



**POLITECHNIKA  
RZESZOWSKA**  
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

---

# ROZPRAWA DOKTORSKA

---

mgr inż. Jakub Żywiec

---

## METODA OCENY NIEZAWODNOŚCI OPERATORA W SYSTEMIE ZBIOROWEGO ZAOPATRZENIA W WODĘ

---

**Promotor:** prof. dr hab. inż. Barbara Tchórzewska - Cieślak

**Promotor pomocniczy:** dr inż. Dawid Szpak

Rzeszów 2022

---



**WYDZIAŁ  
BUDOWNICTWA,  
INŻYNIERII ŚRODOWISKA  
I ARCHITEKTURY**  
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ



\*\*\*\*\*

Składam serdeczne podziękowania mojemu opiekunowi naukowemu  
Pani prof. dr hab. inż. Barbarze Tchórzewskiej - Cieślak,  
za okazaną pomoc i wsparcie, a także cały poświęcony czas.

Pragnę podziękować też wszystkim pracownikom  
Katedry Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków,  
za życzliwość, która spotykała mnie na każdym kroku i okazaną pomoc.

\*\*\*\*\*



## Spis treści

1. Wprowadzenie.....	9
2. Sformułowanie problemu.....	11
3. Cel, zakres, tezy pracy.....	13
3.1. Cel pracy.....	13
3.2. Zakres pracy.....	13
3.3. Tezy pracy.....	14
3.4. Ogólna charakterystyka proponowanych rozwiązań.....	15
4. Definicje.....	16
5. Przegląd stanu wiedzy na temat badań niezawodności operatora systemów technicznych.....	19
6. Analiza roli operatora w funkcjonowaniu systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę.....	23
6.1. Zadania operatora w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę.....	23
6.2. Rodzaje błędów operatora.....	31
6.3. Przyczyny błędów operatora.....	33
7. Przegląd metod stosowanych do oceny niezawodności operatora systemów technicznych.....	34
7.1. Podział metod oceny niezawodności operatora.....	35
7.2. Metody ilościowe w ocenie niezawodności operatora.....	36
7.3. Metody jakościowe w ocenie niezawodności operatora.....	37
7.4. Metody mieszane w ocenie niezawodności operatora.....	38
8. Metodyka badań.....	40
8.1. Opis obiektu badań.....	41
8.2. Charakterystyka przeprowadzonych badań.....	42
8.3. Matematyczne podstawy teoretyczne.....	44
8.3.1. Liczby rozmyte.....	44
8.3.2. Twierdzenie Bayesa i sieci bayesowskie.....	47
8.4. Metoda wielokryterialnego wspomaganie decyzji Fuzzy Simple Additive Weighting (FSAW).....	51
8.4.1. Charakterystyka metody wielokryterialnego wspomaganie decyzji Fuzzy Simple Additive Weighting (FSAW).....	51
8.4.2. Metoda oceny wpływu zdarzeń awaryjnych z udziałem operatora na niezawodność systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę.....	53
8.5. Metoda analizy niezawodności operatora Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM).....	55
8.5.1. Charakterystyka konwencjonalnej metody Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM).....	55
8.5.2. Metoda oceny niezawodności operatora systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę.....	61

---

8.6. Ocena niezawodności w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę z uwzględnieniem wpływu operatora.....	77
8.6.1. Podstawowe wskaźniki i struktury niezawodnościowe .....	77
8.6.2. Metoda oceny niezawodności w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę z uwzględnieniem wpływu operatora .....	81
8.7. Metoda oceny możliwości zwiększenia niezawodności operatora w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę.....	83
9. Wyniki badań.....	85
9.1. Ocena wpływu awarii związanych z działaniem operatora na niezawodność systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę.....	85
9.2. Ocena niezawodności operatora w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę .....	87
9.2.1. Ocena niezawodności operatora w podsystemie ujmowania wody .....	87
9.2.2. Ocena niezawodności operatora w podsystemie uzdatniania wody.....	91
9.2.3. Ocena niezawodności operatora w podsystemie pompowania wody .....	107
9.2.4. Ocena niezawodności operatora w podsystemie magazynowania wody .....	110
9.2.5. Porównanie wyników badań niezawodności operatora w podsystemach systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę .....	113
9.3. Charakterystyka niezawodności operatora SZZW z uwzględnieniem czynników socjodemograficznych .....	117
9.4. Ocena niezawodności w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę z uwzględnieniem wpływu działania operatora .....	133
9.5. Ocena możliwości zwiększenia niezawodności operatora w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę.....	146
10. Podsumowanie, wnioski i kierunki dalszych badań.....	150
10.1. Podsumowanie .....	151
10.2. Wnioski.....	152
10.3. Kierunki dalszych badań.....	153
Literatura.....	155
Spis rysunków.....	162
Spis tabel.....	165
Załączniki.....	167
Streszczenie.....	183
Abstract.....	185

## Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

$B_0$  – wartość wyostrzona liczby rozmytej,

$F St(A_i)$  – funkcja agregacyjna dla wariantów decyzyjnych,

$H$  – parametr testowy w teście Kruskala-Wallisa,

$K_g$  – wskaźnik gotowości,

$P(A)$  – prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia A („*a priori*”),

$P(B)$  – prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia B („*a priori*”),

$P(A|B)$  – prawdopodobieństwo warunkowe zajścia zdarzenia A pod warunkiem zajścia zdarzenia B („*a posteriori*”),

$p$  – prawdopodobieństwo testowe,

$\Sigma P$  – suma punktów dla oceny możliwości zwiększenia niezawodności operatora,

$\alpha$  – poziom istotności,

$\mu_A(x)$  – funkcja przynależności zmiennej  $x$  do zbioru rozmytego  $A$ ,

$\mu_{SR}(x)$  – funkcja przynależności zmiennej  $x$  do zbioru rozmytego określającego strategiczny tryb kontroli,

$\mu_{TT}(x)$  – funkcja przynależności zmiennej  $x$  do zbioru rozmytego określającego taktyczny tryb kontroli,

$\mu_{ST}(x)$  – funkcja przynależności zmiennej  $x$  do zbioru rozmytego określającego sytuacyjny tryb kontroli,

$\mu_{CH}(x)$  – funkcja przynależności zmiennej  $x$  do zbioru rozmytego określającego chaotyczny tryb kontroli,

**COG** – metoda środka ciężkości do defuzyfikacji liczb rozmytych (*ang. COG – Center of Gravity*),

**CPC** – powszechne warunki działania (*ang. Common Performance Conditions*),

**CREAM** – metoda analizy niezawodności i błędów operatora (*ang. Cognitive Reliability and Error Analysis Method*),

**FSAW** – rozmyta wagowa metoda wielokryterialnego wspomaganie decyzji (*ang. Fuzzy Simple Additive Weighting*),

**GEP** – nominalne wartości prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora (*ang. General Error Probability*),

**GIS** – system informacji geograficznej (*ang. Geographical Information System*),

**HEART** – technika oceny i redukcji błędów operatora (*ang. Human Error Assessment and Reduction Technique*),

**HEP** – prawdopodobieństwo błędu operatora (*ang. Human Error Probability*),

**HRA** – ocena niezawodności operatora (*ang. Human Reliability Assesment*),

**OTK** – wartość wyostrzona wyniku z rozkładu prawdopodobieństwa dla trybu kontroli operatora,

**OŚ** – oczyszczalnia ścieków,

**PsDoW** – podsystem dostawy wody,

**PsDyW** – podsystem dystrybucji wody,

**PSF** – czynniki kształtujące działanie (*ang. Performance Shaping Factors*),

**PsMaW** – podsystem magazynowania wody,

**PsPoW** – podsystem pompowania wody,

**PsUjW** – podsystem ujmowania wody,

**PsUzW** – podsystem uzdatniania wody,

**PsUzW-UW** – podsystem uzdatniania wody – proces utlenianie wstępne,

**PsUzW-N** – podsystem uzdatniania wody – proces napowietrzanie,

**PsUzW-K** – podsystem uzdatniania wody – proces koagulacja,

**PsUzW-F** – podsystem uzdatniania wody – proces filtracja,

**PsUzW-D** – podsystem uzdatniania wody – proces dezynfekcja,

**SAW** – metoda wagowa wielokryterialnego wspomaganie decyzji (*ang. Simple Additive Weighting*),

**SCADA** – system informatyczny nadzorujący przebieg procesów technologicznych (*ang. Supervisory Control And Data Acquisition*),

**SHERPA** – symulator analizy prawdopodobieństwa błędu operatora (*ang. Simulator for Human Error Probability Analysis*),

**SPAR-H** – metoda uproszczonej analizy ryzyka i oceny niezawodności operatora (*ang. Simplified Plant Analysis Risk Human Reliability Assesment*),

**SZZW** – system zbiorowego zaopatrzenia w wodę,

**TESEO** – empiryczna technika szacowania błędów operatora (*wł. Tecnica Empirica Stima Errori Operatori*),

**THERP** – technika predykcji wskaźnika błędu ludzkiego (*ang. Technique for Human Error Rate Prediction*),

**TPW** – tablica prawdopodobieństw warunkowych,

**ZUW** – zakład uzdatniania wody.



## 1. Wprowadzenie

Jednym z aktualnych problemów w sektorze zaopatrzenia w wodę jest utrzymanie niezawodności i bezpieczeństwa dostaw wody do konsumentów na wymaganym poziomie [89, 104]. Stale pojawiają się nowe zagrożenia dla funkcjonowania systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę (SZZW) związane z postępującymi zmianami klimatu, występowaniem ekstremalnych zjawisk pogodowych, ograniczeniem zasobów wody słodkiej, cyberterroryzmem, groźbami konfliktów zbrojnych, w tym tzw. wojny o wodę czy też nowymi źródłami zanieczyszczenia wody (np. mikroplastik, farmaceutyki, pestycydy) [89, 104, 114]. Problem ten został zauważony na arenie międzynarodowej, będąc podstawą do wprowadzania regulacji prawnych na poziomie międzynarodowym, jak i europejskim oraz krajowym [134, 135, 143]. W Polsce przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne działają na podstawie Ustawy z dnia 7 czerwca 2001 r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków z późniejszymi zmianami [135]. Wg jej zapisów, za eksploatację SZZW jest odpowiedzialne przedsiębiorstwo wodociągowo-kanalizacyjne, które *„ma obowiązek zapewnić zdolność posiadanych urządzeń wodociągowych i urządzeń kanalizacyjnych do realizacji dostaw wody w wymaganej ilości i pod odpowiednim ciśnieniem oraz dostaw wody i odprowadzania ścieków w sposób ciągły i niezawodny, a także zapewnić należyłą jakość dostarczanej wody i odprowadzanych ścieków”*. Parametry jakości fizykochemicznej oraz mikrobiologicznej wody określa Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi [137], które definiuje, że *„woda jest zdatna do użycia, jeżeli jest wolna od mikroorganizmów chorobotwórczych i pasożytów w liczbie stanowiącej potencjalne zagrożenie dla zdrowia ludzkiego, wszelkich substancji w stężeniach stanowiących potencjalne zagrożenie dla zdrowia ludzkiego oraz nie wykazuje agresywnych właściwości korozyjnych”*.

Rezolucja ONZ A/RES/64/292 z dnia 28 lipca 2010 [143] wskazuje, że *„prawo do bezpiecznej i zdatnej do picia wody i korzystania z urządzeń sanitarnych jest prawem niezbędnym do zapewnienia korzystania w pełni z życia i praw człowieka”*. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/2184 z dnia 16 grudnia 2020 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi [134] kładzie nacisk na bezpieczeństwo dostaw wody, wprowadzając podejście do zagrożeń oparte na ryzyku. Obejmuje ono działania mające na celu ocenę i zarządzanie ryzykiem, w całym łańcuchu dostaw wody, zaczynając od obszarów zasilania ujęć wody, poprzez pobór, uzdatnianie, magazynowanie i dystrybucję wody, kończąc na instalacjach wewnętrznych. Podejście

oparte na prewencji zagrożeń zostało wprowadzone przez WHO (ang. World Health Organization) w 1999 roku i od tego czasu rozwijane jest w formie wytycznych [138] i narzędzi mających na celu zagwarantowanie bezpieczeństwa konsumentów wody [142].

System zbiorowego zaopatrzenia w wodę jest rozległym i złożonym systemem technicznym sterowanym przez człowieka. Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym z późniejszymi zmianami [136] zalicza systemy zaopatrzenia w wodę do infrastruktury krytycznej, obok innych systemów kluczowych dla funkcjonowania Państwa m.in. systemów zaopatrzenia w energię, surowce energetyczne i paliwa, systemów łączności, sieci teleinformatycznych, systemów finansowych, systemów zaopatrzenia w żywność, systemów ratownicze, systemów ochrony zdrowia. W Ustawie określono zasady opracowania planów zarządzania kryzysowego, celem zapobiegania sytuacjom kryzysowym, reagowania na nie oraz usuwania ich skutków, mając na uwadze bezpieczeństwo społeczeństwa. Określenie ścisłej zależności pomiędzy zdarzeniami, zjawiskami lub działaniami podejmowanymi w określonych warunkach pracy SZZW jest bardzo trudne, lub wręcz niemożliwe. Wpływa na to głównie losowość występujących zdarzeń niepożądanych oraz trudne do przewidzenia zachowanie człowieka – operatora systemu zaopatrzenia w wodę. Bardzo często występujące awarie są wynikiem kombinacji czynników ludzkich, technicznych i środowiskowych. Wdrażane podejście oparte na ocenie ryzyka zagrożeń w państwach członkowskich UE [134] ma na celu redukcję zdarzeń niepożądanych w SZZW. Przez zarządzanie ryzykiem rozumie się systematyczne działania mające na celu analizę, ocenę, kontrolę i monitorowanie ryzyka [114]. Punktem wyjścia jest tutaj identyfikacja zagrożeń i sytuacji niebezpiecznych. Praca dotyczy oceny niezawodności operatora w SZZW i jego wpływu na niezawodność i bezpieczeństwo SZZW. Nowe podejście zaproponowane w pracy pozwala na wyznaczenie prawdopodobieństwa zdarzeń rzadkich związanych z pracą operatora. Uzyskane wyniki powinny zostać uwzględnione w procesie zarządzania ryzykiem.

Reasumując ciągła poprawa niezawodności i bezpieczeństwa funkcjonowania SZZW jest jednym z podstawowych wymagań stawianych aktualnie branży wodociągowo-kanalizacyjnej co wynika z przepisów krajowych, europejskich i międzynarodowych. Pojawienie się wcześniej nieznanymi zagrożeń wymaga opracowania nowych i rozwijania istniejących metod badań nad niezawodnością i bezpieczeństwem funkcjonowania SZZW, w szczególności uwzględniających wpływ czynnika ludzkiego.

## 2. Sformułowanie problemu

System zbiorowego zaopatrzenia w wodę jest przykładem systemu antropotechnicznego, czyli układu człowiek – obiekt techniczny – otoczenie [83, 91, 101]. Liczne publikacje naukowe wskazują na duży związek między działaniem człowieka i funkcjonowaniem systemów technicznych. Dane dostępne w literaturze wskazują, że czynnik ludzki miał wpływ na powstanie ponad 90% wypadków w przemyśle nuklearnym, ponad 80% wypadków w przemyśle chemicznym i paliwowym, ponad 75% wypadków morskich, ponad 70% wypadków lotniczych oraz ponad 75% awarii w systemach zbiorowego zaopatrzenia w wodę [35, 50, 95, 96, 106, 126]. Wpływ czynnika ludzkiego na funkcjonowanie systemu technicznego może mieć charakter wewnętrzny, obejmując działania autoryzowane (kadry pracowniczej), lub charakter zewnętrzny w odniesieniu do aktów wandalizmu, terroryzmu lub nieprawidłowego jego użytkowania (działanie osób trzecich) [83]. Człowiek w układzie antropotechnicznym może okazać się tzw. najsłabszym ogniwiem.

W ramach zwiększania poziomu niezawodności i bezpieczeństwa funkcjonowania SZZW właściwą wydaje się automatyzacja procesów produkcji i dystrybucji wody. Jak zapewniają producenci takich rozwiązań dla branży wodociągowej, zastosowanie automatycznych systemów monitoringu i sterowania zwiększa niezawodność dostaw wody oraz efektywność procesów technologicznych [145]. Działanie to wychodzi również naprzeciwko nowym zagrożeniom dla sektora gospodarki wodno-ściekowej. Zagrożenia związane z postępującymi zmianami klimatu, zwiększeniem się częstotliwości ekstremalnych zjawisk pogodowych powodują, że dostęp do zasobów wody zdanej do spożycia staje się ograniczony. W przyszłości pełna automatyzacja zarządzania zaopatrzeniem w wodę ma na celu w sposób zrównoważony wykorzystanie globalnych zasobów wody [145]. Proces ten przebiegał będzie przy wykorzystaniu nowoczesnych narzędzi opartych o wykorzystanie sztucznej inteligencji, sieci neuronowych, uczenia maszynowego, algorytmów genetycznych, sieci Bayesa czy logiki rozmytej [13, 60, 105, 117]. Należy jednak postawić pytanie, **czy całkowite wyeliminowanie człowieka z procesu zaopatrzenia w wodę jest działaniem właściwym?**

W opinii autora całkowite wyeliminowanie czynnika ludzkiego w obrębie procesów eksploatacyjnych w SZZW niesie ze sobą spore ryzyko. Systemy automatyczne mimo stosowania szeregu zabezpieczeń mogą cechować się wrażliwością na zdarzenia niepożądane np. blackout energetyczny, cyberterrorizm, których skutki mogą być

katastrofalne. Podczas wystąpienia sytuacji kryzysowej o nieprzewidywalnym przebiegu lub w przypadku uszkodzenia systemów automatycznych to człowiek – operator SZZW powinien mieć możliwość podejmowania decyzji eksploatacyjnych. Bazując na swoim doświadczeniu, wiedzy i znajomości specyfiki danego systemu zaopatrzenia w wodę ma szansę przywrócić go do stanu sprawności.

Ze względu na zadanie SZZW, jakim jest dostarczenie do konsumentów wody w odpowiedniej jakości i ilości, pod wymaganym ciśnieniem, w dowolnej chwili czasu i po akceptowalnej cenie, wpływ czynnika ludzkiego w ocenie niezawodności SZZW nie może zostać pominięty [90, 114]. Problem ten zrodził konieczność opracowania metody oceny niezawodności operatora SZZW, która może być powszechnie stosowana przez przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne, co było główną motywacją do powstania niniejszej pracy. Wykorzystanie przedstawionych metod, m.in. metody FSAW, metody CREAM, teorii zbiorów rozmytych oraz sieci Bayesa, pozwoli na lepsze poznanie wpływu wewnętrznego czynnika ludzkiego na niezawodność SZZW. Potencjalne wdrożenie wyników pracy przez przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne przyczyni się do wzrostu poziomu niezawodności i bezpieczeństwa dostaw wody do konsumentów.

### **3. Cel, zakres, tezy pracy**

#### **3.1. Cel pracy**

Głównym celem pracy jest zbadanie wpływu wewnętrznego czynnika ludzkiego na niezawodność systemu antropotechnicznego na przykładzie działania operatora w SZZW. Wyróżniono cel poznawczy oraz cel praktyczny:

- celem poznawczym pracy jest analiza wpływu działania operatora na niezawodność SZZW, przez wyznaczenie wskaźnika gotowości operatora dla procesów eksploatacyjnych w poszczególnych podsystemach SZZW, co stanowi uzupełnienie wiedzy w zakresie badań dotyczących niezawodności i bezpieczeństwa funkcjonowania SZZW,
- celem praktycznym jest opracowanie metody oceny niezawodności operatora na potrzeby zwiększenia poziomu niezawodności i bezpieczeństwa funkcjonowania SZZW, przez uwzględnienie wpływu wewnętrznego czynnika ludzkiego w analizach niezawodnościowych dla dowolnego SZZW.

#### **3.2. Zakres pracy**

Zakres pracy obejmuje:

- przegląd stanu wiedzy na temat badań niezawodności operatora w systemach technicznych,
- charakterystykę roli operatora w SZZW, przedstawienie klasyfikacji oraz przyczyn błędów ludzkich,
- przegląd metod stosowanych do oceny niezawodności operatora systemów technicznych,
- przedstawienie metodyki badań,
- opracowanie metody oceny wpływu zdarzeń awaryjnych z udziałem operatora na niezawodność SZZW z wykorzystaniem metody wielokryterialnego wspomaganie decyzji FSAW,
- opracowanie metody oceny niezawodności operatora SZZW opartej na metodzie CREAM, teorii liczb rozmytych oraz sieciach Bayesa,
- analizę statystyczną otrzymanych wyników z uwzględnieniem wybranych czynników socjodemograficznych,
- opracowanie metody oceny niezawodności poszczególnych podsystemów SZZW z uwzględnieniem wpływu działania czynnika ludzkiego w postaci operatora systemu,

- opracowanie metody oceny możliwości zwiększenia poziomu niezawodności operatora w SZZW,
- podsumowanie i wnioski,
- proponowane kierunki dalszych badań.

Zakresem przeprowadzonych badań objęto poszczególne podsystemy SZZW (tj. podsystem ujmowania wody, podsystem uzdatniania wody, podsystem pompowania wody oraz podsystem magazynowania wody). W pracy wykorzystano dane dotyczące procesu pracy operatora, które zgromadzono w trakcie badań ankietowych przeprowadzonych na grupie pracowników przedsiębiorstw wodociągowych – operatorów. Wykorzystano również opinie zespołu ekspertów zawodowo zajmujących się tematyką bezpieczeństwa dostaw wody i niezawodnością SZZW.

Wyniki badań będą stanowiły uzupełnienie wiedzy w zakresie badań nad niezawodnością i bezpieczeństwem funkcjonowania SZZW o zagadnienia związane z niezawodnością operatora w SZZW. Wykorzystanie wyników badań przez przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne pozwoli na ograniczenie potencjalnego negatywnego wpływu wewnętrznego czynnika ludzkiego na procesy eksploatacyjne, zwiększając tym samym poziom niezawodności i bezpieczeństwa dostaw wody wodociągowej do konsumentów.

### **3.3. Tezy pracy**

W pracy postawiono następujące tezy:

- Działanie operatora SZZW ma znaczący wpływ na poziom niezawodności i bezpieczeństwa dostaw wody do konsumenta. Z tego względu analiza niezawodności SZZW powinna obejmować wpływ operatora systemu, a jej wyniki powinny stanowić podstawę dla racjonalnych decyzji eksploatacyjnych podejmowanych przez przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne.
- Zastosowanie rozmyto – bayesowskiej wersji metody CREAM (ang. Cognitive Reliability and Error Analysis Method), ze względu na niepewność pozyskanych danych oraz fakt, że SZZW jest systemem antropotechnicznym, może stanowić oryginalne uzupełnienie i poszerzenie, klasycznego, technicznego podejścia do analiz niezawodnościowych SZZW.

### 3.4. Ogólna charakterystyka proponowanych rozwiązań

W pracy przedstawiono oryginalną, jednolitą metodologię oceny niezawodności operatora w SZZW oraz opracowano nową metodę oceny niezawodności podsystemów SZZW z uwzględnieniem wpływu operatora. Do najważniejszych elementów pracy należy zaliczyć:

- opracowanie metody oceny niezawodności operatora SZZW opartą na metodzie CREAM i teorii zbiorów rozmytych oraz modelu sieci Bayesa umożliwiającą wyznaczenie prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora oraz wskaźnika gotowości operatora,
- rozszerzenie jednoparametrycznej metody oceny niezawodności ZUW opartej na schemacie niezawodnościowym obejmującym obiekty techniczne, poprzez uwzględnienie wpływu operatora na niezawodność SZZW,
- określenie wpływu czynników socjodemograficznych populacji, takich jak: wiek, wykształcenie, doświadczenie zawodowe oraz wielkość obsługiwanego SZZW na poziom niezawodności operatora SZZW,
- weryfikacja opracowanej metody poprzez zestawienie rezultatów trzech przypadków obliczeniowych (brak uwzględnienia wpływu operatora; jeden operator obsługujący dany proces; dwóch operatorów obsługujących dany proces) i oceny wpływu operatora na niezawodność ZUW,
- przedstawienie wytycznych wyboru odpowiedniej metody zwiększenia poziomu niezawodności operatora w zależności od czynników związanych z organizacją pracy, środowiskiem pracy oraz procesem pracy,
- praktyczne wykorzystanie opracowanej metody oceny niezawodności operatora SZZW w przykładowych systemach objętych badaniami, tj. 8 SZZW w tym 12 ZUW oraz 42 operatorów.





## 4. Definicje

Tematyka pracy powiązana jest z następującymi definicjami:

- **Awaria związana z działaniem operatora** – zdarzenie powodujące uszkodzenie obiektu, systemu lub podsystemu uniemożliwiające, lub ograniczające jego funkcjonowanie w pewnym przedziale czasu [12, 83, 90], będące skutkiem błędu popełnionego przez operatora.
- **Bezpieczeństwo systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę** – rozumiane jest jako zdolność systemu do ochrony jego właściwości funkcjonalnych przed zagrożeniami zewnętrznymi i wewnętrznymi tj. ochrona konsumentów przed spożyciem wody o nieodpowiedniej jakości lub brakiem dostawy wody w chwili obecnej oraz w przyszłości w wyniku eskalacji zdarzeń niepożądanych [90, 114].
- **Eksploatacja systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę** – zespół celowych działań wykonywanych przez operatora w systemie, podsystemie, na elementach, urządzeniach oraz obiektach od chwili włączenia ich do użytkowania do czasu ich likwidacji, obejmujący działania organizacyjne, techniczne i ekonomiczne [12, 83].
- **Gotowość** – zdolność obiektu do utrzymywania się w stanie umożliwiającym wypełnianie wymaganych funkcji w dawnych warunkach, w danej chwili lub przedziale czasu, przy założeniu, że dostarczone są wymagane środki zewnętrzne [100]. W odniesieniu do SZZW jest to cecha opisująca jego dyspozycyjność w dowolnej chwili czasu [114].
- **Niezawodność operatora** – prawdopodobieństwo, że operator poprawnie wykona zadania stawiane przez system w danych warunkach otoczenia, w określonym przedziale czasowym nie popełniając błędu [72, 88, 120]. Jest określona przez wskaźnik gotowości operatora [92].
- **Niezawodność systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę** – jest rozumiana jako, zdolność do realizowania zadań systemu, zgodnie z wymaganiami eksploatacyjnymi i bezpieczeństwa. Zadaniem SZZW jest dostarczenie do konsumentów wody w niezbędnej ilości, o odpowiedniej jakości, pod odpowiednim ciśnieniem oraz w akceptowalnej cenie w dowolnej chwili czasu [63, 90].
- **Obiekt** – pojęcie pierwotne, określające (w zależności od potrzeb) niepodzielny element (obiekt prosty), bądź też zbiór elementów tworzących system (obiekt złożony) [63].
- **Obiekt prosty (element)** – jest to obiekt, który umownie traktuje się jako niepodzielną całość [63].

- **Obiekt złożony (system)** – jest to zorganizowany zbiór elementów, który ma wykonywać określone zadanie [63].
- **Operator w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę** – pracownik przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjnego, którego zadaniem jest sterowanie i zarządzanie pracą systemu wodociągowego oraz poszczególnych podsystemów i procesów technologicznych, tak by utrzymać ciągłość jego działania z zachowaniem wymagań pod względem niezawodności i bezpieczeństwa jego funkcjonowania [83, 120].
- **Przedsiębiorstwo wodociągowo-kanalizacyjne** – podmiot, prowadzący działalność gospodarczą w zakresie zbiorowego zaopatrzenia w wodę lub zbiorowego odprowadzania ścieków, lub gminne jednostki organizacyjne nieposiadające osobowości prawnej, prowadzące tego rodzaju działalność [135].
- **Stan sprawności** – jest to stan niezawodnościowy obiektu, w którym obiekt wykonuje swoje zadanie [63]. W systemie antropotechnicznym odnosi się do stanu, w którym układ spełnia psychotechniczne i techniczne wymagania eksploatacyjne i bezpieczeństwa [100].
- **Stan niesprawności** – jest to stan niezawodnościowy obiektu, w którym obiekt nie wykonuje swojego zadania [63]. Można w nim wyodrębnić dwa stany cząstkowe – stan naprawy oraz stan oczekiwania na naprawę.
- **System antropotechniczny** – układ człowiek – obiekt techniczny – otoczenie, którego elementy wzajemnie na siebie oddziałują (człowiek oddziałuje na obiekt techniczny, który oddziałuje na otoczenie, które oddziałuje zwrótnie na maszynę oraz człowieka), w celu realizacji postawionego zadania [12, 100].

## 5. Przegląd stanu wiedzy na temat badań niezawodności operatora systemów technicznych

Według teorii wypadków C. Perrow'a awarie są nieuniknionym skutkiem rosnącej złożoności systemów technicznych [76]. Nie istnieją systemy w pełni niezawodne. Wśród przyczyn awarii obok przyczyn technicznych czy środowiskowych istotny jest również pośredni lub bezpośredni wpływ czynnika ludzkiego [25]. Może on oddziaływać na system już w fazie projektowania, na etapie wykonania systemu czy w końcu podczas jego eksploatacji, stwarzając warunki do powstania awarii [25]. Statystyki wskazują, że działania człowieka mają wpływ na powstanie 60 - 90% awarii w różnych systemach technicznych [25, 131]. Zjawisko to skłoniło naukowców do rozpoczęcia badań nad *niezawodnością operatora* (ang. *human reliability*) [20], w celu określenia prawdopodobieństwa prawidłowego wykonania zadania przez personel techniczny w danym przedziale czasu w dowolnym momencie działania systemu. Wprowadzono również termin *ocena niezawodności operatora* (ang. *human reliability assesment - HRA*) [37] odnoszący się ogólnie do metod oceny i modeli wykorzystywanych w celu przewidzenia wystąpienia *błędów operatora* (ang. *human error*).

Badania nad niezawodnością operatora zapoczątkowane zostały po II wojnie światowej i skupiały się one w sektorze energetyki jądrowej [22, 25]. Operator tych systemów obarczony jest dużą odpowiedzialnością za poprawne funkcjonowanie elektrowni, a skutki potencjalnego wypadku mogą być katastrofalne [103]. Celem badań było opracowanie metody oceny działania operatora systemu oraz wyznaczenie prawdopodobieństwa popełnienia przez niego błędu. Dzięki takiemu narzędziu możliwe było podjęcie działań mających na celu redukcję lub uniknięcie ryzyka związanego z błędem czynnika ludzkiego, prowadzącego do zdarzeń o katastrofalnych skutkach [103]. Pierwsze prace dotyczące niezawodności operatora zostały opublikowane w ramach badań prowadzonych przez organizację American Institute for Resercher's w latach 60-tych XX wieku. W pracy [70] przedstawiono wskaźniki prawdopodobieństwa błędu operatora (ang. *human error probability*) dla użytkowania sprzętu elektronicznego. W 1961 roku przedstawiono zintegrowaną metodę analizy niezawodności operatora THERP (ang. *Technique for Human Error Rate Prediction*) opracowaną dla US Nuclear Regulatory Commision [140].

Od samego początku panowało multidyscyplinarne podejście do tematyki oceny niezawodności operatora, które obejmowało nauki o niezawodności, ergonomii i psychologii [19, 21, 25]. Na przestrzeni ostatnich 60 lat przedstawiono ponad 70 różnych metod HRA [23, 51, 107]. W celu ich klasyfikacji zaproponowano podział na trzy

generacje [22, 23]. Pierwsza generacja HRA obejmuje lata 1960 – 1990 i przynależą do niej takie metody jak: HEART (ang. Human Error Assessment and Reduction Technique) oraz TESEO (wł. Tecnica Empirica Stima Errori Operatori) [9, 125]. Metody te skupiają się na ilościowym wyznaczeniu prawdopodobieństwa błędu operatora. Druga generacja metod HRA obejmuje lata 1990 – 2005. Metody tej generacji uwzględniają wpływ funkcji poznawczych operatora takich jak pamięć, uwaga, myślenie i postrzeganie oraz kontekstu sytuacji na niezawodność operatora. Przykładami metod tej generacji są ATHEANA (ang. A Technique for Human Event Analysis) oraz CREAM (ang. Cognitive Reliability and Error Analysis Methods) [36, 139]. Trzecia generacja HRA kształtująca się po 2005 roku skupia się na wykorzystaniu metod symulacyjnych do oceny niezawodności operatora oraz modyfikacji metod wcześniejszych generacji, np. NARA (ang. Nuclear Action Reliability Assesment), CARA (ang. Controller Action Reliability Assesment) [28, 53] oraz Bayes-SLIM (ang. Success Likelihood Index Method) [115]. Metody oceny niezawodności operatora znalazły szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach m.in. budownictwie [115], energetyce [49, 64, 103, 108, 140], górnictwie [15], lotnictwie [31, 32, 53, 66], kosmonautyce [118], medycynie [65, 73, 131], przemyśle [1, 50], transporcie morskim [2-4, 18, 96, 97, 116, 127-129, 132], transporcie lądowym [34, 43, 72] czy też zaopatrzeniu w wodę [106, 126].

Wpływ czynnika ludzkiego na funkcjonowanie SZZW nie jest do końca poznany, co znalazło odzwierciedlenie w małej liczbie prac na ten temat. Zarządzanie ryzykiem w SZZW jest ukierunkowane w głównej mierze na bezpieczeństwo dostaw wody o wymaganej jakości w oparciu o analizę stanu technicznego obiektów wodociągowych. Przyczyny awarii mogą leżeć jednak zarówno po stronie urządzeń technicznych, warunków zewnętrznych, jak i po stronie człowieka. W publikacji [126] dokonano przeglądu 62 awarii systemów wodociągowych pod kątem identyfikacji błędów ludzkich. Zaproponowano wykorzystanie modelu „sera szwajcarskiego” Reasona [94] do analizy bezpieczeństwa wody wodociągowej. Określono również rolę HRA w redukcji błędów ludzkich w obrębie zaopatrzenia w wodę i nakreślono kierunki dalszych badań m.in. rozwój baz danych błędów ludzkich w SZZW, szczegółowe badania awarii w SZZW pod kątem wpływu czynnika ludzkiego, rozwój narzędzi do analizy i zarządzania błędami ludzkimi. Praca [106] przedstawia podejście o bezpieczeństwa wody oparte na mechanizmach odporności (ang. resilience). Przebadano 40 przypadków awarii w systemach wodociągowych w celu identyfikacji wpływu czynnika ludzkiego. Zaproponowano metody zarządzania ryzykiem związanym z zanieczyszczeniem wody wodociągowej, na skutek błędów człowieka oparte na mechanizmach odpornościowych.

Tematyka HRA w naukach technicznych poruszana była na wielu cyklicznych międzynarodowych konferencjach naukowych. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć: Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM) organizowaną przez International Association for Probabilistic Safety Assessment and Management; European Safety and Reliability Conference (ESREL) – organizowaną przez European Safety and Reliability Association; Probabilistic Safety Assessment and Analysis (PSA) organizowaną przez American Nuclear Society oraz Global Congress on Process Safety organizowaną przez American Institute of Chemical Engineers (AIChE) [74].

Na szczeblu krajowym na szczególne wyróżnienie zasługuje cykl corocznych konferencji Zimowej Szkoły Niezawodności (ZSN) organizowanej przez Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej oraz Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych pod patronatem Komitetu Budowy Maszyn PAN i Komitetu Transportu PAN. Kilka edycji ZSN poświęconych było tematom związanym z wpływem czynnika ludzkiego na niezawodność systemów i obiektów technicznych tj. 8 ZSN – Niezawodność systemów człowiek – obiekt techniczny (1979); 14 ZSN – Człowiek – obiekt techniczny - otoczenie. Problemy niezawodności i utrzymania ruchu (1986); 37 ZSN – Niezawodność systemów antropotechnicznych (2009). Największy wkład w rozwój badań niezawodności układów człowiek – obiekt techniczny - otoczenie w Polsce wniósł prof. Z. Smalko, prof. J. Żurek oraz prof. J. Jaźwiński [39, 40, 99].

W Polsce badania związane z niezawodnością SZZW zostały zapoczątkowane przez prof. A. Wieczystego z Politechniki Krakowskiej oraz prof. M. Romana z Politechniki Warszawskiej na przełomie lat 80 i 90 XX wieku, a następnie kontynuowane przez zespoły prof. J. Raka i prof. B. Tchórzewskiej – Cieślak z Politechniki Rzeszowskiej, prof. M. Kwietniewskiego z Politechniki Warszawskiej, prof. K. Kusia z Politechniki Śląskiej oraz prof. E. Mielcarzewicza z Politechniki Wrocławskiej [61]. Badania związane z tą tematyką realizowane były również przez naukowców z Politechniki Białostockiej, Politechniki Lubelskiej, Politechniki Świętokrzyskiej czy Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie [61]. Opracowane prace dotyczyły całego SZZW m.in. niezawodności ujęć wody [16, 75, 122-124], niezawodności zakładów uzdatniania wody [81], niezawodności pompowni wodociągowych [6, 63], niezawodności zbiorników wodociągowych [7, 29], niezawodności infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej [38, 62] oraz w pewnym zakresie niezawodności instalacji wodociągowych [67].

W obrębie badań nad niezawodnością SZZW tematyka operatora systemu pojawiła się po raz pierwszy w 1997 r. w pracy prof. A. Wieczystego wraz z zespołem [120], gdzie

zostało zdefiniowane pojęcie *niezawodności działania człowieka jako zdolności do wykonania zadań poprawnie (z określonym marginesem błędu) i w określonym czasie w różnych sytuacjach, przy oddziaływaniu różnych czynników wynikających z jego psychiki i zdrowia fizycznego oraz w określonych warunkach pracy*, a sam system zaopatrzenia w wodę został określony jako *system biotechniczny*. Tematyka ta była kontynuowana w pracy [121]. Operator SZZW był również obiektem badań prof. J. Raka wraz z zespołem, który rozwinął problematykę ryzyka funkcjonowania operatora [82, 88], przedstawił wskaźniki niezawodności operatora [83, 92, 111], zaproponował metodę oceny niezawodności operatora opartą na drzewie zdarzeń [85] oraz zastosowanie kilku metod HRA, takich jak TESEO, THERP i HEART do oceny niezawodności operatora [87, 88, 111]. W pracy [84] określono wytyczne działania operatora SZZW, natomiast w pracy [91] przedstawiono rodzaje błędów operatora.

Nieliczne publikacje dotyczące wpływu operatora na funkcjonowanie SZZW charakteryzuje duże rozproszenie i brak propozycji kompleksowego rozwiązania analizowanego problemu. W literaturze krajowej i międzynarodowej brak jest kompleksowych badań nad niezawodnością operatora w SZZW. Przedstawione prace identyfikują wpływ czynnika ludzkiego na powstawanie awarii w SZZW i związane z tym ryzyko, natomiast proponowane metody oceny niezawodności operatora SZZW nie zostały zastosowane do przeprowadzenia badań w pełnej skali, obejmującej cały SZZW, a jedynie do oceny niezawodności operatora dla pojedynczego, wybranego scenariusza awarii. Konieczne zatem wydaje się opracowanie kompleksowej, uniwersalnej metody oceny niezawodności operatora w SZZW oraz metody oceny niezawodności SZZW uwzględniającej wpływ czynnika ludzkiego, który identyfikuje się jako przyczynę 75% powstających awarii w SZZW [25].

Na podstawie przeglądu literatury można stwierdzić, że obszar badań nad niezawodnością operatora w SZZW jest w początkowej fazie rozwoju oraz wymaga prowadzenia pogłębionych, szczegółowych badań. Podjęcie problemu badawczego pozwoli na poznanie wpływu wewnętrznego czynnika ludzkiego na niezawodność i bezpieczeństwo funkcjonowania SZZW. Jest to nowe, oryginalne podejście w ocenie niezawodności SZZW i przyczyni się do rozwoju wiedzy z tego zakresu.

## 6. Analiza roli operatora w funkcjonowaniu systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę

### 6.1. Zadania operatora w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę

Przedsiębiorstwa wodociągowo–kanalizacyjne powinny tworzyć w swoich strukturach organizacyjnych stanowiska pracy dla:

- operatora ZUW – odpowiedzialnego za zarządzanie i sterowanie pracą zakładu uzdatniania wody,
- operatora OŚ – odpowiedzialnego za zarządzanie i sterowanie pracą oczyszczalni ścieków,
- operatora centralnego – odpowiedzialnego za monitorowanie i koordynowanie działań zapewniających utrzymanie właściwego stanu infrastruktury wodociągowej oraz kanalizacyjnej.

Operator zarządzający SZZW ma za zadanie utrzymanie odpowiedniego poziomu niezawodności i bezpieczeństwa funkcjonowania systemu oraz wchodzących w jego skład, działających współzależnie podsystemów, poprzez sterowanie urządzeniami i obiektami zdalnie lub ręcznie. Na SZZW składają się następujące podsystemy: PsUjW – podsystem ujmowania wody, PsUzW – podsystem uzdatniania wody, PsPoW – podsystem pompowania wody, PsMaW – podsystem magazynowania wody, PsDyW – podsystem dystrybucji wody. Istnieje też uogólniony podział podsystemów w SZZW zakładający istnienie dwóch głównych podsystemów: PsDoW – podsystem dostawy wody oraz PsDyW – podsystem dystrybucji wody [63, 119].

Przez niezawodność SZZW rozumie się jego zdolność do realizowania przynależnych mu funkcji, zgodnie z wymaganiami pod względem funkcjonowania i bezpieczeństwa tj. dostarczenie do konsumentów wody w odpowiedniej ilości, o odpowiedniej jakości, pod odpowiednim ciśnieniem, w akceptowalnej cenie w dowolnej chwili czasu [77, 79, 90]. Przez odpowiednią ilość wody rozumie się ilość wynikającą z aktualnego zapotrzebowania na wodę konsumenta, a w przypadku zaistnienia sytuacji kryzysowej dostarczenie minimalnej ilości wody tj.  $7,5 \text{ dm}^3/\text{M}\cdot\text{d}$  [86]. Jakość dostarczanej wody nie może stwarzać zagrożenia dla życia lub zdrowia konsumentów oraz musi spełniać warunki zawarte w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi [137]. Odpowiednie ciśnienie dostarczanej wody powinno zapewnić komfort korzystania z przyborów sanitarnych oraz umożliwić użytkowanie sprzętów AGD zasilanych wodą wodociągową [90]. Cena jednostkowa

za metr sześcienny wody wodociągowej powinna utrzymywać się na poziomie akceptowalnym przez konsumentów, uwzględniając przy tym konieczne do poniesienia koszty eksploatacji zapewniające niezawodne działanie systemu [90]. Działanie operatora SZZW powinno zapewnić realizację tych warunków w dowolnej chwili czasu [90].

Obecnie podstawowym narzędziem pracy operatora są systemy teleinformatyczne umożliwiające zdalne zarządzanie poszczególnymi elementami podsystemów. Powszechnie stosowany jest system SCADA (ang. Supervisory Control And Data Acquisition), czyli system informatyczny będący systemem nadrzędnym nad poszczególnymi systemami sterującymi kolejnymi procesami ciągu technologicznego. SCADA pozwala operatorowi na nadzór nad przebiegiem procesów technologicznych. Główną funkcją systemu jest zbieranie aktualnych danych z obsługiwanych obiektów (m. in. pomiary: przepływu, ciśnienia, dawki reagentów, poziomu wody w zbiornikach, parametrów fizyko-chemicznych wody), ich wizualizacja oraz przedstawienie operatorowi w czytelny graficzny sposób. Ponadto SCADA umożliwia sterowanie procesami technologicznymi, alarmowanie w przypadku awarii oraz archiwizację danych [57].

Poniżej przedstawiono możliwości sterowania procesów przez operatora w poszczególnych podsystemach SZZW. Opisane działania dotyczą pracy operatora ZUW oraz częściowo operatora centralnego. Zestawienie powstało na podstawie informacji uzyskanych od pracowników przedsiębiorstw wodociągowych, automatyków, dokumentacje projektowo – wykonawcze obiektów badanych SZZW oraz dostępną literaturę przedmiotu.

### ***Podsystem Ujmowania Wody (PsUjW)***

Ujęcie wody stanowi pierwszy element SZZW. W zależności od specyfiki obiektu wyróżnia się różne działania eksploatacyjne służące do utrzymania obiektu w stanie sprawności. Dla ujęć wody powierzchniowej zaleca się obserwację najniższych stanów wody w ciągu roku, obserwację wezbrań powodziowych, ruchu dna i rumowiska, usuwanie roślinności przybrzeżnej, ochronę wody przed zakwitami oraz kontrolę jakości wody ujmowanej [57]. Dla ujęć wody podziemnej zaleca się kontrolę jakości wody, obserwację wydajności studni, obserwację stanów zwierciadła wody w studni oraz w pobliżu ujęcia, usuwanie osadów powstających na filtrze studni, a w razie konieczności renowację oraz odpiaszczanie [57].

Systemy sterowania w obrębie obiektów ujęcia mają głównie za zadanie regulować ilość ujmowanej wody w zależności od zapotrzebowania na wodę w danym momencie,



sytuacji hydrologicznej (np. wezbrania, zjawiska lodowe) lub hydrogeologicznej (np. obniżenie poziomu wód gruntowych), czy obserwowalnego pogrożenia jakości wody (np. wzrost mętności). Sterowanie odbywać może się w sposób automatyczny wg. zaimplementowanego programu lub w sposób ręczny przez operatora. Sterowanie automatyczne napędami elementów wykonawczych odbywa się za pomocą sterowników PLC (Programmable Logic Controller) sterujących pracą ciągów technologicznych. Sterowanie ręczne może odbywać się ze stanowiska komputerowego w dyspozytorni, z panelu operatorskiego w obiekcie ujęcia, który przekazuje komendy bezpośrednio do układu sterowania w szafie automatyki i sterownika PLC, lub lokalnie z panelu operatorskiego pojedynczego napędu. Siłowniki połączone z elementami regulującymi ilość dopływającej wody (np. przepustnice, okna wlotowe) powinny posiadać sygnalizację otwarcia/zamknięcia elementu oraz awarii napędu widoczną bezpośrednio na lokalnym sterowniku, na elewacji szafy automatyki oraz stanowisku sterowania w dyspozytorni.

### ***Podsystem Uzdatniania Wody (PsUzW)***

Technologia uzdatniania wody ma największy wpływ na jakość wody dostarczanej do konsumenta, stąd tak ważna jest prawidłowa eksploatacja urządzeń i obiektów wchodzących w skład ZUW. Ze względu na dużą różnorodność stosowanych technologii oraz dedykowanych im urządzeń można wyróżnić wiele działań eksploatacyjnych mających na celu utrzymanie obiektów w stanie sprawności. Do najczęściej stosowanych procesów uzdatniania wody powierzchniowej można zaliczyć: koagulację, filtrację, dezynfekcję, natomiast w przypadku wód podziemnych: napowietrzanie, filtrację i dezynfekcję.

Koagulacja wody to proces polegający na usunięciu z wody koloidów oraz cząstek trudno opadających, które odpowiadają za mętność i barwę wody. Zachodzi na skutek dodania do oczyszczanej wody substancji chemicznych, tzw. koagulantów oraz substancji wspomagających proces koagulacji – obciążników i flokulantów. Proces koagulacji stosowany jest w różnych wariantach technologicznych, wyróżnia się koagulację objętościową, kontaktową oraz powierzchniową. W zależności od zastosowanej technologii wymagane są różne czynności eksploatacyjne. Najczęściej spotykane układy koagulacji objętościowej składają się z mieszalników szybkich (wymieszanie reagentów z wodą), mieszalników wolnych (flokulacja kłaczków) oraz osadników (sedymentacja kłaczków). Do zadań eksploatacyjnych w układzie koagulacji zalicza się: przeglądy i konserwację urządzeń oraz osprzętu obiektów technologicznych, dostosowanie dawek

reagentów do parametrów jakości wody oraz utrzymanie układów zgarniania osadów w stanie sprawności [58]. Sterowanie dawkami reagentów odbywa się najczęściej w sposób automatyczny w zależności od przepływu lub mętności wody [56]. Układy dawkowania posiadają możliwość ręcznego sterowania przez operatora z poziomu lokalnego panelu sterowania oraz stanowiska operatorskiego w dyspozytorni. Na tych stanowiskach powinny być zastosowane układy sygnalizujące pracę lub awarię układów dawkowania reagentów. Eksploatacja układów zagarniania osadu polega na utrzymaniu i konserwacji zgarniaczy oraz pomp osadu. Sterowanie zgarniaczem oraz pompami osadu realizowane jest jako proces automatyczny, w zależności od poziomu wysokości osadu lub jego gęstości. Operator ma możliwość sterowania ręcznego układu zgarniania osadu lokalnie z panelu sterowniczego lub zdalnie ze stanowiska w dyspozytorni. Układ powinien być wyposażony w sygnalizację pracy lub awarii pomp osadu oraz zgarniacza dostępną lokalnie na panelu sterowniczym, oraz w dyspozytorni na stanowisku operatora. Niewłaściwa eksploatacja układów koagulacji, które są pierwszym etapem procesu uzdatniania stanowi zagrożenie dla poprawnej pracy kolejnych urządzeń [58].

Napowietrzanie wody jest jednym z podstawowych procesów uzdatniania wody podziemnej. Ma celu usunięcie z wody związków żelaza i manganu na drodze ich utlenienia i wytrącenia w postaci osadów, które usuwane są w kolejnym etapie uzdatniania tj. filtracji. Proces napowietrzania przeprowadza się w aeratorach lub w systemach otwartego napowietrzania (złoża ociekowe, kaskady napowietrzające, dysze rozdeszczające) [58]. Do podstawowych działań eksploatacyjnych w układach napowietrzania należą przeglądy i konserwacja urządzeń napowietrzających. Zaleca się kontrolę stanu urządzeń napowietrzających raz w miesiącu oraz czyszczenie nie rzadziej niż raz na rok [146]. W zależności od zastosowanego rozwiązania operator ma za zadanie kontrolować przebieg procesu w oparciu o parametry takie jak: stężenie tlenu w wodzie po procesie oraz pH wody [146]. Na ich podstawie ma on możliwość sterowania natężeniem przepływu wody przez urządzenia napowietrzania oraz wydajnością układów wentylacyjno-napowietrzających. Sterowanie to może odbywać się automatycznie oraz ręcznie z poziomu dyspozytorni, lub z lokalnych paneli sterujących w obiektach technologicznych. Niewłaściwa eksploatacja układów napowietrzania stanowi zagrożenie dla efektywności następnych etapów uzdatniania wody, w szczególności filtracji [146].

Proces filtracji wody występuje najczęściej po procesie koagulacji lub napowietrzania na filtrach. W procesie tym na skutek filtracji wody przez złożo wypełnione materiałem porowatym usuwane są zanieczyszczenia w formie zawiesiny.

Do czynności eksploatacyjnych w obsłudze filtrów zalicza się: płukanie filtrów, wymianę wypełnienia złoża filtracyjnego, kontrolę stanu technicznego drenażu filtra, koryt popłuczyn, rurociągów i osprzętu filtrów [58]. Operator nadzoruje pracę filtrów na podstawie parametrów takich jak: prędkość filtracji, długość cyklu filtracji, wartość strat ciśnienia hydraulicznego na filtrze oraz mętność wody przefiltrowanej. Sterowanie pracą filtrów polega na utrzymaniu stałej prędkości filtracji przy wzrastających stratach ciśnienia na filtrze, określeniu końca cyklu filtracji, a następnie przeprowadzeniu procedury płukania filtra i ponownym włączeniu go do eksploatacji [58]. Najczęściej wykorzystuje się automatyczne sterowanie wg. algorytmu uwzględniającego wysokość strat ciśnienia, poziom wody na filtrze lub mętności filtratu. Możliwe jest również sterowanie ręczne przez operatora z dyspozytorni lub lokalnie z poziomu obiektów technologicznych stacji filtrów. Na obiektach filtrów powinno się lokalizować punkty pomiarowe przepływu (rurociągi wody przefiltrowanej), ciśnienia (rurociągi wody surowej i przefiltrowanej) oraz poziomu wody w filtrach. Parametry te powinny być dostępne dla operatora na stanowisku komputerowym w dyspozytorni. Skutkami niewłaściwej eksploatacji urządzeń w procesie filtracji mogą być: ograniczenie wydajności filtrów w kolejnym okresie eksploatacyjnym, przedostanie się zanieczyszczeń do dalszych etapów uzdatniania lub uszkodzenie złoża filtracyjnego [58].

Celem procesu dezynfekcji jest unieszkodliwienie żywych i przetrwalnikowych form organizmów patogennych oraz zabezpieczenie wody przed wtórnym zanieczyszczeniem w sieci wodociągowej [58]. Do najpopularniejszych dezynfektantów należą chlor gazowy  $Cl_2$ , dwutlenek chloru  $ClO_2$  oraz podchloryn sodu [147]. Często wykorzystuje się również lampy UV wspomagające proces dezynfekcji. Eksploatacja urządzeń przeznaczonych do dezynfekcji wody oraz przygotowania dezynfektantów, ze względu na wykorzystanie niebezpiecznych substancji chemicznych musi być prowadzona ze szczególną starannością z zachowaniem obowiązujących wymagań BHP [58]. Najczęściej wykorzystywane są systemy sterowania automatycznego, gdzie dawka dezynfektanta uzależniona jest od chwilowej wartości przepływu [147]. Istnieje możliwość ręcznego sterowania omawianym procesem (m.in. zmiana dawki dezynfektanta, włączenie/wyłączenie) przez operatora ze stanowiska komputerowego w dyspozytorni oraz lokalnie z poziomu obiektów technologicznych. Ważnym aspektem jest również eksploatacja systemów wentylacyjnych w obiektach technologicznych, w których prowadzony jest proces przygotowania dezynfektantów oraz dezynfekcja wody [58]. Powinny być one wyposażone w systemy wentylacji awaryjnej oraz instalacje

do unieszkodliwiania dezynfektanta [147]. Sterowanie tymi systemami odbywa się automatycznie w oparciu o pomiar stężenia dezynfektanta np.  $\text{ClO}_2$ , w obiektach technologicznych. Operator ma możliwość ręcznie uruchomić systemy wentylacji awaryjnej oraz instalację do unieszkodliwiania ze stanowiska w dyspozytorni, oraz lokalnie. W obiektach dezynfekcji powinny znajdować się również systemy sygnalizujące: pracę, awarię, tryb zdalnego sterowania urządzeń do dezynfekcji wody, przekroczenie stężenia dezynfektanta w obiektach technologicznych, awarię detektora stężeń dezynfektanta oraz pracę i awarię systemów wentylacyjnych i instalacji unieszkodliwiającej. Informacje te powinny być dostępne na stanowisku operatora w dyspozytorni oraz lokalnie przy obiektach dezynfekcji. Eksploatacja lamp UV sprowadza się do okresowych przeglądów i konserwacji promienników [147]. Sterowanie mocą promiennika odbywa się w sposób automatyczny na podstawie pomiaru natężenia przepływu oraz nastawy dawki promieniowania UV. Operator ma możliwość ręcznego sterowania pracą lampy UV z poziomu dyspozytorni oraz na lokalnym panelu sterowniczym w obiektach technologicznych. System powinien być wyposażony w układ sygnalizacyjny pracy oraz awarii lampy UV, którego podgląd dostępny jest na stanowisku operatora w dyspozytorni oraz na lokalnym panelu sterowniczym w obiekcie technologicznym. Niewłaściwa eksploatacja układów dezynfekcji wody stanowi zagrożenie dla życia i zdrowia konsumentów wody.

### ***Podsystem Pompowania Wody (PsPoW)***

W podsystemie pompowania wody można wyróżnić pompownię I stopnia, której zadaniem jest pompowanie wody z ujęcia, przez obiekty ZUW do pompowni II stopnia, która następnie tłoczy wodę do sieci wodociągowej. Eksploatacja agregatów pompowych jest zadaniem złożonym i wymaga ścisłego przestrzegania wymaganych procedur dotyczących m.in. uruchomienia czy wyłączenia agregatu pompowego [57]. Okresowo wymaga się badania efektywności pracy agregatu pompowego, co pozwala ocenić warunki pracy i stopień zużycia pompy, oraz w razie potrzeby zakwalifikować ją do remontu. Wśród przyczyn niewłaściwej pracy pompy, objawiającej się np. nadmiernym zużyciem energii czy hałasem, można wyróżnić: zużycie lub wadliwą konstrukcję elementów pompy, nieszczelności na przewodzie ssawnym, zapowietrzenie rurociągu tłocznego, nieprawidłową regulację pracy pompy [57].

Pompownie I stopnia pracują zazwyczaj w trybie automatycznym, gdzie praca pomp może zależeć np. od poziomu wody w zbiornikach wody uzdatnionej. Istnieje

możliwość sterowania ręcznego pracą pompowni I stopnia poprzez uruchamianie kolejnych pomp niezależnie od zadanego parametru sterującego. Sterowanie ręczne przez operatora najczęściej jest możliwe lokalnie za pomocą przełączników w szafie rozdzielczo-sterującej pompowni lub z poziomu dyspozytorni.

Podstawowym trybem sterowania pompami II stopnia jest tryb automatyczny, najczęściej z wykorzystaniem przetwornika ciśnienia na przewodzie tłocznym, gdzie zadana wartość ciśnienia utrzymywana jest w funkcji zapotrzebowania na wodę. Wydajność pompowni II stopnia regulowana jest zmianą prędkości obrotowej pompy z wykorzystaniem przemienników częstotliwości oraz zmiany liczby pracujących pomp. Możliwe jest także sterowanie pompami II stopnia w trybie ręcznym. Uruchomienie każdej z pomp odbywa się bez udziału przemienników częstotliwości. Sterowanie ręczne w takich przypadkach traktowane jest najczęściej jako awaryjne, ponieważ uruchamiając pompy bez przemienników częstotliwości, operator musi się liczyć z większymi wahaniami ciśnienia na sieci. Sterowanie ręczne możliwe jest najczęściej z poziomu dyspozytorni lub lokalnie za pomocą przełączników w szafie rozdzielczo-sterującej pompowni.

Pompownie powinny posiadać również automatyczne bloki zabezpieczające powodujące wyłączenie układu z pracy takie jak: zabezpieczenie pomp przed pracą na suchobiegu, zabezpieczenie przed pracą niepełnofazową, zabezpieczenie przed zanikiem napięcia zasilania oraz zabezpieczenie przeciążeniowe. Sygnalizacja pracy i awarii pomp powinna być dostępna dla operatora na stanowisku dyspozytorni oraz lokalnie w obiektach pompowni.

### ***Podsystem Magazynowania Wody (PsMaW)***

Zbiorniki w SZZW w zależności od umiejscowienia mogą pełnić różne funkcje. Najczęściej spotykanymi w praktyce wodociągowej są zbiorniki wody czystej na terenie ZUW oraz zbiorniki sieciowe. Ich zadanie polega na zgromadzeniu objętości wody potrzebnej do wyrównania zmiennych w czasie rozbiórów wody, zgromadzeniu wody na cele przeciwpożarowe oraz na cele awaryjnego zaopatrzenia w wodę. Zbiorniki sieciowe stabilizują ciśnienie w sieci wodociągowej [57]. Podczas eksploatacji zbiorników zaleca się monitorowanie poziomu wody w zbiorniku, kontrolę jakości wody, stanu zbiornika (kontrola wycieków) oraz komory zasuw, jak również konserwację zbiornika (mycie, dezynfekcja) [57].

Sterowanie pracą zbiorników opiera się o sterowanie przepustnicami lub zasuwami na przewodach doprowadzającym i odprowadzającym wodę oraz spustowym. Napędy

elementów wykonawczych mogą być sterowane przez operatora zdalnie z poziomu dyspozytorni oraz lokalnie w obiektach zbiorników. Najczęściej wykorzystuje się automatyczne sterowanie w oparciu o dane pomiarowe poziomu wody w zbiorniku lub wartości przepływu. Dodatkowo obiekty zbiorników powinny posiadać sygnalizację poziomów wody (minimalnego i maksymalnego) dostępną dla operatora w dyspozytorni oraz na lokalnym panelu sterowniczym.

### ***Podsystem Dystrybucji Wody (PsDyW)***

Podsystem dystrybucji wody obejmuje sieć wodociągową, która jest najbardziej rozległym elementem SZZW. Prawidłowa eksploatacja przewodów wodociągowych polega na utrzymaniu przewodów oraz ich uzbrojenia w odpowiednim stanie technicznym poprzez prowadzenie systematycznych kontroli i prac konserwacyjnych, szybkim usuwaniu występujących awarii, stałej analizie warunków pracy sieci wodociągowej pod względem ilości i jakości wody oraz wartości ciśnienia, jak również planowaniu i prowadzeniu prac remontowych [10, 57, 59]. W celu prawidłowej eksploatacji sieci wodociągowej powoływane są odpowiednie jednostki organizacyjne w przedsiębiorstwach wodociągowych, do których w dużych wodociągach mogą należeć: pogotowie sieciowe, brygady naprawcze, brygady konserwacyjne, brygady brukarskie, dział techniczny, magazyny materiałowe, baza sprzętu technicznego, warsztaty oraz baza transportowa [57].

Działania eksploatacyjne prowadzone w PsDyW z reguły wymagają zaangażowania dużej liczby pracowników i są zadaniami złożonymi.

