki wypadkowości

wykazują tendencję malejącą, jednak nadal są za wysokie i nie akceptowalne [15], [17], [18] – rys. 2.2. Średnio, każdego dnia na polskich budowach dochodzi do ponad 14 wypadków przy pracy.



Rys. 2.2 Liczba osób poszkodowanych w wypadkach przy pracy w budownictwie, w latach 2005-2020 (opracowanie własne, na podstawie [17])

Powszechnie uważa się, że zjawisko ulegania, przez pracowników, wypadkom przy pracy jest zjawiskiem cechującym się dużą zmiennością, w którym duże znaczenie odgrywa przypadek. Jak pokazują dotychczasowe badania naukowe prowadzone na całym świecie, możliwa jest identyfikacja czynników, które sprzyjają powstawaniu sytuacji niebezpiecznych. Identyfikacja zagrożeń, które mogą wystąpić na placu budowy oraz pośrednich i bezpośrednich przyczyn wypadków jest bardzo ważnym elementem prewencji wypadkowej [19].

2.1.1. Przyczyny wypadków przy pracy

Według definicji zawartej w słowniku języka polskiego [9] poprzez przyczynę rozumie się: „czynnik lub zespół warunków wywołujący jakieś zjawisko jako swój skutek”. W analizach dotyczących stanu bezpieczeństwa pracy przez czynnik wypadkowy, należy rozumieć wszelkiego rodzaju działania materialne oraz niematerialne, które w sposób bezpośredni lub pośredni wywierają wpływ na zjawisko wypadkowości [20].

Identyfikacja przyczyn wypadków możliwa jest poprzez zbieranie informacji na temat czynników wypadkogennych. W Polsce rozpowszechnioną metodą klasyfikacji przyczyn wypadków przy pracy jest metoda TOL [21], która została zapoczątkowana przez Hansena [22],

[23]. Metoda ta zakłada, że każdy wypadek jest wynikiem trzech rodzajów przyczyn, a mianowicie:

- technicznych (T) – związanych m.in. z wadami i uszkodzeniami narzędzi i urządzeń wykorzystywanych podczas prowadzonych prac oraz ich niewłaściwą eksploatacją,
- organizacyjnych (O) – związanych m.in. z niewłaściwą organizacją procesu pracy i stanowisk pracy,
- ludzkich (L) – związanych m.in. z nieprawidłowym zachowaniem się pracownika, stanem psychofizycznym pracownika, itp.

Przyczyn wysokiej wypadkowości w budownictwie upatruje się m.in. w niskiej kulturze bezpieczeństwa pracy [24], czynnikach bezpośrednio związanych z terenem budowy [25], czynnikach związanych z aspektem czasu, w którym nastąpił wypadek [26], organizacji przedsiębiorstwa budowanego i jego wielkości [27], [28], a także wielu innych. Dodatkowo, na podstawie wcześniejszych badań własnych [29], zaobserwowano, że również otoczenie terenu budowy i decyzje, które są w nim podejmowane, mogą wpływać na poziom bezpieczeństwa pracy. Potwierdzają to min. badania [30], w których zwrócono uwagę na wpływ otoczenia społecznego na kulturę bezpieczeństwa pracy w budownictwie.

Identyfikacja i analiza czynników wypadkogennych jest ważnym obszarem badań naukowych, ponieważ stanowi podstawę prawidłowego zaprojektowania i zaplanowania działań szkoleniowych oraz prewencyjnych, co w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia liczby wypadków przy pracy [20], [31]–[36].

Autorzy badań zamieszczonych w pracy [31] podkreślają, że odpowiedzialnymi za wypadki przy pracy są wszyscy uczestnicy projektu, a także warunki środowiska, w którym realizowana jest budowa. W pracach [32], [33], na podstawie obszernego przeglądu literatury przedmiotu, zidentyfikowano znaczną liczbę czynników wypadkowych, które następnie zakwalifikowano do pięciu grup, związanych z: klientem, konsultantem, wykonawcą, pracownikami budowlanymi i trenem budowy. Wśród zidentyfikowanych czynników największe znaczenie miały takie czynniki jak: braki w osobistym wyposażeniu pracowników, wadliwy stan techniczny urządzeń, braki szkoleniowe, niewłaściwe wykorzystanie materiałów budowlanych i urządzeń.

Choudhry i Fang w swojej pracy [34] przedstawili wyniki badań ankietowych, dotyczących identyfikacji czynników wypadkowych, przeprowadzonych bezpośrednio wśród pracowników budowlanych. Zidentyfikowane czynniki zostały przyporządkowane do grup

związanych z: zarządzaniem, procedurami bezpieczeństwa, cechami psychologicznymi pracowników, ekonomią i wydajnością pracy, samooceną, doświadczeniem i postrzeganiem ryzyka przez pracowników, a także środowiskiem pracy oraz szkoleniami i edukacją w zakresie bezpieczeństwa pracy.

Również w pracy [20], do identyfikacji czynników wypadkowych wykorzystano ankietę badawczą. Zidentyfikowane czynniki wypadkowe zostały podzielone na trzy grupy w zależności od stopnia powiązania z wypadkiem. Grupę I stanowiły czynniki związane bezpośrednio z terenem budowy, grupę II stanowiły czynniki generowane w organizacji jaką jest przedsiębiorstwo budowlane, grupę III stanowiły czynniki generowane w otoczeniu dalszym przedsiębiorstwa budowlanego.

W zbiorze prac dotyczących tej tematyki na uwagę zasługuje praca Stępnia [35]. Autor, na podstawie analizy literatury przedmiotu, dokonał szczegółowej klasyfikacji czynników wypadkowych, dzieląc je na cztery główne grupy związane z: warunkami pracy, pracownikami, zarządzaniem i organizacją pracy oraz środowiskiem pracy. Interesujące są także badania [36], w których autorzy zaproponowali metodykę klasyfikacji bezpośrednich przyczyn wypadków przy pracy na rusztowaniach. Wykorzystując analizę Pareto-Lorenza, autorzy badań zidentyfikowali przyczyny mające największy wpływ na powstawanie wypadków.

Jak pokazują dotychczasowe badania, znaczna część wypadków w budownictwie związana jest z pracą na wysokości, w tym na rusztowaniach budowlanych [5], [37]. Praca na tych stanowiskach obarczona jest dużym ryzykiem zawodowym, a ewentualne konsekwencje wypadku najczęściej są bardzo poważne. Potwierdzają to m.in. długookresowe badania przeprowadzone przez Tajwańskich naukowców [6], [38], wg których wypadki z udziałem rusztowań budowlanych stanowią ok. 30% wszystkich wypadków śmiertelnych w budownictwie. Wpływ na taką sytuację ma wiele czynników, m.in.: technicznych, organizacyjnych oraz ludzkich [39], a także warunki klimatyczne [40]–[42] i inne. Dodatkowo, niekorzystna sytuacja związana z pracą na wysokości jest wynikiem dużej liczby zaniedbań ze strony pracodawców i pracowników wykonujących te prace. Jak wynika z kontroli 4779 polskich budów przeprowadzonych przez Państwową Inspekcję Pracy w 2018 roku [43], w 62% przypadków stwierdzono naruszenia przepisów związanych z bezpieczną pracą na wysokości. Naruszenia te obejmowały w szczególności:

- brak lub nieprawidłowe stosowanie na stanowiskach pracy, środków ochrony zbiorowej (26% przypadków),

- niezapewnienie bezpiecznych przejść i dojść do stanowisk pracy (10% przypadków),
- niezabezpieczenie otworów w stropach i ścianach zewnętrznych (26% przypadków),
- niezapewnienie pracownikom środków ochrony indywidualnej.

Dodatkowo, w 47% skontrolowanych budowach, stwierdzono nieprawidłowości związane bezpośrednio z użytkowaniem rusztowań budowlanych. Nieprawidłowości te obejmowały m.in. braki w konstrukcji rusztowań oraz dopuszczenie do użytkowania konstrukcji pomimo braku odpowiedniego odbioru.

Aby ograniczyć liczbę wypadków na rusztowaniach budowlanych konieczne jest właściwe rozpoznanie zjawiska wypadkowości na tego typu konstrukcjach, a zwłaszcza zidentyfikowanie głównych przyczyn sprzyjających powstawaniu wypadków przy pracy oraz opracowanie skutecznych narzędzi umożliwiających kontrolę zagrożenia i zapobieganie powstawaniu wypadkom przy pracy.

2.1.2. Modele stosowane w analizach wypadkowości

Zjawisko wypadkowości jest skomplikowane, złożone i wieloaspektowe. W celu dokładnego zbadania różnych aspektów tego zjawiska opracowywane są modele odzwierciedlające wybrane jego cechy i pozwalające ocenić wpływ tych cech na wypadkowość. Do modelowania zjawiska wypadkowości w budownictwie znalazły zastosowanie między innymi: liniowe modele matematyczne, modele opisowe i graficzne, a także modele informatyczne – np.: sieci neuronowe.

Badania zawarte w pracach [44], [45] obejmowały jakościowe i ilościowe analizy, których efektem było opracowanie matematycznych modeli rozwoju tendencji wypadkowej w polskim budownictwie oraz modeli przyczynowo-skutkowych, odzwierciedlających zależność między liczbą osób poszkodowanych w wypadkach przy pracy, a zidentyfikowanymi przyczynami wypadków. Zaproponowane w badaniach modele wykazały bardzo wysoki stopień odwzorowania liniowego analizowanych zależności.

Wysoką zależność liniową, między czynnikami charakteryzującymi produkcję budowlaną, a liczbą wypadków w budownictwie wykazały również wcześniejsze badania prowadzone przez autorów [20], [29]. Uwzględnione w analizach czynniki związane były m.in. z osiąganą wartością produkcji budowlanej, a także rodzajem inwestycji oraz charakterem prowadzonych prac budowlanych.

W pracy [25], do identyfikacji zagrożeń na terenie budowy wykorzystano modele klasyfikacyjne. Z kolei, badania prowadzone w Korei [46] miały na celu opracowanie modelu opisującego zależności między czynnikami ryzyka, związanymi ze środowiskiem pracy i pracownikami, a konsekwencjami wypadku przy pracy w budownictwie. Przeprowadzona analiza statystyczna umożliwiła sformułowanie wniosków, z których wynika, że dla zmniejszenia zagrożenia w budownictwie kluczowe są role menedżerów i menedżerów ds. bezpieczeństwa. Dzięki właściwie prowadzonym przez nich działaniom prewencyjnym i szkoleniowym, ryzyko oraz konsekwencje wypadków ulegają znacznemu zmniejszeniu.

Badacze z Tajlandii i Malezji [47] zaproponowali wielopoziomowy model interwencji w dziedzinie bezpieczeństwa. Dane, które posłużyły do opracowania modelu uzyskano z ankiet badawczych.

Do rozwiązywania problemów związanych z bezpieczeństwem pracy w budownictwie stosowane są również modele neuronowe. Przykładowo indyjscy naukowcy zaproponowali zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do przewidywania bezpiecznych zachowań pracowników budowlanych [48], [49]. Z kolei, w badaniach amerykańskich [50] autorzy zaproponowali podejście oparte na sieci Bayesowskiej do zdiagnozowania ryzyka upadku z wysokości. W wyniku zaproponowanego podejścia możliwe jest określenie prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku, związanego z różnymi stanami zagrożenia bezpieczeństwa.

Dzięki rozwojowi technologii informatycznych, możliwe staje się wirtualne modelowanie środowiska budowlanego oraz występujących w nim zagrożeń. I tak, w pracy [51] przedstawiono sposób przewidywania i monitorowania zagrożeń oparty na wirtualnym modelu terenu budowy. W badaniach [52] zaproponowano tematykę wykorzystania modelu terenu budowy, opracowanego w środowisku wirtualnym, na potrzeby szkoleniowe i edukacyjne, natomiast w pracy [53] zaproponowano wykorzystanie środowiska wirtualnej rzeczywistości do identyfikacji zagrożeń i określenia zasad przemieszczania się pracowników w tym środowisku, a także oddziaływania środowiska budowlanego na jego otoczenie. Z kolei w badaniach [54], autorzy zaproponowali model umożliwiający śledzenie pracowników budowlanych w czasie rzeczywistym za pomocą systemu Real-Time Locating Systems (RTLS). Opracowane narzędzie może być wykorzystane do kontrolowania narażenia pracowników budowlanych na zmieniające się w czasie zagrożenia.

W celu poprawy bezpieczeństwa pracy, autorzy badań [55], proponują podejście oparte na uczeniu maszynowym (ang. Machine Learning – ML). Zdaniem autorów wszystkie wypadki przebiegają wg odpowiednio zdefiniowanych wzorców co daje możliwość ich przewidywania. Technika ML została wykorzystana do przewidywania wypadków związanych z poślizgnięciem, potknięciem i upadkiem pracownika. Opracowano model umożliwiający predykcję wypadków tego typu, w którym zastosowano algorytm optymalizacji roju cząstek (ang. particle swarm optimization).

Z kolei w pracy [56] zaproponowano metodykę badania zjawiska wypadkowości w budownictwie rozumianego jak ciąg następujących po sobie zdarzeń. Do przeprowadzenia analiz wykorzystano bazę 485 wypadków przy pracy, które wydarzyły się w latach od 2008 do 2016 roku w różnych okolicznościach. Badania przeprowadzone na zbudowanym modelu informatycznym potwierdzają, wyniki badań zamieszczonych w pracy [55], a mianowicie, że w budownictwie najczęściej do wypadków dochodzi w wyniku poślizgnięcia, potknięcia i upadku pracownika.

2.1.3. Źródła informacji o wypadkach przy pracy

Informacje na temat wypadków przy pracy w budownictwie można znaleźć w wielu archiwach, m.in.:

- Państwowej Inspekcji Pracy (PIP),
- Głównego Urzędu Statystycznego (GUS),
- Głównego Urzędu Nadzoru Budowlanego (GUNB),
- Zakładu Ubezpieczeń Społecznych (ZUS),
- Policji,
- Ministerstwa Sprawiedliwości,
- Narodowego Funduszu Zdrowia (NFZ),
- firm ubezpieczeniowych,
- firm budowlanych.

Ze względu na poufny charakter takich danych, w większości przypadków nie są one ogólnodostępne przez co dostęp do nich jest utrudniony lub niemożliwy. Wyjątkiem od tej reguły są zbiorcze dane na temat wypadków publikowane przez GUS i PIP.

Publikacje Głównego Urzędu Statystycznego, obejmujące dane statystyczne na temat wypadków przy pracy, znaleźć można m.in. w corocznych, zbiorczych opracowaniach dla

całego kraju („Wypadki przy pracy” [57]) oraz w corocznych opracowaniach statystycznych dla poszczególnych województw polski (tzw. „Roczniki Statystyczne Województw” [17]). Publikowane dane statystyczne są ogólnodostępne zarówno w wersji drukowanej jak i elektronicznej – m.in. z poziomu bazy danych Banku Danych Lokalnych [3]. W przypadku budownictwa, opracowania te zawierają dane na temat wypadków: śmiertelnych, ciężkich i zbiorowych, a także zgłoszonych wypadków lekkich.

Informacje na temat wypadków, opracowane przez Państwową Inspekcję Pracy, publikowane są w formie rocznych sprawozdań z działalności – np. [3], [58]. Sprawozdania te zawierają jedynie zbiorcze informacje na temat wypadków przy pracy zbadanych przez Inspektorów Pracy w danym roku kalendarzowym. Szczegółowe informacje na temat poszczególnych wypadków zawarte są natomiast w Protokołach Kontroli powypadkowej, które nie są ogólnodostępne. Informacje tam zawarte obejmują m.in. okoliczności i przyczyny wypadku, a także jego konsekwencje i skutki.

2.2. Zarządzanie ryzykiem

2.2.1. Definicja, rodzaje i źródła ryzyka

Termin „ryzyko” wywodzi się od staro włoskiego słowa „risicare” (obecnie „rischiare”), które oznacza „ryzykować” lub „odważyć się” [59]. Obecnie, w zależności od zagadnienia, „ryzyko” może być definiowane na różne sposoby, a także oznaczać negatywne lub neutralne konsekwencje danego zdarzenia. Powszechnie uznaje się, że „ryzyko” utożsamiane w sposób negatywny (tzw. „negatywna koncepcja ryzyka”), oznacza zagrożenie lub niepewność dla powodzenia danego przedsięwzięcia. W przypadku neutralnego postrzegania „ryzyka” (tzw. „neutralna koncepcja ryzyka”), rozumie się je zarówno jako zagrożenie, ale również jako możliwość odniesienia sukcesu i szanse, które mogą się do tego przyczynić [60].

Według Encyklopedii Zarządzania [61], naukowa definicja terminu „ryzyko” zmieniała się na przestrzeni lat co zgodne jest m.in. z ewoluowaniem rozróżniania określeń ryzyka i niepewności z nim związanej. Obecnie uważa się [62], że główna różnica pomiędzy ryzykiem, a niepewnością polega na tym, że w przypadku ryzyka znane są informacje na temat możliwych następstw jego wystąpienia (znana jest wartości oczekiwana), natomiast w przypadku wystąpienia niepewności jego następstwa są nieznane (wartość oczekiwana jest nieznana).

Obecnie, wybrane źródła literaturowe definiują pojęcie „ryzyka” w następujący sposób:

- Norma PN-ISO 31000:2012: Zarządzanie ryzykiem. Zasady i wytyczne [63] definiuje ryzyko jako: „wpływ niepewności na cele”. Wpływ ten może powodować zarówno pozytywne jak i negatywne odchylenie od oczekiwań i dotyczyć różnych aspektów (m.in. finansowych, zdrowia i bezpieczeństwa, środowiska). Dodatkowo wg powyższej normy [63], „ryzyko” jest wyrażane jako kombinacja prawdopodobieństwo wystąpienia danego zdarzenia i jego ewentualne następstwa.
- Norma PKN-ISO Guide 73:2012 Zarządzanie ryzykiem – Terminologia [64] definiuje ryzyko jako: „określenie w odniesieniu do potencjalnych zdarzeń i następstw lub ich kombinacji”.
- Słownik języka polskiego [9] definiuje ryzyko m.in. jako: „możliwość, że coś się nie uda” lub „przedsięwzięcie, którego wynik jest niepewny”.

W praktycznych rozważaniach, „ryzyko” najczęściej określane jest jako kombinacja prawdopodobieństwa wystąpienia danego zdarzenia oraz jego konsekwencji, np. w formie iloczynu [65], [66]. W ujęciu matematycznym ryzyko (R) można więc przedstawić jako funkcję (f) zmiennych, za pomocą poniższego wzoru [65]:

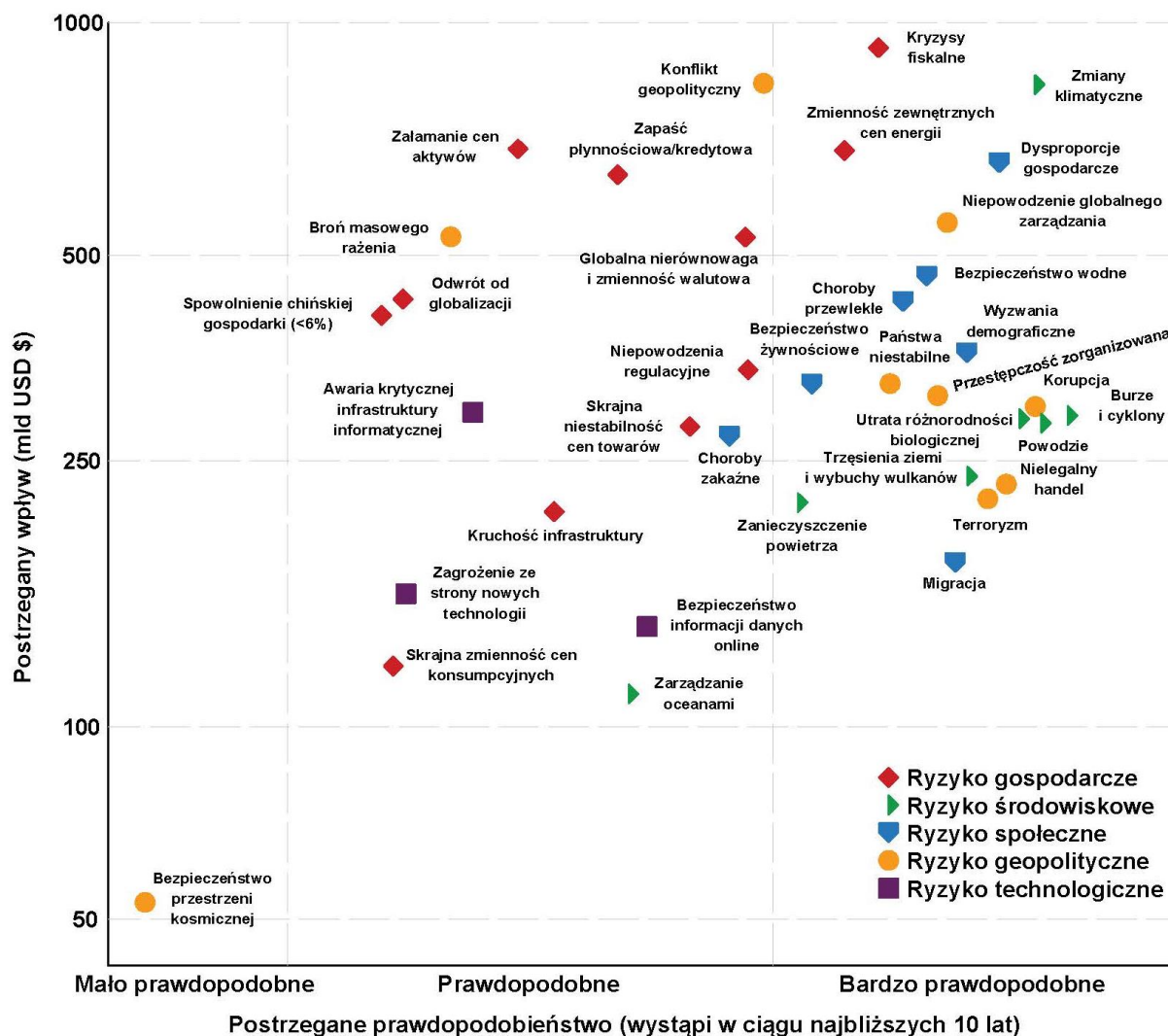
$$R = f(P_z, K_z)$$

gdzie:

P_z – oznacza prawdopodobieństwo wystąpienia danego zdarzenia,

K_z – oznacza konsekwencje (negatywne albo neutralne) wystąpienia danego zdarzenia.

Wszystkie powyższe definicje traktują „ryzyko” w sposób bardzo uogólniony. Jednak, w szczególnych rozważaniach, termin „ryzyko” jest związany z konkretnym obszarem działalności człowieka, takim jak: ekonomia, technologia, gospodarka, środowisko, itd. Z tego powodu ryzyko należy zawsze postrzegać przez pryzmat danego obszaru i definiować w sposób szczegółowy. Warto również zaznaczyć, że w zależności od rodzaju ryzyka, może być ono różnie postrzegane przez społeczeństwo, a ewentualne jego konsekwencje, np. finansowe, mogą być odmienne. Dobrze obrazuje to praca [67], w których zestawiono wybrane ryzyka: ekonomiczne, środowiskowe, społeczne, gospodarcze i techniczne uwzględniając prawdopodobieństwo ich wystąpienia oraz poziom oddziaływania w przypadku wystąpienia (wyrażony w miliardach dolarów) według oceny z 2011 roku – rys. 2.3.



Rys. 2.3 Postrzeganie ryzyka przez społeczeństwo (opracowanie własne, na podstawie [67])

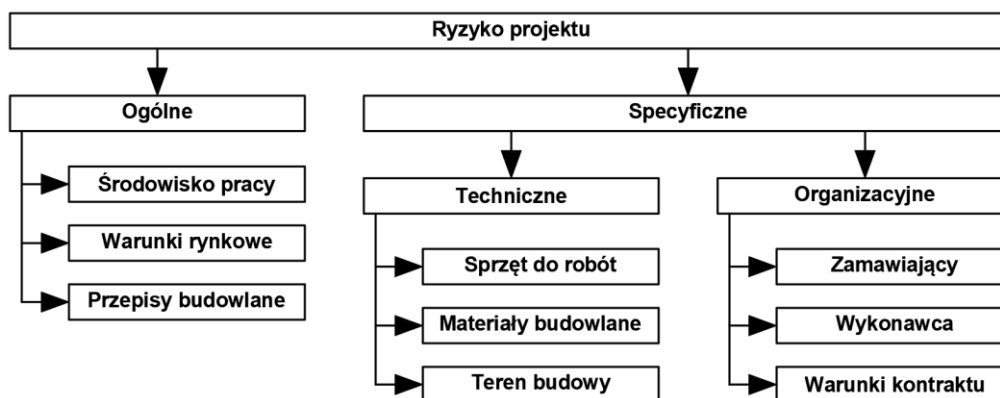
Powszechnie występuje wiele rodzajów ryzyka, takich jak: ryzyko medyczne (związane ze stanem zdrowia człowieka), ryzyko ekologiczne (związane ze stanem środowiska naturalnego), ryzyko operacyjne [68] (związane z bankowością i finansami) i inne, jednak ze względu na charakter tej pracy nie zostały one szerzej scharakteryzowane.

W zagadnieniach ściśle związanych z branżą budowlaną, termin „ryzyko” może być rozumiany na różne sposoby i dotyczyć różnych zagadnień, zarówno ogólnych jak i szczegółowych. I tak, często występującym w trakcie procesu budowlanego „ogólnym” ryzykiem jest tzw. „ryzyko projektu”, które to związane jest bezpośrednio z powodzeniem całego przedsięwzięcia budowlanego, zarówno w kontekście czasu realizacji, kosztów i innych [69]. Dodatkowo, inne „szczegółowe” rodzaje ryzyka mogą występować na poszczególnych etapach całego procesu inwestycyjnego [70] i mieć swoje źródło w tzw. „czynnikiach ryzyka” [71].

Przykładowo, na etapie wyłonienia wykonawcy danego przedsięwzięcia budowlanego (etap przetargowy w zamówieniach publicznych) występują zewnętrzne i wewnętrzne źródła ryzyka, które mają bezpośrednie przełożenie na wszystkich interesariuszy projektu [71]. Do najważniejszych wewnętrznych źródeł powstawania ryzyka można zaliczyć: warunki rynkowe, zmiany kursu walut, ograniczenia środowiskowe, kwestie społeczno-kulturowe i inne [71], [72]. Natomiast wewnętrzne źródła ryzyka mogą mieć swój początek m.in. u dostawców materiałów lub wykonawców i podwykonawców. Na tym etapie bardzo ważna jest prawidłowa alokacja ryzyka, czyli prawidłowy podział ryzyka pomiędzy partnerów inwestycyjnych [73].

Właściwe zarządzanie ryzykiem i poprawnie przeprowadzona ocena ryzyka może mieć duże znaczenie w przypadku inwestycji realizowanych w systemie partnerstwa publiczno-prywatnego (PPP). W tego typu inwestycjach, kluczowe znaczenie ma właściwa alokacja ryzyka, czyli prawidłowy podział ryzyka pomiędzy partnerów inwestycyjnych. W praktyce, podmioty publiczne często wykorzystują w tym celu Wytyczne Komisji Europejskiej [74], które określają zasady alokacji ryzyka związanego m.in. z: wahaniami kursu walut, zmianami politycznymi i innymi. Jednak, jak wykazały badania [73], które przeprowadzono na kilkunastu umowach zawartych w latach 2009-2014, obserwuje się tendencję do przenoszenia większości ryzyka na stronę prywatną, co zdaniem autorów badań w dłuższej perspektywie może przynieść negatywne skutki dla zamawiających.

W trakcie realizacji robót budowlanych może wystąpić wiele rodzajów ryzyka, zarówno ogólnych jak i specyficznych dla danego przedsięwzięcia – m.in.: technicznych i organizacyjnych [71]. Wszystkie mają swoje źródło we wspomnianych już czynnikach ryzyka. Na rys. 2.4 przedstawiono przykładową strukturę podziału czynników ryzyka występujących na etapie realizacji robót budowlanych.



Rys. 2.4 Przykładowa struktura podziału czynników ryzyka na etapie realizacji inwestycji (opracowanie własne, na podstawie [71])

Zestawienie najczęściej występujących rodzajów ryzyka, jakie mogą wystąpić w trakcie realizacji całego procesu budowlanego, znaleźć można m.in. w pracy [75] – tab. 2.1.

Tab. 2.1 Rodzaje ryzyka, jakie mogą wystąpić w trakcie realizacji procesu budowlanego (opracowanie własne, na podstawie [75])

Etap procesu budowlanego	Rodzaje ryzyka
Projekt wstępny	<ul style="list-style-type: none"> • ryzyko źle rozpoznanej konkurencji, • ryzyko źle rozpoznanych preferencji inwestora, • ryzyko złej samooceny, • ryzyko przeszacowania kosztów realizacji projektu.
Przetarg	<ul style="list-style-type: none"> • ryzyko korupcji, • ryzyko unieważnienia przetargu, • ryzyko złej kalkulacji ceny projektu, • ryzyko stosowania cen dumpingowych przez konkurencję, • ryzyko poniesienia zbyt dużych kosztów (lub zbyt małych) na marketing i lobbging, • ryzyko rzetelności zleceniodawcy.
Projekt wykonawczy	<ul style="list-style-type: none"> • ryzyko złego doboru zespołu projektantów, • ryzyko przeszacowania kosztów projektu, • ryzyko spadku poziomu estetycznego, • ryzyko złego doboru technologii, • ryzyko złego harmonogramu prac.
Prace budowlane	<ul style="list-style-type: none"> • ryzyko protestów (np. ekologów, miejscowej ludności), • ryzyko źle rozpoznanej struktury gruntu, • ryzyko awarii sprzętu, • ryzyko absencji pracowników, • ryzyko kwalifikacji pracowników, • ryzyko złego zarządzania zasobami materiałowymi, eksploatacyjnymi i ludzkimi, • ryzyko terminowości dostarczania materiałów budowlanych i eksploatacyjnych, • ryzyko jakości materiałów budowlanych, • ryzyko utrzymania standardów, • ryzyko niedostatecznej kontroli, • ryzyko rozszerzenia zakresu prac, • ryzyko złej organizacji prac, • ryzyko wypadku przy pracy, • ryzyko powstania choroby zawodowej.
Rozliczenie płatności	<ul style="list-style-type: none"> • ryzyko destabilizacji politycznej kraju, • ryzyko destabilizacji gospodarczej kraju, • ryzyko wzrostu inflacji, • ryzyko niewłaściwego planu kosztów, • ryzyko dekonjunktury w branży, • ryzyko wiarygodności zleceniodawcy,

Tab. 2.1 (c.d.) Rodzaje ryzyka, jakie mogą wystąpić w trakcie realizacji procesu budowlanego (opracowanie własne, na podstawie [75])

	<ul style="list-style-type: none">• ryzyko precyzji umowy,• ryzyko przestrzegania i egzekwowania prawa.
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

W trakcie realizacji robót budowlanych ważną kategorią ryzyka jest bezpieczeństwo pracowników podczas pracy. W zagadnieniach związanych z bezpieczeństwem pracy, takich jak: analizy poziomu narażenia pracowników na oddziaływanie czynników niebezpiecznych, „ryzyko” oznacza prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia w środowisku pracy oraz poziom jego oddziaływania na pracownika i definiowane jest jako tzw. „ryzyko zawodowe”. Podstawową definicję ryzyka zawodowego wprowadza Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy [76] oraz norma PN-N-18002:2011: Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy. Ogólne wytyczne do oceny ryzyka zawodowego [77]. Powyższe dokumenty definiują ryzyko zawodowe jako: „prawdopodobieństwo wystąpienia niepożądanych zdarzeń związanych z wykonywaną pracą, powodujących straty, w szczególności wystąpienie u pracowników niekorzystnych skutków zdrowotnych w wyniku zagrożeń zawodowych występujących w środowisku pracy lub sposobu wykonywania pracy”. Inną definicję ryzyka zawodowego wprowadza Międzynarodowa Organizacja Pracy, wg której ryzyko zawodowe to: kombinacja prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia zagrażającego oraz ciężkości urazu lub pogorszenia stanu zdrowia pracowników powodowanego tym zdarzeniem [78]. Warto również zaznaczyć, że zgodnie z Kodeksem pracy [79] ocena i dokumentacja ryzyka zawodowego na stanowiskach pracy jest jednym z podstawowych obowiązków każdego pracodawcy. Ponadto pracodawca powinien poinformować pracowników o ryzyku zawodowym występującym na danym stanowisku pracy oraz przedstawić zasady prawidłowej ochrony przed występującymi zagrożeniami. W szczególności, obowiązek ten jest bardzo ważny dla prac, podczas których występują liczne zagrożenia dla życia i zdrowia pracowników, a prawdopodobieństwo powstania wypadku przy pracy jest wysokie [76]. Do takich prac należą m.in. roboty budowlane prowadzone na wysokości z wykorzystaniem rusztowań budowlanych o czym świadczy szereg zarówno krajowych [80] jak i zagranicznych [37], [38], [81] badań prowadzonych w zakresie wypadkowości w budownictwie.

W ujęciu matematycznym, ryzyko zawodowe (R_z) jest funkcją prawdopodobieństwa wystąpienia lub częstości wystąpienia danych skutków oraz ciężkości skutków spowodowanych tym zdarzeniem, które można przedstawić za pomocą poniższego wzoru [82]:

$$R_z = f(P_s, S)$$

gdzie:

P_s – oznacza prawdopodobieństwo lub częstość wystąpienia danych skutków,

S – oznacza ciężkość skutków spowodowane wystąpieniem zdarzeniem.

Zdaniem autorów pracy [82] prawdopodobieństwo wystąpienia skutków danego zdarzenia zależy od wielu czynników takich jak: częstość z jaką występuje zagrożenie lub ekspozycja na zagrożenie, prawdopodobieństwo z jakim może wystąpić zdarzenie niebezpieczne oraz możliwość zmniejszenia lub ograniczenia ewentualnych jego skutków, a także liczby narażonych osób. Wówczas ryzyko zawodowe (R_z) można przedstawić za pomocą poniższego wzoru:

$$R_z = f(S, E, P_z, G, I)$$

gdzie:

S – oznacza skutki spowodowane wystąpieniem zdarzenia,

E – oznacza częstotliwość z jaką występuje zagrożenie lub ekspozycja na zagrożenie,

P_z – oznacza prawdopodobieństwo wystąpienia danego zdarzenia,

G – oznacza możliwość zmniejszenia lub ograniczenia ewentualnych skutków zdarzenia,

I – oznacza liczbę osób narażonych na zagrożenie.

Warto dodatkowo zaznaczyć, że uwzględnienie dodatkowych czynników wpływających na prawdopodobieństwo powstania skutków może przyczynić się do osiągnięcia bardziej precyzyjnych rezultatów [83].

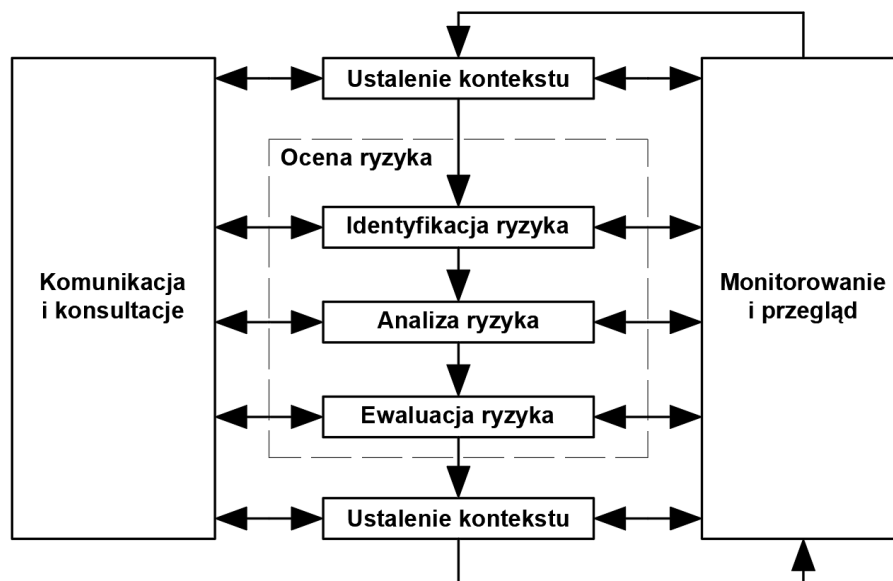
2.2.2. Struktura procesu zarządzania ryzykiem

Zarządzanie ryzykiem jest jednym z podstawowych narzędzi obejmujących skoordynowane działania dotyczące kierowania i nadzorowania organizacją w odniesieniu do ryzyka [63]. Warto zaznaczyć, że zarządzanie ryzykiem należy każdorazowo rozumieć jako

ciągły proces, a nie jednorazowe działanie [60]. W ogólnym ujęciu normowym [63] proces zarządzania ryzykiem składa się z elementów, takich jak:

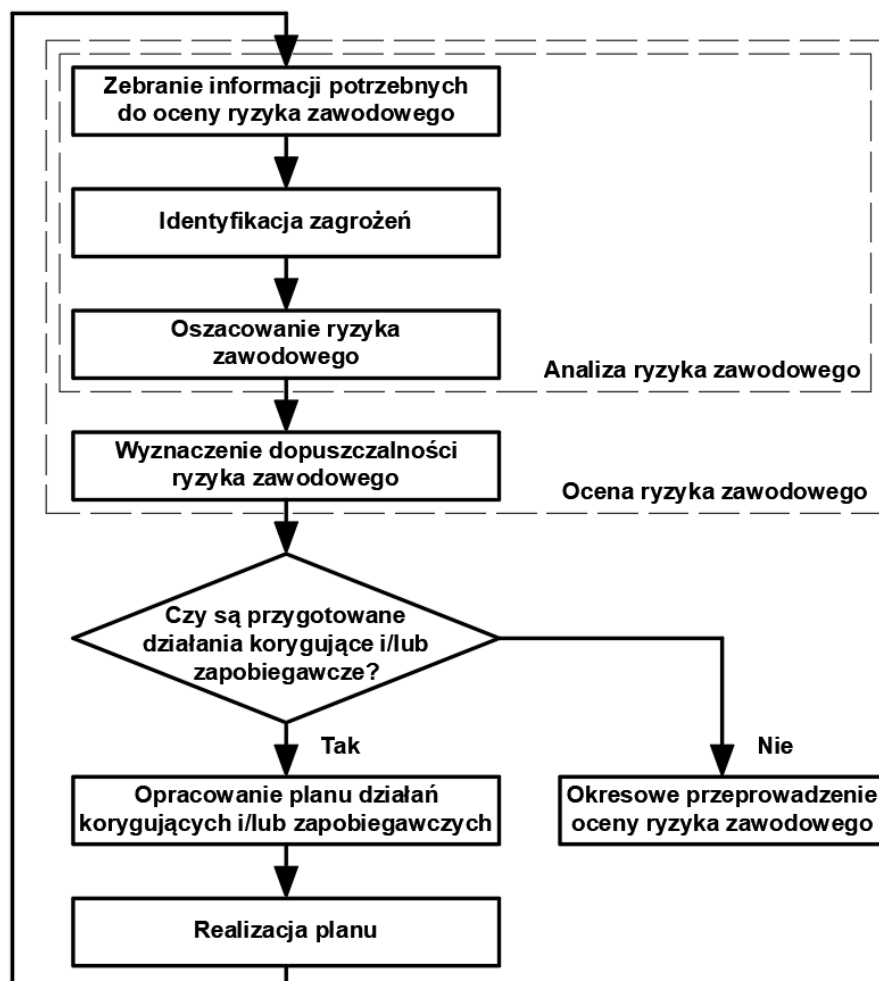
- Komunikacja i konsultacje – proces prowadzony pomiędzy interesariuszami, mający na celu przekazanie lub uzyskanie informacji niezbędnych do prawidłowego zarządzania ryzykiem – np. informacji na temat występowania ryzyka.
- Ustalenie kontekstu – proces definiowania parametrów niezbędnych do określenia zakresu i kryteriów ryzyka.
- Ocena ryzyka – całościowy proces identyfikacji, analizy i ewaluacji ryzyka.
- Postępowanie z ryzykiem – proces modyfikacji ryzyka mający na celu m.in. eliminację lub minimalizację ryzyka.
- Monitorowanie i przegląd – proces mający na celu weryfikację poprawności przyjętych działań i rozwiązań.

Zależności pomiędzy powyższymi elementami przedstawiono na rys. 2.5.



Rys. 2.5 Proces zarządzania ryzykiem (opracowanie własne, na podstawie [63])

Proces zarządzania ryzykiem, podobnie jak samo ryzyko, może dotyczyć również konkretnych, wyodrębnionych aspektów zachodzących w organizacji. I tak, w przypadku analiz związanych z bezpieczeństwem pracy, proces ten sprowadza się do ciągłego zarządzania ryzykiem zawodowym, którego ogólną strukturę znaleźć można m.in. w normie PN-N-18002 [77] – rys. 2.6.



Rys. 2.6 Proces zarządzania ryzykiem zawodowym (opracowanie własne, na podstawie [77])

Najważniejszą częścią zarządzania ryzykiem zawodowym jest ocena ryzyka zawodowego, która wg [78] definiowana jest jako: „proces analizowania i wyznaczania dopuszczalności ryzyka w obszarze bezpieczeństwa i higieny pracy, związanego z zagrożeniami występującymi w miejscu pracy”. Kompletna ocena ryzyka zawodowego składa się z następujących etapów:

- zebranie informacji niezbędnych do prawidłowej oceny ryzyka zawodowego na stanowisku pracy,
- identyfikacji zagrożeń dla pracowników, występujących na stanowisku pracy,
- oszacowanie ryzyka zawodowego na stanowisku pracy,
- wyznaczenie dopuszczalności ryzyka zawodowego na stanowisku pracy.

Etap zebrania informacji potrzebnych do prawidłowej oceny ryzyka zawodowego powinien obejmować w szczególności zebranie danych na temat (m.in.):

- charakterystyki stanowiska pracy i stosowanych na nim narzędzi, materiałów, itp.,
- osób pracujących na danym stanowisku pracy i czynności przez nie wykonywanych,
- występujących na stanowisku pracy zagrożeń, które wcześniej zostały już zidentyfikowane,
- wypadków przy pracy, chorób zawodowych oraz zdarzeń niebezpiecznych, które wydarzyły się w przeszłości.

W przypadku stanowisk pracy występujących w budownictwie, podczas zbierania informacji należy dodatkowo uwzględnić ([84], [85]):

- fazę realizacji inwestycji lub użytkowania obiektu,
- rodzaj prowadzonej inwestycji,
- granice inwestycji,
- osoby postronne, które mogą znaleźć się w strefie zagrożenia.

Według [77], [86] źródłem powyższych informacji mogą być m.in.:

- dane historyczne i prognostyczne,
- dokumentacja techniczna i instrukcje stanowiskowe,
- dokumentacja na temat wypadków i zdarzeń potencjalnie wypadkowych, które wydarzyły się w przeszłości,
- wyniki pomiarów i analiz na stanowiskach pracy,
- literatura naukowo-techniczna,
- analizy teoretyczne i symulacje,
- opinie eksperckie.

Kolejnym etapem oceny ryzyka zawodowego jest identyfikacja zagrożeń dla bezpieczeństwa pracy, która uzależniona jest od zakresu oceny i występujących zagrożeń [77]. Najważniejszym wynikiem tego etapu powinna być pełna identyfikacja wszystkich zagrożeń występujących na analizowanym stanowisku pracy. Według [83] źródłem informacji o zagrożeniach mogą być: listy kontrolne, procedury techniczne, instrukcje stanowiskowe, dane techniczne na temat wykorzystywanych na stanowisku pracy maszyn i urządzeń, dokumentacja na temat wypadków i zdarzeń potencjalnie wypadkowych, które wydarzyły się w przeszłości i inne. Więcej informacji na temat metod służących identyfikacji zagrożeń przedstawiono w kolejnym rozdziale pracy.

Trzecim etapem oceny ryzyka zawodowego jest poprawne oszacowanie poziomu ryzyka na analizowanym stanowisku pracy, które w większości stosowanych w budownictwie metod oceny (m.in. [66], [87]) sprowadza się do:

- wyznaczenia prawdopodobieństwa wystąpienia danego zagrożenia,
- wyznaczenia skutków będących następstwem wystąpienia danego zagrożenia.

Warto zaznaczyć, że w zależności od potrzeb i charakteru analizowanych zagrożeń, do szacowania ryzyka można korzystać równoległe z różnych metod [77]. Wybrane metody oceny ryzyka zostały przedstawione w kolejnych rozdziałach pracy.

Ostatnim etapem oceny ryzyka zawodowego jest wyznaczenie dopuszczalności ryzyka zawodowego na analizowanym stanowisku pracy. Polega ono na określeniu czy wyznaczony we wcześniejszym etapie poziom ryzyka jest akceptowalny czy też należy go obniżyć.

2.2.3. Ocena ryzyka zawodowego

Ryzyko zawodowe należy określać dla każdego zidentyfikowanego na stanowisku pracy zagrożenia [83]. Według [88], w praktycznych zastosowaniach, w pierwszej kolejności, zaleca się wykorzystywanie takich metod oceny ryzyka zawodowego, które w prosty i przejrzysty sposób umożliwiają ich zastosowanie nawet przez osoby nieposiadające specjalistycznej wiedzy. Autor powyższych badań zaznacza jednak, że pomimo docelowej prostoty zastosowanych metod, muszą one umożliwić jednoznaczne wyznaczenie poziomu ryzyka i dostarczyć niezbędnych informacji do dalszego postępowania z ryzykiem. Zdaniem autora dopiero w sytuacji, w której proste metody nie dostarczają zadowalających wyników, należy sięgnąć po metody bardziej zaawansowane lub skorzystać z kilku metod jednocześnie. W takiej sytuacji zalecany jest również udział, w procesie oceny ryzyka zawodowego, specjalistów z danej dziedziny.

Jak już wspomniano w rozdziale 2.2.2., w każdej metodyce oceny ryzyka zawodowego kluczowe są etapy: pozyskiwania informacji na temat ryzyka (identyfikacja ryzyka i występujących zagrożeń), szacowania ryzyka i wyznaczenia dopuszczalnego poziomu ryzyka na analizowanym stanowisku pracy (ewaluacja ryzyka). W każdym z wymienionych etapów występuje wiele narzędzi i technik wspomagających gromadzenie i analizę danych. Według [89], [90] metody te można podzielić na:

- matematyczne – podstawą do wykonania obliczeń i analiz jest wykorzystanie programów komputerowych,

- szacunkowe (inaczej: metoda delficka, metoda ekspertów) – opinie i wiedza ekspercka stanowi bazę wiedzy jako punkt wyjścia do wykonania analiz,
- mieszane (szacunkowo-matematyczne) – będące połączeniem elementów metody szacunkowej i matematycznej.

W tab. 2.2 zestawiono najczęściej spotykane metody, które mogą być wykorzystane na poszczególnych etapach procesu analizy ryzyka zawodowego. W dalszej części pracy szerzej scharakteryzowano wybrane z nich, przedstawiając obecny stan wiedzy w tym zakresie oraz najnowsze badania naukowe prowadzone z ich wykorzystaniem, pozostające w tematyce budownictwa.

Tab. 2.2 Narzędzia i techniki wspomagające ocenę ryzyka zawodowego
(opracowanie własne, na podstawie [86], [91])

Narzędzie / technika wspomagająca	Etapu oceny ryzyka				
	Identyfikacja ryzyka	Analiza ryzyka			Ewaluacja ryzyka
		Wyznaczenie konsekwencji	Wyznaczenie prawdopodobieństwa	Wyznaczenie poziomu ryzyka	
Burza mózgów	++	-	-	-	-
Wywiady ustrukturalizowane lub ustrukturalizowane częściowo	++	-	-	-	-
Metoda delficka	++	-	-	-	-
Lista kontrolna	++	-	-	-	-
Podstawowa analiza zagrożeń	++	-	-	-	-
Analiza zagrożeń i zdolności operacyjnych	++	++	+	+	+
Analiza zagrożeń i krytycznych punktów kontroli	++	++	-	-	++
Ocena ryzyka środowiskowego	++	++	++	++	++
Metoda „co, jeśli?”	++	++	++	++	++
Analiza scenariuszowa	++	++	+	+	+
Analiza wpływu na działalność	+	++	+	+	+
Analiza przyczyn źródłowych	-	++	++	++	++

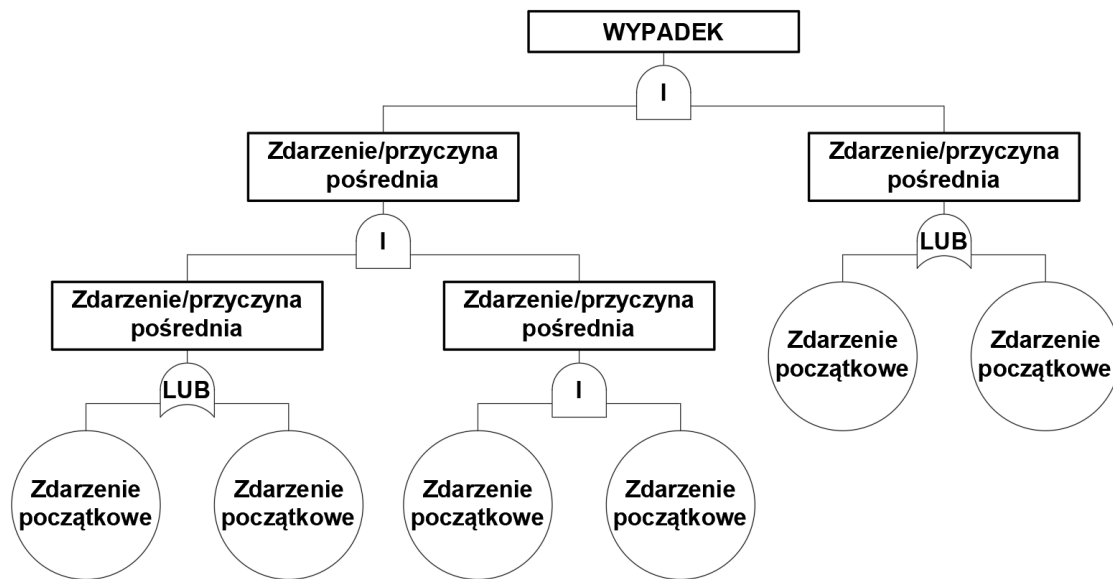
Tab. 2.2 (c.d.) Narzędzia i techniki wspomagające ocenę ryzyka zawodowego
(opracowanie własne, na podstawie [86], [91])

Analiza rodzajów i skutków możliwych błędów	++	++	++	++	++
Analiza drzewa błędów	+	–	++	+	+
Analiza drzewa zdarzeń	+	++	+	+	–
Analiza przyczyn i konsekwencji	+	++	++	+	+
Analiza przyczynowo – skutkowa	++	++	–	–	–
Analiza warstw ochrony	+	++	+	+	–
Analiza drzewa decyzji	–	++	++	+	+
Ocena niezawodności człowieka	++	++	++	++	+
Analiza muchy	–	+	++	++	+
Metoda konserwacji ukierunkowana na niezawodność	++	++	++	++	++
Zapowiedź analizy – SA i zapowiedź analizy obwodu – SCA	+	–	–	–	–
Analiza Markova	+	++	–	–	–
Symulacja Monte Carlo	–	–	–	–	++
Statystyki i sieci Bayesa	–	++	–	–	++
Krzywe wyniku fałszywie ujemnego	+	++	++	+	++
Wskaźniki ryzyka	+	++	++	+	++
Matryca skutek/prawdopodobieństwo	++	++	++	++	+
Analiza koszty/korzyści	+	++	+	+	+
Analiza wielokryterialnej decyzji	+	++	+	++	+
+ / ++ – możliwość skutecznej / bardzo skutecznej aplikacji metody w etapie procesu oceny ryzyka zawodowego. – – brak skutecznej możliwości aplikacji metody w etapie procesu oceny ryzyka zawodowego.					

