

Analiza zagrożeń górniczych z wykorzystaniem metody ETA

dr inż. Dagmara NOWAK-SENDEROWSKA
Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie

TREŚĆ: Artykuł przedstawia zastosowanie metody drzewa zdarzeń (ETA) jako zaawansowanego narzędzia wspierającego procesy analizy, prognozowania i oceny skutków zagrożeń zawodowych w kontekście systemowego zarządzania bezpieczeństwem pracy. Metoda ETA, oparta na logicznej strukturze zdarzeń i możliwych konsekwencji ich wystąpienia, umożliwia identyfikację miejsc newralgicznych w środowisku pracy, w tym potencjalnych błędów ludzkich, zawodności barier technicznych, niedociągnięć organizacyjnych czy wpływu niekorzystnych czynników środowiskowych. Zwrócono uwagę na interdyscyplinarne możliwości wykorzystania tej metody – od identyfikacji i oceny ryzyka zawodowego, poprzez racjonalny dobór środków ochrony, aż po wsparcie w dochodzeniach powypadkowych i projektowaniu skutecznych strategii prewencyjnych. Praktyczne zastosowanie metody drzewa zdarzeń zaprezentowano na przykładzie analizy dwóch stanowisk pracy w górnictwie: operatora wozu wierćco-kotwiącego w kopalni podziemnej, gdzie zidentyfikowano zagrożenie pożarowe wynikające z obecności materiałów łatwo palnych, oraz operatora ładowarki kotowej w górnictwie odkrywkowym, narażonego na kontakt z niewypałami. W obu przypadkach istotną kwestią przy budowie scenariuszy było zebranie odpowiednich danych w postaci: okoliczności każdego zidentyfikowanego zagrożenia, częstotliwości aktywizacji zagrożenia, rodzajów urazów w przypadku wystąpienia zagrożenia oraz stosowanych działań profilaktycznych. Wykazano, że ETA może stanowić skuteczne narzędzie wspomagające ograniczanie ryzyka oraz poprawę poziomu bezpieczeństwa pracy w przedsiębiorstwach górniczych.

SŁOWA KLUCZOWE: ryzyko zawodowe, drzewo zdarzeń, zagrożenia, górnictwo

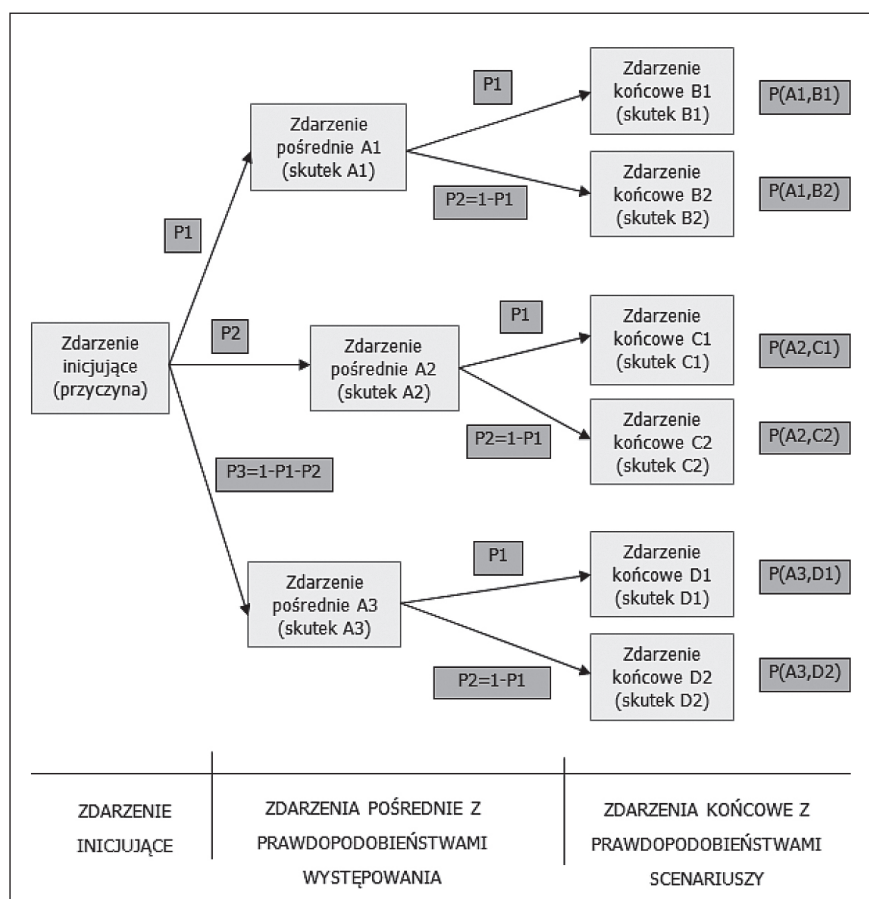
1. Wprowadzenie

Bezpieczeństwo pracy w górnictwie stanowi jedno z największych wyzwań współczesnej inżynierii bezpieczeństwa, a to ze względu na złożoność procesów technologicznych, trudne i zmienne warunki geologiczno-górniczne, a także wysoki potencjał występowania poważnych w skutkach zdarzeń niebezpiecznych. Identyfikacja i ocena zagrożeń w tej branży jest nie tylko wymogiem formalnym wynikającym z przepisów prawa, ale przede wszystkim fundamentem skutecznego zarządzania ryzykiem zawodowym [1].

W praktyce inżynierskiej i w środowisku pracy stosuje się wiele metod służących do identyfikacji zagrożeń i oceny ryzyka z nimi związanego. Do najczęściej wykorzystywanych należą metody jakościowe, takie jak: listy kontrolne (Checklist), analiza co, jeśli (What-If Analysis), PHA (Preliminary Hazard Analysis), a także metody ilościowe i ilościowe, m.in. FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), HAZOP (Hazard and Operability

Study), Risk Score, 5 Steps, FTA (Fault Tree Analysis) czy Monte Carlo. Wybór metody często uzależniony jest od charakteru procesu, dostępnych danych, stopnia skomplikowania analizowanego systemu oraz, a może przede wszystkim, od celu oceny ryzyka. Pomimo ich użyteczności, w praktyce często preferuje się metody szybkie i proste w użyciu, nawet jeśli nie zapewniają pogłębionej analizy zagrożeń. Te oparte na modelach graficznych są wciąż stosunkowo rzadko wykorzystywane, choć oferują znaczne możliwości w zakresie prognozowania przebiegu zdarzeń oraz ich skutków.

