



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

**DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH**

DYSCYPLINA INŻYNIERIA LĄDOWA, GEODEZJA I TRANSPORT

## **ROZPRAWA DOKTORSKA**

*Porównanie metod 2D i 3D wieloczasowego  
wyznaczania współczynnika widoczności nieba  
w kanionie ulicznym*

Autor: mgr inż. Aleksandra Jasińska

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Krystian Pyka

Promotor pomocniczy: dr inż. Elżbieta Pastucha

Praca wykonana: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica  
w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

Kraków, 2025



*Serdeczne podziękowania kieruję w stronę moich niezastąpionych promotorów:*

***profesora Krystiana Pyki oraz doktor Elżbiety Pastuchy*** za nieocenione wsparcie merytoryczne oraz okazaną pomoc w trakcie realizacji rozprawy. Dziękuję Wam, za tą wspólną przygodę, którą zaczęliśmy na Wydmie Łąckiej.

*Szczególnie pragnę podziękować mojej rodzinie: **Rodzicom, Babciom i Chrzestnemu** za nieustające wsparcie przez te wszystkie lata i wiarę we mnie, zwłaszcza w najtrudniejszych momentach. Bez Was by się to nie udało.*

*Dziękuję moim Przyjaciółom, w szczególności Weronice i Kewinowi, za cierpliwość i bycie ze mną zawsze wtedy, gdy tego potrzebowałam. Guys, you're the best!*

*Dziękuję Ani, Dagmarze, Kasi, Kornelii i Maćkowi, za te kilka lat wspólnego doktoryzowania się. Jesteście dla mnie dowodem na to, że najwięcej można osiągnąć wspierając się nawzajem.*

## Streszczenie

Zmiany klimatyczne wywołane globalnym ociepleniem mają coraz większy wpływ na środowisko. Badanie zjawiska miejskich wysp ciepła jest niezbędne do określenia działań mających na celu poprawę miejskich warunków klimatycznych. Jedną ze składowych, którą należy wyznaczyć do obliczenia miejskiej wyspy ciepła, jest współczynnik widoczności nieba (Sky View Factor – SVF). Określa on stosunek widocznego nieba z określonej lokalizacji do całej hemisfery i najczęściej wyrażany jest w zakresie [0, 1].

Celem badań była ocena i porównanie dwóch metod wyznaczania SVF w kanionach ulicznych. Kaniony stanowią szczególną formę zabudowy (wąska ulica otoczona budynkami), która jest charakterystyczna dla wielu starych miast. Badania obejmowały uwzględnienie wpływu drzew i sezonowych zmian w ich wyglądzie na wartość współczynnika. Pierwsza metoda – fotograficzna 2D – bazowała na wyznaczeniu współczynnika na obrazach typu fish-eye z wykorzystaniem algorytmów przetwarzania obrazów. Obrazy fish-eye pozyskano zarówno jako wysokorozdzielcze zdjęcia, jak i niskorozdzielcze klatki z nagrań wideo zrealizowanych kamerą sferyczną. Przetestowano metodę w kanionach o różnej geometrii, zarówno z jak i bez roślinności. Druga z metod – hybrydowa 3D – wykorzystwała modele LOD2 budynków oraz chmury punktów do stworzenia wirtualnego modelu kanionu. Chmury punktów reprezentujące roślinność oraz infrastrukturę techniczną pozyskano z trzech źródeł: z lotniczego skanowania laserowego (ALS), z mobilnego skanowania skanerem SLAM (MLS), a także w wyniku gęstego matchingu obrazów typu fish-eye. Wyznaczenie współczynnika widoczności zrealizowano poprzez wirtualne fotografowanie modelu kamerą typu fish-eye i obliczanie powierzchni zajętej przez niebo na wirtualnym obrazie.

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że zmiany w wyglądzie roślinności mają kluczowy wpływ na SVF. Obie metody wiarygodnie ukazały tendencję zmian współczynnika. Metoda fotograficzna (2D) pozwoliła uchwycić lokalne i sezonowe zmiany. W kanionach bez drzew, zmiany widoczności głównie związane były z krzyżowaniem się ciągów komunikacyjnych. Natomiast w kanionie z drzewami widoczność nieba w okresie bez liści była zdecydowanie wyższa niż w sezonie z liśćmi. Metoda hybrydowa (3D) z chmurami ALS i z gęstego matchingu częściowo nie doszacowała wartości współczynnika, głównie ze względu na nieciągłą formę reprezentacji roślinności w postaci zbiorów punktów. Zastosowanie operacji morfologicznych dla obrazów wirtualnych pozwoliło domknąć otwarte przestrzenie w obrębie koron drzew i uzyskać wartości zbliżone do tych z metody fotograficznej. W przypadku analiz z chmurą MLS stwierdzono zbyt duże przesłonięcia nieba wywołane występowaniem pozornych punktów chmury w obrębie cienkich gałęzi

Podsumowując, można stwierdzić, że zarówno metoda fotograficzna (2D) jak i hybrydowa (3D) mogą być stosowane w kanionach ulicznych. Należy jednak podkreślić, że metody te nie są zamienne, choć każda z nich reprezentatywnie obrazuje trendy zmienności SVF. Metoda fotograficzna pozwala uchwycić wszelkie zmiany w wyglądzie roślinności, jednak opracowanie jest bardzo czasochłonne i żmudne. Jako główną zaletę metody hybrydowej 3D należy uznać możliwość wykonywania analiz na dużą skalę (np. całe miasto) w oparciu o dane ogólnodostępne z geoportalu. Pomimo pewnych uproszczeń, sprawdzi się na większych obszarach, w których dopuszczalne jest uogólnienie reprezentacji miasta.

## Abstract

Climate change driven by global warming has an increasing impact on the environment. Studying the phenomenon of urban heat islands is essential for developing strategies aimed at improving urban climatic conditions. One of the key parameters used in urban heat island analyses is the Sky View Factor (SVF), which defines the ratio of visible sky from a given location to the entire hemisphere and is typically expressed in the range [0, 1].

The aim of this study was to evaluate and compare two methods of determining SVF in urban street canyons. Canyons, understood as narrow streets enclosed by buildings, are a characteristic feature of many historic cities. The research considered the influence of trees and their seasonal variability on SVF values. The first approach – a 2D photographic method – was based on fish-eye images processed with image analysis algorithms. Fish-eye views were obtained both as high-resolution photographs and low-resolution frames extracted from spherical camera video recordings. The method was tested in canyons of different geometries, with and without vegetation. The second approach – a 3D hybrid method – employed LOD2 building models and point clouds to construct a virtual canyon model. Point clouds representing vegetation and technical infrastructure were obtained from three sources: airborne laser scanning (ALS), mobile laser scanning (MLS/SLAM), and dense image matching of fish-eye photographs. SVF values were calculated by virtually photographing the model with a fish-eye camera and estimating the proportion of the sky on the generated hemispherical images.

The analyses showed that seasonal changes in vegetation play a crucial role in shaping SVF values. Both methods reliably reflected general trends. The photographic method (2D) captured local and seasonal variability in detail. In tree-free canyons, variations in SVF were mainly related to street intersections, while in tree-lined canyons the sky visibility was significantly higher during the leaf-off season than in full foliage. The hybrid method (3D), when applied to ALS and dense matching point clouds, tended to underestimate SVF due to the discontinuous representation of vegetation. Applying morphological operations to virtual images helped to close gaps in tree crowns and yielded values closer to those from the photographic method. Analyses based on MLS point clouds revealed excessive sky obstruction caused by spurious points within thin branches.

In conclusion, both the photographic (2D) and hybrid (3D) methods can be applied to urban canyons. However, they should be considered complementary rather than interchangeable, as each effectively represents SVF variability trends. The photographic method accurately reflects vegetation-related changes but requires time-consuming data acquisition and processing. The main advantage of the hybrid method is the ability to perform large-scale analyses (e.g., at the city level) using publicly available geospatial data. Despite certain simplifications, it is suitable for broader spatial applications where a generalized representation of urban form is acceptable.

## Spis treści

Lista stosowanych skrótów .....	8
1. Wstęp .....	9
2. Współczynnik widoczności nieba - Sky View Factor (SVF) .....	11
3. Modelowanie przestrzeni miejskiej .....	17
3.1. Fizjonomia miasta .....	17
3.2. Źródła danych do modelowania .....	18
3.3. Modele budynków .....	21
3.4. Modele drzew .....	23
4. Rekonstrukcja trójwymiarowa ze zdjęć niometrycznych .....	26
4.1. Modele geometrii zdjęć fotograficznych i kalibracja kamer .....	26
4.2. Orientacja zdjęć metodą Structure-from-Motion (SfM) .....	30
4.3. Generowanie chmury punktów metodą Multi-View Stereo (MVS) .....	32
4.4. Reprezentacja ciągła metodą Neural Radiance Fields (NeRF) .....	34
5. Metodyka badań .....	36
5.1. Koncepcja badań i podstawowe założenia .....	36
5.2. Kaniony uliczne - pola badawcze .....	39
5.3. Testowane sensory fotograficzne i ich kalibracja .....	42
5.4. Rejestracja kanionu ulicznego .....	47
5.4.1. Osnowa pomiarowa .....	47
5.4.2. Wykorzystanie aparatu w smartfonie .....	49
5.4.3. Wykorzystanie kamery sferycznej .....	50
5.4.4. Orientacja zdjęć i opracowanie chmury punktów .....	50
5.4.5. Rejestracja kanionu skanerem SLAM .....	51
5.5. Wyznaczanie SVF .....	52
5.5.1. SVF na przykładzie kanionów bez drzew .....	52
5.5.2. SVF na przykładzie kanionu zadrzewionego .....	53
6. Analiza uzyskanych wyników .....	56
6.1. SVF z metody fotograficznej (2D) na przykładzie kanionów bez drzew .....	56
6.1.1. Via S. Martino .....	56
6.1.2. Via di Salicotto .....	58
6.1.3. Casato di Sotto .....	60
6.2. SVF z metody fotograficznej (2D) w kanionie zadrzewionym .....	62
6.3. SVF z metody hybrydowej (3D) w kanionie zadrzewionym .....	68
6.3.1. Chmura punktów z ALS .....	68
6.3.2. Chmura punktów z rejestracji kamerą sferyczną .....	77

6.3.3.	Chmura punktów ze skanera SLAM.....	85
6.4.	Wpływ nachylenia zdjęcia na wartość SVF.....	91
6.5.	Porównanie wyników metody hybrydowej (3D) i fotograficznej (2D) wysokorozdzielczej.....	93
6.5.1.	Chmura punktów z ALS .....	93
6.5.2.	Chmura punktów z rejestracji kamerą sferyczną.....	95
6.5.3.	Chmura punktów ze skanera SLAM.....	101
7.	Wnioski.....	103
8.	Podsumowanie.....	107
9.	Spis literatury.....	109
9.	Spis ilustracji .....	116
10.	Spis tabel.....	119

## **Lista stosowanych skrótów**

2D – dwuwymiarowy  
3D – trójwymiarowy  
AI – Artificial Intelligence  
ALS – Airborne Laser Scanning  
BA – Bundle adjustment  
BVF – Building View Factor  
CHM – Canopy Height Model  
DLT – Direct Linear Transformation  
DSLR – Digital Single Lens Reflex Camera  
DSM – Digital Surface Model  
DTM – Digital Terrain Model  
EOW – elementy orientacji wewnętrznej  
EOZ – elementy orientacji zewnętrznej  
FOV – Field of View  
GML – Geography Markup Language  
GNSS – Global Navigation Satellite System  
IMU – Inertial Measurement Unit  
INS – Inertial Navigation System  
ISOK – Informatyczny System Osłony Kraju  
LiDAR – Light Detection and Ranging  
LOD – Level of Detail  
max – maksimum  
mean – średnia arytmetyczna  
min – minimum  
MP – Megapiksel  
MLS – Mobile Laser Scanning  
MVS – Multi-View Stereo  
NeRF – Neural Radiance Fields  
RANSAC – Random Sample Consensus  
RGB – model przestrzeni barw  
RO – Relative Orientation  
SfM – Structure-from-Motion  
SIFT – Scale-invariant feature transform  
SLAM – Simultaneous Localization and Mapping  
SMG – Semi-Global Matching  
std – standard deviation – odchylenie standardowe  
SVF – Sky View Factor  
TLS – Terrestrial Laser Scanning  
TVF – Tree View Factor  
VF – View Factors

## 1. Wstęp

Zjawisko globalnego ocieplenia powoduje wiele zmian środowiska, które są odczuwalne nie tylko w skali całej Ziemi, ale coraz częściej ich negatywne konsekwencje można zaobserwować na stosunkowo niedużych obszarach. Jednym z takich przykładów jest pogorszenie jakości klimatu miejskiego, zwłaszcza poprzez podnoszenie się temperatur w okresie letnim. Zmiany termiczne w miastach nie są jednorodne, w znacznym stopniu zależą od gęstości zabudowy, ilości zieleni a także od możliwości przewietrzania. Szczególnym przykładem zabudowy miejskiej są wąskie ulice z obu stron otoczone fasadami budynków, które nazywane są kanionami ulicznymi. Cechą charakterystyczną tej formy tkanki miejskiej, jest ograniczony dostęp do światła słonecznego, co przekłada się na mikroklimat unikalny względem innych struktur miejskich. Uwzględniając do tego orientację ulicy względem stron świata, jak również kierunki najczęstszych wiatrów, kanion uliczny staje się ciekawym i złożonym poligonem badań.

Wiele miast wdraża szereg działań mających na celu poprawę klimatu, jednak wymaga to uprzedniego rozpoznania negatywnych zjawisk i ich powiązania ze strukturą miasta. Do modelowania klimatu niezbędnym jest wykorzystanie wielu danych, zarówno tych mierzonych in situ jak i pozyskiwanych zdalnie. Istotnym parametrem wykorzystywanym w modelowaniu zmian termicznych jest współczynnik widoczności nieba (ang. Sky View Factor - SVF), stosowany m.in. przy wyznaczeniu miejskiej wyspy ciepła. Zmienność SVF w skali całego miasta wyznaczyć można wykonując analizy przestrzenne modeli wysokościowych terenu i jego pokrycia, jednak ich dokładność zależna jest od rozdzielczości przestrzennej dostępnych danych. W mikroskali, lokalnie, przeanalizować można zmiany w widoczności nieba poprzez analizę zdjęć wykonanych obiektywem o bardzo szerokim kącie widzenia, tzw. fish-eye (rybie oko), kierując obiektyw w zenit. Zasadniczą zaletą tego rozwiązania jest uwzględnienie wszystkich obiektów, które przesłaniają niebo, natomiast główną wadą to stosunkowo mała wydajność.

Analiza zmienności SVF w kanionach miejskich, zwłaszcza zadrzewionych, wymaga identyfikacji wszystkich możliwych obiektów wpływających na widoczność nieba, co determinuje wykonywanie zdjęć seryjnych i sukcesywną analizę widoczności nieba. Jednocześnie coraz większa dostępność modeli 3D miast otwiera drogę do wirtualnego wyznaczania SVF. W takim przypadku konieczne jest uwzględnianie wpływu roślinności na widoczność nieba. Z przeglądu literatury wynika, że odpowiednia reprezentacja 3D roślinności stanowi niszę badawczą. Z tego względu podjęto badania nad opracowaniem cyfrowej reprezentacji zadrzewionego kanionu ulicznego, która umożliwiłaby wyznaczanie SVF równocześnie z wysoką dokładnością i gęstością przestrzenną. Zajmując się podejściem wirtualnym nie zrezygnowano z adaptacji metody fotograficznej dla potrzeb gęstego wyznaczania SVF. Po pierwsze w ten sposób uzyskano materiał porównawczy, po drugie zdjęcia seryjne zostały wykorzystane jako jedno ze źródeł reprezentacji 3D roślinności.

Sformułowano tezę pracy :

**Zmienność widoczności nieba w zadrzewionych kanionach ulicznych może być wyznaczana i analizowana z wykorzystaniem powszechnie dostępnych sensorów fotograficznych oraz algorytmów stosowanych w fotogrametrii i przetwarzaniu obrazów, zarówno metodami 2D, jak i 3D.**

Cel główny pracy został zdefiniowany jako porównanie wieloczasowego wyznaczania widoczności nieba w kanionach ulicznych metodami:

- ❖ *o charakterze 2D* - metoda polegająca na wykonywaniu serii zdjęć i wyznaczeniu SVF na każdym z nich, przy wcześniejszej geolokalizacji zdjęć, zwana dalej **metodą fotograficzną (2D)**,
- ❖ *o charakterze 3D* - metoda polegająca na wirtualnym fotografowaniu sztucznego krajobrazu przestrzeni miejskiej, złożonego z ogólnodostępnego modelu 3D budynków uzupełnionego chmurą punktów reprezentującą przestrzeń między elewacjami, zwana dalej **metodą hybrydową (3D)**.

Na potrzeby weryfikacji postawionej tezy, a także realizacji celu głównego, zaplanowano następujące cele szczegółowe:

- ❖ zbadanie przydatności niskobudżetowych sensorów do rekonstrukcji przestrzeni miejskiej,
- ❖ opracowanie strategii wykonywania zdjęć sensorami niskobudżetowymi pozwalającej na orientację zdjęć metodą SfM i na uzyskanie chmury punktów, reprezentującej roślinność, na drodze gęstego matchingu,
- ❖ wyznaczanie SVF na obrazach fish-eye z wykorzystaniem algorytmów przetwarzania obrazów,
- ❖ opracowanie chmur punktów z rejestracji wieloczasowych,
- ❖ opracowanie cyfrowej reprezentacji kanionu ulicznego poprzez integrację modelu 3D zabudowy z chmurą punktów opisującą przestrzeń między elewacjami, zwaną dalej modelem hybrydowym,
- ❖ wyznaczanie SVF w oparciu o hybrydowy model kanionu.

W dalszej części pracy opisano metody wyznaczania SVF (Rozdział 2), rozdział 3 poświęcono zagadnieniu modelowania przestrzeni miejskiej, natomiast rozdział 4 skupia się na metodach rekonstrukcji trójwymiarowej ze zdjęć. Metodyka badań opisana została w rozdziale 5 a uzyskane wyniki omówione w rozdziale 6. Wnioski zawarto w rozdziale 7 a podsumowanie całej pracy w rozdziale 8.

## 2. Współczynnik widoczności nieba - Sky View Factor (SVF)

Sky View Factor to współczynnik zaproponowany przez Oke wyrażony jako stosunek widocznego nieba, które można zobaczyć z danej lokalizacji w przestrzeni miejskiej, do całej kopuły nieba o zadanym promieniu (Oke, 1988). Jego wartość zazwyczaj wyrażana jest w zakresie  $[0, 1]$ , gdzie zero oznacza całkowite przesłonięcie horyzontu (Al-Sudani et al., 2017). Jest on szeroko stosowany w badaniach związanych z miejskim klimatem (Middel et al., 2018), miejską wyspą ciepła (Ma et al., 2021; Dirksen et al., 2019), nasłonecznieniem (Du et al., 2020; Ivanova and Gueymard, 2019; Freitas et al., 2015) i analizami termicznymi (Liu et al., 2023; Li et al., 2020; Zhang et al., 2019).

W literaturze spotkać można wiele metod estymowania wartości SVF w kanionach ulicznych, jednak mogą one być podzielone na pięć głównych kategorii: metody geometryczne, fotografowania fish-eye, GNSS, symulacyjne oraz tzw. big data. (Miao et al., 2020). Pierwszymi stosowanymi metodami były tzw. **metody geometryczne** bazujące na określaniu kątów pomiędzy płaszczyzną odniesienia a wierzchołkami fasad. Definiują one ramy teoretyczne do obliczeń SVF w prostych przypadkach, ale można je wykorzystać do szacowania wartości współczynnika (Chen et al., 2012). Gdy wysokość budynków po obu stronach ulicy jest taka sama, kanion taki określany będzie jako regularny. W takim przypadku SVF obliczany jest z środka kanionu z zastosowaniem wzoru (Oke, 1981):

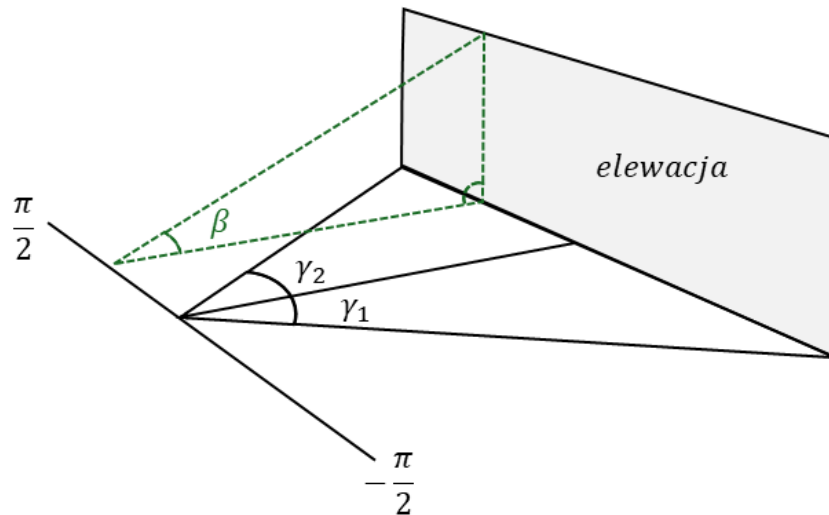
$$SVF = \cos \left( \arctan \left( \frac{H}{0.5 * W} \right) \right) \quad (1)$$

Johnson i Watson opracowali wzory do obliczeń tzw. Wall View Factor (WVF) zarówno dla pojedynczych jak i wielu otaczających budynków w kanionach nieregularnych o skończonej długości (Johnson and Watson, 1984). Na tej podstawie wyznaczali SVF jako różnicę jedności i obliczonego WVF (Rysunek 1).

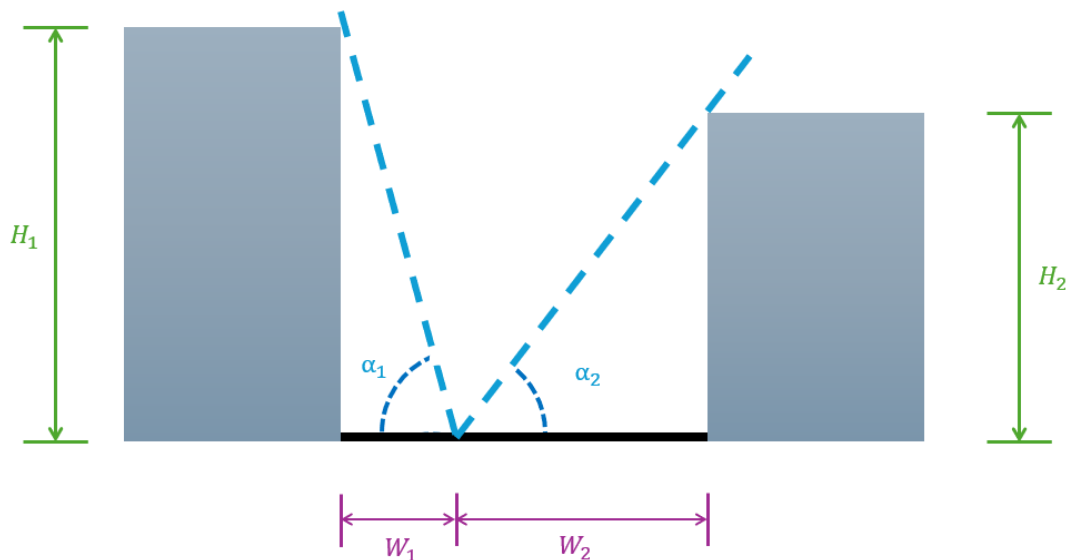
$$WVF = \frac{1}{2\pi} \{(\gamma_2 - \gamma_1) + \cos\beta * [\arctan(\cos\beta * \tan\gamma_1) - \arctan(\cos\beta * \tan\gamma_2)]\} \quad (2)$$

Bottyan i Unger zaproponowali ulepszoną wersję wzoru Oke, który umożliwił wyznaczenie SVF dla obu stron kanionu nieregularnego z dowolnego miejsca pomiędzy fasadami (Bottyan and Unger, 2003) (Rysunek 2).

$$SVF = 1 - (WVF_1 + WVF_2) = 1 - \left( \left( \frac{1 - \cos\alpha_1}{2} \right) + \left( \frac{1 - \cos\alpha_2}{2} \right) \right) \quad (3)$$



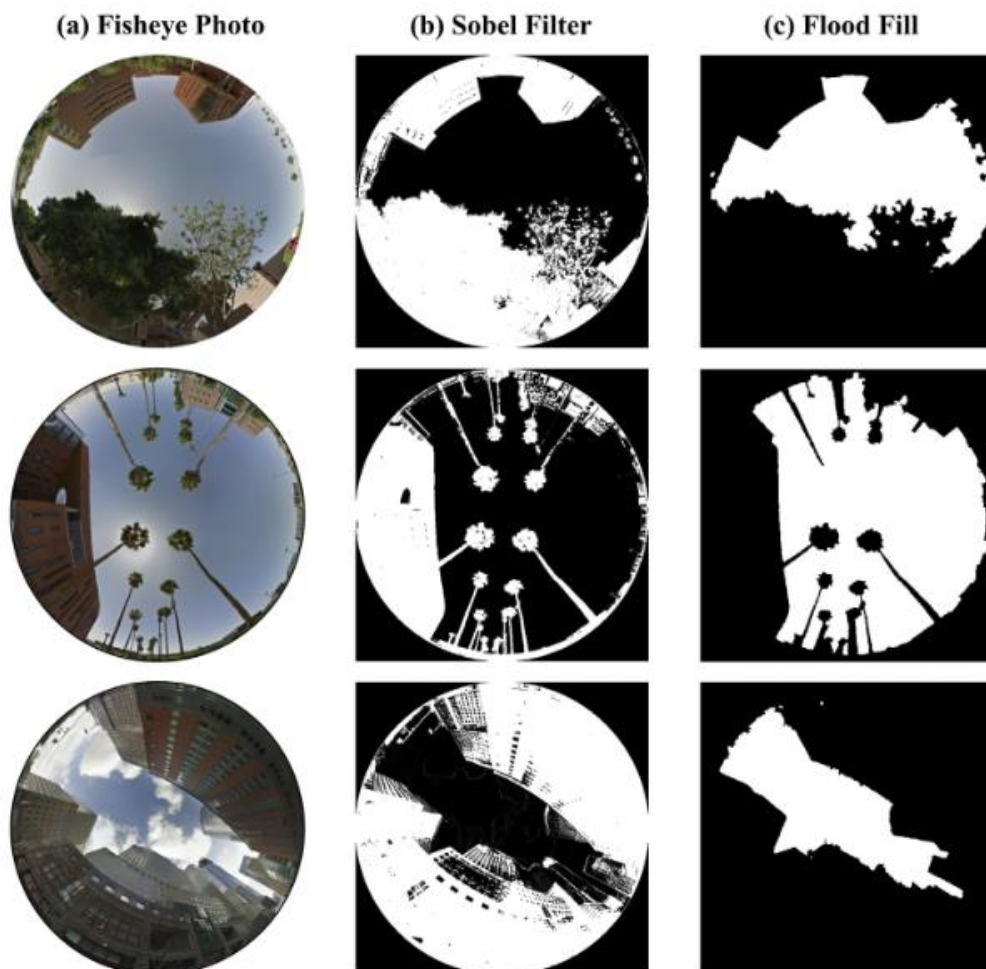
Rysunek 1. Schemat obliczeń metodą autorstwa Johnson i Watson, na podstawie (Johnson and Watson, 1984)



Rysunek 2. Schemat obliczeń metodą autorstwa Bottyan i Unger, na podstawie (Bottyan and Unger, 2003)

Najpopularniejszą grupą stosowanych metod są **rozwiązania oparte na wykonywaniu zdjęć za pomocą obiektywu typu fish-eye** skierowanym w zenit (Zeng et al., 2018). Proces obliczenia SVF z tego typu zdjęć zaproponował (Steyn, 1980; Steyn et al., 1986), jako stosunek liczby pikseli nieba do wszystkich pikseli w okręgu obrazu. Opracowanie takich zdjęć polega na wykorzystaniu algorytmów dedykowanych przetwarzaniu obrazów do wyznaczenia obszaru zajmowanego przez niebo. Realizacja tego może być wykonana w różny sposób. Jeden z nich polega na detekcji tzw. linii nieba (*ang. skyline*), wszystko, co znajduje się poniżej tej linii, traktowane jest jako przesłonięcie horyzontu. Detekcję najczęściej wykonuje się z wykorzystaniem filtrów uwydatniających krawędzie (Zeng et al., 2018). Kolejną popularną metodą jest wykonanie binaryzacji obrazu w taki sposób, aby piksele zdjęcia reprezentujące niebo miały wartość „1” - białe

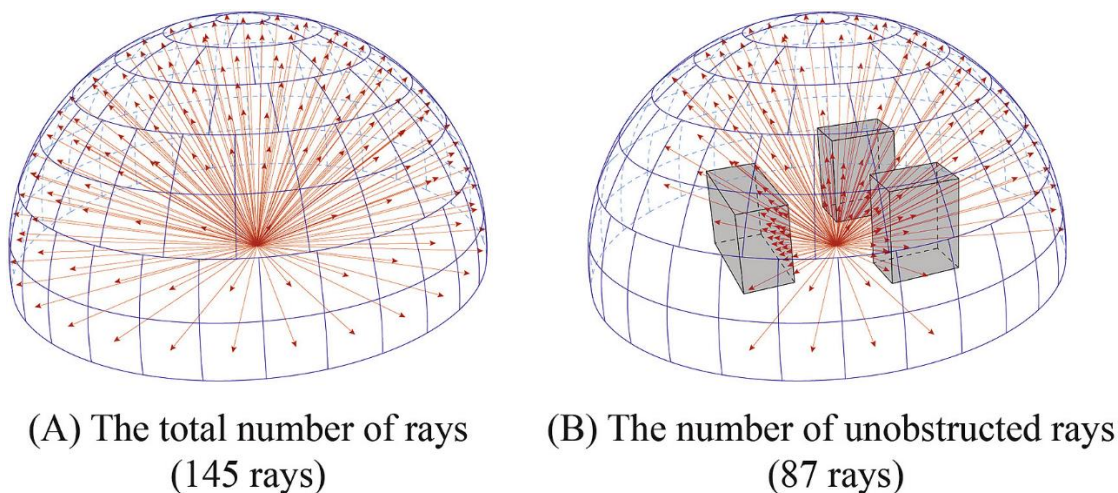
piksel, natomiast wszelkie przesłonięcia „0” - czarny piksel (lub odwrotnie) (Honjo et al., 2019). Wymaga to analizy jasności i kontrastu obrazu, a także doboru odpowiedniej wartości granicznej dla algorytmu binaryzacji. W tym celu przeprowadza się analizę jasności pikseli obrazu wejściowego (np. rozkład minimów i maksimów histogramu) i na tej podstawie dobiera wartość progu (Holmer et al., 2001). Alternatywą dla progowania jest selekcja lub klasyfikacja pikseli nieba. Jako największą zaletę tych danych należy przyjąć, że uwzględniają one przesłonięcia horyzontu wywołane np. roślinnością. Metody korzystające z obrazów fish-eye mają jednak duże ograniczenie związane z warunkami atmosferycznymi, w jakich wykonywane są zdjęcia. Uchwycenie na obrazie czystego, niebieskiego nieba wraz z tarczą słoneczną, przekłada się na występowanie zmiany w jasnościach pikseli w obrębie nieba, co znacząco utrudnia detekcję tego obszaru. Podobna sytuacja ma miejsce, gdy na fotografii występują zarówno pojedyncze chmury, jak i niejednorodne całkowite zachmurzenie. Poza możliwością tworzenia autorskich skryptów w różnych językach w oparciu o biblioteki np. OpenCV, istnieją aplikacje obliczające SVF z obrazów fish-eye, np. SKYVIEW, FIP (Fisheye Image Processing), BMSky View, RayMan. Mają one jednak kilka ograniczeń, m.in. dotyczących zapisu koloru na ośmiu bitach czy rozmiaru obrazów wejściowych.