Techniki analizy oparte na konstrukcji drzew logicznych

Jedną z technik analizy danych, opartą na konstrukcji drzewa logicznego, jest metoda analizy drzewa błędów (ang. Fault Tree Analysis). Technika ta zaliczana jest do jakościowych metod oceny, ponieważ wyznaczone za jej pomocą: konsekwencje, prawdopodobieństwo i poziom ryzyka najczęściej określone są jako: małe, średnie lub duże [86]. Typowe drzewo

błędów przedstawia wzajemną kombinacje i powiązania między zidentyfikowanymi zdarzeniami i przyczynami pośrednimi, które w konsekwencji prowadzą do efektu końcowego, którym może być wypadek przy pracy – rys. 2.7.

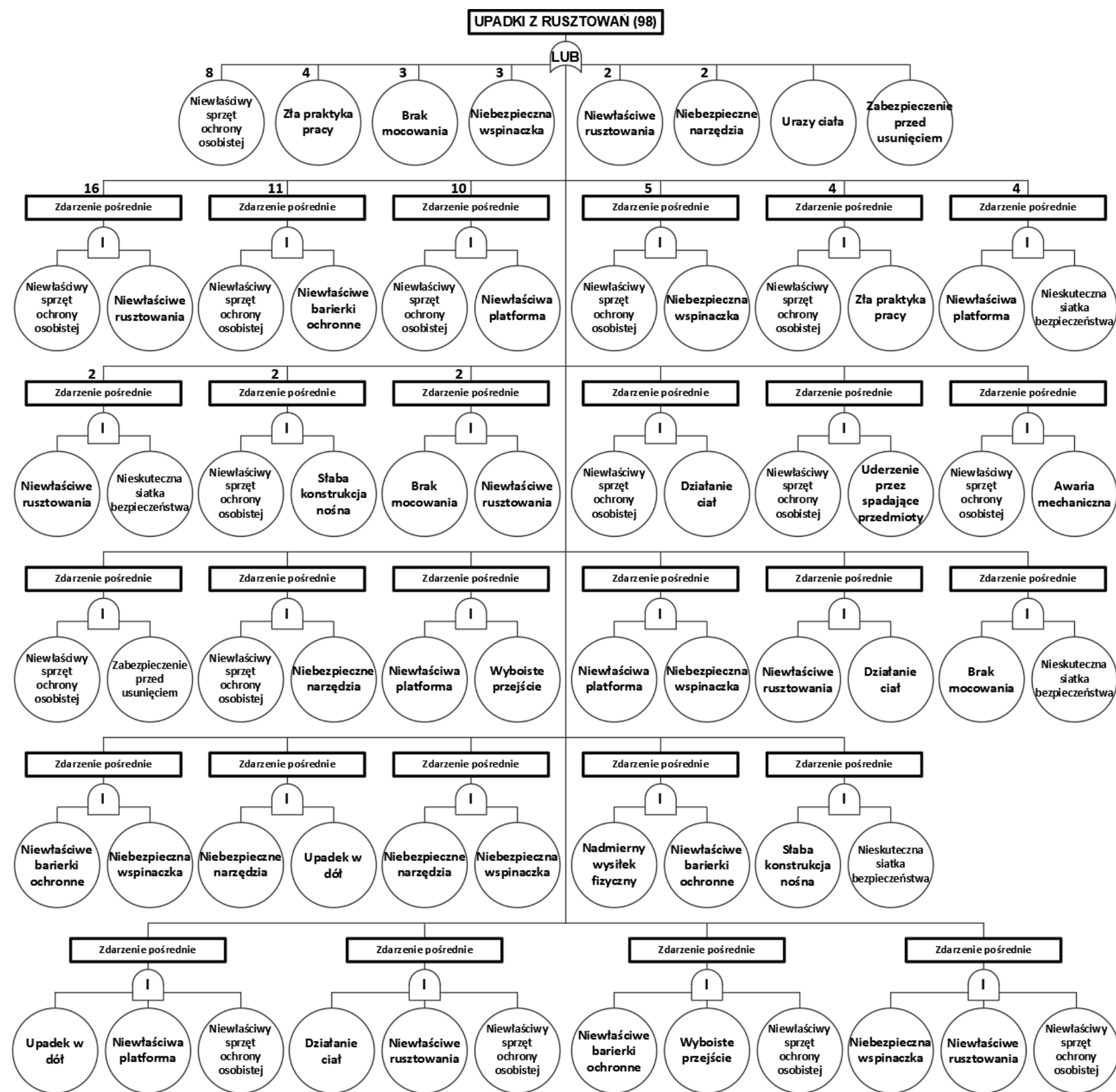


Rys. 2.7 Przykładowa struktura drzewa błędów (opracowanie własne, na podstawie [86])

Przykładem wykorzystania analizy drzewa błędów w badaniach naukowych są badania [92], w których analizie poddano 411 wypadków przy pracy w budownictwie. Ze zbioru wszystkich przeanalizowanych wypadków, 98 bezpośrednio związanych było z rusztowaniami budowlanymi. Ich szczegółowa analiza pozwoliła stwierdzić, że:

- 24 wypadki spowodowane były jedną z ośmiu pojedynczych przyczyn,
- 70 wypadków spowodowanych było jedną z 23 kombinacji dwóch przyczyn,
- 4 wypadki spowodowane były jedną z czterech kombinacji trzech przyczyn.

Autorzy badań, zobrazowali wyniki powyższej analizy za pomocą diagramu drzewa błędów przedstawionego na rys. 2.8.

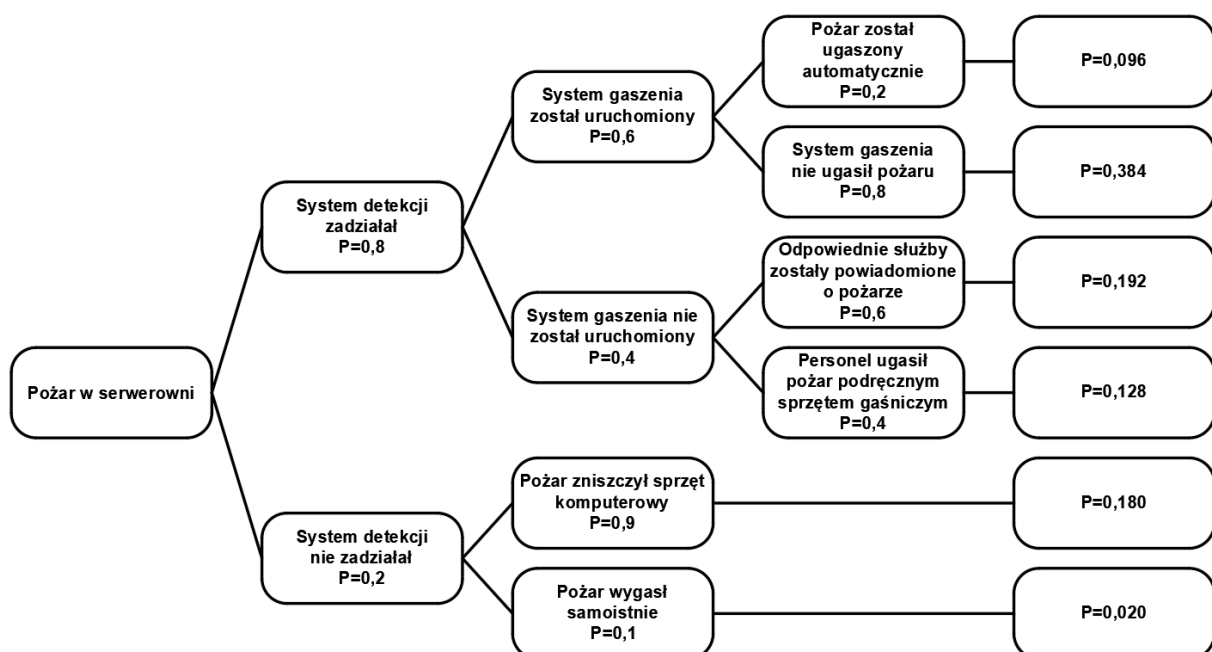


Rys. 2.8 Diagram drzewa błędów upadku z rusztowań budowlanych (opracowanie własne, na podstawie [92])

Warto dodatkowo zaznaczyć, że w powyższych badaniach, autorzy wyróżnili trzy główne kategorie przyczyn wypadków:

- niebezpieczne zachowanie – np. nieprawidłowości w użytkowaniu środków ochrony indywidualnej przez pracowników,
- niebezpieczne maszyny i narzędzia – np. użytkowanie przez pracowników uszkodzonych maszyn lub urządzeń,
- niebezpieczne środowisko – np. praca w środowisku bez środków ochrony zbiorowej.

Kolejną metodą analizy danych, opartą na konstrukcji drzewa logicznego, jest analiza drzewa decyzji (ang. Decision Tree Analysis). Analiza z wykorzystaniem tej techniki rozpoczyna się od identyfikacji tzw. zdarzenia lub decyzji inicjującej, a następnie określa kolejne możliwe zdarzenia lub decyzje (będące bezpośrednim następstwem poprzedzającego zdarzenia/decyzji), z uwzględnieniem prawdopodobieństwa ich wystąpienia [86]. Na samym końcu wyznacza się iloczyn poszczególnych prawdopodobieństw wzdłuż wszystkich ścieżek decyzyjnych zilustrowanych na drzewie decyzji. Na rys. 2.9 przedstawiono przykład analizy danych z wykorzystaniem tej techniki.



Rys. 2.9 Przykładowa analiza drzewa decyzji (opracowanie własne, na podstawie [86])

Wykorzystanie w badaniach nad wypadkowością w budownictwie drzew decyzyjnych znaleźć można m.in. w pracy [93]. Wykorzystany w badaniach zbiór danych obejmował informacje na temat ponad 1400 wypadków przy pracy dekarzy, które wydarzyły się w okresie

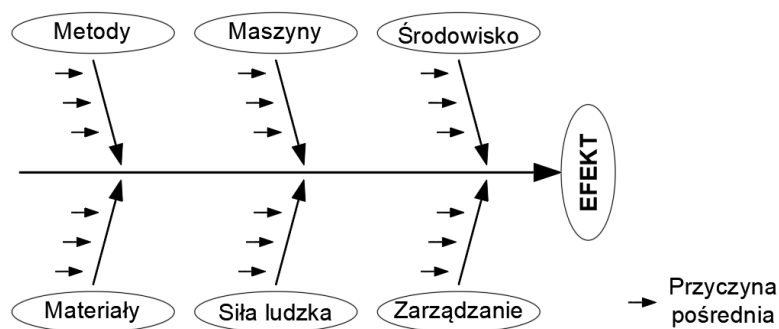
od 1994 roku do 2008 roku. Uzyskane w wyniku analiz wyniki pozwoliły stwierdzić m.in., że czynnikami, którymi w największym stopniu determinują konsekwencje zdrowotne dla pracownika w sytuacji wypadkowej są: wysokość upadku, bezpośrednia przyczyna powstania obrażeń, odbyte szkolenia BHP oraz czynność wykonywana przez pracownika w chwili wypadku. Dodatkowo zaobserwowano, że:

- prawdopodobieństwo wystąpienia poważnych konsekwencji zdrowotnych zwiększa się wraz z wzrostem wysokości, z której spada pracownik,
- szansa wystąpienia poważnych konsekwencji zdrowotnych maleje, jeśli pracownik odbył szkolenie BHP.

Analizy przyczynowo – skutkowe

Model przyczynowo – skutkowy może zostać przedstawiony m.in. w formie diagramu Ishikawy (tzw. diagram przyczyn i skutków), który jest ciekawym, a zarazem czytelnym sposobem zobrazowania sekwencji zdarzeń (przyczyn) prowadzących do danego skutku, którym może być wypadek przy pracy [94], [95]. Dzięki temu metoda ta stanowi nieocenione i intuicyjne narzędzie m.in. do identyfikacji zagrożeń w trakcie procesu oceny ryzyka zawodowego.

Japoński uczony Ishikawa stwierdził, że określony skutek zależy od wielu czynników, które można podzielić na poszczególne grupy. Tak powstał „tradycyjny” diagram Ishikawy, którego budowa opiera się na metodzie 5M+E, czyli na pierwszych literach od angielskich nazw czynników: siła robocza (manpower), metoda pracy (methods), maszyna (machinery), materiał (materials), zarządzanie (management) i środowisko (environment). Czynniki te traktowane są jako główne źródła przyczyn i umieszczone są na osiach skośnych diagramu przedstawionego na rys. 2.10. Poziome osie, dochodzące do nich, przedstawiają szczegółowe przyczyny w każdej grupie przyczyn głównych. Dzięki takiej budowie, diagram w przejrzysty sposób obrazuje powiązania i zależności występujące pomiędzy czynnikami, a także przyporządkowuje je do odpowiedniej grupy [96], [97].



Rys. 2.10 Modelowy diagram Ishikawy (opracowanie własne)

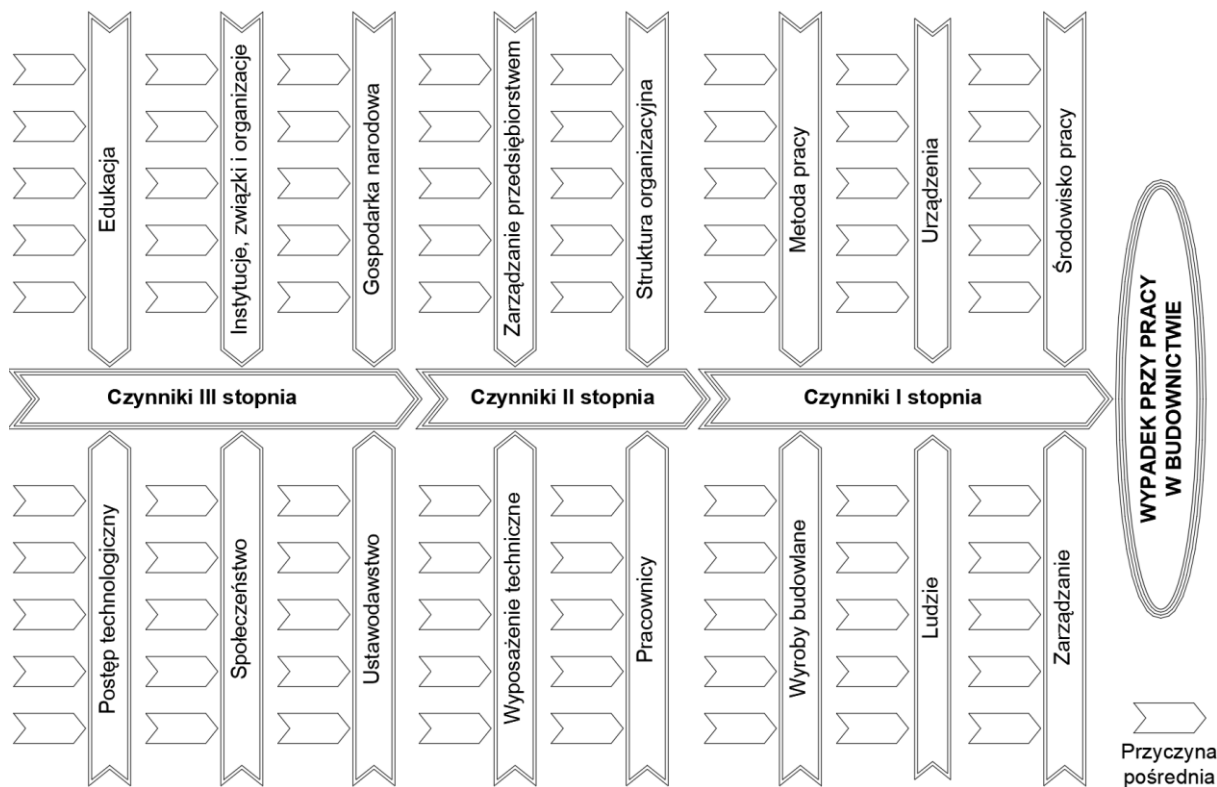
Przykład praktycznego wykorzystania powyższej analizy na potrzeby identyfikacji zagrożeń dla bezpieczeństwa pracy w budownictwie znaleźć można m.in. w pracy [20]. Autorzy powyższych badań do przedstawienia najważniejszych czynników, mających wpływ na powstawanie wypadków przy pracy w budownictwie, zaproponowali zmodyfikowany diagram Ishikawy. Budowa takiego diagramu oparta została na podziale czynników na trzy grupy, uwzględniające stopień ich powiązania z wypadkiem. Do I grupy zaliczono czynniki związane bezpośrednio z terenem budowy, do II grupy zaliczono czynniki generowane w całej organizacji jaką jest przedsiębiorstwo budowlane, a do III grupy zaliczono czynniki generowane w otoczeniu przedsiębiorstwa. Wybrane czynniki, generowane przez poszczególne trzy obszary, zostały zestawione w tab. 2.3 oraz przedstawione na zmodyfikowanym diagramie Ishikawy – rys. 2.11.

Tab. 2.3 Zbiorcze zestawienie wybranych czynników: I stopnia, II stopnia i III stopnia (opracowanie własne, na podstawie [20])

Stopień powiązania czynników	Obszar pochodzenia czynników	Nazwa Czynnika
Czynniki I stopnia (bezpośrednio związane z terenem budowy)	Środowisko pracy	I.1.a – lokalizacja stanowiska pracy, I.1.b – porządek na stanowisku pracy, I.1.c – warunki atmosferyczne, I.1.d – czynniki szkodliwe i szczególnie niebezpieczne, I.1.e – pora roku
	Urządzenia	I.2.a – rodzaj (m.in.: niebezpieczne, poddoporowe, do robót ziemnych), I.2.b – stan techniczny, I.2.c – maszyny niebezpieczne, I.2.d – struktura przestrzenna, I.2.e – użytkowanie
	Metoda pracy	I.3.a – nadzór, I.3.b – środki ochrony indywidualnej, I.3.c – środki ochrony zbiorowej, I.3.d – sposób prowadzenia prac, I.3.e – technologia robót

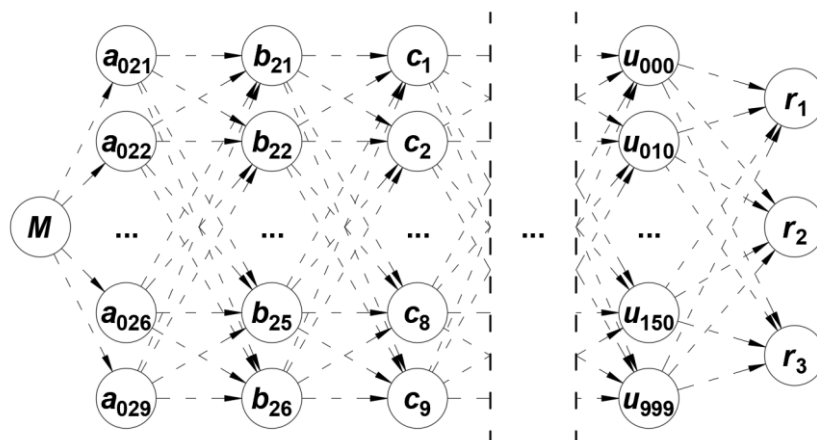
Tab. 2.3 (c.d.) Zbiorcze zestawienie wybranych czynników: I stopnia, II stopnia i III stopnia
(opracowanie własne, na podstawie [20])

	Zarządzanie	I.4.a – przepływ informacji, I.4.b – jakość dokumentacji, I.4.c – tempo pracy, I.4.d – organizacja pracy, I.4.e – ocena ryzyka na stanowiskach
	Ludzie	I.5.a – spożywanie leków, I.5.b – spożywanie środków odurzających, I.5.c – świadomość zagrożeń, I.5.d – stan zdrowia, I.5.e – kwalifikacje
	Wyroby budowlane	I.6.a – niewłaściwa obróbka, I.6.b – właściwości niebezpieczne, I.6.c – wady materiałowe, I.6.d – gabaryty, I.6.e – stosowanie materiałów zastępczych
Czynniki II stopnia (generowane przez przedsiębiorstwo)	Struktura organizacyjna	II.1.a – rodzaj struktury organizacyjnej, II.1.b – system współpracy z podwykonawcami, II.1.c – wielkość przedsiębiorstwa, II.1.d – forma prawna przedsiębiorstwa
	Zarządzanie przedsiębiorstwem	II.2.a – wynagrodzenie, II.2.b – wewnętrzne kontrole, II.2.c – zarządzanie BHP, II.2.d – sytuacja finansowa przedsiębiorstwa
	Pracownicy	II.3.a – wpływy i naciski z zewnątrz, II.3.b – kultura bezpieczeństwa, II.3.c – fluktuacja kadr
	Wyposażenie techniczne	II.4.a – stopień wykorzystania dostępnych urządzeń, II.4.b – jakość urządzeń, II.4.c – wiek urządzeń, II.4.d – wdrażanie nowych technologii
Czynniki III stopnia (generowane przez otoczenie przedsiębiorstwa budowlanego)	Gospodarka narodowa	III.1.a – stopa bezrobocia, III.1.b – osiągnięta wartość produkcji budowlano-montażowej, III.1.c – struktura rodzajowa budownictwa, III.1.d – struktura inwestycyjna budownictwa
	Instytucje, związki i organizacje	III.2.a – organy kontroli (m.in.: PIP, PINB), III.2.b – izby budowlane (m.in.: działalność edukacyjna), III.2.c – związki branżowe (m.in.: działalność edukacyjna)
	Edukacja	III.3.a – programy nauczania w szkołach, III.3.b – kampanie i akcje promujące bezpieczną pracę
	Ustawodawstwo	III.4.a – treści zapisane w ustawach i przepisach, III.4.b – treści zapisane w normach
	Społeczeństwo	III.5.a – kultura, III.5.b – tempo przyrostu naturalnego, III.5.c – świadomość zagrożeń
	Postęp techniczny	III.6.a – prowadzone badania naukowe (m.in.: wnioski patentowe), III.6.b – właściwa implementacja dostępnych technologii, III.6.c – świadomy i ukierunkowany rozwój



Rys. 2.11 Zmodyfikowany diagram Ishikawy, uwzględniający podział czynników na: I stopnia, II stopnia i III stopnia (opracowanie własne, na podstawie [20])

Kolejne badania wykorzystujące modele przyczynowo – skutkowe znaleźć można w pracach [98]–[100], w których do analizy przebiegu sytuacji wypadkowej wykorzystano model w formie grafu skierowanego – rys. 2.12. Poszczególne węzły grafu odpowiadają wyodrębnionym w procesie wypadkowym elementom procesu pracy, natomiast strzałki oznaczają wzajemne relacje zachodzące między poszczególnymi elementami [98].



Rys. 2.12 Fragment modelu rozwoju sytuacji wypadkowej w budownictwie w formie grafu skierowanego (opracowanie własne, na podstawie [98])

Szóstak, w swojej pracy doktorskiej [98] zaadaptował powyższy model na potrzeby analizy 485 wypadków przy pracy w budownictwie, które wydarzyły się w okresie od 2008 do 2014 roku na terenie województwa dolnośląskiego, kujawsko-pomorskiego, lubelskiego, lubuskiego i śląskiego. Szczegółowe informacje na temat wszystkich wypadków pochodziły z powypadkowych Protokołów Kontroli opracowanych przez Okręgowe Inspektoraty Państwowej Inspekcji Pracy i pozwoliły m.in. na:

- identyfikację istotnych i bardzo istotnych elementów procesu pracy – m.in. czynności wykonywanej przez pracownika w chwili wypadku lub nieprawidłowości będących bezpośrednią przyczyną wypadku. Przykładem takiej czynności jest przemieszczanie się pracownika po terenie budowy, które występowało 222 razy (ok. 46% przeanalizowanych wypadków) oraz bezpośrednio wydarzenie powodujące wypadek, czyli poślizgnięcie, potknięcie się, upadek pracownika na tym samym poziomie lub z wysokości – 222 przypadki (ok. 46% przeanalizowanych wypadków).
- identyfikację relacji zachodzących między poszczególnymi elementami procesu pracy,
- identyfikację takich elementów procesu pracy, które znajdują się na wypadkowej ścieżce krytycznej, co w konsekwencji umożliwiło opracowanie najbardziej prawdopodobnych scenariuszy przebiegu wypadku.

Metody klasyfikacyjne

Podczas analizy dużego zbioru danych (np. danych statystycznych), mającej na celu m.in. identyfikację ryzyka oraz jego konsekwencji nieocenione są metody klasyfikacyjne, do których wg [101] możemy zaliczyć m.in.:

- analizę skupień
- analizę koszykową
- drzewa klasyfikacyjne

Główną ideą pierwszej z wymienionych metody eksploracji danych (analizy skupień) jest pogrupowanie analizowanych obiektów w taki sposób, aby w danej grupie znajdowały się obiekty „podobne” do siebie i zarazem „niepodobne” do obiektów z pozostałych grup [101], [102]. Kryterium oceny przynależności obiektu do danej grupy jest miara podobieństwa. W praktycznych rozważaniach, zastosowanie znajduje funkcja odwrotna do miary „podobieństwa”, czyli funkcja „niepodobieństwa” obiektów będąca miarą odległości między

nimi. Oznacza to, że jeżeli odległość między obiektem O_a i O_b jest większa niż odległość pomiędzy obiektami O_a i O_c czyli:

$$d(O_a, O_b) > d(O_a, O_c); \quad \text{gdzie: } a \neq b \neq c; a, b, c \in \{v\}$$

to obiekt O_a jest bardziej „niepodobny” do obiektu O_b aniżeli do obiektu O_c . W konsekwencji prowadzi to do sytuacji, że obiekty O_a oraz O_c mogą tworzyć skupienie, ponieważ są bardziej do siebie „podobne”.

Analiza koszykowa [103], [104] jest metodą pozwalającą na identyfikację powiązań i skojarzeń występujących w dużych zbiorach danych, między konkretnymi wartościami zmiennych. Powyższe powiązania i skojarzenia tworzą tzw. reguły asocjacji, które przyjmują postać: „JEŻELI WYSTĄPI [poprzednik] TO WYSTĄPI [następnik]”, w których zarówno [poprzednik] jak i [następnik] może być identyfikowany m.in. jako konkretne zdarzenie. W analizach bezpieczeństwa pracy, przykładem [poprzednika] w zbiorze analizowanych danych może być: [znaczące zaniechanie przepisów BHP podczas wykonywania prac na wysokości], a przykładem [następnika]: [sytuacja niebezpieczna na budowie]. W sytuacji kiedy w analizowanym zbiorze danych powyższe elementy są ze sobą powiązane, zastosowanie analizy koszykowej pozwoli na identyfikację zależności w postaci: „JEŻELI WYSTĄPI [znaczące zaniechanie przepisów BHP podczas wykonywania prac na wysokości] TO WYSTĄPI [sytuacja niebezpieczna na budowie]”. Powyższą regułą można również zapisać za pomocą wyrażenia logicznego:

$$[\text{poprzednik}] \Rightarrow [\text{następnik}]$$

Ostatnią z wymienionych metod klasyfikacji są tzw. drzewa klasyfikacyjne. Wg [105] ideą tej metody jest wyznaczenie przynależności poszczególnych przypadków lub obiektów do klas jakościowej zmiennej zależnej na podstawie pomiarów jednej lub więcej zmiennych objaśniających (tzw. predyktorów). Oznacza to, że analizowane dane zostają podzielone na możliwie najbardziej jednorodne grupy względem analizowanej zmiennej zależnej. Zaletą tej metody klasyfikacji jest możliwość przedstawienia wyników analizy w postaci graficznej co znacząco ułatwia ich interpretację.

W praktycznym wykorzystaniu metod klasyfikacyjnych do identyfikacji zagrożeń dla bezpieczeństwa pracy w budownictwie duże znaczenie mają badania prowadzone przez Drozda [8], [25], [106]–[109]. Badania zostały przeprowadzone na dużym zbiorze danych obejmującym m.in. informacje pozyskane w wyniku kontroli budów prowadzonych na terenie województwa małopolskiego oraz protokołów powypadkowych sporządzonych przez

Okręgową Inspekcję Pracy w Krakowie. Wykonane analizy, z wykorzystaniem: analizy skupień [107], analizy koszykowej [108] oraz drzew klasyfikacyjnych [109] pozwoliły m.in. na:

- wyodrębnienie charakterystycznych wzorców wypadków przy pracy w budownictwie oraz wskazanie cech środowiska pracy (np. rodzaju wykonywanych prac), które w największym stopniu wpływają na powstanie sytuacji niebezpiecznej.
- klasyfikację cech stanowisk pracy spotykanych w budownictwie w odniesieniu do spotykanych na nich zagrożeń dla bezpieczeństwa pracy.

Innymi, krajowymi badaniami w zakresie wykorzystania metod klasyfikacji w analizach związanych z bezpieczeństwem pracy w budownictwie są badania przeprowadzone z udziałem autora niniejszej dysertacji. Obejmowały one m.in. opracowanie klasyfikacji regionów polski w aspekcie poziomu bezpieczeństwa pracy w budownictwie [110]–[112] oraz określenie struktury jakościowej i ilościowej przyczyn wypadków przy pracy na rusztowaniach budowlanych [113].

Wykorzystanie metod klasyfikacyjnych do analizy danych związanych z identyfikacją zagrożeń dla bezpieczeństwa pracy znaleźć można również w zagranicznych publikacjach – m.in. [114], [115]. I tak w pierwszej pracy [114] autorzy przeprowadzili analizę wypadków w budownictwie w Hong Kongu m.in. z wykorzystaniem analizy skupień. Uzyskane wyniki pozwoliły na zidentyfikowanie najbardziej prawdopodobnych sytuacji wypadkowych. W wyniku przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że do największej liczby wypadków dochodzi w sektorze prywatnym. Zastosowane narzędzia i otrzymane za ich pomocą wyniki, zdaniem autorów, stanowią dobry punkt wyjścia do analiz wypadków w budownictwie na całym świecie, w tym do analiz związanych z ryzykiem zawodowym. Podobne badania można znaleźć w publikacji [115], w której to przedstawiono analizę wypadków związanych z pracami elektrycznymi i mechanicznymi. W badaniach tych zastosowano dwuetapową analizę skupień, a uzyskane wyniki pozwoliły na wypełnienie luki w wiedzy dotyczącej przyczyn wypadków związanych z pracami elektrycznymi i mechanicznymi oraz do zdefiniowania i promocji środków zapobiegawczych.

Statystyki i sieci Bayesa

Sieci Bayesowskie (ang. Bayesian Networks), których podstawą jest teoria opracowana przez Thomasa Bayes'a [116], wiążą warunkowe prawdopodobieństwa warunkowania się

dwóch zdarzeń [117]. Sieci te występują w postaci modeli graficznych, które służą do przedstawienia łącznego rozkładu prawdopodobieństwa w zbiorze analizowanych zmiennych. Wykorzystując tzw. regułę łańcucha można przedstawić je w postaci acyklicznego grafu skierowanego (ang. DAG) [118]. Wykorzystanie sieci Bayesa w analizach zbioru danych, umożliwia m.in. poprawne ujęcie zależności przyczynowych występujących pomiędzy analizowanymi zmiennymi. Ogólny wzór na twierdzenie Bayesa przedstawia się następująco:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \times P(A)}{P(B)}; \quad P(B) > 0$$

gdzie:

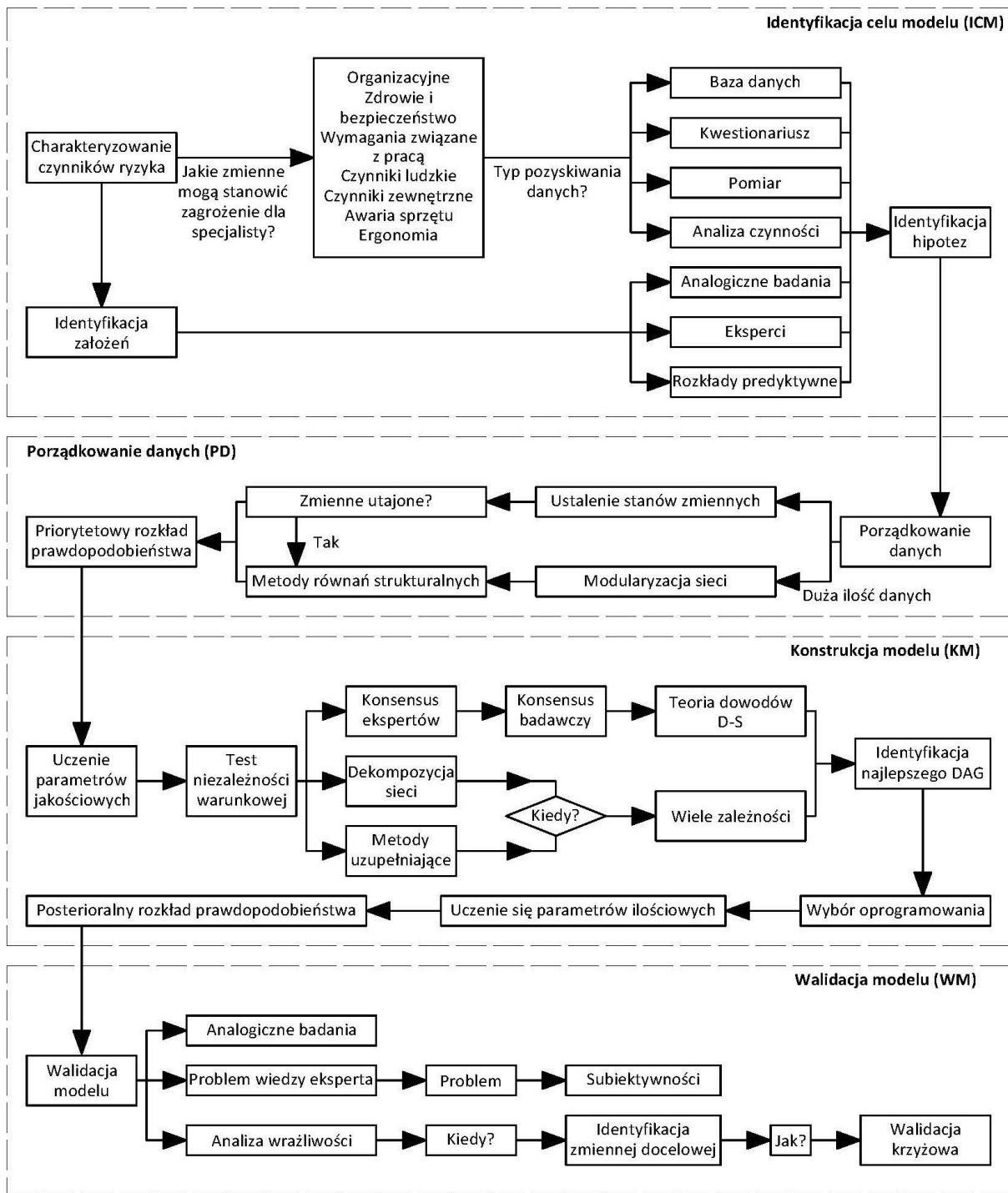
A, B – zdarzenia A i B ,

$P(A|B)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia A jeśli wystąpi zdarzenie B ,

$P(B|A)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia B jeśli wystąpi zdarzenie A .

Praktyczne wykorzystanie sieci Bayesa w procesie oceny ryzyka znaleźć można w wielu badaniach naukowych, zarówno krajowych (m.in. [119]–[122]), jak i zagranicznych (m.in. [50], [123]). Autorzy badań [119] wykorzystali statystyki Bayesa i metodę sieci Bayesa do analizy uprzednio zgromadzonych danych, pochodzących z wywiadów eksperckich. Otrzymane wyniki analizy wykorzystane zostały do opracowania autorskiej metody oceny ryzyka wystąpienia dodatkowych prac w projektach budowy infrastruktury kolejowej. Tematyka ta była kontynuowana m.in. w badaniach [120]. W pracach [121], [122] przedmiotem analiz związanych z ryzykiem był proces budowy i eksploatacji Tunelu pod Martwą Wisłą w Gdańsku. Autorzy badań zauważyli, że ze względu na przejrzystą formę graficzną, sieci Bayesa są bardzo dobrym narzędziem wspomagającym ocenę ryzyka oraz umożliwiającą efektywną kontrolę efektów wdrażania różnych działań łagodzących.

W badaniach amerykańskich naukowców [50] zaproponowano podejście oparte na sieci Bayesowskiej do zdiagnozowania ryzyka upadku z wysokości. W wyniku zaproponowanego podejścia możliwe stało się określenie prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku, związanego z różnymi stanami zagrożenia dla bezpieczeństwa pracy. Z kolei Brazylijscy naukowcy [123] zaproponowali autorski model wykorzystania sieci Bayesa do oceny ryzyka zawodowego – rys. 2.13.



Rys. 2.13 Model oceny ryzyka zawodowego oparty na sieci Bayesa
(opracowanie własne, na podstawie [123])

Metody matrycowe

Metody oparte na macierzach skutku i prawdopodobieństwa (ang. consequence / probability matrix) znajdują zastosowanie na wszystkich etapach oceny ryzyka zawodowego, umożliwiając: klasyfikację ryzyka, hierarchizację jego źródeł oraz dalsze postępowanie z ryzykiem [86]. Macierz (matryca) ryzyka najczęściej występuje w skali od 3 do 5 stopniowej (czasami w skali 7 stopniowej) i prezentuje kombinację prawdopodobieństwa wystąpienia danego zdarzenia oraz jego konsekwencje. Przykładem metody oceny ryzyka opartej na macierzach skutku i prawdopodobieństwa jest metoda proponowana przez normę PN-N-18002 [77]. Do zalet matrycowych metod oceny należy zaliczyć ich przejrzystość, intuicyjność i dostępność dla osób wykonujących ocenę ryzyka [66].

Pomimo swojej prostoty, metody matrycowe mogą być wykorzystane w zaawansowanych analizach naukowych. Przykładem są badania prowadzone przez [124], [125], w których wykorzystano matryce ryzyka oraz metody statystyki matematycznej i prawdopodobieństwa do szczegółowej analizy ryzyka kilkunastu projektów inwestycyjnych. Otrzymane wyniki pozwoliły na opracowanie autorskiej metodyki oceny ryzyka inwestycyjnego złożonych przedsięwzięć budowlanych. Dodatkowo otrzymane wyniki wskazują obszary generowania ryzyka, które w największym stopniu wpływają na powodzenie przedsięwzięcia – są to:

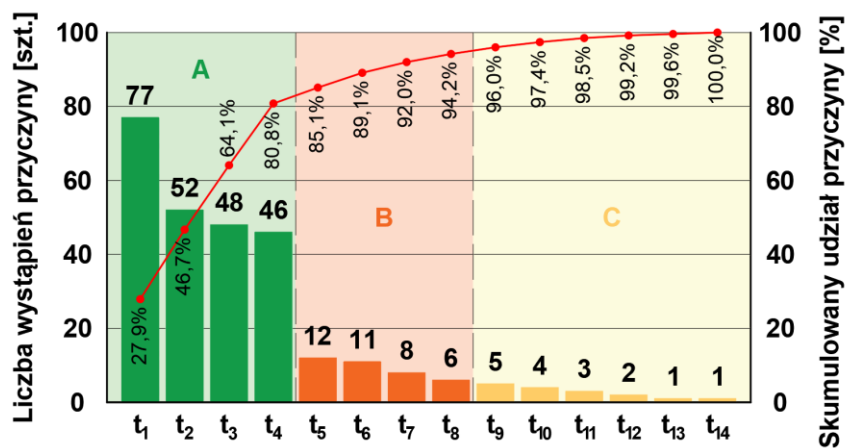
- harmonogram inwestycji,
- budżet inwestycji,
- projektowanie techniczne,
- aspekty bezpieczeństwa pracy.

Inne metody wspomagające ocenę ryzyka

W procesie oceny ryzyka zawodowego wykorzystać można również wiele innych metod wspomagających gromadzenie i analizę informacji, jednak na szczególną uwagę zasługuje metoda Pareto-Lorenza, której podstawą jest diagram opracowany w 1887 roku przez Vilfreda Pareto [126]. Ideą powyższej metody jest wytypowanie takich elementów, z spośród analizowanego zbioru danych, które w największym stopniu wpływają na analizowane aspekty. W praktycznych rozważaniach, najczęściej oznacza to, że ok. 20% elementów występuje tak często, że odpowiada za ok. 80% skumulowanej wartości wszystkich elementów [127]. Uzupełnieniem metody Pareto-Lorenza jest klasyfikacja ABC [128], [129], która pozwala na segregację elementów pod kątem stopnia ich ważności. Najczęściej przyjmuje się że:

- Zbiór A tworzą elementy istotne, które stanowią ok. 80% zbioru wszystkich elementów,
- Zbiór B tworzą elementy średnio istotne, które stanowią ok. 15% zbioru wszystkich elementów,
- Zbiór C tworzą elementy nieistotne, które stanowią ok. 5% zbioru wszystkich elementów.

Przykładem wykorzystania analizy Pareto-Lorenza oraz klasyfikacji ABC w zagadnieniach ściśle związanych z bezpieczeństwem pracy w budownictwie są badania [36]. Autorzy pracy wykorzystali wspomniane metody do analizy technicznych, organizacyjnych i ludzkich przyczyn wypadków, które wydarzyły się w okresie od 2008 do 2015 roku. Wyniki analizy pozwoliły na identyfikację przyczyn: istotnych, średnio istotnych i nieistotnych (pomijalnych). Na rys. 2.14 przedstawiono otrzymany wykres Pareto-Lorenza dla przyczyn technicznych wraz z zaznaczonym stopniem istotności przyczyn – obszar A, B oraz C.



Rys. 2.14 Wykres Pareto-Lorenza dla przyczyn technicznych (opracowanie własne, na podstawie [36])

2.2.4. Ewaluacja ryzyka zawodowego

Ewaluacja ryzyka, będąca ostatnim etapem procesu oceny ryzyka zawodowego [63], [77], ma na celu wyznaczenie dopuszczalności ryzyka zawodowego na analizowanym stanowisku pracy. W praktyce polega ona na porównaniu otrzymanych wyników analizy ryzyka z przyjętymi kryteriami oceny w celu zakwalifikowania ryzyka do odpowiedniej kategorii. Otrzymany poziom ryzyka może być akceptowalny lub nie akceptowalny. W drugiej sytuacji niezbędne jest podjęcie pilnych działań łagodzących, które powinny prowadzić do obniżenia poziomu ryzyka. Zgodnie z zasadą ALARP (ang. As Low As Reasonable Practicable – „tak niskie, jak to praktycznie możliwe”), wyróżnić można trzy obszary, charakteryzujące się różnym poziomem ryzyka:

- Obszar I – poziom ryzyka występujący w tym obszarze jest niedopuszczalnie wysoki, a dostępne środki nie dają możliwości ograniczenia jego poziomu do wartości dopuszczalnych. Powoduje to sytuację, w której praca w tym obszarze jest zabroniona.
- Obszar II – poziom ryzyka w tym obszarze jest możliwy do zaakceptowania, pod warunkiem stałej jego kontroli oraz podjęcia działań mających na celu jego redukcję.
- Obszar III – poziom ryzyka w tym obszarze jest mały i nie przewiduje się jego zwiększenia.

Warto dodatkowo pamiętać, że dokonując ewaluacji ryzyka należy uwzględnić zarówno rezultaty przeprowadzonej oceny ryzyka jak i poziom ich ufności [86].

W praktycznych rozważaniach, w przypadku czynników mierzalnych, takich jak: natężenie hałas, stężenie substancji szkodliwych, itp., wielkość ryzyka można wyznaczyć porównując średnie wartości natężenia (stężenia) czynnika szkodliwego, zaobserwowane w analizowanym środowisku, z wartościami dopuszczalnymi [88]. Wartości te mogą być określone w normach technicznych lub przepisach prawnych – np.:

- Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 5 sierpnia 2005 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na hałas lub drgania mechaniczne [130],
- Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy [131].

W przypadku czynników niemierzalnych, takich jak: zagrożenia mechaniczne, dopuszczalną wielkość ryzyka należy wyznaczać za pomocą określonej dla danego zagadnienia metody oceny oraz korzystać z wiedzy eksperckiej.

2.2.5. Wybrane metody oceny ryzyka zawodowego

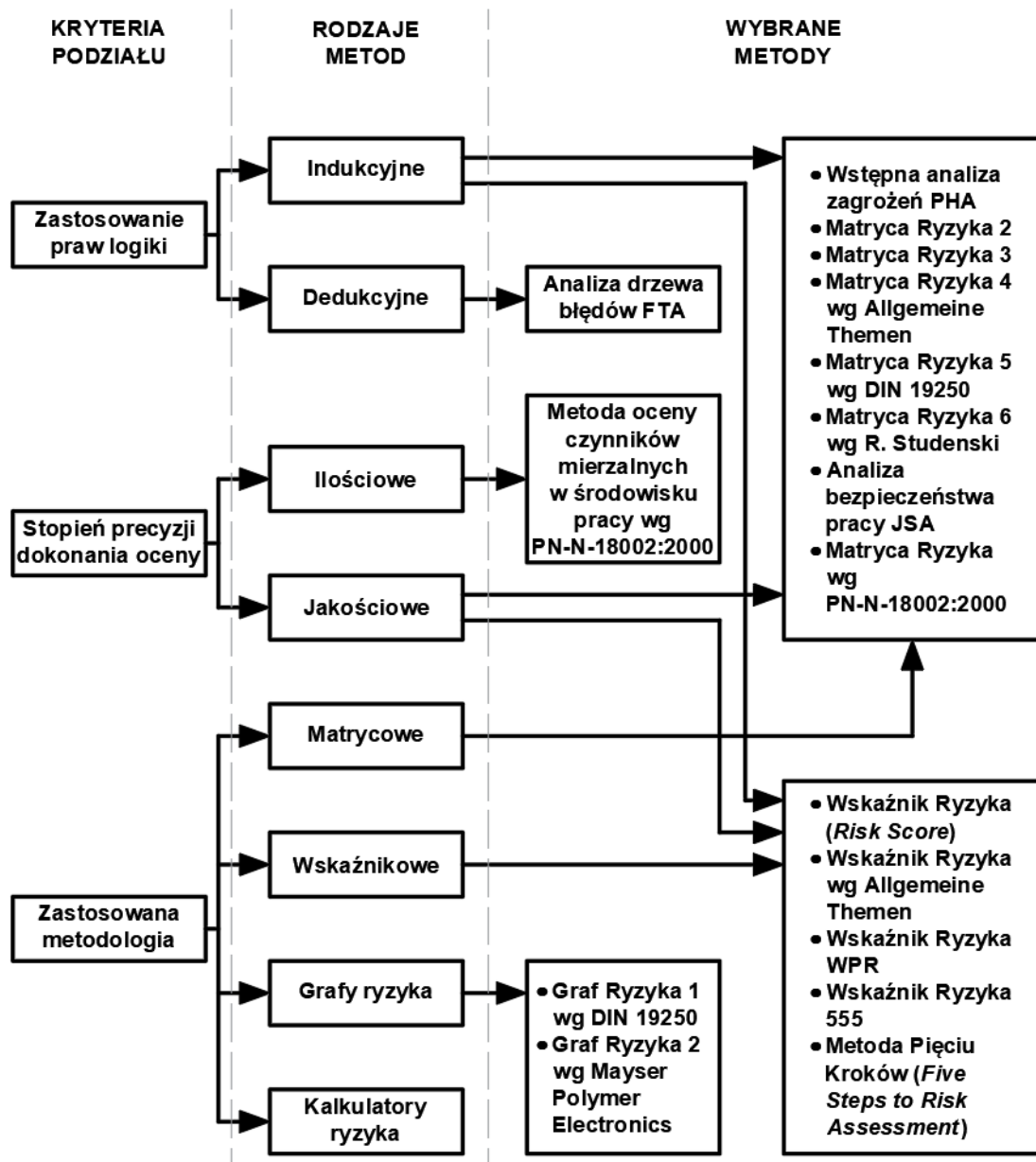
Przeprowadzone rozeznanie literaturowe pozwoliło na identyfikację wielu różnych metod oceny ryzyka zawodowego. Według [83], [88] można sklasyfikować je pod kątem różnych kryteriów, wśród których rozróżnia się metody:

- Indukcyjne i dedukcyjne – podstawą metod oceny ryzyka zaliczanych do tej grupy są metody wykorzystujące w procesie oceny prawa logiki;
- Ilościowe, jakościowe i jakościowo-ilościowe – podstawą oceny ryzyka w metodach zaliczanych do tej grupy są odpowiednio dane: ilościowe, uzyskane na podstawie

dostępnych danych statystycznych, jakościowe (umowne), uzyskane np. na podstawie wiedzy eksperckiej lub jakościowo-ilościowe, będące kombinacją poprzednich;

- Matrycowe (tablicowe), wskaźnikowe i graficzne,
- Oceny prawdopodobieństwa (częstości) i skutków (konsekwencji),
- Oceny obszarów SHE (bezpieczeństwo, zdrowie, środowisko),
- Oceny systemów CTO (człowiek, technika, otoczenie).

Na rys. 2.15 przedstawiono przykładowe metody oceny ryzyka zawodowego uwzględniając powyższą klasyfikację, część z nich przedstawiono w dalszej części pracy.



