

Sylvia Jędraszko

Mgr inż. Marcin Matusiak

Dr inż. Mariusz Mazurek

Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego

Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Cywilnego

Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie

**MODELOWANIE ZASIĘGU ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ NIEBEZPIECZNYCH ZANIECZYSZCZEŃ  
PYŁOWYCH  $PM_{2,5}$  I  $PM_{10}$  W POWIETRZU GENEROWANYCH PODCZAS POŻARÓW LASÓW****STRESZCZENIE**

*W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących niebezpiecznych zanieczyszczeń pyłowych w powietrzu powstałych podczas pożarów lasów. Szczegółowej analizie poddano frakcje pyłów odpowiadające cząstkom  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$ . Do oceny ryzyka zagrożeń środowiskowych zaproponowano model przenoszenia zanieczyszczeń stałych ze źródeł punktowych. Walidację modelu obliczeniowego przeprowadzono dla testowych pożarów lasów (sosny, brzozy oraz dębu). Na tej podstawie określono wielkość ryzyka zawodowego wśród strażaków biorących udział w akcjach gaśniczych.*

**Słowa kluczowe:** pożary lasów, emisja pyłów  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$ , aparatura pomiarowa, ryzyko zawodowe strażaków

**MIGRATION MODELLING OF DANGEROUS  $PM_{2,5}$  AND  $PM_{10}$  DUST POLLUTANTS IN AIR GENERATED DURING FOREST FIRES****SUMMARY**

*In this work the dangerous dust pollutants in air formed during forest fires were investigated. Fractions of dusts corresponding to the particle matters of  $PM_{2,5}$  and  $PM_{10}$  were subjected to a detailed analysis. The transport model of solid pollutants from the spot sources to the evaluation of environmental threats was proposed. The validation of the computational model was conducted for the test of forest fires (pine, birch and oak). Due to this model a size of the occupational hazard of firefighters participating in firefighting actions was determined.*

**Keywords:** forest fires,  $PM_{2,5}$  and  $PM_{10}$  dust emission, measuring equipments, occupational hazard of firefighters

**WSTĘP**

Zanieczyszczenie powietrza pyłem zawieszonym  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$  stanowi poważny problem [1-3]. Jednym ze źródeł tych zanieczyszczeń są pożary lasów. Emitują one do atmosfery różnorodne niebezpieczne gazy, aerozole i pyły, w tym frakcje  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$ . Zanieczyszczenia te rozprzestrzeniają się w atmosferze na duże odległości przyczyniając się do obniżenia jakości powietrza, pogorszenia stanu środowiska naturalnego i zwiększenia zagrożenia zdrowotnego ludności. Stąd, poszukuje się skutecznych metod pozwalających na ograniczenie tych zagrożeń, m.in. poprzez kontrolę zasięgu rozprzestrzeniania się cząstek  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$  w powietrzu. To właśnie stanowiło przedmiot badań w niniejszym opracowaniu. Podstawowym celem pracy było określenie stopnia zanieczyszczenia powietrza niebezpiecznymi pyłami zawieszonymi  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$  generowanymi podczas pożarów lasów. Do oceny ryzyka zagrożeń środowiskowych zaproponowano modele emisji pyłów: kłębu (ang. *Puff model*) i smugi (ang. *Plume model*), które pozwoliły wyznaczyć zasięg rozprzestrzeniania się cząstek  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$  w powietrzu.

**OPIS PROCESU MODELOWANIA**

Proces modelowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń pyłowych  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$  przebiegał w czterech fazach:

Faza 1 – przygotowanie danych wejściowych do modelu;

Faza 2 – modelowanie zasięgu rozprzestrzeniania się pyłów;