Do obowiązków operatora centralnego należą przede wszystkim:

- przyjmowanie i rejestrowanie zgłoszeń o awariach infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w ramach funkcjonowania pogotowia sieciowego oraz przydzielanie zleceń naprawy do odpowiednich jednostek wykonawczych,
- analiza danych z monitoringu sieci i obiektów wodociągowo-kanalizacyjnych,
- współpraca z operatorem ZUW oraz operatorem OŚ,
- powiadamianie właściwych organów administracji rządowej lub samorządowej oraz innych jednostek o zaistniałych zdarzeniach, zgodnie z regulacjami Procedur Reagowania Kryzysowego,
- przekazywanie informacji o zdarzeniach wpływających na pracę sieci wodociągowej i kanalizacyjnej do wiadomości publicznej,
- pełnienie całodobowego dyżuru w przedsiębiorstwie.

Ze względu na charakter pracy operatora w PsDyW tj. praca polegająca głównie na rozdzielaniu przyjętych zgłoszeń, bez wyraźnych zadań technicznych oraz na fakt, że w badanych SZZW (zaliczanych do małych i średnich przedsiębiorstw wodociągowo – kanalizacyjnych) brak było osoby zatrudnionej w charakterze operatora centralnego, niezawodność operatora w PsDyW nie została poddana badaniom w dalszej części pracy.

## 6.2. Rodzaje błędów operatora

Jedną z cech człowieka jako elementu układu antropotechnicznego jest błędność [98, 100]. Wyraża się ona w podejmowaniu nietrafnych decyzji operatorskich oraz fałszywej ocenie stanu otoczenia i stanu technicznego maszyny [100]. Błędy operatora mogą mieć różne podłoże oraz odmienne konsekwencje, dlatego ich identyfikacja ma kluczowe znaczenie podczas poszukiwania możliwości redukcji ich liczby. Istnieje wiele taksonomii błędów operatora [5, 93-95]. Najpopularniejszą z nich przedstawił J. Reason w 1990 roku [94]. Była ona wykorzystana m.in. przy badaniu awarii elektrowni atomowej w Czarnobylu [5]. Podział ten zakłada, że błędy operatora wynikają z nieprawidłowości działania funkcji poznawczych człowieka tj. nieuwagi, problemów z pamięcią oraz braku wiedzy. Wyróżniono trzy kategorie błędów:

- potknięcie (ang. slip) – błąd wykonania, operator w wyniku nieuwagi nie wykonuje poprawnie zaplanowanych czynności,
- pomyłka (ang. lapse) – błąd wykonania, operator w wyniku problemów z pamięcią nie wykonuje poprawnie zaplanowanych czynności,
- błąd właściwy (ang. mistake) – błąd planowania, czynności zaplanowane do wykonania przez operatora, są niewłaściwe dla poprawnego wykonania zadania.

Innym podziałem rodzajów błędów operatora jest podział ze względu na zamiary operatora [91, 100]:

- błędy zamierzone – operator wykonał świadomie czynność niewłaściwą dla danej sytuacji, która w jego opinii była właściwa w danym momencie lub była lepszym sposobem działania; błędem zamierzonym jest błąd właściwy,
- błędy niezamierzone – operator wykonał nieświadomie czynność niewłaściwą dla danej sytuacji, przez co nie osiągnął zamierzonych rezultatów; do błędów niezamierzonych można zaliczyć potknięcie i pomyłkę.

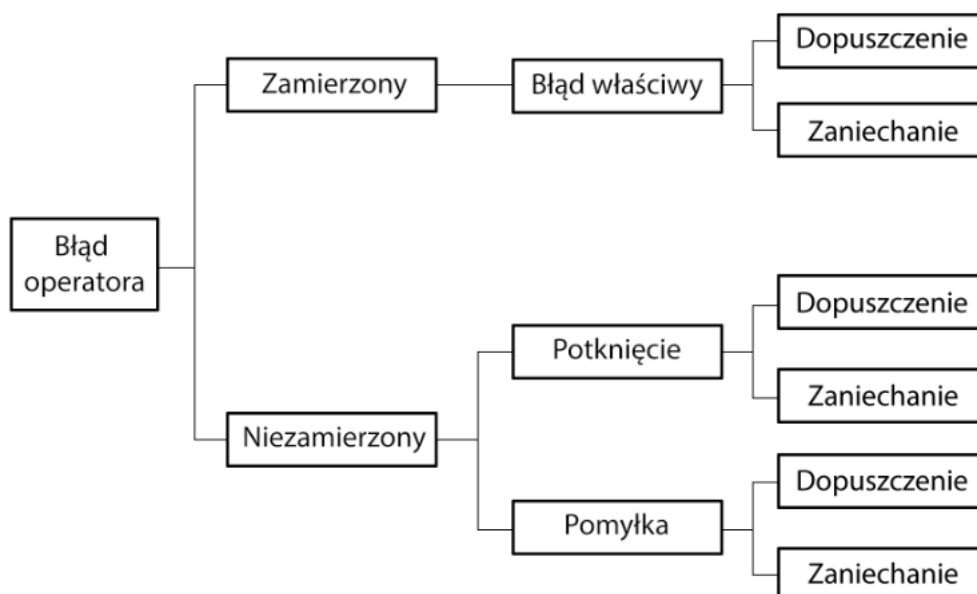
Operator może popełnić błąd w ramach wykonania lub niewykonania działania w odpowiednim momencie, przez co wyróżnia się [91, 102]:

- dopuszczenie (ang. commission) – operator wykonuje działanie, które nie powinno zostać wykonane,
- zaniechanie (ang. omission) – operator nie wykonuje działania, które powinno zostać wykonane.

Niewłaściwa ocena sytuacji przez operatora może skutkować powstaniem błędów związanych z hipotezą stawianą przez operatora, wśród których wyróżnia się [92, 100]:

- błędy I rodzaju – polegające na przyjęciu fałszywej hipotezy, co skutkuje wykonaniem przez operatora działań, których nie powinien wykonać. Błędy pierwszego rodzaju to błędy dopuszczenia. W odniesieniu do niezawodności obiektów błąd ten polega na przyjęciu hipotezy o niesprawności obiektu, co skutkuje stratami finansowymi wynikającymi z niewykorzystania obiektu sprawnego, np. wstrzymanie procesu produkcji wody na ZUW,
- błędy II rodzaju – polegają na odrzuceniu prawdziwej hipotezy, co skutkuje niewykonaniem przez operatora działań, które powinien wykonać. Błędy drugiego rodzaju to błędy zaniechania. W odniesieniu do niezawodności obiektów błąd ten polega na odrzuceniu hipotezy o niesprawności obiektu i kontynuowaniu eksploatacji, stanowiąc zagrożenie dla ludzi oraz środowiska.

Na rysunku 6.1 przedstawiono przyjętą klasyfikację błędów operatora.



**Rys. 6.1.** Rodzaje błędów operatora (na podstawie [88, 94])



### 6.3. Przyczyny błędów operatora

Operatora w trakcie pracy charakteryzują następujące stany sprawności [100]:

- stan sprawności – działanie prawidłowe pod względem psychofizycznym,
- stan potencjalnej niesprawności – chwilowy stan graniczny, w którym możliwa jest utrata sprawności psychofizycznej,
- stan niesprawności – operatora cechuje całkowita niezdolność do działania pod względem psychofizycznym.

Na utratę sprawności przez operatora ma wpływ wiele czynników [12, 26, 83, 100].

Do najważniejszych z nich należą:

- niekorzystne warunki otoczenia (oświetlenie, wibracje, hałas, mikroklimat, narażenie na substancje niebezpieczne),
- niewłaściwa ergonomia stanowiska operatorskiego - brak zasobów (narzędzi, materiałów, dokumentacji) do wykonania zadania,
- niewłaściwa organizacja pracy (złożoność zadań, brak współpracy zespołu, trudności w komunikacji i przepływie informacji),
- zły stan psychofizyczny operatora:
  - zmęczenie – fizyczne lub psychiczne, związane z dobowym rytmem snu i czuwania,
  - rozproszenie uwagi – wynika z dezorientacji spowodowanej nadmiarem bodźców,
  - stres – występuje, gdy operator odczuwa dyskomfort psychiczny dotyczący warunków lub wymagań związanych z realizacją zadania w sytuacji, kiedy przekraczają one jego możliwości,
- niskie kompetencje operatora związane z brakiem wiedzy i doświadczenia, skutkujące brakiem zrozumienia celu zadania oraz zasad jego wykonania,
- niska motywacja operatorów objawiająca się:
  - rutyną – spowodowaną czynnościami powtarzalnymi, żmudną pracą, wynika z wieloletniej praktyki przy jednoczesnej utracie świadomości dotyczącej istniejących zagrożeń,
  - odczuwaniem presji – pojawiającej się w wyniku nacisku przełożonych, braku odpowiedniej ilości czasu, niewłaściwego określenia zadań,
  - brakiem asertywności – oznaczającym brak umiejętności odmowy wykonania zadania na skutek braku pewności siebie, kompleksów oraz lęku,
  - niedbalstwem – polegającym na nieprawidłowej ocenie konsekwencji działania na skutek odczuwanej presji czy braku doświadczenia.



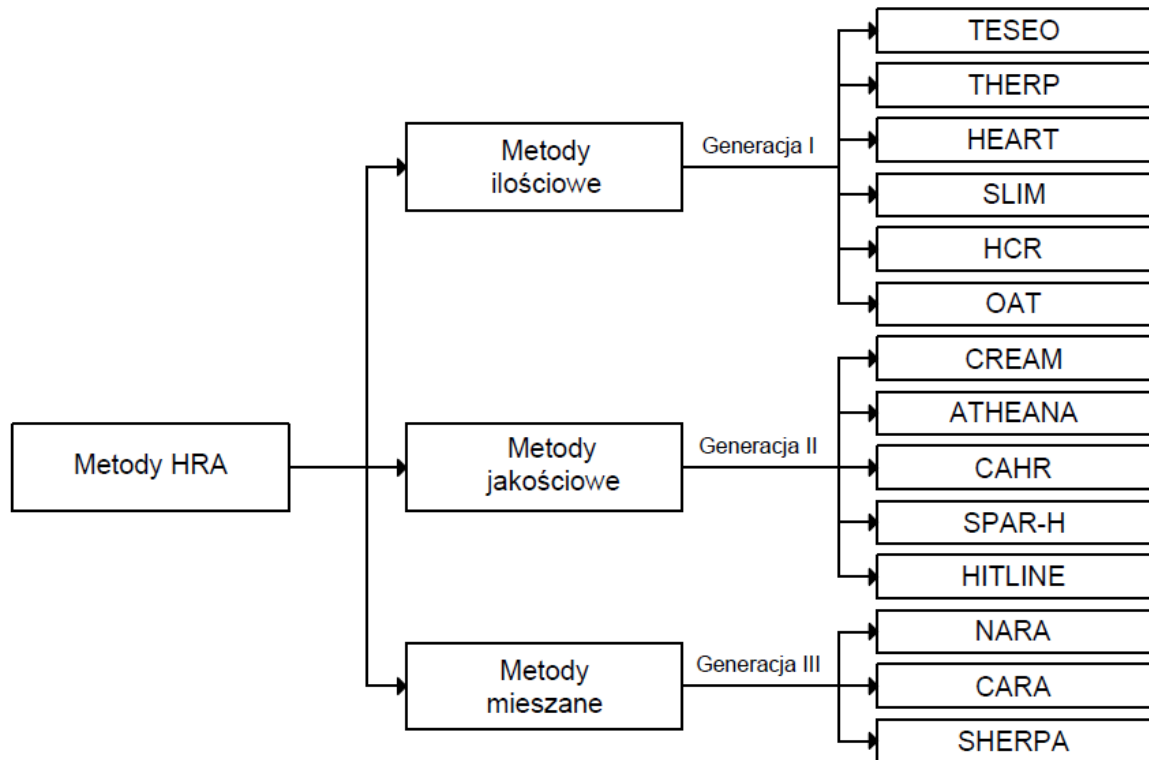
## 7. Przegląd metod stosowanych do oceny niezawodności operatora systemów technicznych

### 7.1. Podział metod oceny niezawodności operatora

Wraz z rozwojem badań nad niezawodnością operatora w systemach technicznych pojawiło się około 70 różnych metod jej oceny tzw. metod HRA (ang. Human Reliability Assessment) [23, 25]. Do najważniejszych metod HRA należą:

- TESEO (wł. Tecnica Empirica Stima Errori Operatori),
- THERP (ang. Technique for Human Error Rate Prediction),
- HEART (ang. Human Error Assessment and Reduction Technique),
- SLIM (ang. Success Likelihood Index Method),
- HCR (ang. Human Cognition Reliability),
- OAT (ang. Operator Action Tree),
- CREAM (ang. Cognitive Reliability and Error Analysis Methods),
- ATHEANA (ang. A Technique for Human Event Analysis),
- CAHR (ang. Connectionism Assessment of Human Reliability),
- SPAR-H (ang. Simplified Plant Analysis Risk Human Reliability Assessment),
- HITLINE (ang. Human Interaction Time-Line),
- NARA (ang. Nuclear Action Reliability Assessment),
- CARA (ang. Controller Action Reliability Assessment),
- SHERPA (ang. Simulator for Human Error Probability Analysis).

Wśród metod HRA można wyróżnić metody ilościowe, metody jakościowe oraz metody mieszane [23]. Alternatywny podział zakłada istnienie trzech generacji metod HRA. Uwzględnia on rok powstania metody oraz różnice w metodyce [4, 23, 25]. Często przyjmuje się, że metody pierwszej generacji (1970 – 1990), skupiają się na ilościowej ocenie niezawodności operatora, metody drugiej generacji (1990 – 2005) uwzględniają aspekt jakościowy, natomiast metody trzeciej generacji (2005 – obecnie) łączą w sobie założenia dwóch poprzednich generacji [4, 23]. Podział najważniejszych metod HRA przedstawiono na rysunku 7.1.



Rys. 7.1. Klasyfikacja wybranych metod HRA

## 7.2. Metody ilościowe w ocenie niezawodności operatora

Ocena niezawodności operatora z wykorzystaniem metod ilościowych sprowadza się głównie do wyznaczenia wartości liczbowej HEP przy pominięciu analizy przyczyn działania operatora [23]. Metody ilościowe często są krytykowane ze względu na brak uwzględnienia wpływu czynników kontekstowych, środowiskowych czy organizacyjnych na niezawodność operatora oraz subiektywność oceny ekspertów [23, 25]. Wyniki uzyskane przy zastosowaniu metod ilościowych często przyjmują zawyżone wartości [23]. Przykładem metody ilościowej oceny niezawodności operatora jest metoda HEART (ang. Human Error Assessment and Reduction Technique) zaprezentowana w 1985 r. przez Wiliamsa [125]. Znalazła ona zastosowanie w wielu dziedzinach techniki takich jak: przemysł nuklearny, przemysł chemiczny, lotnictwo, transport kolejowy, transport morski, medycyna, systemy wodociągowe [2, 4, 8, 51, 52, 54]. Metoda ta pozwala na określenie wielkości wartości prawdopodobieństwa błędu operatora HEP (ang. Human Error Probability) za pomocą zależności [125]:

$$HEP = GEP_i \cdot \prod_{i=1}^n [(W_i - 1) \cdot OE + 1] \quad (7.1)$$

gdzie:

- $GEP_i$  – nominalna wartość prawdopodobieństwa błędu operatora zależna od rodzaju zadania,
- $W_i$  – wartość współczynnika korygującego wartość GEP,
- OE – ocena ekspercka wpływu wybranego czynnika EPC na popełnienie błędu przez operatora; przyjmuje wartości od 0 do 1.

Według tej metody oceniane zdarzenie można przyporządkować do jednego z dziewięciu typów zadań wykonywanych przez operatora, dla których określono nominalne wartości prawdopodobieństwa popełnienia błędu tzw. GEP (ang. General Error Probability). Wartość ta może zostać zwiększona po uwzględnieniu 38 czynników wpływających negatywnie na niezawodność operatora np. niewystarczająca ilość czasu na wykrycie i korektę błędu systemu, nadmiar informacji, niedoświadczenie operatora, niska jakość procedur. Ich wpływ na nominalne wartości prawdopodobieństwa popełnienia błędu GEP uwzględniono przez zastosowanie współczynników korygujących ( $W_i$ ) oraz oceny eksperckiej [125].

### 7.3. Metody jakościowe w ocenie niezawodności operatora

Aspekt jakościowy w ocenie niezawodności operatora pozwala na zbadanie wpływu czynników kontekstowych towarzyszących ocenianej sytuacji [23]. Metody jakościowe pozwalają na uwzględnienie kwestii związanych ze stanem psychofizycznym operatora w czasie wykonywania zadania [4, 23]. Analizy z wykorzystaniem metod jakościowych pozwalają na identyfikację potencjalnych sytuacji, w których może wystąpić błąd operatora. Mogą być one również wykorzystane do analizy retrospektywnej [23].

Przykładem metody jakościowej, drugiej generacji HRA jest metoda SPAR-H (ang. Simplified Plant Analysis Risk Human Reliability Assessment) [141]. Metoda ta rozwijana była w latach 1999 - 2005 na zlecenie Amerykańskiego Urzędu Dozoru Jądrowego (ang. U.S. Nuclear Regulatory Commission) [8]. Metoda ta zakłada istnienie dwóch kategorii zadań operatora, dla których przypisano nominalne wartości HEP. Pierwsza kategoria dotyczy „wykonywania akcji” ( $HEP_n = 0,001$ ), obejmuje proste, intuicyjne, często powtarzające się zadania np. rozruch systemu, uruchomienie pomp itp.; druga kategoria dotyczy „diagnozowania” ( $HEP_n = 0,01$ ), należy do niej zaliczyć zadania, w czasie których operator musi się wykazać doświadczeniem i kwalifikacjami, wymaga interpretacji wskazań systemowych oraz podjęcia odpowiedniego działania przez operatora [8, 78, 141]. Wartość HEP w metodzie SPAR-H wyznacza się według zależności [141]:

$$HEP_{SPAR-H} = \frac{HEP_n \cdot PSF_{suma}}{[HEP_n \cdot (PSF_{suma} - 1) + 1]} \quad (7.2)$$

gdzie:

- $HEP_n$  – nominalna wartość prawdopodobieństwa błędu operatora,
- $PSF_{suma}$  – sumaryczny wpływ czynników kształtujących działanie,

$$PSF_{suma} = PSF_1 \cdot \dots \cdot PSF_i \cdot \dots \cdot PSF_8 \quad (7.3)$$

- $PSF_i$  – mnożnik dla i-tego czynnika PSF.

W metodzie przedstawiono osiem czynników kształtujących działanie PSF (ang. Performance Shaping Factors). Do czynników PSF należą: dostępny czas, stres, doświadczenie i kwalifikacje operatora, złożoność zadania, ergonomia, dostępność procedur, psychofizyczna kondycja operatora, organizacja procesu pracy [141]. W zależności od uzyskanej oceny dla każdego z czynników obserwuje się pozytywny lub negatywny wpływ na nominalną wartość HEP. Metoda ta wykorzystuje do obliczeń wartości HEP dedykowane arkusze robocze, co w bardzo dużym stopniu upraszcza przeprowadzenie analizy zgodnie z wytycznymi [8, 141]. Innym przykładem metody II generacji HRA jest metoda CREAM, której szczegóły przedstawiono w rozdziale 8.5.

#### 7.4. Metody mieszane w ocenie niezawodności operatora

Ze względu na ograniczenia metod HRA pierwszej i drugiej generacji obecnie rozwija się trzecia generacja. Istnieją dwa główne kierunki rozwoju nowych metod oceny niezawodności operatora. Jeden z nich polega na wykorzystaniu znanych metod i ich modyfikacji np. z zastosowaniem wnioskowania Bayesowskiego, wykorzystania teorii liczb rozmytych czy konstruowaniu modeli decyzyjnych. Drugi kierunek zakłada wykorzystanie symulacji komputerowych. W rezultacie metody trzeciej generacji HRA zmniejszają ograniczenia pojawiające się przy metodach starszych, umożliwiając przeprowadzenie bardziej realistycznej analizy niezawodności operatora.

Przykładem metody trzeciej generacji jest metoda SHERPA (ang. Simulator for Human Error Probability Analysis). Została ona zaproponowana przez Di Pasquale z zespołem w 2015 [21]. Metoda ta oparta jest na dynamicznym modelu opisującym niezawodność operatora w funkcji czasu, warunków środowiskowych, fizycznego i psychicznego stanu operatora, stopnia dokładności wykonywania zadania czy oceny wpływu kontekstu sytuacji na jego wykonanie. W celu wyznaczenia prawdopodobieństwa błędu operatora metoda ta korzysta z ogólnej klasyfikacji zadań i wartości GEP

(ang. General Error Probability) przedstawionych w metodzie HEART oraz z oceny czynników kształtujących działanie PSF (ang. Performance Shaping Factors) zaczerpniętych z metody SPAR-H (ang. Standardised Plant Analysis Risk–Human Reliability Analysis Method). Początkowym etapem analizy jest wyznaczenie wartości nominalnej GEP oraz określenie wpływu kontekstu sytuacji na końcową wartość HEP wyznaczaną z zależności [21]:

$$HEP_{SHERPA} = GEP \cdot PSF_{suma} / [GEP \cdot (PSF_{suma} - 1) + 1] \quad (7.4)$$

gdzie:

- GEP – nominalna wartość prawdopodobieństwa błędu operatora (metoda HEART),
- $PSF_{suma}$  – sumaryczny wpływ czynników kształtujących działanie (metoda SPAR-H),

$$PSF_{suma} = PSF_1 \cdot \dots \cdot PSF_i \cdot \dots \cdot PSF_8 \quad (7.5)$$

- $PSF_i$  – mnożnik dla i-tego czynnika PSF.

Prawdopodobieństwo błędu operatora rośnie wraz ze wzrostem negatywnych efektów wpływu czynników PSF (mnożnik dla czynników PSF ma wartość  $>1$ ) oraz maleje, jeżeli ich wpływ jest pozytywny (mnożnik dla czynników pozytywnych ma wartość  $< 1$ ). Wpływ poszczególnych czynników może być modelowany za pomocą symulacji komputerowych przy zmiennych warunkach dynamicznych [21]. Metoda SHERPA może być użyta na etapie projektowania procesów w celu ograniczenia kształtowania się niekorzystnych warunków sprzyjających powstawaniu błędów operatora. Jest to tzw. zastosowanie prewencyjne. Drugim wykorzystaniem metody jest zastosowanie retrospektywne. Jego celem jest zrozumienie czynników, które wpłynęły na taką realizację scenariusza zdarzenia, w którym działanie człowieka było główną przyczyną porażki.





## 8. Metodyka badań

### 8.1. Opis obiektu badań

W celu zachowania reprezentatywności otrzymanych wyników obiekt badań niezawodnościowych powinien charakteryzować się w miarę jednakowymi lub zbliżonymi parametrami pracy, w tym: warunkami współpracy z innymi elementami systemu, warunkami eksploatacji, sposobem rozwiązania konstrukcyjnego, rodzajem wyposażenia [63]. Grupa wybranych do badań obiektów danego typu powinna być możliwie duża [63].

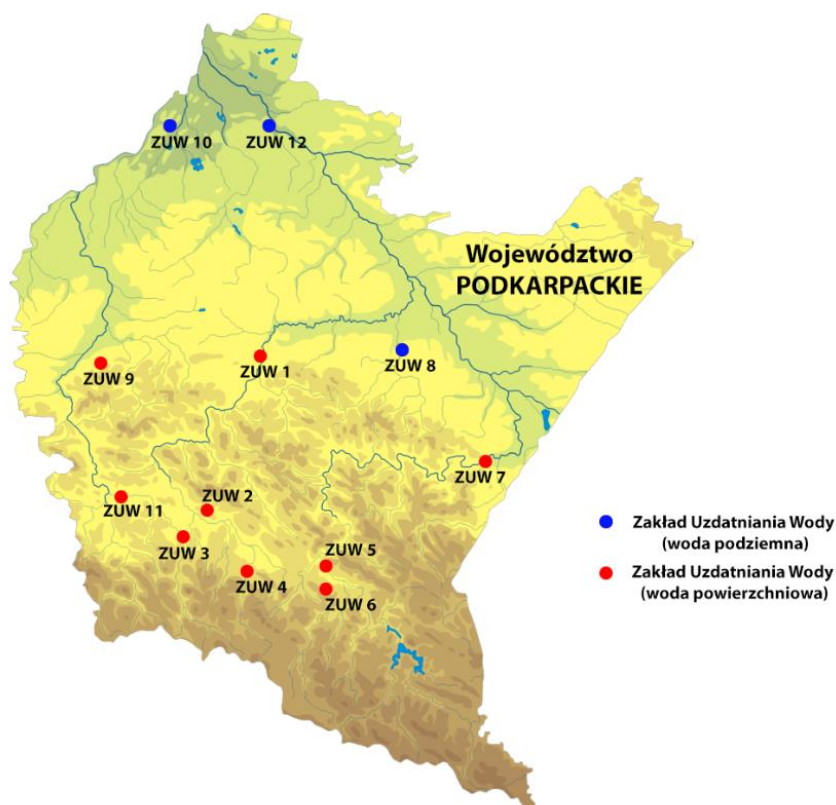
W celu przeprowadzenia badań niezawodności operatora należało zgromadzić jak największą grupę operatorów – pracowników przedsiębiorstw wodociągowych, których zadaniem jest sterowanie i zarządzanie pracą systemu wodociągowego jako całości oraz poszczególnych podsystemów. Celem jest utrzymanie ciągłości jego działania z zachowaniem wymagań pod względem niezawodności i bezpieczeństwa. Zadania operatorów w poszczególnych podsystemach zostały szczegółowo opisane w rozdziale 6.1.

W celu wytypowania odpowiedniej grupy operatorów dokonano przeglądu SZZW w województwie podkarpackim pod względem liczby odbiorców wody, źródła ujmowanej wody oraz technologii uzdatniania wody. Badana grupa operatorów powinna pochodzić z systemów różnej wielkości wykorzystujących wodę podziemną i powierzchniową. Natomiast technologia uzdatniania wody w wybranych systemach powinna być oparta o podobne procesy (dla wody podziemnej wybrano procesy: napowietrzanie, filtracja, dezynfekcja; dla wody powierzchniowej wybrano procesy: utlenianie wstępne, koagulacja, filtracja, dezynfekcja).

Wybrano 20 różnych przedsiębiorstw wodociągowych, które następnie zaproszono do udziału w badaniach. Ze względu na pandemię koronawirusa SARS-CoV-2 w latach 2020-2021, bezpośredni kontakt z operatorami w przedsiębiorstwach wodociągowych był mocno utrudniony, dlatego zdecydowano się na przeprowadzenie badań w sposób zdalny, z wykorzystaniem Internetu. Spośród wybranych 20 przedsiębiorstw wodociągowych zgodę na przeprowadzenie badań wyraziło 8 przedsiębiorstw, które korzystały z ZUW. Na rysunku 8.1 przedstawiono lokalizację ZUW, w których przeprowadzono badania niezawodności operatora.

W ramach pracy przebadano 42 operatorów, z których 38 pracowało w ZUW korzystających z wód powierzchniowych, natomiast 4 z nich pracowało w ZUW pobierających wody podziemne. Badana grupa operatorów obejmowała osoby w różnym wieku (od przedziału wiekowego 18-35 do 50-64 lat), o różnym stopniu wykształcenia

(od zawodowego do wyższego), o różnym poziomie doświadczenia zawodowego (od 1-2 lat do 6 i więcej lat), obsługujących SZZW różnej wielkości (od 5000 – 10 000 odbiorców, do 100 000 i więcej odbiorców). Przeciętny przedstawiciel badanej grupy to mężczyzna w wieku 50-64 lat, o wykształceniu zasadniczym zawodowym, z doświadczeniem zawodowym 6 i więcej lat, obsługującym SZZW dostarczający wodę do 25 000 – 100 000 odbiorców.



**Rys. 8.1.** Lokalizacja ZUW na mapie województwa podkarpackiego, w których przeprowadzono badania niezawodności operatora

## 8.2. Charakterystyka przeprowadzonych badań

Przeprowadzenie badań niezawodności operatora wymaga pozyskania danych obejmujących określenie warunków organizacyjnych, środowiskowych oraz związanych z procesem pracy. W przedsiębiorstwach wodociągowych obecnie nie prowadzi się baz danych na ten temat. W celu oceny niezawodności operatora SZZW przeprowadzono badania ankietowe na grupie operatorów pracujących w 8 przedsiębiorstwach wodociągowych w regionie południowo-wschodniej Polski. Wykorzystano również opinie ekspertów w zakresie bezpieczeństwa dostaw wody i niezawodności SZZW. Dane zostały

zgrupowane w procesie ankietyzacji przeprowadzonym w okresie od czerwca do listopada 2021 za pośrednictwem Internetu, z wykorzystaniem Formularzy Google. W rozdziale *Załączniki* przedstawiono opracowany formularz ankietowy (Załącznik nr 1). Zawiera on metryczkę oraz zestaw pytań dostosowanych do wybranej metody oceny niezawodności operatora. Wyniki ankiet zestawiono w Załączniku nr 2.

Pierwszy etap badań zakładał ocenę wpływu zdarzeń awaryjnych z udziałem operatora na niezawodność SZZW. W tym celu wykorzystano metodę wielokryterialnego wspomaganie decyzji – FSAW (ang. Fuzzy Simple Additive Weighting). Metoda ta polega na ocenie przez ekspertów wariantów decyzyjnych według przyjętych kryteriów opisanych za pomocą przyjętych wag. Wynikiem analizy jest ranking wariantów decyzyjnych – uszeregowany od najlepszego do najgorszego wariantu. Poprzez zastosowanie rozmytej wersji metody wspomaganie decyzji wyeliminowano problem niepewności danych wejściowych. Analizę przeprowadzono z udziałem zespołu ekspertów, co pozwoliło na zminimalizowanie błędu wynikającego z subiektywizmu ocen. Na podstawie przeprowadzonej oceny wpływu zdarzeń awaryjnych z udziałem operatora na niezawodność SZZW określono najbardziej narażone elementy systemu, dla których należy przeprowadzić szczegółową ocenę niezawodności operatora.

W drugim etapie badań przeprowadzono ocenę niezawodności operatora w SZZW z podziałem na podsystemy. Wykorzystano metodę CREAM zmodyfikowaną przez zastosowanie teorii liczb rozmytych oraz sieci bayesowskich, co pozwoliło wyeliminować ograniczenia pierwotnej wersji metody. Metoda ta polega na ocenie 9 czynników CPC (ang. Common Performance Conditions), a następnie określeniu trybu kontroli operatora, na podstawie którego wyznacza się prawdopodobieństwo popełnienia błędu przez operatora – HEP (ang. Human Error Probability). Zaproponowano wykorzystanie trójkątnych i trapezowych liczb rozmytych przy ocenie czynników CPC i określeniu trybu kontroli. Opracowano sieć bayesowską odzwierciedlającą model współzależności między czynnikami CPC oraz zależności między nimi a trybem kontroli operatora. Ze względu na złożoność obliczeń zostały one wykonane z wykorzystaniem programu komputerowego GeNIe 3.0 firmy BayesFusion, LLC. Na podstawie otrzymanych wyników HEP wyznaczano wskaźnik gotowości operatora  $K_g$ .

Trzeci etap obejmował statystyczną analizę otrzymanych wyników. Wyznaczono podstawowe wielkości statystyczne, tj. wartość minimalną oraz maksymalną, wartość średnią, medianę, kwartył I i kwartył III oraz odchylenie standardowe wartości wskaźników niezawodności operatora  $K_g$  dla poszczególnych podsystemów SZZW. Z wykorzystaniem

testu Kruskala-Wallisa zbadano zależności między otrzymanymi wynikami a cechami społeczno-demograficznymi badanej grupy operatorów takimi jak wiek, wykształcenie, doświadczenie zawodowe oraz wielkość obsługiwanego SZZW.

W czwartym etapie zaprezentowano możliwości wykorzystania uzyskanych wyników. Przeprowadzono ocenę niezawodności dla wybranego podsystemu SZZW z uwzględnieniem wpływu działania operatora, co jest niewątpliwie nowym podejściem w ocenie niezawodności SZZW. W tym celu sporządzono schemat niezawodnościowy wybranego podsystemu, a w strukturach niezawodnościowych uwzględniono dodatkowy element odpowiadający operatorowi. Przeprowadzono ocenę niezawodności metodą jednoparametryczną i wyznaczono wskaźniki gotowości. Otrzymane wyniki porównano z literaturowymi wymaganymi poziomami wskaźnika gotowości w SZZW.

W ostatnim, piątym etapie badań przedstawiono ocenę możliwości zwiększenia niezawodności przebadanych operatorów. Na podstawie wyników badań oraz indywidualnych opinii operatorów wskazano możliwe działania naprawcze mające na celu zwiększenie niezawodności. Działania te przedstawiono w obrębie trzech grup czynników wpływających na poziom niezawodności operatora tj. czynników organizacyjnych, czynników środowiskowych oraz czynników związanych z procesem pracy.

### **8.3. Matematyczne podstawy teoretyczne**

#### **8.3.1. Liczby rozmyte**

Teoria logiki i zbiorów rozmytych została przedstawiona w 1965 r. przez L.A. Zadeha w pracy [130]. Autor przedstawił pojęcia m.in. zbiorów i liczb rozmytych, za pomocą których można matematycznie modelować wielkości nieprecyzyjne lub niepewne, co znalazło szerokie zastosowanie praktyczne w wielu dziedzinach nauki i techniki [47, 55, 133].

Z definicji zbiorem rozmytym  $A$  na uniwersum  $X$  nazywa się zbiór par  $A = ((x, \mu_A(x)): x \in X, \mu_A: X \rightarrow [0,1])$ , gdzie  $\mu_A$  jest funkcją przynależności zbioru rozmytego  $A$ , która każdemu elementowi  $x \in X$  przypisuje jego stopień przynależności do zbioru rozmytego  $A$  [130]. Zbiór rozmyty może charakteryzować się normalnością i wypukłością. Zbiór rozmyty  $A$  jest normalny, gdy  $\exists x \in R: \mu_A(x) = 1$  [24], natomiast wypukły jeśli  $\forall x_1, x_2 \in R, \forall \lambda \in [0,1]: \mu_A(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \min(\mu_A(x_1), \mu_A(x_2))$  [133].

Liczba rozmyta  $A$  jest wypukłym, normalnym zbiorem rozmytym określonym na uniwersum liczb rzeczywistych ( $X = \mathbb{R}$ ), takim, że  $\exists! x_0 \in \mathbb{R}: \mu_A(x_0) = 1$ , a funkcja przynależności  $\mu_A$  jest kawałkami ciągła [24, 133]. Dubois i Prade przedstawili formę prezentacji liczb rozmytych typu LR, opartą na funkcjach odniesienia [24]. Funkcją odniesienia  $L$  nazwiemy funkcję nierosnącą w przedziale  $[0, +\infty]$  spełniającą warunek  $L(-x) = L(x)$  oraz  $L(0) = 1$  [48]. Liczba rozmyta  $A$  typu LR można opisać za pomocą funkcji przynależności o postaci [24]:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} L\left(\frac{m_A - x}{\alpha_A}\right) & \text{gdy } x \leq m_A \\ R\left(\frac{x - m_A}{\beta_A}\right) & \text{gdy } x \geq m_A \end{cases} \quad (8.1)$$

gdzie:

- $L, R$  – funkcje odniesienia,
- $m_A$  – wartość średnia,  $\mu_A(m_A) = 1$ ,
- $\alpha_A$  – rozrzut lewostronny,  $\alpha_A \in \mathbb{R}, \alpha_A > 0$ ,
- $\beta_A$  – rozrzut prawostronny,  $\beta_A \in \mathbb{R}, \beta_A > 0$ .

Liczbę rozmytą  $A$  typu LR można opisać za pomocą trzech parametrów funkcji przynależności  $m_A, \alpha_A, \beta_A$  [24]:

$$A = (m_A; \alpha_A; \beta_A) \quad (8.2)$$

Dzięki uproszczeniu zapisu operacje matematyczne na liczbach rozmytych sprowadzają się do operacji na tych trzech parametrach [47]. Dla przykładu suma dwóch liczb rozmytych  $S = (m_S, \alpha_S, \beta_S)$  i  $Z = (m_Z, \alpha_Z, \beta_Z)$  ma postać (8.3), a iloczyn liczby rozmytej  $S$  oraz liczby rzeczywistej  $r$  ma postać (8.4) [47]:

$$S + Z = (m_S + m_Z; \alpha_S + \alpha_Z; \beta_S + \beta_Z) \quad (8.3)$$

$$r \cdot S = (r \cdot m_S; r \cdot \alpha_S; r \cdot \beta_S) \quad (8.4)$$

Jeśli funkcja przynależności przyjmuje wartość 1 dla większej liczby argumentów, wtedy liczba rozmyta  $A$  typu LR staje się przedziałem rozmytym  $B$  typu LR, przyjmującym postać (8.5) oraz (8.6) [48]. Operacje matematyczne na przedziałach rozmytych typu LR można przeprowadzić analogicznie jak na liczbach rozmytych typu LR [48].

$$\mu_B(x) = \begin{cases} L\left(\frac{m_B - x}{\alpha_B}\right) & \text{gdy } x \leq m_B \\ 1 & \text{gdy } m_B \leq x \leq n_B \\ R\left(\frac{x - n_B}{\beta_B}\right) & \text{gdy } x \geq n_B \end{cases} \quad (8.5)$$

$$B = (m_B; n_B; \alpha_B; \beta_B) \quad (8.6)$$

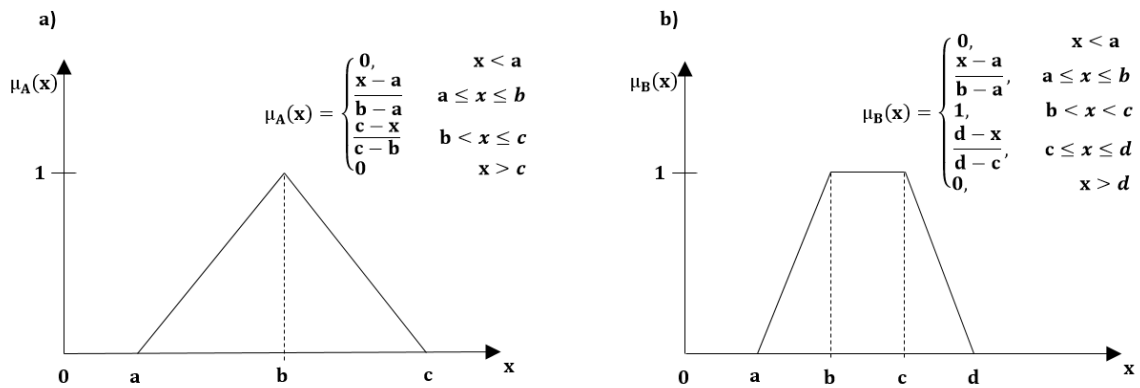
Funkcje odniesienia mogą przyjmować różne postacie [24, 130, 133]. W przypadku gdy przyjmują postać funkcji liniowej w odniesieniu do liczb i przedziałów rozmytych typu LR, mówimy o liczbach rozmytych trójkątnych i trapezowych [24, 47]. Liczby rozmyte trójkątne opisuje się trójką liczb rzeczywistych  $A = (a, b, c)$ , gdzie  $a = m_A - \alpha_A$ ,  $b = m_A$ ,  $c = m_A + \beta_A$ . Funkcja przynależności trójkątnych liczb rozmytych przyjmuje postać [47]:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x - a}{b - a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c - x}{c - b}, & b < x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases} \quad (8.7)$$

Liczby rozmyte trapezowe opisuje się za pomocą czwórki liczb rzeczywistych  $B = (a, b, c, d)$ , gdzie  $a = m_B - \alpha_B$ ,  $b = m_B$ ,  $c = n_B$ ,  $d = n_B + \beta_B$ . Funkcja przynależności trapezowych liczb rozmytych przyjmuje postać [47]:

$$\mu_B(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x - a}{b - a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b < x < c \\ \frac{d - x}{d - c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & x > d \end{cases} \quad (8.8)$$

Na rysunku 8.2 przedstawiono graficzną prezentację przykładowych trójkątnych i trapezowych liczb rozmytych.



**Rys. 8.2.** Funkcje przynależności liczb rozmytych: a) trójkątnej  $A = (a, b, c)$ , b) trapezowej  $B = (a, b, c, d)$  (opracowanie własne)

Procesem odwrotnym do fuzyfikacji liczb jest defuzyfikacja. Polega ona na przekształceniu liczby z postaci rozmytej do postaci ostrej. W literaturze przedstawiono szereg narzędzi służących defuzyfikacji liczb rozmytych [24, 47, 55, 133]. Jedną z najpopularniejszych metod defuzyfikacji jest metoda polegająca na wyznaczeniu środka ciężkości (ang. COG – Center of Gravity) figury uzyskanej pod funkcją przynależności według zależności [55]:

$$B_0 = \frac{\int x \cdot \mu_B(x) dx}{\int \mu_B(x) dx} \quad (8.9)$$

gdzie:

- $x$  – element zbioru rzeczywistego,  $x \in \mathbb{R}$ ,
- $\mu_B(x)$  – funkcją przynależności, która każdemu elementowi  $x \in \mathbb{R}$  przypisuje jego stopień przynależności do zbioru rozmytego  $B$ .

Teoria liczb rozmytych w niniejszej rozprawie znalazła zastosowanie podczas oceny wpływu zdarzeń awaryjnych z udziałem operatora na niezawodność SZZW z wykorzystaniem metody FSAW (rozdział 8.4) oraz do modyfikacji metody oceny niezawodności operatora CREAM (rozdział 8.5).

### 8.3.2. Twierdzenie Bayesa i sieci bayesowskie

Podstawy wnioskowania bayesowskiego ukształtowane zostały w XVIII wieku przez angielskiego matematyka Thomasa Bayesa [30]. Wnioskowanie bayesowskie to metoda wnioskowania statystycznego w oparciu o wzór Bayesa. Umożliwia aktualizację prawdopodobieństwa „a posteriori” badanej hipotezy naukowej w oparciu o napływające nowe dane z doświadczenia i jej dotychczasowego prawdopodobieństwa „a priori” [30].

Wyprowadzenie twierdzenia Bayesa należy rozpocząć od definicji prawdopodobieństwa warunkowego. Prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia A pod warunkiem zajścia zdarzenia B określa wzór [11]:

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (8.10)$$

Przy założeniu, że  $P(A) > 0$ , analogicznie można opisać prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia B pod warunkiem zajścia zdarzenia A [11]:

$$P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} \quad (8.11)$$

Przekształcając wzory (8.9) i (8.10) otrzymujemy zależność [11]:

$$P(A|B) \cdot P(B) = P(A \cap B) = P(B|A) \cdot P(A) \quad (8.12)$$

Dzieląc stronami powyższe równanie przez  $P(B)$ , przy założeniu, że  $P(B) > 0$  otrzymujemy twierdzenie Bayesa [11]:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)} \quad (8.13)$$

gdzie:

- $P(A|B)$  – prawdopodobieństwo warunkowe zajścia zdarzenia A pod warunkiem zajścia zdarzenia B („a posteriori”),
- $P(B|A)$  – prawdopodobieństwo warunkowe zajścia zdarzenia B pod warunkiem zajścia zdarzenia A,
- $P(A)$  – prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia A („a priori”),
- $P(B)$  – prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia B („a priori”).

Wersja twierdzenia Bayesa dla wielu zdarzeń przyjmuje postać równania (8.14) przy założeniu że zdarzenia  $A_1, \dots, A_n$  oraz B spełnią warunki  $P(B) > 0$ ,  $B \subset \bigcup_{i=1}^n A_i$  i  $A_i \cap A_j = \emptyset$  ( $i \neq j$ ), tzn. zdarzenia  $A_i$  są zdarzeniami parami rozłącznymi, a przestrzeń zdarzenia B zawiera się w sumie przestrzeni zdarzeń  $A_i$  [11].

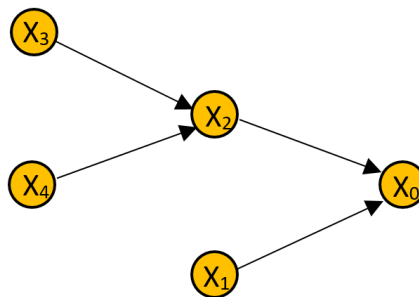
$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i) \cdot P(A_i)}{\sum_{i=1}^n P(B|A_i) \cdot P(A_i)} \quad (8.14)$$

Twierdzenie Bayesa jest również podstawą dla sieci bayesowskich. Obrazuje się je za pomocą skierowanych acyklicznych grafów. Sieć bayesowska służy do graficznego przedstawienia modelu probabilistycznego dla grupy zmiennych losowych



oraz zależności między nimi [41]. Ma ona wiele zastosowań, m.in. w sztucznej inteligencji, medycynie, genetyce, statystyce, ekonomii oraz inżynierii środowiska [27, 30, 33, 41, 71, 109, 110, 112]. Siecią bayesowską nazywamy parę  $(D, P)$ , gdzie  $D$  jest skierowanym grafem acyklicznym, a  $P$  rozkładem prawdopodobieństwa. Sieć zbudowana jest z wierzchołków, reprezentujących zmienne losowe, oraz łuków skierowane reprezentujące zależności pomiędzy kolejnymi zmiennymi [41]. Jeśli zmienna  $X_j$  ma wpływ na zmienną  $X_i$ , to istnieje łuk obrazujący tę zależność wychodzący z wierzchołka  $X_j$  i wchodzący do wierzchołka  $X_i$ . Wierzchołek  $X_i$  jest wtedy nazywany „rodzicem” wierzchołka  $X_j$ . Każdy z wierzchołków w sieci przechowuje rozkład  $P(X_i|X_{\pi(i)})$  gdzie  $X_{\pi(i)}$  jest zbiorem wierzchołków odpowiadających  $\pi(i)$  rodzicom wierzchołka  $i$  [41]. Wartości prawdopodobieństwa warunkowego przechowywane w każdym z wierzchołków tworzą tablicę prawdopodobieństw warunkowych (TPW). Przykładową sieć bayesowską przedstawiono na rysunku 8.3. Rozkład prawdopodobieństwa wszystkich zmiennych losowych w sieci opisuje zależność [14, 41, 109]:

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i|X_{\pi(i)}) \quad (8.15)$$



**Rys. 8.3.** Przykładowa sieć bayesowska

Dla przedstawionej na rysunku 8.3 sieci Bayesa zależność (8.15) przyjmuje postać (8.16).

$$P(X_0, X_1, X_2, X_3, X_4) = P(X_0|X_1, X_2) \cdot P(X_1) \cdot P(X_2|X_3, X_4) \cdot P(X_3) \cdot P(X_4) \quad (8.16)$$

Wartości prawdopodobieństwa dla poszczególnych zmiennych można wyznaczyć wykorzystując metodę wnioskowania przez wyliczenie (ang. inference by enumeration) [14, 41]. Załóżmy, że pośród badanych zmiennych wyróżnimy zmienna  $Q$ , zależną od zmiennych  $E_1, E_2, \dots, E_k$  oraz pozostałe zmienne  $H_1, H_2, \dots, H_r$ . Prawdopodobieństwo łączne dla zmiennych  $Q$  oraz  $E_1, E_2, \dots, E_n$  wyrażone jest wzorem [14, 41]:

$$P(Q, E_1, E_2, \dots, E_k) = \sum_{h_1 \dots h_r} P(Q, H_1 H_2, \dots, H_r, E_1, E_2, \dots, E_k) \quad (8.17)$$

Prawdopodobieństwa dla zmiennych posiadających rodziców tj.  $X_0$  i  $X_2$  można wyznaczyć według zależności (8.18) i (8.19) na podstawie zależności (8.15), (8.16) oraz (8.17). Pozostałe zmienne  $X_1$ ,  $X_3$  i  $X_4$  nie są zależne od innych zmiennych i opisane są za pomocą prawdopodobieństwa przyjęcia przez nie poszczególnych wartości. Dla przedstawionej na rysunku 8.3 sieci występują zależności między zmiennymi:  $\pi(X_0)=(X_1, X_2)$ ,  $\pi(X_1)=(\emptyset)$ ,  $\pi(X_2)=(X_3, X_4)$ ,  $\pi(X_3)=(\emptyset)$ ,  $\pi(X_4)=(\emptyset)$ .

$$P(X_0, X_1, X_2) = \sum_{X_1} \sum_{X_2} P(X_0|X_1, X_2) \cdot P(X_1) \cdot P(X_2) \quad (8.18)$$

$$P(X_2, X_3, X_4) = \sum_{X_3} \sum_{X_4} P(X_2|X_3, X_4) \cdot P(X_3) \cdot P(X_4) \quad (8.19)$$

Po rozpisaniu powyższych zależności prawdopodobieństwo  $P(X_0)$  oraz  $P(X_2)$  w przykładowej sieci przedstawionej na rysunku 8.3 przyjmuje następujące wartości (przy założeniu, że dla danej zmiennej  $X_i = 1$  – zdarzenie zachodzi, a dla  $X_i = 0$  – zdarzenie nie zachodzi).

$$\begin{aligned} P(X_0=1) &= P(X_0=1|X_1=1, X_2=1) \cdot P(X_1=1) \cdot P(X_2=1) + \\ &+ P(X_0=1|X_1=1, X_2=0) \cdot P(X_1=1) \cdot P(X_2=0) + \\ &+ P(X_0=1|X_1=0, X_2=1) \cdot P(X_1=0) \cdot P(X_2=1) + \\ &+ P(X_0=1|X_1=0, X_2=0) \cdot P(X_1=0) \cdot P(X_2=0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(X_2=1) &= P(X_2=1|X_3=1, X_4=1) \cdot P(X_3=1) \cdot P(X_4=1) + \\ &+ P(X_2=1|X_3=1, X_4=0) \cdot P(X_3=1) \cdot P(X_4=0) + \\ &+ P(X_2=1|X_3=0, X_4=1) \cdot P(X_3=0) \cdot P(X_4=1) + \\ &+ P(X_2=1|X_3=0, X_4=0) \cdot P(X_3=0) \cdot P(X_4=0) \end{aligned}$$

Za pomocą sieci bayesowskich zmodyfikowano w niniejszej rozprawie metodę oceny niezawodności operatora CREAM co przedstawiono w rozdziale 8.5.

## 8.4. Metoda wielokryterialnego wspomaganie decyzji Fuzzy Simple Additive Weighting (FSAW)

### 8.4.1. Charakterystyka metody wielokryterialnego wspomaganie decyzji Fuzzy Simple Additive Weighting (FSAW)

Klasyczna metoda SAW (ang. Simple Additive Weighting) jest jedną z najczęściej wykorzystywanych dyskretnych metod wielokryterialnych wspomaganie decyzji [44, 46, 80]. Dzięki swojej charakterystyce jest ona szeroko stosowana m.in. w branży budowlanej, medycynie oraz logistyce [45]. W metodzie tej wyznacza się dla każdego wariantu decyzyjnego kombinację liniową znormalizowanych wartości elementów tworzących macierz decyzyjną oraz wektor wag [44-46]. Najlepszym wariantem decyzyjnym jest ten, dla którego kombinacja ta przyjmuje największą wartość. W klasycznych metodach wielokryterialnych wspomaganie decyzji przyjmuje się, że oceny wariantów względem kryteriów oraz wagi kryteriów są wyrażone za pomocą liczby rzeczywistych [44]. Wykorzystanie takich metod w warunkach rzeczywistych często nie jest możliwe, ze względu na charakter kryteriów, których oceny mogą mieć postać lingwistyczną (szczególnie w przypadku kryteriów jakościowych). Jednym z możliwych rozwiązań tego problemu jest zastosowanie liczb rozmytych do oceny wariantów decyzyjnych lub ustalenia wag poszczególnych kryteriów [44, 46]. Zmodyfikowana wersja klasycznej metody SAW wykorzystująca liczby rozmyte nosi nazwę FSAW (ang. Fuzzy Simple Additive Weighting) [46, 80]. W metodzie tej podobnie jak w przypadku klasycznej metody SAW tworzy się macierz decyzyjną (8.20), na którą składają się oceny wariantów decyzyjnych (należących do zbioru  $[A_1, A_2, \dots, A_m]$ ) względem zadanych kryteriów (należących do zbioru  $[K_1, K_2, \dots, K_n]$ ), przy czym oceny te przyjmują wartości liczb rozmytych  $B_{ij}$ , opartych na funkcjach przynależności trójkątnych, trapezowych lub gaussowskich [44-46, 80].

$$X = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1n} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{m1} & B_{m2} & \cdots & B_{mn} \end{bmatrix} \quad (8.20)$$

gdzie:

-  $B_{ij}$  – ocena i-tego wariantu decyzyjnego  $A_i$  ( $i=1,2,\dots,m$ ) ze względu na kryterium  $K_j$  ( $j = 1,2,\dots,n$ ) w postaci liczby rozmytej.

W modelu decyzyjnym FSAW, oprócz macierzy decyzyjnej występuje wektor wag (8.21), na który składają się wagi poszczególnych kryteriów [44-46, 80]. Wartości wag określane są na podstawie ocen ekspertów i mogą przyjmować wartości ostre, bądź rozmyte [44-46].

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_n) \quad (8.21)$$

gdzie:

-  $w_j$  – waga j-tego kryterium  $K_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ), spełniająca zależność (3):

$$w_1 + w_2 + \dots + w_j = 1 \quad (8.22)$$

Kolejnym etapem w przypadku klasycznej metody SAW jest normalizacja macierzy decyzyjnej oraz jej kombinacja z wektorem wagowym w celu uzyskania funkcji agregującej, której wartość dla każdego wariantu po uszeregowaniu od największej do najmniejszej tworzy ranking preferowanych rozwiązań decyzyjnych [46, 47, 80]. W przypadku metody FSAW w literaturze wyszczególniono kilka różnych podejść do wyznaczenia funkcji agregującej na podstawie liczb rozmytych  $B_{ij}$  oraz ostrych wag kryteriów  $w_j$  [44-47]. Jedną z popularniejszych metod wyznaczenia funkcji agregacyjnej jest wykorzystanie podejścia Bonissone'a, polegające na pominięciu normalizacji liczb rozmytych w macierzy decyzyjnej, a wykorzystujące operacje arytmetyczne na liczbach rozmytych typu LR. Funkcja agregacyjna przyjmuje postać (8.23) [46]:

$$FS_f(A_i) = \sum_{n=1}^N w_j \cdot B_{ij} \quad (8.23)$$

gdzie:

- $A_i$  – i-ty wariant decyzyjny,
- $w_j$  – waga j-tego kryterium w postaci liczby ostrej (lub rozmytej),
- $x_{ij}$  – ocena i-tego wariantu decyzyjnego, względem j-tego kryterium w postaci liczby rozmytej.

Otrzymane w ten sposób wyniki w postaci liczb rozmytych dają jedynie ogólny pogląd na ocenę wariantów decyzyjnych [46]. W celu stworzenia rankingu preferowanych wariantów decyzyjnych należy przeprowadzić defuzyfikację liczb rozmytych oraz uszeregować je od największej do najmniejszej [44-47, 80].

### 8.4.2. Metoda oceny wpływu zdarzeń awaryjnych z udziałem operatora na niezawodność systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę

W celu oceny wpływu zdarzeń awaryjnych z udziałem operatora na niezawodność SZZW wykorzystano metodę FSAW. Wynikiem analizy będzie ranking zdarzeń awaryjnych z udziałem operatora, uszeregowanych od mających największy wpływ na niezawodności SZZW do mających najmniejszy wpływ na niezawodność SZZW.

Na potrzeby wykorzystania metody FSAW, do oceny awarii związanych z działaniem operatora na niezawodność SZZW, jako warianty decyzyjne przyjęto 5 reprezentatywnych scenariuszy awarii. Za kryteria oceny przyjęto zadania SZZW wynikające z definicji jego niezawodności tj. oceniano wpływ poszczególnego zdarzenia na realizację zadań w postaci dostarczenia wody o odpowiedniej ilości, dostarczenia wody o odpowiedniej jakości oraz dostarczenia wody pod odpowiednim ciśnieniem. Uznano, że awarie, mają charakter incydentalny i nie mają znaczącego wpływu na poziom ceny wody, natomiast zapis „w dowolnej chwili” odnosi się ogólnie do wszystkich wymienionych zadań, dlatego te dwa składniki zostały odrzucone z grupy przyjętych kryteriów. W tabeli 8.1 przedstawiono zbiór ocenianych wariantów, natomiast w tabeli 8.2 przedstawiono zbiór kryteriów oceny oraz ich wag. Wagi poszczególnych kryteriów ustalono jako średnią arytmetyczną ocen ekspertów biorących udział w badaniu.

**Tabela 8.1.** Oceniane warianty (zdarzenia awaryjne)

Lp.	Opis wariantu
A <sub>1</sub>	Awaria uzbrojenia na ujęciu wody surowej (Awaria w PsUjW)
A <sub>2</sub>	Awaria pomp I stopnia (Awaria w PsPoW)
A <sub>3</sub>	Awaria urządzeń i obiektów uzdatniania wody (Awaria w PsUzW)
A <sub>4</sub>	Awaria pomp II stopnia (Awaria w PsPoW)
A <sub>5</sub>	Awaria uzbrojenia zbiorników wodociągowych (Awaria w PsMaW)

**Tabela 8.2.** Kryteria oceny wariantów oraz ich wagi

Lp.	Kryterium	Waga kryterium	
		w <sub>1</sub>	0,34
K <sub>1</sub>	Dostarczenie do konsumenta wody w odpowiedniej ilości	w <sub>1</sub>	0,34
K <sub>2</sub>	Dostarczenie do konsumenta wody o odpowiedniej jakości	w <sub>2</sub>	0,51
K <sub>3</sub>	Dostarczenie do konsumenta wody pod odpowiednim ciśnieniem	w <sub>3</sub>	0,15

Oceny wariantów według przedstawionych kryteriów przeprowadzono w grupie 4 ekspertów zajmujących się naukowo tematyką bezpieczeństwa dostaw wody i niezawodnością SZZW. Ze względu na brak możliwości oceny za pomocą precyzyjnych wartości, wykorzystano ocenę za pomocą zmiennych lingwistycznych, które następnie poddano modelowaniu za pomocą liczb rozmytych. W tym celu eksperci oceniali wpływ

każdego wariantu na spełnienie kryteriów za pomocą 5-stopniowej skali lingwistycznej przedstawionej w tabeli 8.3. Zmiennym lingwistycznym przyporządkowano parametry funkcji przynależności trapezowych liczb rozmytych według pracy [68].

**Tabela 8.3.** Skala ocen wraz z przyporządkowaną funkcją przynależności (na podstawie [68])

Poziom wpływ i-tego zdarzenia awaryjnego na spełnienie j-tego kryterium (opis lingwistyczny)	Parametry funkcji przynależności trapezowej liczby rozmytej
bardzo mały	(0,0,1,2)
mały	(1,2,3,4)
przeciętny	(3,4,6,7)
duży	(6,7,8,9)
bardzo duży	(8,9,10,10)

## 8.5. Metoda analizy niezawodności operatora Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)

### 8.5.1. Charakterystyka konwencjonalnej metody Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)

Metoda CREAM (ang. Cognitive Reliability and Error Analysis Methods) bazuje na modelu procesów poznawczych COCOM (ang. Contextual Control Model), który opisuje zależności między funkcjami poznawczymi zachodzącymi w umyśle człowieka [36]. W uproszczeniu model ten zakłada, że każde działanie człowieka wynika z kontrolowanego procesu wykorzystania posiadanych kompetencji w zależności od wymagań danej sytuacji. Działania podejmowane przez człowieka mają również charakter intencjonalny oraz reaktywny. Kontrola człowieka nad podejmowanymi działaniami może płynnie zmieniać swój poziom – od jej całkowitego braku, aż do pełnej kontroli. Wg. modelu COCOM w tym spektrum można wyróżnić cztery kategorie poziomów kontroli, zwane trybami kontroli [36]:

- *Tryb kontroli chaotyczny (ang. Scrambled Control Mode)* – tryb charakteryzuje sytuacje, w których operator poświęca niewiele uwagi na planowanie kolejnych działań lub nie planuje ich wcale. Podejmuje je w sposób losowy, nieplanowany. Najczęściej dotyczy to sytuacji nieznanej, gdy operator traci możliwość logicznego myślenia, nie analizuje możliwych rozwiązań i skutków podejmowanych działań, ulega panice.
- *Tryb kontroli sytuacyjny (ang. Opportunistic Control Mode)* – operator podejmuje kolejne działania w oparciu o chwilowy stan systemu, z pominięciem realizacji nadrzędnego celu zadania. Najczęściej dotyczy to sytuacji, w których występują ograniczenia czasowe lub operator nie potrafi odpowiednio zinterpretować chwilowego stanu systemu.
- *Tryb kontroli taktyczny (ang. Tactical Control Mode)* – operator podejmuje kolejne działania według znanych mu procedur lub planów. W przypadku wystąpienia sytuacji nieznanej, kolejne działanie podejmuje on po przeanalizowaniu parametrów eksploatacyjnych systemu oraz kontekstu sytuacji, przy czym działanie to bazuje na znanych mu wzorcach.
- *Tryb kontroli strategiczny (ang. Strategic Control Mode)* – operator podejmuje działania w sposób przemyślany i zaplanowany, znając ich skutki. Na uwadze ma przede wszystkim realizację nadrzędnego celu zadania. Operator posiada dużą wiedzę i doświadczenie.

Każdy z trybów kontroli jest opisany przez wartości prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora HEP, które zmniejszają się wraz ze wzrostem poziomu kontroli działania operatora [36]. Wartości te zostały przedstawione w tabeli 8.4.