Rys. 2.15 Klasyfikacja wybranych metod oceny ryzyka zawodowego (opracowanie własne, na podstawie [83])

Metoda oceny ryzyka zawodowego wg PN-N-18002

Metoda oceny ryzyka zawodowego, zawarta w Polskiej Normie PN-N-18002 [77] należy do metod indukcyjnych, wykorzystujących matrycową metodę oceny [83]. W zależności od rodzaju danych wykorzystanych w analizie może być metodą ilościową (dane w postaci mierzalnych parametrów środowiska – np. natężenia dźwięku) albo metodą jakościową (dane w postaci niemierzalnych parametrów). Oszacowanie ryzyka zawodowego na analizowanym stanowisku pracy sprowadza się do określenia:

- prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożeń, które mogą mieć niekorzystny wpływ na zdrowie i życie pracowników,
- skutków, jakie może wywołać zagrożenie.

W przypadku zmiennych jakościowych, precyzyjne określenie prawdopodobieństwa wystąpienia danego zagrożenia oraz jego skutków jest zadaniem subiektywnym. Z tego względu norma [77] podaje pewne wskazówki, jakimi należy się kierować w trakcie oceny. I tak, określając prawdopodobieństwa wystąpienia, rozróżnić można takie zagrożenia, dla których prawdopodobieństwo jest:

- wysokie – zdarzenia, które mogą wystąpić wielokrotnie podczas całej aktywności zawodowej pracownika,
- prawdopodobne – zdarzenia, które mogą wystąpić nie więcej niż kilkakrotnie podczas całej aktywności zawodowej pracownika.
- małe – zdarzenia, które nie powinny wystąpić podczas całej aktywności zawodowej pracownika.

Określając szkodliwość wystąpienia danego zdarzenia rozróżnić można takie zdarzenia, dla których szkodliwość jest:

- duża – zdarzenia, które powodują ciężkie i stałe dolegliwości lub śmierć pracownika. Do takich zdarzeń zaliczamy m.in.: amputacje, szkodliwe złamania z następową dysfunkcją, oparzenia III stopnia i II stopnia w przypadku oparzenia dużej powierzchni ciała, zawodowe uszkodzenie słuchu, itp.
- średnia – zdarzenia, które powodują niewielkie, ale długotrwałe lub nawracające okresowo dolegliwości. Do takich zdarzeń zaliczamy m.in.: nieskomplikowane złamania, oparzenia II stopnia niewielkiej powierzchni ciała, zranienia, itp.

- mała – zdarzenia, które nie powodują długotrwałych dolegliwości. Do takich zdarzeń zaliczamy m.in.: stłuczenia, podrażnienia oczu, bóle głowy, itp.

Znając już prawdopodobieństwo wystąpienia danego zagrożenia oraz jego konsekwencje, w następnym kroku należy wyznaczyć poziom ryzyka. W tym celu norma [77] zaleca skorzystanie z jednej z dwóch macierzy, która umożliwia wyznaczenie poziomu ryzyka zawodowego odpowiednio w skali trójstopniowej (tab. 2.4) lub pięciostopniowej (tab. 2.5).

Tab. 2.4 Oszacowanie ryzyka zawodowego – skala trójstopniowa wg [77]

Prawdopodobieństwo	Ciężkość następstw		
	Mała	Średnia	Duża
Mało prawdopodobne	małe 1	małe 1	średnie 2
Prawdopodobne	małe 1	średnie 2	duże 3
Wysoce prawdopodobne	średnie 2	duże 3	duże 3

Tab. 2.5 Oszacowanie ryzyka zawodowego – skala pięciostopniowa wg [77]

Prawdopodobieństwo	Ciężkość następstw		
	Mała	Średnia	Duża
Mało prawdopodobne	bardzo małe 1	małe 2	średnie 3
Prawdopodobne	małe 2	średnie 3	duże 4
Wysoce prawdopodobne	średnie 3	duże 4	bardzo duże 5

Ostatnim krokiem oceny ryzyka zawodowego jest wyznaczenie dopuszczalności ryzyka. W tym celu, w pierwszej kolejności należy posługiwać się wymaganiami zawartymi w przepisach prawa lub dokumentach normatywnych. Jeśli wyżej wymienione wymagania nie występują, norma [77] dopuszcza wyznaczenie dopuszczalności ryzyka, wg wytycznych zawartych w tab. 2.6 i 2.7 (odpowiednio dla skali trójstopniowej i pięciostopniowej). W przypadku kiedy zidentyfikowany poziom ryzyka jest niedopuszczalny, niezwłocznie należy podjąć działania mające na celu jego zmniejszenie do poziomu dopuszczalnego.

Tab. 2.6 Ogólne zasady wyznaczania dopuszczalności ryzyka zawodowego oraz zalecenia dotyczące działań wynikających z oceny tego ryzyka – skala trójstopniowa wg [77]

Oszacowanie ryzyka zawodowego	Dopuszczalność ryzyka zawodowego	Niezbędne działania
Duże	niedopuszczalne	Prace można rozpocząć dopiero po zmniejszeniu ryzyka zawodowego do poziomu dopuszczalnego. W przypadku prac już wykonywanych, działania w celu zmniejszenia ryzyka zawodowego należy podjąć natychmiast (np. poprzez zastosowanie środków ochrony).
Średnie	dopuszczalne	Zaleca się zaplanowanie działań, mających na celu zmniejszenie ryzyka zawodowego.
Małe		Podjęcie działań, mających na celu utrzymanie poziomu ryzyka na co najmniej tym samym poziomie.

Tab. 2.7 Ogólne zasady wyznaczania dopuszczalności ryzyka zawodowego oraz zalecenia dotyczące działań wynikających z oceny tego ryzyka – skala pięciostopniowa wg [77]

Oszacowanie ryzyka zawodowego	Dopuszczalność ryzyka zawodowego	Niezbędne działania
Bardzo duże	niedopuszczalne	Praca nie może być rozpoczęta lub kontynuowana do czasu zmniejszenia ryzyka zawodowego do poziomu dopuszczalnego.
Duże		Prace można rozpocząć dopiero po zmniejszeniu ryzyka zawodowego do poziomu dopuszczalnego. W przypadku prac już wykonywanych, działania w celu zmniejszenia ryzyka zawodowego należy podjąć natychmiast (np. poprzez zastosowanie środków ochrony).
Średnie	dopuszczalne	Zaleca się zaplanowanie działań, mających na celu zmniejszenie ryzyka zawodowego.
Małe		Zaleca się rozważenie możliwości dalszego zmniejszania poziomu ryzyka zawodowego lub podjęcie działań, mających na celu utrzymanie poziomu ryzyka na co najmniej tym samym poziomie.
Bardzo małe		Nie jest konieczne prowadzenie żadnych działań

Analiza bezpieczeństwa pracy

Analiza bezpieczeństwa pracy (ang. *Job Safety Analysis – JSA*) jest jakościową metodą indukcyjną, wykorzystującą matrycową metodę oceny, która umożliwia identyfikację zagrożeń

związanych z realizowanymi zadaniami [83], [88], [132]. Zgodnie z metodą JSA, ryzyko zawodowe ($R_{z,JSA}$) jest definiowane jako funkcja dwóch parametrów: konsekwencji zdarzenia (C_i) oraz prawdopodobieństwa ich wystąpienia (P), które można przedstawić za pomocą poniższego wzoru:

$$R_{z,JSA} = f(C_i, P)$$

Konsekwencje zdarzenia C_i mogą przybrać jedną z czterech klas ($i = 1, 2, 3, 4$):

- C_1 – nieznaczne konsekwencje / brak niezdolności pracownika do pracy,
- C_2 – marginalne konsekwencje / krótka niezdolność pracownika do pracy,
- C_3 – poważne konsekwencje / długa niezdolność pracownika do pracy,
- C_4 – bardzo poważne konsekwencje / śmierć pracownika.

Prawdopodobieństwo wystąpienia konsekwencji P zależne jest od trzech parametrów ryzyka i przyjmuje postać według wzoru:

$$P = F + O + A$$

gdzie:

F – częstotliwość wystąpienia zagrożenia,

O – prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia,

A – możliwość ograniczenia lub uniknięcia ewentualnych szkód.

Powyższe parametry charakteryzujące prawdopodobieństwo wystąpienia konsekwencji przyjmują jeden z pięciu poziomów – tab. 2.8.

Tab. 2.8 Poziomy charakteryzujące parametry F , O i A

(Opracowanie własne na podstawie [82], [83])

Poziom	Parametry ryzyka		
	F	O	A
1	wystąpienie rzadziej niż raz w roku	nieistotne	oczywiste
2	wystąpienie raz w roku	mało prawdopodobne	prawdopodobne
3	wystąpienie raz w miesiącu	wyobrażalne	możliwe

Tab. 2.8 (c.d.) Poziomy charakteryzujące parametry F , O i A
(Opracowanie własne na podstawie [82], [83])

4	wystąpienie raz w tygodniu	prawdopodobne	niezbyt możliwe
5	wystąpienie codziennie	zwykle	niemożliwe

Po obliczeniu prawdopodobieństwa wystąpienia konsekwencji P i określeniu klasy konsekwencji zdarzenia C_i wartość ryzyka wyznacza się na podstawie tab. 2.9.

Tab. 2.9 Wartościowanie ryzyka – metoda JSA (Opracowanie własne na podstawie [83])

Klasa konsekwencji zdarzenia C_i	Wartość ryzyka zawodowego $R_{z,JSA}$				
	$P \in \langle 3, 4 \rangle$	$P \in \langle 5, 7 \rangle$	$P \in \langle 8, 10 \rangle$	$P \in \langle 11, 13 \rangle$	$P \in \langle 14, 15 \rangle$
C_1	1	2	3	4	5
C_2	2	3	4	5	6
C_3	3	4	5	6	7
C_4	4	5	6	7	8

Ewaluacja ryzyka zawodowego odbywa się na podstawie wyznaczonej wartości ryzyka $R_{z,JSA}$. W zależności od ostatecznej wartości, poziom ryzyka może być:

- pomijalny – $R_{z,JSA} \leq 2$ (kolor zielony w tab. 2.9)
- akceptowalny – $3 \leq R_{z,JSA} \leq 5$ (kolor żółty w tab. 2.9)
- nieakceptowalny – $R_{z,JSA} \geq 6$ (kolor czerwony w tab. 2.9)

Wstępna analiza zagrożeń

Wstępna analiza zagrożeń (ang. *Preliminary Hazard Analysis – PHA*) należy do nieznormalizowanych, dwuparametrowych, wskaźnikowych metod indukcyjnych [82], [133], koncentrujących się na identyfikacji potencjalnych zagrożeń i prawdopodobnych zdarzeń, które mogą doprowadzić do zaistnienia awarii lub wypadku. Zgodnie z metodą PHA, ryzyko (R_{PHA}) definiowane jest jako funkcja dwóch parametrów: prawdopodobieństwa powstania szkody (P) oraz stopnia szkody (S). Taką funkcję można przedstawić za pomocą poniższego wzoru:

$$R_{PHA} = P \cdot S$$

Powyższe parametry P oraz S mogą przyjąć jeden z sześciu poziomów, zdefiniowanych odpowiednio w tab. 2.10 i tab. 2.11.

Tab. 2.10 Wartościowanie parametru P (Opracowanie własne na podstawie [83], [133])

Poziom parametru P	Charakterystyka poziomu
1	bardzo nieprawdopodobne
2	mało prawdopodobne – raz na 10 lat
3	doraźne wydarzenia – raz w roku
4	dosyć częste wydarzenia – raz w miesiącu
5	częste / regularne wydarzenia – raz w tygodniu
6	bardzo prawdopodobne

Tab. 2.11 Wartościowanie parametru S (Opracowanie własne na podstawie [83], [133])

Poziom parametru S	Charakterystyka poziomu
1	znikome urazy / lekkie szkody
2	lekkie obrażenia / wymierne szkody
3	ciężkie obrażenia / znaczne szkody
4	pojedyncze wypadki śmiertelne / ciężkie szkody
5	zbiorowe wypadki śmiertelne / szkody na bardzo dużą skalę na terenie zakładu
6	zbiorowe wypadki śmiertelne / szkody na dużą skalę poza terenem zakładu

Ostateczną ocenę ryzyka dokonuje się na podstawie danych zawartych w tab. 2.12.

Tab. 2.12 Wartościowanie ryzyka R_{PHA} – metoda PHA
(Opracowanie własne na podstawie [83], [133])

Parametr	P – prawdopodobieństwa powstania szkody						
	Poziom	1	2	3	4	5	6
S – stopnia szkody	1	1	2	3	4	5	6
	2	2	4	6	8	10	12
	3	3	6	9	12	15	18
	4	4	8	12	16	20	24
	5	5	10	15	20	25	30
	6	6	12	18	24	30	36

Ewaluacja ryzyka zawodowego odbywa się na podstawie wyznaczonej wartości ryzyka R_{PHA} . W zależności od ostatecznej wartości, poziom ryzyka może być:

- akceptowalny – $R_{PHA} \leq 3$ (kolor zielony w tab. 2.12)
- akceptowalny, wymagający ponownej oceny – $4 \leq R_{PHA} \leq 9$ (kolor żółty w tab. 2.12)
- nieakceptowalny – $R_{PHA} \geq 10$ (kolor czerwony w tab. 2.12)

Risk Score

Metoda oceny ryzyka Risk Score jest jakościową, indukcyjną metodą wskaźnikową, która została opracowana w 1971 roku przez Williama Fine [82], [134]. Metoda umożliwia oszacowanie poziom ryzyka (R_{RS}) na podstawie trzech parametrów: potencjalnych skutków zdarzenia (S), ekspozycji pracownika na zagrożenie (E) oraz prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia (P). Wartość ryzyka wyznaczonego za pomocą metody Risk Scare można przedstawić za pomocą wyrażenia:

$$R_{RS} = S \cdot E \cdot P$$

Każdy z parametrów S , E oraz P może przyjąć jedną z sześciu wartości, które przedstawiono w tab. 2.13, tab. 2.14 i tab. 2.14.

Tab. 2.13 Wartościowanie parametru *S* (Opracowanie własne na podstawie [82])

Wartość parametru <i>S</i>	Szacowany poziom strat		
	Ludzkich	Materialnych*	Ogólnie
100	wiele ofiar śmiertelnych	powyżej 30 mln zł	poważna katastrofa
40	kilka ofiar śmiertelnych	1-30 mln zł	katastrofa
15	jedna ofiara śmiertelna	300 tys.-1 mln zł	bardzo duży
7	ciężkie uszkodzenia ciała	30-300 tys. zł	duży
3	absencja	3-30 tys. zł	średni
1	udzielenie pierwszej pomocy	poniżej 3 tys. zł	mały

* – założono kurs: 1\$ = 3,50 zł [82]

Tab. 2.14 Wartościowanie parametru *E* (Opracowanie własne na podstawie [82])

Wartość parametru <i>E</i>	Ekspozycja pracownika na zagrożenie
10	stała (24 h/dobę)
6	często / codziennie
3	sporadycznie / raz w tygodniu
2	okazjonalnie / raz w miesiącu
1	minimalna / kilka razy w roku
0,5	znikoma / raz w roku

Tab. 2.15 Wartościowanie parametru *P* (Opracowanie własne na podstawie [82])

Wartość parametru <i>P</i>	Szansa wystąpienia	Opis
10	50%	bardzo prawdopodobne
6	10%	całkiem możliwe
3	1%	możliwe, ale mało prawdopodobne
1	0,1%	możliwe tylko sporadycznie
0,5	0,01%	możliwe do pomyślenia
0,2	0,001%	praktycznie niemożliwe
0,1	0,0001%	możliwe tylko teoretycznie

Ostateczną ocenę ryzyka, wg. metody Risk Score, dokonuje się na podstawie danych zawartych w tab. 2.16.

Tab. 2.16 Ocena i wyznaczenie dopuszczalności ryzyka w metodzie Risk Score
(Opracowanie własne na podstawie [82])

Oszacowane ryzyko	Poziom ryzyka R_{RS}	Opis
akceptowalne	≤ 20	wskazana jest kontrola aby ryzyko pozostało na tym samym poziomie
małe	21-70	niezbędna jest kontrola zagrożenia
istotne	71-200	niezbędna jest poprawa warunków
duże	201-400	niezbędna jest natychmiastowa poprawa warunków
bardzo duże	>400	wskazane jest wstrzymanie prac do czasu usunięcia zagrożenia

2.3. Specyfika prac na rusztowaniach budowlanych

Rusztowanie, według definicji zawartej w słowniku języka polskiego [9] jest: „prowizoryczną konstrukcją z drewna lub z rur stalowych, ułatwiającą wznoszenie lub remont budowli”. Użyty w tej definicji termin „prowizoryczna” należy rozumieć jako: „mający trwać tylko pewien czas, niemający charakteru stałego”. Powyższe pojęcie słusznie zaznacza, że rusztowanie jest konstrukcją tymczasową, jednak nie przedstawia w pełni możliwych obszarów jego zastosowania. W branży budowlanej, według [135] rusztowania mogą być wykorzystywane m.in. do zapewnienia:

- bezpieczeństwa podczas wykonywanej pracy w trakcie: wznoszenia, konserwacji, naprawy lub rozbiórki budynków i innych obiektów budowlanych,
- łatwego dostępu do elementów i części obiektów budowlanych ulokowanych w miejscach trudno dostępnych – np. na wysokości,
- wparcia elementów wnoszonej konstrukcji, w trakcie jej budowy,
- odpowiedniej komunikacji w pionie (np. tymczasowe klatki schodowe) oraz w poziomie (np. kładki tymczasowe).

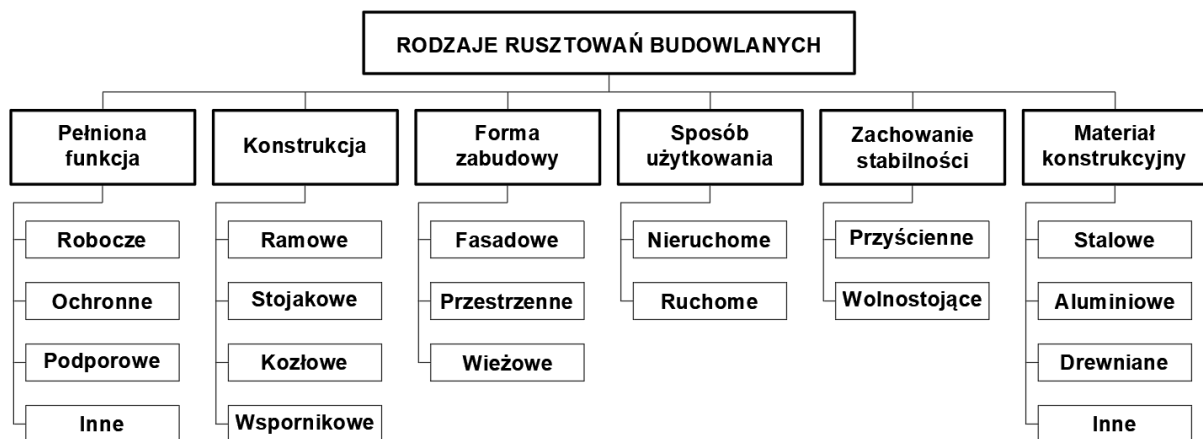
Tak szeroki obszar wykorzystania rusztowań w budownictwie, duża liczba dostępnych na rynku rozwiązań konstrukcyjnych oraz fakt, że roboty prowadzone przy ich użyciu wykonywane są na wysokości i w zmieniających się warunkach powoduje, że prace te obarczone są wysokim ryzykiem zawodowym oraz zaliczane są do prac szczególnie niebezpiecznych [76], [136]. W związku z powyższym, w dalszej części tego rozdziału skupiono się na przedstawieniu najważniejszych aspektów związanych z bezpieczeństwem w trakcie użytkowania rusztowań budowlanych.

2.3.1. Rodzaje i budowa rusztowań

Dzięki rusztowaniom budowlanym możliwe jest prowadzenie prac na wysokości, nawet do kilkudziesięciu metrów nad poziomem terenu, zapewnienie bezpieczeństwa osobom przebywającym w bezpośrednim sąsiedztwie konstrukcji i inne [137]. W związku z szerokim obszarem możliwych zastosowań konstrukcji rusztowań w budownictwie, wyróżnić należy kilka podstawowych rodzajów rusztowań. I tak według funkcji pełnionej przez rusztowanie wyróżnić należy (wg [137]):

- rusztowania robocze, które według [138] stanowią: „konstrukcję budowlaną, tymczasową, z której mogą być wykonywane prace na wysokości, służącą do utrzymania osób, materiałów i sprzętu”.
- rusztowania ochronne, które według [139] stanowią: „konstrukcję budowlaną, tymczasową, służącą do zabezpieczenia przed upadkiem z wysokości ludzi oraz przedmiotów”.
- rusztowania podporowe (inaczej: nośne, wsporcze [137]), które według [140] stanowią: „tymczasowe podparcie części konstrukcji w czasie gdy sama nie uzyskała pełnej nośności oraz w celu przeniesienia jej obciążeń”.
- inne rusztowania – m.in.: tymczasowe klatki schodowe i schodnie, kładki oraz zadaszenia tymczasowe.

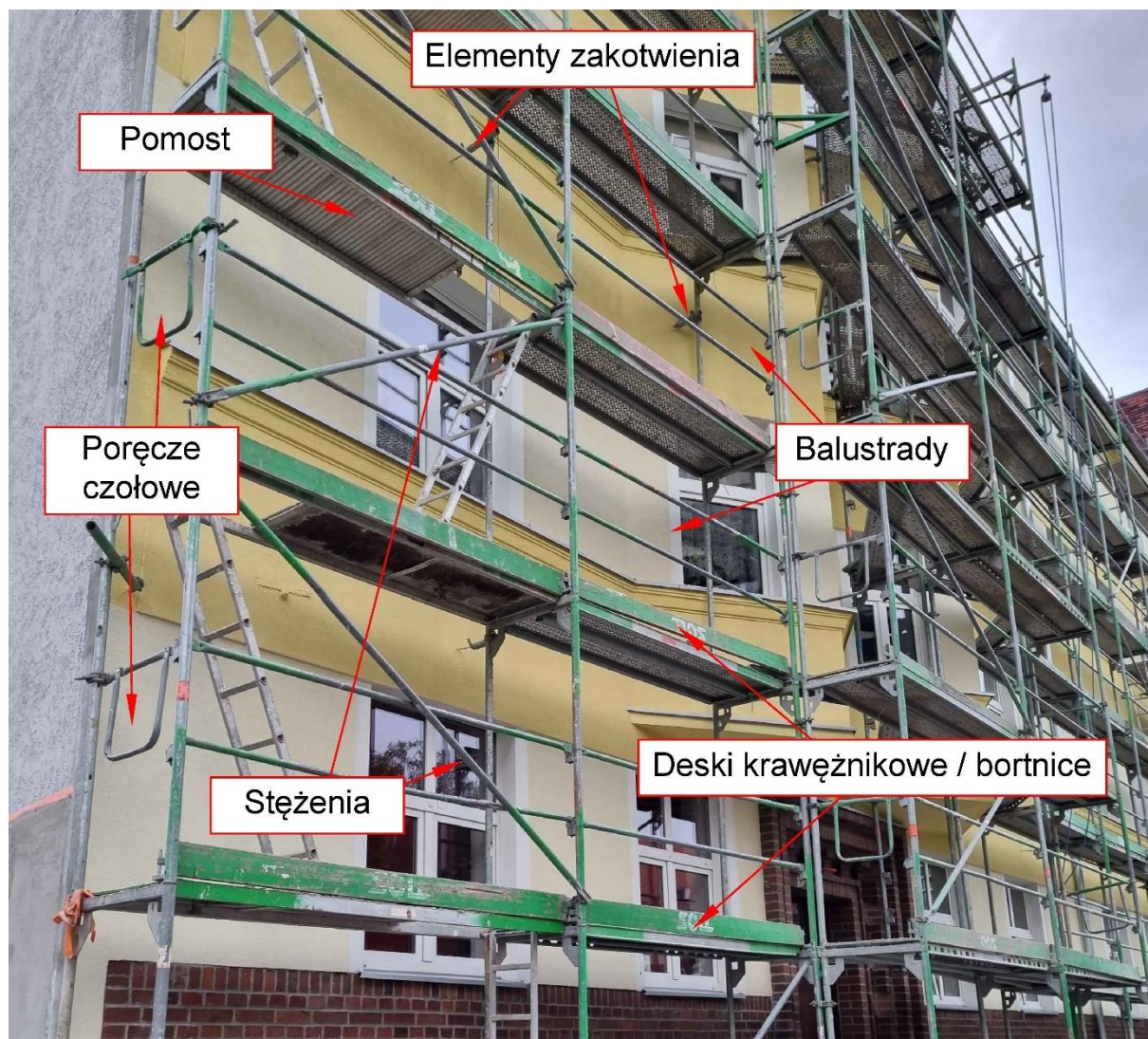
Dodatkowo, rusztowania mogą być klasyfikowane według innych kryteriów – rys. 2.18.



Rys. 2.18 Klasyfikacja rusztowań (opracowanie własne, na podstawie [137])

W zbiorze wszystkich rusztowań na szczególną uwagę zasługują tzw. rusztowania systemowe, które według [139] stanowią: „konstrukcję budowlaną, tymczasową, w której wymiary siatki konstrukcyjnej są jednoznacznie narzucone poprzez wymiary elementów

rusztowania, służąca do utrzymania osób, materiałów i sprzętu”. Budowa przykładowego rusztowania systemowego, wraz z najważniejszymi częściami składowymi, została przedstawiona na rys. 2.19.



Rys. 2.19 Budowa przykładowego rusztowania systemowego (opracowanie własne)

Najważniejszymi elementami konstrukcji rusztowania, zapewniającymi podstawowe bezpieczeństwo pracownikom, są:

- balustrady,
- poręcz czołowe,
- deski krawężnikowe / bortnice,
- ogrodzenia,
- daszki ochronne,
- siatki ochronne,

- nakładki zabezpieczające pomosty przed przesunięciem,
- stężenia,
- elementy zakotwienia.

Braki lub nieprawidłowości w powyższych częściach składowych konstrukcji rusztowania mogą stanowić bezpośrednie źródło zagrożenia dla bezpieczeństwa pracy. Szczegółowe informacje na ten temat zamieszczono w 4.1.1 rozdziale dysertacji.

2.3.2. Uwarunkowania formalno-prawne użytkowania rusztowań

Wszystkie rusztowania stosowane podczas prowadzenia prac budowlanych muszą spełniać szereg wymagań formalno-prawnych. Obecnie w Polsce obowiązuje kilkadziesiąt norm obejmujących swoim zakresem m.in. wymagania jakościowe jakie powinny spełniać rusztowania oraz zasady projektowania, a także ok. 30 aktów prawnych związanych z rusztowaniami [135], [141]. Powyższe przepisy zawierają m.in.:

- wymagania dotyczące bezpiecznej i higienicznej pracy z wykorzystywaniem rusztowań budowlanych oraz organizacji pracy rusztowań – w szczególności:
 - Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 lutego 2003 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas wykonywania robót budowlanych (Dz.U. 2003 nr 47 poz. 401) [138];
 - Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (Dz.U. 2003 nr 169 poz. 1650, z późn. zm.) [76];
 - Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 23 czerwca 2003 r. w sprawie informacji dotyczącej bezpieczeństwa i ochrony zdrowia oraz planu bezpieczeństwa i ochrony zdrowia (Dz.U. 2003 nr 120 poz. 1126) [136];
- wymagania dotyczące niezbędnych uprawnień w trakcie pracy z rusztowaniami budowlanymi – w szczególności:
 - Rozporządzenia Ministra Gospodarki w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas eksploatacji maszyn i innych urządzeń technicznych do robót ziemnych, budowlanych i drogowych (Dz.U. 2018 poz. 583) [142];
 - Rozporządzenie Ministra Inwestycji i Rozwoju z dnia 29 kwietnia 2019 r. w sprawie przygotowania zawodowego do wykonywania samodzielnych funkcji technicznych w budownictwie (Dz.U. 2019 poz. 831) [143];
- informacje na temat awarii rusztowań:

- Ustawa Prawo Budowlane [144].

W związku z dużą liczbą aspektów bezpośrednio związanych z użytkowaniem rusztowań budowlanych, poruszanych przez powyższe przepisy, w dalszej części pracy ograniczono się tylko do przedstawienia najważniejszych informacji jakie z nich wynikają.

I tak, zgodnie z obowiązującymi obecnie w Polsce przepisami prawa, wszystkie rusztowania budowlane powinny być: wykonywane, montowane, eksploatowane i demontowane zgodnie z dokumentacją lub instrukcją producenta (w przypadku typowych konfiguracji rusztowań systemowych) lub według indywidualnego projektu (w pozostałych przypadkach) [145]. Dodatkowo, w każdym przypadku osoby zatrudnione przy montażu i demontażu rusztowań budowlanych powinny posiadać odpowiednie uprawnienia i kwalifikacje [142].

Do użytkowania dopuszczone może być tylko kompletnie i poprawnie zmontowane rusztowanie, posiadające odpowiednie oznakowanie i uziemienie, które zostało odebrane przez kierownika budowy lub uprawnioną osobę. Fakt dokonania odbioru powinien być potwierdzony wpisem w dzienniku budowy lub w protokole odbioru technicznego rusztowania. Przepisy [138] nakazują również wykonanie dodatkowego przeglądu rusztowania m.in. po: wystąpieniu opadów atmosferycznych lub silnego wiatru, przerwach roboczych dłuższych niż 10 dni oraz minimum raz w miesiącu. Prawidłowo przeprowadzony przegląd rusztowania powinien w szczególności pozwolić na identyfikację nieprawidłowości konstrukcji, które mogą wpłynąć na prawidłowy i bezpieczny przebieg dalszych prac budowlanych. Najczęściej wykonanie przeglądu wiąże się z koniecznością wejścia osoby sprawdzającej na rusztowanie. Jednak, jak zauważono to w pracy [146], do wykonania kontroli wybranych elementów rusztowania można wykorzystać m.in. bezzałogowy statek powietrzny (BSP, ang. UAV).

W trakcie użytkowania rusztowania, należy zwracać szczególną uwagę na przestrzeganie przez pracowników przepisów bezpieczeństwa pracy, a także stosowanie środków ochrony indywidualnej, w szczególności chroniących przed upadkiem z wysokości.

2.4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonego obszernego przeglądu literatury przedmiotu, należy stwierdzić, że badania w obszarze: wypadkowości w budownictwie, zarządzania ryzykiem zawodowym oraz użytkowania rusztowań budowlanych są prowadzone przez naukowców na całym świecie. Tak liczne zainteresowanie tą tematyką spowodowane jest m.in. dużą skalą

zjawiska wypadkowości w sektorze budowlanym oraz wpływem wypadków na gospodarkę każdego kraju. Nie bez znaczenia pozostają również straty moralne, które niewątpliwie są konsekwencją każdego wypadku przy pracy na budowie.

Jak wykazano w przeglądzie literatury, każdego roku na polskich budowach w wypadkach przy pracy poszkodowanych zostaje kilka tysięcy osób. Duża część spośród wszystkich wypadków kończy się śmiercią osoby poszkodowanej lub trwałym kalectwem. Dodatkowo, znaczna część zdarzeń związana jest z pracą na wysokości, w tym na rusztowaniach budowlanych.

Zjawisko wypadkowości jest zjawiskiem skomplikowanym, uzależnionym od wielu mechanizmów oraz czynników występujących w środowisku pracy. Prowadzi to do sytuacji, w której każdy wypadek przy pracy spowodowany jest indywidualną kombinacją różnych przyczyn technicznych, organizacyjnych oraz ludzkich, mających swoje źródło w licznych zaniedbaniach występujących na polskich budowach.

Podstawowym narzędziem prewencyjnym, związanym z ochroną bezpieczeństwa pracy, jest analiza ryzyka zawodowego. Wykonanie oceny ryzyka zawodowego na każdym stanowisku pracy jest jednym z obowiązków pracodawcy. W powszechnym użyciu pozostaje wiele różnych metod oceny ryzyka zawodowego. Wśród nich rozróżnić można m.in. metody:

- indukcyjne i dedukcyjne,
- ilościowe, jakościowe i jakościowo-ilościowe,
- matrycowe, wskaźnikowe i graficzne.

Pomimo dużej liczby dostępnych metod oceny ryzyka zawodowego stwierdzono, że brakuje opracowań naukowych pozwalających na oszacowanie ryzyka zawodowego na stanowiskach pracy związanych z użytkowaniem rusztowań budowlanych, opartych na wieloletnich danych statystycznych oraz badaniach empirycznych. Zdaniem autora dysertacji, opracowanie takiej metodyki oceny pozwoli na szacowanie poziomu ryzyka zawodowego związanego z pracą na rusztowaniach budowlanych z dużą dokładnością, co przyczyni się do poprawy poziomu bezpieczeństwa pracy.

3. Metodyka i zakres badań własnych

Jednym z głównych celów dysertacji było opracowanie kompleksowej metodyki oceny ryzyka zawodowego prac związanych z wykorzystaniem rusztowań budowlanych. W ocenie doktoranta, jest to zadanie trudne, ponieważ jest wielowątkowe i wiąże się z pozyskaniem oraz przetworzeniem dużych zbiorów danych. Do przeprowadzenia oceny ryzyka zawodowego niezbędne są między innymi informacje takie jak:

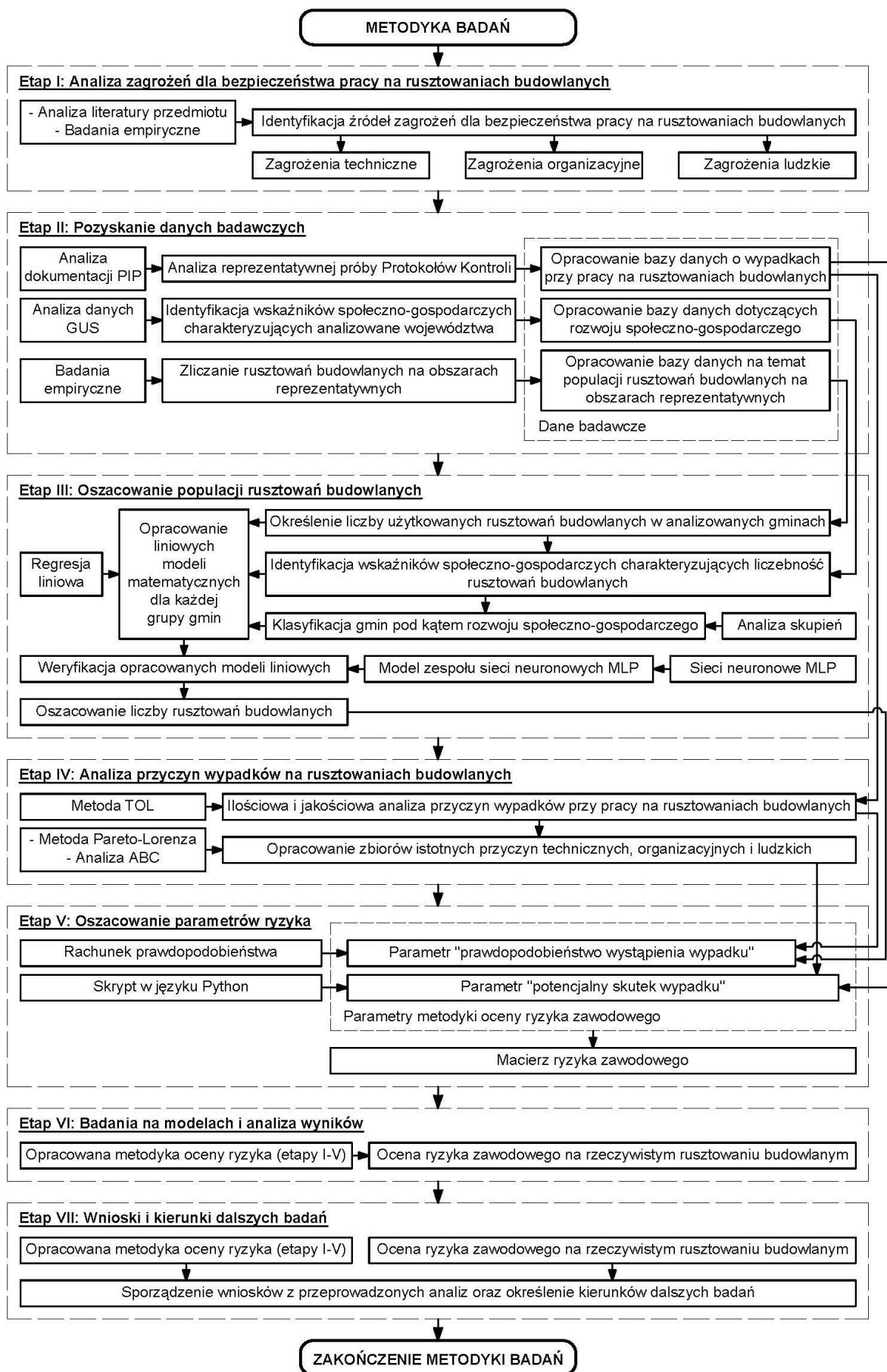
- rodzaje zagrożeń jakie mogą wystąpić na stanowisku pracy,
- prawdopodobieństwo wystąpienia określonego zagrożenia,
- informacja na temat ciężkości skutków jakie spowodować może aktywne zagrożenie.

W celu rozwiązania postawionego zadania badawczego, opracowano autorską metodykę oceny ryzyka zawodowego prac prowadzonych z wykorzystaniem rusztowań budowlanych. Zaproponowana metodyka składa się z 7 etapów:

- Etap I obejmował analizę zagrożeń dla bezpieczeństwa pracy na rusztowaniach budowlanych. W ramach tego etapu wykonano analizę literatury przedmiotu oraz badania empiryczne mające na celu identyfikację potencjalnych źródeł zagrożeń.
- Etap II obejmował pozyskanie danych badawczych. W tym celu przeprowadzono:
 - badania dokumentacji związanej z wypadkami przy pracy, udostępnionej przez Okręgowe Państwowe Inspektoraty Pracy (OPIP),
 - badania danych statystycznych opublikowanych przez Główny Urząd Statystyczny (GUS), obejmujących informacje na temat wartości wskaźników społeczno-gospodarczych,
 - badania empiryczne polegające na zliczaniu rusztowań budowlanych eksploatowanych w wybranych, reprezentatywnych obszarach analizowanych województw.
- Etap III obejmował badania związane z oszacowaniem populacji rusztowań budowlanych. W ramach tego etapu opracowano modele matematyczne pozwalające na oszacowanie populacji eksploatowanych rusztowań budowlanych w analizowanych województwach. Do opracowania powyższych modeli wykorzystano dane liczbowe zgromadzone podczas realizacji etapu II obejmujące: dane statystyczne na temat wskaźników społeczno-gospodarczych oraz wyniki badań empirycznych, polegających na zliczaniu rusztowań budowlanych na wytypowanych obszarach reprezentatywnych.

- Etap IV obejmował analizę przyczyn wypadków na rusztowaniach budowlanych. Jej efektem było opracowanie zbiorów przyczyn, które w istotny sposób wpływają na wystąpienie wypadku przy pracy.
- Etap V polegał na oszacowaniu parametrów ryzyka zawodowego. Zaproponowana w pracy metodyka oceny ryzyka została oparta na dwóch parametrach ryzyka: „prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku” oraz „potencjalny skutek wypadku”.
- Etap VI obejmuje badania na modelach i analizę otrzymanych wyników.
- Etap VII obejmuje sformułowanie wniosków i określenie kierunków dalszych badań.

Wszystkie etapy metodyki zostały przedstawione na rys. 3.1 i szerzej scharakteryzowane w kolejnych podrozdziałach. Wszystkie dane liczbowe wykorzystane w trakcie obliczeń mają charakter a posteriori.



Rys. 3.1 Ogólny schemat zaproponowanej metodyki badań własnych (opracowanie własne)

3.1. Etap I – Analiza zagrożenia dla bezpieczeństwa pracy na rusztowaniach budowlanych

W celu identyfikacji źródeł zagrożeń dla bezpieczeństwa pracy na rusztowaniach budowlanych dokonano przeglądu literatury przedmiotu obejmującego w szczególności raporty statystyczne publikowane przez Państwową Inspekcję Pracy.

Analiza literatury przedmiotu została dodatkowo wzbogacona badaniami empirycznymi przeprowadzonymi przez autora dysertacji. W badaniach tych wykonano m.in. analizę typowego rusztowania elewacyjnego przy użyciu bezzałogowego statku powietrznego (tzw. drona). Wynikiem powyższych badań był jakościowy opis nieprawidłowości zidentyfikowanych podczas kontroli konstrukcji rusztowania.

Na zakończenie powyższego etapu, dokonano szczegółowej analizy zagrożeń wybranych wypadków przy pracy związanych z pracą na rusztowaniach budowlanych, które wydarzyły się w przeszłości.

3.2. Etap II – Pozyskanie danych badawczych

Uzupełnieniem danych jakościowych, uzyskanych na podstawie analizy literatury przedmiotu, były dane ilościowe, które pozyskano na podstawie przeprowadzonych badań:

- dokumentacji związanej z wypadkami przy pracy, tj. protokołów kontroli powypadkowej udostępnionych przez Okręgowe Państwowe Inspektoraty Pracy (OPIP),
- danych statystycznych, obejmujących informacje na temat wartości wskaźników społeczno-gospodarczych, opublikowanych przez Główny Urząd Statystyczny (GUS),
- empirycznych, polegające na zliczaniu rusztowań budowlanych eksploatowanych w wybranych, reprezentatywnych obszarach analizowanych województw.

W Polsce, w okresie od przystąpienia naszego kraju do Unii Europejskiej do chwili obecnej (grudzień 2021 roku), zarejestrowano średnio ponad 7 000 wypadków przy pracy rocznie, związanych z branżą budowlaną [3]. Pomimo faktu, że w ostatnich latach obserwuje się poprawę poziomu bezpieczeństwa pracy (stopniowy spadek liczby wypadków w stosunku „rok do roku”), w dalszym ciągu około 30% spośród wszystkich wypadków stanowią zdarzenia związane z upadkiem z wysokości, w tym z rusztowań budowlanych. Ze względu na czas i koszty, które należałoby poświęcić na szczegółowe przeanalizowanie wszystkich wypadków związanych z pracą na rusztowaniach budowlanych, przeprowadzenie badań o tak szerokim

zakresie było niemożliwe. Z tego względu ograniczono obszar badań do województwa: dolnośląskiego, lubelskiego, łódzkiego, mazowieckiego i wielkopolskiego. Ponadto, przyjęty okres badań obejmował lata: od 2011 do 2017 roku (analiza dokumentacji związanej z wypadkami przy pracy), od 2010 do 2018 roku (badania danych statystycznych), od 2016 do 2018 roku (badania empiryczne). Powyższe ograniczenia wynikały m.in. z ograniczeń dostępu do miarodajnych danych badawczych oraz z okresu realizacji projektu badawczego: „*Model oceny ryzyka wystąpienia katastrof budowlanych, wypadków i zdarzeń niebezpiecznych na stanowiskach pracy z wykorzystaniem rusztowań budowlanych*” (ORKWiZ) [147], w trakcie, którego pozyskano część danych obliczeniowych.

Przyjęto założenie, że jeden wypadek odpowiada jednej osobie poszkodowanej. W sytuacji, w której w wypadku poszkodowane zostały dwie lub większa liczba osób, każdą osobę poszkodowaną traktowano jako oddzielny przypadek obliczeniowy.

3.3. Etap III – Oszacowanie populacji rusztowań budowlanych

Kluczowym etapem procesu oceny ryzyka zawodowego jest szacowanie poziomu ryzyka, które jest związane z wyznaczeniem prawdopodobieństwa: wystąpienia danego zagrożenia lub ekspozycji pracownika na zagrożenie. W analizach bezpieczeństwa pracy, związanych z użytkowaniem rusztowań budowlanych, przyjęto, że prawdopodobieństwo wystąpienia sytuacji niebezpiecznej jest definiowane jako: stosunek liczby rusztowań użytkowanych w analizowanym okresie w danym województwie, na których wystąpił wypadek przy pracy, do całkowitej liczby rusztowań, jakie były użytkowane w tym województwie w analizowanym okresie. W związku z powyższym, dla kompleksowego rozwiązania zagadnienia przedstawionego w niniejszej dysertacji, bardzo ważne jest poprawne oszacowanie populacji rusztowań wykorzystywanych podczas prac budowlanych.

W celu realizacji tak postawionego zadania opracowano autorską metodykę szacowania liczby rusztowań budowlanych za pomocą regresji liniowej, wykorzystując dostępne dane statystycznych oraz wyniki badań empirycznych przeprowadzonych w terenie.

Efektom przeprowadzonych badań są modele regresji liniowej pozwalające na oszacowanie liczby rusztowań na danym obszarze. Opracowane modele uwzględniają m.in. takie aspekty jak: stopień rozwoju i uprzemysłowienia danego regionu, liczbę mieszkańców, powierzchnię zurbanizowaną, a także kwartał roku. Poprawność predykcji populacji rusztowań budowlanych za pomocą powyższych modeli została zweryfikowana za pomocą opracowanej niezależnej metody, opartej o sieci neuronowe.

3.4. Etap IV – Analiza przyczyn wypadków na rusztowaniach budowlanych

Każdy ze zidentyfikowanych wypadków przy pracy był spowodowany szeregiem przyczyn i nieprawidłowości typowych dla danego zdarzenia. W Polsce rozpowszechnioną metodą klasyfikacji przyczyn wypadków przy pracy jest metoda TOL [21], która zakłada, że każdy wypadek jest wynikiem trzech rodzajów przyczyn, a mianowicie: technicznych *T*, organizacyjnych *O* lub ludzkich *L*.

Na potrzeby przeprowadzonych badań wykorzystano powyższą klasyfikację przyczyn wypadków oraz wykonano ich szczegółową analizę, której celem było uzyskanie informacji o strukturze jakościowej i ilościowej przyczyn powodujących największą liczbę wypadków przy pracy z udziałem rusztowań budowlanych. W tym celu opracowano autorską metodykę klasyfikacji wypadków w aspekcie ich przyczyn, której podstawą jest analiza Pareto-Lorenza oraz klasyfikacja ABC. Na podstawie wnikliwej analizy tych informacji opracowano zbiory przyczyn technicznych *T*, organizacyjnych *O* i ludzkich *L*, które mają istotny wpływ na zaistnienie wypadku.

3.5. Etap V – Oszacowanie parametrów ryzyka zawodowego

Wykonane w trakcie realizacji wcześniejszych etapów badań analizy pozwoliły na wyznaczenie liczby wypadków związanych z rusztowaniami budowlanymi z podziałem na poszczególne regiony kraju oraz lata. W połączeniu z oszacowaną liczbą rusztowań budowlanych (wyznaczoną na etapie III), dane te umożliwiły wyznaczenie prawdopodobieństwa a posteriori wystąpienia wypadku przy pracy. Otrzymane wartości zostały wykorzystane do opracowania skali oceny parametru „prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku”. Drugim parametrem jest „potencjalny skutek wypadku”, wyznaczony na podstawie wyników uzyskanych w trakcie realizacji IV etapu badań.

Wyznaczone parametry oceny ryzyka mają bezpośrednie przełożenie na praktyczną ocenę ryzyka zawodowego prac prowadzonych z wykorzystaniem rusztowań budowlanych. Użytkownik zaproponowanej metodyki, na podstawie lokalizacji i okresu użytkowania danego rusztowania może dopasować odpowiedni poziom parametru „prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku”. Następnie, na podstawie liczby oraz rodzaju zidentyfikowanych na analizowanym rusztowaniu nieprawidłowości, możliwe jest określenie parametru „potencjalny skutek wypadku”. Użytkownik metodyki, łącząc powyższe parametry za pomocą zaproponowanej macierzy ryzyka, każdorazowo otrzymuje wartość poziomu ryzyka dla danego przypadku obliczeniowego.

3.6. Etap VI – Badania na modelach i analiza wyników

W trakcie realizacji etapu VI przeprowadzone zostały obliczenia matematyczne, wykonane przy użyciu opracowanych modeli matematycznych, których przedmiotem było rzeczywiste rusztowanie budowlane. Przeprowadzone obliczenia pozwoliły na weryfikację poprawności przyjętych na etapie badań założeń oraz sprawdzenie przydatności zaproponowanej metodyki oceny ryzyka zawodowego prac prowadzonych z wykorzystaniem rusztowań budowlanych w praktyce inżynierskiej.

3.7. Etap VII – Wnioski i kierunki dalszych badań

Wszystkie wyniki, uzyskane na poszczególnych etapach prowadzonych badań, były podstawą do sformułowania szczegółowych wniosków końcowych oraz określenia kierunków dalszych badań.

4. Analiza zagrożeń dla bezpieczeństwa pracy na rusztowaniach budowlanych

Dotychczasowe doświadczenia pokazują, że dużym problemem na wielu budowach stanowi poprawne i zgodne z przepisami użytkowanie rusztowań budowlanych. Niestety, częstą praktyką jest montowanie i użytkowanie rusztowań w sposób nieprawidłowy, a w skrajnych przypadkach naganny. Jak pokazują dane Państwowej Inspekcji Pracy z ostatnich lat [148], każdego roku prawie na co drugiej skontrolowanej budowie, stwierdza się nieprawidłowości związane bezpośrednio z montażem i użytkowaniem rusztowań budowlanych. Odsetek skontrolowanych przez inspektorów OPIP budów, na których stwierdzono nieprawidłowości związane z rusztowaniami wynosi: 47% – 2018r., 45% – 2019r., 44% – 2020r. Identyfikowane przez PIP nieprawidłowości najczęściej dotyczą:

- montowania rusztowań w sposób nietypowy i niezgodny z dokumentacją producenta,
- braków balustrad w zabezpieczeniu pomostów roboczych,
- braków bądź nieprawidłowo użytkowanych pomostów roboczych,
- niewłaściwego zakotwienia rusztowania lub jego brak,
- dopuszczenie rusztowań do eksploatacji bez dokonania wymaganych odbiorów.

Dodatkowo, w samym tylko 2020 roku, w ponad 300 przypadkach inspektorzy Państwowej Inspekcji Pracy zidentyfikowali bezpośrednie zagrożenia dla bezpieczeństwa publicznego wynikające z nieprawidłowego użytkowania rusztowania budowlanego na terenie budowy [148].

Tak duża skala zaniedbań oraz fakt, że rusztowania budowlane wykorzystywane są niemal na każdym placu budowy powoduje, że mogą one generować różnego rodzaju zagrożenia, na które narażeni są nie tylko pracownicy budowlani, ale również osoby postronne.

