

mł. bryg. dr inż. Norbert Tuśnio

Szkoła Główna Służby Pożarniczej

dr inż. Paweł Wolny

dr inż. Dorota Siuta

Politechnika Łódzka

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

DOI: 10.5604/01.3001.0014.3022

Programy komputerowe do wyznaczania prawdopodobieństwa oraz skutków poważnych awarii

Abstrakt

W artykule przedstawiono przegląd najbardziej popularnych i dostępnych w kraju programów komputerowych wspomagających wykonywanie poszczególnych etapów procesu analizy i oceny ryzyka dla zakładów dużego i zwiększonego ryzyka wystąpienia poważnej awarii przemysłowej. Szczególną uwagę skupiono na zaletach i wadach poszczególnych programów, biorąc po uwagę ich funkcjonalność, dostępność, łatwość użycia oraz wiarygodność i walidację uzyskiwanych wyników. Właściwy dobór programu (do określenia wartości zasięgu stref zagrożenia i konsekwencji, częstości wystąpienia skutków scenariuszy awaryjnych, wskaźnika ryzyka) pozwala zaprojektować adekwatne środki bezpieczeństwa i ochrony na wypadek wystąpienia takich zdarzeń niepożądanych. Ułatwia również przygotowanie map ryzyka oraz wewnętrznych i zewnętrznych planów operacyjno-ratowniczych.

Słowa kluczowe: analiza ryzyka, programy komputerowe, modelowanie skutków awarii

Przyjęty: 30.11.2019; Zrecenzowany: 03.04.2020; Zatwierdzony: 12.06.2020

Computer Programmes for Determining the Probability and Consequences of Major Accidents

Abstract

The article presents an overview of the most popular available computer programmes in Poland used to support the implementation of particular stages of the process of risk analysis

and assessment for lower or upper tier establishments. Particular attention was focused on the advantages and disadvantages of particular programmes, taking into account their functionality, availability, ease of use, as well as the reliability and validation of the results obtained. The appropriate selection of a program to determine the hazard zones, consequences, frequencies, and risk indicators of accident scenarios allows designing adequate safety and protection measures to be adopted in the event of occurrence of such undesired events. It also facilitates the preparation of risk maps as well as internal and external operation and emergency plans.

Keywords: risk analysis, computer programmes, physical effects and consequence modelling

Received: 30.11.2019; Reviewed: 03.04.2020; Accepted: 12.06.2020

Комп'ютерні програми для визначення ймовірності та наслідків великих аварій

Анотація

У статті представлено огляд найпопулярніших та доступних в країні комп'ютерних програм, що допомагають в реалізації окремих етапів процесу аналізу та оцінки ризику для підприємств з високим і підвищеним ризиком великої промислової аварії. Особливу увагу зосереджено на перевагах і вадах окремих програм, враховуючи їх функціональність, доступність, простоту використання, а також надійність та достовірність отриманих результатів. Відповідний вибір програми (для визначення ступеня зон загрози та наслідків, частоти виникнення наслідків аварійних сценаріїв, показника ризику) дозволяє розробити адекватні заходи безпеки та захисту у разі виникнення таких несприятливих ситуацій. Це також полегшує прототипування карт ризику, внутрішніх та зовнішніх операційно-рятувальних планів.

Ключові слова: аналіз ризику, комп'ютерні програми, моделювання наслідків аварій

Прийнятий: 30.11.2019; Рецензованої: 03.04.2020; Затверджений: 12.06.2020

1. Wprowadzenie

W celu przeciwdziałania skutkom poważnych awarii przemysłowych z mocy prawa muszą być opracowane wewnętrzne i zewnętrzne plany operacyjno-ratownicze. Podstawą do ich sporządzenia są wytyczne dyrektywy Seveso III Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/18/UE z 4 lipca 2012 r. w sprawie kontroli zagrożeń poważnymi awariami związanymi z substancjami niebezpiecznymi [1], które zostały ujęte w ustawie z 27 kwietnia 2001 r. *Prawo ochrony środowiska* (Dz.U. z 2018 r. poz. 799) i rozporządzeniach wykonawczych [2–7]. Ustawa *Prawo ochrony środowiska* zobowiązuje każdego, kto zamierza prowadzić lub prowadzi zakład przemysłowy (zakład zwiększonego ryzyka – ZZR lub zakład dużego ryzyka – ZDR), czyli taki, w którym stosowane są odpowiednie ilości i rodzaj substancji chemicznych lub ich mieszanin, do zapewnienia, aby zakład ten był zaprojektowany, wykonany, prowadzony i likwidowany w sposób zapobiegający awariom przemysłowym i ograniczający ich skutki dla ludzi i środowiska.

Prowadzący zakład ma wykazać, że właściwie zarządza ryzykiem procesowym. Zarządzanie ryzykiem rozumie się jako zespół działań organizacyjno-technicznych ukierunkowanych na systematyczną analizę, ocenę i kontrolę ryzyka w celu zapobiegania i ochrony przed skutkami poważnych awarii przemysłowych. Działania te mają dążyć do takiego doboru systemu zabezpieczeń, aby osiągnąć dopuszczalny poziom ryzyka.

Prowadzący zakład ZZR, ZDR musi zapewnić bezpieczeństwo pracowników, ludności, środowiska i majątku przed ewentualnymi skutkami tych awarii. Zobowiązany jest również do przeanalizowania możliwości wystąpienia awarii przemysłowej i podjęcia środków koniecznych do zapobieżenia jej. Taka analiza oparta jest o identyfikację zagrożeń, oszacowanie wielkości ryzyka poprzez określenie prawdopodobieństwa wystąpienia scenariusza awaryjnego oraz wielkości jego skutków. Wykonywanie analiz ryzyka jest możliwe poprzez zastosowanie odpowiednich metod oraz narzędzi. Stosowane są różne metody analizy i oceny ryzyka: ilościowe (np. ARAMIS), półilościowe (np. AWZ, ExSys-AWZ) oraz jakościowe (np. FMEA, PHA, HAZOP, What-If, drzewo błędów, drzewo zdarzeń, matryca ryzyka). Wybór metody uzależniony jest od wielu czynników: od dostępnych danych wejściowych do analizy, złożoności instalacji oraz czasu, jaki może zostać poświęcony na analizę. Przygotowanie analizy ryzyka przemysłowego jest działaniem eksperckim, wymagającym zebrania zespołu doświadczonych specjalistów z kilku branż, danych liczbowych, a jej wykonanie jest czasochłonne i obciążone szeregiem niepewności epistemicznych i stochastycznych, np. związanych z dostępnością danych niezawodnościowych, ich wiarygodnością. Po przeprowadzeniu