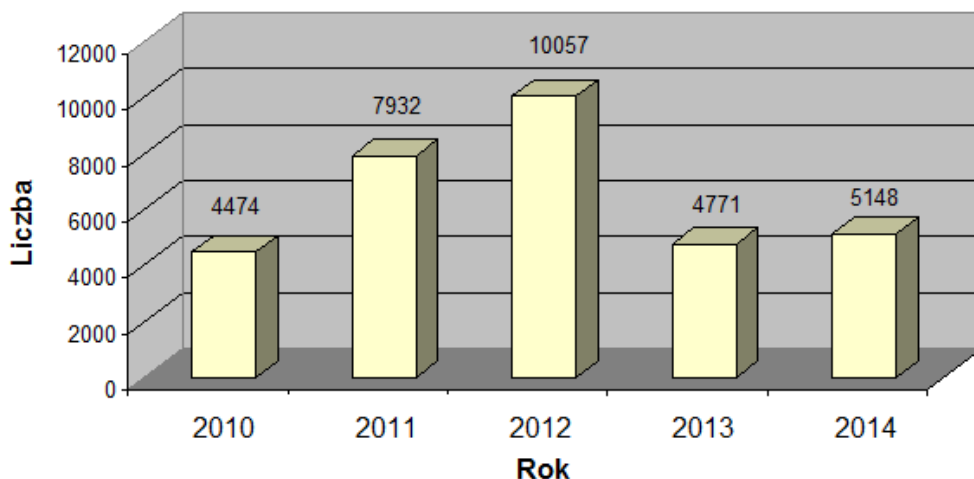
Faza 3 – przetworzenie, wizualizacja i analiza danych obliczeniowych;

Faza 4 – walidacja modelu obliczeniowego.

Na tej podstawie określono wielkość zagrożenia pożarowego i dokonano oceny ryzyka zawodowego wśród strażaków biorących udział w akcjach gaśniczych, którzy byli narażeni na ekspozycję pyłów zawieszonych  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$ .

**PRZYGOTOWANIE DANYCH WEJŚCIOWYCH DO MODELU**

Była to faza najbardziej czasochłonna i wymagała zebrania danych emisyjnych dotyczących pożarów lasów i warunków meteorologicznych. Czas realizacji tej fazy zależał m.in. od powierzchni obszaru, dla którego prowadzono modelowanie, liczby pożarów lasów (rys. 1), ich wielkości i czasu trwania, rodzaju palącego się materiału roślinnego, warunków meteorologicznych, poziomu tła pyłów zawieszonych  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$ , etc.



Rys. 1. Liczba pożarów lasów w Polsce wg danych z Komendy Głównej PSP  
(dane z 2010-2014 r.)

Źródło: Opracowanie własne

Zebranie danych dotyczących pożarów lasów, stanu jakości powietrza i warunków meteorologicznych dokonano w oparciu o informacje z Zakładu Informatyki Lasów Państwowych, bazy Systemu Wspomagania Decyzji z Komendy Głównej Państwowej Straży Pożarnej w Warszawie, wojewódzkich i powiatowych stacji Inspektoratu Ochrony Środowiska oraz wybranych stacji meteorologicznych krajowej sieci monitoringu powietrza.

Zagrożenie pożarowe obszarów leśnych dotyczyło głównie pokrywy gleby (ok. 75% łącznej powierzchni spalonej) i pożarów całkowitych drzew (ok. 24%). Pozostałe stanowiły pożary podpowierzchniowe i pojedynczego drzewa, co wyszczególniono w tabeli 1.

Tabela 1. Liczba i rodzaj pożarów lasów w Polsce w rozbięciu na jednostkę podziału administracyjnego  
(dane za 2012 r.)<sup>1</sup>

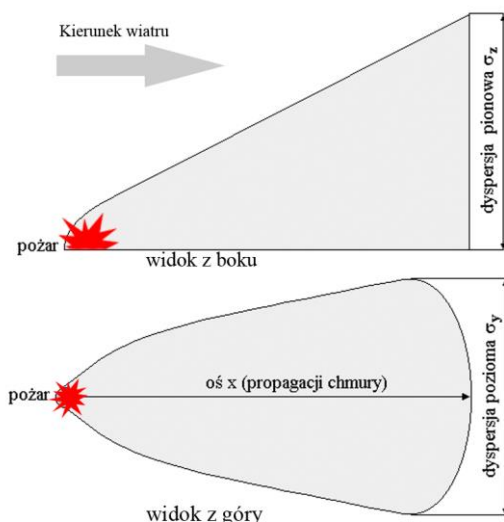
L.p.	Podział administracyjny	Typ pożaru lasu				
		Ogółem	Podpowierzchniowy	Pokrywy gleby	Całkowity drzew	Pojedyncze drzewo
1.	Polska	10057	332	8852	618	255
2.	Dolnośląskie	446	23	363	36	24
3.	Kujawsko-Pomorskie	555	9	514	21	11
4.	Lubelskie	554	18	495	29	12
5.	Lubuskie	518	14	463	34	7
6.	Łódzkie	1072	25	962	68	17
7.	Małopolskie	389	21	307	32	29
8.	Mazowieckie	2181	59	1986	98	38
9.	Opolskie	225	12	194	15	4
10.	Podkarpackie	684	25	565	80	14
11.	Podlaskie	231	5	211	8	7
12.	Pomorskie	297	19	245	12	21
13.	Śląskie	936	50	793	65	28
14.	Świętokrzyskie	1032	23	914	84	11
15.	Warmińsko-Mazurskie	101	6	86	6	3
16.	Wielkopolskie	578	9	537	21	11
17.	Zachodniopomorskie	258	14	217	9	18