Rysunek 3. Przykład wyznaczenia SVF na obrazie fish-eye. a) obrazy z Google Street View, b) filtr Sobela wspierany algorytmem zalewania (flood-fill), c) klasyfikacja nieba (Middel et.all 2018)

Inną grupą są tzw. **metody symulacyjne** bazujące na wyznaczeniu SVF na podstawie numerycznych modeli pokrycia terenu (NMPT) lub wektorowych modeli trójwymiarowych miast (Liang et al., 2017; An et al., 2014). Zaletą tych rozwiązań, w odniesieniu do innych, jest możliwość wykonania analiz na dużych obszarach, w stosunkowo krótkim czasie (zależnym od parametrów obliczeniowych stacji roboczej). Dodatkową zaletą jest opcja jednoczesnego wykorzystania danych rastrowych i wektorowych (Muñoz et al., 2018; Lindberg and Grimmond, 2010; Gál et al., 2009). Pliki rastrowe mogą zawierać informację o całym pokryciu (NMPT), lub tylko o jednej składowej np. grunt (numeryczny model terenu - NMT).

Obliczanie współczynnika w metodach symulacyjnych często wykorzystuje algorytm ray-casting, jednak wynik w dużej mierze zależy od sposobu podziału hemisfery na strefy (Freitas et al., 2015). Autorem pierwszej propozycji podziału półsfery na segmenty był Tregenza (Tregenza, 1987). Jego założenie opiera się na podziale hemisfery na sto pięćdziesiąt jeden cyrkularnych stref, które z czasem zostały zastąpione dyskretnym podziałem na sto czterdzieści pięć czworobocznych obszarów. W tej metodzie SVF (nazywany SkyEF) wyznaczany jest jako stosunek liczby niezakłóconych promieni do ich całkowitej liczby (Rysunek 4) (Yi and Kim, 2017). W niektórych przypadkach obliczenia algorytmem ray-casting są odwrócone. Zamiast zliczać liczbę promieni trafiających w sferę nieba, zlicza się liczbę promieni, które zostały przesłonięte (Sönmez et al., 2019). Takie podejścia umożliwiają skrócenie czasu obliczeń komputera, jednak nie zapewniają dokładnych wyników we wszystkich sytuacjach ze względu na dużą powierzchnię segmentów oraz ograniczoną ich liczbę (Ivanova and Gueymard, 2019).



Rysunek 4. Przykład obliczenia SVF algorytmem ray-casting (Yi and Kim, 2017)

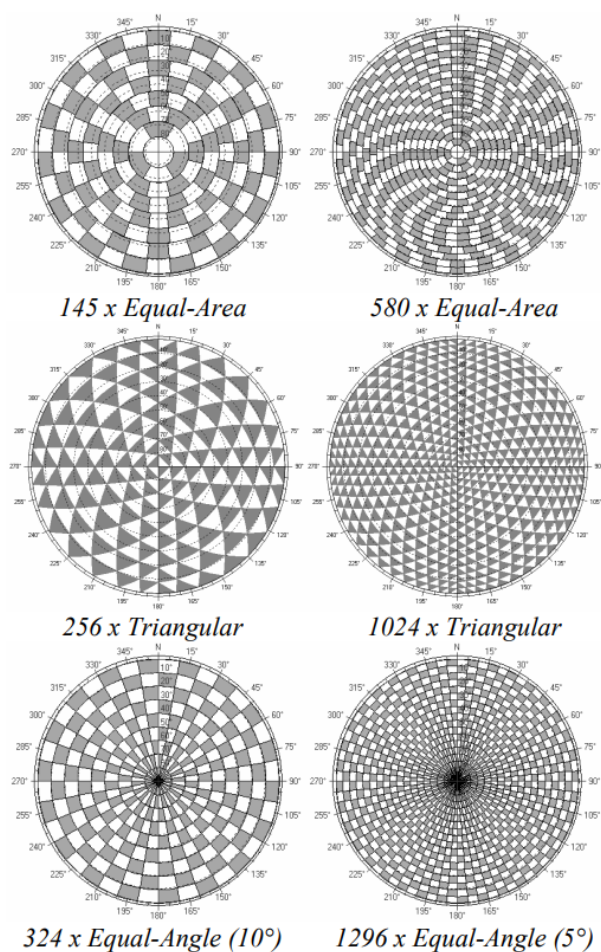
McNeil (McNeil, 2013) przedstawił inne sposoby podziału sfery bazujące na metodzie Tregenzy (Tregenza, 1987). Metoda Reinhart'a zakłada podział każdego segmentu z metody Tregenzy na  $N * N$  podsegmentów. Przyjmując  $N = 2$ , otrzymujemy

$$144 * (2 * 2) + 1 = 577 \quad (4)$$

Wysokość kąta każdego segmentu wynosi

$$\frac{\frac{\pi}{2}}{(7 * N + 0.5)} \quad (5)$$

podczas gdy ich obszar w każdym rzędzie poziomym jest zmienny (Ivanova and Gueymard, 2019). Niektóre metody podziału dążą do uzyskania w przybliżeniu równej powierzchni (kąta bryłowego) dla każdego segmentu, podczas gdy inne stosują prostsze podejście szerokości/długości sferycznej lub równego kąta. Poza podziałem na czworoboczne sekcje, występuje również możliwość podziału na trójkąty sferyczne. Zważywszy na fakt, że możliwe jest wagowanie każdego segmentu nieba według jego względnego obszaru w porównaniu do wszystkich innych, nie jest konieczne, aby każdy segment był równopowierzchniowy - stosowanie takiego rozwiązania wynika z praktycznych aspektów (Marsh, 2005).



Rysunek 5. Przykładowe podziały hemisfery (Marsh, 2005)

Ograniczenia algorytmu ray-casting należy upatrywać głównie w rozdzielczości przestrzennej danych służących do symulacji. Reprezentacja zabudowy jako uproszczonych modeli w standardach LOD (ang. *Level of Detail*), jest popularnym rozwiązaniem, należy jednak mieć na względzie fakt, że przestrzeń miejska to nie tylko budynki. Uwzględnienie także roślinności, której wiarygodna reprezentacja w postaci 3D na dużym obszarze jest rzadko spotykana, znacznie wydłuża czas obliczeń. Z gotowych narzędzi dostępne są np. 3DSky View, ArcView SVF extension, SOLWEIG, SkyHelios, SVFEngine.

Kolejną grupą są **tzw. metody „big data”** wykorzystujące uczenie maszynowe (Chiang et al., 2023), głównie do segmentacji semantycznej obrazów. Bazują one na zdjęciach Street View od Google lub Baidu, które sztucznie są przekształcane w panoramy lub obrazy fish-eye (Xia et al., 2021; Du et al., 2020; Middel et al., 2019; Zeng et al., 2018; Gong et al., 2018). Dużym ograniczeniem dla tych metod jest konieczność przygotowania odpowiedniego zbioru danych do trenowania sieci. Co więcej, wynik takich analiz w znacznej mierze zależy od jakości danych wejściowych. Należy także uwzględnić, że obrazy Street View są aktualizowane z różną częstotliwością, a na niektórych obszarach są one całkiem niedostępne (np. znaczna część Niemiec, Austrii).

Zarówno w metodach fotograficznych, symulacyjnych jak i „big data” pojawia się zagadnienie związane z promieniem hemisfery, względem której wyznaczany jest SVF. Dla wyznaczenia SVF na zdjęciach fish-eye, lub przetworzonych panoramach ze zdjęć typu Street View, promień nie jest arbitralnie zdefiniowany, wynika z ukształtowania terenu i pojawiających się przesłoneń na dalekich planach. Natomiast w metodach symulacyjnych przyjęcie zbyt małego promienia hemisfery może prowadzić do zaniżenia wartości SVF.

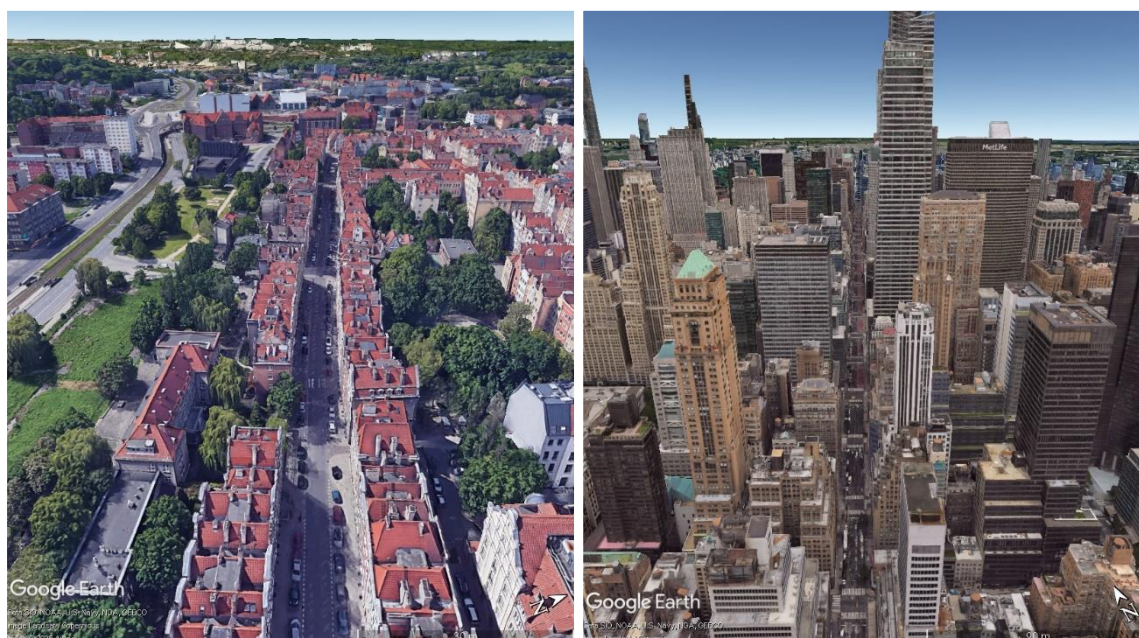
Do ostatniej grupy metod należą rozwiązania wyznaczające widoczność nieba w oparciu o **odbierane sygnały satelitarne** przez odbiorniki GNSS. Metody te wykorzystują równania regresji wielokrotnej ustalone na podstawie liczby widocznych satelitów, siły odbieranych sygnałów oraz współczynników *dilution of precision* (DOP) (Chapman et al., 2002). Metody te nie sprawdzą się na obszarach wiejskich, gdzie przesłonięcia horyzontu nie są tak jednoznaczne jak w przypadku przestrzeni miejskiej (Zeng et al., 2018).

### 3. Modelowanie przestrzeni miejskiej

#### 3.1. Fizjonomia miasta

Fizjonomia miast w dużej mierze zależy od okresu historycznego, w którym powstały, od wydarzeń jakie miały miejsce na danym obszarze, a także od polityki jaka towarzyszyła tworzeniu konkretnych założeń urbanistycznych. Ważnym aspektem determinującym układ przestrzenny miast było ich położenie geograficzne, inaczej kształtowały się osady nadrzeczne niż te na obszarach górzystych. Formę przestrzenną miast tworzą przede wszystkim budynki i ulice, jednak nieodłączną część stanowią również place, parki, drzewa, tereny zielone czy infrastruktura techniczna.

Historyczne centra miast, które do dzisiaj funkcjonują jako śródmieścia w wielu miejscowościach, zazwyczaj charakteryzują się zwartą zabudową podzieloną na kwartały tak jak np. w Krakowie, w Gdańsku, w Wiedniu czy we Florencji. Wzdłuż wąskich ulic często ciągną się pierzeje wysokich kamienic tworząc jednoznaczną granicę krajobrazu. W odniesieniu do takiej przestrzeni najczęściej używa się określenia „kanion uliczny”. Cechuje się on wysokim współczynnikiem geometrycznym obliczanym jako stosunek średniej wysokości elewacji do szerokości kanionu ( $H/W$ ) (Oke, 1981). Jednak kanion uliczny to nie jest przestrzeń charakterystyczna wyłącznie dla historycznych miast. W nowoczesnych dzielnicach wielkich aglomeracji teren pod zabudowę jest niezwykle cenny i pożądanym, co przekłada się na realizację wysokiej i wielokondygnacyjnej zabudowy. Mimo że we współczesnych założeniach ulice są szersze niż w przypadku historycznych koncepcji, gęsto rozmieszczone wieżowce wzmacniają wrażenie zamknięcia przestrzeni. W efekcie powstają kaniony uliczne, w których dostęp do światła dziennego jest wysoce ograniczony.



Rysunek 6. Przykład kanionu ulicznego w Gdańsku i Nowym Jorku, źródło: Google Earth

W miarę oddalania się od centrum, zwarte zabudowania ustępują miejsca zespołom budynków mieszkalnych tworzących osiedla. Gwałtowny przyrost liczby ludności

miejskiej sprawił, że wiele miast borykało się z przeludnieniem i brakiem terenów pod zabudowę, co wymusiło znalezienie nowych lokalizacji do zabudowy poza ścisłym centrum (Rodak et al., 2024). W efekcie projektowano osiedla składające się z bloków dla kilku tysięcy mieszkańców poprzeplatanych terenami zielonymi i pieszymi ciągami komunikacyjnymi, które stopniowo były uzupełniane budynkami infrastruktury edukacyjnej (przedszkola, żłobki) i usługowej (pawilony ze sklepami i instytucjami kultury np. bibliotekami).



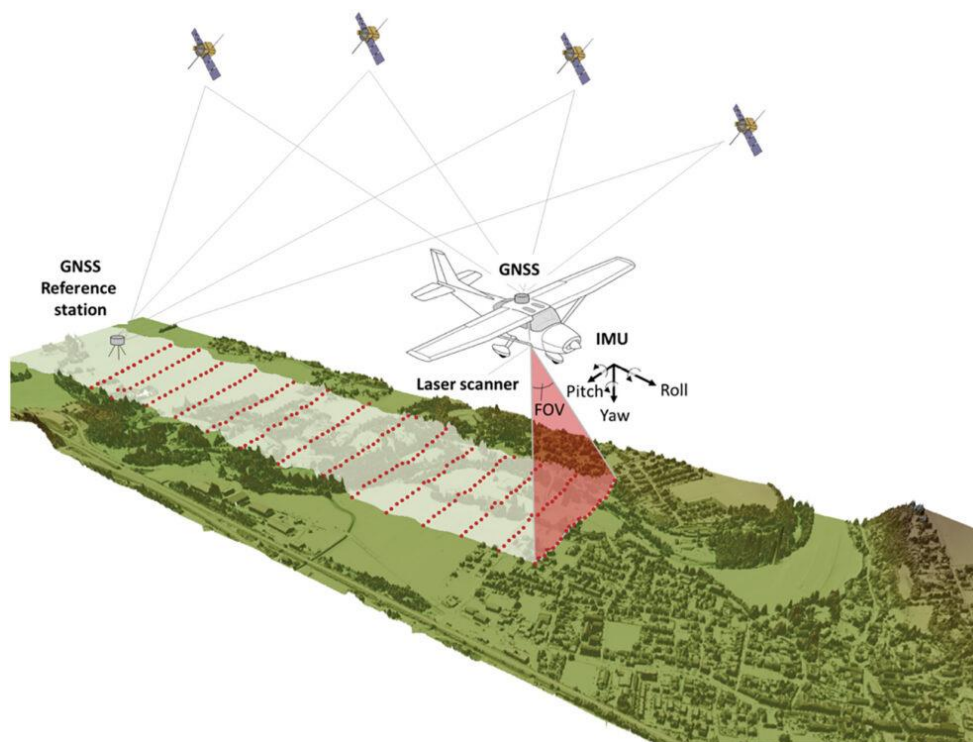
Rysunek 7. Przykład modernistycznego osiedla mieszkaniowego Mistrzejowice, Kraków. Źródło: Google Earth

Różnorodność obiektów w przestrzeni miejskiej powoduje, że jej modelowanie jest zagadnieniem bardzo złożonym. Część dzielnic łączy funkcje mieszkalne z usługowymi czy rekreacyjnymi, jednak w obrębie miasta występują również obszary stricte przemysłowe, charakteryzujące się zupełnie innym krajobrazem. Różne formy przyjmuje także zieleń miejska - od parków ze starodrzewem, przez nowoczesne skwery z niskimi roślinami, po coraz częściej pojawiające się łąki kwietne w pasach zieleni przyulicznej.

### 3.2. Źródła danych do modelowania

Podstawowym źródłem trójwymiarowej informacji o przestrzeni miejskiej są dane ze skanowania laserowego. Może ono przebiegać zarówno z pułapu lotniczego (ang. *Airborne Laser Scanning* - ALS), czy też naziemnego (ang. *Terrestrial Laser Scanning* - TLS). Coraz częściej stosowanym rozwiązaniem jest skanowanie mobilne (ang. *Mobile Laser Scanning* - MLS) wspomagany technologiami SLAM (ang. *Simultaneous Localization and Mapping*).








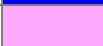
Ogólna zasada działania skanowania laserowego polega na emisji wiązki lasera w wielu kierunkach, a następnie rejestracji odbitych sygnałów od różnych obiektów. Odległość od emitera do obiektu wyznaczana jest na podstawie czasu powrotu impulsu lub różnicy fazowej. Zarejestrowane w ten sposób dane tworzą zbiór punktów zwany chmurą - każdy punkt posiada współrzędne przestrzenne X, Y, Z. W przypadku ALS i MLS punkt z którego emitowany jest impuls oraz jego orientacja przestrzenna wyznaczone są na podstawie pomiaru georeferencji w locie systemami GNSS i INS (Rysunek 8). TLS wymaga georeferencji w oparciu o punkty o znanych współrzędnych, aby przetransformować chmurę do układu terenowego.



Rysunek 8. Schemat pozyskiwania danych ALS (Mandlbürger, 2024)

W Polsce lotniczy skaning został zainicjowany w ramach projektu ISOK (Kurczyński i Bakula, 2013), i jest kontynuowany nominalnie dla obszaru całego kraju w kilkuletnich cyklach. Chmury dla obszarów miejskich pozyskiwane są w rozdzielczości minimum dwunastu pkt/m<sup>2</sup>, natomiast dla terenów wiejskich i leśnych w minimum czterech pkt/m<sup>2</sup>. Dane te są regularnie udostępniane przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii w geoportalu, skąd można je pobrać w formacie LAS. Wszystkie udostępnione chmury punktów zawierają informację o położeniu przestrzennym każdego punktu (X,Y,Z w układzie państwowym), intensywności odbicia wiązki, liczby odbić (ech), a także przypisanej klasie (w wyniku klasyfikacji chmury) (“Dane pomiarowe LIDAR (LIDAR) – Geoportal.gov.pl,”). Niekiedy punkty mają przypisaną również barwę RGB. Klasyfikacja chmur jest ściśle określona w specyfikacji ISOK, a wyodrębnione klasy mają odpowiedniki w standardzie ASPRS (“LAS SPECIFICATION,” 2013) (Tabela 1, Rysunek 9).

Tabela 1. Klasy chmury punktów udostępnianych przez GUGiK (“Dane pomiarowe LIDAR (LIDAR) – Geoportal.gov.pl.”)

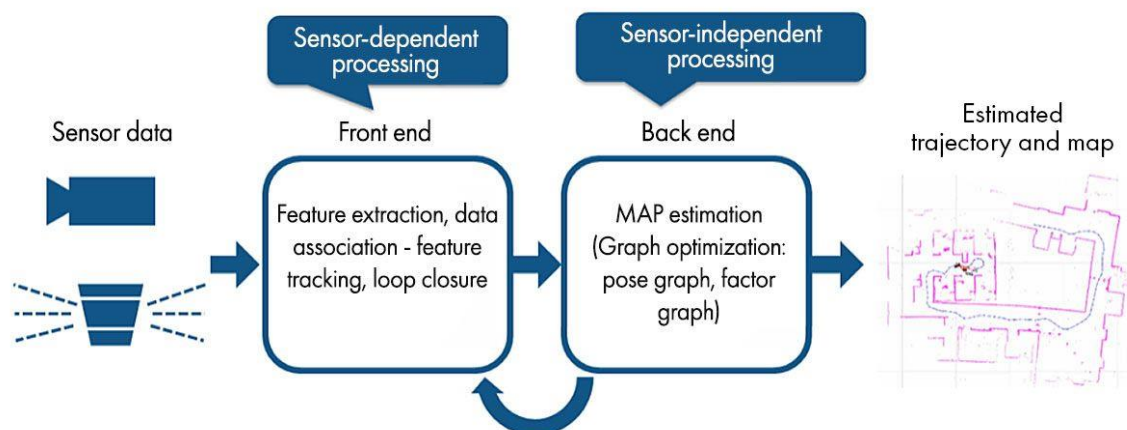
<i>Klasa</i>	<i>Kolor</i>	<i>Nazwa</i>
0		punkty przetwarzane, ale niesklasyfikowane
2		punkty leżące na gruncie
3		punkty reprezentujące niską roślinność, tj. w zakresie 0-0.40 m
4		punkty reprezentujące średnią roślinność, tj. w zakresie 0.40-2.00 m
5		punkty reprezentujące wysoką roślinność, tj. w zakresie powyżej 2.00
6		punkty reprezentujące budynki, budowle oraz obiekty inżynierskie
7		szum
8		punkty reprezentujące obszary wód
12		punkty z obszarów wielokrotnego pokrycia



Rysunek 9. Wizualizacja chmury punktów z geoportalu, po lewej w RGB, po prawej według klasyfikacji

W przypadku MLS, coraz częściej kosztowne systemy GNSS/INS zastępowane są rozwiązaniami SLAM. Metoda ta pozwala na jednoczesne zbieranie informacji o skanowanej przestrzeni oraz wyznaczanie trajektorii sensora względem pozyskanej mapy (Cadena et al., 2016). Proces ten polega na integracji danych z czujników takich jak LiDAR, IMU czy też klasyczne kamery RGB, z wykorzystaniem algorytmów lokalizacji i dopasowania skanów (Li et al., 2025). Powszechnie stosowany model SLAM zakłada dwa etapy opracowania (Rysunek 10). Pierwszy, tzw. *front-end*, zależny od rodzaju czujników, obejmuje ekstrakcję cech, śledzenie wykrytych elementów w kolejnych scenach, a także wykonywanie domknięcia pętli (ang. *loop closure*). W drugim etapie, tzw. *back-end*, następuje estymacja trajektorii poruszania się sensora oraz generowanie mapy w oparciu o optymalizację grafu. Ten proces jest niezależny od wykorzystanych czujników. Dzięki

temu SLAM umożliwia precyzyjne modelowanie otoczenia, niezależnie od rodzaju zastosowanych urządzeń pomiarowych. Uzyskana w ten sposób chmura punktów ma zapewnioną spójność geometrii w ramach lokalnego układu współrzędnych. Daje to szerokie możliwości stosowania w przestrzeniach zamkniętych i o utrudnionym dostępie. W przypadku stosowania na zewnątrz istnieje możliwość integracji danych z systemami GNSS/INS lub georeferencji analogicznej jak dla TLS.



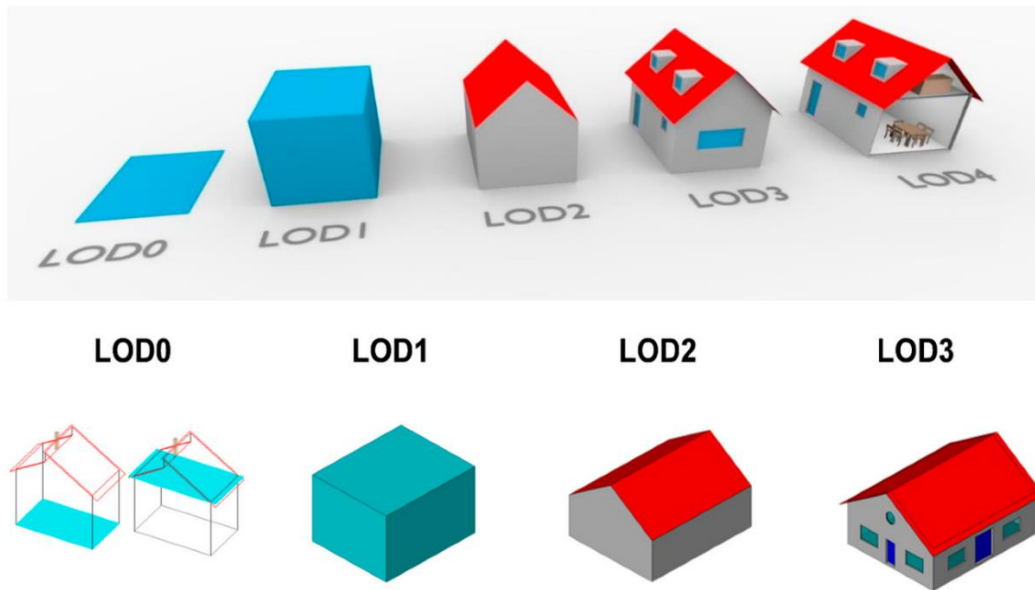
Rysunek 10. Schemat działania algorytmów SLAM, ("What Is SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)? - MATLAB & Simulink,")

### 3.3. Modele budynków

Podstawowy element modelu miasta stanowią budynki. Najbardziej rozpowszechnionym sposobem reprezentacji zabudowy jest przedstawienie jej w standardzie CityGML ("Open Geospatial Consortium," 2012), najczęściej z wykorzystaniem prostych brył geometrycznych. Standard ten w wersji 2.0 wyróżnia pięć poziomów szczegółowości LOD (*ang. Level of Detail*) (Gröger et al., 2012):

- ❖ LOD0 - płaski obrys budynku,
- ❖ LOD1 - proste bryły z płaskimi dachami,
- ❖ LOD2 - przedstawiający prostą geometrię dachu (podstawowe płaszczyzny),
- ❖ LOD3 - uwzględniający elementy elewacji jak balkony / jaskółki itp.,
- ❖ LOD4 - z wiernym odtworzeniem wnętrza budynku.

Wersja 3.0 CityGML zakłada cztery poziomy LOD (0 - 3). Zrezygnowano z LOD4, ponieważ nowy standard umożliwia wszystkim typom obiektów posiadanie elementów zarówno zewnętrznych, jak i wewnętrznych, niezależnie od LOD. Zbiory danych w nowej formie mogą, ale nie muszą, zawierać wiele geometrii dla każdego obiektu w różnych LOD jednocześnie. Przykładowo, budynek może być reprezentowany w LOD2, a jego wnętrze (pomieszczenia) w LOD1. ("OGC City Geography Markup Language (CityGML) 3.0 Conceptual Model Users Guide," n.d.). Ilustracja poniżej (Rysunek 11) przedstawia schemat LOD w wersji 2.0 (u góry) i 3.0 (na dole).



