

Received: December 20, 2026; **Received in revised form:** February 6, 2026; **Accepted:** September 21, 2026

Citation: Mochulska, M.-V., Zielonko-Jung, K., Pisula, M., Poćwierz, M., Szumbariski, J., (2026). Limited Urban Ventilation in the Case of Contemporary Perimeter Block Housing in Po-land/ Problem ograniczonej wentylacji w miastach na przykładzie współczesnej kwartałowej zabudowy mieszkaniowej w Polsce, *Środowisko Mieszkaniowe/ Housing Environment*, 56, pp. 100–119, e2026016. <https://doi.org/10.2478/he-2026-0016>

MARIYA-VERONIKA MOCHULSKA*, KATARZYNA ZIELONKO-JUNG**, MACIEJ PISULA***, MARTA POĆWIERZ****, JACEK SZUMBARSKI*****

Limited urban ventilation in the case of contemporary perimeter block housing in Poland

Problem ograniczonej wentylacji w miastach na przykładzie współczesnej kwartałowej zabudowy mieszkaniowej w Polsce

Abstract

Regulating air exchange processes in cities is essential to create spaces conducive to residents' health and well-being and to make areas resilient to climate change. The widespread trend toward increasing building density risks reducing ventilation efficiency in the vicinity of buildings that form closed spaces. The aim of the article is to diagnose the risk of insufficient ventilation around perimeter building development under the design conditions in force in Poland. The research focused on multi-family residential buildings. A building model was developed using analyses of multi-family block buildings erected after 2003 in three large Polish cities. The study shows that the dimensions of the perimeter building development, especially the w/h ratio of the inner courtyards, resemble parameters recognised in the literature as causing skimming flow and wake interference flow effects. The CFD analysis shows that, for most of the area inside the perimeter building development, the velocity amplification factor does not exceed 0.45. Therefore, the results confirm the risk of insufficient ventilation.

Streszczenie

Regulacja procesów wymiany powietrza w miastach jest niezbędna dla tworzenia przestrzeni sprzyjających zdrowiu i dobrostanu mieszkańców oraz odpornej na zmiany klimatu. Powszechna tendencja do zwiększania intensywności zabudowy powoduje ryzyko obniżenia efektywności wentylacji w otoczeniu budynków tworzących zamknięte przestrzenie. Celem artykułu jest zdiagnozowanie ryzyka występowania problemu niedostatecznej wentylacji wokół zabudowy kwartałowej w uwarunkowaniach projektowania w Polsce. Badania ukierunkowano na zabudowę o funkcji mieszkaniowej wielorodzinnej. Modele budynków opracowano na podstawie analizy morfologicznej kwartałów wzniesionych po 2003 roku w trzech dużych miastach Polski. Wykazano, że wymiary kwartałów, a szczególnie współczynniki proporcji w/h wewnętrznych dziedzińców bliskie są parametrom uznanym w literaturze za powodujące efekt przepływu ślizgowego i szorstkościowo zakłóconego. Analiza CFD wykazała zaś, że dla większości obszaru wewnątrz kwartału współczynnik wzmocnienia prędkości nie przekracza wartości 0,45. Wyniki badań potwierdzają zatem ryzyko występowania niedostatecznej wentylacji.

Keywords: airflow around buildings, artificial intelligence in architecture, residential architecture, sustainable city, urban morphology

Słowa kluczowe: architektura mieszkaniowa, morfologia zabudowy, sztuczna inteligencja w architekturze, wentylacja miejska, zrównoważone miasto

* Mariya-Veronika MOCHULSKA, mgr inż. arch., Wydział Architektury, Politechnika Gdańska/ Mariya-Veronika MOCHULSKA, MSc., Faculty of Architecture, Gdansk University of Technology, <https://orcid.org/0000-0002-8566-9306>, e-mail: mariya-veronika.mochulska@pg.edu.pl

** Katarzyna ZIELONKO-JUNG, dr hab. inż. arch., prof. PG, Wydział Architektury, Politechnika Gdańska/ Katarzyna ZIELONKO-JUNG, Associate Prof., Faculty of Architecture, Gdansk University of Technology, <https://orcid.org/0000-0003-1323-0924>, e-mail: katarzyna.zielonko-jung@pg.edu.pl

*** Maciej PISULA, mgr inż., Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska/ Maciej PISULA, MSc., Faculty of Power and Aeronautical Engineering, Warsaw University of Technology, <https://orcid.org/0000-0003-0618-3349>, e-mail: maciej.pisula.dokt@pw.edu.pl

**** Marta POĆWIERZ, dr inż., prof. PW, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska/ Marta POĆWIERZ, Assistant Prof., Faculty of Power and Aeronautical Engineering, Warsaw University of Technology, <https://orcid.org/0000-0003-0941-3840>, e-mail: marta.pocwierz@pw.edu.pl

***** Jacek SZUMBARSKI, prof. dr hab. inż., Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska/ Jacek SZUMBARSKI, Associate Prof., Faculty of Power and Aeronautical Engineering, Warsaw University of Technology, <https://orcid.org/0000-0003-1176-106X>, e-mail: jacek.szumbariski@pw.edu.pl

Copyright: © 2026 Mochulska, Zielonko-Jung, Pisula, Poćwierz, Szumbariski. This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. WSTĘP

Zjawisko nadmiernego i niekontrolowanego rozrostu terytorialnego miast (*urban sprawl*) powoduje poważne problemy w ich funkcjonowaniu, takie jak konieczność tworzenia nowej infrastruktury technicznej i społecznej, zwiększenie potrzeb transportu, zmniejszenie ilości terenów wartościowych przyrodniczo. Koncepcja miasta zwartego stała się kluczową ideą w dążeniu do ograniczenia tego zjawiska i zrównoważonego rozwoju miast (European Commission. Directorate General for Regional Policy, 2011). Wraz z polityką zagęszczenia zabudowy wzrasta jednak ryzyko spadku jakości mezoklimatu miasta (Cao & Li, 2024; Hameed Basee et al., 2024). Jedną z przyczyn jest hamowanie przepływu powietrza przez zabudowę, co powoduje spadek efektywności wentylacji i obniżenie komfortu wiatrowego przestrzeni miejskich (Baş et al., 2024; Zielonko-Jung et al., 2021). Konsekwencjami tego zjawiska są między innymi: wzrost temperatury w miastach (intensyfikacja efektu miejskiej wyspy ciepła), zwiększenie zanieczyszczenia powietrza (brak możliwości odprowadzania zanieczyszczeń), ograniczenie możliwości naturalnej wentylacji budynków, wzrost zapotrzebowania budynków na chłodzenie. Jednym z ważniejszych elementów polityki wzmacniania odporności miast jest kontrola możliwości jego przewietrzania (Hagen, 2016; Liu et al., 2024; J. Wiszniowski, J. 2025; J. Zhang et al., 2024). Pozwala ono na wymianę powietrza, a więc usuwanie zanieczyszczeń i chłodzenie w okresach gorących, za pomocą naturalnych sił wiatru. Tymczasem coraz większa intensywność zabudowy utrudnia jego przepływ. Kontrola procesów wentylacji miast w dobie silnego nacisku na efektywność wykorzystania wolnych terenów jest niezwykle trudna. Tym bardziej, że pomimo znacznego rozwoju wiedzy w zakresie inżynierii wiatrowej, nadal nie ma jednoznacznych przesłanek dotyczących kształtowania zabudowy w sposób umożliwiający osiągnięcie równowagi pomiędzy kryterium intensywności i zwartości (zgodne z ideą miasta zwartego) a płynnością wentylacji przestrzeni miejskich (Hågbö & Giljarhus, 2024; L. Zhang & Yuan, 2023).

Liczne badania wykazują duże znaczenie geometrii zabudowy w transformacji ruchów powietrza wynikających z czynników naturalnych (atmosferycznych, klimatycznych, geograficznych) (Hågbö & Giljarhus, 2024; Zhao et al., 2024). Duża część publikacji dotyczy charakterystyki zjawisk powstających w zamkniętych wnętrzach urbanistycznych, takich jak ulice i place (Dissanayake et al., 2021). Ważnym osiągnięciem w tym zakresie było zidentyfikowanie trzech rodzajów przepływu powietrza w przestrzeni ulicy przy wiatrach prostopadłych do jej kierunku: przepływu izolowanych szorstkości (pozwalającego na efektywną wentylację ulicy), przepływu szorstkościowo zakłóconego (utrudnionego) oraz przepływu ślizgowego (w strefie ulicy występuje ruch wirowy, a powietrze nie podlega wymianie) (Hussain, 1978). Rodzaj przepływu zależy od proporcji geometrycznej pomiędzy wysokością budynków a szerokością ulicy (współczynnik proporcji w/h lub h/w). Na obszarach miejskich o zwartej zabudowie, gdzie wysokości budynków są znaczne, a odległości między nimi niewielkie, istnieje duże ryzyko występowania przepływu ślizgowego, kiedy większość powietrza przemieszcza się nad szczytami budynków (Zajic et al., 2011). Skutkuje to spadkiem komfortu termicznego i jakości powietrza w otoczeniu budynków i w efekcie także w ich wnętrzach, a także intensyfikacją efektu miejskiej wyspy ciepła w skali miasta (Ascione et al., 2024; Mirhosseini, 2019; Oke et al., 2017).

Niniejszy artykuł dotyczy ryzyka powstawania problemów z wentylacją przestrzeni miejskich w uwarunkowaniach dużych, rozwijających się miast polskich. Podlegają one silnej presji inwestycyjnej. Zabudowa śródmiejska jest dogęszczana kosztem terenów otwartych i przemysłowych, a nawet przez wymianę

1. INTRODUCTION

The excessive and uncontrolled territorial expansion of urban areas, known as urban sprawl, creates serious challenges for city functioning, including the need for new technical and social infrastructure, increased transport needs, and a reduction in land of natural value. The concept of the compact city has become a key idea in efforts to avert this phenomenon and promote sustainable urban development (European Commission. Directorate General for Regional Policy, 2011). However, as urban densification policies advance, the quality of the city's mesoclimate is increasingly at risk of decline. One reason is that urban development inhibits airflow, reducing ventilation efficiency and wind comfort in urban spaces (Baş et al., 2024; Zielonko-Jung et al., 2021). The consequences include higher urban temperatures (intensification of the urban heat island effect), increased air pollution (due to reduced pollutant dispersion), reduced building ventilation capacity, and higher demand for building cooling. The most important elements of policies to strengthen urban resilience refer to controlling its ventilation capacity (Hagen, 2016; Liu et al., 2024; Wiszniowski, 2025; Zhang et al., 2024). Proper ventilation allows air to be exchanged, thus removing pollutants and cooling the area during hot periods by natural wind forces. Meanwhile, intensifying development hinders airflow. Controlling city ventilation amid strong pressure to use vacant land efficiently is extremely difficult. This is all the more so because, despite the considerable development of knowledge in wind engineering, still no clear rationale can be seen for shaping developments in a way that strikes a balance between the criteria of intensity and compactness (in line with the idea of the compact city) on the one hand and the fluidity of ventilation of urban spaces (Hågbö and Giljarhus, 2024; L. Zhang and Yuan, 2023) on the other.

Numerous studies show the importance of building geometry in ensuring air movement driven by natural factors (atmospheric, climatic, geographical) (Hågbö and Giljarhus, 2024; Zhao et al., 2024). Much of the literature describes phenomena in enclosed urban environments, such as streets and public squares (Dissanayake et al., 2021). The identification of three types of airflow in the street space in winds perpendicular to the direction of the street, that is isolated roughness flow (allowing efficient ventilation of the street), wake interference flow (obstructed flow) and skimming flow (there is a swirling movement in the street zone and the air is not exchanged) (Hussain, 1978) have been an important development in this field. The type of flow depends on the geometric ratio between building height and street width (aspect ratio w/h or h/w). In compact urban areas, characteristic of the compact city model, where buildings are tall and spacing between them is limited, there is a high risk of skimming flow, in which most air moves above the rooftops (Zajic et al., 2011). This reduces thermal comfort and air quality in the areas surrounding buildings and, consequently, within their interiors. It also contributes to the intensification of the urban heat island effect on a city-wide scale (Ascione et al., 2024; Mirhosseini, 2019; Oke et al., 2017).

This article discusses the risk of urban ventilation issues in large, developing Polish cities under strong investment pressure. Inner-city developments are being densified at the expense of open and post-industrial areas, and even by replacing existing developments with new, more intensive ones. Also on the outskirts, hitherto poorly urbanised areas are seeing investments with an intensity characteristic of the

zabudowy istniejącej na nową, bardziej intensywną. Także na terenach obrzeżnych, dotąd słabo zurbanizowanych, pojawiają się inwestycje o intensywności charakterystycznej dla śródmieścia. Jednocześnie kryteria wentylacji przestrzeni miejskich są niemal nie uwzględniane w przepisach regulujących gospodarkę przestrzenną miast, w tym projektowanie nowej zabudowy (Mochulska & Zielonko-Jung, 2024).

Celem artykułu jest odpowiedź na pytanie badawcze: czy we współczesnej zabudowie charakterystycznej dla dużych rozwijających się miast w Polsce może występować ryzyko problemów niedostatecznej wentylacji przestrzeni wokół budynków? Zakres badań zawężono do:

- zabudowy mieszkaniowej wielorodzinnej (z uwzględnieniem zabudowy mieszkaniowej z usługami w parterach), ponieważ jest to dominująca funkcja we współczesnych inwestycjach miejskich (w 2023 roku wydano pozwolenia na budowę 105 698 mieszkań w budynkach jednorodzinnych oraz 130 448 mieszkań w budynkach wielorodzinnych, natomiast przekazano do eksploatacji wyłącznie 21,0 tys. nowych budynków niemieszkalnych (GUS. Housing in 2023, 2024)). Ponadto jest to rodzaj zabudowy powstającej w Polsce głównie według modelu inwestycji deweloperskich (Bradecki & Twardoch, 2013), nastawionych przede wszystkim na zysk ekonomiczny, co skutkuje dążeniem do maksymalnego wykorzystania możliwości prawnych by uzyskać jak największą powierzchnię możliwej do sprzedaży;
- zabudowy o układzie zamkniętym, kwartałowym – gdyż jest to typ uznany w badaniach jako sprzyjający efektywności wykorzystania terenu (Ratti et al., 2003) i kontaktom sąsiedzkim (Gehl, 2017, 4-29; Shirazi, 2020; Sim, 2020, 260; Thadani et al., 2011), a także popularny dla zabudowy wielorodzinnej w Polsce (Bradecki & Twardoch, 2013; Solarek, 2011) jest także charakterystyczny dla miast polskich jako nawiązujący do wzorców historycznych; jednocześnie jest potencjalnie narażony na hamowanie przepływu wiatru, szczególnie w obszarze wewnętrznych dziedzińców, gdzie przestrzeń jest zamknięta w obu kierunkach (Poćwierz & Zielonko-Jung, 2021);
- zabudowy wzniesionej po 2003 roku jako że podlegała ona uwarunkowaniom prawnym wypracowanym w Polsce po reformie ustrojowej lat 90. XX wieku (z systemu komunistycznego w kapitalistyczny neoliberalny), które w ogólnym zakresie pozostają aktualne do dziś [rok uchwalenia (Dz.U. 2003 Nr 80 Poz. 717, 2003)].