**Tabela 8.4.** Zależność trybu kontroli i wartości HEP (na podstawie [36])

Tryb kontroli	Prawdopodobieństwo popełnienia błędu - HEP
chaotyczny	$10^{-1} < P < 1$
sytuacyjny	$1 \cdot 10^{-2} < P < 5 \cdot 10^{-1}$
taktyczny	$1 \cdot 10^{-3} < P < 1 \cdot 10^{-1}$
strategiczny	$5 \cdot 10^{-6} < P < 1 \cdot 10^{-2}$

Istotą metody jest wyznaczenie wartości HEP na podstawie trybu kontroli działania operatora. W tym celu należy ocenić 9 czynników CPC, których wpływ na niezawodność operatora może być pozytywny (zwiększa się poziom niezawodności), negatywny (zmniejsza się poziom niezawodności) lub nieokreślony [36]. W tabeli 8.5 przedstawiono czynniki CPC, wraz z ich opisem, określenia sposobu oceny oraz przedstawieniem ich wpływu na poziom niezawodności. Czynniki CPC są względem siebie współzależne według modelu przedstawionego przez E. Hollnagel w pracy [36]. Rozróżnia się dwa typy zależności: proporcjonalne (wzrostowi czynnika A odpowiada wzrost czynnika B) i odwrotnie proporcjonalne (wzrost czynnika A powoduje spadek czynnika B) [36]. Zależności te przedstawiono na rysunku 8.4.

Czynnik CPC	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Organizacja pracy	Warunki pracy	Jakość interfejsu człowiek - maszyna	Dostępność procedur/planów	Liczba jednocześnie wykonywanych zadań	Ilość czasu na wykonanie zadania	Pora dnia	Kwalifikacje i doświadczenie	Współpraca zespołu
1 Organizacja pracy									
2 Warunki pracy	+		+			+	+	+	
3 Jakość interfejsu człowiek - maszyna	+								
4 Dostępność procedur/planów	+								
5 Liczba jednocześnie wykonywanych zadań		-	-	-					
6 Ilość czasu na wykonanie zadania		+	+	+	-		+		+
7 Pora dnia									
8 Kwalifikacje i doświadczenie	+								
9 Współpraca zespołu	+							+	

Legenda: + współzależność proporcjonalna  
- współzależność odwrotnie proporcjonalna

**Rys. 8.4.** Współzależności czynników CPC (na podstawie [36])



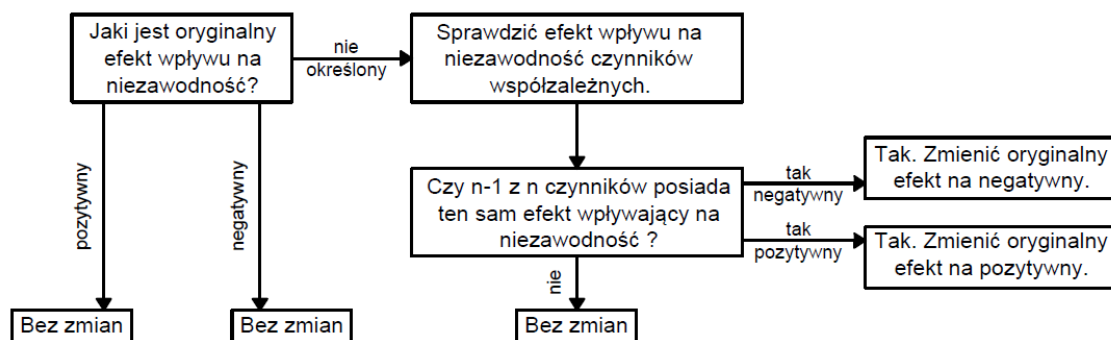
**Tabela 8.5.** Czynniki CPC (na podstawie [36])

Lp.	Nazwa CPC	Opis	Poziom	Wpływ na niezawodność
1	Organizacja pracy	Odpowiedni podział ról i zadań między członków zespołu, system komunikacji, instrukcje operacyjne itd.	bardzo efektywna	pozytywny
			efektywna	nie określony
			nieefektywna	negatywny
			bardzo nieefektywna	negatywny
2	Warunki pracy	Fizyczne uwarunkowania środowiska pracy: oświetlenie, odbicia światła, głośność alarmów itd.	korzystne	pozytywny
			odpowiednie	nie określony
			niekorzystne	negatywny
3	Jakość interfejsu człowiek - maszyna	Ogólna ocena jakości interfejsu człowiek - maszyna: ilość informacji dostępnych na panelu kontrolnym, stanowiskach skomputeryzowanych itd.	efektywna	pozytywny
			odpowiednia	nie określony
			tolerowalna	nie określony
			nieodpowiednia	negatywny
4	Dostępność procedur/planów	Procedury i plany zawierające schematy postępowania itd.	odpowiednia	pozytywny
			akceptowalna	nie określony
			nieakceptowalna	negatywny
5	Liczba jednocześnie wykonywanych zadań	Liczba zadań wykonywanych przez jedną osobę w tym samym czasie.	nieprzekraczająca aktualnych możliwości	nie określony
			odpowiadająca aktualnym możliwościom	nie określony
			przekraczająca aktualne możliwości	negatywny
6	Ilość czasu na wykonanie zadania	Ilość czasu przeznaczona na wykonanie zadania.	odpowiednia	pozytywny
			sporadycznie nieodpowiednia	nie określony
			ciągle nieodpowiednia	negatywny
7	Pora dnia	Pora dnia kiedy zadanie jest wykonywane.	pora dzienna	nie określony
			pora nocna	negatywny
8	Kwalifikacje i doświadczenie	Poziom i jakość wykszolenia pracownika (znajomość nowoczesnych technologii, ćwiczenia okresowe itd.). Czynniki ten uwzględnia również doświadczenie zawodowe.	odpowiednie, duże doświadczenie	pozytywny
			odpowiednie, ograniczone doświadczenie	nie określony
			nieodpowiednia	negatywny
9	Współpraca zespołu	Uwzględnia oficjalne i nieoficjalne zależności, poziom zaufania oraz ogólne stosunki społeczne pomiędzy członkami zespołu.	bardzo wydajna	pozytywny
			wydajna	nie określony
			niewydajna	nie określony
			bardzo niewydajna	negatywny

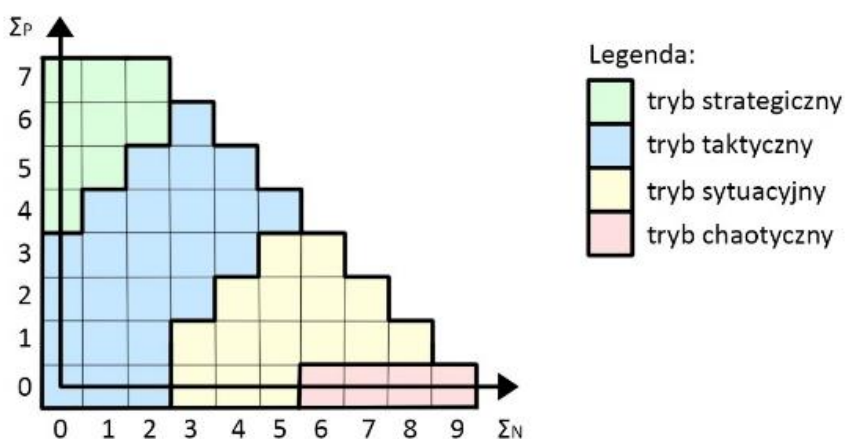
Przeprowadzenie oceny niezawodności operatora za pomocą klasycznej metody CREAM możemy podzielić na trzy etapy:

- *Wybór i opis przedmiotu analizy* – zastosowanie metody CREAM wymaga identyfikacji zdarzeń lub scenariuszy pracy systemu, których prawidłowość wykonania zależy od działań operatora. Wybrane zdarzenie lub scenariusz należy opisać, z uwzględnieniem odpowiedniej liczby detali, charakteryzujących poszczególne jego etapy. Szczegółowość opisu przedmiotu analizy wpływa na jakość przeprowadzanej analizy. Opis zadania może być wykonany w formie osi czasu lub drzewa zdarzeń [36].
- *Ocena czynników CPC* – dla analizowanego zdarzenia lub scenariusza należy przeprowadzić ocenę czynników CPC według kryteriów przedstawionych w tabeli 8.5 oraz przeanalizować ich wpływ na poziom niezawodności operatora. Jeżeli w pierwszym etapie oceny czynników CPC uzyskany wynik posiada „nieokreślony” wpływ na poziom niezawodności operatora, należy sprawdzić wpływ czynników współzależnych. Jeśli  $n-1$  z  $n$  czynników współzależnych posiada jednakowy wpływ na poziom niezawodności operatora (pozytywny lub negatywny) należy skorygować „nieokreślony” poziom wpływu na niezawodność zgodnie z wpływem  $n-1$  czynników współzależnych [36]. Z rysunku 8.4 wynika, że tylko 4 spośród 9 czynników CPC zależą od więcej niż jednego czynnika i należy rozważyć korektę ich wpływu na poziom niezawodności operatora. Czynnikiemami tymi są: warunki pracy, liczba jednocześnie wykonywanych zadań, ilość czasu na wykonanie zadania oraz współpraca zespołu. Procedurę korekty poziomu wpływu czynnika CPC na niezawodność operatora przedstawiono na rysunku 8.5. Po przeprowadzeniu korekty należy wyznaczyć sumaryczny wynik oceny czynników CPC przedstawiony w postaci macierzy  $[\Sigma_N; \Sigma_0; \Sigma_P]$ , gdzie  $(\Sigma_N)$  określa liczbę czynników posiadających negatywny wpływ na poziom niezawodności operatora,  $(\Sigma_0)$  określa liczbę czynników posiadających nieokreślony wpływ na poziom niezawodności operatora,  $(\Sigma_P)$  określa liczbę czynników wpływających pozytywnie na poziom niezawodności operatora [36].
- *Określenie wartości HEP* – w tym celu należy określić tryb kontroli działania operatora, w oparciu o sumaryczny wynik oceny czynników CPC. Na rysunku 8.6 przedstawiono zależności pomiędzy wynikiem sumarycznym oceny czynników CPC, a trybem kontroli. Istnieją 52 możliwe kombinacje wyniku, najkorzystniejsza  $[0,2,7]$  oznacza, że czynników wpływających negatywnie na niezawodność operatora jest 0, czynników o wpływie nieokreślonym – 2, natomiast 7 z czynników ma wpływ pozytywny;

najbardziej niekorzystnym wynikiem możliwym do uzyskania jest kombinacja [9,0,0], gdzie wszystkie 9 ocenianych czynników CPC wykazuje negatywny wpływ na niezawodność operatora [36].

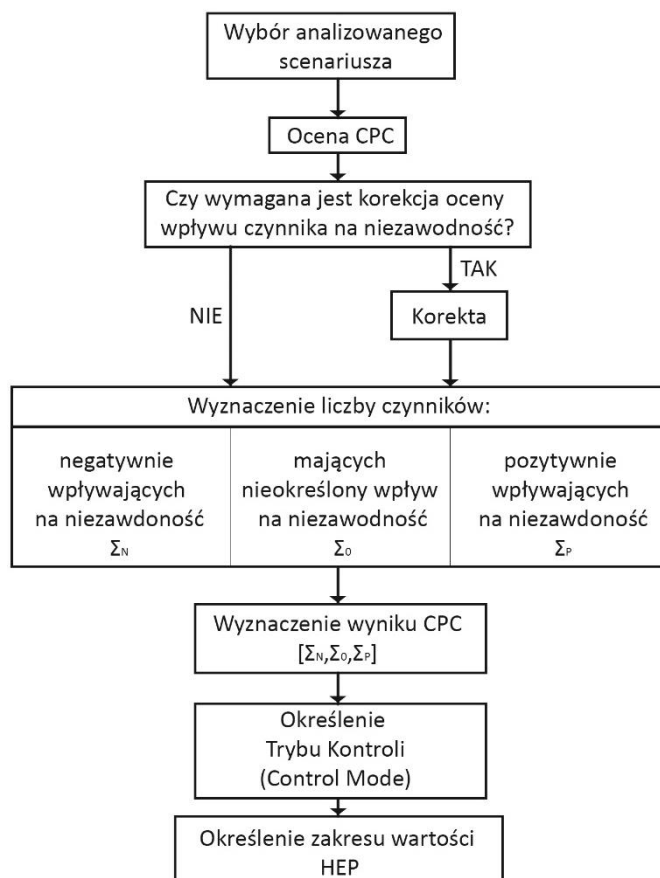


**Rys. 8.5.** Zasady korekty poziomu wpływu na niezawodność operatora dla współzależnych czynników CPC (na podstawie [36])



**Rys. 8.6.** Zależność między sumarycznym wynikiem oceny czynników CPC, a trybem kontroli działania operatora (na podstawie [36])

Schemat przeprowadzenia oceny niezawodności operatora za pomocą konwencjonalnej metody CREAM przedstawiono na rysunku 8.7.



**Rys. 8.7.** Konwencjonalny proces oceny niezawodności operatora metodą CREAM

Metoda oceny niezawodności operatora CREAM pozwala na przeprowadzenie analizy w wariacie retrospektywnym, który umożliwia badanie wpływu działania operatora na rozwój rzeczywistego scenariusza sytuacji awaryjnej oraz w wariacie predykcyjnym, pozwalającym szacować prawdopodobieństwo błędu operatora dla potencjalnych scenariuszy sytuacji awaryjnych. Metoda CREAM znalazła zastosowanie w przemyśle nuklearnym, przemyśle kosmicznym, transporcie morskim, medycynie [8, 19, 132]. Ekspertki zwracają uwagę na niedoskonałości i ograniczenia tej metody, wskazując najczęściej uzyskanie wyników w postaci przedziału wartości HEP, ograniczony model współzależności czynników CPC oraz zależności między sumarycznym wynikiem oceny czynników CPC a trybami kontroli [18, 23, 127, 128, 132].

### 8.5.2. Metoda oceny niezawodności operatora systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę

Największe problemy związane z zastosowaniem metody CREAM dotyczą przede wszystkim danych wejściowych, które często są niepełne lub nieprecyzyjne ze względu na złożoność działania operatora [2, 4, 18, 128, 132]. Problem ten można rozwiązać przez zastosowanie logiki rozmytej, która często stosowana jest do matematycznego modelowania wielkości niepewnych [2, 43, 116, 128, 132]. Drugim poważnym problemem jest uzyskanie jedynie przybliżonych wyników, w postaci interwałów wartości HEP co wynika z ograniczeń modelu zależności między trybami kontroli a wynikiem oceny czynników CPC, oraz ograniczeń modelu współzależności czynników CPC [42, 43, 128, 129, 132]. Do rozwiązania tego problemu zaproponowano wykorzystanie sieci Bayesa [43, 115, 116, 128, 132]. Za ich pomocą można przedstawić złożoność związków między poszczególnymi czynnikami CPC oraz wynikiem oceny czynników CPC, oraz trybem kontroli. Implikacja powyższych rozwiązań do klasycznej metody CREAM pozwala przezwyciężyć największe ograniczenia tej metody.

W pierwszej kolejności zmodyfikowano możliwości oceny czynników CPC, tak żeby ujednolicić skalę oceny dla każdego z czynników. Jako że dany czynnik może powodować wzrost lub spadek niezawodności operatora, lub może nie mieć wpływu na poziom niezawodności operatora, dla czynników CPC1-CPC4, CPC6, CPC8 i CPC 9 zaproponowano trzystopniową skalę oceny: odpowiedni, akceptowalny, nieodpowiedni, a dla czynników CPC 5 i CPC7 dwustopniową: akceptowalny, nieodpowiedni [43, 132]. Propozycja oceny czynników CPC została przedstawiona w tabeli 8.6. Zaproponowaną skalę ocen można opisać za pomocą liczb rozmytych, opisanych funkcjami przynależności według równań 8.24 – 8.26 dla skali trójstopniowej oraz 8.27 i 8.28 dla skali dwustopniowej [43, 132]. Na rysunku 8.8 przedstawiono graficzną interpretację proponowanej skali ocen.

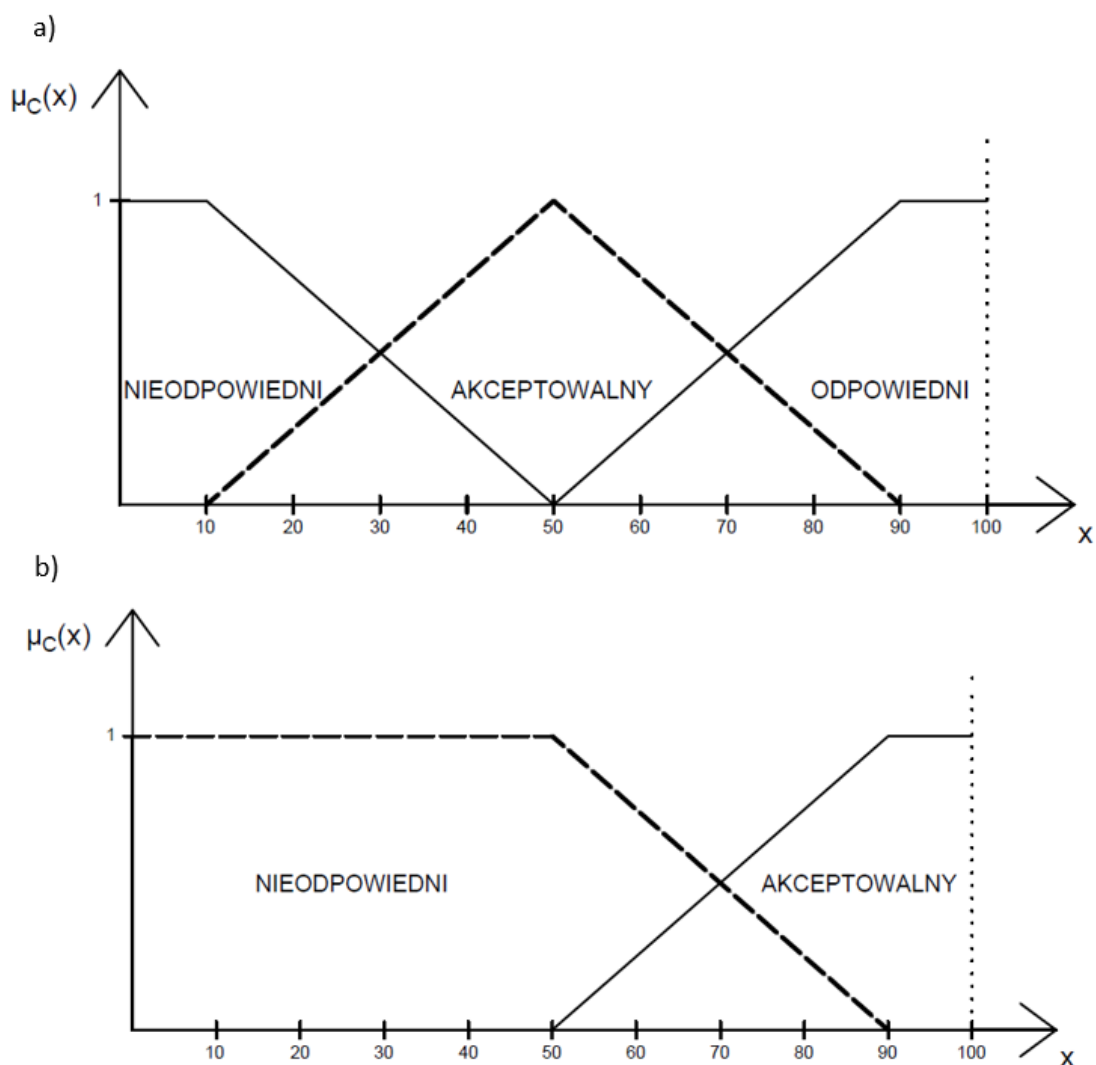
$$\mu_{NIEODPOWIEDNI}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 0 \\ 1, & 0 < x \leq 10 \\ (50 - x)/40, & 10 \leq x \leq 50 \\ 0, & x \geq 50 \end{cases} \quad (8.24)$$

$$\mu_{AKCEPTOWALNY}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 10 \\ (x - 10)/40, & 10 < x \leq 50 \\ (90 - x)/40, & 50 \leq x \leq 90 \\ 0, & x \geq 90 \end{cases} \quad (8.25)$$

$$\mu_{ODPOWIEDNI}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 50 \\ (x - 50)/40, & 50 < x \leq 90 \\ 1, & 90 \leq x \leq 100 \\ 1, & x \geq 100 \end{cases} \quad (8.26)$$

$$\mu_{NIEODPOWIEDNI}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 0 \\ 1, & 0 < x \leq 50 \\ (90 - x)/40, & 50 \leq x \leq 90 \\ 0, & x \geq 90 \end{cases} \quad (8.27)$$

$$\mu_{AKCEPTOWALNY}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 50 \\ (x - 50)/40, & 50 < x \leq 90 \\ 1, & 90 \leq x \leq 100 \\ 1, & x \geq 100 \end{cases} \quad (8.28)$$



**Rys. 8.8.** Funkcja przynależności dla ocen czynników CPC w zależności od stopni oceny: a) trójstopniowa skala ocen; b) dwustopniowa skala ocen (na podstawie [43, 132])

**Tabela 8.6.** Modyfikacja czynników CPC

Lp.	Nazwa CPC	Poziom	Wpływ na niezawodność	Parametry funkcji przynależności trójkątnej liczby rozmytej
1	Organizacja pracy	odpowiednia	pozytywny	(50,90,100,100)
		akceptowalna	nie określony	(10,50,90)
		nieodpowiednia	negatywny	(0,0,10,50)
2	Warunki pracy	odpowiednie	pozytywny	(50,90,100,100)
		akceptowalne	nie określony	(10,50,90)
		nieodpowiednie	negatywny	(0,0,10,50)
3	Jakość interfejsu SCADA	odpowiednia	pozytywny	(50,90,100,100)
		akceptowalna	nie określony	(10,50,90)
		nieodpowiednia	negatywny	(0,0,10,50)
4	Dostępność procedur/planów	odpowiednia	pozytywny	(50,90,100,100)
		akceptowalna	nie określony	(10,50,90)
		nieodpowiednia	negatywny	(0,0,10,50)
5	Liczba jednocześnie wykonywanych zadań	akceptowalna	nie określony	(50,90,100,100)
		nieodpowiednia	negatywny	(0,0,50,90)
6	Ilość czasu na wykonanie zadania	odpowiednia	pozytywny	(50,90,100,100)
		akceptowalna	nie określony	(10,50,90)
		nieodpowiednia	negatywny	(0,0,10,50)
7	Pora dnia	akceptowalna	nie określony	(50,90,100,100)
		nieodpowiednia	negatywny	(0,0,50,90)
8	Kwalifikacje i doświadczenie	odpowiednie	pozytywny	(50,90,100,100)
		akceptowalne	nie określony	(10,50,90)
		nieodpowiednie	negatywny	(0,0,10,50)
9	Współpraca zespołu	odpowiednia	pozytywny	(50,90,100,100)
		akceptowalna	nie określony	(10,50,90)
		nieodpowiednia	negatywny	(0,0,10,50)

W kolejnym kroku poddano fuzyfikacji wielkości opisujące tryby kontroli. W tym celu zapisano interwały prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora w postaci logarytmu dziesiętnego, co przedstawiono w tabeli 8.6. Wyznaczone w ten sposób wartości wykorzystano do modelowania rozmytego z wykorzystaniem trójkątnych liczb rozmytych. Funkcje przynależności dla poszczególnych trybów kontroli opisują równania (8.29 – 8.32) [43, 132]. Na rysunku 8.9 przedstawiono graficzną interpretację przyjętego modelu rozmytego dla trybów kontroli.

$$\mu_{CH}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq -1 \\ 2 \cdot x + 2, & -1 \leq x \leq -0,5 \\ -2 \cdot x, & -0,5 \leq x \leq 0 \\ 0, & x \geq 0 \end{cases} \quad (8.29)$$

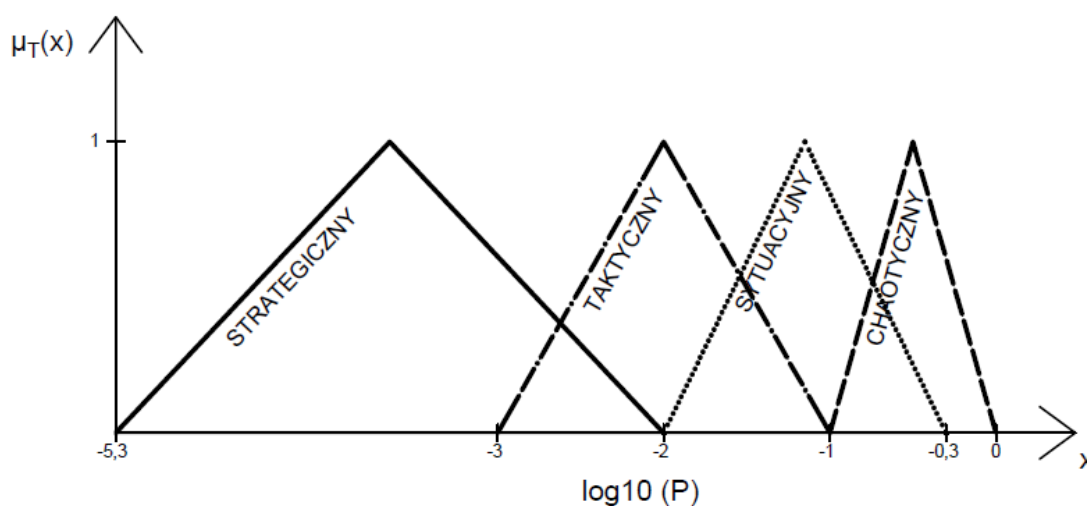
$$\mu_{ST}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq -2 \\ \frac{x+2}{0,85}, & -2 \leq x \leq -1,15 \\ \frac{-0,3-x}{0,85}, & -1,15 \leq x \leq -0,3 \\ 0, & x \geq -0,3 \end{cases} \quad (8.30)$$

$$\mu_{TT}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq -3 \\ x+3, & -3 \leq x \leq -2 \\ -1-x, & -2 \leq x \leq -1 \\ 0, & x \geq -1 \end{cases} \quad (8.31)$$

$$\mu_{SR}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq -5,3 \\ \frac{x+5,3}{1,65}, & -5,3 \leq x \leq -3,65 \\ \frac{-2-x}{1,65}, & -3,65 \leq x \leq -2 \\ 0, & x \geq -2 \end{cases} \quad (8.32)$$

**Tabela 8.7.** Zależność trybu kontroli i wartości HEP

Tryb kontroli	Zlogarytmowana wartość prawdopodobieństwa	Parametry funkcji przynależności trójkątnej liczby rozmytej
chaotyczny	$0 < \log_{10}(P) < -1$	$(-1; -0,5; 0)$
sytuacyjny	$-2 < \log_{10}(P) < -0,3$	$(-2; -1,15; -0,3)$
taktyczny	$-3 < \log_{10}(P) < -1$	$(-3; -2; -1)$
strategiczny	$-5,3 < \log_{10}(P) < -2$	$(-5,3; -3,65; -2)$



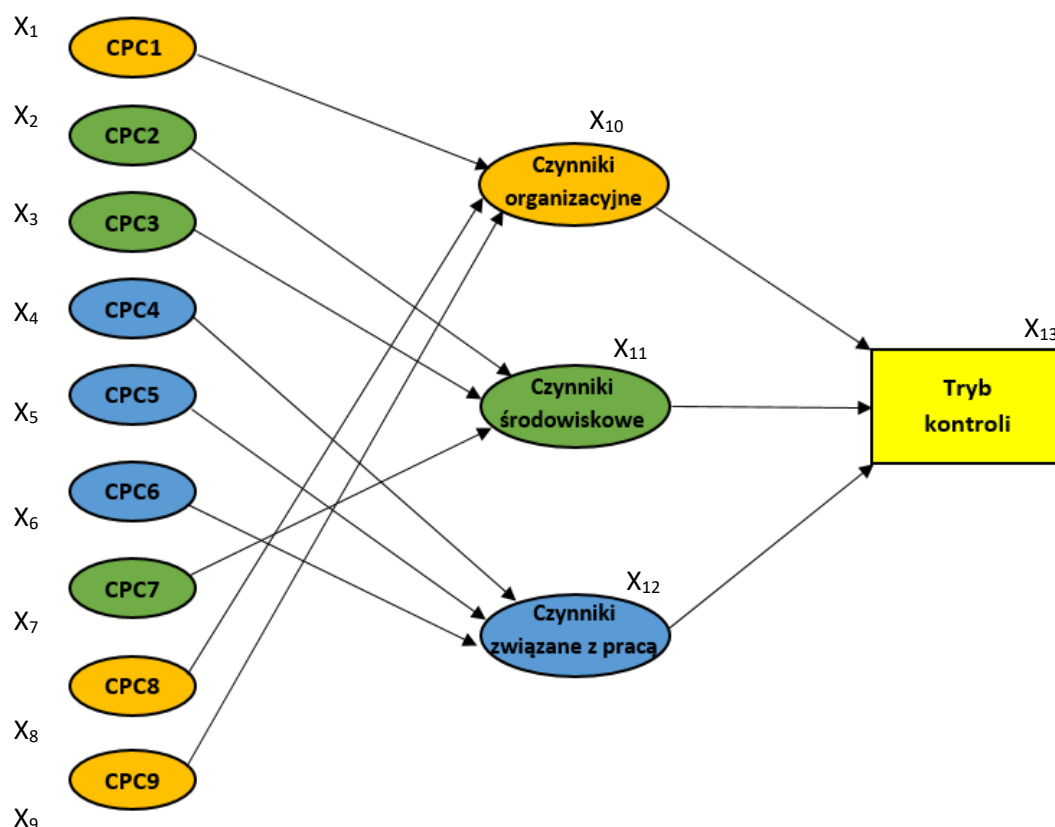
**Rys. 8.9.** Funkcja przynależności dla trybów kontroli (na podstawie [43, 132])



Istotą metody CREAM jest określenie trybu kontroli działania operatora, a następnie wartości prawdopodobieństwa popełnienia przez niego błędu - HEP. Prawdopodobieństwo to zmienia się w zależności od danych okoliczności, które opisane są za pomocą czynników CPC. Związek pomiędzy czynnikami CPC a trybem kontroli można przedstawić za pomocą sieci Bayesa. W związku z tym, że 7 czynników CPC posiada 3 efekty wpływu na niezawodność operatora, a 2 pozostałe czynniki mają 2 efekty wpływu, dla całego układu istnieje  $3^7 \cdot 2^2 = 8748$  różnych kombinacji oceny czynników CPC. Dla każdej kombinacji zgodnie z rysunkiem 8.6 przypisany jest odpowiedni tryb kontroli. Przez zastosowanie sieci Bayesa możliwe jest dla każdej kombinacji wyznaczenie rozkładu prawdopodobieństwa trybu kontroli. W celu ograniczenia złożoności obliczeń czynniki CPC zostały podzielone na trzy kategorie: czynniki organizacyjne, czynniki środowiskowe oraz czynniki związane z pracą [43, 132]. Na rysunku 8.10 przedstawiono sieć Bayesa, za pomocą której można określić rozkład prawdopodobieństwa dla trybów kontroli. Pierwszą warstwę w sieci stanowią zfuzyfikowane wyniki oceny czynników CPC będące danymi wejściowymi dla prezentowanej sieci. Druga warstwa ma na celu uproszczenie obliczeń, zakłada podzielenie czynników CPC według grup:

- czynniki organizacyjne – obejmują szkolenia, doświadczenia i umiejętności operatorów, organizacje, planowanie, nadzorowanie procesów pracy oraz administrowanie przedsiębiorstwem itp.,
- czynniki środowiskowe – związane są ze środowiskiem pracy np. oświetlenie, hałas, wibracje, temperatura, wilgotność powietrza, ergonomia stanowiska pracy,
- czynniki związane z pracą – odnoszą się do procesu pracy np. długość zmiany, liczba zadań do wykonania jednocześnie, charakterystyka zadania, stresogenność zadania.

Ostatnia warstwa pozwala na wyznaczenie rozkładu prawdopodobieństwa dla trybu kontroli, stanowiąc wartości wyjściowe dla analizowanej sieci.



**Rys. 8.10.** Opracowana sieć Bayesa służąca do wyznaczenia rozkładu prawdopodobieństwa trybu kontroli (oznaczenia zgodnie z tabelą 8.6)

Zależności między poszczególnymi wierzchołkami w przedstawionej na rysunku 8.10 sieci Bayesa są następujące:  $\pi(X_{13}) = (X_{10}, X_{11}, X_{12})$ ,  $\pi(X_{12}) = (X_4, X_5, X_6)$ ,  $\pi(X_{11}) = (X_2, X_3, X_7)$ ,  $\pi(X_{10}) = (X_1, X_8, X_9)$ ,  $\pi(X_1) = (\emptyset)$ ,  $\pi(X_2) = (\emptyset)$ ,  $\pi(X_3) = (\emptyset)$ ,  $\pi(X_4) = (\emptyset)$ ,  $\pi(X_5) = (\emptyset)$ ,  $\pi(X_6) = (\emptyset)$ ,  $\pi(X_7) = (\emptyset)$ ,  $\pi(X_8) = (\emptyset)$ ,  $\pi(X_9) = (\emptyset)$ . Wartość prawdopodobieństwa w poszczególnych wierzchołku opisują zależności 8.33 – 8.36.

$$P(X_{10}, X_1, X_8, X_9) = \sum_{X_1} \sum_{X_8} \sum_{X_9} P(X_{10}|X_1, X_8, X_9) \cdot P(X_1) \cdot P(X_8) \cdot P(X_9) \quad (8.33)$$

$$P(X_{11}, X_2, X_3, X_7) = \sum_{X_2} \sum_{X_3} \sum_{X_7} P(X_{11}|X_2, X_3, X_7) \cdot P(X_2) \cdot P(X_3) \cdot P(X_7) \quad (8.34)$$

$$P(X_{12}, X_4, X_5, X_6) = \sum_{X_4} \sum_{X_5} \sum_{X_6} P(X_{12}|X_4, X_5, X_6) \cdot P(X_4) \cdot P(X_5) \cdot P(X_6) \quad (8.35)$$

$$P(X_{13}, X_{10}, X_{11}, X_{12}) = \sum_{X_{10}} \sum_{X_{11}} \sum_{X_{12}} P(X_{13}|X_{10}, X_{11}, X_{12}) \cdot P(X_{10}) \cdot P(X_{11}) \cdot P(X_{12}) \quad (8.36)$$

Wierzchołki  $X_1 - X_9$  oraz wierzchołki pośrednie  $X_{10} - X_{12}$  mogą przyjąć 3 stany, odpowiadające poziomom oceny czynników CPC (O – odpowiedni, A – akceptowalny, N – nieakceptowalny). Dla wierzchołków  $X_1 - X_9$  rozkład prawdopodobieństwa przyjęcia danego stanu jest określany na podstawie wyników badań ankietowych operatorów. Rozkład prawdopodobieństwa przyjęcia danego stanu dla wierzchołków  $X_{10} - X_{12}$  można wyznaczyć na podstawie zależności 8.33 – 8.35. W celu zobrazowania toku rozumowania przedstawiono na przykładzie wierzchołka  $X_{10}$  złożoność obliczeń. Analogicznie przeprowadzono obliczenia dla wierzchołków  $X_{11}$  i  $X_{12}$ .

- prawdopodobieństwo przyjęcia przez wierzchołek  $X_{10}$  stanu O

$$\begin{aligned}
 P(X_{10}) = & P(X_{10}=O|X_1=O, X_8=O, X_9=O) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=O) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=O, X_8=O, X_9=A) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=A) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=O, X_8=O, X_9=N) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=N) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=O, X_8=A, X_9=O) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=O) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=O, X_8=A, X_9=A) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=A) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=O, X_8=A, X_9=N) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=N) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=O, X_8=N, X_9=O) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=O) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=O, X_8=N, X_9=A) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=A) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=O, X_8=N, X_9=N) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=N) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=A, X_8=O, X_9=O) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=O) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=A, X_8=O, X_9=A) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=A) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=A, X_8=O, X_9=N) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=N) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=A, X_8=A, X_9=O) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=O) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=A, X_8=A, X_9=A) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=A) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=A, X_8=A, X_9=N) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=N) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=A, X_8=N, X_9=O) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=O) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=A, X_8=N, X_9=A) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=A) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=A, X_8=N, X_9=N) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=N) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=N, X_8=O, X_9=O) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=O) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=N, X_8=O, X_9=A) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=A) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=N, X_8=O, X_9=N) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=N) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=N, X_8=A, X_9=O) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=O) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=N, X_8=A, X_9=A) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=A) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=N, X_8=A, X_9=N) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=N) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=N, X_8=N, X_9=O) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=O) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=N, X_8=N, X_9=A) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=A) + \\
 & + P(X_{10}=O|X_1=N, X_8=N, X_9=N) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=N)
 \end{aligned}$$

- prawdopodobieństwo przyjęcia przez wierzchołek  $X_{10}$  stanu A

$$\begin{aligned}
P(X_{10}) = & P(X_{10}=A|X_1=O, X_8=O, X_9=O) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=O) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=O, X_8=O, X_9=A) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=A) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=O, X_8=O, X_9=N) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=N) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=O, X_8=A, X_9=O) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=O) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=O, X_8=A, X_9=A) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=A) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=O, X_8=A, X_9=N) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=N) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=O, X_8=N, X_9=O) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=O) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=O, X_8=N, X_9=A) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=A) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=O, X_8=N, X_9=N) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=N) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=A, X_8=O, X_9=O) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=O) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=A, X_8=O, X_9=A) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=A) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=A, X_8=O, X_9=N) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=N) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=A, X_8=A, X_9=O) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=O) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=A, X_8=A, X_9=A) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=A) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=A, X_8=A, X_9=N) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=N) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=A, X_8=N, X_9=O) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=O) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=A, X_8=N, X_9=A) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=A) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=A, X_8=N, X_9=N) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=N) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=N, X_8=O, X_9=O) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=O) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=N, X_8=O, X_9=A) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=A) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=N, X_8=O, X_9=N) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=N) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=N, X_8=A, X_9=O) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=O) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=N, X_8=A, X_9=A) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=A) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=N, X_8=A, X_9=N) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=N) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=N, X_8=N, X_9=O) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=O) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=N, X_8=N, X_9=A) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=A) + \\
& + P(X_{10}=A|X_1=N, X_8=N, X_9=N) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=N)
\end{aligned}$$

- prawdopodobieństwo przyjęcia przez wierzchołek  $X_{10}$  stanu N

$$\begin{aligned}
P(X_{10}) = & P(X_{10}=N|X_1=O, X_8=O, X_9=O) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=O) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=O, X_8=O, X_9=A) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=A) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=O, X_8=O, X_9=N) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=N) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=O, X_8=A, X_9=O) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=O) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=O, X_8=A, X_9=A) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=A) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=O, X_8=A, X_9=N) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=N) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=O, X_8=N, X_9=O) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=O) +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + P(X_{10}=N|X_1=O, X_8=N, X_9=A) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=A) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=O, X_8=N, X_9=N) \cdot P(X_1=O) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=N) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=A, X_8=O, X_9=O) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=O) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=A, X_8=O, X_9=A) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=A) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=A, X_8=O, X_9=N) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=N) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=A, X_8=A, X_9=O) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=O) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=A, X_8=A, X_9=A) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=A) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=A, X_8=A, X_9=N) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=N) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=A, X_8=N, X_9=O) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=O) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=A, X_8=N, X_9=A) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=A) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=A, X_8=N, X_9=N) \cdot P(X_1=A) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=N) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=N, X_8=O, X_9=O) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=O) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=N, X_8=O, X_9=A) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=A) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=N, X_8=O, X_9=N) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=O) \cdot P(X_9=N) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=N, X_8=A, X_9=O) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=O) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=N, X_8=A, X_9=A) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=A) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=N, X_8=A, X_9=N) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=A) \cdot P(X_9=N) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=N, X_8=N, X_9=O) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=O) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=N, X_8=N, X_9=A) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=A) + \\
& + P(X_{10}=N|X_1=N, X_8=N, X_9=N) \cdot P(X_1=N) \cdot P(X_8=N) \cdot P(X_9=N)
\end{aligned}$$

Wykorzystanie wnioskowania bayesowskiego umożliwia wyznaczenie rozkładu prawdopodobieństwa trybu kontroli na podstawie oceny czynników CPC w węźle  $X_{13}$ . Rozkład ten możemy wyznaczyć na podstawie zależności 8.36. W celu szczegółowego przedstawienia toku rozumowania przedstawiono dla wierzchołka  $X_{13}$  równania opisujące wartość prawdopodobieństwa dla 4 możliwych stanów odpowiadających trybom kontroli (CH – chaotyczny, ST – sytuacyjny, T – taktyczny, SR – strategiczny).

- prawdopodobieństwo uzyskania chaotycznego trybu kontroli

$$\begin{aligned}
P(X_{13}) = & P(X_{13}=CH|X_{10}=O, X_{11}=O, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=CH|X_{10}=O, X_{11}=O, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=CH|X_{10}=O, X_{11}=O, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=N) + \\
& + P(X_{13}=CH|X_{10}=O, X_{11}=A, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=CH|X_{10}=O, X_{11}=A, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=CH|X_{10}=O, X_{11}=A, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=N) + \\
& + P(X_{13}=CH|X_{10}=O, X_{11}=N, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=N) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=CH|X_{10}=O, X_{11}=N, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=N) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=CH|X_{10}=O, X_{11}=N, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=N) \cdot P(X_{12}=N) +
\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
& + P(X_{13}=T|X_{10}=N, X_{11}=O, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=T|X_{10}=N, X_{11}=O, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=T|X_{10}=N, X_{11}=O, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=N) + \\
& + P(X_{13}=T|X_{10}=N, X_{11}=A, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=T|X_{10}=N, X_{11}=A, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=T|X_{10}=N, X_{11}=A, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=N) + \\
& + P(X_{13}=T|X_{10}=N, X_{11}=N, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=T|X_{10}=N, X_{11}=N, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=T|X_{10}=N, X_{11}=N, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=N)
\end{aligned}$$

- prawdopodobieństwo uzyskania taktycznego trybu kontroli

$$\begin{aligned}
P(X_{13}) = & P(X_{13}=ST|X_{10}=O, X_{11}=O, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=O, X_{11}=O, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=O, X_{11}=O, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=N) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=O, X_{11}=A, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=O, X_{11}=A, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=O, X_{11}=A, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=N) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=O, X_{11}=N, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=N) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=O, X_{11}=N, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=N) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=O, X_{11}=N, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=N) \cdot P(X_{12}=N) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=A, X_{11}=O, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=A) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=A, X_{11}=O, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=A) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=A, X_{11}=O, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=A) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=N) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=A, X_{11}=A, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=A) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=A, X_{11}=A, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=A) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=A, X_{11}=A, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=A) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=N) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=A, X_{11}=N, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=A) \cdot P(X_{11}=N) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=A, X_{11}=N, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=A) \cdot P(X_{11}=N) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=A, X_{11}=N, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=A) \cdot P(X_{11}=N) \cdot P(X_{12}=N) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=N, X_{11}=O, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=N, X_{11}=O, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=N, X_{11}=O, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=N) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=N, X_{11}=A, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=N, X_{11}=A, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=N, X_{11}=A, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=N) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=N, X_{11}=N, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=N, X_{11}=N, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=ST|X_{10}=N, X_{11}=N, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=N)
\end{aligned}$$

- prawdopodobieństwo uzyskania strategicznego trybu kontroli

$$\begin{aligned}
P(X_{13}) = & P(X_{13}=SR|X_{10}=O, X_{11}=O, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=O, X_{11}=O, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=O, X_{11}=O, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=N) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=O, X_{11}=A, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=O, X_{11}=A, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=O, X_{11}=A, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=N) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=O, X_{11}=N, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=N) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=O, X_{11}=N, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=N) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=O, X_{11}=N, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=O) \cdot P(X_{11}=N) \cdot P(X_{12}=N) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=A, X_{11}=O, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=A) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=A, X_{11}=O, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=A) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=A, X_{11}=O, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=A) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=N) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=A, X_{11}=A, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=A) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=A, X_{11}=A, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=A) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=A, X_{11}=A, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=A) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=N) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=A, X_{11}=N, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=A) \cdot P(X_{11}=N) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=A, X_{11}=N, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=A) \cdot P(X_{11}=N) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=A, X_{11}=N, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=A) \cdot P(X_{11}=N) \cdot P(X_{12}=N) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=N, X_{11}=O, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=N, X_{11}=O, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=N, X_{11}=O, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=O) \cdot P(X_{12}=N) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=N, X_{11}=A, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=N, X_{11}=A, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=N, X_{11}=A, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=A) \cdot P(X_{12}=N) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=N, X_{11}=N, X_{12}=O) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=N) \cdot P(X_{12}=O) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=N, X_{11}=N, X_{12}=A) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=N) \cdot P(X_{12}=A) + \\
& + P(X_{13}=SR|X_{10}=N, X_{11}=N, X_{12}=N) \cdot P(X_{10}=N) \cdot P(X_{11}=N) \cdot P(X_{12}=N)
\end{aligned}$$

Przedstawione zależności oparte na rachunku prawdopodobieństwa ze względu na złożoność obliczeń mogą okazać się trudne w kalkulacji. Pomocne przy rozbudowanych sieciach bayesowskich są programy komputerowe przystosowane do przeprowadzania takich obliczeń. W rozprawie wykorzystano program GeNie 3.0 firmy BayesFusion, LLC [144], w którym zaimplementowano przedstawioną na rysunku 8.10 sieć.

Do przeprowadzenia obliczeń należy przedstawić tablice prawdopodobieństw warunkowych (TPW) dla każdego z wierzchołków w sieci. Dla wierzchołków w pierwszej



warstwie sieci  $X_1 - X_9$  na tablicę składać się będą 3 wartości, przedstawiające prawdopodobieństwo przyjęcia danego stanu (O – odpowiedni, A – akceptowalny, N - nieakceptowalny) na podstawie indywidualnej oceny czynników CPC przez danego operatora. W drugiej warstwie sieci, dla wierzchołków  $X_{10} - X_{12}$  prawdopodobieństwa warunkowe przyjęto na podstawie danych literaturowych [43, 132] oraz własnych doświadczeń. Określają one prawdopodobieństwo przyjęcia danego stanu (O – odpowiedni, A – akceptowalny, N - nieakceptowalny) przez czynniki CPC w danej grupie (czynniki organizacyjne, czynniki środowiskowe, czynniki związane z pracą). Przedstawiono je w tabelach 8.8 – 8.10.

**Tabela 8.8.** Tablica prawdopodobieństwa warunkowego dla  $X_{10}$

$P(X_1)$	$P(X_8)$	$P(X_9)$	$P(X_{10} X_1, X_8, X_9)$		
			$X_{10}=O$	$X_{10}=A$	$X_{10}=N$
$X_1=O$	$X_8=O$	$X_9=O$	1	0	0
		$X_9=A$	0,66	0,34	0
		$X_9=N$	0,33	0,34	0,33
	$X_8=A$	$X_9=O$	0,66	0,34	0
		$X_9=A$	0,34	0,66	0
		$X_9=N$	0,33	0,34	0,33
	$X_8=N$	$X_9=O$	0,66	0	0,34
		$X_9=A$	0,33	0,34	0,33
		$X_9=N$	0,34	0	0,66
$X_1=A$	$X_8=O$	$X_9=O$	0,66	0,34	0
		$X_9=A$	0,34	0,66	0
		$X_9=N$	0,33	0,34	0,33
	$X_8=A$	$X_9=O$	0,34	0,66	0
		$X_9=A$	0	1	0
		$X_9=N$	0	0,66	0,34
	$X_8=N$	$X_9=O$	0,33	0,34	0,33
		$X_9=A$	0	0,66	0,34
		$X_9=N$	0	0,34	0,66
$X_1=N$	$X_8=O$	$X_9=O$	0,66	0	0,34
		$X_9=A$	0,33	0,34	0,33
		$X_9=N$	0,34	0	0,66
	$X_8=A$	$X_9=O$	0,33	0,34	0,33
		$X_9=A$	0	0,66	0,34
		$X_9=N$	0	0,34	0,66
	$X_8=N$	$X_9=O$	0,34	0	0,66
		$X_9=A$	0	0,34	0,66
		$X_9=N$	0	0	1

**Tabela 8.9.** Tablica prawdopodobieństwa warunkowego dla  $X_{11}$ 

P( $X_7$ )	P( $X_2$ )	P( $X_3$ )	P( $X_{11} X_2,X_3,X_7$ )		
			$X_{11}=O$	$X_{11}=A$	$X_{11}=N$
$X_7=A$	$X_2=O$	$X_3=O$	0,66	0,34	0
		$X_3=A$	0,34	0,66	0
		$X_3=N$	0,33	0,34	0,33
	$X_2=A$	$X_3=O$	0,34	0,66	0
		$X_3=A$	0	1	0
		$X_3=N$	0	0,66	0,34
	$X_2=N$	$X_3=O$	0,33	0,34	0,33
		$X_3=A$	0	0,66	0,34
		$X_3=N$	0	0,34	0,66
$X_7=N$	$X_2=O$	$X_3=O$	0,66	0	0,34
		$X_3=A$	0,33	0,34	0,33
		$X_3=N$	0,34	0	0,66
	$X_2=A$	$X_3=O$	0,33	0,34	0,33
		$X_3=A$	0	0,66	0,34
		$X_3=N$	0	0,34	0,66
	$X_2=N$	$X_3=O$	0,34	0	0,66
		$X_3=A$	0	0,34	0,66
		$X_3=N$	0	0	1

**Tabela 8.10.** Tablica prawdopodobieństwa warunkowego dla  $X_{12}$ 

P( $X_5$ )	P( $X_4$ )	P( $X_6$ )	P( $X_{12} X_4,X_5,X_6$ )		
			$X_{12}=O$	$X_{12}=A$	$X_{12}=N$
$X_5=A$	$X_4=O$	$X_6=O$	0,66	0,34	0
		$X_6=A$	0,34	0,66	0
		$X_6=N$	0,33	0,34	0,33
	$X_4=A$	$X_6=O$	0,34	0,66	0
		$X_6=A$	0	1	0
		$X_6=N$	0	0,66	0,34
	$X_4=N$	$X_6=O$	0,33	0,34	0,33
		$X_6=A$	0	0,66	0,34
		$X_6=N$	0	0,34	0,66
$X_5=N$	$X_4=O$	$X_6=O$	0,66	0	0,34
		$X_6=A$	0,33	0,34	0,33
		$X_6=N$	0,34	0	0,66
	$X_4=A$	$X_6=O$	0,33	0,34	0,33
		$X_6=A$	0	0,66	0,34
		$X_6=N$	0	0,34	0,66
	$X_4=N$	$X_6=O$	0,34	0	0,66
		$X_6=A$	0	0,34	0,66
		$X_6=N$	0	0	1

Tablicę prawdopodobieństw warunkowych dla ostatniego wierzchołka w sieci  $X_{13}$  przedstawiono w tabeli 8.11. Wartości opracowano na podstawie prac [43, 132] oraz własnych doświadczeń. Określają one prawdopodobieństwo przyjęcia danego stanu kontroli przez badanego operatora (CH – chaotyczny, ST – sytuacyjny, T – taktyczny, SR – strategiczny) na podstawie sumarycznej oceny czynników CPC zgodnie z rysunkiem 8.6.

**Tabela 8.11.** Tablica prawdopodobieństwa warunkowego dla  $X_{13}$

$P(X_{10})$	$P(X_{11})$	$P(X_{12})$	$P(X_{13} X_{10},X_{11},X_{12})$			
			$X_{13}=SR$	$X_{13}=T$	$X_{13}=ST$	$X_{13}=CH$
$X_{10}=O$	$X_{11}=O$	$X_{12}=O$	1	0	0	0
		$X_{12}=A$	0,6	0,4	0	0
		$X_{12}=N$	0	1	0	0
	$X_{11}=A$	$X_{12}=O$	0,6	0,4	0	0
		$X_{12}=A$	0	1	0	0
		$X_{12}=N$	0	0,8	0,2	0
	$X_{11}=N$	$X_{12}=O$	0	1	0	0
		$X_{12}=A$	0	0,8	0,2	0
		$X_{12}=N$	0	0	1	0
$X_{10}=A$	$X_{11}=O$	$X_{12}=O$	0,6	0,4	0	0
		$X_{12}=A$	0	1	0	0
		$X_{12}=N$	0	0,8	0,2	0
	$X_{11}=A$	$X_{12}=O$	0	1	0	0
		$X_{12}=A$	0	1	0	0
		$X_{12}=N$	0	0,2	0,8	0
	$X_{11}=N$	$X_{12}=O$	0	0,8	0,2	0
		$X_{12}=A$	0	0,2	0,8	0
		$X_{12}=N$	0	0	0,7	0,3
$X_{10}=N$	$X_{11}=O$	$X_{12}=O$	0	1	0	0
		$X_{12}=A$	0	0,8	0,2	0
		$X_{12}=N$	0	0	1	0
	$X_{11}=A$	$X_{12}=O$	0	0,8	0,2	0
		$X_{12}=A$	0	0,2	0,8	0
		$X_{12}=N$	0	0	0,7	0,3
	$X_{11}=N$	$X_{12}=O$	0	0	1	0
		$X_{12}=A$	0	0	0,7	0,3
		$X_{12}=N$	0	0	0,38	0,62

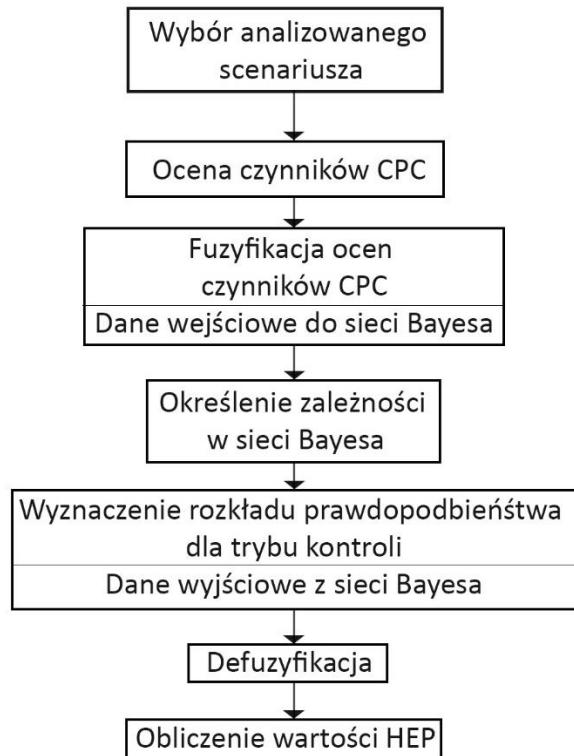
Otrzymany w końcowym węźle rozkład prawdopodobieństwa dla trybu kontroli operatora należy poddać defuzyfikacji, tak by z wartości rozmytej otrzymać wartość ostrą (OTK) z wykorzystaniem metody COG, opisaney w rozdziale 8.3.1. W oparciu o rysunek 8.9 wartość prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora (HEP) należy wyznaczyć z zależności [43, 132]:

$$HEP = 10^{OTK} \quad (8.37)$$

gdzie:

- OTK – ostra wartość wyniku z rozkładu prawdopodobieństwa dla trybu kontroli operatora.

Na rysunku 8.11 przedstawiono schemat oceny niezawodności operatora za pomocą zmodyfikowanej metody CREAM.



**Rys. 8.11.** Proces oceny niezawodności operatora zmodyfikowaną metodą CREAM

Zgodnie z definicją wskaźnika gotowości dla obiektów technicznych jest to wielkość prawdopodobieństwa, że obiekt będzie w stanie sprawności w danym przedziale czasowym. Przez stan sprawności obiektu technicznego rozumie się stan, w którym obiekt wykonuje swoje zadanie [63]. Analogicznie sformułowano definicję wskaźnika gotowości operatora jako, prawdopodobieństwa, że operator będzie wykonywał swoją pracę, będąc w stanie sprawności, bez popełnienia błędu w danych warunkach otoczenia i określonym przedziale czasowym. Znając prawdopodobieństwo popełnienia błędu przez operatora (HEP), można wyznaczyć wskaźnik gotowości operatora wg zależności:

$$K_g = 1 - HEP \quad (8.38)$$

## 8.6. Ocena niezawodności w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę z uwzględnieniem wpływu operatora

### 8.6.1. Podstawowe wskaźniki i struktury niezawodnościowe

Niezawodność systemów ilościowo można opisać za pomocą wskaźników niezawodności, które charakteryzują właściwości systemu i jego elementów oraz procesów losowych związanych z jego funkcjonowaniem. Do podstawowych wskaźników służących do oceny niezawodności zalicza się [63, 81]:

- wskaźnik gotowości  $K_g$  – określa prawdopodobieństwo, że system będzie w stanie sprawności w danym przedziale czasu. Można go wyznaczyć z zależności:

$$K_g = \frac{\mu}{\mu + \lambda} = \frac{T_p}{T_p + T_n}, [-] \quad (8.39)$$

gdzie:

- $\mu$  – wskaźnik intensywności odnowy [1/d],
  - $\lambda$  – wskaźnik intensywności uszkodzeń [1/d],
  - $T_p$  – średni czas pracy bezuszkodzeniowej [d],
  - $T_n$  – średni czas pracy naprawy [d].
- wskaźnik postoju  $K_p$  – określa prawdopodobieństwo, że system będzie znajdował się w stanie niesprawności:

$$K_p = 1 - K_g, [-] \quad (8.40)$$

- średni czas pracy bezuszkodzeniowej  $T_p$  – wartość oczekiwana zmiennej losowej  $T_p$ , określającej czas pracy systemu (lub elementu) między dwoma kolejnymi uszkodzeniami. Można go wyznaczyć m.in. na podstawie danych eksploatacyjnych [63]:

$$T_p = \frac{1}{k + z} \cdot \left( \sum_{i=1}^k t_{pi} + z \cdot t \right), [d] \quad (8.41)$$

gdzie:

- $k$  – liczba okresów pracy obiektów uszkadzających się,
- $z$  – liczba okresów pracy obiektów nieuszkadzających się,
- $t_{pi}$  – wartość  $i$ -tego czasu pracy obiektów uszkadzających się,
- $t$  – czas obserwacji [d].

- średni czas pracy naprawy  $T_n$  – suma czasu oczekiwania na naprawę  $T_d$  i czasu naprawy rzeczywistej  $T_0$  (do momentu włączenia elementu do eksploatacji):

$$T_n = T_d + T_0, [d] \quad (8.42)$$

gdzie:

- $T_d$  – czasu oczekiwania na naprawę [d],
- $T_0$  – czasu naprawy rzeczywistej [d].

- intensywność uszkodzeń  $\lambda(t)$  – określa liczbę uszkodzeń w jednostce czasu. Wyznacza się go z zależności:

$$\lambda = \frac{1}{T_p}, \left[\frac{1}{d}\right] \quad (8.43)$$

- intensywność odnowy  $\mu(t)$  – określa liczbę niesprawności usuwanych w jednostce czasu. Można go wyznaczyć z zależności:

$$\mu = \frac{1}{T_n}, \left[\frac{1}{d}\right] \quad (8.44)$$

Dla badanego systemu należy sporządzić schemat niezawodnościowy, na którym elementy systemu przedstawione są jako ogniwa reprezentujące prawdopodobieństwo pracy poszczególnych elementów [63, 81]. Można wyróżnić następujące struktury niezawodnościowe:

- struktura szeregową – stosowana jest, jeżeli uszkodzenie dowolnego elementu, powoduje uszkodzenie całego systemu. Wskaźnik gotowości  $K_g$  dla struktury szeregowej jest równy iloczynowi wskaźników gotowości poszczególnych elementów systemu. Wyznacza się z zależności [63, 113]:

$$K_g = \prod_{i=1}^n K_{gi}, [-] \quad (8.45)$$

gdzie:

- $K_{gi}$  – wskaźnik gotowości  $i$ -tego elementu systemu [-],
- $n$  – liczba elementów.
- struktura progowa – stosowana jest, jeżeli uszkodzenie „ $k$ ” z pośród „ $m$ ” jednorodnych elementów systemu, powoduje uszkodzenie całego systemu. Mówimy wtedy o strukturze progowej typu „ $m-k$  z  $m$ ”. Dla struktury progowej wskaźnik gotowości  $K_g$  oblicza się wg zależności [63, 113]:

$$K_g = \sum_{k=0}^{k_{dop}} \binom{m}{k} \cdot (K_{g0})^{m-k} \cdot (K_{p0})^k, [-] \quad (8.46)$$

gdzie:

- k – liczba elementów uszkodzonych,
  - $k_{dop}$  – dopuszczalna liczba elementów uszkodzonych,
  - m – liczba wszystkich elementów,
  - $K_{g0}$  – wskaźnik gotowości pojedynczego elementu [-],
  - $K_{p0}$  – wskaźnik postoju pojedynczego elementu [-].
- struktura równoległa – stosowana jest, jeżeli uszkodzenie całego systemu następuje w wyniku uszkodzenia wszystkich jednocześnie elementów systemu. Wskaźnik gotowości  $K_g$  struktury równoległej opisany jest wzorem [63, 113]:

$$K_g = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - K_{gi}), [-] \quad (8.47)$$

gdzie:

- $K_{gi}$  – wskaźnik gotowości i-tego elementu systemu [-],
- n – liczba elementów.

