

OCENA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA DANYCH POGODOWYCH W SYMULACJACH PARAMETRÓW METEOROLOGICZNYCH

Anna BOCHENEK, Katarzyna KLEMM*

*Politechnika Łódzka, Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych, Zakład Gospodarki Przestrzennej i Geomatyki,
al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: an.bochenek@wp.pl, katarzyna.klemm@p.lodz.pl*

Streszczenie: Programy typu CFD stanowią przyszłościową alternatywę dla tradycyjnych metod badań mikroklimatu oraz komfortu termicznego na terenach zurbanizowanych. W niniejszej pracy wykorzystano jeden z programów CFD – ENVI-met (4.1.2.) w celu oceny możliwości zastosowania danych pogodowych pochodzących ze stacji meteorologicznych oraz bezpośrednich pomiarów terenowych w symulacjach procesów atmosferycznych. Badaniami objęto dwie przestrzenie publiczne na terenie Łodzi, tj. plac miejski przy skrzyżowaniu ul. Piotrkowskiej i ul. Więckowskiego oraz Stary Rynek. Modelowaniu zostały poddane parametry takie jak temperatura powietrza oraz wilgotność względna. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że największym stopniem zgodności z wartościami rzeczywistymi charakteryzowały się symulacje bazujące na wartościach pozyskanych z bezpośrednich pomiarów terenowych. Dodatkowo zostały porównane wyniki uzyskane dla bezchmurnej pogody oraz z uwzględnieniem zachmurzenia.

Słowa kluczowe: klimat obszarów zurbanizowanych, symulacje komputerowe, program ENVI-met, metody numeryczne

1. WPROWADZENIE

Stale wzrastająca liczba ludności miast w połączeniu z koncepcją miasta kompaktowego, rozwijającego się dośrodkowo powoduje liczne problemy związane z modyfikacją klimatu miejskiego. Obserwowane powszechnie w większości miast zjawisko miejskiej wyspy ciepła, przejawiające się wzrostem średniej temperatury powietrza w centrum miasta, wpływa znacząco na komfort i jakość życia jego mieszkańców [1].

W ostatnich latach zwrócono szczególną uwagę na przestrzenie publiczne w mieście, stanowiące często miejsca wypoczynku mieszkańców. Zlokalizowane w centrach miast place, otoczone niejednokrotnie zwartą zabudową, pozbawione zieleni i naturalnej powierzchni aeracyjnej charakteryzują specyficzne warunki

mikroklimatu. Warunki te w zasadniczy sposób wpływają na komfort termiczny, a tym samym na użytkowanie przestrzeni. Znajomość rozkładu podstawowych parametrów mikroklimatu nabiera, więc zasadniczego znaczenia w kontekście zrównoważonego planowania miast.

W badaniach mikroklimatu i komfortu termicznego miast wykorzystuje się najczęściej badania terenowe, obejmujące pomiary temperatury, wilgotności względnej, promieniowania słonecznego oraz kierunku i prędkości wiatru, w połączeniu z badaniami ankietowymi [2]. Wiążą się one jednak ze znacznymi nakładami finansowymi i problemami organizacyjnymi. Inną alternatywą są analizy symulacyjne, które umożliwiają uzyskanie w stosunkowo krótkim czasie informacji na temat podstawowych parametrów mikroklimatu, czy komfortu cieplnego człowieka. Należą do nich między innymi programy CFD modelujące przepływ powietrza wokół zabudowy, program RayMan modelujący średnią temperaturę promieniowania i środowisko termiczne człowieka czy programy typu Bioklima do oceny warunków bioklimatycznych.

W ostatnich latach najczęściej stosowanym jest ENVI-met, program, który w sposób kompleksowy ocenia wpływ zabudowy i zagospodarowania terenu na warunki mikroklimatu. Jednakże podobnie jak we wszystkich programach symulacyjnych istotny wpływ na uzyskane wyniki mają wprowadzane dane wejściowe.

W pracy dokonano symulacji wybranych parametrów mikroklimatu, tj. temperatury i wilgotności względnej powietrza w odniesieniu do dwóch przestrzeni publicznych zlokalizowanych w centrum Łodzi. Jako parametry wejściowe wykorzystano dane uzyskane ze stacji meteorologicznej Łódź Lublinek, zlokalizowanej na przedmieściach miasta oraz dane z pomiarów terenowych wykonanych w obrębie analizowanych placów. Uwzględniono zarówno uśrednione wartości dobowe, jak

* Autor korespondencyjny, e-mail: katarzyna.klemm@p.lodz.pl

i wartości godzinowe. Wyniki symulacji porównano z pomiarami w skali rzeczywistej.

2. METODOLOGIA BADAŃ

ENVI-met jest oprogramowaniem z grupy CFD (ang. Computational Fluid Dynamics) służącym do przeprowadzania analiz oraz symulacji z zakresu numerycznej mechaniki płynów. Narzędzie to opracowane przez zespół prof. M. Brusa z Uniwersytetu w Moguncji jest wykorzystywane do tworzenia trójwymiarowych, niehydrostatycznych modeli mikroklimatycznych wykorzystując metodę różnic skończonych. Umożliwia ono symulację zależności podłoże – roślinność – powietrze w środowisku silnie zurbanizowanym w cyklu dobowym (od 24 do 48 godzin) [3]. Aplikacja uwzględnia przepływ powietrza pomiędzy budynkami, procesy wymiany ciepła poziomych i pionowych powierzchni, turbulencje, parametry roślinności oraz dyspersję zanieczyszczeń. Według S. Lenzholer'a ENVI-met jest jednym z narzędzi uwzględniających parametry decydujące o komforcie cieplnym w środowisku zewnętrznym takie jak: temperatura powietrza, kierunek, prędkość wiatru, wilgotność względna oraz średnia temperatura promieniowania w celu określenia wartości wskaźników komfortu cieplnego [4][5].

W niniejszym opracowaniu zostały wykorzystane cztery moduły aplikacji ENVI-met w wersji podstawowej, tj.:

- SPACES – umożliwiające tworzenie oraz modyfikację obiektów w formacie 2D oraz 3D. Aplikacja dostarcza niezbędnych narzędzi do wymodelowania obiektów, roślinności oraz zróżnicowanych typów nawierzchni (naturalnych, sztucznych),
- ConfigWizard – wykorzystane do określenia podstawowych wartości parametrów mikroklimatu,
- Envi-met (core) – użyte do symulacji procesów atmosferycznych,
- LEONARDO – umożliwiające graficzną prezentację rozkładu parametrów pogodowych oraz odczytanie ich wartości w punktach lokalizacji stanowisk pomiarowych na wybranej wysokości.