4.1. Źródła zagrożeń dla bezpieczeństwa pracy

Źródła zagrożeń dla bezpieczeństwa pracy na rusztowaniach budowlanych mogą mieć różny charakter, m.in.: techniczny, organizacyjny lub ludzki. W dalszej części pracy pokrótce scharakteryzowano najważniejsze z nich, przedstawiając przykłady nieprawidłowości, które zidentyfikowano podczas badań własnych.

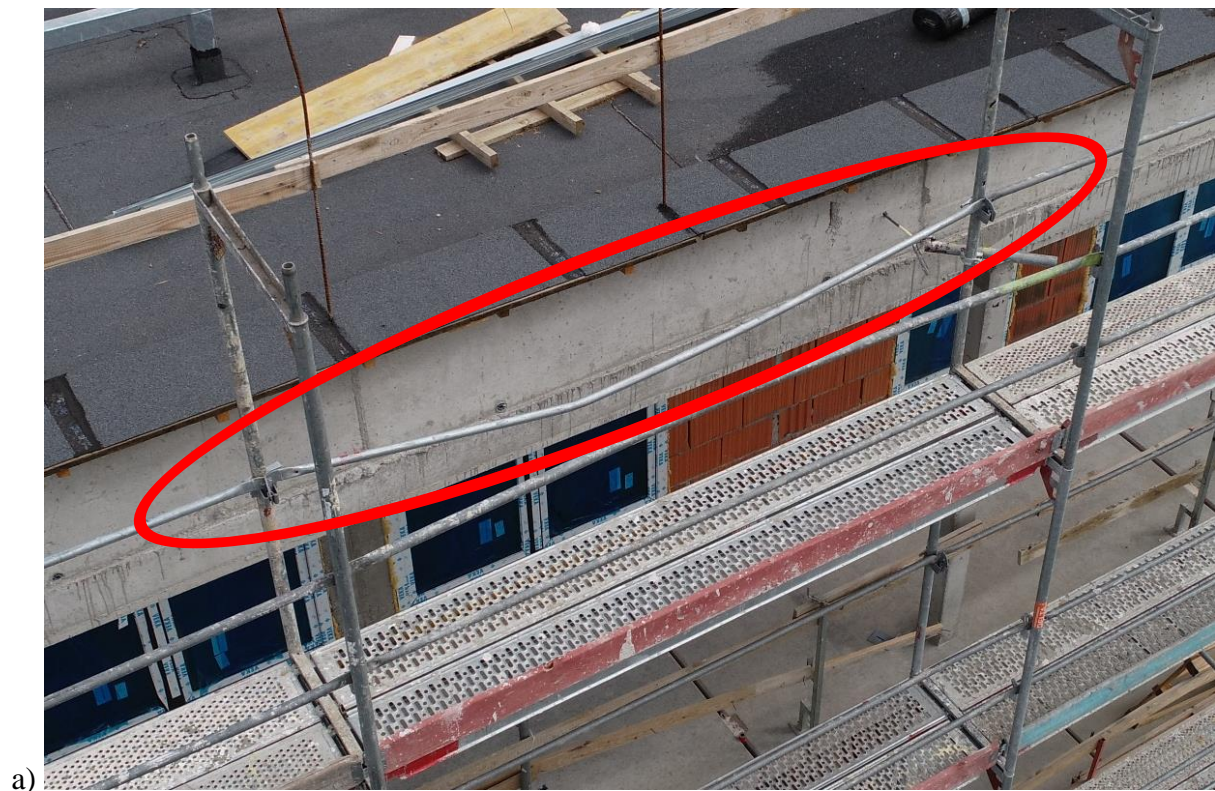
4.1.1. Zagrożenia techniczne

Zagrożenia techniczne związane są m.in. z wadami i uszkodzeniami elementów rusztowań wykorzystywanych podczas prowadzonych prac budowlanych oraz ich niewłaściwą eksploatacją. W przypadku rusztowań budowlanych jednym z najczęściej spotykanych źródeł

zagrożenia technicznego są nieprawidłowości związane z balustradami ochronnymi. Przykładem takiej nieprawidłowości jest niekompletna (rys. 4.1) lub uszkodzona (rys. 4.2) balustrada, która nie stanowi wystarczającego zabezpieczenia dla pracowników budowlanych i może być bezpośrednią przyczyną upadku z wysokości.



Rys. 4.1 Widok na balustradę – brak belek krawężnikowych na dwóch sąsiednich polach
(opracowanie własne z wykorzystaniem BSP)



Rys. 4.2 Widok na uszkodzoną: a) poręcz górną balustrady, b) belkę krawężnikową
(opracowanie własne z wykorzystaniem BSP)

4.1.2. Zagrożenia organizacyjne

Kolejnym źródłem generującym zagrożenia dla bezpiecznej pracy są błędy organizacyjne związane m.in. z niewłaściwą organizacją procesu pracy i stanowiska pracy. Elementem inicjującym powstanie zagrożenia tego typu jest między innymi dopuszczenie pracowników bez wcześniejszego przygotowania do prowadzenia prac w środowisku, w którym występują bezpośrednie zagrożenia związane m.in.:

- czynnymi, napowietrznymi liniami energetycznymi;
- ciekami i zbiornikami wodnymi;
- czynnymi drogami i szlakami kolejowymi.

Innym, niestety bardzo często spotykanym w praktyce źródłem zagrożeń organizacyjnych są uchybienia i nieprawidłowości w stosowaniu przez pracowników środków ochrony indywidualnej podczas wykonywania pracy na wysokości. Na rys. 4.3. przedstawiono proces montowania rusztowania przez pracowników, którzy nie są wyposażeni w podstawowe środki ochrony indywidualnej – m.in. pracownicy nie posiadają uprząży ochronnej oraz hełmów.



Rys. 4.3 Widok na pracowników montujących rusztowanie budowlane, nieposiadających odpowiednich środków ochrony indywidualnej (opracowanie własne)

4.1.3. Zagrożenia ludzkie

Według danych statystycznych, najczęściej występującym czynnikiem inicjującym powstanie wypadku przy pracy jest błąd człowieka. Potwierdzają to dane Państwowej Inspekcji Pracy za 2020 rok [148], według których 48,5% wszystkich zarejestrowanych wypadków przy pracy spowodowanych było przyczynami ludzkimi, takimi jak (m.in.):

- nieprawidłowe zachowanie pracownika i lekceważenie zagrożenia,
- nieprawidłowe stosowanie sprzętu ochronnego,
- spożycie alkoholu, środków odurzających lub substancji psychotropowych.

Ostatnia z wymienionych powyżej przyczyn (spożywanie przez pracowników budowlanych alkoholu) stanowiła jeden z przedmiotów badań własnych [149], w których wykazano istotny związek między spożywaniem alkoholu przez pracowników budowlanych, a liczbą wypadków. Dodatkowo, w przeanalizowanym na potrzeby badań zbiorze 219 wypadków, aż w 17,4% alkohol wskazano jako główną przyczynę wypadku. Niestety, jak wykazano w powyższych badaniach, w dalszym ciągu, na części budów prowadzonych w naszym kraju, występuje problem spożywania alkoholu przez pracowników podczas prac budowlanych – rys. 4.4.



Rys. 4.4 Widok na pozostawione na terenie budowy: a) puszki po piwie, b) butelki po piwie
(źródło fotografii: [149])

4.2. Wybrane wypadki z udziałem rusztowań

W poniższym rozdziale krótko scharakteryzowano wybrane wypadki i katastrofy budowlane związane z użytkowaniem rusztowań budowlanych, jakie wydarzyły się w ostatnim dziesięcioleciu w Polsce.

6 maja 2012 roku w Białymstoku zawaleniu uległa część rusztowania usytuowana przy czteropiętrowym budynku mieszkalnym. Główną przyczyną zdarzenia były błędy w montażu rusztowania, które przyczyniły się do zawalenia konstrukcji na odcinku o długości ok. 45 m i wysokości 15,5 m [150] wskutek silnego podmuchu wiatru. Waląca się konstrukcja spowodowała wyłącznie straty materialne.

1 lipca 2010 roku w Łodzi, podczas przemieszczania rusztowania „Warszawskiego” po placu budowy, pracownik budowlany nie zauważył napowietrznej linii elektroenergetycznej. W skutek tego przeoczenia, nastąpiło zetknięcie konstrukcji rusztowania z siecią elektryczną co doprowadziło do wypadku przy pracy. W wyniku powyższego zdarzenia porażony prądem elektrycznym został 32 letni mężczyzna [151].

25 czerwca 2012 roku, podczas wykonywania prac remontowych w Tomaszowie Mazowieckim, z rusztowania elewacyjnego spadł 37 letni mężczyzna [152]. W wyniku upadku z wysokości ok. 10 metrów poniósł on śmierć na miejscu. Bezpośrednią przyczyną wypadku był zły stan techniczny konstrukcji rusztowania (stwierdzono liczne braki w elementach zabezpieczających, w tym m.in. brak balustrad). Dodatkowo, w chwili wypadku, pracownik był pod wpływem alkoholu.

29 lipca 2012 roku podczas montażu rusztowania na terenie budowy Mostu Północnego w Warszawie, nastąpiło zawalenie części montowanej konstrukcji [153]. W wyniku tego zdarzenia pięciu robotników spadło do Wisły z wysokości ok 20 m. Niestety wypadek zakończył się tragicznie, ponieważ jeden z pracowników poniósł śmierć na miejscu.

23 maja 2017 roku na terenie budowy domu jednorodzinnego w Lublinie uszkodzony spadł z wysokości około 5 metrów [154]. Bezpośrednią przyczyną wypadku było przewrócenie się fragmentu wznoszonej konstrukcji dachu. Przewracająca się konstrukcja zaczepiła o rusztowanie i zrzuciła uszkodzonego na ziemię, a następnie przygniotła.

6 października 2020 roku w Tarnowie, w trakcie montażu rusztowania budowlanego, jeden z jej pracowników stracił równowagę i upadł na betonowy chodnik z wysokości około 9 m [155]. Uszkodowany zmarł w wyniku poniesionych obrażeń wewnętrznych.

5. Pozyskiwanie danych badawczych

Do przeprowadzenia przedstawionych w pracy badań niezbędne są dane ilościowe, stanowiące jednocześnie uzupełnienie informacji przedstawionych w poprzednim rozdziale. Wykorzystane w dalszych analizach dane ilościowe pozyskano z zasobów: Państwowej Inspekcji Pracy oraz Głównego urzędu Statystycznego. Dopełnienie bazy danych opracowanej na podstawie powyższych informacji, stanowią dane zgromadzone w wyniku przeprowadzonych badań empirycznych, polegających na zliczaniu rusztowań budowlanych eksploatowanych w wybranych, reprezentatywnych obszarach analizowanych województw.

5.1. Państwowa Inspekcja Pracy (PIP)

Państwowa Inspekcja Pracy (PIP) jest państwowym organem sprawującym nadzór i kontrolę nad przestrzeganiem przepisów prawa pracy, w szczególności ukierunkowanym na bezpieczeństwo i higienę pracy oraz przestrzeganie przepisów związane z zatrudnianiem pracowników.

Jednym z zadań Państwowej Inspekcji Pracy jest szczegółowa analiza wypadków przy pracy. Zbiorcze informacje na ich temat można znaleźć w corocznych sprawozdaniach, udostępnianych bezpłatnie na stronie internetowej Państwowej Inspekcji Pracy – www.pip.gov.pl [156]. Publikacje te stanowią obszerne źródło ogólnych informacji na temat stanu bezpieczeństwa pracy w kraju.

Z punktu widzenia prowadzonych i opisanych w dysertacji badań istotne były szczegółowe dane ilościowe i jakościowe na temat poszczególnych wypadków przy pracy, które miały miejsce w przeszłości. Takie informacje znaleźć można w protokołach powypadkowych sporządzanych przez inspektorów PIP każdorazowo po zaistnieniu wypadku.

Na potrzeby prowadzonych badań przeprowadzono analizę protokołów powypadkowych pozyskanych z zasobów Okręgowych Inspektoratów Państwowej Inspekcji Pracy. Celem tej analizy były poszukiwania informacji na temat wypadków przy pracy na rusztowaniach budowlanych, które wydarzyły się w okresie objętym badaniami. Spośród wszystkich przeanalizowanych protokołów powypadkowych do dalszych analiz wybrano wyłącznie protokoły zawierające informację na temat wypadków powiązanych z rusztowaniami budowlanymi. Analizie poddano wypadki lekkie, ciężkie oraz śmiertelne. Przyjęto założenie, że jeden wypadek odpowiada jednej osobie poszkodowanej. W sytuacji, w której w wypadku poszkodowane zostały dwie lub większa liczba osób, każdą osobę poszkodowaną traktowano jako oddzielny przypadek obliczeniowy.

Przeprowadzona analiza protokołów powypadkowych pozwoliła na zidentyfikowanie 200 wypadków przy pracy związanych z rusztowaniami budowlanymi, w których poszkodowanych zostało łącznie 213 osób. W tabeli 5.1 zamieszczono zbiorcze dane dotyczące liczby wypadków z udziałem rusztowań budowlanych oraz liczby osób poszkodowanych w tych wypadkach, z podziałem na regiony i lata. Zbiór danych na temat wypadków przy pracy zarejestrowanych przez PIP, który wykorzystano w trakcie badań, zamieszczono na końcu opracowania – załącznik nr I.

Tab. 5.1 Zestawienie liczby zidentyfikowanych wypadków przy pracy związanych z rusztowaniami budowlanymi w poszczególnych regionach i latach
(w nawiasie podano liczbę osób poszkodowanych)

Region	Rok							SUMA (Region)
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Dolnośląski	8 (8)	6 (6)	7 (7)	4 (4)	7 (7)	4 (4)	6 (6)	42 (42)
Lubelski	4 (4)	3 (4)	5 (5)	1 (1)	5 (5)	2 (2)	3 (3)	23 (24)
Łódzki	6 (7)	7 (9)	6 (7)	12 (12)	3 (3)	7 (7)	6 (6)	47 (51)
Mazowiecki	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (6)	5 (5)	5 (5)	35 (36)
Wielkopolski	8 (9)	8 (11)	8 (10)	8 (8)	8 (8)	5 (6)	8 (8)	53 (60)
SUMA (Rok)	31 (39)	29 (35)	31 (34)	30 (30)	28 (29)	23 (24)	28 (28)	200 (213)

Ilościowa analiza zidentyfikowanych wypadków wskazuje, że w badanym przedziale czasu najwięcej wypadków z udziałem rusztowań budowlanych zdarzyło się w regionie wielkopolskim (53), następnie w regionie łódzkim (47) i dolnośląskim (42), a najmniej w regionie mazowieckim (35) i lubelskim (23). W poszczególnych latach liczba wypadków zmieniała się w granicach od 23 zdarzeń w 2016 roku do 31 zdarzeń w 2011 i 2013 roku.

Każdy ze zidentyfikowanych wypadków, spowodowany był zbiorem różnych przyczyn technicznych organizacyjnych i ludzkich. Zbiór wszystkich wypadków oraz ich przyczyn stanowił bazę danych do obliczeń przedstawionych w dalszej części pracy.

5.2. Główny Urząd Statystyczny (GUS)

Główny Urząd Statystyczny (GUS) stanowi centralny urząd administracji rządowej zajmujący się pozyskiwaniem i udostępnianiem danych statystycznych. Dane statystyczne publikowane są m.in. w formie:

- Roczników Statystycznych publikowanych corocznie dla poszczególnych województw [17],
- Opracowań tematycznych, obejmujących zbiorcze informacje statystyczne dotyczące całego kraju – m.in. dotyczące warunków pracy [157] oraz wypadkowości [158],
- Internetowej bazy danych opracowanej i administrowanej przez GUS – tzw. Bank Danych Lokalnych [3],

Główny przedmiot badań opisanych w dysertacji stanowią rusztowania budowlane, które są konstrukcją tymczasową powszechnie stosowaną w trakcie prac prowadzonych na wysokości, we wszystkich obszarach budownictwa. W związku z powyższym, ich liczba jest bezpośrednio związana z liczbą prowadzonych inwestycji, która zależy m.in. od zapotrzebowania na nowe inwestycje budowlane i remonty starych obiektów. Zapotrzebowanie na inwestycje budowlane jest natomiast bezpośrednią pochodną rozwoju gospodarczego danego regionu, liczby jego mieszkańców oraz liczby firm powiązanych z branżą budowlaną.

W związku z powyższym można postawić hipotezę (która zostanie zweryfikowana w dalszej części pracy), że liczba rusztowań budowlanych jest skorelowana z różnymi wskaźnikami gospodarczymi charakteryzującymi dany region. Informacje na temat kształtowania się wartości wskaźników gospodarczych na przestrzeni lat można pozyskać m.in. z danych statystycznych publikowanych przez Główny Urząd Statystyczny [3]. Do przedstawionej w dysertacji analizy wytypowano 11 różnych wskaźników gospodarczych I_n ($n = 1, \dots, 11$), które charakteryzują analizowane województwa kraju pod kątem rozwoju społeczno-gospodarczego, a które mogą mieć wpływ na liczbę użytkowanych rusztowań. Są to:

- liczba przedsiębiorstw budowlanych realizująca roboty związane z wznoszeniem budynków [szt.] – I_1 ,
- liczba przedsiębiorstw budowlanych realizująca roboty związane z budową obiektów inżynierii lądowej i wodnej [szt.] – I_2 ,
- liczba przedsiębiorstw budowlanych realizująca roboty specjalistyczne [szt.] – I_3 ,

- liczba osób fizycznych prowadzących działalność gospodarczą w budownictwie [szt.] – I_4 ,
- liczba nowododanych do użytkowania budynków mieszkalnych [szt.] – I_5 ,
- liczba ludności [l. osób] – I_6 ,
- liczba mieszkań w miastach [szt.] – I_7 ,
- liczba mieszkań na wsi [szt.] – I_8 ,
- powierzchnia gminy [km²] – I_9 ,
- liczba osób pracujących w gminie [l. osób] – I_{10} ,
- powierzchnia gruntów zabudowanych i zurbanizowanych w gminie [km²] – I_{11} .

Przyjęte wskaźniki (I_1, I_2, I_3, I_4) charakteryzują branżę budowlaną pod kątem liczby działających firm, wskaźniki (I_5, I_7, I_8) charakteryzują regiony pod kątem istniejących i oddanych do użytkowania nowych mieszkań. Pozostałe wskaźniki charakteryzują odpowiednio: stan ludności (I_6, I_8), zatrudnienie (I_{10}), całkowitą powierzchnię gminy (I_9) oraz powierzchnię gminy, na której potencjalnie mogą być użytkowane rusztowania budowlane (I_{11}). Wartości liczbowe poszczególnych wskaźników, pozyskano z Roczników Statystycznych Województw [17] oraz Banku Danych Lokalnych [3]. Jednostką obmiarową był jeden kwartał. W tab. 5.1 przedstawiono fragment zgromadzonych danych. Cały zbiór danych wykorzystanych w analizach, zamieszczono na końcu opracowania – załącznik nr II.

Tab. 5.2 Wartości wybranych wskaźników gospodarczych – dane dla wybranych gmin województwa dolnośląskiego (opracowanie własne na podstawie [3], [17])

Gmina	Rok / kwartał	Wskaźnik gospodarczy I_n				
		Liczba przedsiębiorstw budowlanych realizująca roboty związane z wznoszeniem budynków	...	Liczba ludności	...	Powierzchnia gruntów zabudowanych i zurbanizowanych w gminie
Wrocław	2010 / 1	3 439	...	630 256	...	126,37
	2010 / 2	3 439	...			
	2010 / 3	3 464	...	630 691	...	

Tab. 5.2 (c.d.) Wartości wybranych wskaźników gospodarczych – dane dla wybranych gmin województwa dolnośląskiego (opracowanie własne na podstawie [3], [17])

	2010 / 4	3 488		
	
	2018 / 1	4 088	...	639 258	...	126,37	
	2018 / 2	4 156	...		...
	2018 / 3	4 086	...	640 648	...		
	2018 / 4	4 142	...		...
Jelcz- Laskowice	2010 / 1	140	...	22 690	...		11,29
	2010 / 2	140	...		...
	2010 / 3	144	...	22 802	...		
	2010 / 4	147	...		...
	
	2018 / 1	118	...	23 273	...	11,29	
	2018 / 2	119	...		...
	2018 / 3	119	...	23 286	...		
	2018 / 4	120	...		...
	Stare Bogaczowice	2010 / 1	15	...	4 229		...	3,35
2010 / 2		15	...	...	
2010 / 3		15	...	4 253	...		
2010 / 4		15	...		...
...		
2018 / 1		20	...	4 281	...	3,35	
2018 / 2		20	...		...
2018 / 3		19	...	4 298	...		
2018 / 4		20	...		...

5.3. Badania empiryczne

Bardzo ważnym elementem prowadzonych badań było empiryczne wyznaczenie liczby rusztowań na wytypowanych, reprezentatywnych obszarach kraju. W związku z powyższym przeprowadzono badania, polegające na zliczaniu rusztowań budowlanych w wybranych województwach polski. Ze względu na skalę badań, zostały one wykonane przez zespół kilkunastu osób w ramach realizacji jednego z zadań projektu badawczego: „*Model oceny ryzyka wystąpienia katastrof budowlanych, wypadków i zdarzeń niebezpiecznych na stanowiskach pracy z wykorzystaniem rusztowań budowlanych*” (ORKWiZ) [147].

Celem zrealizowanego zadania (wg [159]) było:

- oszacowanie całkowitej liczby rusztowań użytkowanych w danym miesiącu w danej miejscowości,
- oszacowanie zmienności liczby rusztowań na przestrzeni roku w danej miejscowości,
- określenia najczęściej występujących typów i wielkości rusztowań w danej miejscowości.

Kluczowe etapy zadania zostały przedstawione na rys. 5.1.



Rys. 5.1 Metodyka zliczania rusztowań budowlanych realizowana w ramach projektu badawczego ORKWiZ (opracowanie własne)

Zliczanie rusztowań odbywało się cyklicznie (nie rzadziej niż raz na dwa miesiące) w okresie od drugiego kwartału 2016 roku do trzeciego kwartału 2018 roku w stolicy analizowanych województw oraz wybranych miejscowościach – po pięć dla każdego województwa. Zakresem zliczania objęte zostały miejscowości zlokalizowane w województwie: dolnośląskim, lubelskim, łódzkim, mazowieckim i wielkopolskim.

Spośród sumarycznej liczby 30 wybranych do analizy miejscowości, w każdym województwie przynajmniej jedna miejscowość jest miastem wojewódzkim oraz przynajmniej jedna miejscowość jest miastem satelickim stolicy województwa. Dodatkowo, minimum dwie miejscowości są miastami powiatowymi, nie będącymi jednocześnie miastami satelickimi stolicy województwa [159] – rys. 5.2.



Rys. 5.2 Miejsowości w których wykonano zliczanie rusztowań budowlanych
(opracowanie własne, na podstawie [160])

W każdej spośród 30 przyjętych do analizy miejscowości wytypowano tzw. „obszary zliczania”, które w sposób reprezentatywny oddają m.in. charakter zabudowy danego miasta. Obszary zliczania, w zależności od wielkości analizowanej miejscowości obejmowały:

- w przypadku miast dużych (o powierzchni większej niż 12 km², z obszarami o dominującym typie zabudowy – np. zabudowie przemysłowej): min. 6 podobszarów o zróżnicowanym typie zabudowy, o powierzchni ok. 3 km² i łącznej powierzchni podobszarów nie mniejszej niż 16 km²;
- w przypadku miast średnich (o powierzchni większej niż 12 km², bez obszarów o dominującym typie zabudowy): powierzchnia zliczania nie mniejsza niż 12 km²;
- w przypadku miast małych (o powierzchni mniejszej niż 12 km²): powierzchnia zliczania równa powierzchni miejscowości.

Przykładowo, jednym z analizowanych miast był Wrocław – stolica województwa dolnośląskiego. We Wrocławiu, zgodnie z przyjętymi założeniami, wyznaczono 6 reprezentatywnych podobszarów (rys. 5.3), w których cyklicznie wykonywano zliczanie. Charakterystyka wybranych do analizy podobszarów została zawarta w tab. 5.3.



Rys. 5.3 Wytypowane do analizy podobszary Wrocławia
(opracowanie własne, na podstawie [160])

Tab. 5.3 Charakterystyka wytypowanych do analizy podobszarów Wrocławia

Podobszar	Rodzaj zabudowy	Powierzchnia [km ²]
WRO3	Zabudowa jednorodzinna nowa	3,26
WRO4	Dzielnica przemysłowa stara	3,12
WRO6	Zabudowa wielorodzinna stara	4,35
WRO7	Śródmieście stare	2,89
WRO8	Zabudowa wielorodzinna nowa	3,00
WRO11	Zabudowa wielorodzinna stara i w budowie	3,44
SUMA		20,06

Przedmiotem zliczania (wg [159]) objęte były wszystkie rusztowania, zlokalizowane w miejscach ogólnodostępnych wytypowanych obszarów zliczania, pełniące rolę tymczasowej konstrukcji umożliwiającej wykonywanie prac na wysokości. Podczas zliczania przyjęto następujące założenia:

- za jedno rusztowanie uznaje się rusztowanie obsługujące jeden budynek;
- w sytuacji, w której budynek obsługiwany jest przez więcej niż jedno rusztowanie przyjmuje się, że liczba rusztowań przyjmuje wartość jeden;
- nie zlicza się rusztowań pełniących inną funkcję aniżeli tymczasowej konstrukcji umożliwiającej wykonywanie prac na wysokości (np. rusztowań pod banery reklamowe);
- jako rusztowanie traktuje się konstrukcję: kompletną, niekompletną, w trakcie montażu, demontażu lub w trakcie użytkowania.

Tak przeprowadzone badania pozwoliły na zgromadzenie dużej liczby informacji na temat populacji rusztowań budowlanych – kompletny zbiór danych wykorzystanych w analizach, zamieszczono na końcu opracowania (załącznik nr III). Fragment zgromadzonych danych przedstawiono w tab. 5.4.

Tab. 5.4 Fragment danych zgromadzonych w wyniku zliczania rusztowań na obszarach reprezentatywnych – województwo dolnośląskie

Rok / miesiąc	Miejscowość					
	Wrocław	Jawor	Jelcz- Laskowice	Siechnice	Środa Śląska	Świdnica
2016 / 1	-	-	-	-	-	-
2016 / 2	-	-	-	-	-	-
2016 / 3	-	-	-	-	-	-
2016 / 4	39	10	2	1	8	3
2016 / 5	47	7	6	0	8	6
2016 / 6	45	9	5	1	10	7*
2016 / 7	55	9*	2	7	9*	7
2016 / 8	61*	8	4*	6*	8	6
2016 / 9	67	9*	6	5	16	10*
2016 / 10	60*	9	5*	6*	11	13
2016 / 11	53	4	4	6	9*	8*
2016 / 12	45*	5*	4*	6*	6	3
* – liczba rusztowań wyznaczona na podstawie sąsiednich miesięcy, jako średnia arytmetyczna zaokrąglona do pełnych wartości						

6. Oszacowanie populacji rusztowań budowlanych

Jak zauważono w przeglądzie literatury, rusztowania budowlane są konstrukcją powszechnie stosowaną podczas prowadzenia prac budowlanych. Fakt ten powoduje, że precyzyjne określenie liczby eksploatowanych rusztowań budowlanych jest zadaniem bardzo pracochłonnym i kosztownym, a w przypadku dużego obszaru badań niemożliwym wręcz do wykonania. Przeprowadzone wnikliwe rozpoznanie literaturowe wykazało, że brakuje opracowań naukowych dotyczących szacowania populacji rusztowań w budownictwie. Spostrzeżenie to zainicjowało prowadzenie badań własnych autora dysertacji [161], mających na celu opracowanie autorskiej metodyki szacowania liczby rusztowań budowlanych za pomocą powszechnie dostępnych narzędzi i metod matematycznych oraz danych statystycznych, a także obserwacji prowadzonych w terenie.

Proponowana metodyka składa się z następujących etapów:

- Empirycznego określenia liczby użytkowanych rusztowań, polegającego na przekształceniu danych empirycznych zgromadzonych dla obszarów reprezentatywnych na dane charakteryzujące daną miejscowość,
- Analizy wskaźników gospodarczych wpływających na liczbę rusztowań budowlanych – powyższy etap polegał na zbadaniu siły korelacji występującej pomiędzy wybranymi wskaźnikami gospodarczymi oraz rzeczywistą liczbą rusztowań budowlanych,
- Klasyfikacji gmin pod kątem rozwoju społeczno-gospodarczego z wykorzystaniem analizy skupień,
- Opracowania modeli matematycznych pozwalających na predykcję liczby eksploatowanych rusztowań budowlanych,
- Weryfikacji opracowanych modeli z zastosowaniem alternatywnej metody obliczeń – modelu zespołu sieci neuronowych MLP,
- Końcowego oszacowania liczby rusztowań budowlanych i analizy wyników.

Szczegółową charakterystykę i praktyczną implementację zaproponowanej metodyki przedstawiono w dalszej części pracy.

6.1. Empiryczne określenie liczby użytkowanych rusztowań

Zgromadzone w wyniku przeprowadzonych badań empirycznych informacje na temat liczby użytkowanych rusztowań budowlanych, przedstawiają liczbę rusztowań na reprezentatywnych obszarach danej miejscowości. Ze względu na charakter i cel niniejszej

pracy, oczekiwaną wartością jest liczba rusztowań charakteryzująca daną miejscowość (gminę). W związku z powyższym niezbędne do wykonania dalszych analiz było przekształcenie posiadanej bazy danych na powierzchnię całej gminy. Dokonano tego przyjmując zabudowaną powierzchnię gminy jako wyznacznik powierzchni danej miejscowości, na której potencjalnie mogą występować rusztowania budowlane. Informacje ilościowe na temat powierzchni zabudowanej danej miejscowości uzyskano z zasobów GUS [3]. Zbudowana na podstawie badań empirycznych baza danych na temat rusztowań budowlanych została przekształcona przez autora dysertacji na dane charakteryzujące obszar danej gminy według poniższego wzoru:

$$L_{R,g,r,m} = \frac{l_{R,g,r,m}}{o_g} * O_{g,r}$$

gdzie:

$L_{g,r,n}$ – liczba rusztowań przypadająca na zabudowaną powierzchnię gminy,

$l_{g,r,n}$ – liczba rusztowań wyznaczona na reprezentatywnych obszarach podczas badań empirycznych,

o_g – obszar zliczania w danej gminie, na którym wykonano zliczanie [km^2]
($o = 1, 2, 3, \dots, O$),

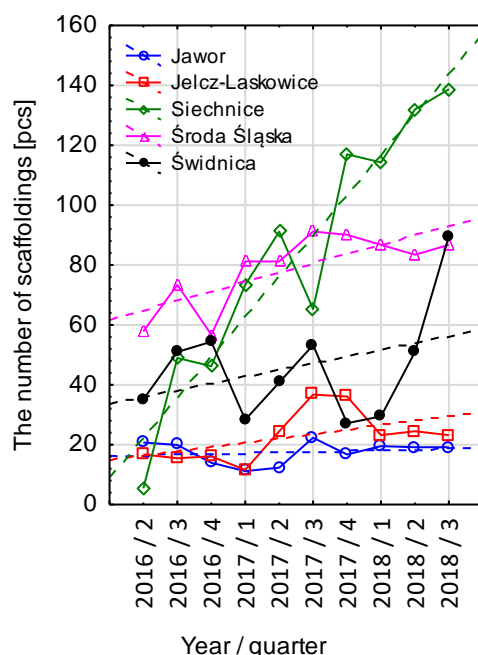
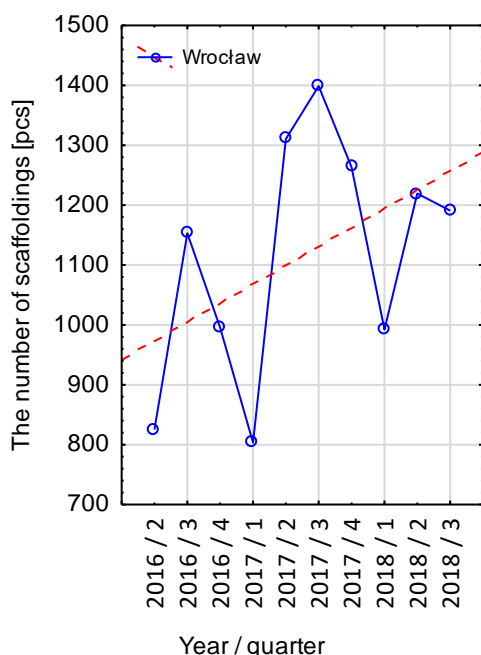
O_g – obszar danej gminy, na którym występują zabudowanie [km^2] (wyznaczony według danych GUS [3]),

g – gmina ($g = 1, 2, 3, \dots, G$),

r – rok ($r = 2016, 2017, 2018$),

m – miesiąc ($m = 1, 2, 3, \dots, 12$).

Tak przeprowadzona analiza umożliwiła uzyskanie danych liczbowych, charakteryzujących wybrane gminy pod kątem liczby rusztowań występujących w danym miesiącu. Dane miesięczne na temat liczby rusztowań zostały następnie zsumowane w dane kwartalne. Na rys. 6.1 przedstawiono fragment uzyskany wyników dla sześciu miejscowości województwa dolnośląskiego.



a)

b)

Rys. 6.1 Wyznaczona liczba rusztowań w analizowanych miejscowościach regionu dolnośląskiego w okresie od 2016 roku do 2018 roku: a) stolica regionu, b) pozostałe analizowane miejscowości (opracowanie własne)

Na podstawie przebiegu wykresów można zauważyć zdecydowaną różnicę w liczbie eksploatowanych rusztowań w gminie Wrocław i w pozostałych gminach regionu dolnośląskiego. Widoczna jest również, szczególnie w dużych gminach, różnica w liczbie rusztowań użytkowanych w poszczególnych kwartałach roku. Dodatkowo, zauważalna jest tendencja wzrostowa liczby eksploatowanych rusztowań budowlanych.

6.2. Wskaźniki gospodarcze wpływające na liczbę rusztowań budowlanych

Jak wcześniej zasygnalizowano, liczba rusztowań budowlanych jest związana z różnymi wskaźnikami gospodarczymi charakteryzującymi dany region. Potwierdzeniem tak postawionej hipotezy są wysokie wartości współczynników korelacji Pearsona między wartościami poszczególnych wskaźników gospodarczych I_n i liczbą eksploatowanych rusztowań budowlanych, jaka została określona na podstawie badań empirycznych. Wyznaczone wartości współczynników korelacji Pearsona R_n zamieszczono w tab. 6.1.

Tab. 6.1 Wartości współczynników korelacji

I_n	Wskaźnik gospodarczy	Współczynnik korelacji Pearsona R_n
I_1	Liczba przedsiębiorstw budowlanych realizująca roboty związane z wznoszeniem budynków [szt.]	0,970
I_2	Liczba przedsiębiorstw budowlanych realizująca roboty związane z budową obiektów inżynierii lądowej i wodnej [szt.]	0,891
I_3	Liczba przedsiębiorstw budowlanych realizująca roboty specjalistyczne [szt.]	0,970
I_4	Liczba osób fizycznych prowadzących działalność gospodarczą w budownictwie [szt.]	0,968
I_5	Liczba nowododanych do użytkowania budynków mieszkalnych [szt.]	0,870
I_6	Liczba ludności [l. osób]	0,956
I_7	Liczba mieszkań w miastach [szt.]	0,955
I_8	Liczba mieszkań na wsi [szt.]	-0,170
I_9	Powierzchnia gminy [km ²]	0,820
I_{10}	Liczba osób pracujących w gminie [l. osób]	0,970
I_{11}	Powierzchnia gruntów zabudowanych i zurbanizowanych w gminie [km ²]	0,942

Analizując otrzymane wartości współczynników korelacji można stwierdzić, że:

- wskaźniki: $I_1, I_3, I_4, I_6, I_7, I_{10}, I_{11}$ uzyskały korelację prawie pełną, dodatnią ($R_n \geq 0.9$),
- wskaźniki: I_2, I_5, I_9 uzyskały korelację bardzo silną, dodatnią ($R_n \geq 0.8$),
- wskaźnik I_8 uzyskał korelację słabą, ujemną ($R_8 = -0,17$).

Wysokie wartości współczynników korelacji Pearsona R_m , uzyskane dla większości przypadków, potwierdziły postawioną hipotezę, że liczba rusztowań budowlanych jest powiązana ze wskaźnikami społeczno-gospodarczymi charakteryzującymi daną gminę. Uzyskane wyniki świadczą również o tym, że możliwe jest opracowanie modelu

matematycznego pozwalającego na predykcję liczby eksploatowanych rusztowań budowlanych na podstawie wskaźników społeczno-gospodarczych I_n .

6.3. Klasyfikacja gmin pod kątem rozwoju społeczno-gospodarczego

Przeprowadzona, wstępna analiza pozyskanych danych statystycznych wykazała, że wartości poszczególnych wskaźników gospodarczych I_n dla różnych gmin są zróżnicowane. Związane jest to m.in. ze stopniem rozwoju i uprzemysłowienia danej gminy oraz liczby mieszkańców. Potwierdzeniem takiego stanu rzeczy są wcześniejsze badania własne autora dysertacji w zakresie analizy współczynników gospodarczych i branży budowlanej [110]–[112]. Badania te wykazały, że konieczne jest pogrupowanie zbioru danych pod kątem wielkości i rozwoju gospodarczego poszczególnych obszarów (w analizowanym przypadku gmin) przed przystąpieniem do właściwej analizy i modelowania badanego zjawiska. Wykonanie grupowania w sposób znaczący wpływa na dokładność wyników końcowych.

W związku z powyższym, przed opracowaniem modelu matematycznego pozwalającego na szacowanie populacji rusztowań budowlanych, konieczne było dokonanie klasyfikacji gmin G , gdzie $G = \{g: g = 1, \dots, 1099\}$, uwzględniającej różnice społeczno-gospodarcze poszczególnych regionów wyrażone za pomocą wskaźników gospodarczych I_n .

Przyjęte do obliczeń wartości wskaźników gospodarczych I_n różnią się między sobą m.in. jednostką pomiarową lub skalą, co może negatywnie wpłynąć na grupowanie [101]. Aby temu zaradzić wszystkie dane liczbowe należy poddać zabiegowi normalizacji, a wybór właściwej formuły normalizacyjnej zależy od rodzaju danych [162]. W proponowanej metodyce, jako metodę normalizacji, przyjęto standaryzację zmiennych, wg wzoru:

$$P_{n,g} = \frac{I_{n,g} - \bar{I}_n}{\sigma_n}$$

gdzie:

$P_{n,g}$ – wartości wskaźników gospodarczych I_n po standaryzacji dla gminy g ,

$I_{n,g}$ – wartości niestandaryzowanych wskaźników gospodarczych I_n dla gminy g ,

\bar{I}_n – wartość średnia w analizowanym zbiorze,

σ_n – odchylenie standardowe wartości wskaźnika I_n .

Efektom standaryzacji jest utworzenie zbioru parametrów P_G opisujących analizowany zbiór wszystkich gmin G , zapisanych w postaci dwuwymiarowej macierzy, w której każdy wiersz zawiera wartości wszystkich parametrów dotyczących jednej gminy, natomiast każda

kolumna zawiera dane dotyczące jednego parametru dla wszystkich gmin. Macierz ta dana jest wzorem:

$$P_G = \begin{bmatrix} P_{1,1} & \dots & P_{n,1} & \dots & P_{N,1} \\ P_{1,2} & \dots & P_{n,2} & \dots & P_{N,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{1,g} & \dots & P_{n,g} & \dots & P_{N,g} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{1,G} & \dots & P_{n,G} & \dots & P_{N,G} \end{bmatrix}$$

Wyliczone parametry stanowią podstawę do grupowania gmin z wykorzystaniem analizy skupień. Analiza skupień jest jedną z metod eksploracji danych, której główną ideą jest pogrupowanie analizowanych obiektów w taki sposób, aby w danej grupie znajdowały się obiekty „podobne” do siebie i zarazem „niepodobne” do obiektów z pozostałych grup [101], [102]. Kryterium oceny przynależności obiektu do danej grupy jest miara podobieństwa. W praktycznych rozważaniach, zastosowanie znajduje funkcja odwrotna do miary „podobieństwa”, czyli funkcja „niepodobieństwa” obiektów będąca miarą odległości między nimi. Oznacza to, że jeżeli odległość między obiektem O_a i O_b jest większa niż odległość pomiędzy obiektami O_a i O_c czyli:

$$d(O_a, O_b) > d(O_a, O_c); \quad \text{gdzie: } a \neq b \neq c; a, b, c \in \{g\}$$

to obiekt O_a jest bardziej „niepodobny” do obiektu O_b aniżeli do obiektu O_c . W konsekwencji prowadzi to do sytuacji, że obiekty O_a oraz O_c mogą tworzyć skupienie, ponieważ są bardziej do siebie „podobne”. W analizie skupień wykorzystywane są różne miary odległości. Do rozwiązania omawianego zadania zastosowano odległość geometryczną w przestrzeni wielowymiarowej, czyli odległość euklidesową [101]. Ogólny wzór odległości euklidesowej, przyjmuje następującą postać:

$$d(O_a, O_b) = \sqrt{\sum_n (P_{n,a} - P_{n,b})^2}$$

gdzie:

O_a, O_b – badane obiekty, czyli gminy a oraz b , gdzie $a \neq b$, oraz $a, b \in \{g\}$,

$P_{n,a}, P_{n,b}$ – wyznaczone wartości parametrów P_n dla gmin a oraz b , gdzie $a \neq b$ oraz $a, b \in \{g\}$.

W analizowanym zadaniu obiektami są poszczególne gminy g . Do grupowania obiektów w pierwszej kolejności proponuje się zastosowanie metody hierarchicznej oraz

aglomeracyjnej techniki grupowania, które pozwalają na wyznaczenie oczekiwanej liczby skupień k dla analizowanego zbioru danych [101]. Znając już oczekiwaną liczbę skupień k możliwe staje się wykonanie końcowej analizy grupowania gmin z zastosowaniem metody niehierarchicznej – grupowanie metodą k -średnich.

Technika aglomeracyjna, wykorzystywana najczęściej w badaniach [101], polega na stopniowym łączeniu obiektów, stanowiących odrębne skupienia, w nowe skupienia, aż do momentu kiedy wszystkie obiekty utworzą jedno skupienie. Każde połączenie się dwóch skupień nazywane jest krokiem. Istotnym zagadnieniem przy wyznaczaniu właściwej odległości między skupieniami, poza wyborem opisanej wyżej miary odległości, jest wyznaczenie metody wiązania obiektów. Przeanalizowano różne metody wiązania obiektów, a wśród nich metody, w których odległość wyznaczana jest między konkretnymi miejscami skupień (m.in. danym obiektem lub środkiem ciężkości skupienia) oraz metody, które wykorzystują analizę wariancji – m.in. metoda Warda [163]. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że najbardziej jednoznaczne rezultaty osiągnęte są przy zastosowaniu metody Warda, której główną zaletą jest grupowanie obiektów w sposób umożliwiający tworzenie się skupień o podobnej liczbie obiektów. Eliminuje się w ten sposób tzw. efekt łańcuchowania, a nowo utworzone skupienia charakteryzują się możliwie najmniejszym zróżnicowaniem pomiędzy poszczególnymi ich elementami. W opracowanej metodyce przyjęto sposób wiązania obiektów metodą Warda.

Wynikiem hierarchicznej analizy skupień jest wykres w kształcie drzewa – tzw. dendrogram. Obrazuje on, w którym kroku obiekty łączą się ze sobą. Nie daje on jednak jednoznacznej odpowiedzi, co do właściwej liczby skupień. Liczba ta zależy od miejsca odcięcia gałęzi drzewa na wykresie. W związku z powyższym, ważnym zadaniem jest właściwe wyznaczenie miejsca odcięcia. Wg [101] nie ma jednak obiektywnej reguły w jaki sposób należy to wykonać. Istnieją jedynie metody wspomagające, a wśród nich rozróżniamy m.in.: metodę graficznej analizy dendrogramu polegającą na zbadaniu odległości pomiędzy kolejnymi wiązaniami, metodę z wykorzystaniem miernika Grabińskiego [164] lub reguły Mojena [165]. W opracowanej metodyce zaproponowano metodę Grabińskiego [164], która opiera się na analizie odległości d_i pomiędzy kolejnymi wiązaniami oraz wyznaczeniu miernika q_i wg poniższego wzoru:

$$q_i = \frac{d_i}{d_{i-1}}$$

gdzie:

d_i – i -ta odległość wiązania.

Największa wartość miernika q_i wskazuje miejsce, w którym należy dokonać podziału gałęzi dendrogramu. Przeprowadzona w ten sposób analiza pozwala wyznaczyć liczbę skupień k jaką tworzy analizowany zbiór danych.

Posiadając informację na temat oczekiwanej liczby skupień k można przystąpić do kolejnego kroku analizy, wykorzystującego metodę k-średnich. Analiza skupień oparta na powyższej metodzie została opracowana przez MacGueena w 1967 roku i uznawana jest za jedną z najczęściej stosowanych w praktyce metod taksonometrycznych [101]. W porównaniu do metod hierarchicznych, analiza zbioru danych za pomocą metody k-średnich pozwala na wyeliminowanie zjawiska, w którym dane skupienie jest podskupieniem innego skupienia, pozwalając przy tym na opracowanie podziału analizowanych obiektów w taki sposób, aby w danym skupieniu znajdowały się obiekty możliwie najbardziej podobne do siebie, przy zachowaniu wyraźnych różnic pomiędzy kolejnymi skupieniami.

Zaproponowaną powyżej metodykę klasyfikacji, zastosowano do pogrupowania wszystkich gmin. Podstawą klasyfikacji były dane publikowane przez GUS [3]. W obliczeniach uwzględniono dane kwartalne dotyczące okresu od 2010 do 2018 roku, uzyskane dla 1099 gmin pięciu województw Polski. W związku z tym liczba analizowanych wskaźników gospodarczych I_m , dla poszczególnych gmin, wyniosła 396, a ich fragment zamieszczono w tab. 6.2.

Tab. 6.2 Wartości wybranych wskaźników gospodarczych I_n

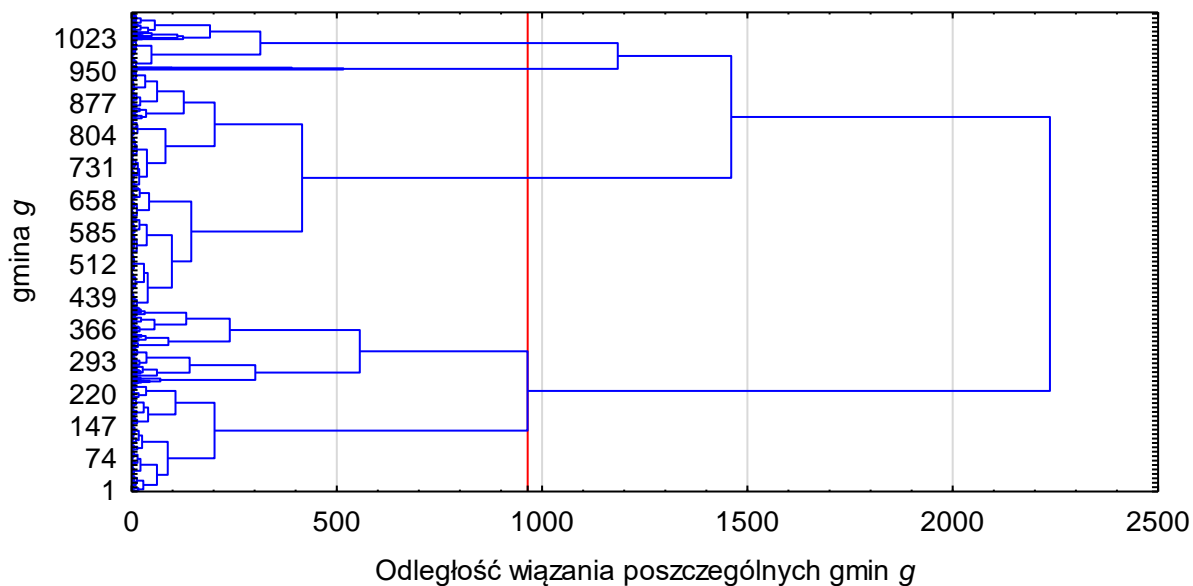
g	Wybrane wskaźniki gospodarcze I_n						
	$I_{1,g,r,kw}$			...	$I_{11,g,r,kw}$		
	2010 / 1 $r = 1$ $kw = 1$	...	2018 / 4 $r = 9$ $kw = 4$	...	2010 / 1 $r = 1$ $kw = 1$	...	2018 / 4 $r = 9$ $kw = 4$
1	135	...	188	...	10,06	...	10,06
2	53	...	88	...	18,55	...	18,55
...
1099	2641	...	3254	...	115,09	...	115,09
gdzie: r – rok ($r = 1, \dots, 9$), kw – kwartał ($kw = 1, \dots, 4$), g – gmina ($g = 1, \dots, 1099$).							

Uzyskane wartości wskaźników gospodarczych I_n poddane zostały zabiegowi standaryzacji. Efektem tego działania było utworzenie parametrów $P_{n,g,r,kw}$ stanowiących zbiór znormalizowanych wskaźników, które był podstawą klasyfikacji gmin. Fragment danych uzyskanych po standaryzacji przedstawiono w tab. 6.3.

Tab. 6.3 Wartości wybranych parametrów P_n

g	Wybrane parametry P_n						
	$P_{1,g,r,kw}$			...	$P_{11,g,r,kw}$		
	2010 / 1 $r = 1$ $kw = 1$	...	2018 / 4 $r = 9$ $kw = 4$	...	2010 / 1 $r = 1$ $kw = 1$	...	2018 / 4 $r = 9$ $kw = 4$
1	0,197	...	0,267	...	0,341	...	0,341
2	-0,009	...	0,053	...	1,079	...	1,079
...
1099	6,500	...	6,828	...	9,477	...	9,477
gdzie:							
r – rok ($r = 1, \dots, 9$),							
kw – kwartał ($kw = 1, \dots, 4$),							
g – gmina ($g = 1, \dots, 1099$).							

Po przeprowadzeniu obliczeń z wykorzystaniem oprogramowania Statistica, uzyskano dendrogram przedstawiony na rys. 6.2. Analizując go można zauważyć, że niektóre gminy bardzo szybko tworzą wyraźne skupienia. Zaproponowane miejsce odcięcia gałęzi dendrogramu wyznaczono za pomocą metody Grabińskiego [164] i zaznaczono na rys. 6.3. linią czerwoną. Przy takim odcięciu otrzymano cztery skupienia ($k = 4$).