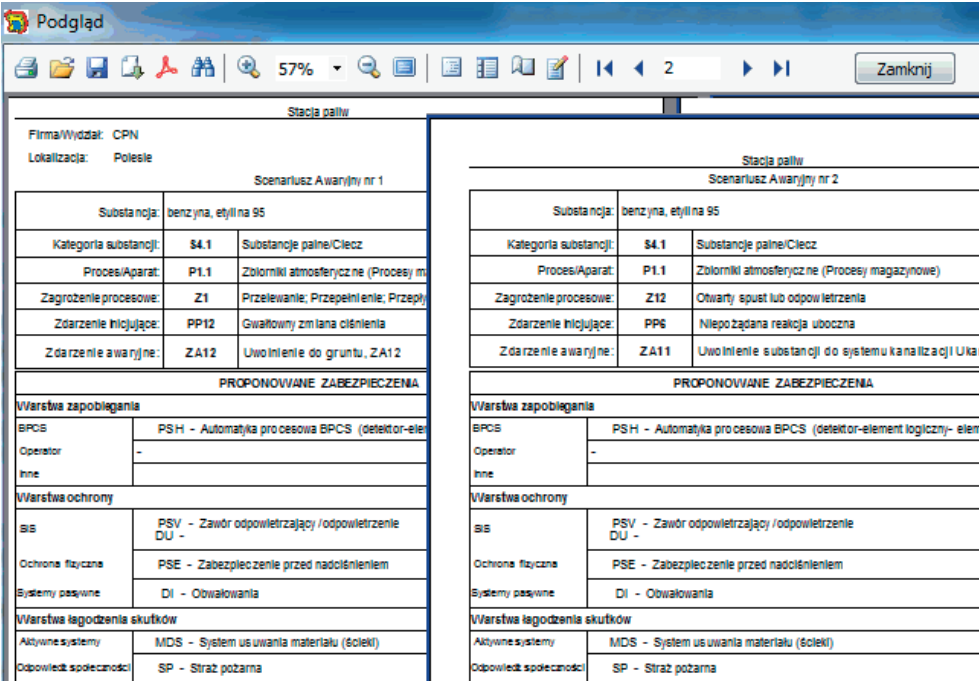
analizy ryzyka należy dokonać jego oceny na podstawie odpowiednich kryteriów akceptacji. W Polsce nie ma ustalonych formalnych wytycznych dotyczących tych kryteriów, dlatego też taka odpowiedzialność spada na zakłady podlegające pod Dyrektywę Seveso. W przypadku gdy oszacowane ryzyko jest akceptowalne, nie ma konieczności jego zmniejszenia [8,9]. Natomiast, gdy ryzyko jest nieakceptowalne w porównaniu z wybranymi kryteriami akceptacji ryzyka, należy podjąć działania zmierzające do jego zmniejszenia, np. poprzez wprowadzenie dodatkowych środków bezpieczeństwa (w postaci barier fizycznych, działań organizacyjno-prawnych oraz metod redukcji konsekwencji zdarzeń niepożądanych) lub ulepszenie istniejących.

2. Przegląd programów do modelowania prawdopodobieństwa i skutków poważnych awarii

Dla usprawnienia prowadzenia obliczeń, przez analityków bezpieczeństwa przygotowujących dokumentację dla zakładów o dużym lub o zwiększonym ryzyku, powstały programy komputerowe wspomagające wykonywanie poszczególnych etapów procesu analizy i oceny ryzyka procesowego.

W procesie identyfikacji zagrożeń i wyboru reprezentatywnych scenariuszy awaryjnych wykorzystywany jest program ExSysAWZ, opracowany przez naukowców z Wydziału Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej. Program ExSysAWZ służy do generowania scenariuszy awaryjnych związanych z uwolnieniem substancji niebezpiecznych dla potrzeb wykonania oceny ryzyka wystąpienia poważnej awarii za pomocą analizy warstw zabezpieczeń (AWZ). W skład pakietu ExSysAWZ wchodzi również program DaneExSysAWZ, który służy do edycji baz danych dotyczących substancji niebezpiecznych, procesów jednostkowych, zagrożeń procesowych, zdarzeń awaryjnych, zdarzeń inicjujących, matrycy zagrożeń procesowych, drzew logicznych, powiązań zdarzeń awaryjnych ze zdarzeniami inicjującymi. Dla przykładowej bazy paliw metoda ta, w oparciu o listę 13 zdarzeń awaryjnych typowych dla procesów przemysłowych, wygenerowała ponad 105 scenariuszy [8]. Wydruk dwóch przykładowych scenariuszy zidentyfikowanych za pomocą programu ExSysAWZ przedstawiono na rys. 1.

W praktyce największe trudności analitykom ryzyka sprawia proces oszacowania prawdopodobieństwa (lub częstości) wystąpienia skutków scenariusza awaryjnego. Wynika to przede wszystkim z problemu dostępu do danych niezawodnościowych charakteryzujących wszystkie elementy tworzące scenariusz oraz złożonego procesu



Stacja paliw	
Firma/Wydział:	CPN
Lokalizacja:	Polesie
Scenariusz Awaryjny nr 1	
Substancja:	benzyna, etylina 95
Kategoria substancji:	S4.1 Substancje palne/Ciecz
Proces/Aparat:	P1.1 Złomniki atmosferyczne (Procesy magazynowe)
Zagrożenie procesowe:	Z1 Przelewanie; Przepelnienie; Przepły
Zdarzenie inicjujące:	PP12 Gwałtowny zmiana ciśnienia
Zdarzenie awaryjne:	ZA12 Uwolnienie do gruntu; ZA12
PROPONOWANE ZABEZPIECZENIA	
Warstwa zapobiegania	
BPCS	PSH - Automatyka procesowa BPCS (detektor-ele
Operator	-
Inne	
Warstwa ochrony	
BIS	PSV - Zawór odpowietrzający /odpowietrzenie DU -
Ochrona fizyczna	PSE - Zabezpieczenie przed nadciśnieniem
Systemy pasywne	DI - Obwałowania
Warstwa łagodzenia skutków	
Aktywne systemy	MDS - System usuwania materiału (ścieki)
Odpowiedzialność	SP - Straż pożarna

Stacja paliw	
Scenariusz Awaryjny nr 2	
Substancja:	benzyna, etylina 95
Kategoria substancji:	S4.1 Substancje palne/Ciecz
Proces/Aparat:	P1.1 Złomniki atmosferyczne (Procesy magazynowe)
Zagrożenie procesowe:	Z12 Otwarty spust lub odpowietrzenia
Zdarzenie inicjujące:	PP6 Niepożądana reakcja uboczna
Zdarzenie awaryjne:	ZA11 Uwolnienie substancji do systemu kanalizacji Ukaz
PROPONOWANE ZABEZPIECZENIA	
Warstwa zapobiegania	
BPCS	PSH - Automatyka procesowa BPCS (detektor-element logiczny- elem
Operator	-
Inne	
Warstwa ochrony	
BIS	PSV - Zawór odpowietrzający /odpowietrzenie DU -
Ochrona fizyczna	PSE - Zabezpieczenie przed nadciśnieniem
Systemy pasywne	DI - Obwałowania
Warstwa łagodzenia skutków	
Aktywne systemy	MDS - System usuwania materiału (ścieki)
Odpowiedzialność	SP - Straż pożarna

Rys. 1. Przykładowe dwa scenariusze wygenerowane za pomocą programu ExSysAWZ przeznaczone do dalszej analizy w programie AWZ

