



**Lucyna Brzozowska<sup>1</sup>**

## **BEZPIECZEŃSTWO W TRANSPORCIE DROGOWYM – – MODELOWANIE SKUTKÓW POWAŻNYCH AWARII**

**Streszczenie:** Celem pracy jest wskazanie głównych problemów modelowania skutków poważnych awarii w aspekcie bezpieczeństwa w transporcie drogowym. Problem bezpieczeństwa w odniesieniu do transportu drogowego jest zagadnieniem złożonym, na który składa się zarówno modelowanie skutków eksploatacji pojazdów jak i nagłych uwolnień substancji niebezpiecznych powstających w wyniku zdarzeń drogowych. W niniejszej pracy skupiono się na drugim ze wskazanych tematów.

**Słowa kluczowe:** modelowanie komputerowe, rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń, transport drogowy, systemy decyzyjne, nagłe uwolnienia

### **Wstęp**

Wpływ emitowanych w wyniku transportu drogowego zanieczyszczeń jest stały, ale o stosunkowo niewielkiej negatywnej sile oddziaływania na środowisko oraz zdrowie i życie ludzi, poza szczególnymi sytuacjami zwiększonego natężenia ruchu i nietypowych warunków atmosferycznych, kiedy to powstaje zjawisko zwane smogiem. W sytuacjach nagłych uwolnień substancji niebezpiecznych może natomiast dojść do skażenia dużych obszarów miejskich. W tym przypadku życie mieszkańców bywa poważnie zagrożone. Do modelowania skutków oddziaływania transportu na środowisko stosowanych jest szereg metod i programów komputerowych głównie opartych o dwa elementy: model pola prędkości powietrza oraz model rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń. Ten pierwszy determinuje sposób rozchodzenia się substancji szkodliwych w modelowanym obszarze. Oba modele mogą być rozpatrywane w różnych skalach przestrzennych i czasowych. Najczę-

---

<sup>1</sup> Dr hab. inż. Lucyna Brzozowska, prof. ATH, Katedra Modelowania Komputerowego, Wydział Zarządzania i Transportu, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej.

ściej stosuje się podział na modele mikro- mezo- i makroskalowe oraz krótko- i długookresowe. Podczas rozpatrywania zagadnień związanych z dyspersją związków szkodliwych spalin stosowane są najczęściej modele mikroskalowe krótkookresowe (skala miasta), natomiast w zagadnieniach nagłych uwolnień substancji niebezpiecznych modele mikro oraz mezoskalowe również w krótkich okresach czasu.

O ile zagadnienia wpływu transportu drogowego w aspekcie emisji związków szkodliwych spalin jest tematem szczegółowo omawianym, zarówno od strony eksploatacji pojazdów, jak i ochrony środowiska, o tyle problem nagłych uwolnień powstałych w wyniku zdarzeń drogowych, jest w literaturze naukowej dość rzadko podejmowany. Jednakże występowanie incydentów związanych z uwolnieniem substancji chemicznych do atmosfery, powodujących nierzadko ofiary śmiertelne, zmusza organizacje ekologiczne i rządowe do rozwoju systemów reagowania w czasie rzeczywistym, na podstawie precyzyjnych prognoz i symulacji komputerowych. W niniejszej pracy przedstawiono przegląd stosowanych systemów oraz modeli komputerowych, a także omówiono własną propozycję modeli i programów umożliwiających ocenę skutków uwolnień substancji niebezpiecznych w wyniku nagłych zdarzeń powstających w transporcie drogowym.

## 1. Elementy planowania awaryjnego

Wpływ przypadkowych uwolnień toksycznych związków chemicznych może być zminimalizowany poprzez dostarczanie dokładnych informacji i wspomaganie organizowania pracy zespołów zapobiegania skutkom poważnych awarii<sup>2</sup>. W tym celu tworzone są systemy przewidywania dyspersji do atmosfery szkodliwych oraz niebezpiecznych substancji chemicznych. Tego typu systemy stanowią kluczowe narzędzie do wspierania decydentów podczas akcji ratowniczych oraz na etapie ich planowania. Przede wszystkim powinny one umożliwiać szybkie oszacowanie zasięgu wyemitowanych substancji<sup>3</sup> (np. ARAC (Atmospheric Release and Advisory Capability), opracowany przez Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)<sup>4</sup>).

Tego typu system został omówiony w pracy Alhajraf i inni<sup>5</sup>. Budowa systemu wspomagania decyzji wraz z etapami postępowania została przedstawiona na rysunku 1.

---

<sup>2</sup> S. Alhajraf, L. Al-Awadhi, S. Al-Fadala, A. Al-Khubaizi, A.R. Khan, S. Baby, *Real-time response system for the prediction of the atmospheric transport of hazardous materials*, "Journal of Loss Prevention in the Process Industries" 18, 2005, s. 520-525.

<sup>3</sup> N. Quaranta, A. DeMartini, R. Bellasio, R. Bianconi, M. Marioni, *A decision support system for the simulation of industrial accidents*, "Environmental Modelling and Software", 17, 2002, s. 497-504, doi:101016/S1364-8152(02)00018-X.

<sup>4</sup> L.D. Ermak, G. Sugiyama, J.S. Nasstrom, *Atmospheric release assessment program (ARAP) science and technology base development*, Lawrence Livermore National Laboratory 2002, UCRL-JC-148450.

<sup>5</sup> S. Alhajraf, L. Al-Awadhi, S. Al-Fadala, A. Al-Khubaizi, A.R. Khan, S. Baby, *Real-time response system for the prediction of the atmospheric transport of hazardous materials*, "Journal of Loss Prevention in the Process Industries" 18, 2005, s. 520-525.



