

Metoda oceny ryzyka wystąpienia sytuacji potencjalnie wypadkowej na rusztowaniu

prof. dr hab. inż. Ewa Błazik-Borowa, dr hab. inż. Krzysztof Czarnocki, prof. uczelni,
dr inż. Agata Czarnigowska, Politechnika Lubelska, dr inż. Iwona Szer, dr hab. inż. Jacek Szer,
prof. uczelni, Politechnika Łódzka, prof. dr hab. inż. Bożena Hoła, Politechnika Wrocławska

1. Wprowadzenie

Budownictwo jest ciągle branżą ze znaczną liczbą wypadków. Ze sprawozdania Państwowej Inspekcji Pracy (PIP) [1] wynika, że 26,9% poszkodowanych w wypadkach śmiertelnych lub ciężkich to pracownicy branży budowlanej. Wśród tych wypadków są głównie te związane z pracą na rusztowaniu. Rusztowania są stosowane po to, aby zapewnić bezpieczny dostęp do stanowisk pracy w miejscach trudno dostępnych i ich stosowanie nie stwarza zagrożenia. Zagrożeniem jest nieprawidłowe użytkowanie rusztowań, począwszy od projektu, poprzez montaż, eksploatację i demontaż, co zostało opisane np. w pracach [2–5]. Potwierdzają to także wyniki kontroli PIP podane w opracowaniu [1], przeprowadzone w 2021 r., z których wynika, że na 46% placów budów stwierdzono naruszenie przepisów dotyczących prac z użyciem rusztowań. Dodatkowo w większości przypadków prace na rusztowaniach budowlanych realizowane są na zewnątrz, często w dynamicznie zmieniającym się klimacie. Analiza 47 wypadków na rusztowaniach w latach 2011–2018 w województwie łódzkim, opisana w pracy [6], wykazała, że liczba wypadków latem jest 4,5 razy większa niż liczba wypadków, które wydarzyły się jesienią.

Celem artykułu jest prezentacja metody oceny ryzyka wystąpienia sytuacji potencjalnie wypadkowej na rusztowaniu, nazwanej przez autorów modelem ORKWIZ, i zakres niezbędnych badań, jakie trzeba przeprowadzić, aby można było rusztowanie ocenić w aspekcie spełnienia przez nie warunku bezpieczeństwa.

2. Opis składników modelu ORKWIZ

2.1. Główne założenia

Wypełnianie dokumentacji powypadkowej i badania wypadków, prowadzone przez GUS, są oparte na modelu TOL [7]. Podczas badania przyczyn danego wypadku

są brane pod uwagę zdarzenia, których bezpośrednim efektem jest wypadek. Przyczyny wypadku są podzielone na trzy grupy: techniczne, organizacyjne i ludzkie. Badania funkcjonowania rusztowań pokazują, że na możliwość wystąpienia sytuacji potencjalnie wypadkowej ma wpływ znacznie więcej czynników. Model ORKWIZ opiera się na założeniu, że prawdopodobieństwo powstania sytuacji niebezpiecznej zależy od stanu czynników, nazwanych: czynniki prawnospołeczno-ekonomiczne, czynniki środowiskowe, czynniki organizacyjne, czynniki techniczne i czynniki ludzkie. Druga różnica pomiędzy modelem TOL a ORKWIZ polega na tym, że model TOL jest wykorzystywany do badań wypadków, natomiast ORKWIZ ocenia prawdopodobieństwo powstania sytuacji potencjalnie wypadkowej. Z pracy [8] wynika, że na 600 zdarzeń potencjalnie wypadkowych przypada dziesięć wypadków z lekkimi urazami i jeden ciężki wypadek. Inaczej mówiąc model ORKWIZ uwzględnia znacznie więcej aspektów niż dotąd stosowana metoda i w obecnej formie jest przystosowany do oceny rusztowań jako konstrukcji tymczasowych, mających zapewnić bezpieczeństwo pracowników. Model uwzględnia również wpływ użytkowników oraz otoczenia rusztowania na bezpieczeństwo pracy.

Model ORKWIZ powstał w ramach projektu PBS3/A2/19/2015 „Model oceny ryzyka wystąpienia katastrof budowlanych, wypadków i zdarzeń niebezpiecznych na stanowiskach pracy z wykorzystaniem rusztowań budowlanych”, finansowanego przez NCBiR, na podstawie badań 120 rusztowań budowlanych w Polsce, danych statystycznych GUS i dokumentacji wypadków, w których czynnikiem materialnym było rusztowanie. Projekt był realizowany przez zespół badawczy, który powstał z pracowników trzech uczelni: Politechnika Lubelska, Politechnika Łódzka i Politechnika Wrocławska. W projekcie uczestniczyło 50 osób. Po raz pierwszy podstawy modelu ORKWIZ zostały zaprezentowane w 2016 r. w pracy [9].

2.2. Ocena rusztowania

Ocena rusztowania w aspekcie zapewnienia bezpieczeństwa pracowników polega na przyporządkowaniu rusztowania do jednej z grup zagrożeń, które zostały zestawione w tabeli 1. Ta część modelu została opracowana przez dr. hab. inż. Jacka Szera, prof. uczelni z zespołem. W pierwszej kolumnie tabeli 1 użyto określenia predyktor. Wielkość ta jest definiowana jako miara prawdopodobieństwa wystąpienia sytuacji potencjalnie wypadkowej, przy czym 0,0 oznacza, że rusztowanie jest bezpieczne, a 1,0 oznacza, że ze 100% pewnością na rusztowaniu wystąpi sytuacja potencjalnie wypadkowa lub inaczej mówiąc, rusztowanie jest niebezpieczne. Predyktor jest wyznaczany ze wzoru:

$$P = 1 - (1 - p(\text{PSE}))(1 - p(\text{E}))(1 - p(\text{T}))(1 - p(\text{O}))(1 - p(\text{L})), \quad (1)$$