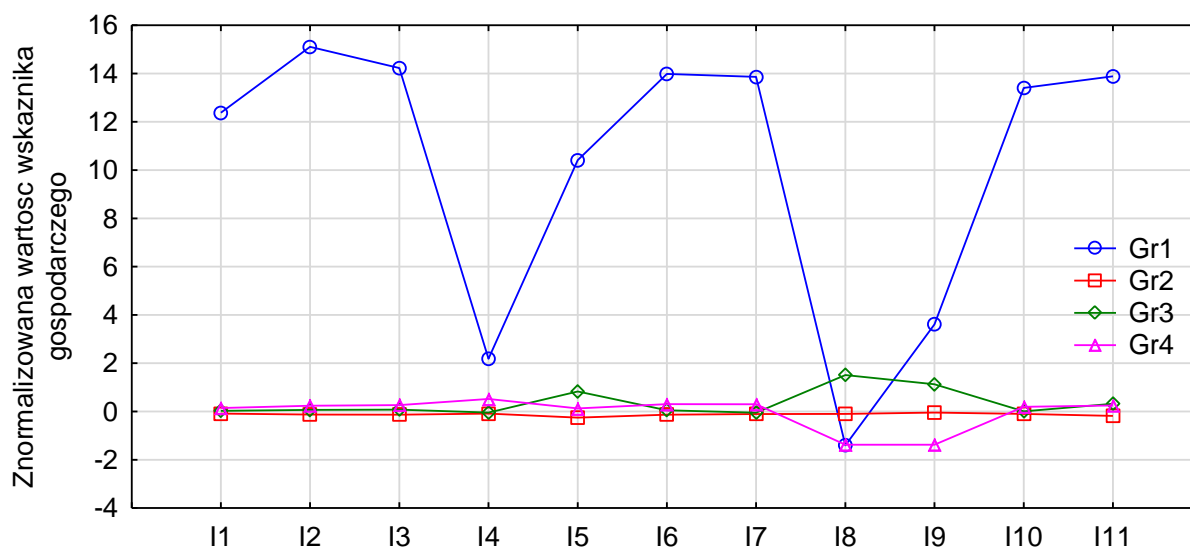
Rys. 6.2 Dendrogram – wykres obrazujący łączenie się poszczególnych gmin w kolejnych krokach obliczeniowych (opracowanie własne)

W kolejnym kroku analizy wykorzystano metodę k -średnich oraz oprogramowanie Statistica, przyjmując wyznaczoną uprzednio oczekiwaną liczbę skupień $k = 4$. W wyniku przeprowadzonej klasyfikacji wszystkich 1099 gmin na grupy o podobnym potencjale gospodarczym, uzyskano cztery podzbiory Gr_k ($k = 1, \dots, 4$). Każdy z otrzymanych podzbiorów skupiają gminy o podobnych wartościach wskaźników społeczno-gospodarczych.

Szczegółowa charakterystyka otrzymanych grup została zamieszczona w tab. 6.4 oraz na rys. 6.3, na którym przedstawiono średnie wartości poszczególnych parametrów P_m dla każdego skupienia.

Tab. 6.4 Charakterystyka otrzymanych grup gmin

Nr skupienia / grupa gmin	Gr_1	Gr_2	Gr_3	Gr_4
Liczebność skupienia	4 gminy	791 gmin	129 gmin	175 gmin
Przykładowe gminy wchodzące w skład skupienia	<ul style="list-style-type: none"> • Wrocław • Łódź • M. st. Warszawa • Poznań 	<ul style="list-style-type: none"> • Łęczna • Kępno • Dzierżoniów • Kutno 	<ul style="list-style-type: none"> • Lublin • Jawor • Świdnica • Puławy 	<ul style="list-style-type: none"> • Jelcz-Laskowice • Grójec • Piaseczno • Ostrzeszów



Rys. 6.3 Średnie wartości poszczególnych parametry P_n dla każdej grupy gmin
(opracowanie własne)

Analizując otrzymane wyniki należy stwierdzić, że w grupie Gr_1 znalazły się cztery gminy stanowiące wyłącznie duże miasta wojewódzkie, tj.: Wrocław, Łódź, Warszawa i Poznań. Są to gminy charakteryzujące się bardzo dużą liczbą mieszkańców oraz bardzo wysokim rozwojem gospodarczym przez co grupa ta wyraźnie odstaje od pozostałych grup. Gminy wiejskie i miejsko-wiejskie w zdecydowanej większości zostały zaliczone do grupy Gr_2 i Gr_3 – odpowiednio: 791 gmin grupa Gr_2 i 129 gmin grupa Gr_3 . W gminach z grupy Gr_2 obserwuje się mniejszą liczbę nowych inwestycji mieszkaniowych oraz mniejszą powierzchnię zurbanizowaną w stosunku do gmin z grupy Gr_3 . 175 gmin miejskich, o wysokim stopniu powierzchni zurbanizowanej w stosunku do całkowitej powierzchni gminy, zostało zaklasyfikowanych do grupy Gr_4 .

6.4. Modele predykcji liczby eksploatowanych rusztowań budowlanych

Dla każdego opracowanego podzbioru Gr_k ($k = 1, \dots, 4$) opracowano model matematyczny pozwalający na prognozowanie liczby eksploatowanych rusztowań. Do budowy modelu autorzy badań zaproponowali zastosowanie regresji liniowej. Ogólna postać modelu została przedstawiona poniżej:

$$L_r = \beta_0 + \beta_1 \cdot I_1 + \beta_2 \cdot I_2 + \dots + \beta_n \cdot I_n + \varepsilon$$

gdzie:

L_r – wartość zmiennej zależnej. W analizowanym przypadku zmienną zależną jest liczba rusztowań budowlanych, wyznaczona na podstawie badań empirycznych,

β_n – parametry modelu / współczynniki regresji,

I_n – wartości zmiennych niezależnych. W analizowanym przypadku zmiennymi niezależnymi są parametry charakteryzujące poszczególne gminy,

ε – składnik losowy.

Głównym założeniem regresji liniowej jest znalezienie takich wartości parametrów modelu β_n , dla których wyznaczona z modelu wartość n' jest możliwie zbliżona do wartości zmiennej zależnej (empirycznej) n . Różnica między wartością znaną n , a wartością prognozowaną n' stanowi składnik losowy ε . Podczas wyznaczania wartości parametrów modelu β_n należy spełnić szereg wymagań teoretycznych. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć m.in.: istnienie zależności liniowej pomiędzy wartościami zmiennych; rozkład normalny składników losowych modelu ε (wartość oczekiwana jest równa zero) [166], [167].

W celu uwzględnienia sezonowości w budownictwie, oprócz wymienionych w rozdziale 5.2 wskaźników gospodarczych I_n , podczas budowy modelu uwzględniono również zmienną jakościową opisującą kwartał roku kw ($kw = 1, \dots, 4$). Zgodnie z [166] zmienne jakościowe kw przekształcono na dychotomiczne zmienne instrumentalne p_j ($j = I, II, III$), które zostały wprowadzone do modelu jako predyktory. Zmienne te mogą przyjmować wartości 0, 1 lub -1 – tab. 6.5.

Tab. 6.5 Wartości zmiennych pomocniczych p_j w zależności od kwartału roku kw

Parametr pomocniczy p_j	Kwartał roku kw			
	1	2	3	4
p_I	1	0	0	-1
p_{II}	0	1	0	-1
p_{III}	0	0	1	-1

Opracowane modele matematyczne posłużyły do wygenerowania liczby rusztowań L_R eksploatowanych w poszczególnych gminach. Następnie otrzymane liczby rusztowań dla poszczególnych gmin zostały zsumowane i w ten sposób uzyskano prognozowaną liczbę rusztowań dla całego województwa.

6.4.1. Model liniowy dla grupy Gr 1

W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono, że dla gmin należących do grupy Gr_1 najlepiej dopasowany jest liniowy model zawierający jedną zmienną ilościową oraz jedną zmienną jakościową. Ogólną postać modelu przedstawiono poniżej:

$$L_{R,g,r,kw} = 331,47 + 0,19 \cdot I_{1,g,r,kw} - 260,18 \cdot p_I + 25,39 \cdot p_{II} + 168,49 \cdot p_{III}$$

gdzie:

$L_{R,g,r,kw}$ – liczba rusztowań przypadająca na zabudowaną powierzchnię gminy g ,

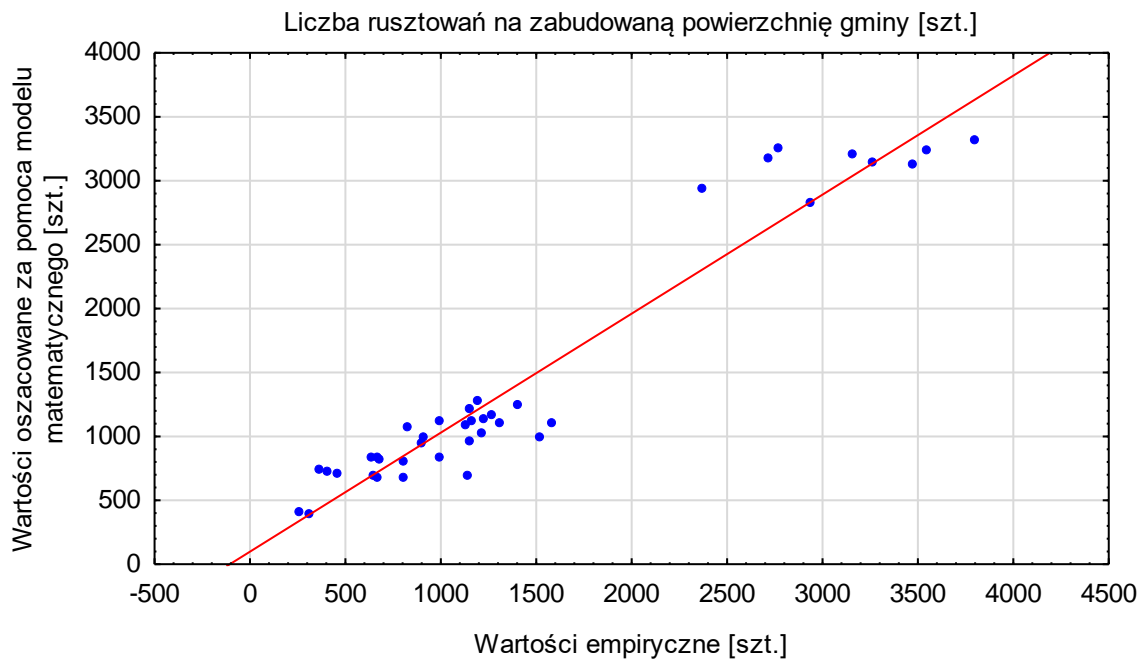
p_j – parametr pomocniczy, który może przyjmować wartości 0, 1 lub -1 (wg. tab. 6.5),

W celu zbadania jakości dopasowania opracowanego modelu matematycznego do wartości empirycznych wyznaczono wartości statystyk: R_p , R^2 , R_S^2 , które zamieszczono w tab. 6.6.

Tab. 6.6 Zestawienie parametrów charakteryzujących opracowany model matematyczny dla Gr_1

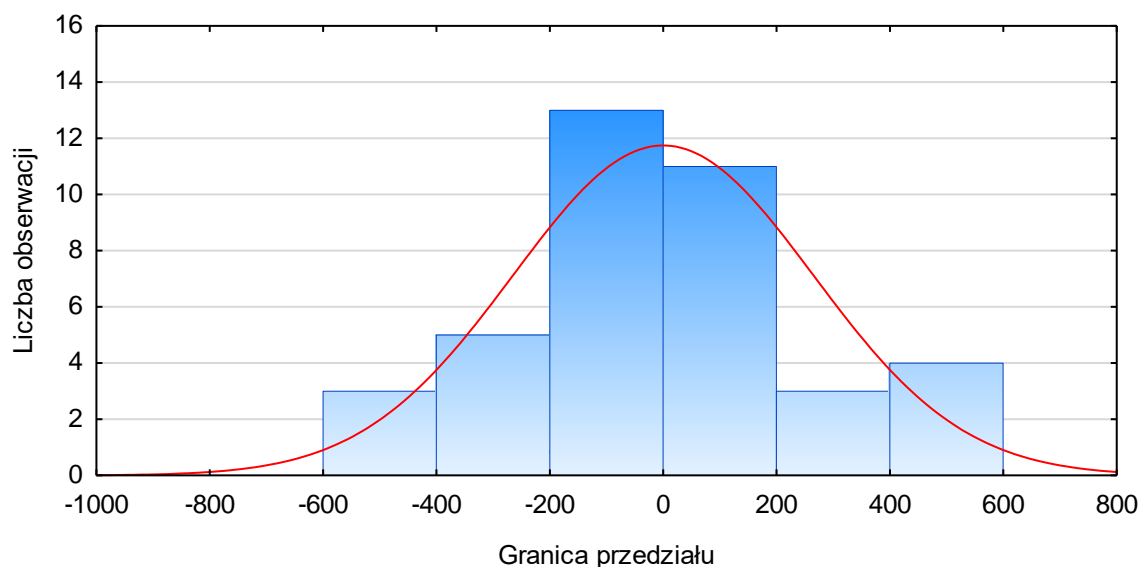
Lp.	Nazwa parametru charakteryzującego	Wartość
1	Współczynnik korelacji wielorakiej R_p	0,965
2	Współczynnik determinacji R^2	0,931
3	Skorygowany współczynnik determinacji R_S^2	0,923

Analizując otrzymane wyniki należy stwierdzić, że opracowany model charakteryzuje się prawie pełnym stopniem dopasowania do wartości empirycznych. Świadczą o tym otrzymane statystyki: R_p , R^2 oraz R_S^2 , które zbliżone są do jedynki ($R \geq 0,9$) oraz wykres rozrzutu – rys. 6.4.



Rys. 6.4 Porównanie wartości empirycznych oraz wyników uzyskanych za pomocą opracowanego modelu matematycznego dla grupy Gr_1 (opracowanie własne)

Jednym z założeń poprawnie opracowanego modelu regresji liniowej jest normalność rozkładu reszt modelu. W analizowanym przypadku do weryfikacji tego założenia wykorzystano histogram (rys. 6.5), którego wizualna analiza pozwala na stwierdzenie, że otrzymany rozkład reszt modelu jest rozkładem normalnym.



Rys. 6.5 Histogram reszt surowych dla opracowanego modelu matematycznego dla grupy Gr_1 (opracowanie własne)

6.4.2. Model liniowy dla grupy Gr 2

W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono, że dla gmin przynależnych do grupy Gr_2 najlepiej dopasowany jest liniowy model jednoczynnikowy bez wyrazu wolnego, zawierający jedną zmienną ilościową. Ogólną postać modelu przedstawiono poniżej:

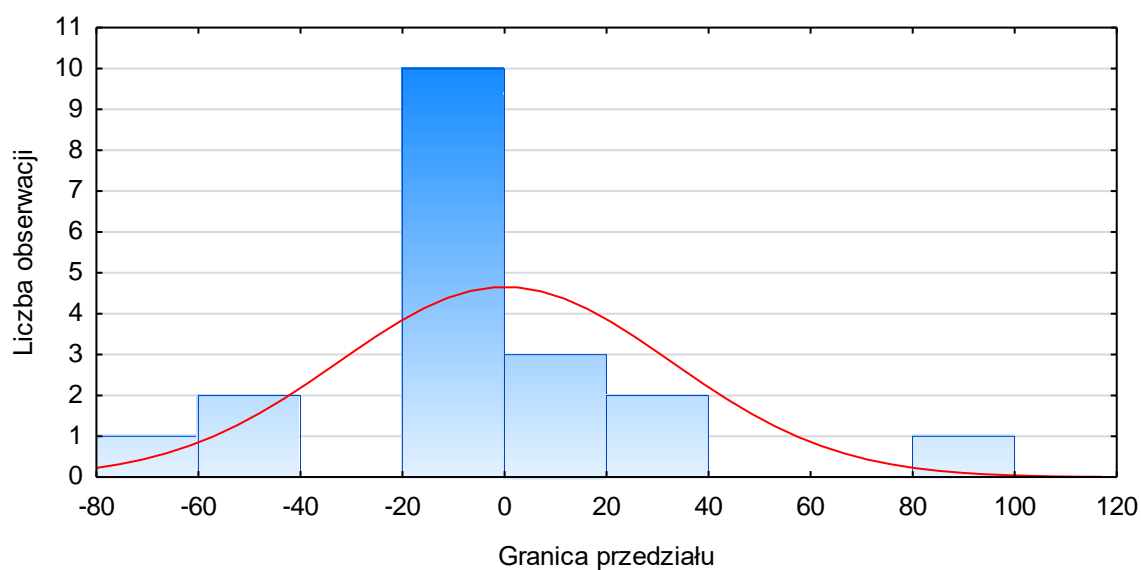
$$L_{R,g,r,kw} = 5,68 \cdot I_{2,g,r,kw}$$

W tab. 6.7 zamieszczono wartości statystyk: R_p , R^2 , R_S^2 dla powyższego modelu.

Tab. 6.7 Zestawienie parametrów charakteryzujących opracowany model matematyczny dla Gr_2

Lp.	Nazwa parametru charakteryzującego	Wartość
1	Współczynnik korelacji wielorakiej R_p	0,959
2	Współczynnik determinacji R^2	0,919
3	Skorygowany współczynnik determinacji R_S^2	0,915

Analizując otrzymane wyniki należy stwierdzić, że opracowany model charakteryzuje się prawie pełnym stopniem dopasowania do wartości empirycznych (otrzymane statystyki: R_p , R^2 oraz R_S^2 zbliżone są do jedynki – $R \geq 0,9$). Przeprowadzona wizualna analiza histogramu pozwala na stwierdzenie, że otrzymany rozkład reszt modelu jest rozkładem normalnym – rys. 6.6.



Rys. 6.6 Histogram reszt surowych dla opracowanego modelu matematycznego dla grupy Gr_2 (opracowanie własne)

6.4.3. Model liniowy dla grupy Gr 3

W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono, że dla gmin przynależnych do grupy Gr_3 najlepiej dopasowany jest model zawierający jedną zmienną ilościową oraz jedną zmienną jakościową. Ogólną postać modelu przedstawiono poniżej:

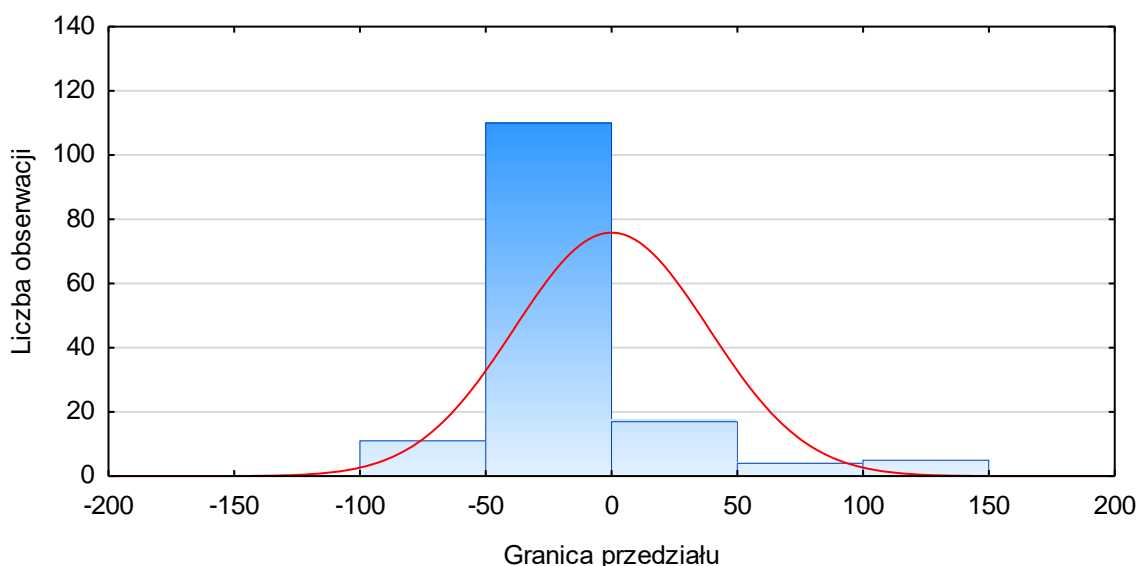
$$L_{R,g,r,kw} = 0,16 \cdot I_{3,g,r,kw} - 13,94 \cdot p_I + 2,97 \cdot p_{II} + 9,67 \cdot p_{III}$$

W tab. 6.8 zamieszczono wartości statystyk: R_p , R^2 , R_S^2 dla powyższego modelu.

Tab. 6.8 Zestawienie parametrów charakteryzujących opracowany model matematyczny dla Gr_3

Lp.	Nazwa parametru charakteryzującego	Wartość
1	Współczynnik korelacji wielorakiej R_p	0,932
2	Współczynnik determinacji R^2	0,869
3	Skorygowany współczynnik determinacji R_S^2	0,865

Analizując otrzymane wyniki należy stwierdzić, że opracowany model charakteryzuje się bardzo wysokim ($R \geq 0,7$) i prawie pełnym ($R \geq 0,9$) stopniem dopasowania do wartości empirycznych. Przeprowadzona wizualna analiza histogramu pozwala na stwierdzenie, że otrzymany rozkład reszt modelu jest rozkładem normalnym – rys. 6.7.



Rys. 6.7 Histogram reszt surowych dla opracowanego modelu matematycznego dla grupy Gr_3 (opracowanie własne)

6.4.4. Model liniowy dla grupy Gr 4

W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono, że dla gmin przynależnych do grupy Gr_4 najlepiej dopasowany jest model zawierający trzy zmienne ilościowe. Ogólną postać modelu przedstawiono poniżej:

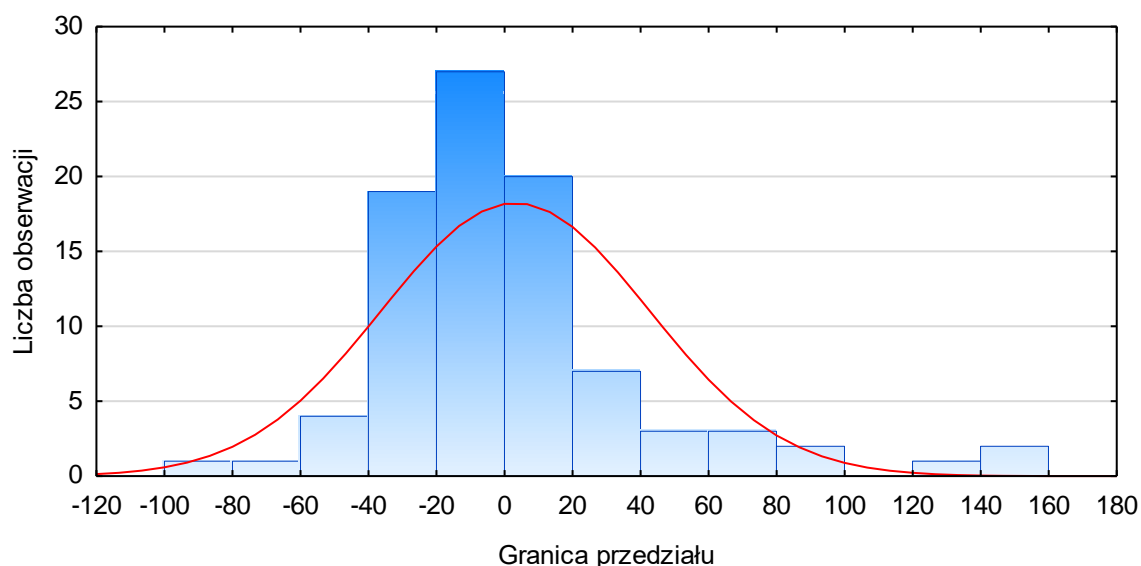
$$L_{R,g,r,kw} = 0,31 \cdot I_{9,g,r,kw} + 0,71 \cdot I_{5,g,r,kw} - 0,002 \cdot I_{7,g,r,kw}$$

W tab. 6.9 zamieszczono wartości statystyk: R_p , R^2 , R_S^2 dla powyższego modelu.

Tab. 6.9 Zestawienie parametrów charakteryzujących opracowany model matematyczny dla Gr_4

Lp.	Nazwa parametru charakteryzującego	Wartość
1	Współczynnik korelacji wielorakiej R_p	0,804
2	Współczynnik determinacji R^2	0,646
3	Skorygowany współczynnik determinacji R_S^2	0,634

Analizując otrzymane wyniki należy stwierdzić, że opracowany model charakteryzuje się bardzo wysokim ($R \geq 0,7$) i wysokim ($R \geq 0,5$) stopniem dopasowania do wartości empirycznych. Przeprowadzona wizualna analiza histogramu pozwala na stwierdzenie, że otrzymany rozkład reszt modelu jest rozkładem normalnym – rys. 6.8.



Rys. 6.8 Histogram reszt surowych dla opracowanego modelu matematycznego dla grupy Gr_4 (opracowanie własne)

6.5. Weryfikacja opracowanych modeli – model zespołu sieci neuronowych

W celu weryfikacji opracowanych i przedstawionych modeli regresji liniowej, postanowiono wykorzystać inne narzędzie matematyczne do zamodelowania analizowanego zjawiska, a następnie porównać wyniki otrzymane za pomocą obydwu metod [161]. Narzędziem, które wykorzystano do weryfikacji opracowanych modeli regresji liniowej są sieci neuronowe MLP.

Sieci neuronowe stanowią narzędzie matematyczne służące m.in. klasyfikacji, predykcji i analizie danych, którego działanie wzorowane jest na działaniu naturalnej sieci biologicznej komórek nerwowych [105], [168]. Każda sztuczna sieć neuronowa składa się z siatki połączonych ze sobą elementów (tzw. neuronów), w których każdy z nich posiada pewną liczbę wejść oraz jedno wyjście. Neurony rozmieszczone są w warstwach i wzajemnie połączone. W typowej sieci neuronowej rozróżnia się następujące warstwy:

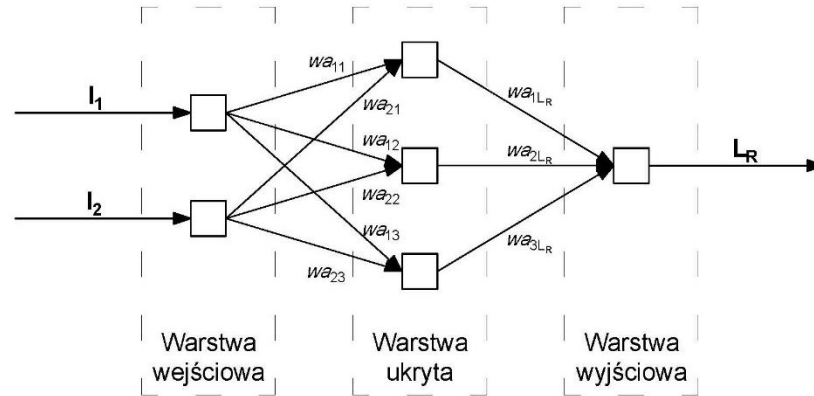
- Wejściową – odpowiadającą za wprowadzenie wartości zmiennych I_n do sieci ($n = 1, 2, 3, \dots, N$),
- Ukrytą – odpowiadającą za przetworzenie informacji,
- Wyjściową – odpowiadającą za wyznaczenie wartości wyjściowej L_R sieci (wyniku).

W przypadku bardzo rozbudowanych sieci neuronowych, w jej strukturze może być zawarta więcej niż jedna warstwa ukryta, jednak jak wykazuje dotychczasowa praktyka [168], zaleca się budowę sieci o maksymalnie dwóch warstwach ukrytych. Ponadto, w większości przypadków pojedyncza warstwa ukryta w połączeniu z odpowiednią liczbą neuronów może rozwiązać ten sam problem z porównywalnym poziomem dokładności. Ważne jest jednak, aby funkcja aktywacji neuronów ukrytych była funkcją nieliniową.

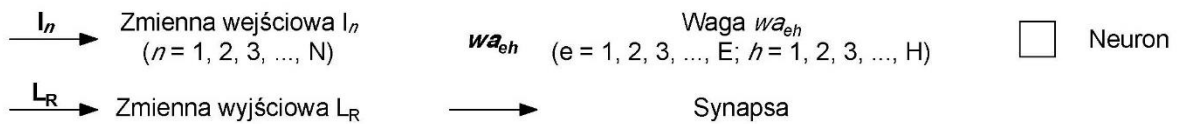
Połączenia pomiędzy poszczególnymi neuronami w sąsiednich warstwach realizowane są za pomocą tzw. synaps, które są odpowiedzialne za przekazywanie informacji x_e pomiędzy elementami. Należy zaznaczyć, że przekazywany sygnał w każdym przypadku modyfikowany jest za pomocą współczynnika liczbowego – tzw. wagi wa_{eh} , w której e oznacza numer neuronu z którego sygnał jest pobierany ($e = 1, 2, 3, \dots, E$), a h oznacza numer neuronu do którego dany sygnał jest doprowadzany ($h = 1, 2, 3, \dots, H$). Wartości poszczególnych wag wyznaczone są w procesie uczenia sieci i są odpowiedzialne za tzw. „pamięć” sieci, czyli zdolność do przewidywania wyników na podstawie nowych wartości zmiennych. W przypadku, gdy wartość współczynnika wagi jest dodatnia, neuron do którego dostarczana

jest informacja jest pobudzany, natomiast gdy wartość współczynnika wagi jest ujemna neuron jest hamowany.

Na rys. 6.9 przedstawiono przykładową strukturę dwuwarstwowej sieci neuronowej z jedną warstwą ukrytą.

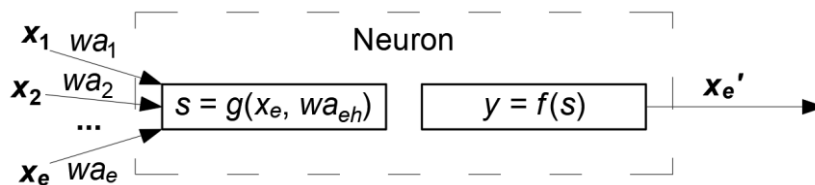


Legenda:



Rys. 6.9 Przykładowa struktura dwuwarstwowej sieci neuronowej (opracowanie własne)

Typowy neuron występujący w warstwie ukrytej oraz w warstwie wyjściowej sieci składa się z funkcji agregacji s oraz funkcji aktywacji y – rys. 6.10.



Rys. 6.10 Budowa typowego neuronu występującego w warstwie ukrytej lub w warstwie wyjściowej (opracowanie własne)

Funkcja agregacji $s = g(x_e, wa_{eh})$ odpowiedzialna jest za agregację danych wejściowych czyli połączenie informacji x_e przekazywanej przez synapsę z neuronu warstwy poprzedniej z odpowiednim współczynnikiem wagi w_{ed} przypisanym do danego połączenia. W praktyce [168] funkcja agregacji s najczęściej jest funkcją liniową: $s = \sum x_e wa_{eh}$ lub funkcją radialną: $s = \sum (w_{eh} - x_e)^2$. W przypadku zadań innych niż klasyfikacyjne zalecane jest jednak stosowanie liniowej funkcji agregacji [168].

Zagregowana wartość wejściowa danego neuronu staje się jego parametrem funkcji aktywacji $y = f(s)$. Funkcja aktywacji y może być funkcją: liniową, sigmoidalną, tangensoidalną, Gaussa lub inną. W praktyce, wg [168] do rozwiązywania zadań związanych z predykcją i modelowaniem zjawiska zalecane jest stosowanie liniowych lub sigmoidalnych funkcji aktywacji y .

Podczas opracowywania modelu sieci neuronowej bardzo ważne jest właściwe dobranie: zmiennych wejściowych, liczby neuronów, liczby warstw ukrytych oraz funkcji agregacji i aktywacji w poszczególnych neuronach.

Podczas opracowywania modelu sieci neuronowej kluczowym etapem jest proces uczenia, który najczęściej przebiega z tzw. nauczycielem. Proces ten polega na iteracyjnym wyznaczeniu wartości wszystkich wag wa_{eh} , które odpowiedzialne są za „pamięć” sieci. W pierwszym kroku iteracji do struktury sieci wprowadzane są parametry wejściowe (zmienne I_n), które następnie zostają przetworzone przez poszczególne elementy sieci. Podczas pierwszej iteracji, wartości wag wa_{nh} najczęściej dobierane są w sposób losowy [168], [169]. Otrzymana w ten sposób wartość wyjściowa sieci L_R porównywana jest z rzeczywistą wartością oczekiwaną i wyznaczana jest wartość błędu jaki popełnia sieć. W wyniku otrzymanego podczas pierwszej iteracji błędu sieci wprowadzana jest korekta do wartości poszczególnych wag wa_{eh} . Do tak „zaktualizowanej” struktury sieci ponownie zostają wprowadzone parametry wejściowe. Po ponownym przetworzeniu wszystkich informacji przez sieć, jej wynikiem jest zaktualizowana wartość wyjściowa sieci L_R , dla której ponownie wyznaczany jest błąd sieci oraz kolejna korekta do wartości poszczególnych wag wa_{nh} . Proces ten powtarzany jest wielokrotnie, aż do momentu, w którym wartości otrzymywane za pomocą sieci są wystarczająco dokładne.

Zestaw danych wykorzystywany w trakcie opracowywania modelu sieci neuronowej, czyli zbiór wartości empirycznych i wartości zmiennych charakteryzujących analizowane zjawisk, należy podzielić na trzy zbiory:

- Zbiór uczący – zawiera najczęściej 70% wszystkich obserwacji, które są wykorzystane do właściwego opracowania modelu sieci neuronowej, czyli tzw. „aktywnego” uczenia sieci [168],
- Zbiór testowy – zawiera najczęściej 15% wszystkich obserwacji, które są wykorzystywane do weryfikacji opracowanego modelu sieci,

- Zbiór walidacyjny – zawiera najczęściej 15% wszystkich obserwacji i wykorzystywany jest do wykrycia zagrożenia przeuczeniem sieci, czyli nadmiernym dopasowaniem sieci do zbioru uczącego.

Poprawnie opracowywany model z wykorzystaniem sieci neuronowych powinien charakteryzować się wysoką jakością dopasowania do analizowanego zjawiska, czyli powinien posiadać możliwie wysoką (najlepiej bliską jedności) wartość współczynnika korelacji pomiędzy wartościami empirycznymi oraz wartościami otrzymanymi za pomocą modelu. W praktyce, sprowadza się to do porównania jakości dopasowania opracowanego modelu do zbioru uczącego, testowego i walidacyjnego, których wartości powinny być ze sobą porównywalne.

Przedmiotem przeprowadzonych badań własnych było opracowanie modelu matematycznego opartego na sieci neuronowej, umożliwiającego weryfikację oszacowanej na podstawie modeli regresji liniowej liczby rusztowań budowlanych. Analizę wykonano na podstawie zgromadzonych danych empirycznych oraz danych statystycznych Głównego Urzędu Statystycznego [3] wykorzystując moduł „sieci neuronowe” dostępny w oprogramowaniu Statistica firmy StatSoft.

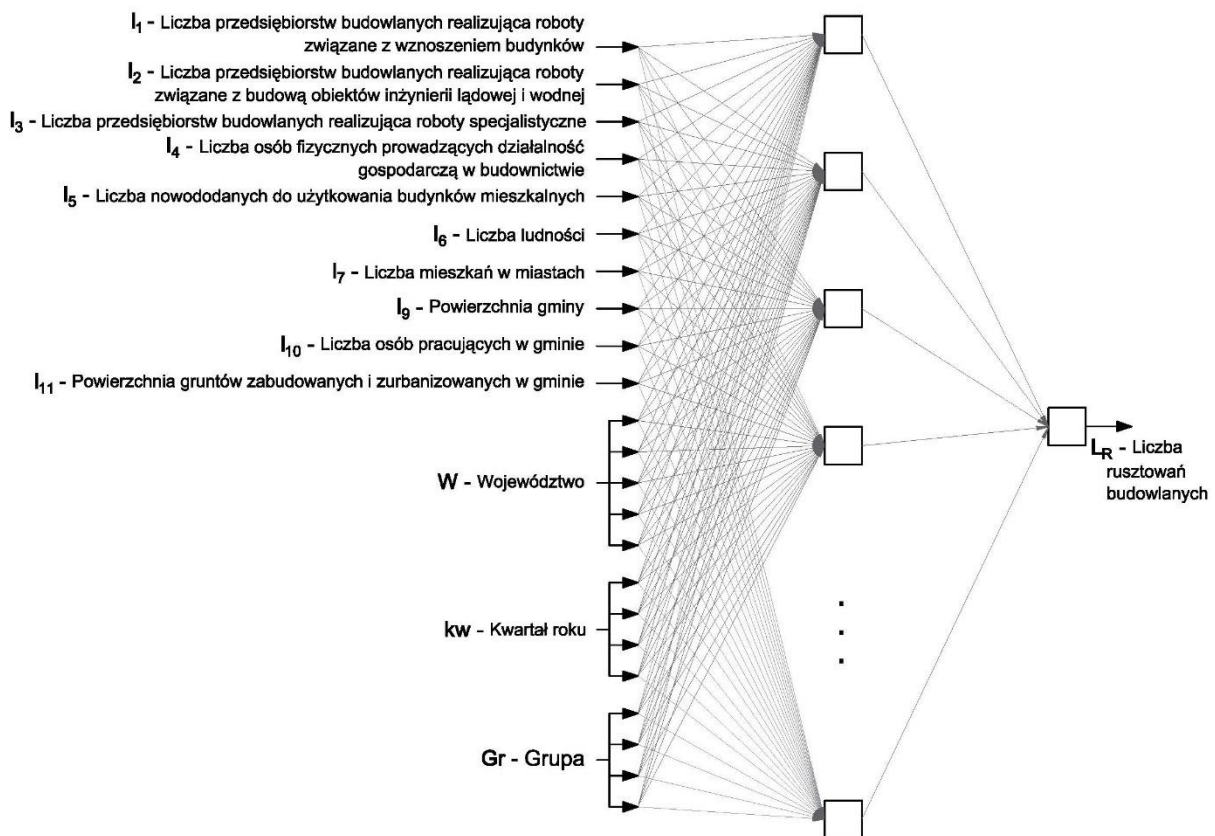
Przeprowadzone wstępne obliczenia wykazały, że dla analizowanego zbioru danych najlepsze wyniki uzyskać można dla sieci, w których liczba neuronów w warstwie ukrytej wynosi od 5 do 20. W związku z powyższym, w przeprowadzonym toku obliczeń opracowano manualnie 80 różnych sieci neuronowych charakteryzujących się zmienną od 5 do 20 liczbą neuronów w warstwie ukrytej. Zgodnie z zaleceniami [168] do budowy modelu przyjęto:

- liniową funkcję agregacji we wszystkich neuronach warstwy ukrytej;
- liniową funkcję agregacji we wszystkich neuronach warstwy wyjściowej;
- sigmoidalną funkcję aktywacji we wszystkich neuronach warstwy ukrytej;
- liniową funkcję aktywacji we wszystkich neuronach warstwy wyjściowej

Podczas każdego kroku iteracji, wartość poszczególnych wag była optymalizowana na podstawie funkcji błędu jaki popełnia sieć, według algorytmu BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb—Shanno) – tzw. metoda zmiennej metryki.

Wykorzystany w obliczeniach zestaw danych, liczący 295 niezależnych obserwacji, został podzielony na zbiór: uczący, testowy i walidacyjny w zalecanym stosunku: 70%, 15% i 15%.

Wszystkie sieci zostały zbudowane na podstawie zmiennych ilościowych (wskaźników gospodarczych I_n) oraz zmiennych jakościowych takich jak: Województwo W (gdzie $W = \{w: w = 1, \dots, 5\}$), kwartał roku kw oraz numer grupy gmin Gr . Zmienne jakościowe zostały zakodowane za pomocą metody jeden-z-N pozwalającej na przekształcenie wartości nominalnych do postaci numerycznej [169]. Kodowanie za pomocą tej metody polega na przyporządkowaniu każdej zmiennej jakościowej wektora wartości binarnych o długości równej liczbie wszystkich dopuszczalnych wartości danej zmiennej. Ogólną budowę opracowanej, pojedynczej sieci MLP przedstawiono na rys. 6.11.



Rys. 6.11 Budowa pojedynczej sieci MLP (opracowanie własne)

Z spośród wszystkich 80 opracowanych modeli do dalszej analizy wybrano pięć sieci neuronowych charakteryzujących się najlepszą jakością dopasowania do przyjętego zestawu danych. Przyjęcie do dalszych obliczeń pięciu sieci neuronowych podyktowane było faktem, że sieci te charakteryzują się podobną, wysoką jakością wyrażoną za pomocą współczynnika korelacji oraz niskiej wartości root-mean-square error ($RMSE$). Dodatkowo jakość wybranych sieci jest lepsze od pozostałych sieci, które opracowano. Pełną charakterystykę wybranych do dalszej analizy sieci neuronowych zestawiono w tab. 6.10 oraz tab. 6.11.

Tab. 6.10 Charakterystyka opracowanych sieci neuronowych

Nr sieci	Liczba neuronów w warstwie ukrytej	Jakość sieci*			RMSE		
		Uczenie	Testowanie	Walidacja	Uczenie	Testowanie	Walidacja
1	13	0,989	0,986	0,990	65.7	22.1	68.3
2	14	0,989	0,986	0,989	65.5	22.5	74.5
3	16	0,989	0,985	0,990	65.7	23.7	69.9
4	17	0,990	0,987	0,990	63.8	21.9	70.6
5	19	0,989	0,987	0,990	65.8	22.2	70.1

*- Wartość współczynnika korelacji

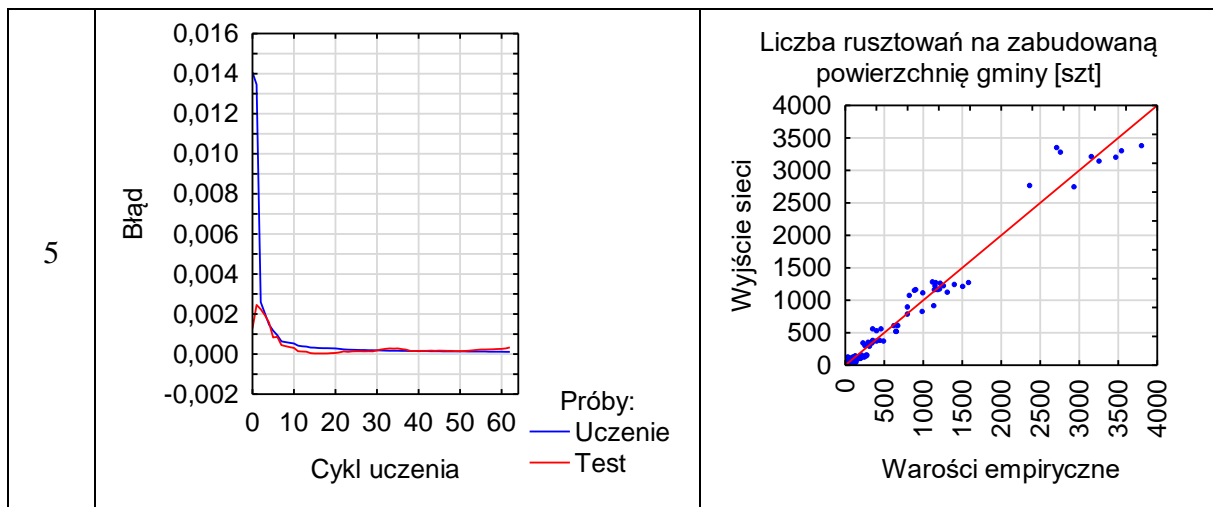
Tab. 6.11 Charakterystyka opracowanych sieci neuronowych – wykresy

Nr sieci	Wykres uczenia sieci	Wykres jakości dopasowania wartości wyjściowych sieci i wartości empirycznych
1		<p>Liczba rusztowań na zabudowaną powierzchnię gminy [szt]</p>

Tab. 6.11 (c.d.) Charakterystyka opracowanych sieci neuronowych – wykresy

2	<p>Błąd</p> <p>Cykl uczenia</p> <p>Próby: — Uczenie — Test</p>	<p>Liczba rusztowań na zabudowaną powierzchnię gminy [szt]</p> <p>Wyjście sieci</p> <p>Wartości empiryczne</p>
3	<p>Błąd</p> <p>Cykl uczenia</p> <p>Próby: — Uczenie — Test</p>	<p>Liczba rusztowań na zabudowaną powierzchnię gminy [szt]</p> <p>Wyjście sieci</p> <p>Wartości empiryczne</p>
4	<p>Błąd</p> <p>Cykl uczenia</p> <p>Próby: — Uczenie — Test</p>	<p>Liczba rusztowań na zabudowaną powierzchnię gminy [szt]</p> <p>Wyjście sieci</p> <p>Wartości empiryczne</p>

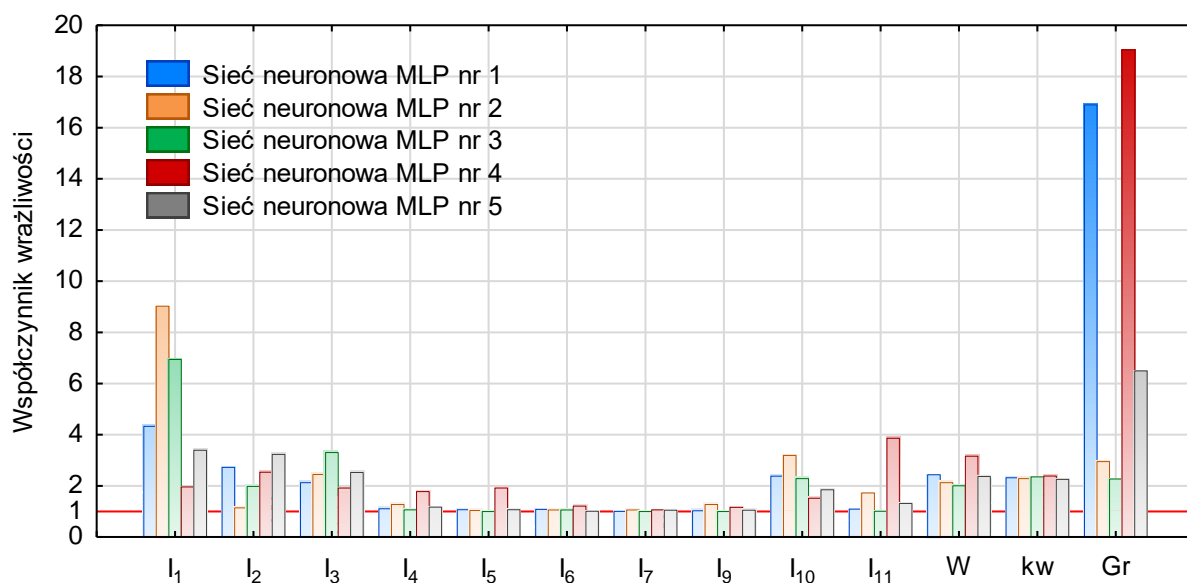
Tab. 6.11 (c.d.) Charakterystyka opracowanych sieci neuronowych – wykresy



Wyniki przedstawione w tab. 6.11 pozwalają na graficzną interpretację uzyskanych wyników. W szczególności analiza wykresu uczenia sieci pozwala na stwierdzenie, że proces uczenia w największym stopniu nastąpił w okresie do około 10 cyklu (sieci nr 1, 3, 4 i 5) oraz do około 15 cyklu w przypadku sieci nr 2.

Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że wszystkie pięć modeli charakteryzuje się wysoką jakością dopasowania do analizowanego zjawiska (bliska jedności jakość uczenia sieci) i jednocześnie nie wykazując nadmiernego „dopasowania” sieci do zbioru uczącego (bliska jedności jakość walidacji sieci). Dodatkowo, analiza wykresów przebiegu uczenia (tab. 6.11) jednoznacznie wykazuje, że proces uczenia sieci przebiegł prawidłowo [168].

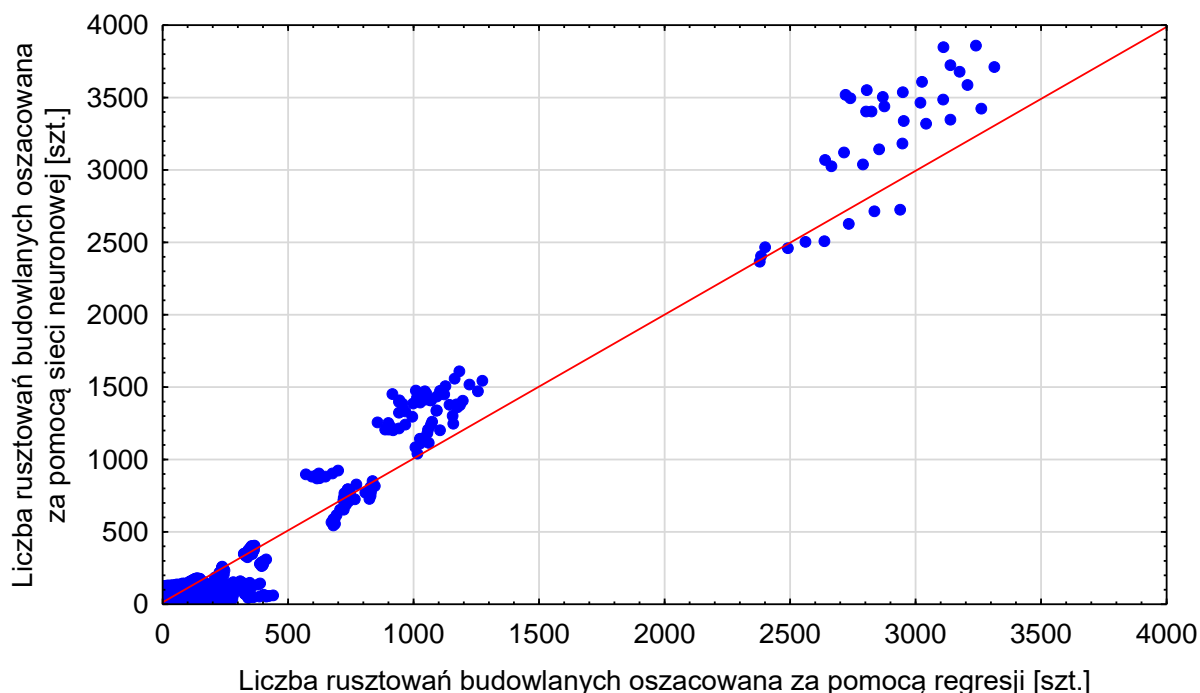
Wykonana analiza wrażliwości wszystkich zmiennych ilościowych i jakościowych użytych do budowy modeli wykazała, że w każdym przypadku wszystkie zmienne wykazują istotny wpływ na końcowy wynik sieci (wartości współczynnika wrażliwości we wszystkich przypadkach były większe od 1,0 [168]) – rys. 6.12



Rys. 6.12 Analiza wrażliwości wszystkich zmiennych użytych do budowy sieci
(opracowanie własne)

Analizując powyższy wykres (rys. 6.13) można zauważyć, że największy wpływ na końcowy wynik sieci ma wejście Gr_k oraz wejście I_1 . Taka sytuacja spowodowana jest tym, że liczba użytkowanych rusztowań budowlanych w dużym stopniu uzależniona jest od liczby przedsiębiorstw budowlanych realizujących roboty budowlane oraz charakteru danej gminy – w szczególności stopnia jej uprzemysłowienia. Dodatkowo, w zależności od rodzaju sieci, wpływ poszczególnych parametrów jest inny. Przykładem może być sieci nr 1, w której parametr G ma większy wpływ na wynik końcowy niż parametr I_1 . W przypadku sieci nr 2 sytuacja wygląda odwrotnie – parametr G ma mniejszy wpływ na wynik sieci niż parametr I_1 .