W warunkach górniczych, gdzie występuje wiele zagrożeń o charakterze dynamicznym i często kaskadowym, klasyczne metody oceny ryzyka zawodowego nie oddają w pełni złożoności oraz interakcji pomiędzy czynnikami ryzyka. Do najpoważniejszych zagrożeń trudnych do analizy w górnictwie należą przede wszystkim te powodowane czynnikami naturalnymi (metanowe, pożarowe, wybuchem pyłu węglowego czy tąpnięciami) i czynnikami mechanicznymi oraz elektrycznymi związanymi z pracą



► Rys. 1. Przykładowy schemat metody ETA

► Fig. 1. Example diagram of the ETA method

maszyn i wyposażeniem technicznym. Wiele z nich cechuje trudna do przewidzenia eskalacja oraz możliwość wystąpienia skutków o charakterze katastrofalnym. W tym kontekście metoda ETA (Event Tree Analysis) może stanowić istotne uzupełnienie lub alternatywę dla innych technik oceny ryzyka. Dzięki strukturze logicznie rozgałęziającej się od zdarzenia inicjującego pozwala nie tylko na analizę sekwencji zdarzeń, ale także na ocenę skuteczności zastosowanych zabezpieczeń i identyfikację punktów krytycznych wymagających interwencji. Jej zastosowanie w górnictwie umożliwia bardziej szczegółową analizę zagrożeń na podstawie opracowania realistycznych scenariuszy zdarzeń niebezpiecznych wraz z ich potencjalnymi konsekwencjami.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie możliwości zastosowania metody ETA do analizy zagrożeń górniczych, ze szczególnym uwzględnieniem jej potencjału w zakresie oceny ryzyka zawodowego, wspomaganie decyzji dotyczących doboru środków ochrony oraz klasyfikacji skutków zagrożeń dla zdrowia pracowników. Zaprezentowane przykłady pokazują, że metoda ta może stanowić istotne wsparcie w systemowym podejściu do bezpieczeństwa pracy w warunkach wysokiego ryzyka.

2. Drzewo zdarzeń w literaturze przedmiotu

Metoda drzewa zdarzeń (ETA) znalazła szerokie zastosowanie zarówno w praktyce inżynierskiej, jak i w literaturze naukowej, stając się jednym z kluczowych narzędzi wykorzystywanych do prognozowania i oceny.

Jej uniwersalność, przejrzystość graficzna oraz możliwość zastosowania zarówno w analizie ilościowej, jak i ilościowej sprawiają, że jest powszechnie stosowana w wielu dziedzinach inżynierii bezpieczeństwa.

W literaturze przedmiotu wskazuje się na różnorodne przykłady zastosowań metody ETA, obejmujące zarówno zagrożenia naturalne oraz techniczne, jak i scenariusze awaryjne w środowiskach przemysłowych. Przykładowo, Przybyła i Korban [2] opisali wykorzystanie drzewa zdarzeń do analizy ryzyka zapłonu metanu w wyrobisku górniczym. Ich opracowanie miało charakter jakościowy, a skupiało się na przedstawieniu metodyki budowy drzewa zdarzeń w kontekście konkretnego scenariusza zagrożenia. Autorzy zaprezentowali przejrzysty schemat pozwalający na identyfikację ścieżek prowadzących do potencjalnych skutków niepożądanych, takich jak pożar lub wybuch, co czyni tę metodę użyteczną w planowaniu działań prewencyjnych w warunkach górniczych.

Z kolei Findeisen [3] zaproponował zastosowanie metody ETA w analizie awarii związanej z wyciekiem ropy naftowej w porcie. W tym przypadku podjęto próbę ilościowej oceny ryzyka, co umożliwiło precyzyjniejsze oszacowanie prawdopodobieństw poszczególnych zdarzeń oraz ich skutków środowiskowych i technicznych. Analiza taka miała na celu nie tylko określenie możliwych ścieżek rozwoju sytuacji awaryjnej, ale również dostarczenie danych niezbędnych do opracowania strategii zarządzania ryzykiem oraz planów reagowania kryzysowego.

W badaniach Hebby i współautorów [4] podkreślono z kolei szczególną przydatność metody drzewa zdarzeń w kontekście oceny ryzyka zawodowego. Autorzy zwrócili uwagę na możliwość wykorzystania tej metody do ustalenia prawdopodobieństwa wystąpienia szkody na zdrowiu pracownika w wyniku zdarzenia inicjującego. Modelowanie kolejnych następstw zdarzeń w strukturze drzewa pozwala na wyznaczenie logicznej i przejrzystej sekwencji skutków oraz ich wzajemnych zależności, co stanowi istotną wartość w kontekście opracowywania procedur bezpieczeństwa pracy.

Zastosowanie metody ETA w analizie zagrożeń pożarowych zaprezentował również Wolanin [5]. Autor ten zintegrował analizę drzewa zdarzeń z wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu metody drzewa błędów (FTA), badając proces rozprzestrzeniania się dymu poza strefę pożaru. Otrzymane wyniki wykorzystano następnie w analizie skutków pożaru z uwzględnieniem możliwych scenariuszy jego rozwoju oraz wpływu na bezpieczeństwo ludzi i infrastrukturę. Praca ta wskazuje na możliwość synergicznego stosowania różnych metod analizy ryzyka w celu uzyskania bardziej kompleksowego i wiarygodnego obrazu zagrożeń.