Źródło: [8]

obliczeniowego. Aby uniknąć wyżej wymienionych problemów, naukowcy z Wydziału Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej opracowali narzędzie informatyczne – AWZ, wspierające proces oszacowania częstości wystąpienia skutków scenariuszy awaryjnych i ryzyka dla działających lub projektowanych instalacji. Metoda analizy warstw zabezpieczeń, zaimplementowana w pakiecie AWZ, oparta jest na identyfikacji występujących wielowarstwowych zabezpieczeń i prawdopodobieństwa ich niezadziałania. Zakłada, że poważna awaria występuje w wyniku niesprawności systemów bezpieczeństwa. Umożliwia ocenę skuteczności stosowanych lub projektowanych warstw zabezpieczeń. Pakiet AWZ składa się z dwóch programów: programu AWZ i programu do edycji danych DaneAWZ. W programie AWZ wykonywana jest właściwa analiza AWZ składająca się z trzech etapów: określenia częstości skutków scenariusza awaryjnego bez zabezpieczeń, określenia częstości skutków scenariusza awaryjnego z zabezpieczeniami i oszacowania ryzyka wystąpienia danego scenariusza

awaryjnego na podstawie matrycy ryzyka i ustalonych zasad akceptowalności. Program Dane AWZ służy do edycji danych niezbędnych do przeprowadzenia analizy, tj. danych niezawodnościowych dla zdarzeń inicjujących, zdarzeń warunkujących oraz prawdopodobieństwa niezadziałania zabezpieczeń w trzech warstwach: zapobiegania, ochrony, przeciwdziałania; bazy substancji niebezpiecznych; matryc skutków, ryzyka i efektów domina. Przykładowy wydruk z programu AWZ podano na rys. 2.

Politechnika Łódźska, Katedra
Inżynierii Bezpieczeństwa
Pracy

Analiza Warstw Zabezpieczeń dla scenariusza 4 :

str. 1/1

Synthos S.A. Centralny Magazyn Butadienu Wydział Kauczuku – Dział Monomerów i Emulgatorów	Proces: Magazynewania Aparaturazadzenie: Króciec DN125 zbiornika lp.16	Rodzaj zdarzenia: RZA (W) Nazwa zdarzenia: Rozszczelnienie króćca DN125 zbiornika magazynowego 1,3-butadienu lp. 16	
Lokalizacja: Oświęcim, ul. Chemików 1			
Data analizy: 8-03-2016	Opis scenariusza zdarzenia awaryjnego: Rozszczelnienie króćca DN125 zbiornika magazynowego 1,3-butadienu lp.16 (T=20°C, P=0,3 MPa, całkowita pojemność zbiornika 50 m3, stopień napełnienia 80%) wskutek powstania polimeru popcornowego. Wypływ substancji na wysokości 2,5 m w kierunku pionowym do dołu na tacę podzbiornikową (powierzchnia tacy 155,2 m2, wysokość murka 0,1m) do czasu opróżnienia zbiornika. Niezadziałanie detektorów i niepodjęcie działań przez obsługę eksploatacyjną. Zapłon mieszaniny palnej i skutki pożarowo –wybuchowe.		
Substancja: 1,3 butadien			
Stopień uwolnienia: 5 do 50000 kg Obszar: Magazynowy	Ocena kategorii skutków: 5 katastrofa	Ocena ryzyka	
		PFD	Częstość (1/rok)
Zdarzenie inicjujące			
	Powstanie polimeru popcornowego		0,1
Zdarzenia warunkujące wystąpienie scenariusza awaryjnego			
	Błąd operatora	0,01	
Zdarzenia umożliwiające powstanie skutków wymienionych w scenariuszu, zewnętrzne			
	Prawdopodobieństwo niesprzyjającego kierunku wiatru		
	Prawdopodobieństwo zapłonu - zapłon natychmiastowy	0,45	
	Prawdopodobieństwo pobytu w strefie		
	Prawdopodobieństwo śmierci	0,5	
	Efekty domina	10	
	Częstość wystąpienia skutków bez zabezpieczeń:		2,3e-03
Niezależne warstwy zabezpieczeń (NWZ)			
Warstwa II (Ochrona)			
	Detektory gazu	0,01	
Warstwa III (Przeciwdziałanie)			
	Działania Zakładowej Straży Pożarnej w ciągu 5 do 10 min. (od -1 do -2)		Zmiana Kat. Skutków -1
	Kategoria skutków po korekcie		4
	Końcowe prawdopodobieństwo dla wszystkich NWZ	0,01	
	Częstość występowania skutków z zabezpieczeniami		2,3e-05
	Ocena kategorii ryzyka		TA
Dodatkowe zabezpieczenia niezbędne do osiągnięcia poziomu ryzyka co najmniej TA	nie dotyczy		
Referencje, odsyłacze	Raport o Bezpieczeństwie RoB część III/1; Layer of Protection Analysis, CCPS, AICHE (2001)		
Zespół analizujący	A.S. Markowski, D. Siuta		

Rys. 2. Przykładowe arkusz z programu AWZ

Źródło: [10]

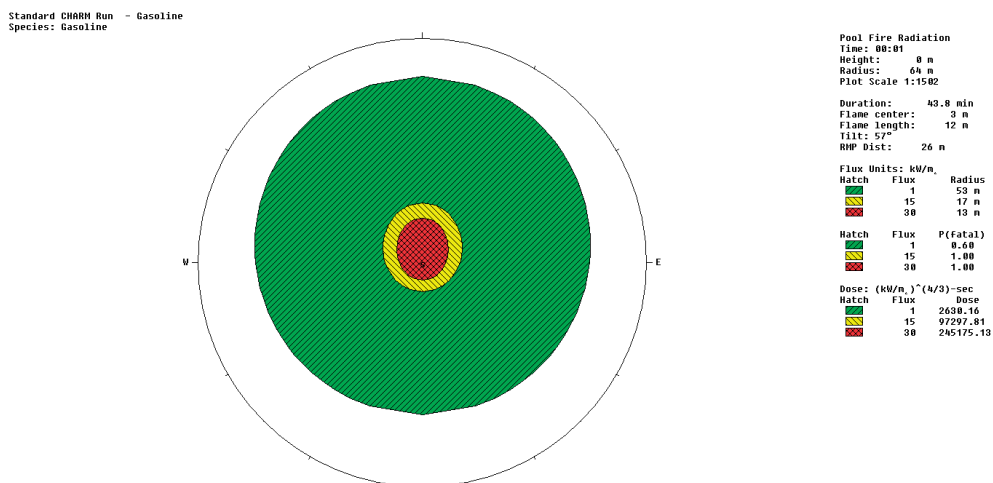
Programy AWZ i exSysAWZ są proste w obsłudze i znacząco skracają czas wymagany do przygotowania analiz ryzyka procesowego. Do programów dostępne są instrukcje obsługi (przewodnik) w języku polskim, które prowadzą użytkownika krok po kroku przez aplikację. Programy nie wymagają zainstalowania dodatkowych bibliotek ani zasobów systemowych. Analityk ryzyka, wykonujący analizę przy pomocy tego typu programów, musi być odpowiednio przeszkolony, posiadać praktyczne doświadczenie i wiedzę. Minimalny czas wymagany do właściwej, efektywnej obsługi programów AWZ i exSysAWZ wynosi 5 dni.