Rysunek 11. Schemat ilustrujący standard LOD w wersji 2.0 i 3.0 (Varlık and Dursun, 2024)

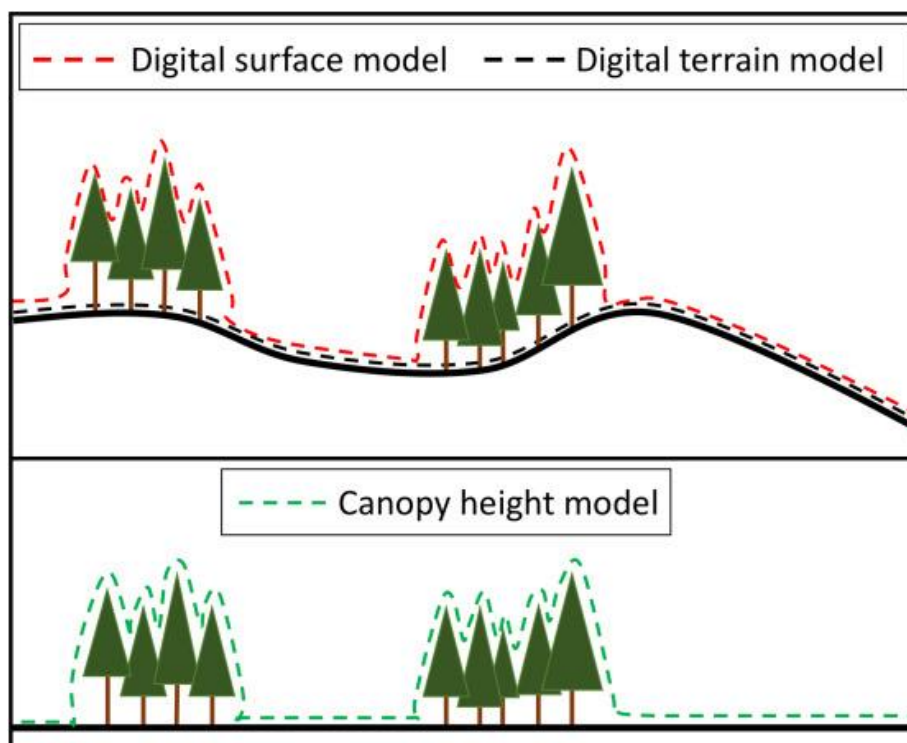
Podstawowym źródłem danych do modelowania budynków są chmury punktów pochodzące z ALS oraz, w przypadku Polski, Ewidencja Gruntów i Budynków (w innych krajach odpowiednie zasoby zawierające informacje o charakterze katastralnym). Z bazy danych EGiB pozyskiwany jest obrys przyziemia budynku, natomiast informacje o wysokości i kształcie dachu pozyskiwana jest z chmury punktów. Wektorowe modele w LOD1 i LOD2 są udostępniane do pobrania w geoportalu jako pliki GML.

Pierwsze próby modelowania budynków z danych lidarowych podejmowano już w latach dziewięćdziesiątych. Zakładały one wykorzystanie chmury punktów z uwzględnieniem dodatkowych informacji o położeniu zabudowy. Haala i Brenner wyodrębnili elementy dachów za pomocą algorytmu segmentacji płaskich powierzchni (Haala and Brenner, 1997). Hug i Wehr zaproponowali detekcję oraz segmentację budynków na podstawie informacji wysokościowej wykorzystując m.in. filtrację morfologiczną (Hug and Wehr, 1997). Dodatkowo, zmierzone wartości odbicia lasera wykorzystali do rozróżnienia roślinności od budynków. Maas i Vosselman zaproponowali dwa podejścia do automatycznej rekonstrukcji budynków z chmur punktów, w których znajomość lokalizacji zabudowy nie jest konieczna. Jedno z nich wykorzystuje wyznaczenie momentów niezmiennych dla dachów dwuspadowych. Drugie opiera się na analizie przecięć płaszczyzn w trójwymiarze, co pozwala na modelowanie dachów o bardziej skomplikowanym kształcie (Maas and Vosselman, 1999). W późniejszym okresie wykrywanie budynków w chmurach zaczęto wspierać m.in. wektorami 2D (Zhang et al., 2005), zdjęciami lotniczymi (Cheng et al., 2011), jednak przełomowym momentem w ekstrakcji budynków było pojawienie się głębokiego uczenia. Sieć neuronowa PointNet++ (Charles et al., 2017) uwzględnia hierarchiczną strukturę punktów wraz z lokalnymi detalami. Obecnie jest to standard w segmentacji danych LiDAR (Shin et al., 2022).

### 3.4. Modele drzew

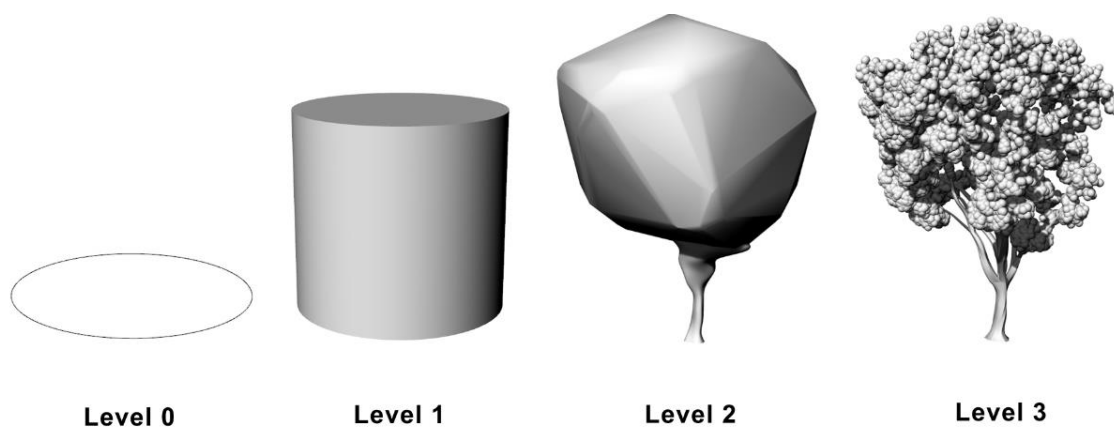
Nieodłącznym elementem przestrzeni miejskiej jest roślinność, kojarzona głównie z kompleksami parkowymi, jednak nie należy zapominać o tej, która niejako jest wtopiona w otoczenie. Wzdłuż arterii oraz na podwórkach między budynkami występuje wiele zieleni, w tym niejednokrotnie stare drzewa. Coraz częściej modernizowane są uliczki pomiędzy kamienicami, a w obrębie nowych założeń architektonicznych tworzy się specjalne miejsca na nowe nasadzenia - zarówno niskie jak i te średnie - w taki sposób, aby dopasować się do już istniejących starszych drzew. Najczęstszym źródłem informacji o wysokiej roślinności są chmury punktów z lotniczego skaningu laserowego. Należy jednak pamiętać, że w wąskich przestrzeniach miejskich, takich jak na przykład kaniony uliczne, stare i wysokie drzewa dotykają swoimi gałęziami elewacji po obu stronach ulicy. W efekcie rozróżnienie, które punkty zaklasyfikowane powinny być jako budynki, a które jako roślinność, staje się utrudnione i może być powodem błędnego przypisania klasy do punktów.

Dzięki klasyfikacji chmur z ALS można wyodrębnić roślinność niską, średnią i wysoką. Chmura punktów nie stanowi ciągłej reprezentacji, istnieje jednak możliwość przejścia do formy quasi-ciągłej. Przykładem takiego podejścia jest rasteryzacja całej chmury punktów (ang. Digital Surface Model - DSM), lub jej poszczególnych klas. W ten sposób powstaje dyskretna reprezentacja o zadanym interwale (rozmiar oczka GRID) zawierająca informację o najwyższym punkcie w danym pikselu. Różnica DSM i DTM (ang. Digital Terrain Model) pozwala na wyznaczenie tzw. Canopy Height Model - CHM.

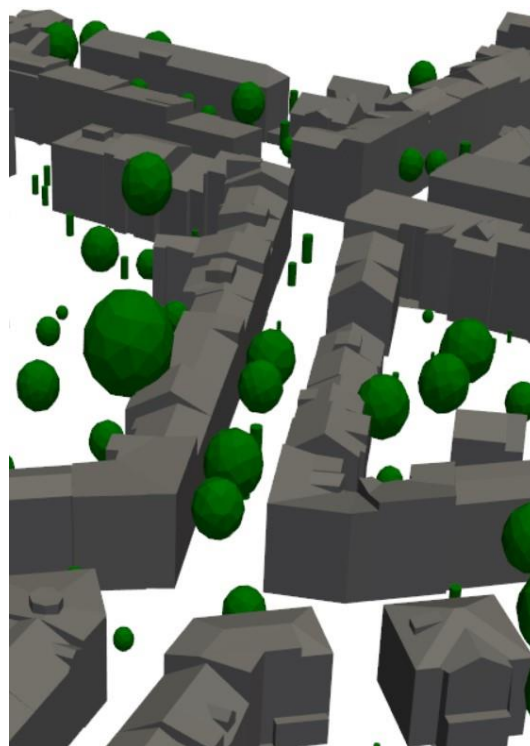


Rysunek 12. Idea wyznaczania CHM (Meddens et al., 2018)

Standard CityGML 2.0 (“Open Geospatial Consortium,” 2012), podobnie jak w przypadku budynków, określa szczegółowość modelowania roślinności. Przewiduje on reprezentację od LOD0 (określającego powierzchnię pokrytą roślinnością w przestrzeni 2D) aż do LOD3, który pozwala na modelowanie struktury geometrycznej z podziałem na pień i koronę (Rysunek 13). GUGiK udostępnia modele 3D drzew, których wysokość przekracza cztery metry, dla wybranych miast w Polsce. Są to reprezentacje na poziomie pośrednim między LOD1 a LOD2. W przypadku niewielkich drzew zazwyczaj jest to walec, dla wyższych reprezentacja obejmuje trójkątowy model korony zbliżony do elipsoidalnego (Rysunek 14). Modele te zawierają informację o źródle i aktualności danych oraz wysokości drzewa i wysokości nad poziomem morza jego przyziemia.

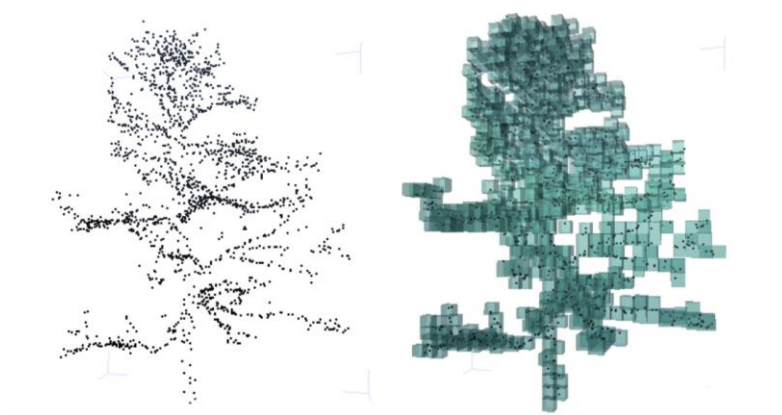


Rysunek 13. Wizualizacja sposobów reprezentacji roślinności za pomocą poziomów LOD (Gobeawan et al., 2018)

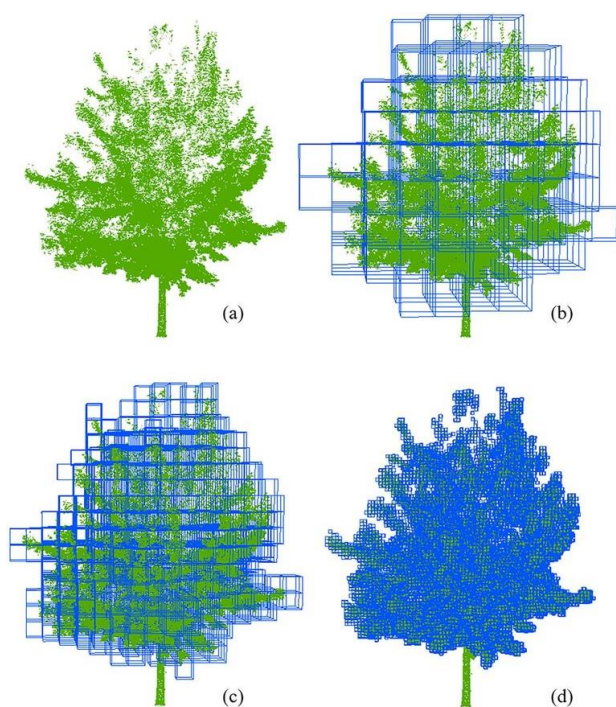


Rysunek 14. Wizualizacja danych udostępnianych przez GUGiK, fragment ul. Konarskiego w Krakowie, budynki LOD2 i roślinność LOD1

Innym sposobem reprezentacji trójwymiarowej struktury drzew jest wokselizacja, polegająca na dyskretnym podziale przestrzeni na sześciennie elementy zwane woksalami. Każdy woksół może zawierać różne informacje m.in. o obecności jakiegoś obiektu (np. drzewa, budynku), kolorze czy rodzaju tekstury. Zbudowanie woksali bazuje na sprawdzeniu warunku czy w danym sześciacie występuje punkt chmury (lub przyjęta ich liczba), jeśli tak, to tworzony jest woksół. Dzięki temu, możliwe jest przedstawienie skomplikowanej bryły rośliny w bardziej ciągły sposób. Woksele są często stosowane do symulowania wyglądu roślinności zeskanowanej LiDAR-em (Zięba-Kulawik et al., 2021). Istotne znaczenie w sposobie reprezentacji ma dobór rozmiaru pojedynczego sześciacu. Im większy, tym kształt jest bardziej uogólniony. Z kolei, bardzo mały rozmiar woksela będzie z dużym uszczegółowieniem przedstawiał kształt roślinności, jednak, ze względu na objętość danych może się okazać uciążliwy zarówno dla przetwarzania, jak i wyświetlania. Na podstawie woksali można estymować różne parametry włącznie z objętością biomasy.



Rysunek 15. Przykład wokselizacji chmury punktów (Zięba-Kulawik et al., 2021)



Rysunek 16. Reprezentacja drzewa w zależności od rozmiaru woksela (Zhu et al., 2021)

## 4. Rekonstrukcja trójwymiarowa ze zdjęć niemetrycznych

### 4.1. Modele geometrii zdjęć fotograficznych i kalibracja kamer

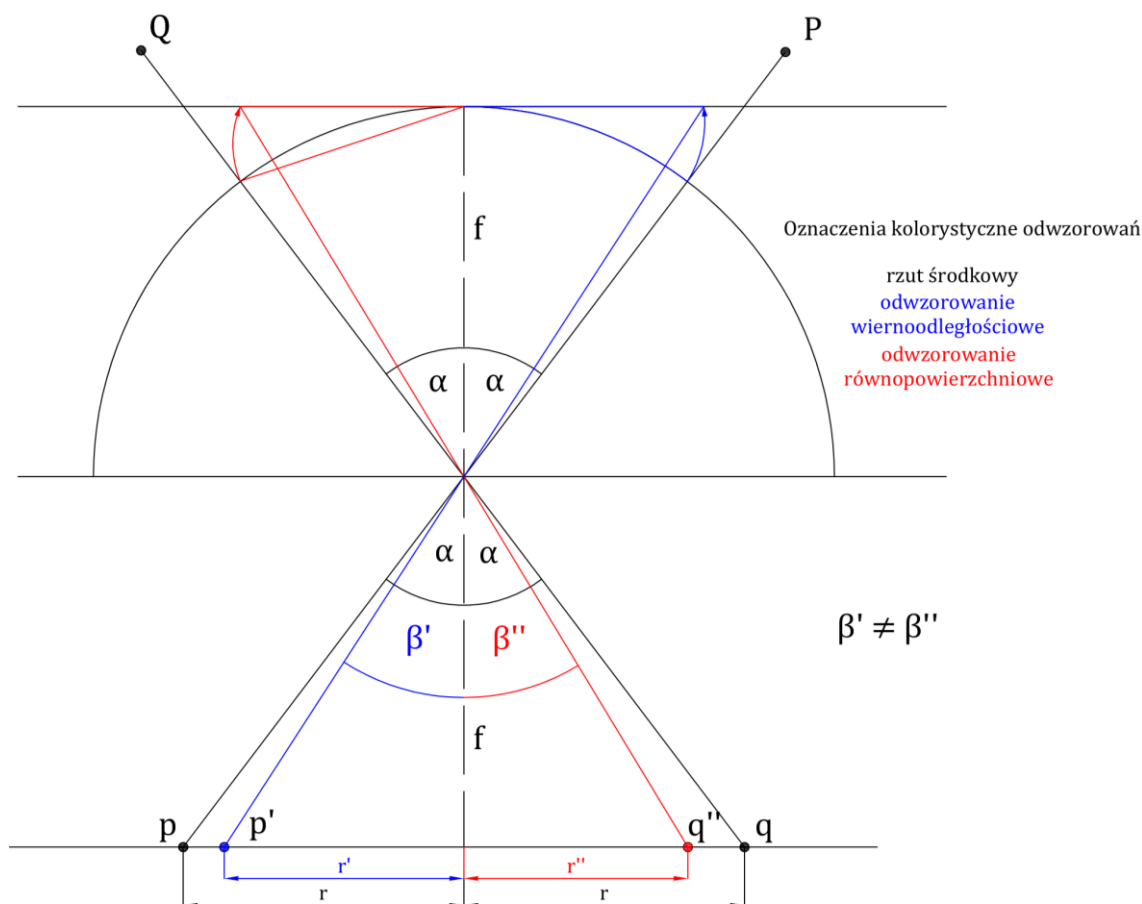
Zdjęcie fotograficzne jest odwzorowaniem przestrzeni 3D na płaszczyźnie. W zdecydowanej większości kamer odwzorowanie ma postać rzutu środkowego. Kamery realizujące rzut środkowy nazywane są symbolicznie otworkowymi (ang. *pinhole*). Istotnym ograniczeniem dla fotografowania w rzucie środkowym jest rozmiar pola widzenia, które rzadko przekracza  $120^\circ$ . Obiektywy fish-eye mają pole widzenia około  $180^\circ$ , ale osiągnięte jest to na drodze specjalnych odwzorowań, takich jak (Schneider et al., 2009):

- ❖ odwzorowanie wiernoodległościowe gdzie  $r = f * \theta$ ,
- ❖ odwzorowanie ortogonalne gdzie  $r = f * \sin\theta$ ,
- ❖ odwzorowanie równopowierzchniowe gdzie  $r = 2f * \sin \frac{\theta}{2}$ ,
- ❖ odwzorowanie stereograficzne gdzie  $r = 2f * \tan \frac{\theta}{2}$

$r$  - promień radialny

$f$  - ogniskowa

$\theta$  - kąt między osią optyczną obiektywu a wiązką padającą



Rysunek 17. Porównanie rzutu środkowego z odwzorowaniem fish-eye wiernoodległościowym i równopowierzchniowym

(Rysunek 17) przedstawia porównanie rzutu środkowego i dwóch najpopularniejszych odwzorowań fish-eye wiernoodległościowego i równopowierzchniowego. Punkty p i q są rzutami środkowymi punktów P i Q. Obrazem punktu P w odwzorowaniu wiernoodległościowym jest p', natomiast obrazem punktu Q w odwzorowaniu równopowierzchniowym jest q''. Wzory (6) - (8) pokazują związki geometryczne jakie występują w rzucie środkowym, odwzorowaniu wiernoodległościowym i równopowierzchniowym:

$$r = f \tan(\alpha) \quad (6)$$

$$r' = f\alpha \quad (7)$$

$$r'' = 2f \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (8)$$

Znając promienie radialne na zdjęciu fish-eye można obliczyć promienie jakie wystąpiłyby na zdjęciu w rzucie środkowym:

$$r = f * \tan\left(\frac{r'}{f}\right) \quad (9)$$

$$r = f * \tan\left(2 \arcsin\left(\frac{r''}{2f}\right)\right) \quad (10)$$

Fizyczna realizacja odwzorowań w fotografii zawsze obarczona jest zniekształceniami w stosunku do modelu. Dlatego potrzebna jest kalibracja kamer, czyli proces badania zniekształceń względem modelu i ich matematyczny opis. W trakcie kalibracji niezbędne jest wyznaczenie elementów orientacji wewnętrznej aparatu (EOW), które definiują jego geometrię: długość ogniskowej, położenie punktu głównego w układzie zdjęcia, wartości zniekształceń geometrycznych obiektywu rozumianych jako dystorsje oraz ewentualnie afiniczność rozmiarów piksela matrycy.

Kalibracja dotyczy wszystkich kamer, przy czym kamery intencjonalnie konstruowane jako stabilne, nazywane są metrycznymi, podlegają tylko okresowemu sprawdzeniu geometrii. Kamery dedykowane powszechnemu użytkownikowi z reguły mają zmienne w czasie odstępstwa od geometrii modelowej, dlatego nazywane są kamerami niemetrycznymi. Dla tych kamer problem uzyskania parametrów kalibracji adekwatnych dla czasu wykonania zdjęć jest kluczowy z punktu widzenia wykorzystania dla zadań metrycznych.

Geometryczna kalibracja kamery jest możliwa do realizacji na kilka sposobów z wykorzystaniem różnych metod, które można podzielić na grupy uwzględniając poszczególne aspekty procesu kalibracji (Luhmann et al., 2016; Kukulova et al., 2008; Remondino and Fraser, 2006; Zhang, 2004):

- a) Wymiar obiektu kalibracyjnego:
- a. *Obiekt w postaci trójwymiarowej* - kalibracja jest wykonywana na bazie fotografii obiektu, którego geometria w przestrzeni 3D jest wyznaczona z wysoką precyzją. Często za obiekt wykorzystywane są dwie lub trzy prostopadłe do siebie płaszczyzny, spośród których jedną można przesuwac o zadany wektor (znana translacja). Wadą tego rozwiązania jest konieczność posiadania kosztownej aparatury.
  - b. *Obiekt w postaci dwuwymiarowej* - fotografowanie płaskiego, regularnego wzoru (np. szachownica) z kilku orientacji. Łatwa i tania w realizacji metoda do wykonania przez każdego.
  - c. *Obiekt w postaci jednowymiarowej* - tego typu obiekt składa się z zestawu współliniowych punktów (np. sznur kul podwieszony przy suficie). Kalibrację wykonuje się na podstawie obserwacji poruszającej się linii wokół stałego punktu.
  - d. *Obiekt bezwymiarowy* - taka kalibracja, najczęściej zwana samokalibracją (często nazywana on-the-job calibration), bazuje na korelacji kolejnych obrazów statycznej sceny. Parametry aparatu wyznaczone są w trakcie rekonstrukcji 3D fotografowanego obiektu. Jednocześnie należy wyznaczyć elementy orientacji zewnętrznej (EOZ) i wewnętrznej dlatego kalibracja jest zdecydowanie trudniejszym zadaniem pod względem matematycznym.
- b) Model funkcjonalny:
- a. *W oparciu o model perspektywiczny (równanie kolinearności)* - wymagana jest znajomość współrzędnych minimum pięciu punktów w sieci wieloobrazowej, ze względu na nieliniowy charakter wymagane są przybliżone parametry na potrzeby metody najmniejszych kwadratów,
  - b. *W oparciu o model rzutowy (DLT)*,
  - c. *W oparciu o geometrię epipolarną* - wykorzystanie algorytmów estymacji macierzy podstawowej lub fundamentalnej przy nieznannej lecz stałej ogniskowej.
- c) Technika estymacji i optymalizacji:
- a. *Metody liniowe* - proste i szybkie (DLT). Metody te nie radzą sobie w przypadku zdjęć z dużymi zniekształceniami obiektywu.
  - b. *Metody nieliniowe* - rozszerzony model równania kolinearności, obejmuje rygorystyczne i dokładne modelowanie parametrów orientacji wewnętrznej kamery oraz parametrów zniekształcenia obiektywu, proces obliczany iteracyjnie metodą najmniejszych kwadratów.
  - c. *Metody mieszane* - na pierwszym etapie stosuje się metodę liniową do obliczania wstępnych przybliżeń dla parametrów, w kolejnym kroku przybliżenia orientacji i kalibracji są iteracyjnie udoskonalane metodą najmniejszych kwadratów.

Najczęściej wykorzystywane są rozwiązania bazujące na równaniu kolinearności adekwatnym dla rzutu środkowego, które zostało rozbudowane o wielomianowy model Brown'a uwzględniający wpływ dystorsji radialnej i tangencjalnej (Brown, 1971), równania (11) - (14).

$$x' = x_0 - f * \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x_r + \Delta x_t \quad (11)$$

$$y' = y_0 - f * \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y_r + \Delta y_t \quad (12)$$

$$\Delta x_r = x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad \Delta y_r = y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (13)$$

$$\Delta x_t = p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2xy \quad \Delta y_t = p_2(r^2 + 2y^2) + 2p_1xy \quad (14)$$

gdzie:

$x_0, y_0$  - współrzędne punktu głównego w układzie kamery

$x, y$  - współrzędne obserwowanego punktu w układzie kamery

$f$  - ogniskowa

$r_{ij}$  - wyrazy macierzy obrotów R

$X_0, Y_0, Z_0$  - współrzędne punktu głównego w układzie terenowym

$X, Y, Z$  - współrzędne obserwowanego punktu w układzie terenowym

$\Delta x_r, \Delta y_r, \Delta x_t, \Delta y_t$  - składowe dystorsji radialnej i tangencjalnej

$k_1, k_2, k_3, p_1, p_2$  - parametry dystorsji radialnej ( $k_i$ ) oraz tangencjalnej ( $p_i$ )

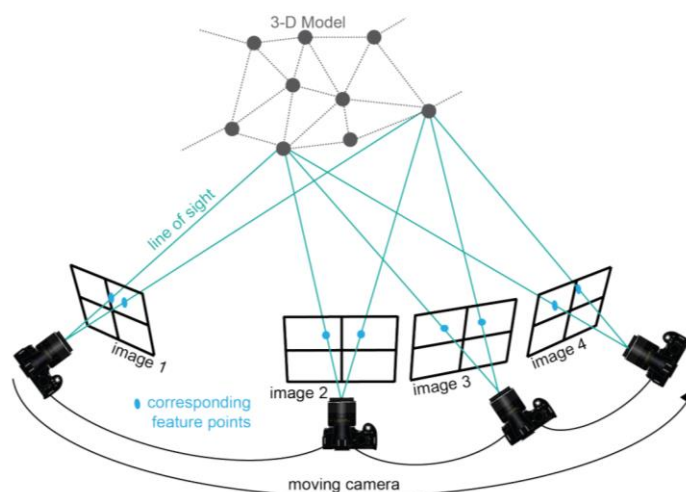
$r$  - promień radialny

W roku 2000 Zhang zaproponował metodę kalibracji kamery w oparciu o regularny wzór złożony z białych i czarnych kwadratów - popularnie zwanym szachownicą (Zhang, 2000). Stanowi ona jedną z najważniejszych i najczęściej stosowanych metod kalibracji kamer w oparciu o widzenie komputerowe. Jej głównym założeniem jest wyznaczenie elementów orientacji wewnętrznej i zewnętrznej aparatu na podstawie analizy odfotografowanego pod różnymi kątami wzoru. Metoda ta wykorzystuje model rzutowania perspektywicznego uwzględniając jednocześnie parametry dystorsji radialnej i tangencjalnej zaproponowane przez (Brown, 1971). Zakłada się, że odfotografowana szachownica leży w płaszczyźnie  $Z^0 = 0$  w swoim układzie współrzędnych. Na podstawie wykrytych narożników na każdym zdjęciu przeliczane jest przekształcenie (homografia) pomiędzy obrazem a płaszczyzną  $Z^0$ . Kolejno estymowane są macierz wewnętrzna kamery, następnie rotacja i translacja dla każdego zdjęcia a finalnie parametry dystorsji. Zasadniczą zaletą tego rozwiązania jest jego powszechność oraz łatwość wykonania. Nie wymaga on specjalnych przygotowań - wystarczy wyświetlić lub wydrukować wzór szachownicy i sfotografować go dowolnym aparatem. Obliczenia można wykonać zarówno w darmowych rozwiązaniach np. 3DF Zephyr Free, wykorzystując bibliotekę OpenCV (dedykowana do Pythona i C++), jak i w programach komercyjnych: Matlab Camera Calibrator App, Agisoft Metashape Professional.

Kalibracja kamer fish-eye korzysta z doświadczeń wypracowanych dla kamer otworkowych. Teoretycznie, po przeliczeniu położenia punktu na zdjęciu fish-eye na rzut środkowy, można kalibrować wirtualny odpowiednik w oparciu o równanie kolinearności. W literaturze opisywanych jest kilka modeli matematycznych dedykowanych właśnie takim obiektywom. Kannala i Brandt zaproponowali uproszczony model projekcji wykorzystujący rozwinięcie w szereg potęgowy kąta padania promienia świetlnego (Kannala and Brandt, 2006). Schwalbe porównała różne modele projekcji fish-eye (m.in. stereograficzne, wieronoodległościowe czy ortograficzne) i zaproponowała rozszerzenie standardowego równania kolinearności o parametry opisujące nieliniowe odwzorowanie kątowe, testując przy tym zarówno modele wielomianowe, jak i funkcje odwzorowania dopasowane do rzeczywistych obserwacji (Schwalbe, 2005). (Kędzierski, 2008) zaproponował metodę korekcji przed procesem kalibracji, co znacząco ułatwiło wyznaczenie parametrów kamery. (Aghayari et al., 2017) zaproponowali kalibrację wykorzystując pośrednią reprezentację na za pomocą współrzędnych sferycznych. (Huai et al., 2024) przedstawili przegląd popularnych narzędzi do kalibracji w tym MATLAB Camera Calibrator, Kalibr, OpenCV/ROS Camera Calibrator, stwierdzając zależność powtarzalności kalibracji od wybranego modelu odwzorowania i narzędzia. (Rezaei and Arefi, 2025) szczegółowo ocenili metody kalibracji obiektywów typu fish-eye, wykazując istotne różnice w uzyskiwanej dokładności rekonstrukcji 3D w zależności od zastosowanego modelu projekcji i procedury estymacji parametrów.