Źródło: Opracowanie własne na podstawie bazy danych SWD Komendy Głównej PSP

## MODELOWANIE ZASIĘGU ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ PYŁÓW

Do modelowania chwilowych emisji pyłów PM<sub>2,5</sub> i PM<sub>10</sub> (o czasie trwania emisji do 60 min.) wykorzystano modele gaussowskie kłębu (ang. *Puff model*) i smugi (ang. *Plume model*) ze względu na ich prostotę obliczeniową i łatwość zastosowania [4-6]. W modelach tych przyjmuje się jednakowy układ współrzędnych, gdzie oś „x” jest skierowana wzdłuż kierunku wiatru, co pokazano na rys. 2.

<sup>1</sup> Wg danych Lasów Państwowych w analizowanym okresie na terenie kraju powstało łącznie 9977 pożarów.



**Rys. 2. Schemat tworzenia się chmury niebezpiecznych pyłów  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$  w powietrzu podczas pożaru lasu. Źródło: Opracowanie własne**

Równanie transportu zanieczyszczeń pyłowych przedstawiono za pomocą równania:

$$C(x, y, z) = \frac{Q_p}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}} [\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (1)$$

gdzie:

$Q_p$  – natężenie emisji pyłów, w  $[\mu\text{g} \cdot \text{s}^{-1}]$ , odpowiadające wielkości emisji pyłów podczas trwania pożaru,

$u$  – przyziemna prędkość wiatru, w  $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ ,

$\sigma_y$  i  $\sigma_z$  – pozioma i pionowa dyspersja chmury pyłów, w [m].

Natężenie emisji pyłów uwalnianych podczas pożaru lasu obliczono z zależności:

$$Q_p = \frac{A \cdot B \cdot \eta \cdot CE \cdot e_i}{t} [\mu\text{g} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2)$$

gdzie:

$A$  – powierzchnia lasu objęta pożarem, w  $[\text{m}^2]$ ,

$B$  – obciążenie ogniowe (masa materiału - tzw. biomasy, przypadająca na jednostkę powierzchni lasu), w  $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}]$ ,

$\eta$  – bezwymiarowy współczynnik wypalenia,

$CE$  – względna sprawność spalania (stosunek biomasy czynnej, która ulega spalaniu, do biomasy całkowitej, tj. czynnej i biernej pożarowo),

$e_i$  – współczynnik emisji frakcji pyłów  $PM_{2,5}$  lub  $PM_{10}$  (masa pyłu na jednostkę masy spalanej biomasy), w  $[\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ ,

$t$  – czas trwania emisji pyłów, w [s].

Do obliczenia wielkości dyspersji chmury pyłów stosowano uproszczone zależności:

$$\sigma_y = a \cdot x^k [\text{m}] \quad (3)$$

$$\sigma_z = b \cdot x^n [\text{m}] \quad (4)$$

$$x = u \cdot t [\text{m}] \quad (5)$$

gdzie:

$a$ ,  $b$ ,  $k$  i  $n$  – współczynniki empiryczne uwzględniające klasę stabilności atmosfery wg Pasquilla.

Charakterystykę warunków atmosferycznych określających klasy stabilności atmosfery oraz odpowiadające im wartości dyspersji chmury pyłów wyszczególniono w tabelach 2 i 3.