Wśród najbardziej rozpowszechnionych metod oceny niezawodności można wyróżnić metodę jednoparametryczną, dwuparametryczną oraz metodę przeglądu stanów [63, 81, 113]. Metoda jednoparametryczna polega na wyznaczeniu wskaźnika niezawodnościowego dla całego systemu na podstawie znajomości tego wskaźnika dla pojedynczych elementów składowych systemu. Obliczenia wykonuje się w oparciu o schemat niezawodnościowy badanego systemu, wyznaczając poszukiwany wskaźnik gotowości kolejno dla poszczególnych struktur [113]. W przypadku metody dwuparametrycznej podobnie należy wykorzystać schemat niezawodnościowy systemu oraz przeprowadzić obliczenia pozostałych wskaźników niezawodności na podstawie znanych dwóch wskaźników niezawodnościowych wszystkich składowych elementów badanego systemu. Wyznaczając wskaźniki dla kolejnych struktur na schemacie niezawodnościowym, na końcu otrzymuje się wskaźniki niezawodności dla systemu jako całości [113]. Metodę przeglądu stanów systemu stosuje się przy założeniu niezależności elementów występujących w systemie. Polega ona na wyróżnieniu w systemie podzbiorów

stanu sprawności i niesprawności, których suma tworzy pełny zbiór zdarzeń. Jest to metoda pracochłonna, gdyż należy tutaj rozpatrzyć  $2^L$  kombinacji, gdzie L jest liczbą elementów w systemie, które wpływają na niezawodność systemu jako całości [63, 113].

W tabelach 8.12 i 8.13 przedstawiono wartości wymaganego poziomu wskaźnika gotowości SZZW dla różnych kategorii niezawodności systemu opracowane przez prof. A. Wieczystego [119] oraz dla różnych kategorii wodociągu opracowane przez prof. M. Romana [63].

**Tabela 8.12.** Wartości wymaganego poziomu  $K_g$  dla SZZW w zależności od kategorii niezawodności systemów (na podstawie [119])

Kategoria niezawodności	Użytkownicy SZZW	$K_g(\text{SZZW})$ dla przypadku obliczeniowego		
		I	II	III
		$Q_w = Q_n$	$\alpha_{aw} \cdot Q_n \leq Q < Q_n$ $Q_w = \alpha_{aw} \cdot Q_n$	$Q < \alpha_g \cdot Q_n$
I	istotne zakłady przemysłowe	na drodze studialnej		
II	miasta o LM > 500 000	0,9827329	0,9991713	0,9999932
III	miasta o LM 50 000 - 500 000	0,9740959	0,9987534	0,9999863
IV	miasta o LM 1 000 - 50 000	0,9150137	0,9972055	0,9999452
V	miasta o LM < 1 000	0,8706849	0,9939726	0,9994521
gdzie: Q – wydajność SZZW [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]; $Q_n$ – nominalna (projektowana) wydajność SZZW [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]; $Q_w$ – wymagana wydajność SZZW [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]; $\alpha_{aw}$ – współczynnik obniżenia dostaw wody w stanie awaryjnym; $\alpha_g$ – graniczny współczynnik obniżenia dostaw wody w stanie awaryjnym				

**Tabela 8.13.** Wartości wskaźnika gotowości  $K_g$  w zależności od kategorii wodociągu (na podstawie [63])

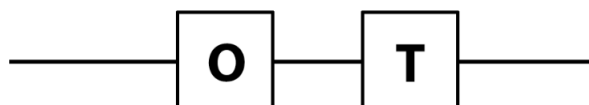
Kategoria wodociągu		Stopień pokrycia całkowitego zapotrzebowania na wodę [%]	$K_g(\text{SZZW})$
I	wodociągi duże LM > 500 000	100	$\geq 0,9917809$
		$\geq 70$	$\geq 0,9945206$
		$< 70$	$\geq 0,9999453$
II	wodociągi średnie LM 50 000 – 500 000	100	$\geq 0,9835617$
		$\geq 70$	$\geq 0,9917809$
		$< 70$	$\geq 0,9994542$
III	wodociągi małe LM < 50 000	100	$\geq 0,9671233$
		$\geq 70$	$\geq 0,9835617$
		$< 70$	$\geq 0,9972603$



### 8.6.2. Metoda oceny niezawodności w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę z uwzględnieniem wpływu operatora

Do oceny niezawodności SZZW z uwzględnieniem wpływu operatora zaadoptowano metodę jednoparametryczną. W metodzie tej operator jest traktowany jako element systemu, który należy uwzględnić jako dodatkowe ogniwo na schemacie niezawodnościowym. Ogniwo to reprezentuje prawdopodobieństwo, że operator będzie wykonywał swoją pracę będąc w stanie sprawności. Jest ono opisane za pomocą wskaźnika niezawodności  $K_g$  podobnie jak pozostałe elementy systemu.

Pierwszy etap analizy wymaga sporządzenia schematu niezawodnościowego, przedstawiającego wzajemne powiązania elementów systemu mających wpływ na niezawodność całego systemu, w tym operatora. Operator wraz z obiektem technicznym tworzą parę antropotechniczną o szeregowej strukturze [12], gdzie uszkodzenie całego systemu następuje na skutek uszkodzenia obiektu technicznego lub błędu operatora. Na rysunku 8.12 przedstawiono strukturę szeregową dla operatora i obiektu technicznego. Wskaźnik gotowości można wyznaczyć wg. zależności 8.45.



**Rys. 8.12.** Struktura szeregową O (operator) – T (obiekt techniczny) (na podstawie [12])

Następnie należy określić wskaźnik gotowości poszczególnych elementów tworzących strukturę niezawodnościową. Określenie wskaźnika niezawodności dla obiektów technicznych w SZZW powinno odbyć się na podstawie danych eksploatacyjnych, jednak ze względu na częste braki w dokumentacji badanych obiektów nie jest to możliwe. Dopuszcza się przyjęcie orientacyjnych wartości na podstawie dostępnych danych literaturowych.

Wartości wskaźnika gotowości operatora zostaną przyjęte na podstawie wyników badań przedstawionych w rozdziale 9.2. Wyniki te mimo tego, że zostały uzyskane w wyniku badania rzeczywistej grupy operatorów, mogą być obarczone błędem, ze względu na niepewność odpowiedzi części ankietowanych operatorów. Można przypuszczać, że mimo zachowania anonimowości badań, badani operatorzy celowo zawyżali oceny w ankiecie, spodziewając się uzyskania lepszych wyników. Zachowanie takie często jest obserwowane w przypadku badań polegających na samoocenie i wynika

przede wszystkim z cech psychospołecznych badanej osoby, co należy mieć na uwadze podczas opracowania wyników. W związku z tym do analiz niezawodnościowych przyjęto średnie wyznaczone wartości wskaźnika gotowości dla operatorów.

Wartość poszukiwanego wskaźnika gotowości  $K_g$  dla całego SZZW należy wyznaczyć z zastosowaniem odpowiednich wzorów (8.45) – (8.47) wyznaczając wartość  $K_g$  dla poszczególnych struktur niezawodnościowych na opracowanym schemacie.

### 8.7. Metoda oceny możliwości zwiększenia niezawodności operatora w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę

W zaproponowanej metodzie oceny niezawodności operatora w SZZW ocenia się wpływ czynników CPC na poziom niezawodności operatora. Czynniki te podzielono na trzy grupy: czynniki organizacyjne, czynniki środowiskowe oraz czynniki związane z procesem pracy. W celu zwiększenia niezawodności operatora należy podjąć działania naprawcze dla czynników CPC w poszczególnych grupach. W tym celu operatorzy powinni udzielić odpowiedzi na pytania dotyczące czynników organizacyjnych, czynników środowiskowych oraz związanych z procesem pracy. Następnie odpowiedziom przyporządkowuje się liczbę punktów zgodnie z tabelą 8.14.

**Tabela 8.14.** Pytania i waga punktowa odpowiedzi

Grupa	Pytanie	Powiązany CPC	Odpowiedź	Liczba punktów	Współczynnik korekcyjny $\alpha$
1. Czynniki organizacyjne	Czy uważasz, że organizacja pracy w przedsiębiorstwie jest odpowiednia (podział zadań między poszczególne działy, pracowników itp.)?	CPC1	tak	0	0,66
			nie mam zdania	0,5	
			nie	1	
	Kiedy odbyło się ostatnie szkolenie z zakresu czynności operatorskich (obsługa urządzeń na SUW, obsługa oprogramowania SCADA, GIS itd.)?	CPC8	w ciągu ostatnich 12 miesięcy	0	
			1-2 lata temu	0,25	
			3-4 lata temu	0,5	
			> 5 lat temu	0,75	
			nigdy	1	
	Czy w pracy panuje koleżeńska atmosfera między współpracownikami?	CPC9	tak	0	
nie mam zdania			0,5		
nie			1		
2. Czynniki środowiskowe	Czy twoje stanowisko pracy jest przystosowane do wykonywania powierzonych zadań?	CPC2, CPC7	tak	0	-
			nie mam zdania	0,5	
			nie	1	
	Czy interfejs oprogramowania monitorującego-sterującego jest wygodny w użytkowaniu?	CPC3	tak	0	
			nie mam zdania	0,5	
3. Czynniki związane z procesem pracy	Czy istnieją i są dostępne procedury dla czynności operatorskich?	CPC4	tak	0	-
			nie mam zdania	0,5	
			nie	1	
	Czy podczas wykonywania czynności operatorskich odczuwasz presję czasu lub liczba zadań do wykonania jednocześnie jest zbyt duża ?	CPC5, CPC6	tak	1	
			nie mam zdania	0,5	
nie	0				

Ze względu na to, że każda z grup obejmuje po trzy czynniki CPC, założono, że każda z nich ma taki sam wpływ na poziom niezawodności operatora oraz w każdej z tych grup istnieją równe możliwości zwiększenia niezawodności operatora. W związku z tym dla każdej z grup ustalono maksymalną możliwą sumę punktów do uzyskania równą 2, co wymagało zastosowania dla grupy czynników organizacyjnych współczynnika korekcyjnego zgodnie z zależnością:

$$\Sigma P_{1k} = \alpha_1 \cdot \Sigma P_1 \quad (8.48)$$

gdzie:

- $\alpha_1$  – współczynnik korygujący dla grupy czynników organizacyjnych,
- $\Sigma P_1$  – suma punktów w grupie czynników organizacyjnych.

Suma wszystkich punktów  $\Sigma P$  wyznaczona z zależności 8.49 określa możliwości zwiększenia niezawodności operatora zgodnie z wartościami podanymi w tabeli 8.15. Wyniki dla poszczególnych operatorów należy przedstawić na wykresie radarowym.

$$\Sigma P = \Sigma P_{1k} + \Sigma P_2 + \Sigma P_3 \quad (8.48)$$

**Tabela 8.15.** Ocena możliwości zwiększenia niezawodności operatora

$\Sigma P$	Możliwości zwiększenia niezawodności operatora
0-1	bardzo niskie
1,1-2	niskie
2,1-3	znaczne
3,1-4	wysokie
4,1-6	bardzo wysokie

W przypadku wystąpienia bardzo wysokich, wysokich oraz znacznych możliwości zwiększenia niezawodności operatora zaleca się podjęcie działań naprawczych, skoncentrowanych na obszarach wskazanych przez wykres radarowy w obrębie grup czynników organizacyjnych, środowiskowych lub związanych z procesem pracy.

## 9. Wyniki badań

### 9.1. Ocena wpływu awarii związanych z działaniem operatora na niezawodność systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę

W celu oceny wpływu awarii związanych z działaniem operatora na niezawodność SZZW wykorzystano metodę wielokryterialną wspomaganą decyzji FSAW, za pomocą której stworzono ranking scenariuszy awaryjnych uszeregowanych od mającego największy wpływ do mającego najmniejszy wpływ na niezawodność SZZW. Wyniki te stanowią pierwszy z etapów badań nad niezawodnością operatora w SZZW mający na celu identyfikację najbardziej narażonych na awarię wynikającą z błędnego działania operatora elementów systemu.

Przedmiot badań stanowią awarie związane z działaniem operatora, za które uważa się zdarzenia powodujące uszkodzenie obiektu, systemu lub podsystemu uniemożliwiające, lub ograniczające jego funkcjonowanie w pewnym przedziale czasu [90], będące skutkiem błędu popełnionego przez operatora.

Do awarii związanych z działaniem operatora SZZW zaliczono:

- awaria uzbrojenia na ujęciu wody surowej,
- awaria pompowni I stopnia,
- awaria urządzeń i obiektów uzdatniania wody,
- awaria pompowni II stopnia,
- awaria uzbrojenia zbiorników sieciowych.

Powyższe informacje uzyskano na podstawie analizy schematów technologicznych, informacji uzyskanych od eksploatorów SZZW oraz ekspertów w dziedzinie zaopatrzenia w wodę.

W tabeli 9.1 przedstawiono wyniki indywidualnej oceny wariantów przeprowadzonej przez ekspertów. Po zamianie zmiennych lingwistycznych na liczby rozmyte i uśrednieniu wyników otrzymano rozmyte wyniki oceny przedstawione w tabeli 9.2. Następnie przeprowadzono agregację wyników z uwzględnieniem wag poszczególnych kryteriów. Zagregowane wyniki oceny przedstawiono w tabeli 9.3. W tabeli 9.4 przedstawiono wyniki defuzyfikacji oraz ranking, który określa wpływ ocenianego scenariusza na niezawodność SZZW, uszeregowany od mającego największy wpływ, do wariantu mającego najmniejszy wpływ na niezawodność SZZW.

**Tabela 9.1.** Wyniki oceny ekspertów

E <sub>1</sub>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	E <sub>2</sub>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>
A <sub>1</sub>	przeciętny	mały	bardzo mały	A <sub>1</sub>	duży	przeciętny	bardzo mały
A <sub>2</sub>	bardzo duży	bardzo mały	mały	A <sub>2</sub>	duży	mały	mały
A <sub>3</sub>	przeciętny	bardzo duży	mały	A <sub>3</sub>	duży	bardzo duży	mały
A <sub>4</sub>	bardzo duży	bardzo mały	bardzo duży	A <sub>4</sub>	bardzo duży	mały	bardzo duży
A <sub>5</sub>	duży	przeciętny	duży	A <sub>5</sub>	przeciętny	przeciętny	duży
E <sub>3</sub>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>
A <sub>1</sub>	mały	przeciętny	bardzo mały	A <sub>1</sub>	przeciętny	przeciętny	bardzo mały
A <sub>2</sub>	przeciętny	bardzo mały	mały	A <sub>2</sub>	przeciętny	przeciętny	bardzo mały
A <sub>3</sub>	duży	duży	mały	A <sub>3</sub>	duży	bardzo duży	mały
A <sub>4</sub>	duży	bardzo mały	duży	A <sub>4</sub>	bardzo duży	przeciętny	bardzo duży
A <sub>5</sub>	przeciętny	mały	przeciętny	A <sub>5</sub>	duży	przeciętny	duży

**Tabela 9.2.** Rozmyte wyniki oceny

Wariant\Kryterium	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>
A <sub>1</sub>	(3,25;4,25;5,75;6,75)	(2,5;3,5;5,25;6,25)	(0;0;1;2)
A <sub>2</sub>	(5;6;7,5;8,25)	(1;1,5;2,75;3,75)	(0,75;1,5;2,5;3,5)
A <sub>3</sub>	(5,25;6,25;7,5;8,25)	(7,5;8,5;9,5;9,75)	(1;2;3;4)
A <sub>4</sub>	(7,5;8,5;9,5;9,75)	(1;1,5;2,75;3,75)	(7,5;8,5;9,5;9,75)
A <sub>5</sub>	(4,5;5,5;7;8)	(2,5;3,5;5,25;6,25)	(5,25;6,25;7,5;8,5)

**Tabela 9.3.** Zagregowane wyniki oceny

Wariant	$FS_f(A_i)$
A <sub>1</sub>	(2,378;3,228;4,781;5,781)
A <sub>2</sub>	(2,312;3,019;4,316;5,231)
A <sub>3</sub>	(5,766;6,766;7,850;8,466)
A <sub>4</sub>	(4,169;4,913;6,041;6,675)
A <sub>5</sub>	(3,588;4,588;6,178;7,178)

**Tabela 9.4.** Wyniki defuzyfikacji oraz ranking wariantów

Ranking	$B_0$	Wariant
1	7,20	A <sub>3</sub>
2	5,45	A <sub>4</sub>
3	5,38	A <sub>5</sub>
4	4,05	A <sub>1</sub>
5	3,73	A <sub>2</sub>

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że spośród awarii związanych z działaniem operatora, największy wpływ na niezawodność SZZW mają awarie urządzeń i obiektów uzdatniania wody, następnie awarie pompowni II stopnia oraz uzbrojenia zbiorników wodociągowych, z kolei najmniejszy wpływ na niezawodność SZZW mają awarie uzbrojenia na ujęciach wody oraz awarie pompowni I stopnia. Według

ekspertów spośród proponowanych kryteriów oceny najważniejszym z nich w aspekcie zapewnienia odpowiedniego poziomu niezawodności SZZW jest dostarczenie do konsumenta wody o odpowiedniej jakości, następnie dostarczenie do konsumenta wody w odpowiedniej ilości, najmniejszą wagę przypisano do kryterium dostarczenia do konsumenta wody pod odpowiednim ciśnieniem. Wyniki te stanowią pierwszy etap badań nad niezawodnością operatora SZZW, wskazując elementy systemu najbardziej narażone na awarię wynikającą z błędnego działania operatora tj. podsystem uzdatniania wody (PsUzW), dla którego w dalszym etapie badań przeprowadzona zostanie szczegółowa ocena niezawodności operatora.

## 9.2. Ocena niezawodności operatora w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę

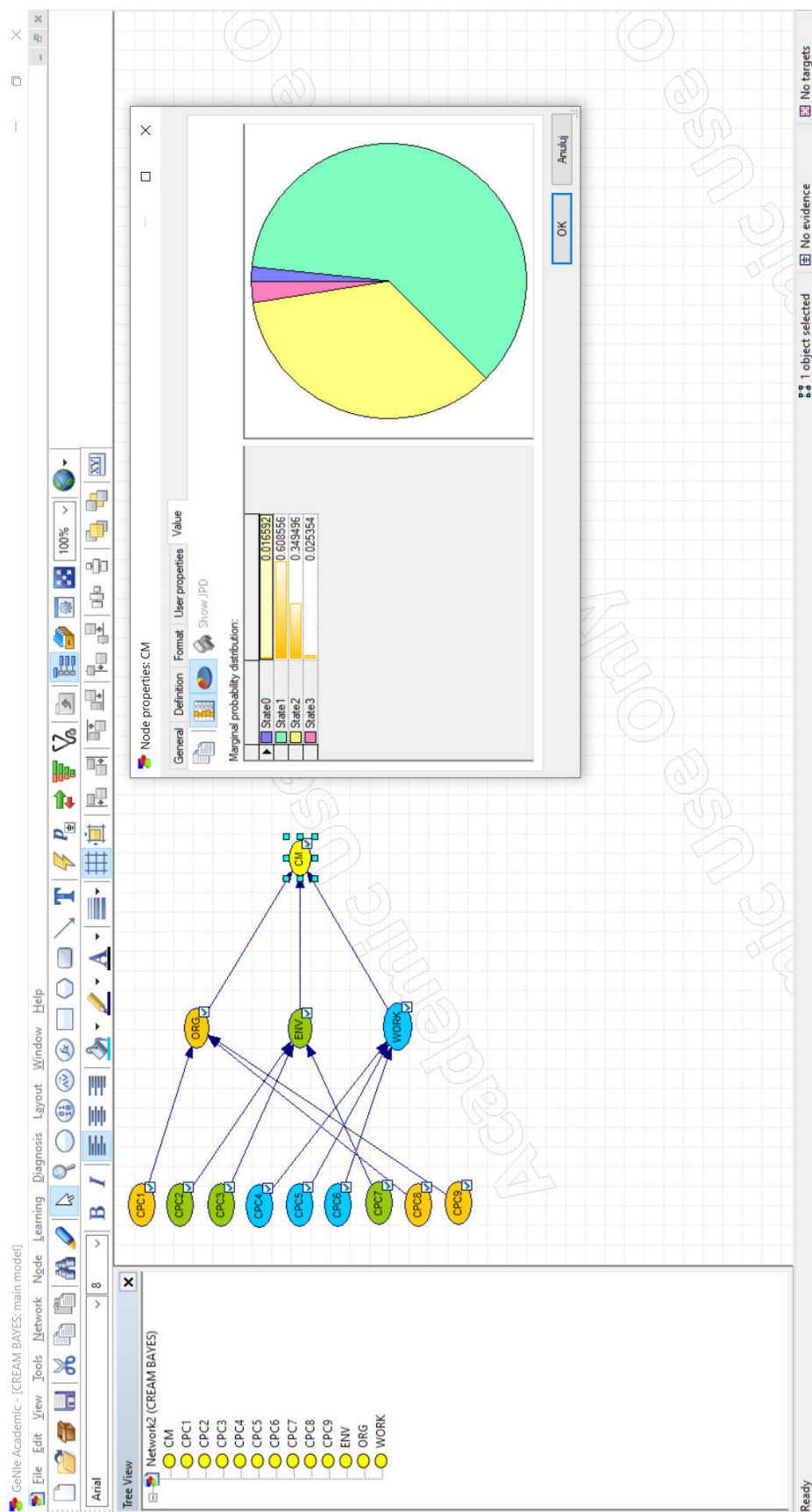
### 9.2.1. Ocena niezawodności operatora w podsystemie ujmowania wody

W celu zobrazowania toku rozumowania przedstawiono pełen proces oceny niezawodności operatora w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę za pomocą opracowanej metodyki na przykładzie operatora O1.

W tabeli 9.5 przedstawiono wyniki oceny czynników CPC dla operatora O1 w podsystemie ujmowania wody (PsUjW), uzyskane w procesie ankietyzacji oraz ich postać po procesie fuzyfikacji zgodnie z zależnościami 8.24 - 8.28 oraz rysunkiem 8.8. Następnie wartości rozmyte zostały wprowadzone do oprogramowania GeNIe 3.0 firmy BayesFusion, za pomocą którego przeprowadzono obliczenia dla sieci Bayesa obrazującej zależności między oceną czynników CPC, a trybem kontroli działania dla badanego operatora z wykorzystaniem zależności 8.33 – 8.36. Na rysunku 9.1 przedstawiono środowisko oprogramowania GeNIe 3.0. Wyniki uzyskane za pomocą programu przedstawiają rozkład prawdopodobieństwa dla trybu kontroli, w którym pracuje badany operator, co przedstawiono na rysunku 9.2.

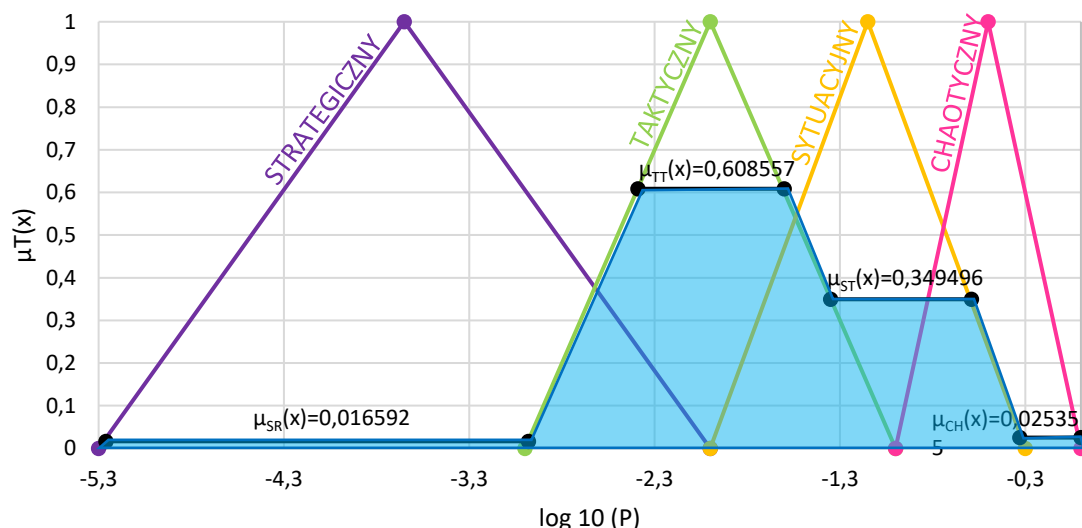
**Tabela 9.5.** Rozmyte wartości oceny czynników CPC dla operatora O1 dla procesu sterowania PsUjW

Czynnik CPC	Ocena wg. ankiety	Rozmyte wartości oceny
CPC1	50	0 ; 1 ; 0
CPC2	60	0,25 ; 0,75 ; 0
CPC3	60	0,25 ; 0,75 ; 0
CPC4	40	0 ; 0,75 ; 0,25
CPC5	60	0,25 ; 0,75
CPC6	50	0 ; 1 ; 0
CPC7	50	0 ; 1
CPC8	70	0,5 ; 0,5 ; 0
CPC9	60	0,25 ; 0,75 ; 0



Rys. 9.1. Okno programu GeNIe 3.0 firmy BayesFusion (sieć Bayesa dla operatora O1 w PsUjW)





**Rys. 9.2.** Wykres funkcji przynależności  $\mu_T(x)$  dla poszczególnych trybów kontroli dla operatora O1 w PsUjW

Kolejnym krokiem jest wyostrzenie otrzymanych wyników z programu GeNie 3.0 za pomocą metody COG, w celu otrzymania wartości OTK, za pomocą której w oparciu o zależność 8.37 można wyznaczyć prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora – HEP i dalej wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  z zależności 8.38. W tabeli 9.6. przedstawiono wyniki analizy niezawodności operatora wyrażone za pomocą wartości HEP – prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora oraz wskaźnika gotowości  $K_g$  dla operatora O1, oraz pozostałych przebadanych operatorów w PsUjW.

Wartości funkcji przynależności dla trybów kontroli zostały wyznaczone przez program GeNie 3.0 z dokładnością 6 miejsc po przecinku. Następnie wartości OTK, HEP oraz  $K_g$  wyznaczono z dokładnością 4 miejsc po przecinku. Dzięki temu możliwa jest analiza uzyskanych wyników wskaźnika gotowości operatora, charakteryzującymi się niewielkimi różnicami, które z punktu widzenia niezawodności są jednak znaczące. Dokładność taka ułatwia również interpretację wartości  $K_g$  jako prawdopodobieństwa opisanego wartością procentową.

Tabela 9.6. Wyniki analizy niezawodności operatorów O1 - O42 w PsUjW

Operator	Wartość funkcji przynależności dla trybów kontroli				OTK	HEP	K <sub>g</sub>
	$\mu_{CH}(X)$	$\mu_{ST}(X)$	$\mu_{TT}(X)$	$\mu_{SR}(X)$			
O1	0,025354	0,349496	0,608556	0,016592	-1,8050	0,0157	0,9843
O2	0,266923	0,636834	0,096243	0,000000	-1,1467	0,0713	0,9287
O3	0,000000	0,017528	0,517054	0,465418	-3,0237	0,0009	0,9991
O4	0,087567	0,453024	0,438742	0,020667	-1,6769	0,0210	0,9790
O5	0,017264	0,321658	0,661078	0,000000	-1,7502	0,0178	0,9822
O6	0,017264	0,321658	0,661078	0,000000	-1,7502	0,0178	0,9822
O7	0,141404	0,592263	0,266333	0,000000	-1,3780	0,0419	0,9581
O8	0,045249	0,394846	0,554329	0,005576	-1,7114	0,0194	0,9806
O9	0,012562	0,174904	0,577655	0,234879	-2,5988	0,0025	0,9975
O10	0,004256	0,118256	0,574832	0,302656	-2,7589	0,0017	0,9983
O11	0,049269	0,462622	0,488110	0,000000	-1,6355	0,0231	0,9769
O12	0,047835	0,348525	0,548107	0,055533	-1,9591	0,0110	0,9890
O13	0,002104	0,078966	0,636804	0,282126	-2,7435	0,0018	0,9982
O14	0,007354	0,167360	0,687288	0,137998	-2,3657	0,0043	0,9957
O15	0,011362	0,260946	0,700462	0,027230	-1,9161	0,0121	0,9879
O16	0,143538	0,617870	0,238592	0,000000	-1,3401	0,0457	0,9543
O17	0,000000	0,009727	0,425000	0,565273	-3,1477	0,0007	0,9993
O18	0,009914	0,148227	0,671434	0,170425	-2,4639	0,0034	0,9966
O19	0,266923	0,636834	0,096243	0,000000	-1,1467	0,0713	0,9287
O20	0,006439	0,114996	0,514768	0,367294	-2,8632	0,0014	0,9986
O21	0,073627	0,480852	0,445521	0,000000	-1,5671	0,0271	0,9729
O22	0,146850	0,620053	0,233096	0,000000	-1,3335	0,0464	0,9536
O23	0,144750	0,695088	0,160275	0,000000	-1,2608	0,0549	0,9451
O24	0,000000	0,014358	0,604775	0,380867	-2,9285	0,0012	0,9988
O25	0,000356	0,034237	0,595721	0,369686	-2,9036	0,0012	0,9988
O26	0,028545	0,290022	0,554056	0,127377	-2,2555	0,0056	0,9944
O27	0,009020	0,135237	0,638054	0,217689	-2,5834	0,0026	0,9974
O28	0,000000	0,072705	0,570888	0,356407	-2,8665	0,0014	0,9986
O29	0,000000	0,087802	0,673161	0,239037	-2,6581	0,0022	0,9978
O30	0,003156	0,127996	0,704713	0,164135	-2,4628	0,0034	0,9966
O31	0,004208	0,129792	0,728625	0,137375	-2,3899	0,0041	0,9959
O32	0,006268	0,153611	0,733405	0,106716	-2,2821	0,0052	0,9948
O33	0,000000	0,022400	0,713282	0,264318	-2,7472	0,0018	0,9982
O34	0,016781	0,297719	0,660428	0,025073	-1,8803	0,0132	0,9868
O35	0,000000	0,024932	0,588993	0,386074	-2,9303	0,0012	0,9988
O36	0,000872	0,103329	0,672788	0,223011	-2,6156	0,0024	0,9976
O37	0,000879	0,054758	0,716596	0,227767	-2,6565	0,0022	0,9978
O38	0,001750	0,079398	0,669918	0,248933	-2,6822	0,0021	0,9979
O39	0,000000	0,000000	0,550788	0,449212	-3,0196	0,0010	0,9990
O40	0,005659	0,251718	0,548546	0,194077	-2,4678	0,0034	0,9966
O41	0,000000	0,052383	0,666162	0,281455	-2,7581	0,0017	0,9983
O42	0,009806	0,194582	0,640513	0,155100	-2,3957	0,0040	0,9960

W tabeli 9.7 przedstawiono liczbowe charakterystyki statystyczne otrzymanych wyników.

**Tabela 9.7.** Podstawowe statystyki opisowe wartości HEP i  $K_g$  operatora w PsUjW

Parametr statystyczny	HEP	$K_g$
Min	0,0007	0,9287
Max	0,0713	0,9993
Średnia	0,0136	0,9864
Odchylenie standardowe	0,0189	0,0189
Kwartyl I	0,0018	0,9822
Mediana	0,0037	0,9963
Kwartyl III	0,0178	0,9982

Wartość prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora (HEP) w PsUjW zmieniają się w zakresie od 0,0007 do 0,0713. Średnia wartość HEP wynosi 0,0136, natomiast mediana 0,0037. Wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  w podsystemie ujmowania wody zmienia się w zakresie 0,9287 – 0,9993, przy czym średnia wartość wynosi 0,9864, a mediana 0,9963.

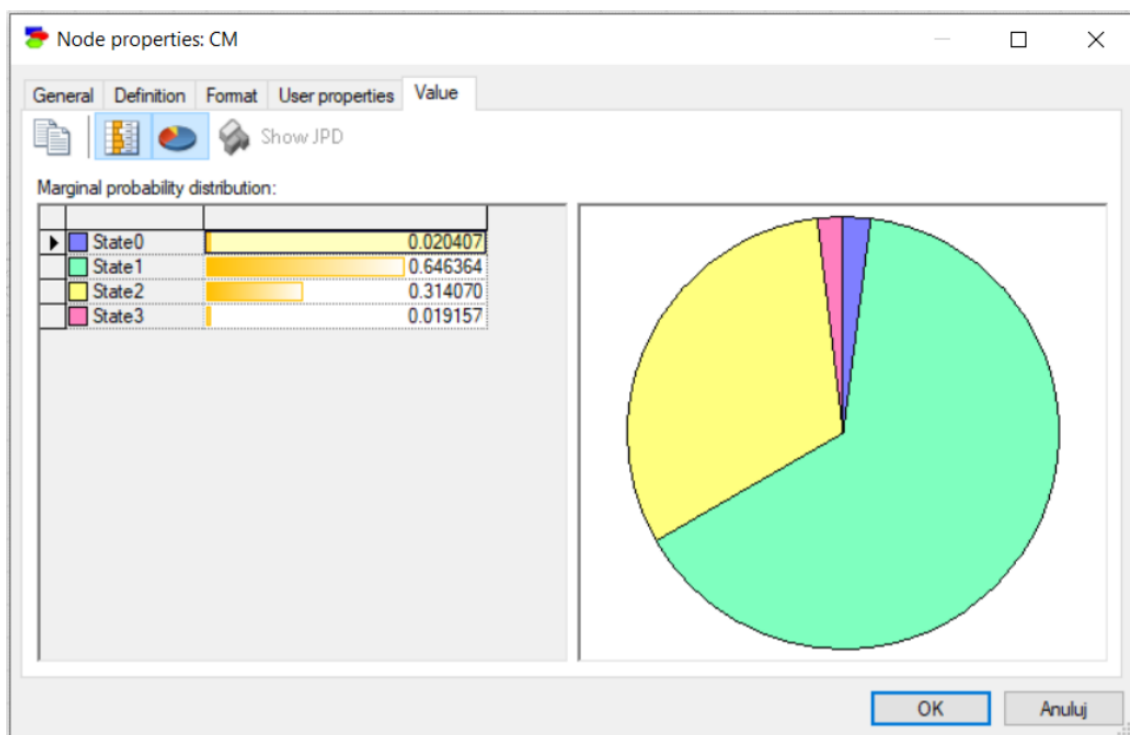
## 9.2.2. Ocena niezawodności operatora w podsystemie uzdatniania wody

### 9.2.2.1. Ocena niezawodności operatora w procesie utleniania wstępnego

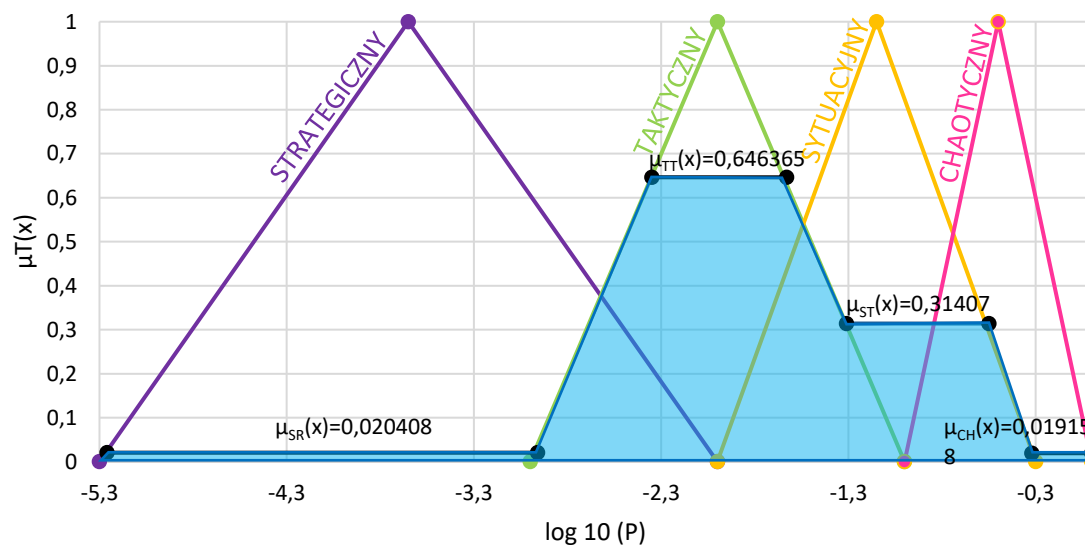
Proces utleniania wstępnego był realizowany w zakładach uzdatniania wody powierzchniowej, gdzie przebadano 34 operatorów (O1 – O27, O30 - O34, O37, O38). Zadaniem operatora w tym procesie jest głównie nadzorowanie parametrów procesu technologicznego, kontrola dawki reagentów oraz wykonywanie okresowych przeglądów i konserwacji urządzeń technicznych. W tabeli 9.8 przedstawiono wyniki oceny czynników CPC oraz ich rozmytą postać dla przykładowego operatora O1 w podsystemie uzdatniania wody, dla procesu utleniania wstępnego (PsUzW-UW). Na rysunku 9.3 przedstawiono wyniki obliczeń dla sieci Bayesa uzyskane w oprogramowaniu GeNIe 3.0. Wyniki te przedstawiają rozkład prawdopodobieństwa dla trybów kontroli, w którym pracuje badany operator, co przedstawiono na rysunku 9.4.

**Tabela 9. 8.** Rozmyte wartości oceny czynników CPC dla operatora O1 dla procesu sterowania PsUzW-UW

Czynnik CPC	Ocena wg. ankiety	Rozmyte wartości oceny
CPC1	50	0 ; 1 ; 0
CPC2	60	0,25 ; 0,75 ; 0
CPC3	50	0 ; 1 ; 0
CPC4	50	0 ; 1 ; 0
CPC5	60	0,25 ; 0,75
CPC6	60	0,25 ; 0,75 ; 0
CPC7	50	0 ; 1
CPC8	70	0,5 ; 0,5 ; 0
CPC9	60	0,25 ; 0,75 ; 0



**Rys. 9.3.** Wyniki operatora O1 dla PsUzW-UW (oprogramowanie GeNIe 3.0 firmy BayesFusion)



**Rys. 9.4.** Wykres funkcji przynależności  $\mu_T(x)$  dla poszczególnych trybów kontroli dla operatora O1 w PsUzW-UW

W tabeli 9.9. przedstawiono wyniki analizy niezawodności operatora w PsUzW-UW wyrażone za pomocą wartości HEP – prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora oraz wskaźnika gotowości  $K_g$  dla operatora O1, oraz pozostałych przebadanych operatorów.

**Tabela 9.9.** Wyniki analizy niezawodności operatorów O1 – O27, O30 - O34, O37, O38 w PsUzW-UW

Operator	Wartość funkcji przynależności dla trybów kontroli				OTK	HEP	$K_g$
	$\mu_{CH}(X)$	$\mu_{ST}(X)$	$\mu_{TT}(X)$	$\mu_{SR}(X)$			
O1	0,019157	0,314070	0,646364	0,020407	-1,8481	0,0142	0,9858
O2	0,125634	0,618515	0,255851	0,000000	-1,3632	0,0433	0,9567
O3	0,007936	0,141112	0,585537	0,265415	-2,6789	0,0021	0,9979
O4	0,147708	0,616733	0,235558	0,000000	-1,3357	0,0462	0,9538
O5	0,025375	0,335729	0,608660	0,030236	-1,8740	0,0134	0,9866
O6	0,035428	0,377419	0,580930	0,006223	-1,7326	0,0185	0,9815
O7	0,036760	0,377601	0,578109	0,007530	-1,7378	0,0183	0,9817
O8	0,033335	0,368642	0,592437	0,005586	-1,7366	0,0183	0,9817
O9	0,002862	0,130743	0,577554	0,288842	-2,7286	0,0019	0,9981
O10	0,001060	0,059915	0,612536	0,326489	-2,8274	0,0015	0,9985
O11	0,046398	0,408302	0,537827	0,007473	-1,7109	0,0195	0,9805
O12	0,020041	0,237251	0,599528	0,143180	-2,3346	0,0046	0,9954
O13	0,002442	0,085774	0,687042	0,224742	-2,6298	0,0023	0,9977
O14	0,004903	0,134155	0,717356	0,143587	-2,4038	0,0039	0,9961
O15	0,011194	0,233226	0,678013	0,077567	-2,1305	0,0074	0,9926
O16	0,085790	0,552446	0,361764	0,000000	-1,4793	0,0332	0,9668

**Tabela 9.9. (cd.)** Wyniki analizy niezawodności operatorów O1 – O27, O30 - O34, O37, O38 w PsUzW-UW

Operator	Wartość funkcji przynależności dla trybów kontroli				OTK	HEP	K <sub>g</sub>
	$\mu_{CH}(X)$	$\mu_{ST}(X)$	$\mu_{TT}(X)$	$\mu_{SR}(X)$			
O17	0,000000	0,010600	0,387344	0,602056	-3,1887	0,0006	0,9994
O18	0,022837	0,229927	0,659183	0,088053	-2,1642	0,0069	0,9931
O19	0,161063	0,639288	0,199649	0,000000	-1,2948	0,0507	0,9493
O20	0,008554	0,140215	0,528347	0,322883	-2,7836	0,0016	0,9984
O21	0,040341	0,403345	0,556314	0,000000	-1,6809	0,0208	0,9792
O22	0,125634	0,618515	0,255851	0,000000	-1,3632	0,0433	0,9567
O23	0,099750	0,632750	0,267500	0,000000	-1,3830	0,0414	0,9586
O24	0,000531	0,037362	0,585683	0,376424	-2,9113	0,0012	0,9988
O25	0,000363	0,027216	0,465536	0,506885	-3,0771	0,0008	0,9992
O26	0,009437	0,203904	0,711139	0,075520	-2,1429	0,0072	0,9928
O27	0,014638	0,247110	0,660718	0,077534	-2,1201	0,0076	0,9924
O30	0,002616	0,103764	0,690653	0,202967	-2,5714	0,0027	0,9973
O31	0,003527	0,119686	0,724127	0,152660	-2,4385	0,0036	0,9964
O32	0,002104	0,098312	0,755553	0,144031	-2,4309	0,0037	0,9963
O33	0,001410	0,076454	0,679871	0,242265	-2,6711	0,0021	0,9979
O34	0,029982	0,347676	0,622342	0,000000	-1,7255	0,0188	0,9812
O37	0,005291	0,111384	0,575978	0,307347	-2,7702	0,0017	0,9983
O38	0,000528	0,041381	0,648977	0,309114	-2,8103	0,0015	0,9985

W tabeli 9.10 przedstawiono liczbowe charakterystyki statystyczne otrzymanych wyników.

**Tabela 9.10.** Podstawowe statystyki opisowe wartości HEP i K<sub>g</sub> operatora w PsUzW-UW

Parametr statystyczny	HEP	K <sub>g</sub>
Min	0,0006	0,9493
Max	0,0507	0,9994
Średnia	0,0137	0,9863
Odchylenie standardowe	0,0151	0,0151
Kwartył I	0,0021	0,9813
Mediana	0,0070	0,9930
Kwartył III	0,0187	0,9979

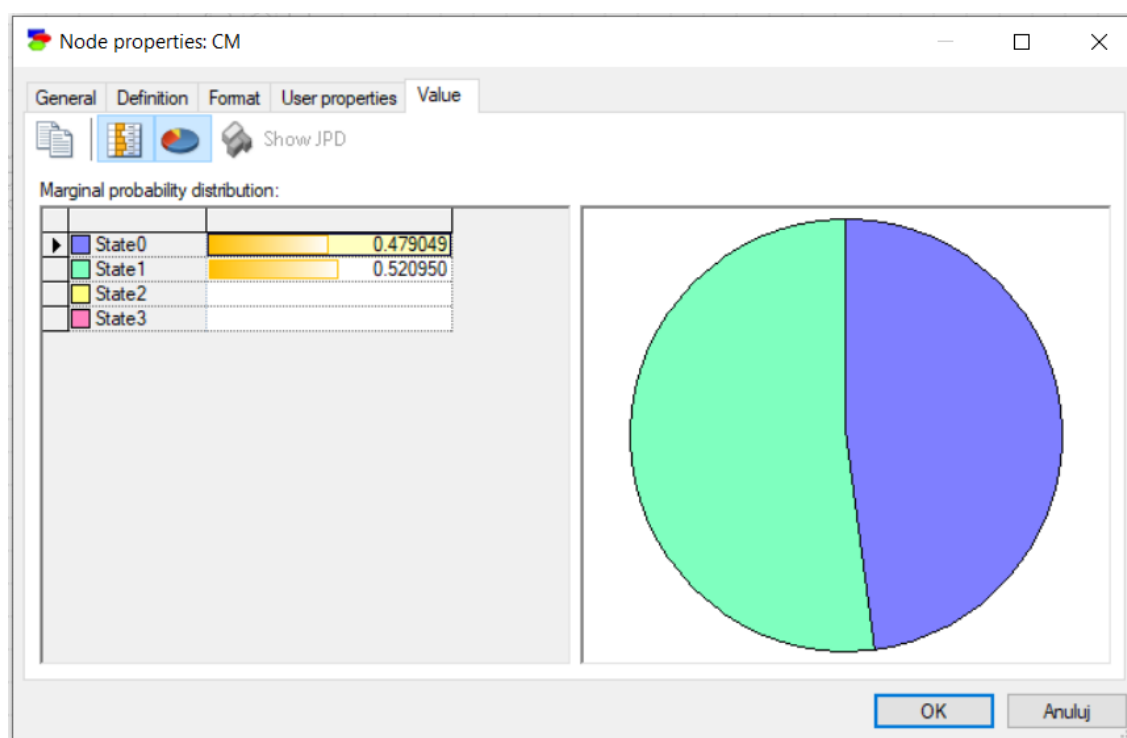
Wartość prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora (HEP) w PsUzW-UW zmieniają się w zakresie od 0,0006 do 0,0507. Średnia wartość HEP wynosi 0,0137, natomiast mediana 0,0070. Wartość wskaźnika gotowości operatora K<sub>g</sub> w podsystemie uzdatniania wody, dla procesu utleniania wstępnego zmienia się w zakresie 0,9493 – 0,9994, przy czym średnia wartość wynosi 0,9863, a mediana 0,9930.

### 9.2.2.2. Ocena niezawodności operatora w procesie napowietrzania

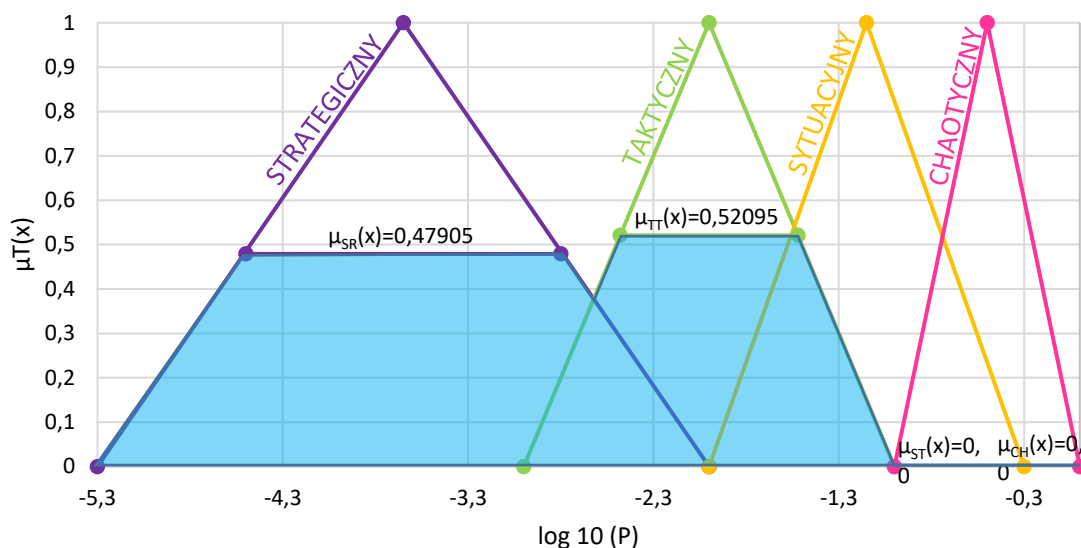
Proces napowietrzania realizowany był w zakładach uzdatniania wody podziemnej, w których przebadano 4 operatorów (O39 – O42). W tabeli 9.11 przedstawiono wyniki oceny czynników CPC oraz ich rozmytą postać dla przykładowego operatora O39 w podsystemie uzdatniania wody, dla procesu napowietrzania (PsUzW-N). Na rysunku 9.5 przedstawiono wyniki obliczeń dla sieci Bayesa uzyskane w oprogramowaniu GeNIe 3.0. Wyniki te przedstawiają rozkład prawdopodobieństwa dla trybów kontroli, w którym pracuje badany operator, co przedstawiono na rysunku 9.6.

**Tabela 9.11.** Rozmyte wartości oceny czynników CPC dla operatora O39 dla procesu sterowania PsUzW-N

Czynnik CPC	Ocena wg. ankiety	Rozmyte wartości oceny
CPC1	100	1 ; 0 ; 0
CPC2	100	1 ; 0 ; 0
CPC3	80	0,75 ; 0,25 ; 0
CPC4	50	0 ; 1 ; 0
CPC5	100	1 ; 0
CPC6	100	1 ; 0 ; 0
CPC7	100	1 ; 0
CPC8	100	1 ; 0 ; 0
CPC9	80	0,75 ; 0,25 ; 0



**Rys. 9.5.** Wyniki operatora O39 dla PsUzW-N (oprogramowanie GeNIe 3.0 firmy BayesFusion)



**Rys. 9.6.** Wykres funkcji przynależności  $\mu_T(x)$  dla poszczególnych trybów kontroli dla operatora O39 w PsUzW-N

W tabeli 9.12. przedstawiono wyniki analizy niezawodności operatora w podsystemie uzdatniania wody, dla procesu napowietrzania wyrażone za pomocą wartości HEP – prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora oraz wskaźnika gotowości  $K_g$  dla operatorów O39-O42.

**Tabela 9.12.** Wyniki analizy niezawodności operatorów O39-O42 w PsUzW-N

Operator	Wartość funkcji przynależności dla trybów kontroli				OTK	HEP	$K_g$
	$\mu_{CH}(X)$	$\mu_{ST}(X)$	$\mu_{TT}(X)$	$\mu_{SR}(X)$			
O39	0,000000	0,000000	0,520950	0,479050	-3,0541	0,0009	0,9991
O40	0,002861	0,143965	0,519584	0,333590	-2,8004	0,0016	0,9984
O41	0,000000	0,010444	0,460595	0,528962	-3,1021	0,0008	0,9992
O42	0,000000	0,014056	0,563915	0,422029	-2,9744	0,0011	0,9989

W tabeli 9.13 przedstawiono liczbowe charakterystyki statystyczne otrzymanych wyników.

**Tabela 9.13.** Podstawowe statystyki opisowe wartości HEP i  $K_g$  operatora w PsUzW-N

Parametr statystyczny	HEP	$K_g$
Min	0,0008	0,9984
Max	0,0016	0,9992
Średnia	0,0011	0,9989
Odchylenie standardowe	0,0003	0,0003
Kwartył I	0,0009	0,9988
Mediana	0,0010	0,9990
Kwartył III	0,0012	0,9991



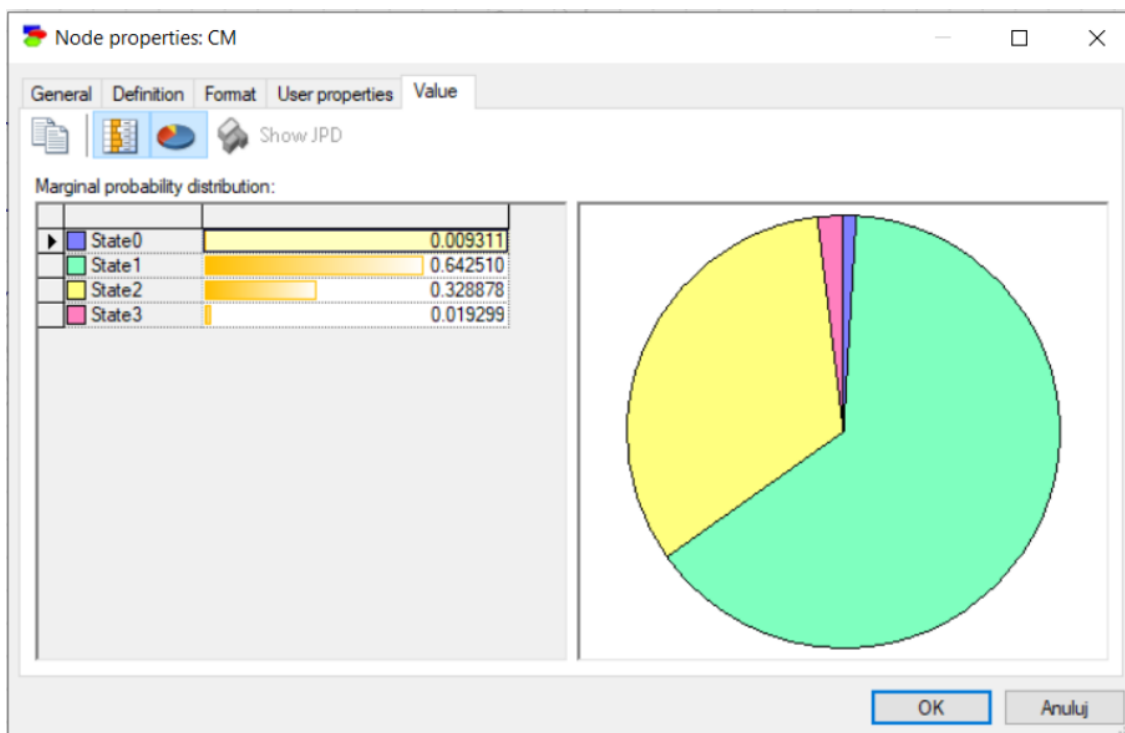
Wartość prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora (HEP) w PsUzW-N zmieniają się w zakresie od 0,0008 do 0,0016. Średnia wartość HEP wynosi 0,0011, natomiast mediana 0,0010. Wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  w podsystemie uzdatniania wody, dla procesu napowietrzania zmienia się w zakresie 0,9984 – 0,9992, przy czym średnia wartość wynosi 0,9989, a mediana 0,9990.

### 9.2.2.3. Ocena niezawodności operatora w procesie koagulacji

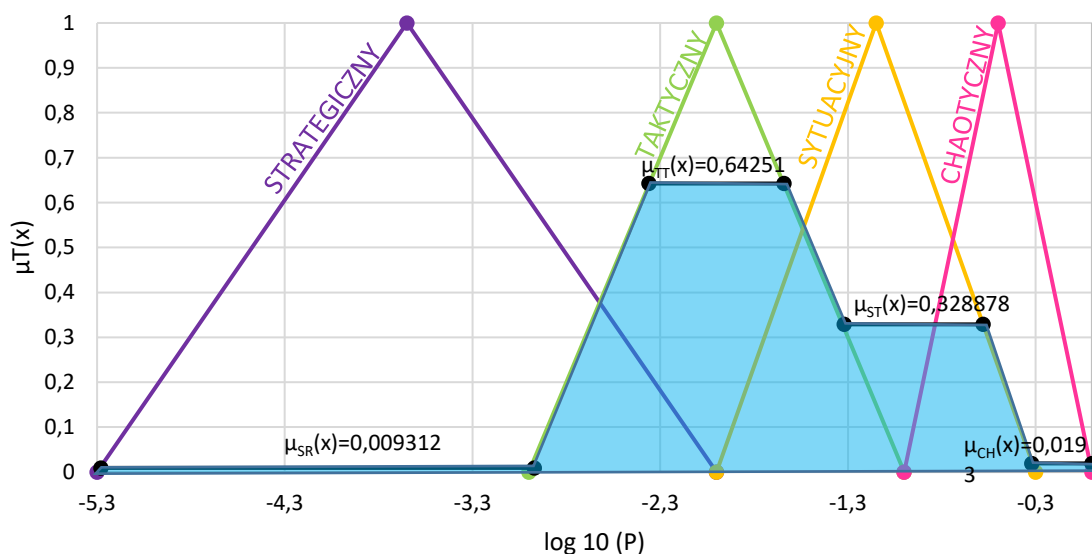
Proces koagulacji realizowany był w zakładach uzdatniania wody powierzchniowej, w których przebadano 38 operatorów (O1 – O38). W tabeli 9.14 przedstawiono wyniki oceny czynników CPC oraz ich rozmytą postać dla przykładowego operatora O1 w podsystemie uzdatniania wody, dla procesu koagulacji (PsUzW-K). Na rysunku 9.7 przedstawiono wyniki obliczeń dla sieci Bayesa uzyskane w oprogramowaniu GeNIe 3.0. Wyniki te przedstawiają rozkład prawdopodobieństwa dla trybów kontroli, w którym pracuje badany operator, co przedstawiono na rysunku 9.8.

**Tabela 9.14.** Rozmyte wartości oceny czynników CPC dla operatora O1 dla procesu sterowania PsUzW-K

Czynnik CPC	Ocena wg. ankiety	Rozmyte wartości oceny
CPC1	50	0 ; 1 ; 0
CPC2	60	0,25 ; 0,75 ; 0
CPC3	50	0 ; 1 ; 0
CPC4	50	0 ; 1 ; 0
CPC5	60	0,25 ; 0,75
CPC6	50	0 ; 1 ; 0
CPC7	50	0 ; 1
CPC8	70	0,5 ; 0,5 ; 0
CPC9	60	0,25 ; 0,75 ; 0



**Rys. 9.7.** Wyniki operatora O1 dla PsUzW-K (oprogramowanie GeNIe 3.0 firmy BayesFusion)



**Rys. 9.8.** Wykres funkcji przynależności  $\mu_T(x)$  dla poszczególnych trybów kontroli dla operatora O1 w PsUzW-K

W tabeli 9.15. przedstawiono wyniki analizy niezawodności operatora w PsUzW-K wyrażone za pomocą wartości HEP – prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora oraz wskaźnika gotowości  $K_g$  dla operatora O1, oraz pozostałych przebadanych operatorów.

**Tabela 9.15.** Wyniki analizy niezawodności operatorów O1 – O38 w PsUzW-K

Operator	Wartość funkcji przynależności dla trybów kontroli				OTK	HEP	K <sub>g</sub>
	$\mu_{CH}(X)$	$\mu_{ST}(X)$	$\mu_{TT}(X)$	$\mu_{SR}(X)$			
O1	0,019299	0,328878	0,642510	0,009311	-1,7883	0,0163	0,9837
O2	0,161063	0,639288	0,199649	0,000000	-1,2948	0,0507	0,9493
O3	0,005597	0,124727	0,673611	0,196065	-2,5418	0,0029	0,9971
O4	0,217410	0,610531	0,172059	0,000000	-1,2464	0,0567	0,9433
O5	0,017264	0,321658	0,661078	0,000000	-1,7502	0,0178	0,9822
O6	0,025375	0,335729	0,608660	0,030236	-1,8740	0,0134	0,9866
O7	0,042846	0,425122	0,529591	0,002441	-1,6779	0,0210	0,9790
O8	0,046398	0,408302	0,537827	0,007473	-1,7109	0,0195	0,9805
O9	0,001436	0,090039	0,709018	0,199507	-2,5729	0,0027	0,9973
O10	0,000882	0,047272	0,631415	0,320431	-2,8248	0,0015	0,9985
O11	0,021621	0,359672	0,618707	0,000000	-1,7232	0,0189	0,9811
O12	0,018973	0,207259	0,626591	0,147178	-2,3635	0,0043	0,9957
O13	0,001048	0,057441	0,707195	0,234316	-2,6677	0,0021	0,9979
O14	0,014708	0,236095	0,644961	0,104235	-2,2178	0,0061	0,9939
O15	0,005639	0,163982	0,767644	0,062736	-2,1256	0,0075	0,9925
O16	0,096161	0,580561	0,323278	0,000000	-1,4386	0,0364	0,9636
O17	0,000000	0,000000	0,332819	0,667181	-3,2747	0,0005	0,9995
O18	0,020954	0,212641	0,631109	0,135297	-2,3255	0,0047	0,9953
O19	0,217410	0,610531	0,172059	0,000000	-1,2464	0,0567	0,9433
O20	0,006415	0,118230	0,535568	0,339787	-2,8208	0,0015	0,9985
O21	0,040341	0,403345	0,556314	0,000000	-1,6809	0,0208	0,9792
O22	0,128719	0,607921	0,263360	0,000000	-1,3696	0,0427	0,9573
O23	0,121544	0,630846	0,247614	0,000000	-1,3564	0,0440	0,9560
O24	0,002819	0,103579	0,575806	0,317796	-2,7917	0,0016	0,9984
O25	0,000356	0,034237	0,595721	0,369686	-2,9036	0,0012	0,9988
O26	0,007299	0,160590	0,671133	0,160978	-2,4326	0,0037	0,9963
O27	0,022837	0,229927	0,659183	0,088053	-2,1642	0,0069	0,9931
O28	0,000000	0,008344	0,549344	0,442313	-3,0080	0,0010	0,9990
O29	0,000000	0,041375	0,657125	0,301500	-2,7981	0,0016	0,9984
O30	0,003501	0,104008	0,656202	0,236289	-2,6421	0,0023	0,9977
O31	0,001757	0,087155	0,720314	0,190774	-2,5550	0,0028	0,9972
O32	0,004256	0,147286	0,783148	0,065310	-2,1476	0,0071	0,9929
O33	0,004229	0,114049	0,608629	0,273092	-2,7079	0,0020	0,9980
O34	0,016854	0,292280	0,668685	0,022180	-1,8711	0,0135	0,9865
O35	0,000000	0,033353	0,595161	0,371486	-2,9065	0,0012	0,9988
O36	0,000000	0,091227	0,750794	0,157979	-2,4733	0,0034	0,9966
O37	0,001426	0,069948	0,563540	0,365086	-2,8804	0,0013	0,9987
O38	0,001063	0,062050	0,644556	0,292332	-2,7709	0,0017	0,9983

W tabeli 9.16 przedstawiono liczbowe charakterystyki statystyczne otrzymanych wyników.

