

BRZozowska Lucyna¹

Symulacja rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń gazowych uwolnionych podczas zdarzenia drogowego

awarie, modelowanie rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń,
Lagrangeowski model cząstek, model diagnostyczny,
transport, transport drogowy,

Streszczenie

Jednym z istotnych zagadnień związanych z transportem, jest analiza zdarzeń będących skutkiem katastrof kolejowych lub drogowych. W wyniku takich wypadków do atmosfery przedostają się zanieczyszczenia, które mogą być transportowane przez wiatr na znaczne odległości, ulegać dalszym przemianom bądź osiadać na podłożu, a przy dużych stężeniach powodować istotne zagrożenie dla ludzi, zwierząt i roślin.

W pracy przedstawiono model diagnostyczny do symulacji numerycznej umożliwiający określenie pola prędkości powietrza na podstawie danych ze stacji pomiarowych. Zadania rozwiązano metodą różnic skończonych różnoodległych. Następnie określono stężenia w otoczeniu miejsca nagłego uwolnienia zanieczyszczeń stosując Lagrangeowski model cząstek. Wykonano symulacje numeryczne hipotetycznych sytuacji awaryjnych i przedstawiono wyniki obliczeń i analizy w zakresie określenia wpływu konfiguracji terenu na stężenia zanieczyszczeń w obszarze przyległym do miejsca zdarzenia.

SIMULATION OF PROPAGATION GASEOUS POLLUTANTS RELEASED DURING A ROAD ACCIDENT

Abstract

One of the important issues relating to transport, is to develop models for the numerical analysis of the events that result from road or railway accidents. As a result of such accidents the pollutants are released to air. They can be transported by wind over long distances, undergo further transformations or deposited on the ground. High concentrations of pollutants can cause a significant hazard to humans, animals and plants. A model for numerical simulation allows to determine the air velocity field. Diagnostic model was formulated and the finite difference method was applied. The sudden release of contaminants is considered. The movement of pollutants were simulated using the Lagrange's particles model. Numerical simulations of hypothetical emergency situations are considered. The results of calculations and analysis of influence the impact on the concentration of pollutants in the neighboring area are discussed as well.

1. WSTĘP

Ważnym zagadnieniem z grupy podstawowych problemów związanych z modelowaniem rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń pochodzenia motoryzacyjnego, jest symulacja propagacji dymu w wyniku nagłego wypadku na drodze. Taka sytuacja może mieć miejsce gdy następuje nagłe zapalenie się pojazdu oraz przewożonego ładunku. Szczególnym przypadkiem jest zapłon cysterny z paliwem, który można określić mianem poważnej awarii. W myśl ustawy Prawo Ochrony Środowiska [13] pod pojęciem *Poważna Awaria* rozumie się „zdarzenie, w szczególności emisję, pożar lub eksplozję, powstałe w trakcie procesu przemysłowego, magazynowania lub transportu, w których występuje jedna lub więcej niebezpiecznych substancji, prowadzące do natychmiastowego powstania zagrożenia życia lub zdrowia ludzi lub środowiska lub powstania takiego zagrożenia z opóźnieniem”. Z pojęciem tym wiąże się zwykle *Strefę zagrożenia* rozumianą jako przestrzeń, w której może wystąpić zagrożenie dla zdrowia lub życia ludzi, bądź zniszczenia lub strat środowiska naturalnego i jego elementów. Stopień negatywnego wpływu na środowisko zależy między innymi od rodzaju, ilości lub intensywności czynnika zagrażającego, a także sposobu emisji tego czynnika, natężenia emisji i zasięgu. Istotne przy ocenie zagrożenia dla środowiska jest również uwzględnienie stanu początkowego samego środowiska, jego wartości dla ludzi i spełnianych funkcji.

Do symulacji rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń stosowane są różne modele analityczne i numeryczne. Do najczęściej stosowanych modeli analitycznych należą Gaussowskie modele obłoku, Gaussowskie modele smugi oraz modele Eulerowskie. Natomiast do modeli numerycznych można zaliczyć modele z domknięciem I rzędu (teorii K), modele z domknięciem II rzędu i wyższych, modele z domknięciem poprzez model turbulencji oraz symulacji wielkowirowej. Przegląd tych modeli przedstawiono w pracy [1]. W pracy tej, jak i w niniejszej publikacji, ze względu na dobrą efektywność numeryczną oraz łatwość implementacji komputerowej stosowano model z grupy modeli z domknięciem I rzędu – własną modyfikację Lagrangeowskiego modelu cząstek. Ważnym atutem tego modelu jest powiązanie z diagnostycznym modelem pola prędkości powietrza, stosowanym również w niniejszej publikacji.

¹Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, tel.: 338297289, e-mail: lbrzozowska@ath.eu

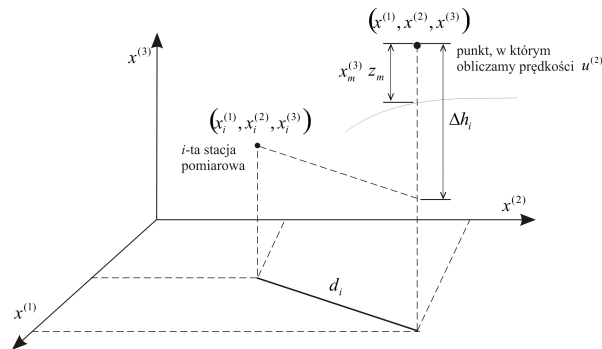
2. DIAGNOSTYCZNY MODEL POLA PRĘDKOŚCI POWIETRZA

Jedną z metod określania przestrzennego pola prędkości powietrza jest interpolacja danych pomiarowych pozyskiwanych ze stacji meteorologicznych w modelowanym obszarze Ω .

