

## ŚRODOWISKO DO TESTOWANIA RUCHU BSP W AGLOMERACJI MIEJSKIEJ

ANTONI KOPYT, MATEUSZ SOCHACKI, KACPER KACZMAREK

*Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej*

*e-mail: antoni.kopyt@pw.edu.pl; mateusz.sochacki@pw.edu.pl; kacper.kaczmarek.stud3@pw.edu.pl*

Koncepcja Urban Air Mobility (UAM) zakłada przeniesienie znacznej części ruchu drogowego (głównie dostawy) do przestrzeni powietrznej. Pojawienie się nad aglomeracjami miejskimi tysięcy statków powietrznych pionowego startu (SPPS) musi zostać poprzedzone okresem przejściowym, w trakcie którego opracowane zostaną rozwiązania dotyczące organizacji ruchu powietrznego oraz bezpieczeństwa. W celu wspomagania tego procesu opracowano narzędzie do analizy ruchu statków powietrznych w obszarach aglomeracji miejskich o nazwie UAM TAT. Narzędzie to umożliwia prowadzenie symulacji komputerowej systemów o różnych właściwościach oraz charakterystyce w określonej przestrzeni powietrznej, np. dla aglomeracji warszawskiej. Podczas inicjowania symulacji możliwe jest wprowadzanie różnej kategorii BSP reprezentującej zapotrzebowanie rynku i usług w zakresie np. dostaw paczek, dostaw jedzenia czy przewozu osób. Dodatkowym elementem narzędzia jest kreowanie środowiska, w którym dana symulacja ma być przeprowadzona. Najważniejszym elementem tej cechy jest tworzenie tzw. *No-fly zone*, czyli stref zakazanych dla systemów bezałogowych do poruszania się. Dla określonych miast takie strefy są określone przez przepisy i odpowiednie służby. Natomiast w symulatorze możliwe jest dodawanie podobnych stref, które umożliwiają wyznaczanie korytarzy przemieszczania się dronów tzw. *Dronostrad*.

*Słowa kluczowe:* BSP, symulacja, ruch lotniczy (*urban air mobility*) UAM

### 1. Wstęp

Rosnąca złożoność zaawansowanych systemów lotniczych stwarza nowe zagrożenia dla bezpieczeństwa i ochrony szczególnie infrastruktury krytycznej oraz stwarza szereg wyzwań regulacyjnych i technicznych. Wraz ze wzrostem ruchu BSP istotne jest zapewnienie bezpiecznej integracji BSP z systemem zarządzania ruchem lotniczym, pierwotnie zaprojektowanym do obsługi załogowych statków powietrznych [1]. Rosnące wykorzystanie BSP w środowisku miejskim zwiększy ryzyko potencjalnych kolizji, różnych incydentów i wypadków. W związku z powyższym, konieczne jest opracowanie skutecznych praktyk, metodologii i procesów zarządzania ryzykiem w celu zapewnienia bezpieczeństwa operacji. Identyfikacja i zrozumienie czynników ryzyka [2, 3] jest kluczowym krokiem w opracowywaniu środków ich mitygacji oraz reagowania dla BSP działających w środowiskach miejskich. Aby zweryfikować różne podejścia, metody i zasady ruchu lotniczego do UAM, opracowano dedykowane narzędzie symulacyjne. Środowisko wirtualne, w którym można testować różne scenariusze, można wykorzystać do identyfikacji i ograniczenia niektórych ryzyk w UAM. Celem systemu jest identyfikacja potencjalnych zagrożeń, a następnie określenie, które stosowane przepisy i procedury bezpieczeństwa są najbardziej niezawodne i bezpieczne.

Z prac badawczych [4, 5] wynika, że scentralizowana metoda sterowania BSP może nie być skuteczna i konieczne jest zastosowanie podejścia zdecentralizowanego. Przeprowadzając różne symulacje, możliwe jest, że nie wszystkie metody i przepisy można zaadaptować z lotnictwa cywilnego. Opracowany symulator umożliwia prowadzenie symulacji wielu platform BSP o różnym poziomie autonomii, właściwościach dynamicznych (np. prędkość, promień skrętu, masa,

czujniki pokładowe czy system S&A). Przeprowadzenie symulacji poprzez zmianę tych parametrów mogłoby skutkować określeniem przepisów dla krajowych władz lotniczych w zakresie minimalnych wymagań dla BSP, które mają być dopuszczone do użytku w obecnym U-Space. Opracowane narzędzie umożliwia również definiowanie różnych metod stosowania zasad ruchu lotniczego, takich jak kolejki, ustalanie priorytetów i sytuacje awaryjne. Cecha ta może skutkować określeniem skutecznych i bezpiecznych metod kontrolowania przestrzeni U-Space. W poniższym artykule zaprezentowano narzędzie do analizy ruchu i jego funkcje, a następnie przedstawiono kilka studiów przypadków.