Początkowo niezbędnym było utworzenie trójwymiarowych modeli terenu na bazie prostokątnej siatki. Wymiar poziomy pojedynczego elementu może wahać się w przedziale od 0.5 m do 10 m, zaś pionowy może osiągać wartość od 1 m do 5 m [6]. W związku z tym program umożliwia tworzenie modeli szczegółowych o wielkości 50 m x 50 m x 40 m lub modeli ogólnych o powierzchni 1 000 m x 1 000 m x 200 m. Dodatkowo istnieje możliwość zastosowania dwóch typów siatek

pionowych. Pierwsza z nich – equidistant grid – jest tworzona z elementów o stałej wysokości. Wyjątkiem jest pięć komórek przy podłożu, których wymiar pionowy wynosi 20% referencyjnej wysokości modelu. Druga z siatek – telescoping – powstaje poprzez ustalenie wartości początkowej jej tworzenia oraz określenie współczynnika zmiany wymiaru pionowego. Wysokość komórek modelu może zostać zdefiniowana za pomocą równania [7]:

$$\Delta z(k) = [1 + s]^{k-1} * \Delta z_{start} \quad (1)$$

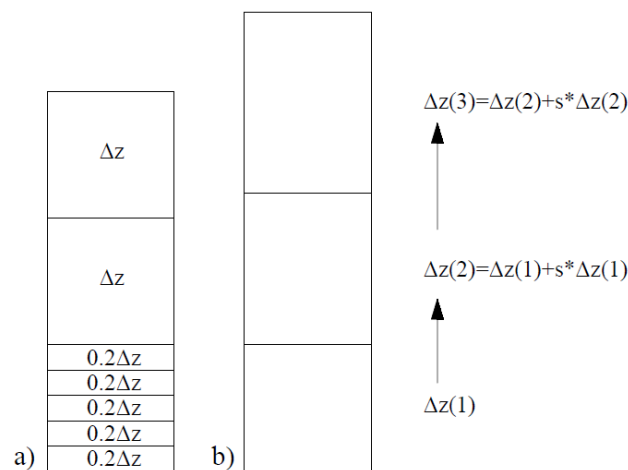
gdzie:

k – numer elementu siatki,

Δz – wysokość k -tego elementu siatki,

s – procentowy współczynnik wzrostu wysokości dla komórki,

Δz_{start} – wysokość pierwszego elementu siatki.



Rys. 1. Rodzaje siatek pionowych w programie ENVI-met (a – equidistant (elementy o stałej wysokości), b – telescoping (elementy o zmiennej wysokości))

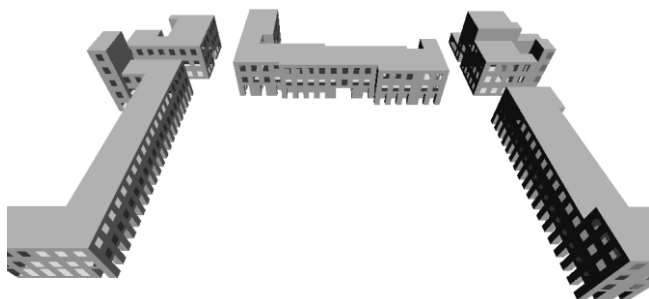
Fig. 1. Types of vertical grids in ENVI-met (a – equidistant grid (constant height of elements), b – telescoping grid (variable height of elements))

Zastosowanie siatki teleskopowej jest zalecane w przypadku występowania obiektów wysokościowych na modelowanym obszarze. W niniejszym opracowaniu zastosowano siatkę o jednakowych wysokościach (equidistant grid) ze względu na występowanie obiektów o maksymalnym wymiarze pionowym wynoszącym 20 m.

2.1. Przyjęty model i dane wejściowe

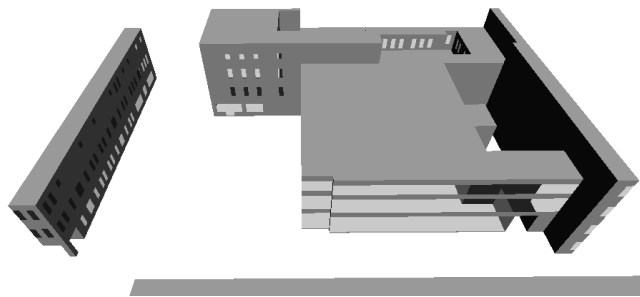
Dokonanie oceny wpływu danych wejściowych na wyniki symulacji wymusza tworzenie modeli szczegółowych. Dlatego też, do badań zostały wybrane przestrzenie publiczne takie jak: Stary Rynek oraz plac znajdujący się przy skrzyżowaniu ul. Piotrkowskiej oraz

ul. Więckowskiego w Łodzi. Dla obszaru Starego Rynku został stworzony model o wymiarach 80 x 80 x 30 komórek o rozdzielczości 2 m x 2 m x 1 m. Dodatkowo został on obrócony o 10.85° ze względu na konieczność jego dopasowania do struktury bazowej programu (siatka komórek). Średnia wysokość wymodelowanych obiektów wynosiła 12 m. Dominującym typem wykorzystanego materiału był beton, zarówno dla przegród budowlanych jak i nawierzchni placu.



Rys. 2. Model zabudowy okalającej Stary Rynek w Łodzi
Fig. 2. Model of Stary Rynek surrounding buildings

W drugim przypadku – placu miejskiego – wymiary modelu wynosiły 90 x 80 x 30 komórek o rozdzielczości 1 m x 1 m x 1 m. Projekt został obrócony o 9.30°. Wysokość budynków wynosiła 12 – 20 m. Także w tym przypadku beton był dominującym typem materiału użytego w modelu.



Rys. 3. Model zabudowy okalającej plac miejski przy skrzyżowaniu ul. Piotrkowskiej oraz ul. Więckowskiego w Łodzi
Fig. 3. Model of town square surrounding buildings at Piotrkowska and Więckowskiego crossroad in Łódź

Aby określić podstawowe parametry mikroklimatu w obrębie analizowanych przestrzeni publicznych wykorzystano dwie metody pozyskania danych. W pierwszym przypadku pochodziły one ze stacji meteorologicznej – Lublinek. Parametry zostały zmierzone na wysokości 10 m. W drugim przypadku – badań

terenowych – pomiary zostały wykonane na poziomie 2 m. Uzyskane dane dotyczyły średnich godzinowych oraz dobowych wartości parametrów meteorologicznych, tj. temperatury, wilgotności względnej, prędkości, kierunku napływu powietrza, ciśnienia atmosferycznego oraz temperatury punktu rosy.

Dane meteorologiczne ze stacji Łódź – Lublinek

Wartości parametrów nie odzwierciedlały w pełni warunków panujących w centrum miasta. Celem uzyskania dokładniejszych wyników symulacji obliczono prędkość wiatru w strefie śródmiejskiej miasta. Początkowo koniecznym było określenie prędkości tarciowej na terenie Lublinka wykorzystując zmodyfikowaną wersję wzoru logarytmicznego [8], tj.

$$\bar{U}_{(z)} = \frac{u_*}{K} * \ln \left(\frac{z-z_d}{z_0} \right) \quad (2)$$

$$u_* = \frac{\bar{U}_{(z)}}{\ln \left(\frac{z-z_d}{z_0} \right)} * K \quad (3)$$

gdzie:

$\bar{U}_{(z)}$ – średnia prędkość wiatru na wysokości 10 m [m/s],
 u_* – prędkość tarciowa [m/s],
 K – stała von Kármána (0,4),
 z – wysokość nad poziomem terenu [m],
 $(z - z_d)$ – wysokość efektywna [m],
 z_d – przemieszczenie płaszczyzny zerowej [m],
 z_0 – współczynnik szorstkości (zwany również parametrem chropowatości lub wysokością chropowatości) [m].