**Tabela 9.16.** Podstawowe statystyki opisowe wartości HEP i  $K_g$  operatora w PsUzW-K

Parametr statystyczny	HEP	$K_g$
Min	0,0005	0,9433
Max	0,0567	0,9995
Średnia	0,0132	0,9868
Odchylenie standardowe	0,0165	0,0165
Kwartył I	0,0018	0,9814
Mediana	0,0045	0,9955
Kwartył III	0,0186	0,9982

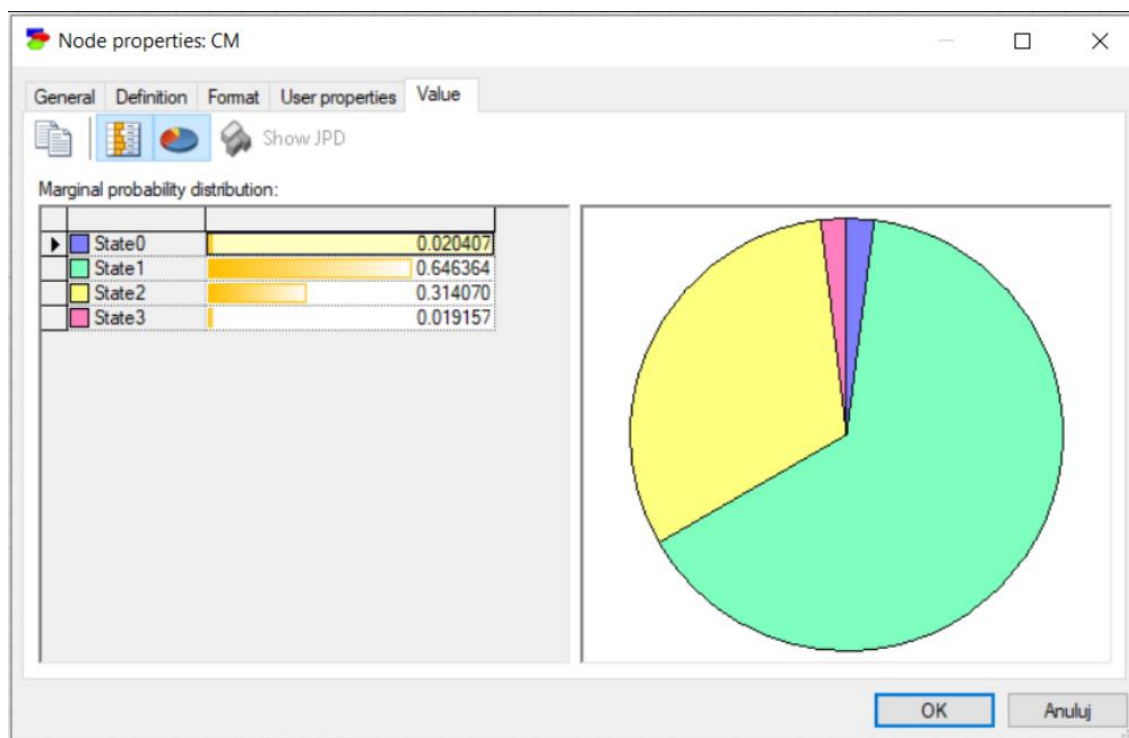
Wartość prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora (HEP) w PsUzW-K zmieniają się w zakresie od 0,0005 do 0,0567. Średnia wartość HEP wynosi 0,0132, natomiast mediana 0,0045. Wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  w podsystemie uzdatniania wody, dla procesu koagulacji zmienia się w zakresie 0,9433 – 0,9995, przy czym średnia wartość wynosi 0,9868, a mediana 0,9955.

#### 9.2.2.4. Ocena niezawodności operatora w procesie filtracji

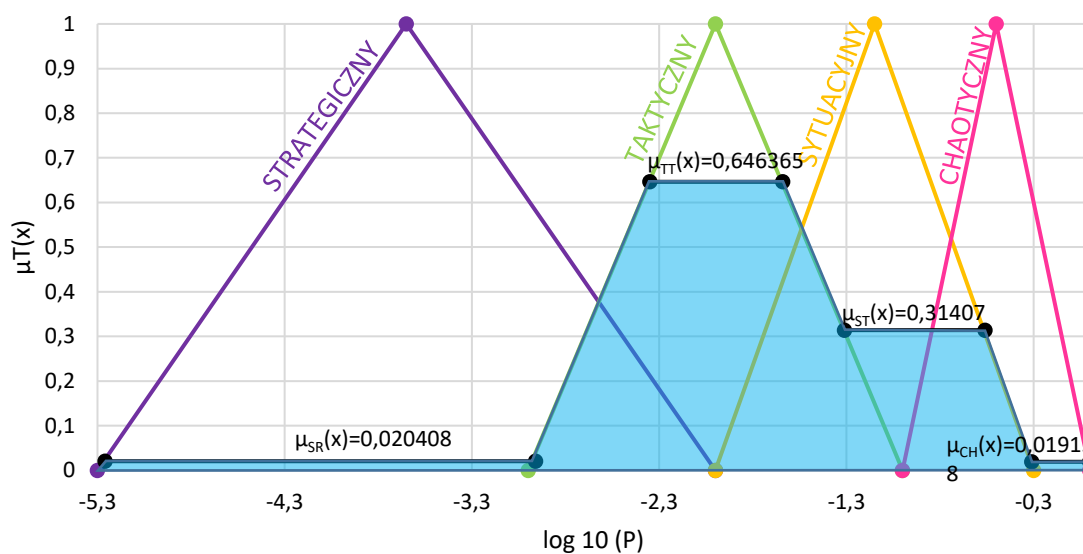
Proces filtracji był realizowany we wszystkich przebadanych ZUW, wyniki przedstawiono w podziale na proces filtracji w zakładach uzdatniających wodę powierzchniową oraz na proces filtracji w zakładach uzdatniających wodę podziemną. W tabeli 9.17 przedstawiono wyniki oceny czynników CPC oraz ich rozmytą postać dla przykładowego operatora O1 w podsystemie uzdatniania wody, dla procesu filtracji wody powierzchniowej oraz podziemnej (PsUzW-FPw/Pd). Na rysunku 9.9 przedstawiono wyniki obliczeń dla sieci Bayesa uzyskane w oprogramowaniu GeNIe 3.0. Wyniki te przedstawiają rozkład prawdopodobieństwa dla trybów kontroli, w którym pracuje badany operator, co przedstawiono na rysunku 9.10.

**Tabela 9.17.** Rozmyte wartości oceny czynników CPC dla operatora O1 dla procesu sterowania PsUzW-FPw

Czynnik CPC	Ocena wg. ankiety	Rozmyte wartości oceny
CPC1	50	0 ; 1 ; 0
CPC2	60	0,25 ; 0,75 ; 0
CPC3	50	0 ; 1 ; 0
CPC4	50	0 ; 1 ; 0
CPC5	60	0,25 ; 0,75
CPC6	60	0,25 ; 0,75 ; 0
CPC7	50	0 ; 1
CPC8	70	0,5 ; 0,5 ; 0
CPC9	60	0,25 ; 0,75 ; 0



**Rys. 9.9.** Wyniki operatora O1 dla PsUzW-FPw (oprogramowanie GeNIe 3.0 firmy BayesFusion)



**Rys. 9.10.** Wykres funkcji przynależności  $\mu_T(x)$  dla poszczególnych trybów kontroli dla operatora O1 w PsUzW-FPw

W tabelach 9.18 oraz 9.19 przedstawiono wyniki analizy niezawodności operatora w PsUzW-FPw/Pd wyrażone za pomocą wartości HEP – prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora oraz wskaźnika gotowości  $K_g$  dla operatora O1, oraz pozostałych przebadanych operatorów.

**Tabela 9.18.** Wyniki analizy niezawodności operatorów O1 – O38 w PsUzW-FPw

Operator	Wartość funkcji przynależności dla trybów kontroli				OTK	HEP	K <sub>g</sub>
	$\mu_{CH}(X)$	$\mu_{ST}(X)$	$\mu_{TT}(X)$	$\mu_{SR}(X)$			
O1	0,019157	0,314070	0,646364	0,020407	-1,8481	0,0142	0,9858
O2	0,147708	0,616733	0,235558	0,000000	-1,3357	0,0462	0,9538
O3	0,004921	0,122480	0,683841	0,188757	-2,5263	0,0030	0,9970
O4	0,266923	0,636834	0,096243	0,000000	-1,1467	0,0713	0,9287
O5	0,017264	0,321658	0,661078	0,000000	-1,7502	0,0178	0,9822
O6	0,021146	0,315620	0,639450	0,023784	-1,8609	0,0138	0,9862
O7	0,031499	0,402927	0,562797	0,002777	-1,7022	0,0199	0,9801
O8	0,031036	0,384958	0,578420	0,005585	-1,7276	0,0187	0,9813
O9	0,001447	0,091762	0,500204	0,406587	-2,9312	0,0012	0,9988
O10	0,001590	0,080427	0,607657	0,310326	-2,7909	0,0016	0,9984
O11	0,046398	0,408302	0,537827	0,007473	-1,7109	0,0195	0,9805
O12	0,007227	0,153801	0,680345	0,158627	-2,4307	0,0037	0,9963
O13	0,000526	0,039203	0,616730	0,343541	-2,8640	0,0014	0,9986
O14	0,012641	0,227711	0,683581	0,076067	-2,1280	0,0074	0,9926
O15	0,004939	0,146662	0,754290	0,094108	-2,2472	0,0057	0,9943
O16	0,106180	0,554522	0,339298	0,000000	-1,4517	0,0353	0,9647
O17	0,000000	0,000000	0,406432	0,593568	-3,1812	0,0007	0,9993
O18	0,022899	0,220432	0,642185	0,114484	-2,2570	0,0055	0,9945
O19	0,217410	0,610531	0,172059	0,000000	-1,2464	0,0567	0,9433
O20	0,008554	0,140215	0,528347	0,322883	-2,7836	0,0016	0,9984
O21	0,040341	0,403345	0,556314	0,000000	-1,6809	0,0208	0,9792
O22	0,108047	0,605898	0,286055	0,000000	-1,3985	0,0400	0,9601
O23	0,153598	0,663310	0,183092	0,000000	-1,2807	0,0524	0,9476
O24	0,002820	0,103579	0,575806	0,317796	-2,7917	0,0016	0,9984
O25	0,028545	0,290022	0,554056	0,127377	-2,2555	0,0056	0,9944
O26	0,009445	0,197580	0,708609	0,084366	-2,1780	0,0066	0,9934
O27	0,020954	0,212641	0,631109	0,135297	-2,3255	0,0047	0,9953
O28	0,000000	0,059033	0,519589	0,421377	-2,9622	0,0011	0,9989
O29	0,000000	0,065340	0,653420	0,281240	-2,7501	0,0018	0,9982
O30	0,001757	0,089691	0,746975	0,161578	-2,4829	0,0033	0,9967
O31	0,003156	0,127996	0,704713	0,164135	-2,4628	0,0034	0,9966
O32	0,004224	0,135596	0,747769	0,112411	-2,3130	0,0049	0,9951
O33	0,001764	0,067009	0,593938	0,337289	-2,8404	0,0014	0,9986
O34	0,006360	0,184001	0,746583	0,063056	-2,1125	0,0077	0,9923
O35	0,000000	0,044073	0,435986	0,519941	-3,0879	0,0008	0,9992
O36	0,000000	0,086089	0,634345	0,279566	-2,7354	0,0018	0,9982
O37	0,002128	0,082261	0,605529	0,310082	-2,7895	0,0016	0,9984
O38	0,004193	0,118481	0,688871	0,188455	-2,5283	0,0030	0,9970

**Tabela 9.19.** Wyniki analizy niezawodności operatorów O39-O42 w PsUzW-FPd

Operator	Wartość funkcji przynależności dla trybów kontroli				OTK	HEP	K <sub>g</sub>
	$\mu_{CH}(X)$	$\mu_{ST}(X)$	$\mu_{TT}(X)$	$\mu_{SR}(X)$			
O39	0,000000	0,000000	0,443670	0,556330	-3,1402	0,0007	0,9993
O40	0,022303	0,291717	0,530404	0,155576	-2,3410	0,0046	0,9954
O41	0,000000	0,000000	0,515260	0,484740	-3,0605	0,0009	0,9991
O42	0,000358	0,030724	0,529743	0,439175	-2,9952	0,0010	0,9990

W tabelach 9.20 i 9.21 przedstawiono liczbowe charakterystyki statystyczne otrzymanych wyników.

**Tabela 9.20.** Podstawowe statystyki opisowe wartości HEP i K<sub>g</sub> operatora w PsUzW-FPw

Parametr statystyczny	HEP	K <sub>g</sub>
Min	0,0007	0,9287
Max	0,0713	0,9993
Średnia	0,0147	0,9853
Odchylenie standardowe	0,0182	0,0182
Kwartył I	0,0021	0,9807
Mediana	0,0056	0,9944
Kwartył III	0,0193	0,9979

Wartość prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora (HEP) w PsUzW-FPw zmieniają się w zakresie od 0,0007 do 0,0713. Średnia wartość HEP wynosi 0,0147, natomiast mediana 0,0056. Wartość wskaźnika gotowości operatora K<sub>g</sub> w podsystemie uzdatniania wody, dla procesu filtracji (wody powierzchniowe) zmienia się w zakresie 0,9287 – 0,9993, przy czym średnia wartość wynosi 0,9853, a mediana 0,9944.

**Tabela 9.21.** Podstawowe statystyki opisowe wartości HEP i K<sub>g</sub> operatora w PsUzW-FPd

Parametr statystyczny	HEP	K <sub>g</sub>
Min	0,0008	0,9970
Max	0,0030	0,9992
Średnia	0,0018	0,9982
Odchylenie standardowe	0,0008	0,0008
Kwartył I	0,0014	0,9979
Mediana	0,0017	0,9983
Kwartył III	0,0021	0,9986

Wartość prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora (HEP) w PsUzW-FPd zmieniają się w zakresie od 0,0008 do 0,0030. Średnia wartość HEP wynosi 0,018, natomiast mediana 0,0017. Wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  w podsystemie uzdatniania wody, dla procesu filtracji (wody podziemne) zmienia się w zakresie 0,9970 – 0,9992, przy czym średnia wartość wynosi 0,9982, a mediana 0,9983.

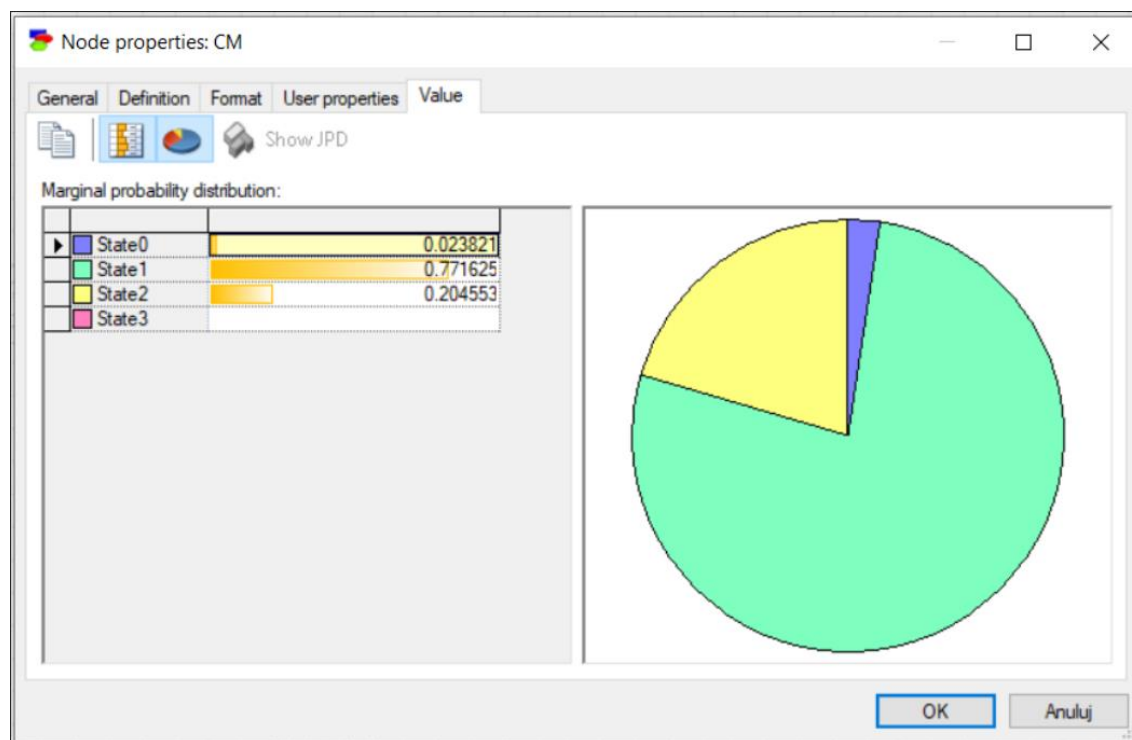
#### 9.2.2.5. Ocena niezawodności operatora w procesie dezynfekcji

W tabeli 9.22 przedstawiono wyniki oceny czynników CPC oraz ich rozmytą postać dla przykładowego operatora O1 w podsystemie uzdatniania wody, dla procesu dezynfekcji (PsUzW-D). Na rysunku 9.11 przedstawiono wyniki obliczeń dla sieci Bayesa uzyskane w oprogramowaniu GeNIe 3.0. Wyniki te przedstawiają rozkład prawdopodobieństwa dla trybów kontroli, w którym pracuje badany operator, co przedstawiono na rysunku 9.12.

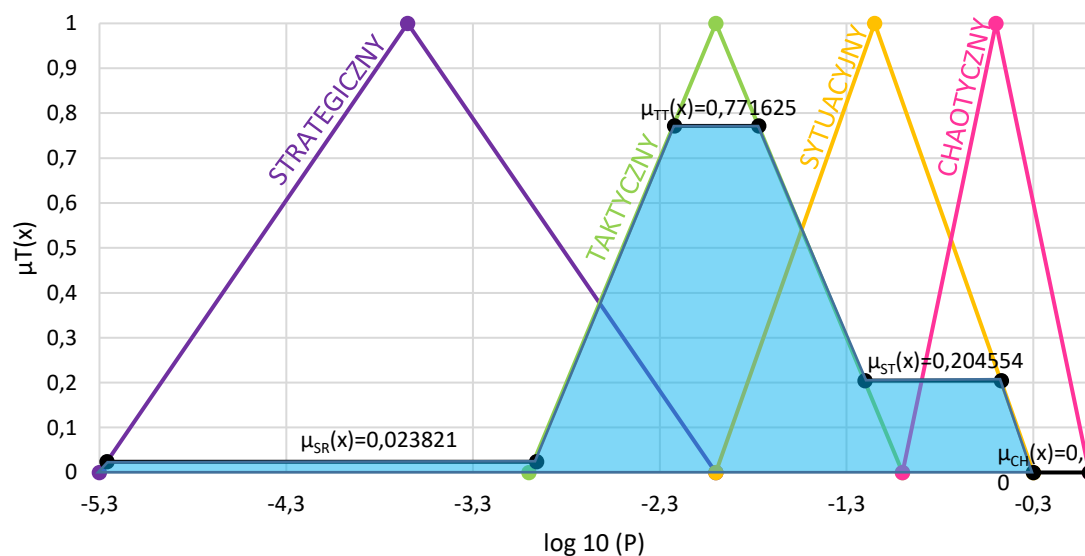
**Tabela 9.22.** Rozmyte wartości oceny czynników CPC dla operatora O1 dla procesu sterowania PsUzW-D

Czynnik CPC	Ocena wg. ankiety	Rozmyte wartości oceny
CPC1	50	0 ; 1 ; 0
CPC2	60	0,25 ; 0,75 ; 0
CPC3	50	0 ; 1 ; 0
CPC4	60	0,25 ; 0,75 ; 0
CPC5	50	0 ; 1
CPC6	50	0 ; 1 ; 0
CPC7	90	1 ; 0
CPC8	70	0,5 ; 0,5 ; 0
CPC9	60	0,25 ; 0,75 ; 0





**Rys. 9.11.** Wyniki operatora O1 dla PsUzW-D (oprogramowanie GeNIe 3.0 firmy BayesFusion)



**Rys. 9.12.** Wykres funkcji przynależności  $\mu_T(x)$  dla poszczególnych trybów kontroli dla operatora O1 w PsUzW-D

W tabeli 9.23 przedstawiono wyniki analizy niezawodności operatora w podsystemie uzdatniania wody, dla procesu koagulacji wyrażone za pomocą wartości HEP – prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora oraz wskaźnika gotowości  $K_g$  dla operatora O1, oraz pozostałych przebadanych operatorów.

**Tabela 9.23.** Wyniki analizy niezawodności operatorów O1 – O42 w PsUzW-D

Operator	Wartość funkcji przynależności dla trybów kontroli				OTK	HEP	K <sub>g</sub>
	$\mu_{CH}(X)$	$\mu_{ST}(X)$	$\mu_{TT}(X)$	$\mu_{SR}(X)$			
O1	0,000000	0,204554	0,771625	0,023821	-1,9446	0,0114	0,9886
O2	0,147708	0,616733	0,235558	0,000000	-1,3357	0,0462	0,9538
O3	0,004208	0,113209	0,668297	0,214286	-2,5901	0,0026	0,9974
O4	0,161063	0,639288	0,199649	0,000000	-1,2948	0,0507	0,9493
O5	0,017264	0,321658	0,661078	0,000000	-1,7502	0,0178	0,9822
O6	0,004208	0,129792	0,728625	0,137375	-2,3899	0,0041	0,9959
O7	0,031773	0,420019	0,548249	0,000000	-1,6774	0,0210	0,9790
O8	0,021621	0,359672	0,618707	0,000000	-1,7232	0,0189	0,9811
O9	0,001056	0,055582	0,585607	0,357755	-2,8764	0,0013	0,9987
O10	0,004240	0,126316	0,591162	0,278282	-2,7112	0,0019	0,9981
O11	0,021621	0,359672	0,618707	0,000000	-1,7232	0,0189	0,9811
O12	0,001056	0,063942	0,638985	0,296017	-2,7760	0,0017	0,9983
O13	0,000000	0,022445	0,610156	0,367399	-2,9064	0,0012	0,9988
O14	0,007354	0,164368	0,692038	0,136240	-2,3627	0,0043	0,9957
O15	0,005639	0,163982	0,767644	0,062736	-2,1256	0,0075	0,9925
O16	0,081281	0,424749	0,493970	0,000000	-1,6331	0,0233	0,9767
O17	0,000000	0,000000	0,369964	0,630036	-3,2235	0,0006	0,9994
O18	0,014638	0,247110	0,660718	0,077534	-2,1201	0,0076	0,9924
O19	0,147708	0,616733	0,235558	0,000000	-1,3357	0,0462	0,9538
O20	0,006415	0,118230	0,535568	0,339787	-2,8208	0,0015	0,9985
O21	0,040341	0,403345	0,556314	0,000000	-1,6809	0,0208	0,9792
O22	0,125830	0,618912	0,255258	0,000000	-1,3625	0,0434	0,9566
O23	0,169150	0,682994	0,147857	0,000000	-1,2388	0,0577	0,9423
O24	0,000000	0,094220	0,601505	0,304275	-2,7739	0,0017	0,9983
O25	0,007299	0,160590	0,671133	0,160978	-2,4326	0,0037	0,9963
O26	0,014221	0,241448	0,680994	0,063338	-2,0720	0,0085	0,9915
O27	0,020954	0,212641	0,631109	0,135297	-2,3255	0,0047	0,9953
O28	0,000000	0,009757	0,503118	0,487125	-3,0598	0,0009	0,9991
O29	0,000000	0,000000	0,531875	0,468125	-3,0416	0,0009	0,9991
O30	0,003514	0,114373	0,701490	0,180622	-2,5125	0,0031	0,9969
O31	0,004208	0,129792	0,728625	0,137375	-2,3899	0,0041	0,9959
O32	0,000000	0,024897	0,672641	0,302462	-2,8095	0,0016	0,9984
O33	0,001757	0,074476	0,646612	0,277154	-2,7373	0,0018	0,9982
O34	0,016938	0,299498	0,658773	0,024791	-1,8779	0,0132	0,9868
O35	0,000000	0,025125	0,502125	0,472750	-3,0378	0,0009	0,9991
O36	0,000000	0,127157	0,719394	0,153449	-2,4367	0,0037	0,9963
O37	0,001757	0,077012	0,675097	0,246134	-2,6782	0,0021	0,9979
O38	0,002809	0,099641	0,668836	0,228714	-2,6293	0,0023	0,9977
O39	0,000000	0,000000	0,479368	0,520632	-3,1008	0,0008	0,9992
O40	0,016830	0,728510	0,254660	0,000000	-1,4559	0,0350	0,9650
O41	0,000000	0,065606	0,668148	0,266246	-2,7233	0,0019	0,9981
O42	0,004203	0,204697	0,694329	0,096772	-2,2172	0,0061	0,9939

W tabeli 9.24 przedstawiono liczbowe charakterystyki statystyczne otrzymanych wyników.

**Tabela 9.24.** Podstawowe statystyki opisowe wartości HEP i  $K_g$  operatora w PsUzW-D

Parametr statystyczny	HEP	$K_g$
Min	0,0006	0,9423
Max	0,0577	0,9994
Średnia	0,0121	0,9879
Odchylenie standardowe	0,0156	0,0156
Kwartył I	0,0017	0,9814
Mediana	0,0041	0,9959
Kwartył III	0,0186	0,9983

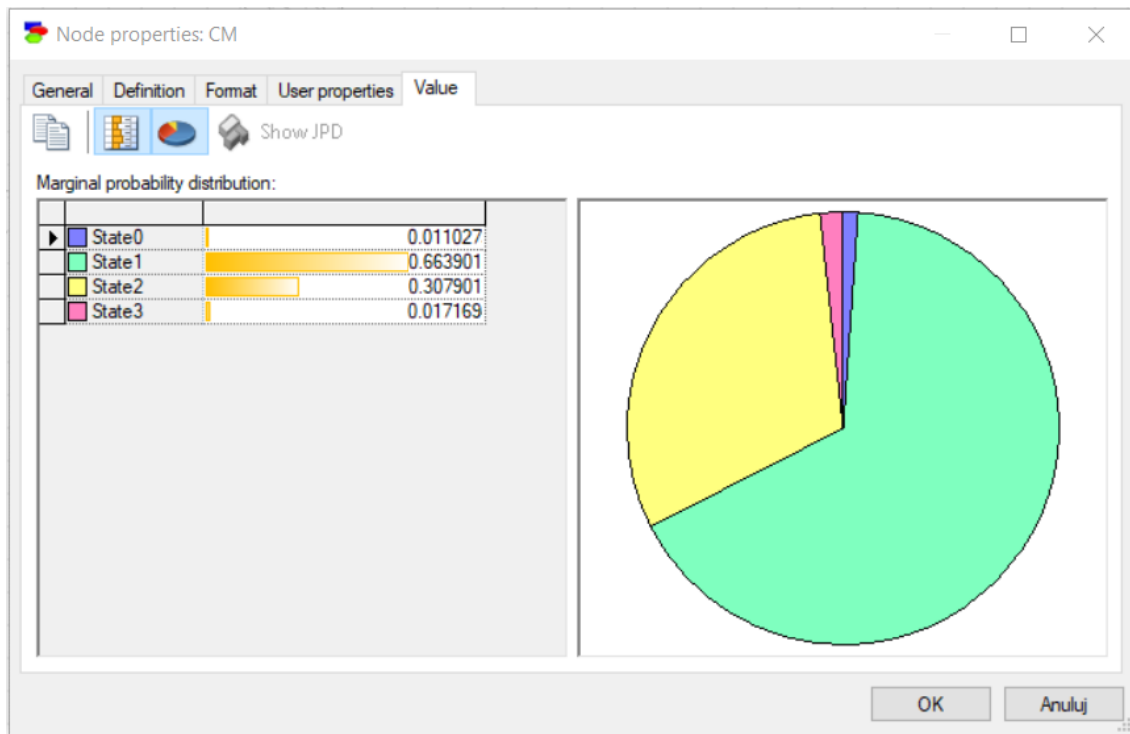
Wartość prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora (HEP) w PsUzW-D zmieniają się w zakresie od 0,0006 do 0,0577. Średnia wartość HEP wynosi 0,0121, natomiast mediana 0,0041. Wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  w podsystemie uzdatniania wody, dla procesu koagulacji zmienia się w zakresie 0,9423 – 0,9994, przy czym średnia wartość wynosi 0,9879, a mediana 0,9959.

### 9.2.3. Ocena niezawodności operatora w podsystemie pompowania wody

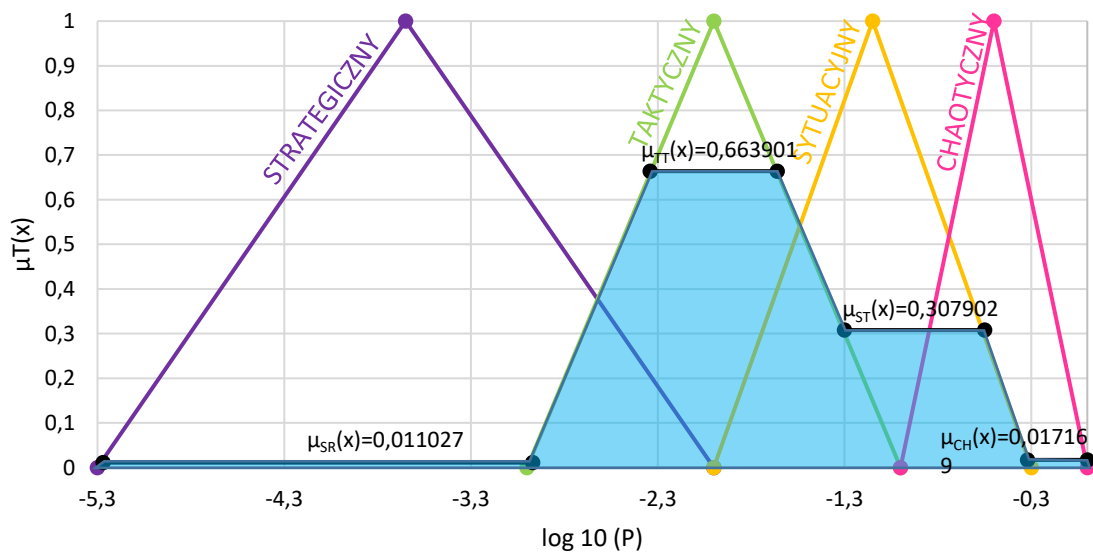
W tabeli 9.25 przedstawiono wyniki oceny czynników CPC oraz ich rozmytą postać dla przykładowego operatora O1 w podsystemie pompowania wody (PsPoW). Na rysunku 9.13 przedstawiono wyniki obliczeń dla sieci Bayesa uzyskane w oprogramowaniu GeNIe 3.0. Wyniki te przedstawiają rozkład prawdopodobieństwa dla trybów kontroli, w którym pracuje badany operator, co przedstawiono na rysunku 9.14.

**Tabela 9.25.** Rozmyte wartości oceny czynników CPC dla operatora O1 dla procesu sterowania PsPoW

Czynnik CPC	Ocena wg. ankiety	Rozmyte wartości oceny
CPC1	60	0,25 ; 0,75 ; 0
CPC2	50	0 ; 1 ; 0
CPC3	50	0 ; 1 ; 0
CPC4	50	0 ; 1 ; 0
CPC5	60	0,25 ; 0,75
CPC6	60	0,25 ; 0,75 ; 0
CPC7	50	0 ; 1
CPC8	70	0,5 ; 0,5 ; 0
CPC9	60	0,25 ; 0,75 ; 0



Rys. 9.13. Wyniki operatora O1 dla PsPoW (oprogramowanie GeNIe 3.0 firmy BayesFusion)



Rys. 9.14. Wykres funkcji przynależności  $\mu_T(x)$  dla poszczególnych trybów kontroli dla operatora O1 w PsPoW

W tabeli 9.26 przedstawiono wyniki analizy niezawodności operatora w PsPoW wyrażone za pomocą wartości HEP – prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora oraz wskaźnika gotowości  $K_g$  dla operatora O1, oraz pozostałych przebadanych operatorów.

Tabela 9.26. Wyniki analizy niezawodności operatorów O1 - O42 w PsPoW

Operator	Wartość funkcji przynależności dla trybów kontroli				OTK	HEP	K <sub>g</sub>
	$\mu_{CH}(X)$	$\mu_{ST}(X)$	$\mu_{PT}(X)$	$\mu_{SR}(X)$			
O1	0,017169	0,307901	0,663901	0,011027	-1,8108	0,0155	0,9845
O2	0,266923	0,636834	0,096243	0,000000	-1,1467	0,0713	0,9287
O3	0,004208	0,118737	0,688860	0,188195	-2,5276	0,0030	0,9970
O4	0,289557	0,624004	0,086439	0,000000	-1,1272	0,0746	0,9254
O5	0,015860	0,266724	0,679484	0,037932	-1,9551	0,0111	0,9889
O6	0,015860	0,266724	0,679484	0,037932	-1,9551	0,0111	0,9889
O7	0,022808	0,333487	0,621816	0,021889	-1,8404	0,0144	0,9856
O8	0,049269	0,462622	0,488110	0,000000	-1,6355	0,0231	0,9769
O9	0,002138	0,088987	0,565021	0,343854	-2,8401	0,0014	0,9986
O10	0,004256	0,122490	0,564325	0,308929	-2,7678	0,0017	0,9983
O11	0,031552	0,416278	0,552170	0,000000	-1,6800	0,0209	0,9791
O12	0,001052	0,059656	0,611985	0,327307	-2,8288	0,0015	0,9985
O13	0,001047	0,060137	0,732704	0,206112	-2,6078	0,0025	0,9975
O14	0,014818	0,257956	0,661444	0,065782	-2,0704	0,0085	0,9915
O15	0,008458	0,211847	0,734690	0,045004	-2,0233	0,0095	0,9905
O16	0,143922	0,618522	0,237556	0,000000	-1,3389	0,0458	0,9542
O17	0,000000	0,000000	0,479372	0,520628	-3,1008	0,0008	0,9992
O18	0,009020	0,135237	0,638054	0,217689	-2,5834	0,0026	0,9974
O19	0,249131	0,619599	0,131270	0,000000	-1,1915	0,0643	0,9357
O20	0,006415	0,118230	0,535568	0,339787	-2,8208	0,0015	0,9985
O21	0,085968	0,552824	0,361208	0,000000	-1,4787	0,0332	0,9668
O22	0,094755	0,581328	0,323918	0,000000	-1,4396	0,0363	0,9637
O23	0,128719	0,607921	0,263360	0,000000	-1,3696	0,0427	0,9573
O24	0,000000	0,028823	0,565414	0,405762	-2,9541	0,0011	0,9989
O25	0,014221	0,241448	0,680994	0,063338	-2,0720	0,0085	0,9915
O26	0,009445	0,214827	0,724761	0,050967	-2,0443	0,0090	0,9910
O27	0,009914	0,148227	0,671434	0,170425	-2,4639	0,0034	0,9966
O28	0,000000	0,066959	0,612700	0,320341	-2,8142	0,0015	0,9985
O29	0,000000	0,029145	0,526105	0,444750	-3,0027	0,0010	0,9990
O30	0,002104	0,092785	0,707435	0,197677	-2,5668	0,0027	0,9973
O31	0,005291	0,151994	0,695332	0,147384	-2,4024	0,0040	0,9960
O32	0,011073	0,205069	0,676061	0,107797	-2,2499	0,0056	0,9944
O33	0,000000	0,022232	0,543267	0,434500	-2,9929	0,0010	0,9990
O34	0,039568	0,344756	0,593620	0,022056	-1,8240	0,0150	0,9850
O35	0,000535	0,059748	0,545792	0,393926	-2,9255	0,0012	0,9988
O36	0,000000	0,087802	0,673161	0,239037	-2,6581	0,0022	0,9978
O37	0,001405	0,069345	0,659668	0,269583	-2,7268	0,0019	0,9981
O38	0,001063	0,053731	0,554047	0,391159	-2,9243	0,0012	0,9988
O39	0,000000	0,012783	0,491401	0,495816	-3,0628	0,0009	0,9991
O40	0,000000	0,459365	0,498050	0,042585	-1,8679	0,0136	0,9864
O41	0,000000	0,015178	0,522650	0,462172	-3,0218	0,0010	0,9990
O42	0,000000	0,028112	0,609747	0,362141	-2,8963	0,0013	0,9987

W tabeli 9.27 przedstawiono liczbowe charakterystyki statystyczne otrzymanych wyników.

**Tabela 9.27.** Podstawowe statystyki opisowe wartości HEP i  $K_g$  operatora w PsPoW

Parametr statystyczny	HEP	$K_g$
Min	0,0008	0,9254
Max	0,0746	0,9992
Średnia	0,0137	0,9863
Odchylenie standardowe	0,0194	0,0194
Kwartył I	0,0015	0,9851
Mediana	0,0037	0,9963
Kwartył III	0,0149	0,9985

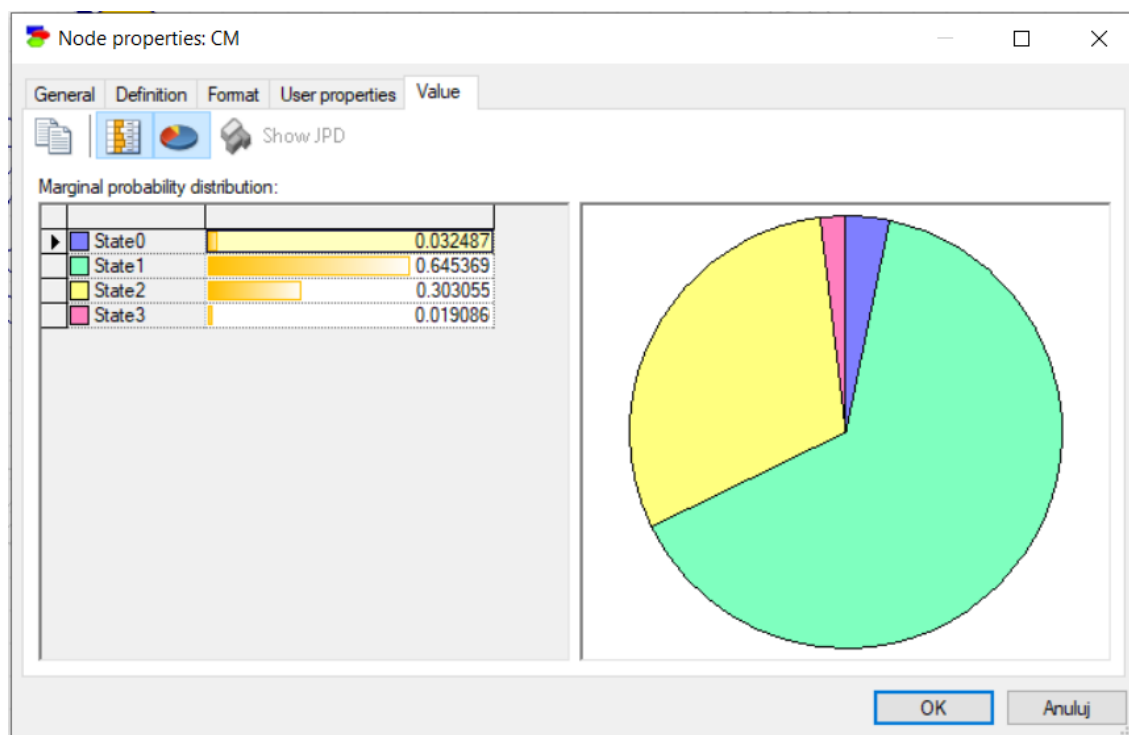
Wartość prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora (HEP) w PsPoW zmieniają się w zakresie od 0,0008 do 0,0746. Średnia wartość HEP wynosi 0,0137, natomiast mediana 0,0037. Wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  w podsystemie pompowania wody zmienia się w zakresie 0,9254 – 0,9992, przy czym średnia wartość wynosi 0,9863, a mediana 0,9963.

#### 9.2.4. Ocena niezawodności operatora w podsystemie magazynowania wody

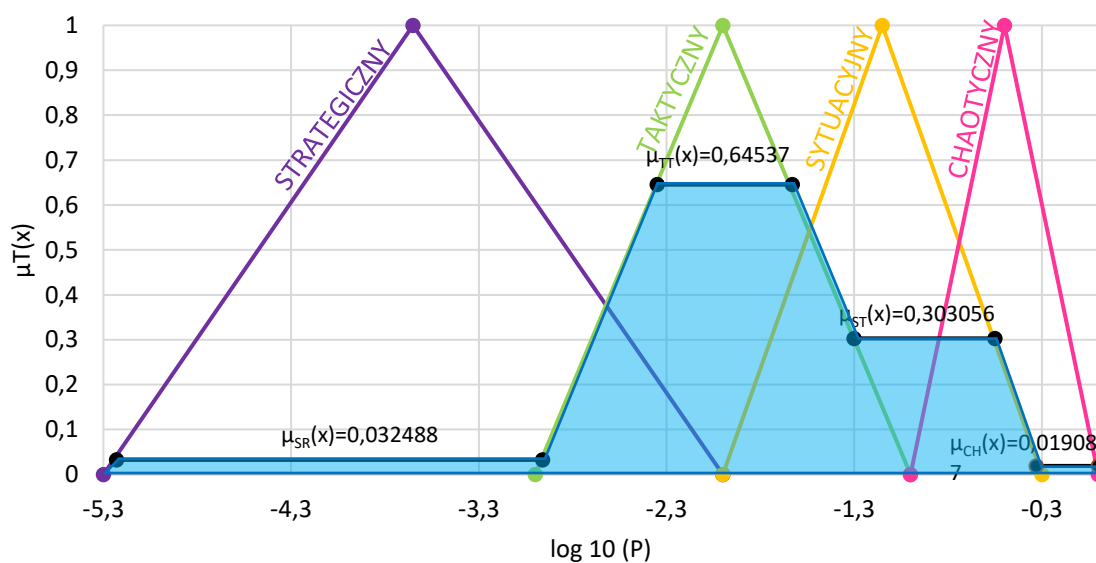
W tabeli 9.28 przedstawiono wyniki oceny czynników CPC oraz ich rozmytą postać dla przykładowego operatora O1 w podsystemie magazynowania wody (PsMaW). Na rysunku 9.15 przedstawiono wyniki obliczeń dla sieci Bayesa uzyskane w oprogramowaniu GeNIe 3.0. Wyniki te przedstawiają rozkład prawdopodobieństwa dla trybów kontroli, w którym pracuje badany operator, co przedstawiono na rysunku 9.16.

**Tabela 9.28.** Rozmyte wartości oceny czynników CPC dla operatora O1 dla procesu sterowania PsMaW

Czynnik CPC	Ocena wg. ankiety	Rozmyte wartości oceny
CPC1	50	0 ; 1 ; 0
CPC2	50	0 ; 1 ; 0
CPC3	60	0,25 ; 0,75 ; 0
CPC4	60	0,25 ; 0,75 ; 0
CPC5	50	0 ; 1
CPC6	60	0,25 ; 0,75 ; 0
CPC7	60	0,25 ; 0,75
CPC8	70	0,5 ; 0,5 ; 0
CPC9	60	0,25 ; 0,75 ; 0



**Rys. 9.15.** Wyniki operatora O1 dla PsMaW (oprogramowanie GeNIe 3.0 firmy BayesFusion)



**Rys. 9.16.** Wykres funkcji przynależności  $\mu_T(x)$  dla poszczególnych trybów kontroli dla operatora O1 w PsMaW

W tabeli 9.29 przedstawiono wyniki analizy niezawodności operatora w PsMaW wyrażone za pomocą wartości HEP – prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora oraz wskaźnika gotowości  $K_g$  dla operatora O1, oraz pozostałych przebadanych operatorów.

**Tabela 9.29.** Wyniki analizy niezawodności operatorów O1 - O42 w PsMaW

Operator	Wartość funkcji przynależności dla trybów kontroli				OTK	HEP	K <sub>g</sub>
	$\mu_{CH}(X)$	$\mu_{ST}(X)$	$\mu_{TT}(X)$	$\mu_{SR}(X)$			
O1	0,019087	0,303056	0,645370	0,032488	-1,9076	0,0124	0,9876
O2	0,249131	0,619599	0,131270	0,000000	-1,1915	0,0643	0,9357
O3	0,004208	0,118737	0,688860	0,188195	-2,5276	0,0030	0,9970
O4	0,249131	0,619599	0,131270	0,000000	-1,1915	0,0643	0,9357
O5	0,021146	0,315620	0,639450	0,023784	-1,8609	0,0138	0,9862
O6	0,019736	0,302383	0,633079	0,044802	-1,9587	0,0110	0,9890
O7	0,016096	0,302011	0,675622	0,006270	-1,7932	0,0161	0,9839
O8	0,031552	0,416278	0,552170	0,000000	-1,6800	0,0209	0,9791
O9	0,000000	0,045225	0,493986	0,460789	-2,9958	0,0010	0,9990
O10	0,002120	0,109252	0,619143	0,269485	-2,7040	0,0020	0,9980
O11	0,049269	0,462622	0,488110	0,000000	-1,6355	0,0231	0,9769
O12	0,001578	0,080109	0,607240	0,311073	-2,7923	0,0016	0,9984
O13	0,001052	0,052045	0,653871	0,293032	-2,7778	0,0017	0,9983
O14	0,008427	0,195388	0,715696	0,080489	-2,1665	0,0068	0,9932
O15	0,005639	0,163982	0,767644	0,062736	-2,1256	0,0075	0,9925
O16	0,114581	0,587810	0,297609	0,000000	-1,4079	0,0391	0,9609
O17	0,000000	0,000000	0,479642	0,520358	-3,1005	0,0008	0,9992
O18	0,038044	0,302359	0,597977	0,061620	-2,0161	0,0096	0,9904
O19	0,249131	0,619599	0,131270	0,000000	-1,1915	0,0643	0,9357
O20	0,006415	0,118230	0,535568	0,339787	-2,8208	0,0015	0,9985
O21	0,131062	0,596679	0,272259	0,000000	-1,3777	0,0419	0,9581
O22	0,108047	0,605898	0,286055	0,000000	-1,3985	0,0400	0,9601
O23	0,100120	0,566913	0,332967	0,000000	-1,4470	0,0357	0,9643
O24	0,000000	0,038900	0,552654	0,408445	-2,9533	0,0011	0,9989
O25	0,009445	0,197580	0,708609	0,084366	-2,1780	0,0066	0,9934
O26	0,018891	0,277600	0,642398	0,061111	-2,0387	0,0091	0,9909
O27	0,009914	0,148227	0,671434	0,170425	-2,4639	0,0034	0,9966
O28	0,000000	0,033500	0,643250	0,323250	-2,8368	0,0015	0,9985
O29	0,000000	0,028928	0,568098	0,402975	-2,9505	0,0011	0,9989
O30	0,002096	0,095286	0,731514	0,171104	-2,5026	0,0031	0,9969
O31	0,002645	0,127356	0,740861	0,129138	-2,3688	0,0043	0,9957
O32	0,003691	0,148159	0,725886	0,122264	-2,3342	0,0046	0,9954
O33	0,000705	0,049180	0,698514	0,251602	-2,7064	0,0020	0,9980
O34	0,066894	0,487620	0,438536	0,006950	-1,6014	0,0250	0,9750
O35	0,000000	0,099872	0,591459	0,308669	-2,7785	0,0017	0,9983
O36	0,000000	0,041685	0,661405	0,296910	-2,7905	0,0016	0,9984
O37	0,000000	0,000000	0,785850	0,214150	-2,6690	0,0021	0,9979
O38	0,001590	0,086661	0,629202	0,282547	-2,7401	0,0018	0,9982
O39	0,000000	0,000000	0,332819	0,667181	-3,2747	0,0005	0,9995
O40	0,000000	0,677000	0,323000	0,000000	-1,5277	0,0297	0,9703
O41	0,000000	0,000000	0,406979	0,593021	-3,1806	0,0007	0,9993
O42	0,000000	0,000000	0,442821	0,557179	-3,1411	0,0007	0,9993



W tabeli 9.30 przedstawiono liczbowe charakterystyki statystyczne otrzymanych wyników.

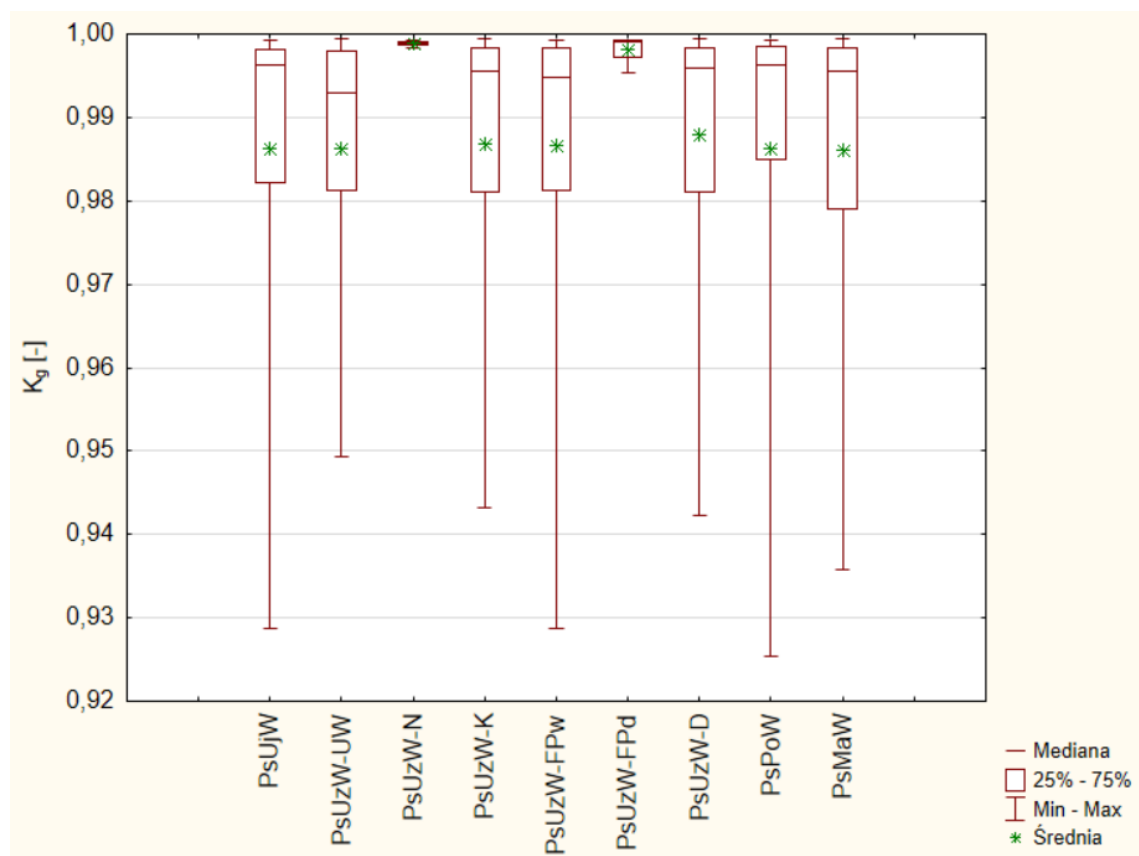
**Tabela 9.30.** Podstawowe statystyki opisowe wartości HEP i  $K_g$  operatora w PsMaW

Parametr statystyczny	HEP	$K_g$
Min	0,0005	0,9357
Max	0,0643	0,9995
Średnia	0,0139	0,9861
Odchylenie standardowe	0,0183	0,0183
Kwartył I	0,0016	0,9803
Mediana	0,0045	0,9955
Kwartył III	0,0197	0,9984

Wartość prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora (HEP) w PsMaW zmieniają się w zakresie od 0,0005 do 0,0643. Średnia wartość HEP wynosi 0,0139, natomiast mediana 0,0045. Wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  w podsystemie magazynowania wody zmienia się w zakresie 0,9357 – 0,9995, przy czym średnia wartość wynosi 0,9861, a mediana 0,9955.

### **9.2.5. Porównanie wyników badań niezawodności operatora w podsystemach systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę**

Na rysunku 9.17 przedstawiono zestawienie wyników wartości wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  dla poszczególnych podsystemów. Przedstawiono wartości minimalne, maksymalne, medianę, kwartył I i kwartył II oraz wartość średnią.



**Rys. 9.17.** Wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  w poszczególnych podsystemach SZZW

Najwyższe średnie wartości wskaźnika gotowości  $K_g$  operatora otrzymano dla podsystemu uzdatniania wody – proces napowietrzania oraz proces filtracji (woda podziemna). Należy jednak zauważyć, że procesy te są realizowane w SZZW wykorzystujących wodę podziemną, dla których grupa przebadanych operatorów była mała (4 osoby) w stosunku do grupy operatorów w systemach wykorzystujących wodę powierzchniową (38 osób). Dla podsystemu uzdatniania wody, którego awarie mają największy wpływ na niezawodność SZZW, największe średnie wartości wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  otrzymano dla procesu dezynfekcji, najmniejsze dla procesu filtracji (woda powierzchniowa). Najmniejsze minimalne wartości wskaźnika  $K_g$  w podsystemie uzdatniania wody można zaobserwować w procesie filtracji (woda powierzchniowa). Dla pozostałych podsystemów najmniejszą wartość średnią wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  otrzymano w podsystemie magazynowania wody, natomiast najmniejsze wartości minimalne w podsystemie pompowania wody.

W tabeli 9.32 przedstawiono wartości wskaźnika gotowości  $K_g$  operatorów w poszczególnych podsystemach oraz wyznaczono wartość średnią wskaźnika gotowości

dla każdego operatora. Na podstawie otrzymanych wyników zaproponowano klasyfikację operatorów ze względu na poziom niezawodności, przedstawioną w tabeli 9.31.

**Tabela 9.31.** Klasyfikacja poziomu niezawodności operatora

Zakres wartości $K_g$	Poziom niezawodności operatora
0,9414 - 0,9607	niski
0,9608 - 0,9800	przeciętny
0,9801 - 1,0000	wysoki

**Tabela 9.32.** Poziom niezawodności badanych operatorów

Operator	$K_g$									$K_g$ śr	Poziom niezawodności operatora
	PsUjW	PsUzW-UW	PsUzW-N	PsUzW-K	PsUzW-FPw	PsUzW-FPd	PsUzW-D	PsPoW	PsMaW		
O1	0,9843	0,9858	-	0,9837	0,9858	-	0,9886	0,9845	0,9876	0,9858	wysoki
O2	0,9287	0,9567	-	0,9493	0,9538	-	0,9538	0,9287	0,9357	0,9438	niski
O3	0,9991	0,9979	-	0,9971	0,9970	-	0,9974	0,9970	0,9970	0,9975	wysoki
O4	0,979	0,9538	-	0,9433	0,9287	-	0,9493	0,9254	0,9357	0,9450	niski
O5	0,9822	0,9866	-	0,9822	0,9822	-	0,9822	0,9889	0,9862	0,9844	wysoki
O6	0,9822	0,9815	-	0,9866	0,9862	-	0,9959	0,9889	0,9890	0,9872	wysoki
O7	0,9581	0,9817	-	0,9790	0,9801	-	0,9790	0,9856	0,9839	0,9782	przeciętny
O8	0,9806	0,9817	-	0,9805	0,9813	-	0,9811	0,9769	0,9791	0,9802	wysoki
O9	0,9975	0,9981	-	0,9973	0,9988	-	0,9987	0,9986	0,9990	0,9983	wysoki
O10	0,9983	0,9985	-	0,9985	0,9984	-	0,9981	0,9983	0,9980	0,9983	wysoki
O11	0,9769	0,9805	-	0,9811	0,9805	-	0,9811	0,9791	0,9769	0,9794	przeciętny
O12	0,9890	0,9954	-	0,9957	0,9963	-	0,9983	0,9985	0,9984	0,9959	wysoki
O13	0,9982	0,9977	-	0,9979	0,9986	-	0,9988	0,9975	0,9983	0,9981	wysoki
O14	0,9957	0,9961	-	0,9939	0,9926	-	0,9957	0,9915	0,9932	0,9941	wysoki
O15	0,9879	0,9926	-	0,9925	0,9943	-	0,9925	0,9905	0,9925	0,9918	wysoki
O16	0,9543	0,9668	-	0,9636	0,9647	-	0,9767	0,9542	0,9609	0,9630	przeciętny
O17	0,9993	0,9994	-	0,9995	0,9993	-	0,9994	0,9992	0,9992	0,9993	wysoki
O18	0,9966	0,9931	-	0,9953	0,9945	-	0,9924	0,9974	0,9904	0,9942	wysoki
O19	0,9287	0,9493	-	0,9433	0,9433	-	0,9538	0,9357	0,9357	0,9414	niski
O20	0,9986	0,9984	-	0,9985	0,9984	-	0,9985	0,9985	0,9985	0,9985	wysoki
O21	0,9729	0,9792	-	0,9792	0,9792	-	0,9792	0,9668	0,9581	0,9735	przeciętny
O22	0,9536	0,9567	-	0,9573	0,9601	-	0,9566	0,9637	0,9601	0,9583	niski
O23	0,9451	0,9586	-	0,9560	0,9476	-	0,9423	0,9573	0,9643	0,9530	niski
O24	0,9988	0,9988	-	0,9984	0,9984	-	0,9983	0,9989	0,9989	0,9986	wysoki
O25	0,9988	0,9992	-	0,9988	0,9944	-	0,9963	0,9915	0,9934	0,9961	wysoki
O26	0,9944	0,9928	-	0,9963	0,9934	-	0,9915	0,9910	0,9909	0,9929	wysoki
O27	0,9974	0,9924	-	0,9931	0,9953	-	0,9953	0,9966	0,9966	0,9952	wysoki
O28	0,9986	-	-	0,9990	0,9989	-	0,9991	0,9985	0,9985	0,9988	wysoki
O29	0,9978	-	-	0,9984	0,9982	-	0,9991	0,9990	0,9989	0,9986	wysoki
O30	0,9966	0,9973	-	0,9977	0,9967	-	0,9969	0,9973	0,9969	0,9971	wysoki
O31	0,9959	0,9964	-	0,9972	0,9966	-	0,9959	0,996	0,9957	0,9962	wysoki

**Tabela 9.32. (cd.)** Poziom niezawodności badanych operatorów

Operator	K <sub>g</sub>									K <sub>g</sub> śr	Poziom niezawodności operatora
	PsUjW	PsUzW-UW	PsUzW-N	PsUzW-K	PsUzW-FPw	PsUzW-FPd	PsUzW-D	PsPoW	PsMaW		
O32	0,9948	0,9963	-	0,9929	0,9951	-	0,9984	0,9944	0,9954	0,9953	wysoki
O33	0,9982	0,9979	-	0,9980	0,9986	-	0,9982	0,9990	0,9980	0,9983	wysoki
O34	0,9868	0,9812	-	0,9865	0,9923	-	0,9868	0,9850	0,9750	0,9848	wysoki
O35	0,9988	-	-	0,9988	0,9992	-	0,9991	0,9988	0,9983	0,9988	wysoki
O36	0,9976	-	-	0,9966	0,9982	-	0,9963	0,9978	0,9984	0,9975	wysoki
O37	0,9978	0,9983	-	0,9987	0,9984	-	0,9979	0,9981	0,9979	0,9982	wysoki
O38	0,9979	0,9985	-	0,9983	0,997	-	0,9977	0,9988	0,9982	0,9981	wysoki
O39	0,9990	-	0,9991	-	-	0,9993	0,9992	0,9991	0,9995	0,9992	wysoki
O40	0,9966	-	0,9984	-	-	0,9954	0,9650	0,9864	0,9703	0,9854	wysoki
O41	0,9983	-	0,9992	-	-	0,9991	0,9981	0,9990	0,9993	0,9988	wysoki
O42	0,9960	-	0,9989	-	-	0,9990	0,9939	0,9987	0,9993	0,9976	wysoki

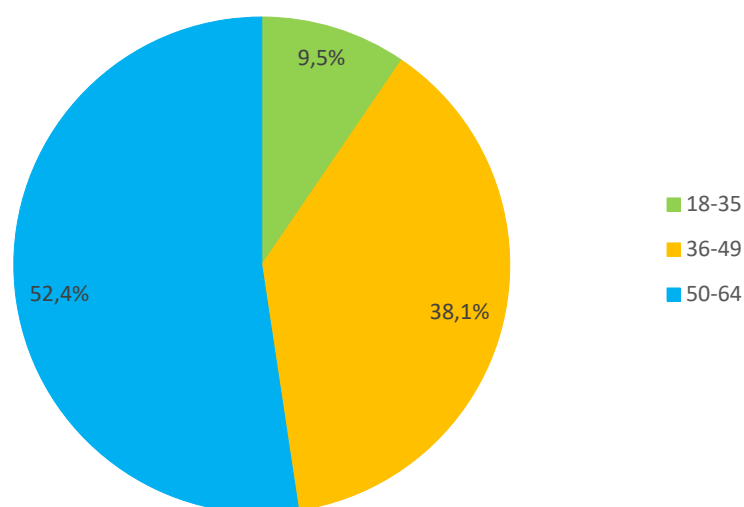
Wśród badanych operatorów wysokim poziomem niezawodności charakteryzuje się 33 operatorów, przeciętnym poziomem niezawodności 4 operatorów oraz niskim poziomem niezawodności 5 operatorów. Dla operatorów z najniższym wynikiem konieczne jest podjęcie działań mających na celu zwiększenie poziomu niezawodności, co powinno przełożyć się na zwiększenie niezawodności i bezpieczeństwa funkcjonowania sterowanych SZZW.