Tabela 2. Klasy stabilności atmosfery wg Pasquilla

Prędkość wiatru <sup>1</sup> [m s <sup>-1</sup> ]	Dzień			Noc	
	nasłonecznienie			zachmurzenie	
	silne	umiarkowane	słabe	silne	umiarkowane
< 2	A	A-B	B	-	-
2 – 3	A-B	B	C	E	F
3 – 5	B	B-C	C	D	E
5 – 6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Oznaczenie: <sup>1</sup> – prędkość przygruntowa na wysokości do 10 m.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [4]

Tabela 3. Formuły rekomendowane do określenia wartości dyspersji chmury pyłów dla uwolnień chwilowych

Klasa stabilności	A	B	C	D	E	F
$\sigma_y$	$0,18x^{0,92}$	$0,14x^{0,92}$	$0,10x^{0,92}$	$0,06x^{0,92}$	$0,04x^{0,92}$	$0,02x^{0,89}$
$\sigma_z$	$0,60x^{0,75}$	$0,53x^{0,73}$	$0,34x^{0,71}$	$0,15x^{0,70}$	$0,10x^{0,65}$	$0,05x^{0,61}$

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [4]

Do modelowania propagacji zanieczyszczeń pyłowych PM<sub>2,5</sub> i PM<sub>10</sub> wykorzystano statystyczny pożar lasu w województwie mazowieckim. Szczegółowe dane dotyczące wielkości emisji dla poszczególnych rodzajów spalanej biomasy zamieszczono w tabeli 4. Za średni czas trwania pożaru przyjęto 45 min.

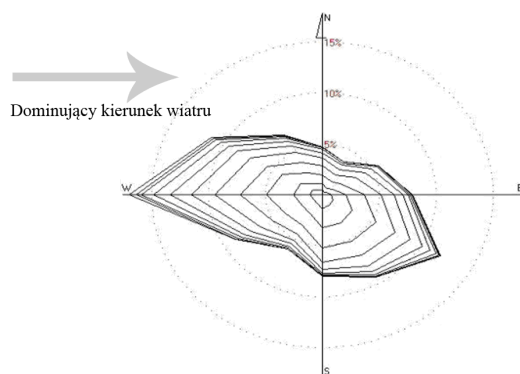
Tabela 4. Wielkość emisji pyłów PM<sub>2,5</sub> i PM<sub>10</sub> dla statystycznego pożaru lasu w województwie mazowieckim (dane za 2012 r.)

L.p.	Rodzaj biomasy	Udział procentowy [%]	Powierzchnia spalona [m <sup>2</sup> ]	Obciążenie ogniowe [kg m <sup>-2</sup> ]	Współczynnik wypalenia	Względna sprawność spalania	Współczynnik emisji PM <sub>2,5</sub> i PM <sub>10</sub> w [g·kg <sup>-1</sup> ]		Emisja PM <sub>2,5</sub> w [g]	Emisja PM <sub>10</sub> w [g]
1.	sosna	92,3	6276	9,6	0,4	0,9	10,9	12,8	236419	277630
2.	świerk	0,4	27	13,2	0,4	0,9	10,9	12,8	1399	1642
3.	pozostałe iglaste	0,1	7	4,4	0,4	0,9	10,9	12,8	121	142
4.	brzoza	3,4	231	6,7	0,4	0,9	9,5	12,5	5293	6965
5.	dąb	3,3	224	13,9	0,4	0,9	9,5	12,5	10649	14011
6.	olcha	0,4	27	11,8	0,4	0,9	9,5	12,5	1090	1434
7.	pozostałe liściaste	0,1	8	10	0,4	0,9	9,5	12,5	274	360
8.	pokrywa ściółkowa	44,6	3033	2,0	0,9	0,9	7,0	9,5	34394	46678
9.	pokrywa wrzosowa	24,1	1639	1,2	0,8	0,9	11,5	15,5	16285	21949
10.	trawa	31,3	2130	0,5	1,0	0,9	9,5	12,5	9106	11981
	SUMA:	100	6800						315030	382792

Źródło: Opracowanie własne

Wielkość teoretycznej emisji pyłu wynosiła ok. 315 kg PM<sub>2,5</sub> oraz 383 kg PM<sub>10</sub>. Błąd statystyczny wartości emisji pyłów wynosił średnio ok. ± 25% [8,9].