Wzór powyższy jest ważny od poziomu $z \cong (z_d + 10)$, poniżej tego pułapu wartość prędkości wiatru należy uznać za stałą i równą $\bar{U}(z_d + 10)$ [9]. W związku z tym, prędkość tarciowa na terenie Lublinka została obliczona za pomocą uproszczonej formy rów. 4, tj.

$$u_* = \frac{\bar{U}_{(z)}}{\ln \frac{z}{z_0}} * K \quad (4)$$

Następnie została określona prędkość tarciowa na terenie śródmieścia Łodzi w oparciu o zależność zaproponowaną przez Simiu [10], którą można zapisać jako:

$$\frac{u_*}{u_{*1}} = \left(\frac{z_0}{z_{01}} \right)^{0,0706} \quad (5)$$

gdzie:

u_* – prędkość tarciowa na terenie Lublinka [m/s],
 u_{*1} – prędkość tarciowa w strefie śródmiejskiej Łodzi [m/s],
 z_0 – współczynnik szorstkości dla terenu Lublinka [m],
 z_{01} – współczynnik szorstkości dla strefy śródmiejskiej Łodzi [m].

W konsekwencji wyznaczono profil prędkości przepływu powietrza w centrum miasta.

Kolejnym parametrem wejściowym modelu jest wilgotność właściwa na wysokości 2500 m. Znając wartość wilgotności właściwej przy gruncie oraz pionowy gradient wilgotności można określić wartość parametru na wysokości 2500 m korzystając z równ. 6 [11].

$$q = q_1 + (25 * \Delta q_{100}) \quad (6)$$

gdzie:

q – wilgotność właściwa powietrza na wysokości 2500 m [g/kg],

q_1 – wilgotność właściwa przy powierzchni gruntu [g/kg],

Δq_{100} – pionowy gradient wilgotności właściwej na 100 m wysokości.

Podstawowe ustawienia symulacji wymagają podania wartości temperatury potencjalnej powietrza. Znając wartość temperatury powietrza jest możliwe jej obliczenie na podstawie równ. 7 [5].

$$\theta = T_A \left(\frac{1000}{p_1} \right)^{R/C_p} \quad (7)$$

gdzie:

θ – temperatura potencjalna [K],

T_A – temperatura powietrza [K],

p_1 – ciśnienie atmosferyczne [hPa],

R – stała gazowa,

C_p – ciepło właściwe powietrza,

$R/C_p = 0.286$.

W tab. 1 przedstawiono uśrednione dobowe wartości parametrów klimatycznych wykorzystanych do symulacji bazujących na ogólnodostępnych danych ze stacji pomiarowej Lublinek.

Tabela 1. Średnie dobowe wartości parametrów klimatycznych określone na podstawie danych ze stacji pomiarowej Lublinek
Table 1. Average daily values of climatic parameters calculated on the basis of data from Lublinek measurement station

PARAMETRY	25.03.2017	10.04.2017
prędkość wiatru na wysokości 10 m [m/s]	1.70	1.37
kierunek wiatru [°]	279.30°	
temperatura potencjalna powietrza [°C]	-3.06	4.27
wilgotność właściwa powietrza na wysokości 2500 m [g/kg]	1.45	3.31

wilgotność względna powietrza [%]	71.48	67.55
zachmurzenie [%]	39.92	-

W modelach został uwzględniony stopień zachmurzenia nieba dla każdego z pięter występowania chmur, tj. niskiego, średniego, wysokiego.

$$y = \frac{8x}{300} \quad (8)$$

gdzie:

y – wartość stopnia pokrycia nieba przez chmury na wybranej wysokości,

x – stopień pokrycia nieba przez chmury na wybranej wysokości określony na podstawie danych ze stacji meteorologicznej [%].

Dane meteorologiczne z bezpośrednich pomiarów terenowych

W drugim przypadku parametry meteorologiczne zostały określone na podstawie bezpośrednich pomiarów terenowych. Wartość temperatury powietrza określono termohigrometrem elektrycznym – AB-321S. Wilgotność względną oraz prędkość wiatru wyznaczono przy użyciu termoanemometru testo 410-2. Wszystkie pomiary zostały wykonane na wysokości 2 m. Pierwsza seria pomiarów została przeprowadzona od godziny 4.00 dnia 25 marca do godziny 0.30 dnia 26 marca 2017 roku. Kolejne pomiary były wykonywane od godz. 4.00 dnia 10 kwietnia 2017 roku do godz. 0.30 dnia 11 kwietnia 2017 roku. Tabele 2 – 3 przedstawiają wartości parametrów klimatycznych określonych na podstawie bezpośrednich pomiarów terenowych wykorzystanych w symulacjach numerycznych.

Tabela 2. Średnie dobowe wartości parametrów klimatycznych określone na podstawie bezpośrednich pomiarów terenowych dla placu przy skrzyżowaniu ul. Piotrkowskiej oraz ul. Więckowskiego w Łodzi

Table 2. Average daily values of climatic parameters calculated on the basis of field research for town square at Piotrkowska and Więckowskiego crossroad in Lodz

PARAMETRY	25.03.2017	10.04.2017
prędkość wiatru na wysokości 10 m [m/s]	0.89	0.69
kierunek wiatru [°]	279.30°	
temperatura potencjalna powietrza [°C]	-1.08	8.57
wilgotność właściwa powietrza na wysokości 2500 m [g/kg]	0.06	4.67

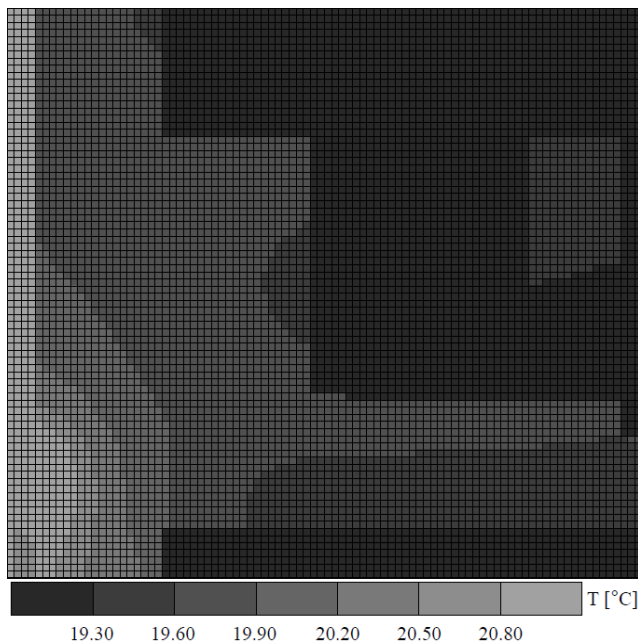
wilgotność względna powietrza [%]	43.84	47.47
zachmurzenie [%]	39.92	-

Tabela 3. Średnie dobowe wartości parametrów klimatycznych określone na podstawie bezpośrednich pomiarów terenowych dla Starego Rynku w Łodzi

Table 3. Average daily values of climatic parameters calculated on the basis of field research for Stary Rynek in Lodz

PARAMETRY	25.03.2017	10.04.2017
prędkość wiatru na wysokości 10 m [m/s]	0.60	0.67
kierunek wiatru [°]	280.85°	
temperatura potencjalna powietrza [°C]	-1.08	6.89
wilgotność właściwa powietrza na wysokości 2500 m [g/kg]	0.46	2.78
wilgotność względna powietrza [%]	51.53	50.19
zachmurzenie [%]	39.92	-

W wyniku analiz symulacyjnych uzyskano rozkład parametrów meteorologicznych w cyklu godzinowym. Na rys. 4-7. przedstawiono rozkład temperatury powietrza oraz wilgotności względnej na wysokości 1,5 m na obszarze wybranych przestrzeni publicznych.