## 2. Architektura systemu

Symulator UAM składa się z kilku modułów, które umożliwiają przeprowadzenie pełnej symulacji oraz otrzymanie wyników. Są to: skrypt generujący dane wejściowe, moduł odpowiedzialny za przetwarzanie danych wejściowych, moduł symulacyjny, moduł generujący wykresy i pliki wyjściowe. Celem skryptu generowania danych wejściowych jest utworzenie pliku wejściowego zawierającego dane o każdym symulowanym BSP na podstawie parametrów podanych przez użytkownika. Parametry te są przechowywane jako tekst w formacie JSON w plikach deklaracji populacji. Punkty orientacyjne BSP są generowane na podstawie danych o gęstości zaludnienia w symulowanym regionie. Publikowane są przez GUS w postaci siatek jednokilometrowych [6]. Strefy zakazu lotów dla prezentowanej przestrzeni powietrznej publikowane są przez Polską Agencję Żeglugi Powietrznej [7, 8]. Pierwszym krokiem przygotowania symulacji jest wygenerowanie parametrów dla poszczególnych rodzin SPPS. Parametry pokazane w tabeli 1, takie jak *FamilyName* i *FailureRate*, są bezpośrednio przypisane do każdego SPPS z rodziny, natomiast parametr *numberOfDrones* to liczba SPPS, dla których powinny zostać wygenerowane dane. Dla parametrów zawierających funkcję gęstości prawdopodobieństwa opisaną przez wagi podane przez użytkownika. Program wykorzystuje te dane do losowego losowania ich wartości. W programie zaimplementowano cztery rodzaje tras. Wygenerowane punkty trasy nie znajdują się w strefie zakazu lotów.

- Lot typu *punkt-punkt*. Na podstawie gęstości zaludnienia program generuje punkty orientacyjne startu i lądowania. Jest to najprostszy typ trasy, składający się wyłącznie z dwóch punktów orientacyjnych. Ten typ reprezentuje m.in. trasy taksówek. SPPS typu *hub-to-point* startuje i ląduje w jednym z węzłów oraz leci przez punkty orientacyjne. Wdrożenie symuluje dostawy kurierskie – paczki odbierane są z dużych hubów i dostarczane do klientów. Statystyki dostaw oszacowano na podstawie paczkomatu wykorzystywanego przez wiodącą polską firmę kurierską InPost. Oszacowano, że 32% SPPS poleciało do od 1 do 2 punktów orientacyjnych, 44% SPPS poleciało do od 3 do 4 punktów orientacyjnych, 23% SPPS poleciało do od 5 do 8 punktów orientacyjnych. Po zsumowaniu całkowitej liczby punktów nawigacyjnych dla danej rodziny SPPS, program rysuje lokalizację punktów na podstawie rozkładu gęstości zaludnienia. Następnie jeden z punktów pośrednich zostaje wybrany jako pierwszy punkt trasy. Następnym krokiem jest wybranie kolejnych punktów orientacyjnych, które są najbliższe pierwszego punktu. Ponadto jako miejsce startu wybierany jest najbliższy węzeł komunikacyjny. Zapewnia optymalną dystrybucję „paczek” w węzłach. Ostatnim krokiem jest zastosowanie algorytmu komiwojażera do punktów orientacyjnych w celu ustalenia ich optymalnej kolejności.
- Lot typu *hub-hub*. W tym rodzaju trasy SPPS rozpoczyna lot w jednym z węzłów, a następnie leci do dwóch punktów, po czym kończy trasę w tym samym lub innym węźle. Ten typ trasy symulować ma dostawy jedzenia z restauracji do klientów. Pierwszy węzeł reprezentuje tu stacje lądowania SPPS, z której startują one do restauracji (pierwszego punktu), podejmują zamówienie, lecą do klienta (drugiego punktu), a następnie udają się

do najbliższej stacji ładowania. Pierwszym krokiem w generowaniu tego typu trasy jest wylosowanie drugiego punktu trasy zgodnie z rozkładem gęstości ludności. Następnie losowany jest punkt pierwszy (restauracja) zgodnie z rozkładem normalnym w taki sposób, aby średnia odległość między tymi punktami była równa zadanej (np. 500 m lub 1000 m). Ma to zapobiec sytuacji, w której punkt pierwszy znajduje się w odległościach rzędu kilku kilkunastu kilometrów od punktu drugiego. Ostatnim krokiem jest dobranie węzła startowego, który jest położony najbliżej punktu pierwszego oraz węzła końcowego najbliższego punktowi drugiemu.