Dla znanych składowych wektora prędkości powietrza \mathbf{u}_i w n_w punktach wewnątrz modelowanego obszaru Ω , w wyniku interpolacji można otrzymać początkowe pole prędkości powietrza na wysokości $x_m^{(3)}$ [8,9]:

$$\mathbf{u}_0(x^{(1)}, x^{(2)}, x_m^{(3)}) = \varepsilon \frac{\sum_{i=1}^{n_w} \frac{\mathbf{u}_i}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^{n_w} \frac{1}{d_i^2}} + (1 - \varepsilon) \frac{\sum_{i=1}^{n_w} \frac{\mathbf{u}_i}{|\Delta h_i|}}{\sum_{i=1}^{n_w} \frac{1}{|\Delta h_i|}}, \quad (1)$$

gdzie d_i jest poziomą odległością i -tej stacji pomiarowej do punktu, w którym oblicza się prędkość wiatru, Δh_i jest różnicą wysokości stacji i oraz punktu, ε jest parametrem wagowym ($0 \leq \varepsilon \leq 1$) (rys. 1).



Rys. 1. Odległość pozioma d_i i różnica wysokości h_i

W kolejnym kroku dla każdego węzła siatki dyskretyzacyjnej, w którym nieznaną jest wektor prędkości, jest on obliczany według pionowego profilu prędkości $\mathbf{u}_0(x^{(3)})$ przy zastosowaniu równania (2):

$$\mathbf{u}_0(x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)}) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \frac{x^{(3)}}{x_0^{(3)}} - \Psi_u \left(\frac{x^{(3)}}{L_*} \right) + \Psi_u \left(\frac{x_0^{(3)}}{L_*} \right) \right], \quad (2)$$

gdzie L_* jest skalą długości Monina-Obuchowa, κ to stała Karmana, u_* jest prędkością dynamiczną, Ψ_u to funkcja zależna od klasy stabilności atmosfery [2,10,12].

Pole prędkości początkowej powietrza \mathbf{u}_0 , obliczane według powyższych wzorów, na ogół nie spełnia równania ciągłości (3):

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \text{ w } \Omega, \quad (3)$$

Przeprowadza się zatem proces dopasowywania \mathbf{u}_0 opisany poniżej.

Aby spełnione było równanie ciągłości w każdym punkcie siatki dyskretyzacyjnej można stosować jedną z czterech metod: bezpośredniego różniczkowania, punktowo-iteracyjną, hybrydową lub rachunek wariacyjny [4]. Przy czym ostatnia metoda jest najbardziej popularna i została zastosowana również w niniejszej pracy.

Poszukiwane są składowe wektora prędkości w całym obszarze $\bar{\mathbf{u}} = [\bar{u}^{(1)}, \bar{u}^{(2)}, \bar{u}^{(3)}]^T$ takie, że spełnione jest równanie ciągłości, przy czym dopasowane pole prędkości musi być możliwie bliskie polu wejściowemu \mathbf{u}_0 .

W celu dopasowania pola prędkości w obszarze Ω można sformułować zadanie w sensie najmniejszych kwadratów w postaci:

$$E(\bar{\mathbf{u}}) = \int_{\Omega} \left[\sum_{l=1}^3 \alpha^{(l)2} (\bar{u}^{(l)} - u_0^{(l)})^2 \right] d\Omega \rightarrow \min, \quad (5)$$

gdzie $\alpha^{(1)} = \alpha^{(2)}, \alpha^{(3)}$ to współczynniki wagowe.

Po wprowadzeniu mnożników Lagrangea $\phi(x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)})$ zadanie jest równoważne minimalizacji funkcjonału postaci [1,4]:

$$E(u^{(1)}, u^{(2)}, u^{(3)}, \phi) = \int_{\Omega} \left[\sum_{l=1}^3 \alpha^{(l)2} (\bar{u}^{(l)} - u_0^{(l)})^2 + \phi \nabla \cdot \mathbf{u} \right] d\Omega. \quad (6)$$

Po przekształceniach opisanych szczegółowo w [1] zadanie sprowadza się do rozwiązania równania Poissona postaci:

$$\sum_{l=1}^2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^{(l)2}} + \frac{T^{(3)}}{T^{(1,2)}} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^{(3)2}} = -\frac{1}{T^{(1,2)}} \sum_{l=1}^3 \frac{\partial u_0^{(l)}}{\partial x^{(l)}}. \quad (7)$$

gdzie $T^{(l)} = \frac{1}{2\alpha^{(l)2}}$, przy czym $T^{(1)} = T^{(2)} = T^{(1,2)}$.

Mając rozwiązanie powyższego równania można przyjąć, że wielkości $u^{(1)}, u^{(2)}, u^{(3)}$, które spełniają już równanie ciągłości określa się ze wzorów:

$$u^{(l)} = u_0^{(l)} + T^{(l)} \frac{\partial \phi}{\partial x^{(l)}}, \quad (8)$$

Przy rozwiązywaniu równania (7) przyjmuje się odpowiednie warunki brzegowe dla funkcji ϕ . Dirichleta na brzegach w przypadku swobodnego przepływu i Neumana na powierzchni tereny oraz górnej płaszczyźnie – na wysokości warstwy mieszania, zamykającej obszar.