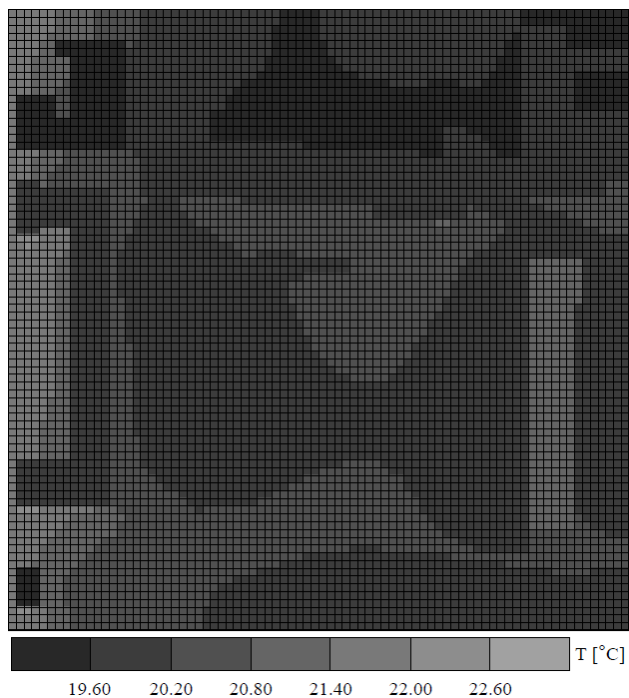
Rys. 4. Rozkład temperatury powietrza na wysokości 1,5 m na placu miejskim przy skrzyżowaniu ul. Piotrkowskiej i ul. Więckowskiego w Łodzi [10.04.2017]

Fig. 4. Air temperature distribution at 1,5 m height at town square at Piotrkowska and Więckowskiego crossroad in Lodz [10.04.2017]

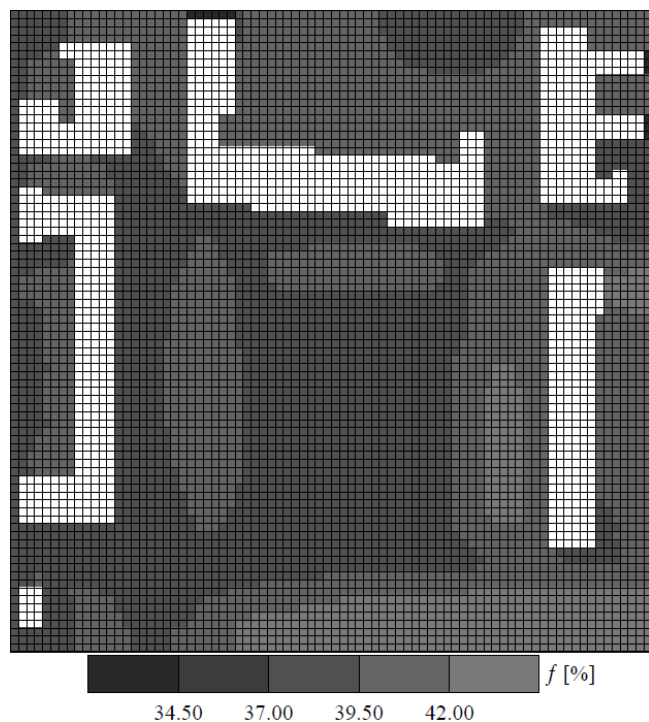


Rys. 5. Rozkład wilgotności względnej na wysokości 1,5 m na placu miejskim przy skrzyżowaniu ul. Piotrkowskiej i ul. Więckowskiego w Łodzi [10.04.2017]

Fig. 5. Relative humidity distribution at 1,5 m height at town square at Piotrkowska and Więckowskiego crossroad in Lodz [10.04.2017]



Rys. 6. Rozkład temperatury powietrza na wysokości 1,5 m na Starym Rynku [10.04.2017]
 Fig. 6. Air temperature distribution at 1,5 m height at Stary Rynek [10.04.2017]



Rys. 7. Rozkład wilgotności względnej na wysokości 1,5 m na Starym Rynku [10.04.2017]

Fig. 7. Relative humidity distribution at 1,5 m height at Stary Rynek [10.04.2017]

3. PORÓWNANIE OTRZYMANÝCH WYNIKÓW BADAŃ

Program ENVI-met umożliwia symulację na podstawie średnich wartości dobowych oraz wartości parametrów w interwale godzinowym. W niniejszym opracowaniu zostały rozpatrzone cztery scenariusze tworzenia symulacji w zależności od rodzaju danych wejściowych modelu, tj.:

- a) średnich dobowych wartości parametrów meteorologicznych z badań terenowych,
- b) godzinowych wartości pomiarów terenowych na wysokości 2 m,
- c) średnich dobowych wartości ze stacji meteorologicznej (Lublinek),
- d) godzinowych wartości z najbliższej stacji meteorologicznej.

Aby dokonać porównania wyników symulacji z wartościami referencyjnymi niezbędnym było pozyskanie informacji o wartościach parametrów meteorologicznych na wysokości 2 m. Z uwagi na fakt, że wyniki symulacji są możliwe do odczytania w programie dla wysokości 1,5 m oraz 2,5 m koniecznym było ich uśrednienie. Zgodność wyników symulacji z wartościami referencyjnymi została wyznaczona za pomocą średniego bezwzględnego błędę procentowego, zwanego dalej błędem pomiarowym (rów. 9).