Badania światowe w zakresie warunków wiatrowych wokół zwartej zabudowy miejskiej rozwinęły się znacznie w ciągu ostatnich lat (Tominaga, 2024). Największa ich część ukierunkowana jest na przestrzeń ulic, znacznie mniejsza dotyczy problematyki przestrzeni zamkniętych w obu kierunkach, jak place czy dziedzińce (Palusci et al., 2022). Zjawiska wiatrowe badane są najczęściej bądź na bardzo uproszczonych modelach teoretycznych, nie odnoszących się do zasad projektowania urbanistycznego i architektonicznego (Du et al., 2018), bądź na fragmentach zabudowy istniejącej jako studium przypadku. Widoczna jest potrzeba interdyscyplinarnego podejścia do projektowania zabudowy zwartej (Kim & Kim, 2018; Kurppa et al., 2018; Palusci & Cecere, 2022), w tym także wiązanie zagadnień wiatrowych z problemami architektury i planowania przestrzennego. Wymaga to uwzględnienia uwarunkowań prawnych, które regulują zasady wymiarowania budynków i przestrzeni urbanistycznych w danym kraju. W kontekście Polski badania dotyczące problematyki wentylacji przestrzeni zurbanizowanych nie są liczne (Chudzińska, 2021; Flaga, 2019), z czego jedynie część odnosi się do problemów praktyki projektowania architektonicznego, w tym do specyfiki zabudowy mieszkaniowej (Zielonko-Jung et al., 2021).

inner-city zone. At the same time, regulations governing urban spatial management, including the design of new developments, rarely take ventilation criteria for urban spaces into account (Mochulska and Zielonko-Jung, 2024).

The aim of the article is to answer the research question: does the risk of insufficient ventilation of space around buildings in modern building development characteristic of large developing cities in Poland exist? The scope of the research was narrowed down to:

- multi-family residential development (including residential development with ground-floor commercial service functions), as this is the dominant function in contemporary urban investments (in 2023 permits were issued for the construction of 105,698 dwellings in single-family buildings and 130,448 dwellings in multi-family buildings, while only 21,000 new non-residential buildings were commissioned (GUS. Housing in 2023, 2024)). Moreover, this is the main type of development created in Poland according to the model of developer investments (Bradecki and Twardoch, 2013), oriented primarily towards economic profit; this results in the pursuit of the maximum use of legal opportunities to obtain as much sellable space as possible;
- developments with a closed, perimeter development layout – as this is the type recognised in research as conducive to land use efficiency (Ratti et al., 2003) and neighbourhood contact (Gehl, 2017, 4–29; Shirazi, 2020; Sim, 2020, 260; Thadani et al., 2011), and also popular for multi-family developments in Poland (Bradecki and Twardoch, 2013; Solarek, 2011); it is also characteristic of Polish cities as referring to historical patterns; at the same time, it is potentially vulnerable to wind flow inhibition, especially in the area of inner courtyards where space is enclosed in both directions (Poćwierz and Zielonko-Jung, 2021);
- buildings erected after 2003, as they were subject to the legal conditions developed in Poland after the political reform of the 1990s (from the communist system to the capitalist neo-liberal system), still valid in general terms [year of adoption of the (Dz.U. 2003 Nr 80 Poz. 717, 2003)].

Global research on the development of wind conditions around compact urban buildings has developed significantly in recent years (Tominaga, 2024). Most studies focus on street canyon spaces; far fewer address spaces enclosed in both directions, such as squares or courtyards (Palusci et al., 2022). Researchers most often study wind phenomena either in highly simplified theoretical models that do not capture urban and architectural design principles (Du et al., 2018) or in fragments of existing building developments as case studies. The need for an interdisciplinary approach to designing compact developments is apparent (Kim and Kim, 2018; Kurppa et al., 2018; Palusci and Cecere, 2022), including connecting wind issues to architectural and urban planning concerns. This requires considering the legal regulations that govern the dimensioning of buildings and urban spaces in a given country. In Poland, research on the ventilation of urbanised spaces is relatively limited (Chudzińska, 2021; Flaga, 2019), and only a few studies address issues relevant to architectural design practice, including the specifics of residential development (Zielonko-Jung et al., 2021).

To answer the research question posed in this paper, we created a model of a multi-family residential perimeter building

Aby uzyskać odpowiedź na postawione w tym artykule pytanie badawcze opracowano model kwartału zabudowy wielorodzinnej oddający uwarunkowania prawne projektowania w Polsce, po czym poddano go wstępnym badaniom CFD w celu zidentyfikowania charakterystyki problemów przyływu powietrza, które mogą wystąpić w jego otoczeniu.

2. METODOLOGIA

Badania podzielono na trzy etapy – dwa dotyczące opracowania modelu zabudowy, który można uznać za reprezentatywny dla uwarunkowań projektowania w Polsce oraz jeden poświęcony symulacjom wiatrowym modelu. Są to:

- A) opracowanie wstępnych założeń przestrzennych modelu zabudowy: podstawowych cech geometrii działki i zabudowy;
- B) opracowanie modelu bryły budynku uwzględniającego przepisy obowiązujące w Polsce, które wpływają na projektowanie wymiarów budynków i odległości między nimi;
- C) przeprowadzenie badań CFD dla opracowanego modelu kwartału zabudowy oraz wstępna ocena możliwości występowania problemów wentylacji wokół zabudowy, w tym szczególnie jej niekorzystnego spowolnienia wewnątrz dziedzińca.

2.1. OPACOWANIE ZAŁOŻEŃ WSTĘPNYCH

Podstawą dla wstępnych założeń dotyczących wielkości działki oraz geometrii budynku była analiza 28 przykładów kwartałów zabudowy wielorodzinnej wzniesionej po 2003 roku w Polsce w dużych rozwijających się miastach. Wybrano trzy polskie miasta: Warszawę, Gdańsk i Kraków. Są to miasta klasyfikowane w Polsce jako duże ze względu na obszar i liczbę ludności. Największym miastem jest stolica Polski Warszawa (517 km² i 1,8 mln ludności, 3599 osób/km²). Zdecydowanie mniejsze, ale będące centrami regionalnymi są – Kraków (327 km² i 0,8 mln ludności, 2467 osób/km²) i Gdańsk (258 km² obszaru lądowego i 0,48 mln ludności, 1890,82 osób/km² względem obszaru lądowego) (Area and population by territory in 2024, Raport o stanie Miasta Gdańska za 2023 rok). Miasta te zajmują pierwsze trzy miejsca na liście miast o najwyższych cenach mieszkań za m² w Polsce oraz są zaliczane do polskiej czołówki miast rozwijających się (Raport rankingu miast), co można powiązać z porównywalną presją w zakresie inwestycji mieszkaniowych. Miasta te są również w czołówce miast Polskich według rankingu jakości życia (Ranking of quality of life in cities, 2018). Strategie rozwoju miast Warszawy (Uchwała nr LXVI/1800/18, 2018), Krakowa (Uchwała nr XCIV/2449/18, 2018) i Gdańska (Uchwała nr. LIV/1363/22, 2022) koncentrują swoją uwagę na zwiększeniu terenów zielonych w mieście, ochronie istniejącej zieleni i korzyści ekologicznych oraz na powstaniu zabudowy zwartej i lokalnych centrów. Jednocześnie te trzy miasta prezentują zupełnie różne uwarunkowania geograficzne wpływające na ich warunki wyjściowe związane z potencjałem przewietrzania. Kraków ma najmniej korzystne warunki jako miasto położone w kotlinie i pozbawione pełnego systemu korytarzy napowietrzających (Zielonko-Jung & Mochulska, 2022). Warszawa ma warunki dość dobre jako miasto na niewielkim wyniesieniu z systemem dobrze zaprojektowanych, choć niestety sukcesywnie redukowanych korytarzy napowietrzających. Gdańsk jako miasto nadmorskie o układzie liniowym jest wyjątkowo intensywnie wentylowane. Różnice te, choć może nie aż tak ważne w opisywanym tu wstępnym etapie badań, mogą się okazać ciekawe przy planowanych w przyszłości badaniach porównawczych.

Wybrano do analizy 28 przypadków zabudowy kwartałowej, z czego 12 z Warszawy, 8 z Krakowa, 8 z Gdańska. Początkowo zakładano rozdział badanych przypadków na lokalizacje w granicach Śródmieścia oraz poza nim ze względu na różnice w przepisach

development that reflects Polish design regulations; we then subjected the model to preliminary CFD tests to identify airflow issues that may occur in its surroundings.

2. METHODOLOGY

The research was divided into three stages – two concerning the development of a model that can be considered representative of design conditions in Poland, and one devoted to wind simulations of the model:

- A) development of initial spatial assumptions for the development model: basic features of plot geometry and development;
- B) developing a building model that takes into account regulations in Poland affecting the design of building dimensions and distances between them;
- C) conducting CFD analyses for the created perimeter building development model and performing a preliminary risk assessment of potential external ventilation issues, particularly those related to unfavourable airflow deceleration.

2.1. DEVELOPMENT OF INITIAL ASSUMPTIONS

The initial assumptions on plot size and building geometry were based on an analysis of 28 examples of multi-family housing perimeter building developments built after 2003 in large developing cities in Poland. Three Polish cities were selected: Warsaw, Gdańsk and Kraków. These cities are classified as large in Poland due to their area and population. Warsaw, the Polish capital, is the largest city (517 km² and 1,8 million inhabitants, 3599 persons/m²). Definitely smaller cities, but being regional centres, are Kraków (327 km² and 0.8 million population, 2467 persons/km²) and Gdańsk (258 km² land area and 0.48 million population, 1890.82 persons/km² in relation to land area) (Area and population by territory in 2024, 2024; Raport o stanie Miasta Gdańska za 2023 rok). These cities are also ranked in the top three on the list of cities with the highest prices of flats per m² in Poland according to the portal and are ranked among the top developing cities in Poland (Raport rankingu miast). Thus, these cities can be associated with comparable pressure in terms of residential investment. Warsaw, Kraków and Gdańsk are also among the top Polish cities according to the ranking of quality of life (Ranking of quality of life in cities, 2018). City development strategies of Warsaw (Uchwała nr LXVI/1800/18, 2018), Kraków (Uchwała nr XCIV/2449/18, 2018) and Gdańsk (Uchwała nr. LIV/1363/22, 2022), focus on increasing green areas in the city and protecting existing greenery and ecological corridors, as well as on the emergence of compact building developments and local centres. At the same time, the three cities have quite different geographical conditions that shape their initial development potential for ventilation. Kraków has the least favourable conditions as a city located in a basin and lacking a full system of aeration corridors (Zielonko-Jung and Mochulska, 2022). Warsaw has quite good conditions as a city on a slight elevation with a system of well-designed, but unfortunately successively reduced aeration corridors. Gdańsk, as a coastal city with a linear layout, is extremely intensively ventilated. These differences, although perhaps not so important in the preliminary stage of the research described here, may prove interesting in the comparative studies planned for the future.

Twenty-eight cases of perimeter building developments were selected for analysis: 12 in Warsaw, 8 in Kraków, and 8 in

budowlanych w Polsce (Dz.U.2022.0.1225 §60, 2002) w odniesieniu do obu tych stref. Różnice dotyczą wymagań w zakresie dostępu światła dziennego do pomieszczeń mieszkalnych w budynkach wielorodzinnych. Wymagania te w największym stopniu wpływają na decyzje projektowe dotyczące proporcji pomiędzy wysokością zabudowy a odległościami między budynkami. W zabudowie śródmiejskiej dopuszcza się złagodzenie tych wymagań, co powoduje możliwość projektowania gęstszej zabudowy. Wprowadzenie tego rozdziału analizowanych przypadków okazało się jednak skomplikowane ze względu na zmiany w określaniu granic obszaru śródmiejskiego w poszczególnych badanych miastach na przestrzeni lat oraz na możliwość uzyskania odstępstw na wniosek inwestora. Podział ten wykorzystano zatem wyłącznie dla zbadania wielkości działki w dalszym etapie badań. Wybrano przypadki zabudowy o możliwie najprostszej geometrii, czyli o obrysie zbliżonym do prostokąta z pojedynczym dziedzińcem wewnętrznym. Na podstawie geoportal.pl dokonano pomiarów następujących cech geometrycznych:

- wielkości działki, jej kształtu i proporcji (Zgodnie z (Dz.U.2022.0.1225 §12, §13, §19, §23, §36, §40, §60, §271–273, 2002) budynki powinny być sytuowane w określonych odległościach od granicy działki);
- wysokości zabudowy, powierzchni zabudowy, intensywności zabudowy (parametry wymagane zgodnie z miejscowymi planami zagospodarowania);
- współczynnik h/w (opisany w dalszej części artykułu parametr wykorzystywany w badaniach przepływu wiatru wokół budynków (Mochulska & Zielonko-Jung, 2024)).

W efekcie uzyskano uśrednione przedziały wartości badanych parametrów.

2.2. OPRAWOWANIE MODELU BRYŁY BUDYNKU

Opierając się na założeniach uzyskanych w wyniku opisanego wyżej etapu, opracowano model bryły budynku. Wykorzystano oprogramowanie (Kolega, 2023) stworzone w 2023 roku przez firmę Designbotic. Oprogramowanie wykorzystuje zaawansowane modele obliczeniowe oparte na algorytmach generatywnych oraz sztucznej inteligencji (AI). Program automatycznie generuje i analizuje różne rozwiązania projektowe na podstawie danych wejściowych, takich jak granice działki, granica zabudowy, powierzchnia zabudowy, wysokość zabudowy. Dostosowany jest do projektowania koncepcyjnego budynków wielorodzinnych z uwzględnieniem przepisów obowiązujących w Polsce. Daje możliwość wygenerowania wielu rozwiązań (do 32 wariantów w zależności od liczby możliwych konfiguracji budynków) dla określonych założeń, które można wyeksportować do oprogramowania CAD i BIM. Na potrzeby tych badań wygenerowano 4 modele budynków o różnych wariantach planu i odległościach od granicy działki. Dwa z nich dotyczą strefy poza granicami śródmieścia, z różnymi proporcjami działki, ale z jednakową wysokością zabudowy. Pozostałe dwa modele opracowano dla strefy śródmiejskiej, przy zachowaniu tych samych proporcji działki i wysokości zabudowy, lecz z różnymi odległościami od granicy działki. Wybór jednego modelu przeznaczonego do dalszych badań nastąpił na podstawie kryteriów:

- wyboru wariantu dla strefy nieśródmiejskiej, czyli generującej mniejszą intensywność (zgodne z logiką, że jeśli dla tej strefy wystąpią problemy z niedostateczną wentylacją, to będą tym bardziej prawdopodobne dla strefy śródmiejskiej);
- spełnienia warunku, by parametr współczynnika w/h modelu mieścił się w granicach wynikających z analizy przeprowadzonej w etapie A.

2.3. BADANIA CFD MODELU

Kolejnym etapem było przeprowadzenie analiz z wykorzystaniem metod numerycznej mechaniki płynów (CFD). Wstępne badania

Gdańsk. Initially, we assumed the cases would be divided into locations within the inner city zone and outside its boundaries, because Polish building regulations (Dz.U.2022.0.1225 §60, 2002) differ between these two zones. The differences relate to the requirements for daylight access to living spaces in multi-family building developments. These requirements exert the greatest impact on designing the ratio between building development heights and distances between buildings. In the inner-city development zone, these requirements can be less strict, allowing denser building development. However, this division of the analysed cases proved complicated because the boundaries of the inner city area in the individual cities studied changed over the years, and because derogations were possible at the investor's request. This division was therefore used only to examine plot size in a later stage of the research. Cases of buildings with the simplest possible geometry were selected, i.e. with a roughly rectangular outline and a single inner courtyard. The following geometrical features were measured on the basis of geoportal.pl:

- Size of the plot, its shape and proportions (according to (Dz.U.2022.0.1225 §12, §13, §19, §23, §36, §40, §60, §271–273, 2002) buildings should be located at certain distances from the plot boundary);
- Building height, building area, building coverage ratio BCR (parameters required according to local development plans);
- Aspect ratio w/h (the parameter used in wind flow studies around buildings (Mochulska and Zielonko-Jung, 2024)).

This resulted in averaged ranges of values for the parameters studied.