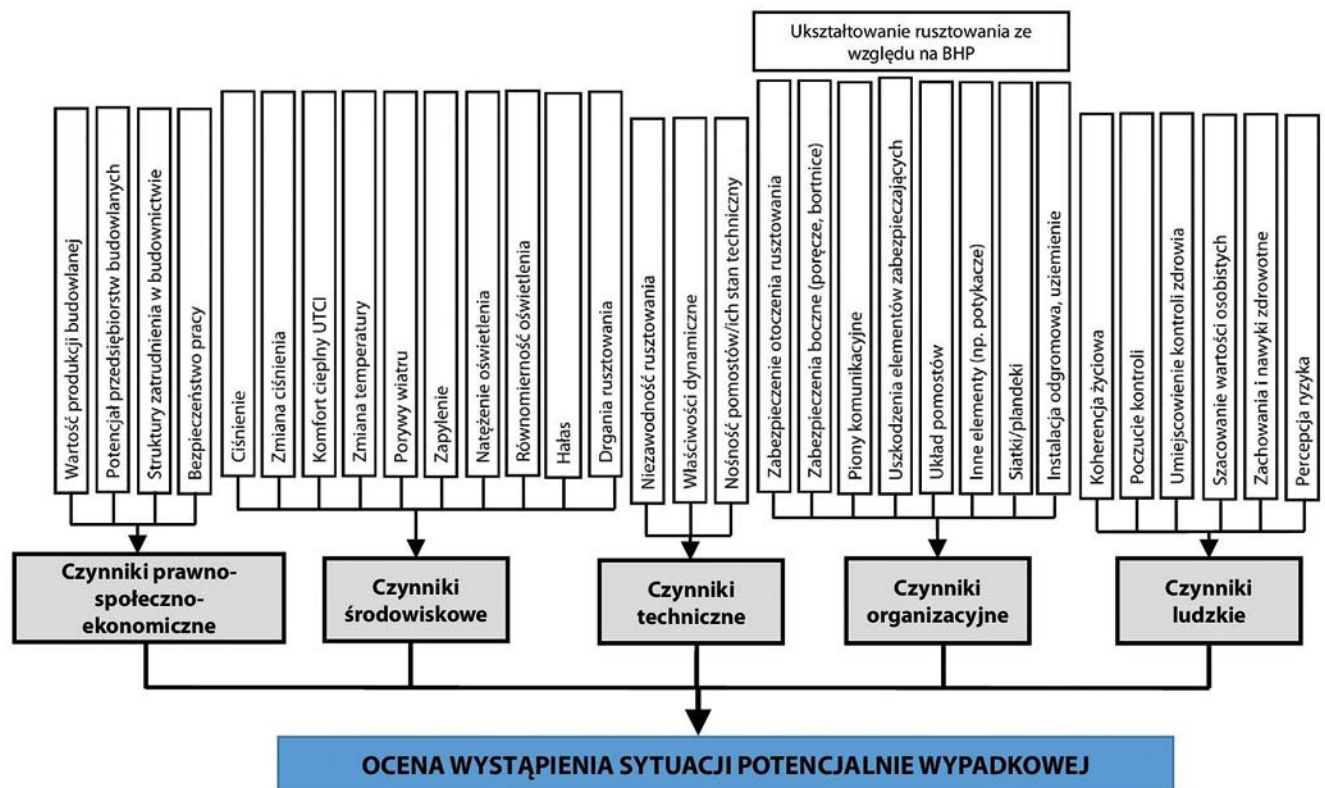
gdzie: PSE – czynniki prawno-społeczno-ekonomiczne, E – czynniki środowiskowe, O – czynniki organizacyjne, T – czynniki techniczne, L – czynniki ludzkie, $p(X)$ – wartość predyktora grupy czynników X.

Wzór (1) oparty jest na założeniu, że grupy czynników tworzą szeregowy system niezawodności czyli, jeżeli którykolwiek z czynników jest w takim stanie, że przyczynia się do powstawania sytuacji niebezpiecznych, to do takiej sytuacji dojdzie. W odniesieniu do każdej

Tabela 1. Grupy zagrożenia bezpieczeństwa pracy na rusztowaniu

Wartość predyktora P	Opis grupy zagrożenia	Numer grupy zagrożenia
0,00–0,30	zagrożenie prawie nie występuje	I
0,31–0,60	zagrożenie występuje w niewielkim stopniu	II
0,61–0,80	zagrożenie występuje	III
0,81–0,90	zagrożenie występuje w dużym stopniu	IV
0,91–1,00	zagrożenie występuje w wysokim stopniu	V

z grup czynników określany jest predyktor, który tak jak w przypadku głównego predyktora definiowany jest jako miara prawdopodobieństwa wystąpienia sytuacji potencjalnie wypadkowej z powodu stanu danej grupy czynników. Jeżeli którykolwiek z predyktorów czynników przyjmuje wartość 1,0, to oznacza 100% pewność, że sytuacja potencjalnie wypadkowa wystąpi. Jeżeli predyktory wszystkich grup czynników są równe 0,0, to do takiej sytuacji nie dojdzie. Składowe modelu ORKWIZ zestawiono na rysunku 1. Podstawy opracowania metod wyznaczania predyktorów poszczególnych grup czynników oraz same metody są opisane w kolejnych podpunktach.



Rys. 1. Schemat modelu wystąpienia sytuacji potencjalnie wypadkowej ORKWIZ

2.3. Czynniki prawno-społeczno-ekonomiczne

Czynniki prawno-społeczno-ekonomiczne (PSE) to czynniki wynikające z ogólnej sytuacji gospodarczej w kraju i stanu prawnego w zakresie funkcjonowania rusztowań. Metodę wyznaczania predyktora $p(\text{PSE})$ opracowała prof. dr hab. inż. Bożena Hoła z zespołem i więcej informacji na temat badań tego zespołu można znaleźć w pracach [10, 11].

Wyznaczenie predyktora $p(\text{PSE})$ zostało poprzedzone podziałem województw na grupy o podobnych cechach gospodarczych. Następnie dla poszczególnych grup województw została wykonana analiza zależności między liczbą osób poszkodowanych na 1000 osób zatrudnionych w budownictwie a danymi publikowanymi przez GUS, związanymi z warunkami PSE, pogrupowanymi w następujące zestawy danych:

- wartość produkcji budowlanej W ,
- potencjał przedsiębiorstw budowlanych I ,
- struktura rodzajowa podmiotów gospodarczych prowadzących działalność w budownictwie F ,
- charakterystyka zatrudnienia w budownictwie Z ,
- charakterystyka zmienności zatrudnienia w budownictwie C ,
- ogólna charakterystyka bezpieczeństwa pracy w budownictwie B .

Zbiory danych liczbowych, wykorzystano do budowy liniowych modeli regresji wielorakiej, w których zmienną objaśnianą jest liczba osób poszkodowanych P_s , a zmiennymi objaśniającymi są wartości odpowiednio dobranych podczynników, podanych powyżej. Na przykład w odniesieniu do województwa dolnośląskiego prognozowana liczba osób poszkodowanych na 1000 osób zatrudnionych w budownictwie w tym modelu opisana jest wzorem:

$$P_s = 266,79 - 0,12F_2 - 0,59I_1 + 0,03F_4 + 0,02I_2 - 0,06Z_1 + 0,73C_3 + 0,20W_3 - 39,53F_1 + 0,03C_1 + 1,30I_5 - 0,11I_4 - 0,18Z_2 - 1,19I_6, \quad (2)$$

gdzie: W_3 – wartość produkcji budowlano-montażowej według rodzajów obiektów budowlanych o charakterze inwestycyjnym – budynki mieszkalne, I_1 – aktywa obrotowe – produkty gotowe, I_2 – kapitał – kapitał (fundusz) ogółem, I_3 – nakłady inwestycyjne według grup – środki transportu, F_1 – podmioty gospodarki narodowej według form prawnych i sekcji – przedsiębiorstwa państwowe, F_2 – podmioty gospodarki narodowej według form prawnych i sekcji – spółki handlowe, F_4 – podmioty gospodarki narodowej według form prawnych i sekcji – osoby fizyczne prowadzące działalność gospodarczą, Z_1 – liczba osób pracujących

w budownictwie – kobiety, C_1 – przyjęcia do pracy – ogółem, C_3 – przyjęcia do pracy – powracający z urlopów wychowawczych.