Czynnikiem odgrywającym zasadniczą rolę w migracji cząstek dymu wraz z powstałymi pyłami jest wiatr. W pracy wykorzystano elementy róży wiatrów opracowane na podstawie średniorocznych danych obserwacyjnych (rys. 3). Pod względem prędkości wiatru największy udział miały wiatry średnie (ok. 60%), których prędkość mieściła się w granicach od 3 do 6 m/s. Średnia prędkość wiatru dla województwa mazowieckiego wynosiła 4,1 m/s. Udział wiatrów słabych (poniżej 2 m/s) wynosiła ok. 24%, a udział wiatrów wiejących z prędkością powyżej 10 m/s wynosiła niewiele ponad 1%.



Rys. 3. Roczna róża wiatrów dla województwa mazowieckiego

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych ze Stacji Meteorologicznej Warszawa-Okęcie

Wzrost prędkości wiatru powoduje znaczne zwiększenie zasięgu rozprzestrzeniania się chmury pyłów i jej dyspersji, zarówno poziomej jak i pionowej. Przykładowe wielkości rozproszenia chmury pyłów  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$  i ich stężeń dla statystycznego pożaru lasu zestawiono w tabelach 5 i 6.

Tabela 5. Wielkość rozproszenia chmury pyłów  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$  dla statystycznego pożaru lasu trwającego 45 minut

Prędkość $u$ [m/s]	Zasięg $x$ [m]	Stany pogody					
		A	B	C	D	E	F
Dyspersja pozioma $\sigma_y$ [m]							
0,5	1350	137	106	76	46	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>
1,0	2700	258	201	144	86	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>
2,0	5400	489	380	272	163	109	42
3,0	8100	710	552	394	237	158	60
4,0	10800	925	719	514	308	205	78
5,0	13500	1135	883	631	378	252	95
Dyspersja pionowa $\sigma_z$ [m]							
0,5	1350	134	102	57	23	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>
1,0	2700	225	170	93	38	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>
2,0	5400	378	281	152	61	27	9
3,0	8100	512	378	203	82	35	12
4,0	10800	636	466	248	100	42	14
5,0	13500	751	549	291	117	48	17

Oznaczenie: <sup>1</sup> – nie dotyczy.

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 6. Obliczone wartości stężeń pyłu  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$  generowane podczas statystycznego pożaru lasu<sup>1</sup>

Prędkość $u$ [m/s]	Zasięg $x$ [m]	Stany pogody					
		A	B	C	D	E	F
Stężenie pyłu $PM_{2,5}$ [ $\mu\text{g m}^{-3}$ ]							
0,5	1350	4 977	7 952	18 343	62 746	- <sup>2</sup>	- <sup>2</sup>
1,0	2700	860	1 423	3 456	12 640	- <sup>2</sup>	- <sup>2</sup>
2,0	5400	142	242	609	2 355	7 527	41 823
3,0	8100	49	40	216	854	2 853	17 101
4,0	10800	23	19	104	413	1 416	9 060
5,0	13500	12	10	58	235	819	5 379
Stężenie pyłu $PM_{10}$ [ $\mu\text{g m}^{-3}$ ]							
0,5	1350	6 048	9 663	22 288	76 243	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>
1,0	2700	1 045	1 729	4 199	15 359	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>
2,0	5400	173	294	740	2 862	9 146	50 819
3,0	8100	60	103	263	1 038	3 467	20 779
4,0	10800	28	49	126	502	1 721	11 009
5,0	13500	15	27	71	285	995	6 536

Oznaczenie: <sup>1</sup> – w obliczeniach uwzględniono rozproszenie chmury pyłów ze źródła powierzchniowego o wartości  $6800 \text{ m}^2$ , <sup>2</sup> – nie dotyczy.

Źródło: Opracowanie własne

## WALIDACJA MODELU OBLICZENIOWEGO

W celu potwierdzenia zgodności założonych modeli teoretycznych z rzeczywistym wynikami przeprowadzono pomiary stężenia pyłów zawieszonych  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$  dla testowych pożarów lasów. Do badań wybrano trzy najczęściej spotykane gatunki drzew: sosnę, brzozę oraz dąb. Spaleniu poddano takie same ilości biomasy wynoszące po 25 kg. Pomiar stężenia pyłów w powietrzu prowadzono bezpośrednio za pomocą przenośnego urządzenia TSI DustTrak II, z podziałem na pomiar zawartości frakcji pyłu  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$ . Zakres pomiarowy pyłomierza wynosił od 0,001 do 400 [ $mg \cdot m^{-3}$ ].