2.2. DEVELOPING A BUILDING MODEL

Based on the assumptions from the previous step, a model of the building's shape was developed. The software used was (Colleague, 2023) developed in 2023 by (Designbotic). The software uses advanced computational models based on generative algorithms and artificial intelligence (AI). The software automatically generates and analyses various design solutions based on input data such as plot boundaries, building boundaries, building footprint, and building height. It is adapted to the conceptual design of multi-family buildings, taking into account the regulations in force in Poland. It allows generating multiple solutions (up to 32 variants, depending on the number of possible building configurations) for specific assumptions, which can be exported to CAD and BIM software. For this research, 4 building models were generated with different plan variants and distances from the plot boundary. Two of these models refer to the zone beyond the inner city boundary, with different plot proportions but equal building heights. The other two models were developed for the inner-city zone, with the same plot proportions and building heights but different distances from the plot boundary. The selection of one model for further study was based on the following criteria:

- the choice of a variant for the zone outside the inner city area, i.e. one that generates less intensity (following the logic that if there are problems with insufficient ventilation for this zone, these issues are all the more likely for the inner city zone);
- the condition that the aspect ratio parameter w/h of the model is within the limits resulting from the analysis performed in step A.

miały pokazać, czy w rozważanym kwartale zabudowy, usytuowanym w zadanym sąsiedztwie, mogą wystąpić problemy z przewietrzaniem przestrzeni między budynkami, a w szczególności obszary stagnacji, czyli miejsca niedostatecznie wentylowane. Do oceny tego zjawiska posłużono się bezwymiarową wielkością α , czyli współczynnikiem wzmocnienia prędkości. Jest to stosunek prędkości przepływu powietrza w danym punkcie przestrzeni, przy obecności budynków w domenie obliczeniowej do wartości prędkości w tym samym miejscu przy założeniu, że domena jest pusta, czyli bez budynków zaburzających przepływ.

Stworzenie map współczynnika wzmocnienia pozwala zidentyfikować strefy, gdzie powietrze przyspiesza na skutek obecności budynków ($\alpha > 1$), oraz takie, gdzie przepływ zwalnia ($\alpha < 1$). Obie sytuacje mogą być niekorzystne z różnych powodów – w pierwszym przypadku ze względu na niebezpieczeństwo, które niosą za sobą silne podmuchy wiatru, a w drugim przez możliwą kumulację zanieczyszczeń i niewystarczające ich wywiewanie.

Znając prędkość w przepływie niezaburzonym z danego kierunku (na przykład z pomiarów meteorologicznych), można na podstawie mapy współczynnika wzmocnienia oszacować wartości prędkości w każdym miejscu obszaru poddanego badaniu. Jeśli prędkość na danej wysokości w obszarze niezaburzonym wynosiłaby v , to prędkość w konkretnym miejscu obszaru na tej wysokości wynosi: $w = \alpha \cdot v$.

Badania CFD wykonano w następującej kolejności:

- stworzenie geometrii i siatki obliczeniowej;
- dobór warunków brzegowych;
- modelowanie przepływu.

3. WYNIKI ANALIZY ISTNIEJĄCYCH KWARTAŁÓW W ASPEKcie WYBRANYCH CECH GEOMETRYCZNYCH

3.1. WYBÓR PRZYPADKÓW

Jak opisano w punkcie 2.1, dokonano analizy parametrów geometrycznych zabudowy kwartałowej w Polsce na podstawie 28 przypadków budynków wzniesionych po 2003 roku w trzech polskich miastach. Zestawiono je w tabeli 1. Ważnym aspektem doboru

2.3. CFD MODEL TESTS

The following stage involved conducting analyses using numerical fluid mechanics methods. The preliminary studies aimed to show whether, in the considered perimeter building development in the given neighbourhood, ventilation problems between buildings may occur, particularly whether stagnation areas (i.e., insufficiently ventilated places) can emerge. To assess this phenomenon, a dimensionless quantity α (i.e. the velocity amplification factor) is used. It is the ratio of the air velocity at a given point in space with buildings in the computational domain to the velocity at the same location in an empty domain (i.e., without buildings disturbing the flow).

By creating amplification factor maps, it is possible to identify zones where the air accelerates due to the presence of buildings ($\alpha > 1$) and those where the flow slows down ($\alpha < 1$). Both situations may be unfavourable for different reasons – in the first case because of the danger posed by strong wind gusts, and in the latter by the possible accumulation of pollutants and insufficient ventilation.

Knowing the velocity in the undisturbed flow from a given direction (for example, from meteorological measurements), you can estimate the velocity at each location in the study area using the amplification factor map. If the velocity at a given height in the undisturbed area is v , then the velocity at a specific point in the area at that height equals: $w = \alpha \cdot v$.

CFD studies were performed in the following order:

- creation of geometry and calculation grid;
- selection of boundary conditions;
- flow modelling.

3. RESULTS OF THE ANALYSIS OF EXISTING PERIMETER BUILDING DEVELOPMENT IN TERMS OF SELECTED FEATURES

3.1. SELECTION OF CASES

As described in section 2.1 above, we analysed the geometric parameters of perimeter building development in Poland

III.1 Lokalizacja badanych przypadków na mapach miast a. Kraków, b. Warszawa, c. Gdańsk; opracowanie: M.-V.Mochulska, na podstawie (SUiKZP Kraków CXII/1700/14, 2014; SUiKZP Warszawa LIII/1611/2021, 2021; SUiKZP Gdańsk XII/218/19, 2019)

III. 1. Location of the studied cases on city maps a. Kraków, b. Warsaw, c. Gdansk; by the M.-V.Mochulska, based on (SUiKZP Kraków CXII/1700/14, 2014; SUiKZP Warszawa LIII/1611/2021, 2021; SUiKZP Gdansk XII/218/19, 2019)

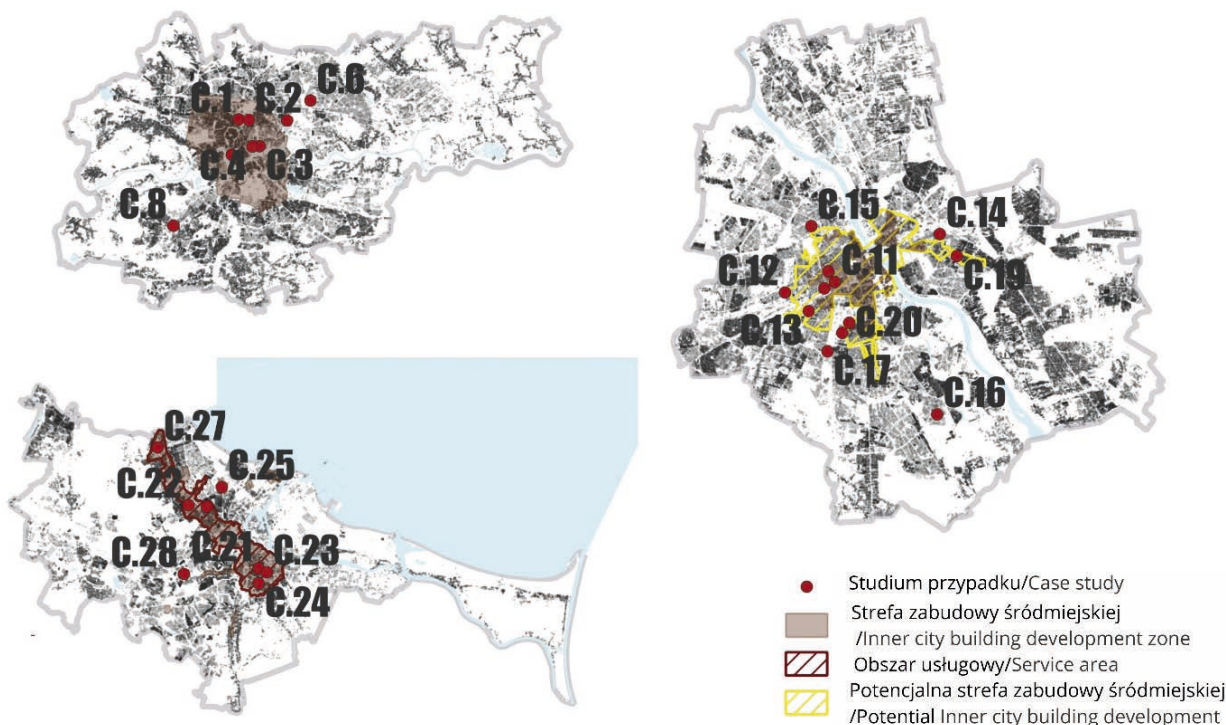
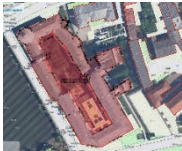
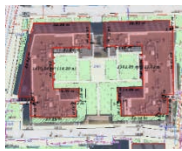
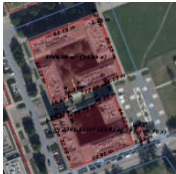
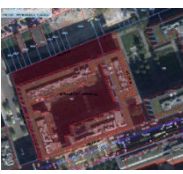
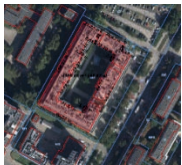
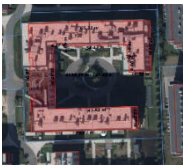
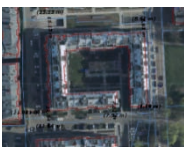
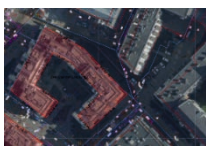
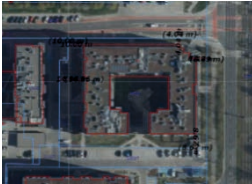
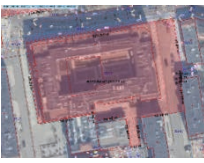


Tabela 1. Zestawienie przebadanych przypadków

Table 1. Summary of cases studied

Kraków / Kraków	C.1.Angel City, 2009	C.2.Apartamenty Novum, 2014	C.3.Wiślane tarasy I, 2013	C.4a.Masarska 6 ,2023 C.4b.Masarska 8, 2016
				
	C.5.Angel Wawel, 2015	C.6.O.Avia5, 2016	C.7.O.Nowe Dąbie, 2013	C.8.OE Bruksela, 2017
				
Warszawa/ Warsaw	C.9.Dzielnica 19 C-D, 2012	C.10.Browary Warszawskie, 2019	C.11.Sienna 86, 2007	C.12.Dobra Wola, 2015
				
	C.13.Awangarda, 2017	C.14.Osiedle Praha,2022	C.15.Splace Park, 2020	C.16.Zora Wilanów, 2016
				
	C.17.Marina Mokotów II, 2020	C.18.O.E.P. SERENATA, 2005	C.19.Omulewska, 2022	C.20.Apartamenty Bruna, 2008
				
Gdańsk/ Gdansk	C.21.Kwartał kamienic na starym, 2012	C.22.Apartamenty & Lofty Garnizon, 2018	C.23.Angielska Grobla, 2019	C.24.Chmielna park, 2016
				
	C.25.Zajezdnia Wrzeszcz, 2022	C.26.Browar Gdański, 2020	C.27.Harmonia Oliwska, 2022	C.28.Słoneczna Morena, 2018
				

inwestycji była lokalizacja w pobliżu centrów lokalnych oraz bliskość do węzłów komunikacyjnych. Wybrane przypadki dobierano tak, aby nie były zlokalizowane w jednym osiedlu, aby uniknąć podobieństw wyników wynikających ze wspólnego projektu (il.1). Spośród analizowanych miast najwięcej przypadków zabudowy kwartałowej można zaobserwować w Warszawie. Większość przypadków zlokalizowanych jest w centrum, na zachodzie oraz północy miasta, lecz pojedyncze przykłady zabudowy kwartałowej również

based on 28 cases of buildings erected after 2003 in three Polish cities. Table 1 below summarises them. The location of these investments near local centres and their proximity to transport nodes were important factors in their selection. The selected cases were chosen to avoid clustering in a single housing estate and to avoid similar results driven by a common design (Ill. 1). Among the analysed cities, Warsaw has the highest number

zlokalizowane są na wschodzie oraz północy. W Krakowie występuje tendencja do dogęszczania zabudową kwartałową zwartej strefy śródmiejskiej oraz tworzenia nowych, zwarto zabudowanych zespołów mieszkaniowych na obrzeżach miasta. Natomiast w Gdańsku zabudowa kwartałowa koncentruje się głównie w centralnym pasie usługowym oraz w strefach zwartej zabudowy miejskiej.

3.2. ANALIZA PARAMETRÓW

Wybrane kwartały zostały przeanalizowane w zakresie wybranych cech geometrycznych działki i zabudowy. Parametry działki przeanalizowano według kryterium powierzchni oraz proporcji kształtu. Parametry zabudowy zaś według wymiarów kwartału (długości boków), liczby kondygnacji, powierzchni zabudowy oraz współczynnika proporcji w/h (Mochulska & Zielonko-Jung, 2024)there has been a surge in Computational Fluid Dynamics (CFD (il. 2). Powierzchnię zabudowy określono za pomocą narzędzia geoport.pl, a liczbę kondygnacji oszacowano na podstawie analizy terenu oraz zdjęć z Google Maps. Zbiorcze wyniki analizy wszystkich przypadków zestawiono w tabeli 2.

Średnia wartość powierzchni działek, w przypadku kwartałów zlokalizowanych w strefie śródmiejskiej jest zbliżona do 0,8 ha. Jest to stosunkowo mała powierzchnia jak na ten typ zabudowy, co jest

of perimeter building development cases. Most cases are located in the centre, west, and north of the city, but individual examples of perimeter development also occur in the east and north. In Kraków, a clear tendency to densify the compact inner-city zone with perimeter block-type developments is evident, as well as a tendency to create new compact housing complexes on the city outskirts. In Gdansk, by contrast, perimeter building developments are primarily concentrated in the central service strip and areas of compact urban development.