W celu wyznaczenia predyktora $p(\text{PSE})$ należy odczytać dane z ostatniego Rocznika Statystycznego RP i Rocznika Statystycznego Województw w odniesieniu do województwa, w którym zlokalizowane jest rusztowanie. Następnie na podstawie wzorów, odpowiadających danemu województwu, wyznaczyć liczbę osób poszkodowanych na 1000 osób zatrudnionych w budownictwie P_s i ostatecznie określić wartość predyktora dla konkretnego rusztowania ze wzoru:

$$p(\text{PSE}) = n \cdot P_s / 1000, \quad (3)$$

gdzie: n – liczba osób, pracujących na rusztowaniu.

2.4. Czynniki środowiskowe

Czynniki środowiskowe (E) są to bodźce fizyczne otoczenia zewnętrznego oddziałujące na człowieka podczas pracy. Do tej grupy zaliczono: ciśnienie atmosferyczne, zmianę ciśnienia atmosferycznego podczas dnia pracy, wskaźnik oceny obciążeń cieplnych człowieka UTCI*, zmianę temperatury powietrza podczas dnia pracy, porywy wiatru, zapylenie, natężenie oświetlenia miejsc pracy, nierównomierność oświetlenia miejsc pracy, poziom dźwięku, drgania wywołane urządzeniami. Metodę wyznaczania predyktora $p(\text{E})$ opracowała dr inż. Iwona Szer z zespołem.

W odniesieniu do każdego z podczynników na podstawie literatury określono zakresy wartości, przy których dany parametr ma niekorzystny wpływ na organizm człowieka. Zakresy tych wartości są różne w odniesieniu do poszczególnych podczynników. Ciśnienie atmosferyczne niekorzystnie wpłynie na pracownika, jeżeli przyjmie wartości zarówno poniżej 900 hPa, jak również powyżej 1000 hPa. Z kolei zmiana ciśnienia atmosferycznego podczas dnia pracy powyżej 4,1 hPa również niekorzystnie działa na organizm pracownika. Jak podano w pracach [12–14] na podstawie analizy wskaźnika oceny obciążeń cieplnych człowieka UTCI* temperatura powyżej 26,0°C może u pracownika spowodować stres ciepła, a temperatura poniżej 9,1°C stres zimna. Jeżeli podczas dnia nastąpi zmiana temperatury powietrza o 4,0°C lub powyżej, również niekorzystnie wpłynie to na pracownika [15]. Rozpatrując kolejny podczynnik, stwierdzono, że prędkości wiatru powyżej 5,4 m/s mogą być niesprzyjające dla osoby pracującej. Według badań omówionych w pracy [16] analizując oświetlenie miejsc pracy, należy zwrócić uwagę na dwa parametry: natężenie oświetlenia

i nierównomierność oświetlenia miejsc pracy. Jeżeli natężenie oświetlenia jest mniejsze niż 100 lx, to pracownik może niezbyt dokładnie widzieć pole robocze. Natomiast wartość większa niż 10 000 lx może spowodować oślepienie pracownika. Nierównomierność oświetlenia miejsc pracy poniżej 0,4 wpływa również na nieprawidłowe widzenie pola roboczego. Kolejnym podczynnikiem z tej grupy jest środowisko akustyczne, opisane w pracy [17]. Jeżeli poziom ekspozycji na hałas odniesiony do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy $L_{EX,8h}$ jest równy albo większy niż 82 dB lub maksymalny poziom dźwięku L_{Amax} jest równy albo większy niż 109 dB lub szczytowy poziom dźwięku L_{Cpeak} jest równy albo większy niż 129 dB, to hałas może powodować ujemne skutki zdrowotne. Również drgania rusztowania wywołane funkcjonowaniem takich urządzeń, jak: pompa do betonu, mikrokret, agregat, zsymp budowlany czy winda towarowa mogą niekorzystnie oddziaływać na osoby pracujące na rusztowaniach [18]. I ostatnim podczynnikiem, który jest uwzględniony w modelu, jest zapylenie na stanowiskach pracy. Temu podczynnikiem przypisywana jest jedna z trzech ocen: 0,0; 0,5 lub 1,0 na podstawie wizualnej oceny otoczenia.

Prawdopodobieństwo wystąpienia sytuacji potencjalnie wypadkowej z powodu stanu poszczególnych podczynników zależy od wielkości czasu, w jakim poszczególne parametry przyjmuje wartości poza zakresem, w którym warunki środowiska zewnętrznego są sprzyjające dla pracownika. Im wartość danego podczynnika jest dalej od przyjętego zakresu, tym większy jest jego wpływ na prawdopodobieństwo wystąpienia sytuacji potencjalnie wypadkowej. Wielkości te są liczone jako iloraz czasu występowania parametru poza zakresem i całkowitego czasu pomiaru. Na przykład określając prawdopodobieństwo wystąpienia sytuacji potencjalnie wypadkowej na skutek zapylenia miejsc pracy, rozróżnia się trzy poziomy zapylenia: 0,0 (brak zapylenia), 0,5 (słabe zapylenie) i 1,0 (silne zapylenie). Prawdopodobieństwo wystąpienia sytuacji potencjalnie wypadkowej z tego powodu jest wyznaczone ze wzoru:

$$p_6 = 0,5 \cdot p(z_{0,5}) + p(z_1), \quad (4)$$

gdzie: $p(z_{0,5})$ – prawdopodobieństwo wystąpienia słabego zapylenia na stanowiskach pracy w odniesieniu do zanieczyszczeń widocznych gołym okiem, $p(z_1)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia silnego zapylenia na stanowiskach pracy w odniesieniu do zanieczyszczeń widocznych gołym okiem.

Stany poszczególnych podczynników są zdarzeniami niezależnymi. Do wyznaczenia wartości predyktora $p(E)$ wykorzystano prawdopodobieństwo warunkowe tych zdarzeń i ostatecznie prawdopodobieństwo wystąpienia sytuacji potencjalnie wypadkowej wyznaczono ze wzoru:

$$p(E) = 1 - (1-p_1)(1-p_2)(1-p_3)(1-p_4)(1-p_5)(1-p_6)(1-p_7)(1-p_8)(1-p_9)(1-p_{10}), \quad (5)$$

gdzie: p_1 – ciśnienie atmosferyczne, p_2 – zmiana ciśnienia atmosferycznego podczas dnia pracy, p_3 – obciążenie cieplne człowieka UTCI*, p_4 – zmiana temperatury powietrza podczas dnia pracy, p_5 – porywy wiatru, p_6 – zapylenie, p_7 – natężenie oświetlenia miejsc pracy, p_8 – nierównomierność oświetlenia miejsc pracy, p_9 – poziom dźwięku, p_{10} – drgania wywołane urządzeniami.