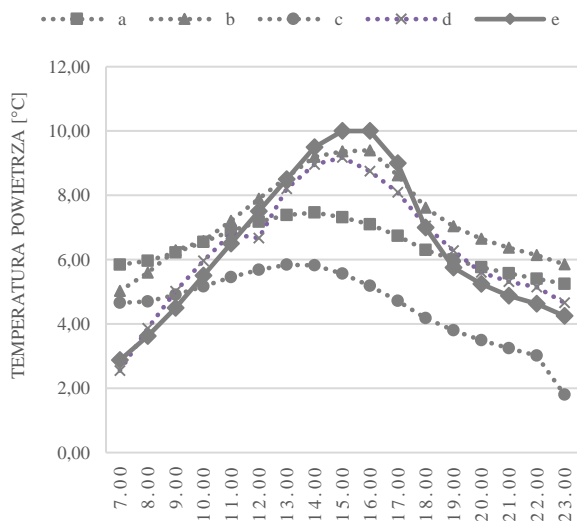
$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(y_r - y)}{y_r} \right| \quad (9)$$

gdzie:

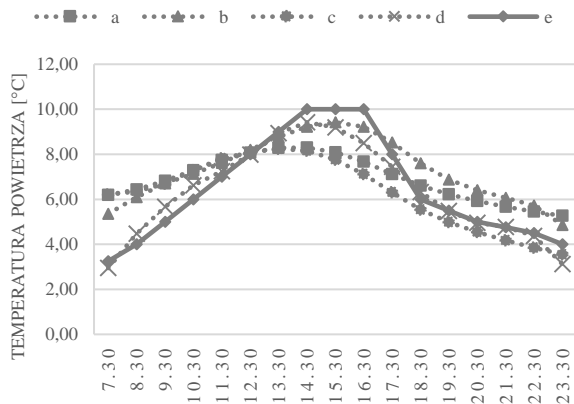
- n – liczba pomiarów,
- y_r – wartość referencyjna,
- y – wartość wyjściowa symulacji.

Rys. 8-9 przedstawiają porównanie wyników symulacji temperatury powietrza dla czterech przypadków (patrz rozdz. 3. pkt. a-d). Wykresy zostały uzupełnione o wartości referencyjne parametrów (e).

Analiza wykazała, że największy stopień zgodności z wartościami rzeczywistymi charakteryzował symulacje bazujące na danych pozyskanych z pomiarów terenowych. W tym przypadku średni bezwzględny błąd procentowy wynosił 24,22%. Oznacza to, iż wyniki symulacji odbiegały o 1,43 °C od wartości referencyjnych. Mniejszą dokładnością charakteryzowały się opracowania, których dane wejściowe stanowiły informacje ze stacji pomiarowej Lublinek. W tym przypadku błąd pomiarowy wynosił 28,89%, co stanowi średnią wartość 1,84 °C.



Rys. 8. Temperatura powietrza na obszarze placu miejskiego przy skrzyżowaniu ul. Piotrkowskiej i ul. Więckowskiego w Łodzi (symulacje: a - średnie dobowe wartości z pomiarów terenowych, b - godzinowe wartości z pomiarów terenowych, c - średnie dobowe wartości ze stacji meteorologicznej, d - godzinowe wartości ze stacji meteorologicznej, e - wartości referencyjne)
 Fig. 8. Air temperature at town square at Piotrkowska and Więckowskiego crossroad in Lodz (simulations: a - average daily values from the field research, b - hourly values from the field research, c - average daily values from the weather station, d - hourly values from the weather station, e - reference values)

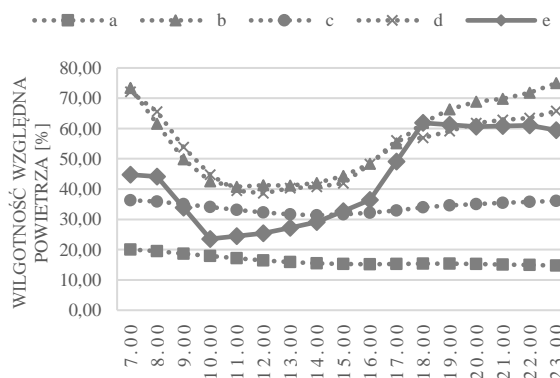


Rys. 9. Temperatura powietrza na obszarze Starego Rynku w Łodzi (symulacje: a - średnie dobowe wartości z pomiarów terenowych, b - godzinowe wartości z pomiarów terenowych, c - średnie dobowe wartości ze stacji meteorologicznej, d - godzinowe wartości ze stacji meteorologicznej, e - wartości referencyjne)
 Fig. 9. Air temperature at Stary Rynek in Lodz (simulations: a - average daily values from the field research, b - hourly values from the field research, c - average daily values from the weather station, d - hourly values from the weather station, e - reference values)

Temperatura powietrza dla najlepszych scenariuszy (rys. 8-9, krzywa b) została przeszacowana przez program w godzinach 7.00-12.30 oraz 18.00-23.30. Średni bezwzględny błąd procentowy wynosił 28,16%. Oznacza to, że wartość temperatury powietrza odbiegała o 1,82°C od wartości rzeczywistych. W godzinach 12.30-18.00 parametr został niedoszacowany. Błąd pomiarowy wynosił 4,79%, co daje wartość 0,62°C. W obu przypadkach ekstrema temperaturowe były obserwowane w godzinach 14.00-16.00. Ich wartość wahała się w przedziale 9,40-9,42°C.

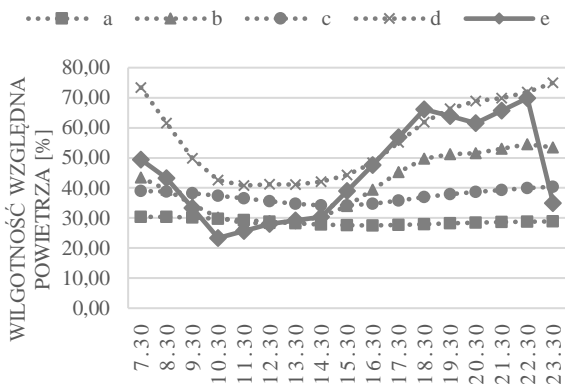
Kolejnym parametrem objętym analizą była wilgotność względna powietrza (rys. 10-11). Analiza wyników symulacji wykazała, że największym stopniem zgodności z wartościami referencyjnymi charakteryzowały się opracowania bazujące na wartościach bezpośrednich pomiarów terenowych. W najlepszym przypadku (scenariusz b) średni błąd pomiarowy wynosił 26,15%. Oznacza to, że wilgotność względna odbiegała o 11,47% od wartości rzeczywistej. Symulacje stworzone przy użyciu danych ze stacji meteorologicznej były obarczone większym błędem pomiarowym, który wynosił średnio 31,11% (13,77%).

Wyniki symulacji dla obszaru placu miejskiego (rys. 10, krzywa b) wskazują, że średni bezwzględny błąd procentowy wynosił 36,29%. Wartość wilgotności względnej odbiegała o 15,71% od wartości rzeczywistej. Uzyskana najniższa precyzja symulacji została spowodowana drastyczną zmianą warunków pogodowych około godz. 17.00. Rzeczywiste pomiary wykazały nagły spadek temperatury (1,5°C) oraz wzrost wilgotności powietrza (12,73%). Badania przeprowadzone na terenie Starego Rynku (rys. 11, krzywa b) były obarczone błędem pomiarowym, który wynosił 15,99%. Oznacza to, że wynik symulacji odbiegał o +/-7,23% od wartości rzeczywistej.