Rozwiązanie równania (7) z odpowiednimi warunkami brzegowymi otrzymuje się dla współrzędnych prostokątnych lub po przyjęciu współrzędnych dopasowanych do powierzchni obszaru, w którym poszukiwane jest pole prędkości powietrza. W niniejszej pracy zastosowano postępowanie przedstawione szczegółowo w pracy [1]. Trójwymiarowy obszar Ω , w którym poszukiwane jest rozwiązanie, poprzez zastosowanie współrzędnych dopasowanych (konforemnych) redukuje się do jednostkowego sześcianu Ω' , w którym powierzchnia terenu jest powierzchnią poziomą. Takie postępowanie upraszcza proces budowania siatki dyskretyzacyjnej, komplikując jednak dyskretną reprezentację równania (7). W wyniku szeregu przekształceń opisanych w [1] z zastosowaniem metody różnic skończonych, otrzymuje się $n = n^{(1)} \cdot n^{(2)} \cdot (n^{(3)} + 2)$ równań algebraicznych liniowych w ogólnej postaci macierzowej:

$$\mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\phi} = \mathbf{f} \quad (8)$$

gdzie: $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{\Omega'} & \mathbf{B}_{\Omega'} \\ \mathbf{A}_{\Gamma'} & \mathbf{B}_{\Gamma'} \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\phi}_{\Omega'} \\ \boldsymbol{\phi}_{\Gamma'} \end{bmatrix}$, $\mathbf{f} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{\Omega'} \\ \mathbf{f}_{\Gamma'} \end{bmatrix}$, macierz $[\mathbf{A}_{\Omega'} \mathbf{B}_{\Omega'}]$ jest macierzą rzadką, $\boldsymbol{\phi}_{\Omega'}$ – jest wektorem zawierającym niewiadome wartości $\phi_{i^{(1)}, i^{(2)}, i^{(3)}}$ dla $i^{(l)} = 1, \dots, n^{(l)}$, $\boldsymbol{\phi}_{\Gamma'}$ – jest wektorem zawierającym niewiadome wartości $\phi_{i^{(1)}, i^{(2)}, 0}$ oraz $\phi_{i^{(1)}, i^{(2)}, n^{(3)}+1}$ dla $i^{(1)} = 1, \dots, n^{(1)}$, $i^{(2)} = 1, \dots, n^{(2)}$,

których rozwiązanie umożliwia wyznaczenie ϕ oraz wobec (8) $u^{(1)}, u^{(2)}, u^{(3)}$ w węzłach siatki dyskretyzacyjnej.

3. LAGRANGEOWSKI MODEL CZĄSTEK

Jak wspomniano wcześniej w niniejszej publikacji do symulacji rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń została wykorzystana autorska implementacja lagrangeowskiego modelu cząstek. Podstawowym równaniem opisującym proces rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze dla modeli tego typu jest równanie w postaci [6,10]:

$$S(\mathbf{r}, t) = \int_{\Omega=-\infty}^t \int p(\mathbf{r}, t | \mathbf{r}', t') I(\mathbf{r}', t') dt' d\mathbf{r}', \quad (9)$$

gdzie: $S(\mathbf{r}, t)$ – stężenie zanieczyszczenia uśrednione w punkcie \mathbf{r} dla czasu t
 $I(\mathbf{r}', t')$ – człon opisujący źródło emisji,
 $p(\mathbf{r}, t | \mathbf{r}', t')$ – funkcja gęstości prawdopodobieństwa, że hipotetyczna objętość powietrza znajdująca się w chwili t' w punkcie \mathbf{r}' znajdzie się w chwili t w punkcie \mathbf{r} .

Położenie cząstki w przestrzeni jest zdeterminowane poprzez wektor średniej prędkości powietrza $\bar{\mathbf{u}}$ oraz prędkości turbulentnej (pulsacyjnej) \mathbf{u}' . Prędkość pulsacyjną można opisać za pomocą modeli deterministycznych lub stochastycznych, w drugim przypadku najczęściej w oparciu o metodę Monte Carlo. Zachowanie cząstki jest wtedy jedną z wielu możliwych realizacji z nieskończonego zbioru możliwości. W niniejszej pracy zastosowano właśnie implementację takiego modelu. Kompletny model ruchu cząstek wymaga także odpowiedniego algorytmu ujmującego zmianę prędkości cząstki w przypadku odbicia od górnej granicy warstwy mieszania i powierzchni terenu.

W prezentowanym modelu przyjęto ogólny schemat postępowania:

1. Wyznaczenie pola prędkości średniej $\bar{\mathbf{u}}$ w węzłach siatki, z wykorzystaniem modelu diagnostycznego;
2. Obliczenie Lagrangeowskich skalarów czasowych $T_{L,u}$, $T_{L,v}$, $T_{L,w}$ i wielkości σ_u , σ_v , σ_w , występujących we wzorach, koniecznych do określenia prędkości turbulentnej \mathbf{u}' (występują w macierzy definiującej autoregresyjny składnik $\psi \cdot \mathbf{u}'_n$ w procesie Markowa), w węzłach siatki, zastosowanej do wyznaczenia wektora prędkości $\bar{\mathbf{u}}$.
3. Obliczenie wszystkich wielkości w punktach pozawęzłowych.