### 9.3. Charakterystyka niezawodności operatora SZZW z uwzględnieniem czynników socjodemograficznych

W badaniach ankietowych uwzględnia się najczęściej czynniki socjodemograficzne populacji takie jak: płeć, wiek, wykształcenie, miejsce zamieszkania, sytuacja zawodowa, poziom dochodu, wyznanie religijne itd. W pracy przedstawiono wpływ wybranych czynników socjodemograficznych na kształtowanie się poziomu niezawodności operatora w oparciu o wskaźnik gotowości operatora  $K_g$ . W przeprowadzonej ankiecie umieszczono pytania metryczkowe obejmujące: wiek, poziom wykształcenia, doświadczenie zawodowe operatora oraz wielkość obsługiwanego SZZW. Dla uzyskanych wyników przeprowadzono analizę statystyczną wpływu czynników socjodemograficznych na wartość  $K_g$ , za pomocą oprogramowania STATISTICA 12.0. Wyznaczono wartość średnią, medianę, kwartył I (25%), kwartył III (75%), wartość minimalną i maksymalną oraz przeprowadzono test istotności statystycznej z wykorzystaniem testu Kruskala-Wallisa (dla więcej niż dwóch grup) dla postawionych hipotez przy założonym poziomie istotności  $\alpha$ . W przypadku gdy uzyskana wartość prawdopodobieństwa  $p < \alpha$ , to na przyjętym poziomie istotności  $\alpha$  należy odrzucić hipotezę zerową, na rzecz hipotezy alternatywnej. W przeciwnym przypadku gdy  $p > \alpha$ , nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej. Przyjęto, że dla  $p < 0,05$  występuje istotna zależność statystyczna, dla  $p < 0,01$  wystąpiła wysoce istotna zależność, dla  $p < 0,001$  wystąpiła bardzo wysoka istotna statystycznie zależność. W przypadku gdy  $p > 0,05$  uznaje się, że zależność jest nieistotna statystycznie.

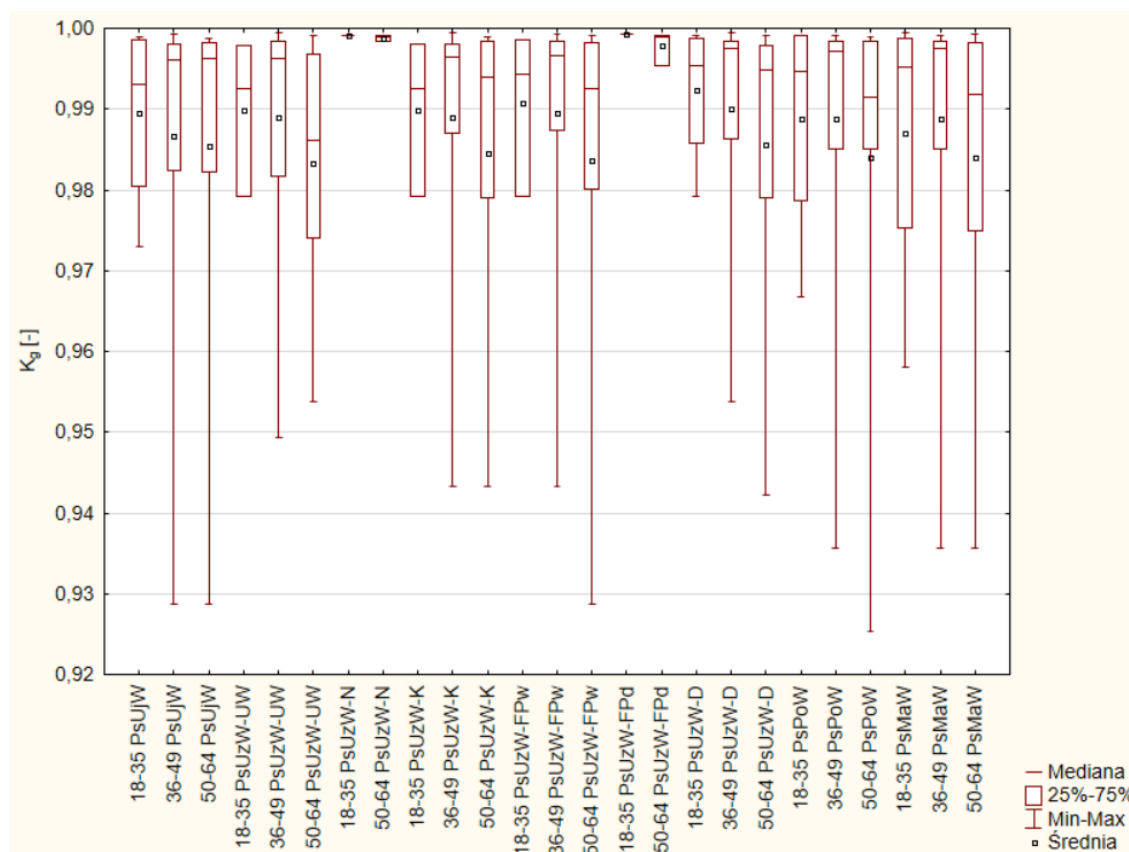
#### **Wiek**

Badana grupa operatorów ( $n=42$ ) składa się z trzech grup wiekowych tj. 18-35 lat – 4 osoby, 36-49 lat – 16 osób, 50-64 lata – 22 osoby. Na rysunku 9.18 przedstawiono strukturę wiekową badanej grupy, wg której osoby w wieku 18-35 lat stanowiły 9,5% ogółu, osoby w wieku 36-49 lat stanowiły 38,1% ogółu, pozostałą część 52,4% stanowiły osoby w wieku 50-64 lat.



**Rys. 9.18.** Struktura wieku badanej grupy operatorów SZZW

Na rysunku 9.19 przedstawiono wartości wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  dla poszczególnych podsystemów SZZW z rozróżnieniem wieku operatora. W grupie operatorów w wieku 50-64 obserwuje się niższe średnie wartości wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  niż w pozostałych grupach wiekowych. Największą różnicę odnotowano dla podsystemu uzdatniania wody – proces filtracja (wody powierzchniowe), gdzie średnia wartość  $K_g$  w grupie wiekowej 50-64 lat była mniejsza niż średnia wartość  $K_g$  w grupie wiekowej 18-35 lat o 0,007053. Najmniejszą różnicę średnich wartości  $K_g$  między badanymi grupami wynoszącą 0,000267 odnotowano dla podsystemu uzdatniania wody – proces napowietrzanie. Wartości minimalne uzyskiwane w grupie wiekowej 18-35 były wyższe niż w pozostałych grupach. Można zaobserwować trend malejący wartości  $K_g$  wraz ze wzrostem wieku operatora.



**Rys. 9.19.** Wartość wskaźnika gotowości operatora w poszczególnych podsystemach SZZW zróżnicowana pod względem struktury wiekowej

Dla otrzymanych wyników przeprowadzono test Kruskala-Wallisa dla prób niezależnych w grupach wiekowych: 18-35, 36-49 oraz 50-64 lat dla poszczególnych podsystemów SZZW w celu ustalenia, czy uzyskane zależności są statystycznie istotne. Postawiono hipotezę zerową  $H_0$ : *wiek nie ma wpływu na wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$* , oraz hipotezę alternatywną  $H_1$ : *wiek ma wpływ na wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$* . Poziom istotności  $\alpha$  do przeprowadzenia analizy ustalono jako  $\alpha = 0,05$ . W tabeli 9.33 przedstawiono wyniki testu Kruskala-Wallisa.

**Tabela 9.33.** Wyniki testu Kruskala-Wallisa (poziom istotności  $\alpha = 0,05$ )

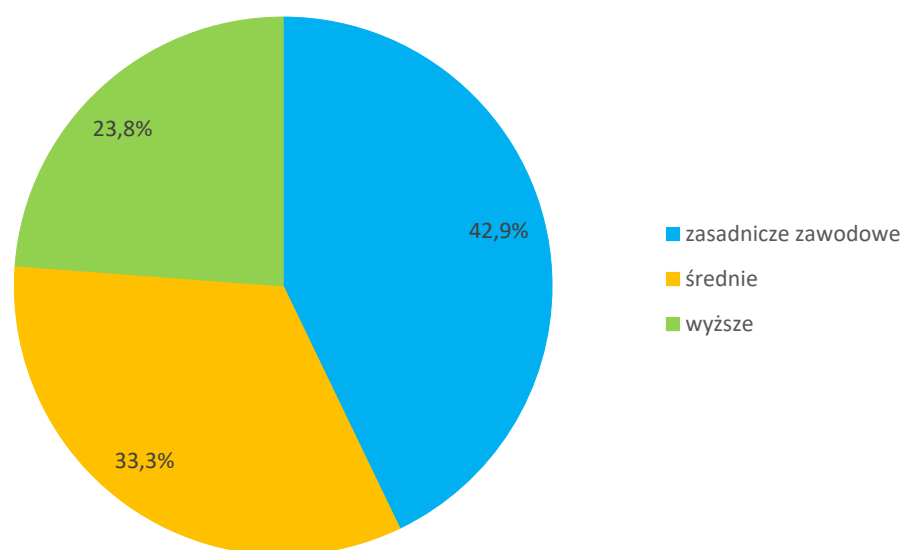
Podsystem	Liczebność grup		Suma rang	Średnia ranga	H	p
PsUjW	Grupa wiekowa 18-35	4	93,5	23,37500	0,108465	0,9472
	Grupa wiekowa 36-49	16	343,5	21,46875		
	Grupa wiekowa 50-64	22	466,0	21,18182		
PsUzW-UW	Grupa wiekowa 18-35	3	48,5	16,16667	1,399006	0,4968
	Grupa wiekowa 36-49	15	296,5	19,76667		
	Grupa wiekowa 50-64	16	250,0	15,62500		
PsUzW-N	Grupa wiekowa 18-35	1	3,0	3,000000	0,2	0,6547
	Grupa wiekowa 50-64	3	7,0	2,333333		
PsUzW-K	Grupa wiekowa 18-35	3	51,0	17,00000	0,324262	0,8503
	Grupa wiekowa 36-49	16	328,5	20,53125		
	Grupa wiekowa 50-64	19	361,5	19,02632		
PsUzW-FPw	Grupa wiekowa 18-35	3	57,5	19,16667	1,389797	0,4991
	Grupa wiekowa 36-49	16	351,0	21,93750		
	Grupa wiekowa 50-64	19	332,5	17,50000		
PsUzW-FPd	Grupa wiekowa 18-35	1	4,0	4,000000	1,8	0,1797
	Grupa wiekowa 50-64	3	6,0	2,000000		
PsUzW-D	Grupa wiekowa 18-35	4	98,0	24,50000	1,853964	0,3957
	Grupa wiekowa 36-49	16	386,0	24,12500		
	Grupa wiekowa 50-64	22	419,0	19,04545		
PsPoW	Grupa wiekowa 18-35	4	103,0	25,75000	1,003717	0,6054
	Grupa wiekowa 36-49	16	362,5	22,65625		
	Grupa wiekowa 50-64	22	437,5	19,88636		
PsMaW	Grupa wiekowa 18-35	4	91,5	22,87500	0,976469	0,6137
	Grupa wiekowa 36-49	16	377,5	23,59375		
	Grupa wiekowa 50-64	22	434,0	19,72727		

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że wiek nie ma wpływu na wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$ , a przedstawione zależności nie są istotne statystycznie. W żadnym z podsystemów wartość prawdopodobieństwa  $p$  nie jest mniejsza niż wartość przyjętego do testu poziomego istotności  $\alpha = 0,05$ , zatem nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej  $H_0$ : *wiek nie ma wpływu na wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$* , na rzecz hipotezy alternatywnej  $H_1$ : *wiek ma wpływ na wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$* .



## Wykształcenie

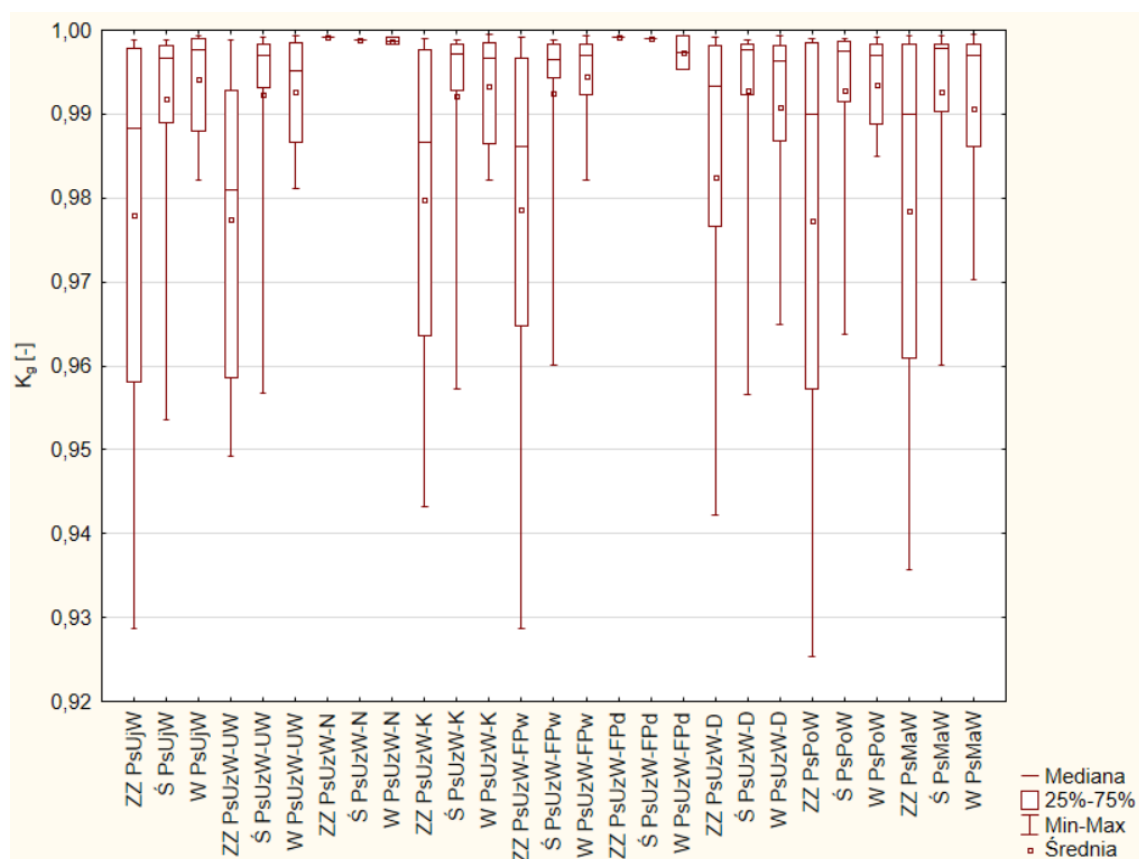
Na badaną grupę operatorów ( $n=42$ ) składa się 18 osób o wykształceniu zasadniczym – zawodowym, 14 osób o wykształceniu średnim oraz 10 osób o wykształceniu wyższym. Na rysunku 9.20 przedstawiono strukturę poziomu wykształcenia badanej grupy, wg której osoby z wykształceniem zasadniczym-zawodowym stanowiły 42,9% ogółu, osoby z wykształceniem średnim stanowiły 33,3% ogółu, pozostałą część 23,8% stanowiły osoby z wykształceniem wyższym.



**Rys. 9.20.** Struktura poziomu wykształcenia badanej grupy operatorów SZZW

Na rysunku 9.21 przedstawiono wartości wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  dla poszczególnych podsystemów SZZW z rozróżnieniem poziomu wykształcenia operatora. W grupie operatorów z wykształceniem zasadniczym zawodowym obserwuje się niższe średnie wartości wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  niż dla operatorów z wykształceniem średnim i wyższym w przypadku większości podsystemów. Odwrotna sytuacja kształtuje się w podsystemie uzdatniania wody dla procesu napowietrzania i filtracji wód powierzchniowych, co może wynikać z małej liczebności badanej grupy dla tych podsystemów (4 operatorów). Największą różnicę odnotowano dla podsystemu pompowania wody, gdzie średnia wartość  $K_g$  w grupie operatorów z wykształceniem zasadniczym zawodowym była mniejsza niż średnia wartość  $K_g$  w grupie operatorów z wykształceniem wyższym o 0,01623. Najmniejszą różnicę średnich wartości  $K_g$  między badanymi grupami wynoszącą 0,00045 odnotowano dla podsystemu uzdatniania wody – proces napowietrzanie. Minimalne wartości  $K_g$  uzyskiwane w grupie operatorów

z wykształceniem zasadniczym zawodowym były mniejsze niż w pozostałych grupach w większości badanych podsystemów, poza podsystemem uzdatniania wody – proces napowietrzanie oraz proces filtracji (wody podziemne) gdzie wartości minimalne w tej grupie były większe niż wartości minimalne w pozostałych grupach. Można również zaobserwować trend rosnący w wartości wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  wraz ze wzrostem poziomu wykształcenia.



**Rys. 9.21.** Wartość wskaźnika gotowości operatora w poszczególnych podsystemach SZZW zróżnicowana pod względem poziomu wykształcenia (ZZ - zawodowe zasadnicze; Ś - średnie; W - wyższe)

Dla otrzymanych wyników przeprowadzono test Kruskala-Wallisa dla prób niezależnych w grupach operatorów z wykształceniem: zasadniczym – zawodowym, średnim oraz wyższym dla poszczególnych podsystemów SZZW w celu ustalenia, czy uzyskane zależności są statystycznie istotne. Postawiono hipotezę zerową  $H_0$ : *poziom wykształcenia nie ma wpływu na wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$* , oraz hipotezę alternatywną  $H_1$ : *poziom wykształcenia ma wpływ na wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$* . Poziom istotności  $\alpha$  do przeprowadzenia analizy ustalono jako  $\alpha = 0,05$ . W tabeli 9.34 przedstawiono wyniki testu Kruskala-Wallisa.

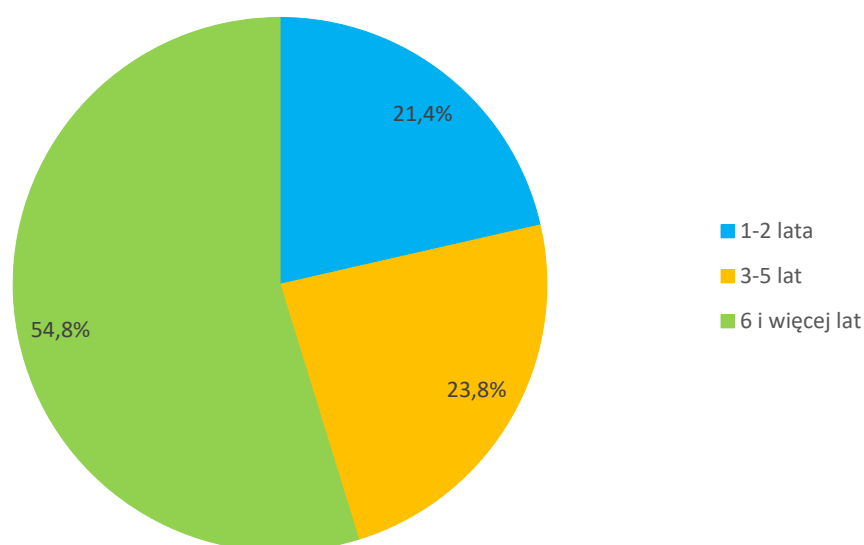
**Tabela 9.34.** Wyniki testu Kruskala-Wallisa (poziom istotności  $\alpha = 0,05$ )

Podsystem	Liczebność grup		Suma rang	Średnia ranga	H	p
PsUjW	ZZ	18	310,0	17,22222	4,551564	0,1027
	Ś	15	346,0	23,06667		
	W	9	247,0	27,44444		
PsUzW-UW	ZZ	14	161,0	11,50000	8,648743	<b>0,0132</b>
	Ś	14	305,0	21,78571		
	W	6	129,0	21,50000		
PsUzW-N	ZZ	1	4,0	4,00000	1,8	0,4066
	Ś	1	2,0	2,00000		
	W	2	4,0	2,00000		
PsUzW-K	ZZ	17	270,5	15,91176	3,217923	0,2001
	Ś	14	316,0	22,57143		
	W	7	154,5	22,07143		
PsUzW-FPw	ZZ	17	260,0	15,29412	4,429863	0,1092
	Ś	14	317,5	22,67857		
	W	7	163,5	23,35714		
PsUzW-FPd	ZZ	1	3,0	3,00000	0,3	0,8607
	Ś	1	2,0	2,00000		
	W	2	5,0	2,50000		
PsUzW-D	ZZ	18	324,0	18,00000	2,626048	0,269
	Ś	15	369,0	24,60000		
	W	9	210,0	23,33333		
PsPoW	ZZ	18	320,5	17,80556	2,863737	0,2389
	Ś	15	366,0	24,40000		
	W	9	216,5	24,05556		
PsMaW	ZZ	18	321,5	17,86111	2,793238	0,2474
	Ś	15	367,5	24,50000		
	W	9	214,0	23,77778		

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że w większości podsystemów poziom wykształcenia nie ma wpływu na wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$ , a przedstawione zależności nie są istotne statystycznie. Wartość prawdopodobieństwa p nie jest mniejsza niż wartość przyjętego do testu poziomu istotności  $\alpha = 0,05$ , zatem nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej  $H_0$ : *poziom wykształcenia nie ma wpływu na wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$* , na rzecz hipotezy alternatywnej  $H_1$ : *poziom wykształcenia ma wpływ na wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$* . Tylko dla jednego badanego podsystemu tj. podsystemu uzdatniania wody – proces utleniania wstępnego uzyskano wynik  $p = 0,0132 < \alpha = 0,05$ , co wskazuje, że wystąpiła istotna zależność statystyczna i należy odrzucić hipotezę  $H_0$  na rzecz hipotezy alternatywnej  $H_1$ .

### Doświadczenie zawodowe

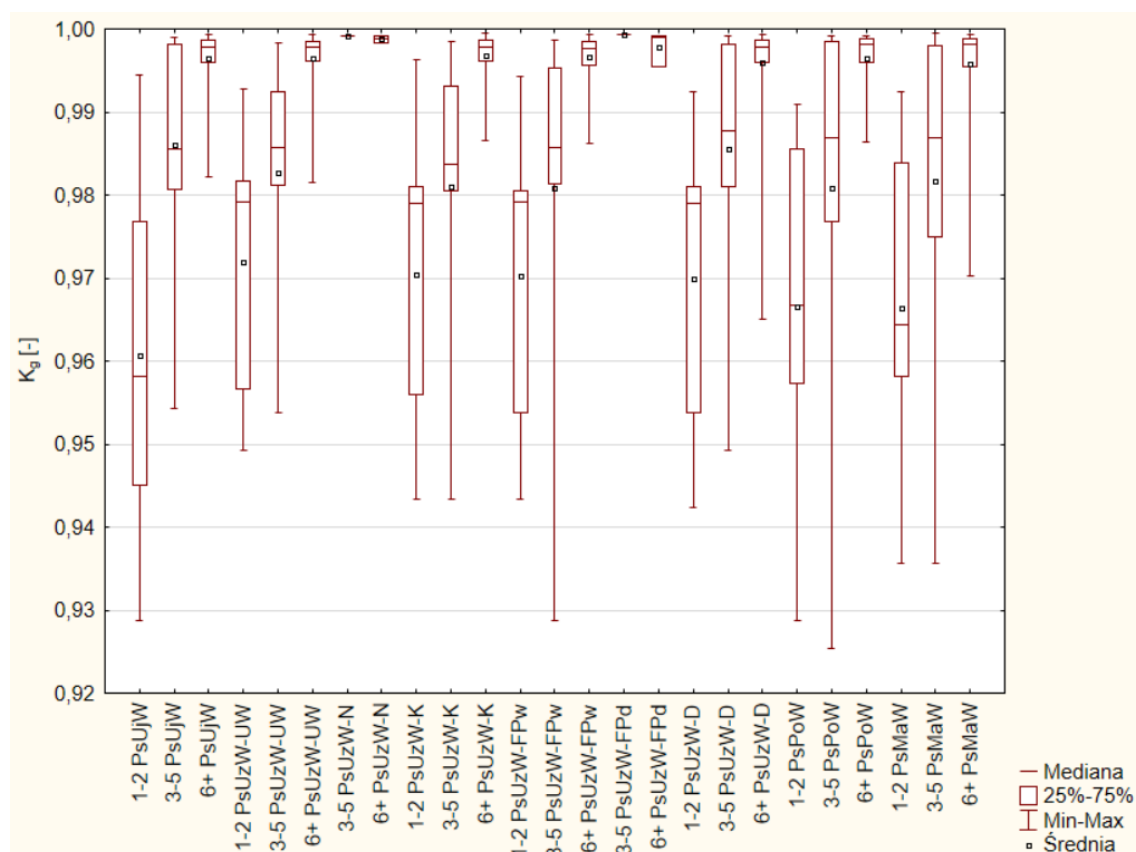
Badana grupa operatorów ( $n=42$ ) składa się z 9 osób z doświadczeniem zawodowym na stanowisku operatora 1 – 2 lata, 10 osób z doświadczeniem zawodowym 3-5 lat oraz 23 osoby o doświadczeniu zawodowym 6 i więcej lat. Na rysunku 9.22 przedstawiono strukturę poziomu doświadczenia zawodowego badanej grupy, wg której osoby z doświadczeniem zawodowym 1 – 2 lata stanowiły 21,4% ogółu, osoby z doświadczeniem zawodowym 3-5 lat 23,8% ogółu, pozostałą część 54,8% stanowiły osoby z doświadczeniem 6 i więcej lat.



**Rys. 9.22.** Struktura poziomu doświadczenia zawodowego badanej grupy operatorów SZZW

Na rysunku 9.23 przedstawiono wartości wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  dla poszczególnych podsystemów SZZW z rozróżnieniem poziomu doświadczenia zawodowego operatora. W grupie operatorów z doświadczeniem zawodowym 6 i więcej lat obserwuje się wyższe średnie wartości wskaźnika gotowości operatora  $K_g$ , niż dla operatorów z mniejszym doświadczeniem zawodowym w przypadku większości podsystemów. Odwrotna sytuacja kształtuje się w podsystemie uzdatniania wody dla procesu napowietrzania i filtracji wód powierzchniowych, co może wynikać z małej liczebności badanej grupy dla tych podsystemów (4 operatorów). Najmniejsze średnie wartości wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  obserwuje się dla grupy operatorów z najmniejszym doświadczeniem zawodowym 1-2 lata. Największą różnicę odnotowano dla podsystemu ujmowania wody, gdzie średnia wartość  $K_g$  w grupie operatorów

z doświadczeniem zasadniczym zawodowym 1-2 lata była mniejsza niż średnia wartość  $K_g$  w grupie operatorów z doświadczeniem zawodowym 6 i więcej lat o 0,03583. Najmniejszą różnicę średnich wartości  $K_g$  między badanymi grupami wynoszącą 0,00027 odnotowano dla podsystemu uzdatniania wody – proces napowietrzanie. Minimalne wartości  $K_g$  uzyskiwane w grupie operatorów z doświadczeniem zawodowym 1-2 lata były mniejsze niż w pozostałych grupach w podsystemach: ujmowania wody, uzdatniania wody (procesy: utlenianie wstępne, dezynfekcja). Dla podsystemów magazynowania wody oraz uzdatniania wody (proces koagulacji) wartości minimalne w grupie operatorów z doświadczeniem zawodowym 1-2 lata były równe wartościom minimalnym dla grupy operatorów z doświadczeniem zawodowym 3-5 lat. Natomiast dla podsystemu uzdatniania wody (proces filtracja wody powierzchniowej) oraz podsystemu pompowania wody najmniejsze minimalne wartości zaobserwowano dla grupy operatorów z doświadczeniem zawodowym 3-5 lat. Można również zaobserwować trend rosnący w wartości wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  wraz ze wzrostem poziomu doświadczenia zawodowego.



**Rys. 9.23.** Wartość wskaźnika gotowości operatora w poszczególnych podsystemach SZZW zróżnicowana pod względem poziomu doświadczenia zawodowego (1-2 lata; 3-5 lat; 6+ lat)

Dla otrzymanych wyników przeprowadzono test Kruskala-Wallisa dla prób niezależnych w grupach operatorów z doświadczeniem zawodowym na poziomie: 1-2 lata, 3-5 lat oraz 6 i więcej lat dla poszczególnych podsystemów SZZW w celu ustalenia, czy uzyskane zależności są statystycznie istotne. Postawiono hipotezę zerową  $H_0$ : *poziom doświadczenia zawodowego nie ma wpływu na wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$* , oraz hipotezę alternatywną  $H_1$ : *poziom doświadczenia zawodowego ma wpływ na wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$* . Poziom istotności  $\alpha$  do przeprowadzenia analizy ustalono jako  $\alpha = 0,05$ . W tabeli 9.35 przedstawiono wyniki testu Kruskala-Wallisa.

**Tabela 9.35.** Wyniki testu Kruskala-Wallisa (poziom istotności  $\alpha = 0,05$ )

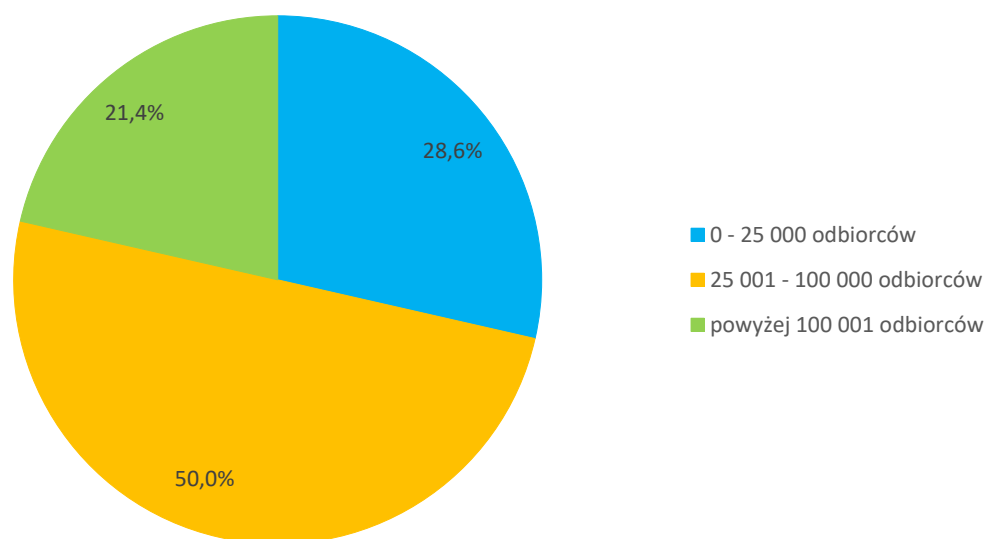
Podsystem	Liczebność grup		Suma rang	Średnia ranga	H	p
PsUjW	1-2 lata	9	63,0	7,00000	19,46143	0,0001
	3-5 lat	10	194,5	19,45000		
	6+ lat	23	645,5	28,06522		
PsUzW-UW	1-2 lata	9	72,5	8,05556	17,99112	0,0001
	3-5 lat	9	125,0	13,88889		
	6+ lat	16	397,5	24,84375		
PsUzW-N	3-5 lat	1	3,0	3,000000	0,2	0,6547
	6+ lat	3	7,0	2,333333		
PsUzW-K	1-2 lata	9	74,5	8,27778	19,73807	0,0001
	3-5 lat	9	130,0	14,44444		
	6+ lat	20	536,5	26,82500		
PsUzW-FPw	1-2 lata	9	71,0	7,88889	19,09955	0,0001
	3-5 lat	9	139,0	15,44444		
	6+ lat	20	531,0	26,55000		
PsUzW-FPd	3-5 lat	1	4,0	4,000000	1,8	0,1797
	6+ lat	3	6,0	2,000000		
PsUzW-D	1-2 lata	9	72,5	8,05556	18,07263	0,0001
	3-5 lat	10	184,5	18,45000		
	6+ lat	23	646,0	28,08696		
PsPoW	1-2 lata	9	77,0	8,55556	17,28127	0,0002
	3-5 lat	10	181,5	18,15000		
	6+ lat	23	644,5	28,02174		
PsMaW	1-2 lata	9	77,0	8,55556	17,21447	0,0002
	3-5 lat	10	182,0	18,20000		
	6+ lat	23	644,0	28,00000		

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że w większości podsystemów poziom doświadczenia zawodowego ma wpływ na wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$ , a przedstawione zależności są istotne statystycznie. Wartość prawdopodobieństwa p jest mniejsza niż wartość przyjętego do testu poziomu istotności  $\alpha = 0,05$ , zatem należy odrzucić hipotezę zerową  $H_0$ : *poziom doświadczenia zawodowego*

nie ma wpływu na wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$ , na rzecz hipotezy alternatywnej H1: poziom doświadczenia zawodowego ma wpływ na wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$ . Wyznaczone wartości  $p < 0,001$  określają przedstawione zależności jako bardzo wysoce istotnie statystycznie. Tylko dla dwóch badanych podsystemów tj. podsystemu uzdatniania wody – proces napowietrzanie oraz proces filtracja (wody podziemne) uzyskano wyniki  $p > \alpha = 0,05$ , co wskazuje, że zależności nie są istotne statystycznie i nie ma podstaw do odrzucenia hipotezę H0 na rzecz hipotezy alternatywnej H1.

### **Wielkość obsługiwanego systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę**

Badana grupa (n=42) składa się z 12 operatorów SZZW obsługujących mniej niż 25 000 odbiorców, 21 operatorów SZZW obsługujących od 25 001 do 100 000 odbiorców oraz 9 operatorów SZZW obsługujących więcej niż 100 000 odbiorców. Na rysunku 9.24 przedstawiono wielkość SZZW w badanej grupie operatorów. Operatorzy SZZW obsługującego mniej niż 25 000 odbiorców stanowili 28,6% ogółu, operatorzy SZZW obsługującego od 25 001 do 100 000 odbiorców – 50,0% ogółu, pozostałą część 21,4% stanowili operatorzy SZZW obsługującego powyżej 100 000 odbiorców.

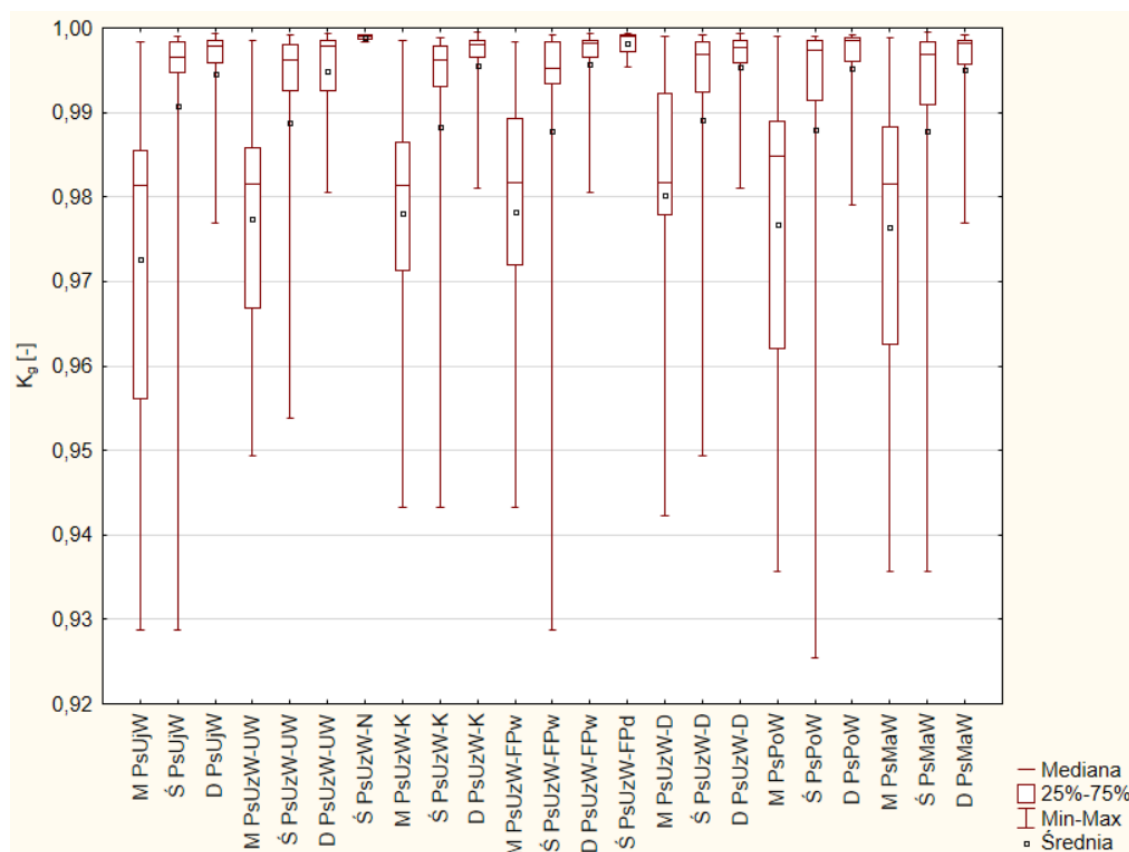


**Rys. 9.24.** Wielkość obsługiwanego SZZW przez operatorów w badanej grupie

Na rysunku 9.25 przedstawiono wartości wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  dla poszczególnych podsystemów SZZW z rozróżnieniem wielkości obsługiwanego SZZW. W grupie operatorów SZZW obsługujących mniej niż 25 000 odbiorców obserwuje

się niższe średnie wartości wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  niż dla operatorów SZZW obsługujących więcej odbiorców. Największe średnie wartości wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  obserwuje się dla grupy operatorów SZZW obsługujących powyżej 100 000 odbiorców. Największą różnicę odnotowano dla podsystemu ujmowania wody, gdzie średnia wartość  $K_g$  w grupie operatorów SZZW obsługujących mniej niż 25 000 odbiorców była mniejsza niż średnia wartość  $K_g$  w grupie operatorów SZZW obsługujących powyżej 100 000 odbiorców o 0,021936. Najmniejszą różnicę średnich wartości  $K_g$  między badanymi grupami wynoszącą 0,015178 odnotowano dla podsystemu uzdatniania wody – proces dezynfekcja. Minimalne wartości  $K_g$  uzyskiwane w grupie operatorów SZZW obsługujących mniej niż 25 000 odbiorców były mniejsze niż w pozostałych grupach w podsystemie uzdatniania wody dla procesów: utlenianie wstępne, dezynfekcja. Dla podsystemów ujmowania wody, magazynowania wody oraz uzdatniania wody (proces koagulacji) wartości minimalne w grupie operatorów SZZW obsługujących mniej niż 25 000 odbiorców były równe wartościom minimalnym dla grupy operatorów SZZW obsługujących od 25 001 do 100 000 odbiorców. Natomiast dla podsystemu uzdatniania wody (proces filtracja wody powierzchniowej) oraz podsystemu pompowania wody najmniejsze minimalne wartości zaobserwowano dla grupy operatorów SZZW obsługujących od 25 001 do 100 000 odbiorców. Można również zaobserwować trend rosnący w wartości wskaźnika gotowości operatora  $K_g$  wraz ze wzrostem wielkości obsługiwanego SZZW.





**Rys. 9.25.** Wartość wskaźnika gotowości operatora w poszczególnych podsystemach SZZW zróżnicowana pod względem wielkości SZZW (M – 0 – 25 000 odbiorców; Ś – 25 001 – 100 000 odbiorców; D – powyżej 100 001 odbiorców)

Dla otrzymanych wyników przeprowadzono test Kruskala-Wallisa dla prób niezależnych w grupach operatorów SZZW obsługujących: mniej niż 25 000 odbiorców, od 25 001 do 100 000 odbiorców oraz powyżej 100 000 odbiorców dla poszczególnych podsystemów SZZW w celu ustalenia, czy uzyskane zależności są statystycznie istotne. Postawiono hipotezę zerową  $H_0$ : *wielkość obsługiwanego SZZW nie ma wpływu na wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$* , oraz hipotezę alternatywną  $H_1$ : *wielkość obsługiwanego SZZW ma wpływ na wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$* . Poziom istotności  $\alpha$  do przeprowadzenia analizy ustalono jako  $\alpha = 0,05$ . W tabeli 9.36 przedstawiono wyniki testu Kruskala-Wallisa.

**Tabela 9.36.** Wyniki testu Kruskala-Wallisa (poziom istotności  $\alpha = 0,05$ )

Podsystem	Liczebność grup		Suma rang	Średnia ranga	H	p
PsUjW	M	12	144,5	12,04167	10,30094	<b>0,0058</b>
	Ś	21	514,0	24,47619		
	D	9	244,5	27,16667		
PsUzW-UW	M	11	118,5	10,77273	8,252467	<b>0,0161</b>
	Ś	16	311,5	19,46875		
	D	7	165,0	23,57143		
PsUzW-N	b/d					
PsUzW-K	M	12	148,5	12,37500	8,484989	<b>0,0144</b>
	Ś	17	357,0	21,00000		
	D	9	235,5	26,16667		
PsUzW-FPw	M	12	144,0	12,00000	9,531777	<b>0,0085</b>
	Ś	17	357,0	21,00000		
	D	9	240,0	26,66667		
PsUzW-FPd	b/d					
PsUzW-D	M	12	168,0	14,00000	6,997707	<b>0,0302</b>
	Ś	21	488,5	23,26190		
	D	9	246,5	27,38889		
PsPoW	M	12	157,0	13,08333	8,724778	<b>0,0127</b>
	Ś	21	494,5	23,54762		
	D	9	251,5	27,94444		
PsMaW	M	12	157,0	13,08333	8,482299	<b>0,0144</b>
	Ś	21	499,0	23,76190		
	D	9	247,0	27,44444		

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że w większości podsystemów wielkość obsługiwanego SZZW ma wpływ na wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$ , a przedstawione zależności są istotne statystycznie. Wartość prawdopodobieństwa p jest mniejsza niż wartość przyjętego do testu poziomu istotności  $\alpha = 0,05$ , zatem należy odrzucić hipotezę zerową  $H_0$ : *wielkość obsługiwanego SZZW nie ma wpływu na wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$* , na rzecz hipotezy alternatywnej  $H_1$ : *wielkość obsługiwanego SZZW ma wpływ na wartość wskaźnika gotowości operatora  $K_g$* . Dla podsystemu ujmowania wody oraz podsystemu uzdatniania wody – proces filtracja (woda powierzchniowa) wartość  $p < 0,01$  co oznacza, że występuje wysoce istotna zależność statystyczna. W przypadku podsystemu uzdatniania wody dla procesów napowietrzania oraz filtracji (woda podziemna) nie można było przeprowadzić testu Kruskala-Wallisa ze względu na zbyt małą liczbę danych.

Dla wszystkich przebadanych cech socjodemograficznych grupy operatorów można zaobserwować wpływ na zmianę poziomu niezawodności operatora w oparciu o wartość wskaźnika gotowości  $K_g$ , jednak tylko dla cech: doświadczenie zawodowe, wielkość obsługiwanego systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę oraz częściowo dla wykształcenia wykazano istotność statystyczną badanych zależności.

W odniesieniu do wieku badanych operatorów wyższe wartości wskaźników gotowości można zaobserwować w grupie wiekowej 18-35 lat, które następnie wraz ze wzrostem wieku operatora maleją. Prawdopodobnie ma to związek z rosnącym znaczeniem systemów teleinformatycznych (SCADA, GIS) wykorzystywanych w dyspozytorniach do sterowania elementami SZZW, które dla starszych osób mogą być trudne w obsłudze. Wraz ze wzrostem wieku operatora spodziewany jest też spadek zdolności psychomotorycznych, od których w dużym stopniu zależy precyzja i szybkość reakcji operatora. Na podstawie wyników badanej grupy nie wykazano istotności statystycznej przedstawionych zależności.

Biorąc pod uwagę wykształcenie badanych operatorów, obserwuje się wyższe wartości wskaźnika gotowości dla osób z wyższym lub średnim wykształceniem. Osoby, które poświęciły więcej czasu na zdobywanie wiedzy i podnoszenie kwalifikacji zawodowych charakteryzują się z reguły bardziej rozwiniętymi umiejętnościami miękkimi takimi jak np. organizacja pracy, zarządzanie czasem, samodzielność, odpowiedzialność, kreatywność czy praca zespołowa co może przekładać się na lepsze wyniki uzyskiwane w pracy zawodowej, a co za tym idzie mniejsze prawdopodobieństwo popełnienia błędu. W przypadku wykształcenia istotność statystyczną przedstawionych zależności wykazano tylko w przypadku podsystemu uzdatniania wody dla procesu utleniania wstępnego.

Doświadczenie zawodowe jest jednym z kluczowych czynników socjogeograficznych wpływających na poziom niezawodności operatora. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem doświadczenia zawodowego rośnie również poziom wartości wskaźników gotowości badanych operatorów. Wykazano istnienie bardzo wysoce istotnych zależności statycznych dla większości podsystemów. Rosnąca liczba lat pracy z jednym systemem zbiorowego zaopatrzenia w wodę skutkuje nabyciem odpowiednich doświadczeń, które mogą być specyficzne i niepowtarzalne dla danego systemu co zwiększa zrozumienie systemu przez operatora oraz umożliwia mu właściwe, intuicyjne współdziałanie z nim, minimalizując możliwość błędnego działania.

W dużej mierze poziom niezawodności operatora zależy też od wielkości obsługiwanego systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę. Zaobserwowano wyższe

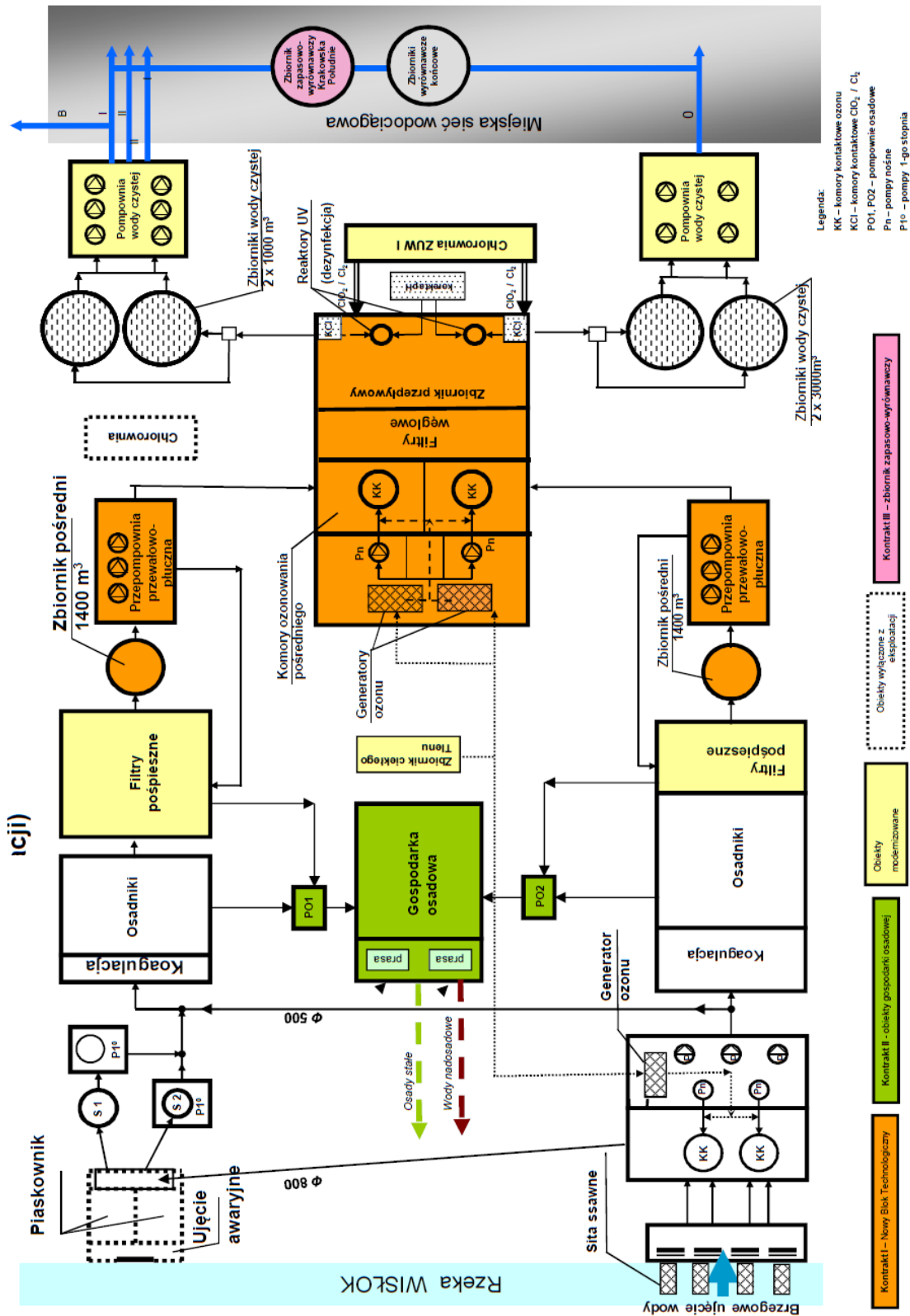
wartości wskaźnika gotowości operatora dla systemów zaopatrzenia w wodę obsługujących powyżej 100 000 odbiorców. Dla wszystkich podsystemów wykazano istotność statystyczną przedstawionych zależności. Często duże, rozbudowane systemy zaopatrzenia w wodę borykają się z mniejszymi problemami finansowymi, są doinwestowane – również w zakresie obsługi operatorskiej, w odróżnieniu od najmniejszych systemów, w których często możliwości operatora są mocno ograniczone przez brak lub przestarzałe systemy sterowania poszczególnymi elementami SZZW. Operatorzy dużych systemów częściej mają do dyspozycji dedykowane rozwiązania w sferze sterowania podsystemami SZZW z wykorzystaniem nowoczesnych systemów wspomaganie decyzji czy monitoringu parametrów pracy, przez co ich obsługa jest łatwiejsza i sprzyja niepopelnianiu błędów przez operatora.

#### **9.4. Ocena niezawodności w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę z uwzględnieniem wpływu działania operatora**

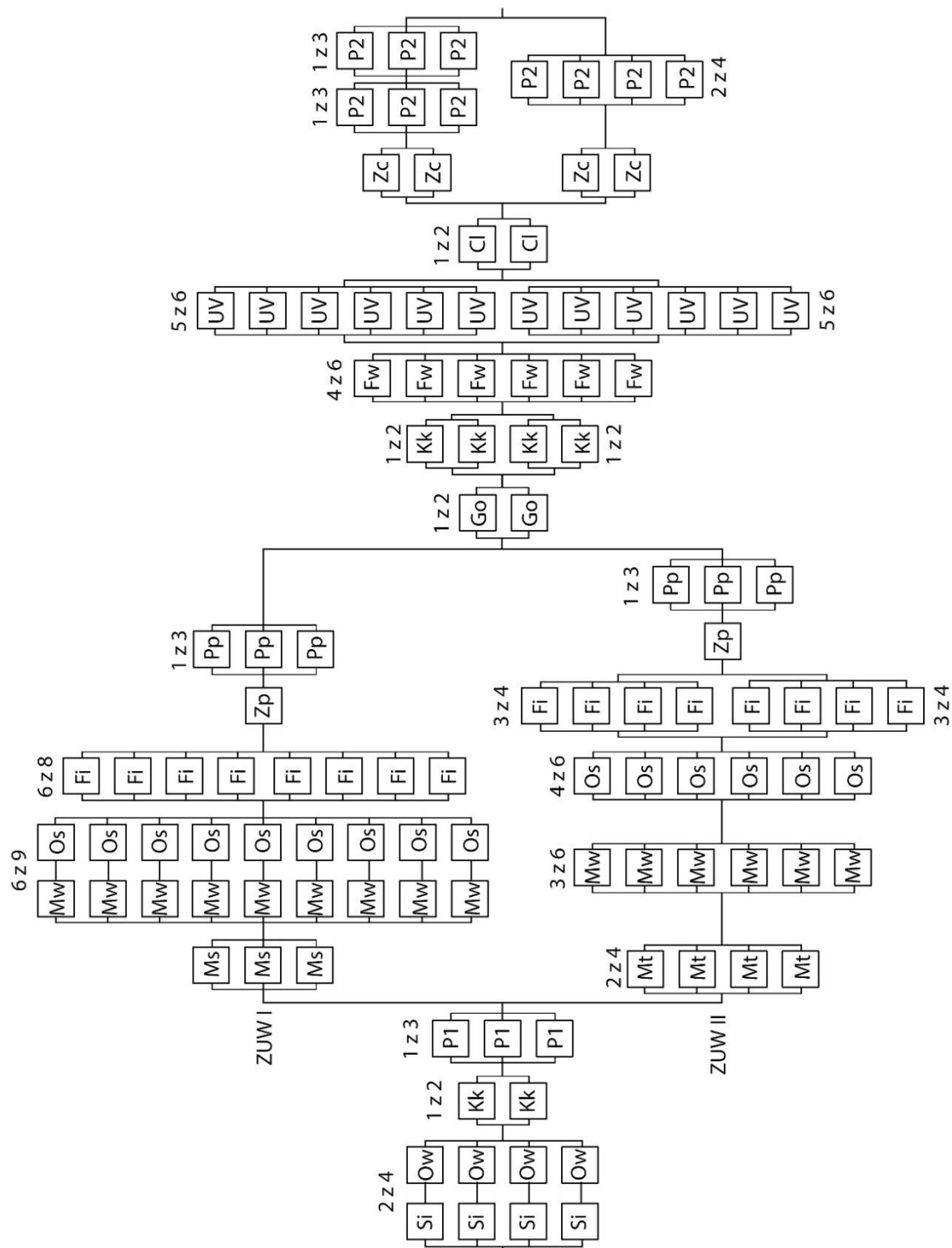
Przykład aplikacyjny oceny niezawodności w SZZW z uwzględnieniem wpływu działania operatora przeprowadzono dla Zakładu Uzdatniania Wody w mieście Rzeszów, stanowiącego wraz z obiektami ujęcia wody, zbiornikami wody czystej oraz pompownią II stopnia - Podsystem Dostawy Wody.

Analizowany ZUW zaopatruje w wodę ok. 200 000 odbiorców, a projektowa wydajność produkcyjna wody wynosi ok. 84 000 m<sup>3</sup>/d. Woda surowa ujmowana jest z rzeki Wisłok za pomocą ujęcia brzegowo – komorowego. Zakład uzdatniania wody stanowią dwa niezależne ciągi technologiczne ZUW I i ZUW II, w których prowadzi się takie same procesy uzdatniania wody tj. wstępne ozonowanie wody, koagulacja, filtracja przez złoża piaskowe (stacja ZUW I) i antracytowo-piaskowe (stacja ZUW II), ozonowanie pośrednie, filtracja przez złoża węglowe, dezynfekcja za pomocą lamp UV i dezynfekcja końcowa związkami chloru (chlorem gazowym i dwutlenkiem chloru) oraz korekta odczynu pH wody (w zależności od potrzeb). Uzdatniona woda gromadzona jest w zbiornikach wody czystej na terenie zakładu uzdatniania wody, a następnie tłoczona przez pompownie wysokiego ciśnienia do sieci wodociągowej. Długość sieci wodociągowej wynosi ok. 1 089 km. Współdziała ona z 41 pompowniami wody oraz 11 zbiornikami sieciowymi o łącznej pojemności ok. 35 000 m<sup>3</sup>.

Na rysunku 9.26 przedstawiono ideowy schemat technologiczny badanego ZUW. Na podstawie informacji uzyskanych od MPWiK Rzeszów Sp. z o.o. oraz schematu technologicznego sporządzono schemat niezawodnościowy przedstawiony na rysunku 9.27. W tabeli 9.37 przedstawiono wartości wskaźników gotowości dla elementów na schemacie niezawodnościowym opracowane na podstawie danych literaturowych oraz materiałów udostępnionych przez przedsiębiorstwo wodociągowe [63, 81, 119]. Na podstawie zgromadzonych danych wyznaczono wskaźnik gotowości dla badanego SZZW, a obliczenia cząstkowe zostały przedstawione w tabeli 9.38.



Rys. 9.26. Schemat technologiczny badanego ZUW



**Rys. 9.27.** Konwencjonalny schemat niezawodnościowy badanego ZUW (oznaczenia: Si – sito ssawne; Ow – okno wlotowe; Kk – komora kontaktowa; P1 – pompowania 1<sup>o</sup>; Ms – mieszacz szybki; Mt – mieszacz statyczny; Mw – komora wolnego mieszania; Os – osadnik po koagulacji; Fi – filtr pospieszny; Zp – zbiornik pośredni; Pp – pompownia przevalowa; Go – generator ozonu; Fw – filtr węglowy; UV – lampa ultrafioletowa; Cl – chlorator; Zc – zbiornik wody czystej; P2 – pompownia 2<sup>o</sup>)

**Tabela 9.37.** Wskaźniki gotowości  $K_g$  elementów przedstawionych na schemacie niezawodnościowym (na podstawie [63, 81, 119])

Podsystem	Symbol	Obiekt	$K_g$
PsUjW	Si	Sito ssawne	0,999
PsUjW	Ow	Okno wlotowe	0,9992
PsUzW - UW	Kk	Komora kontaktowa	0,997
PsPoW	P1	Pompownia I stopnia	0,9681
PsUzW - K	Ms	Mieszalnik szybki	0,9891
PsUzW - K	Mt	Mieszacz statyczny	0,998
PsUzW - K	Mw	Komora wolnego mieszania	0,9729
PsUzW - K	Kf	Komora flokulacji	0,998
PsUzW - K	Os	Osadnik po koagulacji	0,9986
PsUzW - FPw	Fi	Filtr pospieszny	0,9846
PsMaW	Zp	Zbiornik pośredni	0,991
PsPoW	Pp	Pompownia przewałowa	0,989
PsUzW - UW	Go	Generator ozonu	0,998
PsUzW - UW	Kk	Komory kontaktowe	0,997
PsUzW - FPw	Fw	Filtry węglowe	0,998
PsUzW - D	UV	Lampy ultrafioletowa	0,987
PsUzW - D	Cl	Chloratory	0,9985
PsMaW	Zc	Zbiornik wody czystej	0,9892
PsPoW	P2	Pompownia II stopnia	0,9905

**Tabela 9.38.** Zestawienie obliczeń wskaźnika gotowości badanego SZZW

Obiekt	$K_g$ (dla pojedynczego elementu)	Struktura	$K_g$ (wg struktur niezawodnościowych)
Si	0,999	szeregowa	0,9982
Ow	0,9992		
SiOW	0,9982	progowa 2 z 4	0,9999
Kk	0,997	progowa 1 z 2	0,9999
P1	0,9681	progowa 1 z 3	0,9999
ZUW I			
Ms	0,9891	równoległa	0,9999
Mw	0,9729	szeregowa	0,9715
Os	0,9986		
MwOs	0,9715	progowa 6 z 9	0,9999
Fi	0,9846	progowa 6 z 8	0,9998
Zp	0,991	-	0,991
Pp	0,989	progowa 1 z 3	0,9999
ZUW I (całość)	-	szeregowa	0,9905
ZUW II			
Mt	0,998	progowa 2 z 4	0,992
Mw	0,9729	progowa 3 z 6	0,9999
Os	0,9986	progowa 4 z 6	0,9999
Fi	0,9846	progowa 3 z 4	0,9989
FiFi	0,9989	równoległa	0,9999
Zp	0,991	-	0,991
Pp	0,989	progowa 1 z 3	0,9999
ZUW II (całość)		szeregowa	0,9827



**Tabela 9.38. (cd.)** Zestawienie obliczeń wskaźnika gotowości badanego SZZW

Obiekt	$K_g$ (dla pojedynczego elementu)	Struktura	$K_g$ (wg struktur niezawodnościowych)
ZUWI/ZUWII	-	równoległa	0,9998
Go	0,998	progowa 1 z 2	0,9999
Kk	0,997	progowa 1 z 2	0,9999
KkKk	0,9999	równoległa	0,9999
Fw	0,998	progowa 4 z 6	0,9999
UV	0,987	progowa 5 z 6	0,9976
UVUV	0,9976	równoległa	0,9999
Cl	0,9985	progowa 1 z 2	0,9999
Zc	0,9892	równoległa	0,9998
P2	0,9905	progowa 1 z 3	0,9999
ZcP2P2	-	szeregowa	0,9996
P2	0,9905	progowa 2 z 4	0,9999
ZcP2	-	szeregowa	0,9997
ZcP2P2ZcP2	-	równoległa	0,9999
ZUW (całość)	-	szeregowa	0,9988

Ze względu na liczbę odbiorców wody w SZZW wg tabeli 8.10 i 8.11 wartości wymaganego poziomu wskaźnika  $K_g$  dla miast o liczbie mieszkańców od 50 000 – 500 000 wynoszą  $K_{wszzw} = 0,9740959$  wg [119] oraz  $K_{wszzw} = 0,9835617$  wg [63]. Wartości te odnoszą się do SZZW jako całości, przez co niemożliwe jest bezpośrednie porównanie otrzymanego wyniku, który przedstawia wartość wskaźnika gotowości dla obiektów ZUW. Jeśli przyjmie się uproszczoną strukturę podsystemów SZZW, który będzie się składał tylko z dwóch podsystemów połączonych szeregowo tj. Podsystem Dostawy Wody (obejmujący obiekty ujęcia, zakładu uzdatniania wody, pompowni) oraz Podsystem Dystrybucji Wody (obejmujący sieć wodociągową i instalacje wewnętrzne) można wyznaczyć wartość wymaganą poziomu wskaźnika  $K_g$  dla składowych podsystemów SZZW jak poniżej:

$$K_{WP_{sDoW}} = \sqrt{K_{WSZZW}} = \sqrt{0,9835617} = 0,9917$$

Porównując wynik obliczeń wskaźnika gotowości w analizowanym ZUW ( $K_g = 0,9988$ ) z powyższą wartością, należy stwierdzić, że analizowany ZUW cechuje się odpowiednim poziomem niezawodności.