Rysunek 1. System awaryjnego planowania w czasie rzeczywistym

Pierwszym krokiem jest zebranie podstawowych danych wejściowych wymaganych do uruchomienia systemu. Trzy główne rodzaje tych danych to:

- dane meteorologiczne – mogą być pozyskane z internetowych stacji pogodowych, z najbliższej położonej stacji pomiarowej lub za pomocą przenośnych urządzeń,
- informacje o źródle, w tym: parametry emisji (natężenie emisji, sposób: emisja ciągła; stała; rosnąca; malejąca itd., rodzaj emitowanego materiału) oraz położenie geograficzne źródła wraz z jego wysokością nad powierzchnią terenu,
- inne informacje uzupełniające, takie jak: dane topograficzne pozyskiwane z systemu GIS, mapy oraz informacje o sposobie użytkowania gruntów na obszarze w pobliżu źródła emisji.

W kolejnym kroku wykonywane są obliczenia, przy czym model dyspersji należy dostosować do konkretnego przypadku. Następnie dane są generowane w postaci plików tekstowych i graficznych i przekazywane odpowiednim służbom, np. oddziałom ratunkowym ochrony cywilnej, do siedziby straży pożarnej i zarządzania kryzysowego, czy szpitalom<sup>6</sup>.

W przypadku awarii drogowych stosowanie tak rozbudowanego systemu ma swoje uzasadnienie, gdyż uwolnione w wyniku wypadku drogowego substancje mogą stanowić zagrożenie dla większej liczby mieszkańców na znacznym obszarze miasta (np. uwolnienie chloru). W pracy Zhao i inni<sup>7</sup> zaproponowano system wspomaganie decyzji w przypadkach nagłego uwolnienia substancji niebezpiecznej, związanych z transportem drogowym. System ten oparto o model sieci Bayesa, zbudowanej na bazie wiedzy eksperckiej.

<sup>6</sup> S. Alhajraf, L. Al-Awadhi, S. Al-Fadala, A. Al-Khubaizi, A.R. Khan, S. Baby, *Real-time response system for the prediction of the atmospheric transport of hazardous materials*, "Journal of Loss Prevention in the Process Industries" 18, 2005, s. 520-525.

<sup>7</sup> L. Zhao, X. Wanga, Y. Qian, *Analysis of factors that influence hazardous material transportation accidents based on Bayesian networks: A case study in China*, "Safety Science", 50, 2012, s. 1049-1055, doi:10.1016/j.ssci.2011.12.003.

Podczas oceny oddziaływania skutków poważnych awarii ważne jest przyjęcie odpowiedniej metody określającej skład demograficzny populacji znajdującej się pod wpływem substancji toksycznych. Taką metodę zaproponowano w pracy Chakraborty i Armstrong<sup>8</sup> i stosowano między innymi w publikacji Fisher i inni<sup>9</sup>. Opisuje ona podejście zawierające analizę smugi w kontekście geograficznym (Geographic Plume Analysis). W podejściu tym dane otrzymane z modelu dyspersji nakładane są na bazę danych demograficznych. Stosowany jest przy tym system informacji przestrzennej (GIS). W analizach tych uwzględnia się często inne źródła zanieczyszczeń występujące na danym terenie.

Osobnym zagadnieniem, jakiemu poświęcono szereg prac, jest ocena ryzyka związanego z przewozem substancji niebezpiecznych. Zagadnienia te były opisywane między innymi w pracy Chakrabarti i Parikh<sup>10</sup>. W pracy Fabiano i inni<sup>11</sup> przedstawiono wyniki analizy statystycznej, a także ocenę ryzyka wypadków z udziałem substancji niebezpiecznych we Włoszech. Podczas analizy brano pod uwagę takie czynniki, jak: rodzaj i parametry drogi, warunki meteorologiczne i parametry ruchu (częstotliwość przejazdów cystern lub innego rodzaju samochodów ciężarowych przewożących towary niebezpieczne). Innym systemem oceny ryzyka wystąpienia poważnej awarii z udziałem związków niebezpiecznych i jej skutków jest system stosowany od lat we Francji<sup>12</sup>. Jest on podbudowany prawem, które – zwłaszcza po 2003 roku, kiedy to weszła w życie Dyrektywa 2003/105/WE – wymaga istnienia takich systemów, stosowania ich oraz informowania opinii publicznej o zdarzeniach, zagrożeniach i podejmowanych działaniach. Z kolei w artykule Scenna i Santa Cruz<sup>13</sup> przedstawiono analizę ryzyka związanego z transportem chloru i ewentualnym wypadkiem na autostradzie wokół miasta Rosario w Argentynie. Kryterium oceny ryzyka stanowił wpływ skutków awarii na mieszkańców miasta, a nie na środowisko, choć system umożliwia także i taką ocenę. Natomiast w pracy Spadoni i inni<sup>14</sup> omówiono metodologię ARIPAR (Analisi e controllo dei Rischi Industriali e Portuali dell'Area di Ravenna – analiza i kontrola ryzyka

---

<sup>8</sup> J. Chakraborty, M.P. Armstrong, *Using geographic plume analysis to assess community vulnerability to hazardous accidents*, "Computers, Environment and Urban Systems", 19, 1995, s. 341-356.

<sup>9</sup> B. Fabiano, F. Curro, A.P. Reverberi, R. Pastorino, *Dangerous good transportation by road: from risk analysis to emergency planning*, "Journal of Loss Prevention in the Process Industries", 18, 2005, s. 403-413, doi: 10.1016/j.jlp.2005.06.031.

<sup>10</sup> U.K. Chakrabarti, J.K. Parikh, *Risk-based route evaluation against country-specific criteria of risk tolerability for hazmat transportation through Indian State Highway*, "Journal of Loss Prevention in the Process Industries", 26, 2013, s. 723-736.

<sup>11</sup> B. Fabiano, F. Curro, A.P. Reverberi, R. Pastorino, *Dangerous good transportation by road: from risk analysis to emergency planning*, "Journal of Loss Prevention in the Process Industries", 18, 2005, s. 403-413, doi: 10.1016/j.jlp.2005.06.031.