#### 4.2. Orientacja zdjęć metodą Structure-from-Motion (SfM)

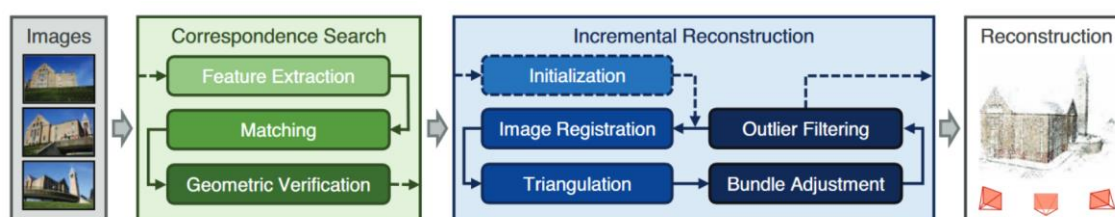
Na początku XXI wieku, dzięki postępowi w zakresie widzenia komputerowego, rozwinęły się metody automatyzacji opracowania modeli trójwymiarowych na podstawie serii nakładających się zdjęć. Pozwoliły one na rekonstrukcję odfotografowanej sceny nie tylko na podstawie bloku regularnych zdjęć pionowych o znanych elementach orientacji wewnętrznej oraz dystorsji, ale także ze zdjęć wykonywanych w ruchu dookoła obiektu bez znajomości powyższych parametrów (*ang. Structure-from-Motion* - struktura w ruchu) (Schonberger and Frahm, 2016; Hartley and Zisserman, 2004) (Rysunek 18).



Rysunek 18. Schemat metody wyszukiwania podobieństw Structure-from-Motion (SfM) (Shervais, 2016)

SfM bazuje na automatycznej identyfikacji punktów charakterystycznych i dopasowaniu ich na kolejnych zdjęciach, a następnie na estymacji elementów orientacji zewnętrznej zdjęć wraz z orientacją wewnętrzną i dystorsją. (Schonberger and Frahm, 2016) dzieli całość procesu na poszukiwanie podobieństw i rekonstrukcję przyrostową (Rysunek 19). Pierwszy obejmuje trzy kroki: ekstrakcja cech, dopasowanie cech, weryfikacja geometryczna. Na drugi etap składa się pięć kroków: inicjalizacja, przybliżona orientacja zdjęcia (rejestracja), triangulacja, wyrównanie metodą niezależnych wiązek, filtracja wartości odstających.

Poszukiwanie podobieństw (etap I) rozpoczyna się od detekcji punktów obrazu wyróżniających się względem otoczenia. Ekstrakcja cech (krok pierwszy) obejmuje wykrycie punktów kluczowych (*ang. key points*) operatorem *Difference of Gaussian* poprzez przeszukiwanie ekstremów w przestrzeni skali (*scale-space*). Są to punkty, które wyróżniają się w różnych skalach wysokiej „istotności” wizualnej (Lowe, 2004). Kolejnym punktom przypisywane są wektory cech liczonych z gradientu otoczenia (tzw. deskryptory). Przykładem stosowanych do tego algorytmów są SIFT (Scale-Invariant Feature Transform (Lowe, 2004)), ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF (Rublee et al., 2011)) czy SURF (Speeded Up Robust Features, (Bay et al., 2006)). Zbiór wyznaczonych w ten sposób punktów kluczowych jest intencjonalnie nadmiarowy, gdyż tylko część zostanie zaakceptowana jako punkty wiążące (*ang. tie point*). Dzięki deskryptorom możliwe jest dopasowanie punktów o tych samych cechach na różnych obrazach (krok drugi) - gdy na kolejnym zdjęciu zostanie odnaleziony odpowiadający wektor cech, punkt ten przekształca się w punkt wiążący. Takie podejście pozwala na opracowanie zdjęć różniących się nachyleniem, skręceniem, skalą oraz oświetleniem. Krok trzeci polega na obliczeniu orientacji wzajemnej (*ang. relative orientation - RO*) poprzez wyznaczenie macierzy fundamentalnej (uwzględniającej kalibrację kamery), a następnie na usunięciu błędnych dopasowań z wykorzystaniem RANSAC (Random Sample Consensus, (Fischler and Bolles, 1981)). Algorytm ten iteracyjnie szacuje parametry modelu matematycznego opisującego zbiór obserwowanych danych tworząc podgrupę danych zgodnych (*ang. inliers*) oraz odstających (*ang. outliers*) (Xu et al., 2019).



Rysunek 19. Szczegółowy schemat działania SfM (Schonberger and Frahm, 2016)

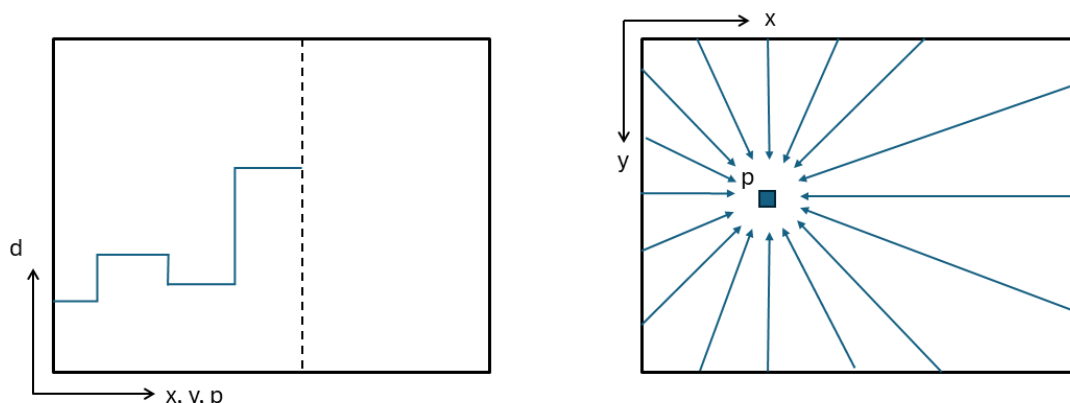
Rekonstrukcja (etap II) rozpoczyna się od inicjalizacji, czyli wyboru dwóch obrazów (zazwyczaj sąsiadujących ze sobą), które będą stanowić parę początkową dla całego procesu rekonstrukcji przyrostowej (model inicjalny z wyonaną RO). Od tego wyboru zależy dokładność i wydajność rekonstrukcji (Schonberger and Frahm, 2016). Rejestracja obrazów (krok drugi) polega na sukcesywnym dodawaniu kolejnych zdjęć do

istniejącego modelu stosując—algorytm Perspective-n-Point (PnP), bazujący na oszacowaniu pozycji kolejnego obrazu. Odbywa się to na podstawie fotogrametrycznego wycięcia wstecz względem poprzednio wyznaczonych punktów. Krok trzeci to triangulacja, która jest kluczowym krokiem w całym SfM, ponieważ zwiększa ona stabilność zrekonstruowanego modelu poprzez redundancję (Triggs et al., 2000) a także umożliwia rejestrację nowych obrazów do modelu. Istnieje wiele metod triangulacji wielowidokowej w tym na przykład, metody liniowe i iteracyjne nieliniowe (Hartley and Sturm, 1997), dla gęstych rekonstrukcji (Furukawa and Ponce, 2010), czy też minimalnych solverów (Stewénius et al., 2006). Kolejny etap (krok czwarty) to wyrównanie metodą niezależnych wiązek (*ang. bundle adjustment - BA*), które polega na nieliniowym wyrównaniu parametrów kamery (EOZ), współrzędnych zrekonstruowanych punktów oraz parametrów kalibracji w taki sposób, aby w równaniach kolinearności zminimalizować sumę poprawek do położenia punktów wiążących na zdjęciach. Proces ten odbywa się po dodaniu każdego nowego zdjęcia do modelu oraz finalnie po dodaniu wszystkich zdjęć. W rezultacie powyższych działań powstaje zrekonstruowany model w lokalnym układzie współrzędnych (wyznaczonym przez model inicjalny) w postaci rzadkiej chmury punktów. Nadanie modelowi skali i georeferencji odbywa się na drodze włączenia do wyrównania współrzędnych fotopunktów dzięki czemu wykonywana jest transformacja do układu docelowego. W przypadku gdy zdjęcia w ramach BA posiadają już EOZ, wyrównanie prowadzone jest w układzie zewnętrznym. Ostatnim krokiem jest filtracja wartości odstających ponownie stosując algorytm RANSAC.

### **4.3. Generowanie chmury punktów metodą Multi-View Stereo (MVS)**

Kolejnym etapem rekonstrukcji trójwymiarowej jest obliczenie nowej chmury punktów technikami gęstego matchingu Multi-View Stereo (MVS). W odróżnieniu od SfM, MVS pracuje na wszystkich pikselach obrazu, a nie tylko na tych charakterystycznych, co przekłada się na zdecydowanie dłuższy czas przetwarzania. Aby usprawnić proces poszukiwania podobieństw pomiędzy obrazami wykonywana jest rektyfikacja epipolarna zdjęć. Dzięki temu możliwe jest ograniczenie dopasowania punktów tylko do linii epipolarnych, co przekłada się na efektywność procesu (Wang et al., 2022; Elhashash and Qin, 2022). Jednym z najpopularniejszych algorytmów gęstego dopasowania jest Semi-Global Matching, w którym analizowane jest dopasowanie pikseli nie tylko wzdłuż linii epipolarnych ale również w jej otoczeniu, co korzystnie wpływa na spójność dopasowanych punktów (Furukawa and Hernández, 2015; Furukawa and Ponce, 2010; Hirschmuller, 2008). W pierwszym kroku dla każdego obrazu obliczane są tzw. mapy głębokości (*ang. depth maps*). Dla każdego piksela reprezentują one odległość od kamery do powierzchni sceny. Podstawą tego etapu jest funkcja kosztu, która ocenia dopasowanie pikseli pomiędzy obrazami, najczęściej w oparciu o różnicę w ich intensywności. SGM uwzględnia informację z wielu kierunków w obrazie (najczęściej ośmiu lub szesnastu) (Rysunek 20). Koszt dla danego piksela i paralaksy jest sumowany ze wszystkich analizowanych kierunków. Aby uniknąć niepożądanych skoków wartości, stosuje się koszty regularyzacji (*ang. penalties*), które pomagają zachować lokalną spójność mapy głębokości. Finalnie, po agregacji wszystkich kosztów dla pikseli i paralaks, ostateczna mapa dysparycji jest uzyskiwana poprzez wybór wartości dysparycji

minimalizujący skumulowany koszt dla każdego piksela  $p$ . Gęsta chmura punktów generowana jest w oparciu o mapy głębokości stosując fotogrametryczne wcięcie w przód.



Rysunek 20. Agregacja kosztów w przestrzeni rozbieżności paralaksy, na podstawie (Hirschmuller, 2008)

Połączenie algorytmów SfM i MVS to rozwiązanie najczęściej wykorzystywane w programach do rekonstrukcji trójwymiarowej ze zdjęć przede wszystkim ze względu na możliwość pracy na zdjęciach bez znajomości ich EOZ i parametrów kalibracji. Na rynku dostępnych jest wiele oprogramowań, zarówno darmowych jak i komercyjnych (Tabela 2), które można wykorzystać do rekonstrukcji 3D na bazie zdjęć lotniczych (Haala and Kada, 2010; Remondino and El-Hakim, 2006), z klasycznych kamer DSLR (Murtiyoso et al., 2024), kamer sferycznych (Jiang et al., 2024; Pérez-García et al., 2024; Elhashash and Qin, 2022) z dronów (Oniga et al., 2022; Harwin and Lucieer, 2012) czy smartfonów (Jasińska et al., 2023; Eker et al., 2022; Farella et al., 2022; Saif and Alshibani, 2022; An et al., 2021; Brandolini et al., 2020).

Tabela 2. Zestawienie przykładowych oprogramowań fotogrametrycznych wykorzystujących SfM i MVS

	<i>Nazwa</i>	<i>Adres</i>
<i>Darmowe</i>	AliceVision/Meshroom	<a href="http://alicevision.org">alicevision.org</a>
	COLMAP	<a href="https://colmap.github.io">colmap.github.io</a>
	Micmac	<a href="https://github.com/micmacIGN/micmac">github.com/micmacIGN/micmac</a>
	VisualSFM	<a href="http://ccwu.me/vsfm">ccwu.me/vsfm</a>
<i>Komercyjne</i>	3DF Zephyr	<a href="https://3dflow.net/3df-zephyr-photogrammetry-">3dflow.net/3df-zephyr-photogrammetry-</a>
	Agisoft Metashape	<a href="http://agisoft.com">agisoft.com</a>
	iTwin Capture Modeler	<a href="https://bentley.com/software/itwin-capture-modeler">bentley.com/software/itwin-capture-modeler</a>
	Pix4Dmapper	<a href="http://pix4d.com">pix4d.com</a>
	PixPro	<a href="http://pix-pro.com">pix-pro.com</a>
	RealityCapture	<a href="http://capturingreality.com">capturingreality.com</a>

#### 4.4. Reprezentacja ciągła metodą Neural Radiance Fields (NeRF)

Jednym z najnowszych podejść do rekonstrukcji trójwymiarowej jest wykorzystanie Neural Radiance Fields (Mildenhall et al., 2020). Wynik NeRF, w odróżnieniu od MVS, nie jest reprezentowany jako geometria w postaci zbioru elementów 3D, ale jako funkcja ciągła definiująca przezroczystość rekonstruowanego obiektu z określonego punktu widzenia (Murtiyoso and Grussenmeyer, 2023). Funkcja ta zakłada próbkowanie współrzędnych 5D (lokalizacja i kierunek widzenia) wzdłuż promieni kamery w celu uzyskania koloru i gęstości w punkcie. Przyjmuje ona postać:

$$F : (x, y, z, \theta, \phi) \rightarrow (R, G, B, \sigma) \quad (15)$$

gdzie:

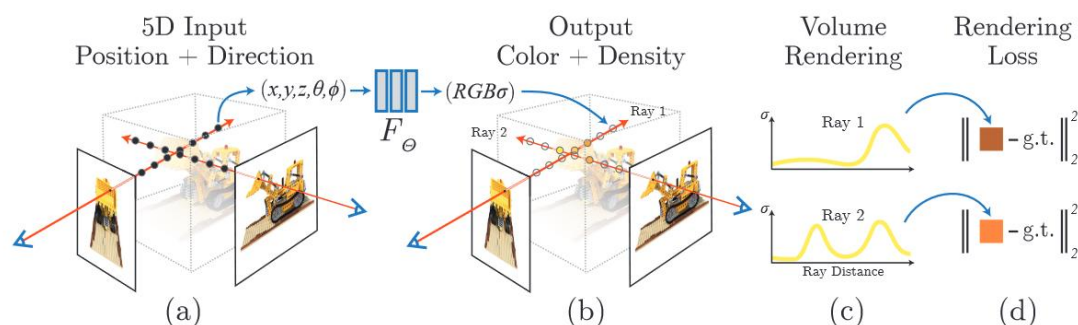
$x, y, z$  - współrzędne przestrzenne,

$\theta, \phi$  - kierunek patrzenia,

$R, G, B$  - kolor w danym punkcie,

$\sigma$  - gęstość wyrażająca stopień pochłaniania lub emitowania światła w punkcie.

Po przeliczeniu sceny do funkcji ciągłej wykonywany jest *volume rendering*. Na tym etapie dla każdego piksela obrazu definiuje się promień, wzdłuż którego całkowana jest funkcja  $F$  dzięki czemu istnieje możliwość syntezy obrazów z nowych, nieobserwowanych wcześniej perspektyw (Rysunek 21 a, b). Kolejno, NeRF wykorzystuje dwie sieci mające za zadanie zwiększenie dokładności i efektywności obliczeniowej. Pierwsza z nich szacuje przybliżony rozkład gęstości wzdłuż promienia, co pozwala na wybranie obszarów, w których należy przeprowadzić szczegółowe próbkowanie. Druga natomiast, zajmuje się stricte dokładniejszym próbkowaniem we wcześniej wyselekcjonowanych obszarach, co przekłada się na precyzyjne odwzorowanie szczegółów obiektu. Finalnym etapem jest optymalizacja parametrów sieci tak, aby zminimalizować różnice między obrazami syntetyzowanymi a referencyjnymi (Rysunek 21 c, d) (Mildenhall et al., 2020).



Rysunek 21. Schemat działania NeRF (Mildenhall et al., 2020)

Wykorzystanie NeRF staje się coraz bardziej popularne, zwłaszcza w przypadku obiektów, z którymi ma problem rekonstrukcja MVS - obiekty połyskliwe, przezroczyste i o jednolitej teksturze (Yan et al., 2023). Porównanie wyników dokładności rekonstrukcji z NeRF i MVS wskazują na przewagę pierwszej metody zwłaszcza w trudnych warunkach

oświetleniowych, a także dla obiektów o skomplikowanej geometrii (Murtiyoso et al., 2024; Balloni et al., 2023; Condorelli et al., 2021). Należy jednak wspomnieć, że NeRF wymaga znajomości położenia w przestrzeni zdjęć wprowadzanych do sieci - sam w sobie nie wykonuje orientacji obrazów. Z tego względu należy rozpatrywać wykorzystanie NeRF jako alternatywę dla gęstego matchingu, natomiast wcześniej niezbędna jest orientacja zewnętrzna zdjęć (np. z wykorzystaniem SfM). Integracja obu podejść może przynieść korzyści w jakości i dokładności wykonywanej dokumentacji (Yan et al., 2023).

## 5. Metodyka badań

### 5.1. Koncepcja badań i podstawowe założenia

W ramach prac badawczych planowane jest przeanalizowanie zmienności widoczności nieba w kanionach ulicznych na podstawie zbiorów danych pochodzących z różnych źródeł i okresów czasowych. Kaniony uliczne są szczególną formą zabudowy miejskiej i jako wąskie przestrzenie uliczne charakteryzują się ograniczonym dostępem do światła słonecznego, co ma wpływ między innymi na ich mikroklimat.

Kluczowym aspektem będzie wybór pola badawczego, które powinno spełniać kilka założeń. Przede wszystkim, kanion powinien charakteryzować się wysokim współczynnikiem geometrycznym (wysokość elewacji do szerokości kanionu). Poza infrastrukturą komunikacyjną (chodnikami i jezdnią) w przestrzeni tej konieczna jest obecność terenów zielonych, w szczególności wysokie zadrzewienia znacząco wpływające na widoczności nieba. Dodatkowo, preferowane będą kaniony o prostoliniowym przebiegu, do których zapewniony jest łatwy dostęp, co umożliwi pozyskanie danych w różnych porach roku, pozwalając na analizę sezonowych zmian widoczności nieba wywołanych rozwojem roślinności.

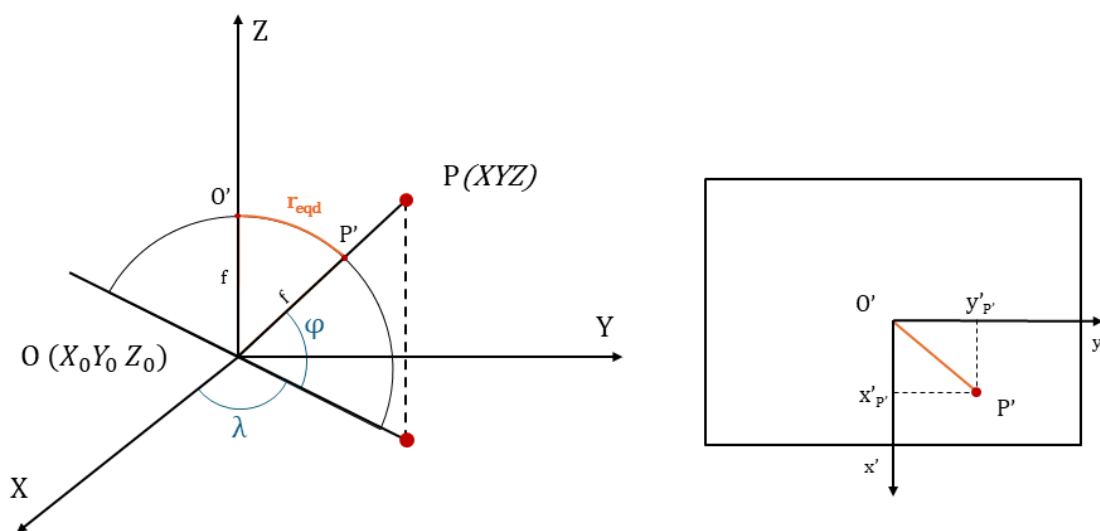
Prace obejmować będą wykorzystanie ogólnodostępnych zasobów, samodzielnie pozyskanych danych pomiarowych, a także integracji tych źródeł. Z publicznie dostępnych zasobów planowane jest skorzystanie z chmur punktów z ALS z różnych lat oraz budynków wektorowych o szczegółowości na poziomie LOD2. Materiały własne obejmą samodzielną rejestrację kanionu ulicznego w różnych okresach wegetacyjnych z wykorzystaniem, głównie niskobudżetowych sensorów pasywnych (aparat) z uzupełnieniem sensorem aktywnym (skaner).

Wyznaczenie współczynnika widoczności nieba (SVF) zrealizowane będzie dwoma metodami: **fotograficzną (2D) i hybrydową (3D)**.

**Metoda fotograficzna (2D)** obejmie wyznaczenie SVF na podstawie samodzielnie pozyskanych obrazów, które poddane będą opracowaniu z wykorzystaniem algorytmów Image Processing. W pierwszym etapie niezbędne będzie pozyskanie informacji obrazowej z poziomu ulicy w taki sposób, aby zapewnić pełne pokrycie analizowanego odcinka kanionu. W zależności od możliwości zastosowanego sensora, planowane jest wykonywanie standardowych zdjęć jak i wybór poszczególnych kadrów z nagrań wideo (metoda fotograficzna wysoko- i niskorozdzielcza). Pozyskanie danych odbędzie się w różnych porach roku. Dla tak zebranych obrazów konieczne będzie wykonanie orientacji przestrzennej, pozwalającej na umiejscowienie poszczególnych zdjęć w konkretnych lokacjach XYZ. Proces ten zrealizowany zostanie w oparciu o punkty charakterystyczne w kanionie, których współrzędne będą znane (wyznaczone w trakcie pomiaru własnego w układzie PL-1992 (EPSG:2180)). Na obrazach zostanie wyodrębniony obszar nieba a potem nastąpi binaryzacja. Na podstawie tak opracowanych danych, zostanie obliczony SVF jako stosunek liczby pikseli reprezentujących niebo do wszystkich pikseli obrazu.

Obliczenia wykonane będą dla wielu lokalizacji w obrębie kanionu, w celu przeanalizowania zarówno czasowej, jak i przestrzennej zmienności współczynnika.

**Metoda hybrydowa (3D)** polegać będzie na wykorzystaniu różnych typów danych przestrzennych w celu stworzenia wirtualnego modelu 3D kanionu ulicznego. W skład modelu wejdą wektorowe budynki oraz chmury punktów reprezentujące przestrzeń pomiędzy elewacjami. Planowane jest wykorzystanie chmur: ze skaningu lotniczego (ALS), ze skanowania mobilnego (MLS) oraz z opracowania fotogrametrycznego. Dane te będą wymagały uprzedniego przygotowania. W przypadku ALS wyodrębniona zostanie tylko klasa wysokiej roślinności, natomiast skanowanie mobilne wymagał będzie orientacji w układzie państwowym oraz filtracji. Chmury punktów z sensorów fotograficznych powstaną z wykorzystaniem algorytmów SfM-MVS na podstawie serii obrazów pozyskanych z poziomu ulicy, analogicznie jak w przypadku metody fotograficznej. Poszczególne chmury punktów zostaną zintegrowane z wektorowymi modelami budynków. Obliczenie współczynnika widoczności nieba zrealizowane będzie poprzez wirtualne fotografowanie obiektywem fish-eye modelu kanionu z określonych lokacji XYZ (tożsamy z pozycją zdjęć wyznaczonych przy metodzie fotograficznej). Wykorzystane zostanie odwzorowanie wiernoodległościowe, a układ kamery będzie miał osie równoległe do terenowego układu współrzędnych PL-1992.



Rysunek 22. Przeliczanie współrzędnych przestrzennych na płaskie (hemisferyczne)

W pierwszym etapie współrzędne przestrzenne każdego punktu (XYZ) przeliczane będą względem pozycji kamery (obserwatora) ( $X_0Y_0Z_0$ ):

$$\Delta x = X - X_0 \quad \Delta y = Y - Y_0 \quad \Delta z = Z - Z_0 \quad (16)$$

Następnie obliczona zostanie odległość od kamery ( $d$ ), oraz kąty: azymut ( $\lambda$ ) i elewacja ( $\varphi$ ):

$$d = \sqrt{(\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)} \quad (17)$$

$$\lambda = \text{atan2}(\Delta y, \Delta x) \quad \varphi = \arcsin\left(\frac{\Delta z}{r}\right) \quad (18)$$

Funkcja  $\text{atan2}$  zwraca kąt  $\lambda$  w zakresie  $(-\pi, \pi]$  mierzony od osi X do punktu (X,Y), z uwzględnieniem ćwiartki układu współrzędnych. Na podstawie równań (13) wyznaczony będzie promień odwzorowania rzutowego zgodnie ze wzorem dla projekcji hemisferycznej:

$$r_{eqd} = f \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \quad (19)$$

gdzie  $f$  to ogniskowa kamery wirtualnej (jej wielkość może być przyjęta arbitralnie, decyduje o skali obrazu). Współrzędne punktu P na obrazie wirtualnym ( $x'$ ,  $y'$ ) wyznaczone będą jako:

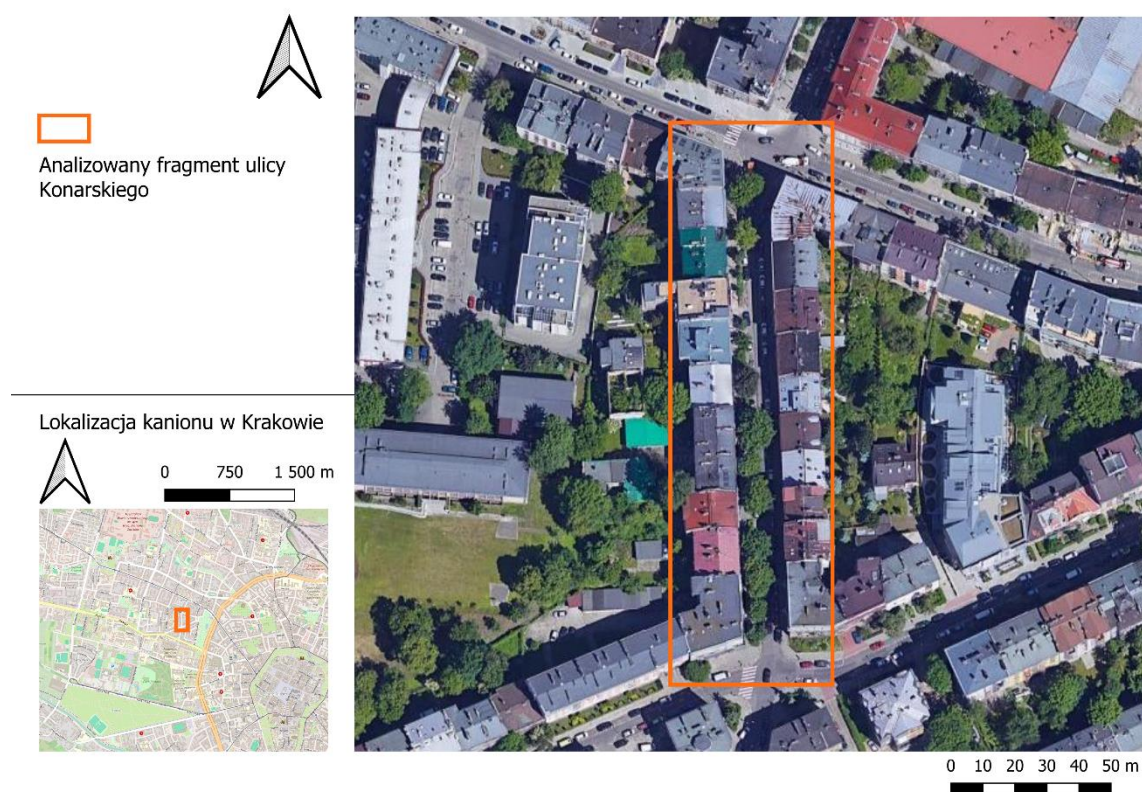
$$x' = r_{eqd} \cdot \cos(\lambda) \quad y' = r_{eqd} \cdot \sin(\lambda) \quad (20)$$

Po zadeklarowaniu rozmiaru piksela współrzędne  $x'$ ,  $y'$  będą przeliczane do układu pikselowego, w wyniku czego powstanie obraz rastrowy. Tworzenie obrazów wirtualnych będzie prowadzone oddzielnie dla danych powierzchniowych (budynki w formacie GML) i dla danych punktowych (chmury punktów reprezentujące roślinność i obiekty smukłe). SVF obliczony będzie jako stosunek pikseli niezastłoniętych (niebo) do wszystkich pikseli znajdujących się w okręgu wpisanym w kwadratowy obraz.

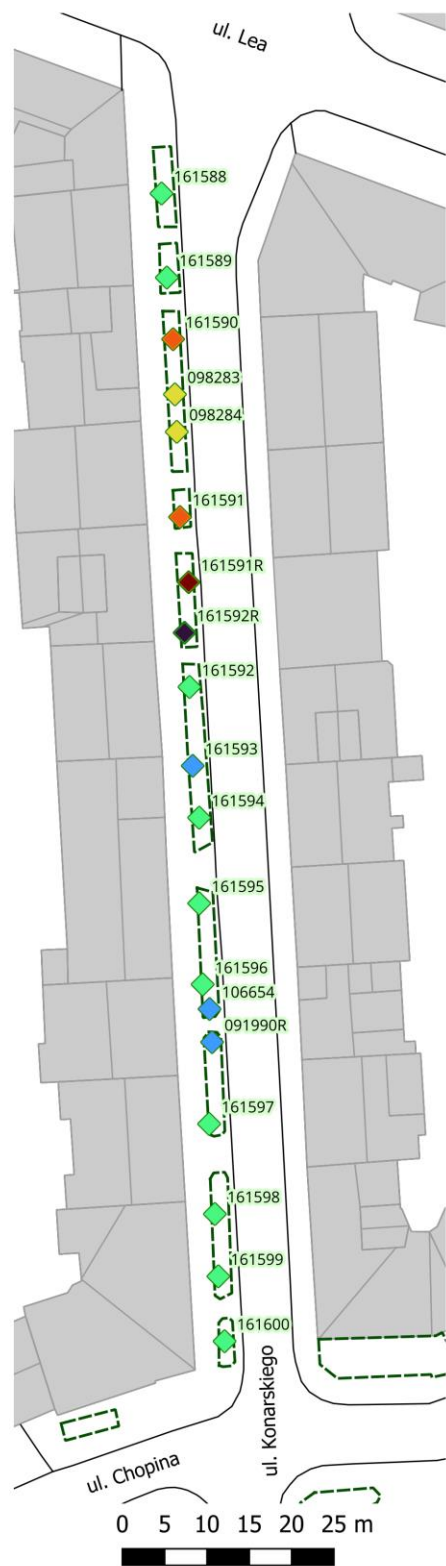
Analizie zostaną poddane wartości SVF uzyskane obiema metodami, zarówno w ujęciu przestrzennym, jak i czasowym.