W celu weryfikacji opracowanych czterech modeli regresji liniowej oraz zespołu sieci neuronowych MLP postanowiono oszacować liczbę rusztowań budowlanych we wszystkich gminach analizowanych pięciu województw, niezależnie za pomocą obydwu metod. Jako parametry wejściowe do wszystkich modeli przyjęto na podstawie danych statystycznych GUS [3] wartości niezbędnych zmiennych z okresu od 2010 do 2018 roku. Otrzymane w ten sposób wyniki porównano ze sobą otrzymując bardzo wysoką wartość współczynnika korelacji $R = 0,89$ co świadczy o istotnym związku pomiędzy wynikami uzyskanymi z pomocą modeli regresji liniowej oraz sieci neuronowych – rys. 6.13.

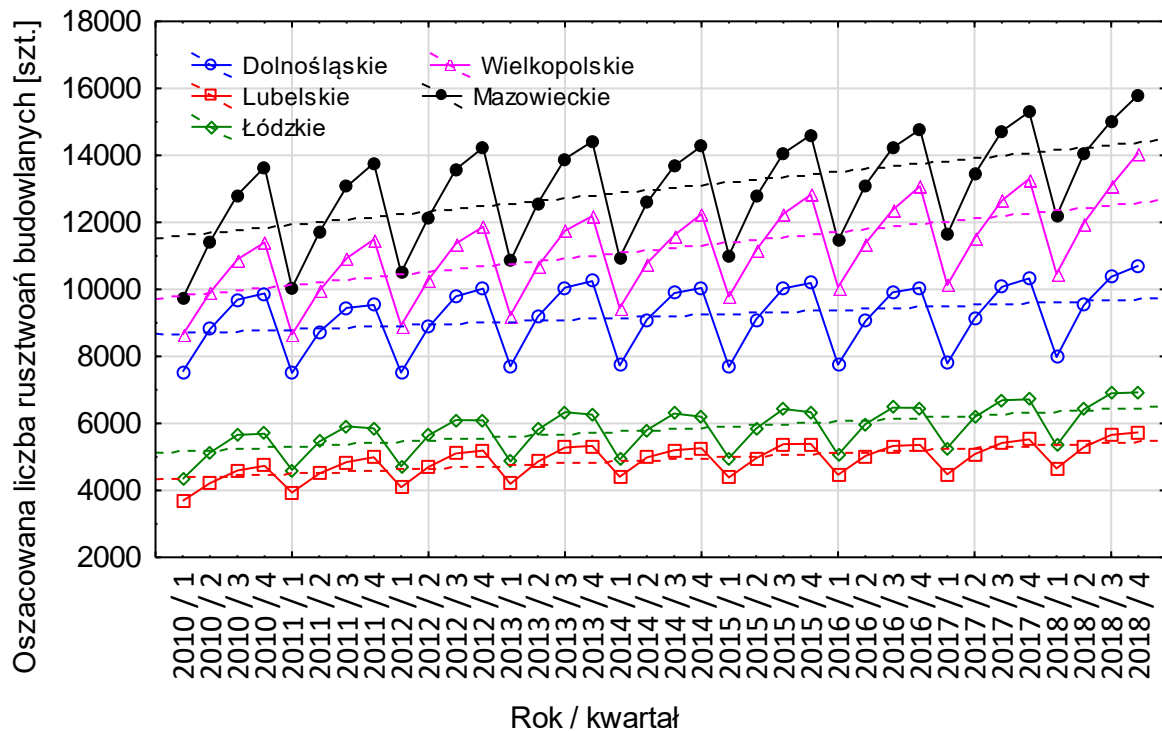


Rys. 6.13 Porównanie wyników uzyskanych za pomocą modeli regresji liniowej oraz zespołu złożonego z pięciu sieci neuronowych (opracowanie własne)

W związku z powyższym można stwierdzić, że wyniki uzyskiwane za pomocą zespołu sieci neuronowych MLP są porównywalne z wynikami uzyskanymi za pomocą modeli regresji liniowej. Potwierdza to tezę, że modele regresji liniowej są opracowane w sposób właściwy i umożliwiają poprawne oszacowanie populacji rusztowań budowlanych w analizowanych województwach

6.6. Oszacowanie liczby rusztowań budowlanych i analiza wyników

Ostateczną liczebność populacji rusztowań budowlanych wyznaczono za pomocą opracowanych czterech modeli regresji liniowej. Sumując wartości uzyskane dla poszczególnych gmin wchodzących w skład poszczególnych województw, otrzymano liczbę eksploatowanych rusztowań budowlanych w analizowanych regionach kraju. Na rys. 6.14 przedstawiono oszacowaną liczbę rusztowań budowlanych dla każdego województwa w okresie od 2011 do 2018 roku, z podziałem na kwartały.



Rys. 6.14 Oszacowana za pomocą modeli regresji liniowej liczba rusztowań budowlanych w wybranych województwach (opracowanie własne)

Analizując otrzymane wyniki należy stwierdzić, że największa liczba rusztowań występuje w województwie mazowieckim, wielkopolskim i dolnośląskim. Mniejsza liczba rusztowań w województwie łódzkim i lubelskim. Fakt ten może być spowodowany m.in. odpowiednio mniejszą liczbą inwestycji oraz mniejszą powierzchnią regionu łódzkiego i lubelskiego. Obserwuje się również wyraźną sezonowość w liczbie użytkowanych rusztowań, a mianowicie mniejszą liczbę eksploatowanych rusztowań w kwartale pierwszym oraz większą w kwartałach drugim, trzecim i czwartym. Średnia liczba użytkowanych rusztowań budowlanych wykazuje tendencję rosnącą.

7. Analiza przyczyn wypadków na rusztowaniach budowlanych

Każdy wypadek przy pracy spowodowany jest wieloma różnymi przyczynami i przebiega wg indywidualnego scenariusza [98]. Konsekwencje poszczególnych zdarzeń również są zróżnicowane. W zależności od rodzaju wypadku, jego konsekwencję mogą być lekkie, ciężkie albo śmiertelne. Pomimo tak istotnych różnic pomiędzy poszczególnymi zdarzeniami, można zaobserwować pewne zależności i związki pomiędzy nimi. Fakt ten został zaobserwowany m.in. w badaniach [36] oraz we wcześniejszych badaniach własnych autora dysertacji [113]. Powyższe obserwacje zainicjowały potrzebę wykonania szczegółowej analizy przyczyn wypadków przy pracy związanych z rusztowaniami budowlanymi. Badania te miały na celu wyznaczenie parametru „potencjalny skutek wypadku”. W ramach powyższych badań wykonano:

- analizę zbioru wypadków i ich przyczyn pod kątem identyfikacji istotnych przyczyn technicznych, organizacyjnych i ludzkich,
- grupowanie wypadków pod kątem przyczyn istotnych, mające na celu zbadanie zależności występujących pomiędzy poszczególnymi przyczynami wypadków.

7.1. Identyfikacja istotnych przyczyn wypadków

Dane zgromadzone w wyniku przeprowadzonej analizy protokołów kontroli powypadkowej zawierają informacje na temat 200 wypadków przy pracy związanych z rusztowaniami budowlanymi tworzącymi zbiór A , które wydarzyły się na obszarze 5 analizowanych województw, w badanym okresie czasu. W powyższych wypadkach poszkodowanych zostało łącznie 213 osób, które stanowią indywidualne przypadki obliczeniowe, nazywane w dalszej części pracy zdarzeniami wypadkowymi A' , gdzie: $A' = \{a; a = 1, \dots, 213\}$.

Każde spośród analizowanych zdarzeń wypadkowych A' spowodowane zostało kombinacją od kilku do kilkunastu przyczyn szczegółowych. Poszczególne przyczyny szczegółowe zaliczyć można do jednej z ośmiu grup rodzajowych C_{eu} (gdzie $eu = I, \dots, VIII$) przyczyn wypadków przy pracy, opracowanych przez Europejski Urząd Statystyczny Unii Europejskiej (EUROSTAT):

- C_I – niewłaściwy stan czynnika materialnego,
- C_{II} – niewłaściwa ogólna organizacja pracy,
- C_{III} – niewłaściwa organizacja stanowiska pracy,

- C_{IV} – brak odpowiednich czynników materialnych lub niewłaściwe posługiwanie się tymi czynnikami,
- C_V – nieużywanie sprzętu ochronnego przez pracownika,
- C_{VI} – niewłaściwe samowolne zachowanie się pracownika,
- C_{VII} – stan psychofizyczny pracownika niezapewniający bezpiecznego wykonania pracy,
- C_{VIII} – nieprawidłowe zachowanie się pracownika.

W zawiązku z powyższym, zbiór przyczyn wypadków można zapisać jako:

$$C = \{C_{eu}: eu = I, \dots, VIII\}$$

gdzie:

C – zbiór przyczyn wypadku,

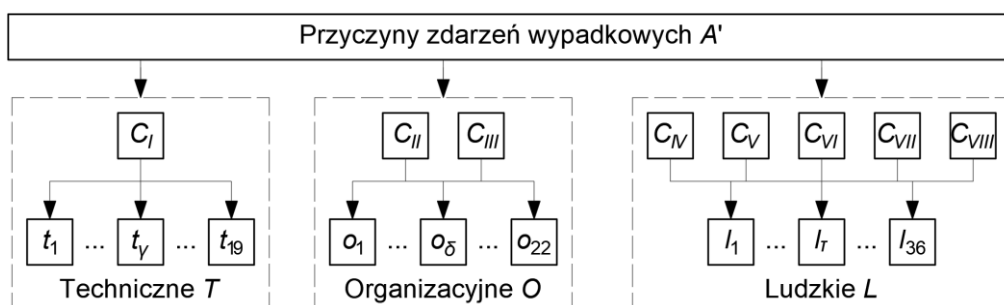
C_{eu} – grupa rodzajowa przyczyn – według klasyfikacji EUROSTATU.

W Polsce, jedną z najbardziej rozpowszechnionych metod klasyfikacji przyczyn wypadków przy pracy jest metodyka TOL [21]. Jak już wcześniej wspomniano, metoda ta zakłada, że każdy wypadek jest wynikiem trzech rodzajów przyczyn, zaliczanych do zbioru przyczyn: technicznych (T), organizacyjnych (O) oraz ludzkich (L). W zawiązku z tym, zbiór wszystkich przyczyn wypadków C stanowi sumę podzbiorów T , O oraz L :

$$C = T \cup O \cup L$$

W podzbiorze przyczyn: technicznych T znajdują się poszczególne przyczyny szczególne t_γ ($t_\gamma \subset T$ oraz $\gamma = 1, \dots, 19$), organizacyjnych O znajdują się poszczególne przyczyny szczególne o_δ ($o_\delta \subset O$ oraz $\delta = 1, \dots, 22$), ludzkich L znajdują się przyczyny szczególne l_τ ($l_\tau \subset L$ oraz $\tau = 1, \dots, 36$).

Schemat klasyfikacji przyczyn wypadków przedstawiono na rys. 7.1.



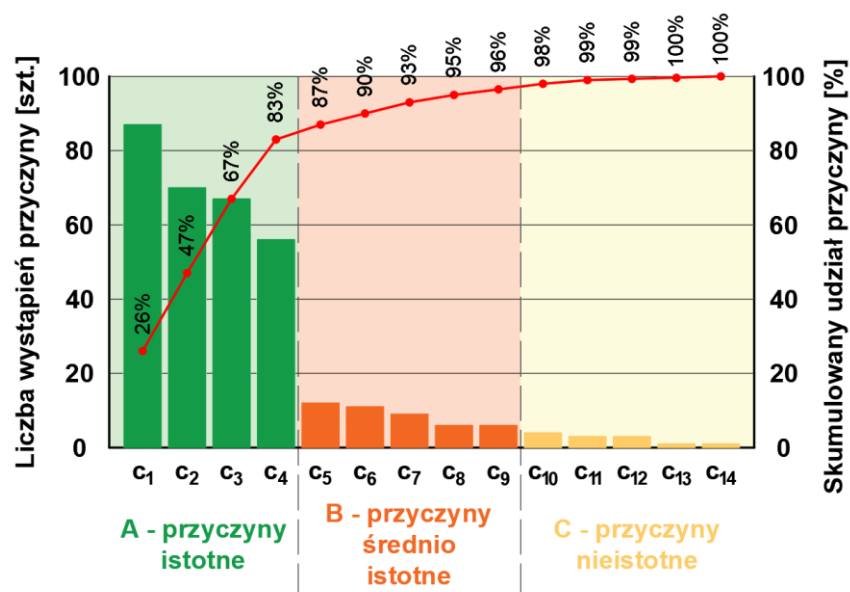
Rys. 7.1 Schemat klasyfikacji przyczyn (opracowanie własne)

W każdej grupie rodzajowej przyczyn szczegółowych wyróżnić można dodatkowo przyczyny istotne, średnio istotne i nieistotne. Do identyfikacji istotności przyczyn w każdej grupie rodzajowej, autorzy publikacji [36] proponują zastosowanie analizy Pareto-Lorenza oraz klasyfikacji ABC [128], [129].

W analizowanym zbiorze danych, analiza Pareto-Lorenza polega na uporządkowaniu poszczególnych przyczyn szczegółowych (t_γ , o_δ albo l_τ) w kolejności malejącej, począwszy od przyczyny, która wystąpiła największą ilość razy. W następnym kroku, należy wyznaczyć skumulowany procent uporządkowanych przyczyn. Takie działanie pozwala na wyznaczenie przyczyn, które najczęściej przyczyniają się do powstania zdarzenia wypadkowego A' . Dodatkowo, przeanalizowane w powyższy sposób przyczyny można zaklasyfikować, np. za pomocą metody ABC. Dzięki temu, możliwe jest zidentyfikowanie:

- przyczyn istotnych (oznaczanych jako A), które stanowią około 80% wystąpienia wszystkich przyczyn przynależnych do danej grupy rodzajowej przyczyn t_γ , o_δ albo l_τ ,
- przyczyn średnio istotne (oznaczanych jako B), które stanowią około 15% wystąpienia wszystkich przyczyn przynależnych do danej grupy rodzajowej przyczyn t_γ , o_δ albo l_τ ,
- przyczyn nieistotnych (oznaczanych jako C), które stanowią około 5% wystąpienia wszystkich przyczyn przynależnych do danej grupy rodzajowej przyczyn t_γ , o_δ albo l_τ .

Graficzną interpretację przedstawionych powyżej metod przedstawiono na rys. 7.2.



Rys. 7.2 Schemat klasyfikacji przyczyn (opracowanie własne)

7.1.1. Przyczyny techniczne

W analizowanym zbiorze zdarzeń wypadkowych A' , przyczyny techniczne T wystąpiły łącznie 336 razy co stanowi około 25% wystąpień wszystkich przyczyn T , O i L . W tab. 7.1 zamieszczono zidentyfikowane przyczyny techniczne T , uszeregowane w kolejności malejącej, począwszy od przyczyny, która wystąpiła największą ilość razy. Dodatkowo w tabeli zawarto: liczności wystąpień poszczególnych przyczyn t_γ , udział procentowy poszczególnych przyczyn t_γ , skumulowany udział procentowy następujących kolejno przyczyn t_γ oraz klasyfikację istotności przyczyn t_γ .

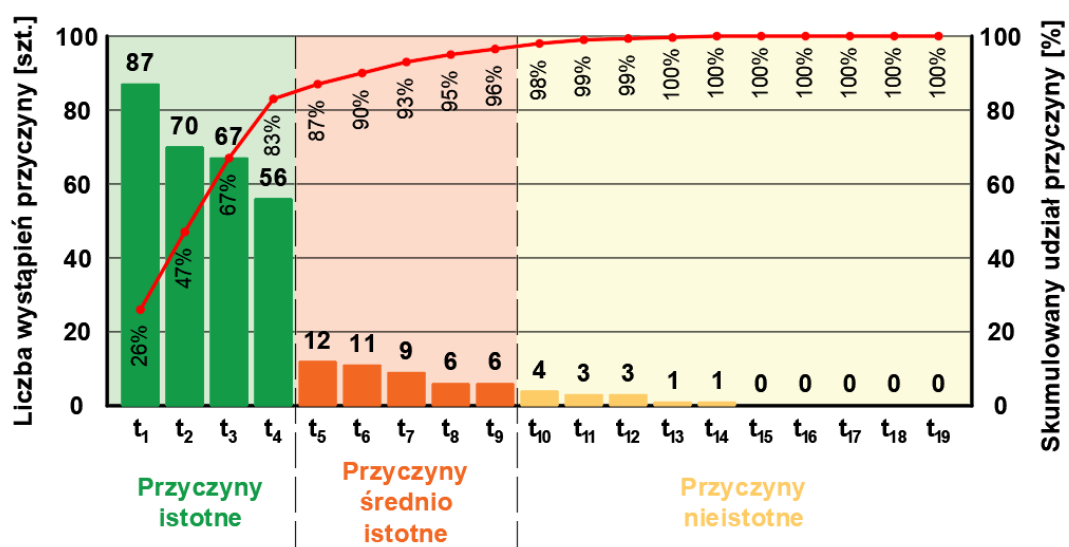
Tab. 7.1 Analizowane szczegółowe przyczyny techniczne t_γ

Analizowane przyczyny techniczne T $T = \{t_\gamma: \gamma = 1, \dots, 19\}$		Liczność wystąpień [szt.]	Udział [%]	Skumulowany udział [%]	Klasa istotności przyczyny
t_1	Brak lub niewłaściwe urządzenia zabezpieczające	87	26%	26%	A
t_2	Brak lub niewłaściwe środki ochrony zbiorowej	70	21%	47%	A
t_3	Niewłaściwa struktura przestrzenna czynnika materialnego	67	20%	67%	A
t_4	Niewłaściwa stateczność czynnika materialnego	56	17%	83%	A
t_5	Wady konstrukcyjne czynnika materialnego będące źródłem zagrożenia	12	4%	87%	B
t_6	Zastosowanie materiałów zastępczych	11	3%	90%	B
t_7	Brak lub niewłaściwa sygnalizacja zagrożeń	9	3%	93%	B
t_8	Nieodpowiednia wytrzymałość czynnika materialnego	6	2%	95%	B
t_9	Niedotrzymanie wymaganych parametrów technicznych	6	2%	96%	B
t_{10}	Ukryte wady materiałowe czynnika materialnego	4	1%	98%	C
t_{11}	Nadmierna eksploatacja czynnika materialnego	3	1%	99%	C
t_{12}	Niedostateczna konserwacja czynnika materialnego	3	1%	99%	C

Tab. 7.1 (c.d.) Analizowane szczegółowe przyczyny techniczne t_γ

t_{13}	Niedostosowanie czynnika materialnego do transportu, konserwacji lub napraw	1	0%	100%	C
t_{14}	Niewłaściwe naprawy i remonty czynnika materialnego	1	0%	100%	C
t_{15}	Niewłaściwe elementy sterownicze	0	0%	100%	C
t_{16}	Inne, niewymienione lub nieokreślone nieprawidłowości projektowo-konstrukcyjne	0	0%	100%	C
t_{17}	Inne, niewymienione lub nieokreślone nieprawidłowości wykonania	0	0%	100%	C
t_{18}	Inne, niewymienione lub nieokreślone wady materiałowe	0	0%	100%	C
t_{19}	Inne, niewymienione lub nieokreślone nieprawidłowości związane z eksploatacją	0	0%	100%	C

Na rys. 7.3 przedstawiono wykres Pareto-Lorenza przedstawiający uszeregowane przyczyny t_γ oraz ich skumulowany udział procentowy. Na rysunku zaznaczono również klasyfikację istotności przyczyn: A – przyczyny istotne, B – przyczyny średnio istotne, C – przyczyny nieistotne.



Rys. 7.3 Schemat klasyfikacji przyczyn t_γ (opracowanie własne)

Analizując otrzymane wyniki należy stwierdzić, że istotnymi przyczynami technicznymi są przyczyny: t_1, t_2, t_3 oraz t_4 , których skumulowany udział wynosi około 83%.

7.1.2. Przyczyny organizacyjne

W analizowanym zbiorze zdarzeń wypadkowych A' , przyczyny organizacyjne O wystąpiły łącznie 622 razy co stanowi około 47% wystąpień wszystkich przyczyn T, O i L . W tab. 7.2 zamieszczono zidentyfikowane przyczyny organizacyjne O , uszeregowane w kolejności malejącej, począwszy od przyczyny, która wystąpiła największą ilość razy. Dodatkowo w tabeli zawarto: licznosci wystąpień poszczególnych przyczyn o_δ , udział procentowy poszczególnych przyczyn o_δ , skumulowany udział procentowy następujących kolejno przyczyn o_δ oraz klasyfikację istotności przyczyn o_δ .

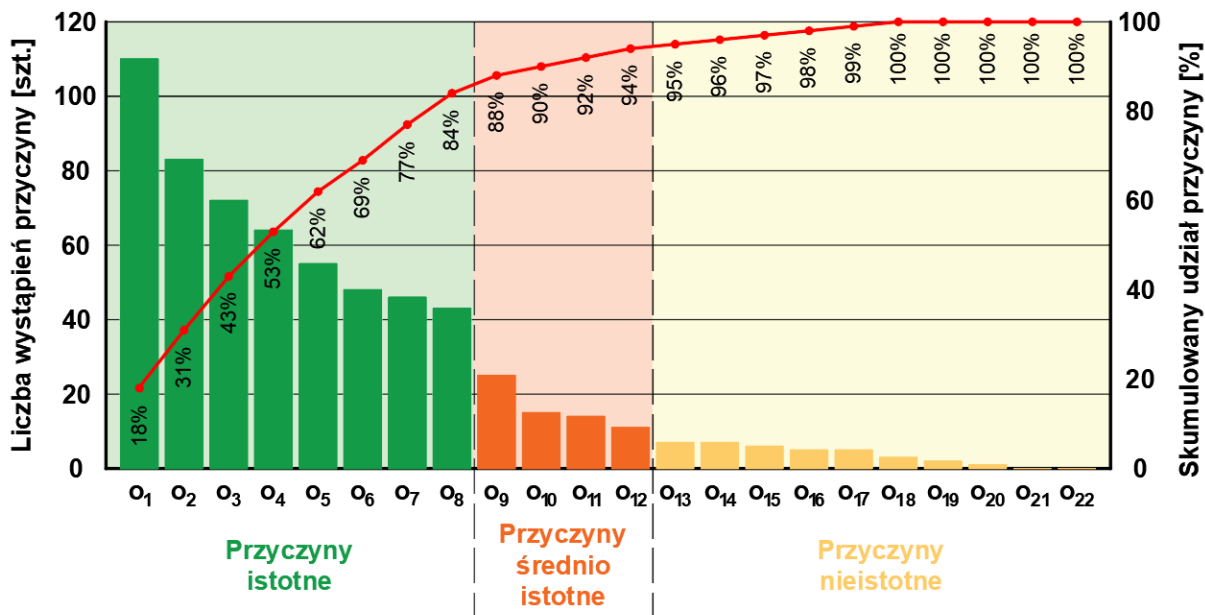
Tab. 7.2 Analizowane szczegółowe przyczyny organizacyjnych o_δ

	Analizowane przyczyny organizacyjne O $O = \{o_\delta: \delta = 1, \dots, 22\}$	Liczność wystąpień [szt.]	Udział [%]	Skumulowany udział [%]	Klasa istotności przyczyny
o_1	Brak nadzoru	110	18%	18%	A
o_2	Dopuszczenie do pracy czynnika materialnego bez wymaganych kontroli, przeglądów	83	13%	31%	A
o_3	Brak lub niewłaściwe przeszkolenie w zakresie bezpieczeństwa i higieny prac	72	12%	43%	A
o_4	Tolerowanie, przez osoby sprawujące nadzór, odstępstw od przepisów i zasad bezpieczeństwa i higieny pracy	64	10%	53%	A
o_5	Niedostateczne przygotowanie zawodowe pracownika	55	9%	62%	A
o_6	Brak instrukcji posługiwania się czynnikiem materialnym	48	8%	69%	A
o_7	Dopuszczenie do pracy pracownika z przeciwwskazaniami lekarskimi lub bez badań lekarskich	46	7%	77%	A
o_8	Nieodpowiednie przejścia i dojścia	43	7%	84%	A
o_9	Brak środków ochrony indywidualnej	25	4%	88%	B
o_{10}	Tolerowanie, przez osoby sprawujące nadzór, stosowania niewłaściwej technologii	15	2%	90%	B

Tab. 7.2 (c.d.) Analizowane szczegółowe przyczyny organizacyjnych o_{δ}

o_{11}	Nieprawidłowy podział pracy lub rozplanowanie zadań	14	2%	92%	B
o_{12}	Nieodpowiednie rozmieszczenie i składowanie przedmiotów pracy (surowców, półproduktów, produktów itp.)	11	2%	94%	B
o_{13}	Niewłaściwe usytuowanie urządzeń na stanowisku pracy	7	1%	95%	C
o_{14}	Niewłaściwy dobór środków ochrony indywidualnej	7	1%	96%	C
o_{15}	Niewłaściwa koordynacja prac zbiorowych	6	1%	97%	C
o_{16}	Niewłaściwe polecenia przełożonych	5	1%	98%	C
o_{17}	Nieusunięcie zbędnych przedmiotów, substancji lub energii (np. odpadów, opakowań, resztek substancji, niewyłączenie zasilania itp.)	5	1%	99%	C
o_{18}	Wykonywanie pracy w zbyt małej obsadzie osobowej	3	0%	100%	C
o_{19}	Wykonywanie, z polecenia osób sprawujących nadzór, prac nie wchodzących w zakres obowiązków pracownika	2	0%	100%	C
o_{20}	Wykonywanie prac pomimo niewłaściwego zaopatrzenia w narzędzia, surowce	1	0%	100%	C
o_{21}	Inne, niewymienione lub nieokreślone nieprawidłowości związane z ogólną organizacją pracy	0	0%	100%	C
o_{22}	Inne, niewymienione lub nieokreślone nieprawidłowości organizacji stanowiska pracy	0	0%	100%	C

Na rys. 7.4 przedstawiono wykres Pareto-Lorenza przedstawiający uszeregowane przyczyny o_{δ} oraz ich skumulowany udział procentowy. Na rysunku zaznaczono również klasyfikację istotności przyczyn: A – przyczyny istotne, B – przyczyny średnio istotne, C – przyczyny nieistotne.



Rys. 7.4 Schemat klasyfikacji przyczyn o_{δ} (opracowanie własne)

Analizując otrzymane wyniki należy stwierdzić, że istotnymi przyczynami organizacyjnymi są przyczyny: $o_1, o_2, o_3, o_4, o_5, o_6, o_7$ oraz o_8 , których skumulowany udział wynosi około 84%.

7.1.3. Przyczyny ludzkie

W analizowanym zbiorze zdarzeń wypadkowych A' , przyczyny ludzkie L wystąpiły łącznie 364 razy co stanowi około 28% wystąpień wszystkich przyczyn T, O i L . W tab. 7.3 zamieszczono zidentyfikowane przyczyny ludzkie L , uszeregowane w kolejności malejącej, począwszy od przyczyny, która wystąpiła największą ilość razy. Dodatkowo w tabeli zawarto: licznosci wystąpień poszczególnych przyczyn l_{τ} , udział procentowy poszczególnych przyczyn l_{τ} , skumulowany udział procentowy następujących kolejno przyczyn l_{τ} oraz klasyfikację istotności przyczyn l_{τ} .

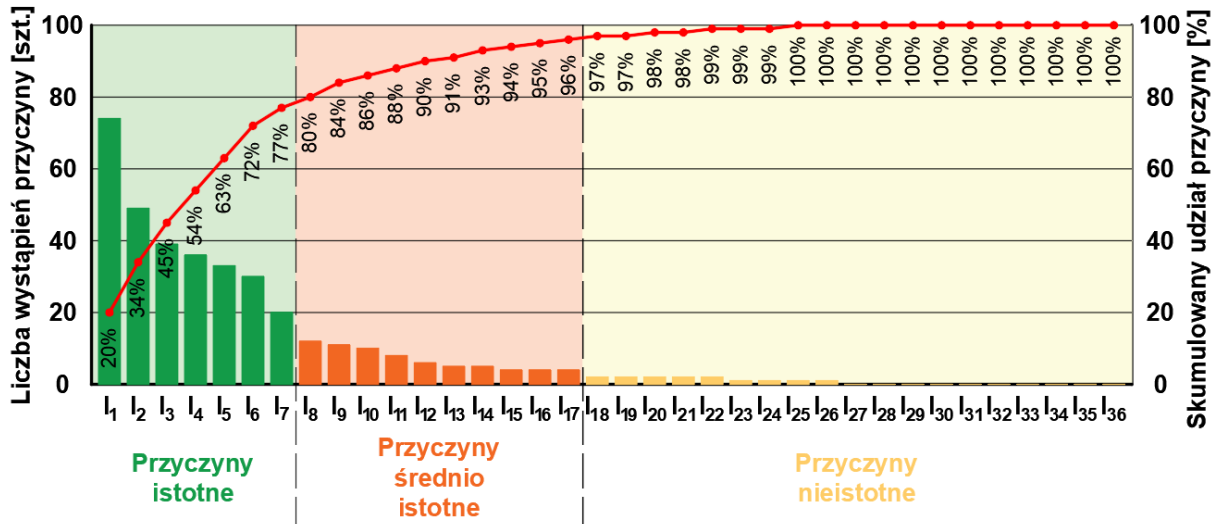
Tab. 7.3 Analizowane szczegółowe przyczyny ludzkich l_τ

Analizowane przyczyny ludzkie L $L = \{l_\tau: \tau = 1, \dots, 36\}$		Liczność wystąpień [szt.]	Udział [%]	Skumulowany udział [%]	Klasa istotności przyczyny
l_1	Nieużywanie przez pracownika środków ochrony indywidualnej	74	20%	20%	A
l_2	Lekceważeniem zagrożenia (brawura, ryzykanctwo)	49	13%	34%	A
l_3	Zaskoczeniem niespodziewanym zdarzeniem	39	11%	45%	A
l_4	Spożyciem alkoholu, środków odurzających lub substancji psychotropowych	36	10%	54%	A
l_5	Niedostateczną koncentracją uwagi na wykonywanej czynności	33	9%	63%	A
l_6	Przechodzenie, przejeżdżanie lub przebywanie w miejscach niedozwolonych	30	8%	72%	A
l_7	Wykonywanie pracy nie wchodzącej w zakres obowiązków pracownika	20	5%	77%	A
l_8	Nieznajomością zagrożenia	12	3%	80%	B
l_9	Nieznajomością przepisów i zasad bezpieczeństwa i higieny pracy	11	3%	84%	B
l_{10}	Używanie nieodpowiedniego do danej pracy czynnika materialnego	10	3%	86%	B
l_{11}	Niewłaściwe zabezpieczenie czynnika materialnego (np. niezaciągnięcie hamulca na postoju)	8	2%	88%	B
l_{12}	Nagłym zachorowaniem, niedyspozycją fizyczną	6	2%	90%	B
l_{13}	Niewłaściwe uchwycenie, trzymanie czynnika materialnego	5	1%	91%	B
l_{14}	Wykonywanie czynności bez usunięcia zagrożenia (np. niewyłączenie maszyny, niewyłączenie napięcia)	5	1%	93%	B
l_{15}	Nieużywanie przez pracownika środków ochrony zbiorowej	4	1%	94%	B

Tab. 7.3 (c.d.) Analizowane szczegółowe przyczyny ludzkich l_{τ}

l_{16}	Lekceważeniem poleceń przełożonych	4	1%	95%	B
l_{17}	Niewłaściwym tempem pracy	4	1%	96%	B
l_{18}	Użycie czynnika materialnego podczas przebywania osób w strefie zagrożenia	2	1%	97%	C
l_{19}	Użycie czynnika materialnego niezgodnie z jego przeznaczeniem	2	1%	97%	C
l_{20}	Nieużywanie przez pracownika urządzeń zabezpieczających	2	1%	98%	C
l_{21}	Wejście, wjechanie na obszar zagrożony bez upewnienia się, czy nie ma niebezpieczeństwa	2	1%	98%	C
l_{22}	Brakiem doświadczenia	2	1%	99%	C
l_{23}	Wykonywanie pracy ręcznie zamiast przy użyciu czynnika materialnego	1	0%	99%	C
l_{24}	Wadliwe zainstalowanie, zamocowanie, zawieszenie czynnika materialnego przez pracownika	1	0%	99%	C
l_{25}	Niewłaściwe operowanie kończynami w strefie zagrożenia	1	0%	100%	C
l_{26}	Zmęczeniem	1	0%	100%	C
l_{27}	Udostępnienie przez pracownika czynnika materialnego osobie nie upoważnionej	0	0%	100%	C
l_{28}	Inne, niewymienione lub nieokreślone nieprawidłowości w posługiwaniu się czynnikiem materialnym	0	0%	100%	C
l_{29}	Inne	0	0%	100%	C
l_{30}	Zbyt szybka jazda	0	0%	100%	C
l_{31}	Żarty, bójki	0	0%	100%	C
l_{32}	Inne niewłaściwe zachowanie się pracownika	0	0%	100%	C
l_{33}	Przewlekłą lub ostrą chorobą psychiczną	0	0%	100%	C
l_{34}	Zdenerwowaniem	0	0%	100%	C
l_{35}	Innymi przyczynami	0	0%	100%	C
l_{36}	Nieużywanie przez pracownika środków ochrony indywidualnej	74	20%	20%	C

Na rys. 7.5 przedstawiono wykres Pareto-Lorenza przedstawiający uszeregowane przyczyn o_{δ} oraz ich skumulowany udział procentowy. Na rysunku zaznaczono również klasyfikację istotności przyczyn: A – przyczyny istotne, B – przyczyny średnio istotne, C – przyczyny nieistotne.



Rys. 7.5 Schemat klasyfikacji przyczyn l_t (opracowanie własne)

Analizując otrzymane wyniki należy stwierdzić, że istotnymi przyczynami organizacyjnymi są przyczyny: $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$ oraz l_7 , których skumulowany udział wynosi około 77%.

8. Oszacowanie parametrów ryzyka zawodowego

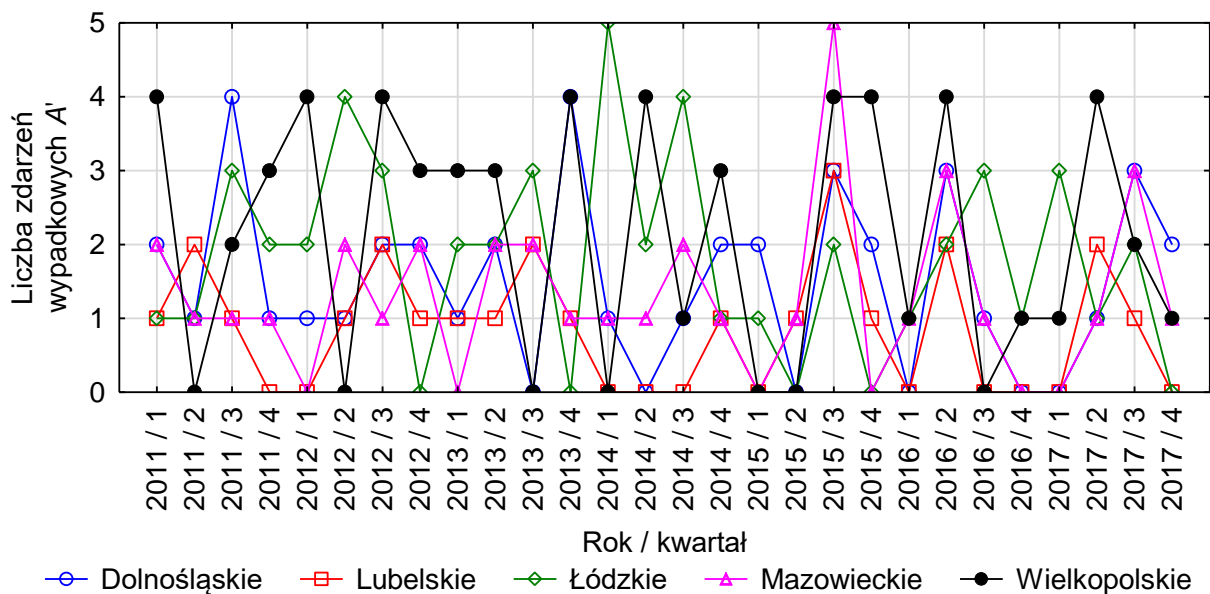
Jak zasygnalizowano w przeglądzie literaturowym, w praktycznych rozważaniach ryzyko zawodowe często określane jest jako kombinacja prawdopodobieństwa wystąpienia skutku P_S danego zdarzenia oraz ciężkości tego skutku S . Taką też interpretację ryzyka zawodowego przyjęto na potrzeby niniejszej dysertacji. W związku z powyższym, ryzyko zawodowe prac prowadzonych z wykorzystaniem rusztowań budowlanych R_Z , w ujęciu matematycznym, można przedstawić jako funkcję f dwóch zmiennych, za pomocą poniższego wzoru:

$$R_Z = f(P_S, S)$$

Kluczowym zadaniem badawczym jest oszacowanie wartości jakie mogą przyjmować przedstawione powyżej zmienne. Dodatkowo, w praktycznych rozważaniach, ważne jest opisanie ich za pomocą parametrów ryzyka wyrażonych w odpowiedniej w skali. Rozwiązanie powyższych zagadnień przedstawiono poniżej.

8.1. Parametr „prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku”

Wykonana, w trakcie realizacji wcześniejszych etapów, analiza protokołów kontroli powypadkowej pozwoliła na wyznaczenie szczegółowej liczby zdarzeń wypadkowych A' związanych z rusztowaniami budowlanymi. Zdarzenia te można podzielić na poszczególne regiony kraju, lata oraz kwartały roku – rys. 8.1.

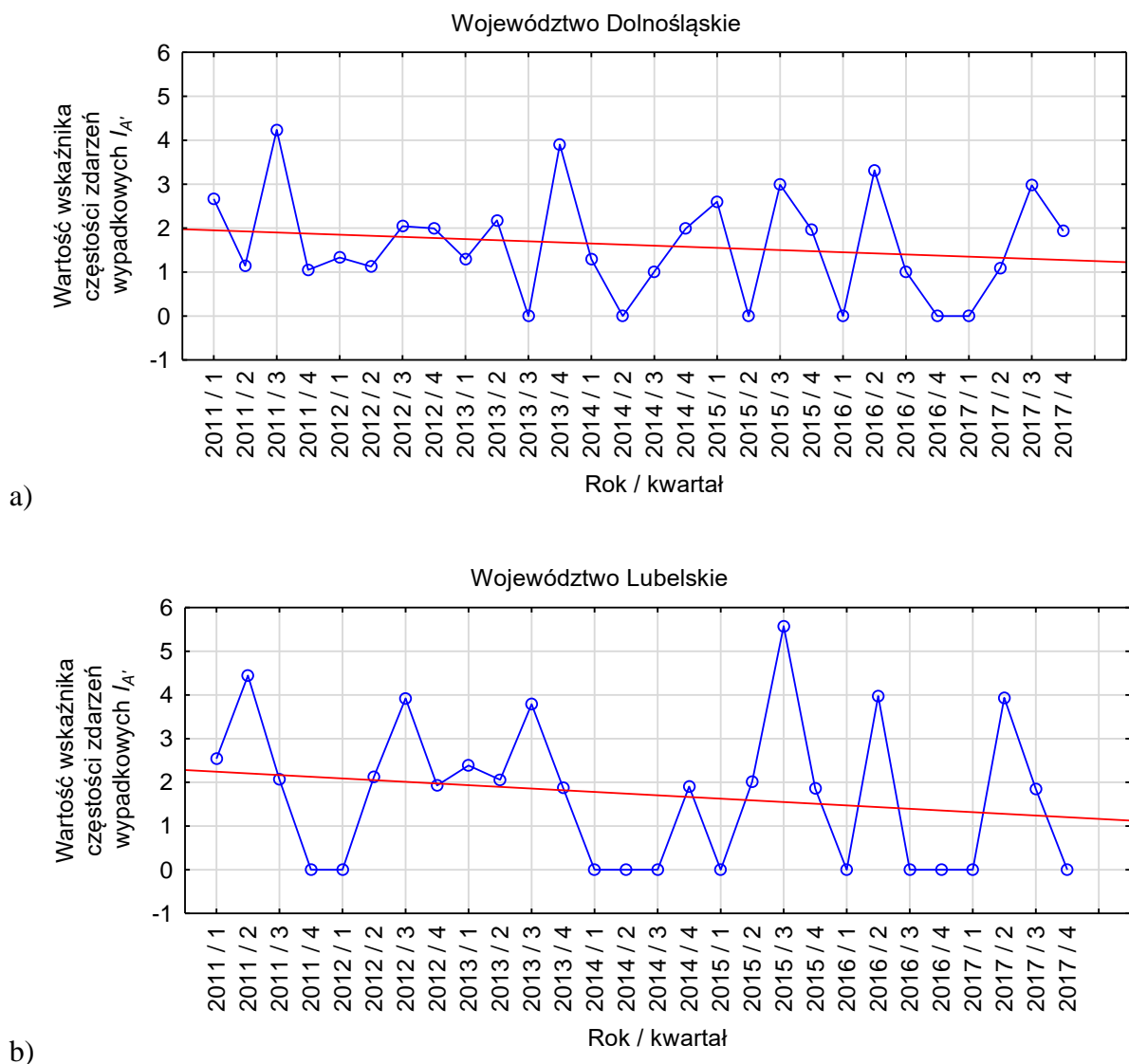


Rys. 8.1 Liczba zdarzeń wypadkowych A' w wybranych województwach
(opracowanie własne)

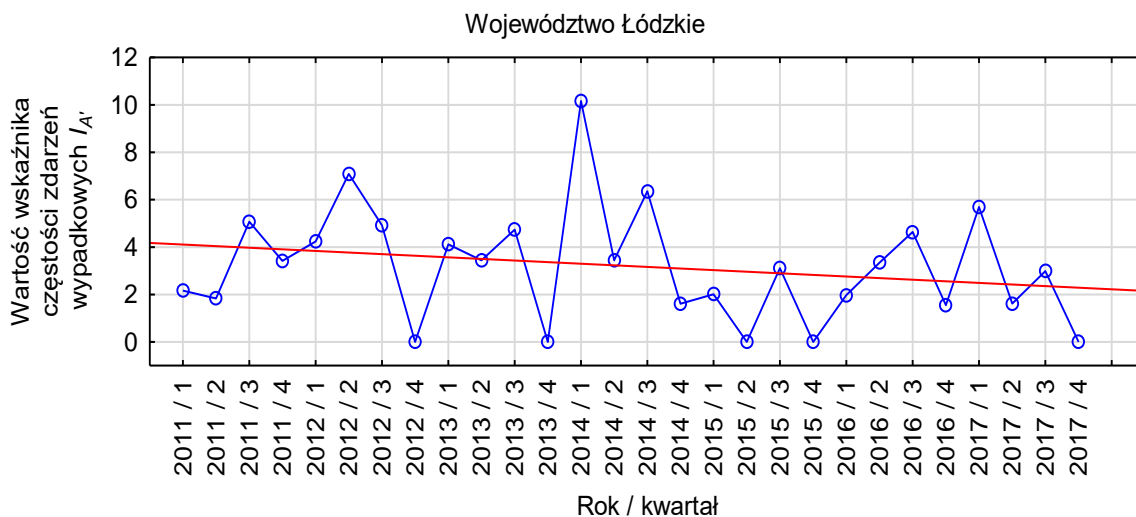
Otrzymane wyniki, w połączeniu z oszacowaną na etapie III liczbą rusztowań budowlanych L_R , umożliwiają wyznaczenie prawdopodobieństwa a posteriori wystąpienia zdarzenia wypadkowego, wyrażonego w postaci wskaźnika częstości zdarzeń wypadkowych $I_{A'}$ wg poniższej formuły:

$$I_{A'} = \frac{A'}{L_R} \cdot 10\,000 \left[\frac{\text{liczba zdarzeń wypadkowych}}{10\,000 \text{ rusztowań}} \right]$$

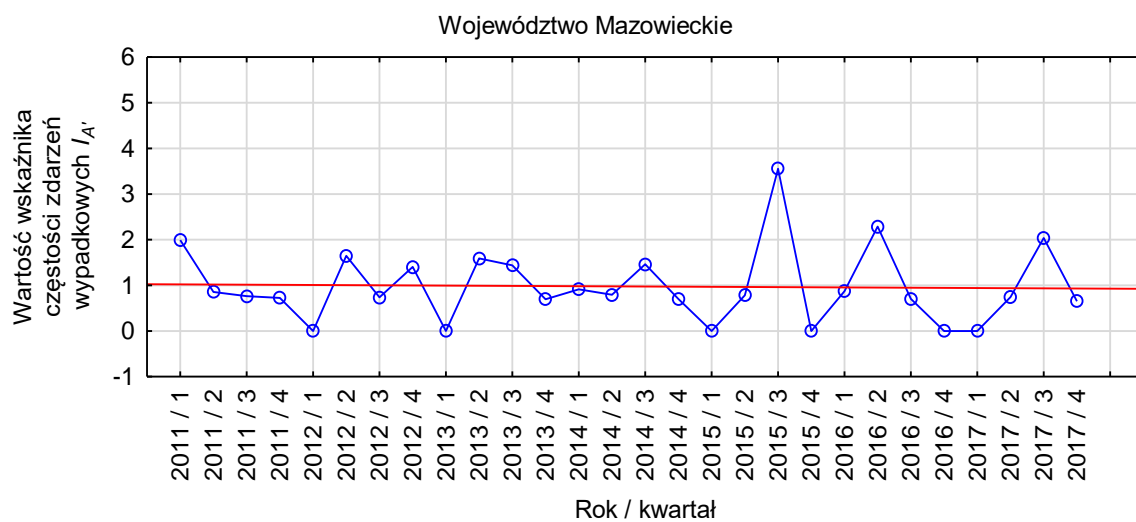
Wyliczone wartości częstości zdarzeń wypadkowych $I_{A'}$ dla poszczególnych województw zostały przedstawione na rys. 8.2.



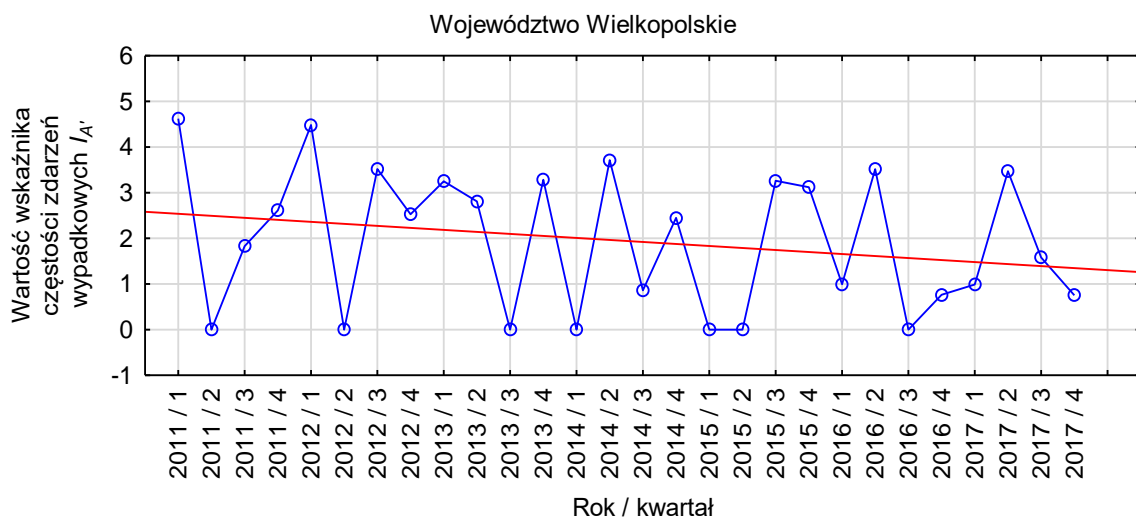
Rys. 8.2 Wartości wskaźnika częstości zdarzeń wypadkowych I_A dla województwa:
a) Dolnośląskiego, b) Lubelskiego, c) Łódzkiego, d) Mazowieckiego, e) Wielkopolskiego
(opracowanie własne)



c)



d)

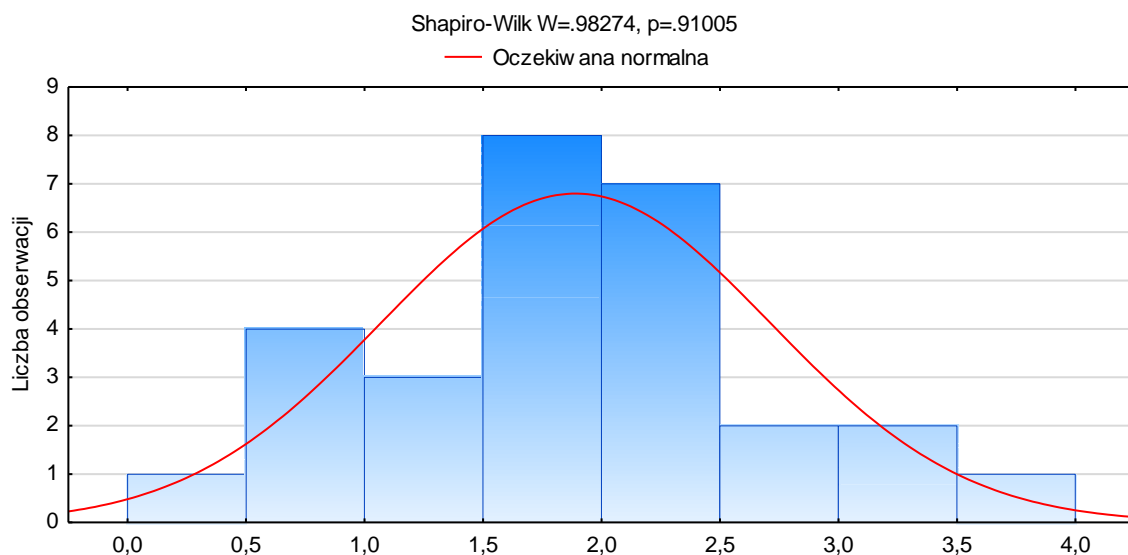


e)

Rys. 8.2 (c.d.) Wartości wskaźnika częstości zdarzeń wypadkowych I_A dla województwa: a) Dolnośląskiego, b) Lubelskiego, c) Łódzkiego, d) Mazowieckiego, e) Wielkopolskiego (opracowanie własne)

We wszystkich województwach zauważalna jest minimalna tendencja malejąca wypadkowości. Można zauważyć wyraźną zmienność częstości wypadków w przypadku województwa łódzkiego, lubelskiego i dolnośląskiego. W przypadku pozostałych województw zmienność ta nie jest już tak wyraźnie obserwowana. W przebiegu wykresu dotyczącego województwa łódzkiego widoczny jest znaczny wzrost częstości wypadków w pierwszym kwartale 2014 roku, który wynosił 10,1 wypadków na każde 10 000 eksploatowanych rusztowań.