<sup>12</sup> C. Lenoble, C. Durand, *Introduction of frequency in France following the AZF accident*, "Journal of Loss Prevention in the Process Industries", 24, 2011, s. 227-236, doi:10.1016/j.jlp.2010.09.003.

<sup>13</sup> N.J. Scenna, A.S.M. Santa Cruz, *Road risk analysis due to the transportation of chlorine in Rosario city*, "Reliability Engineering and System Safety", 90, 2005, s. 83-90, doi: 10.1016/j.res.2004.11.004.

<sup>14</sup> G. Spadoni, D. Egidi, S. Contini, *Through ARIPAR-GIS the quantified area risk analysis supports land-use planning activities*, "Journal of Hazardous Materials", 71, 2000, s. 423-437.

przemysłowego w obszarze portowym Rawenny), stosowaną do oszacowania ryzyka wystąpienia poważnych awarii związanych z produkcją, przechowywaniem i transportowaniem substancji niebezpiecznych. W artykule Tena-Chollet i inni<sup>15</sup> przedstawiono zastosowanie systemu oceny ryzyka w przypadku transportu węglowodorów.

W każdej z wymienionych publikacji kładziono nacisk na wagę problemów oceny skutków nagłych uwolnień substancji niebezpiecznych.

## 2. Programy komputerowe stosowane przez służby ratownicze

Programy stosowane do analizy zagrożeń poważnymi awariami w transporcie drogowym powinny uwzględniać tzw. *strefę zagrożenia*, rozumianą jako przestrzeń, w której może wystąpić zagrożenie dla zdrowia lub życia ludzi bądź zniszczenie lub strata w środowisku naturalnym. Zwykle uwzględnia się takie czynniki jak: rodzaj, ilość lub intensywność substancji zagrażającej, sposób i natężenie jego emisji, zasięg. Dodatkowo uwzględnia się warunki panujące w środowisku, przy czym w stosowanych przez Państwową Straż Pożarną programach, przeważnie są to: kierunek i prędkość wiatru, klasa stabilności atmosfery oraz temperatura powietrza.

Do najczęściej używanych programów należą: ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) oraz HPAC (Hazard Prediction and Assessment Capability). Pierwszy z nich służy do szacowania stref zagrożenia w razie awaryjnego uwolnienia substancji niebezpiecznych<sup>16</sup>, został opracowany przez amerykańską Agencję Ochrony Środowiska (EPA – Environmental Protection Agency) oraz Amerykańską Narodową Służbę Oceaniczną i Meteorologiczną (NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration), drugi z programów opracowała Agencja Obrony Specjalnej – DSWA (Defense Special Weapons Agency), pierwotnie w celu zapewnienia szybkiej reakcji na zagrożenia ze strony broni masowego rażenia.

Ze względu na łatwość obsługi oraz darmowy dostęp najczęściej wykorzystywany jest program ALOHA. W programie wyniki prezentowane są w postaci graficznej, gdzie za pomocą linii i kolorów prezentowane są strefy zagrożenia, zdefiniowane przez użytkownika. Niestety w programie nie uwzględnia się zmian położenia terenu ani zabudowy, można jedynie wybrać jeden z trzech możliwych rodzajów szorstkości aerodynamicznej podłoża. Zaletą programu jest kompatybilność z najbardziej popularnymi systemami operacyjnymi oraz łatwy w obsłudze interfejs. Minusem jest ograniczony do 60 minut czas trwania zjawiska (symulacji). Program posiada również inne ograniczenia, polegające na braku możliwości

---

<sup>15</sup> F. Tena-Chollet, J. Tixier, G. Dusserre, J.-F. Mangin, *Development of a spatial risk assessment tool for the transportation of hydrocarbons: Methodology and implementation in a geographical information system*, "Environmental Modelling & Software", 46, 2013, s. 61-74, doi: 10.1016/j.envsoft.2013.02.010

<sup>16</sup> NOAA, 2013. *NOAA Technical Memorandum NOS OR&R 43 ALOHA® (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4.4*, Technical Documentations, Seattle, Washington, November 2013.

określania stref pionowych oraz prowadzenia symulacji tylko dla niewielkich prędkości wiatru lub jego braku. Mimo tych ograniczeń jest przydatny nie tylko podczas działań ratowniczych, ale również prognozowania zagrożeń<sup>17</sup>.

Innym, z najczęściej stosowanych programów komputerowych służących do modelowania i symulacji emisji oraz rozprzestrzeniania substancji toksycznych i niebezpiecznych jest wspomniany już HPAC. Jego głównym zadaniem jest umożliwienie szybkiej, wręcz natychmiastowej reakcji na zagrożenie związane z zastosowaniem broni chemicznych. Kod główny, używany w obliczeniach transportu związków chemicznych, oparty jest o model z domknięciem drugiego rzędu SCIPUFF<sup>18</sup>.

Koniuch i Czaplą<sup>19</sup> wymieniają szereg programów dedykowanych modelowaniu propagacji gazów toksycznych i dymu, powstałych w wyniku pożaru, między innymi: ALOFT-FT (A Large Outdoor Fire Plume Trajectory Model – Flat Terrain – McGrattan<sup>20</sup>), którego głównym zadaniem jest ocena rozprzestrzeniania się produktów spalania powstałych podczas pożaru dużych zbiorników z ropą naftową i jej pochodnymi; FDS (Fire Dynamics Simulator – McGrattan i inni<sup>21</sup>), służący do szczegółowej analizy zagrożeń pożarowych i rozwiązywania problemów związanych z inżynierią bezpieczeństwa pożarowego; CFAST (Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport) – dwustrefowy model przeznaczony do obliczeń rozkładu dymu i gazów pożarowych oraz temperatury w różnych pomieszczeniach budynku objętego pożarem.