Tuncel i współautorzy [6] zastosowali rozszerzoną analizę drzewa zdarzeń (ETA) w połączeniu z logiką rozmytą do oceny ryzyka pożaru w maszynowni statku, uwzględniając prawdopodobieństwa awarii systemów detekcji i gaszenia oraz oceniając skutki i rekomendując działania minimalizujące ryzyko. Metoda ETA znalazła również zastosowanie w ocenie ryzyka pożarów lasów i obszarów miejskich jako analiza *wild-fire* dla miasta. Alam i Sadiq [7] zintegrowali model drzewa zdarzeń z systemami GIS oraz symulacjami Monte Carlo w celu klasyfikacji obszarów według poziomu ryzyka oraz przyczyn społecznych i technicznych. Korhonen i inni [8] opracowali metodę *time-dependent event trees*, w której drzewo zdarzeń jest dzielone na przedziały czasowe; pożar traktowany jest jako proces stochastyczny (łańcuch Markowa), a prawdopodobieństwa rozgałęzień powiązane z macierzami transferu, co umożliwia analizę rozwoju pożaru w czasie i ocenę strat. Abdelghany i zespół [9] stworzyli narzędzie ETMA, które automatyzuje konstrukcję, redukcję i probabilistyczną analizę pełnych modeli ETA dla systemów energetycznych, umożliwiając generowanie kompletnych drzew zdarzeń oraz symulacje prawdopodobieństw skutków.

Przytoczone przykłady potwierdzają, że metoda drzewa zdarzeń znajduje zastosowanie w różnorodnych kontekstach analizy ryzyka – od środowisk przemysłowych, przez systemy transportowe, aż po ochronę środowiska i zdrowia pracowników. Elastyczność oraz możliwość adaptacji do specyfiki analizowanego zagrożenia czynią ją wartościowym narzędziem zarówno w badaniach naukowych, jak i w praktyce inżynierskiej. Co istotne, ETA może być skutecznie wykorzystywana nie tylko do oceny aktualnego poziomu ryzyka, ale również jako narzędzie wspomagające projektowanie systemów bezpieczeństwa oraz podejmowanie decyzji strategicznych w zakresie zarządzania ryzykiem.

3. Metoda ETA – konstrukcja drzewa

Metoda ETA (Event Tree Analysis) stanowi jedno z uznanych narzędzi analitycznych stosowanych do

oceny zagrożeń w środowisku pracy. Jej podstawową funkcją jest modelowanie sekwencji zdarzeń następujących po tzw. zdarzeniu inicjującym, które może doprowadzić do wystąpienia skutków niepożądanych, w tym szkód na zdrowiu pracowników [10]. Konstrukcja drzewa zdarzeń umożliwia identyfikację wszystkich potencjalnych scenariuszy rozwoju sytuacji w oparciu o określone mechanizmy przyczynowo-skutkowe. Model ten ma charakter graficzny i bazuje na strukturze rozgałęziającej się, w której każdemu węzłowi przypisuje się możliwe warianty przebiegu analizowanego procesu. W klasycznym ujęciu rozgałęzienia mają charakter binarny, tj. uwzględniają wystąpienie danego zdarzenia lub jego brak. Jednak dopuszczalne są również warianty z większą liczbą następstw jednego zdarzenia pod warunkiem wzajemnego ich wykluczania, co zapewnia spójność logiczną modelu (rys. 1).

Zdarzenia w scenariuszach mogą być dwójakiego rodzaju:

- statyczne, czyli wykazujące posiadanie/nieposiadanie jakiejś cechy, stanu;
- kinetyczne, czyli takie, które wskazują na zmianę stanu lub z posiadania na nieposiadanie jakiejś cechy (lub odwrotnie) [11].

Analizując sytuację przebiegu zagrożenia w tworzonych drzewach zdarzeń, ze względu na rodzaje związków występujących pomiędzy zdarzeniami można wyróżnić trzy rodzaje scenariuszy:

- z powiązaniami przyczynowymi między zdarzeniami, co skutkuje zależnościami statystycznymi między nimi;
- bez powiązań przyczynowych między zdarzeniami, czyli niezależnością statystyczną;
- jako kombinacja dwóch wskazanych zależności między zdarzeniami.

Doznanie przez pracownika urazu jest zatem wynikiem połączonych zdarzeń, z których każde jest następstwem poprzedniego i przyczyną następnego. Jak już wcześniej zaznaczono, zazwyczaj każde zdarzenie w strukturze drzewa posiada dwa odgałęzienia: jedno odpowiadające pomyślnemu przebiegowi zdarzenia (sukces) i drugie – jego niepowodzeniu. Dzięki prześledzeniu odpowiednich ścieżek w drzewie możliwe jest oszacowanie prawdopodobieństw zarówno dla zdarzeń pośrednich, jak i końcowych. Ważną cechą analizy jest fakt, iż suma prawdopodobieństw zdarzenia i jego alternatywy (braku jego wystąpienia) w ramach jednego węzła musi wynosić jeden, co odzwierciedla zasadę pełnej przestrzeni zdarzeń [12].

Prawdopodobieństwo zdarzenia końcowego oblicza się jako iloczyn prawdopodobieństw wszystkich zdarzeń poprzedzających. Analogicznie należy postępować przy kalkulacji prawdopodobieństwa zdarzenia pośredniego.

$$p_n(W_i) = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_j \cdot p_k(W_i) \quad (1)$$

gdzie:

- W_i – określona kategoria szkody na zdrowiu,
- p_n – prawdopodobieństwo wystąpienia określonej kategorii szkody w wyniku realizacji scenariusza dotyczącego danego zagrożenia,
- p_j – prawdopodobieństwo zdarzeń w scenariuszu dotyczącym danego zagrożenia, doprowadzającym do szkody W_i ,

$p_k(W_i)$ – prawdopodobieństwo szkody W_i dotyczącej danego zagrożenia.

Prawdopodobieństwo wystąpienia szkody na zdrowiu zdefiniowanej odpowiednią kategorią oblicza się, mnożąc prawdopodobieństwo scenariusza prowadzącego do szkody i prawdopodobieństwo tej szkody. W kontekście analizy zagrożeń dla zdrowia pracownika skutki zdarzeń mogą zostać sklasyfikowane w pięciu kategoriach [1]:

- W_0 – brak urazu,
- W_1 – uraz skutkujący niezdolnością do pracy do 33 dni,
- W_2 – uraz powodujący niezdolność do pracy powyżej 33 dni,
- W_3 – choroba zawodowa lub trwałe inwalidztwo,
- W_4 – zgon.