- Lot typu *krążenie*. Ten typ trasy ma za zadanie symulację lotu rekreacyjnych SPPS, które poruszają się w sposób chaotyczny w danym obszarze, rozpoczynając i kończąc lot w tym samym punkcie. Punkty są dobierane w sposób losowy z uwzględnieniem zasięgu lotu SPPS. W związku z tym, że w danych wejściowych znajdują się jedynie konkretne punkty, które SPPS powinien osiągnąć, konieczne jest wyznaczenie optymalnej trasy pomiędzy nimi, omijającej strefy zabronione i uwzględniającej obecność ograniczonych.
- Strefy *zabronione*. Jeśli odcinek między punktami trasy SPPS przebiega przez strefę zabronioną, to program wyznacza pośrednie punkty trasy w taki sposób, aby tę strefę ominąć. W tym celu wykorzystywany jest algorytm  $A^*$  [9]. Aby wyznaczyć optymalną trasę, program tworzy graf, którego wierzchołkami są punkty trasy SPPS oraz stref zabronionych. Krawędziami są połączenia między tymi punktami. Wagi krawędzi są obliczane na podstawie odległości między punktami. Następnie algorytm  $A^*$  wyznacza optymalną trasę, która jest zapisywana w postaci listy punktów.
- Strefy *ograniczone*. Strefa ograniczona, w przeciwieństwie do zabronionej, nie jest całkowicie niedostępna dla SPPS, dany statek może się w niej poruszać, jeśli któryś z punktów trasy znajduje się w tej strefie. Punkty pośrednie są dobierane w taki sposób, aby BSP spędził w strefie ograniczonej jak najmniej czasu. Jeśli jeden z punktów trasy znajduje się w strefie tego typu, to program wyznacza pośredni punkt trasy jako miejsce na krawędzi strefy najbliższe pierwotnemu punktowi. Jeśli w strefie znajdują się dwa kolejne punkty, to program sprawdza, czy mniejsza jest odległość między tymi dwoma punktami, czy suma odległości między tymi punktami a odpowiadającymi im punktami na krawędziach strefy. W przypadku gdy mniejsza jest suma, program nie wyznacza punktu pośredniego – SPPS polecą bezpośrednio z jednego punktu do drugiego. W przeciwnym razie wyznacza on dla obu punktów punkty pośrednie w sposób opisany powyżej, wymuszający opuszczenie strefy po osiągnięciu pierwszego punktu i ponowny wlot w strefę w innym miejscu w celu osiągnięcia punktu drugiego.

### 3. Modelowanie zderzeń oraz awarii

Kolejną zaimplementowaną funkcjonalnością jest wykrywanie kolizji między SPPS oraz naruszeń stref bezpieczeństwa. Implementacja stref bezpieczeństwa ma pomóc w analizie przypadków, w których może być pożądane utrzymanie określonej separacji między SPPS. W przypadku kolizji SPPS, które w omawianym zagadnieniu są modelowane jako sfery, program sprawdza, czy odległość między ich środkami jest mniejsza niż suma ich promieni (będących połową rozmiaru SPPS, zapisanego w postaci parametru *size*). Analogicznie sprawdzane jest naruszenie strefy bezpieczeństwa. Z tym że w tym przypadku odległość między środkami SPPS jest porównywana z sumą promieni stref bezpieczeństwa (będących połową rozmiaru strefy, zapisanego w postaci parametru *safetyZone*). W celu symulacji awarii SPPS, program wykorzystuje współczynnik awaryjności (zapisany w postaci parametru *failureRate*). W każdym kroku czasowym program losuje liczbę z przedziału  $[0, 1]$  i porównuje ją z wartością współczynnika awaryjności. Jeśli wylosowana liczba jest mniejsza od współczynnika awaryjności, program uznaje, że SPPS uległ awarii. Następnym krokiem jest określenie typu awarii. Program przewiduje 3 typy awarii:

- spadek swobodny,
- spadek poziomu autonomii,
- przejście do krążenia.