## 5.2. Kaniony uliczne - pola badawcze

W ramach badań wstępnych przeanalizowano kilka kanionów ulicznych z drzewami znajdujących się w Krakowie. Jako główny poligon badawczy wybrano fragment ulicy Stanisława Konarskiego położonej w dzielnicy V - Krowodrza, na odcinku między ulicami Chopina od południa i Lea od północy (długość blisko sto pięćdziesiąt metrów) (Rysunek 23). Odcinek ten charakteryzuje się szerokością około piętnastu metrów. W tej wąskiej przestrzeni występują chodniki po obu stronach jednokierunkowej jezdni, na której dodatkowo, z każdej strony, wyznaczone są miejsca postojowe dla samochodów. Co więcej, od strony zachodniej, chodnik oddzielony jest od jezdni pasem zieleni, w którym występują stare, wysokie drzewa (przeważnie klony), jak i niższe - młodsze nasadzenia. Szczegółową charakterystykę gatunkową oraz szacowaną wysokość i przekrój korony przedstawia (Rysunek 24). Budynki znajdujące się przy tej ulicy są wielokondygnacyjne - od dwóch do pięciu kondygnacji, co przekłada się na wysoki współczynnik geometryczny kanionu.



Rysunek 23. Lokalizacja ulicy Konarskiego - podkłady, Open Street Map i Google Satellite Map



- Gatunki drzew
- ◆ Forsycja pośrednia
  - ◆ Grab pospolity
  - ◆ Klon zwyczajny
  - ◆ Jarzęb pospolity
  - ◆ Jarzęb szwedzki
  - ◆ Jaśminowiec wonny
  - ▭ Zieleńce
  - Budynek

Nr	Gatunek rośliny	Wysokość zakres [m]	Obwód pnia [cm]	Średnica korony [m]
091990R	Grab pospolity	< 5	18	2
098283	Jarzęb pospolity	< 5	17	2
098284	Jarzęb pospolity	< 5	16	2
106654	Jarzęb pospolity	< 5	17	2
161588	Klon zwyczajny	15-20	166	6
161589	Klon zwyczajny	15-20	148	6
161590	Jarzęb szwedzki	5-10	67	5
161591	Jarzęb szwedzki	5-10	66	4
161591R	Jaśminowiec wonny	15-20	41; 34; 36	4
161592R	Forsycja pośrednia	< 5	2	1
161592	Klon zwyczajny	15-20	158	6
161593	Grab pospolity	< 5	17	1
161594	Klon zwyczajny	15-20	137	6
161595	Klon zwyczajny	15-20	168	6
161596	Klon zwyczajny	15-20	148	7
161597	Klon zwyczajny	15-20	138	6
161598	Klon zwyczajny	20-25	168	7
161599	Klon zwyczajny	10-15	121	6
161600	Klon zwyczajny	5-10	117	5

Rysunek 24. Ulica Konarskiego - rozkład gatunkowy drzew (źródło informacji o gatunkach: Zarząd Zieleni Miejskiej w Krakowie)

Jako dodatkowe pola badawcze wybrano kaniony uliczne we włoskiej miejscowości Siena - fragment Via S. Martino, Via di Salicotto (odcinki prostoliniowe) oraz Casato di Sotto (odcinek krzywoliniowy). W odróżnieniu od pola badawczego w Krakowie, kaniony te pozbawione są roślinności, natomiast są zdecydowanie węższe niż ulica Konarskiego (szerokość około sześciu metrów) (Rysunek 26). Białym rombem oznaczono początki kanionów.



Rysunek 25. Badane kaniony uliczne w historycznym centrum Sieny, podkład Google Satellite Map



Rysunek 26. Przykład kanionu ulicznego w Sienie - Casato di Sotto (po lewej), Via di Salicotto (po prawej) - Google Street View

Poniższa (Tabela 3) zawiera informacje o charakterystyce pól badawczych. Konarskiego stanowi główny poligon badawczy do oceny zmian SVF spowodowanych przez roślinność w ciągu roku.

Tabela 3. Zestawienie charakterystyk pól badawczych

<i>Pole badawcze</i>	<i>Długość [m]</i>	<i>Rodzaj kanionu</i>
Via S. Martino	~80	Bez drzew, prostoliniowy
Via di Salicotto	~120	Bez drzew, z dziedzińcami, prostoliniowy
Casato di Sotto	~150	Bez drzew, krzywoliniowy
Konarskiego	~150	Z drzewami, prostoliniowy

### 5.3. Testowane sensory fotograficzne i ich kalibracja

W ramach prac przygotowawczych oceniono możliwość stosowania niskobudżetowych sensorów do rejestracji przestrzeni miejskiej jako alternatywy dla klasycznych (często drogich) urządzeń fotograficznych. Zdecydowano się sprawdzić dwa rodzaje urządzeń rejestrujących: smartfon oraz kamerę sferyczną. W Polsce blisko 75% społeczeństwa jest posiadaczem telefonu typu smartfon. Obecnie standardem w tego typu urządzeniach jest kilka wbudowanych aparatów o różnej charakterystyce. Najczęściej są to obiektywy szerokokątne, ultraszerokokątne a także, coraz popularniejsze, teleobiektywy. Kamery sferyczne nie są tak powszechne jak smartfony, jednak stale zyskują na popularności, głównie ze względu na możliwość wykonywania panoram trzysta sześćdziesiąt stopni. Co więcej, na rynku dostępne są obiektywy fish-eye jako nakładki na obiektyw w smartfonie.

Głównym testowanym smartfonem był Samsung Galaxy S10 (Rysunek 27 po lewej) z wbudowanymi czterema obiektywami (Tabela 4). Część z nich wyposażona jest w autofocus typu Dual Pixel. Oznacza to, że każdy piksel matrycy wykorzystywany jest jednocześnie do rejestracji koloru oraz detekcji fazy. Piksel zawiera dwie fotodiody skierowane odpowiednio w lewo i prawo. Podczas rejestracji sceny porównywane są fazy z każdej pary fotodiod dzięki czemu można uzyskać autofocus w kilka milisekund bez utraty jakości obrazu. (“What is Dual Pixel Autofocus? Camera tech explained - Android Authority,” n.d.).

Domyślnym aparatem jest obiektyw o kącie widzenia 75° w kierunku horyzontalnym i ogniskową nominalną 4.32 mm. Dla tego obiektywu istnieje możliwość wykonywania zdjęć i nagrań w trybie profesjonalnym, gdzie użytkownik samodzielnie ustawia parametry aparatu takie jak ISO, czas naświetlania, przysłonę czy głębię ostrości. Właśnie dla tego obiektywu przeprowadzane były testy stałości EOW.

Tabela 4. Specyfikacja obiektywów Samsung Galaxy S10 (“Dane techniczne aparatów w Galaxy S10 | Samsung Polska,”) )

<i>Obiektyw</i>	<i>Specyfikacja</i>
Przedni	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ rozdzielczość 10 MP,</li> <li>❖ autofocus typu Dual Pixel.</li> </ul>
Z tyłu, teleobiektyw	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ rozdzielczość 12 MP,</li> <li>❖ FOV 45°,</li> <li>❖ dwukrotny zoom,</li> <li>❖ oprogramowanie OIS do redukcji rozmycia.</li> </ul>
Z tyłu, szerokokątny	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Rozdzielczość 12MP,</li> <li>❖ FOV 77°,</li> <li>❖ z podwójną przysłoną f/1.5-f/2.4,</li> <li>❖ autofocus typu Dual Pixel,</li> <li>❖ oprogramowanie OIS do redukcji rozmycia.</li> </ul>
Z tyłu, ultraszerokokątny	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Rozdzielczość 16 MP,</li> <li>❖ FOV 123°.</li> </ul>



Rysunek 27. Wykorzystanie urządzenia fotograficzne do rejestracji: po lewej Samsung Galaxy S10, po prawej Ricoh THETA X. (<https://www.samsung.com/pl/smartphones/galaxy-s10/specs/>; <https://ricohtheta.eu/pl/products/ricoh-theta-x>)

Drugim testowanym narzędziem była kamera sferyczna Ricoh THETA X (Rysunek 27 po prawej). Urządzenie to składa się z dwóch obiektywów typu fish-eye o rozdzielczości ok. 48 MP każdy, z przysłoną f/2.4, o nominalnej ogniskowej 1.37 mm. Oba obiektywy posiadają zestaw siedmiu niezależnych soczewek (“RICOH THETA - Kamery 360°: Ricoh Theta X - wyjątkowa jakość,” n.d.). Kamera pozwala na wykonywanie zdjęć oraz nagrań

w trybie profesjonalnym (użytkownik sam definiuje ISO, czas naświetlania). Domyślnie urządzenie zapisuje scalony obraz z dwóch obiektywów w odwzorowaniu walcowym wieronoodległościowym. Istnieją jednak wtyczki pozwalające na separację zdjęć i zapisanie ich jako pojedyncze obrazy fish-eye np. udostępniona na licencji MIT „Theta bitrate” (Oda, 2024) (Rysunek 28). Niestety, narzędzie to nie umożliwia ekstrakcji osobnych obrazów z nagrań.



Rysunek 28. Przykład zastosowania wtyczki Theta bitrate do rozdzielania obrazu panoramicznego na obrazy fish-eye

### ***Kalibracja sensorów***

Samsung Galaxy S10 stał się przedmiotem szeregu badań mających na celu określenie, czy w przypadku tego typu urządzeń można mówić o stałości elementów orientacji wewnętrznej. Zdecydowano się na sprawdzenie urządzenia na dedykowanym polu kalibracyjnym (skonstruowanym na potrzeby pracy magisterskiej), jak również na prostym teście szachownicowym Zhanga. Sposób estymacji EOW uzależniony był od rodzaju fotografowanego pola testowego.

Dla zdjęć pola kalibracyjnego wykorzystano Agisoft Metashape (“Agisoft Metashape Professional,”), który modeluje zniekształcenia kamery zgodnie z modelem Brown’a w procesie SfM. W ramach eksperymentów wykonywano po cztery zdjęcia pola testowego w trzech szeregach w określonej konfiguracji: z lewej, centralne lewe, centralne prawe i z prawej (kadr horyzontalny) (Jasińska, 2022). Schemat ten wypracowano na bazie propozycji (Akca and Gruen, 2009) rezygnując jednak z obracania o dziewięćdziesiąt stopni zdjęć centralnych. Założono, że osie zdjęcia są ortogonalne a piksele matrycy kwadratowe. Odległość fotografowania oscylowała w granicach 1.10 - 1.40 m. Wszystkie parametry aparatu (czas naświetlania, przysłona, ISO, głębia ostrości) ustawiane były manualnie.

Na podstawie ponad setki zestawów kalibracyjnych, stwierdzono, że wyznaczone EOW nie zachowują stałości, a wykorzystany model Browna nie eliminuje w pełni zniekształceń obrazu (wykres resztek nie ma charakteru losowego, pozostają charakterystyczne okręgi niewyeliminowanych zniekształceń).

W związku z niezadowalającymi wynikami kalibracji badanego smartfona, do badań włączono inne modele telefonów różnych producentów (m.in. Xiaomi, iPhone, Redmi, Huawei), testując ich aparaty w regularnych odstępach czasu na szachownicy. Do wyznaczenia EOW dla tych zestawów wykorzystano program camera-calibration-with-large-chessboards na licencji MIT (Midtiby, 2022). Zaletą tego rozwiązania jest fakt, że wewnętrzne narożniki szachownicy lokalizowane są poprzez zastosowanie splotu do obrazu wejściowego w skali szarości z jądrem składającym się z liczb zespolonych. Struktura jądra wybierana jest w taki sposób, aby narożniki szachownicy generowały silną odpowiedź. Po wykryciu, lokalizacje narożników są numerowane, a następnie funkcja kalibracji kamery OpenCV (“Open Source Computer Vision Library,” 2015) stosowana jest do określenia parametrów kamery. Dzięki systematycznie zbieranym zestawom, możliwe było ocenienie zmian w estymowanych EOW. Na tej podstawie udało się określić, że niektóre modele smartfonów zachowują stałość swojej orientacji wewnętrznej na przestrzeni ponad miesiąca. Szczegółowe wyniki badań omówiono w artykule (Jasińska et al., 2023).

Na podstawie doświadczeń z kalibracji smartfona stwierdzono, że gdy w fotografowanej scenie miejsca bez tekstury zajmują znaczną część kadru (co powoduje nierównomierne rozłożenie punktów wiążących), wówczas korzystne jest wykonanie wstępnej kalibracji na podstawie wzoru szachownicy. Uzyskane w ten sposób parametry kalibracji traktowane są jako przybliżone dla samokalibracji wykonywanej w procesie wyrównania sieci zdjęć fotografowanej sceny.

Kalibracja kamery sferycznej odbyła się na polu kalibracyjnym w ośrodku Politechniki Warszawskiej CENAGIS w Józefosławiu.<sup>1</sup> Znajdują się tam dwie prostopadłe do siebie ściany z punktami pomiarowymi oraz szereg znaków na podłodze i suficie (Rysunek 29).

---

<sup>1</sup> Podziękowania dla Pani *dr hab. inż. Doroty Zawieskiej* za możliwość skorzystania z laboratorium oraz dla *Jakuba Markiewicza* oraz *Sławomira Łapińskiego* za pomoc w realizacji pomiarów.



Rysunek 29. Laboratorium kalibracji skanerów laserowych i kamer cyfrowych (<https://cenagis.edu.pl/laboratoria/>)

Zestawy kalibracyjne wykonano w dwóch wersjach. Klasycznie, wykonując zdjęcia oraz nagrywając wnętrze pomieszczenia. Wyznaczenie EOW wykonano w Agisoft Metashape. Oprogramowanie to oferuje możliwość pracy zarówno na klasycznych zdjęciach, jak również na obrazach fish-eye i sferycznych, jednak w przypadku tych ostatnich nie ma możliwości wykonania kalibracji kamery. Z tego względu zdecydowano się na opracowanie danych ze zdjęć fish-eye. Po ekstrakcji klatek z nagrań, obrazy zostały przeliczone z odwzorowania walcowego na zdjęcia typu rybie oko z wykorzystaniem skryptu w języku R autorstwa Tsuyoshi Honjo (Honjo, 2017). W wyniku przetworzenia powstały dwa obrazy fish-eye: w odwzorowaniu wiernopowierzchniowym i wiernoodległościowym. Różnica pomiędzy tymi obrazami nie jest bardzo wyraźna, promień koła jest jednakowy na obu zdjęciach, jednak po dokładnym przyjrzeniu się widać, że w przypadku odwzorowania równopowierzchniowego występuje więcej pikseli reprezentujących niebo niż w przypadku wieronoodległościowego (Rysunek 30). Ze względu jednak na specyfikę zaimplementowanego modelu kamery fish-eye w Agisoft (odwzorowanie wiernoodległościowe (Tommaselli et al., 2023)), obrazy w tym odwzorowaniu wykorzystano do kalibracji i późniejszej rekonstrukcji. Wyznaczone EOW w oparciu o fotopunkty stosowano jako kalibracja do wszystkich realizowanych zestawów. W przypadku gdy część zdjęć do rekonstrukcji nie wiązała się z pozostałymi, uruchamiano samokalibrację traktując wyniki kalibracji laboratoryjnej jako wartości przybliżone.



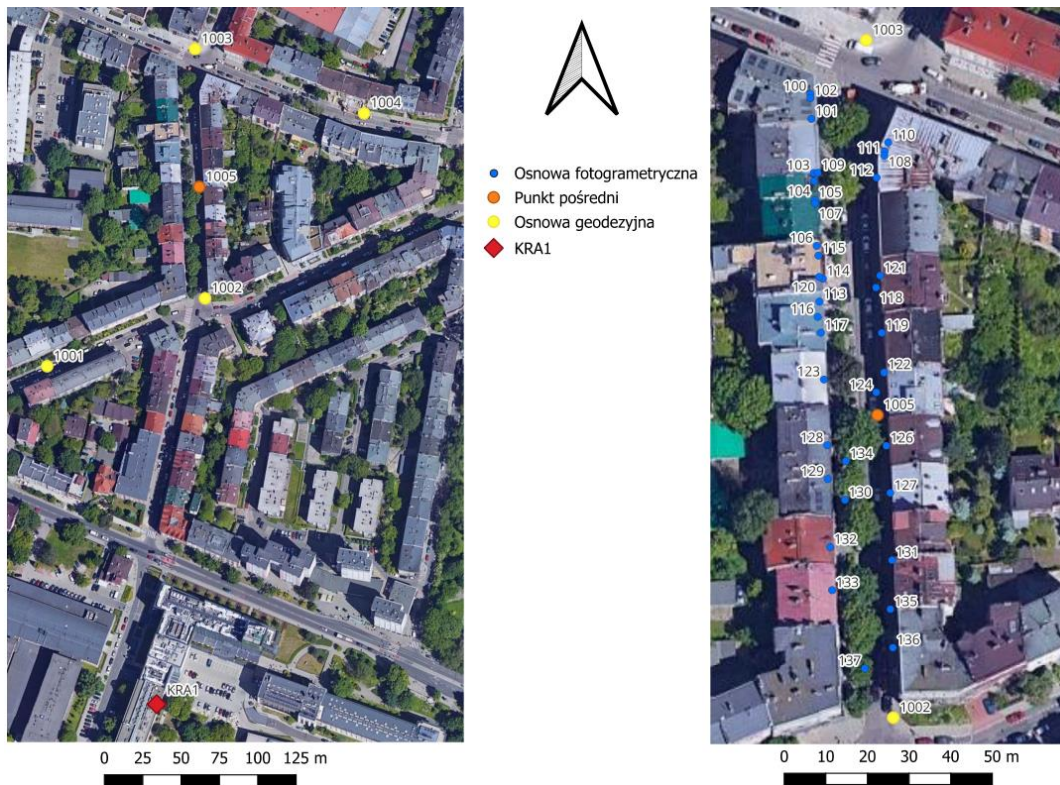
Rysunek 30. Przykładowy fragment zdjęcia sferycznego przetworzonego skryptem (Honjo, 2017) do dwóch obrazów fish-eye - po lewej wiernopowierzchniowe, po prawej wiernoodległościowe

## 5.4. Rejestracja kanionu ulicznego

### 5.4.1. Osnowa pomiarowa

Na potrzeby wyrównania fotogrametrycznego niezbędny był pomiar fotopunktów. W tym celu założono geodezyjną osnowę lokalną złożoną z czterech punktów, których współrzędne wyznaczono w wyniku symultanicznych pomiarów statycznych odbiornikami Leica GS16. Minimalna sesja wspólna trwała czterdzieści minut. Obserwacje nawiązano do punktu fundamentalnej osnowy - stacji bazowej KRA1 (Rysunek 31)<sup>2</sup>. Kolejno poprowadzono ciąg poligonowy pomiędzy punktami, wcinając punkt pośredni w połowie ulicy Konarskiego. Pomiar fotopunktów zrealizowano stosując wielokrotne wcięcie kątowno-liniowe ze stanowisk swobodnych uprzednio wcinanych na punkty ciągu. Ze względu na brak możliwości zamontowania trwałych znaków wybrano elementy charakterystyczne m.in. na elewacjach (np. przecięcia szpalet, tabliczki orientacyjne, numery budynków), na znakach drogowych (Rysunek 32) dbając o zróżnicowanie wysokościowe rozmieszczenia punktów.

<sup>2</sup> Szczególne podziękowania dla *Przemysława Kurasa*, za nieocenione wsparcie merytoryczne przy planowaniu i realizacji osnowy. Dziękuję także *Jakubowi Koleckiemu*, *Annie Malczewskiej*, *Karolinie Pargiele* oraz *Dagmarze Waśniowskiej-Rataj* za udział w pomiarach, a *Katarzynie Januchcie*, za pomoc przy ich opracowaniu.



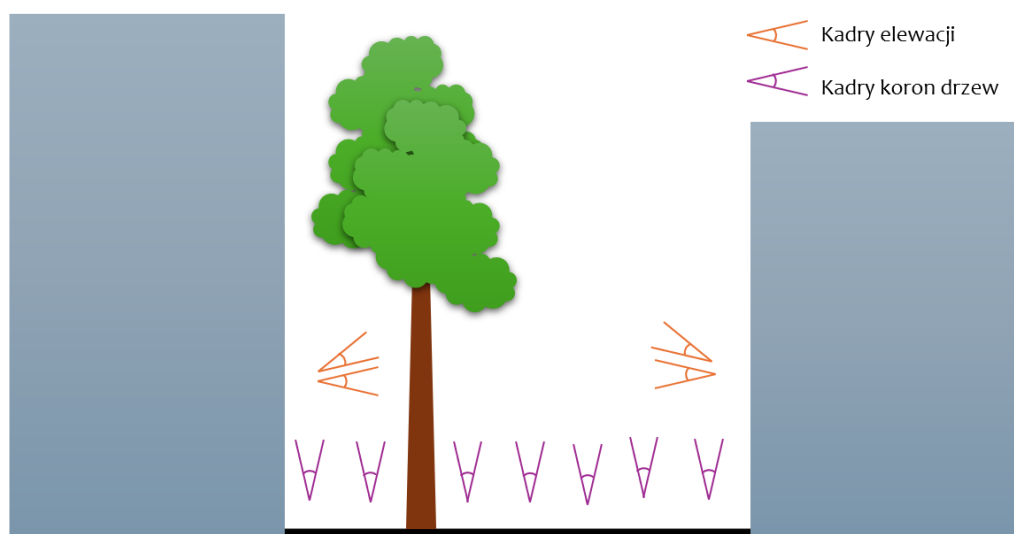
Rysunek 31. Szkic osnowy, podkład Google Satellite Map



Rysunek 32. Przykładowe fotopunkty - kolejno: przecięcie szańca, tabliczka orientacyjna, element znaku drogowego, element elewacji

#### 5.4.2. Wykorzystanie aparatu w smartfonie

W skomplikowanym kanionie (wysokie elewacje i drzewa na Konarskiego) zrezygnowano z robienia zdjęć na rzecz wykonywania wideo rejestracji (w trybie profesjonalnym) w rozdzielczości minimum dwudziestu czterech klatek na sekundę. Ze względu na brak możliwości odejścia, a także stosunkowo nieduży kąt widzenia aparatu, na potrzeby rekonstrukcji wykonano jedenaście nagrań kanionu: siedem, kiedy obiektyw aparatu był skierowany w niebo na korony drzew oraz po dwa nagrania każdej pierzei: pierwsze prostopadłe do naprzeciwległej elewacji oraz drugie w kierunku wierzchołków budynków (Rysunek 33).



Rysunek 33. Schemat pozyskiwania nagrań smartfonem

Dzięki ekstrakcji kadrów z nagrań, możliwe było wybranie ujęć służących do rekonstrukcji. Po przetestowaniu różnych wariantów zdecydowano na selekcję co szóstego kadru z nagrania. W efekcie zestaw zdjęć do wyrównania obejmował ponad tysiąc kadrów. Pomimo zapewnienia minimalnego wymaganego przez oprogramowanie pokrycia wzajemnego pomiędzy kolejnymi obrazami, na etapie wiązania zdjęć występowały błędy. Kadry skierowane w stronę nieba, przedstawiające wyłącznie gałęzie drzew, łączyły się błędnie z pozostałymi zdjęciami, a w niektórych przypadkach całkowicie były pomijane przez algorytm SfM. Co więcej, sam etap łączenia był bardzo czasochłonny pomimo średnich ustawień przeszukiwania podobieństw. Zasadniczą przyczyną powyższych problemów był ograniczony kąt widzenia wykorzystanego obiektywu, co miało kluczowe znaczenie w przypadku ujęć skierowanych w niebo, gdzie jedynym elementem charakterystycznym były wąskie gałęzie. Zastosowanie obiektywu o szerszym kącie zwiększy zakres fotografowanego obszaru, poprawiając skuteczność algorytmów wyszukiwania podobieństw.

W związku z powyższym, zrezygnowano z dalszego stosowania smartfona do rejestracji kanionu ulicznego. Zdecydowano, że pozyskiwanie danych odbędzie się wyłącznie z wykorzystaniem kamery sferycznej.

#### 5.4.3. Wykorzystanie kamery sferycznej

Do pozyskania kompleksowych danych w kanionie wykorzystano kamerę Ricoh THETA X (Rysunek 27). Dzięki wbudowanym obiektywom fish-eye, na jednym obrazie możliwe było uchwycenie elewacji po obu stronach ulicy, które, w odróżnieniu od gałęzi, stanowią dobrą bazę dla punktów wiążących. Nagrania wideo wykonywane były w rozdzielczości trzydziestu klatek na sekundę. Na Konarskiego rejestracji dokonano przemieszczając się wzdłuż obu chodników ulicy. W przypadku kanionów we Włoszech, rejestracja odbywała się w trakcie jednego przejścia wzdłuż kanionu. Na każdym z pól testowych filmy kręcono w taki sposób, że jeden z obiektywów kamery (zawsze ten sam) skierowany był w niebo, a oś kamery była w przybliżeniu pionowa.

W następnym kroku, wyeksportowano klatki z nagrań i dokonano ich selekcji, pierwotnie co szóstej, a finalnie co dwunastej, która miała być wykorzystana do rekonstrukcji. Następnie kadry były przeliczane do wiernoodległościowego obrazu fish-eye analogicznie jak przy kalibracji kamery. Tak przygotowane zestawy stanowiły dane do etapu opisanego w kolejnym podrozdziale.

#### 5.4.4. Orientacja zdjęć i opracowanie chmury punktów

Proces wyrównania zdjęć prowadzony był w Agisoft Metashape Professional ("Agisoft Metashape Professional," n.d.). Oprogramowanie to umożliwia trójwymiarową rekonstrukcję na podstawie dowolnego zestawu zdjęć, pod warunkiem, że występuje wzajemne pokrycie (nie mniejsze niż 50%) pomiędzy kolejnymi kadrami stosując metody SfM i MVS opisane w podrozdziałach 4.2 i 4.3. Podstawowym etapem opracowania, bez którego nie można wykonać kolejnych kroków, jest tzw. wiązanie zdjęć (*Align photos*). W tym procesie algorytm SfM odnajduje homologiczne punkty na kolejnych zdjęciach. Efektem jest wstępnie wyrównana sieć zdjęć oraz chmura punktów wiążących (*Tie points*), na podstawie której program oblicza elementy orientacji zewnętrznej i wewnętrznej aparatu (samokalibracja). Należy wspomnieć, że software umożliwia użytkownikowi filtrację znalezionych punktów ze względu np. na błąd reprojekcji czy też niepewność wiązania, co ma przełożenie na wyznaczone EOW. Samokalibracja jest wyznaczana tylko w sytuacji, gdy orientacja wewnętrzna nie jest wcześniej zdefiniowana przez użytkownika. W tym przypadku kalibracja wyznaczona na polu testowym była wczytana jako inicjalna. Kolejny etap obejmował aerotriangulację sieci zdjęć. Dla zestawów z Konarskiego w ramach SfM wykonano transformację do państwowego układu współrzędnych PL-1992 w oparciu o wskazanie fotopunktów. W przypadku kanionów włoskich wykonano skalowanie modelu w lokalnym układzie współrzędnych. Finalnie, na podstawie wyrównanych zdjęć wykonano gęstą chmurę punktów (semi-global matching). W przypadku Konarskiego chmura okazała się obarczona pewnymi zniekształceniami wynikającymi głównie z różnych warunków oświetleniowych, w jakich zostały wykonane rejestracje. Wokół gałęzi chmura była bardzo zaszumiona, zwłaszcza z zestawów zimowych. Z tego względu użyto kilku algorytmów z CloudCompare ("CloudCompare (version 2.13.alpha) GPL software," 2022) w celu usunięcia duplikatów oraz zredukowania szumów w chmurach bezlistnych (Remove duplicate points, SOR i Noise filter).

#### 5.4.5. Rejestracja kanionu skanerem SLAM

Pomiar kanionu został zrealizowany z wykorzystaniem skanera Emesent Hovermap<sup>3</sup> (Rysunek 34). Urządzenie to stanowi mobilny system wyposażony w LiDAR wykorzystujący algorytmy SLAM, dzięki czemu możliwe jest pozyskiwanie danych również w warunkach bez dostępu do sygnałów GNSS. Ze względu na niewielką masę (poniżej dwóch kilogramów) skaner może być wykorzystany zarówno do pomiarów ręcznych jak i zamontowany na różnych platformach np. na dronie, plecaku czy pojeździe. Szczegółową specyfikację urządzenia przedstawia (Tabela 5).

Rejestracja danych przebiegała najpierw wzdłuż jednego chodnika, natomiast powrót odbył się drugim chodnikiem, co umożliwiło pełną dokumentację przestrzeni kanionu.



Rysunek 34. Wykorzystany skaner Emesent Hovermap (źródło: <https://geotronics.com.pl/produkty-i-rozwiazania/systemy-mobilne/emesent-hovermap>)

Tabela 5. Specyfikacja skanera Emesent Hovermap (źródło: <https://geotronics.com.pl/dokumenty/broszury/systemy-mobilne/emesent-hovermap-arkusz-danych.pdf>)

<i>Parametr</i>	<i>Specyfikacja</i>
Zasięg	0.40 - 100 m
Dokładność LiDAR	± 30 mm
Dokładność mapowania	± 20 mm w ogólnych warunkach ± 15 mm w warunkach podziemnych i w budynkach ± 5 mm skanowanie z bliskiej odległości
Mapowanie SLAM	Dryft rzędu ± 0.03% dokładności mapowania
FOV	360° x 360°

<sup>3</sup> Podziękowania dla firmy **Geotronics Dystrybucja**, w szczególności dla *Pana Wojciecha Stolarskiego* za udostępnienie sprzętu i realizację pomiarów.