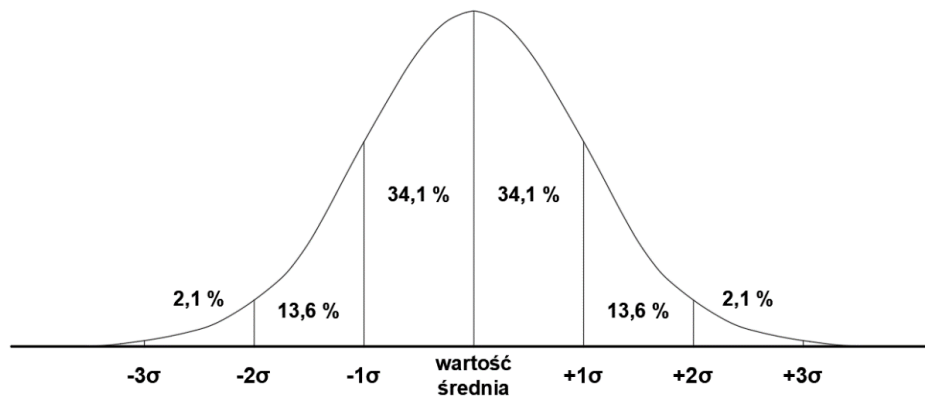
W celu wyznaczenia ujednoczonego dla wszystkich województw parametru „prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku”, przedstawione powyżej wartości dla poszczególnych województw zostały uśrednione i zbadane pod kątem rodzaju rozkładu jaki przybierają. W tym celu postawiono hipotezę, że rozkład ten przyjmuje wartość rozkładu normalnego, który jest jednym z najczęściej stosowanych rozkładów w analizach technicznych [170]. W celu weryfikacji tak postawionej hipotezy wykorzystano test Shapiro-Wilka, który pozwala na zbadanie normalności rozkładu. Po przeprowadzeniu obliczeń, dla analizowanego zbioru danych otrzymano wartość statystyki testowej $W = 0,983$. Dla analizowanej liczby obserwacji, wartość krytyczna statystyki W_k , na przyjętym poziomie prawdopodobieństwa $\alpha = 0,05$, wynosi 0,924. Otrzymana w ten sposób nierówność $W > W_k$ oznacza, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu badanych danych – rys. 8.3.



Rys. 8.3 Histogram uśrednionych dla poszczególnych województw wartości wskaźnika częstości zdarzeń wypadkowych I_A (opracowanie własne)

Otrzymane wyniki dają podstawę do wykorzystania tzw. reguły trzech sigm, w celu identyfikacji przedziałów zawierających daną liczbę obserwacji. Graficzną interpretacją reguły

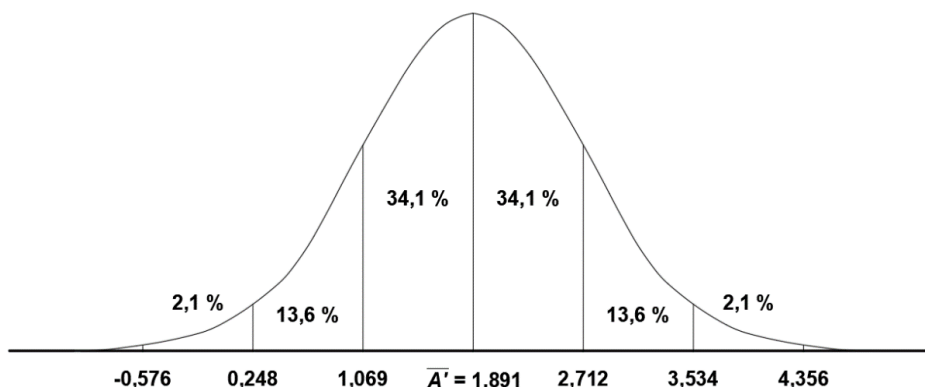
trzech sigm jest rozkład normalny, wyrażony za pomocą krzywej Gaussa, podzielony na przedziały – rys. 8.4.



Rys. 8.4 Graficzna interpretacja reguły trzech sigm (opracowanie własne)

Powszechnie przyjmuje się, że w przedziale od -1σ do $+1\sigma$ odchylenia standardowego od wartości średniej znajduje się około 68,2% wszystkich obserwacji. W przedziałach od -2σ do -1σ oraz od $+1\sigma$ do $+2\sigma$ odchylen standardowych znajduje się łącznie około 27,2% obserwacji, a w przedziałach od -3σ do -2σ oraz od $+2\sigma$ do $+3\sigma$ odchylen standardowych znajduje się łącznie około 4,3% obserwacji. W związku z powyższym, obserwacje, które przyjmują wartości mniejsze niż -3σ odchylenia standardowego od wartości średniej oraz większe niż $+3\sigma$ odchylenia standardowego od wartości średniej stanowią jedynie 0,3% wszystkich obserwacji przez co nie stanowią istotnego wpływu na wynik końcowy.

Metoda trzech sigm pozwala na ściśle wyznaczenie granic dla poszczególnych przedziałów. W związku z tym postanowiono wykorzystać ją do opracowania skali oceny prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń wypadkowych A' . Dla zadanego zbioru danych obliczeniowych otrzymano wartość średnią na poziomie $\bar{A}' = 1,891$, a odchylenie standardowe $\sigma = 0,822$. Na rys. 8.5 przedstawiono otrzymane wartości przedziałów dla analizowanego zbioru danych.



Rys. 8.5 Krzywa Gaussa, z zaznaczonymi granicami przedziałów dla analizowanego zbioru danych (opracowanie własne)

Analizując otrzymane wartości należy zauważyć, że wskaźnik częstości zdarzeń, w ujęciu teoretycznym, może przyjmować wartości ujemne. W praktyce, wartości wskaźnika częstości zdarzeń wypadkowych $I_{A'}$, nie mogą być ujemne – $I_{A'} \geq 0$. W związku z powyższym, skala parametru „prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku” na rusztowaniu (odpowiadająca prawdopodobieństwu wystąpienia skutków P_S) przedstawia się w sposób następujący:

- $I_{A'} \in \langle 0; 0,248 \rangle$ – prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia wypadkowego A' jest bardzo niskie ($P_S = 1$),
- $I_{A'} \in \langle 0,248; 1,069 \rangle$ – prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia wypadkowego A' jest niskie ($P_S = 2$),
- $I_{A'} \in \langle 1,069; 2,712 \rangle$ – prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia wypadkowego A' jest średnie ($P_S = 3$),
- $I_{A'} \in \langle 2,712; 3,534 \rangle$ – prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia wypadkowego A' jest wysokie ($P_S = 4$),
- $I_{A'} \in \langle 3,534; 4,356 \rangle$ – prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia wypadkowego A' jest bardzo wysokie ($P_S = 5$),
- $I_{A'} \in \langle 4,356; +\infty \rangle$ – prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia wypadkowego A' jest skrajnie wysokie ($P_S = 6$).

8.2. Parametr „potencjalny skutek wypadku”

Drugim parametrem proponowanej metodyki oceny ryzyka jest parametr „potencjalny skutek wypadku”, wyznaczony na podstawie wyników uzyskanych w trakcie realizacji wcześniejszych etapów badań, w szczególności analizy protokołów kontroli powypadkowej. Na podstawie ich wnikliwej analizy stwierdzono, że w analizowanej próbie 213 zdarzeń wypadkowych A' prawdopodobieństwo wypadku:

- lekkiego wynosi 31,5% (37 zdarzeń wypadkowych A'),
- ciężkiego wynosi 49,8% (106 zdarzeń wypadkowych A'),
- śmiertelnego wynosi 18,8 % (10 zdarzenia wypadkowe A').

Przeprowadzono analizę związków występujących pomiędzy istotnymi przyczynami wypadków (zidentyfikowanymi w rozdziale 7) oraz skutkami wypadków. W tym celu wykorzystano analizę korelacji Pearsona, a uzyskane wyniki przedstawiono w tab. 8.1, 8.2 i 8.3.

Tab. 8.1 Wartości współczynników korelacji dla skutków wypadku i istotnych przyczyn technicznych t_γ

t_γ	Przyczyna techniczna t_γ	Współczynnik korelacji Pearsona R_γ
t_1	Brak lub niewłaściwe urządzenia zabezpieczające	-0,101
t_2	Brak lub niewłaściwe środki ochrony zbiorowej	0,060
t_3	Niewłaściwa struktura przestrzenna czynnika materialnego	-0,083
t_4	Niewłaściwa stateczność czynnika materialnego	-0,156
t_{inne}	Inna średnio istotna lub nieistotna przyczyna techniczna	0,076

Tab. 8.2 Wartości współczynników korelacji dla skutków wypadku i istotnych przyczyn organizacyjnych o_δ

o_δ	Przyczyna organizacyjna o_δ	Współczynnik korelacji Pearsona R_δ
o_1	Brak nadzoru	-0,026
o_2	Dopuszczenie do pracy czynnika materialnego bez wymaganych kontroli, przeglądów	0,063
o_3	Brak lub niewłaściwe przeszkolenie w zakresie bezpieczeństwa i higieny prac	-0,090
o_4	Tolerowanie, przez osoby sprawujące nadzór, odstępstw od przepisów i zasad bezpieczeństwa i higieny pracy	0,042
o_5	Niedostateczne przygotowanie zawodowe pracownika	0,123
o_6	Brak instrukcji posługiwania się czynnikiem materialnym	-0,144
o_7	Dopuszczenie do pracy pracownika z przeciwwskazaniami lekarskimi lub bez badań lekarskich	-0,079
o_8	Nieodpowiednie przejścia i dojścia	-0,192
o_{inne}	Inna średnio istotna lub nieistotna przyczyna organizacyjna	0,019

Tab. 8.3 Wartości współczynników korelacji dla skutków wypadku i istotnych przyczyn ludzkich l_{τ}

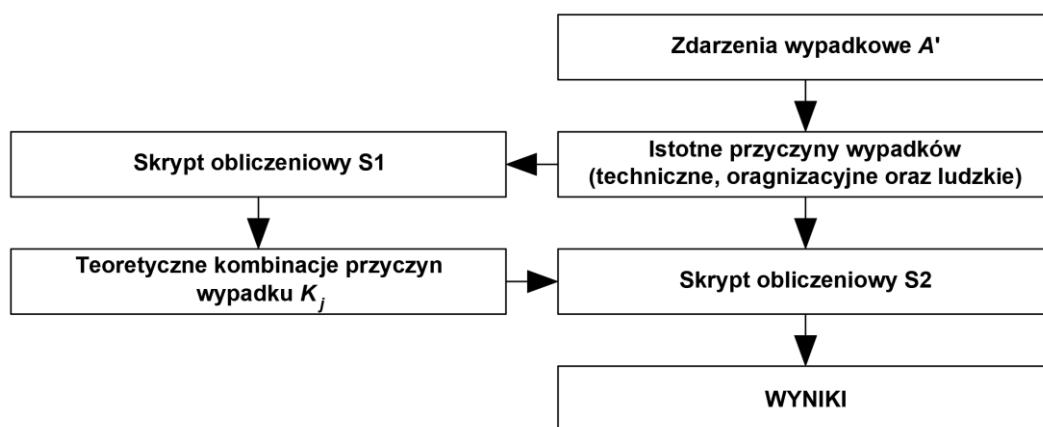
l_{τ}	Przyczyna ludzka l_{τ}	Współczynnik korelacji Pearsona R_{τ}
l_1	Nieuzywanie przez pracownika środków ochrony indywidualnej	-0,076
l_2	Lekceważeniem zagrożenia (brawura, ryzykanctwo)	-0,082
l_3	Zaskoczeniem niespodziewanym zdarzeniem	-0,016
l_4	Spożyciem alkoholu, środków odurzających lub substancji psychotropowych	0,008
l_5	Niedostateczną koncentracją uwagi na wykonywanej czynności	0,061
l_6	Przechodzenie, przejeżdżanie lub przebywanie w miejscach niedozwolonych	0,127
l_7	Wykonywanie pracy nie wchodzącej w zakres obowiązków pracownika	0,071
l_{inne}	Inna średnio istotna lub nieistotna przyczyna ludzka	0,047

Według klasyfikacji Guilford'a [171] przyjmuje się, że jeżeli $|R| < 0,3$ to korelacja jest słaba, a jeżeli $|R| < 0,1$ to korelacja jest niska. Uzyskane w wyniku badań wartości współczynników korelacji są bardzo małe ($|R| < 0,3$, a w większości przypadków $|R| < 0,1$) i świadczą o braku istotnej korelacji między przyczynami wypadków a ich konsekwencjami. Jest to potwierdzenie powszechnie znanej tezy, według której konsekwencje danego zdarzenia w dużej mierze zależą od przypadku, który jest elementem niemierzalnym. Uzyskane wyniki świadczą również o braku możliwości opracowania liniowego modelu matematycznego pozwalającego na przedstawienie powyższego zjawiska.

Rozwiązaniem powyższego problemu, umożliwiającego wyrażenie parametru „potencjalny skutek wypadku” za pomocą ścisłej wartości, jest zaproponowana przez autora dysertacji metoda porównawcza, przypominająca działanie sita. Metoda ta zakłada wyznaczenie prawdopodobieństwa a posteriori powstania skutków danego rodzaju (tj. skutków lekkich, ciężkich oraz śmiertelnych) na podstawie przyczyn.

Głównym problemem rozwiązania postawionego problemu badawczego za pomocą zaproponowanej metody była konieczność przetworzenia dużego zbioru danych, składającego się z kombinacji 22 różnych przyczyn, w taki sposób aby dla każdej teoretycznej kombinacji przyczyn wypadku K_j określić prawdopodobieństwo powstania skutków o charakterze lekkim E_1 , ciężkim E_2 oraz śmiertelnym E_3 . W wyniku analizy ustalono, że 22 przyczyny tworzą łącznie 4 194 304 niezależne przypadki obliczeniowe – teoretyczne kombinacje przyczyn wypadku K_j ($j = 1, \dots, 4\,194\,304$). W celu przeanalizowania tak dużego zbioru możliwych kombinacji i dopasowania poszczególnych zdarzeń wypadkowych A' konieczne było opracowanie skryptu obliczeniowego, którego działanie oparte zostało na metodzie przypominającej działanie sita. W tym celu skorzystano z języka programowania Python.

Na rys. 8.6 przedstawiono schemat analiz, które wykonano w celu przeprowadzenia powyższej analizy.



Rys. 8.6 Ogólny schemat analizy (opracowanie własne)

W pierwszym kroku, opracowano skrypt S1 (załącznik nr IV do opracowania) pozwalający na wyznaczenie wszystkich możliwych teoretycznych kombinacji przyczyn wypadku K_j – rys. 8.7. Elementem wyjściowym uzyskanym za pomocą skryptu obliczeniowego S1 jest baza kombinacji K_j , zawierająca 4 194 304 unikalne i niezależne przypadki obliczeniowe. Wystąpienie danej przyczyny w powyższej bazie kombinacji K_j zapisano w systemie binarnym (0 – przyczyna nie występuje, 1 – przyczyna występuje). Fragment otrzymanych w tym kroku wyników przedstawiono w tab. 8.4.

rzeczywistych zdarzeń wypadkowych A'_i pozyskanych z protokołów kontroli powypadkowej w następujący sposób:

- Każdy teoretyczny przypadek K_j , stanowi unikalne sito, przez które przesiewane są każdorazowo wszystkie zdarzenia wypadkowe A' . „Otwartymi oczkami sita” są przyczyny istotne zakodowane w systemie binarnym wartością 1. Przez sito mogą przejść tylko te zdarzenia wypadkowe A' , których wszystkie przyczyny są zgodne z „otwartymi oczkami sita” lub te których wszystkie przyczyny są zgodne z częścią „otwartych oczek sita”. Takie podejście prowadzi do sytuacji, w której sito (pojedynczy przypadek teoretycznej kombinacji przyczyn wypadku K_j) blokuje zdarzenia wypadkowe A' , które są spowodowane przynajmniej jedną przyczyną inną niż „otwarte oczko sita”.
- Przyporządkowane do każdej teoretycznej kombinacji przyczyn wypadku K_j zdarzenia wypadkowe A' posiadają informację na temat skutków wypadku (wypadek lekki E_1 , ciężki E_2 lub śmiertelny E_3).
- Zsumowanie zdarzenia wypadkowe A' o poszczególnych skutkach dla każdej teoretycznej kombinacji K_j i wyrażenie skutków za pomocą wartości procentowej.

```
#czytanie
import csv
lista=[]
lista2=[]
lista_skutki=[]
lista_skutki2=[]
lista_skutki3=[]
lista_skutki4=[]

# Lista wypadkow - LB
with open('Baza_wypadkow.csv', 'r', encoding='utf-8-sig') as csvfile:
    csvreader = csv.reader(csvfile)

    for row in csvreader:
        lista.append(row)
        aLB=lista
        LB= [[int(x) for x in list] for list in aLB]

# Lista przypadkow - LK
with open('lista_kombinacji_LK.csv', 'r', encoding='utf-8-sig') as csvfile:
    csvreader = csv.reader(csvfile)

    for row in csvreader:
        lista2.append(row)
        aLK=lista2
        LK= [[int(x) for x in list] for list in aLK]
```

Rys. 8.8 Skrypt obliczeniowy S2 – kod opracowany w środowisku Python
(opracowanie własne)


```

# Przyporzadkowanie
def mch(str1, str2):
    x=0
    while x+1 < len(str1):
        if str1[x] == 0:
            if not str2[x] == 0:
                return False
            return False
        if x < (len(str1)-1):
            if str1[x] == str2[x]:
                x+=0
            else:
                return False
        x+=1
    return True

for str1 in LK:
    for str2 in LB:
        if mch(str1, str2):
            skutki = str2[22]
            lista_skutki.append(skutki)

smiertelne = lista_skutki.count(1)
ciezkie = lista_skutki.count(2)
lekkie = lista_skutki.count(3)

suma = smiertelne + ciezkie + lekkie

smiertelnep = 0
if smiertelne > 0:
    smiertelnep = smiertelne / suma * 100

ciezkiep = 0
if ciezkie > 0:
    ciezkiep = ciezkie / suma * 100

lekkiep = 0
if lekkie > 0:
    lekkiep = lekkie / suma * 100

lista_skutki2 = ["Smiertelne=", smiertelne, "Ciezkie=", ciezkie,
"Lekkie=", lekkie, "SUMA=", suma, "Smiertelne [%]=", smiertelnep, "Ciezkie
[%]=", ciezkiep, "Lekkie [%]=", lekkiep]

lista_skutki3 = str1 + lista_skutki2

lista_skutki4.append(lista_skutki3)

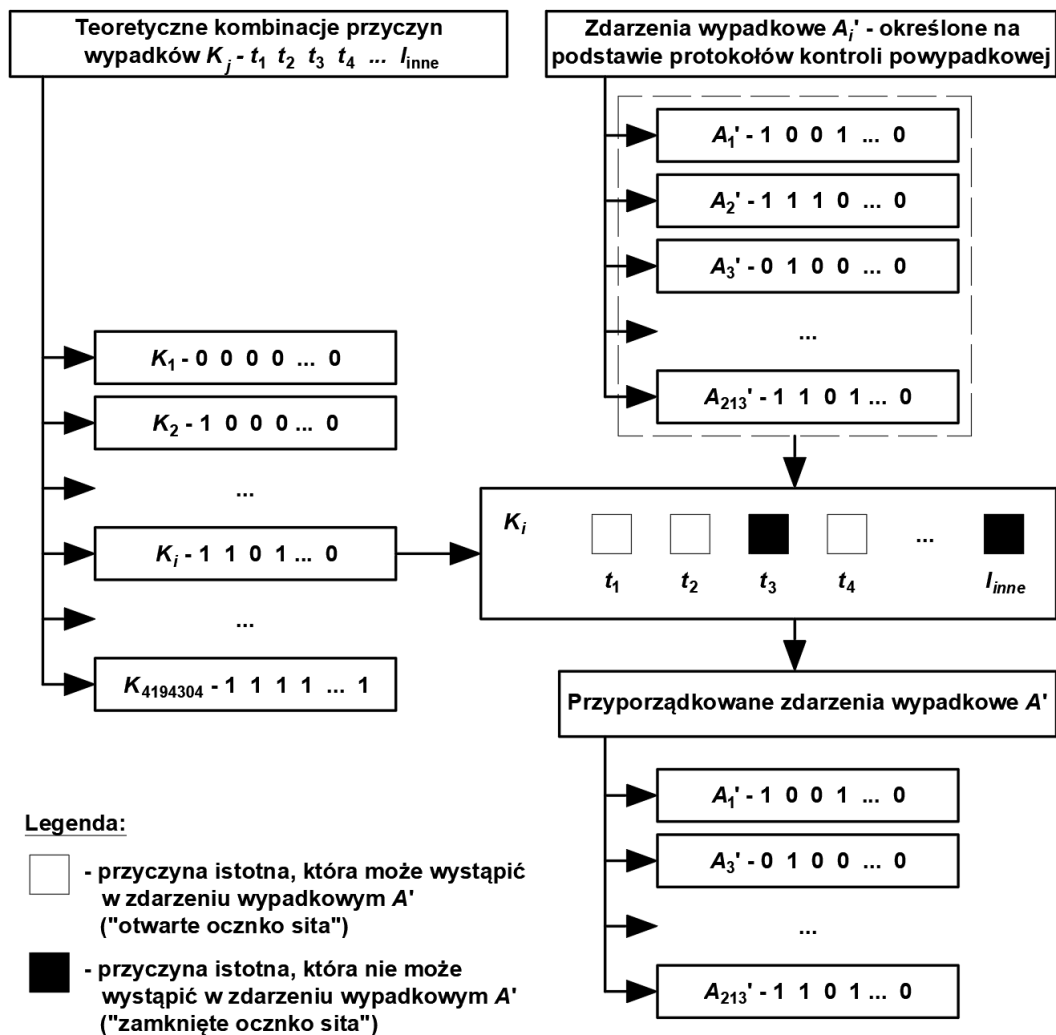
lista_skutki = []

# zapis
with open('WYNIKI.csv', 'w+', newline='') as newcsvfile:
    csvwriter = csv.writer(newcsvfile)
    for row in lista_skutki4:
        csvwriter.writerow(row)

```

Rys. 8.8 (c.d.) Skrypt obliczeniowy S2 – kod opracowany w środowisku Python
(opracowanie własne)

Zasada przyporządkowywania poszczególnych zdarzeń wypadkowych A' do danej kombinacji K_j za pomocą skryptu S2 przedstawiona została na rys. 8.9.



Rys. 8.9 Schemat przyporządkowywania poszczególnych zdarzeń wypadkowych A' do danej teoretycznych kombinacji przyczyn wypadku K_j (opracowanie własne)

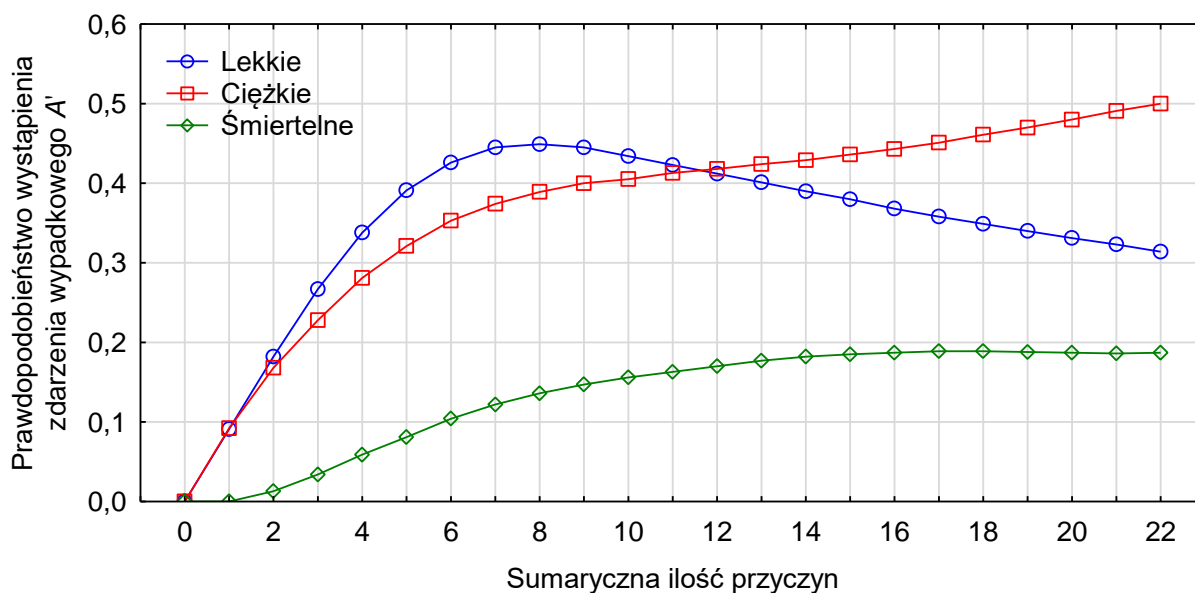
Opracowany skrypt S2 pozwolił również na zsumowanie zdarzeń o poszczególnych skutkach dla każdej kombinacji K_j i wyrażenie skutków za pomocą wartości procentowej – tab. 8.5. Całość uzyskanych na tym etapie wyników została zamieszczona w załączniku nr VI do opracowania i może stanowić podstawę do określenia prawdopodobieństwa wystąpienia danych skutków wypadku na podstawie zidentyfikowanych na rusztowaniu nieprawidłowości.

Tab. 8.5 Fragment uzyskanych za pomocą skryptu S2 wyników – prawdopodobieństwo wystąpienia poszczególnych skutków wypadku dla danej kombinacji przyczyn wypadku K_j

Lp.	Przyczyny wypadków									Skutki		
	Techniczne			Organizacyjne			Ludzkie			Lekkie	Ciężkie	Śmiertelne
	t_1	...	t_{inne}	o_1	...	o_{inne}	l_1	...	l_{inne}	[%]	[%]	[%]
1	0	...	0	0	...	0	0	...	0	0	0	0
...
2096897	1	...	1	1	...	1	0	...	0	31,6	39,5	28,9
...
4194304	1	...	1	1	...	1	1	...	1	31,4	49,8	18,8

Otrzymane i przedstawione w powyższej tabeli wyniki pozwalają na procentowe określenie prawdopodobieństwa wystąpienia lekkich, ciężkich i śmiertelnych skutków wypadku dla każdej z 4 194 304 teoretycznych kombinacji przyczyn wypadku K_j .

Ilościową interpretację otrzymanych wyników przedstawiono na rys. 8.10. Przedstawiony wykres obrazuje średnią wartość prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia wypadkowego A' o danych konsekwencjach w zależności od ilości występujących przyczyn.



Rys. 8.10 Średnia wartość prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia wypadkowego A' o danych konsekwencjach w zależności od ilości występujących przyczyn (opracowanie własne)

Analizując otrzymany wykres można zauważyć, że wraz ze wzrostem ilości przyczyn, gwałtownie wzrasta średnie prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku lekkiego E_1 i ciężkiego E_2 . W przypadku wypadków śmiertelnych E_3 wzrost ten jest wyraźnie mniejszy. W zakresie od 1 do 11 przyczyn, średnie prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku lekkiego E_1 jest największe i wynosi odpowiednio od ok. 9% do ok. 45%. Zwiększenie liczby przyczyn do 12 i więcej powoduje, że najbardziej prawdopodobne jest wystąpienie wypadku ciężkiego E_2 , które osiąga wartość maksymalną ok. 50%. Średnie prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku śmiertelnego E_3 największe jest w przedziale od 12 do 22 przyczyn i wynosi około 17-19%.

Skala parametru „potencjalny skutek wypadku” związanego z pracą na rusztowaniu budowlanym (odpowiadająca skutkom wystąpienia zdarzenia S) została uzależniona od dominującego rodzaju skutków E – tab. 8.6

Tab. 8.6 Skala parametru „potencjalny skutek wypadku”

Dominujące konsekwencje	Skutki wypadku			Parametr „potencjalny skutek wypadku”
	Lekkie	Ciężkie	Śmiertelne	
Brak	0%	0%	0%	Skrajnie niskie ($S = 1$)
Lekkie $L > C, L > Ś$	(33% – 50%)	< 50%	< 50%	Bardzo niskie ($S = 2$)
	> 50%			Niskie ($S = 3$)
Ciężkie $C > L, C > Ś$	< 50%	(33% – 50%)	< 50%	Umiarkowane ($S = 4$)
		> 50%		Wysokie ($S = 5$)
Śmiertelne $Ś > L, Ś > C$	< 50%	< 50%	(33% – 50%)	Bardzo wysokie ($S = 6$)
			> 50%	Skrajnie wysokie ($S = 7$)

8.3. Matryca ryzyka

Elementem pozwalającym na końcowe oszacowanie poziomu ryzyka zawodowego R_z dla danego przypadku obliczeniowego (analizowanego rusztowania budowlanego) w zaproponowanej przez autora dysertacji metodyce oceny ryzyka zawodowego prac prowadzonych z wykorzystaniem rusztowań budowlanych jest matryca ryzyka przedstawiona w tab. 8.7. Powyższa matryca ryzyka, na podstawie iloczynu wartości parametru

„prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku” oraz parametru „potencjalny skutek wypadku”, umożliwia określenie jednego z pięciu poziomów ryzyka zawodowego R_z , które definiowane jest w następujący sposób:

- Bardzo niski poziom ryzyka zawodowego ($R_z \in \langle 1; 4 \rangle$),
- Niski poziom ryzyka zawodowego ($R_z \in \langle 5; 9 \rangle$),
- Umiarkowany poziom ryzyka zawodowego ($R_z \in \langle 10; 19 \rangle$),
- Wysoki poziom ryzyka zawodowego ($R_z \in \langle 20; 29 \rangle$),
- Bardzo wysoki poziom ryzyka zawodowego ($R_z \in \langle 30; 42 \rangle$).

Tab. 8.7 matryca ryzyka – poziom ryzyka zawodowego R_z

Parametr		Potencjalny skutek wypadku						
		Skrajnie niskie ($S = 1$)	Bardzo niskie ($S = 2$)	Niskie ($S = 3$)	Umiarkowane ($S = 4$)	Wysokie ($S = 5$)	Bardzo wysokie ($S = 6$)	Skrajnie wysokie ($S = 7$)
Prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku	Bardzo niskie ($P_S = 1$) $I_{A'} \in \langle 0; 0,248 \rangle$	1	2	3	4	5	6	7
	Niskie ($P_S = 2$) $I_{A'} \in \langle 0,248; 1,069 \rangle$	2	4	6	8	10	12	14
	Średnie ($P_S = 3$) $I_{A'} \in \langle 1,069; 2,712 \rangle$	3	6	9	12	15	18	21
	Wysokie ($P_S = 4$) $I_{A'} \in \langle 2,712; 3,534 \rangle$	4	8	12	16	20	24	28
	Bardzo wysokie ($P_S = 5$) $I_{A'} \in \langle 3,534; 4,356 \rangle$	5	10	15	20	25	30	35
	Skrajnie wysokie ($P_S = 6$) $I_{A'} \in \langle 4,356; +\infty \rangle$	6	12	18	24	30	36	42

8.4. waluacja ryzyka

Ostatnim krokiem oceny ryzyka zawodowego jest wyznaczenie dopuszczalności ryzyka – ewaluacja ryzyka. W zaproponowanej metodyce oceny ryzyka zawodowego prac prowadzonych z wykorzystaniem rusztowań budowlanych autor proponuje wyznaczenie dopuszczalności ryzyka zawodowego za pomocą klasyfikacji zbliżonej do zawartej w Polskiej

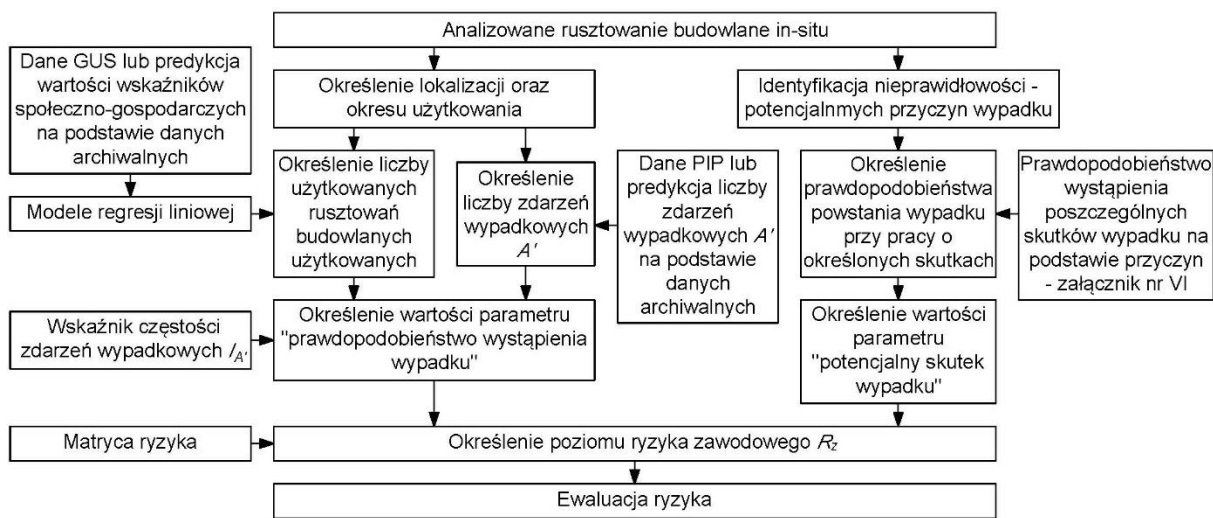
Normie PN-N-18002 [77] – tab. 8.8. Takie założenie ma na celu ułatwienie implementacji zaproponowanej metodyki w praktyce inżynierskiej.

Tab. 8.8 Zasady wyznaczania dopuszczalności ryzyka zawodowego R_z oraz zalecenia dotyczące działań wynikających z oceny tego ryzyka – skala pięciostopniowa oparta na [77]

Oszacowanie ryzyka zawodowego R_z	Dopuszczalność ryzyka zawodowego	Niezbędne działania
Bardzo wysoki poziom ryzyka zawodowego ($R_z \in \langle 30; 42 \rangle$)	Poziom ryzyka jest niedopuszczalny	Praca nie może być rozpoczęta lub kontynuowana do czasu zmniejszenia ryzyka zawodowego do poziomu dopuszczalnego.
Wysoki poziom ryzyka zawodowego ($R_z \in \langle 20; 29 \rangle$)		Prace można rozpocząć dopiero po zmniejszeniu ryzyka zawodowego do poziomu dopuszczalnego. W przypadku prac już wykonywanych, działania w celu zmniejszenia ryzyka zawodowego należy podjąć natychmiast (np. poprzez zastosowanie środków ochrony).
Umiarkowany poziom ryzyka zawodowego ($R_z \in \langle 10; 19 \rangle$)		Zaleca się zaprzestanie pracy i zaplanowanie działań, mających na celu zmniejszenie ryzyka zawodowego.
Niski poziom ryzyka zawodowego ($R_z \in \langle 5; 9 \rangle$)	Poziom ryzyka jest dopuszczalny	Zaleca się rozważenie możliwości dalszego zmniejszania poziomu ryzyka zawodowego lub podjęcie działań, mających na celu utrzymanie poziomu ryzyka na co najmniej tym samym poziomie.
Bardzo niski poziom ryzyka zawodowego ($R_z \in \langle 1; 4 \rangle$)		Nie jest konieczne prowadzenie żadnych działań.

9. Badania na modelach i analiza wyników

Jednym z podstawowych założeń opracowanej i przedstawionej w pracy metodyki oceny ryzyka zawodowego prac prowadzonych z wykorzystaniem rusztowań budowlanych jest możliwość jej prostej implementacji do środowiska inżynierskiego. Na rys. 9.1 przedstawiono schemat postępowania jaki należy przyjąć w trakcie oceny danego rusztowania in-situ, a w kolejnym podpunkcie przedstawiono przykład zastosowania zaproponowanej metodyki w praktyce.



Rys. 9.1 Implementacja opracowanej metodyki oceny ryzyka do środowiska inżynierskiego – schemat postępowania (opracowanie własne)

Należy zaznaczyć, że schemat analizy rusztowania budowlanego in-situ może różnić się nieznacznie w zależności od okresu, w którym rusztowanie było/jest użytkowane. W przypadku analizy rusztowań budowlanych użytkowanych w przeszłości, użytkownik metodyki powinien skorzystać z danych archiwalnych, które następnie podstawia do opracowanych modeli matematycznych będących integralną częścią zaproponowanej metodyki oceny ryzyka zawodowego – podejście a posteriori. W sytuacji, w której analizowane jest użytkowane rusztowanie budowlane, użytkownik metodyki wykonuje predykcję niezbędnych wartości liczbowych na podstawie dostępnych danych za pomocą dowolnej metody matematycznej, a otrzymane wartości wykorzystuje w dalszej części obliczeń – podejście a priori. Poniżej przedstawiono przykład obliczeniowy łączący obydwa sposoby postępowania w praktyce.

9.1. Ocena ryzyka zawodowego na rzeczywistym rusztowaniu budowlanym

Przedmiotem analizy mającej na celu praktyczną implementację zaproponowanej w dysertacji metodyki oceny ryzyka prac prowadzonych z wykorzystaniem rusztowań

budowlanych było systemowe rusztowanie budowlane zmontowane i użytkowane we Wrocławiu, przy ulicy Hoene-Wrońskiego – rys. 9.2. Analizowane rusztowanie elewacyjne użytkowane było w II kwartale 2018 roku, a jego szczegółowa ocena techniczna została przeprowadzona m.in. przez autora dysertacji w ramach realizacji projektu badawczego ORKWiZ, w okresie użytkowania konstrukcji.



Rys. 9.2 Widok na analizowane rusztowanie budowlane
(źródło fotografii: archiwum projektu ORKWiZ)

9.1.1. Określenie wartości parametru „prawdopodobieństw wystąpienia wypadku”

Na podstawie miejsca i okresu użytkowania analizowanego rusztowania budowlanego określono, że przewidywana liczba użytkowanych rusztowań budowlanych w województwie

dolnośląskim w analizowanym okresie (tj. II kwartał 2018 roku) wynosi 9530 rusztowań. Wartość ta została wyznaczona na podstawie opracowanych i przedstawionych w rozdziale 6.2 liniowych modeli regresji linowej oraz danych statystycznych z II kwartału 2018 roku, opublikowanych przez GUS – podejście a posteriori.

Drugim elementem niezbędnym do określenia wskaźnika częstości zdarzeń wypadkowych jest informacja na temat przewidywanej liczby zdarzeń wypadkowych A' . W analizowanym przypadku wartość ta nie jest dostępna, dlatego należy dokonać jej predykcji na podstawie dostępnych danych archiwalnych – podejście a priori. W tym celu skorzystano z danych PIP na temat zdarzeń wypadkowych A' z okresu od 2011 do 2017 roku, które wydarzyły się w drugim kwartale roku. Końcowa wartość przewidywanej liczby zdarzeń wypadkowych A' została wyznaczona za pomocą średniej arytmetycznej z pozyskanych wartości i wynosi: 1,143 zdarzeń wypadkowych A' .

Łącząc informację na temat populacji rusztowań budowlanych użytkowanych w drugim kwartale 2018 roku oraz prognozowaną liczbę zdarzeń wypadkowych A' uzyskano wartość wskaźnika częstości zdarzeń wypadkowych $I_{A'} = 1,199 \left[\frac{l. zd. wyp.}{10\ 000 ruszt.} \right]$. Wyznaczona wartość wskaźnika częstości zdarzeń wypadkowych $I_{A'}$ mieści się w przedziale od 1,069 co 2,712 co oznacza, że prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia wypadkowego A' jest średnie – wartość parametru „prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku” $P_S = 3$.

9.1.2. Określenie wartości parametru „potencjalny skutek wypadku”

W ramach przeprowadzonej analizy rusztowania in-situ zidentyfikowano szereg nieprawidłowości technicznych, organizacyjnych i ludzkich, do których należy zaliczyć:

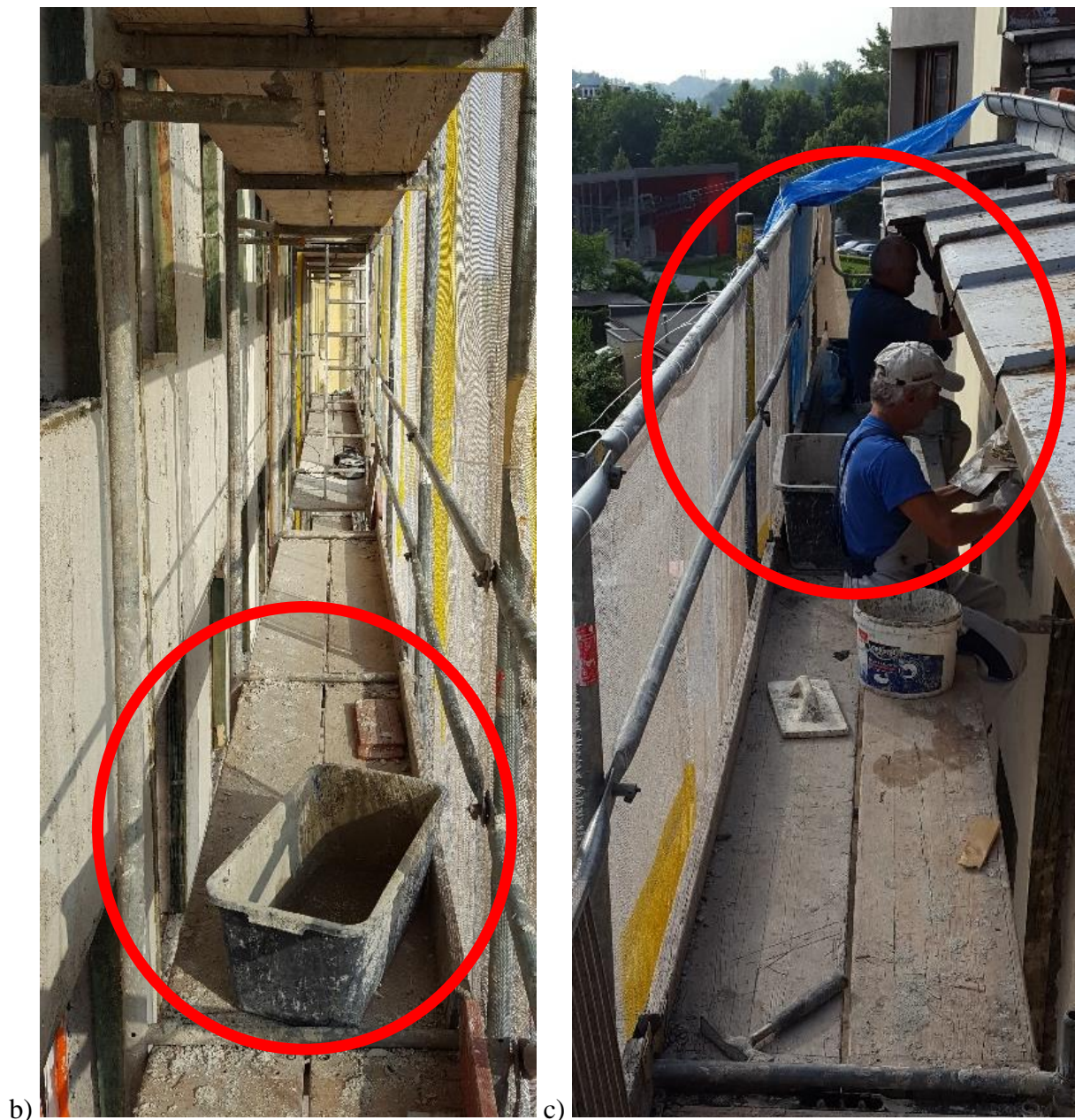
- Brak w urządzeniach zabezpieczających (m.in. braki balustrad) – przyczyna t_1 ,
- Brak stosowania przez pracowników budowlanych lub niewłaściwe stosowanie środków ochrony zbiorowej – przyczyna t_2 ,
- Inne przyczyny techniczne (średnio istotne lub nieistotne) – przyczyna t_{inne} (rys. 9.3 a)),
- Brak nadzoru – przyczyna o_1 ,
- Dopuszczenie do pracy czynnika materialnego bez wymaganych kontroli oraz przeglądu – przyczyna o_2 ,
- Niewłaściwe przeszkolenie pracowników budowlanych w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy – przyczyna o_3 ,

- Tolerowanie, przez osoby sprawujące nadzór, odstępstw od przepisów i zasad bezpieczeństwa i higieny pracy – przyczyna o_4 ,
- Nieodpowiednie przejścia i dojścia do stanowisk pracy (panujący na budowie nieporządek) – przyczyna o_8 (rys. 9.3 b)),
- Inne przyczyny organizacyjne (średnio istotne lub nieistotne) – przyczyna o_{inne} ,
- Nieużywanie przez pracowników budowlanych środków ochrony indywidualnej – przyczyna l_1 (rys. 9.3 c)),
- Lekceważeniem przez pracowników zagrożenia – przyczyna l_2 ,
- Spożywanie przez pracowników środków odurzających – przyczyna l_4 ,
- Przechodzenie, przejeżdżanie lub przebywanie w miejscach niedozwolonych – przyczyna l_6 ,
- Inne przyczyny ludzkie (średnio istotne lub nieistotne) – przyczyna l_{inne} .



a)

Rys. 9.3 Przykładowe nieprawidłowości stwierdzone w trakcie kontroli: a) techniczne, b) organizacyjne, c) ludzkie (źródło fotografii: archiwum projektu ORKWiZ)



b) c)

Rys. 9.3 (c.d.) Przykładowe nieprawidłowości stwierdzone w trakcie kontroli: a) techniczne, b) organizacyjne, c) ludzkie (źródło fotografii: archiwum projektu ORKWiZ)

Korzystając z wyników badań przedstawionych w rozdziale 8.2 (załącznik nr VI do opracowania – prawdopodobieństwo wystąpienia poszczególnych skutku wypadku na podstawie przyczyn) oraz informacji na temat rodzaju nieprawidłowości stwierdzonych podczas kontroli rusztowania budowlanego, określono prawdopodobieństwa wystąpienia danych skutków wypadku. W analizowanym przypadku prawdopodobieństwo wystąpienie wypadku lekkiego wynosi 40% ($E_1 = 0,40$), ciężkiego 43% ($E_2 = 0,43$), a śmiertelnego 17% ($E_3 = 0,17$). Korzystając z tabeli 8.6 (rozdział 8.2.) można stwierdzić, że parametr „potencjalny skutek wypadku” przyjmuje poziom umiarkowany $S = 4$.

9.1.3. Określenie poziomu ryzyka zawodowego i ewaluacja ryzyka

W celu wyznaczenia poziomu ryzyka zawodowego R_z dla analizowanego rusztowania budowlanego należy połączyć uzyskane wartości parametrów ryzyka ($P_S = 3$ oraz $S = 4$) za pomocą zaproponowanej w rozdziale 8.3 matrycy ryzyka. Korzystając z tab. 8.7 można stwierdzić, że poziom ryzyka zawodowego R_z jest umiarkowany ($R_z = 12$).

Ostatnim etapem oceny ryzyka zawodowego jest ewaluacja ryzyka mająca na celu wyznaczania dopuszczalności ryzyka zawodowego R_z określenie dalszych działań związanych z zarządzaniem ryzykiem.

Dla uzyskanego w wyniku przeprowadzonej analizy poziomu ryzyka zawodowego R_z stwierdzono, że uzyskany poziom ryzyka jest niedopuszczalny – tab. 8.8, rozdział 8.4. W celu ograniczenia ryzyka zalecane jest zaprzestanie prowadzenia prac budowlanych oraz zaplanowanie działań, mających na celu zmniejszenie poziomu ryzyka zawodowego. Do powyższych działań można zaliczyć m.in.:

- Uzupełnienie konstrukcji rusztowania o urządzenia zabezpieczające (w szczególności brakujące balustrady) i środki ochrony zbiorowej oraz dostarczenie pracownikom środki ochrony indywidualnej, a także odpowiednie przeszkolenie w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy – eliminacja przyczyn t_1 , t_2 , o_4 oraz l_1 ,
- Zapewnienie stałego nadzoru przez wykwalifikowaną osobę – eliminacja przyczyny o_1 ,
- Uprzątnięcie stanowisk pracy i dojść do nich, a także zapewnienie odpowiedniego wygrozdzenia stanowisk pracy od otoczenia – eliminacja przyczyn o_8 oraz l_6 ,
- Niedopuszczenie do pracy osób będących po spożyciu alkoholu lub pod wpływem środków odurzających – eliminacja przyczyny l_4 .

Zastosowanie wszystkich, wyżej wymienionych zaleceń, pozwoliłoby ograniczyć prawdopodobieństwo wystąpienie wypadku lekkiego do poziomu 83% ($E_1 = 0,83$), ciężkiego do 17% ($E_2 = 0,17$), a śmiertelnego do 0% ($E_3 = 0,00$). W takiej sytuacji, parametr „potencjalny skutek wypadku” uległby obniżeniu z poziomu umiarkowanego ($S = 4$) do poziomu niskiego ($S = 3$). Taka zmiana skutkuje obniżeniem poziomu ryzyka zawodowego R_z do wartości dopuszczalnej – niski poziom ryzyka zawodowego $R_z = 9$.