Wyznaczenie predyktora $p(E)$ w odniesieniu do konkretnego rusztowania wymaga wykonania pomiarów ciśnienia, temperatury powietrza, prędkości wiatru, wilgotności względnej powietrza, stanu zapylenia, natężenia oświetlenia miejsc pracy, poziomu dźwięku, inwentaryzacji pracy urządzeń, na tym rusztowaniu na budowie. Następnie należy określić czas niekorzystnego działania na pracownika danego czynnika, prawdopodobieństwo występowania tej wielkości, wartości p_i i ostatecznie predyktor $p(O)$ ze wzoru (5).

2.5. Czynniki organizacyjne

Czynniki organizacyjne (O) to zbiór uwarunkowań związanych z organizacją pracy oraz przestrzeganiem zasad BHP, w tym kształtowanie rusztowania. Do zbioru tego zaliczono: otoczenie biznesowe, kształtowanie rusztowania pod względem zasad i przepisów BHP, przygotowanie formalne do prac. Ta część modelu została opracowana przez dr inż. Agatę Czarnigowską.

Po wykonaniu wstępnych badań stwierdzono, że poszczególne grupy uwarunkowań są ze sobą skorelowane. Dlatego jako miarę predyktora czynników organizacyjnych $p(O)$ przyjęto prawdopodobieństwo wystąpienia sytuacji niebezpiecznej z powodu stanu ukształtowania rusztowania pod względem zasad i przepisów BHP. Z jednej strony ten zestaw danych jest ściśle związany z rusztowaniem, z drugiej strony te dane najłatwiej zebrać podczas pobytu na budowie. W modelu uwzględniono znaczenie poszczególnych komponentów ukształtowania rusztowania poprzez wprowadzenie wag w_i . Ostatecznie predyktor czynników organizacyjnych opisano wzorem:

$$p(O) = \sum_{i=1}^N o_i w_i \quad (6)$$

gdzie: o_i – ocena stanu komponentu i , $N=13$ – liczba badanych komponentów, w_i – waga znaczenia danego komponentu ukształtowania rusztowania.

W modelu uwzględniono następujące komponenty ukształtowania rusztowania: wydzielenie strefy niebezpiecznej rusztowania, daszki zabezpieczające, piony komunikacyjne, poręcze wewnętrzne i zewnętrzne, krawężniki zewnętrzne i wewnętrzne, pomosty, inne elementy grożące zaczepieniem lub potknięciem, siatki, wciągarki, uziemienie, instalacja odgromowa. W odniesieniu do każdego z wymienionych komponentów przyporządkowano wartości, które określały jego stan. Na przykład w przypadku poręczy wewnętrznych przyjęto:

- $o_i = 0$ – jeżeli poręczę wewnętrzne, w przypadku gdy były potrzebne, czyli odległość pomostu od ściany była większa niż 20 cm, były kompletne lub gdy były zbędne,

- $o_i = k$ – w przeciwnym wypadku, a parametr k jest równy ilorazowi liczby pól rusztowania z brakiem choć jednej poręczy do całkowitej liczby pól rusztowania.

Wagi w_i zostały wyznaczone na podstawie analizy 134 dokumentacji powypadkowych, udostępnionych przez okręgowe inspektoraty pracy PIP w Lublinie, Warszawie, Wrocławiu, Łodzi i Poznaniu. Przyjęto następujący, arbitralny sposób ustalenia wag w_i : każdemu komponentowi ukształtowania rusztowania przyznano punkty będące liczbą punktów procentowych (iloraz wskazań na komponent według badanych protokołów powypadkowych PIP i łącznej liczby protokołów, czyli 134) powiększoną o jeden. Następnie przeprowadzono normalizację tej punktacji, aby suma wag wszystkich komponentów była równa 1, dzieląc punkty danego komponentu przez sumę punktów wszystkich komponentów. W ten sposób uzyskano wagi w_i zestawione na rysunku 2. Wyznaczenie predyktora $p(O)$ wymaga wykonania

inwentaryzacji komponentów ukształtowania rusztowania na budowie i podstawienie wyników tej inwentaryzacji do wzoru (6).

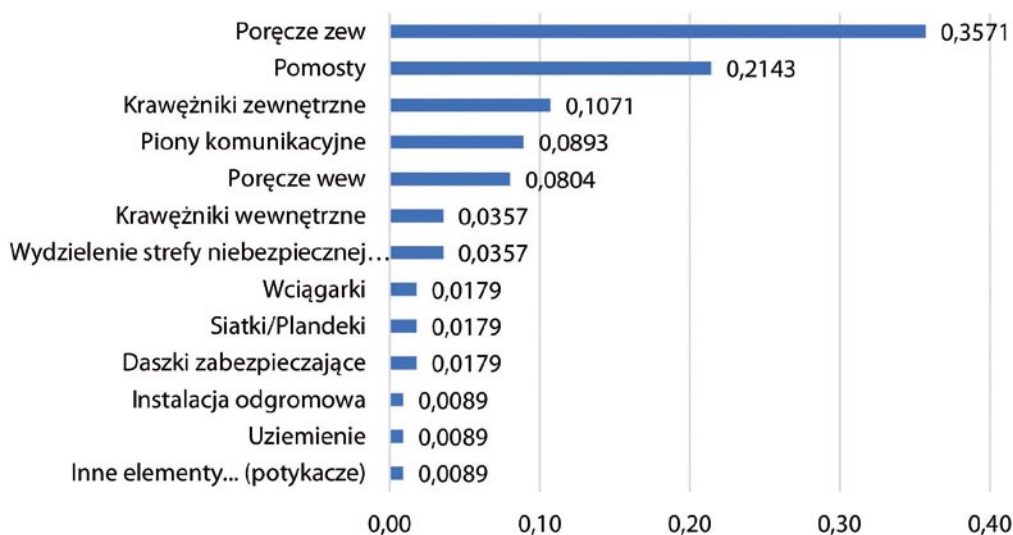
2.6. Czynniki techniczne

Czynniki techniczne (T) to ogólnie stan techniczny rusztowania, w tym nośność konstrukcji, podatność na drgania, uszkodzenia pomostów, wpływające na jego stabilność, możliwość awarii pojedynczych elementów lub całej konstrukcji. Metoda wyznaczania predyktora $p(T)$ została opracowana przez prof. dr hab. inż. Ewę Błazik-Borową z zespołem. Elementy modelu zostały opisane w takich pracach, jak [19, 20].