## 5.5. Wyznaczanie SVF

Wyznaczanie współczynnika widoczności nieba w kanionie ulicznym wykonano w kilku wariantach w zależności od dostępnego materiału badawczego - udostępnionego publicznie lub zebranego samodzielnie. Dla kanionów ze Sieny obliczenia obejmowały obrazy sferyczne wyselekcjonowane z nagrań i przetworzone do obrazów fish-eye - metoda fotograficzna (2D) niskorozdzielcza. Natomiast dla ulicy Konarskiego wykonano obliczenia metodą fotograficzną (2D):

- ❖ wysokorozdzielczą - zdjęcia fish-eye zimowe i letnie (**2 zestawy**),
- ❖ niskorozdzielczą - obrazy sferyczne wyselekcjonowane z nagrań przetworzone do obrazów fish-eye (**3 zestawy**),

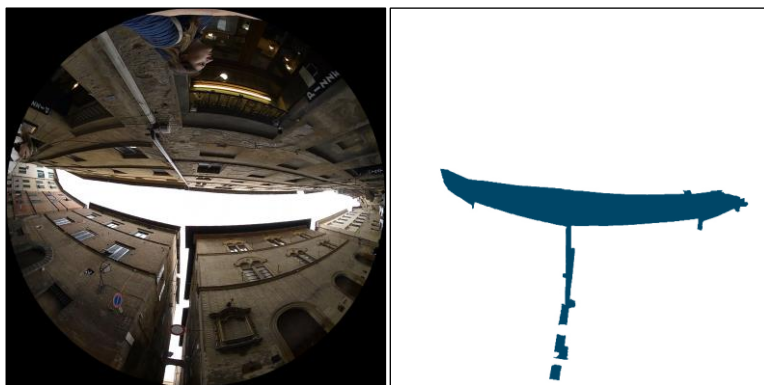
oraz hybrydową (3D):

- ❖ budynki LOD2 oraz chmury punktów (klasa drzewa) z ALS (**3 zestawy**),
- ❖ budynki LOD2 oraz chmury punktów z rejestracji kamerą sferyczną (**10 zestawów**),
- ❖ budynki LOD2 oraz chmura punktów ze SLAM (**1 zestaw**).

Specyfikacja zestawów omówiona została w (Tabela 7).

### 5.5.1. SVF na przykładzie kanionów bez drzew

Dla wszystkich kanionów przetworzono nagrania zgodnie z opisem przygotowania danych do kalibracji z rozdziału 5.3. Ze względu na niewielką szerokość kanionu, zdecydowana większość obrazu (ponad 80%) zajmowały elewacje. Na wygenerowanych zdjęciach wyznaczono obszar zajęty przez niebo. W tym celu stworzono skrypt, który tworzył binarną maskę sprawdzając czy piksel obrazu oryginalnego jest w zadanym kolorze z określoną tolerancją. Jeśli tak, to jego odpowiednik w masce przyjmował wartość zero. Pomimo sprzyjających warunków atmosferycznych, w których wykonano nagrania (jednorodne, jasnoszare niebo), powstałe maski wymagały niewielkich korekt manualnych, ze względu na włączenie do maskowanego obszaru np. odbitego w szybach okiennych nieba. Następnie dla każdej maski został policzony współczynnik SVF jako stosunek sumy zamaskowanych pikseli, do wszystkich dostępnych w okręgu zdjęcia fish-eye.



Rysunek 35. Kanion w Sienie, Casato di Sotto - przykład maskowania nieba na zdjęciach fish-eye (niebo w kolorze ciemnoniebieskim)

### 5.5.2. SVF na przykładzie kanionu zadrzewionego

Dla zdjęć fish-eye wysokorozdzielczych oraz trzech wybranych zestawów danych służących do rekonstrukcji fotogrametrycznej wykonano maski analogicznie jak dla kanionów w Sienie. Ze względu na różne warunki atmosferyczne, w których dane były pozyskane (niebo z pojedynczymi chmurami, lub niejednorodnie zachmurzone), a także nienaturalne dla klasycznej fotografii wykonywanie zdjęć pod Słońce, część obrazów okazała się prześwietlona. W efekcie proces maskowania, kluczowy etap metody fotograficznej, był bardziej złożony i wymagał zdefiniowania większej liczby kolorów. Przełożyło się to m.in. na zamaskowanie wielu pikseli nie tylko na niebie, ale również na elewacjach. W związku z tym, każda wygenerowana maska wymagała manualnej korekty w obszarze budynków. Dodatkowym aspektem był brak ciągłości gałęzi (zwłaszcza dla zestawów pozyskanych zimą). Problem ich prześwietlenia rozwiązano stosując operację morfologiczną (z oknem 3x3) na poprawionych maskach.



Rysunek 36. Przykład maskowania nieba, ul Konarskiego, kolejno zdjęcie oryginalne, maska z automatyzacji, maska po korektach w obszarze budynków

W przypadku metody hybrydowej wyznaczenie SVF następowało w oparciu o trójwymiarową reprezentację kanionu ulicznego (metoda hybrydowa). W skład modelu 3D wchodziły budynki LOD2 w standardzie CityGML w formacie GML oraz chmury punktów reprezentujące roślinność i inną infrastrukturę znajdującą się w tej przestrzeni np. znaki drogowe. Analizy przeprowadzono poprzez wirtualne fotografowanie obiektywem fish-eye modelu 3D zgodnie ze wzorami opisanymi w rozdziale 5.1 (równania 16 - 20). Punkty chmury wraz z budynkami (wieloboki ścian i dachów) rzutowane były na wirtualną matrycę o rozmiarze dostosowanym, na drodze eksperymentalnej, do gęstości testowanych chmur (ALS, z rejestracji kamera sferyczną i SLAM). Punktem odniesienia dla wyboru rozdzielczości obrazu był rozmiar zdjęcia fish-eye przetworzonego z rejestracji kamerą sferyczną wynoszący 1920 x 1920 pikseli. Punkt chmury nie ma fizycznego rozmiaru przestrzennego, dlatego rzutowanie nie uwzględnia efektu skalowania jaki występuje w rzeczywistym fotografowaniu (w zależności od odległości od kamery zmienia się rozmiar detalu na zdjęciu). Aby zasymulować zmianę skali obrazu wirtualnego wprowadzono podział przestrzeni na strefy odległościowe, a każdej przyporządkowano inną rozdzielczość kadru, odpowiednio dla rodzaju chmury (Tabela 6). Zmniejszenie rozdzielczości na bliskim planie powoduje, że sąsiednie punkty chmury tworzą ciąg sąsiadujących pikseli, co tworzy quasi ciągły obraz drzew i innych obiektów. Obraz

końcowy był generowany jako połączenie rastrów kolejnych rozdzielczości z zastosowaniem interpolacji metodą najbliższego sąsiada.

Tabela 6. Zestawienie rozdzielczości generowanych wirtualnych obrazów

<i>Źródło chmury</i>	<i>Strefy odległości [m]</i>	<i>Rozdzielczość [pix]</i>
ALS	$d \leq 7.5$	240 x 240
	$7.5 < d \leq 15.0$	320 x 320
	$15.0 < d \leq 40.0$	480 x 480
	$d > 40.0$	640 x 640
Rejestracja kamerą sferyczną	$d \leq 2.0$	240 x 240
	$2.0 < d \leq 4.0$	320 x 320
	$4.0 < d \leq 7.0$	480 x 480
	$7.0 < d \leq 12.0$	640 x 640
	$12.0 < d \leq 20.0$	960 x 960
	$20.0 < d \leq 40.0$	1280 x 1280
MLS	$d > 40.0$	1920 x 1920
	$d \leq 1.0$	320 x 320
	$1.0 < d \leq 1.5$	480 x 480
	$1.5 < d \leq 2.2$	640 x 640
	$2.2 < d \leq 3.0$	960 x 960
	$3.0 < d \leq 4.0$	1280 x 1280
	$4.0 < d \leq 8.0$	1920 x 1920
	$8.0 < d \leq 12.0$	2560 x 2560
$d > 12.0$	3840 x 3840	

SVF wyznaczano analogicznie jak w metodzie fotograficznej obliczając stosunek pikseli nieba do wszystkich dostępnych w okręgu obrazu. Wszystkie zestawy danych zostały przeliczone w lokalizacjach wzdłuż obu chodników tożsamych z lokalizacjami zdjęć pozyskanych zimą dla metody fotograficznej wysokorozdzielczej. Dodatkowo wykonano obliczenia dla osi jezdni ul. Konarskiego w interwale jednowymiarowym dla przeciwstawnych pór roku. Na potrzeby porównania wyników metody hybrydowej z metodą fotograficzną wykonano dodatkowe obliczenia na modelu 3D w lokalizacjach zdjęć z metody fotograficznej zrealizowanej w okresie rozwinięcia liści.

Tabela 7. Specyfikacja zestawów opracowanych dla ulicy Konarskiego

Źródło danych	ZDIĘCIA FISH-EYE	NAGRANIA KAMERĄ SFERYCZNĄ		ALS	SLAM
Zestawy	25 II 2025, 28 V 2025	5 X 2023, 5 I 2024, 21 III 2024, 26 III 2024, 3 IV 2024, 9 IV 2024, 1 X 2024, 25 X 2024, 26 II 2025, 28 V 2025	2017, 2021, 2023	Z II 2025	
Przygotowanie		<p>Ekstrakcja i selekcja klatek</p> <p>Przetworzenie z odczorowania walcowego na obrazy fish-eye</p> <p>Orientacja obrazów</p>	Przyjęcie do zakresu opracowania Selekcja klasy "wysokie drzewa"	Orientacja skanu Przyjęcie do zakresu opracowania, Selekcja drzew	
Metoda	<b>Metoda hybrydowa</b>				
Opracowanie	<b>Metoda fotograficzna</b>				
Miejsca dliczeń	Orientacja zdjęć Maskowanie nieba (z manualnymi korektami)	Maskowanie nieba (z manualnymi korektami)	Opracowanie chmury punktów Selekcja i filtracja chmury punktów <b>Integracja z modelem 3D budynków</b>	<b>Integracja z modelem 3D budynków</b>	Odszumienie chmury punktów <b>Integracja z modelem 3D budynków</b>
Wynik dliczeń	Maski binarne	Maski binarne	Wirtualne obrazy	Wirtualne obrazy	Wirtualne obrazy
Morfologia obrazu SVF	SVF	SVF	SVF	SVF	SVF
SVF	SVF	SVF	SVF	SVF	SVF

## 6. Analiza uzyskanych wyników

### 6.1. SVF z metody fotograficznej (2D) na przykładzie kanionów bez drzew

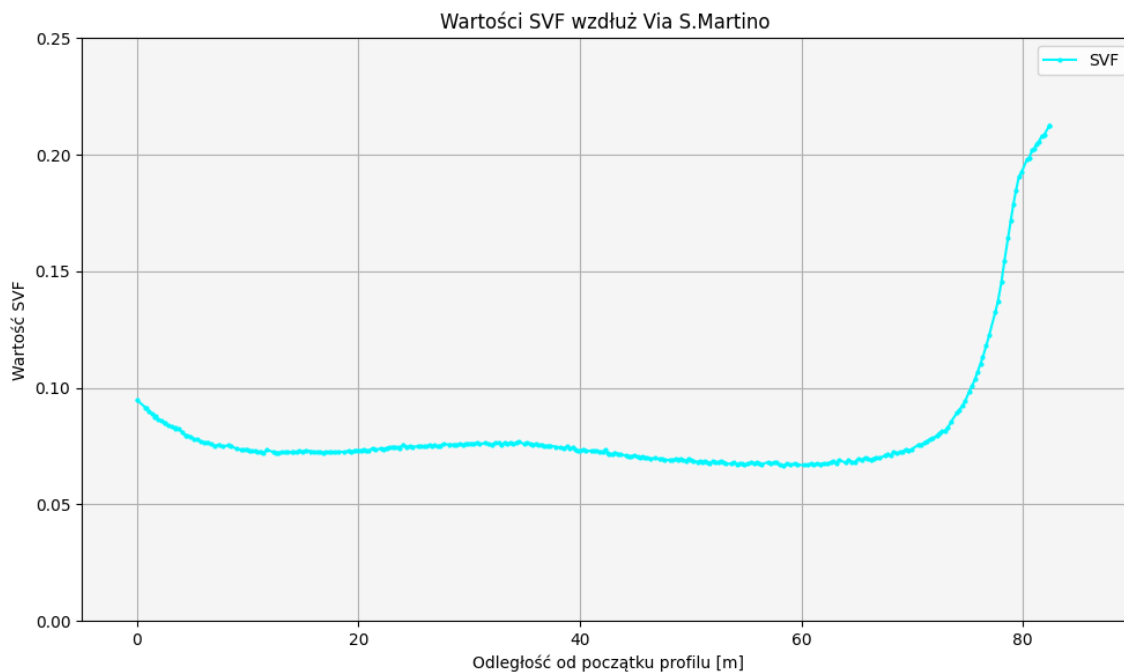
Podrozdział ten skupia się na analizie zmian SVF wyznaczonego metodą fotograficzną niskorozdzielczą dla trzech wybranych ulic znajdujących się w historycznym centrum Sieny. Widoczność nieba obliczono na podstawie opracowania obrazów fish-eye, zgodnie z procedurą opisaną w 5.5.1. Zasadniczym celem było zbadanie zmian w widoczności nieba wynikającej głównie z układu zabudowy oraz lokalnie występujących dziecińców i skrzyżowań. Dla każdego analizowanego kanionu przygotowano profil przedstawiający zmiany wartości współczynnika.



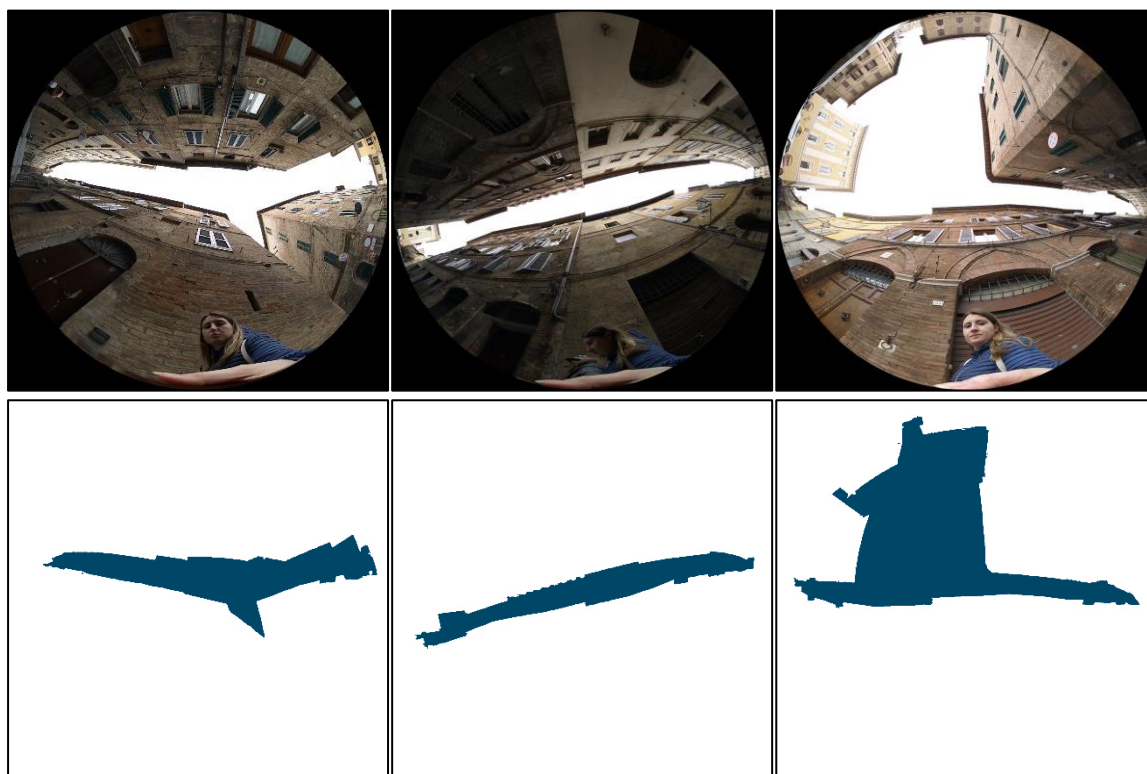
Rysunek 37. Badane kaniony uliczne w historycznym centrum Sieny, podkład Google Satellite Map

#### 6.1.1. Via S. Martino

Początek kanionu ulicznego stanowi wąskie skrzyżowanie, a jego zakończeniem jest prostokątny plac. Odcinek ten ma długość nieco ponad osiemdziesięciu metrów, a jego szerokość wynosi około sześciu metrów. Analizując przebieg profilu (Rysunek 38), jednoznacznie można stwierdzić, że widoczność nieba jest bardzo ograniczona (dominują wartości z przedziału 0.05-0.10). W początkowej części kanionu współczynnik powoli maleje, co związane jest z oddalaniem się od skrzyżowania. Niewielkie zwiększenie wartości SVF zaobserwować można w okolicach trzydziestego piątego metra. Najniższą wartość (0.0667) współczynnik osiąga w sześćdziesiątym pierwszym metrze profilu, natomiast od sześćdziesiątego ósmego metra SVF gwałtownie wzrasta, co wynika ze zbliżania się do otwartego placu, osiągając tam wartość maksymalną (0.2125). (Rysunek 39) zestawia obrazy źródłowe i wygenerowane maski dla pierwszego i ostatniego zdjęcia w kanionie, dodatkowo przedstawiając miejsce z najmniejszą widocznością nieba.



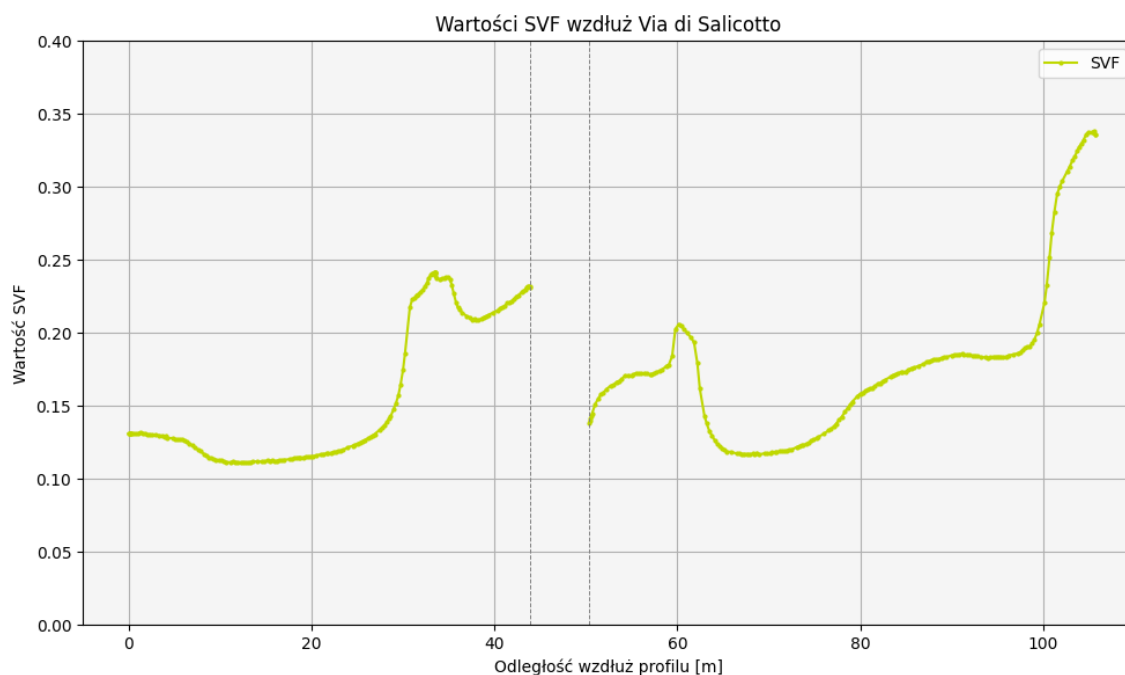
Rysunek 38. Wartości SVF wzdłuż Via S.Martino



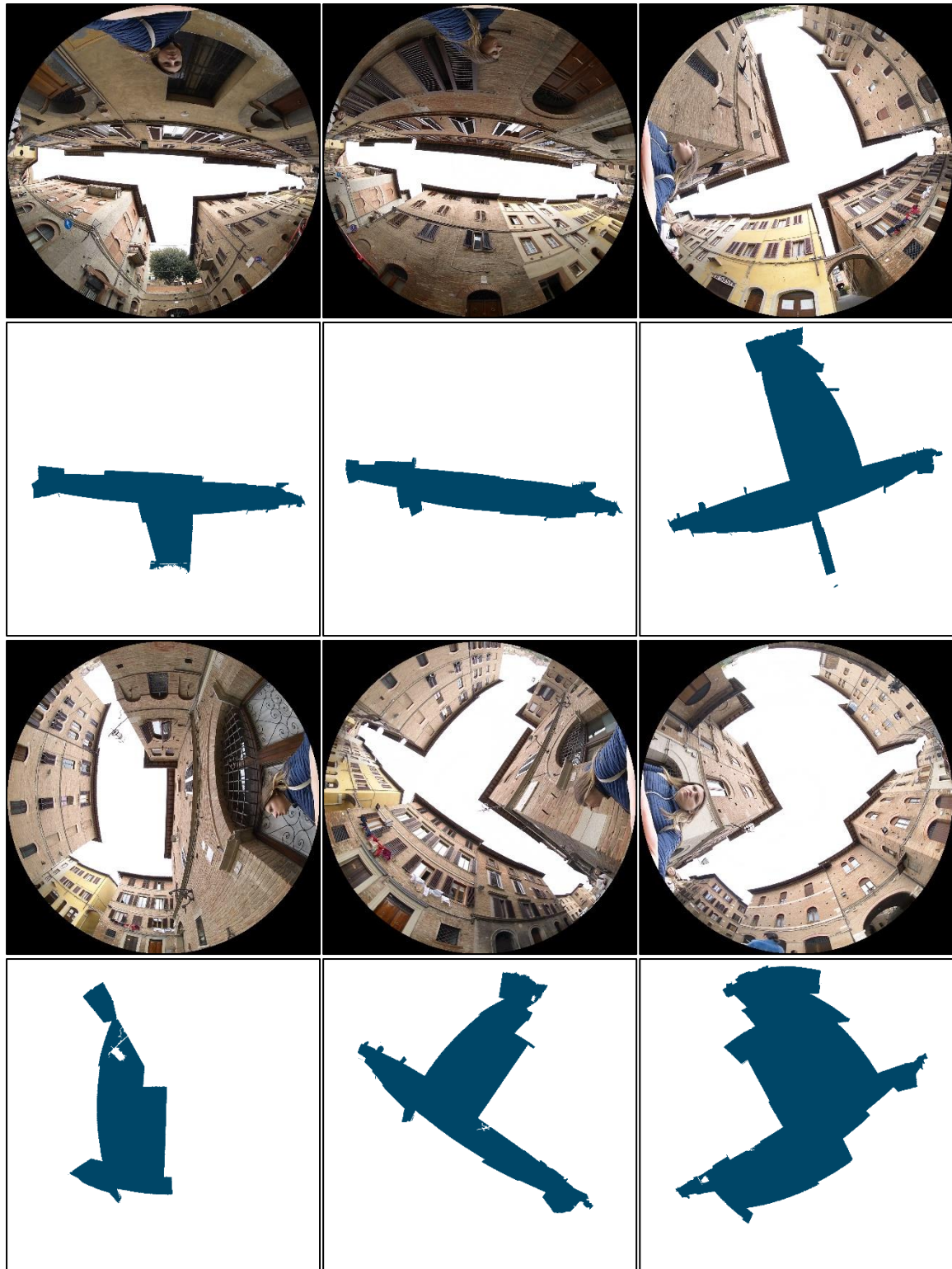
Rysunek 39. Zestawienie obrazów i masek kolejno dla początku kanionu, punktu o najniższym SVF (sześćdziesiąty pierwszy metr), końca kanionu

### 6.1.2. Via di Salicotto

W odróżnieniu od pierwszego analizowanego kanionu, Via di Salicotto to ulica o szerokości około sześciu metrów, wzdłuż której występują niewielki dziedziniec oraz dwa place z otwartym widokiem na sąsiednie wzgórze. Rejestracja podzielona została na dwie części (Rysunek 37). Pierwsza rozpoczyna się przy dziedzińcu z zielenią i kończy przy południowo-zachodnim rogu pierwszego placu, natomiast druga rozpoczyna się w jego południowo-wschodnim narożniku i wraca do osi kanionu kończąc przy drugim placu. Widoczność nieba na analizowanych fragmentach oscyluje w przedziale (0.10-0.35), zauważyć można inną dynamikę zmian niż w przypadku Via S.Martino. W pierwszej części, SVF stopniowo maleje aż do dziesiątego metra (co wynika z oddalania się od dziedzińca). Minimum lokalne występuje na odcinku do czternastego metra (0.1112), a następnie współczynnik zaczyna rosnąć, największą dynamikę wzrostu osiąga od dwudziestego ósmego metra. Między trzydziestym trzecim a trzydziestym piątym metrem znajdują się dwa maksima lokalne (odpowiednio 0.2412 i 0.2384), jest to moment przejścia z osi kanionu na pierwszy plac. Kolejne minimum znajduje się w połowie szerokości placu (trzydziesty ósmy metr - 0.2090), natomiast w miarę zbliżania się do jego skraju wartość współczynnika ponownie wzrasta osiągając 0.2322. Przerwa w wykresie wynika z braku danych na tym odcinku. Po drugiej stronie dziedzińca wartość współczynnika systematycznie rośnie od 0.1386 do maksimum lokalnego (0.2062) w okolicach sześćdziesiątego metra. Ponownie jest to miejsce przejścia z placu do kanionu. Wraz z przemieszczaniem się między budynkami widoczność nieba gwałtownie maleje, osiągając minimum lokalne (0.1169) w sześćdziesiątym ósmym metrze. Następnie SVF sukcesywnie wzrasta. Do około dziewięćdziesiątego drugiego metra przyrost powiązany jest z rozszerzaniem się kanionu. Natomiast w dalszym odcinku wzrost jest bardzo gwałtowny, ociągając maksimum (0.3384), co związane jest z kolejnym placem, który przylega do kanionu.