Położenie cząstki w przestrzeni można oznaczyć jako:

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (7.3)$$

a wektory prędkości cząstki, średniej (zdeterminowanej, otrzymywanej w wyniku pomiarów lub obliczeń) $\bar{\mathbf{u}}$, turbulentnej (losowej, wywołanej fluktuacjami pola prędkości powietrza) \mathbf{u}' i całkowitej $\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}'$ odpowiednio:

$$\bar{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \\ \bar{w} \end{bmatrix}, \mathbf{u}' = \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix}, \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}, \quad (7.4)$$

Przyjmuje się, że zarówno pozycja cząstki w przestrzeni, jak i turbulentna prędkość \mathbf{u}' są kierowane przez dyskretny w czasie proces Markowa [7,11]:

$$\mathbf{r}_{n+1} = \mathbf{r}_n + \tau[\bar{\mathbf{u}}(\mathbf{r}_n) + \mathbf{u}'_{n+1}], \quad (7.6.1)$$

$$\mathbf{u}'_{n+1} = \psi(\mathbf{r}_n) \cdot \mathbf{u}'_n + \boldsymbol{\omega}, \quad (7.6.2)$$

gdzie: $\mathbf{r}_n = \mathbf{r}(t_n)$, $\mathbf{r}_{n+1} = \mathbf{r}(t_{n+1})$, $\bar{\mathbf{u}}_n = \bar{\mathbf{u}}(t_n)$, $\mathbf{u}'_{n+1} = \mathbf{u}'(t_{n+1})$, $\mathbf{u}'_n = \mathbf{u}'(t_n)$, $t_{n+1} = t_n + \tau$, τ to krok czasowy, ψ – macierz definiująca autoregresyjny składnik $\psi \cdot \mathbf{u}'_n$ prędkości turbulentnej, a $\boldsymbol{\omega}$ – wektor definiujący częściowo losowy składnik prędkości turbulentnej.

Pełny model matematyczny i opis postępowania można znaleźć w pracy [1].

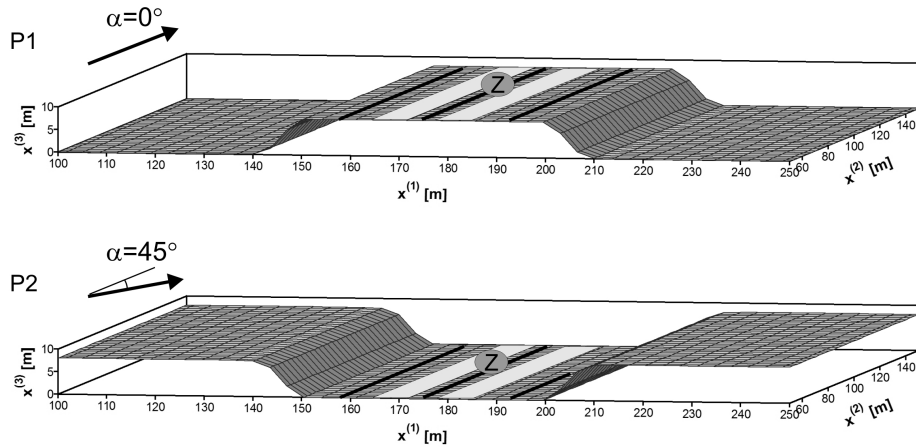
4. SYMULACJA ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ ZANIECZYSZCZEŃ

4.1. Wyznaczenie pola prędkości powietrza

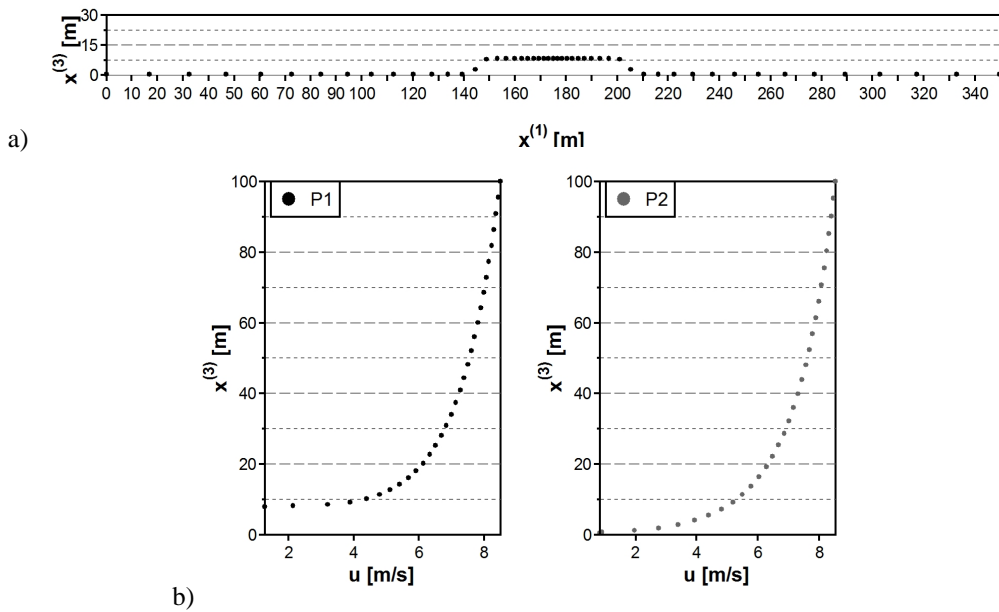
Modelowane jest rozprzestrzenianie się dymu w wyniku zapalenia się cysterny z paliwem w obszarze niezabudowanym dla dwóch różnych ukształtowań niwelety drogi. W pierwszym przypadku P1 droga przebiegała na nasypie, w drugim P2 w wykopie. Wysokość nasypu (lub skarpy) wynosiła 8 m, przy zachowaniu nachylenia 1:1,5 zgodnie z [14]. Rozpatrywano obszar kwadratowy o długości boków 350 m, przy czym droga o szerokości 50 m prowadziła przez środek obszaru, a wypadek i pożar cysterny miał miejsce na drodze w odległości 100 metrów od osi $x^{(1)}$ (rys.2).