Na końcowym etapie analizy modelem drzewa zdarzeń określa się kategorię szkody zdrowotnej jako efektu danego scenariusza zdarzeń. W przypadku urazów miarą skutku jest czasowa niezdolność do pracy, natomiast dla chorób zawodowych lub inwalidztwa jako kryterium oceny przyjmuje się trwałość skutku zdrowotnego.

4. Potencjał drzewa zdarzeń w ocenie ryzyka szkody na zdrowiu pracowników w górnictwie

Stanowisko pracy stanowi podstawową, najmniejszą i funkcjonalnie niepodzielną jednostkę organizacyjną w strukturze przedsiębiorstwa. Jego specyfikę determinują współistniejące elementy, takie jak: aktywność ludzka, rozmieszczenie techniczne i organizacyjne poszczególnych składników, eksploatacja maszyn i urządzeń oraz oddziaływanie czynników środowiskowych, zarówno wewnętrznych, jak i zewnętrznych [13]. W kontekście oceny ryzyka zawodowego takie ujęcie stanowiska pracy pozwala na kompleksową analizę potencjalnych zagrożeń, które – zgodnie z definicją zawartą w normie PN-N-18002:2011 [14] – mogą prowadzić do wystąpienia niepożądanych zdarzeń skutkujących stratami, w szczególności w postaci uszczerbku na zdrowiu pracownika. W praktyce podkreśla się, że ryzyko zawodowe:

- wynika z ekspozycji pracownika na zagrożenie;
- może skutkować uszczerbkiem na zdrowiu, chorobą zawodową lub wypadkiem;
- powinno być identyfikowane, oceniane i redukowane.

Zgodnie z podejściem przyjętym w niniejszym artykule ryzyko zawodowe rozumiane jest jako kombinacja prawdopodobieństwa wystąpienia szkody na zdrowiu oraz jej potencjalnych konsekwencji, uwzględniająca sekwencję zdarzeń prowadzących do danego skutku. Taka perspektywa analizy, oparta na strukturze stanowiska pracy i scenariuszy rozwoju zagrożeń, umożliwia precyzyjne identyfikowanie miejsc newralgicznych, w których ekspozycja na zagrożenia jest szczególnie wysoka, co z kolei sprzyja racjonalnemu zarządzaniu ryzykiem i podejmowaniu adekwatnych działań prewencyjnych, przerywających łańcuch niekorzystnych zdarzeń w drzewie.

Istotną kwestią dla dokonania rzeczowej identyfikacji zagrożeń, a także pozyskania szczegółowych informacji o zagrożeniach występujących na konkretnym stanowisku pracy jest zebranie odpowiednich danych, które umożliwią określenie:

- okoliczności każdego zidentyfikowanego zagrożenia,
 - częstotliwości aktywizacji zagrożenia,
 - rodzajów urazów w przypadku wystąpienia zagrożenia,
- oraz
- stosowanych dotychczas działań profilaktycznych.

Pozyskanie wskazanych danych determinuje użycie metody ETA przy jednoczesnej modyfikacji oraz dostosowaniu przyjmowanych wartości do rzeczywistych warunków i specyfiki analizowanych prac w górnictwie, co prezentuje tab. 1. W kolejnej części zostały przytoczone analizy metodą ETA dwóch zagrożeń występujących na stanowiskach pracy w górnictwie.

4.1. Zagrożenie pożarowe – operator wozu wierząco-kotwiącego w kopalni podziemnej

Do przedmiotowej analizy wybrano stanowisko operatora samojezdnego wozu wierząco-kotwiącego pracującego przy eksploatacji rud miedzi i wskazano jedno z istotniejszych zagrożeń zidentyfikowanych w środowisku pracy kopalni podziemnej, jakim jest występowanie pożaru. Zagrożenie to ma charakter pośrednio-technologiczny, wynika z eksploatacji maszyn i urządzeń górniczych w podziemnych wyrobiskach zakładów górniczych rud, a także obecności materiałów łatwo palnych (oleje hydrauliczne, paliwa, smary, tworzywa sztuczne) w bezpośrednim otoczeniu miejsca pracy.

Operator wozu wierząco-kotwiącego wykonuje szereg czynności technologicznych, które niosą potencjalne ryzyko związane z wystąpieniem pożaru, w tym:

- obsługa układów hydraulicznych pod ciśnieniem – możliwość nieszczelności, wycieków oleju i nagrzewania się elementów systemu;
- praca z urządzeniami elektrycznymi pod napięciem – ryzyko iskrzenia, zwarcie, przegrzewania się instalacji;
- wiercenie otworów i kotwienie przy znacznych obciążeniach – prowadzi do wzrostu temperatury w rejonie pracy głowicy wierzącej;
- tankowanie paliwa lub obsługa elementów układu zasilania w warunkach ograniczonej wentylacji – możliwość emisji łatwo palnych oparów;
- parkowanie maszyny w miejscach niewystarczająco zabezpieczonych przeciwpożarowo – brak stałych systemów detekcji i gaszenia ognia.