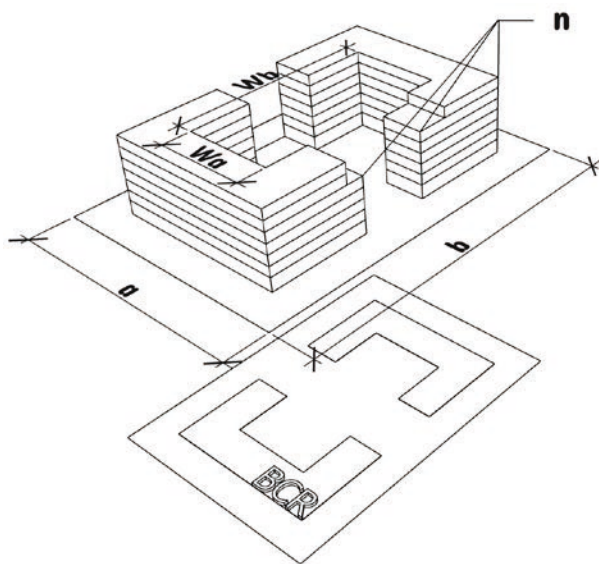
3.2. PARAMETER ANALYSIS

The selected perimeter buildings were analysed in terms of selected geometric features of the plot and development. Plot parameters were analysed according to the criteria of area and aspect ratio. The parameters of the development, on the other hand, were analysed according to the dimensions of the perimeter buildings (length of the sides), the number of storeys, the area of the development and the aspect ratio (Mochulska and Zielonko-Jung, 2024)there has been a surge in Computational Fluid Dynamics (CFD (III. 2). The building development area was determined using the geoport.pl tool, and the number of storeys was estimated based on site

Tabela 2. Zestawienie Parametrów

Table 2. Summary of parameters

	Przypadek/ Case Study	Powierzchnia działki [ha] / Plot area [ha]	Stosunek boku a/b / Side ratio a/b	BCR [%]	Liczba kondygnacji/ Number of storeys	Średnia liczba kondygnacji/ Average number of storeys	Wa [m]	Wb [m]	wa/h	wb/h
Kraków / Kraków	C.1	0,44	-	52,89	7	7	-	-	-	-
	C.2	1,02	0,73	33,35	4;6;9	6	34,39	68,28	1,67	3,31
	C.3	1,35	0,56	35,64	8	8	-	-	-	-
	C.4	0,76	0,79	55,04	5;6	5,5	-	-	-	-
	C.5	0,95	-	45,15	5;6	5,5	20,31	95,56	1,07	5,07
	C.6	0,64	-	40,38	8	8	-	-	-	-
	C.7	0,98	0,50	40,83	4;6	5	-	-	-	-
	C.8	0,88	0,79	33,07	7	7	24,49	53,3	1,03	2,25
Warszawa/ Warsaw	C.9	1,24	0,73	47,32	5;7;10	7	28,55	86,2	1,20	3,64
	C.10	0,50	0,82	46,18	7	7	23,23	45,05	0,98	1,90
	C.11	0,59	0,88	41,22	6;8	7	32,87	33,87	1,39	1,43
	C.12	1,02	-	38,25	6;7;10	7,5	19,74	80,62	0,78	3,19
	C.13	1,00	0,72	44,05	7	7	34,07	77,19	1,44	3,26
	C.14	0,53	0,94	39,54	6	6	33,50	39,20	1,63	1,90
	C.15	1,50	0,75	30,15	8;10	9	-	-	-	-
	C.16	0,66	0,78	45,40	5	5	-	-	-	-
	C.17	1,03	-	26,18	7;8;9	8	-	-	-	-
	C.18	0,52	0,66	40,20	5;8	6,5	21,84	78,73	0,99	3,55
	C.19	1,05	0,70	33,51	9;11	10	-	-	-	-
	C.20	1,11	0,61	40,38	6;8	7	37,60	92,79	1,59	3,92
Gdańsk/ Gdansk	C.21	0,33	0,90	95,64	4	4	-	-	-	-
	C.22	0,94	0,88	45,53	7	7	35,85	45,23	1,51	1,91
	C.23	0,98	0,73	35,65	7	7	37,92	56,73	1,60	2,39
	C.24	0,45	-	45,71	5;6;7	6	25,35	39,88	1,23	1,94
	C.25	0,59	0,73	45,83	6;7	6,5	20,78	35,68	0,88	1,51
	C.26	0,62	0,58	45,07	6	6	23,87	56,75	1,16	2,75
	C.27	0,58	0,63	33,41	6;7;8	7	18,98	57,46	0,80	2,42
	C.28	0,99	0,85	29,63	6	6	-	-	-	-



II. 2. Schemat badanych parametrów (a-krótszy bok działki; b-dłuższy bok działki; BCR- powierzchnia zabudowy; Wa-krótszy bok dziedzińca; Wb- dłuższy bok dziedzińca; n-liczba kondygnacji); Opracowanie: M.-V. Mochulska

III. 2: Schematic of the parameters tested (a-shortest side of plot; b-longest side of plot; BCR-building coverage ratio; Wa-shortest side of the courtyard; Wb- longest side of the courtyard; n-number of storeys); by the M.-V. Mochulska

prawdopodobnie spowodowane małą dostępnością dużych wolnych terenów w centrum i jego bliskim otoczeniu. Badane przypadki zlokalizowane poza śródmieściem zajmują średnio około 0,9 ha, co stanowi powierzchnię większą o 11% w porównaniu do inwestycji w ścisłym śródmieściu.

W analizie proporcji kształtu działki, zgodnie z badaniami opisanymi w artykule (Bitner, 2011), dokonano uproszczenia obrysu działki do prostokąta. Działki przenalizowano pod względem stosunku długości krótszego boku do długości dłuższego boku. W celu pogrupowania wyników ułatwiającego ich interpretację dokonano podziału na cztery grupy: nieregularny kształt, prostokąt zbliżony do kwadratu, prostokąt o stosunku boków 1:1,5 oraz prostokąt zbliżony do złotego podziału oraz dłuższy, o stosunku boków 1:2 i większym (tabela 3).

Według przeprowadzonej analizy wynika, że:

- 11 z badanych przykładów jest zbliżonych do prostokąta o stosunku boków krótszego do dłuższego w przedziale od 0,66 do 0,8;
- 6 z nich do prostokąta zbliżonego do kwadratu w przedziale od 0,8 do 1;
- 5 z nich do wydłużonego prostokąta o stosunku boków w przedziale od 0,5 do 0,66;
- 6 zdefiniowano jako nieregularne.

Syntetyczne zestawienie parametrów dotyczących powierzchni zabudowy i liczby kondygnacji przedstawiono w tabeli 4. Wartości

analysis and Google Maps images. Table 2 summarises the consolidated results for all cases.

The average plot area for perimeter building developments in the inner city zone is around 0.8 ha. This is a relatively moderate plot area for this type of development, likely due to the limited availability of large vacant areas in the centre and its close surroundings. The studied cases outside the inner city zone cover an average area of around 0.9 ha, which is 11% larger than inner city developments.

In the analysis of plot shape proportions, in line with the research described in the article (Bitner, 2011), the plot outline was simplified to a rectangle. The plots were analysed by the ratio of the shorter side length to the longer side length of the outline. To group the results and facilitate interpretation, these outlines were divided into five groups: an irregular shape, a square-like rectangle, a rectangle with a side ratio of 1:1.5, a golden ratio-like rectangle, and a longer rectangle with a side ratio of 1:2 or more (Table 3).

From the analysis performed, it follows that:

- 11 of the examples examined are similar to a rectangle with a ratio of shorter sides to longer ones between 0.66 and 0.8;
- 6 of these are similar to near-square rectangles with the ratio of sides between 0.8 and 1;
- 5 of these are similar to an elongated rectangle with a ratio of sides between 0.5 and 0.66;
- 6 of these can be defined as irregular.

Table 4 presents a synthetic summary of the parameters relating to building footprint and number of storeys. The values were grouped in 10% intervals for BRC and per storey. In 12 cases, the perimeter building development had varying heights, with the differences not exceeding 2 floors, except for case C.21 (Table 4). The average number of floors was used for these cases.

The range in the number of storeys is quite large, varying between 4 and 10, which illustrates the wide variation in building

Tabela 3. Schemat analizy parametrów działki

Table 3. Scheme of analysing plot parameters

Nieregularny kształt/ Irregular shape 6 (C.1, C.5, C.6, C.12, C.17, C.24)	Zbliżony do kwadratu/ Close to square >1:1,25 >0,8 6 (C.10, C.11, C.14, C.21, C.22, C.28)	Prostokąt/ Rectangle 1:1,5 ≥0,66≤0,8 11 (C.2, C.4, C.8, C.9, C.13, C.15, C.16, C.18, C.19, C.23, C.25)	Prostokąt zbliżony do złotego podziału oraz dłuższy/ Rectangle close to the golden ratio and longer (0,618) 1:2 ≥0,5<0,66 5 (C.3, C.7, C.20, C.26, C.27)

Tabela 4. Porównanie parametrów badanych przypadków (w kolorze szarym – studium przypadku zlokalizowane w strefie śródmiejskiej)
Table 4. Comparison of case study parameters (in grey – cases study located in inner city development zone)

Liczba Kondygnacji/ Number of storeys	BCR				
	>25%	>30%-39%	>40%-49%	>50%-59%	>60%-100%
4					C.21
5			C.7, C.16		
5-6			C.5	C.4	
6	C.28	C.2	C.24	C.1	
6-7			C.18, C.20, C.26		
7		C.8, C.12, C.14, C.23, C.27	C.9, C.10, C.11, C.13, C.22, C.25		
8	C.17	C.3	C.6		
9		C.15			
10		C.19			

pogrupowano co 10% w przypadku BRC oraz co kondygnację. W 12 przypadkach kwartały miały zróżnicowaną wysokość, przy czym różnice nie przekraczały 2 kondygnacji z wyjątkiem przypadku C.21 (tabela 4). Przyjęto dla nich uśrednioną liczbę kondygnacji. Rozpiętość pomiędzy liczbą kondygnacji jest dość duża, waha się między 4 a 10, co obrazuje duże zróżnicowanie morfologii zabudowy charakterystyczne dla dużych miast. Uśredniona liczba kondygnacji badanych kwartałów waha się pomiędzy 6 i 7. Taką wysokość miała największa część wszystkich przypadków, co pokrywa się z wynikami analizy morfologii zabudowy wielorodzinnej opublikowanej w monografii (Bradecki & Twardoch, 2013). Wysokości zabudowy nieznacznie różnią się w zależności od miasta. W Warszawie i Krakowie średnia liczba kondygnacji wynosi lekko powyżej 7, a w Gdańsku średnia jest bliżej 6 kondygnacji. Średnie wartości współczynnika powierzchni zabudowy (BCR) mieszczą się w przedziale 30-49%. Przypadki zlokalizowane poza strefą śródmieścia posiadają niższy współczynnik zabudowy, rzadziej przekracza on 45%. Kwartały zlokalizowane w strefie zabudowy śródmiejskiej częściej posiadają współczynnik powyżej 40%. W poszczególnych przypadkach zlokalizowanych w ścisłym śródmieściu (jak C.21) zabudowa zajmuje prawie całą powierzchnię działki.

morphology characteristic of large cities. The average number of storeys in the surveyed perimeter building developments ranges from 6 to 7. This height was the most common across all cases studied, which aligns with the results of the morphology analysis of multi-family developments published in the monograph (Bradecki and Twardoch, 2013). Building heights vary slightly from city to city. In Warsaw and Kraków, the average number of storeys is slightly above 7, while in Gdansk it is closer to 6.

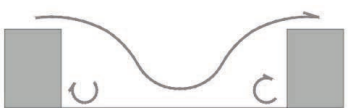
The average BCR values range from 30–49%. Cases outside the inner city development zone have a lower BCR and less commonly exceed 45%. In contrast, perimeter building developments located in the inner city development zone are more likely to have a ratio above 40%. In individual cases located in the inner city development zone (such as C.21), the development occupies almost the entire plot area.

Ultimately, 17 perimeter building developments were identified that fall within the following averaged ranges:

- number of storeys 6–7;
- BCR 30–49%.

For these buildings, we determined the aspect ratio of the inner courtyard. The results were grouped according to the

Tabela 5. Współczynnik w/h
Table 5. Aspect ratio w/h

Współczynnik w/h Aspect ratio parameter w/h	 Przepływ ślizgowy/ Skimming flow w<1,4h		 Przepływ szorstkościowo zakłócony/ Wake inference flow 1,4h<w<2,4h		 Przepływ izolowanych szorstkości/ Isolated roughness flow w>2,5h	
	n		n		n	
Wa		C.5, C.24, C.26	C.8, C.9, C.10, C.11, C.12, C.18, C.25, C.27	C.2, C.14	C.13, C.20, C.22, C.23	
Wb			C.14, C.24	C.8, C.10, C.11, C.22, C.23, C.25	C.2, C.5, C.26	C.9, C.12, C.13, C.18, C.20, C.27

Ostatecznie wyodrębniono 17 kwartałów mieszczących się w uśrednionych przedziałach:

- liczby kondygnacji 6-7;
- współczynnik BCR 30-49%.

Dla nich wyznaczono współczynnik w/h dziedzińca wewnętrznego. Wyniki pogrupowano wg 3 znanych z literatury przedziałów h/w : $w < 1,4$ h, gdy wg literatury w przestrzeni między budynkami wystąpi zjawisko przepływu ślizgowego; $1,4h < w < 2,4$ h, gdy wg literatury wystąpi przepływ szorstkościowo zakłócony; $w > 2,5$ h, gdy wg literatury wystąpi przepływ izolowanych szorstkości (Hussain, 1978). Zestawienie pogrupowanych wyników pokazano w tabeli 5. Wyniki analizy wskazują, że dla krótszego boku dziedzińca 11 z 17 przypadków charakteryzują się parametrem w/h poniżej granicy przepływu spowolnionego, natomiast dla dłuższego boku dziedzińca podwórka 8 z 17 przypadków mieści się w granicach przepływu zakłóconego, a 9 są w granicach normy.

3.3. ZAŁOŻENIA DLA MODELU

Efektom opisanych wyżej analiz są następujące założenia dla modelowego kwartału zabudowy, który w dalszych etapach został poddany badaniom CFD:

- wielkość działki dla strefy z zabudową śródmiejską (z mniej restrykcyjnymi wymaganiami dotyczącymi warunków nasłonecznienia wnętrz) – 0,8 ha, dla zabudowy pozaśródmiejskiej (z bardziej restrykcyjnymi wymaganiami) – 0,9 ha
- kształt działki prostokątny o stosunku krótszego boku do dłuższego w przedziale od 0,66 do 0,8;
- liczba kondygnacji 6-7;
- współczynnik BCR – 30-49%;
- parametr W_a w przedziale od $w_a < 2,4h$;
- parametr W_b w przedziale od $w_b > 1,4h$.

4. KWARTAŁ MODELOWY

Kolejnym krokiem prezentowanych tu badań było stworzenie przestrzennego modelu zabudowy wielorodzinnej odpowiadającego podanym wyżej założeniom, a jednocześnie umożliwiające właściwe rozplanowanie mieszkań i funkcji usługowych w parterze, zgodne z uwarunkowaniami prawnymi obowiązującymi w Polsce. Wykorzystano w tym celu oprogramowanie (Kolega, 2023) firmy Designbotic wykorzystujące zaawansowane modele obliczeniowe oparte na algorytmach generatywnych oraz sztucznej inteligencji. Pozwoliło to uniknąć czasochłonnego procesu projektowania tradycyjnego oraz wygenerować dużą liczbę różnych wariantów spełniających wymagane założenia przestrzenne. Narzędzie to

three w/h intervals known from the literature: $w < 1.4$ h, when skimming flow occurs according to the literature; $w < 1.4$ h $< w < 2.4$ h, when wake interference flow occurs according to the literature; $w > 2.5$ h, when isolated roughness flow occurs according to the literature (Hussain, 1978). A summary of the grouped results is shown in Table 5.

The results of the analysis show that for the shorter side of the courtyard, 11 out of 17 cases are characterised by an aspect ratio parameter w/h being below the inhibited flow limit. However, for the longer side of the courtyard, 8 out of 17 cases are within the disturbed flow limit, and 9 are within the norm.

3.3. MODEL ASSUMPTIONS

The above analysis resulted in the determination of the following assumptions for the model perimeter building development, which was later subjected to CFD studies in further stages:

- plot size for a zone with inner city development (with less restrictive requirements for interior sunlight conditions) – 0.8 ha, for a zone with non-inner city development (with more restrictive requirements) – 0.9 ha;
- the shape of the plot is rectangular with a ratio of the shorter side to the longer side being between 0.66 to 0.8;
- number of storeys 6–7;
- BCR – 30–49%;
- parameter W_a ranging from $w_a < 2.4$ h;
- parameter W_b between $w_b > 1.4$ h.

4. MODEL OF PERIMETER BUILDING DEVELOPMENT

The next step in the research was to create a spatial model of a multi-family development corresponding to the above-mentioned assumptions, while also allowing for the proper arrangement of flats and service functions on the ground floor, in accordance with the legal conditions in force in Poland. The software used for this was (Kolega, 2023) by Designbotic, which uses advanced computational models based on generative algorithms and artificial intelligence. This approach avoided the time-consuming traditional design process and generated a large number of variants that met the required spatial requirements. This tool complies with the legal requirements in force in Poland. It is intended to support the architect's design work at the conceptual stage and to analyse land development opportunities for investors and city authorities responsible for local regulations. The condition for generating the development variants in the programme (Kolega, 2023) was to indicate a specific location.