Użytkownik przed rozpoczęciem symulacji ma możliwość określenia prawdopodobieństwa wystąpienia każdego z typów awarii. Należy jednak pamiętać, że SPPS z poziomem autonomii 0 (brak autonomii) nie może ulec awarii polegającej na spadku poziomu autonomii lub przejściu do krążenia. W związku z tym jedyną możliwą awarią dla takiego SPPS to spadek swobodny.

#### 4. Sposób prezentowania danych wyjściowych

Po wykonaniu danej symulacji program umożliwia wizualizację danych w różnorodny sposób.

- *Animacja.* Pierwszym typem pliku wyjściowego jest animacja, która wizualnie przedstawia ruch lotniczy nad symulowanym regionem. Wygenerowana mapa przedstawia SPPS, które znajdowały się w powietrzu w danym momencie. Różne kolory pozwalają rozróżnić SPPS o różnych poziomach autonomii. Strefy zakazu i ograniczonych lotów zaznaczono odpowiednio czerwonymi i żółtymi wielokątami. Ponadto animacja pokazuje aktualny lokalny czas symulacji oraz liczbę powietrznych SPPS.
- *Mapy cieplne.* Innym rodzajem plików wyjściowych są mapy cieplne. Prezentują natężenie ruchu w danym regionie. Przed rozpoczęciem symulacji cały region jest dzielony na kosze. Podczas symulacji sumowana jest liczba SPPS obecnych w pojemnikach w poszczególnych krokach czasowych. Pozwala to szybko ocenić, gdzie występuje największe natężenie ruchu. Ponadto mapy cieplne prezentują liczbę wygenerowanych kolizji, a także liczbę manewrów uniknięcia kolizji.
- *Liczba SPPS w locie.* Aby pokazać dzienny rozkład ruchu, program generuje wykres liczby powietrznych SPPS w funkcji czasu. Wykres pokazuje, jak zmienia się liczba powietrznych SPPS-ów w ciągu doby, z uwzględnieniem podziału na poziomy autonomii.
- *Histogram kolizji.* Kolejnym typem wykresu jest histogram kolizji. Wykres przedstawia liczbę zderzeń w funkcji czasu.
- *Raport z symulacji.* Ostatnim typem pliku wyjściowego jest raport symulacji, który jest jedynym wynikiem przechowywanym w postaci pliku tekstowego. Przechowuje najważniejsze metryki dotyczące przeprowadzonej symulacji. Plik zawiera informacje takie jak: czas rozpoczęcia symulacji, lokalny czas rozpoczęcia symulacji, czas trwania symulacji, łączną liczbę SPPS w symulacji, tabelę zawierającą liczbę SPPS obecnych w symulacji w podziale na poziom autonomii, całkowita liczba kolidujących SPPS, całkowita liczba manewrów uniknięcia kolizji.

#### 5. Symulacje testowe dla aglomeracji warszawskiej

W studium przypadku wzięto pod uwagę cztery rodziny VTOL, tj. drony rekreacyjne, taksówki powietrzne, dostawę paczek i dostawę żywności. Rodzina dronów rekreacyjnych składa się ze 100 VTOL, z których wszystkie mają najniższy poziom autonomii (0). Ich typ trasy to „wędrówka”, a pochodzenie jest rozmieszczone według gęstości zaludnienia Warszawy. Przyjęto, że rodzina taksówek składa się z 20 000 VTOL, wszystkie o najwyższym poziomie autonomii (4). Latają na trasie „od punktu do punktu”, z punktami wylotu i miejsca docelowego rozmieszczonymi według gęstości zaludnienia. Godziny startów rozłożone są zgodnie z dobowym rozkładem ruchu drogowego [10]. Rodzina dostaw paczek składa się z 45 365 VTOL o różnych poziomach autonomii (od 1 do 3). Latają na trasie „od węzła do punktu” ze średnią liczbą przystanków