Należy tutaj zaznaczyć, że przytoczone wartości wymagane dla wskaźników gotowości dla SZZW zostały zaproponowane w latach 90 ubiegłego wieku i konieczne wydaje się ich uaktualnienie do obecnych standardów, ze względu na rozwój nowych

technologii w zakresie zaopatrzenia w wodę czy też pojawienie się nowych zagrożeń dla niezawodności i bezpieczeństwa funkcjonowania SZZW.

W dalszej części analizy uwzględniono wpływ pojedynczego operatora na niezawodność ZUW. W tym celu zmodyfikowano schemat niezawodnościowy, poprzez dodanie elementów odpowiadających operatorowi, co przedstawiono na rysunku 9.28. W tabeli 9.39 zgromadzono wartości wskaźników gotowości operatora dla poszczególnych podsystemów, wyznaczone na drodze badań przeprowadzonych w niniejszej rozprawie doktorskiej. Ponownie wyznaczono wartość wskaźnika gotowości dla badanego ZUW z uwzględnieniem wpływu działania pojedynczego operatora, co przedstawiono w tabeli 9.40.



**Tabela 9.39.** Wskaźniki gotowości  $K_g$  operatora dla elementów przedstawionych na schemacie niezawodnościowym

Podsystem	Symbol	Obiekt	$K_g$		
			Min	Średnia	Max
PsUjW	Ou	Operator w podsystemie ujmowania wody	0,9287	0,9864	0,9993
PsUzW - UW	Oo	Operator w podsystemie uzdatniania wody - proces ozonowania	0,9493	0,9863	0,9994
PsUzW - K	Ok	Operator w podsystemie uzdatniania wody - proces koagulacji	0,9433	0,9868	0,9995
PsUzW - FPw	Of	Operator w podsystemie uzdatniania wody - proces filtracji	0,9287	0,9853	0,9993
PsUzW - D	Od	Operator w podsystemie uzdatniania wody - proces dezynfekcji	0,9423	0,9879	0,9994
PsPoW	Op	Operator w podsystemie pompowania wody	0,9254	0,9863	0,9992
PsMaW	Om	Operator w podsystemie magazynowania wody	0,9357	0,9861	0,9995

**Tabela 9.40.** Zestawienie obliczeń wskaźnika gotowości badanego SZZW z uwzględnieniem wpływu pojedynczego operatora

Obiekt	$K_g$ (dla pojedynczego elementu)	Struktura	$K_g$ (wg struktur niezawodnościowych)
Ou	0,9864	-	0,9864
Si	0,999	szeregowa	0,9982
Ow	0,9992		
SiOW	0,9982	progowa 2 z 4	0,9999
OuSiOW	-	szeregowa	0,9998
Oo	0,9863	-	0,9863
Kk	0,997	progowa 1 z 2	0,9999
OoKk	-	szeregowa	0,9862
Op	0,9863	-	0,9863
P1	0,9681	progowa 1 z 3	0,9999
OpP1	-	szeregowa	0,9862
ZUW I			
Ok	0,9868	-	0,9868
Ms	0,9891	równoległa	0,9999
Mw	0,9729	szeregowa	0,9715
Os	0,9986		
MwOs	0,9715	progowa 6 z 9	0,9999
OkMwOs	-	szeregowa	0,9866
Of	0,9853	-	0,9853
Fi	0,9846	progowa 6 z 8	0,9998
OfFi	-	szeregowa	0,9851
Om	0,9861	-	0,9861
Zp	0,991	-	0,991
OmZp	-	szeregowa	0,9772
Op	0,9863	-	0,9863
Pp	0,989	progowa 1 z 3	0,9999
OpPp	-	szeregowa	0,9862
ZUW I (całość)	-	szeregowa	0,9366

**Tabela 9.40. (cd.)** Zestawienie obliczeń wskaźnika gotowości badanego SZZW z uwzględnieniem wpływu pojedynczego operatora

Obiekt	$K_g$ (dla pojedynczego elementu)	Struktura	$K_g$ (wg struktur niezawodnościowych)
ZUW II			
Ok	0,9868	-	0,9868
Mt	0,998	progowa 2 z 4	0,992
Mw	0,9729	progowa 3 z 6	0,9999
Os	0,9986	progowa 4 z 6	0,9999
OkMtMwMs	-	szeregowa	0,9787
Of	0,9853	-	0,9853
Fi	0,9846	progowa 3 z 4	0,9989
FiFi	0,9989	równoległa	0,9999
OfFiFi	-	szeregowa	0,9852
Om	0,9861	-	0,9861
Zp	0,991	-	0,991
OmZp	-	szeregowa	0,9772
Op	0,9863	-	0,9863
Pp	0,989	progowa 1 z 3	0,9999
OpPp	-	szeregowa	0,9862
ZUW II (całość)		szeregowa	0,9292
ZUWI/ZUWII	-	równoległa	0,9955
Oo	0,9863	-	0,9863
Go	0,998	progowa 1 z 2	0,9999
Kk	0,997	progowa 1 z 2	0,9999
Kkkk	0,9999	równoległa	0,9999
OoGoKkkk	-	szeregowa	0,9861
Of	0,9853	-	0,9853
Fw	0,998	progowa 4 z 6	0,9999
OfFw	-	szeregowa	0,9852
Od	0,9879	-	0,9879
UV	0,987	progowa 5 z 6	0,9976
UVUV	0,9976	równoległa	0,9999
Cl	0,9985	progowa 1 z 2	0,9999
OdUVUVCl	-	szeregowa	0,9877
Om	0,9861	-	0,9861
Zc	0,9892	równoległa	0,9998
ZcZc	0,9998	równoległa	0,9999
OmZcZc	-	szeregowa	0,986
Op	0,9863	-	0,9863
P2	0,9905	progowa 1 z 3	0,9999
P2P2	0,9999	szeregowa	0,9998
P2	0,9905	progowa 2 z 4	0,9999
P2P2P2	-	równoległa	0,9999
OpP2P2P2	-	szeregowa	0,9862
ZUW (całość)	-	szeregowa	0,8910

Operator połączony z obiektem sterowanym w systemie antropotechnicznym występuje w strukturze szeregowej. Przy dużej liczbie różnych obiektów, wzrasta również liczba struktur szeregowych par antropotechnicznych operator – obiekt, przez co obniża się wskaźnik gotowości całego badanego systemu. W przedstawionym przypadku obliczeniowym wskaźnik gotowości badanego ZUW z uwzględnieniem wpływu pojedynczego operatora otrzymano na poziomie  $K_g = 0,8910$ . Porównując tę wartość do wartości wskaźnika gotowości badanego ZUW bez uwzględnienia wpływu operatora ( $K_g = 0,9988$ ) obserwuje się znaczny spadek wartości  $K_g$  o 0,1078. Można zatem stwierdzić, że po uwzględnieniu wpływu operatora na niezawodność działania ZUW wartość wskaźnika gotowości spadła o ok. 10%. W odniesieniu do przedstawionych wymaganych wartości  $K_g$  dla miast o liczbie mieszkańców 50 000 – 500 000, po uwzględnieniu wpływu operatora na niezawodność działania ZUW, obiekt nie spełnia stawianych wymagań.

Przedstawiony przypadek obliczeniowy zakłada pracę jednego operatora, co jak udowodniono, stwarza realne zagrożenia dla niezawodności i bezpieczeństwa funkcjonowania ZUW. Dla najważniejszych procesów technologicznych decyzje operatorskie powinny być podejmowane w oparciu o decyzję minimum dwóch operatorów, dzięki czemu zmniejsza się prawdopodobieństwo popełnienia błędu przez człowieka [17, 69]. Operatorzy w takiej sytuacji tworzą z obiektem sterowanym parę antropotechniczną o strukturze niezawodnościowej szeregowo-równoległej.

W dalszej części analizy uwzględniono wpływ pracy dwóch operatorów na niezawodność ZUW. W tym celu zmodyfikowano schemat niezawodnościowy, poprzez dodanie elementów odpowiadających dwóm operatorom, co przedstawiono na rysunku 9.29. Ponownie wyznaczono wartość wskaźnika gotowości dla badanego ZUW z uwzględnieniem wpływu działania pary operatorów, co przedstawiono w tabeli 9.41.



**Tabela 9.41.** Zestawienie obliczeń wskaźnika gotowości badanego SZZW z uwzględnieniem wpływu dwóch operatorów

Obiekt	$K_g$ (dla pojedynczego elementu)	Struktura	$K_g$ (wg struktur niezawodnościowych)
Ou	0,9864	równoległa	0,9998
Si	0,999	szeregowa	0,9982
Ow	0,9992		
SiOW	0,9982	progowa 2 z 4	0,9999
OuSiOW	-	szeregowa	0,9997
Oo	0,9863	równoległa	0,9998
Kk	0,997	progowa 1 z 2	0,9999
OoKk	-	szeregowa	0,9997
Op	0,9863	równoległa	0,9998
P1	0,9681	progowa 1 z 3	0,9999
OpP1	-	szeregowa	0,9997
ZUW I			
Ok	0,9868	równoległa	0,9998
Ms	0,9891	równoległa	0,9999
Mw	0,9729	szeregowa	0,9996
Os	0,9986		
MwOs	0,9715	progowa 6 z 9	0,9999
OkMwOs	-	szeregowa	0,9866
Of	0,9853	równoległa	0,9998
Fi	0,9846	progowa 6 z 8	0,9998
OfFi	-	szeregowa	0,9996
Om	0,9861	równoległa	0,9998
Zp	0,991	-	0,991
OmZp	-	szeregowa	0,9908
Op	0,9863	równoległa	0,9998
Pp	0,989	progowa 1 z 3	0,9999
OpPp	-	szeregowa	0,9997
ZUW I (całość)	-	szeregowa	0,9897
ZUW II			
Ok	0,9868	równoległa	0,9998
Mt	0,998	progowa 2 z 4	0,992
Mw	0,9729	progowa 3 z 6	0,9999
Os	0,9986	progowa 4 z 6	0,9999
OkMtMwMs	-	szeregowa	0,9916
Of	0,9853	równoległa	0,9998
Fi	0,9846	progowa 3 z 4	0,9989
FiFi	0,9989	równoległa	0,9999
OfFiFi	-	szeregowa	0,9997
Om	0,9861	równoległa	0,9998
Zp	0,991	-	0,991
OmZp	-	szeregowa	0,9908
Op	0,9863	równoległa	0,9998
Pp	0,989	progowa 1 z 3	0,9999
OpPp	-	szeregowa	0,9997
ZUW II (całość)	-	szeregowa	0,9819



**Tabela 9.41. (cd.)** Zestawienie obliczeń wskaźnika gotowości badanego SZZW z uwzględnieniem wpływu dwóch operatorów

Obiekt	$K_g$ (dla pojedynczego elementu)	Struktura	$K_g$ (wg struktur niezawodnościowych)
ZUWI/ZUWII	-	równoległa	0,9998
Oo	0,9863	równoległa	0,9998
Go	0,998	progowa 1 z 2	0,9999
Kk	0,997	progowa 1 z 2	0,9999
Kkkk	0,9999	równoległa	0,9999
OoGoKkkk	-	szeregowa	0,9996
Of	0,9853	równoległa	0,9998
Fw	0,998	progowa 4 z 6	0,9999
OfFw	-	szeregowa	0,9997
Od	0,9879	równoległa	0,9998
UV	0,987	progowa 5 z 6	0,9976
UVUV	0,9976	równoległa	0,9999
Cl	0,9985	progowa 1 z 2	0,9999
OdUVUVCl	-	szeregowa	0,9996
Om	0,9861	równoległa	0,9998
Zc	0,9892	równoległa	0,9998
ZcZc	0,9998	równoległa	0,9999
OmZcZc	-	szeregowa	0,9997
Op	0,9863	równoległa	0,9998
P2	0,9905	progowa 1 z 3	0,9999
P2P2	0,9999	szeregowa	0,9998
P2	0,9905	progowa 2 z 4	0,9999
P2P2P2	-	równoległa	0,9999
OpP2P2P2	-	szeregowa	0,9997
ZUW (całość)	-	szeregowa	0,9972

Dla dwóch operatorów współpracujących w strukturze równoległej zakłada się, że do poprawnego działania systemu wystarczy, że jeden z nich nie popełni błędu. Para operatorów z obiektem sterowanym w systemie antropotechnicznym występuje w strukturze szeregowo - równoległej. W przedstawionym przypadku obliczeniowym wskaźnik gotowości badanego ZUW z uwzględnieniem wpływu pary operatorów otrzymano na poziomie  $K_g = 0,9972$ . Porównując tę wartość do wartości wskaźnika gotowości badanego ZUW bez uwzględnienia wpływu operatora ( $K_g = 0,9988$ ) obserwuje się nieznaczny spadek wartości  $K_g$  o 0,0016. Natomiast w porównaniu z wartością wskaźnika gotowości dla ZUW z uwzględnieniem wpływu pojedynczego operatora ( $K_g = 0,8910$ ) obserwuje się wzrost wartości  $K_g$  o 0,1062. W odniesieniu do przedstawionych wymaganych wartości  $K_g$  dla miast o liczbie mieszkańców 50 000 – 500 000, po uwzględnieniu wpływu pary operatorów na niezawodność działania ZUW, obiekt spełnia stawiane wymagania.

## 9.5. Ocena możliwości zwiększenia niezawodności operatora w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę

Możliwości zwiększenia niezawodności operatora zostały określone na podstawie odpowiedzi operatorów na pytania dotyczące organizacji pracy, środowiska pracy i procesu pracy w danym przedsiębiorstwie wodociągowym. W tabeli 9.42 przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań.

**Tabela 9.42.** Ocena możliwości zwiększenia niezawodności operatorów O1 - O42

Operator	Liczba punktów								Możliwości zwiększenia niezawodności operatora
	Pytanie 1	Pytanie 2	Pytanie 3	Pytanie 4	Pytanie 5	Pytanie 6	Pytanie 7	ΣP	
O1	0	0,5	0	0	0	0	0	0,3	bardzo niskie
O2	1	0,75	0,5	0,5	1	1	1	5,0	bardzo wysokie
O3	0	0	0	0	0	0	0	0,0	bardzo niskie
O4	0	0,75	0,5	0	0	0	0	0,8	bardzo niskie
O5	0	0,25	0	0	0	0	0	0,2	bardzo niskie
O6	0	0	0	0	0	0	0	0,0	bardzo niskie
O7	1	1	0,5	0	0	0	0	1,7	niskie
O8	0	0,75	0	0	0	0	1	1,5	niskie
O9	0	0,5	0	0	0	0	1	1,3	niskie
O10	0,5	0,25	0	0	0	0	1	1,5	niskie
O11	1	1	0	0	0	0	0,5	1,8	niskie
O12	0	0	0	0	0	0	0	0,0	bardzo niskie
O13	0	0	0	0	0	0	0	0,0	bardzo niskie
O14	1	0,25	0	0	0	0	1	1,8	niskie
O15	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	bardzo niskie
O16	1	0,25	0	0	0	0	1	1,8	niskie
O17	0	0,25	0,5	0	0	0	1	1,5	niskie
O18	0	0,25	0	0	0	0	0	0,2	bardzo niskie
O19	1	0,75	0,5	0	0,5	0,5	0	2,5	znaczne
O20	0	0,5	0	0	0	0	0	0,3	bardzo niskie
O21	0	0,75	0,5	0	0	0	0	0,8	bardzo niskie
O22	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0	2,0	niskie
O23	0	1	0	0,5	0,5	0	0	1,7	niskie
O24	0	1	0	0	0	0	1	1,7	niskie
O25	0	1	0	0	0	0	0	0,7	bardzo niskie
O26	0	1	0	0	0	0	0	0,7	bardzo niskie
O27	0	1	0	0	0	0	0	0,7	bardzo niskie
O28	0	1	0	0	1	0	0	1,7	niskie
O29	0	1	0	0,5	0	0	0	1,2	niskie
O30	0	0,25	0	0	0	0	1	1,2	niskie
O31	0	0,75	0	0	0	0	1	1,5	niskie
O32	0	1	0	0	0	0	1	1,7	niskie
O33	0,5	0	0,5	0	0	0	0	0,7	bardzo niskie
O34	0	0,5	0	0	0	0	0	0,3	bardzo niskie
O35	0	1	0	0,5	1	0	0	2,2	znaczne

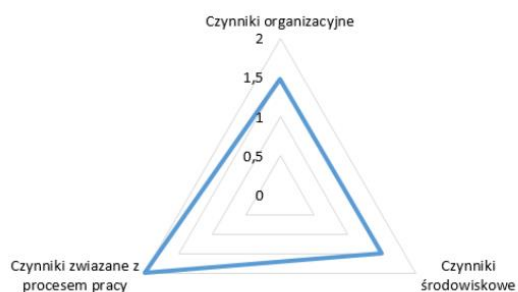
**Tabela 9.42. (cd.)** Ocena możliwości zwiększenia niezawodności operatorów O1 - O42

Operator	Liczba punktów								Możliwości zwiększenia niezawodności operatora
	Pytanie 1	Pytanie 2	Pytanie 3	Pytanie 4	Pytanie 5	Pytanie 6	Pytanie 7	ΣP	
O36	0	0,25	0,5	0	0	0	0	0,5	bardzo niskie
O37	0	0,25	0	0	0	0	0	0,2	bardzo niskie
O38	0	0,5	0,5	0	0	0	0	0,7	bardzo niskie
O39	0	0,75	0	0	0	0	0	0,5	bardzo niskie
O40	1	0	0	1	0	0	1	2,7	znaczne
O41	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0,7	bardzo niskie
O42	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0,7	bardzo niskie

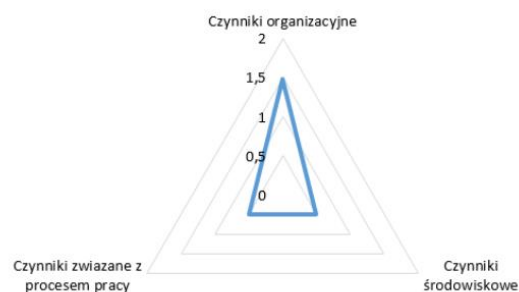
\*numeracja pytań zgodnie z Załącznikiem 1 (Etap 6. Informacje dodatkowe)

Dla 22 badanych operatorów określono możliwości zwiększenia niezawodności jako bardzo niskie, dla 16 jako niskie, dla 3 jako znaczne (O19, O35, O40) oraz dla 1 bardzo wysokie (O2). Dla operatorów, dla których istnieją znaczne i bardzo wysokie możliwości zwiększenia niezawodności operatora zaleca się podjęcie działań naprawczych w obrębie grup czynników zgodnie z wykresami przedstawionymi na rysunku 9.30.

a) O2



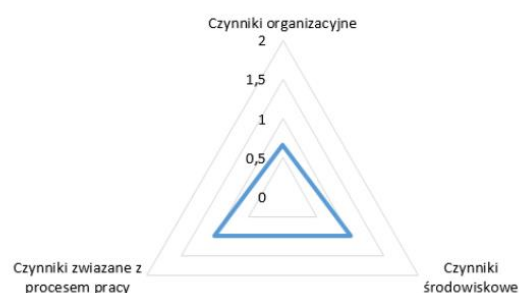
b) O19



c) O35



d) O40



**Rys. 9.30.** Możliwości zwiększenia niezawodności operatora w poszczególnych obszarach dla operatorów: a) O2, b) O19, c) O35, d) O40

Działania naprawcze dla grupy czynników organizacyjnych powinny obejmować:

- reorganizację w strukturach przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjnego,
- planowanie obciążenia pracą,
- ułatwienie komunikacji, przepływu informacji i pracy zespołowej,
- prowadzenie odpowiedniej rekrutacji oraz selekcji zasobów ludzkich,
- rozwój i szkolenia pracowników,
- zarządzanie wynikami pracy oraz nadzór,
- delegację uprawnień kierowniczych,
- stosowanie systemów zarządzania bezpieczeństwem,
- określenie regulaminów pracy,
- stosowanie odpowiednich systemów wynagradzania i premiowania pracowników.

Działania naprawcze dla grupy czynników środowiskowych powinny obejmować:

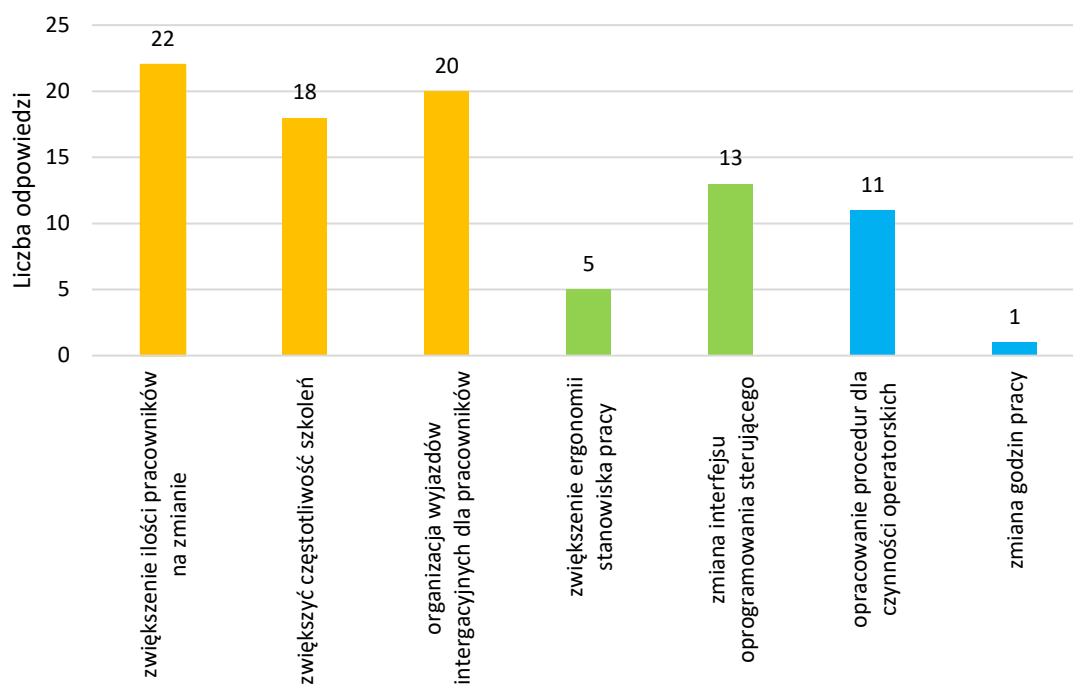
- poprawę warunków pracy (natężenie hałasu, wibracje, oświetlenie),
- poprawę ergonomii stanowiska pracy,
- rozwój systemów monitoringu i sterowania procesami technologicznymi.

Działania naprawcze dla grupy czynników związanych z procesem pracy powinny obejmować:

- zapewnienie wystarczającej ilości czasu na wykonanie zadania,
- określenie struktury zadań operatorskich,
- zapewnienie odpowiednich środków komunikacji oraz przepływu informacji,
- opracowanie procedur postępowania dla czynności operatorskich, zasad działania, instrukcji lokalnych czy wymagań dla personelu.

Na rysunku 9.31 przedstawiono możliwe działania naprawcze wskazane przez badaną grupę 42 operatorów. Najwięcej odpowiedzi (60) uzyskano dla działań naprawczych w obrębie grupy czynników organizacyjnych (kolor żółty), następnie (18) w grupie czynników środowiskowych (kolor zielony) oraz najmniej (12) w grupie czynników związanych z procesem pracy (kolor niebieski). W obrębie grupy czynników organizacyjnych największą liczbę odpowiedzi uzyskało działanie „zwiększenie liczby pracowników a zmianie”, co może wynikać ze zbyt dużego obciążenia operatorów pracą. W grupie czynników środowiskowych najczęściej wybieraną odpowiedzią było „zmiana interfejsu oprogramowania sterującego”, co wskazuje na konieczność dostosowania i rozbudowy systemów monitoringu i sterowania. W grupie czynników związanych

z procesem pracy najczęściej operatorów wybrało odpowiedź „opracowanie procedur dla czynności operatorskich”.



**Rys. 9.31.** Wskazane przez operatorów możliwe działania naprawcze



## 10. Podsumowanie, wnioski i kierunki dalszych badań

### 10.1. Podsumowanie

Podjęty problem badawczy dotyczył opracowania metody oceny niezawodności operatora w SZZW. Na podstawie przeprowadzonej analizy dotychczasowego stanu wiedzy stwierdzono brak istniejących badań dotyczących oceny niezawodności operatora w SZZW. Uzasadnione było więc opracowanie uniwersalnej, kompleksowej metody oceny niezawodności operatora w SZZW oraz metody oceny niezawodności SZZW z uwzględnieniem wpływu wewnętrznego czynnika ludzkiego. Tematyka badawcza rozprawy wpisuje się w szeroki obszar badań, prowadzonych w Katedrze Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków Politechniki Rzeszowskiej od blisko 40 lat, związanych z analizą niezawodności i bezpieczeństwa funkcjonowania SZZW. Przedstawiona rozprawa przyczyni się do rozwoju wiedzy w obszarze analizy niezawodności SZZW, będącego przykładem systemu antropotechnicznego.

Pierwszych pięć rozdziałów stanowi wprowadzenie do tematyki pracy. Sformułowano problem badawczy, cele, zakres oraz tezy pracy, wyjaśniono pojęcia stosowane w pracy, przedstawiono aktualny stan wiedzy na temat metod oceny niezawodności operatora systemów technicznych, ze szczególnym uwzględnieniem operatora systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę.

W rozdziale 6 opisano rolę i zadania operatora w SZZW w poszczególnych podsystemach SZZW. Przedstawiono również różne klasyfikacje błędów operatora oraz wskazano najważniejsze przyczyny błędów człowieka.

Rozdział 7 zawiera przegląd wybranych metod stosowanych do oceny niezawodności operatora systemów technicznych. Wprowadzono ogólny podział metod na 3 grupy: metody ilościowe, metody jakościowe i metody mieszane. W celu zobrazowania różnic pomiędzy poszczególnymi grupami opisano po jednej metodzie z każdej z ww. grup tj. metoda HEART (ilościowa), metoda SPAR-H (jakościowa) i metoda SHERPA (mieszana).

W rozdziale 8 przedstawiono wybór obiektu badań i ogólną charakterystykę przeprowadzonych badań. Następnie opisano podstawy matematyczne dla teorii liczb rozmytych oraz wnioskowania i sieci bayesowskich. W dalszej części przedstawiono szereg autorskich metod wykorzystanych w niniejszej rozprawie tj. metoda oceny wpływu zdarzeń awaryjnych z udziałem operatora na niezawodność systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę, metoda oceny niezawodności operatora systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę, metoda oceny niezawodności w systemie zbiorowego zaopatrzenia

w wodę z uwzględnieniem wpływu operatora oraz metoda oceny możliwości zwiększenia niezawodności operatora w systemie zbiorowego zaopatrzenia w wodę.

Rozdział 9 zawiera wyniki badań. W pierwszym etapie wskazano najbardziej wrażliwy na oddziaływanie awarii związanych z działaniem operatora element SZZW, tj. podsystem uzdatniania wody. Następnie przeprowadzono ocenę niezawodności operatora w oparciu o wartość wskaźnika gotowości operatora dla poszczególnych podsystemów SZZW, szczegółowo dla procesów technologicznych w obrębie podsystemu uzdatniania wody. Dalszy etap obejmował analizę wpływu czynników socjodemograficznych (tj. wiek, wykształcenie, doświadczenie zawodowe, wielkość obsługiwanego SZZW) na poziom niezawodności operatorów. W celu wykorzystania uzyskanych wyników w kolejnej części badań przedstawiono ocenę niezawodności dla wybranego elementu SZZW z uwzględnieniem wpływu operatora. W ostatnim etapie pracy przedstawiono możliwości zwiększenia poziomu niezawodności operatora w przedsiębiorstwach wodociągowych.

## 10.2. Wnioski

W wyniku realizacji niniejszej rozprawy sformułowano następujące wnioski:

- na podstawie analizy wpływu awarii związanych z działaniem operatora na niezawodność SZZW, jako najbardziej wrażliwy element całego systemu zidentyfikowano podsystem uzdatniania wody,
- za najważniejsze kryterium w aspekcie zapewnienia odpowiedniego poziomu niezawodności SZZW eksperci uznali dostarczenie do konsumenta wody o odpowiedniej jakości, następnie dostarczenie do konsumenta wody w odpowiedniej ilości; najmniejszą wagę przypisano do kryterium dostarczenia do konsumenta wody pod odpowiednim ciśnieniem,
- najwyższe wartości wskaźnika gotowości operatora otrzymano dla podsystemu uzdatniania wody w procesie dezynfekcji ( $K_{g\text{sr}} = 0,9879$ ), z kolei najniższe dla podsystemu uzdatniania wody w procesie filtracji (woda powierzchniowa) ( $K_{g\text{sr}} = 0,9853$ ). Przedstawiona metoda oceny niezawodności operatora wpisuje się w III generację metod poprzez modyfikację metody CREAM (II generacja) z wykorzystaniem teorii liczb rozmytych oraz sieci Bayesa. Powyższy wniosek potwierdza tezę postawioną w pracy: *Zastosowanie rozmyto – bayesowskiej wersji metody CREAM (ang. Cognitive Reliability and Error Analysis Method) ze względu na niepewność pozyskanych danych oraz fakt, że SZZW jest systemem antropotechnicznym, może stanowić oryginalne uzupełnienie i poszerzenie, klasycznego, technicznego podejścia do analiz niezawodnościowych SZZW,*



- spośród przebadanych cech socjodemograficznych największy wpływ na poziom niezawodności operatora mają: doświadczenie zawodowe, wielkość obsługiwanego SZZW oraz wykształcenie,
- na podstawie przeprowadzonej analizy niezawodności SZZW z uwzględnieniem wpływu operatora wykazano, że dla badanego podsystemu dostawy wody wskaźnik gotowości  $K_g = 0,9988$  zmienia się po uwzględnieniu wpływu czynnika ludzkiego w postaci pojedynczego operatora do wartości  $K_g = 0,8910$ . Przy zaleceniu pracy dwóch operatorów równocześnie wartość wskaźnika gotowości dla całego podsystemu wynosi  $K_g = 0,9972$ . Wyniki te wskazują, że wpływ wewnętrznego czynnika ludzkiego na poziom niezawodności i bezpieczeństwa funkcjonowania SZZW jest bardzo istotny i powinien być włączony jako stały element analizy niezawodnościowej SZZW. Zatem potwierdzona została teza: *Działanie operatora SZZW ma znaczący wpływ na poziom niezawodności i bezpieczeństwa dostaw wody do konsumenta. Z tego względu analiza niezawodności SZZW powinna obejmować wpływ operatora systemu, a jej wyniki powinny stanowić podstawę dla racjonalnych decyzji eksploatacyjnych podejmowanych przez przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne,*
- w celu zwiększenia poziomu niezawodności operatorów największe możliwości podjęcia działań naprawczych zidentyfikowano w obszarze czynników organizacyjnych (np. zmiana liczby pracowników, szkolenia) oraz czynników środowiskowych (np. zwiększenie ergonomii stanowiska pracy, zmiana interfejsu oprogramowania sterująco-monitorującego),
- w rozprawie przedstawiono wiele oryginalnych rozwiązań obejmujących problematykę analizy niezawodności operatora w SZZW, co niewątpliwie przyczyni się do rozwoju wiedzy w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

### 10.3. Kierunki dalszych badań

Realizacja niniejszej rozprawy pozwoliła na wskazanie głównych kierunków dalszych badań naukowych związanych z podjętą tematyką:

- adaptacja proponowanej metody oceny niezawodności operatora do innych systemów w sektorze gospodarki komunalnej np. systemy odprowadzania i oczyszczania ścieków, systemy zaopatrzenia w ciepło, systemy elektroenergetyczne,
- wykorzystanie komputerowych metod symulacyjnych do modelowania i oceny niezawodności operatora SZZW, w tym algorytmów sztucznej inteligencji, sieci neuronowych, uczenia maszynowego czy też algorytmów genetycznych,
- rozwój metod redukcji błędów ludzkich w SZZW.



## Literatura

1. Aalipour, M., Ayele, Y.Z., Barabadi, A. *Human reliability assessment (HRA) in maintenance of production process: a case study*. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2016. 7(2): s. 229–238.
2. Akyuz, E., Celik, E. *A modified human reliability analysis for cargo operation in single point mooring (SPM) off-shore units*. Applied Ocean Research, 2016. 58(C): s. 11–20.
3. Akyuz, E., Celik, E., Celik, M. *A practical application of human reliability assessment for operating procedures of the emergency fire pump at ships*. Ships and Offshore Structures, 2017. 13: s. 1–9.
4. Akyuz, E., Celik, M. *A methodological extension to human reliability analysis for cargo tank cleaning operation on board chemical tanker ships*. Safety Science, 2015. 75: s. 146–155.
5. Anu, V., Hu, W., Carver, J.C., Walia, G.S., Bradshaw, G. *Development of a human error taxonomy for software requirements: A systematic literature review*. Information and Software Technology, 2018. 103: s. 112–124.
6. Bajer, J. *Niezawodność podsystemu pompowania wody*. Rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska. 1993, Kraków.
7. Bajer, J., Wieczysty, A. *Analiza wpływu zbiorników wody surowej na niezawodność układów zasilania w wodę*. Metody oceny i podnoszenia niezawodności działania komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, 2001: s. 83–140.
8. Belčík, M., Tureková, I., Szabová, Z. *Comparison of selected methods for human reliability assesment*. Problemy Profesjologii, 2013(2): s. 217–223.
9. Bello, G.C., Colombari, V. *The human factors in risk analyses of process plants: The control room operator model 'TESEO'*. Reliability Engineering & System Safety, 1980. 1: s. 3–14.
10. Bergel, T., Kaczor, G., Bugajski, S. *Stan techniczny sieci wodociągowych w małych wodociągach województwa małopolskiego i podkarpackiego*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 2013(3/IV).
11. Bernardo, J.M., Smith, A.F.M. *Bayesian theory*. 1993, Chichester Wiley.
12. Będkowski, L., Dąbrowski, T. *Podstawy eksploatacji Część II: Podstawy niezawodności eksploatacyjnej*. 2006, Warszawa: Wojskowa Akademia Techniczna.
13. Bi, W., Dandy, G.C., Maier, H.R. *Improved genetic algorithm optimization of water distribution system design by incorporating domain knowledge*. Environmental Modelling & Software, 2015. 69: s. 370–381.
14. Bishop, C. *Pattern Recognition and Machine Learning*. 2006, Singapore Springer.
15. Borgheipour, H., Mohammadfam, I., Narenji, M.A. *Assessing and Comparing Human Errors in Technical operations in Petroleum Wells using Extended CREAM Technique*. International Journal of Occupational Hygiene, 2017. 9(3): s. 132–141.
16. Budziło, B., Wieczysty, A. *Teoretyczne i eksploatacyjne badania niezawodności ujęć wody powierzchniowej*. Metody oceny i podnoszenia niezawodności działania komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, 2001: s. 45–82.
17. Carvalho, S., Vidal, M., Carvalho, E. *Nuclear power plant communications in normative and actual practice: A field study of control room operators' communications*. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, 2007. 17: s. 43–78.
18. Chen, D., Fan, Y., Li, W., Wang, Y., Zhang, S. *Human reliability prediction in deep-sea sampling process of the manned submersible*. Safety Science, 2019. 112: s. 1–8.
19. De Felice, F., Petrillo, A. *Human Factors and Reliability Engineering for Safety and Security w Critical Infrastructures - Decision Making, Theory, and Practice* red: F. De Felice. 2018: Springer International Publishing.
20. Dhillon, B.S. *Human Reliability: With Human Factors*. 1986, Oxford, UK.

21. Di Pasquale, V., Miranda, S., Iannone, R., Riemma, S. *A Simulator for Human Error Probability Analysis (SHERPA)*. Reliability Engineering & System Safety, 2015. 139: s. 17-32.
22. Di Pasquale, V., Miranda, S., Neumann, W.S., Setayesh, A. *Human reliability in manual assembly systems: a Systematic Literature Review*. IFAC-PapersOnLine, 2018. 51(11): s. 675–680.
23. Dsouza, N., Lu, L. *A Literature Review on Human Reliability Analysis Techniques Applied for Probabilistic Risk Assessment in the Nuclear Industry*. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2017. 495: s. 41-54.
24. Dubois, D., Prade, H. *Fuzzy sets and systems: theory and applications*. Academic Press, 1980.
25. French, S., Bedford, T., Pollard, S.J.T., Soane, E. *Human reliability analysis: A critique and review for managers*. Safety Science, 2011. 49(6): s. 753-763.
26. Fruggiero, F., Fera, M., Lambiase, A., Di Pasquale, V. *Linking Human Factors to Assess Human Reliability*, w *Human-Friendly Robotics 2020*, Springer: Cham, Switzerland. s. 154–185.
27. Geweke, J. *Contemporary Bayesian Econometrics and Statistics*. 2005, Chichester, England, UK: Wiley Blackwell.
28. Gibson, W.H., Kirwan, B., Kennedy, R., Edmunds, J., Umbers, I. *Nuclear Action Reliability Assessment (NARA), further development of a data-based HRA tool*. Contemporary Ergonomics 2008: s. 164-169.
29. Głód, K., Wieczysty, A. *Niezawodność sieciowych zbiorników wodociągowych oraz ocena ich wpływu na niezawodność podsystemu dystrybucji wody*. Metody oceny i podnoszenia niezawodności działania komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, 2001.
30. Grabski, F., Jaźwiński, J. *Metody bayesowskie w niezawodności i diagnostyce z przykładami*. 2001, Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
31. Guo, Y., Sun, Y. *Human Reliability Quantification in Flight Through a Simplified CREAM Method*, in *Advances in Human Factors of Transportation*. 2019, Springer: Cham, Switzerland. s. 762–773.
32. Guo, Y., Sun, Y., Yang, X., Wang, Z. *Flight Safety Assessment Based on a Modified Human Reliability Quantification Method*. International Journal of Aerospace Engineering, 2019. 2019: s. 1–12.
33. Habier, D., Fernando, R.L., Kizilkaya, K., Garrick, D.J. *Extension of the bayesian alphabet for genomic selection*. BMC Bioinformatics, 2011. 12: s. 186.
34. He, C., Söffker, D. *Human reliability analysis in situated driving context considering human experience using a fuzzy-based clustering approach*, w *Proceedings of 2021 IEEE 2nd International Conference on Human-Machine Systems (ICHMS) 2021*, IEEE. s. 1–6.
35. Helmreich, R.L. *On error management: lessons from aviation*. British Medical Journal, 2000. 320(7237): s. 781–785.
36. Hollnagel, E. *Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)*. 1998: Elsevier Science.
37. Hollnagel, E. *Human Reliability Assessment in Context*. Nuclear Engineering and Technology, 2005. 37(2): s. 159–166.
38. Hotłoś, H. *Ilościowa ocena wpływu wybranych czynników na parametry i koszty eksploatacyjne sieci wodociągowych*. 2007, Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
39. Jaźwiński, J., Wieremiejczyk, W. *Niezawodność układu człowiek-maszyna*. Diagnostyka niezawodnościowa systemów technicznych: materiały VII Zimowej Szkoły Niezawodności, 1978.
40. Jaźwiński, J., Żurek, J. *Modelowanie i identyfikacja systemu "Człowiek - obiekt techniczny - otoczenie" w aspekcie jego niezawodności i gotowości*. Człowiek-obiekt techniczny-otoczenie. Problemy niezawodności i utrzymania ruchu: materiały XIV Zimowej Szkoły Niezawodności, 1986.
41. Jensen, F.V. *An Introduction to Bayesian Networks*. 1996, London: UCL Press Ltd.

42. Jiang, Y., Sun, Z., Xie, H., Gong, E. *A human error probability quantification method based on CREAM+Bayes*, w *Proceedings of 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE)*. 2010. IEEE.
43. Jin, J., Li, K., Yuan, L. *A Fuzzy and Bayesian Network CREAM Model for Human Error Probability Quantification of the ATO System*, w *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT) 2020*, Springer: Singapore. s. 567–576.
44. Kacprzak, D. *Metoda FSAW oparta na skierowanych liczbach rozmytych*. Przegląd Statystyczny, 2015. 62(z. 2): s. 165-181.
45. Kacprzak, D. *Rozmyta metoda SAW z wagami uzyskanymi za pomocą rozmytej entropii*. Przegląd Statystyczny, 2018. 65(1): s. 25-40.
46. Kacprzak, D., Rudnik, K. *Podjęcie decyzji z wykorzystaniem rozmytej metody SAW i transformaty Mellina*, w *Metody Ilościowe w Badaniach Ekonomicznych*. 2015, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego. s. 141-150.
47. Kacprzak, D., Rudnik, K. *Porządkowanie wariantów decyzyjnych z wykorzystaniem transformaty Mellina w rozmytej metodzie SAW*. Modern Management Review, 2015. XX(3).
48. Kacprzyk, J. *Zbiory rozmyte w analizie systemowej*. 1986, Warszawa: PWN.
49. Kancev, D., Heussen, S., Kluegel, J.U., Drinovac, S., Kozlik, T., Heussen, S., Kluegel, J. U., Drinovac, S., Kozlik, T. *Human reliability analysis in NPP: A plant-specific sensitivity analysis considering dynamic operator actions versus accident management actions*, w *Safety and Reliability – Safe Societies in a Changing World*. 2018, Taylor & Francis: Boca Raton, FL, USA. s. 365–372.
50. Kariuki, S.G., Löwe, K. *Integrating human factors into process hazard analysis*. Reliability Engineering & System Safety, 2007. 92(12): s. 1764-1773.
51. Kirwan, B. *The validation of three human reliability quantification techniques THERP, HEART and JHEDI .1. Technique descriptions and validation issues*. Applied Ergonomics, 1996. 27(6): s. 359-373.
52. Kirwan, B. *The validation of three human reliability quantification techniques - THERP, HEART and JHEDI .3. Practical aspects of the usage of the techniques*. Applied Ergonomics, 1997. 28(1): s. 27-39.
53. Kirwan, B., Gibson, H. *CARA: A Human Reliability Assessment Tool for Air Traffic Safety Management — Technical Basis and Preliminary Architecture* w *Safety of Systems - Proceedings of the 15th Safety-Critical Systems Symposium*. 2007.
54. Kirwan, B., Kennedy, R., Taylor-Adams, S., Lambert, B. *The validation of three human reliability quantification techniques - THERP, HEART and JHEDI .2. Results of validation exercise*. Applied Ergonomics, 1997. 28(1): s. 17-25.
55. Kluska, J. *Analytical Methods in Fuzzy Modeling and Control 2009*: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
56. Kłós, M. *Sterowanie dawką koagulantu jako element optymalizacji procesu koagulacji*. Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód—zagadnienia współczesne, red. M. Sozański. 2010, Poznań.
57. Knapik, K., Bajer, J. *Wodociągi*. 2010, Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
58. Kowal, A., Świdorska-Bróż, M. *Oczyszczanie wody. Podstawy teoretyczne i technologiczne, procesy i urządzenia*. 2007, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
59. Kuliczowska, E., Kuliczowski, A., Tchórzewska-Cieślak, B. *The structural integrity of water pipelines by considering the different loads*. Engineering Failure Analysis, 2020. 118: s. 104932.
60. Kutylowska, M. *Neural network approach for availability indicator prediction*. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2017. 61(4): s. 873–881.
61. Kwietniewski, M., Podedworna, J., Sozański, M. *Stan aktualny i kierunki rozwoju nauki w zakresie zaopatrzenia w wodę, usuwania i unieszkodliwiania ścieków i osadów oraz gospodarki odpadami*. 2014, Warszawa: Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN.
62. Kwietniewski, M., Rak, J. *Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce*. 2010, Warszawa: Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN.

63. Kwietniewski, M., Roman, M., Kłoss-Trębaczkiwicz, H. *Niezawodność wodociągów i kanalizacji*. 1993, Warszawa: Arkady.
64. Li, D., Li, L. *Preliminary Study of Human Factor Reliability in Hydropower Station*. *Advanced Materials Research*, 2011. 422: s. 803–806.
65. Lin, Q.L., Wang, D.J., Lin, W.G., Liu, H.C. *Human reliability assessment for medical devices based on failure mode and effects analysis and fuzzy linguistic theory*. *Safety Science*, 2014. 62: s. 248–256.
66. Lin, Y., Pan, X., He, C. *Human Reliability Analysis in Carrier-based Aircraft Recovery Procedure based on CREAM* w *Proceedings of 2015 First International Conference on Reliability Systems Engineering (ICRSE)*. 2010. Beijing, China: IEEE.
67. Lubowiecka, T., Wiczysty, A., Iwanejko, R., Jarecka, U. *Three-Parameter Method For Reliability Assessment of Indoor Water Supply Systems*, w *Proceedings of IWA 2nd World Water Congress*. 2000. Berlin, Germany.
68. Łęski, J. *Systemy neruonowo-rozmyte*. 2008, Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
69. Mahmoudi-Nasr, S., Varjani, A. *Toward Operator Access Management in SCADA System: Deontological Threat Mitigation*. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017. 14(8): s. 3314 - 3324.
70. Munger, S.J., Smith, R.W., Payne, D. *An Index of Electronic Equipment Operability: Data Store*. American Institute for Research Report, 1962.
71. Nistal-Nuño, B. *Tutorial of the probabilistic methods Bayesian networks and influence diagrams applied to medicine*. *Journal of Evidence-Based Medicine*, 2018. 11(2): s. 112–124.
72. Nowakowski, W., Ciszewski, T., Łukasik, Z. *Metody oceny wpływu czynnika ludzkiego na bezpieczeństwo w transporcie*. *Autobusy : technika, eksploatacja, systemy transportowe*, 2018. 19(6).
73. Pandya, D., Podofillini, L., Emert, F., Lomax, A., Dang, V.N. *Developing the foundations of a cognition-based human reliability analysis model via mapping task types and performance-influencing factors: Application to radiotherapy*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 2017. 232(1): s. 3–37.
74. Patriarca, R., Ramos, M., Paltrinieri, N., Massaiu, S., Costantino, F., Di Gravio, G., Boring, R.L. *Human reliability analysis: Exploring the intellectual structure of a research field*. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020. 203: s. 107102.
75. Pawełek, J. *Wykorzystanie zapasu wody w celu zabezpieczenia ujęć wodociągowych z rzek i potoków górskich przy stanach podwyższonych mętności i zawiesin*. Wydawnictwo AR Kraków, Rozprawa nr 215, 1996.
76. Perrow, C. *Normal Accidents*. 1999, Princeton, NJ, USA: Princeton University Press.
77. Piegoń, I., Tchórzewska-Cieślak, B., Szpak, D., Szlachta, A. *Analysis of selected reliability indicators of water supply network*. *Journal of KONBiN*, 2018. 47(1): s. 45–65.
78. Piesik, E., Barnert, T., Śliwiński, M. *Metoda analizy niezawodności człowieka SPAR-H w aplikacji ProSIL-EAL*. *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 2014. 40.
79. Pietrucha-Urbanik, K., Tchórzewska-Cieślak, B. *Approaches to Failure Risk Analysis of the Water Distribution Network with Regard to the Safety of Consumers*. *Water Research*, 2018. 10(11).
80. Prasetyo, B., Baroroh, N. *Fuzzy Simple Additive Weighting Method in the Decision Making of Human Resource Recruitment*. *Lontar Komputer: Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi*, 2016: s. 174.
81. Rak, J. *Niezawodność systemu uzdatniania wód powierzchniowych*. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, 1993. 111(20).
82. Rak, J. *Ryzyko w funkcjonowaniu operatora SZW - analiza ergonomiczna*. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 2003. LXXVII(6): s. 211-214.
83. Rak, J. *Istota ryzyka w funkcjonowaniu systemu zaopatrzenia w wodę*. 2004, Rzeszów: Oficyna Wydawnicza PRZ.

84. Rak, J. *Wybrane uwarunkowania skutecznego działania operatorów systemów komunalnych*. Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, 2013. XXX: s. 211-221.
85. Rak, J., Boryczko, K. *Sposób oceny niezawodności operatora SZW metodą drzewa zdarzeń z możliwością poprawy popełnionego błędu*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 2009. 9: s. 47-49.
86. Rak, J., Piegdoń, I., Homa, K. *Kryzysowe zaopatrzenie Rzeszowa w wodę*. Journal of KONBiN, 2013. 1(25).
87. Rak, J., Tchórzewska-Cieślak, B. *Metody analizy i oceny ryzyka w systemie zaopatrzenia w wodę*. 2005, Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
88. Rak, J., Tchórzewska-Cieślak, B. *Pojęcie niezawodności i bezpieczeństwa pracy operatora w systemie wodociągowym*. Instal, 2019. 2.
89. Rak, J., Tchórzewska-Cieślak, B., Piegdoń, I., Szpak, D., Żywiec, J. *Problematyka niezawodności i bezpieczeństwa systemów wodociągowych w świetle zmian przepisów Unii Europejskiej*. Instal, 2022. 3.
90. Rak, J., Tchórzewska-Cieślak, B., Studziński, J. *Bezpieczeństwo Systemów Zbiorowego Zaopatrzenia w Wodę*. 2013, Warszawa: Polska Akademia Nauk.
91. Rak, J., Tchórzewska-Cieślak, B., Żywiec, J. *Czynnik niezawodności człowieka w systemach zaopatrzenia w wodę*. Instal, 2019. 3.
92. Rak, J., Tchórzewska-Cieślak, B., Żywiec, J. *Nowy segment estymatorów wskaźników niezawodności operatora systemu wodociągowego*. Instal, 2019. 4.
93. Rasmussen, J. *Human errors. A taxonomy for describing human malfunction in industrial installations*. Journal of Occupational Accidents, 1982. 4(2): s. 311–333.
94. Reason, J. *Human error*. 1990, New York: Cambridge University Press.
95. Reason, J. *Human error: models and management*. BMJ : British Medical Journal, 2000. 320(7237): s. 768.
96. Ren, J., Jenkinson, I., Wang, J., Xu, D. L., Yang, J. B. *A methodology to model causal relationships on offshore safety assessment focusing on human and organizational factors*. Journal of Safety Research, 2008. 39(1): s. 87-100.
97. Sezer, S.I., Akyuz, E., Arslan, O. *An extended HEART Dempster–Shafer evidence theory approach to assess human reliability for the gas freeing process on chemical tankers*. Reliability Engineering & System Safety, 2022. 220: s. 108275.
98. Smalko, Z. *Studium terminologiczne inżynierii bezpieczeństwa transportu*. 2010, Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
99. Smalko, Z., Jaźwiński, J. *Wpływ czynnika ludzkiego na poprawne działanie systemów transportowych*. Problemy decyzyjne w inżynierii niezawodności: materiały XXVIII Zimowej Szkoły Niezawodności, 2000.
100. Smalko, Z., Nowakowski, T., Tubis, A. *Zarys niezawodnościowej teorii zagrożeń*. 2020, Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
101. Smalko, Z., Szpytko, J. *The man - machine type systems modeling approach*. Journal of KONBiN, 2008. 5(8): s. 171–188.
102. Straeter, O. *Human reliability analysis: data issues and errors of commission*. Reliability Engineering & System Safety, 2004. 83.
103. Swain, A.D., Guttman, H.E. *Human reliability analysis applied to nuclear-power*. Proceedings Annual Reliability And Maintainability Symposium, 1975: s. 116-119.
104. Szpak, D., Boryczko, K., Żywiec, J., Piegdoń, I., Tchórzewska-Cieślak, B., Rak, J. *Risk Assessment of Water Intakes in South-Eastern Poland in Relation to the WHO Requirements for Water Safety Plans*. Resources, 2021. 10(10): s. 105.
105. Szpak, D., Tchórzewska-Cieślak, B. *The Use of Grey Systems Theory to Analyze the Water Supply Systems Safety*. Water Resources Management, 2019. 33(12): s. 4141–4155.
106. Tang, Y., Wu, S., Miao, X., Pollard, S.J.T., Hrudefy, S.E. *Resilience to evolving drinking water contamination risks: A human error prevention perspective*. Journal of Cleaner Production, 2013. 57: s. 228-237.
107. Tao, J., Qiu, D., Yang, F., Duan, Z. *A bibliometric analysis of human reliability research*. Journal of Cleaner Production, 2020. 260: s. 121041.

108. Tavakoli, M., Nafar, M. *Modification of the FFTA method for calculating and analyzing the human reliability of maintenance groups in power transmission grids*. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2021. 12.
109. Tchórzewska-Cieślak, B. *Metody analizy i oceny ryzyka awarii podsystemu dystrybucji wody*. 2011, Rzeszów: Oficyna wydawnicza PRZ.
110. Tchórzewska-Cieślak, B. *Bayesian model of urban water safety management*. Global NEST Journal, 2014. 16(4): s. 667–675.
111. Tchórzewska-Cieślak, B., Rak, J. *Niezawodność operatora systemu wodociągowego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Seria: Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 2010. 1(57): s. 169-177.
112. Tchórzewska-Cieślak, B., Rak, J., Szpak, D. *Bayesian Inference in the Analysis of the Failure Risk of the Water Supply Network*. Journal of KONBiN, 2019. 49(3): s. 433–450.
113. Tchórzewska - Cieślak, B. *Niezawodność i bezpieczeństwo systemów komunalnych*. 2008, Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
114. Tchórzewska - Cieślak, B. *Wieloaspektowa analiza bezpieczeństwa w eksploatacji systemów wodociągowych*. 2018, Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
115. Tu, J., Lin, W., Lin, Y. *A Bayes-SLIM based methodology for human reliability analysis of lifting operations*. International Journal of Industrial Ergonomics, 2015. 45: s. 48–54.
116. Ung, S.-T. *Human error assessment of oil tanker grounding*. Safety Science, 2018. 104: s. 16–28.
117. Velasco, A. R., Muñuzuri, J., Onieva, L., Palero, M. R. *Trends and applications of machine learning in water supply networks management*. Journal of Industrial Engineering and Management, 2021. 14(1): s. 45–54.
118. Wang, X., Zhang, W., Pan, X., Liu, T. *Method for Crew Human Reliability Analysis Based on CREAM*, in *Advances in Human Error, Reliability, Resilience and Performance*. 2019, Springer: Cham, Switzerland. s. 225–234.
119. Wiczysty, A. *Metody oceny i podnoszenia niezawodności działania komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę*. 2001, Kraków: Komitet Inżynierii Środowiska PAN.
120. Wiczysty, A., Lubowiecka, T., Iwaniejko, R. *Człowiek - dyspozytor systemu jako element wpływający na jego bezpieczeństwo*, w *Bezpieczeństwo i niezawodność działania systemów gazowych, wodociągowych, kanalizacyjnych i centralnego ogrzewania. Materiały ogólnopolskiej konferencji naukowo - technicznej, Zakopane*. 1997. Zakopane.
121. Wiczysty, A., Lubowiecka, T., Iwaniejko, R. *Niezawodność człowieka w biotechnicznym systemie zaopatrzenia w wodę*, w *Zaopatrzenie w wodę miast i wsi. PZITS O/Poznań*. 1998. Poznań.
122. Wiczysty, A., Rak, J. *Niezawodność systemów zaopatrzenia w wodę w aspekcie wymagań jakościowych*. Ochrona Środowiska, 1995. 1(56): s. 5-10.
123. Wiczysty, A., Rak, J. *Sposoby ochrony systemu zaopatrzenia w wodę miasta przed incydentalnymi zanieczyszczeniami*, w *Zasady racjonalnej gospodarki wodą - VII Ogólnopolskie Seminarium Naukowo-Techniczne Ochrona Jakości i Zasobów Wód, PZiITS, Oddział w Krakowie*. 1996. Zakopane.
124. Wiczysty, A., Rak, J., Lubowiecka, T. *Teoretyczne podstawy badania i projektowania stacji osłonowych ujęć wód powierzchniowych płynących*, w *Zaopatrzenie w wodę miast i wsi, PZITS O/Wielkopolski*. 1996. Poznań.
125. Williams, J.C. *A data-based method for assessing and reducing human error to improve operational performance*, w *Proceedings of IEEE Fourth Conference on Human Factors and Power Plants*. 1988. IEEE.
126. Wu, S., Hrudey, S., French, S., Bedford, T., Soane, E., Pollard, S. *A role for human reliability analysis (HRA) in preventing drinking water incidents and securing safe drinking water*. Water Research, 2009. 43(13): s. 3227-3238.
127. Xi, Y. T., Yang, Z. L., Fang, Q. G., Chen, W. J., Wang, J. *A new hybrid approach to human error probability quantification–applications in maritime operations*. Ocean Engineering, 2017. 138: s. 45–54.



128. Yang, Z.L., Bonsall, S., Wall, A., Wang, J., Usman, M. *A modified CREAM to human reliability quantification in marine engineering*. Ocean Engineering, 2013. 58: s. 293-303.
129. Yang, Z.L., Wang, J., Rochdi, M., Belkacem, O. *Bayesian modelling for human error probability analysis in CREAM*, w Proceedings of 2011 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering. 2011. Xi'an, China: IEEE.
130. Zadeh, L.A. *Fuzzy sets*. Information and Control, 1965. 8(3): s. 338-353.
131. Zheng, X., Bolton, M. L., Daly, C., Biltekoff, E. *The development of a next-generation human reliability analysis: Systems analysis for formal pharmaceutical human reliability (SAFPH)*. Reliability Engineering & System Safety, 2020. 202: s. 106927.
132. Zhou, Q., Wong, Y.D., Loh, H.S., Yuen, K.F. *A fuzzy and Bayesian network CREAM model for human reliability analysis - The case of tanker shipping*. Safety Science, 2018. 105: s. 149-157.
133. Zimmermann, H.J. *Fuzzy Set Theory—and Its Applications*. 2001: Springer Netherlands.

### **Wykaz aktów prawnych, norm i wytycznych**

134. *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/2184 z dnia 16 grudnia 2020 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi*.
135. *Ustawa z dnia 7 czerwca 2001 r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków (z późniejszymi zmianami, Dz.U. 2020 poz. 2028)*.
136. *Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym (z późniejszymi zmianami, Dz.U. 2022 poz. 261)*.
137. *Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz.U. 2017 poz. 2294)*.
138. *Guidelines for Drinking-water Quality. Fourth Edition. 2011*. Geneva: WHO.
139. *NUREG-1624: technical basis and implementation guidelines for a technique for human event analysis (ATHEANA). 2000*. Washington, DC: US Nuclear Regulatory Commission.
140. *NUREG/CR-1278: Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications. 1983*. Washington, DC: US Nuclear Regulatory Commission.
141. *NUREG/CR-6883: The SPAR-H Human Reliability Analysis Method. 2005* Washington, DC: US Nuclear Regulatory Commission.
142. *Water safety plan manual: step-by-step risk management for drinking-water suppliers. 2009*. Geneva WHO.

### **Netografia**

143. <https://amnesty.org.pl/onz-uznanie-prawa-do-wody-i-urz%C4%85dze%C5%84-sanitarnych/>, (dostęp 10.05.2022 r.).
144. <https://bayesfusion.com/2020/08/26/genie-3-0-released/>, (dostęp 15.09.2020 r.).
145. <https://phoenixcontact.com/pl-pl/galezie-przemyslu/smart-water/zaopatrzenie-w-wode-pitna#ex-kgrk>, (dostęp 9.05.2022 r.).
146. <https://technologia-wody.pl/posts/2010-04-22-eksploatacja-ukladow-napowietrzania-otwartego-wody-przyklady-rozwiazan-stosowanych-w-kraju>, (dostęp 05.04.2022 r.).
147. [https://technologia-wody.pl/posts/2020-10-02-podstawowe\\_metody\\_dezynfekcji\\_wody-\\_technika\\_i\\_eksploatacja-\\_dezynfekcja\\_chlorem\\_-\\_aspekty\\_tehnologiczne-\\_dozowanie\\_podchlorynu\\_przygotowywanego\\_na\\_miejscu\\_z\\_soli\\_kuchennej](https://technologia-wody.pl/posts/2020-10-02-podstawowe_metody_dezynfekcji_wody-_technika_i_eksploatacja-_dezynfekcja_chlorem_-_aspekty_tehnologiczne-_dozowanie_podchlorynu_przygotowywanego_na_miejscu_z_soli_kuchennej), (dostęp 07.04.2022 r.).