II. 3. Wybrana lokalizacja dla modelu badawczego. opracowanie: a.M.-V.Mochulska, b.Zdjęcie (*Ukosne mapy*)

III. 3. Selected location for the research model; a.by the M.-V. Mochulska, b.photo (*Ukośne mapy*)



a



b

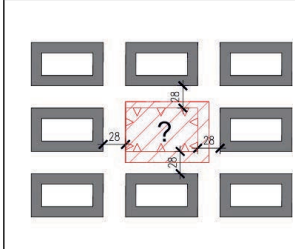
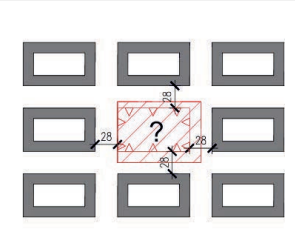
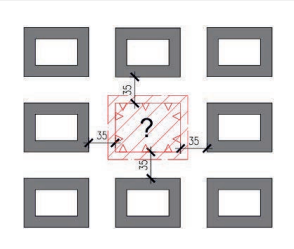
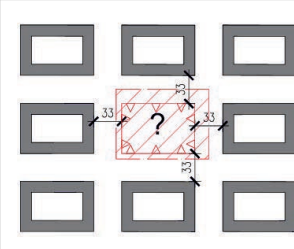
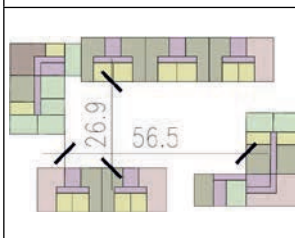
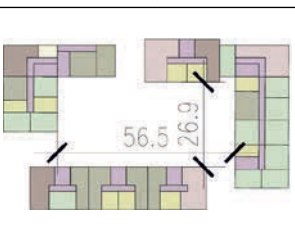
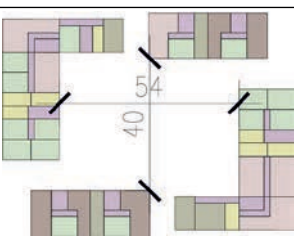
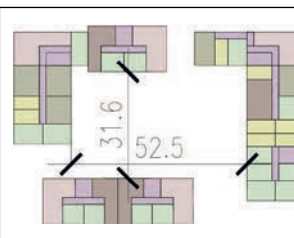
dostosowane jest do wymogów prawnych obowiązujących w Polsce. Przeznaczone jest jako wsparcie pracy projektowej architekta na etapie koncepcyjnym oraz jako narzędzie analizowania możliwości zabudowy terenu dla inwestorów oraz władz miasta odpowiedzialnych za lokalne regulacje prawne.

Warunkiem wygenerowania wariantów zabudowy było wskazanie konkretnej lokalizacji (Kolega, 2023). Wybrano teren

The site of a former brownfield in Warsaw (52.223184, 20.949552) surrounded by multi-family housing (Ill. 3) was chosen. It is a non-inner-city development zone without a binding local spatial development plan (Serwis Map), but close enough to the city centre to allow less restrictive regulations regarding sunlight in the flats, and therefore smaller minimum distances between buildings (see 2.1).

II. 4. Warianty modeli badawczych (BCRmaks - maksymalny nieprzekraczalny współczynnik powierzchni zabudowy, Wu - odległość do otaczających kwartałów, Wa - szerokość podwórka, Wb - długość podwórka, TFA - całkowita powierzchnia użytkowa, FA - powierzchnia użytkowa mieszkań, M0 - micro kawalerka, M1 - kawalerka, M2 - mieszkanie dwupokojowe, M3 - mieszkanie trzypokojowe, M4 - mieszkanie czteropokojowe, M5 - mieszkanie pięciopokojowe). Opracowanie: M.-V. Mochulska

III. 4. Variants of research model (BCRmaks - maximum building coverage ratio not to be exceeded, Wu - distance to surrounding perimeter building development, Wa - shortest side of the courtyard; Wb - longest side of the courtyard; n - number of storeys, TFA - Total Floor Area, FA - Flats area, M0 - micro studio apartment, M1 - one-bedroom dwelling, M2 - two-bedroom dwelling, M3 - three-bedroom dwelling, M4 - four-bedroom dwelling, M5 - five-bedroom dwelling) by the M.-V. Mochulska

Strefa śródmiejska/Inner city zone		Strefa pozaśródmiejska/Non-inner city zone	
K.1 Dane wejściowe/ Inputs: -Powierzchnia działki/ Plot area: 0,8 ha a/b 0,73 H 21m BCRmax 40% Wu 28 m MW/U (P)/ Resi/Comm (GF)	K.1 Dane wejściowe/ Inputs: -Powierzchnia działki/ Plot area: 0,8 ha a/b 0,73 H 21m BCRmax 40% Wu 28 m MW/U (P)/ Resi/Comm (GF)	K.3 Dane wejściowe/ Inputs: Powierzchnia działki/ Plot area: 0,9 ha a/b 0,8 H 24m BCRmax 30% Wu 35m MW/U (P)/ Resi/Comm (GF)	K.4 Dane wejściowe/ Inputs: Powierzchnia działki/ Plot area: 0,9 ha a/b 0,75 H 24m BCRmax 30% Wu 33 m MW/U (P)/ Resi/Comm (GF)
Legenda/Legend:  Teren projektowy/ Project area  -Linia zabudowy/ Building line  -Otoczenie/ Surrounding			
			
   			
Wygenerowane modele/ Models generated			
			
KM.1 Dane wyjściowe/ Output data: TFA: 12679.943 m ² FA: 9337.786 m ² BCR: 31,7 % M1 36% M2 21% M3 28% M4 42% M5 10% Wa-26,9 Wb-56,5	KM.2 Dane wyjściowe/ Output data: TFA: 12762.297m ² FA: 9446.530 m ² BCR: 31,9 % M0 2% M1 25% M2 33% M3 22% M4 8% M5 8% Wa-26,9 Wb-56,5	KM.3 Dane wyjściowe/ Output data: TFA: 19488,016 m ² FA:14327.510 m ² BCR: 30,9% M1 27,5 % M2 37,5% M3 12,5% M4 12,5 % M5 10% Wa-40,0 Wb-54,0	KM.4 Dane wyjściowe/ Output data: TFA: 15279.512 m ² FA: 11481.342 m ² BCR: 28,3% M1 21% M2 42% M3 13% M4 10% M5 13% Wa-31,6 Wb-52,5
wa<1,4h (1,28) wb>2,5h (2,69)	wa<1,4h (1,28) wb>2,5h (2,69)	1,4<wa<2,4h (1,66) 1,4<wb<2,4h (2,25)	wa<1,4h (1,31) 1,4<wb<2,4h (2,18)

poprzemysłowy w Warszawie (52.223184, 20.949552), w otoczeniu zabudowy wielorodzinnej (il. 3). Jest to strefa zabudowy pozaśródmiejskiej bez obowiązującego MPZP (Serwis Map), jednak na tyle bliska centrum, że możliwe jest ubieganie się na podstawie specustawy o możliwość zastosowania mniej restrykcyjnych przepisów nasłonecznienia mieszkań, a co za tym idzie mniejszych odległości minimalnych między budynkami (patrz. 2.1).

Przyjęto 4 warianty modeli, po 2 dla strefy śródmiejskiej i pozaśródmiejskiej. Konieczne było podanie wymiarów działek i zaproponowanie przebiegu ulic pomiędzy kwartałami. Przyjęto:

- maksymalną wysokość zabudowy 6 kondygnacji dla strefy śródmiejskiej (daje to ok. 21 m wysokości) i 7 dla pozaśródmiejskiej (daje to ok. 24 m wysokości)
- powierzchnię działki 0,8 ha dla strefy śródmiejskiej i 0,9 ha dla pozaśródmiejskiej, dla której przyjęto dodatkowo dwie różne proporcje boków (0,8 i 0,75)
- maksymalną powierzchnię zabudowy BCR 40% dla strefy śródmiejskiej i 30% dla pozaśródmiejskiej.

Przyjęte założenia układu siatki ulic i opisanych wyżej parametrów dla wszystkich 4 wariantów modeli zestawiono na il. 4. Zgodnie z założeniami planowanego aktu miejscowego prawa miasta Warszawy (Proposed Plan of Odolan, 2020) w omawianej okolicy (il. 3) proponowane są odstępy pomiędzy budynkami od 20 do 40 m. Zgodnie z dobrymi praktykami oraz wytycznymi dotyczącymi projektowania ulic (GSUM, 2020) maksymalna zalecana szerokość ulic wynosi: 28 m dla terenów z dominującą zabudową pierzejową; do 50 m dla obszarów charakteryzujących się większą różnorodnością kształtu zabudowy. Podsumowując powyższe ustalenia, przyjęto następujące odległości pomiędzy kwartałami, określane dalej jako Wu:

- 28 m dla strefy strefy śródmiejskiej;
- 33-35 m dla strefy pozaśródmiejskiej.

Program miał za zadanie wygenerować warianty dla działki w środku terenu z założeniem, że jej otoczenie jest zabudowane przez uproszczone kwartały pokazane na schemacie o wysokości równej z zakładaną na działce środkowej.

W ramach każdego z wariantów program wygenerował różne możliwości zabudowy, pokazując podstawowe podziały funkcjonalne pozwalające na oszacowanie liczby i metrażu mieszkań. Na il. 4 pokazano rzuty powtarzalnej kondygnacji mieszkalnej, które wybrano dla każdego z wariantów jako najbardziej korzystne. Odrzucono rozwiązania niewpisujące się w założenie prostokątnego kwartału z dziedzińcem. Wybrano rozwiązania najkorzystniejsze pod względem struktury mieszkań oraz kompozycji urbanistycznej.

Utworzony model nie jest finalnym projektem, lecz jedynie analizą chłonności działki w kontekście zabudowy wielorodzinnej z usługami na parterze. Ocena poprawności wykonania modelu nie jest celem tego artykułu, lecz można zauważyć, że niektóre rozwiązania, takie jak załamanie elewacji czy nielogicznie ustawiona komunikacja na rzucie, wymagają zapewne ingerencji architekta. Pomimo to można uznać, że wygenerowane modele są wystarczające do dalszych badań na potrzeby studium prezentowanego w tym artykule. Zdecydowanie największy metraż użytkowy charakteryzuje model KM.3. Porównując dane wyjściowe czterech wariantów modeli pomimo mniejszej ogólnej ilości metrażu w modelu KM.4 w porównaniu do KM.3, model KM.4 charakteryzuje się najmniejszą liczbą mieszkań typu M1 oraz największą liczbą mieszkań typu M2, które są najczęściej wybierane w Polsce (Bryk, 2020; Raport AMRON-SARfiN, 2024). Modele KM.1 i KM.2 wykazują niewielkie różnice w metrażu. Do dalszych badań, przewidzianych w etapie trzecim wybrano model KM.4 (rys. 5) o:

Four model variants were adopted, 2 for the inner city and non-inner city development zones. We needed to provide plot dimensions and propose the street layout between the perimeter buildings. The following was adopted:

- maximum building height of 6 storeys for the inner city zone (this gives a height of approx. 21 m) and 7 storeys for the non-inner city zone (this gives a height of approx. 24 m);
- a plot size of 0.8 ha for the inner city zone and 0.9 ha for the non-inner city zone, for which two different aspect ratios (0.8 and 0.75) were additionally adopted;
- maximum built-up area of BCR 40% for the inner city zone and 30% for the non-inner city zone.

Figure 4 summarises the assumptions for the street grid layout and the parameters described above for all 4 model variants. According to the assumptions of the proposed local act of the city of Warsaw (Proposed Plan of Odolan, 2020), building intervals of 20 to 40 m are suggested in the area (Il. 3). According to good practice and guidelines for street design (GSUM, 2020), the maximum recommended street width is: 28 m for areas where frontage building development is dominant; 50 m for areas with a greater variety of building shapes. In summary, the following distances between perimeter building development, hereinafter referred to as Wu, have been adopted:

- 28 m for the inner city zone;
- 33–35 m for the non-inner city zone

The programme aimed to generate variants for the plot in the centre of the site, assuming its surroundings are built up by the simplified perimeter building development shown in the scheme, with a height equal to that assumed for the central plot.

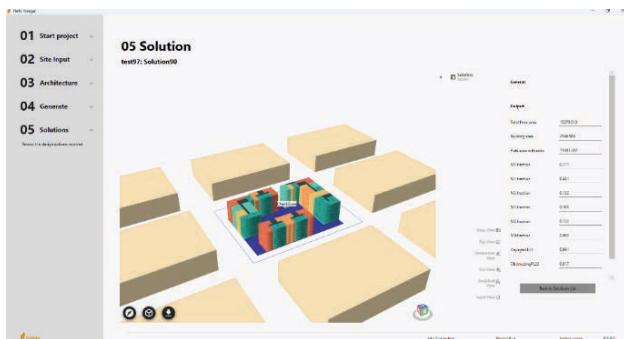
Within each variant, the programme generated different development options showing the basic functional divisions used to estimate the number and square footage of individual dwellings. Figure 4 shows the projections of the repeatable residential storeys that were deemed most favourable for each alternative. Solutions that do not fit the assumption of a rectangular perimeter building development with a courtyard were rejected. The most favourable solutions in terms of housing structure and urban composition were selected.

The model is an analysis, not the final design, of the plot's absorption capacity in the context of a multi-family development with service functions on the ground floor. The present article is not aimed at assessing the correctness of the model, but it can be noted that some solutions, such as a break in the elevation or communication positioned on the plan in an illogical manner, probably require the intervention of an architect. Nevertheless, the generated models are sufficient for further research related to the study presented in this article.

Model KM.3 has by far the largest usable floor area. Comparing the output data for the four model variants, despite the smaller overall amount of floor area in model KM.4 as compared to KM.3, model KM.4 is characterised by the lowest amount of M1-type dwellings and the largest number of M2-type dwellings, which are the most common choice in Poland (Bryk, 2020; AMRON-SARfiN Report, 2024). Models KM.1 and KM.2 show little difference in meterage area.

The KM.4 model (Il. 5) was selected for further research envisaged in stage three. The model is characterised by:

- the largest number of M2 flats;
- the lowest BCR;
- the most unfavourable aspect ratio parameter.



II. 5. Model Badawczy. Wygenerowany przy użyciu oprogramowania Kolega

III. 5. Research model. Generated using the Kolega software

- największej liczbie mieszkań typu M2
- najmniejszym współczynniku BCR
- najbardziej niekorzystnym parametrze współczynnika w/h

5. SYMULACJE PRZEPŁYWU POWIETRZA DLA WYBRANEGO MODELU BADAWCZEGO

5.1. GEOMETRIA I SIATKA OBLICZENIOWA

Stworzono domenę obliczeniową na bazie graniastopuła ośmiokątnego prawidłowego, z którego, za pomocą operacji boolowskich, wycięte zostały kształty budynków (zaproponowanego kwartału i jego najbliższego sąsiedztwa) opracowane w poprzednich etapach. Geometria odpowiada zatem przestrzeni między zabudowaniami, w której swobodnie może poruszać się powietrze. Zgodnie z wytycznymi zawartymi w artykułach (Franke et al., 2007; Tominaga et al., 2008; Blocken, 2015), zachowano odpowiednie odległości od budynków do wlotu, wylotu, górnej powierzchni domeny, a także jej bocznych krańców. Zdecydowano się na przyjęcie najbardziej restrykcyjnych wymagań, czyli piętnastokrotności najwyższego budynku od każdej powierzchni bocznej.

Następnym krokiem był podział domeny na objętości skończone. W celu osiągnięcia najlepszej zbieżności obliczeń zdecydowano się na siatkę strukturalną generowaną głównie metodą Sweep, jak zalecono w literaturze (Van Hooff & Blocken, 2010). W bezpośrednim otoczeniu badanego kwartału przewidziano największe zagęszczenie elementów, a w obszarach oddalonych, które nie podlegały bezpośredniej analizie rozrzedzono siatkę, by zaoszczędzić moc obliczeniową i przyspieszyć proces iteracyjny. Wygenerowana siatka składa się z około 9 milionów elementów (il.6).