wynoszącą 3,41 (zgodnie z obliczeniami zawartymi w [11] rozmieszczoną według gęstości zaludnienia. Węzły wyjazdowe skojarzono z głównymi węzłami doręczania przesyłek na terenie Warszawy. Rozkład wyjazdów według węzła dostaw został ustalony na podstawie udziału w rynku konkretnej firmy dostawczej [11, 12]. Założono że godziny odjazdu przesyłek są równomiernie rozłożone w godzinach od 07:00 do 22:00. Rodzina dostaw żywności składa się z 7706 VTOL o różnych poziomach autonomii (od 1 do 3). Latają na trasie „od węzła do punktu do punktu do węzła” z dwoma przystankami. Drugie przystanki (związane z punktem dostawy) zostały rozłożone według gęstości zaludnienia, natomiast pierwsze (związane z punktami odbioru) zostały wybrane losowo w pobliżu punktu dostawy. Węzły odlotowe kojarzono z głównymi centrami handlowymi w Warszawie (jako odpowiedni teren pod lokalizację dużych obiektów utrzymania ruchu BSP). Do odlotu wybierany jest najbliższy węzeł komunikacyjny. Dzienny rozkład dostaw żywności zaczerpnięto z [13]. Wysokość przelotowa jest wybierana losowo dla każdego BSP, z wyjątkiem dronów rekreacyjnych, dla których wysokość zmienia się w trakcie lotu. Wszystkie trzy symulacje obejmują okres 24 godzin, a krok czasu symulacji wynosił 1 sekundę.