Jako zdarzenie inicjujące przyjęto wystąpienie źródła wysokiej temperatury (np. iskrzenie instalacji elektrycznej, przegrzanie układu hydraulicznego, zwarcie w systemie sterowania, nieszczelność układu paliwowego) w bliskiej odległości od materiałów palnych lub samej maszyny. Może to prowadzić do zapłonu i zdarzenia o charakterze pożarowym. W toku rozwoju scenariusza zagrożenia wyróżniono takie o zdarzenia następujące:

- zapłon materiałów palnych lub pożar wozu – rozprzestrzenienie się ognia na elementy maszyny, takie jak układ hydrauliczny, kabina operatora, przewody zasilające, elementy wyposażenia technicznego;
- niemożność opanowania pożaru przy użyciu dostępnych środków gaśniczych – nieskuteczność podręcznych środków ochrony przeciwpożarowej (gaśnice proszkowe, zestawy pianowe), np. z powodu

► Tab. 1. Zbiorcze dane dotyczące identyfikacji i oceny zagrożeń na potrzeby użycia metody ETA na analizowanych górniczych stanowiskach pracy

► Table 1. Aggregate data on hazard identification and assessment for the purposes of using the ETA method at the analyzed mining workplaces

ARKUSZ IDENTYFIKACJI I OCENY ZAGROŻEŃ NA STANOWISKACH PRACY																	
Lp.	Nazwa zagrożenia	Występowanie		Opis			Częstotliwość występowania						Rodzaj urazu				Profilaktyka
	Wskazanie występowania czynnika w środowisku pracy powodującego zagrożenie	NIE	TAK	Określenie okoliczności zagrożenia			Określenie częstotliwości aktywizacji zagrożenia (jak często pracownik ma kontakt z potencjalnym zagrożeniem, jak często jest narażony)						Określenie udziału procentowego rodzajów urazu (W ₁ + W ₂ + W ₃ + W ₄ = 100%)				Określenie podjętych działań (możliwych do stosowania)
		(0 lub 1)		(0 lub 1)			(0 lub 1)						(w %)				
Operator samojedznej maszyny wierząco-kotwiącej – kopalnia podziemna																	
1.	Pożar/otwarty ogień	0	1	stosowane maszyny i urządzenia	materiały łatwo palne	gazy palne	raz na dzień	raz na tydzień	raz na miesiąc	raz na rok	raz na 10 lat	rzadziej	niezdolność do pracy do 33 dni	niezdolność do pracy powyżej 33 dni	inwalidztwo/choroba zawodowa	śmierć	pomiar środków; plan ratownictwa; instalacje gaśnicze; ochrona dróg oddechowych
Operator ładowarki – kopalnia odkrywkowa																	
2.	Używanie materiałów wybuchowych	0	1	transport MW	roboty strzałowe	niewypał	raz na dzień	raz na tydzień	raz na miesiąc	raz na rok	raz na 10 lat	rzadziej	niezdolność do pracy do 33 dni	niezdolność do pracy powyżej 33 dni	inwalidztwo/choroba zawodowa	śmierć	poprawne wykonywanie robót strzał.; przestrzeganie instrukcji dotyczących transportu, przechowywania i używania MW

- ograniczonego dostępu do źródła ognia lub szybkości jego rozprzestrzeniania się;
- brak możliwości bezpiecznego wycofania się operatora z rejonu zagrożenia – wynikający z zadymienia, wysokiej temperatury, odcięcia dróg ewakuacyjnych lub awarii systemu komunikacji i alarmowania.
- W celu minimalizacji ryzyka operator zobowiązany jest do:
- codziennej kontroli stanu technicznego układów elektrycznych i hydraulicznych,
 - użytkowania maszyny zgodnie z instrukcją eksploatacji oraz procedurami bhp,
 - znajomości lokalizacji i sposobu użycia podręcznych środków gaśniczych,
 - utrzymywania czystości w obrębie maszyny (usuwanie nagromadzonych olejów, smarów, odpadów),
 - bezwzględnego przestrzegania zakazu palenia tytoniu oraz stosowania otwartego ognia w rejonach zagrożonych.

Rys. 2 ilustruje przebieg scenariusza zagrożenia pożarowego wraz z wartościami liczbowymi przyjętymi w drzewie.

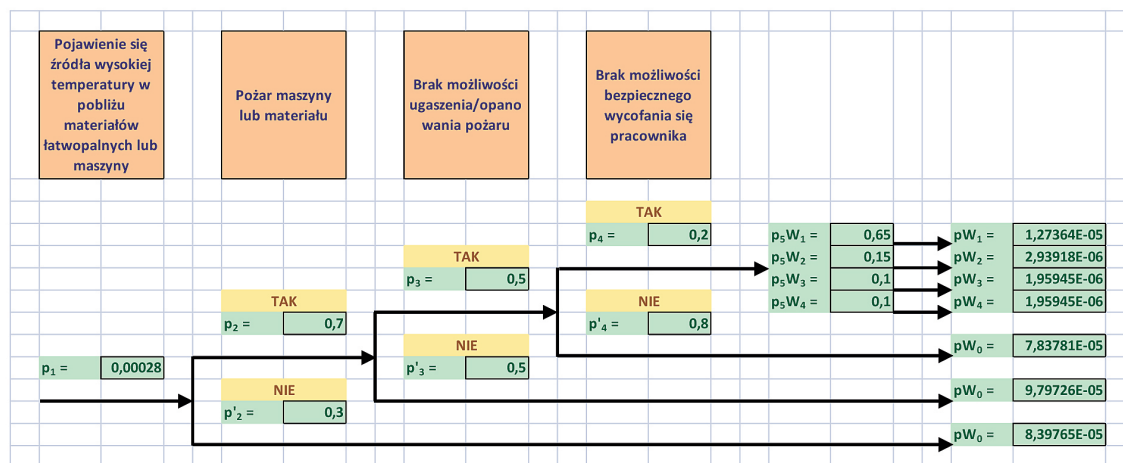
Przewidywany rozkład szacowanego ryzyka wystąpienia rozmiaru szkody na zdrowiu pracownika przy realizacji scenariusza „pożar egzogeniczny” przedstawia rys. 3.

Analiza rozpatrywanego scenariusza zagrożenia oraz uzyskany rozkład szacowanego ryzyka wskazują, że najwyższe prawdopodobieństwo przypisane jest wystąpieniu skutku w postaci krótkotrwałej niezdolności do pracy (W1). Pozostałe skutki zdrowotne, tj. długotrwała niezdolność do pracy (W2), trwałe inwalidztwo (W3) i zgon (W4), odznaczają się istotnie niższym i względnie zbliżonym poziomem ryzyka.