5.2. WARUNKI BRZEGOWE

Na wlocie domeny obliczeniowej zastosowano profil prędkości wiatru wyznaczony w oparciu o założenia, że rozważany kwartał będzie usytuowany w strefie podmiejskiej. Zgodnie z normą (PN-EN-1-1-4, 2008) prędkość wiatru dla takiej lokalizacji wyrażona jest zależnością:

$$\frac{v}{v_{10}} = \left(\frac{z}{10} \right)^{0.19} \quad (1)$$

gdzie v - prędkości wiatru, z - wysokość, v_{10} - prędkość wiatru na wysokości 10 m

Założono stałą intensywność turbulencji równą 20% i skalę turbulencji 3 metry według zaleceń (Błazik-Borowa, 2008). Górna ściana domeny była ścianą symetrii, podobnie jak dwie z ośmiu bocznych ścian, które są równoległe do głównego kierunku przepływu powietrza (zaznaczone na ilustracji il.6 kolorem żółtym). Trzy boczne ściany zdefiniowano jako wloty (zaznaczone kolorem niebieskim), a trzy pozostałe jako wyloty (oznaczone kolorem czerwonym).

5. AIRFLOW SIMULATIONS FOR THE SELECTED RESEARCH MODEL

5.1. GEOMETRY AND DESIGN GRID

A computational domain was created on the basis of a regular octagonal prism from which, by means of Boolean operations, the shapes of the buildings (the proposed perimeter building development and its immediate neighbourhood) developed in the previous stages were cut out. The geometry thus corresponds to the space between the buildings, where air can move freely. Following the guidelines in the articles (Blocken, 2015; Franke et al., 2007; Tominaga et al., 2008), we maintained appropriate distances from the buildings to the inlet, outlet, upper surface of the domain, and lateral extremities. We adopted the most restrictive requirement: fifteen times the height of the tallest building from each lateral surface.

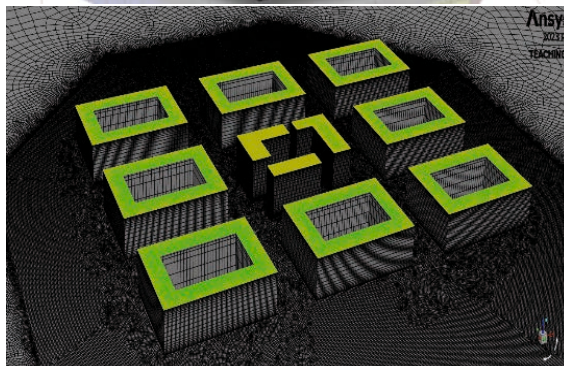
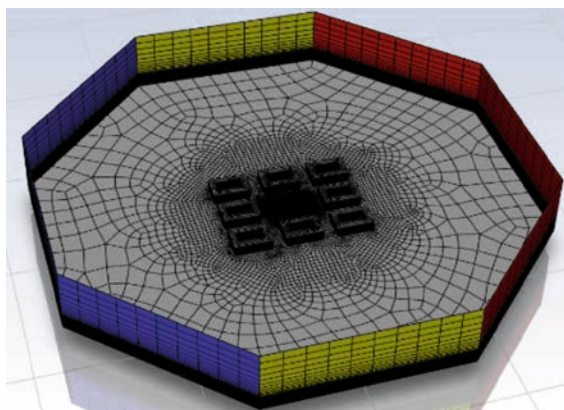
Next, we divided the domain into finite volumes. To achieve the best convergence, we used a structured mesh generated mainly by the Sweep method, as recommended in the literature (Van Hooff and Blocken, 2010). In the immediate vicinity of the residential building development under study, we predicted the highest element density, while in remote areas not directly analysed, we rarified the grid to save computing power and speed up the iterative process. The generated grid consists of approximately 9 million elements (III. 6).

5.2. BOUNDARY CONDITIONS

At the inlet of the computational domain, we used a wind velocity profile based on the assumption that the perimeter building development under consideration is located in a sub-urban zone. According to the standard (PN-EN-1-1-4, 2008),

II. 6 Siatka obliczeniowa na powierzchniach bocznych i dolnej domeny obliczeniowej oraz na budynkach. Opracowanie: M. Pisula

III. 6. Computational grid on the side surfaces and the bottom surface of the computational domain. By the M. Pisula



5.3. MODELOWANIE PRZEPŁYWU

Analizy numeryczne przeprowadzono w środowisku ANSYS Fluent w wersji 2023 R2 z wykorzystaniem najczęściej stosowanego do tego typu obliczeń modelu RANS (Blocken et al., 2016). Zastosowano model turbulencji k -epsilon realizabile rekomendowany, między innymi, przez (Wankhade et al., 2023).

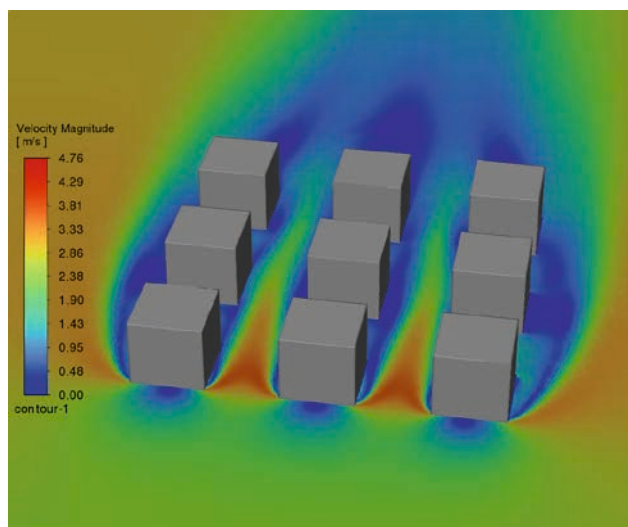
Do modelowania warstwy przyściennej użyto standardowej funkcji ściany zgodnie z zaleceniami zawartymi w (Błazik-Borowa, 2008). Do rozwiązywania układu równań wybrano metodę Coupled, w której zarówno prędkości, jak i ciśnienie są wyznaczane jako pierwsze, a następnie, na ich podstawie obliczane są pozostałe parametry. Symulację numeryczną prowadzono do momentu, w którym wszystkie residua osiągną zbieżność nie większą niż 10^{-3} i nie będą znacząco zmieniać się w czasie. Symulacje numeryczne wykonano dla 8 podstawowych kierunków wiatru.

W celu zapewnienia wiarygodności symulacji numerycznych przeprowadzono procedurę walidacyjną z wykorzystaniem publicznie dostępnych danych eksperymentalnych uzyskanych z pomiarów w tunelu aerodynamicznym. Jest to zbiór danych referencyjnych opracowany przez Japoński Instytut Architektury dla kilku różnych konfiguracji urbanistycznych. Są one wykorzystywane w badaniach CFD jako przypadki odniesienia do oceny przepływu powietrza wokół budynków na poziomie pieszych (Tominaga et al., 2008). Spośród dostępnych konfiguracji referencyjnych wybrano przypadek C (il. 7) jako najbardziej zbliżony do analizowanej zabudowy kwartałowej (geometria referencyjna składa się z dziewięciu budynków w kształcie bloków ułożonych w zwartym układzie).

Porównanie uzyskanych w tym badaniu wyników numerycznych z pomiarami referencyjnymi wykazało dobrą zgodność pod względem średnich wartości prędkości wiatru w wybranych punktach odniesienia. Na tej podstawie uznano, że model numeryczny został odpowiednio skalibrowany, a następnie we wszystkich symulacjach przedstawionych w niniejszym badaniu zastosowano to samo podejście modelowe i te same ustawienia parametrów. Choć jest to uproszczona metoda walidacji wyników, uznano ją za wystarczającą dla celu tych badań.

Il. 7. Rozkład prędkości wiatru na poziomie pieszych w badaniach referencyjnych Japońskiego Instytutu Architektury – przypadek C. Opracowanie: M. Pisula

Ill. 7. Distribution of mean wind velocity magnitude at pedestrian level in reference studies by the Japan Institute of Architecture – case C. By the M.Pisula



the wind velocity for such a location is expressed by the following equation:

$$\frac{v}{v_{10}} = \left(\frac{z}{10} \right)^{0.19} \quad (1)$$

where – wind velocity, – height, – wind velocity at 10 m height. A constant turbulence intensity of 20% and a turbulence scale of 3 m were assumed, as recommended by Blazik-Borowa (2008). The top wall of the domain was the symmetry wall (symmetry), as were two of the eight side walls parallel to the main airflow direction (highlighted in yellow in Ill. 7). Three of the side walls were defined as inlets (velocity_inlet, marked in blue) and the other three as outlets (pressure outlet, marked in red).

5.3. FLOW MODELLING

Numerical analyses were performed in ANSYS Fluent 2023 R2 using the RANS model, the most commonly used solution for this type of calculation (Blocken et al., 2016). The k -epsilon realisable turbulence model recommended by such researchers as (Wankhade et al., 2023) was used.

The Standard Wall Function (standard wall treatment) was used to model the wall layer as recommended in (Blazik-Borowa, 2008).

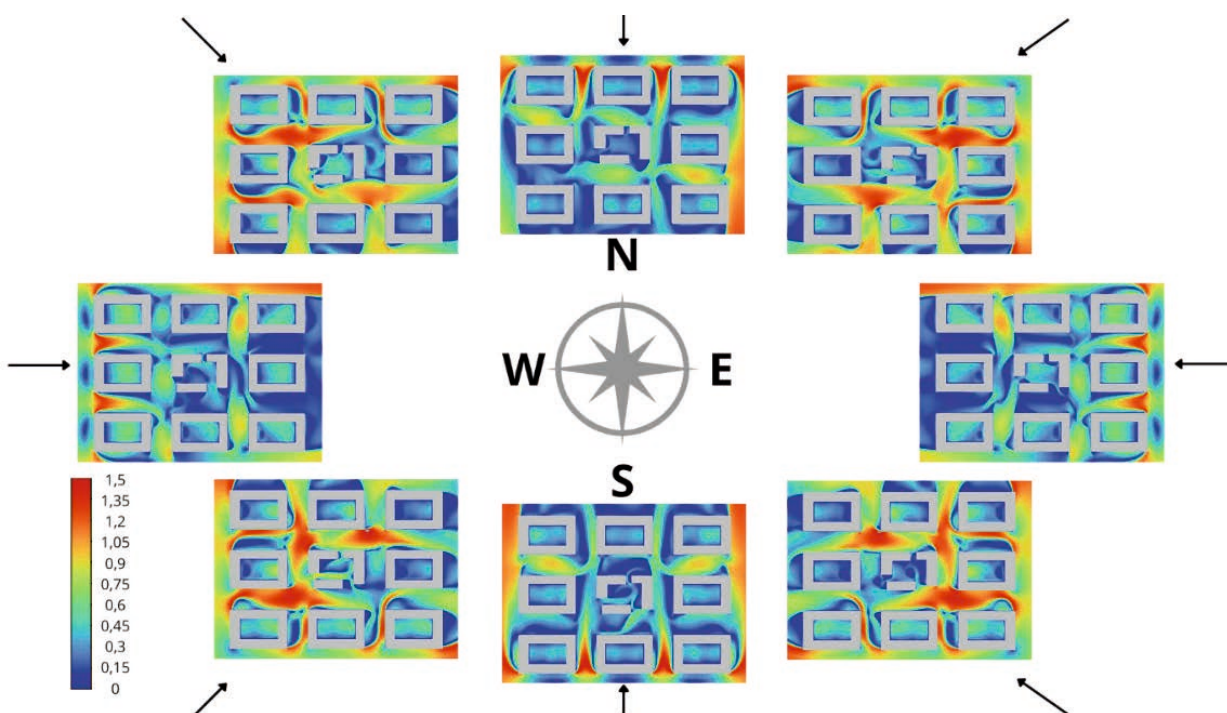
The Coupled method was chosen to solve the system of equations, in which both velocity and pressure are determined first, and then the other parameters are calculated from these results. The numerical simulation was run until all residues converged to no more than 10^{-3} and showed no significant variation over time. Numerical simulations were performed for eight basic wind directions.

To ensure the reliability of the numerical simulations, we carried out a validation procedure using experimental data from wind tunnel measurements. The reference dataset consisted of wind tunnel experiments conducted by the Architectural Institute of Japan, which provide well-established benchmark cases for assessing airflow around building developments at pedestrian level (Tominaga et al., 2008). Among the available benchmark configurations, Case C (Ill. 7) was selected as the most representative of the analysed perimeter building development (the reference geometry consists of nine block-shaped buildings arranged in a compact array).

The comparison between the numerical results and the experimental measurements showed good agreement in mean wind velocity values at selected reference points. On this basis, the numerical model was considered to be properly calibrated, and the same modelling approach and parameter settings were subsequently applied in all simulations presented in this study. Although this is a simplified method of validating the results, it was deemed adequate for the purposes of this study.

6. RESULTS OF CFD SIMULATIONS

The following (Ill. 8) shows maps of the amplification factor (discussed in Section 2.3) at pedestrian height (1.75 m) for a given building configuration (the analysed perimeter building development, located centrally in the neighbourhood of identical buildings). Areas where the air is most accelerated ($\alpha > 1.2$) are indicated in red, areas of local flow deceleration are shown in blue, whereas very poorly ventilated areas where $\alpha < 0.3$ are indicated in dark blue. Yellow and green ($0.9 < \alpha < 1.2$) indicate areas that are quite well-ventilated and comfortable for pedestrians in moderate winds.



Il. 8. Mapy współczynnika wzmocnienia analizowanego kwartału wraz z sąsiednimi budynkami na wysokości pieszego. Strzałki przy każdej z map oznaczają kierunek napływu powietrza. Opracowanie: M. Pisula

Ill. 8. Wind amplification factor maps for the analysed building development and its surrounding buildings at pedestrian height. Arrows on each map indicate the direction of incoming airflow. By the M. Pisula

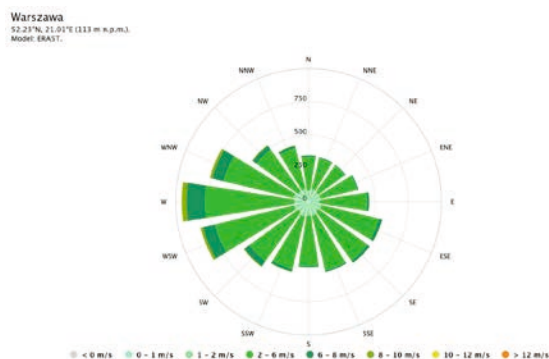
6. WYNIKI BADAŃ CFD

Na kolejnych ilustracjach (il. 8) przedstawiono mapy współczynnika wzmocnienia (omówionego w rozdziale 2.3) na wysokości pieszego (1,75 m) dla danej konfiguracji budynków (analizowany kwartał zabudowy usytuowany centralnie w sąsiedztwie identycznych budynków). Kolorem czerwonym zaznaczono miejsca, w których powietrze najmocniej przyspiesza ($\alpha > 1,2$), a kolorem niebieskim miejsca lokalnego spowolnienia przepływu, przy czym strefy bardzo słabej wentylacji, gdzie współczynnik $\alpha < 0,3$ oznaczono kolorem granatowym. Kolor żółty i zielony ($0,9 < \alpha < 1,2$) wskazuje na obszary dość dobrze wentylowane i przy umiarkowanym wietrze komfortowe dla pieszych.