Kolejnym poważnym wyzwaniem dla analityka ryzyka jest proces wyznaczania stref oddziaływań poszczególnych efektów fizycznych, tzw. stref zagrożeń w oparciu o modele matematyczne, m.in. opisujące charakterystykę źródła uwolnienia, proces rozpylania rozlewiska, odparowanie, dyspersję chmur gazu i wreszcie, po wystąpieniu źródła zapłonu, proces spalania mieszaniny palnej z efektami fizycznymi w postaci odłamkowania, promieniowania cieplnego i fali nadciśnienia [11]. Proces modelowania zasięgów stref zagrożeń i skutków uwolnień substancji niebezpiecznych może być przeprowadzony przy wykorzystaniu programów komputerowych, takich jak: Aloha (U.S. EPA), Rizex-2 (RIZIKON), Breeze Incident Analyst (Trinity Consultants), Canary (Quest), Effects (TNO) lub Phast (DNV). Dalej omówiono najbardziej popularne i dostępne w kraju programy do modelowania skutków awarii technicznych.

CHARM

Oprogramowanie CHARM jest rozwijane przez dr. Marka Eltgrotha od 1981 r. Jest to najbardziej rozbudowany program symulacyjny spośród ogólnie stosowanych, jak przedstawiono w tabeli 1. Aktualna wersja programu umożliwia modelowanie awaryjnego uwolnienia niebezpiecznych substancji, dyspersji toksycznych i palnych substancji, pożarów oraz wybuchów. Dostępne są dwie wersje oprogramowania CHARM. Pierwsza umożliwia modelowanie jednego źródła zagrożenia na terenie płaskim. Druga wersja pozwala na odwzorowanie wielu źródeł zagrożeń w terenie trójwymiarowym. Wersja z płaskim terenem jest również dostępna jako aplikacja internetowa, do której można uzyskać dostęp za pośrednictwem przeglądarki internetowej i nie wymaga specjalnego oprogramowania. Obie wersje CHARM mogą być użyte do oszacowania wpływu użycia chemicznych broni masowego rażenia. W obu bazach danych znajdują się parametry środków bojowych, które mogą być użyte np. w atakach terrorystycznych (np. chlor, gaz musztardowy, sarin, soman i VX). Pozwala również na oszacowanie skutków użycia broni biologicznej masowego rażenia (np. bakterii wąglika). Wersja programu

z odwzorowaniem 3D umożliwia wykonanie kompletnej symulacji dla realnej lokalizacji (w oparciu o mapy Google). Wiele substancji chemicznych używanych do broni masowego rażenia jest uwalnianych w postaci aerozolu. Złożona wersja CHARM jest w stanie symulować wszystkie główne procesy wpływające na aerozol. Konieczne jest pewne oszacowanie rozkładu wielkości aerozolu w uwolnionej substancji chemicznej. Po wystąpieniu uwolnienia CHARM może obliczyć zmiany w rozkładzie wielkości w wyniku koagulacji, kondensacji, parowania i osadzania. Możliwości modelowania zagrożenia wynikającego z użycia broni biologicznej w trójwymiarowej wersji CHARM uwzględniają postać aerozolu (obliczane są stężenia w powietrzu) lub formę osiadłą substancji [12]. Na rys. 3 pokazano przykładowe obliczenia zasięgu stref promieniowania ciepłego przy pożarze powierzchniowym benzyny.



Rys. 3. Zasięg poszczególnych stref zagrożenia w zależności od gęstości strumienia promieniowania ciepłego przy pożarze powierzchniowym benzyny

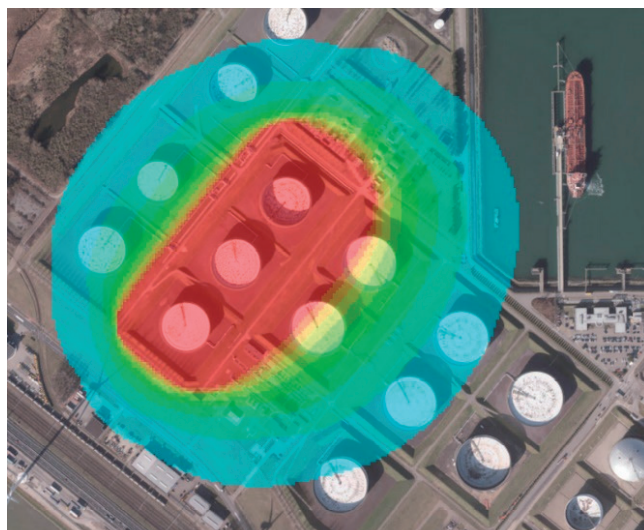
Źródło: opracowanie własne w oparciu o działanie programu CHARM

EFFECTS

EFFECTS to zaawansowane oprogramowanie pochodzące z Holandii, wspomagające analizę bezpieczeństwa dla przemysłu petrochemicznego, rafineryjnego, chemicznego w całym procesie technologicznym. Program oferuje pełną gamę modeli obliczeniowych dotyczących zdarzeń awaryjnych, wypadkowych związanych z magazynowaniem i transportem chemikaliów – od wypływu chwilowego, ciągłego, parowania cieczy, dyspersji gazów po pożary, wybuchy i ich konsekwencje dla otoczenia. Wymie-

nione modele można łączyć i wybierać samodzielnie albo program może to wykonać automatycznie. Zawiera zaawansowaną bazę danych substancji toksycznych, palnych i wybuchowych (termodynamiczne właściwości ponad 2000 związków chemicznych). Zintegrowany edytor umożliwia szczegółową definicję własnych, produkowanych, magazynowanych substancji lub mieszanin chemicznych. Konsekwencje zaistniałych zdarzeń są modelowane, a wyniki przedstawiane w czytelnych tabelach, wykresach oraz mapach, na których wizualizowane są skutki przyjętego scenariusza awaryjnego.

Wyniki symulacji dostarczają specjalistom ds. bezpieczeństwa wartościowych informacji dotyczących możliwości powstania odpowiednich zjawisk fizycznych w danym scenariuszu awaryjnym, wielkości zasięgu stref oddziaływań chmury palnej lub toksycznej, fali nadciśnienia od wybuchu, promieniowania cieplnego od pożaru. Stosowanie programu EFFECTS zapewnia otrzymywanie wiarygodnych wyników i jest on na arenie międzynarodowej traktowany jako referencyjny do analiz konsekwencji zdarzeń. Program wdrożony przez Netherlands Organisation for Applied Scientific Research jest nadal rozwijany i od wielu lat użytkowany w firmach produkcyjnych, przez agendy rządowe i instytuty badawcze na całym świecie [13]. Na rys. 4 przedstawiono wynik przykładowej symulacji oddziaływania promieniowania cieplnego od pożaru powierzchniowego zbiorników benzyny.