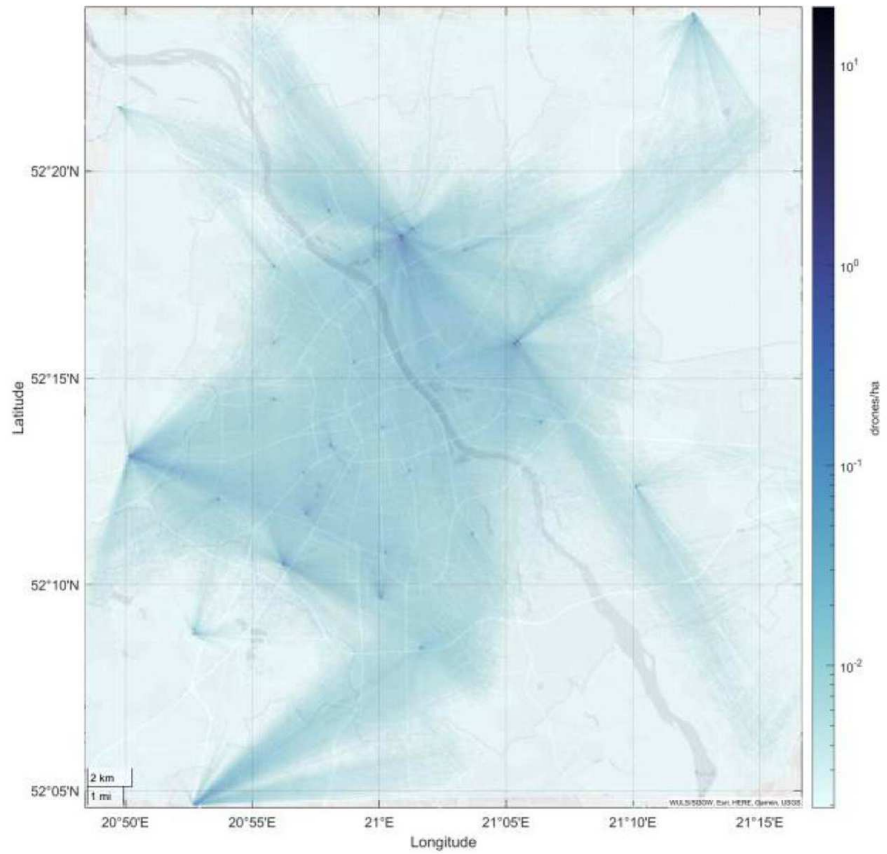
## 6. Wyniki

Na rysunkach 1 do 3 przedstawiono mapy cieplne pokładowych VBSP dla trzech symulacji, tj. odpowiednio przypadki braku ograniczeń przestrzeni powietrznej, strefy zakazu lotów, strefy zakazu lotów i strefy ograniczonego lotu. Mapy cieplne wyrażane są w dronach na hektar, co należy rozumieć jako liczbę VTOL widocznych na obszarze jednego hektara w ciągu jednego dnia w okresie jednego dnia (1 dron/ha oznacza, że na obszarze jednego hektara występował jeden dron widoczny nieprzerwanie przez cały dzień). Wyraźnie widoczne są węzły BSP oraz naturalne korytarze wzmożonego ruchu lotniczego powstałe po wprowadzeniu ograniczeń przestrzeni powietrznej. Ciekawą obserwacją realizowanych symulacji jest fakt, że wprowadzenie stref zakazanych powoduje automatyczne tworzenie się korytarzy, tj. dronostrad, którymi statki powietrzne zmuszone są do poruszania. Jest to jeden z ważniejszych wniosków podczas korzystania z narzędzia symulacyjnego. Powyższe symulacje poddają w wątpliwość, czy warto jest korzystać z całej przestrzeni powietrznej nad danym obszarem, co zdecydowanie ułatwia tworzenie nowych misji, trajektorii przelotu, optymalizuje czas lotu. Przeniesienie usług transportu i dostaw z ulic do przestrzeni lotniczej daje dużą swobodę sterowania ruchem. Z drugiej jednak strony nasuwa się zasadnicze pytanie, czy jako społeczność chcemy mieć w przestrzeni powietrznej rój dronów poruszający się w sposób losowy, przysłaniający istotnie przejrzystość nieba. Jednocześnie występuje kluczowy element bezpieczeństwa, który sugerowałby, że mniejsze ryzyko spowodowałby spadający dron na ulicę niż na osiedle mieszkalne. Jednak obecne miasta tak szybko rozwijające się nie tworzą optymalnych połączeń na ziemi z uwagi na istotne ograniczenia, które nie występują w przestrzeni powietrznej. Celem stworzenia symulatora jest właśnie między innymi testowanie różnych koncepcji prowadzenia lotów i ich analizy.

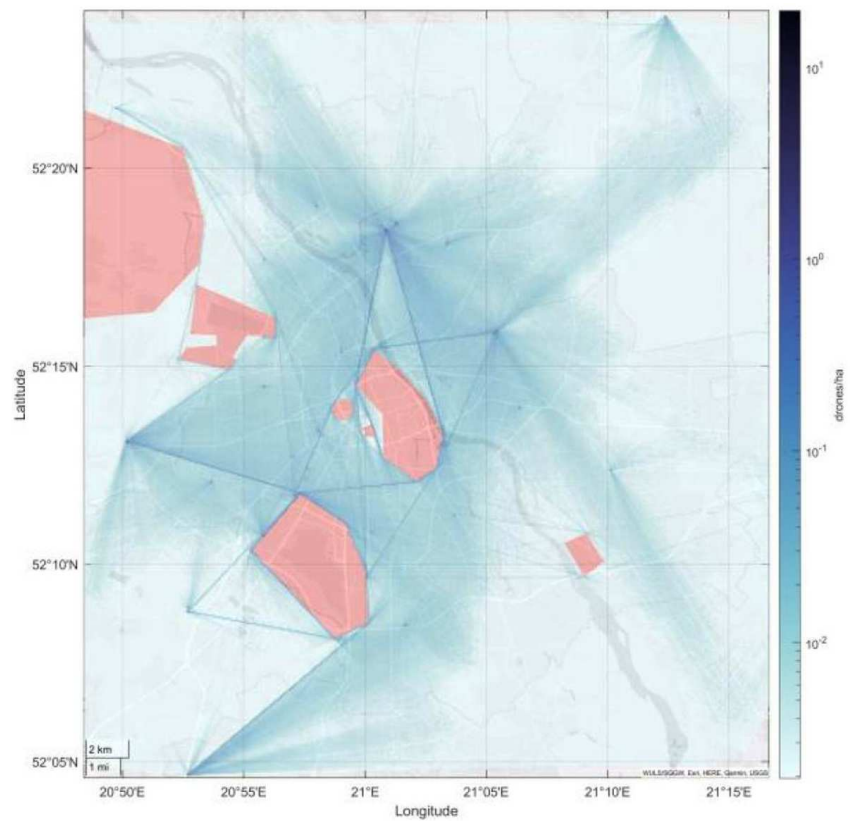
System umożliwia również analizę zderzeń oraz w przypadku realizowania lotów poprzez systemy wysoce zaawansowane i dzięki systemom S&A, wykorzystywanym przez BSP, umożliwia także zliczanie unikania kolizji. W tabeli 1 podsumowano wyniki pod względem liczby kolizji i manewrów unikowych. Wbrew intuicji wydaje się, że liczba zdarzeń nie wzrasta wraz z ograniczeniami przestrzeni powietrznej, ale efekt ten jest po prostu przyćmiony liczbą zdarzeń w pobliżu węzłów komunikacyjnych.