Analizując mapy zamieszczone na il. 8 można zauważyć, że współczynnik wzmocnienia prędkości α wewnątrz rozważanego kwartału dla większości kierunków wiatru oscyluje między wartościami 0 a 0,45. Na niewielkich obszarach (np. dla kierunku południowo-zachodniego i północno-zachodniego) podnosi się do wartości 0,6 - 0,9. Średnia roczna prędkość wiatru dla miasta Warszawy na wysokości 10 m (Klimat Warszawy, 2018) nie przekracza wartości 4 m/s (przez większość dni w roku waha się między 2 a 6 m/s (il. 9)). Korzystając ze wzoru (1), można określić prędkość na dowolnej wysokości. Dla prezentowanych na mapach współczynników wzmocnienia, odnoszących się do wysokości pieszego, średnia wartość prędkości wiatru wynosi 2,87 m/s.

Biorąc pod uwagę współczynniki wzmocnienia prędkości $\alpha \in (0-0,45)$ wewnątrz rozpatrywanego kwartału i podaną prędkość, można oszacować średnie prędkości wiatru ze wzoru $w = \alpha \cdot v$, co daje nam wartości pomiędzy 0-1,3 m/s.

Dla wiatru z kierunku zachodniego, północnego, południowego i południowo-wschodniego współczynnik wzmocnienia prędkości we wnętrzu kwartału na większości obszaru nie przekracza wartości 0,3, a w wielu miejscach spada do 0,15. Te współczynniki odpowiadają niskim prędkościom wiatru nieprzekraczającym średnio 1 m/s, co



Il. 9. Róża wiatrów dla Warszawy z ostatnich 30 lat wg. (Meteoblue.Com, 2024)

Ill. 9. Wind rose for Warsaw over the last 30 years according to (Meteoblue.Com, 2024)

While analysing the maps in Ill. 8, the velocity amplification factor α within the perimeter building development under consideration oscillates between 0 and 0.45 for most wind directions. In smaller areas (e.g., the south-west and north-west directions), it rises to 0.6–0.9.

The average annual wind velocity for the city of Warsaw at a height of 10 m, according to ('The climate of Warsaw', 2018) does not exceed the value of 4 m/s (on most days of the year, it varies between 2 and 6 m/s (Ill. 9)). Using equation (1), the velocity at any height can be determined. For the amplification coefficients relating to pedestrian height shown on the maps, the average wind velocity is 2.87 m/s.

Taking into account the velocity amplification coefficients $\alpha \in (0-0.45)$ inside the perimeter building development under consideration, and the given velocity, the average wind

sugeruje, że przestrzeń kwartału dla tych kierunków wiatru będzie słabo wentylowana. Biorąc pod uwagę, że zachodnie i południowo-wschodnie kierunki wiatru dominują w Warszawie (il. 9), można stwierdzić, że problem będzie utrzymywał się przez wiele dni w ciągu roku. Przeglądając się natomiast mapom współczynnika wzmocnienia dla wiatru południowo-zachodniego, południowo-wschodniego, północno-zachodniego i północno-wschodniego można zauważyć inny problem. Na większości obszaru wewnątrz kwartału prędkości są niskie – współczynnik wzmocnienia α nie przekracza 0,45, ale w ulicach przylegających do rozważanego kwartału przekracza wartość 1,35, co może sugerować dość mocne przyspieszenie wiatru w tych miejscach. Dla mieszkańców rozważanego kwartału takie warunki wiatrowe mogą być wysoce niekomfortowe, szczególnie gdy występują silne porywy wiatru oraz ze względu na duże różnice prędkości wewnątrz kwartału i w ulicach z nim sąsiadujących.

Powyższa analiza daje przesłanki do zastanowienia się nad zmianami geometrii samego kwartału, jak i najlepszego usytuowania go względem otaczających go budynków w celu poprawy warunków wentylacyjnych i komfortu wiatrowego w rozważanym zespole budynków.

7. DYSKUSJA

Opracowanie modelu zabudowy kwartałowej spełniającej uwarunkowania projektowania w Polsce okazało się złożonym wieloetapowym zadaniem. Niewątpliwie pomocnym narzędziem okazało się oprogramowanie Kolega oparte na sztucznej inteligencji, które pozwoliło na wygenerowanie wielu różnych kombinacji zabudowy w krótkim czasie i dostarczyło cennych danych, ułatwiających ich porównywanie (na przykład w zakresie powierzchni użytkowej czy struktury mieszkań). Tym niemniej na wielu etapach pracy badawczej trzeba było dokonywać wyboru pomiędzy różnymi opcjami (na przykład pomiędzy uwarunkowaniami śródmiejskimi i nieśródmiejskimi, czy pomiędzy różnymi wariantami planu). Nie zawsze był on jednoznaczny i często wymagał starannego doboru argumentów. Tym niemniej różnice pomiędzy rozważanymi wariantami modelu w zakresie ostatecznych parametrów geometrycznych realnie wpływających na przepływ wiatru były niewielkie. Zatem można uznać, że opracowany model w dostatecznym stopniu oddaje charakterystykę geometryczną współczesnej zabudowy kwartałowej w Polsce.

Przeprowadzone badania symulacyjne przepływu wiatru w zadanym obszarze zabudowy mają charakter uproszczony. Wybrany do obliczeń model RANS odnosi się do uśrednionych w czasie równań Naviera-Stokesa i daje ustalony opis przepływu turbulentnego. Model ten jest również mniej precyzyjny dla przepływów wokół budynków w regionach o niskiej prędkości wiatru (np. w śladzie aerodynamicznym budynków czy w obszarach obniżonej prędkości przed budynkami) (Blocken et al., 2016). Jest jednak najczęściej używanym modelem do tego typu obliczeń w inżynierii wiatrowej (Blocken, 2015; Paris et al., 2023; Tominaga, 2024).

Głównym parametrem, na którym skoncentrowano się w analizie, jest współczynnik wzmocnienia prędkości. Na podstawie otrzymanych map tego parametru wskazano obszary, w których pojawiają się problemy z przewietrzaniem lub nadmierną prędkością wiatru. Nie odniesiono się jednak szczegółowo do kwestii, jak często w skali roku mogą występować zidentyfikowane problemy. Poza informacją, które z badanych kierunków wiatru należą do przeważających, zakres wykonanych badań nie daje przesłanek do precyzyjnej oceny skali częstotliwości występowania problemów lokalnie niedostatecznej lub nadmiernej wietrzności. Choć cenny jest wniosek z badań, że dla większości kierunków można było zaobserwować strefy potencjalnie problemowe.

Ostatecznie można uznać, że przeprowadzone studium daje odpowiedź na postawione we wstępie pytanie badawcze: czy we współczesnej zabudowie charakterystycznej dla dużych rozwijających się miast w Polsce może występować ryzyko problemów

velocities can be estimated from the formula $w = \alpha \cdot v$, the resulting values of which are between 0–1.3 m/s.

For winds from the western, northern, southern and south-eastern directions, the velocity amplification factor for the interior of the perimeter building development does not exceed a value of 0.3 in the major part of the area and drops to 0.15 in many places. These coefficients correspond to average wind velocities not exceeding 1 m/s, suggesting that the perimeter building development will be poorly ventilated for these wind directions. Because westerly and south-easterly winds dominate in Warsaw (Ill. 9), the problem will persist for many days throughout the year. However, the amplification factor maps for south-west, south-east, north-west, and north-east winds show another problem. Most of the area inside the perimeter building development shows low velocities – the amplification factor α does not exceed 0.45, whereas in the streets adjacent to the perimeter building development under consideration, it exceeds the value of 1.35. This may suggest quite strong wind acceleration in these places. For residents of the perimeter block under consideration, these wind conditions can be highly uncomfortable, especially during strong gusts, due to the large differences in velocities inside the perimeter building development and in the adjacent streets. The above analysis provides a rationale for considering changes to the geometry of the perimeter building development itself, as well as the best positioning of the perimeter building development in relation to the surrounding buildings. Such considerations may improve ventilation and wind comfort in the building complex in question.

7. DISCUSSION

Developing a model of a perimeter building development that meets the design conditions in force in Poland proved to be a complex multi-stage task. Undoubtedly, the artificial intelligence-based software Kolega proved a helpful tool, allowing many different development combinations to be generated in a short period of time and providing valuable data to facilitate comparison (for example, in terms of floor area or housing structure). Nevertheless, at many stages of the research, a choice had to be made between different options (for example, between inner-city and non-inner-city conditions, or between different layout options). The choice was not always clear-cut and often required a careful selection of arguments. Yet the differences between the model variants considered, in terms of the final geometrical parameters that realistically affect wind flow, were small. Thus, the developed model sufficiently captures the geometrical characteristics of contemporary perimeter building developments in Poland.

The wind-flow simulation studies for the given development area are simplified. The RANS model used for the calculations relates to the time-averaged Navier-Stokes equations and provides a fixed description of turbulent flow. The model is also less accurate for flows around buildings in low-wind-velocity areas (e.g., in the aerodynamic footprint of buildings or in reduced-velocity areas in front of buildings) (Blocken et al., 2016). However, it is the most widely used model for such calculations in wind engineering (Blocken, 2015; Paris et al., 2023; Tominaga, 2024). The analysis focused on the velocity amplification factor. Based on the maps for this parameter, the study identified areas with ventilation problems or excessive wind velocity.

However, the study did not address in detail how often the identified problems may occur per year. Apart from providing information as to which of the wind directions studied are among the predominant ones, the extent of the research

niedostatecznej wentylacji przestrzeni wokół budynków? Badania symulacyjne wykazały realną możliwość występowania tych problemów, choć dokładniejsze rozpoznanie ich skali wymaga pogłębienia badań. Przede wszystkim chodzi o rozważenie w analizie innych parametrów związanych z wentylacją przestrzeni miejskiej, wspominanych między innymi w artykułach (Hang et al., 2012, 2015; Lau & Ngan, 2018; Ramponi et al., 2015) oraz przeprowadzenie szeregu eksperymentów przepływu powietrza dla danego zespołu zabudowy w tunelu aerodynamicznym przy użyciu technik polowych, takich jak saltacja piaskowa i wizualizacja olejowa, jak również technik pomiarowych, których wynikiem będą dane ilościowe dotyczące ciśnienia i prędkości w zadanym obszarze. Dane otrzymane z eksperymentu pozwolą na szczegółową walidację wyników symulacji i oszacowanie błędów.

8. WNIOSKI

Przeprowadzone badania nad modelem zabudowy kwartałowej oddającej uwarunkowania projektowania w Polsce wykazały, że wymiary kwartałów, a szczególnie współczynnik w/h wewnętrznych dziedzińców bliskie są parametrom uznanym w literaturze za powodujące efekt przepływu ślizgowego i szorstkościowo zakłóconego. Wiąże się to z ryzykiem niedostatecznej wentylacji.

Wstępna analiza wpływu geometrii ostatecznie opracowanego modelu zabudowy na warunki wiatrowe wykazała, że dany układ urbanistyczny znacząco wpływa na obecność stref stagnacji i przyspieszeń powietrza. Skośne kierunki wiatru (południowo-zachodni, południowo-wschodni i analogicznie północno-wschodni i południowo-wschodni) zapewniają lepszą wentylację w ulicach sąsiadujących z rozpatrywanym kwartałem niż kierunki główne (pn, pd, wsch, zach). Można zauważyć, że powietrze napływające z kierunków głównych jest blokowane przez budynki otaczające kwartał. Wewnątrz kwartału na większości obszaru współczynnik wzmocnienia prędkości nie przekracza wartości 0,45, zatem prędkość powietrza jest dość znacznie obniżona w stosunku do prędkości wiatru, która występowałaby, gdyby obszar był niezabudowany. Niewątpliwie będzie to miało wpływ na wentylację wewnętrznego dziedzińca kwartału i możliwości kumulowania się w nim różnego typu zanieczyszczeń. Można zatem uznać, że istnieje ryzyko niedostatecznej wentylacji wewnętrznej przestrzeni kwartału. Bardziej precyzyjne wnioski wymagają pogłębienia badań i wzięcia pod uwagę także innych parametrów niż tylko współczynnik wzmocnienia prędkości.

Warto zwrócić uwagę, że opracowując model przeznaczony do badań symulacyjnych, kierowano się zasadą, by nie koncentrować się na najbardziej niekorzystnych dla przepływu wartościach parametrów (dotyczą one lokalizacji śródmiejskich). Aby ocenić, jak szeroki jest problem ryzyka tworzenia lokalnych zastojów powietrza, przyjęto te nieco korzystniejsze współczynniki występujące na mniej intensywnie zurbanizowanych terenach (intensywność zabudowy na poziomie 1,6, zalecana według (Bradecki, 2021) dla miast powyżej 200 tys. mieszkańców). Biorąc pod uwagę, że śródmieścia uwzględnionych w badaniach miast zabudowane są bardziej intensywnie oraz aktualna polityka przestrzenna zakłada dalszy rozwój zabudowy – zidentyfikowany problem ryzyka niedostatecznej wentylacji może dotyczyć dużych obszarów miast i prawdopodobnie będzie się pogłębiać.

Skłania to do refleksji na temat konieczności rozwijania badań, a w szczególności: o uzupełnienia ich o modele reprezentujące bardziej intensywną zabudowę i o uszczegółowienie badań CFD. Wyniki tych badań mogą stać się przesłanką do podjęcia starań o wprowadzenie regulacji prawnych w Polsce uwzględniających czynnik przepływu wiatru wokół zabudowy.

conducted provided no indication of the precise scale of the frequency with which the problems of locally insufficient or excessive wind occur. Still, the study concluded that potentially problematic zones could be observed for most directions. Ultimately, the study answers the research question posed in the introduction: is inadequate ventilation of the space around buildings in contemporary buildings characteristic of large developing cities in Poland a potential risk? Simulation studies have proved the likely occurrence of these problems, although a more accurate recognition of their scale requires deeper research. Most importantly, the analysis considered other parameters related to the ventilation of urban spaces mentioned in the articles (Hang et al., 2012, 2015; Lau and Ngan, 2018; Ramponi et al., 2015). Additionally, it was important to conduct a series of wind-tunnel airflow experiments for a given set of buildings using field techniques, such as sand fusion and oil visualisation, as well as measurement techniques that would result in quantitative data on pressure and velocity in a given area. The data obtained from the experiment will allow detailed validation of the simulation results and error estimation.

8. CONCLUSIONS

A study of a model perimeter building development reflecting design conditions in Poland showed that the building dimensions, especially the aspect ratio w/h of the internal courtyards, are similar to parameters recognised in the literature as causing skimming flow and wake interference flow. This implies a risk of inadequate ventilation.

A preliminary analysis of how the final development geometry affects wind conditions showed that the urban layout significantly influences the presence of stagnant and accelerated air zones. Oblique wind directions (south-west, south-east, and analogously north-east and south-east) provide better ventilation in the streets adjacent to the perimeter building development under consideration than the main wind directions (north, south, east, west). The buildings surrounding the perimeter development block air from the main directions. Inside the perimeter building in most areas, the velocity amplification factor does not exceed 0.45; thus, air velocity is significantly reduced compared with what would occur if the area were undeveloped. This will undoubtedly affect ventilation in the inner courtyard of the perimeter building development and the potential accumulation of various pollutants. More precise conclusions require deeper research and consideration of parameters beyond the velocity amplification factor. When developing the model for the simulation studies, the principle was not to focus on the most unfavourable flow parameter values (these concern inner-city locations). In order to assess how widespread the risk of creating local air stagnation is, the slightly more favourable coefficients occurring in less intensively urbanised areas were adopted (building intensity of 1.6, recommended according to (Bradecki, 2021) for cities with more than 200,000 inhabitants). Because the inner areas of the cities included in the study are built up more intensively than the study assumptions, and current spatial policy advocates further building development, the identified risk of inadequate ventilation may affect large areas of cities and is likely to worsen.