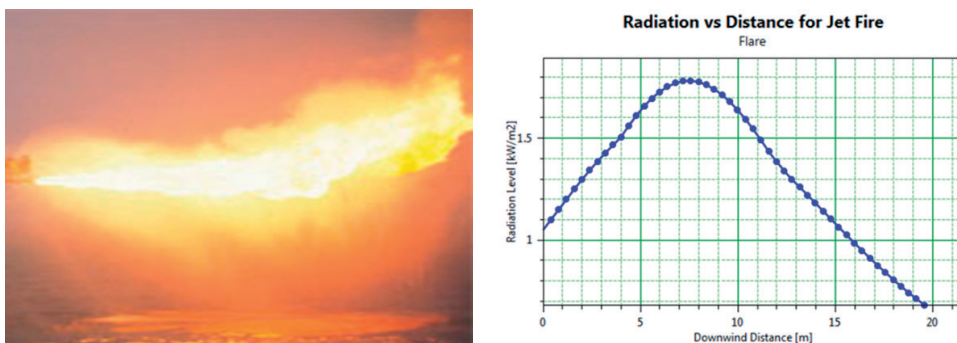
Rys. 4. Zaawansowane modelowanie za pomocą programu EFFECTS dotyczące pożarów zbiorników

Źródło: [13]

PHAST

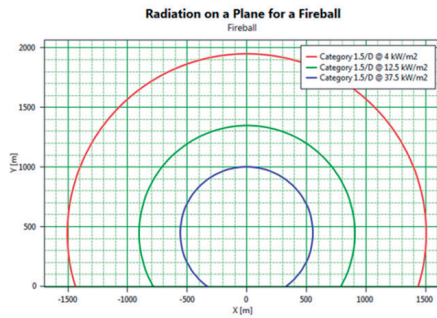
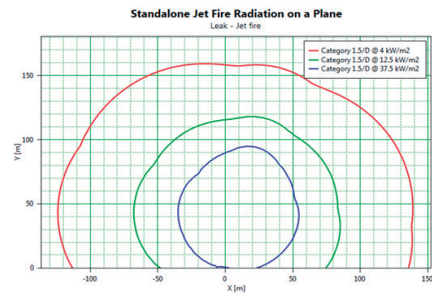
Program PHAST stworzony w Norwegii służy do analiz zagrożeń toksycznych, pożarowych i wybuchowych w przemyśle, wykorzystywany jest przez ponad 800 organizacji na całym świecie. Jest uznawany za najpełniejsze dostępne narzędzie przeznaczone do modelowania skutków potencjalnego zdarzenia od początkowego uwolnienia substancji do analizy dyspersji na duże odległości, w tym modelowania rozprzyskania się rozlewiska i jego odparowywania, a także skażeń terenu przez substancje łatwopalne i toksyczne, po pożary i wybuchy. Zawiera zaawansowaną bazę danych substancji toksycznych, palnych i wybuchowych (termodynamiczne właściwości ponad 2500 związków chemicznych).

Głównymi zaletami oprogramowania PHAST jest wiarygodność uzyskiwanych wyników analiz oraz szerokie możliwości raportowania w postaci kompleksowych raportów i wykresów ułatwiających przedstawianie wyników (np. na planach lokalizacji i schematach instalacji zakładu). Wbudowane modele matematyczne zjawisk fizycznych są stale walidowane (z ekspertami zewnętrznymi od ponad 30 lat), weryfikowane i aktualizowane. Cechuje go szeroka możliwość zastosowania – można modelować różne typy i źródła uwalniania, np. z pęknięć i przecieków rurociągów, zaworów bezpieczeństwa, pęknięć i zakleszczeń zbiorników, itp. Posiada przyjazny dla użytkownika interfejs [14]. Na rys. 5 przedstawiono zdarzenia oraz wykresy sporządzone w programie PHAST (zdjęcie pokazuje incydent, a wykres obok pokazuje wyniki modelowania).



Rys. 5. Zdarzenia rzeczywiste oraz wyniki obliczeń w postaci wykresów i wizualizacji wielkości stref sporządzone w programie PHAST

Źródło: materiał uzyskany dzięki uprzejmości firmy DNV GL – Digital Solutions



cd. Rys. 5.

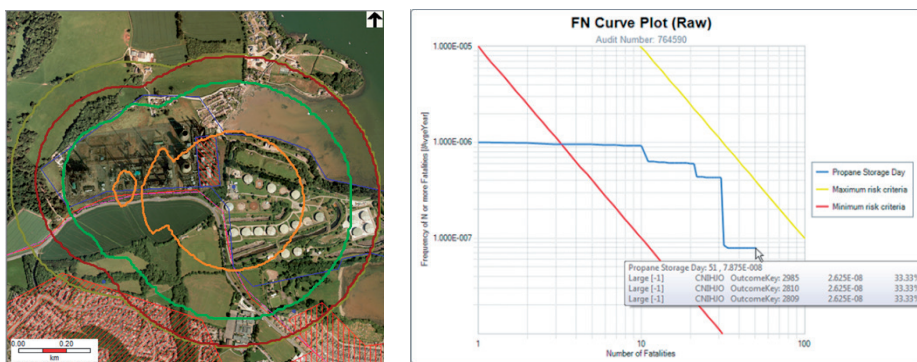
SAFETI

Program SAFETI służy do ilościowej oceny ryzyka w obiektach przemysłowych na podstawie wprowadzonych danych oraz przeprowadzeniu symulacji scenariuszy awaryjnych. Pozwala na wizualizację graficzną i tekstową obliczeń ryzyka terytorialnego, indywidualnego, określenia możliwej liczby osób poszkodowanych, tworzenia krzywych FN.

Od pozostałych programów odróżnia go możliwość zastosowania do analizy ryzyka transportu substancji niebezpiecznych. SAFETI zapewnia kompleksowy obraz potencjalnych zagrożeń wzdłuż całej trasy przejazdu, pozwalający na wstępną identyfikację obszarów wysokiego ryzyka. Bogate możliwości tego oprogramowania w zakresie analizy ryzyka związanego z transportem obejmują:

- różne środki transportu (transport drogowy, kolejowy, rzeczny, morski, system rurociągowy itd.),
- możliwość definiowania alternatywnych tras i rodzajów uwolnienia substancji (wyciek, pęknięcie zbiornika itp.),
- skutki awarii są automatycznie oceniane w określonych miejscach wzdłuż trasy (gdzie ryzyko wypadku jest największe) lub w równych odległościach, np. co 10 m,
- inne czynniki, które zmieniają się wzdłuż trasy (gęstość zaludnienia, pogoda itp.), mogą być również określone i wzięte pod uwagę w modelu.

W oparciu o analizy skutków wypadku lub awarii w transporcie można tak dobrać trasę przejazdu lub poprowadzenia rurociągu, aby skutki potencjalnej awarii były jak najmniej uciążliwe zarówno dla ludzi, jak i środowiska naturalnego (np. z dala od dużych skupisk ludzkich, rzek, punktów poboru wody itp.) [15]. Na rys. 6 przedstawiono wyniki generowane przy użyciu SAFETI, który jest podprogramem aplikacji PHAST.