10. Wnioski i kierunki dalszych badań

Na podstawie przeprowadzonego rozpoznania literaturowego oraz wykonanych badań i analiz, sformułowano kilkanaście wniosków, które przedstawiono poniżej. Dodatkowo, w osobnym podpunkcie przedstawiono proponowane kierunki dalszych badań.

10.1. Wnioski

Wnioski wynikające z przeglądu literatury przedmiotu:

- Badania w obszarze: wypadkowości w budownictwie, zarządzania ryzykiem zawodowym oraz użytkowania rusztowań budowlanych są prowadzone przez naukowców na całym świecie. Tak liczne zainteresowanie tą tematyką spowodowane jest m.in. dużą skalą zjawiska wypadkowości w sektorze budowlanym oraz wpływem wypadków na gospodarkę każdego kraju. Nie bez znaczenia pozostają również straty moralne, które niewątpliwie są konsekwencją każdego wypadku przy pracy na budowie.
- Każdego roku na polskich budowach w wypadkach przy pracy poszkodowanych zostaje kilka tysięcy osób. Duża część spośród wszystkich wypadków kończy się śmiercią osoby poszkodowanej lub trwałym kalectwem. Dodatkowo, znaczna część zdarzeń związana jest z pracą na wysokości, w tym na rusztowaniach budowlanych.
- Zjawisko wypadkowości jest zjawiskiem skomplikowanym, uzależnionym od wielu mechanizmów oraz czynników występujących w środowisku pracy. Prowadzi to do sytuacji, w której każdy wypadek przy pracy spowodowany jest indywidualną kombinacją różnych przyczyn technicznych, organizacyjnych oraz ludzkich, mających swoje źródło w licznych zaniedbaniach występujących na budowach.
- Podstawowym narzędziem prewencyjnym, związanym z ochroną bezpieczeństwa pracy, jest analiza ryzyka zawodowego. Wykonanie oceny ryzyka zawodowego na każdym stanowisku pracy jest jednym z obowiązków każdego pracodawcy. W powszechnym użyciu pozostaje wiele różnych metod oceny ryzyka zawodowego. Wśród nich rozróżnić można m.in. metody:
 - indukcyjne i dedukcyjne,
 - ilościowe, jakościowe i jakościowo-ilościowe,
 - matrycowe, wskaźnikowe i graficzne.
- Pomimo dużej liczby dostępnych metod oceny ryzyka zawodowego stwierdzono, że brakuje opracowań naukowych pozwalających na oszacowanie ryzyka zawodowego na stanowiskach pracy związanych z użytkowaniem rusztowań budowlanych, opartych na

wieloletnich danych statystycznych oraz badaniach empirycznych. Zdaniem autora dysertacji, opracowanie takiej metodyki oceny pozwoli na szacowanie poziomu ryzyka zawodowego związanego z pracą na rusztowaniach budowlanych z dużą dokładnością, co przyczyni się do poprawy poziomu bezpieczeństwa pracy.

- Najczęściej występującym czynnikiem inicjującym powstanie wypadku przy pracy jest błąd człowieka. Na drugim miejscu znajdują się błędy organizacyjne, a na trzecim błędy techniczne.

Wnioski wynikające z przeprowadzonych badań własnych:

- Liczba rusztowań budowlanych, użytkowanych na obszarze danej gminy, jest powiązana ze wskaźnikami społeczno-gospodarczymi I_n ją charakteryzującymi. Potwierdzają to bardzo wysokie wartości współczynników korelacji ($R_n \geq 0.8$) między wskaźnikami społeczno-gospodarczymi I_n , a liczbą rusztowań. Otrzymane wyniki świadczą również o tym, że możliwe jest opracowanie modelu matematycznego pozwalającego na predykcję liczby eksploatowanych rusztowań budowlanych na podstawie wskaźników społeczno-gospodarczych I_n .
- Opracowane modele regresji liniowej, dla każdej z czterech grup gmin, charakteryzują się wysoką jakością dopasowania do wartości empirycznych. Pozwala to na szacowanie liczby rusztowań za ich pomocą w sposób dokładny.
- W celu weryfikacji opracowanych modeli regresji liniowej, zbudowano alternatywny model neuronowy i porównano wyniki generowane przez oba rodzaje modeli. Otrzymane wyniki świadczą o bardzo wysokiej korelacji pomiędzy wynikami generowanymi przez oba modele – wartość współczynnika korelacji Pearsona $R = 0,89$. Uzyskane wyniki z modelu sieci neuronowej potwierdzają poprawność opracowanych modeli regresji liniowej.
- Największa, z pośród analizowanych województw, liczba rusztowań występuje w województwie mazowieckim, wielkopolskim i dolnośląskim, a mniejsza liczba rusztowań w województwie łódzkim i lubelskim. Fakt ten może być spowodowany m.in. odpowiednio mniejszą liczbą inwestycji oraz mniejszą powierzchnią regionu łódzkiego i lubelskiego.
- Obserwuje się wyraźną sezonowość w liczbie użytkowanych rusztowań budowlanych, a mianowicie mniejszą liczbę eksploatowanych rusztowań w kwartale pierwszym oraz większą w kwartałach drugim, trzecim i czwartym. Średnia liczba użytkowanych rusztowań budowlanych w analizowanym okresie wykazuje tendencję rosnącą.

- Analiza przyczyn wypadków przy pracy, pozyskanych z zasobów Państwowej Inspekcji Pracy pozwoliła na wytypowanie przyczyn, które w sposób istotny wpływają na liczbę wypadków. Do istotnych przyczyn wypadków należy zaliczyć następujące przyczyny:
 - Techniczne:
 - Brak lub niewłaściwe urządzenia zabezpieczające – t_1 ,
 - Brak lub niewłaściwe środki ochrony zbiorowej – t_2 ,
 - Niewłaściwa struktura przestrzenna czynnika materialnego – t_3 ,
 - Niewłaściwa stateczność czynnika materialnego – t_4 ,
 - Organizacyjne:
 - Brak nadzoru – o_1 ,
 - Dopuszczenie do pracy czynnika materialnego bez wymaganych kontroli, przeglądów – o_2 ,
 - Brak lub niewłaściwe przeszkolenie w zakresie bezpieczeństwa i higieny prac – o_3 ,
 - Tolerowanie, przez osoby sprawujące nadzór, odstępstw od przepisów i zasad bezpieczeństwa i higieny pracy – o_4 ,
 - Niedostateczne przygotowanie zawodowe pracownika – o_5 ,
 - Brak instrukcji posługiwania się czynnikiem materialnym – o_6 ,
 - Dopuszczenie do pracy pracownika z przeciwwskazaniami lekarskimi lub bez badań lekarskich – o_7 ,
 - Nieodpowiednie przejścia i dojścia – o_8 ,
 - Ludzkie:
 - Nieużywanie przez pracownika środków ochrony indywidualnej – l_1 ,
 - Lekceważeniem zagrożenia (brawura, ryzykanctwo) – l_2 ,
 - Zaskoczeniem niespodziewanym zdarzeniem – l_3 ,
 - Spożyciem alkoholu, środków odurzających lub substancji psychotropowych – l_4 ,
 - Niedostateczną koncentracją uwagi na wykonywanej czynności – l_5 ,
 - Przechodzenie, przejeżdżanie lub przebywanie w miejscach niedozwolonych – l_6 ,
 - Wykonywanie pracy nie wchodzącej w zakres obowiązków pracownika – l_7 .

- We wszystkich analizowanych województwach zauważalna jest minimalna tendencja malejąca wypadkowości. Można zauważyć wyraźną zmienność częstości wypadków w przypadku województwa łódzkiego, lubelskiego i dolnośląskiego. W przypadku pozostałych województw zmienność ta nie jest już tak wyraźnie obserwowana.
- Konsekwencje wypadku w dużej mierze zależą od przypadku, który jest elementem niemierzalnym. Potwierdzeniem powyższej tezy są wyniki świadczące o braku korelacji pomiędzy istotnymi przyczynami wypadków oraz konsekwencjami analizowanych zdarzenia – $|R| < 0,2$.
- Opracowane parametry oceny ryzyka mają bezpośrednie przełożenie na praktyczną ocenę ryzyka zawodowego prac prowadzonych z wykorzystaniem rusztowań budowlanych. Użytkownik zaproponowanej metodyki, na podstawie lokalizacji i okresu użytkowania danego rusztowania może dopasować odpowiedni poziom parametru „prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku”. Następnie, na podstawie liczby oraz rodzaju zidentyfikowanych na analizowanym rusztowaniu potencjalnych przyczyn wypadku, możliwe jest określenie potencjalnych skutków wypadku – parametr „potencjalny skutek wypadku”. Użytkownik metodyki, łącząc powyższe parametry za pomocą matrycy ryzyka, każdorazowo otrzymuje wartość poziomu ryzyka zawodowego dla danego przypadku obliczeniowego.

10.2. Kierunki dalszych badań

Przedstawione w dysertacji obszerne wyniki badań własnych nie wyczerpują wszystkich poruszonych w pracy aspektów związanych z oceną ryzyka zawodowego prac prowadzonych z wykorzystaniem rusztowań budowlanych. Zdaniem autora, przedstawione w pracy badania mogą być kontynuowane w następujących obszarach:

- zbadanie wpływu uwarunkowań kulturalnych i regionalnych na bezpieczeństwo pracy na rusztowaniach budowlanych – w szczególności rozszerzenia zakresu analizy na pozostałe województwa kraju,
- zbadanie wpływu na bezpieczeństwo pracy rodzaju i typu stosowanych rusztowań budowlanych,
- zbadanie wpływu czynników generowanych w otoczeniu terenu budowy na bezpieczeństwo pracy.

11. Podsumowanie

W ocenie autora dysertacji, zaproponowana w dysertacji metodyka oceny ryzyka prac prowadzonych z wykorzystaniem rusztowań budowlanych jest unikatowa, ponieważ jej elementy są wyznaczone na podstawie analizy wieloletnich, szczegółowych danych statystycznych oraz danych empirycznych pozyskanych bezpośrednio na placu budowy, co pozwala na precyzyjne określenie poszczególnych parametrów ryzyka.

Wyznaczone parametry oceny ryzyka mają bezpośrednie przełożenie na praktyczną ocenę ryzyka zawodowego. Użytkownik zaproponowanej metodyki, na podstawie lokalizacji i okresu użytkowania danego rusztowania może dopasować odpowiedni poziom parametru „prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku”. Następnie, na podstawie liczby oraz rodzaju zidentyfikowanych na analizowanym rusztowaniu potencjalnych przyczyn wypadku, możliwe jest określenie potencjalnych skutków wypadku – parametr „potencjalny skutek wypadku”. Użytkownik metodyki, łącząc powyższe parametry za pomocą zaproponowanej macierzy ryzyka, każdorazowo otrzymuje wartość poziomu ryzyka zawodowego R_z dla danego przypadku obliczeniowego – analizowanego rusztowania budowlanego.

Dodatkowo, zaproponowana metodyka zachowuje funkcjonalność prostej w aplikacji metody oceny ryzyka zawodowego co jest nieocenioną zaletą, oczekiwaną przez potencjalnych użytkowników. Opracowana metodyka oceny ryzyka stanowi optymalne narzędzie do wykorzystania w praktyce inżynierskiej, a jej rozpowszechnienie będzie miało wymierny wpływ na podniesienie poziomu bezpieczeństwa pracy.

12. Załączniki

W tab. 12.1 zestawiono najważniejsze załączniki do dysertacji. Załączniki nr I, II i III stanowią obszerną bazę danych wykorzystanych w trakcie analiz. Ze względu na ilość informacji wykorzystanych w trakcie badań, wszystkie załączniki zostały załączone do pracy wyłącznie w formie elektronicznej i są dostępne do pobrania pod adresem:

https://drive.google.com/drive/folders/1LXsWyPD2CRU1po-dP6rMjTP25-PnHk_j?usp=sharing

Tab. 12.1. Zestawienie najważniejszych załączników do dysertacji

Numer załącznika	Nazwa	Format pliku
I	Baza danych o wypadkach przy pracy na rusztowaniach budowlanych (dane PIP)	.xls
II	Baza danych dotyczących rozwoju społeczno-gospodarczego (dane GUS)	.xls
III	Baza danych na temat populacji rusztowań budowlanych na obszarach reprezentatywnych (dane empiryczne)	.xls
IV	Skrypt obliczeniowy S1	.py
V	Skrypt obliczeniowy S2	.py
VI	Prawdopodobieństwo wystąpienia poszczególnych skutku wypadku na podstawie przyczyn	.csv

Załączniki I, II oraz III stanowią bazę danych wykorzystanych w trakcie badań. Załączniki nr IV oraz V stanowią skrypty obliczeniowe napisane w języku Python, których uruchomienie możliwe jest w środowisku informatycznym. Załącznik nr VI stanowi wyniki przeprowadzonych badań, które umożliwiają określenie prawdopodobieństwa wystąpienia danych skutków wypadku na podstawie zidentyfikowanych na rusztowaniu nieprawidłowości.

Literatura

- [1] *Safety and Health at Work: A Vision for Sustainable Prevention*. Frankfurt: International Labour Organization, 2014.
- [2] European Commission, “Eurostat.” ec.europa.eu (accessed Oct. 25, 2021).
- [3] Główny Urząd Statystyczny (GUS), “Bank Danych Lokalnych [Local Data Bank],” 1995. http://www.stat.gov.pl/bdlen/app/strona.html?p_name=indeks
- [4] A. Hoła, B. Hoła, M. Sawicki, and M. Szóstak, “Analysis of selected factors that generate the costs of accidents at work using the Polish construction industry as an example,” *MATEC Web of Conferences*, 2016, doi: 10.1051/mateconf/20168607005.
- [5] B. Hoła, T. Nowobilski, J. Rudy, and E. Błazik-Borowa, “Dangerous events related to the use of scaffolding,” *Czasopismo Techniczne*, vol. 7, no. July 2017, 2017, doi: 10.4467/2353737XCT.17.106.6647.
- [6] Y.-H. Lin and C.-Y. Chen, “Statistical analysis of fatal occupational falls in the Taiwan construction industry from 1996–2007,” in *The 40th International Conference on Computers & Industrial Engineering*, 2010, pp. 1–4.
- [7] *Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 24 grudnia 2007 r. w sprawie Polskiej Klasyfikacji Działalności (PKD) (Dz. U. z 2007 r. Nr 251, poz. 1885)*.
- [8] W. Drozd, “Charakterystyka terenu budowy w aspekcie zagrożeń bezpieczeństwa pracy,” *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE*, vol. 63, no. 1, pp. 165–172, 2016, doi: 10.7862/rb.2016.19.
- [9] “Słownik języka polskiego PWN.” <https://sjp.pwn.pl/szukaj/ryzyko.html>
- [10] *Ustawa z dnia 30 października 2002 r. o ubezpieczeniu społecznym z tytułu wypadków przy pracy i chorób zawodowych (Dz.U. 2002 nr 199 poz. 1673)*.
- [11] *PN-N-18001:2004 Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy. Wymagania*.
- [12] R. Studenski, *Organizacja bezpiecznej pracy w przedsiębiorstwie*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1996.
- [13] T. Lis and K. Nowacki, *Zarządzanie bezpieczeństwem i higieną pracy w zakładzie przemysłowym*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2005.

- [14] S. Mohamed, "Safety Climate in Construction Site Environments," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 128, no. 5, pp. 375–384, 2002, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2002\)128:5\(375\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2002)128:5(375)).
- [15] B. Hoła and M. Szóstak, "Analysis of the State of the Accident Rate in the Construction Industry in European Union Countries," *Archives of Civil Engineering*, vol. 61, no. 4, 2015, doi: 10.1515/ace-2015-0033.
- [16] *Rocznik Statystyki Międzynarodowej 2019*. Warszawa, Polska, 2019.
- [17] Główny Urząd Statystyczny, *Rocznik Statystyczny Województw 2005-2020*. Główny Urząd Statystyczny.
- [18] *International Statistics Yearbook 2018*. Warsaw, Poland: Central Statistical Office, 2018.
- [19] D. Cermelli, M. Pettinato, F. Curro', and B. Fabiano, "Major Accident Prevention: a Construction Site Approach for Pro-active Management of Unsafe Conditions," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 74, pp. 1387-1392 SE-Research Articles, May 2019, doi: 10.3303/CET1974232.
- [20] B. Hoła, T. Nowobilski, I. Szer, and J. Szer, "Identification of factors affecting the accident rate in the construction industry," in *Procedia Engineering*, 2017, vol. 208, pp. 35–42. doi: 10.1016/j.proeng.2017.11.018.
- [21] L. Pietrzak, *Analiza wypadków przy pracy dla potrzeb prewencji*. Warszawa: Państwowa Inspekcja Pracy, 2007.
- [22] A. Hansen, *Kompleksowa ocena poziomu bezpieczeństwa i higieny pracy*. Warszawa: Instytut Wydawniczy Związków Zawodowych, 1988.
- [23] A. Hansen, *Zarys wypadkoznawstwa*. Warszawa: Państwowa Inspekcja Pracy, 1992.
- [24] M. Segarra Cañamares, B. M. Villena Escribano, M. N. González García, A. Romero Barriuso, and A. Rodríguez Sáiz, "Occupational risk-prevention diagnosis: A study of construction SMEs in Spain," *Safety Science*, vol. 92, pp. 104–115, 2017, doi: 10.1016/j.ssci.2016.09.016.

- [25] W. Drozd, *Badania cech terenu budowy i ich wpływu na bezpieczeństwo prowadzenia robót budowlanych przy obiektach nieliniowych*. Kraków: Monografie Politechniki Krakowskiej, seria Inżynieria Lądowa, 2017.
- [26] M. Szóstak, "Analysis of occupational accidents in the construction industry with regards to selected time parameters," *Open Engineering*, 2019, doi: 10.1515/eng-2019-0027.
- [27] A. Dąbrowski and A. Zamojski, "Wypadkowość w małych firmach budowlanych," *Bezpieczeństwo Pracy : nauka i praktyka*, vol. 11, pp. 6–9, 2011.
- [28] A. Dąbrowski, "Propozycje poprawy bezpieczeństwa pracy w małych firmach budowlanych," *Occupational Safety – Science and Practice*, 2016, doi: 10.5604/01377043.1155397.
- [29] B. Hoła, T. Nowobilski, J. Rudy, and K. Czarnocki, "An analysis of the influence of selected factors on the accident rate in the construction industry," *Czasopismo Techniczne*, vol. 6, no. June, pp. 95–102, 2018, doi: 10.4467/2353737XCT.18.089.8694.
- [30] I. Musonda, J.-H. Pretorius, and T. Haupt, "Investigating the role of the external environment to influence clients' health and safety (H&S) performance in the construction industry," 2013.
- [31] O. S. Williams, R. Adul Hamid, and M. S. Misnan, "Accident Causal Factors on the Building Construction Sites: A Review," *International Journal of Built Environment and Sustainability*, vol. 5, no. 1, 2018, doi: 10.11113/ijbes.v5.n1.248.
- [32] K. C. Goh, H. H. Goh, M. F. Omar, T. C. Toh, and A. A. Mohd Zin, "Accidents Preventive Practice for High-Rise Construction," *MATEC Web of Conferences*, vol. 47, p. 04004, 2016, doi: 10.1051/matecconf/20164704004.
- [33] T. M. Toole, "Construction Site Safety Roles," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 128, no. 3, pp. 203–210, 2002, doi: 10.1061/(asce)0733-9364(2002)128:3(203).
- [34] R. M. Choudhry and D. Fang, "Why operatives engage in unsafe work behavior: Investigating factors on construction sites," *Safety Science*, vol. 46, no. 4, pp. 566–584, 2008, doi: 10.1016/j.ssci.2007.06.027.
- [35] T. Stępień, "Identification of factors determining accident rate in construction industry," *Czasopismo Techniczne*, vol. 111, no. 1-B, p. 265 281, 2014.

- [36] A. Hoła, M. Sawicki, and M. Szóstak, “Methodology of Classifying the Causes of Occupational Accidents Involving Construction Scaffolding Using Pareto-Lorenz Analysis,” *Applied Sciences*, vol. 8, no. 1, p. 48, Jan. 2018, doi: 10.3390/app8010048.
- [37] K. M. Halperin and M. McCann, “An evaluation of scaffold safety at construction sites,” *Journal of Safety Research*, 2004, doi: 10.1016/j.jsr.2003.11.004.
- [38] Y.-H. Lin, C.-Y. Chen, and T.-W. Wang, “Fatal occupational falls in the Taiwan construction industry,” *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, vol. 28, no. 8, pp. 586–596, 2011.
- [39] M. Szóstak, “The application of cluster analysis to identify the occupational profile of people injured in accidents in the Polish construction industry,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 456, pp. 1–8, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/456/1/012027.
- [40] I. Szer, E. Błazik Borowa, and J. Szer, “The Influence of Environmental Factors on Employee Comfort Based on an Example of Location Temperature,” *Archives of Civil Engineering*, vol. LXIII, no. 3, 2017, doi: 10.1515/ace-2017-0035.
- [41] M. Jabłoński, I. Szer, and J. Szer, “Probability of occurrence of health and safety risks on scaffolding caused by noise exposure,” *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 24, no. 6, pp. 437–443, 2018, doi: 10.3846/jcem.2018.5716.
- [42] I. Szer, J. Szer, K. Czarnocki, and E. Błazik Borowa, “Apparent Temperature Distribution on Scaffoldings during Construction Works,” *International Journal of Medical and Health Sciences*, vol. 5, no. 3, pp. 81–87, 2018.
- [43] Państwowa Inspekcja Pracy, *Sprawozdanie z działalności Państwowej Inspekcji Pracy w 2018 roku*. Warszawa: Państwowa Inspekcja Pracy, 2019.
- [44] B. Hoła, *Qualitative and quantitative modelling in the construction industry*. Wrocław: Publishing House of Wrocław University of Science and Technology, 2008.
- [45] B. Hoła, “Methodology of estimation of accident situation in building industry,” *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 29–46, 2012, doi: 10.1016/s1644-9665(12)60038-7.
- [46] S. Chi, S. Han, D. Y. Kim, and Y. Shin, “Accident risk identification and its impact analyses for strategic construction safety management,” *Journal of Civil Engineering*

- and Management*, vol. 21, no. 4, pp. 524–538, 2015, doi: 10.3846/13923730.2014.890662.
- [47] M. Mazlina Zaira and B. H. W. Hadikusumo, “Structural equation model of integrated safety intervention practices affecting the safety behaviour of workers in the construction industry,” *Safety Science*, vol. 98, pp. 124–135, 2017, doi: 10.1016/j.ssci.2017.06.007.
- [48] D. A. Patel and K. N. Jha, “Neural Network Model for the Prediction of Safe Work Behavior in Construction Projects,” *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 141, no. 1, p. 04014066, 2015, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000922.
- [49] D. A. Patel and K. N. Jha, “Evaluation of construction projects based on the safe work behavior of co-employees through a neural network model,” *Safety Science*, vol. 89, pp. 240–248, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.ssci.2016.06.020.
- [50] L. D. Nguyen, D. Q. Tran, and M. P. Chandrawinata, “Predicting Safety Risk of Working at Heights Using Bayesian Networks,” *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 142, no. 9, p. 04016041, 2016, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001154.
- [51] C. Andolfo and F. Sadeghpour, “A Probabilistic Accident Prediction Model for Construction Sites,” 2015. doi: 10.1016/j.proeng.2015.10.052.
- [52] Q.-T. Le and C.-S. Park, “Construction safety education model based on second life,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE) 2012*, 2012, pp. H2C-1-H2C-5. doi: 10.1109/TALE.2012.6360336.
- [53] R. Klempous, K. Kluwak, R. Idzikowski, T. Nowobilski, and T. Zamojski, “Possibility analysis of danger factors visualization in the construction environment based on Virtual Reality model,” in *8th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications, CogInfoCom 2017 - Proceedings*, 2018, vol. 2018-Janua, pp. 000363–000368. doi: 10.1109/CogInfoCom.2017.8268271.
- [54] S. Isaac and T. Edrei, “A statistical model for dynamic safety risk control on construction sites,” *Automation in Construction*, vol. 63, pp. 66–78, 2016, doi: 10.1016/j.autcon.2015.12.006.

- [55] S. Sarkar, R. Raj, S. Vinay, J. Maiti, and D. K. Pratihari, "An optimization-based decision tree approach for predicting slip-trip-fall accidents at work," *Safety Science*, vol. 118, pp. 57–69, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.ssci.2019.05.009.
- [56] B. Hoła and M. Szóstak, "Modeling of the Accidentality Phenomenon in the Construction Industry," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 9, p. 1878, 2019, doi: 10.3390/app9091878.
- [57] Główny Urząd Statystyczny, *Wypadki przy pracy w 2007-2018 r.* Warszawa: Główny Urząd Statystyczny.
- [58] Państwowa Inspekcja Pracy, *Sprawozdanie z działalności Państwowej Inspekcji Pracy w 2018 roku.* Warszawa: Państwowa Inspekcja Pracy, 2019.
- [59] K. Janasz, "Ryzyko i niepewność w gospodarce– wybrane aspekty teoretyczne," *Studia i Prace Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania*, vol. 14, pp. 87–98, 2009.
- [60] K. Jajuga, *Zarządzanie ryzykiem.* Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [61] K. Czerwonka, M. Cież, and M. Kowal, "Encyklopedia Zarządzania." <https://mfiles.pl/pl/index.php/Ryzyko>
- [62] S. Marciniak, *Mikro i makroekonomia. Podstawowe problemy współczesności.* Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2013.
- [63] *PN-ISO 31000:2012 Zarządzanie ryzykiem. Zasady i wytyczne.*
- [64] *PKN-ISO Guide 73:2012 Zarządzanie ryzykiem – Terminologia.*
- [65] H. Constant, *Project management: A systems approach to planning, scheduling and controlling*, vol. 10, no. 2. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.
- [66] A. Dziadosz and M. Rejment, "Risk Analysis in Construction Project - Chosen Methods," in *Procedia Engineering*, 2015, pp. 258–265. doi: 10.1016/j.proeng.2015.10.034.
- [67] B. M. Ayyub, *Risk Analysis in Engineering and Economics.* Taylor & Francis Group, 2012.
- [68] B. Ludwiczak, "Ilościowa ocena ryzyka operacyjnego w praktyce bankowej," *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, no. 365, 2014, doi: 10.15611/pn.2014.365.12.

- [69] D. Skorupka, D. Kuchta, and M. Górski, *Zarządzanie ryzykiem w projekcie*. Wrocław: Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych imienia generała Tadeusza Kościuszki, 2012.
- [70] D. Skorupka, *Zarządzanie ryzykiem projektu w inwestycjach budowlanych*. Kielce: Wydawnictwo Akademi Świętokrzyskiej, 2007.
- [71] J. C. Teixeira, J. Kulejewski, M. Krzemiński, and J. Zawistowski, *Zarządzanie ryzykiem w budownictwie*. Guimaraes, Warszawa: Biblioteka Menedżerów Budownictwa, 2011.
- [72] J. I. C. Mbachu and K. Vinasithamby, "Sources of risks in construction project development: An exploratory study," in *Queensland University of Technology Research Week International Conference, QUT Research Week 2005 - Conference Proceedings*, 2005.
- [73] E. Plebankiewicz and K. Biadała, "Ocena ryzyka w inwestycjach budowlanych realizowanych w systemie partnerstwa publiczno-prywatnego," *Świat Nieruchomości*, no. 3(97), pp. 55–60, 2016.
- [74] Komisja Europejska, *Wytyczne dotyczące udanego Partnerstwa Publiczno – Prywatnego*. Bruksela, 2003.
- [75] D. Skorupka, "Zarządzanie ryzykiem w przedsięwzięciach budowlanych," *Zeszyty Naukowe / Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych im. gen. T. Kościuszki*, 2008.
- [76] *Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (Dz.U. 2003 nr 169 poz. 1650, z późn. zm.)*.
- [77] *PN-N-18002:2011 Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy. Ogólne wytyczne do oceny ryzyka zawodowego*.
- [78] *ILO-OSH 2001 Wytyczne do systemów zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy*. Genewa, Warszawa: CIOP, 2001.
- [79] *Ustawa z dnia 26 czerwca 1974r. - Kodeks pracy (Dz. U. z 2019 r., poz. 1040, 1043, 1495, z późn. zm.)*.
- [80] B. Hoła, M. Sawicki, M. Szóstak, E. Błazik-Borowa, K. Czarnocki, and J. Szer, "Badania rusztowań na placu budowy," *Builder*, vol. 12, p. 80/83, 2016.

- [81] S. M. Whitaker, R. J. Graves, M. James, and P. McCann, "Safety with access scaffolds: Development of a prototype decision aid based on accident analysis," *Journal of Safety Research*, 2003, doi: 10.1016/S0022-4375(03)00025-2.
- [82] I. Romanowska-Słomka and A. Słomka, *Zarządzanie ryzykiem zawodowym*. Kraków-Tarnobrzeg: Tarbonus, 2008.
- [83] B. Hoła, *Bezpieczeństwo pracy w procesach budowlanych*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2016.
- [84] K. Czapliński, "O odpowiedzialności prawnej eksperta," *przegląd Budowlany*, vol. 10, pp. 534–535, 1978.
- [85] B. Hoła, "Methodology of hazards identification in construction work course," *Journal of Civil Engineering and Management*, 2010, doi: 10.3846/jcem.2010.64.
- [86] D. Wróblewskiego, *Zarządzanie ryzykiem - Przegląd wybranych metodyk*. Józefów: Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej, 2015. doi: 10.17381/2015.1.
- [87] J. Konior, "Enterprise's risk assessment of complex construction projects," *Archives of Civil Engineering*, 2015, doi: 10.1515/ace-2015-0025.
- [88] M. Krause, "Praktyczne aspekty doboru metod oceny ryzyka zawodowego," *Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: organizacja i zarządzanie*, vol. 59, pp. 173–198, 2011.
- [89] E. Kulińska, "Metody analizy ryzyka w procesach logistycznych," *Logistyka*, vol. 2, pp. 385–409, 2011.
- [90] M. Kowacka, "Metoda analizy ryzyka prac geodezyjnych w przedsiębiorstwach budowy dróg," Politechnika Wroclawska, Wrocław, 2018.
- [91] *ISO/IEC 31010:2009 Risk Management – Risk Assessment Techniques*. 2009.
- [92] C. F. Chi, S. Z. Lin, and R. S. Dewi, "Graphical fault tree analysis for fatal falls in the construction industry," *Accident Analysis and Prevention*, 2014, doi: 10.1016/j.aap.2014.07.019.
- [93] G. Mistikoglu, I. H. Gerek, E. Erdis, P. E. Mumtaz Usmen, H. Cakan, and E. E. Kazan, "Decision tree analysis of construction fall accidents involving roofers," *Expert Systems with Applications*, 2015, doi: 10.1016/j.eswa.2014.10.009.

- [94] A. Gorny, "The use of Ishikawa diagram in occupational accidents analysis," in *OCCUPATIONAL SAFETY AND HYGIENE - SHO2013*, 2013, pp. 224–226.
- [95] A. Górný, "Identification of occupational accident causes by use the Ishikawa diagram and Pareto principles," in *Economics and Management Innovations (ICEMI)*, Oct. 2017, vol. 1, pp. 384–388. doi: 10.26480/icemi.01.2017.384.388.
- [96] K. Ishikawa, *Guide to Quality Control*. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1976.
- [97] K. Ishikawa, *What is total quality control? The Japanese way*. New Jersey: Prentice Hall, 1985.
- [98] M. Szóstak, "Modelowanie rozwoju sytuacji wypadkowej w budownictwie," Politechnika Wrocławska, 2017.
- [99] B. Hoła and M. Szóstak, "Methodology of Analysing the Accident Rate in the Construction Industry," 2017. doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.040.
- [100] B. Hoła and M. Szóstak, "Matematyczny model rozwoju sytuacji wypadkowej w budownictwie," *Czasopismo Techniczne*, 2017, doi: 10.4467/2353737xct.17.049.6360.
- [101] A. Stanisław, *Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny, Tom 3: Modele liniowe i nieliniowe*. Kraków, 2007.
- [102] S. Wierzchoń and M. Kłopotek, *Algorytmy analizy skupień*. Warszawa: Wydawnictwo WNT, 2015.
- [103] R. Agrawal, T. Imieliński, and A. Swami, "Mining Association Rules Between Sets of Items in Large Databases," *ACM SIGMOD Record*, 1993, doi: 10.1145/170036.170072.
- [104] R. Agrawal and R. Srikant, "Fast Algorithms for Mining Association Rules in Large Databases," 1994.
- [105] StatSoft, *Elektroniczny Podręcznik Statystyki PL*. Kraków, 2006.
- [106] W. Drozd, "Warunki bezpieczeństwa pracy i ich wpływ na koszty realizacji procesów budowlanych," Politechnika Krakowska, 2007.
- [107] W. Drozd, "Identyfikacja i profilowanie wzorców wypadków budowlanych za pomocą analizy skupień," *MATERIAŁY BUDOWLANE*, 2017, doi: 10.15199/33.2017.08.30.

- [108] W. Drozd, “Identifying and profiling the patterns of construction accidents using affinity analysis,” *Czasopismo Techniczne*, vol. 5, pp. 15–24, 2017, doi: 10.4467/2353737XCT.17.065.6422.
- [109] W. Drozd and M. Kowalik, “Drzewa decyzyjne w analizie wypadkowości w budownictwie,” *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, 2017, doi: 10.22630/PNIKS.2017.26.2.21.
- [110] T. Nowobilski, I. Bagińska, and K. Gawron, “Classification of Polish voivodeships with regards to the accident rate in the construction industry,” in *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 04007, pp. 1–8. doi: 10.1051/mateconf/201817404007.
- [111] B. Hoła and T. Nowobilski, “Classification of economic regions with regards to selected factors characterizing the construction industry,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, no. 5, 2018, doi: 10.3390/su10051637.
- [112] B. Hoła and T. Nowobilski, “Klasyfikacja województw polski pod kątem wybranych wskaźników charakteryzujących budownictwo,” *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, vol. 27, no. 3, pp. 310–318, 2018, doi: 10.22630/pniks.2018.27.3.30.
- [113] T. Nowobilski and B. Hoła, “The Qualitative and Quantitative Structure of the Causes of Occupational Accidents on Construction Scaffolding,” *Archives of Civil Engineering*, 2019, doi: 10.2478/ace-2019-0023.
- [114] Y. H. Chiang, F. K. W. Wong, and S. Liang, “Fatal Construction Accidents in Hong Kong,” *Journal of Construction Engineering and Management*, 2018, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001433.
- [115] F. K. W. Wong, A. P. C. Chan, A. K. D. Wong, C. K. H. Hon, and T. N. Y. Choi, “Accidents of electrical and mechanical works for public sector projects in Hong Kong,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, doi: 10.3390/ijerph15030485.
- [116] T. Bayes, “An Essay towards solving a Problem in the Doctrine of Chances,” 1763.
- [117] S. Q. Wang, M. F. Dulaimi, and M. Y. Aguria, “Risk management framework for construction projects in developing countries,” *Construction Management and Economics*, 2004, doi: 10.1080/0144619032000124689.

- [118] T. Ponikowska, "Sieci Bayesowskie i sieci (samo)wspierania, teoria i zastosowania do danych z systemu USOS," Uniwersytet Warszawski, 2012.
- [119] A. Leśniak and F. Janowiec, "Risk assessment of additional works in railway construction investments using the Bayes network," *Sustainability (Switzerland)*, 2019, doi: 10.3390/su11195388.
- [120] A. Leśniak and F. Janowiec, "Application of the Bayesian Networks in Construction Engineering," *Civil and Environmental Engineering Reports*, vol. 30, no. 2, pp. 221–233, 2020, doi: <https://doi.org/10.2478/ceer-2020-0028>.
- [121] M. W. Kembłowski, B. Grzyl, A. Kristowski, and A. Siemaszko, "Risk Modelling with Bayesian Networks - Case Study: Construction of Tunnel under the Dead Vistula River in Gdansk," 2017. doi: 10.1016/j.proeng.2017.08.046.
- [122] M. W. Kembłowski, B. Grzyl, A. Siemaszko, and A. Kristowski, "Risk Diagnosis and Management with BBN for Civil Engineering Projects during Construction and Operation," in *E3S Web of Conferences*, Nov. 2018, vol. 63. doi: 10.1051/e3sconf/20186300004.
- [123] E. M. A. Vieira, J. M. N. da Silva, and U. F. da Paraíba, "Modeling Bayesian Networks from a conceptual framework for occupational risk analysis," *Production*, vol. 27, pp. 1–12, 2017, doi: DOI: 10.1590/0103-6513.223916.
- [124] J. Konior, "Enterprise's risk assessment of complex construction projects," *Archives of Civil Engineering*, 2015, doi: 10.1515/ace-2015-0025.
- [125] J. Konior, "Mitigation of Correlated Risk in Construction Projects," *Civil Engineering and Architecture*, vol. 7, no. 1, pp. 17–22, 2019, doi: 10.13189/cea.2019.070103.
- [126] Kowalik Kamila, "Diagram Pareto-Lorenza w teorii i praktyce zarządzania jakością," *Archiwum Wiedzy Inżynierskiej*, vol. 3, no. 1, pp. 22–24, 2018.
- [127] B. Małgorzata and K.-T. Dorota, "Narzędzia zarządzania jakością w branży cementowej," *Archiwum Wiedzy Inżynierskiej*, vol. 1, no. 1, pp. 36–38, 2016.
- [128] C.-W. Chu, G.-S. Liang, and C.-T. Liao, "Controlling inventory by combining ABC analysis and fuzzy classification," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 55, no. 4, pp. 841-851 *Computers & Industrial Engineering*, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.03.006>.

- [129] D. Dhoka and DR. Y. L. Choudary, "ABC Classification for Inventory Optimization," *IOSR Journal of Business and Management*, vol. 15, no. 1, pp. 38–41, 2013.
- [130] *Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 5 sierpnia 2005 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na hałas lub drgania mechaniczne (Dz.U. z 2005 r., nr 157 poz. 1318).*
- [131] *Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz.U. z 2018 r., poz. 1286).*
- [132] J. Roughton and N. Crutchfield, *Job Hazard Analysis: A Guide for Voluntary Compliance and Beyond: from Hazard to Risk: Transforming the JHA from a Tool to a Process*. Amsterdam, Boston: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2008.
- [133] J. Szlązak and N. Szlązak, *Bezpieczeństwo i higiena pracy*. Kraków: Uczelniane Wydaw. Nauk.-Dydakt. AGH im. S. Staszica, 2005.
- [134] W. Fine, "Mathematical Evaluation for Controlling Hazards," *Journal of Safety Research*, vol. 3, no. 4, pp. 157–166, 1971.
- [135] P. Kmieciak, D. Gnot, R. Jurkiewicz, E. Nowicka-Słowik, and M. Brajza, *Rusztowania robocze i ochronne*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2018.
- [136] *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 23 czerwca 2003 r. w sprawie informacji dotyczącej bezpieczeństwa i ochrony zdrowia oraz planu bezpieczeństwa i ochrony zdrowia (Dz.U. 2003 nr 120 poz. 1126).*
- [137] P. Kmieciak, D. Gnot, R. Jurkiewicz, E. Nowicka-Słowik, and M. Brajza, *Rusztowania robocze i ochronne*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2018.
- [138] *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 lutego 2003 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas wykonywania robót budowlanych (Dz.U. 2003 nr 47 poz. 401).*
- [139] *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 lutego 2003 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas wykonywania robót budowlanych (Dz.U. 2003 nr 47 poz. 401).*
- [140] *PN-EN 13670:2011 Wykonywanie konstrukcji z betonu*. 2011.

- [141] E. Błazik-Borowa and M. Pieńko, *Scaffoldings*. Lublin: Politechnika Lubelska, 2017.
- [142] *Obwieszczenie Ministra Przedsiębiorczości i Technologii z dnia 19 lutego 2018 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Gospodarki w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas eksploatacji maszyn i innych urządzeń technicznych.*
- [143] *Rozporządzenie Ministra Inwestycji i Rozwoju z dnia 29 kwietnia 2019 r. w sprawie przygotowania zawodowego do wykonywania samodzielnych funkcji technicznych w budownictwie (Dz.U. 2019 poz. 831).*
- [144] *Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 21 maja 2019 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy - Prawo budowlane (Dz.U. 2019 poz. 1186).*
- [145] P. Kmiecik and D. Gnot, *Budownictwo. Bezpieczne rusztowania*. Warszawa: Państwowa Inspekcja Pracy, 2016.
- [146] T. Nowobilski, M. Sawicki, and M. Szóstak, “Drony w ocenie stanu rusztowań,” *Builder*, vol. 270, no. 1, pp. 40–41, 2019, doi: 10.5604/01.3001.0013.6481.
- [147] E. Błazik-Borowa, K. Czarnocki, B. Hoła, and J. Szer, “Projekt badawczy ‘Model oceny ryzyka wystąpienia katastrof budowlanych, wypadków i zdarzeń niebezpiecznych na stanowiskach pracy z wykorzystaniem rusztowań budowlanych,’” *Kwartalnik Rusztowania*, vol. 40, pp. 18–20, 2016.
- [148] Państwowa Inspekcja Pracy, *Sprawozdanie z działalności Państwowej Inspekcji Pracy w 2020 roku*. Warszawa: Państwowa Inspekcja Pracy, 2021.
- [149] M. Szóstak, M. Sawicki, J. Konior, T. Nowobilski, and T. Stachoń, “Wpływ stosowania alkoholu przez pracowników na stan bezpieczeństwa pracy na rusztowaniach budowlanych,” *BUILDER*, vol. 282, no. 1, 2020, doi: 10.5604/01.3001.0014.5701.
- [150] Państwowa Inspekcja Pracy, “

w-biac-ymstoku-nie-wytrzymac-o-silniejszych-podmucha-w-wiatru-inspektorzy-pracy-stwierdzili-m-in-c-e-przy-stawianiu-konstrukcji-nie-przestrzegano-p

- [151] “Wypadek z udziałem rusztowania - porażenie prądem elektrycznym.” http://lublin.com.pl/tagi/porazenie_pradem/1/
- [152] “Wypadek przy ul. Krzyżowej w Tomaszowie Maz. Nie żyje robotnik, który spadł z rusztowania.” <https://tomaszowmazowiecki.naszemiasto.pl/wypadek-przy-ul-krzyzowej-w-tomaszowie-maz-nie-zyje/ar/c16-1456599>
- [153] “Warszawa: pięciu robotników poszkodowanych w wyniku wypadku z udziałem rusztowania.” http://wiadomosci.gazeta.pl/wiadomosci/1,114873,10031621,Warszawa__pieciu_robotnikow_rannych_podczas_prac_na.html
- [154] “Śmiertelny upadek z wysokości.” <https://lublin.pip.gov.pl/pl/wypadki/wypadki-przy-pracy-na-terenie-oip-w-lublinie/82680,smiertelny-upadek-z-wysokosci.html>
- [155] “Tragiczny upadek z wysokości.” <https://malopolska.policja.gov.pl/krk/aktualnosci/2889,Tragiczny-upadek-z-wysokosci.html>
- [156] “Główny Inspektorat Państwowej Inspekcji Pracy,” *www.pip.gov.pl*, Nov. 2021.
- [157] Główny Urząd Statystyczny, *Warunki pracy w 2020 r.* Warszawa, Gdańsk, 2021.
- [158] U. S. w G. Główny Urząd Statystyczny, *Wypadki przy pracy w 2019 r.* Warszawa, Gdańsk, 2020.
- [159] A. Czarnigowska, *Zliczanie rusztowań w ramach zadań 4-8 Badania rusztowań budowlanych w województwie ... - Instrukcja.* Lublin, 2016.
- [160] “Google Maps.” <https://www.google.pl/maps/preview>
- [161] T. Nowobilski, “Calculation of the population of construction scaffoldings using neural networks,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 17, 2021, doi: 10.3390/app11178211.
- [162] M. Jarocka, “Wybór formuły normalizacyjnej w analizie porównawczej obiektów wielocechowych,” *Economics and Management*, vol. 1, pp. 113–126, 2015, doi: 10.12846/j.em.2015.01.08.

- [163] J. H. Jr. Ward, "Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function," *J Am Stat Assoc*, vol. 58, no. 301, pp. 236–244, 1963.
- [164] T. Grabiński, *Metody taksonometrii*. Kraków: Akademia Ekonomiczna w Krakowie, 1992.
- [165] R. Mojena, "Hierarchical grouping methods and stopping rule: an evaluation," *The Computer Journal*, vol. 20, no. 4, pp. 359–363, 1977, doi: <https://doi.org/10.1093/comjnl/20.4.359>.
- [166] S. Bedyńska and M. Książek, *Statystyczny drogowskaz 3. Praktyczny przewodnik wykorzystania modeli regresji oraz równań strukturalnych*. Warszawa: Wydawnictwo Akademickie Sedno Spółka z o.o., 2012.
- [167] A. Stanisław, *Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny, Tom 2: Modele liniowe i nieliniowe*. Kraków, 2007.
- [168] R. Tadeusiewicz and G. Migut, *Sieci neuronowe - materiały szkoleniowe*. Kraków: StatSoft Polska, 2019.
- [169] R. Tadeusiewicz, *Sieci Neuronowe*. Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza, 1993.
- [170] Antini Biegus, *Probabilistyczna analiza konstrukcji stalowych*. Warszawa - Wrocław: Wydawnictwo naukowe PWN, 1991.
- [171] J. M. Guilford, *Fundamental statistics in psychology and education*. New York: McGraw-Hill, 1965.

Streszczenie

Rozprawa doktorska, zatytułowana: „*Metodyka oceny ryzyka zawodowego prac prowadzonych z wykorzystaniem rusztowań budowlanych*”, została zrealizowana w Katedrze Inżynierii Materiałów i Procesów Budowlanych na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, pod opieką prof. dr hab. inż. Bożeny Hoły. Celem pracy było opracowanie kompleksowej metodyki oceny ryzyka zawodowego prac prowadzonych z wykorzystaniem rusztowań budowlanych uwzględniającej fakt, że prace te prowadzone są w różnych lokalizacjach i w zmieniających się warunkach.

Opracowana autorska metodyka oceny ryzyka zawodowego składa się z 7 etapów:

- Etap I – Analiza zagrożenia dla bezpieczeństwa pracy na rusztowaniach budowlanych,
- Etap II – Pozyskanie danych badawczych,
- Etap III – Oszacowanie populacji rusztowań budowlanych,
- Etap IV – Analiza przyczyn wypadków na rusztowaniach budowlanych,
- Etap V – Oszacowanie parametrów ryzyka zawodowego,
- Etap VI – Badania na modelach i analiza wyników,
- Etap VII – Wnioski i kierunki dalszych badań.

W ramach realizacji sformułowanego zadania badawczego wykonano analizę literatury przedmiotu oraz badania empiryczne mające na celu identyfikację potencjalnych źródeł zagrożeń dla bezpieczeństwa pracy na rusztowaniach budowlanych. Następnie, zgromadzono informację o zagrożeniach dla bezpieczeństwa pracy. W celu pozyskania danych liczbowych, niezbędnych do wykonania obliczeń, przeprowadzono badania archiwów Okręgowych Państwowych Inspektoratów Pracy, badania danych statystycznych opublikowanych przez Główny Urząd Statystyczny oraz badania empiryczne polegające na zliczaniu rusztowań budowlanych eksploatowanych w wybranych, reprezentatywnych obszarach analizowanych województw. Na podstawie zgromadzonych danych, oraz wykonanej szczegółowej analizy, opracowano liniowe modele regresji liniowej pozwalające na oszacowanie populacji eksploatowanych rusztowań budowlanych, które zweryfikowano za pomocą opracowanego zespołu sieci neuronowych MLP. Następnie, za pomocą analizy Pareto-Lorenza oraz klasyfikacji ABC, wykonano ilościową i jakościową analizę przyczyn wypadków na rusztowaniach budowlanych. Kluczowym elementem zaproponowanej metodyki było opracowanie dwóch parametrów ryzyka, które wyznaczono na podstawie wyników uzyskanych we wcześniejszych etapach realizacji dysertacji. Na zakończenie przedstawiono implementację

opracowanej metodyki w środowisku inżynierskim oraz sformułowano wnioski i określono kierunki dalszych badań.

Wszystkie obliczenia matematyczne wykonano w oprogramowaniu Statistica firmy StatSoft a jeden z parametrów zaproponowanej metodyki oceny ryzyka opracowano z wykorzystaniem języka Python.

Słowa kluczowe:

budownictwo, rusztowanie, bezpieczeństwo pracy, ocena ryzyka zawodowego, wypadkowość

Summary

Doctoral dissertation, entitled: "*Occupational Risk Assessment methodology of works using construction scaffolding*", was carried out at the Department of Materials and Construction Processes Engineering, Faculty of Civil Engineering, Wrocław University of Science and Technology, under the supervision of Prof. Bożena Hoła, DSc, PhD, Eng. The goal of this study was to develop a comprehensive methodology for occupational risk assessment of works conducted with the use of construction scaffolding. Under consideration were works carried out in various locations and under changing conditions.

The developed proprietary methodology of occupational risk assessment was divided into 7 stages:

- Stage I - Analysis of working on construction scaffolding safety risks.
- Stage II - Obtaining research data.
- Stage III - Estimating the population of construction scaffolding.
- Stage IV - Analysis of accidents on construction scaffolding causes.
- Stage V - Estimation of risk parameters.
- Stage VI - Tests on models and analysis of results.
- Stage VII - Conclusions and directions of further research.

As a part of the implementation of the formulated objective, a literature analysis and empirical research were performed. The main purpose was to identify potential sources of occupational safety hazards on construction scaffolding. Moreover, information on occupational safety hazards was collected. In order to obtain numerical data necessary to perform the calculations, the archives of the Regional Labour Inspectorates and statistical data published by the Central Statistical Office has been investigated. Additionally, empirical studies involving counting construction scaffoldings used in selected, representative areas of the analyzed voivodeships were conducted. On the basis of the collected data and a detailed analysis, linear regression models were developed to estimate the population of construction scaffoldings in use, which were verified with the MLP neural networks. A quantitative and qualitative analysis of the causes of construction scaffolding accidents was then performed using Pareto-Lorenz analysis and ABC classification. A key element of the proposed methodology was the development of two risk parameters, which were determined based on the results obtained in the earlier stages of the dissertation. Finally, the implementation of the

developed methodology in an engineering environment was presented with conclusions . At the end the directions for further research were formulated.

For all mathematical calculations Statistica software from StatSoft was used. One of the parameters of the proposed risk assessment methodology was developed using the Python language.

Keywords:

construction, scaffolding, occupational safety, risk assessment, accident rate