This prompts reflection on the need to develop the research, in particular by supplementing it with models representing more intensive buildings and making the CFD studies more detailed. The results of these studies may provide a basis for efforts to introduce legal regulations in Poland that account for wind flow around developments.

REFERENCES

- [1] Ascione, F., Böttcher, O., Manniti, G., Mastellone, M., and Mühle, J. (2024). The effect of climate change and urbanization on outdoor microclimate: A case study in Berlin. *Energy and Buildings*, 308, 114024. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114024>
- [2] Baş, H., Andrianne, T., and Reiter, S. (2024). City configurations to optimise pedestrian level ventilation and wind comfort. *Sustainable Cities and Society*, 114, 105745. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105745>
- [3] Bitner, A. (2011). The characteristic shape of cadastral parcels in urban areas – an analysis of the morphological structure of cities. *Acta Sci. Pol., Geodesia et Descriptio Terrarum*, 23-32.
- [4] Błazik-Borowa, E. (2008). *Problemy związane ze stosowaniem modelu turbulencji k-e do wyznaczania parametrów opływu budynków*, Lublin University of Technology Publishing House.
- [5] Blocken, B. (2015). Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment*, 91, 219–245. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.015>
- [6] Blocken, B., Stathopoulos, T., and Van Beeck, J. P. A. J. (2016). Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment. *Building and Environment*, 100, 50–81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.004>
- [7] Bradecki, T. (2021). *Wskaźniki, parametry i modele w kształtowaniu intensywnej wielorodzinnej zabudowy mieszkaniowej*, Silesian University of Technology.
- [8] Bradecki, T., and Twardoch, A. (2013). *Współczesne kierunki kształtowania zabudowy mieszkaniowej; Residential areas development - current trends: case studies from Silesian Metropolitan Area*, Silesian University of Technology.
- [9] Bryk, R. (2020). Preferencje zakupu mieszkań w dużych miastach Polski. *Studia Miejskie*, 33, 141–153. <https://doi.org/10.25167/sm.1265>
- [10] Cao, P., and Li, W. (2024). Evaluation and optimization of outdoor wind environment in block based on space syntax and CFD simulation. *PLOS ONE*, 19(3), e0297683. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0297683>
- [11] Chudzińska, A. (2021). Smog – architektoniczne metody przeciwdziałania. *BUILDER*, 294(1), 28–31. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.5969>
- [12] Dissanayake, C., Weerasinghe, U. G. D., and Dharmasena, J. (2021). Assessment of Thermal Comfort and Microclimate in Urban Street Canyons. *A Review of Recent Research*. 77–95. <https://doi.org/10.22492/issn.2432-8642.2021.6>
- [13] Du, Y., Mak, C. M., and Tang, B. (2018). Effects of building height and porosity on pedestrian level wind comfort in a high-density urban built environment. *Building Simulation*, 11(6), Article 6. <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0451-y>
- [14] European Commission. Directorate General for Regional Policy. (2011). Cities of tomorrow – Challenges, visions, ways forward. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2776/53888>
- [15] Flaga, A. (2019). Model studies of dynamic effects on the ground layer of the atmosphere – ventilation towers in a linear configuration in an area with a specific roughness, 73–83. In A. Flaga, Ł. Flaga, & A. Pistol (eds.), *Dynamic ventilation and smog reduction in urban areas with particular emphasis on the city of Krakow*: Scientific conference, September 26, 2019, Cracow University of Technology.
- [16] Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., and Carissimo, B. (2007). BEST PRACTICE GUIDELINE FOR THE CFD SIMULATION OF FLOWS IN THE URBAN ENVIRONMENT. COST European Cooperation in Science and Technology, 53. <https://doi.org/hal-04181390>
- [17] Gehl, J. (2017). *Cities for People*. Island Press.
- [18] Hägbo, T.-O., and Giljarhus, K. E. T. (2024). Sensitivity of urban morphology and the number of CFD simulated wind directions on pedestrian wind comfort and safety assessments. *Building and Environment*, 253, 111310. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111310>
- [19] Hagen, B. (2016). The Role of Planning in Minimizing the Negative Impacts of Global Climate Change. *Urban Planning*, 1(3), 13–24. <https://doi.org/10.17645/up.v1i3.671>
- [20] Hameed Basee, D., Mohsin Hmoud, S., and Riadh Abdulla, Z. (2024). The impact of the morphological change of urban spaces in shaping the new microclimate: A case study in Karbala, Iraq. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(3), 102463. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102463>
- [21] Hang, J., Li, Y., Sandberg, M., Buccolieri, R., and Di Sabatino, S. (2012). The influence of building height variability on pollutant dispersion and pedestrian ventilation in idealized high-rise urban areas. *Building and Environment*, 56, 346–360. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.023>
- [22] Hussain, M. (1978). A study of the wind forces on low rise building arrays and their application to natural ventilation design methods, Ph.D. Thesis, University of Sheffield.
- [23] Kim, H.-J., and Kim, J.-S. (2018). Design Methodology for Street-Oriented Block Housing Considering Daylight and Natural Ventilation. *Sustainability*, 10(9), 3154. <https://doi.org/10.3390/su10093154>
- [24] Kurppa, M., Hellsten, A., Auvinen, M., Raasch, S., Vesala, T., and Järvi, L. (2018). Ventilation and Air Quality in City Blocks Using Large-Eddy Simulation – Urban Planning Perspective. *Atmosphere*, 9(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/atmos9020065>
- [25] Lau, G. E., and Ngan, K. (2018). Analysing urban ventilation in building arrays with the age spectrum and mean age of pollutants. *Building and Environment*, 131, 288–305. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.010>
- [26] Liu, H., Zhou, X., Ge, X., Han, D., Zhuang, W., Tang, Y., and Shen, X. (2024). Multiscale urban design based on the optimization of the wind and thermal environments: A case study of the core area of Suzhou Science and Technology City. *Frontiers of Architectural Research*, 13(4), 822–841. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2024.02.017>
- [27] Mirhosseini, H. (2019). *Evaluating Urban Ventilation in the Urban Grid of Barcelona and Berlin: A Comparative Study on the Relationship Between Wind Direction and Urban Morphology*, Prometheus, 3, 30–35.
- [28] Mochulska, M.-V., and Zielonko-Jung, K. (2024). Parameters of Building Geometry that Affect Wind Flow With Regards to the Possibilities for their Implementation in Urban and Architectural Design in Poland. *Architecture, Civil Engineering, Environment*, 17(4), 83–98. <https://doi.org/10.2478/acee-2024-0030>
- [29] Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., and Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates* (1st ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- [30] Palusci, O., and Cecere, C. (2022). Urban Ventilation in the Compact City: A Critical Review and a Multidisciplinary Methodology for Improving Sustainability and Resilience in Urban Areas. *Sustainability*, 14(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/su14073948>
- [31] Paris, M., Dubois, F., Bosc, S., and Devillers, P. (2023). Integrating Wind Flow Analysis in Early Urban Design: Guidelines for Practitioners. *Journal of Contemporary Urban Affairs*, 7(2), 194–211. <https://doi.org/10.25034/jcuca.2023.v7n2-12>
- [32] PN-EN-1-1-4. (2008). Polish Committee for Standardisation.
- [33] Poćwierz, M., and Zielonko-Jung, K. (2021). An analysis of wind conditions at pedestrian level in the selected types of multi-family housing developments. *Environmental Fluid Mechanics*, 21(1), Article 1. <https://doi.org/10.1007/s10652-020-09763-5>
- [34] Ramponi, R., Blocken, B., De Co, L. B., and Janssen, W. D. (2015). CFD simulation of outdoor ventilation of generic urban configurations with different urban densities and equal and unequal street widths. *Building and Environment*, 92, 152–166. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.018>
- [35] Ratti, C., Raydan, D., and Steemers, K. (2003). Building form and environmental performance: Archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and Buildings*, 35(1), 49–59. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00079-8)
- [36] Shirazi, M. R. (2020). Compact Urban Form: Neighbouring and Social Activity. *Sustainability*, 12(5), 1987. <https://doi.org/10.3390/su12051987>
- [37] Sim, D. (2020). *Miasto żyć i wyciszyć. Jak kształtować miasto z troską o wszystkich*. Wydawnictwo Wysoki Zamek
- [38] Solarek, K. (2011). Współczesne koncepcje rozwoju miasta. *Kwartalnik Architektury i Urbanistyki*, 56(4), 51–71.
- [39] Tominaga, Y. (2024). CFD simulations of turbulent flow and dispersion in built environment: A perspective review. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 249, 105741. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2024.105741>
- [40] Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., and Shirasawa, T. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10–11), 1749–1761. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.058>
- [41] Van Hooff, T., and Blocken, B. (2010). Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modelling on a high-resolution grid: A case study for the Amsterdam ArenA stadium. *Environmental Modelling and Software*, 25(1), 51–65. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.07.008>
- [42] Wankhade, R., Pernigotto, G., and Larcher, M. (2023). A Literature Review on Methods and Metrics for the Analysis of Outdoor Air Displacement Conditions in the Urban Environment. *Energies*, 16(6), 2577. <https://doi.org/10.3390/en16062577>
- [43] Wiszniowski, J. (2025). Ograniczanie zanieczyszczenia powietrza i efektu miejskiej wyspy ciepła – wpływ na warunki życia mieszkańców/ Mitigating air pollution and the urban heat island effect – impact on the living conditions of inhabitants. *Środowisko Mieszkaniowe/Housing Environment*, e2025018. <https://doi.org/10.2478/he-2025-0018>
- [44] Zajic, D., Fernando, H. J. S., Calhoun, R., Princevac, M., Brown, M. J., and Pardyjak, E. R. (2011). Flow and Turbulence in an Urban Canyon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(1), Article 1. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2525.1>
- [45] Zhang, J., Chen, J., Zhu, W., Ren, Y., Cui, J., and Jin, X. (2024). Impact of urban space on PM2.5 distribution: A multiscale and seasonal study in the Yangtze River Delta urban agglomeration. *Journal of Environmental Management*, 363, 121287. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121287>
- [46] Zhang, L., and Yuan, C. (2023). Multi-scale climate-sensitive planning framework to mitigate urban heat island effect: A case study in Singapore. *Urban Climate*, 49, 101451. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101451>
- [47] Zhao, Z., Li, Y., and Su, X. (2024). Mountains block and seas move: The impact of geographical environment on the China's Carbon Emissions Trading Scheme in reducing urban PM2.5 concentrations. *Sustainable Cities and Society*, 112, 105630. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105630>
- [48] Zielonko-Jung, K., and Mochulska, M. V. (2022). Morphology of Building Development as an Element of Urban Ventilation System. *Architecture, Civil Engineering, Environment*, 15(2), 71–81. <https://doi.org/10.2478/acee-2022-0016>
- [49] Zielonko-Jung, K., Poćwierz, M., and Idem, R. (2021). Wind Conditions at Pedestrian Level in Different Types of Residential Urban Development for a High Degree of Land Use Efficiency. *Sustainability*, 13(24), 13612. <https://doi.org/10.3390/su132413612>

ONLINE SOURCES

- [1] Area and population by territory in 2024. (2024). Statistics Poland, Programming, Coordination of Statistical Surveys and Registers Department. <https://stat.gov.pl/en-topics/population/population/area-and-population-in-the-territorial-profile-in-2024,4,18.html> (accessed: 20.10.2025)
- [2] Designbotic. <https://www.designbotic.pl> (accessed: 20.07.2025)
- [3] Dz.U. 2003 nr 80 poz. 717. (2003). <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu20030800717>. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu20020750690> (accessed: 26.05.2025)
- [4] Dz.U.2022.0.1225 §60. (2002). <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu20020750690> (accessed: 26.05.2025)
- [5] Dz.U.2022.0.1225 §12, §13, §19, §23, §36, §40, §60, §271–273. (2002). <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu20020750690> (accessed: 27.05.2025)
- [6] Dz.U.2022.0.1225 §12, §13, §19, §23, §36, §40, §60, §271–273. (2002). <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu20020750690> (accessed: 27.05.2025)
- [7] GUS. Housing in 2023. (2024). Central Statistical Office of Poland. https://stat.gov.pl/files/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5478/13/21/1/budownictwo_w_2023_r..pdf. (accessed: 26.02.2025)
- [8] GSUM -Gdański Standard Ulicy Miejskiej (2020) <https://www.brg.gda.pl/wizje-opracowania-i-polityki-miejskie/przestrzenie-publiczne/1176-gdanski-standard-ulicy-miejskiej-gsum> (accessed: 16.02.2024)
- [9] Klimat Warszawy (2018). Office of Architecture and Spatial Planning. https://architektura.um.warszawa.pl/documents/12025039/22491719/klimat_broszura.pdf/b654b97c-8c88-dbf2-0168-38fa1971c4ca?t=1634497936327 (accessed: 22.11.2025)
- [10] Kolega. (2023). <https://www.kolega.space> (accessed: 05.12.2023)
- [11] Meteoblue.com. (2024). https://www.meteoblue.com/pl/pogoda/historyclimate/climatemodelled/warszawa_polska_756135 (accessed: 04.02.2025)
- [12] Proposed plan of Odolan. (2020). <https://konsultacje.um.warszawa.pl/proces-ses/odolany?locale=pl> (accessed: 17.07.2025)
- [13] Ranking of quality of life in cities. (2018). <https://www.miasta.pl/aktualnosci/rankingjakoosci-zycia-w-miastach> (accessed: 18.05.2025)
- [14] Raport rankingu miast. <https://sonarhome.pl/statystyki-rynkowe> (accessed: 19.11.2025)
- [15] Raport AMRON-SARFiN (4/2023). <https://demagog.org.pl/wp-content/uploads/2024/09/Raport-AMRON-SARFiN-Nr-4-2024-Pl.pdf> (accessed: 20.10.2025)
- [16] Raport o stanie Miasta Gdańska za 2023 rok. Urząd Miejski w Gdańsku. <https://bip.gdansk.pl/urzad-miejski/raporty-i-publikacje/Raport-o-stanie-miasta-Gdanska-za-2023-rok,a,264665> (accessed: 10.12.2024)
- [17] Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego Miasta Krakowa - Dokument ujednolicony 2014 (CXII/1700/14) <https://www.bip.krakow.pl/?id=48> (accessed: 10.01.2025)
- [18] Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego miasta stołecznego Warszawy (LIII/1611/2021) <https://architektura.um.warszawa.pl/-/studium-uwarunkowan-i-kierunkow-zagospodarowania-przestrzennego-warszawy> (accessed: 10.01.2025)
- [19] Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego miasta Gdańska (XII/218/19) <https://www.brg.gda.pl/planowanie-przestrzenne/studium-uwarunkowan-i-kierunkow-zagospodarowania-przestrzennego> (accessed: 10.01.2025)
- [20] Serwis Map.<https://mapa.um.warszawa.pl/> (accessed: 16.02.2024)
- [21] Ukośne mapy (2024) <https://ukosne.um.warszawa.pl/> (accessed: 16.02.2024)
- [22] UCHWAŁA NR LIV/1363/22 Rady Miasta Gdańska z dnia 29 września 2022 r. https://baw.bip.gdansk.pl/UrzadMiejskiwGdanskudocument/552770/Uchwala%C5%82a-LIV_1363_22 (accessed: 16.02.2024)
- [23] UCHWAŁA NR LXVI/1800/2018 RADY MIASTA STOŁECZNEGO WARSZAWY z dnia 10 maja 2018 r. <https://bip.warszawa.pl/web/rada-warszawy/-/uchwala-nr-lxvi-1800-2018-z-2018-05-10-5272815> (accessed: 16.02.2024)
- [24] UCHWAŁA NR XCII/2502/22 RADY MIASTA KRAKOWA z dnia 6 lipca 2022 r https://www.bip.krakow.pl/?dok_id=167&sub_dok_id=167&sub=uchwala&query=id%3D23155%26typ%3Du (accessed: 16.02.2024)