Rys. 6. Wizualizacja zasięgu stref oraz wyniki analizy ryzyka obliczone w programie SAFETI

Źródło: materiał uzyskany dzięki uprzejmości firmy DNV GL – Digital Solutions

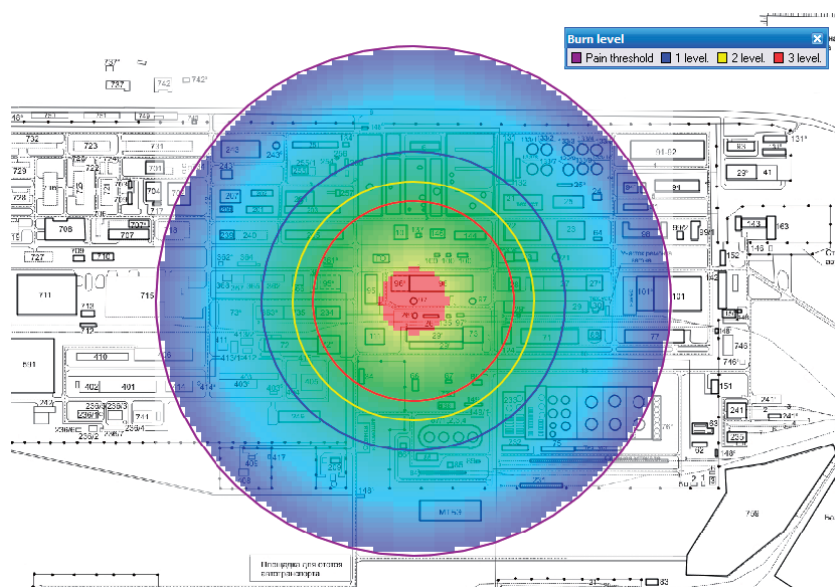
RIZEX-2

Program obliczeniowy RIZEX-2 jest autorskim produktem ukraińskiej firmy Rizikon. Składa się on z czterech głównych części: edytora graficznego, modułu obliczeniowego, przeglądarki wyników oraz bazy danych. Edytor graficzny umożliwia wygenerowanie wektorowych i rastrowych map dwu- i trójwymiarowych oraz ich dwustronny transfer. Po zdefiniowaniu własności obiektów należy wybrać odpowiedni model obliczeniowy. Moduł obliczeniowy składa się z następujących podmodułów: drzewo błędów, drzewo zdarzeń, reprezentatywne zdarzenia awaryjne, uwolnienia i parowanie cieczy, emisji gazów, dyspersji (modele Gaussa i gazu cięższego od powietrza), tworzenia się atmosfery wybuchowej, wybuchu (w oparciu o modele empiryczne), pożaru (pożar powierzchniowy, pożar strumieniowy, pożar kulisty, pożar błyskawiczny), pożaru 3D (uwzględniającego efekty promieniowania cieplnego na froncie płomienia), odłamkowania i szacowania ryzyka. Istnieje możliwość tworzenia standardowych „drzew błędów” i zapisywania ich w bazie danych. Prezentowane są one w formie tekstowej i graficznej. Analiza warunków powstania awarii metodą „drzewa błędów” z wykorzystaniem modułu „baza danych” umożliwia realizację poszukiwań optymalnych rozwiązań dla zapewnienia akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa. Jeżeli koszty poniesione na obniżenie prawdopodobieństwa wystąpienia awarii są wysokie i nie do przyjęcia dla prowadzącego zakład, przeprowadza się modelowanie przebiegu awarii oraz dobór rozwiązań zmniejszających skalę skutków awarii. W skład pakietu wchodzi baza danych substancji oraz parametrów konstrukcji budynków i obiektów wraz z ich odpornością na działanie np. fali nadciśnienia. Struktura pakietu oraz konstrukcja plików i baz danych umożliwia w stopniu nieograniczonym rozbudowę modeli obliczeniowych i narzędzi obróbki informacji bez wpływu na podstawowe własności programu. Wykorzystanie „drzewa zdarzeń” pozwala na przeprowadzenie analizy efektywności zastosowanych środków ochrony, ocenę skali rozwoju różnych scenariuszy awaryjnych oraz określenie ich prawdopodobieństwa. RIZEX-2 zawiera modele uwolnienia cieczy i gazów oraz ich dyspersji w atmosferze. Umożliwia modelowanie procesów fizycznych zachodzących podczas awarii oraz wizualizację wyników obliczeń. W zakresie zagrożenia wybuchowego uwzględnia parowanie cieczy przegrzanych z podaniem szybkości przebiegu procesu, a także powstawanie mieszaniny palnej o stężeniu pomiędzy dolną i górną granicą wybuchowości. Jego mocną stroną jest modelowanie różnych typów wybuchów, określanie rozkładu i wielkości nadciśnienia w przestrzeni oraz szacowanie prawdopodobieństwa obrażeń ludzi i stopnia zniszczenia obiektów. Efektem pracy modeli obliczeniowych wybuchów jest również

graficzna wizualizacja wyników obliczeń i wydruk raportu tekstowego. Natomiast modele obliczeniowe odłamkowania umożliwiają określenie jego parametrów podczas wybuchu, wyznaczenie strefy niebezpiecznej dla ludzi i prawdopodobieństwa uderzenia odłamków w obiekty.

W zakresie zagrożeń pożarowych możliwe jest modelowanie pożarów i ich skutków na podstawie modeli doświadczalnych oraz określenie poziomu ryzyka wystąpienia urazów u ludzi (różne stopnie poparzeń) oraz zdolność zapalenia się materiałów palnych w efekcie oddziaływania promieniowania cieplnego. Obliczana jest gęstość strumieni ciepłych od pożarów z uwzględnieniem efektu wytłumiania ich przez przeszkody. Pozwala na oszacowanie prawdopodobnego stopnia oparzeń ludzi przebywających na drogach ewakuacyjnych. Po wprowadzeniu danych dotyczących kierunku i prędkości wiatru oraz prawdopodobieństwa zmaterializowania się ryzyka przebiegu różnych scenariuszy powstania i rozwinięcia awarii otrzymuje się kontury ryzyka.

Ocena ryzyka wykonana w programie RIZEX-2 pozwala na wizualizację graficzną i tekstową obliczeń ryzyka lokalnego i globalnego, a co najważniejsze określenie możliwej liczby osób poszkodowanych [16]. Przykładowe wyniki wygenerowane przy użyciu programu RIZEX zilustrowano na rys. 7.



Rys. 7. Wartości gęstości strumienia ciepła w funkcji odległości od źródła pożaru i granice zagrożenia różnymi stopniami oparzeń

Źródło: [16]

ALOHA

Program ALOHA należący do pakietu CAMEO (ang. *Computer-Aided Management of Emergency Operations*) jest przeznaczony do modelowania dyspersji gazów i par substancji niebezpiecznych. Opracowany został przez amerykańską Agencję Ochrony Środowiska EPA (Environmental Protection Agency), która od 1970 r. realizuje zadania mające na celu ochronę życia, zdrowia i środowiska. Reprezentacja wyników jest możliwa poprzez wizualizację na planach rzeczywistego terenu w programach MARPLOT®, ArcMap firmy Esri, Google Earth i mapach Google. Czerwony kolor strefy reprezentuje najwyższy poziom zagrożenia, a pomarańczowy i żółty – strefy o niższym jego poziomie.