Podczas modelowania pola prędkości powietrza rozważano dwa przypadki warunków meteorologicznych: silne przewietrzanie, dla prędkości wiatru 7,07 m/s oraz niewielkie przewietrzanie, dla prędkości wiatru 1,4 m/s. W obu przypadkach i dla różnego położenia drogi (w wykopie lub nasypie) rozpatrywano wiatr wiejący równoległe do drogi i pod kątem 45° do drogi.

Siatkę dyskretyzacyjną przyjęto jako równoodległą w kierunku $x^{(2)}$, natomiast wzdłuż osi $x^{(1)}$ oraz $x^{(3)}$ przyjęto, że węzły siatki są położone w nierównych odstępach, przy czym dla osi $x^{(1)}$ modelowano odległości funkcją paraboliczną, zagęszczając oczka siatki do środka obszaru, a dla osi $x^{(3)}$ za pomocą węzłów Czebyszewa (szczegóły przedstawiono w pracy [1]). Oba rodzaje dyskretyzacji przedstawiono na rys.3

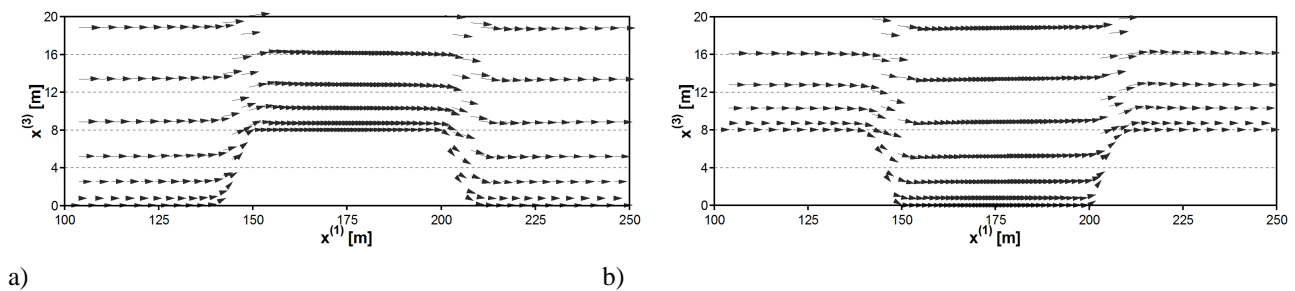


Rys.2. Fragment modelowanego obszaru, warianty ukształtowania terenu, przyjmowane kąty wektora wiatru i położenie źródła emisji dymu, P1 – droga na nasypie, P2 – droga w wykopie.



Rys.3. Siatka dyskretyzacyjna: a) wzdłuż osi $x^{(1)}$ z uwzględnieniem powierzchni terenu i b) wzdłuż osi $x^{(3)}$ - początkowy profil prędkości w punktach dyskretyzacji nad nasypem i nad drogą w wykopie gdy prędkość wiatru wynosiła 7,07 m/s, a kąt 45° .

Na rysunku 4 przedstawiono wektor wiatru w płaszczyźnie $x^{(1)}x^{(3)}$ dla $x^{(2)} = 175$ m, dla obu przypadków położenia drogi. W sumie rozważano 4 różne scenariusze meteorologiczne dla dwóch różnych ukształtowań niwelety drogi.