Rys. 10. Wilgotność względna powietrza na obszarze placu miejskiego przy skrzyżowaniu ul. Piotrkowskiej i ul. Więckowskiego w Łodzi (symulacje: a - średnie dobowe wartości z pomiarów terenowych, b - godzinowe wartości z pomiarów terenowych, c - średnie dobowe wartości ze stacji meteorologicznej, d - godzinowe wartości ze stacji meteorologicznej, e - wartości referencyjne)

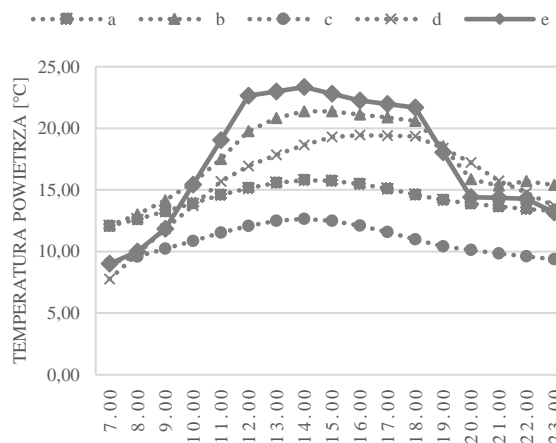
Fig. 10. Relative humidity at town square at Piotrkowska and Więckowskiego crossroad in Lodz (simulations: a – average daily values from the field research, b – hourly values from the field research, c – average daily values from the weather station, d – hourly values from the weather station, e – reference values)



Rys. 11. Wilgotność względna powietrza na obszarze Starego Rynku w Łodzi (symulacje: a - średnie dobowe wartości z pomiarów terenowych, b - godzinowe wartości z pomiarów terenowych, c - średnie dobowe wartości ze stacji meteorologicznej, d - godzinowe wartości ze stacji meteorologicznej, e - wartości referencyjne)

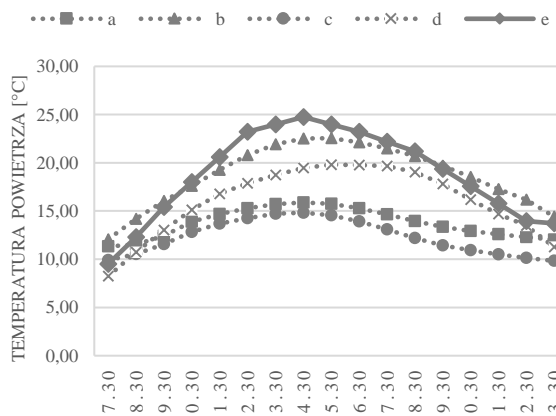
Fig. 11. Relative humidity at Stary Rynek in Lodz (simulations: a – average daily values from the field research, b – hourly values from the field research, c – average daily values from the weather station, d – hourly values from the weather station, e – reference values)

Poziom zachmurzenia nieba może mieć istotny wpływ na rezultaty badań. Modyfikuje on wartość promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemskiej, a tym samym temperaturę oraz wilgotność powietrza. Pomiaru terenowe powinny być wykonywane w warunkach bezchmurnej pogody w celu wyeliminowania wpływu zachmurzenia na wyniki opracowań. Takie podejście jest powszechnie stosowane w literaturze przedmiotu, aby ograniczyć przestrzenne oraz czasowe zróżnicowanie wartości parametrów meteorologicznych [12,13,14]. W związku z tym, druga seria pomiarów została wykonana w warunkach bezchmurnej pogody. Trwała ona od godz. 4.00 dnia 10 kwietnia do godz. 0.30 dnia 11 kwietnia. Następnie zostały stworzone symulacje w programie ENVI-met bazujące na wartościach bezpośrednich pomiarów w terenie oraz danych ze stacji meteorologicznej. Wyniki symulacji dla temperatury powietrza zostały przedstawione na rys. 12-13.



Rys. 12. Temperatura powietrza na obszarze placu miejskiego przy skrzyżowaniu ul. Piotrkowskiej i ul. Więckowskiego w Łodzi (symulacje: a - średnie dobowe wartości z pomiarów terenowych, b - godzinowe wartości z pomiarów terenowych, c - średnie dobowe wartości ze stacji meteorologicznej, d - godzinowe wartości ze stacji meteorologicznej, e - wartości referencyjne) [10.04.2017]

Fig. 12. Air temperature at town square at Piotrkowska and Więckowskiego crossroad in Lodz (simulations: a – average daily values from the field research, b – hourly values from the field research, c – average daily values from the weather station, d – hourly values from the weather station, e – reference values) [10.04.2017]

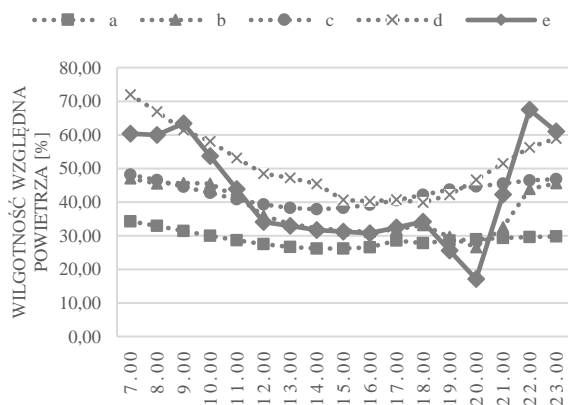


Rys. 13. Temperatura powietrza na obszarze Starego Rynku w Łodzi (symulacje: a - średnie dobowe wartości z pomiarów terenowych, b - godzinowe wartości z pomiarów terenowych, c - średnie dobowe wartości ze stacji meteorologicznej, d - godzinowe wartości ze stacji meteorologicznej, e - wartości referencyjne) [10.04.2017]

Fig. 13. Air temperature at Stary Rynek in Lodz (simulations: a – average daily values from the field research, b – hourly values from the field research, c – average daily values from the weather station, d – hourly values from the weather station, e – reference values) [10.04.2017]

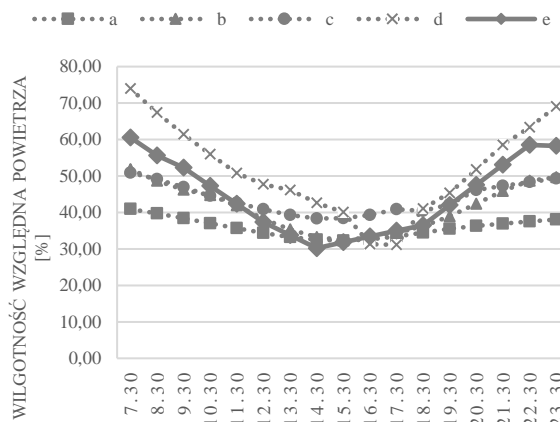
Przeprowadzona seria symulacji potwierdziła, że najlepsze scenariusze (rys. 12-13, krzywa b) zostały obciążone średnim błędem pomiarowym, który wynosił 9,67% (1,74°C). Analiza wyników symulacji temperatury powietrza w warunkach bezchmurnej pogody wykazała, że program przeszacował wartość parametru w godzinach 7.00-10.00 oraz 19.00-23.30. Odpowiednio średnie błędy pomiarowe wynosiły 26,92% (4,92°C) oraz 8,45% (1,53°C). Zaniżenie wartości temperatury miało miejsce w godzinach 10.30-18.30. Na terenie placu miejskiego odchylenie wynosiło 11,27% (1,97°C). Wartość błędu dla obszaru Starego Rynku była równa 8,07% (1,51°C). Modele bazujące na danych ze stacji meteorologicznej charakteryzowała mniejsza dokładność wyników. Odchylenia od wartości rzeczywistych oscylowały pomiędzy 22,93% (4,01°C), a 23,36% (4,38°C).