4.2. Zagrożenie związane z MW – operator ładowarki w kopalni odkrywkowej

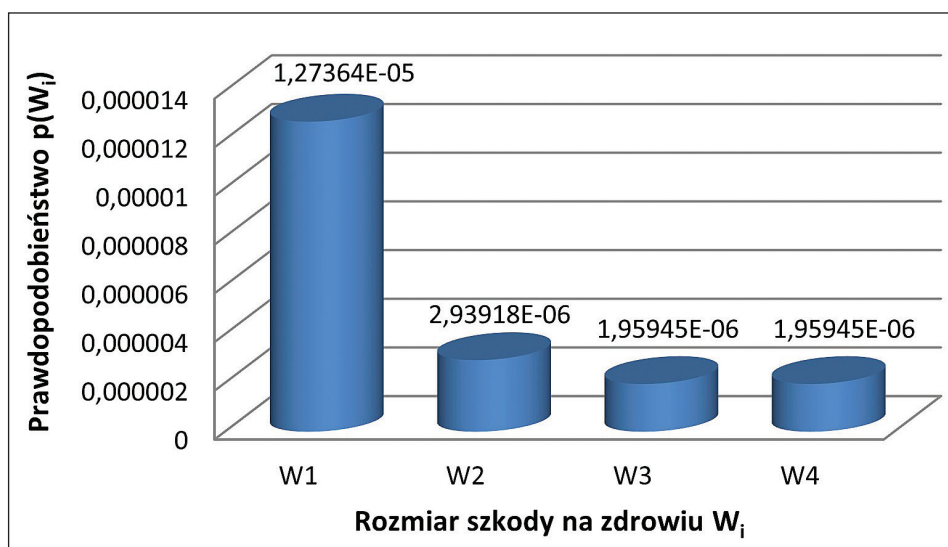
W ramach analizy metodą drzewa zdarzeń dotyczącej identyfikacji i oceny ryzyka zawodowego dla

stanowiska operatora ładowarki kołowej w górnictwie odkrywkowym jednym z istotnych zagrożeń jest to związane z obecnością materiałów wybuchowych w miejscu pracy. Zagrożenie to jest szczególnie istotne w kontekście możliwości występowania niewypałów – pozostałości materiałów wybuchowych, które nie uległy detonacji podczas prowadzonych wcześniej eksploatacyjnych robót strzałowych. Czynnikiem ten stanowi potencjalne źródło wypadków ciężkich lub śmiertelnych ze względu na możliwość niespodziewanej eksplozji ładunku w momencie kontaktu z elementami roboczymi ładowarki. W warunkach wyrobisk odkrywkowych operator wykonuje czynności załadunku skał z przodków, hałd lub zwalów, które mogą zawierać niewidoczne dla oka pozostałości ładunków strzałowych. Szczególnie narażone na to ryzyko są stanowiska pracy, gdzie nie wdrożono skutecznych procedur oczyszczania przodków po odstrzałach lub gdzie występują zakłócenia w komunikacji pomiędzy służbami strzałowymi a brygadą maszynową.



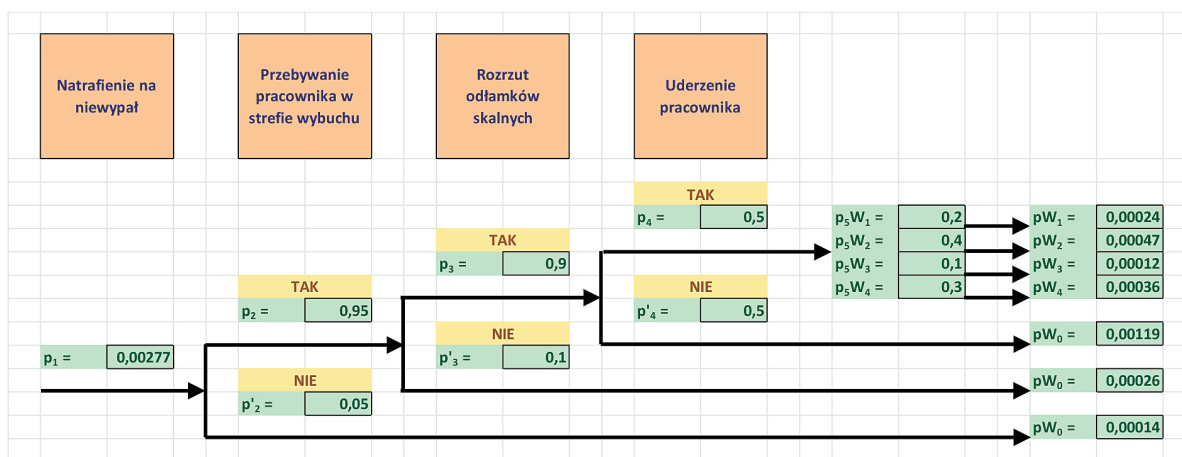
► Rys. 2. Drzewo zdarzeń dla zagrożenia „pożar egzogeniczny” – operator wozu wierząco-kotwiącego

► Fig. 2. Event tree for the hazard “exogenous fire” – drilling and bolting machine operator



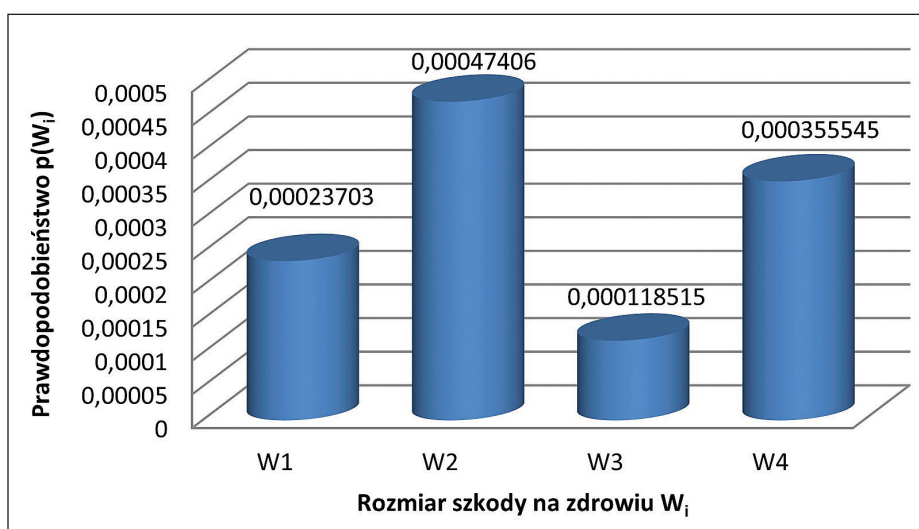
► Rys. 3. Przewidywany rozkład szacowanego ryzyka wystąpienia rozmiaru szkody na zdrowiu pracownika przy realizacji scenariusza „pożar egzogeniczny” – operator wozu wierząco-kotwiącego