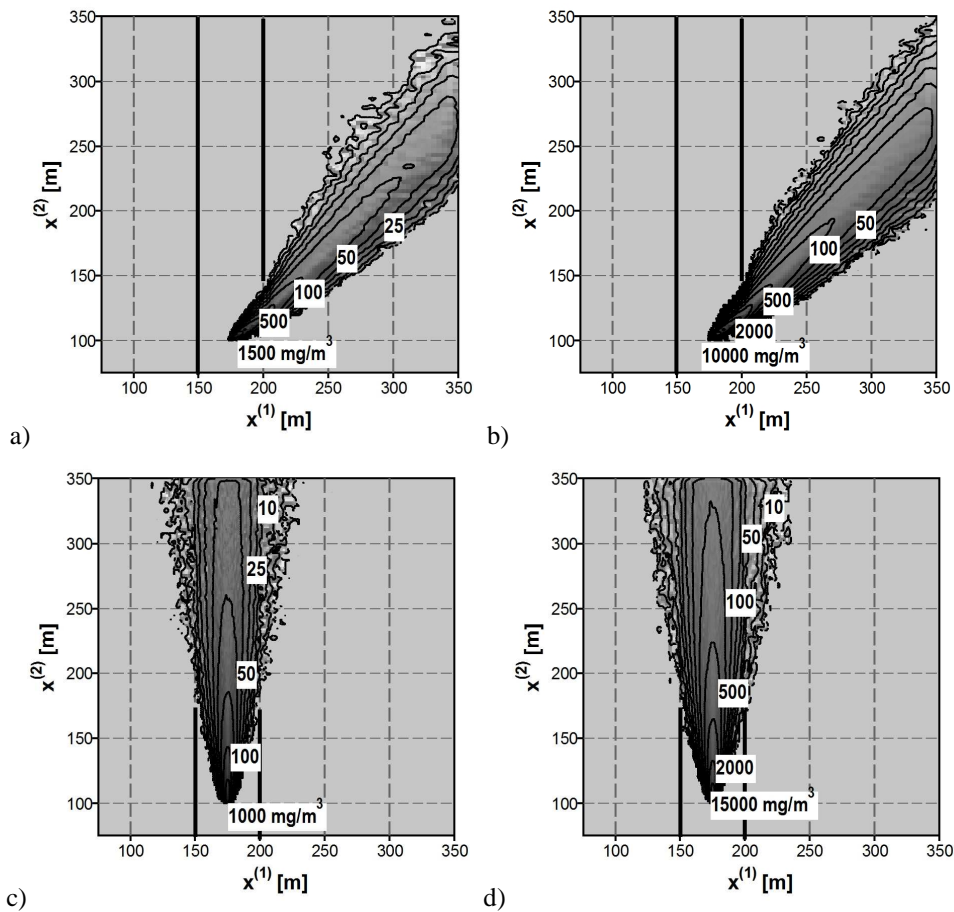


Rys.4. Wektor prędkości wiatru w modelowanym obszarze, dla przypadku a) P1 i b) P2, w przypadku gdy prędkość wiatru wynosiła 7,07 m/s i początkowy kierunek wiatru 45°

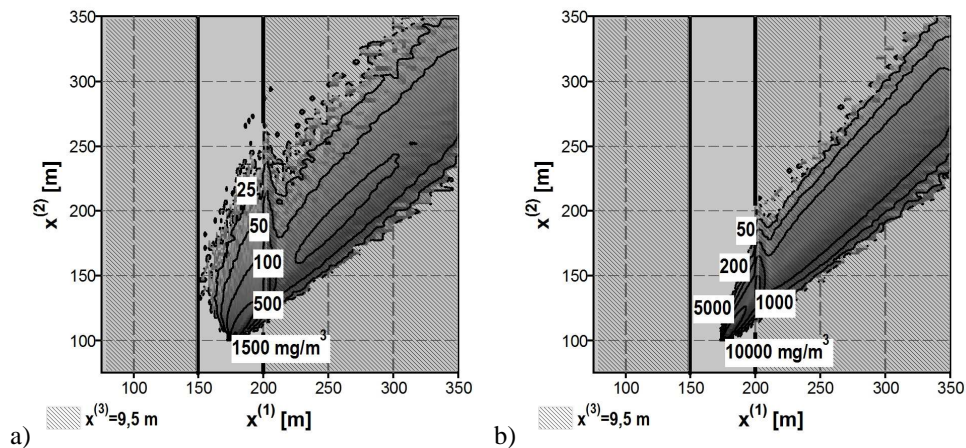
4.2. Symulacja pożaru cysterny w modelowanym obszarze

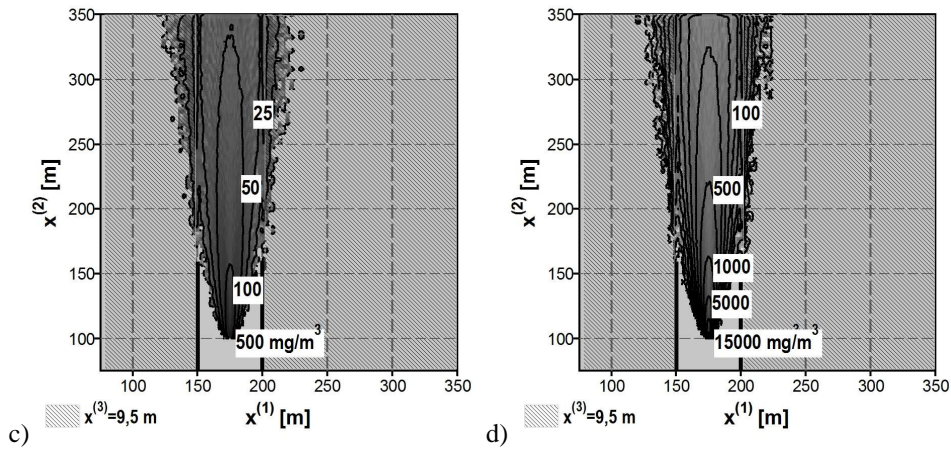
Zgodnie z przedstawionymi w pracy [3] danymi, moc pożaru cysterny z paliwem przyjmowana jest na poziomie 100 MW zarówno przez PIARC / AIPCR (Międzynarodowe Stowarzyszenie Kongresów Drogowych); jak i NFPA (Narodowe Stowarzyszenie Ochrony Przeciwpożarowej), natomiast ilość wydzielanego dymu przy temperaturze 300 °C szacuje się w granicach 140-300 m³/s. W niniejszej pracy przyjęto wartość 200 m³/s, co w przypadku gdy gęstość dymu wynosi 300 mg/m³ [5] daje maksymalną wartość intensywności źródła dymu równą 60 g/s. Założono, że propagacja dymu trwa 45 minut, a jej przebieg jest zgodny z krzywą Gaussa.

Symulację emisji dymu przeprowadzono dla jednej godziny. Dla tego okresu obliczano średnie stężenie na określonej wysokości $x^{(3)}$ lub w konkretnej warstwie nad poziomem terenu. Tak jak w przypadku pola prędkości powietrza rozpatrywano dwa przypadki położenia drogi: na nasypie lub w wykopie.