Ponadto w modelowaniu propagacji zanieczyszczeń pochodzenia motoryzacyjnego używa się wielu innych modeli i programów komputerowych. Szczegółowo zostały one omówione w monografii<sup>22</sup>.

### 3. Autorski model dyspersji zanieczyszczeń

Uwzględnienie złożoności zagadnienia modelowania propagacji związków niebezpiecznych wymaga bądź stosowania skomplikowanych pakietów obliczeniowych, bądź dedykowanych, autorskich programów komputerowych.

Schemat modelowania stosowany w programie opracowanym przez autorkę niniejszej publikacji przedstawiono na rysunku 2. Program oparty jest o dwa niezależnie działające moduły: model pola prędkości powietrza – preprocesor meteorologiczny oraz model dyspersji zanieczyszczeń. Wartościami wejściowymi, które nale-

---

<sup>17</sup> NOAA, 2013. *NOAA Technical Memorandum NOS OR&R 43 ALOHA® (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4.4*, Technical Documentations, Seattle, Washington, November 2013.

<sup>18</sup> *HPAC 4.04 Help Manual*, Defense Threat Reduction Agency (DTRA), April, 2005, [ftp.atdd.noaa.gov/pub/gunter/hpac\\_404\\_users\\_manual.pdf](ftp.atdd.noaa.gov/pub/gunter/hpac_404_users_manual.pdf).

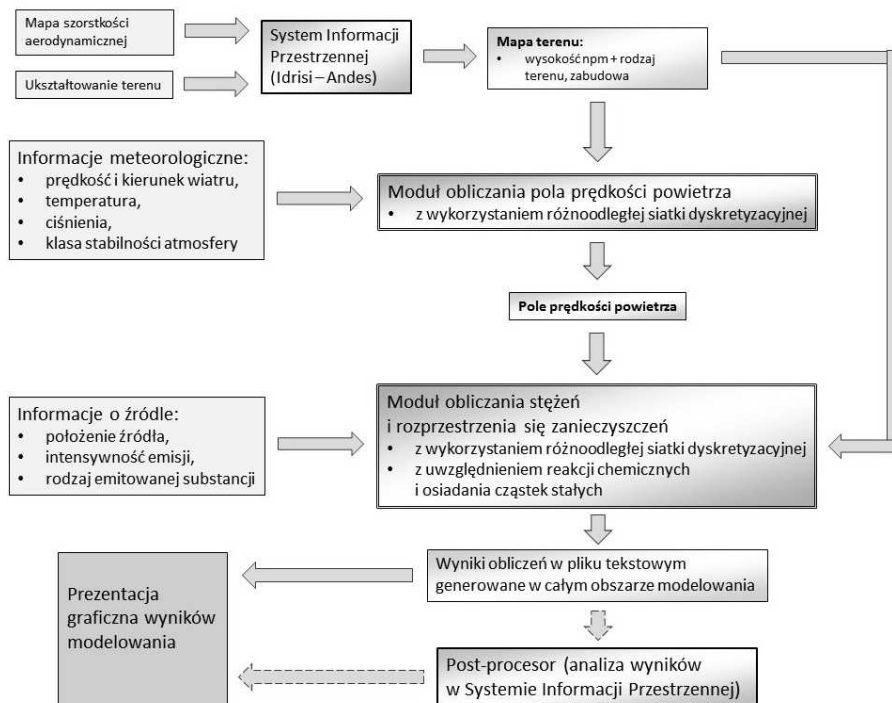
<sup>19</sup> A. Koniuch, R. Czaplą, *Nowe narzędzia do rozpoznawania zagrożeń*, „Przegląd pożarniczy”, 1, 2013, s. 18-21.

<sup>20</sup> K. McGrattan, B. Klein, S. Hostikka, *Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide*, U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, October 2007.

<sup>21</sup> K. McGrattan, B. Klein, S. Hostikka, *Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide*, U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, October 2007.

<sup>22</sup> L. Brzozowska, *Modelowanie skutków uwolnień substancji niebezpiecznych w transporcie drogowym*, Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej, Rozprawy naukowe nr 55, Bielsko-Biała 2015.

ży wprowadzić do modelu pola prędkości powietrza są dane o ukształtowaniu terenu, szorstkości aerodynamicznej oraz informacje meteorologiczne. W wyniku przetwarzania wstępnego (preprocessing) i obliczeń pola prędkości powietrza generowane są odpowiednio pliki zawierające mapę terenu oraz pole prędkości w całym modelowanym obszarze. Dane te są następnie importowane do modułu dyspersji, opartego o lagrange'owski model cząstek, należący do klasy modeli numerycznych. W wyniku obliczeń można pozyskać mapę stężenia w całym obszarze obliczeniowym.



Rysunek 2. Schemat modelowania w programie własnym.

Prezentowany model należy do klasy modeli numerycznych, ściślej, według podziału zaproponowanego przez Seamana<sup>23</sup>, jest to model diagnostyczny (kinematyczny). Poza tym Seaman wyróżnia jeszcze modele dynamiczne – prognostyczne.