► Fig. 3. Predicted distribution of the estimated risk of damage to employee health in the “exogenous fire” scenario – drilling and bolting machine operator



► Rys. 4. Drzewo zdarzeń dla zagrożenia „używanie materiałów wybuchowych” – operator ładowarki

► Fig. 4. Event tree for the hazard “use of explosives” – loading machine operator



► Rys. 5. Przewidywany rozkład szacowanego ryzyka wystąpienia rozmiaru szkody na zdrowiu pracownika przy realizacji scenariusza „używanie materiałów wybuchowych” – operator ładowarki

► Fig. 5. Predicted distribution of the estimated risk of damage to employee health in the “use of explosives” scenario – loading machine operator

W praktyce czynności zawodowe operatora ładowarki, które zwiększają ryzyko wystąpienia opisanego scenariusza, obejmują przede wszystkim:

- załadunek urobku z przodków bez wcześniejszego, potwierdzonego protokołem oczyszczenia z niewypałów przez służby strzałowe;
- przemieszczanie się po rejonach objętych wcześniejszymi robotami strzałowymi bez stosownego oznakowania stref niebezpiecznych;
- niestosowanie się do procedur wyznaczania czasów i stref bezpiecznego powrotu po strzelaniu (tzw. „czas wyczekiwania”);
- prace w warunkach ograniczonej widoczności, w tym przy znacznym zapyleniu, mgłach pyłowych lub w godzinach zmniejszonej widoczności diennej.

Zdarzeniem inicjującym rozwój scenariusza zagrożenia jest natrafienie przez łyżkę ładowarki lub inny element roboczy maszyny na niewypał. Może

ono nastąpić zarówno w trakcie załadunku urobku, jak i podczas profilowania skarp czy przemieszczania masy skalnej w rejonie świeżo odstrzelonym. Wskutek mechanicznego uszkodzenia niewypału może dojść do jego niekontrolowanej detonacji. W dalszej sekwencji zdarzeń wyróżnia się trzy główne następstwa:

- przebywanie pracownika w strefie wybuchu – operator znajduje się w kabinie maszyny bezpośrednio nad miejscem detonacji lub w jego pobliżu. Pomimo stosowania konstrukcji ochronnych (np. kabiny) siła wybuchu może doprowadzić do uszkodzeń strukturalnych maszyny lub przedostania się odłamków do wnętrza kabiny;
- ruch mas skalnych – gwałtowne rozprężenie gazów powybuchowych powoduje przemieszczenie urobku, jego wtórne rozkruszenie i rozrzut materiału skalnego w niekontrolowanych kierunkach, co może stanowić bezpośrednie zagrożenie dla operatora i innych pracowników w rejonie;

- uderzenie pracownika – może nastąpić w wyniku działania fali uderzeniowej, uderzenia odłamkiem skały lub uszkodzonym fragmentem maszyny, a także przez przewrócenie się ładowarki, jeśli doszło do detonacji pod jej konstrukcją nośną.

Należy również podkreślić, że zagrożenie to jest często trudne do wykrycia bezpośrednio przez operatora, gdyż nie ma on możliwości oceny składu skały załadowywanej do łyżki maszyny, co jeszcze bardziej uwypukla znaczenie działań profilaktycznych na poziomie organizacyjnym i systemowym.

Przebieg omawianego scenariusza wraz z wartościami liczbowymi obrazuje rys. 4, a przewidywany rozkład szacowanego ryzyka szkody na zdrowiu pracownika, wynikającego z wystąpienia scenariusza „używanie materiałów wybuchowych”, rys. 5.

Z przeprowadzonej analizy scenariusza zagrożenia oraz oszacowanego rozkładu ryzyka wynika, że najbardziej prawdopodobną konsekwencją dla zdrowia pracownika jest długotrwała niezdolność do pracy (W2). W dalszej kolejności, z mniejszym prawdopodobieństwem wystąpienia, klasyfikują się: zgon pracownika (W4), krótkotrwała niezdolność do pracy (W1) oraz trwałe inwalidztwo (W3).

5. Podsumowanie

W niniejszym artykule przedstawiono zastosowanie metody ETA (Event Tree Analysis) jako narzędzia oceny ryzyka zawodowego w zakładach górniczych. Omówiono sposób budowy scenariuszy zdarzeń inicjujących, analizę skuteczności barier technicznych i organizacyjnych oraz możliwości ilościowego szacowania ryzyka. Szczególną uwagę poświęcono przydatności tej metody w kontekście zagrożeń, takich jak pożary czy obecność niewypałów, występujących na stanowiskach operatorów zarówno w górnictwie podziemnym, jak i odkrywkowym. Scenariusze zagrożeń tworzone metodą drzewa zdarzeń stwarzają potencjał w postaci:

- przebiegu analizowanych zagrożeń jako sekwencji zdarzeń niepożądanych,
- uzyskania wyników ilościowych ryzyka szkody na zdrowiu,

- wskazania możliwych środków ochronnych,
- wspomagania procesu identyfikacji przyczyn i badania okoliczności wypadków przy pracy [15].