Rys.5. Rozkład średniego stężenia dymu dla drogi na nasypie na wysokości $x^{(3)}=9,5$ m (1,5 m nad drogą): a) prędkość wiatru 7,07 m/s, kąt 45°, b) prędkość wiatru 1,41 m/s, kąt 0°, c) prędkość wiatru 7,07 m/s kąt 0°, d) prędkość wiatru 1,41 m/s, kąt 0°



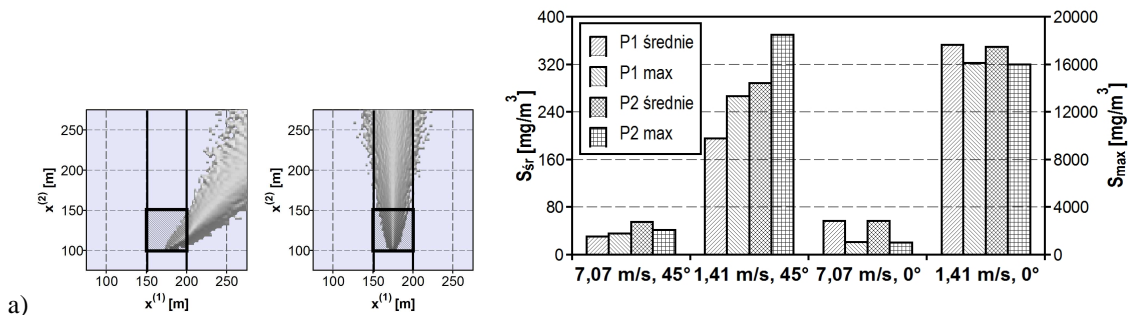


Rys.6. Rozkład średniego stężenia dymu dla drogi prowadzonej w wykopie 1,5 m nad powierzchnią terenu: a) prędkość wiatru 7,07 m/s, kąt 45°, b) prędkość wiatru 1,41 m/s, kąt 45°, c) prędkość wiatru 7,07 m/s, kąt 0°, d) prędkość wiatru 1,41 m/s, kąt 0°.

Na powyższych rysunkach przedstawiono rozkład średnich stężeń dla wiatru wiejącego z różną intensywnością i z różnych kierunków, dla drogi zbudowanej na nasypie, na wysokości $x^{(3)}=9,5$ m (rys.5) oraz dla drogi prowadzonej w wykopie (rys.6). W tym drugim przypadku przedstawiono wyniki obliczeń nie na bezwzględnej wysokości $x^{(3)}$, ale w odniesieniu do ukształtowania terenu (1,5 m nad podłożem).

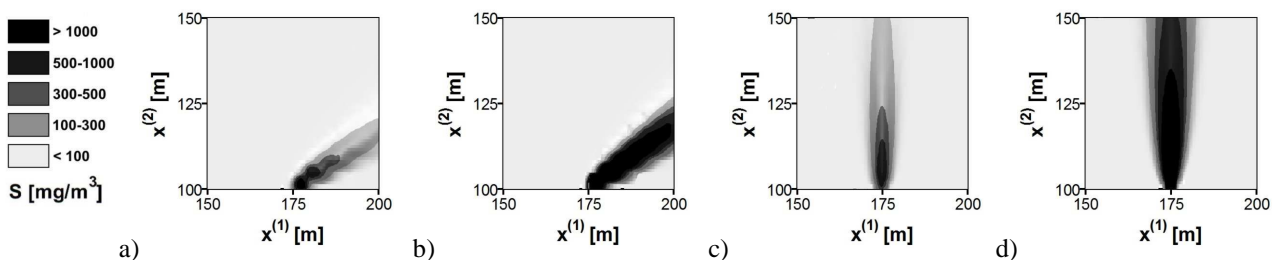
4.3. Analiza wyników symulacji

Średnie i maksymalne stężenie w obszarze $x^{(1)} \in (150,200)$ i $x^{(2)} \in (100,150)$ (rys. 7a) dla analizowanych przypadków zostało przedstawione na rysunku 7.

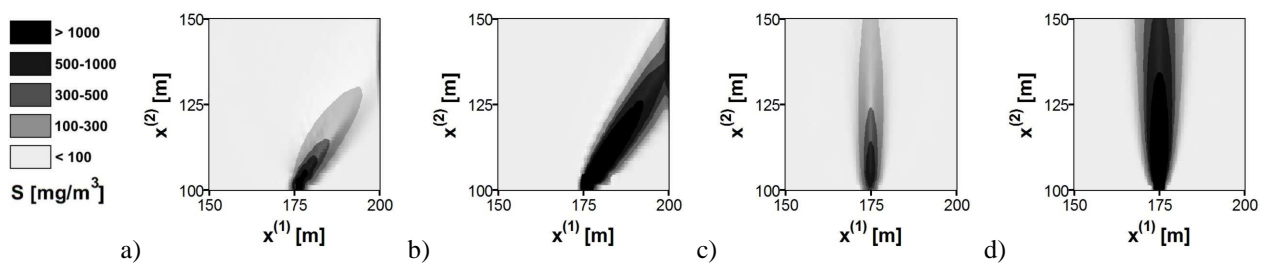


Rys.7. Średnie stężenie w odległości 50 metrów od źródła emisji wzdłuż drogi: a) analizowany fragment obszaru.

W analizowanym fragmencie drogi (rys.7a) wartości bliskie maksymalnym stężeniom zanieczyszczeń występowały w zasadzie wyłącznie w punkcie emisji dymu, natomiast wartości powyżej wartości średniej na obszarze od 250 m² (dla przypadku P1 i gdy prędkość wiatru wynosiła 1,41 m/s, a kąt 45°) aż po obszar bliski 500 m² (dla P2 i kierunku wiatru 45°). Obszar widzialnego dymu ($S > 100$ mg/m³) zajmował od 7 % do 22% analizowanego fragmentu drogi. Tzw. „czarny dym”, można zaobserwować w bezpośrednim sąsiedztwie źródła emisji, w przypadkach gdy prędkość wiatru wynosiła 7,07 m/s (rys.8a, 8c, 9a, 9c), natomiast, gdy prędkość wiatru była dużo mniejsza (1,41 m/s) wartości stężenia dymu powyżej 500 mg/m³ obejmowały znacznie większy obszar.