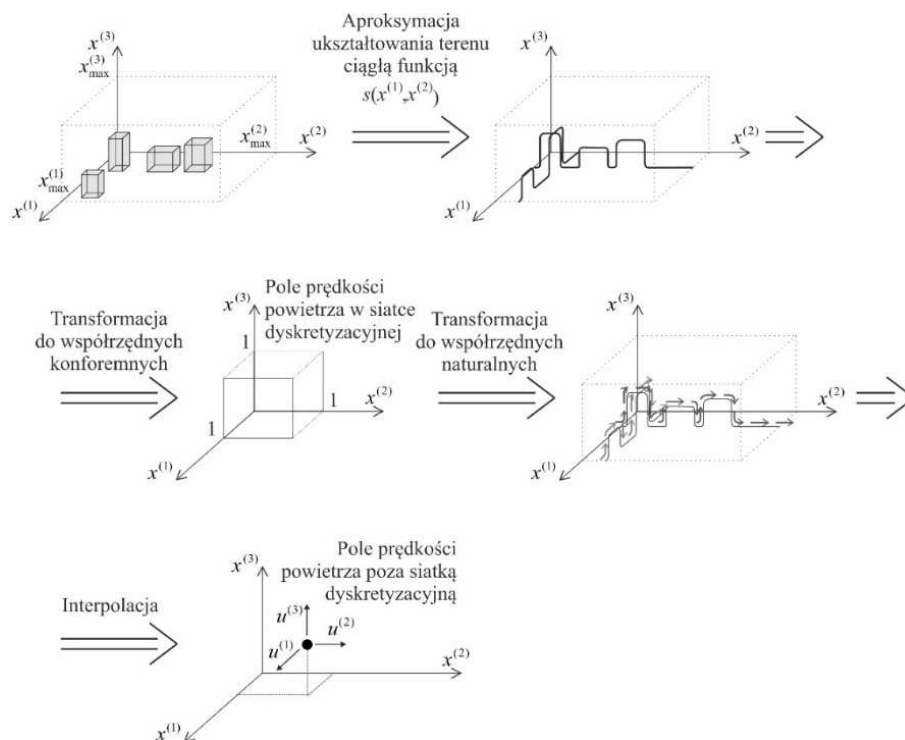
Modele diagnostyczne bazują najczęściej na równaniu ciągłości a metody otrzymywania przestrzennego pola prędkości powietrza oparte są o interpolowane dane pomiarowe. Wyniki pozyskiwane z tego typu modeli dotyczą stanu stacjonarnego. Otrzymywane pole prędkości powietrza może nie spełniać zasady zachowania masy, jako że nie jest ono rozwiązaniem kompletnego układu równań opisującego procesy przepływu. W modelach diagnostycznych pole prędkości otrzymane w wyniku interpolacji należy dopasować tak, aby wynikowe pole prę-

<sup>23</sup> N.L. Seaman, *Meteorological modeling for air-quality assessments*, "Atmospheric Environment", 34, 2000, s. 2231-2259, doi: 101016/S1352-2310(99)00466-5.

kości spełniało równanie ciągłości. Do tego celu najczęściej stosuje się jeden z algorytmów: bezpośredniego różniczkowania, punktowo-iteracyjny, hybrydowy lub rachunku wariacyjnego<sup>24</sup>. W prezentowanym modelu do wyznaczania pola prędkości powietrza stosowano autorską implementację algorytmu wariacyjnego.

Podstawą algorytmu jest rozwiązanie zadania minimalizacji funkcjonu odwzorowującego różnicę pomiędzy początkowym (wynikającym z pomiarów) a dopasowanym (spełniającym równanie ciągłości) polem prędkości. W wyniku rozwiązania zadania minimalizacji otrzymuje się równanie różniczkowe o pochodnych cząstkowych, typu eliptycznego. Dokładny opis metody, podobnie jak szczegółowe postępowanie, skrótkowo omówione poniżej, wraz z modelem matematycznym można znaleźć w Brzozowska<sup>25</sup>, a walidację modelu także w Brzozowska<sup>26</sup>.

Główne etapy postępowania podczas wyznaczania pola prędkości powietrza przedstawiono na rysunku 3.



Rysunek 3. Główne etapy postępowania w stosowanym modelu diagnostycznym

<sup>24</sup> G.F. Homicz, *Three-dimensional wind field modeling: a review*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, SAND Report 2002, <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2002/022597.pdf>

<sup>25</sup> L. Brzozowska, *Modelowanie skutków uwolnień substancji niebezpiecznych w transporcie drogowym*, Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej, Rozprawy naukowe nr 55, Bielsko-Biała 2015.

<sup>26</sup> L. Brzozowska, *Validation of a Lagrangian particle model*, "Atmospheric Environment", 70, 2013, s. 218-226, doi:10.1016/j.atmosenv.2013.01.015.



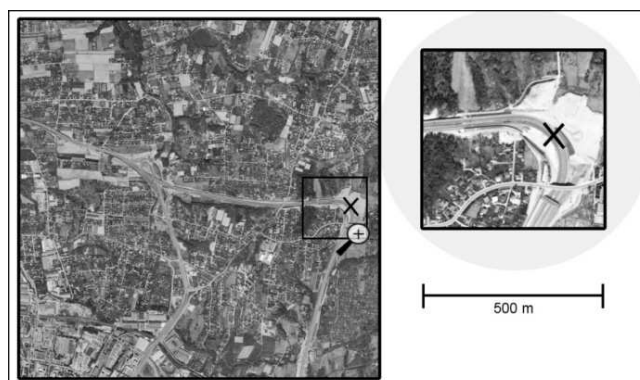
Pierwszy z etapów obejmuje aproksymację ukształtowania terenu za pomocą ciągłej funkcji  $s$ , następnie trójwymiarowy obszar  $\Omega$ , w którym poszukiwane jest rozwiązanie, można zredukować, poprzez zastosowanie współrzędnych dopasowanych (konforemnych), do jednostkowego sześcianu  $\Omega'$ . W sześcianie tym powierzchnia terenu jest powierzchnią poziomą. Znacznie upraszcza to proces budowania siatki dyskretyzacyjnej, komplikując jednak dyskretną reprezentację podstawowych równań. W obu prezentowanych modelach numerycznych możliwe jest stosowanie siatek o nierównoległych węzłach. Daje to szczególnie pozytywne efekty, jeśli chodzi o efektywność numeryczną opracowanych algorytmów, w szczególności przy modelowaniu dyspersji zanieczyszczeń w obszarach o złożonej topografii. Możliwe jest zagęszczanie siatki w pobliżu budynków, wzniesień, czy obniżen terenu.