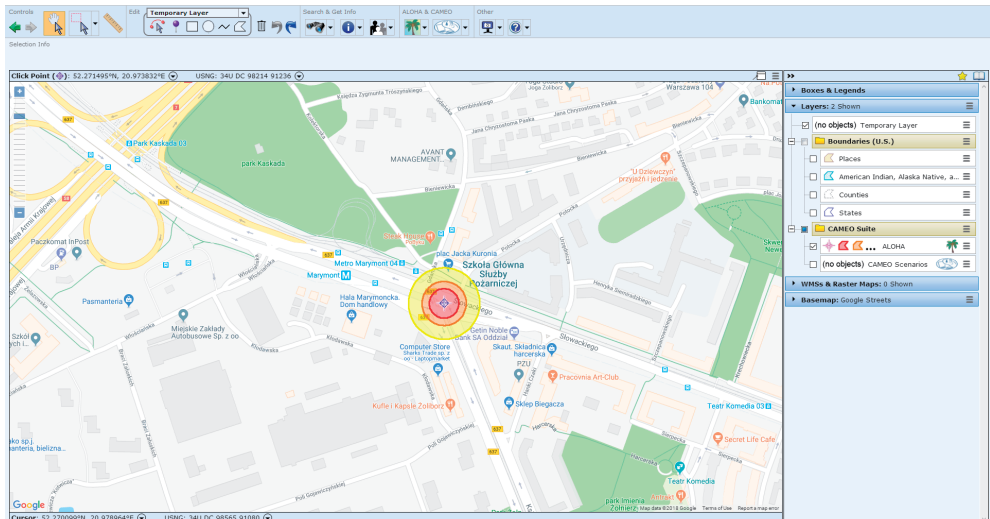
Dane wejściowe wprowadzane są przez użytkownika samodzielnie lub z wykorzystaniem transferu danych ze stacji pomiarów atmosferycznych, co gwarantuje dostęp do najbardziej aktualnych i zweryfikowanych informacji o warunkach meteorologicznych. Mają one znaczny wpływ na wyniki modelowania skutków uwolnienia substancji niebezpiecznych. Wyniki są prezentowane w postaci liczbowej, graficznej (wykresy) lub zapisywane w pliku tekstowym. Wizualizacja stref zagrożenia odbywa się na mapach cyfrowych i pozwala na szybkie określenie zamiaru taktycznego oraz wyznaczenie bezpiecznych stref koncentracji sił i środków oraz punktów ewakuacyjnych.

Weryfikacja walorów użytkowych programu oraz właściwej metodologii badawczej miała miejsce w wielu publikacjach naukowych, co gwarantuje wiarygodność uzyskiwanych wyników symulacji. Modele źródła wpływu skorelowane są z modelami dyspersji i dotyczą zarówno uwolnień jedno- jak i dwufazowych, a także chwilowych oraz ciągłych. W zakresie analiz numerycznych wykorzystywane są modele Gaussa oraz strefowy.

Program ALOHA zawiera bibliotekę powyżej 60 substancji i związków, z możliwością rozszerzenia o własne dane. Posiada możliwość stosowania jednostek układu SI. Daje to podstawę do powszechnego wykorzystania aplikacji w charakterze narzędzia do wspomagania decyzji w sytuacjach kryzysowych lub noszących znamiona kryzysu. Podobnie jak w przypadku pozostałych programów, precyzja obliczeń zależy od jakości danych wprowadzanych do programu przez użytkownika. Wadą tego narzędzia jest brak możliwości modelowania niektórych rodzajów uwolnień. Dokładność wyników programu zależy ściśle od prędkości wiatru, zmienności jego kierunku, a także stabilności warunków atmosferycznych.

Ponadto ALOHA nie jest przeznaczona do obliczeń dla przypadków pożarów i reakcji chemicznych, cząstek stałych zawieszonych w gazie (np. dyspersja warstwy pyłu

w powietrzu i jego osiadanie) oraz mieszanin substancji [17]. Na rys. 8 pokazano skutki wycieku paliwa ze zbiornika, a następnie pożaru powierzchniowego rozlewiska.



Rys. 8. Strefy zagrożenia obliczone w programie ALOHA i naniesione na mapę Google

Źródło: opracowanie własne

ALOHA jest narzędziem przeznaczonym dla specjalistów z obszaru ratownictwa chemiczno-ekologicznego, ponieważ wymaga znajomości procesów zachodzących po uwolnieniu substancji niebezpiecznej do środowiska. Przeprowadzana jest również automatyczna weryfikacja doboru modelu symulacyjnego. Zaletą tego programu jest fakt, że jest to oprogramowanie bezpłatne i ogólnodostępne, funkcjonujące w środowisku Windows i Mac oraz jest stale uaktualniane.

Zestawienie podstawowej charakterystyki oprogramowania przeznaczonego do modelowania skutków awarii przemysłowych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie funkcji najczęściej wykorzystywanych programów do modelowania skutków awarii przemysłowych

Program	BREEZE CHARM	EFFECTS	PHAST/SAFETI	ALOHA	RIZEX
1. Bezpłatny	NIE	NIE	NIE	TAK	NIE
2. Prosty w obsłudze	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK

cd. Tabeli 1.

Program	BREEZE CHARM	EFFECTS	PHAST/ SAFETI	ALOHA	RIZEX
3. Wymaga zaawansowanej wiedzy analityka ryzyka	TAK	TAK	TAK	NIE	NIE
4. W języku polskim	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE
5. Program aktualizowany, modele są stale weryfikowane	NIE	TAK	TAK	NIE	NIE
6. Wbudowane modele					
Model dyspersji gazu lekkiego	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK
Model dyspersji gazu ciężkiego	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK
Uniwersalny model dyspersji	TAK	TAK	TAK	NIE	TAK
Model pożaru powierzchniowego	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK
Model pożaru strumieniowego	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK
Model pożaru błyskawicznego	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK
Model pożaru kulistego	TAK	TAK	TAK	NIE	TAK
Model wybuchu na otwartej przestrzeni	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK
Modele wybuchu BLEVE	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK
Ilościowa ocena ryzyka (ryzyko indywidualne, grupowe, społeczne)	TAK	TAK	TAK (SAFETI)	-	TAK
7. Uwzględnienie przeszkód terenowych i wpływu ukształtowania terenów na przebieg wybuchu	NIE	NIE	TAK (PHAST 3D)	NIE	NIE
8. Modelowanie wybuchu wewnątrz budynków	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE

cd. Tabeli 1.

Program	BREEZE CHARM	EFFECTS	PHAST/ SAFETI	ALOHA	RIZEX
9. Modelowanie odłamkowa- nia podczas wybuchu	NIE	NIE	NIE	NIE	TAK
10. Modelowanie wybuchów pyłów	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE
11. Efekt domino	NIE	NIE	TAK	NIE	NIE
12. Weryfikacja wyników przez badaczy	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK
13. Prezentacja wyników w formie graficznej i tabel- arycznej	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK
14. Wbudowany moduł GIS	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK

Źródło: opracowanie własne

W ostatnich latach w różnych ośrodkach naukowych na świecie powstały i są rozwijane modele obliczeniowej mechaniki płynów CFD, takie jak: FLACS, PHOENICS, FLUENT, JASMINE, ANSYS, FDS, Kameleon FireEx (KFX) wykorzystywane do opisu środowiska pożaru, dyspersji, wybuchów. Zaletą ich jest możliwość symulacji zjawisk fizycznych w warunkach niemożliwych lub trudnych do uzyskania w rzeczywistości. Należy jednak pamiętać, że modele CFD posiadają również pewne wady, np. konieczność walidacji modelowania, możliwość popełnienia błędów podczas definiowania modelu obliczeniowego (np. warunków brzegowych, doboru siatki obliczeniowej), jak i posiadania szerokiej wiedzy w zakresie mechaniki płynów, transportu ciepła, chemii procesów spalania, dynamiki pożarów oraz innych pokrewnych dziedzin.