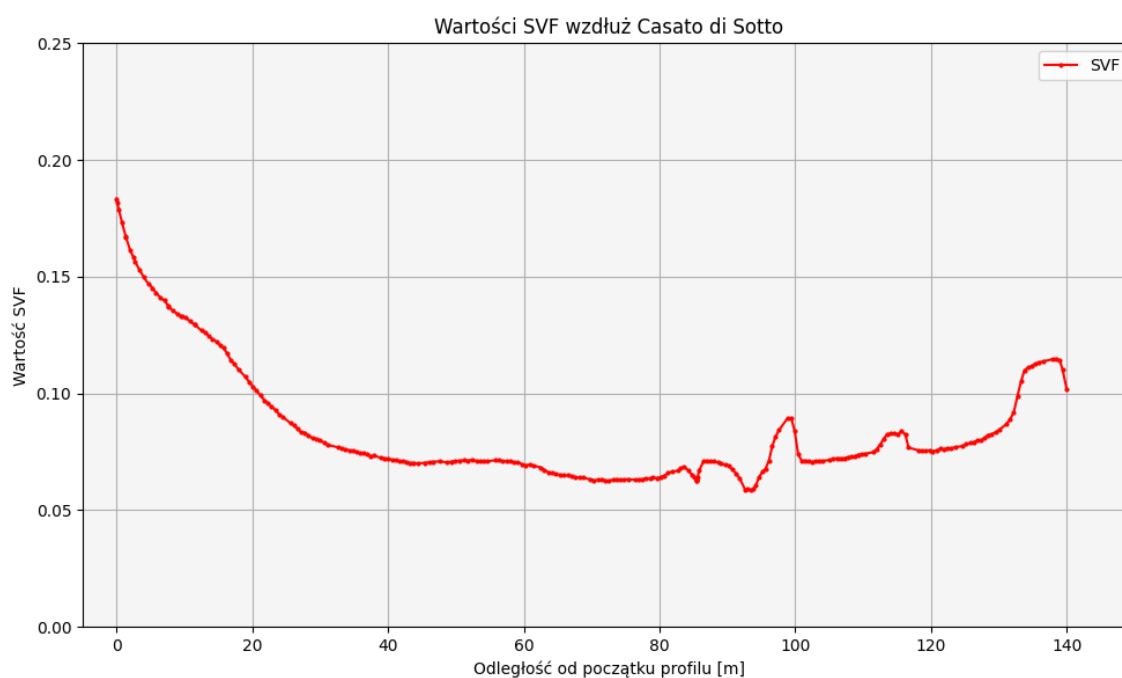
Rysunek 40. Wartości SVF wzdłuż Via di Salicotto



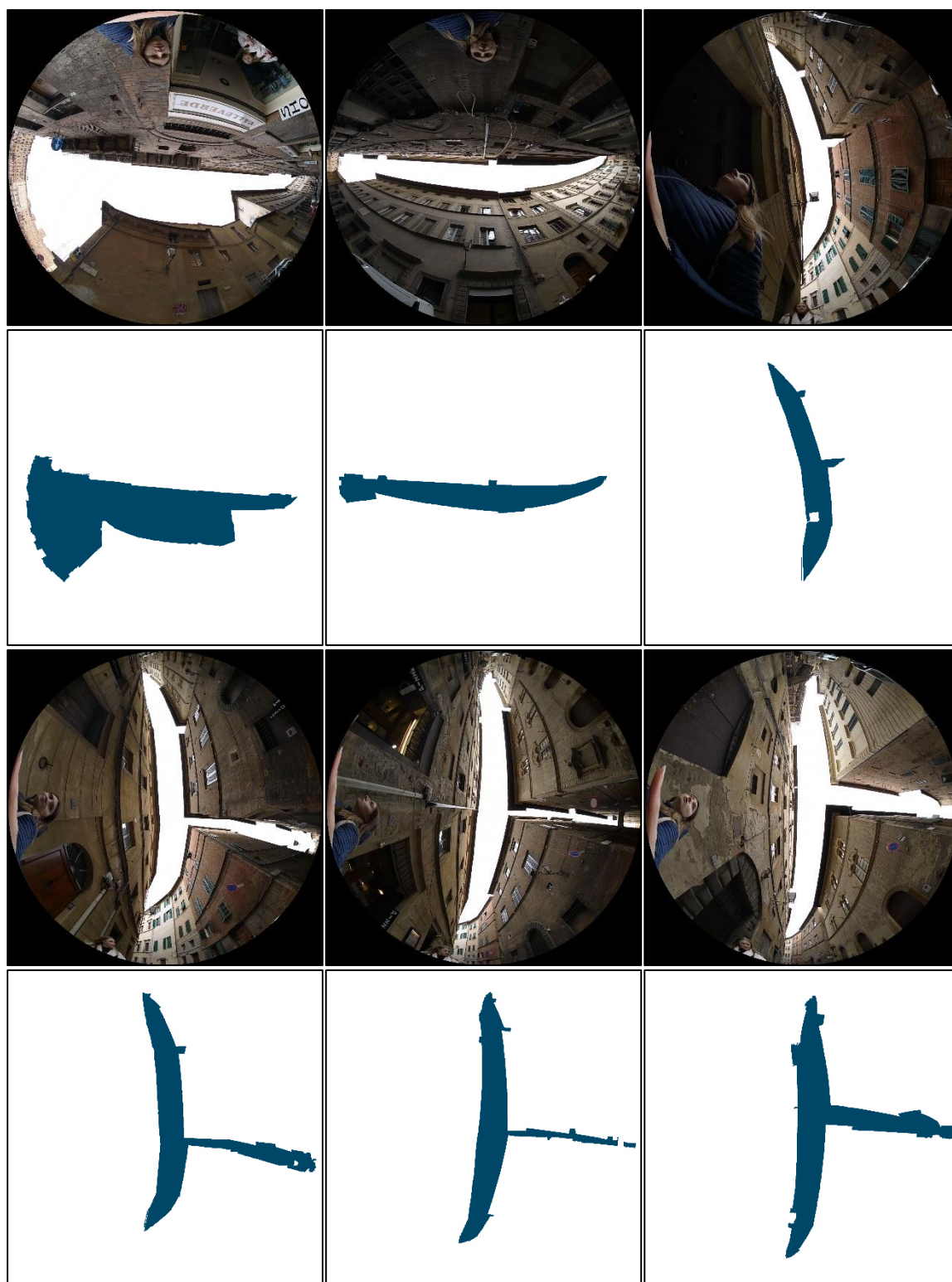
Rysunek 41. Zestawienie obrazów i masek kolejno: początek kanionu na dziedzińcu, minimum lokalne w piętnastym metrze, przejście na pierwszy plac, początek drugiego odcinka, powrót do osi kanionu, wejście na drugi plac

### 6.1.3. Casato di Sotto

Ostatnim z analizowanych kanionów w historycznym centrum Sieny była ulica Casato di Sotto. Kanion ten rozpoczyna się przy słynnym rynku - Piazza del Campo, a następnie zakręca w kierunku południowo-zachodnim. W początkowej części ulicy wartość współczynnika sukcesywnie maleje, od wartości 0.1834 przy rynku do 0.0646 w czterdziestym szóstym metrze. Do sześćdziesiątego drugiego metra, SVF utrzymuje się na zbliżonym poziomie, by następnie, do osiemdziesiątego metra, ponownie zmniejszać się (0.0632). Na kolejnym odcinku zaobserwować można dwa minima lokalne, w osiemdziesiątym szóstym i w dziewięćdziesiątym trzecim metrze (odpowiednio 0.0625 i 0.0586). Są to miejsca w których kanion najbardziej zakręca, a dodatkowo widoczność nieba przesłaniają latarnie przymocowane do elewacji. Następnie widoczne są maksima lokalne związane z przecięciem kanionu z prostopadłymi ulicami. Pierwsze z nich występuje tuż przed setnym metrem (0.0894), jest to miejsce pierwszego skrzyżowania. Kolejne występuje między sto trzynastym a sto szesnastym metrem (ok. 0.0827), na następnym skrzyżowaniu. Ostatnie maksimum (0.1153) zaobserwować można u zbiegu z kolejną prostopadłą uliczką.



Rysunek 42. Wartości SVF wzdłuż Casato di Sotto

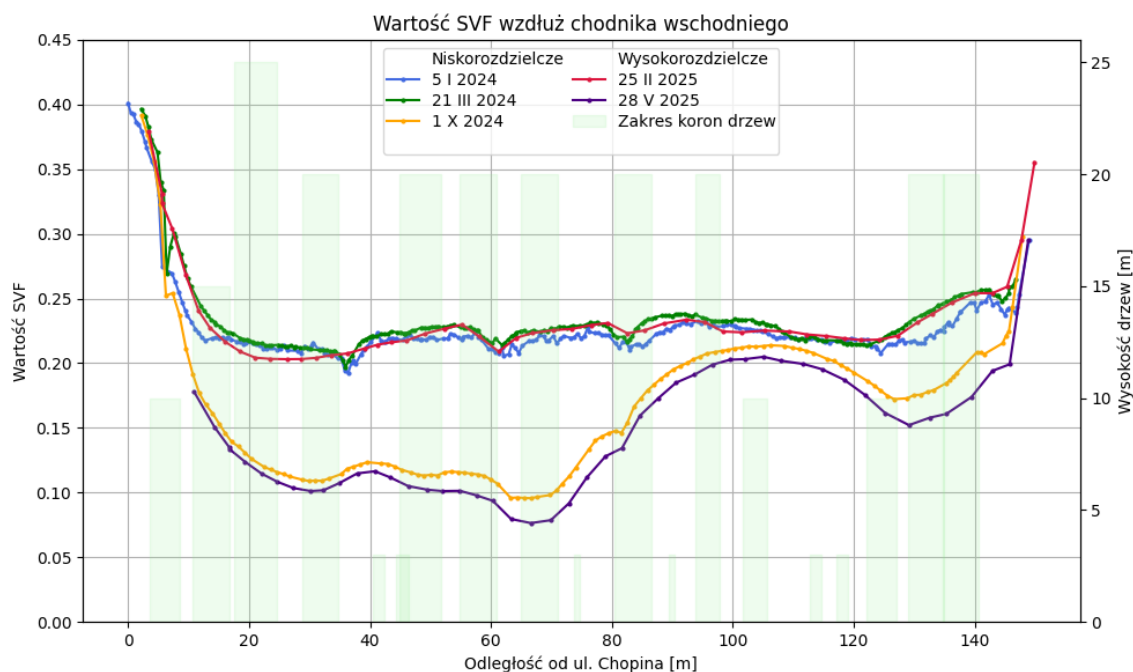


Rysunek 43. Zestawienie obrazów i masek, Casato di Sotto, kolejno: początek kanionu, dalszy odcinek, najbardziej zakręcający, skrzyżowania z Vicolo di S. Salvatore, Vicolo Ugurgieri, Vicolo delle Pietre

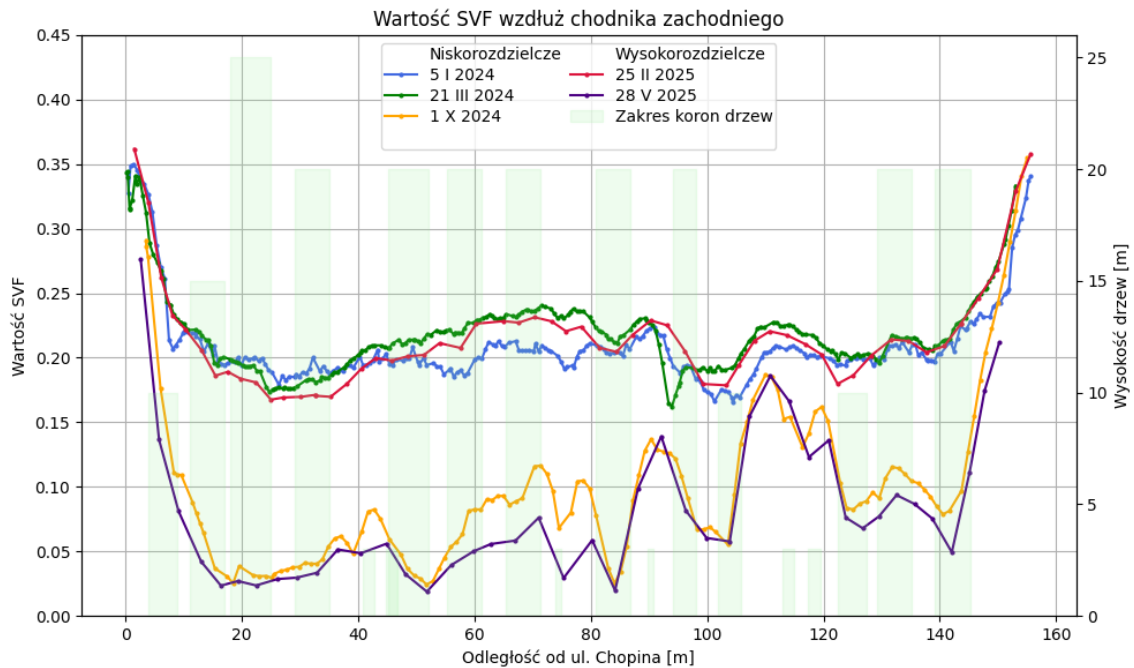
## 6.2. SVF z metody fotograficznej (2D) w kanionie zadrzewionym

Dla ulicy Konarskiego wyznaczono SVF metodą fotograficzną dla dwóch rodzajów danych. Pierwsze z nich to kadry, które brały udział w opracowaniu chmury punktów (5 I 2024, 21 III 2024 i 1 X 2024), drugie natomiast to zdjęcia fish-eye wykonane w wyższej rozdzielczości (25 II 2025, 28 V 2025). Ze względu na różnicę rozdzielczości na potrzeby rozróżnienia przyjęto określenia metoda fotograficzna niskorozdzielcza i wysokorozdzielcza. Każdy zestaw danych wymagał indywidualnego doboru kolorów, które zostały zamaskowane. Analogicznie jak w przypadku kanionów włoskich, wygenerowane automatycznie maski wymagały manualnych korekt, głównie z powodu odbijającego się w szybach nieba. Ze względu na kierunek fotografowania (zawsze pod Słońce), część cienkich gałęzi drzew była prześwietlona. W wyniku maskowania obszary te zostały włączone w obszar nieba, co powodowało nieciągłość w obrysie gałęzi. Sprawdzone, czy zastosowanie na maskach operacji morfologicznej z filtrem o rozmiarze okna 3 x 3, zniweluje przerwy w gałęziach.

Wyznaczony na zdjęciach współczynnik przeanalizowano osobno dla strony wschodniej i zachodniej. Ze względu na różne położenie przestrzenne zdjęć zdecydowano się na zdefiniowanie prostych wzdłuż obu chodników, na które zostały zrzutowane wartości wyznaczonego na obrazach SVF. Dzięki temu możliwe było porównanie współczynnika z kilku zestawów w konkretnych odcinkach Konarskiego. W tle profili przedstawiono zakres średnicy koron poszczególnych drzew na podstawie danych pozyskanych z Zarządu Zieleni Miejskiej.



Rysunek 44. Wartości SVF wzdłuż chodnika wschodniego z metody fotograficznej



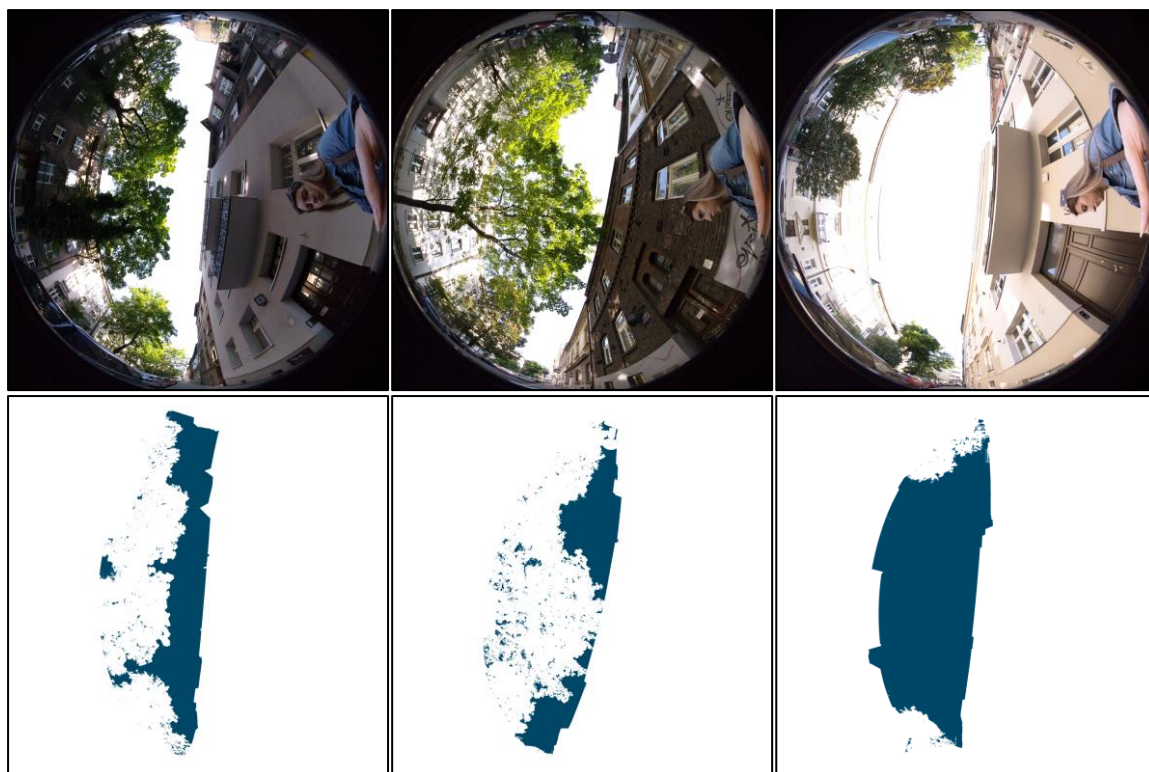
Rysunek 45. Wartości SVF wzdłuż chodnika zachodniego z metody fotograficznej

Analizując przebieg wykresów (Rysunek 44, Rysunek 45) można stwierdzić, że widoczność nieba zawsze jest największa przy skrzyżowaniach. Wraz z oddalaniem się od nich, SVF sukcesywnie maleje. W kontekście pór roku, można stwierdzić, że w okresie bez liści, widoczność nieba jest zdecydowanie większa niż w sezonie wegetacyjnym. Co więcej, wyniki z zestawów wysokorozdzielczych mają podobny przebieg, jak te z niskorozdzielczych. W znacznej części kanionu widoczność nieba jest większa 21 III 2024 niż 5 I 2024, co jest nietypowe w kontekście sezonowości. Jednakże, w tym konkretnym przypadku, różnica najprawdopodobniej wynika ze stałego elementu przesłaniającego występującego w kadrach ze stycznia, fragment sylwetki obserwatora, która częściowo zasłania niebo (Rysunek 48). Zestaw ten był jednym z pierwszych, testowych dokumentacji kanionu, m.in. na jego podstawie wypracowano właściwą metodologię pozyskiwania danych. Pomimo niedoskonałości w materiale, zdecydowano się zachować go do analizy porównawczej, głównie ze względu na kompletność danych. Natomiast materiał wiosenny pozyskany został przy niejednorodnie zachmurzonym niebie, co wymagało zadeklarowania większej liczby kolorów przy maskowaniu. Refleksy świetlne w obrębie gałęzi, a zwłaszcza na drobnych pąkach liści i kwiatostanach, zaklasyfikowane zostały jako piksele reprezentujące niebo.

W przypadku chodnika wschodniego (Rysunek 44), zimą i wczesną wiosną większość wartości współczynnika oscyluje w przedziale (0.20-0.25), zaobserwować można lokalne, nieregularne zmiany. Najwyższe wartości SVF osiąga na skrzyżowaniach, z ulicą Chopina największą widoczność nieba uzyskano dla zestawu z 5 I 2024 (0.40, niebieska linia), natomiast w przypadku ulicy Lea - dla zestawu wysokorozdzielczego z 25 II 2025 (0.35, czerwona linia). Dane z pierwszego kwartału roku mają podobny przebieg, bez względu na rozdzielczość zdjęć (dane wysokorozdzielcze pozyskane zostały w dwukrotnie lepszej rozdzielczości). Rozwój liści znacząco obniża wartość

współczynnika. Wykresy uzyskane dla 1 X 2024 i 28 V 2025 (kolejno żółty i fioletowy) mają bardzo zbliżony kształt, wartości uzyskane w 2025 roku są niewiele mniejsze niż w roku poprzednim. Szczegółowo analizując przebieg wykresu z maja (Rysunek 44), SVF w pierwszej części kanionu gwałtownie maleje, osiągając minimum lokalne blisko trzydziestego pierwszego metra (0.10), następnie powoli wzrasta (0.12) w czterdziestym metrze by ponownie maleć aż do minimum globalnego w sześćdziesiątym szóstym metrze (0.07). Następnie widać dynamiczny wzrost wartości współczynnika (0.21 w sto piątym metrze), co związane jest z mniejszymi drzewami rosnącymi w tej części kanionu. Kolejno współczynnik maleje do ostatniego minimum lokalnego wywołanego dwoma wysokimi drzewami (0.15 w sto dwudziestym dziewiątym metrze), w dalszej części sukcesywnie wzrasta. Wizualizacja wybranych lokalizacji przedstawiona jest na (Rysunek 46).

Chodnik zachodni (Rysunek 45) charakteryzuje się dużo większą zmiennością wartości współczynnika widoczności, głównie ze względu na bliskie sąsiedztwo drzew. Podobnie jak po stronie wschodniej, największy SVF zaobserwować można przy skrzyżowaniach. W sezonie zimowym, w środku kanionu widoczność nieba jest z przedziału (0.20-0.24), lokalnie uzyskując wartości mniejsze (do 0.16). Krzywe z tego okresu mają zbliżony przebieg, bez względu na źródło danych. W okresie rozwiniętych liści, zaobserwować można znaczny spadek wartości SVF, miejscami widoczność ograniczona jest nawet poniżej 0.05, zwłaszcza w pierwszej części kanionu, w której występuje najwięcej starych klonów. Wykres z maja 2025 (fioletowa linia) wykazuje nieco niższe wartości SVF niż te z października 2024 (żółta linia), co można interpretować jako efekt rozrostu drzew. W odróżnieniu od strony wschodniej, wykresy te cechują się dużo większą dynamiką zmian. Zaobserwować można naprzemiennie występujące minima i maksima lokalne. Pierwsze minimum występuje w szesnastym metrze (0.02), kolejno współczynnik wzrasta by w okolicach czterdziestego metra osiągnąć wartości bliskie 0.05, a następnie maleje do pięćdziesiątego drugiego metra (0.02). W dalszej części występuje podobna tendencja. W osiemdziesiątym czwartym metrze występuje minimum globalne (poniżej 0.02), a kolejno wyniki wzrastają (do 0.14), maleją (do 0.06) i znów wzrastają (0.19). W końcowym odcinku kanionu (między sto dwudziestym a sto czterdziestym metrem) współczynnik maleje, w sto czterdziestym drugim metrze nawet do 0.04, by ponownie wzrastać w miarę zbliżania się do ulicy Lea. Można uznać, że zmiany współczynnika mają charakter skokowy, jednakże są one głównie związane z lokacją wykonania, gdy zdjęcie wykonywane jest bezpośrednio pod drzewem, współczynnik widoczności jest bardzo mały. Omówione przykłady przedstawia (Rysunek 47).

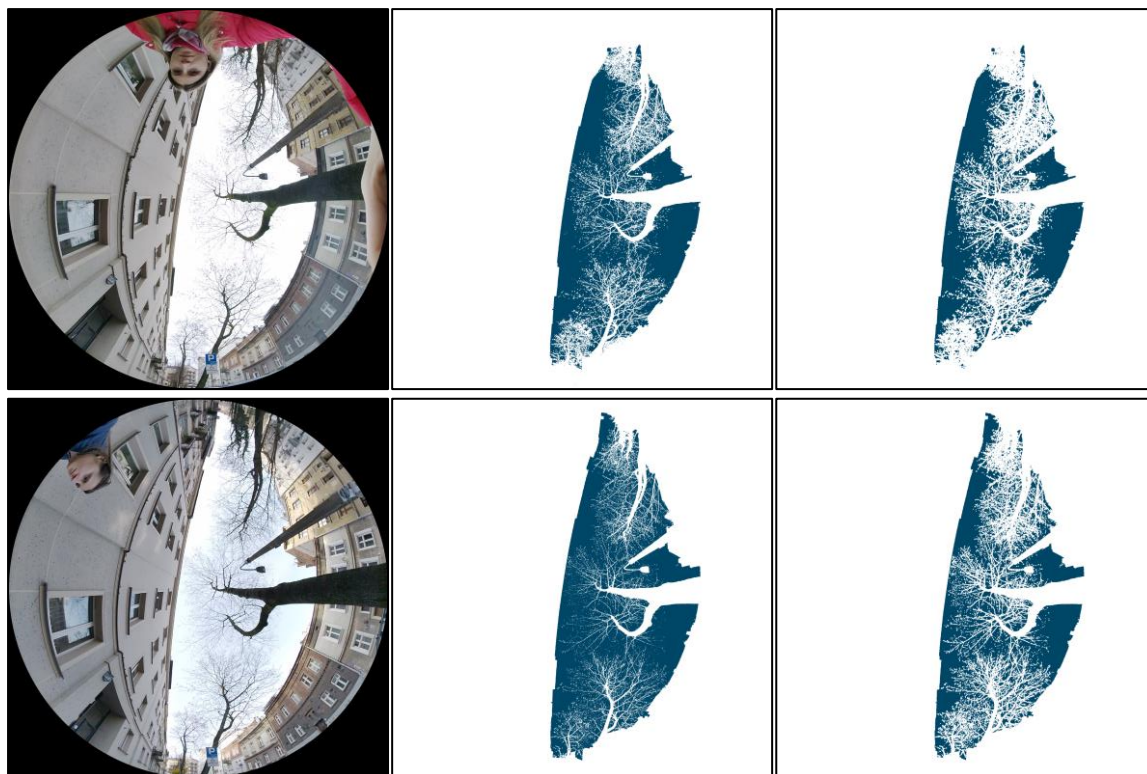


Rysunek 46. Przykładowe dane i maski z metody fotograficznej wysokorozdzielczej 28 V 2025 - chodnik wschodni, kolejno: trzydziesty, sześćdziesiąty szósty i sto piąty metr profilu



Rysunek 47. Przykładowe dane i maski z metody fotograficznej wysokorozdzielczej 28 V 2025 - chodnik zachodni, kolejno: osiemdziesiąty czwarty, sto dziesiąty i sto czterdziesty drugi metr profilu

Ze względu na występowanie przerw w reprezentacji koron drzew (zwłaszcza w przypadku cienkich gałęzi), wszystkie maski poddano operacji morfologicznej (okno filtracji 3 x 3), dzięki czemu, udało się wyeliminować część artefaktów w postaci drobnych prześwitów gałęzi (Rysunek 48). Jednocześnie, operacja ta wpłynęła na powiększenie obszarów zasłoniętych przez budynki. Przeliczono SVF dla nowych masek, ze względu na tożsamą tendencję w uzyskanych wynikach, na (Rysunek 50) przedstawiono SVF przed i po operacji morfologicznej dla wybranych zestawów danych o różnej rozdzielczości.



Rysunek 48. Przykład danych, maski poprawionej i po operacji morfologicznej z 5 I 2024 (górze) i 21 III 2024 (dół)

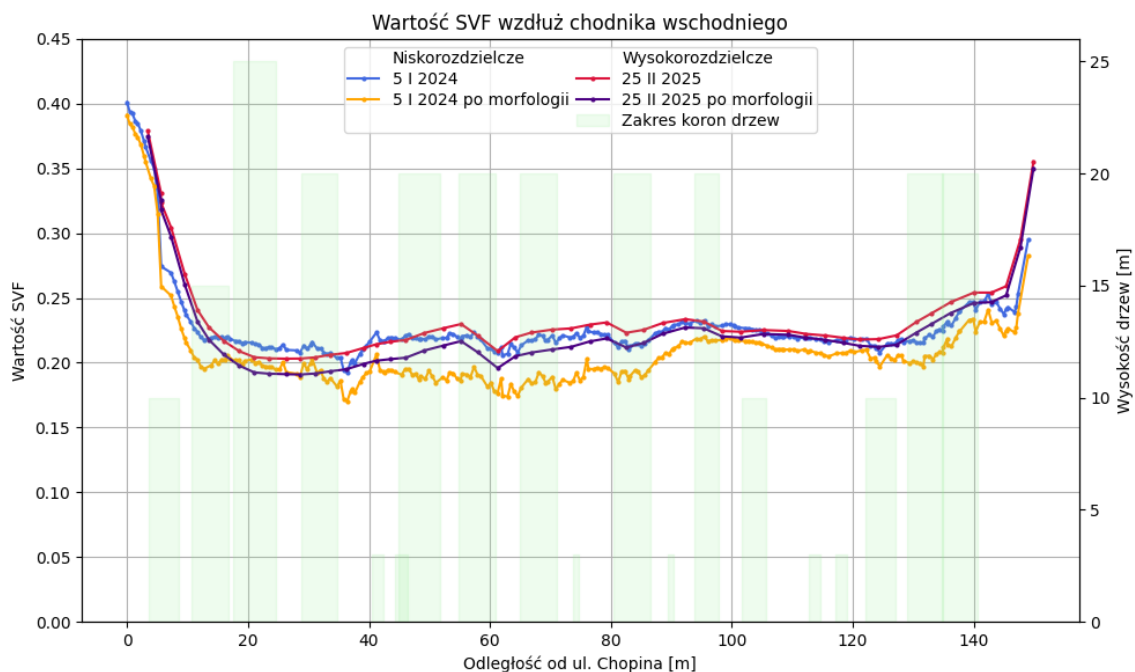
We wszystkich przypadkach operacja morfologiczna zmniejszyła współczynnik widoczności nieba. (Tabela 8) zawiera statystyki różnic między SVF obliczonym z oryginalnych masek a SVF po przekształceniu.

Tabela 8. Zestawienie statystyk dla różnic w SVF z metody fotograficznej przed i po operacjach morfologicznych

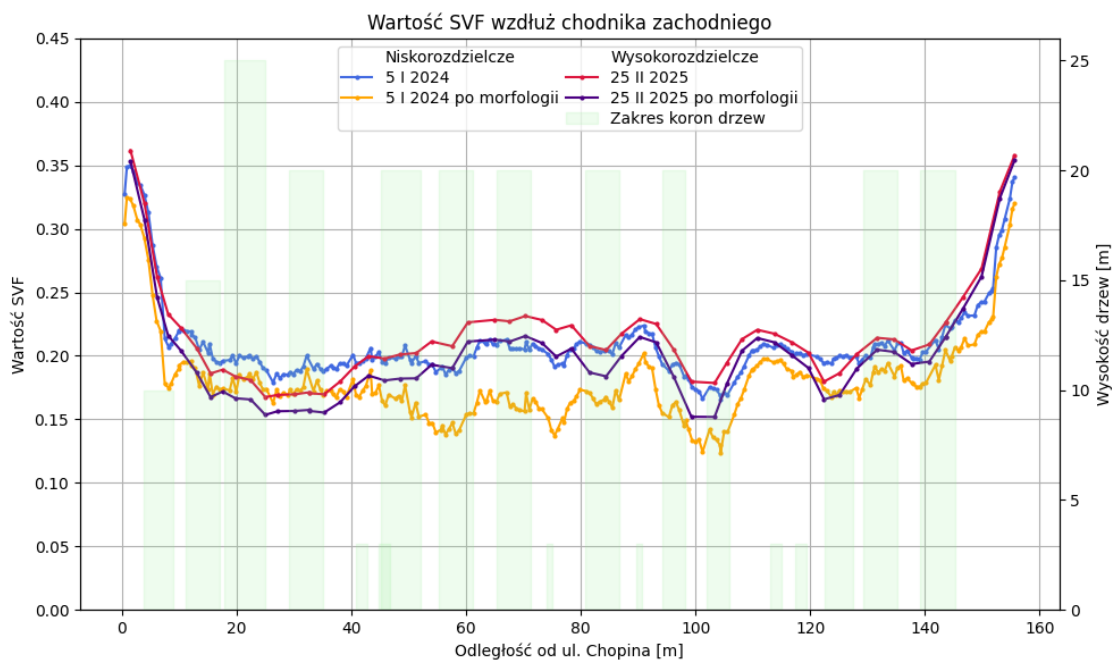
<i>Zdjęcia</i>	<i>Niskorozdzielcze</i>			<i>Wysokorozdzielcze</i>	
	<i>5 I 2024</i>	<i>21 III 2024</i>	<i>1 X 2025</i>	<i>25 II 2025</i>	<i>28 V 2025</i>
mean	0.0240	0.0345	0.0119	0.0121	0.0040
median	0.0222	0.0340	0.0117	0.0126	0.0041
std	0.0106	0.0142	0.0044	0.0051	0.0016

Analiza wyników wskazuje, że w największe różnice są dla danych z 21 III 2024, natomiast najmniejsze dla zestawu z 28 V 2025. Zauważalna jest zależność, im niższa

rozdzielczość danych tym wpływ dylatacji na współczynnik jest większy. Co więcej, zestawy pozyskane w okresie z liśćmi, cechują się mniejszym zakresem zmian. Wpływ dylatacji uzależniony jest też od fotografowanej sceny. W sytuacji, w której w kadrze nie znajdują się rośliny, wpływ morfologii jest mniejszy niż w obszarach z dużym zadrzewieniem.