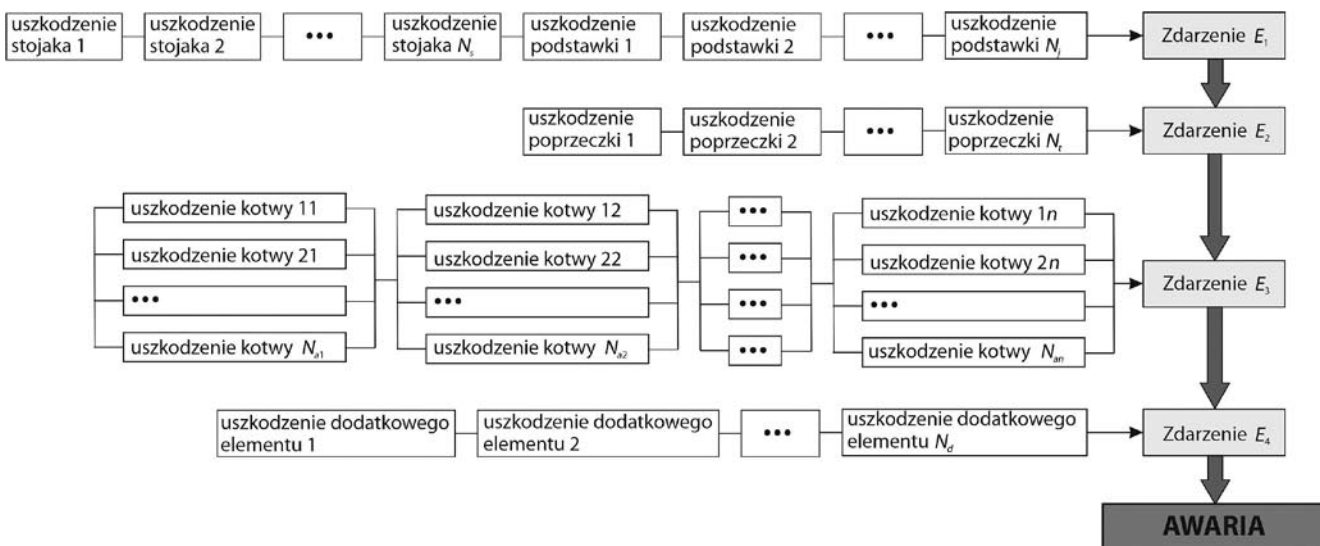
Metoda wyznaczania predyktora $p(T)$, który jest miarą prawdopodobieństwa zajścia sytuacji potencjalnie wypadkowej z powodu stanu technicznego rusztowania, została opracowana na podstawie analizy niezawodności konstrukcji, własnych badań i studiów literatury. Wielkość ta uwzględnia następujące niezależne zdarzenia: prawdopodobieństwo przekroczenia nośności rusztowania q_1 , prawdopodobieństwo wymuszenia drgań rezonansowych podczas przejścia pracowników q_2 , prawdopodobieństwo awarii jakiegokolwiek pomostu z powodu przekroczenia jego nośności q_3 , i jest wyznaczana ze wzoru:

$$p(T) = 1 - (1 - q_1)(1 - q_2)(1 - q_3), \quad (7)$$

Prawdopodobieństwo przekroczenia nośności rusztowania jest wyznaczane na podstawie obliczeń komputerowych rusztowania o rzeczywistej geometrii i modelu, skalibrowanym na podstawie badań rusztowania na budowie. W obliczeniach statycznych rusztowanie jest poddane obciążeniu maksymalnemu, wyznaczonemu na budowie. Na podstawie uzyskanych sił



Rys. 2. Zestawienie wag w_i dla poszczególnych komponentów ukształtowania rusztowania ze względu na BHP



Rys. 3. Scenariusz wystąpienia awarii rusztowania

wewnętrznych w elementach rusztowania, przy założeniu losowego rozkładu nośności tych elementów i na podstawie scenariusza awarii, pokazanego na rysunku 3, wyznaczany jest predyktor q_1 ze wzoru:

$$q_1 = 1 - (1 - P(E_1))(1 - P(E_2))(1 - P(E_3))(1 - P(E_4)) \quad (8)$$

gdzie: $P(E_r)$ – prawdopodobieństwa awarii z powodu zdarzenia E_r .

Pracownik, poruszający się po rusztowaniu, wymusza drgania o dwóch składowych ruchu: wzdłuż drogi (wzdłuż rusztowania) i w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu (prostopadle do rusztowania). W pracach [21 i 22] opisano częstotliwości wymuszenia jako wielkości losowe o rozkładzie normalnym z maksimum przypadającym przy 1,99 Hz w odniesieniu do drgań wzdłuż rusztowania i 0,91 Hz w odniesieniu do drgań w kierunku prostopadłym. Prawdopodobieństwo wystąpienia rezonansu podczas przejścia pracownika po rusztowaniu jest wyznaczane jako prawdopodobieństwo tego, że częstotliwość wymuszenia będzie zbliżona do częstotliwości drgań własnych rusztowania f_r . To prawdopodobieństwo $\Omega_i(f_i)$ dla i -tej częstotliwości jest równe polu pod krzywą rozkładu normalnego w obszarze

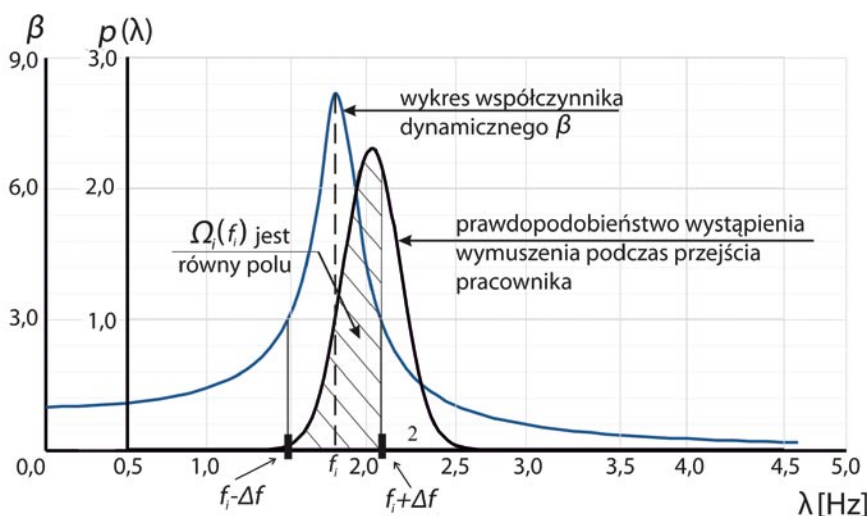
wokół f_r , tzn. w przedziale $(f_i - \Delta f, f_i + \Delta f)$. Graficzna interpretacja wielkości $\Omega_i(f_i)$ jest pokazana na rysunku 4. Predyktor q_2 wyznacza się dla dwóch najniższych częstotliwości drgań własnych ze wzoru:

$$q_2 = 0,5 \cdot \Omega_1(f_1) + 0,5 \cdot \Omega_2(f_2) \quad (9)$$

Ostatni podczynnik jest wyznaczany na podstawie stanu technicznego pomostu ze wzoru:

$$q_3 = \frac{\text{liczba pomostów uszkodzonych}}{\text{liczba wszystkich pomostów w rusztowaniu}} \quad (10)$$