#### 4. Modelowanie zagadnień związanych z nagłą emisją związków szkodliwych i dymu – przykłady zastosowania programu autorskiego

##### 4.1. Modelowanie skutków pożaru cysterny w obszarze zabudowanym

Przykładem zastosowania prezentowanego programu komputerowego jest szczegółowa analiza skutków pożaru cysterny w obszarze zabudowanym jak na rysunku 4<sup>27</sup>. Analizowano sytuację, w której maksymalna wartość natężenia emisji kształtowała się na poziomie 60 g/s. Założono przy tym, że propagacja dymu trwa 60 minut, a jej przebieg opisuje krzywa Gaussa.

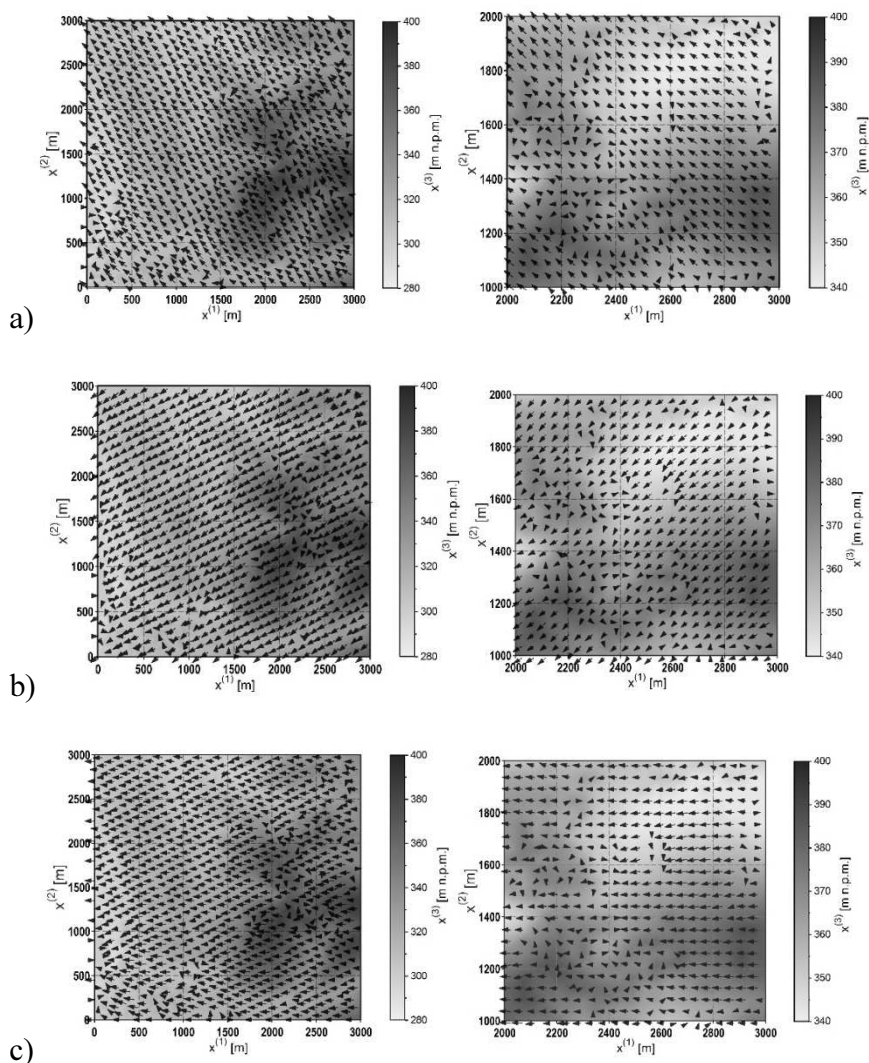
Symulacje wykonywano dla kilku wariantów warunków meteorologicznych, związanych głównie z kierunkiem przepływu powietrza w stosunku do osi poziomej – P1:  $\alpha = 140^\circ$ , P2:  $\alpha = 219^\circ$ , P3:  $\alpha = 180^\circ$ . Prędkość wiatru wynosiła 2,06 m/s.



Rysunek 4. Mapa Bielska-Białej, modelowany obszar zaznaczono prostokątem, miejsce wypadku krzyżykiem (źródło: google.maps)

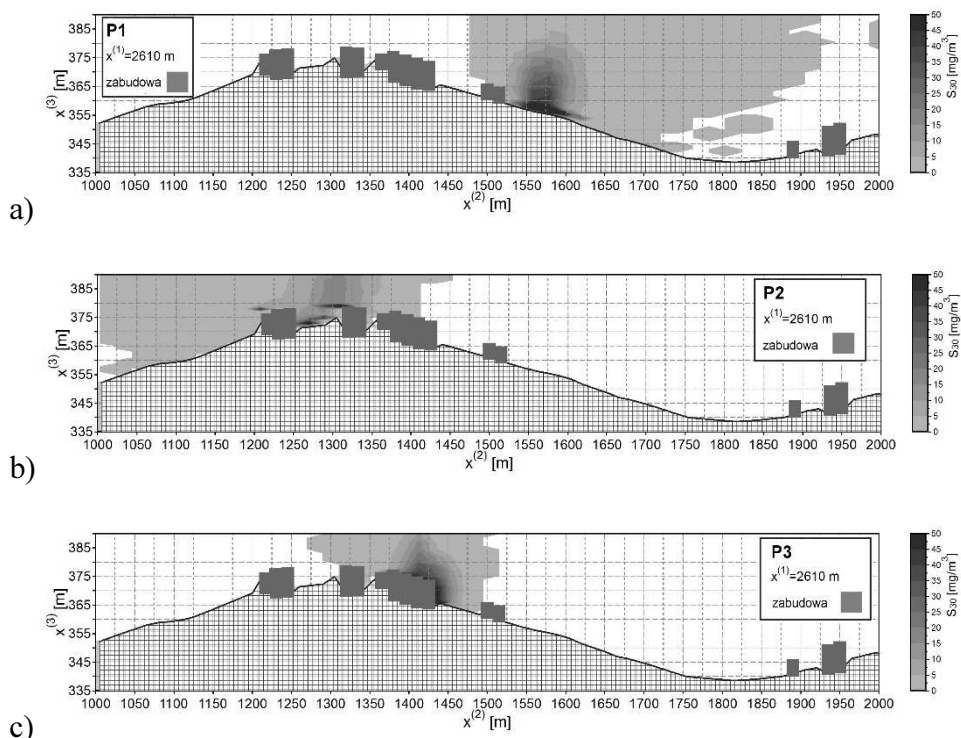
<sup>27</sup> L. Brzozowska, *Modelowanie skutków uwolnień substancji niebezpiecznych w transporcie drogowym*, Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej, Rozprawy naukowe nr 55, Bielsko-Biała 2015; L. Brzozowska, *Modelling the propagation of smoke from a tanker fire in a built-up area*, "Science of the Total Environment", 2014, 472, s. 901-911, doi: 10.1016/j.scitotenv. 2013.11.130.