Zaletą ETA jest jej zdolność do jasnej i przejrzystej wizualizacji możliwych scenariuszy rozwoju zagrożeń, co ułatwia identyfikację luk w systemach bezpieczeństwa oraz podejmowanie świadomych decyzji prewencyjnych. Dzięki strukturze umożliwiającej analizę różnych wariantów działania i zaniechania barier ochronnych ETA pozwala na uwzględnienie złożonych interakcji między zdarzeniami. Może być skutecznie stosowana zarówno w ocenie ryzyka operacyjnego (bieżącego), jak i na etapie projektowania nowych rozwiązań technologicznych czy organizacyjnych. Ponadto wyniki analizy można wykorzystywać do doskonalenia procedur, planowania działań awaryjnych i wspomagania szkoleń z zakresu bezpieczeństwa.

Metoda ta nie jest pozbawiona ograniczeń. Jej efektywność zależy w dużej mierze od jakości danych wejściowych – zarówno w zakresie prawdopodobieństw zdarzeń, jak i oszacowań potencjalnych skutków. Dodatkowo liczba możliwych scenariuszy wzrasta wraz z liczbą analizowanych barier, co może prowadzić do nadmiernej złożoności oraz utrudniać interpretację wyników. Należy również podkreślić, że ETA skupia się wyłącznie na skutkach zdarzeń inicjujących, bez analizy ich przyczyn źródłowych. Zastosowanie tej metody wymaga także specjalistycznej wiedzy oraz doświadczenia, a sam proces bywa czasochłonny, zwłaszcza w środowiskach o wysokiej zmienności operacyjnej.

Podsumowując, analiza drzewa zdarzeń stanowi użyteczne i elastyczne narzędzie w zarządzaniu bezpieczeństwem pracy w górnictwie, umożliwiające ilościowe i scenariuszowe podejście do oceny ryzyka zawodowego. Skuteczne wdrożenie tej metody wymaga jednak odpowiedniego przygotowania analitycznego oraz – w wielu przypadkach – wsparcia innymi metodami identyfikacji i analizy zagrożeń, takimi jak FTA czy HAZOP. Tylko takie podejście może zapewnić pełne i wiarygodne odwzorowanie rzeczywistego poziomu ryzyka w skomplikowanych systemach techniczno-organizacyjnych, jakimi są współczesne zakłady górnicze.

Abstract: The article presents the application of the event tree analysis (ETA) method as an advanced tool supporting the processes of analysis, forecasting, and assessment of occupational hazards in the context of systematic occupational safety management. The ETA method, based on the logical structure of events and their possible consequences, enables the identification of critical points in the work environment, including potential human errors, technical failures, organizational shortcomings, and the impact of adverse environmental factors. Attention was drawn to the interdisciplinary possibilities of using this method – from the identification and assessment of occupational risks, through the rational selection of protective measures, to support in accident investigations and the design of effective prevention strategies. The practical application of the event tree method is presented using the example of an analysis of two mining workstations: a drilling and anchoring machine operator in an underground mine, where a fire hazard was identified due to the presence of flammable materials, and a wheel loader operator in open-pit mining, exposed to contact with unexploded ordnance. In both cases, an important issue in the construction of scenarios was the collection of relevant data in the form of: the circumstances of each identified hazard, the frequency of activation of the hazard, the types of injuries in the event of a hazard, and the preventive measures used to date. It has been shown that ETA can be an effective tool for reducing risk and improving occupational safety in mining companies.

Literatura

1. Korzeniowski W., Nowak-Senderowska D., Algorytm oceny zagrożeń zawodowych na górnictwym stanowisku pracy. „Rudy i Metale Nieżelazne Recykling”, r. 59, nr 10, 2014, s. 481–488.
2. Przybyła H., Korban Z., Wybrane aspekty wykorzystania metod badań operacyjnych w procesie szacowania ryzyka zawodowego. „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Górnictwo”, z. 270, 2005, s. 307–316.
3. Findeisen W., Analiza systemowa – podstawy i metodologia. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1985.
4. Hebda A., Nowak D., Stryczek Z., Gonet R., Ilościowe metody szacowania ryzyka szkody na zdrowiu w górnictwie. „Przegląd Górniczy”, t. 65, nr 3–4, 2009, s. 62–73.
5. Wolanin J., Ocena ryzyka pożarowego. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej Scenariusze Pożarowe a Inżynieria Bezpieczeństwa Pożarowego, Zakopane 2006, s. 7–15.
6. Tuncel A.L., Akyuz E., Arslan Ö., An extended event tree risk analysis under fuzzy logic environment: The case of fire in ship engine room. „Journal of ETA Maritime Science”, 9 (3), 2021, s. 210–220.
7. Alam M.S., Sadiq R., Application of Event Tree Analysis in Wild-Fire Risk Assessment for the City of Kelowna. „International Journal of Fire Science and Engineering”, 27 (3), 2013, s. 1–13.
8. Korhonen T., Hietaniemi J., Baroudi D., Kokkala M., Time-dependent event-tree method for fire risk analysis: Tentative results. „Fire Safety Science”, 7, 2003, s. 321–332.
9. Abdelghany M., Ahmad W., Tahar S., Nethula S., ETMA: A new software for event tree analysis with application to power protection. Electrical Engineering and Systems Science, arXiv preprint arXiv:2006.12383, 2020.
10. Marhavi P.K., Koulouriotis D.E., Mitakas C., Fault- and event-tree techniques in occupational health-safety systems – Part I: Integrated risk-evaluation scheme. „Environmental Engineering and Management Journal”, 13 (8), 2014, s. 2097–2108.
11. Pszczotowski T., Mała encyklopedia prakseologii i teorii organizacji. Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław 1978.
12. Mareş R.E., Nagy M., Radu I.R., Using the event tree analysis in the investigation of a work accident. MATEC Web of Conferences, volume 305. SESAM 2019 Symposium, 2020.
13. Sajkiewicz A., Harmonizacja pracy: czynniki społeczne, ekonomiczne i organizacyjne, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1986.
14. PN-N-18002:2011 Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy – Ogólne wytyczne do oceny ryzyka zawodowego. PKN, Warszawa.
15. Burtan Z., Schmidt-Polończyk N., Nowak-Senderowska D., Wykorzystanie modelu drzewa zdarzeń do tworzenia scenariuszy zagrożeń w górnictwie. „Inżynieria Mineralna”, r. 18, nr 2 (40), 2017, s. 163–170.