Ocena rusztowania wymaga wykonania następujących badań na budowie: inwentaryzacja rusztowania, pomiary geodezyjne geometrii rusztowania, inwentaryzacja uszkodzeń pomostów i innych elementów, które mogą wpłynąć na nośność rusztowania, inwentaryzacja układów punktów kotwienia i sposób realizacji



Rys. 4. Graficzna interpretacja wielkości $\Omega_i(f)$

kotwienia, badanie nośności podłoża, inwentaryzacja obciążeń eksploatacyjnych, pomiary prędkości i kierunku wiatru, ewentualnie pomiary własności dynamicznych rusztowania. Wyniki badań są wykorzystywane podczas tworzenia modelu komputerowego rusztowania i symulacji jego zachowania pod wpływem maksymalnego obciążenia. Na podstawie stanu wytężenia konstrukcji jest wyznaczane prawdopodobieństwo przekroczenia nośności rusztowania q_1 . Częstości drgań własnych są wyznaczane także za pomocą obliczeń komputerowych, a wyniki analizy modalnej służą do wyznaczenia prawdopodobieństwa wymuszenia drgań rezonansowych podczas przejścia pracowników q_2 . Ostatnia z wielkości czyli q_3 jest wyznaczana ze wzoru (8).

2.7. Czynniki ludzkie

Czynniki ludzkie (L) to czynniki związane ze stanem psychofizycznym człowieka (choroba, znaczny wysiłek energetyczny, stres) oraz zachowaniami pracowników (zachowania społeczne, poczucie kontroli, hierarchia wartości społecznych, nawyki, percepcja ryzyka). Metoda wyznaczania predyktora $p(L)$ została opracowana przez dr. hab. inż. Krzysztofa Czarnockiego, prof. uczelni, z zespołem i została opisana np. w takich pracach, jak [23–26]. Predyktor $p(L)$ jest miarą prawdopodobieństwa powstania sytuacji potencjalnie wypadkowej, indukowanej stanem czynnika ludzkiego. Na podstawie studiów literatury i własnych badań stwierdzono, że można ten predyktor zapisać jako funkcję:

$$p(L) = f(RS_{SOC}, RS_{LOC}, RS_{KLZ}, RS_{LWO}, RS_{IZZ}, RS_{PR}, RS_{WL}) \quad (11)$$

gdzie kolejne zmienne są odniesione do wpływu ludzi na bezpieczeństwo i są to: RS_{SOC} – poczucie koherencji, RS_{LOC} – umiejscowienie kontroli, RS_{KLZ} – kontrola zdrowia, RS_{LWO} – wartości osobiste, RS_{IZZ} – indeks zachowań zdrowotnych, RS_{PR} – indywidualna percepcja ryzyka, RS_{WL} – wydatek energetyczny pracownika.

Wyznaczenie wartości stanu podczynników wymaga:

- przeprowadzenia badań kwestionariuszowych (CAPI), na podstawie wyników których wyznaczane są macierze standaryzowanych wartości: $S_{SOC}, S_{LOC}, S_{LKZ}, S_{LWO}, S_{IZZ}, S_{PR}$
- wykonania pomiaru parametrów fizjologicznych człowieka i inwentaryzacji prac przez niego wykonywanych w trakcie pomiaru i te wyniki służą do wyznaczenia macierzy standaryzowanych wartości wydatku energetycznego S_{WL}
- podstawienia do wzorów modelu, których formę zaproponowano w pracy [25].

Wartość, oceniająca wpływ k -tej grupy podczynników na bezpieczeństwo pracy, wyznaczana jest ze wzoru:

$$RS_k = \frac{\sum_j \sum_i S_{k,ij}}{\sum_j \sum_i Smax_{k,ij}} \quad (12)$$

gdzie: k – symbol macierzy, i – numer pracownika, j – numer pytania lub stanowiska pracy, $Smax_{k,ij}$ – wartość maksymalna składnika i,j macierzy k .

Na podstawie badań i wyników pomiarów na budowach wyznaczono zestaw równań regresji wielorakiej i równań strukturalnych, które przyjmują formę zaproponowaną w publikacji [25]. Zmienne składowe modelu, opisujące oddziaływanie czynnika ludzkiego na poziom bezpieczeństwa pracy na rusztowaniach są bardziej niż inne grupy czynników podatne na zmianę charakterystyki lub poziomu pozostałych czynników. Między innymi podczas analizy wyników badań uchwycono istotne różnice w równaniach w zależności od regionów i dlatego w odniesieniu do każdego z regionów przygotowano inny zestaw równań. Przykładowo w odniesieniu do województwa lubelskiego przyjmuje on formę:

$$\left\{ \begin{array}{l} RS_{SOC} = 0,71\eta_1 + \varepsilon_1 \\ RS_{LOC} = 0,77\eta_1 + \varepsilon_2 \\ RS_{KLZ} = 0,46\eta_2 + \varepsilon_3 \\ RS_{LWO} = 0,52\eta_1 + \varepsilon_4 \\ RS_{IZZ} = 0,79\eta_2 + \varepsilon_5 \\ RS_{PR} = 0,82\eta_3 + \varepsilon_6 \\ RS_{WL} = 0,67\eta_2 + \varepsilon_7 \\ \eta_2 = 1,53\eta_1 \\ \eta_3 = 1,61\eta_1 \\ \eta_3 = 1,44\eta_2 \end{array} \right. \quad (13)$$

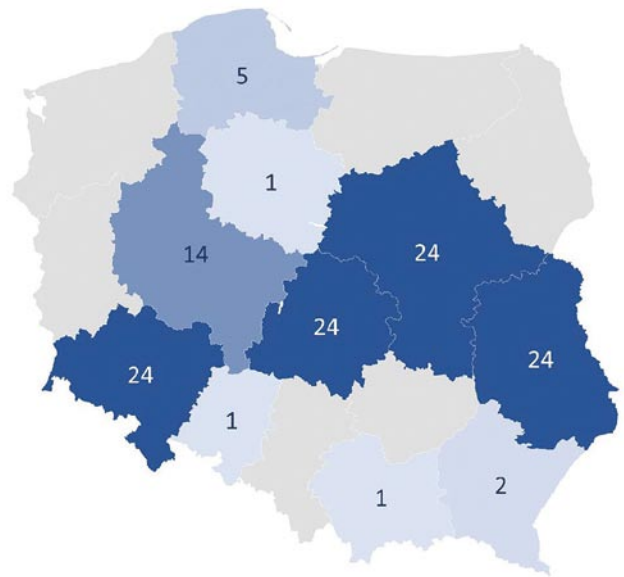
gdzie: ε_i – i -ty składnik wektora błędu pomiaru, η_1 – zmienna, opisująca klimat bezpieczeństwa, η_2 – zmienna, opisująca stan zdrowia, $\eta_3 = p(L)$ – zmienna, opisująca percepcję ryzyka i tym samym predyktor wystąpienia sytuacji potencjalnie wypadkowej spowodowanej czynnikiem ludzkim.