Rys.8. Obszary o określonym stężeniu dymu w analizowanym fragmencie drogi, przypadek P1: a) $u=7,07$ m/s, kąt 45° b) $u=1,41$ m/s, kąt 45°, c) $u=7,07$ m/s, kąt 0° d) $u=1,41$ m/s, kąt 0°.



Rys.9. Obszary o określonym stężeniu dymu w analizowanym fragmencie drogi, przypadek P1: a) $u=7,07$ m/s, kąt 45° b) $u=1,41$ m/s, kąt 45° , c) $u=7,07$ m/s, kąt 0° d) $u=1,41$ m/s, kąt 0° .

Wyraźnie można zauważyć wpływ położenia drogi na wyniki obliczeń. Usytuowanie w wykopie powoduje (rys.6 i rys.9), że stężenia zanieczyszczeń osiągają, zwłaszcza dla kierunku wiatru 45° , znacznie wyższe wartości. Średnie stężenie na wysokości 1,5 m nad gruntem w analizowanym fragmencie drogi jest prawie dwukrotnie wyższe gdy droga prowadzona jest w wykopie niż na nasypie dla prędkości wiatru 7,07 m/s i 50% wyższe dla prędkości wiatru 1,01 m/s. Położenie drogi powoduje także, że dla nierównoległego do drogi kierunku wiatru zmienia się nieznacznie kąt jaki tworzy oś smugi z linią drogi. W przypadku drogi prowadzonej na nasypie (rys.8a, 8b) kąt jaki tworzy oś smugi z linią drogi wynosi ok. 53° , natomiast gdy droga prowadzona jest w wykopie kąt ten wynosi 33° . Jest to związane ze zmianą kierunku wiatru i jego prędkości na brzegach wykopu bądź za nasypem (rys. 4).

5. WNIOSKI

Przedstawione modele komputerowe, diagnostyczny model pola prędkości powietrza i Lagrangeowski model dyspersji zanieczyszczeń, mogą być stosowane do modelowania zjawisk związanych z nagłymi uwolnieniami zanieczyszczeń gazowych i pyłów, w tym dymu. Pozwalają one na szybkie prognozowanie, na podstawie istniejącego pola prędkości powietrza, stężeń zanieczyszczeń w wybranym obszarze. Otrzymywane mogą być średnie wartości w dowolnym okresie czasu.

Modele te są również przydatne w ocenie wpływu ukształtowania terenu na położenie i wielkość smugi zanieczyszczeń. Jak wykazano, zmiana lokalizacji niwelety drogi może znacząco wpłynąć na propagację zanieczyszczeń. Podobnie, zaobserwowano duży wpływ wartości początkowego pola prędkości powietrza na powstawanie stref o zwiększonym stężeniu, w analizowanym przypadku charakteryzowanym jako „czarny dym”.

Istotnym elementem prezentowanych modeli jest możliwość dostosowania natężenia emisji źródła do dowolnych warunków i określonego, zmiennego jej przebiegu w czasie.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Brzozowska L., Brzozowski K., Drag Ł.: *Transport drogowy a jakość powietrza atmosferycznego. Modelowanie komputerowe w mezoskali*. Warszawa, WKiŁ 2009
- [2] COST Action 710 - Final report: *Harmonisation of the pre-processing of meteorological data for atmospheric dispersion models*. Luxemburg, European Communities 1998
- [3] Fabryczewska A., Chojnacki K.: *Bezpieczeństwo pożarowe w tunelach*. Str.: 24-27, *Geoinżynieria i Tunelowanie* 01/2005 (04) 2005
- [4] Homicz G.F.: *Three-dimensional wind field modeling: a review*. Sandia National Laboratories, Albuquerque, SAND Report 2002-2597 2002
- [5] Li Z. X., Han X., Wang K. S.: *Smoke Features Simulation of Vehicle Fires in Large Cross-Section Road Tunnel*, Shanghai, Tongji University, China, ISGSR2007 First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk 2007
- [6] Markiewicz M.T.: *Podstawy modelowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2004
- [7] Mayer D., Reiczigel J., Rubel F.: *A Lagrangian particle model to predict the airborne spread of foot-and-mouth disease virus*. Pp. 466-479, *Atmospheric Environment* 42 2008
- [8] Montero G., Sanín N.: *3-D modelling of wind field adjustment using finite differences in a terrain conformal coordinate system*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89, 2001, pp. 471-488
- [9] Sanín N., Montero G.: *A finite difference model for air pollution simulation*. Pp. 358-365, *Advances in Engineering Software* 38 2007
- [10] Sorbjan Z.: *Turbulencja i dyfuzja w dolnej atmosferze*. Warszawa, PWN 1983
- [11] Souto M.J., Souto J.A., Pérez-Muñuzuri V., Casares J.J., Bermúdez J.L.: *A comparison of operational Lagrangian particle and adaptive puff models for plume dispersion forecasting*. Pp. 2349-2360, *Atmospheric Environment* 35 2001
- [12] Zannetti P.: *Air pollution modeling. Theories, computational methods and available software*. New York, Van Nostrand Reinhold 1990
- [13] *Ustawa Prawo Ochrony Środowiska z dnia 27 kwietnia 2001 roku*, Dz.U. Nr 62, poz. 627
- [14] *Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej, z dnia 2 marca 1999 r., w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie*, Dz. U. Nr 43, poz. 430