Na rysunku 5 przedstawiono pole prędkości powietrza na wysokości trzeciej warstwy dyskretyzacyjnej dla analizowanych przypadków.



Rysunek 5. Pole prędkości wiatru w modelowanym obszarze oraz dla fragmentu obszaru w otoczeniu źródła emisji, na trzeciej warstwie siatki dyskretyzacyjnej, maksymalna wartość wektora prędkości to 4 m/s (najdłuższa strzałka): a) w przypadku P1, b) w przypadku P2, c) w przypadku P3

Na kolejnych rysunkach (rysunek 6) przedstawiono stężenia zanieczyszczeń w przekroju pionowym wzdłuż osi poziomej  $x^{(2)}$  dla trzech analizowanych przypadków kierunku wiatru.



Rysunek 6. Rozkład stężenia dymu w wybranych przekrojach w osi  $x^{(2)}$  w czasie  $t = 1500$  s, w przypadku: a) P1, b) P2, c) P3

Jak można zauważyć, zdecydowanie najwięcej zabudowań znajduje się pod wpływem chmury dymu w przypadku P2, gdy kierunek wiatru wynosi  $\alpha = 219^\circ$  (wiatr północno-zachodni). Chmura dymu przykrywa mniejszy sumaryczny obszar zabudowany w przypadku P3, nie brano jednak pod uwagę w obliczeniach samej drogi jako obszaru zabudowanego – przypadku P3 oś smugi dymu pokrywa się z osią jezdni, na której wydarzył się wypadek. Natomiast w pierwszym przypadku na działanie dymu (stężenia  $\geq 2$  mg/m<sup>3</sup>) narażone były przede wszystkim tereny leśne, sady i zarośla.

W przypadku pierwszym, w czasie największego natężenia emisji, nie stwierdzono wartości stężenia powyżej 5 mg/m<sup>3</sup> w obszarze zabudowanym, w przypadku drugim takie wartości stężenia występowały na obszarze o sumarycznej powierzchni 11 900 m<sup>2</sup>, natomiast w przypadku trzecim na obszarze 3800 m<sup>2</sup>. Również w drugim przypadku zaobserwowano występowanie stężenia o wartościach

$> 10 \text{ mg/m}^3$ , w obszarze zabudowanym o łącznej powierzchni  $4950 \text{ m}^2$  i około  $900 \text{ m}^2$  w przypadku P3. Po godzinie od rozpoczęcia symulacji (pożaru) maksymalne wyznaczone stężenia na terenie zabudowanym wynosiły:  $1 \text{ mg/m}^3$  w przypadku P1, natomiast w przypadku P2 –  $9 \text{ mg/m}^3$  oraz  $3 \text{ mg/m}^3$  w przypadku P3.

## 5. Podsumowanie

Modelowanie propagacji zanieczyszczeń powodowanych transportem stanowi element szerszej problematyki, na jaką składa się bezpieczeństwo ludzi i środowiska, analiza ryzyka, transport miejski (w tym materiałów niebezpiecznych), wspomaganie podejmowania decyzji służb ratowniczych i inne.

W artykule przedstawiono model numeryczny łączący w sobie zalety modeli mikro- i mezoskalowych. Szczegółowość modelu, w tym możliwość opisu terenu, na którym znajdują się zabudowania, osiągnięto dzięki zastosowaniu funkcji odzwierciedlającej ukształtowanie powierzchni. Funkcja ta jest stosowana zarówno w modelu pola prędkości powietrza, jak i dyspersji. Oba moduły: pola prędkości powietrza oraz dyspersji zanieczyszczeń zostały poddane walidacji i weryfikacji<sup>28</sup>, a wyniki otrzymane w programie własnym były porównywane z tymi otrzymanymi w programie ALOHA<sup>29</sup>. Wyniki okazały się zgodne.

Zastosowanie prezentowanego programu i modeli numerycznych jest bardzo szerokie – od analiz teoretycznych propagacji związków szkodliwych czy dymu, po możliwość wyznaczania stref zagrożenia w czasie rzeczywistym, w przypadku wystąpienia wypadku drogowego z udziałem pojazdów przewożących substancji niebezpiecznych.

## Bibliografia:

- Alhajraf S., Al-Awadhi L., Al-Fadala S., Al-Khubaizi A., Khan A.R., Baby S., *Real-time response system for the prediction of the atmospheric transport of hazardous materials*, "Journal of Loss Prevention in the Process Industries" 18, 2005.
- Brzozowska L. *Modelowanie skutków uwolnień substancji niebezpiecznych w transporcie drogowym*, Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej, Rozprawy naukowe nr 55, Bielsko-Biała 2015.
- Brzozowska L., *Zastosowanie autorskich modeli komputerowych w zagadnieniu bezpieczeństwa ruchu drogowego: kolizja cysterny z chlorem*, „Logistyka” 3, 2015.
- Brzozowska L., *Evaluation of a Diagnostic Model of an Air Velocity Field: The Must Wind Tunnel Case*, "Environmental Modeling and Assessment" 20 2015, s. 71-82, doi: 10.1007/s10666-014-9422-6 (IF: 0,98).