## Spis rysunków

Rys. 6.1. Rodzaje błędów operatora.....	32
Rys. 7.1. Klasyfikacja wybranych metod HRA.....	36
Rys. 8.1. Lokalizacja ZUW na mapie województwa podkarpackiego, w których przeprowadzono badania niezawodności operatora.....	42
Rys. 8.2. Funkcje przynależności liczb rozmytych .....	47
Rys. 8.3. Przykładowa sieć bayesowska .....	49
Rys. 8.4. Współzależności czynników CPC.....	56
Rys. 8.5. Zasady korekty poziomu wpływu na niezawodność operatora dla współzależnych czynników CPC.....	59
Rys. 8.6. Zależność między sumarycznym wynikiem oceny czynników CPC, a trybem kontroli działania operatora .....	59
Rys. 8.7. Konwencjonalny proces oceny niezawodności operatora metodą CREAM.....	60
Rys. 8.8. Funkcja przynależności dla ocen czynników CPC w zależności od stopni oceny .....	62
Rys. 8.9. Funkcja przynależności dla trybów kontroli .....	64
Rys. 8.10. Opracowana sieć Bayesa służąca do wyznaczenia rozkładu prawdopodobieństwa trybu kontroli .....	66
Rys. 8.11. Proces oceny niezawodności operatora zmodyfikowaną metodą CREAM .....	76
Rys. 8.12. Struktura szeregową O (operator) – T (obiekt techniczny).....	81
Rys. 9.1. Okno programu GeNIe 3.0 firmy BayesFusion (sieć Bayesa dla operatora O1 w PsUjW).....	88
Rys. 9.2. Wykres funkcji przynależności $\mu_T(x)$ dla poszczególnych trybów kontroli dla operatora O1 w PsUjW.....	89
Rys. 9.3. Wyniki operatora O1 dla PsUzW-UW .....	92
Rys. 9.4. Wykres funkcji przynależności $\mu_T(x)$ dla poszczególnych trybów kontroli dla operatora O1 w PsUzW-UW .....	93
Rys. 9.5. Wyniki operatora O39 dla PsUzW-N.....	95
Rys. 9.6. Wykres funkcji przynależności $\mu_T(x)$ dla poszczególnych trybów kontroli dla operatora O39 w PsUzW-N.....	96
Rys. 9.7. Wyniki operatora O1 dla PsUzW-K.....	98
Rys. 9.8. Wykres funkcji przynależności $\mu_T(x)$ dla poszczególnych trybów kontroli dla operatora O1 w PsUzW-K.....	98
Rys. 9.9. Wyniki operatora O1 dla PsUzW-FPw .....	101
Rys. 9.10. Wykres funkcji przynależności $\mu_T(x)$ dla poszczególnych trybów kontroli dla operatora O1 w PsUzW-FPw .....	101
Rys. 9.11. Wyniki operatora O1 dla PsUzW-D.....	105
Rys. 9.12. Wykres funkcji przynależności $\mu_T(x)$ dla poszczególnych trybów kontroli dla operatora O1 w PsUzW-D.....	105
Rys. 9.13. Wyniki operatora O1 dla PsPoW .....	108
Rys. 9.14. Wykres funkcji przynależności $\mu_T(x)$ dla poszczególnych trybów kontroli dla operatora O1 w PsPoW .....	108
Rys. 9.15. Wyniki operatora O1 dla PsMaW .....	111
Rys. 9.16. Wykres funkcji przynależności $\mu_T(x)$ dla poszczególnych trybów kontroli dla operatora O1 w PsMaW .....	111
Rys. 9.17. Wartość wskaźnika gotowości operatora $K_g$ w poszczególnych podsystemach SZZW .....	114
Rys. 9.18. Struktura wieku badanej grupy operatorów SZZW .....	118

---

Rys. 9.19. Wartość wskaźnika gotowości operatora w poszczególnych podsystemach SZZW zróżnicowana pod względem struktury wiekowej .....	119
Rys. 9.20. Struktura poziomu wykształcenia badanej grupy operatorów SZZW .....	121
Rys. 9.21. Wartość wskaźnika gotowości operatora w poszczególnych podsystemach SZZW zróżnicowana pod względem poziomu wykształcenia .....	122
Rys. 9.22. Struktura poziomu doświadczenia zawodowego badanej grupy operatorów SZZW .	124
Rys. 9.23. Wartość wskaźnika gotowości operatora w poszczególnych podsystemach SZZW zróżnicowana pod względem poziomu doświadczenia zawodowego.....	125
Rys. 9.24. Wielkość obsługiwanych SZZW przez operatorów w badanej grupie .....	127
Rys. 9.25. Wartość wskaźnika gotowości operatora w poszczególnych podsystemach SZZW zróżnicowana pod względem wielkości SZZW .....	129
Rys. 9.26. Schemat technologiczny badanego ZUW .....	134
Rys. 9.27. Konwencjonalny schemat niezawodnościowy badanego ZUW .....	135
Rys. 9.28. Schemat niezawodnościowy badanego ZUW z uwzględnieniem wpływu pojedynczego operatora .....	139
Rys. 9.29. Schemat niezawodnościowy badanego ZUW z uwzględnieniem wpływu pracy dwóch operatorów .....	143
Rys. 9.30. Możliwości zwiększenia niezawodności operatora w poszczególnych obszarach dla operatorów O2, O19, O35 i O40 .....	147
Rys. 9.31. Wskazane przez operatorów możliwe działania naprawcze .....	149

## Spis tabel

Tabela 8.1. Oceniane warianty (zdarzenia awaryjne).....	53
Tabela 8.2. Kryteria oceny wariantów oraz ich wagi .....	53
Tabela 8.3. Skala ocen wraz z przyporządkowaną funkcją przynależności .....	54
Tabela 8.4. Zależność trybu kontroli i wartości HEP .....	56
Tabela 8.5. Czynniki CPC .....	57
Tabela 8.6. Modyfikacja czynników CPC .....	63
Tabela 8.7. Zależność trybu kontroli i wartości HEP .....	64
Tabela 8.8. Tablica prawdopodobieństwa warunkowego dla $X_{10}$ .....	73
Tabela 8.9. Tablica prawdopodobieństwa warunkowego dla $X_{11}$ .....	74
Tabela 8.10. Tablica prawdopodobieństwa warunkowego dla $X_{12}$ .....	74
Tabela 8.11. Tablica prawdopodobieństwa warunkowego dla $X_{13}$ .....	75
Tabela 8.12. Wartości wymaganego poziomu $K_g$ dla SZZW w zależności od kategorii niezawodności systemów .....	80
Tabela 8.13. Wartości wskaźnika gotowości $K_g$ w zależności od kategorii wodociągu .....	80
Tabela 8.14. Pytania i waga punktowa odpowiedzi .....	83
Tabela 8.15. Ocena możliwości zwiększenia niezawodności operatora .....	84
Tabela 9.1. Wyniki oceny ekspertów .....	86
Tabela 9.2. Rozmyte wyniki oceny .....	86
Tabela 9.3. Zagregowane wyniki oceny .....	86
Tabela 9.4. Wyniki defuzyfikacji oraz ranking wariantów .....	86
Tabela 9.5. Rozmyte wartości oceny czynników CPC dla operatora O1 dla procesu sterowania PsUjW .....	87
Tabela 9.6. Wyniki analizy niezawodności operatorów O1 - O42 w PsUjW .....	90
Tabela 9.7. Podstawowe statystyki opisowe wartości HEP i $K_g$ operatora w PsUjW .....	91
Tabela 9.8. Rozmyte wartości oceny czynników CPC dla operatora O1 dla procesu sterowania PsUzW-UW .....	92
Tabela 9.9. Wyniki analizy niezawodności operatorów O1 – O27, O30 - O34, O37, O38 w PsUzW-UW .....	93
Tabela 9.9. (cd.) Wyniki analizy niezawodności operatorów O1 – O27, O30 - O34, O37, O38 w PsUzW-UW .....	94
Tabela 9.10. Podstawowe statystyki opisowe wartości HEP i $K_g$ operatora w PsUzW-UW .....	94
Tabela 9.11. Rozmyte wartości oceny czynników CPC dla operatora O39 dla procesu sterowania PsUzW-N.....	95
Tabela 9.12. Wyniki analizy niezawodności operatorów O39-O42 w PsUzW-N.....	96
Tabela 9.13. Podstawowe statystyki opisowe wartości HEP i $K_g$ operatora w PsUzW-N.....	96
Tabela 9.14. Rozmyte wartości oceny czynników CPC dla operatora O1 dla procesu sterowania PsUzW-K.....	97
Tabela 9.15. Wyniki analizy niezawodności operatorów O1 – O38 w PsUzW-K.....	99
Tabela 9.16. Podstawowe statystyki opisowe wartości HEP i $K_g$ operatora w PsUzW-K.....	100
Tabela 9.17. Rozmyte wartości oceny czynników CPC dla operatora O1 dla procesu sterowania PsUzW-FPw .....	100
Tabela 9.18. Wyniki analizy niezawodności operatorów O1 – O38 w PsUzW-FPw .....	102
Tabela 9.19. Wyniki analizy niezawodności operatorów O39-O42 w PsUzW-FPd .....	103
Tabela 9.20. Podstawowe statystyki opisowe wartości HEP i $K_g$ operatora w PsUzW-FPw .....	103
Tabela 9.21. Podstawowe statystyki opisowe wartości HEP i $K_g$ operatora w PsUzW-FPd .....	103

---

Tabela 9.22. Rozmyte wartości oceny czynników CPC dla operatora O1 dla procesu sterowania PsUzW-D .....	104
Tabela 9.23. Wyniki analizy niezawodności operatorów O1 – O42 w PsUzW-D .....	106
Tabela 9.24. Podstawowe statystyki opisowe wartości HEP i $K_g$ operatora w PsUzW-D .....	107
Tabela 9.25. Rozmyte wartości oceny czynników CPC dla operatora O1 dla procesu sterowania PsPoW.....	107
Tabela 9.26. Wyniki analizy niezawodności operatorów O1 - O42 w PsPoW.....	109
Tabela 9.27. Podstawowe statystyki opisowe wartości HEP i $K_g$ operatora w PsPoW .....	110
Tabela 9.28. Rozmyte wartości oceny czynników CPC dla operatora O1 dla procesu sterowania PsMaW.....	110
Tabela 9.29. Wyniki analizy niezawodności operatorów O1 - O42 w PsMaW.....	112
Tabela 9.30. Podstawowe statystyki opisowe wartości HEP i $K_g$ operatora w PsMaW.....	113
Tabela 9.31. Klasyfikacja poziomu niezawodności operatora.....	115
Tabela 9.32. Poziom niezawodności badanych operatorów .....	115
Tabela 9.32. (cd.) Poziom niezawodności badanych operatorów .....	116
Tabela 9.33. Wyniki testu Kruskala-Wallisa (poziom istotności $\alpha = 0,05$ ).....	120
Tabela 9.34. Wyniki testu Kruskala-Wallisa (poziom istotności $\alpha = 0,05$ ).....	123
Tabela 9.35. Wyniki testu Kruskala-Wallisa (poziom istotności $\alpha = 0,05$ ).....	126
Tabela 9.36. Wyniki testu Kruskala-Wallisa (poziom istotności $\alpha = 0,05$ ).....	130
Tabela 9.37. Wskaźniki gotowości $K_g$ elementów przedstawionych na schemacie niezawodnościowym.....	136
Tabela 9.38. Zestawienie obliczeń wskaźnika gotowości badanego SZZW.....	136
Tabela 9.38. (cd.) Zestawienie obliczeń wskaźnika gotowości badanego SZZW .....	137
Tabela 9.39. Wskaźniki gotowości $K_g$ operatora dla elementów przedstawionych na schemacie niezawodnościowym.....	140
Tabela 9.40. Zestawienie obliczeń wskaźnika gotowości badanego SZZW z uwzględnieniem wpływu pojedynczego operatora .....	140
Tabela 9.40. (cd.) Zestawienie obliczeń wskaźnika gotowości badanego SZZW z uwzględnieniem wpływu pojedynczego operatora .....	141
Tabela 9.41. Zestawienie obliczeń wskaźnika gotowości badanego SZZW z uwzględnieniem wpływu dwóch operatorów.....	144
Tabela 9.41. (cd.) Zestawienie obliczeń wskaźnika gotowości badanego SZZW z uwzględnieniem wpływu dwóch operatorów.....	145
Tabela 9.42. Ocena możliwości zwiększenia niezawodności operatorów O1 - O42.....	146
Tabela 9.42. (cd.) Ocena możliwości zwiększenia niezawodności operatorów O1 - O42 .....	147

---

## Załączniki

Załącznik nr 1. Formularz ankietowy.....	169
Załącznik nr 2. Wyniki ankiet .....	175





## Załącznik nr 1. Formularz ankietowy

### Badanie niezawodności operatora w SZZW

Ankietę podzielono na 6 etapów. Pierwsze 4 etapy dotyczą oceny czynników wpływających na niezawodność operatora wg. metody CREAM dla poszczególnych podsystemów SZZW. Badanie odnosi się do sytuacji gdzie operator ma za zadanie ręczne sterowanie procesami technologicznymi.

Występuje 9 czynników podlegających ocenie w skali od 1 do 10 (1 - nieodpowiednia, 10 - odpowiednia/akceptowalna). Definicje czynników przedstawiono poniżej:

1. Organizacja pracy - odpowiedni podział ról i zadań między członków zespołu, system komunikacji, instrukcje operacyjne itd.
2. Warunki pracy - fizyczne uwarunkowania środowiska pracy: oświetlenie, odbicia światła, głośność alarmów itd.
3. Jakość interfejsu SCADA - ogólna ocena jakości interfejsu człowiek - maszyna: ilość informacji dostępnych na panelu kontrolnym, stanowiskach skomputeryzowanych itd.
4. Dostępność procedur/planów - procedury i plany zawierające schematy postępowania itd.
5. Liczba jednocześnie wykonywanych zadań - liczba zadań wykonywanych przez jedną osobę w tym samym czasie.
6. Ilość czasu na wykonanie zadania - ilość czasu przeznaczona na wykonanie zadania.
7. Pora dnia
8. Kwalifikacje i doświadczenie - poziom i jakość wyszkolenia pracownika, doświadczenie zawodowe.
9. Współpraca zespołu - uwzględnia oficjalne i nieoficjalne zależności, poziom zaufania oraz ogólne stosunki społeczne pomiędzy współpracownikami.

Etap 5 ankiety obejmuje pytania metryczkowe. Etap 6 ankiety obejmuje pytania mające na celu identyfikację ewentualnych obszarów w których można podjąć działania na rzecz zwiększenia niezawodności operatora.

*Serdecznie dziękujemy za poświęcony czas.*

#### Etap 1. Ocena niezawodności operatora w podsystemie ujmowania wody

*Ocena obejmuje wszystkie zagadnienia związane z pracą ujęcia (np. sterowanie pracą ujęcia, włączanie/wyłączanie z eksploatacji itd.)*

<p>1. Organizacja pracy</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5 6 7 8 9 10</p> <p>nieodpowiednia <span style="float: right;">odpowiednia</span></p> <p>2. Warunki pracy</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5 6 7 8 9 10</p> <p>nieodpowiednie <span style="float: right;">odpowiednie</span></p> <p>3. Jakość interfejsu SCADA</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5 6 7 8 9 10</p> <p>nieodpowiednia <span style="float: right;">odpowiednia</span></p> <p>4. Dostępność procedur/planów</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5 6 7 8 9 10</p> <p>nieodpowiednia <span style="float: right;">odpowiednia</span></p> <p>5. Liczba jednocześnie wykonywanych zadań</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5 6 7 8 9 10</p> <p>nieodpowiednia <span style="float: right;">akceptowalna</span></p>	<p>6. Ilość czasu na wykonanie zadania</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5 6 7 8 9 10</p> <p>nieodpowiednia <span style="float: right;">odpowiednia</span></p> <p>7. Pora dnia</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5 6 7 8 9 10</p> <p>nieodpowiednia <span style="float: right;">akceptowalna</span></p> <p>8. Kwalifikacje i doświadczenie</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5 6 7 8 9 10</p> <p>nieodpowiednie <span style="float: right;">odpowiednie</span></p> <p>9. Współpraca zespołu</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5 6 7 8 9 10</p> <p>nieodpowiednia <span style="float: right;">odpowiednia</span></p>
---	---

## Etap 2. Ocena niezawodności operatora w podsystemie uzdatniania wody

*Ocena obejmuje wszystkie zagadnienia związane z realizacją danego procesu (np. filtracja + płukanie filtrów, wymiana złoża itd.). Jeżeli dany proces nie jest wykorzystywany w państwa ciągu technologicznym należy go pominąć.*

*Proces: utlenianie/ozonowanie wstępne/pośrednie*

### 1. Organizacja pracy

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

### 2. Warunki pracy

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednie							odpowiednie		

### 3. Jakość interfejsu SCADA

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

### 4. Dostępność procedur/planów

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

### 5. Liczba jednocześnie wykonywanych zadań

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							akceptowalna		

### 6. Ilość czasu na wykonanie zadania

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

### 7. Pora dnia

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							akceptowalna		

### 8. Kwalifikacje i doświadczenie

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednie							odpowiednie		

### 9. Współpraca zespołu

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

*Proces: napowietrzanie*

### 1. Organizacja pracy

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

### 2. Warunki pracy

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednie							odpowiednie		

### 3. Jakość interfejsu SCADA

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

### 4. Dostępność procedur/planów

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

### 5. Liczba jednocześnie wykonywanych zadań

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							akceptowalna		

### 6. Ilość czasu na wykonanie zadania

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

### 7. Pora dnia

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							akceptowalna		

### 8. Kwalifikacje i doświadczenie

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednie							odpowiednie		

### 9. Współpraca zespołu

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

*Proces: koagulacja*

## 1. Organizacja pracy

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

## 2. Warunki pracy

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednie							odpowiednie		

## 3. Jakość interfejsu SCADA

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

## 4. Dostępność procedur/planów

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

## 5. Liczba jednocześnie wykonywanych zadań

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							akceptowalna		

## 6. Ilość czasu na wykonanie zadania

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

## 7. Pora dnia

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							akceptowalna		

## 8. Kwalifikacje i doświadczenie

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednie							odpowiednie		

## 9. Współpraca zespołu

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

*Proces: filtracja*

## 1. Organizacja pracy

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

## 2. Warunki pracy

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednie							odpowiednie		

## 3. Jakość interfejsu SCADA

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

## 4. Dostępność procedur/planów

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

## 5. Liczba jednocześnie wykonywanych zadań

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							akceptowalna		

## 6. Ilość czasu na wykonanie zadania

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

## 7. Pora dnia

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							akceptowalna		

## 8. Kwalifikacje i doświadczenie

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednie							odpowiednie		

## 9. Współpraca zespołu

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

*Proces: dezynfekcja*

## 1. Organizacja pracy

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

## 2. Warunki pracy

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednie							odpowiednie		

## 3. Jakość interfejsu SCADA

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

## 4. Dostępność procedur/planów

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

## 5. Liczba jednocześnie wykonywanych zadań

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							akceptowalna		

## 6. Ilość czasu na wykonanie zadania

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

## 7. Pora dnia

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							akceptowalna		

## 8. Kwalifikacje i doświadczenie

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednie							odpowiednie		

## 9. Współpraca zespołu

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nieodpowiednia							odpowiednia		

### **Etap 3. Ocena niezawodności operatora w podsystemie pompowania wody**

*Ocena obejmuje wszystkie zagadnienia związane ze sterowaniem pompowniami I i II stopnia ( np. zmiana parametrów pracy pomp, włączenie/wyłączenie z eksploatacji itd.)*

1. Organizacja pracy	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	6. Ilość czasu na wykonanie zadania	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
nieodpowiednia	odpowiednia	nieodpowiednia	odpowiednia
2. Warunki pracy	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	7. Pora dnia	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
nieodpowiednie	odpowiednie	nieodpowiednia	akceptowalna
3. Jakość interfejsu SCADA	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	8. Kwalifikacje i doświadczenie	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
nieodpowiednia	odpowiednia	nieodpowiednie	odpowiednie
4. Dostępność procedur/planów	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	9. Współpraca zespołu	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
nieodpowiednia	odpowiednia	nieodpowiednia	odpowiednia
5. Liczba jednocześnie wykonywanych zadań	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10		
nieodpowiednia	akceptowalna		

### **Etap 4. Ocena niezawodności operatora w podsystemie magazynowania wody**

*Ocena obejmuje wszystkie zagadnienia związane z eksploatacją zbiorników (np. napełnianie/opróznianie zbiorników, czyszczenie itd.)*

1. Organizacja pracy	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	6. Ilość czasu na wykonanie zadania	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
nieodpowiednia	odpowiednia	nieodpowiednia	odpowiednia
2. Warunki pracy	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	7. Pora dnia	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
nieodpowiednie	odpowiednie	nieodpowiednia	akceptowalna
3. Jakość interfejsu SCADA	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	8. Kwalifikacje i doświadczenie	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
nieodpowiednia	odpowiednia	nieodpowiednie	odpowiednie
4. Dostępność procedur/planów	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	9. Współpraca zespołu	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
nieodpowiednia	odpowiednia	nieodpowiednia	odpowiednia
5. Liczba jednocześnie wykonywanych zadań	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10		
nieodpowiednia	akceptowalna		

**Etap 5. Metryczka**

1. Płeć kobieta / mężczyzna	4. Doświadczenie zawodowe 1-2 lata; 3-5 lat; 6 i więcej lat
2. Wiek 18-35; 36-49; 50-64; 65+	5. Wielkość obsługiwanego SZZW (liczba odbiorców wody)
3. Wykształcenie podstawowe/zasadnicze zawodowe/średnie/wyższe (lic., inż.)/wyższe (mgr, mgr inż.)	< 5000; 5001-10000; 10001-25000; 25001 – 50000; 50001 – 100000; 100001-200000; powyżej 200000

**Etap 6. Informacje dodatkowe**

1. Czy uważasz, że organizacja pracy w przedsiębiorstwie jest odpowiednia (podział zadań między poszczególne działy, pracowników itp.) tak/nie/nie mam zdania	6. Kiedy odbyło się ostatnie szkolenie z zakresu czynności operatorskich (obsługa urządzeń na SUW, obsługa oprogramowania SCADA, GIS itd.) nigdy/> 5 lat temu/3-4 lata temu/1-2 lata temu/ w ciągu ostatnich 12 miesięcy
2. Czy twoje stanowisko pracy jest przystosowane do wykonywania powierzonych zadań (np. posiada odpowiednie oświetlenie, ergonomiczne biurko, odpowiednia wielkość ekranów itd.) tak/nie/nie mam zdania	7. Czy w pracy panuje koleżeńska atmosfera między współpracownikami? tak/nie/nie mam zdania
3. Czy interfejs oprogramowania monitorująco-sterującego jest wygodny w użytkowaniu (łatwość obsługi aplikacji, widoczność alertów, dostęp on-line do wskazań czujników itd.) tak/nie/nie mam zdania	8. Jakim twoim zdaniem można podjąć kroki w celu usprawnienia pracy na stanowisku operatora (można wybrać więcej niż 1 odpowiedź) zwiększenie ilości pracowników na zmianie/ zwiększenie ergonomii stanowiska pracy (np. zmiana oświetlenia, ograniczenie hałasu itp.)/ zmiana interfejsu oprogramowania sterującego ( np. rozbudowa systemu monitoringu sieci wodociągowej, wprowadzenie interfejsu graficznego w systemie SCADA)/ opracowanie procedur dla poszczególnych czynności operatorskich/ zmiana godzin pracy/ podnoszenie kwalifikacji pracowników przez udział w konferencjach, sympozjach itd./ zwiększyć częstotliwość szkoleń (np. obsługa oprogramowania SCADA, GIS itd.)/ organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników
4. Czy istnieją i są dostępne procedury dla czynności operatorskich (np. instrukcja obsługi urządzeń uzdatniania wody, instrukcja sterowania pompami itd.) tak/nie/nie mam zdania	
5. Czy podczas wykonywania czynności operatorskich odczuwasz presję czasu lub liczba zadań do wykonania jednocześnie jest zbyt duża ? tak/nie/nie mam zdania	



**Załącznik nr 2. Wyniki ankiet****Tabela Z1.** Wyniki ankiet operatorów O1 - O20

Operator	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10	O11	O12	O13	O14	O15	O16	O17	O18	O19	O20	
Ocena niezawodności w PsUjW	Pytanie 1	5	5	6	4	8	8	3	4	8	8	4	3	6	6	5	3	8	7	5	7
	Pytanie 2	6	2	9	9	5	5	3	5	10	8	5	8	9	7	5	4	9	9	2	9
	Pytanie 3	6	3	8	7	5	5	4	6	6	7	5	5	7	7	6	1	8	10	3	8
	Pytanie 4	4	2	8	3	5	5	4	4	9	8	5	6	7	6	6	2	9	4	2	8
	Pytanie 5	6	2	8	2	5	5	5	7	5	7	5	4	8	7	5	5	8	9	2	6
	Pytanie 6	5	3	9	4	5	5	4	4	7	8	5	7	8	7	5	5	8	10	3	10
	Pytanie 7	5	5	9	6	6	6	4	6	6	5	5	3	7	6	7	5	9	7	5	6
	Pytanie 8	7	1	8	1	6	6	4	7	8	8	5	5	7	7	7	7	9	5	1	8
	Pytanie 9	6	5	8	7	5	5	6	4	5	8	5	7	8	7	7	6	9	3	5	8
Ocena niezawodności w PsUzW-UW	Pytanie 1	5	3	8	5	6	6	4	4	8	8	5	4	6	6	5	4	9	4	4	7
	Pytanie 2	6	2	8	5	5	5	6	4	8	8	6	8	9	6	5	3	9	10	4	8
	Pytanie 3	5	4	8	5	7	5	6	5	9	7	5	6	7	7	7	2	9	10	5	8
	Pytanie 4	5	4	7	2	6	6	5	5	5	7	6	3	6	7	6	3	9	3	2	8
	Pytanie 5	6	5	6	2	5	5	6	6	7	7	5	6	7	7	5	5	8	9	3	5
	Pytanie 6	6	5	8	4	5	6	6	6	7	8	6	9	8	7	7	5	9	9	3	10
	Pytanie 7	5	5	6	5	5	6	5	6	5	8	5	7	8	7	7	5	9	7	6	6
	Pytanie 8	7	5	7	2	6	5	5	5	9	8	4	6	7	7	7	7	8	5	2	8
	Pytanie 9	6	5	7	4	6	4	5	5	8	8	5	8	7	7	7	6	8	2	5	8
Ocena niezawodności w PsUzW-N	Pytanie 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pytanie 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pytanie 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pytanie 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pytanie 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pytanie 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pytanie 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pytanie 8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pytanie 9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ocena niezawodności w PsUzW-K	Pytanie 1	5	4	6	3	4	6	6	5	8	8	5	3	6	6	5	4	10	7	3	8
	Pytanie 2	6	4	7	4	9	5	6	6	6	8	5	8	8	6	5	3	9	9	4	8
	Pytanie 3	5	5	7	6	7	7	5	5	5	8	5	7	7	7	6	1	9	10	6	8
	Pytanie 4	5	2	7	2	3	6	5	6	8	7	5	4	6	7	6	3	9	4	2	8
	Pytanie 5	6	3	7	2	2	5	5	5	8	8	5	7	8	5	7	5	9	8	2	6
	Pytanie 6	5	3	8	4	4	5	4	6	8	8	5	8	8	6	7	5	10	8	4	10
	Pytanie 7	5	6	7	5	6	5	6	5	5	8	6	7	8	6	7	6	9	6	5	6
	Pytanie 8	7	2	6	2	1	6	5	4	9	7	6	7	7	7	7	7	9	4	2	8
	Pytanie 9	6	5	7	3	7	6	4	5	8	7	6	8	8	7	7	6	8	4	3	7

Tabela Z2. Wyniki ankiet operatorów O1 - O20

Operator	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10	O11	O12	O13	O14	O15	O16	O17	O18	O19	O20	
Ocena niezawodności w PsUZW-FPW	Pytanie 1	5	5	6	5	8	5	5	5	8	8	5	5	8	6	6	3	8	6	3	8
	Pytanie 2	6	5	6	2	5	5	5	6	8	8	6	9	8	6	5	4	9	10	4	8
	Pytanie 3	5	5	7	3	5	6	6	6	9	7	5	6	7	6	6	2	8	10	6	8
	Pytanie 4	5	2	8	2	5	7	5	5	8	7	6	4	6	7	7	3	10	4	2	8
	Pytanie 5	6	2	7	2	5	6	5	6	7	8	5	7	8	6	7	5	9	7	2	5
	Pytanie 6	6	4	8	3	5	5	5	5	8	8	6	8	9	6	7	5	9	8	4	10
	Pytanie 7	5	5	7	5	6	4	5	5	5	6	5	7	8	6	7	6	9	6	5	6
	Pytanie 8	7	2	7	1	6	6	6	5	9	8	4	7	8	7	7	7	9	5	2	8
	Pytanie 9	6	4	7	5	5	6	5	6	9	8	5	8	8	6	7	6	8	4	3	7
Ocena niezawodności w PsUZW-FPD	Pytanie 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pytanie 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pytanie 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pytanie 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pytanie 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pytanie 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pytanie 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pytanie 8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pytanie 9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ocena niezawodności w PsUZW-D	Pytanie 1	5	5	7	4	8	7	5	5	8	8	5	8	7	6	5	3	9	6	5	8
	Pytanie 2	6	5	7	4	5	7	5	5	6	7	5	8	8	6	5	4	10	8	5	8
	Pytanie 3	5	5	7	5	5	6	5	5	9	8	5	7	8	7	6	3	9	7	5	8
	Pytanie 4	6	2	7	2	5	6	5	5	8	8	5	6	7	7	6	4	9	6	2	8
	Pytanie 5	5	2	7	3	5	7	5	5	8	7	5	8	9	7	7	5	9	8	2	6
	Pytanie 6	5	4	8	3	5	7	5	5	8	7	5	8	9	7	7	6	10	7	4	10
	Pytanie 7	9	5	7	6	6	7	5	6	7	5	6	7	8	6	7	6	9	5	5	6
	Pytanie 8	7	2	7	2	6	7	5	6	8	8	6	8	7	7	7	7	8	5	2	8
	Pytanie 9	6	4	7	5	5	7	6	6	8	8	6	8	8	7	7	6	8	4	4	7
Ocena niezawodności w PsPoW	Pytanie 1	6	5	7	3	6	6	6	4	8	8	5	8	5	7	5	3	0	7	3	8
	Pytanie 2	5	2	7	3	6	6	5	5	7	8	5	8	8	6	6	3	8	10	4	8
	Pytanie 3	5	3	7	2	6	6	5	5	8	8	4	7	6	6	5	2	8	10	4	8
	Pytanie 4	5	2	7	2	6	6	6	5	8	7	4	6	6	7	5	2	9	7	2	8
	Pytanie 5	6	2	7	3	6	6	5	5	7	7	7	8	8	6	6	5	9	8	5	6
	Pytanie 6	6	3	7	3	6	6	6	5	8	8	4	9	8	6	7	5	9	8	4	10
	Pytanie 7	5	5	7	5	6	6	5	5	6	5	5	7	8	5	7	5	9	7	5	6
	Pytanie 8	7	1	7	2	6	6	7	5	8	8	6	8	8	6	7	7	8	6	2	8
	Pytanie 9	6	5	7	5	5	5	6	5	9	8	7	8	8	7	7	6	8	3	3	7
Ocena niezawodności w PsMaW	Pytanie 1	5	3	7	3	5	6	5	5	8	8	4	8	7	6	5	3	8	5	3	8
	Pytanie 2	5	4	7	4	5	6	6	5	8	8	5	8	8	6	5	3	8	6	4	8
	Pytanie 3	6	4	7	4	6	5	5	4	9	7	5	7	7	6	6	2	8	9	4	8
	Pytanie 4	6	2	7	2	7	5	5	4	9	7	5	6	7	6	6	4	9	6	2	8
	Pytanie 5	5	5	7	5	6	5	6	7	9	8	5	8	8	6	7	5	9	6	5	6
	Pytanie 6	6	4	7	4	5	7	5	4	7	7	5	9	9	7	7	5	9	8	4	10
	Pytanie 7	6	5	7	5	4	5	6	5	5	5	5	6	8	7	7	5	9	6	5	6
	Pytanie 8	7	2	7	2	6	8	6	6	9	8	5	8	7	6	7	7	9	4	2	8
	Pytanie 9	6	3	7	3	6	6	6	7	9	8	5	8	7	7	7	6	7	3	3	7



Tabela Z3. Wyniki ankiet operatorów O1 - O20

Operator	Informacje dodatkowe							Metryczka						
	Pytanie 7	Pytanie 6	Pytanie 5	Pytanie 4	Pytanie 3	Pytanie 2	Pytanie 1	Wlk. obsl. SZZW	Dośw. zawodowe	Wykształcenie	Wiek	Płeć		
O1	Tak	3-4 lata temu	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	3-5 lat	wyższe (lic., inż.)	50-64	mężczyzna		
O2	Nie mam zdania	> 5 lat temu	Tak	Nie	Nie mam zdania	Nie	Nie	25 001 - 50 000	1-2 lata	zawodowe	50-64	mężczyzna		
O3	Tak	w ciągu ostatnich 12 miesięcy	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	25 001 - 50 000	6 i więcej lat	wyższe (lic., inż.)	36-49	mężczyzna		
O4	Nie mam zdania	> 5 lat temu	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	25 001 - 50 000	3-5 lat	zawodowe	50-64	mężczyzna		
O5	Tak	1-2 lata temu	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	10 001 - 25 000	3-5 lat	wyższe (mgr, mgr inż.)	50-64	kobieta		
O6	Tak	w ciągu ostatnich 12 miesięcy	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	10 001 - 25 000	6 i więcej lat	zawodowe	50-64	mężczyzna		
O7	Nie mam zdania	Nigdy	Nie	Tak	Tak	Tak	Nie	10 001 - 25 000	1-2 lata	zawodowe	50-64	mężczyzna		
O8	Tak	> 5 lat temu	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	5001 - 10 000	3-5 lat	średnie	36-49	mężczyzna		
O9	Tak	3-4 lata temu	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	25 001 - 50 000	6 i więcej lat	średnie	36-49	mężczyzna		
O10	Tak	1-2 lata temu	Tak	Tak	Tak	Tak	Nie mam zdania	5001 - 10 000	6 i więcej lat	wyższe (mgr, mgr inż.)	36-49	mężczyzna		
O11	Tak		Nie mam zdania	Tak	Tak	Tak	Nie	100 000 - 200 000	1-2 lata	zawodowe	36-49	mężczyzna		
O12	Tak	w ciągu ostatnich 12 miesięcy	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	25 001 - 50 000	6 i więcej lat	średnie	36-49	mężczyzna		
O13	Tak	w ciągu ostatnich 12 miesięcy	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	25 001 - 50 000	6 i więcej lat	średnie	36-49	mężczyzna		
O14	Tak	1-2 lata temu	Tak	Tak	Tak	Tak	Nie	25 001 - 50 000	6 i więcej lat	zawodowe	50-64	mężczyzna		
O15	Tak	w ciągu ostatnich 12 miesięcy		Tak	Tak	Tak	Tak	100 000 - 200 000	1-2 lata	wyższe (lic., inż.)	18-35	mężczyzna		
O16	Tak	1-2 lata temu	Tak	Tak	Tak	Tak	Nie	5001 - 10 000	3-5 lat	zawodowe	50-64	kobieta		
O17	Nie mam zdania	1-2 lata temu	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	100 000 - 200 000	6 i więcej lat	wyższe (mgr, mgr inż.)	36-49	mężczyzna		
O18	Tak	1-2 lata temu	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	25 001 - 50 000	6 i więcej lat	średnie	50-64	mężczyzna		
O19	Nie mam zdania	> 5 lat temu	Nie	Nie wiem	Nie mam zdania	Tak	Nie	10 001 - 25 000	1-2 lata	zawodowe	36-49	mężczyzna		
O20	Tak	3-4 lata temu	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	100 000 - 200 000	3-5 lat	średnie	36-49	mężczyzna		

Tabela Z4. Wyniki ankiet operatorów O1 - O20

Operator	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10	O11	O12	O13	O14	O15	O16	O17	O18	O19	O20
Informacje dodatkowe																				
	Pytanie 8																			
	zwiększenie ilości pracowników na zmianie, podnoszenie kwalifikacji pracowników przez udział w konferencjach, sympozjach itd., organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników																			
	zwiększenie ilości pracowników na zmianie, opracowanie procedur dla poszczególnych czynności operatorskich, podnoszenie kwalifikacji pracowników przez udział w konferencjach, sympozjach itd., zwiększyć częstotliwość szkoleń (np. obsługa oprogramowania SCADA, GIS itd.)																			
	zwiększenie ergonomii stanowiska pracy (np. zmiana oświetlenia, ograniczenie hałasu itp.), zmiana interfejsu oprogramowania sterującego ( np. rozbudowa systemu monitoringu sieci wodociągowej, wprowadzenie interfejsu graficznego w systemie SCADA), opracowanie procedur dla poszczególnych czynności operatorskich																			
	zwiększyć częstotliwość szkoleń (np. obsługa oprogramowania SCADA, GIS itd.)																			
	zmiana interfejsu oprogramowania sterującego ( np. rozbudowa systemu monitoringu sieci wodociągowej, wprowadzenie interfejsu graficznego w systemie SCADA)																			
	zwiększenie ilości pracowników na zmianie, zwiększenie ergonomii stanowiska pracy (np. zmiana oświetlenia, ograniczenie hałasu itp.)																			
	podnoszenie kwalifikacji pracowników przez udział w konferencjach, sympozjach itd., zwiększyć częstotliwość szkoleń (np. obsługa oprogramowania SCADA, GIS itd.), organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników																			
	zwiększenie ilości pracowników na zmianie																			
	zwiększyć częstotliwość szkoleń (np. obsługa oprogramowania SCADA, GIS itd.)																			
	zwiększenie ilości pracowników na zmianie, zmiana interfejsu oprogramowania sterującego ( np. rozbudowa systemu monitoringu sieci wodociągowej, wprowadzenie interfejsu graficznego w systemie SCADA), opracowanie procedur dla poszczególnych czynności operatorskich, zwiększyć częstotliwość szkoleń (np. obsługa oprogramowania SCADA, GIS itd.), organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników																			
	zwiększenie ilości pracowników na zmianie, zmiana interfejsu oprogramowania sterującego ( np. rozbudowa systemu monitoringu sieci wodociągowej, wprowadzenie interfejsu graficznego w systemie SCADA), zwiększyć częstotliwość szkoleń (np. obsługa oprogramowania SCADA, GIS itd.)																			
	zwiększenie ilości pracowników na zmianie, opracowanie procedur dla poszczególnych czynności operatorskich, podnoszenie kwalifikacji pracowników przez udział w konferencjach, sympozjach itd., organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników																			
	zwiększenie ilości pracowników na zmianie, podnoszenie kwalifikacji pracowników przez udział w konferencjach, sympozjach itd., organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników																			
	zwiększenie ilości pracowników na zmianie, organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników																			
	zwiększenie ilości pracowników na zmianie																			
	zwiększenie ilości pracowników na zmianie, podnoszenie kwalifikacji pracowników przez udział w konferencjach, sympozjach itd., zwiększyć częstotliwość szkoleń (np. obsługa oprogramowania SCADA, GIS itd.), organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników																			
	zwiększenie ilości pracowników na zmianie, zmiana interfejsu oprogramowania sterującego ( np. rozbudowa systemu monitoringu sieci wodociągowej, wprowadzenie interfejsu graficznego w systemie SCADA), opracowanie procedur dla poszczególnych czynności operatorskich, podnoszenie kwalifikacji pracowników przez udział w konferencjach, sympozjach itd., zwiększyć częstotliwość szkoleń (np. obsługa oprogramowania SCADA, GIS itd.), organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników																			
	zmiana interfejsu oprogramowania sterującego ( np. rozbudowa systemu monitoringu sieci wodociągowej, wprowadzenie interfejsu graficznego w systemie SCADA), podnoszenie kwalifikacji pracowników przez udział w konferencjach, sympozjach itd., organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników																			
	zwiększenie ilości pracowników na zmianie, zmiana interfejsu oprogramowania sterującego ( np. rozbudowa systemu monitoringu sieci wodociągowej, wprowadzenie interfejsu graficznego w systemie SCADA), organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników																			
	zwiększenie ilości pracowników na zmianie, organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników																			

Tabela Z5. Wyniki ankiet operatorów O21 - O42

Operator		O21	O22	O23	O24	O25	O26	O27	O28	O29	O30	O31	O32	O33	O34	O35	O36	O37	O38	O39	O40	O41	O42
Ocena niezawodności w PsUJW	Pytanie 1	3	2	5	8	7	7	7	9	9	7	6	5	7	5	9	8	7	7	8	9	8	5
	Pytanie 2	5	3	2	7	6	10	10	8	8	6	7	6	6	4	8	8	7	8	9	8	9	7
	Pytanie 3	4	3	2	8	8	3	10	6	4	7	6	7	7	5	6	4	6	6	9	8	9	6
	Pytanie 4	4	4	2	10	7	5	7	7	4	7	6	6	8	4	6	4	7	8	5	9	7	7
	Pytanie 5	5	5	5	10	8	5	8	7	9	6	7	7	9	6	8	9	8	7	10	1	6	5
	Pytanie 6	5	5	5	5	10	10	8	9	9	7	7	8	8	7	9	9	8	7	9	1	6	8
	Pytanie 7	5	5	5	8	8	5	7	6	5	8	7	7	8	7	8	5	8	8	10	5	10	7
	Pytanie 8	6	5	6	10	10	5	6	10	9	7	7	6	8	7	9	9	8	8	8	9	8	7
	Pytanie 9	7	5	6	9	10	8	3	9	10	7	8	7	7	7	9	9	7	7	8	8	6	8
Ocena niezawodności w PsUzW-UW	Pytanie 1	4	3	5	7	7	5	6	-	-	7	7	6	8	4	-	-	8	8	-	-	-	-
	Pytanie 2	5	2	3	7	8	6	8	-	-	8	6	6	8	5	-	-	8	7	-	-	-	-
	Pytanie 3	5	4	3	8	9	5	7	-	-	5	6	7	7	4	-	-	8	8	-	-	-	-
	Pytanie 4	5	4	3	10	10	6	6	-	-	7	7	6	6	5	-	-	7	8	-	-	-	-
	Pytanie 5	5	5	5	8	8	6	8	-	-	8	7	7	8	6	-	-	6	8	-	-	-	-
	Pytanie 6	5	5	5	7	8	10	7	-	-	8	7	7	7	5	-	-	9	6	-	-	-	-
	Pytanie 7	5	5	5	8	8	7	5	-	-	6	7	8	7	6	-	-	7	8	-	-	-	-
	Pytanie 8	6	5	5	10	10	6	5	-	-	7	7	8	8	7	-	-	7	8	-	-	-	-
	Pytanie 9	7	5	5	8	10	7	4	-	-	8	8	7	7	7	-	-	7	8	-	-	-	-
Ocena niezawodności w PsUzW-N	Pytanie 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	9	10	8
	Pytanie 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	9	9	8
	Pytanie 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	9	9	8
	Pytanie 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	9	7	7
	Pytanie 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	5	8	8
	Pytanie 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	5	10	8
	Pytanie 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	5	10	10
	Pytanie 8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	9	8	8
	Pytanie 9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	8	8	9
Ocena niezawodności w PsUzW-K	Pytanie 1	4	3	4	8	7	7	4	9	9	7	7	6	8	5	9	9	8	9	-	-	-	-
	Pytanie 2	5	4	3	8	8	6	10	8	8	8	6	6	8	4	8	6	8	7	-	-	-	-
	Pytanie 3	5	3	3	9	8	7	10	6	7	6	7	6	7	5	7	4	8	7	-	-	-	-
	Pytanie 4	5	3	3	10	10	6	3	7	7	7	7	5	8	5	6	4	8	8	-	-	-	-
	Pytanie 5	5	5	5	5	10	6	9	9	9	9	7	7	7	6	6	9	9	7	8	-	-	-
	Pytanie 6	5	5	5	5	9	10	9	9	9	8	7	6	7	7	8	9	7	7	-	-	-	-
	Pytanie 7	5	5	5	7	8	7	7	8	6	7	8	7	7	6	6	5	7	7	-	-	-	-
	Pytanie 8	6	5	5	10	10	7	5	9	9	7	7	8	8	7	9	9	9	7	-	-	-	-
	Pytanie 9	7	5	5	8	10	6	2	9	10	8	8	7	7	7	9	9	8	8	-	-	-	-

Tabela Z6. Wyniki ankiet operatorów O21 - O42

Operator		O21	O22	O23	O24	O25	O26	O27	O28	O29	O30	O31	O32	O33	O34	O35	O36	O37	O38	O39	O40	O41	O42
Ocena niezawodności w PsUzW-FPW	Pytanie 1	4	4	4	8	7	6	7	9	9	7	6	6	7	7	9	9	8	6	-	-	-	-
	Pytanie 2	5	4	3	9	10	6	9	9	9	7	7	7	8	6	9	9	7	7	-	-	-	-
	Pytanie 3	5	3	2	8	3	7	10	7	4	6	6	6	8	5	9	4	7	7	-	-	-	-
	Pytanie 4	5	3	2	10	5	6	4	8	5	7	7	6	7	5	7	4	8	6	-	-	-	-
	Pytanie 5	5	5	5	5	5	7	8	8	9	7	6	7	7	6	8	9	7	7	-	-	-	-
	Pytanie 6	5	5	5	5	10	7	8	8	9	6	7	6	9	7	9	9	8	8	-	-	-	-
	Pytanie 7	5	5	5	7	5	6	6	5	4	8	8	7	8	7	6	4	7	7	-	-	-	-
	Pytanie 8	6	5	5	10	5	6	4	9	9	7	7	8	8	7	9	9	8	7	-	-	-	-
	Pytanie 9	7	5	5	8	8	6	4	9	10	8	8	7	7	7	9	9	8	8	-	-	-	-
Ocena niezawodności w PsUzW-FPD	Pytanie 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	8	10	9
	Pytanie 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	8	10	9
	Pytanie 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	7	9	8
	Pytanie 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	9	7	7
	Pytanie 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	1	9	8
	Pytanie 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	1	9	8
	Pytanie 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	5	10	8
	Pytanie 8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	9	6	8
	Pytanie 9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	6	8	8
Ocena niezawodności w PsUzW-D	Pytanie 1	4	3	4	9	7	6	7	9	9	7	6	7	7	5	9	9	7	8	9	8	9	8
	Pytanie 2	5	3	2	7	6	6	9	9	6	7	7	8	8	4	9	6	8	7	10	1	7	6
	Pytanie 3	5	3	3	8	7	6	10	7	8	6	6	7	7	5	7	4	7	7	9	1	8	6
	Pytanie 4	5	4	3	10	6	6	4	8	7	7	7	7	7	6	7	4	7	6	6	5	6	3
	Pytanie 5	5	5	5	5	6	6	8	9	9	7	7	9	8	5	9	8	7	7	10	1	6	3
	Pytanie 6	5	5	5	5	10	7	8	7	9	7	6	8	8	6	9	9	7	8	10	1	8	7
	Pytanie 7	5	5	5	7	7	6	6	8	9	7	7	8	7	7	6	5	8	7	10	5	10	8
	Pytanie 8	6	5	5	10	7	6	4	9	9	7	7	8	8	7	9	9	7	7	8	9	6	7
	Pytanie 9	7	5	5	9	6	6	4	9	10	8	8	7	7	7	9	9	8	8	8	9	8	8
Ocena niezawodności w PsPoW	Pytanie 1	4	4	3	8	6	6	7	9	9	6	7	7	8	3	8	9	8	9	8	9	9	9
	Pytanie 2	4	4	4	8	6	7	9	8	9	6	6	6	7	4	8	8	8	9	9	3	10	8
	Pytanie 3	4	4	3	8	6	5	10	6	7	7	6	6	8	4	8	4	7	7	10	4	10	8
	Pytanie 4	3	3	3	10	6	7	4	7	6	7	7	7	9	5	6	5	8	7	7	7	8	7
	Pytanie 5	5	5	5	10	6	7	9	8	9	7	6	6	8	6	8	8	7	7	8	1	8	7
	Pytanie 6	4	5	5	5	7	5	10	8	9	8	7	7	9	7	9	9	6	9	10	1	8	7
	Pytanie 7	5	5	5	7	6	6	7	5	6	8	7	6	10	7	6	5	8	8	10	5	10	9
	Pytanie 8	6	5	5	10	6	6	5	9	9	7	7	6	8	7	9	9	7	7	8	9	7	6
	Pytanie 9	7	5	5	10	6	6	3	9	10	8	8	7	7	7	9	9	8	8	8	9	7	8
Ocena niezawodności w PsMaW	Pytanie 1	3	4	3	10	6	6	7	9	9	6	7	7	8	4	9	9	6	8	8	9	9	8
	Pytanie 2	4	3	4	8	6	7	9	7	9	7	6	6	7	3	8	8	8	7	10	1	10	9
	Pytanie 3	2	4	4	8	7	5	10	6	6	6	6	6	7	3	7	3	7	7	10	1	10	9
	Pytanie 4	2	3	4	10	6	7	4	7	6	6	7	7	7	4	5	8	6	8	9	8	8	8
	Pytanie 5	5	5	5	8	7	5	9	9	9	7	6	6	8	5	6	9	9	6	9	1	9	9
	Pytanie 6	5	5	5	5	7	6	10	9	9	8	6	7	7	6	9	9	6	7	10	1	10	9
	Pytanie 7	5	5	5	7	6	6	7	5	6	8	8	8	8	6	6	5	9	8	10	5	10	9
	Pytanie 8	6	5	5	10	6	6	5	9	9	7	7	6	8	7	9	9	8	8	9	9	7	8
	Pytanie 9	7	5	5	9	6	6	3	9	10	8	8	7	7	7	9	9	8	8	9	9	9	8

Tabela Z7. Wyniki ankiet operatorów O21 - O42

Operator	Informacje dodatkowe							Metryczka						
	Pytanie 7	Pytanie 6	Pytanie 5	Pytanie 4	Pytanie 3	Pytanie 2	Pytanie 1	Wlk. obs. SZZW	Dośw. zawodowe	Wykształcenie	Wiek	Płeć		
O21	Nie mam zdania	> 5 lat temu	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	5001 - 10 000	1-2 lata	zawodowe	18-35	mężczyzna		
O22	Nie mam zdania	3-4 lata temu	Nie	Nie wiem	Nie mam zdania	Tak	Nie mam zdania	25 001 - 50 000	1-2 lata	średnie	36-49	mężczyzna		
O23	Tak	Nigdy	Nie	Tak	Nie mam zdania	Tak	Tak	10 001 - 25 000	1-2 lata	zawodowe	50-64	mężczyzna		
O24	Tak	Nigdy	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	25 001 - 50 000	6 i więcej lat	zawodowe	50-64	mężczyzna		
O25	Tak	Nigdy	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	25 001 - 50 000	6 i więcej lat	średnie	50-64	mężczyzna		
O26	Tak	Nigdy	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	25 001 - 50 000	1-2 lata	zawodowe	36-49	mężczyzna		
O27	Tak	Nigdy	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	25 001 - 50 000	3-5 lat	zawodowe	36-49	mężczyzna		
O28	Tak	Nigdy	Nie	Tak	Nie	Tak	Tak	100 000 - 200 000	6 i więcej lat	zawodowe	50-64	mężczyzna		
O29	Tak	Nigdy	Nie	Tak	Tak	Nie mam zdania	Tak	5001 - 10 000	6 i więcej lat	zawodowe	50-64	mężczyzna		
O30	Tak	1-2 lata temu	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	25 001 - 50 000	6 i więcej lat	zawodowe	50-64	mężczyzna		
O31	Tak	> 5 lat temu	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	100 000 - 200 000	6 i więcej lat	średnie	50-64	mężczyzna		
O32	Tak	Nigdy	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	25 001 - 50 000	6 i więcej lat	średnie	36-49	mężczyzna		
O33	Nie mam zdania	w ciągu ostatnich 12 miesięcy	Nie	Tak	Tak	Tak	Nie mam zdania	100 000 - 200 000	3-5 lat	średnie	18-35	mężczyzna		
O34	Tak	3-4 lata temu	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	5001 - 10 000	3-5 lat	wyższe (lic. inż.)	50-64	mężczyzna		
O35	Tak	Nigdy	Nie	Tak	Nie	Nie mam zdania	Tak	25 001 - 50 000	6 i więcej lat	zawodowe	50-64	mężczyzna		
O36		1-2 lata temu	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	100 000 - 200 000	6 i więcej lat	wyższe (lic. inż.)	36-49	mężczyzna		
O37	Tak	1-2 lata temu	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	25 001 - 50 000	6 i więcej lat	średnie	50-64	mężczyzna		
O38	Nie mam zdania	3-4 lata temu	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	100 000 - 200 000	6 i więcej lat	średnie	36-49	mężczyzna		
O39	Tak	> 5 lat temu	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak	25 001 - 50 000	3-5 lat	wyższe (mgr, mgr inż.)	18-35	mężczyzna		
O40	Tak	w ciągu ostatnich 12 miesięcy	Tak	Tak	Tak	Nie	Nie	25 001 - 50 000	6 i więcej lat	wyższe (mgr, mgr inż.)	50-64	kobieta		
O41	Tak	3-4 lata temu	Nie	Tak	Tak	Tak	Nie mam zdania	25 001 - 50 000	6 i więcej lat	zawodowe	50-64	mężczyzna		
O42	Tak	3-4 lata temu	Nie	Tak	Tak	Tak	Nie mam zdania	25 001 - 50 000	6 i więcej lat	średnie	50-64	mężczyzna		

Tabela Z8. Wyniki ankiet operatorów O21 - O42

Operator	Informacje dodatkowe
	Pytanie 8
O21	zwiększenie ilości pracowników na zmianie, zmiana interfejsu oprogramowania sterującego ( np. rozbudowa systemu monitoringu sieci wodociągowej, wprowadzenie interfejsu graficznego w systemie SCADA), podnoszenie kwalifikacji pracowników przez udział w konferencjach, sympozjach itd., zwiększyć częstotliwość szkoleń (np. obsługa oprogramowania SCADA, GIS itd.)
O22	zwiększenie ilości pracowników na zmianie, zmiana interfejsu oprogramowania sterującego ( np. rozbudowa systemu monitoringu sieci wodociągowej, wprowadzenie interfejsu graficznego w systemie SCADA), opracowanie procedur dla poszczególnych czynności operatorskich, organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników
O23	zwiększenie ergonomii stanowiska pracy (np. zmiana oświetlenia, ograniczenie hałasu itp.), zmiana interfejsu oprogramowania sterującego ( np. rozbudowa systemu monitoringu sieci wodociągowej, wprowadzenie interfejsu graficznego w systemie SCADA), opracowanie procedur dla poszczególnych czynności operatorskich, zwiększyć częstotliwość szkoleń (np. obsługa oprogramowania SCADA, GIS itd.)
O24	organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników
O25	organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników
O26	podnoszenie kwalifikacji pracowników przez udział w konferencjach, sympozjach itd.
O27	podnoszenie kwalifikacji pracowników przez udział w konferencjach, sympozjach itd.
O28	zmiana interfejsu oprogramowania sterującego ( np. rozbudowa systemu monitoringu sieci wodociągowej, wprowadzenie interfejsu graficznego w systemie SCADA)
O29	zwiększenie ergonomii stanowiska pracy (np. zmiana oświetlenia, ograniczenie hałasu itp.), zmiana interfejsu oprogramowania sterującego ( np. rozbudowa systemu monitoringu sieci wodociągowej, wprowadzenie interfejsu graficznego w systemie SCADA), opracowanie procedur dla poszczególnych czynności operatorskich
O30	podnoszenie kwalifikacji pracowników przez udział w konferencjach, sympozjach itd., zwiększyć częstotliwość szkoleń (np. obsługa oprogramowania SCADA, GIS itd.), organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników
O31	zmiana godzin pracy
O32	
O33	podnoszenie kwalifikacji pracowników przez udział w konferencjach, sympozjach itd., zwiększyć częstotliwość szkoleń (np. obsługa oprogramowania SCADA, GIS itd.)
O34	zwiększenie ilości pracowników na zmianie
O35	zmiana interfejsu oprogramowania sterującego ( np. rozbudowa systemu monitoringu sieci wodociągowej, wprowadzenie interfejsu graficznego w systemie SCADA), zwiększyć częstotliwość szkoleń (np. obsługa oprogramowania SCADA, GIS itd.)
O36	zwiększenie ilości pracowników na zmianie, podnoszenie kwalifikacji pracowników przez udział w konferencjach, sympozjach itd., organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników
O37	opracowanie procedur dla poszczególnych czynności operatorskich, zwiększyć częstotliwość szkoleń (np. obsługa oprogramowania SCADA, GIS itd.), organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników
O38	podnoszenie kwalifikacji pracowników przez udział w konferencjach, sympozjach itd., zwiększyć częstotliwość szkoleń (np. obsługa oprogramowania SCADA, GIS itd.), organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników
O39	zwiększenie ilości pracowników na zmianie, opracowanie procedur dla poszczególnych czynności operatorskich, podnoszenie kwalifikacji pracowników przez udział w konferencjach, sympozjach itd., zwiększyć częstotliwość szkoleń (np. obsługa oprogramowania SCADA, GIS itd.), organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników
O40	zwiększenie ilości pracowników na zmianie, zwiększenie ergonomii stanowiska pracy (np. zmiana oświetlenia, ograniczenie hałasu itp.)
O41	zwiększenie ilości pracowników na zmianie, opracowanie procedur dla poszczególnych czynności operatorskich, podnoszenie kwalifikacji pracowników przez udział w konferencjach, sympozjach itd., zwiększyć częstotliwość szkoleń (np. obsługa oprogramowania SCADA, GIS itd.), organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników
O42	zwiększenie ilości pracowników na zmianie, podnoszenie kwalifikacji pracowników przez udział w konferencjach, sympozjach itd., zwiększyć częstotliwość szkoleń (np. obsługa oprogramowania SCADA, GIS itd.), organizacja wyjazdów integracyjnych dla pracowników

## Streszczenie

Niniejsza rozprawa dotyczy problematyki analizy niezawodności operatora systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę (SZZW) oraz jego wpływu na niezawodność i bezpieczeństwo funkcjonowania SZZW, co wpisuje się w obecne trendy badawcze w obrębie tematyki związanej z sektorem zaopatrzenia w wody.

Na podstawie przeprowadzonej analizy dotychczasowego stanu wiedzy stwierdzono brak kompleksowych badań dotyczących oceny niezawodności operatora w SZZW w wodę oraz brak badań dotyczących wpływu czynnika ludzkiego na niezawodność i bezpieczeństwo funkcjonowania SZZW. Z tego względu w pracy podjęto próbę aplikacji metod wykorzystywanych w innych dziedzinach naukowych oraz opracowania nowych metod oceny niezawodności operatora oraz oceny niezawodności SZZW z uwzględnieniem wpływu czynnika ludzkiego opartych między innymi na metodzie FSAW, metodzie CREAM, teorii zbiorów rozmytych oraz sieci Bayesa.

Zgromadzone wyniki pracy pozwoliły na identyfikację najbardziej wrażliwego na oddziaływanie awarii związanych z działaniem operatora elementu SZZW, tj. podsystemu uzdatniania wody. Przeprowadzono ocenę niezawodności operatora w poszczególnych podsystemach SZZW w oparciu o wartość wskaźnika gotowości operatora. Określono wpływ wybranych czynników socjodemograficznych (tj. wiek, wykształcenie, doświadczenie zawodowe, wielkość obsługiwanego SZZW) na poziom niezawodności operatora. Przeprowadzono ocenę niezawodności podsystemu dostawy wody dla wybranego SZZW z uwzględnieniem wpływu czynnika ludzkiego. W dysertacji przedstawiono również możliwości zwiększenia poziomu niezawodności operatora w przedsiębiorstwach wodociągowych.

Podjęcie problemu badawczego pozwoliło na ocenę wpływu czynnika ludzkiego na niezawodność i bezpieczeństwo funkcjonowania SZZW oraz określenie nowych standardów niezawodnościowych dla operatorów SZZW. Przedstawiona rozprawa przyczyni się do rozwoju wiedzy w obszarze analizy niezawodności SZZW, będącego przykładem systemu antropotechnicznego.





## Abstract

This dissertation concerns the issues of the reliability analysis of the collective water supply system operator (CWSS) and impact of the human factor on the reliability and safety of the CWSS functioning. The presented research are in line with the current research trends in the area of water supply sector.

Based on the analysis of the current state of knowledge, it was found that there are no existing studies on the assessment of operator reliability in the collective water supply system and no studies on the impact of the human factor on the reliability and safety of CWSS functioning. For this reason, the study attempts to apply methods used in other scientific fields and to develop new methods for assessing CWSS operator reliability and assessing the reliability of CWSS, taking into account the impact of the human factor based on, among others, the FSAW method, the CREAM method, the fuzzy set theory and the Bayesian network.

The results of the work allowed to identify the most sensitive to the impact of human error element of the CWSS, i.e. the water treatment subsystem. The operator's reliability was assessed in individual CWSS subsystems based on the value of the operator reliability index. The influence of selected socio-demographic factors (age, education, professional experience, size of the CWSS) on the operator reliability level was determined. In order to use the results of the work in practice, the reliability of the water supply subsystem was assessed for the selected CWSS, taking into account the impact of the human factor. The dissertation also presents the possibilities of increasing the level of operator reliability in water supply companies.

Taking up the research problem allowed to learn about the impact of the human factor on the reliability and safety of CWSS functioning and to define reliability standards for CWSS operators. The presented dissertation will contribute to the development of knowledge in the area of reliability analysis of CWSS, which is an example of an anthropotechnical system.