Analiza wilgotności względnej powietrza potwierdziła zasadność wykonywania pomiarów terenowych w celu uzyskania danych wejściowych do tworzenia modeli procesów atmosferycznych. W tym przypadku (rys. 14-15) symulacje były obciążone średnim błędem pomiarowym wynoszącym 18,29%. Oznacza to, że modelowana wartość wilgotności względnej odbiegała o 7,89% od rzeczywistej. Największymi odchyleniami charakteryzowały się symulacje bazujące na wartościach danych pozyskanych z najbliższej stacji meteorologicznej. Wynosiły one +/- 10,46%.



Rys. 14. Wilgotność względna powietrza na obszarze placu miejskiego przy skrzyżowaniu ul. Piotrkowskiej i ul. Więckowskiego w Łodzi (symulacje: a - średnie dobowe wartości z pomiarów terenowych, b - godzinowe wartości z pomiarów terenowych, c - średnie dobowe wartości ze stacji meteorologicznej, d - godzinowe wartości ze stacji meteorologicznej, e - wartości referencyjne) [10.04.2017]
Fig. 14. Relative humidity at town square at Piotrkowska and Więckowskiego crossroad in Lodz (simulations: a - average daily values from the field research, b - hourly values from the field research, c - average daily values from the weather station,

d - hourly values from the weather station, e - reference values) [10.04.2017]

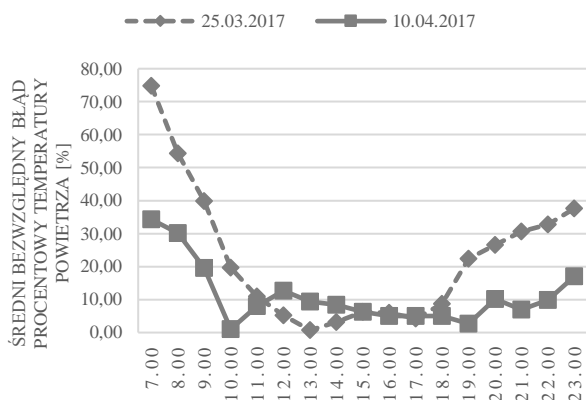


Rys. 15. Wilgotność względna powietrza na obszarze Starego Rynku w Łodzi (symulacje: a - średnie dobowe wartości z pomiarów terenowych, b - godzinowe wartości z pomiarów terenowych, c - średnie dobowe wartości ze stacji meteorologicznej, d - godzinowe wartości ze stacji meteorologicznej, e - wartości referencyjne) [10.04.2017]

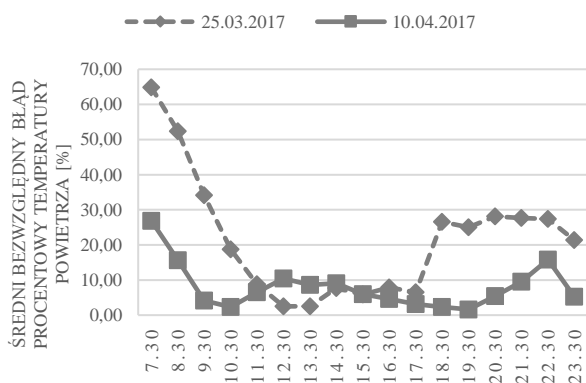
Fig. 15. Relative humidity at Stary Rynek in Lodz (simulations: a - average daily values from the field research, b - hourly values from the field research, c - average daily values from the weather station, d - hourly values from the weather station, e - reference values) [10.04.2017]

Analiza najlepszych scenariuszy symulacji bazujących na bezpośrednich pomiarach terenowych (rys. 14-15, krzywa b) wykazała, że wilgotność względna powietrza została niedoszacowana w godzinach 7.00-11.30 oraz 16.30-22.30. Symulowana wartość odbiegała odpowiednio o 6,01% oraz 6,67%. W godzinach 12.00-16.00 błąd pomiaru wynosił 3,50%. Na obszarze placu miejskiego wartość wahała się o 0,98%, zaś na terenie Starego Rynku odbiegała o +/- 2,08% od wartości referencyjnej.

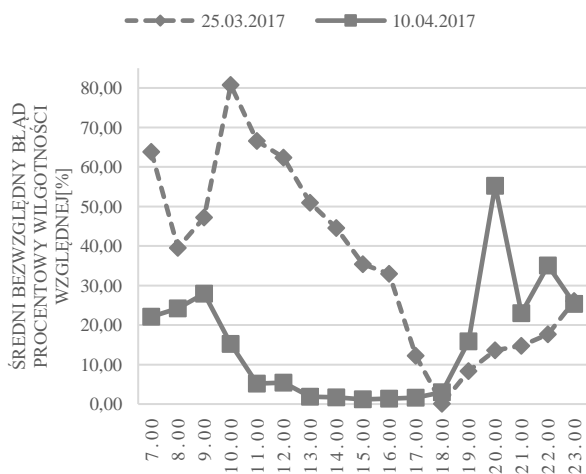
Ostatni etap analiz polegał na ocenie wpływu warunków pogodowych na wyniki przeprowadzonych symulacji. Wartości średnich bezwzględnych błędów procentowych dla temperatury powietrza oraz wilgotności względnej dwóch serii pomiarowych zostały przedstawione na rys. 16-19.



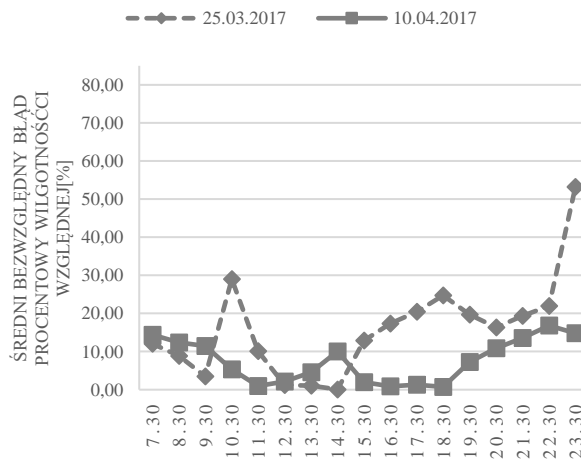
Rys. 16. Porównanie średnich bezwzględnych błędów procentowych temperatury powietrza dla placu miejskiego
Fig. 16. Comparison of air temperature mean absolute percentage errors at town square



Rys. 17. Porównanie średnich bezwzględnych błędów procentowych temperatury powietrza dla Starego Rynku
Fig. 17. Comparison of air temperature mean absolute percentage errors at Stary Rynek



Rys. 18. Porównanie średnich bezwzględnych błędów procentowych wilgotności względnej dla placu miejskiego
Fig. 18. Comparison of relative humidity mean absolute percentage errors at town square



Rys. 19. Porównanie średnich bezwzględnych błędów procentowych wilgotności względnej dla Starego Rynku
Fig. 19. Comparison of relative humidity mean absolute percentage errors at Stary Rynek

Pomiary terenowe w dniach 25/26 marca 2017 roku były wykonywane w warunkach zachmurzenia wynoszącego 39,92%. Druga seria badań (10/11 kwietnia 2017) została przeprowadzona podczas bezchmurnej pogody. Analizy porównawcze wykazały, że symulacje stworzone przy użyciu wyników pomiarów terenowych w warunkach zachmurzenia były obarczone co najmniej dwukrotnie większym średnim bezwzględnym błędem procentowym (tabela 4). Zależność ta była widoczna zarówno dla temperatury powietrza jak i wilgotności względnej.