---

<sup>28</sup> L. Brzozowska, *Evaluation of a Diagnostic Model of an Air Velocity Field: The Must Wind Tunnel Case*, "Environmental Modeling and Assessment" 20 2015, s. 71-82, doi: 10.1007/s10666-014-9422-6 (IF: 0,98); L. Brzozowska, *Validation of a Lagrangian particle model*, "Atmospheric Environment", 70, 2013, s. 218-226, doi:10.1016/j.atmosenv.2013.01.015.

<sup>29</sup> L. Brzozowska, *Zastosowanie autorskich modeli komputerowych w zagadnieniu bezpieczeństwa ruchu drogowego: kolizja cysterny z chlorem*, „Logistyka” 3, 2015, s. 602-609; L. Brzozowska, R.Dunat, *Przykłady zastosowanie autorskiego programu komputerowego do modelowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w zagadnieniach ruchu drogowego*, „Logistyka”, 5, 2014, s. 162-171.

- Brzozowska L., *Validation of a Lagrangian particle model*, "Atmospheric Environment", 70, 2013, s. 218-226, doi:10.1016/j.atmosenv.2013.01.015.
- Brzozowska L., *Modelling the propagation of smoke from a tanker fire in a built-up area*, "Science of the Total Environment", 2014, 472, s. 901-911, doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.11.130.
- Brzozowska L., *Symulacja rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń gazowych uwolnionych podczas zdarzenia drogowego*, „Logistyka” 3, 2012.
- Brzozowska L., *Wybrane aspekty numerycznego modelowania dyspersji zanieczyszczeń*, „TTS Technika Transportu Szynowego”, 9, 2012.
- Brzozowska L., Dunat R., *Przykłady zastosowanie autorskiego programu komputerowego do modelowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w zagadnieniach ruchu drogowego*, „Logistyka”, 5, 2014.
- Chakrabarti U.K., Parikh J.K., *Risk-based route evaluation against country-specific criteria of risk tolerability for hazmat transportation through Indian State Highway*, "Journal of Loss Prevention in the Process Industries", 26, 2013.
- Chakraborty J., Armstrong M.P., *Using geographic plume analysis to assess community vulnerability to hazardous accidents*, "Computers, Environment and Urban Systems", 19, 1995.
- Ermak L.D., Sugiyama G., Nasstrom J.S., *Atmospheric release assessment program (ARAP) science and technology base development*, Lawrence Livermore National Laboratory 2002, UCRL-JC-148.
- Fabiano B., Curro F., Reverberi A.P., Pastorino R., *Dangerous good transportation by road: from risk analysis to emergency planning*, "Journal of Loss Prevention in the Process Industries", 18, 2005, s. 403-413, doi: 10.1016/j.jlp.2005.06.031.
- HPAC, 2005. *HPAC 4.04 Help Manual*, Defense Threat Reduction Agency (DTRA), April, 2005, ftp.atdd.noaa.gov/pub/gunter/hpac\_404\_users\_manual.pdf.
- Homicz G.F., *Three-dimensional wind field modeling: a review*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, SAND Report 2002, <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2002/022597.pdf>.
- Koniuch A., Czapla R., *Nowe narzędzia do rozpoznawania zagrożeń*, „Przegląd Pożarniczy”, 1, 2013.
- Lenoble C., Durand C., *Introduction of frequency in France following the AZF accident*, "Journal of Loss Prevention in the Process Industries", 24, 2011, doi: 10.1016/j.jlp.2010.09.003.
- McGrattan K., Klein B., Hostikka S., *Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide*, U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, October 2007.
- NOAA, *NOAA Technical Memorandum NOS OR&R 43 ALOHA® (Areal Locations of hazardous Atmospheres) 5.4.4*, Technical Documentations, Seattle, Washington, November 2013.
- Quaranta N., DeMartini A., Bellasio R., Bianconi R., Marioni M., *A decision support system for the simulation of industrial accidents*, "Environmental Modelling and Software", 17, 2002, s. 497-504, doi:101016/S1364-8152(02)00018-X.
- Scenna N.J., Santa Cruz A.S.M., *Road risk analysis due to the transportation of chlorine in Rosario city*, "Reliability Engineering and System Safety", 90, 2005, s. 83-90, doi:101016/j.res.2004.11.004.
- Seaman N.L., *Meteorological modeling for air-quality assessments*, "Atmospheric Environment", 34, 2000, s. 2231-2259, doi: 101016/S1352-2310(99)00466-5.

- Spadoni G., Egidi D., Contini S., *Through ARIPAR-GIS the quantified area risk analysis supports land-use planning activities*, "Journal of Hazardous Materials", 71, 2000.
- Tena-Chollet F., Tixier J., Dusserre G., Mangin J.-F *Development of a spatial risk assessment tool for the transportation of hydrocarbons: Methodology and implementation in a geographical information system*, "Environmental Modelling & Software", 46, 2013, doi: 101016/jenvsoft201302010.
- Zhao L., Wang X., Qian Y., *Analysis of factors that influence hazardous material transportation accidents based on Bayesian networks: A case study in China*, "Safety Science", 50, 2012, doi:101016/jssci201112003.

### **Abstract**

#### **Safety in road transport – modeling the consequences of major accidents**

The aim of the study is to identify the main problems of modeling the effects of major failures in the aspect of safety in road transport. The problem of security in relation to road transport is a complex issue, which consists of both the modeling of the effects of vehicle maintenance and emergency releases of hazardous substances arising as a result of road accidents. In this paper we focus on the second one.

**Keywords:** computer modeling, dispersion of pollutants, road transport, decision systems, sudden releases