## 7. Podsumowanie

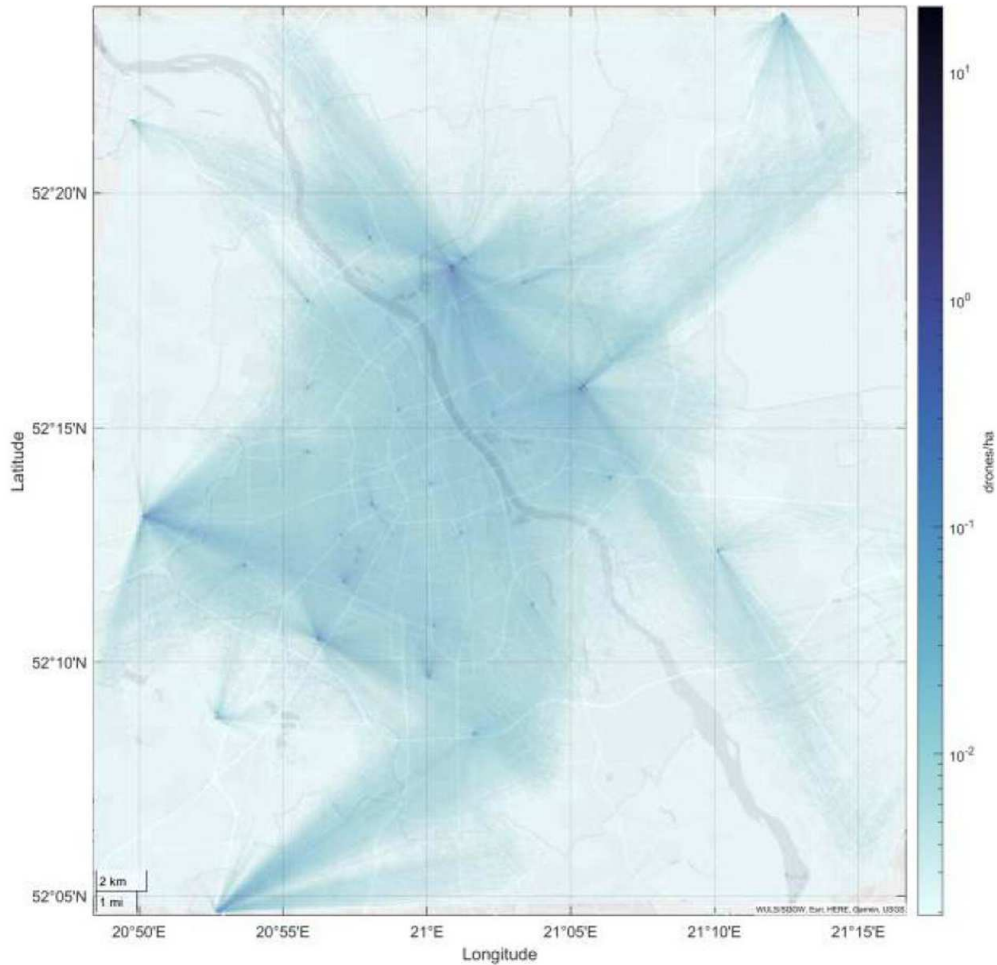
W poniższej pracy zaprezentowano narzędzie przeznaczone do symulacji miejskiej mobilności powietrznej. Pozwala ono na implementację różnych rodzin SPSS i różnych przepisów ruchu lot-



Rys. 1. Mapa ciepła ruchu BSP dla przypadku bez stref zakazanych



Rys. 2. Mapa ciepła ruchu BSP dla przypadku ze strefami zakazanymi



Rys. 3. 3 Mapa cieplna ruchu BSP dla przypadku ze strefami zakazanymi i ograniczonymi

**Tabela 1.** Liczba kolizji dla danego przypadku

Przypadek	Liczba kolizji	Liczba uniknięć kolizji
Brak no fly zones	897	738 825
No-fly zones aktywne	865	716.675
Dwa typy stref aktywne	832	748.061

niczego. Jego modułowość ułatwia dodawanie nowych parametrów lub ograniczeń. Możliwe jest rozszerzenie i głębsze rozwinięcie dynamiki dronów, ich bezwładności i cech wewnętrznych mogących mieć wpływ na ich interakcje, a także rozszerzenie zarządzania ruchem lotniczym o optymalizację wyznaczania wysokości przelotowej. Przedstawione cechy systemu stanowią kompletne narzędzie symulacyjne, które można wykorzystać. Między innymi krajowym władzom lotnictwa cywilnego i użytkownikom U-Space pozwala na zdefiniowanie i oszacowanie przepustowości danej przestrzeni powietrznej. Po drugie, narzędzie to może zostać wykorzystane do zdefiniowania wymagań dotyczących SPPS, które muszą zostać spełnione, aby zostały dopuszczone do ruchu. Wreszcie można przetestować i porównać różne zasady i metody dotyczące ATM, aby zapewnić najbezpieczniejsze rozwiązanie.