Jak już napisano powyżej, ocena wpływu zachowań pracowników na rusztowaniu na bezpieczeństwo czyli wyznaczenia predyktora $p(L)$ wymaga przeprowadzenia badań kwestionariuszowych z użytkownikami rusztowań, pomiaru parametrów fizjologicznych i inwentaryzacji prac, wykonywanych przez danego pracownika. Następnie należy wyznaczyć wartości stanu podczynników ze wzoru (12) i podstawić te wartości do zestawu wzorów, opisujących model w odniesieniu do danego regionu.

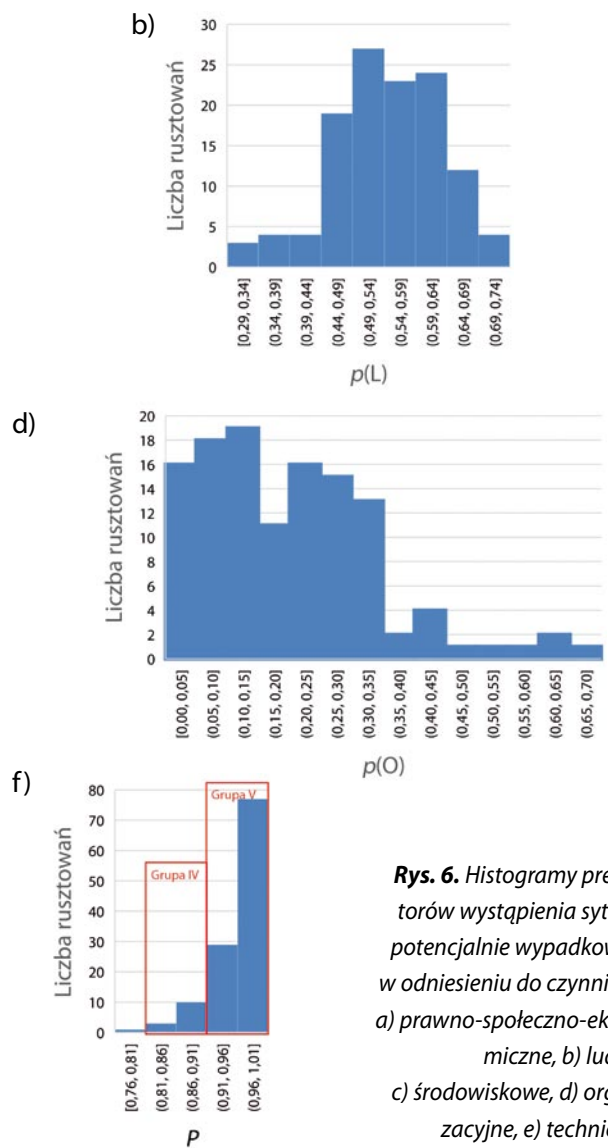
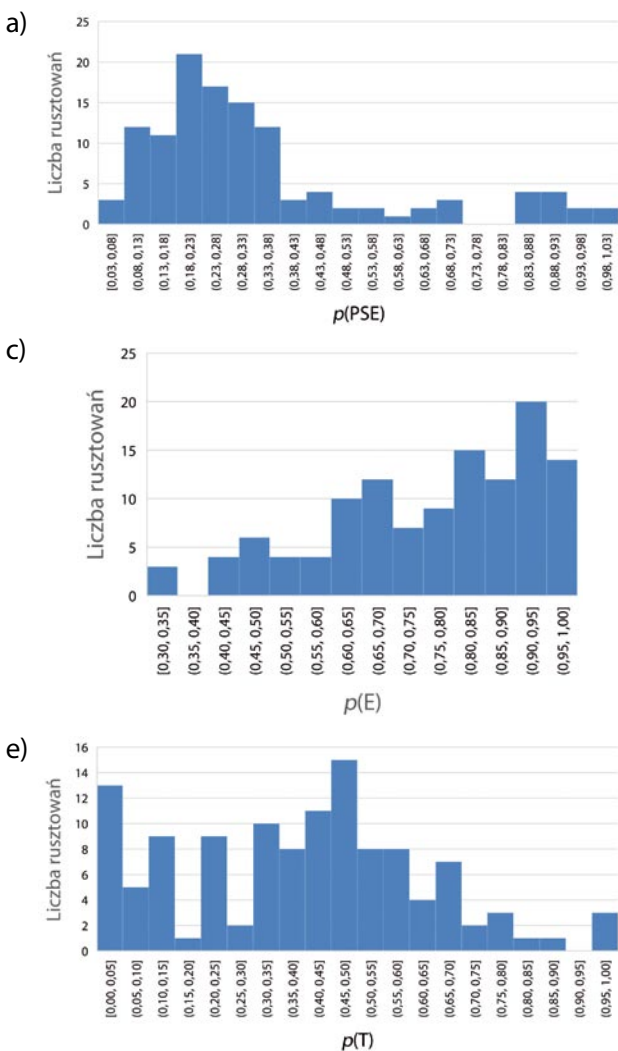
3. Wyniki badań rusztowań w Polsce

Model ORWKIZ posłużył do oceny 120 systemowych rusztowań ramowych w całej Polsce, które były użytkowane na budowach w latach 2016–2018. Rozkład lokalizacji rusztowań pokazany jest na rysunku 5. Na każdej z budowli wykonywano badania przez jeden tydzień roboczy. Zakres badań był dostosowany przede wszystkim do wymagań modelu ORWKIZ. Na podstawie badań i metod, opisanych w poprzednim punkcie, wyznaczono predyktory pięciu grup czynników i predyktor ostateczny. Ta ostatnia wielkość była podstawą zaszeregowania rusztowania do grupy zagrożenia. Histogramy rozkładu predyktorów poszczególnych grup czynników pokazano na rysunku 6.

Predyktory $p(PSE)$ i $p(O)$ są dla większości rusztowań mniejsze od 0,4. Predyktor $p(L)$ ma rozkład podobny do rozkładu normalnego. Prawdopodobieństwo wystąpienia sytuacji potencjalnie wypadkowej z powodu czynnika ludzkiego przyjmuje większe wartości i osiągają one około 0,75. Predyktor $p(T)$ ma wartości