Tabela 4. Wartość średniego bezwzględnego błędu procentowego symulacji (scenariusz b) w dniach 25.03.2017 r. oraz 10.04.2017 r.
Table 4. Value of mean absolute percentage error for simulations (scenario b) on 25.03.2017 and 10.04.2017

ŚREDNI BEZWZGLĘDNY BŁĄD PROCENTOWY [%]		
parametr meteorologiczny	plac miejski	Stary Rynek
temperatura powietrza [25.03.2017]	22.58	21.64
temperatura powietrza [10.04.2017]	11.27	8.07
wilgotność względna powietrza [25.03.2017]	36.29	16.00
wilgotność względna powietrza [10.04.2017]	15.62	7.62

4. WNIOSKI

Oprogramowanie ENVI-met umożliwia tworzenie symulacji procesów atmosferycznych bazujących na wartościach godzinowych lub dobowych parametrów meteorologicznych. Dane te mogą pochodzić z bezpośrednich pomiarów terenowych lub ogólnodostępnych, cyfrowych baz danych stacji meteorologicznych.

Stacje meteorologiczne są najczęściej lokalizowane na terenach otwartych. Tym samym nie odzwierciedlają one warunków panujących w centrach miast. Wykorzystanie informacji z cyfrowych baz danych stacji Lublinek wymagało przeliczenia prędkości wiatru dla terenu śródmiejskiego (rów. 2-5). Dla każdego z modeli końcowym było obliczenie wartości temperatury potencjalnej oraz wilgotności względnej na wysokości 2 500 m (rów. 6-7).

Analiza porównawcza wyników stworzonych symulacji dla czterech wariantów (rozdz. 3 pkt a-d) wykazała, że największym stopniem zgodności z wartościami rzeczywistymi charakteryzowały się opracowania bazujące na bezpośrednich pomiarach terenowych (interwał godzinowy) w warunkach bezchmurnej pogody. Średni bezwzględny błąd procentowy dla temperatury powietrza wynosił 9,67% (1,74°C). Odchylenie wilgotności względnej powietrza oscylowało w granicach +/- 11,62%, co daje wartość 5,01%. Symulacje bazujące na danych ze stacji pomiarowej charakteryzowały się mniejszą dokładnością otrzymywanych wyników. Średni bezwzględny błąd procentowy temperatury powietrza wynosił 12,99% (2,36°C). Wilgotność względna odbiegała o +/-11,29% od wartości rzeczywistej.

Symulacje bazujące na danych pozyskanych w warunkach zachmurzenia (39,92%) były obciążone dwukrotnie większymi średnimi bezwzględnymi błędami procentowymi. Dla opracowań bazujących na bezpośrednich pomiarach wykonanych w dniach 25/26 marca 2017 roku odchylenie temperatury powietrza wynosiło 22,11% (1,43°C), zaś wilgotności względnej 26,15% (11,74%). Mniejszą precyzją otrzymanych wyników charakteryzowały się symulacje przeprowadzone przy użyciu danych ze stacji meteorologicznych. Błąd pomiarowy temperatury powietrza wynosił 28,59% (1,84°C). Odchylenie wilgotności względnej wahało się w przedziale od 30,57% ($f = 13,24\%$) do 31,57% ($f = 14,31\%$).

EVALUATION OF METEOROLOGICAL DATA USAGE POSSIBILITIES IN WEATHER PARAMETERS SIMULATIONS

Summary: CFD applications are promising alternative to traditional microclimate research and thermal comfort on urbanized areas. The CFD program ENVI-met (4.1.2.) was used in

the paper in order to evaluate possibilities of usage of meteorological data obtained from weather stations and direct field research in atmospheric process simulations. Two public spaces such as: the town square at Piotrkowska and Więckowskiego crossroad and Stary Rynek in Lodz were considered in research. Air temperature and relative humidity were modelled in the study. The highest quality of results was obtained in simulations based on direct field measurements. Additionally, simulations for cloudless and cloudiness weather were compared.

Literatura

- [1] Błażejczyk K. et al. *Miejska wyspa ciepła w Warszawie*. IGIPZ PAN, Wydawnictwo Akademickie SEDNO, Warszawa 2014
- [2] Oliveira S., Andrade H. *An initial assessment of the bioclimatic comfort in an outdoor public space in Lisbon*. International Journal of Biometeorology 52 (2007) 69–84
- [3] Hien W. N., Ignatius M., Eliza A., Jusuf S. K., Samsudin R. *Comparison of STEVE and ENVI-met as temperature prediction models for Singapore context*. International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development 3 (2012) 197-209
- [4] Lenzholer S., Kohl J. *Immersed in microclimatic space: Microclimate experience and perception of spatial configuration in Dutch squares*. Landscape and Urban Planning (95) 1-15
- [5] Salata F., Golasi I., De Lieto Vollaro R. *Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data*. Sustainable City and Society 26 (2016) 318-343
- [6] Huttner S., Bruse M., Dostal P. *Using ENVI-met to simulate the impact of global warming on the microclimate in central European cities* [in:] H. Mayer, A. Matzarakis (eds.) *Berichte des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg 18 (2008)*. 5th Japanese-German Meeting on Urban Climatology, 2008, 307-312
- [7] Vankerkom J., Vos P., Maiheu B., Nikolova I., De Maerschalek B., Janssen S. *VITO extension to the ENVI-met model*. Flemish Institute for Technological Research, 2012
- [8] Żurański J. A. *Wpływ warunków klimatycznych i terenowych na obciążenie wiatrem konstrukcji budowlanych*. Prace Naukowe Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa 2005
- [9] Flaga A. *Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania*. Arkady, 2008
- [10] Simiu E. *Equivalent statistic wind load for tall building design*. Proc. of the 4-th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Heathrow, 721-735
- [11] Stopa-Boryczka M., Boryczka J. *Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce*. Uniwersytet Warszawski, Warszawa 2016

- [12] Srivanit M., Hokao K. *Evaluating the cooling effects of greening for improving the outdoor thermal environment at an institutional campus in the summer*. Building and Environment 66 (2013) 158-172
- [13] Middel A., Häb K., Brazel A. J., Martin C. A., Guhathakurta S. *Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zone*. Landscape and Urban Planning 122 (2014) 16-28
- [14] Salata F., Golasi I., De Lieto Vollaro E., Bisegna F., Nardecchia F., Coppi M., Guliermetti F., De Lieto Vollaro A. *Evaluation of different urban microclimate mitigation strategies through a PMV analysis*. Sustainability 7 (2015) 9012-9030