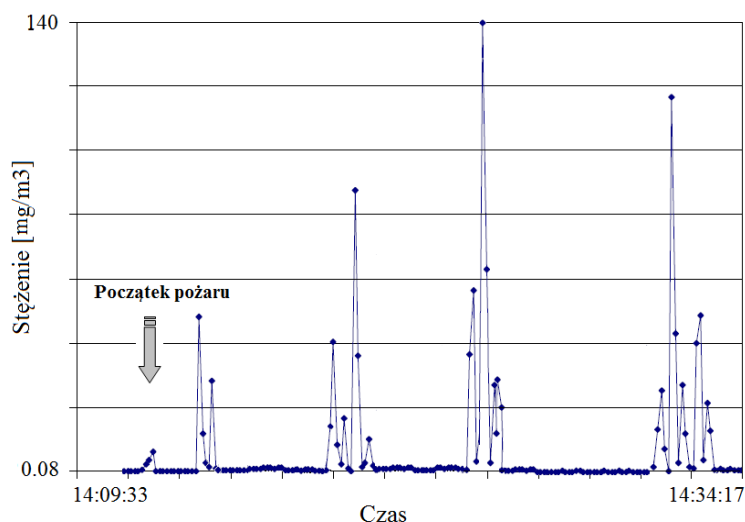
Dodatkowo, do badań wykorzystano anemometr model AZ-9871 do pomiarów warunków meteorologicznych, w tym prędkości wiatru, oraz kamerę termowizyjną FLIR T420 do rejestrowania temperatury spalania w zakresie od  $-20^{\circ}C$  do  $1200^{\circ}C$ .

Podczas pożaru testowego sosny, powstawały duże ilości gęstego dymu barwy białoszarej (rys. 4). Stężenia pyłów zawieszonych  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$  były znacznie wyższe niż w przypadku spalania gatunków liściastych. Natomiast odnotowano niższą temperaturę w strefie spalania oraz dymu.

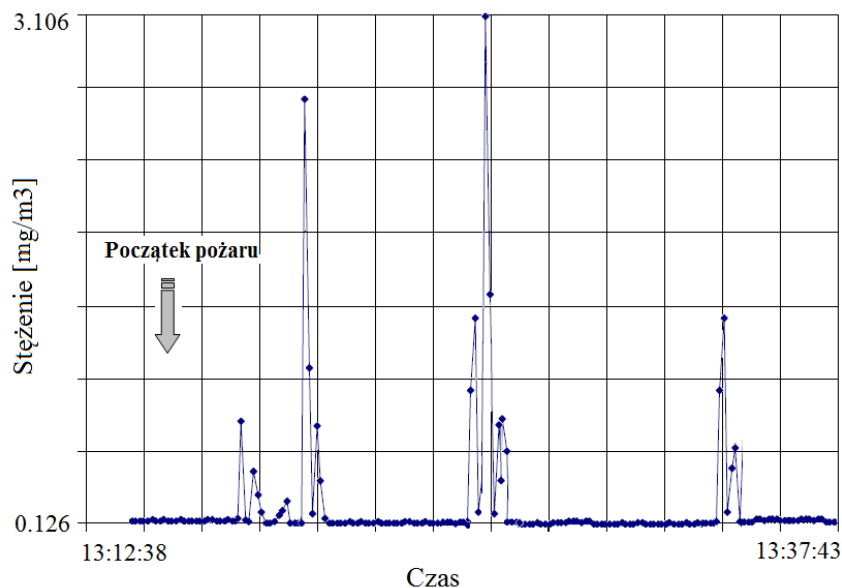


Rys. 4. Pożar testowy podczas spalania sosny  
Źródło: Opracowanie własne

W wyniku przeprowadzonych pomiarów można było zaobserwować różną emisję pyłów zawieszonych  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$  w zależności od rodzaju spalanej biomasy roślinnej - co pokazano na rysunkach 5 i 6. Widoczne przerwy między pikami określającymi stężenia pyłów w powietrzu były spowodowane zmianami kierunku wiatru. Klasę stabilności atmosfery wg Pasquilla określono jako „A” (atmosfera stabilna).