## Bibliografia

1. DAVID P., THIPPHAVONG I INNI, Urban air mobility airspace integration concepts and considerations, *2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, AIAA AVIATION Forum*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, June 24, 2018, DOI: 10.2514/6.2018-3676, <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2018-3676> (visited on 03/15/2024)
2. ELLIS K., KOELLING J., DAVIES M., KROIS P., *In-time System-wide Safety Assurance (ISSA) Concept of Operations and Design Considerations for Urban Air Mobility (UAM)*, June 2020
3. GUTIÉRREZ CASTRO D., VENTAS GARCÍA E., Safety challenges for integrating U-space in urban environments. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 1258-1267, June 2021, DOI: 10.1109/ICUAS51884.2021.947 6883, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9476883> (visited on 03/15/2024), ISSN: 2575-7296
4. MEINCKE P., DUCA G., CIABURRI M., RUSSO R., ENEI R., PROIETTI S., DZIUGIEL B., MACZKA M., STAŃCZYK A., *Concept of Operations for ATM Service to Passengers in Intermodal Transport System*, SESAR, June 8, 2022
5. European Aviation Safety Agency, *Introduction of a Regulatory Framework for the Operation of Unmanned Aircraft*, December 18, 2015
6. GIS Support, Dane statystyczne GUS, 2022, <https://gis-support.pl/baza-wiedzy-2/dane-dopobrania/dane-statystyczne-gus/> (visited on 11/21/2023)
7. Polish Air Navigation Services Agency, AIP VFR ENR 2.1.1 Prohibited Areas, 2019, [https://www.ais.pansa.pl/vfr/pliki/EP\\_ENR\\_2\\_1\\_1\\_en.pdf](https://www.ais.pansa.pl/vfr/pliki/EP_ENR_2_1_1_en.pdf) (visited on 11/21/2023)
8. Polish Air Navigation Services Agency. PansaUTM, 2023, <https://utm.pansa.pl/> (visited on 11/21/2023)
9. HART P.E., NILSSON N.J., RAPHAEL B., A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths, *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4, 2, 100-107, 1968, DOI: 10.1109/TSSC.1968.300136
10. Zarząd Dróg Miejskich w Warszawie, *Wyniki pomiarów systemu automatycznych pomiarów ruchu APR ZDM – 2022 rok*, 2023, <https://zd.mwarszawa.maps.arcgis.com/apps/dashboards/fb6da3d215334a489709f7dc02726311> (visited on 12/08/2023)
11. Annual Report 2022, InPost S.A., March 31, 2023, <https://inpost.eu/sites/default/files/2023-03/InPost%20IAR%202022.pdf> (visited on 12/06/2023)
12. Polish CEP Report 2022, Last Mile Experts, September 2022, [https://lastmileexperts.com/wp-content/uploads/2022/10/Polish-CEP-2022\\_Teaser.pdf](https://lastmileexperts.com/wp-content/uploads/2022/10/Polish-CEP-2022_Teaser.pdf) (visited on 12/06/2023)
13. Raport Stava o rynku dowozów jedzenia w Polsce 2023, Stava 2023, <https://stava-reports.s3.eu-central1.amazonaws.com/Raport+Stava+o+rynku+dowozo%CC%81w+jedzenia+2023.pdf> (visited on 12/06/2023)

## UAV simulator for Urban Air Mobility planning

The concept of Urban Air Mobility (UAM) assumes that a significant part of road traffic will be moved to the airspace. The appearance of thousands of vertical take-off and landing aircraft over urban agglomerations must be preceded by a transitional period during which solutions regarding the air traffic management and safety will be developed. In order to support this process, a tool for aircraft traffic analysis in urban agglomerations, called UAMTAT, has been developed. The first part of the thesis contains an introduction to the concept of Urban Air Mobility, a review of the history of urban air transport, the latest achievements in this field and proposed solutions regarding the air space management. In the paper, a case study based on Warsaw agglomeration data to prove the concept of the system is presented.