3. Podsumowanie

Wybór programu komputerowego wspomagającego wykonanie poszczególnych etapów procesu analizy i oceny ryzyka dla zakładów dużego i zwiększonego ryzyka wystąpienia poważnej awarii przemysłowej decyduje o wiarygodności końcowych wyników. Pomimo łatwości w obsłudze konieczne jest, aby osoba korzystająca z programu była odpowiednio przeszkolona, posiadała doświadczenie i wiedzę

z zakresu bezpieczeństwa. Spośród wymienionych w artykule programów, w zakresie obliczania efektów fizycznych i skutków awaryjnych uwolnień substancji niebezpiecznych wskutek różnych awarii procesowych, najwyższą ocenę ze względu na dostępność, wiarygodność uzyskiwanych wyników oraz funkcjonalność posiadają programy PHAST i EFFECTS. Tylko kilka instytucji w Polsce je posiada. Ponadto ich stosowanie wymaga intensywnego szkolenia w zakresie teorii i praktyki analizy ryzyka procesowego i nie jest możliwe zrozumienie uzyskanych wyników obliczeń bez posiadania tej wiedzy. Koszty oprogramowania są na ogół wysokie. Pewną ich niedoskonałością jest brak możliwości określenia parametrów odłamkowania podczas wybuchu i prawdopodobieństwa uderzenia odłamków w obiekty narażone na ich bezpośrednie oddziaływanie. Funkcje tę ma natomiast program RIZEX. Dzięki zastosowaniu odpowiedniego programu komputerowego, można zaprojektować adekwatne środki bezpieczeństwa i ochrony na wypadek wystąpienia awarii. Uzyskane wyniki wspomagają proces zagospodarowania przestrzennego w zakresie lokalizacji nowych zakładów zwiększonego lub dużego ryzyka wystąpienia poważnej awarii, nowych inwestycji oraz rozmieszczenia obszarów przestrzeni publicznej i terenów zabudowy mieszkalnej w sąsiedztwie zakładów przemysłowych.

Bibliografia

- [1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/18/UE z 4 lipca 2012 r. *w sprawie kontroli zagrożeń poważnymi awariami związanymi z substancjami niebezpiecznymi, zmieniająca, a następnie uchylająca dyrektywę Rady 96/82/WE* (Dz.Urz. UE L 197 z 24.07.2012), s. 1–37.
- [2] Rozporządzenie Ministra Rozwoju z 29 stycznia 2016 r. *w sprawie rodzajów i ilości substancji niebezpiecznych, których znajdowanie się w zakładzie decyduje o zaliczeniu go do zakładu o zwiększonym ryzyku albo zakładu o dużym ryzyku wystąpienia poważnej awarii przemysłowej* (Dz.U. z 2016 r. poz. 138).
- [3] Rozporządzenie Ministra Rozwoju z 23 lutego 2016 r. *w sprawie raportu o bezpieczeństwie zakładu o dużym ryzyku* (Dz.U. z 2016 r. poz. 287).
- [4] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z 8 czerwca 2016 r. *w sprawie wymagań, jakim powinny odpowiadać plany operacyjno-ratownicze* (Dz.U. z 2016 r. poz. 821).
- [5] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z 2 grudnia 2015 r. *w sprawie szczegółowego zakresu informacji wymaganych do podania do*

- publicznej wiadomości przez komendanta wojewódzkiego Państwowej Straży Pożarnej* (Dz.U. z 2015 r. poz. 2145).
- [6] Rozporządzenie Ministra Środowiska z 30 grudnia 2002 r. w sprawie poważnych awarii objętych obowiązkiem zgłoszenia do Głównego Inspektora Ochrony Środowiska (Dz.U. z 2003 r. nr 5, poz. 58).
- [7] Rozporządzenie Ministra Środowiska z 18 maja 2016 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie poważnych awarii objętych obowiązkiem zgłoszenia do Głównego Inspektora Ochrony Środowiska (Dz.U. z 2016 r. poz. 799).
- [8] Markowski A.S., Pietrzykowski M., Żyłła R.J., *Metoda generowania typowych scenariuszy awaryjnych w zakładach dużego i zwiększonego ryzyka – ExSysAWZ*, XII Konferencja Naukowo-Techniczna „Bezpieczeństwo Instalacji Przemysłowych”, Warszawa 2013.
- [9] Markowski A.S., Siuta D., *Selection of representative accident scenarios for major industrial accidents*, “Process Safety and Environmental Protection” 2017, 111, 652–662.
- [10] Siuta D., Pawlak H., Markowski A.S., *Materiały szkoleniowe SPBPP*, Politechnika Łódzka, Łódź 2018.
- [11] Siuta D., Markowski A.S., *Zastosowanie algorytmu logiki rozmytej do modelowania skutków awaryjnych uwolnień LNG do wody morskiej*, „Przemysł Chemiczny” 2017, 96 (5), 1105–1108.
- [12] CHARM Software – When Realism Counts. Materiały dystrybutora programu, Lometa (US, TX) 2019.
- [13] Effects – advanced, easy-to-use consequence analysis. Materiały dystrybutora programu, Bergen (NO) 2019.
- [14] Phast – The world’s most comprehensive hazard analysis software for all stages of process industry design and operation. Materiały dystrybutora programu, Oslo (NO) 2018.
- [15] Safeti – The right choice for safety professionals. Materiały dystrybutora programu, Oslo (NO) 2018.
- [16] User’s manual (functional description) of the research software complex of risk assessment and accident simulation „RizEx-2”, Scientific Center of Risk Investigations „Rizikon”, Severodonetsk (UA) 2011.
- [17] Technical documentation ALOHA® (Areal Locations Of Hazardous Atmospheres) 5.4.4. Technical Memorandum 43, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Ocean Service (NOS), Office of Response and Restoration (OR&R), Seattle, Washington, 2013.

Norbert Tuśnio – doktor budownictwa, Kierownik Zakładu Systemów Wspomagania Decyzji, Kateru Działań Ratowniczych, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa i Ochrony Ludności, Szkoła Główna Służby Pożarniczej.

ORCID 0000-0003-0878-8499

Paweł Wolny – niezależny badacz, główne obszary zainteresowań: zarządzanie kryzysowe, nowoczesne technologie w ratownictwie, gaszenie mgłą wodną i hybrydową.

ORCID 0000-0003-2161-4506

Dorota Siuta – w 2007 r. ukończyła studia na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej. Odbyła staż naukowy w Mary Kay O'Connor Process Safety Center w Texas A&M University w Stanach Zjednoczonych w 2011 r. Obecnie jest adiunktem badawczo-dydaktycznym w Katedrze Inżynierii Bezpieczeństwa Pracy Politechniki Łódzkiej. Specjalność – bezpieczeństwo procesów chemicznych, zarządzanie ryzykiem procesowym.

ORCID: 0000-0002-5504-7725

Lt. Col. Norbert Tuśnio, PhD – PhD in construction engineering, Head of the Unit of Decision Support Systems, Department of Rescue Operations, Faculty of Safety Engineering and Civil Protection, The Main School of Fire Service.

Paweł Wolny, PhD – independent researcher, with main fields of interest: crisis management, modern technologies in rescuing, fire suppression using water and hybrid mist.

Dorota Siuta, PhD – graduate of Faculty of Process and Environmental Engineering of the Łódź University of Technology in 2007. Scientific internship at the Mary Kay O'Connor Process Safety Center w Texas A&M University in the USA in 2011. Presently a research and didactic assistant professor in the Department of Work Safety Engineering of the Łódź University of Technology. Specialty – safety of chemical processes, process risk management.