Rys. 5. Przykładowa emisja pyłów zawieszonych  $PM_{10}$  w powietrzu podczas spalania gałęzi sosny  
Źródło: Opracowanie własne



Rys. 6. Przykładowa emisja pyłów zawieszonych  $PM_{10}$  w powietrzu podczas spalania dębiny  
Źródło: Opracowanie własne

Wzrost migracji chmury pyłów powodował zwiększenie jej dyspersji, zarówno poziomej jak i pionowej. Stąd, po 30 metrach od źródła pożaru rejestrowano jedynie stężenia pyłów na poziomie tła. Zmierzone wartości stężenia pyłów  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$  porównano z danymi teoretycznymi, a wyniki zestawiono w tabeli 7.

Tabela 7. Porównanie teoretycznych i doświadczalnych wartości stężeń pyłu  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$  generowanych podczas kontrolowanego spalania sosny (czas spalania ok. 20 minut)

Prędkość $u$ [m/s]	Odległość [m]	pył $PM_{2,5}$		pył $PM_{10}$	
		teoretyczne	doświadczalne	teoretyczne	doświadczalne
$u < 2$	5	- <sup>1</sup>	ok. 11 800	- <sup>1</sup>	ok. 14 000
	10	6 263	ok. 3 325	7 355	ok. 4 500
	20	2 175	ok. 2 000	2 554	ok. 2 600
	30	1 145	ok. 880	1 344	ok. 950
	40	721	48	847	22
	50	502	51	589	20
	75	259	b.d.	304	b.d.
	100	161	b.d.	189	b.d.
	150	83	b.d.	97	b.d.
	200	51	b.d.	60	b.d.

Oznaczenie: <sup>1</sup> – nie dotyczy, b.d. – brak danych.

Źródło: opracowanie własne

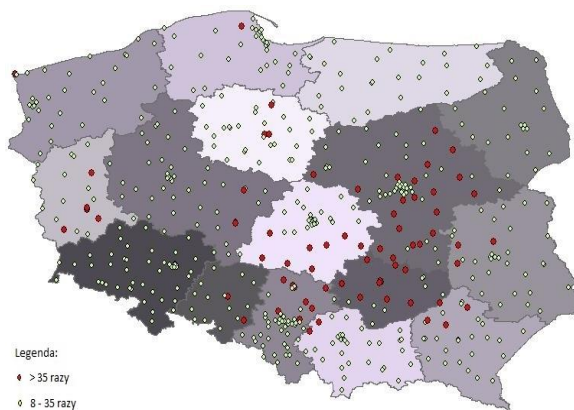
## OCENA RYZYKA ZAWODOWEGO

Na zagrożenia zdrowotne spowodowane zanieczyszczeniem powietrza pyłem  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$  szczególnie narażeni są strażacy. Uczestniczą oni wielokrotnie w akcjach gaszenia pożarów lasów w ciągu roku. Mimo tak dużej skali zjawiska nie uwzględnia się wpływu zanieczyszczeń pyłów zawieszonych na stan ich zdrowia. Z tego też względu postanowiono określić wielkość zagrożenia pożarowego i dokonać oceny ryzyka zawodowego wśród strażaków biorących udział w akcjach gaśniczych.

Analiza zagrożeń pożarowych lasów w danym roku kalendarzowym oraz sposobu prowadzenia akcji gaśniczych wskazuje, że narażenie ponadnormatywne strażaków (gdzie rzeczywistą dawkę ekspozycyjną przeliczono na 24-godzinne dopuszczalne stężenia pyłu  $PM_{10}$ ) występuje zawsze, gdy akcja dogaszania pogorzeliiska jest dłuższa niż 15 minut.

Na tej podstawie oraz wytycznych zawartych w rozporządzeniu ministra właściwego ds. środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu (Dz. U., 2012, poz. 1031) [10] ustalono, że 72 Jednostki Ratowniczo-Gaśnicze (JRG) brały udział w zwalczaniu pożarów lasów częściej niż 35 razy w skali roku. Rekordowa ilość interwencji przypadła JRG Końskie, która brała udział w gaszeniu pożarów lasów aż 248 razy.