Rys. 5. Liczba badanych rusztowań w poszczególnych województwach



Rys. 6. Histogramy predyktorów wystąpienia sytuacji potencjalnie wypadkowych w odniesieniu do czynników: a) prawno-społeczno-ekonomiczne, b) ludzkie c) środowiskowe, d) organizacyjne, e) techniczne, f) ostateczny predyktor

w pełnym zakresie, ale wartości predyktorów dla większości rusztowań też mieszczą się poniżej wartości 0,75. Natomiast w przypadku czynników środowiskowych widać wyraźny wzrost wartości predyktora $p(E)$. Niestety tutaj widać przesunięcie wykresu w kierunku wartości 1,0. Wartość ostatecznego predyktora P uwzględnia wszystkie grupy czynników. Wartości tego predyktora rozpoczynają się od 0,76. Do grupy IV czyli rusztowań, na których występuje zagrożenie w dużym stopniu, zakwalifikowano 13 rusztowań, a do grupy V, czyli rusztowań, na których występuje zagrożenie w wysokim stopniu, zakwalifikowano 106 rusztowań.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono metodę oceny rusztowań budowlanych w aspekcie bezpieczeństwa użytkowników, uwzględniającą otoczenie rusztowania, stan rusztowania i zachowania ludzi. Metoda została wykorzystana do oceny bezpieczeństwa pracy na 120 rusztowaniach, użytkowanych w Polsce w latach 2016–2018. Stwierdzono, że właściwie na wszystkich rusztowaniach występowały zagrożenia, a w przypadku 106 rusztowań, czyli w 88% stwierdzono, że zagrożenie wystąpienia wypadku występuje w wysokim stopniu. Do tego stanu przyczyniają się wszystkie grupy czynników, jednak w Polsce największym problemem są czynniki środowiskowe, dlatego podczas organizacji prac budowlanych należy uwzględnić warunki klimatyczne.

Wykorzystanie osiągnięć naukowych, zaprezentowanych w artykule, może znacząco przyczynić się do zmniejszenia wypadkowości w branży budowlanej. Każda firma ma możliwość sprawdzenia użytkowanych przez siebie rusztowań. Model ORWKIZ jest tak opracowany, że obejmuje wszystkie zagadnienia związane z funkcjonowaniem rusztowań. Dzięki temu można ocenić bezpieczeństwo pracy na rusztowaniach, wskazać, gdzie są największe problemy związane ze stosowaniem rusztowań w danej firmie i usunąć je lub zminimalizować. Metoda wymaga wykonania badań, ale każde działanie na rzecz ochrony życia ludzi jest opłacalne.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Państwowa Inspekcja Pracy, Sprawozdanie z działalności Państwowej Inspekcji Pracy w 2020 roku, Warszawa 2021, <https://www.pip.gov.pl/pl/o-urzedzie/sprawozdania-z-dzialalnosci/128604,sprawozdanie-z-dzialalnosci-panstwowej-inspekcji-pracy-2020.html>
- [2] Abas N. H., Noridan M. R., Rahmat M. H., Abas N. A., Ibrahim N. Q., Causes of Accidents Involving Scaffolding at Construction Sites. *Journal of Technology Management and Business* 7(1)2020
- [3] Czarnigowska A., Czego brakuje rusztowaniom – przepisy a praktyka, *Inżynier Budownictwa* 3/2019
- [4] Błazik-Borowa E., Czarnocki K., Dąbrowski A., Hoła B., Miszteła A., Obolewicz J., Walusiak-Skorupa J., Smolarz A., Szer J., Szóstak M., Bezpieczeństwo pracy budownictwie. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2015
- [5] Błazik-Borowa E., Szer J., The analysis of the stages of scaffolding 'life' with regard to the decrease in the hazard at building works. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 15(2)2015
- [6] Szer I., Hoła B., Analiza warunków klimatycznych podczas wypadków na rusztowaniach budowlanych na przykładzie temperatury powietrza, [w]: Kaszyńska M., Awarie budowlane, zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje. Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, Szczecin 2022
- [7] Pietrzak L., Analiza wypadków przy pracy dla potrzeb prewencji. Państwowa Inspekcja Pracy, Warszawa, 2007
- [8] Bird F. E., Management guide to loss control. International Loss Control Institute, Atlanta 1974
- [9] Błazik-Borowa E., Szer I., Podstawowe elementy modelu oceny ryzyka wystąpienia zdarzeń niebezpiecznych na rusztowaniach, *Przegląd budowlany* 10/2016
- [10] Hoła B., Nowobilski T., Classification of economic regions with regards to selected factors characterizing the construction industry, *Sustainability* 10(5)2018
- [11] Hoła B., Nowobilski T., Analysis of the influence of socio-economic factors on occupational safety in the construction industry, *Sustainability* 11(16)2019
- [12] Szer I., Szer J., Hoła B., Evaluation of climatic conditions affecting workers on scaffoldings, [w]: Al Ali M., Platko P., Advances and trends in engineering sciences and technologies III. CRC Press, Londyn, 2019
- [13] Szer I., Szer J., The influence of external environment on workers on scaffolding illustrated by UTCL, *Open Engineering* 11(1)2021
- [14] Szer I., Lipecki T., Szer J., Czarnocki K., Using meteorological data to estimate heat stress of construction workers on scaffolds for improved safety standards. *Automation in Construction* 134, 2022
- [15] Szer I., Szer J., Hazards induced by thermal conditions during work on scaffolding. *MATEC Web of Conferences* 284, 2019
- [16] Szer I., Szer J., Analysis of lighting on exterior scaffoldings at different times of day. *Archives of Civil Engineering*, artykuł zaakceptowany do druku w 2022
- [17] Jabłoński M., Szer I., Szer J., Probability of occurrence of health and safety risks on scaffolding caused by noise exposure. *Journal of Civil Engineering and Management* 24(6)2018
- [18] Bęc J., Błazik-Borowa E., Jamińska-Gadomska P., Lipecki T., Vibrational environment at scaffoldings, [w]: Flaga A., Lipecki T., 8th International Symposium on Environmental Effects on Buildings and People: actions, influences, interactions, discomfort, Polskie Stowarzyszenie Inżynierii Wiatrowej, Kraków, 2018
- [19] Błazik-Borowa E., Geryło R., Wielgos P., The probability of a scaffolding failure on a construction site. *Engineering Failure Analysis* 131, 2022
- [20] Błazik-Borowa E., Bęc J., Influence of dynamic properties on scaffolding safety. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 21(4)2021
- [21] Racic V., Brownjohn J. M. W., Mathematical modelling of random narrow band lateral excitation of footbridges due to pedestrians walking. *Computers and Structures*, 2012, str. 90–91
- [22] Racic V., Pavic A., Brownjohn J. M. W., Experimental identification and analytical modelling of human walking forces: Literature review. *Journal of Sound and Vibration* 326, 2009
- [23] Czarnocki K., Silveira F., Czarnocka E., Szaniawska K., Safety climate assessment and its impact on the productivity of construction enterprises, *WASET Journal of Economics and Management Engineering* 12(9)2018
- [24] Czarnocki K., Czarnocka E., Szaniawska K., Human factors as the main reason of the accident in scaffold use assessment, *WASET International Journal of Medical and Health Sciences* 12(3)2018
- [25] Czarnocki K., Determinanty klimatu bezpieczeństwa w przedsiębiorstwach budowlanych. Towarzystwo Naukowe Organizacji i Kierownictwa Dom Organizatora, Toruń, 2018
- [26] Bojar H., Silveira F., Rebelo M., Czarnocka E., Czarnocki K., Health behaviours in scaffold use risk assessment model – SURAM, *Annals of Agricultural and Environmental Medicine* 26(1)2019