Normy jakości powietrza dla pyłów  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$  określone w Europejskiej Dyrektywie z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości i czystszej powietrza dla Europy (2008/50/WE) wyznaczają ostrzejsze kryteria ilości maksymalnych przekroczeń stężeń pyłu zawieszzonego  $PM_{10}$  do 7 dni w skali roku [11]. Dla tego typu ustaleń ustalono, że 281 JRG brało czynny udział w zwalczaniu pożarów lasów częściej niż 7 razy. Pokazano to na rys. 7 zaznaczając kolorem czerwonym te JRG, które uczestniczyły w gaszeniu pożarów więcej niż 35 razy w skali roku i kolorem żółtym - od 8 do 35 razy w skali roku.



**Rys. 7. Częstość wyjazdów JRG do gaszenia pożarów lasów w 2012 roku**  
Oznaczenia: kolorem czerwonym i żółtym zaznaczono JRG opisane w tekście.  
Źródło: Opracowanie własne

## PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i uzyskanych wyników obliczeń wysunięto następujące wnioski:

1. Modelowanie zasięgu rozprzestrzenienia się pyłów zawieszonych  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$  jest złożone i uwarunkowane od wielu czynników środowiskowych.
2. Podczas przyziemnych pożarów lasów (o małej powierzchni spalania do 1 ha) mogą powstawać niebezpieczne stężenia pyłów  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$  utrzymujące się w przyziemnej warstwie powietrza, które w niskich temperaturach otoczenia i dużej wilgotności powietrza będą groźne dla ludzi przez okres do kilku godzin.
3. Wielkość emisji niebezpiecznych cząstek pyłów  $PM_{2,5}$  i  $PM_{10}$  uzależniona jest od lokalizacji miejsca pożaru i materiału roślinnego, który ulega spalaniu. Różnice w ilości biomasy czynnej do biernej pożarowo mogą być spowodowane różnymi czynnikami, m.in. stopniem pokrycia terenu drzewami, strukturą drzewostanu, ich wiekiem, czasem spalania, wilgotnością, etc.
4. Podczas statystycznego pożaru lasu, dopuszczalne stężenia pyłów zawieszonych w przyziemnej warstwie powietrza były przekroczone w odległości do 18 m od czoła pożaru. Ratownicy przebywający w tej strefie są szczególnie narażeni na ten rodzaj zawieszonoego pyłu i powinni stosować środki ochrony dróg oddechowych.
5. Największa emisja pyłów ma miejsce podczas początkowego etapu rozwoju pożaru i dogaszania pogorzelska.
6. Przedstawione modele matematyczne mogą być dobrym narzędziem do wstępnego szacowania skutków emisji szkodliwych pyłów podczas pożarów lasów oraz symulacji zagrożeń ludności.

## LITERATURA

1. "Health aspects of air pollution". Results from the WHO project "Systematic review of health aspects of air pollution in Europe". WHO 2004,
2. "Air quality in Europe - 2011 report". Copenhagen: EEA, 2011,
3. "WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide". Global update 2005. WHO, 2006,
4. Borysiewicz M., Stankiewicz R. "Modelowanie procesów propagacji skażeń w atmosferze, Podstawy modeli matematycznych i metod numerycznych", Otwock-Świerk: Instytut Energii Atomowej, 1994,
5. Łobocki L. "Wskazówki metodyczne dotyczące modelowania matematycznego w systemie zarządzania jakością powietrza". Warszawa: Politechnika Warszawska, Instytut Systemów Inżynierii Środowiska, 2003,
6. Markiewicz M.T. "Podstawy modelowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym". Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2004,
7. Pasquill F. "The estimation of the dispersion of windborne materials". Met. Mag. nr 90 (1961), s. 33,
8. Hardy C., Ottmar R., Peterson J., Core J., Seamon P. "Smoke management guide for prescribed and wildland fire", USA: National Wildfire Coord. Group, 2001,
9. Wiedinmyer C., Quayle B., Geron C., Belote A., McKenzie D., Zhang X., O'Neill S., Wynne K. K. "Estimating emissions from fires in North America for air quality modeling", Atm. Environm. nr 40 (2006), s. 3419-3432,
10. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu, (Dz. U. 2012 poz. 1031),
11. Europejska dyrektywa z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości i czystszej powietrza dla Europy, (2008/50/WE).