Rysunek 49. Wartości SVF przed i po morfologii masek dla wybranych zestawów z metody fotograficznej, chodnik wschodni



Rysunek 50. Wartości SVF przed i po morfologii masek dla wybranych zestawów z metody fotograficznej, chodnik zachodni.

### 6.3. SVF z metody hybrydowej (3D) w kanionie zadrzewionym

Metoda hybrydowa pozwoliła wykonać analizę widoczności nieba na trójwymiarowym modelu kanionu ulicznego. Zdecydowano, że podstawową składową modelu zawsze będą budynki CityGML, w standardzie LOD2, uzupełniane danymi o roślinności oraz innej infrastrukturze znajdującej się w kanionie. Analizy w tym rozdziale podzielono w zależności od źródła pochodzenia materiału uzupełniającego.

#### 6.3.1. Chmura punktów z ALS

Ten wariant analiz zakładał wykorzystanie bezpłatnych danych udostępnionych w geoportalu. Informacje o budynkach pochodzą z 2017 roku, natomiast chmury punktów można pobrać z trzech lat - 2017, 2021 i 2023. Należy jednak wspomnieć, że chmury cechują się różną charakterystyką (Tabela 9). Różnica w gęstościach udostępnianych chmur wynika z faktu, że były one zamawiane przez różne podmioty. Dane z 2017 i 2023 pozyskane zostały na zlecenie GUGiK, natomiast w 2021 zbierano dane z inicjatywy miasta Krakowa. W związku ze zmianą obowiązującego systemu wysokości, niezbędnym było przeliczenie wysokości punktów chmury z 2017 roku. Na potrzeby analiz, ze wszystkich udostępnionych zestawów wyselekcjonowano klasę „wysokie drzewa”.

Tabela 9. Zestawienie charakterystyk udostępnionych danych z ALS (geoportal.gov.pl)

<i>Zestaw</i>	<i>Aktualność [data]</i>	<i>Układ wysokości</i>	<i>Deklarowana gęstość [pkt/m<sup>2</sup>]</i>	<i>Punkty klasy wysokie drzewa</i>
2017	2017-11-05	PL-KRON86-NH	12	12 622
2021	2021-10-04	PL-EVRF2007-NH	20	38 550
2023	2023-09-08	PL-EVRF2007-NH	12	54 359

Wyznaczono współczynnik z trzech modeli kanionu w stu dwunastu lokalizacjach na obu chodnikach (XYZ tożsame ze zdjęciami wysokorozdzielczymi z 25 II 2025 z metody fotograficznej) oraz wzdłuż osi jezdni w interwale jednometrowym zgodnie z opisem z rozdziału 5.5.2. a statystyki wyników zawarto w (Tabela 10 i Tabela 11). Na ich podstawie, a także analizując mapy wartości współczynnika (Rysunek 52), można stwierdzić, że SVF sukcesywnie maleje w kolejnych latach. Zasadność tej tendencji zdaje się logiczna w związku z corocznym przyrostem roślinności, jednakże trzeba uwzględnić liczbę punktów chmury oraz okres zbierania danych. Najstarsze dane zawierają najmniej punktów reprezentujących roślinność wysoką, a to przekłada się na niewielkie przesłonięcia nieba. Zestawy z 2017 i 2021 pozyskane zostały jesienią, natomiast w 2023 nalot wykonano późnym latem.

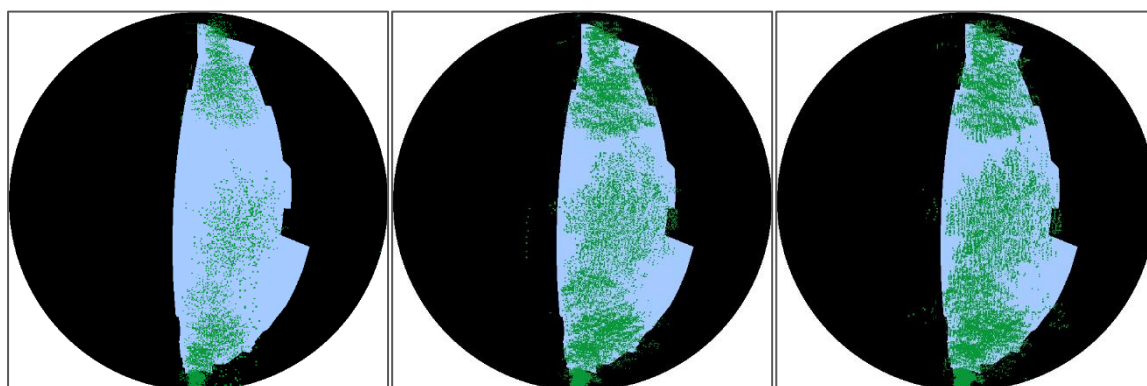
Tabela 10. Zestawienie statystyk SVF z metody hybrydowej z chmur z ALS

		<i>Statystyka</i>	<i>2017</i>	<i>2021</i>	<i>2023</i>
<i>Chodniki</i>		min	0.2229	0.1803	0.1693
		max	0.4267	0.4144	0.4134
		mean	0.2614	0.2285	0.2188
		std	0.0448	0.0508	0.0526
<i>Oś jezdni</i>		min	0.2218	0.1843	0.1770
		max	0.4484	0.4411	0.4414
		mean	0.2779	0.2486	0.2400
		std	0.0627	0.0700	0.0715

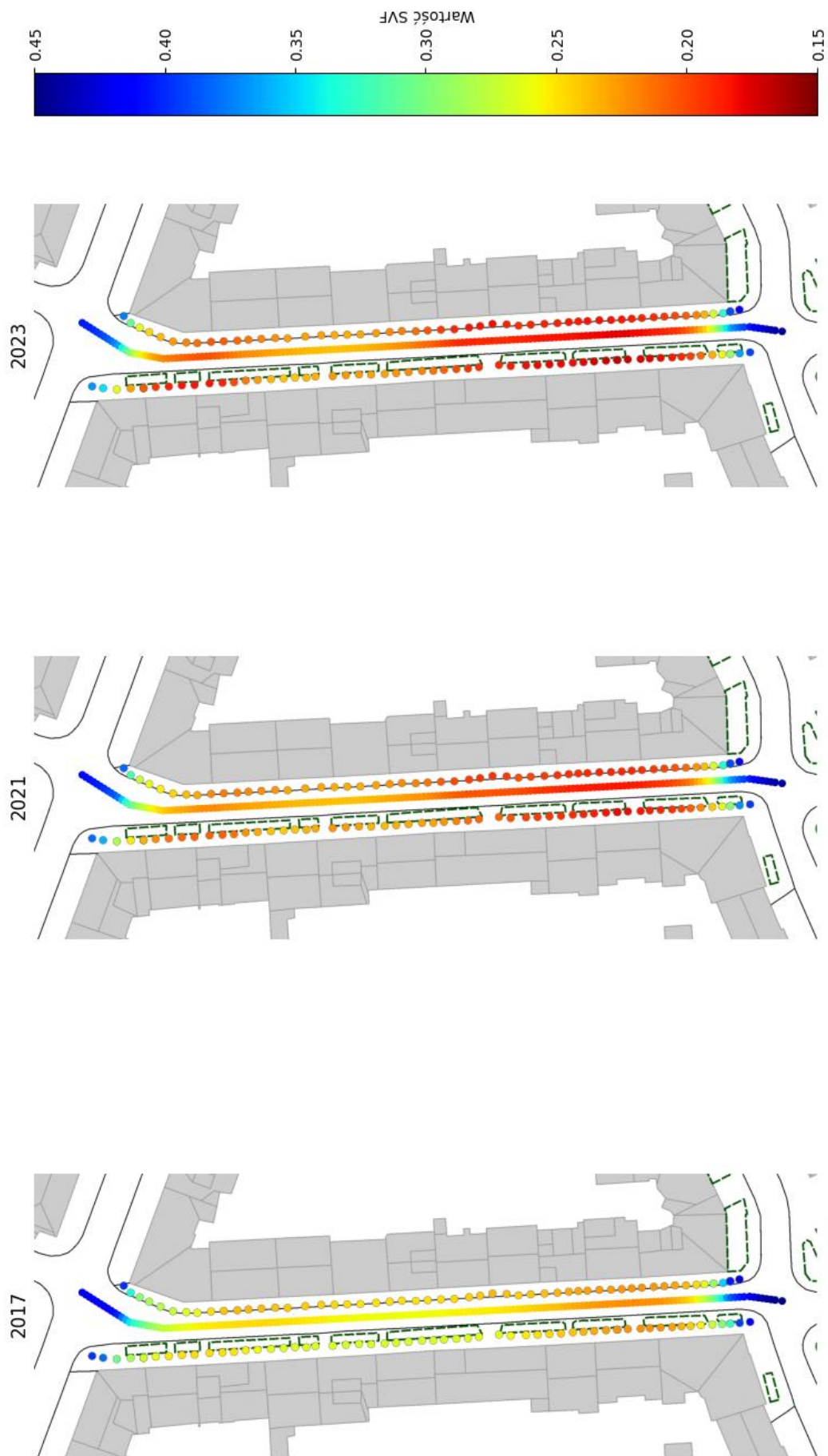
Tabela 11. Zestawienie różnic SVF z metody hybrydowej z chmur z ALS

		<i>Statystyka</i>	<i>Wartość różnicy</i>		
			<i>2023 - 2021</i>	<i>2021 - 2017</i>	<i>2023 - 2017</i>
<i>Chodniki</i>		min	-0.0284	-0.0551	-0.0728
		max	0.0028	-0.0115	-0.0132
		mean	-0.0098	-0.0331	-0.0428
<i>Oś jezdni</i>		min	-0.0245	-0.0496	-0.0646
		max	0.0007	-0.0073	-0.0070
		mean	-0.0088	-0.0293	-0.0380

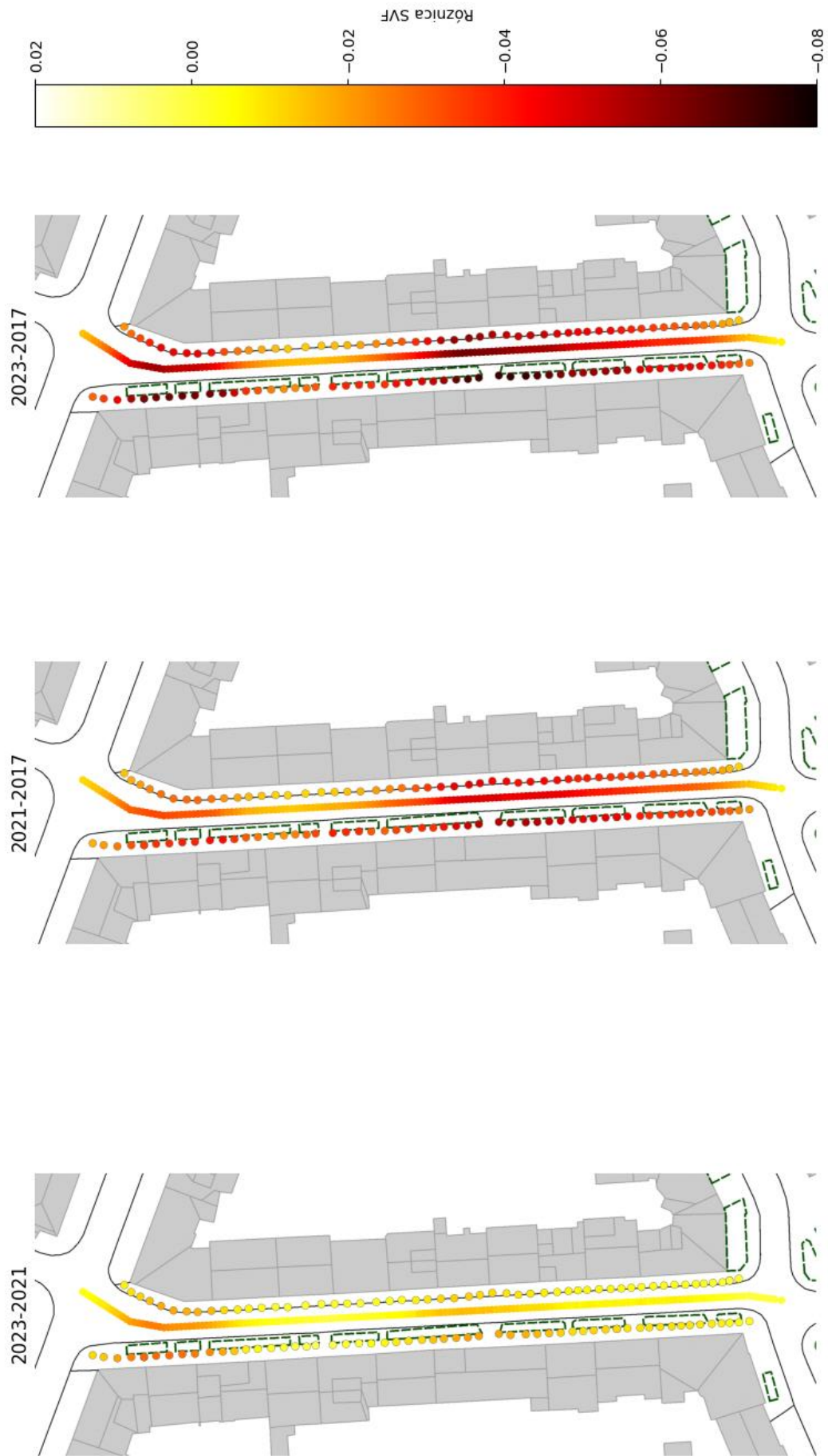
Analizując przykładową wartość współczynnika uzyskaną w kolejnych latach dla wybranego punktu XYZ zlokalizowanego w strefie wysokich drzew (Rysunek 51), uzyskano następujące wartości: 2017 - 0.2425, 2021 - 0.1921, 2023 - 0.1796. SVF zmniejszył się w tym miejscu kolejno o 0.0504 i 0.0125. Na tym przykładzie, jednoznacznie można stwierdzić, że w bliskim sąsiedztwie wysokich drzew liczba punktów chmury ma bezpośrednie przełożenie na zmniejszenie wartości SVF. Dokładne wartości różnic pomiędzy kolejnymi latami prezentuje mapa (Rysunek 53).



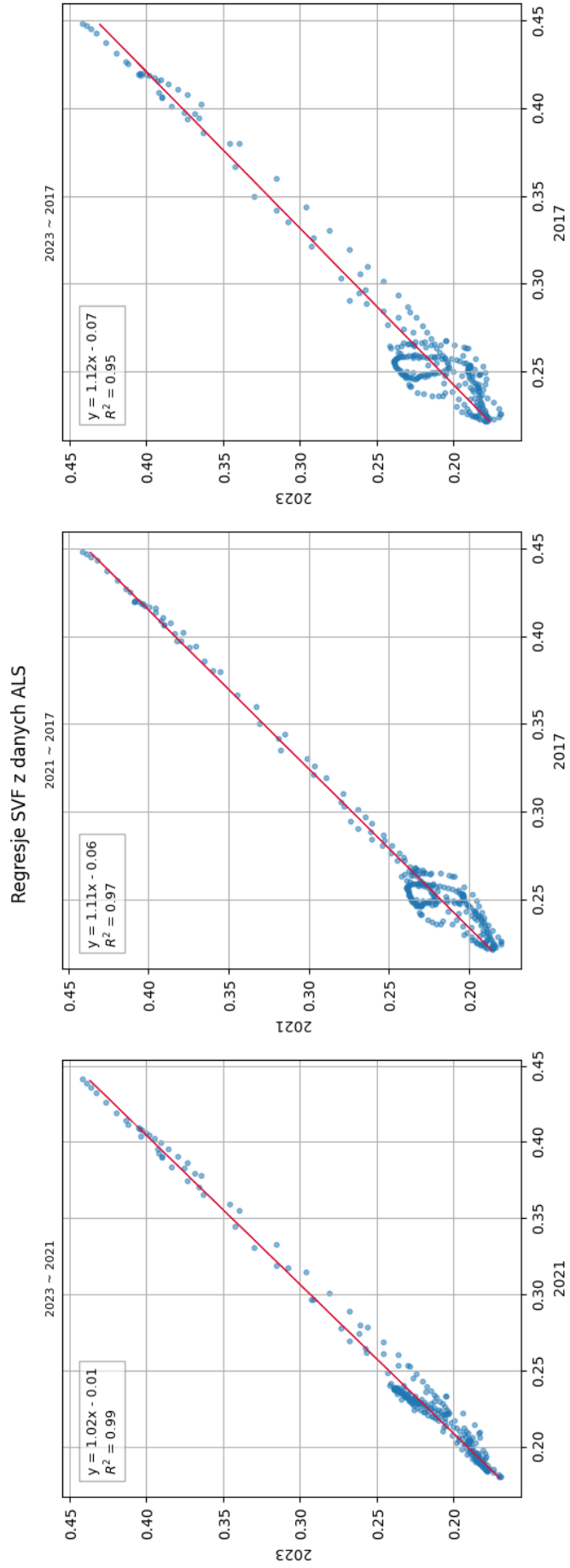
Rysunek 51. Zestawienie obrazów wirtualnych dla przykładowej lokalizacji na zachodnim chodniku, kolejno rok 2017, 2021 i 2023



Rysunek 52. Mapa wartości SVF z metody hybrydowej z chmur z ALS



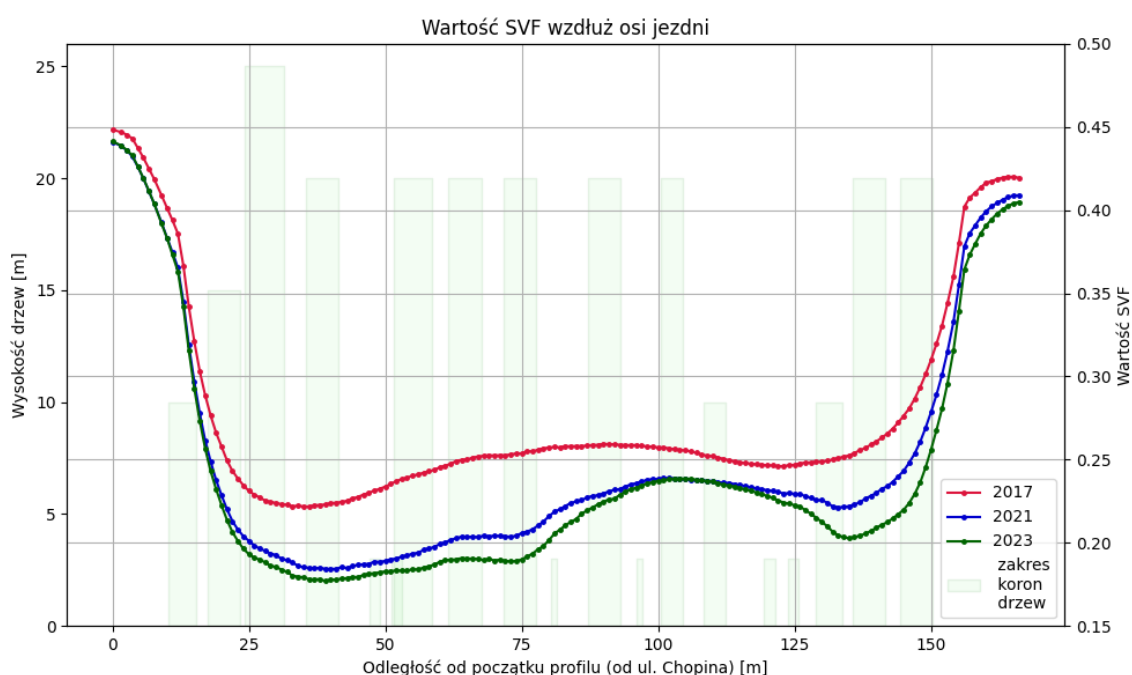
Rysunek 53. Mapa różnic SVF z metody hybrydowej z chmur z ALS



Rysunek 54. Regresja SVF z metody hybrydowej z chmur z ALS

W poszczególnych latach najmniejszą wartość SVF zaobserwować można w południowej części kanionu, gdzie występuje największe zagęszczenie starych drzew, ale także w północnej części, w której rosną dwa stare klony (Rysunek 52). Warto nadmienić, że zmiana SVF występuje nie tylko po stronie zachodniego chodnika, gdzie są wsadzone drzewa, wpływ roślinności przekłada się też na zmniejszenie widoczności nieba po stronie wschodniej. Analizując zmiany wartości SVF, w okresie 2021-2023, największą różnicę widać w ostatniej części zachodniego chodnika (między sto dwudziestym piątym a sto czterdziestym metrem), natomiast w pozostałych częściach kanionu dysproporcje oscylują wokół 0.02. Okres 2017-2021 cechuje się większymi różnicami, największe zmiany SVF występują w południowej części kanionu, co powiązać należy ze skumulowaniem w tym miejscu starych nasadzeń, zwłaszcza po stronie zachodniej (różnice sięgają nawet do 0.06). W latach 2017-2023 zaobserwować można znaczące zmniejszenie wartości współczynnika, sięgające miejscami aż 0.08 (głównie przy klonach). Pomimo braku nasadzeń po stronie wschodniej, we wszystkich analizowanych przykładach widoczna jest zmiana widoczności nieba. Jest to konsekwencja rozrostu drzew, ale także faktu, że część z nich pochylona jest w kierunku elewacji po wschodniej stronie.

Dla lepszej wizualizacji zmienności współczynnika wykonano profil wyznaczonych wartości SVF wzdłuż osi ulicy przedstawiony na (Rysunek 55). W tle profilu przedstawiono zakres średnicy koron poszczególnych drzew na podstawie danych pozyskanych z Zarządu Zieleni Miejskiej.



Rysunek 55. Wartości SVF wzdłuż osi jezdni z metody hybrydowej z chmur z ALS

Najbardziej dynamiczną zmianę współczynnika zauważyć można przy krańcach kanionu. Wraz z wchodzeniem między budynki widoczność nieba gwałtownie maleje od ponad 0.40 na skrzyżowaniach do 0.15-0.25 między elewacjami. Dodając do tego wysokie drzewa, które są skumulowane bliżej ulicy Chopina, stwierdzić można, że ta część kanionu

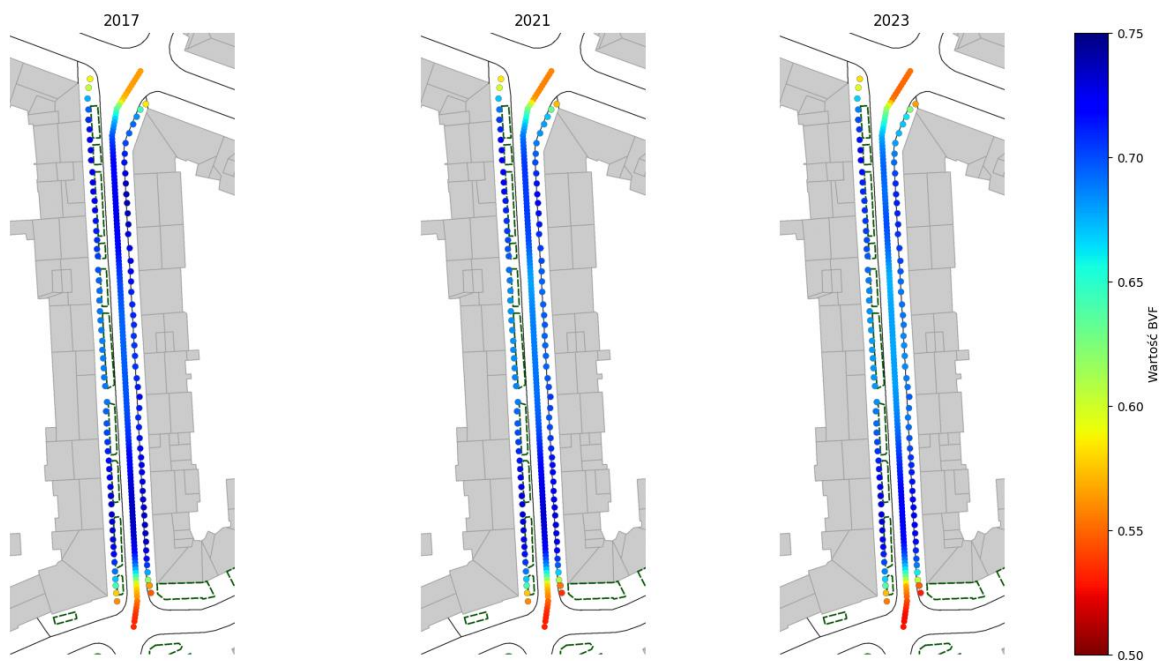
cechuje się najmniejszą widocznością nieba we wszystkich analizowanych latach. Kształt wykresu jest podobny dla każdego zestawu danych, a dla 2021 i 2023 niemalże identyczny. Dane z 2017 najbardziej odstają wartościami od pozostałych, co należy wiązać z najmniejszą liczbą punktów chmury. Dla reszty zestawów, na odcinku między osiemdziesiątym a sto trzydziestym drugim metrem profilu widać maksimum lokalne współczynnika pomimo występowania drzew w tej części. Jest to spowodowane dwiema kwestiami. Po pierwsze, część nasadzeń jest młoda i niska, przez co w całości znajduje się na tle budynków nie przesłaniając nieba. Po drugie, wyższe nasadzenia mają bardziej wyprostowany pokrój niż drzewa rosnące bliżej ulicy Chopina. W okolicach sto trzydziestego piątego metra zaobserwować można minimum lokalne, na które składa się sąsiedztwo dwóch pochylonych nad jezdnią klonów

Dodatkowo wykonano analizę regresji liniowej dla uzyskanych wyników. Wykresy przedstawione na (Rysunek 54) przedstawiają zależność wartości SVF w kolejnych latach. W okresie 2021-2023 rozproszenie punktów względem linii regresji jest niewielkie, co świadczy o spójności wyników. Można uznać, że zmiany współczynnika miały charakter równomierny w obrębie całego kanionu. Dla pozostałych okresów, spójność danych nie jest aż tak jednoznaczna jak w pierwszym przypadku. W zakresie wartości 0.20-0.25 widoczne jest większe rozproszenie punktów przypominające kształtem pętle. Świadczyć to może o lokalnych zmianach wartości współczynnika. Mając jednak na uwadze fakt, że oba wykresy odnoszą się do danych z 2017, rozbieżności w wynikach najprawdopodobniej są konsekwencją niewielkiej gęstości chmury punktów z tego roku. Pomimo faktu, że współczynnik  $R^2$  we wszystkich analizowanych przypadkach jest na poziomie bliskim jedności (co świadczyłoby o bardzo wysokiej zależności danych), rozkład wartości na wykresie nie ma charakteru liniowego.

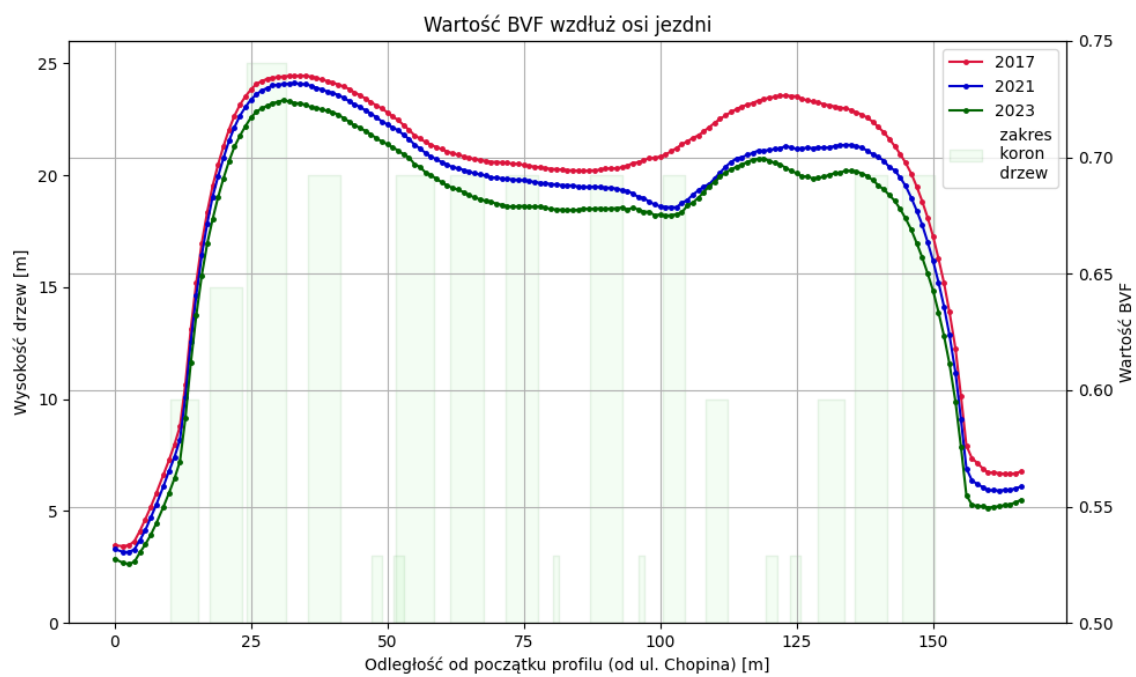
### ***Analizy dodatkowe - Building View Factor (BVF) i Tree View Factor (TVF)***

W ramach dodatkowych analiz zdecydowano się na wyznaczenie innych współczynników widoczności: budynków - BVF i drzew - TVF. Idea obliczeń była tożsama z wyznaczaniem SVF. Ze względu na generowanie wirtualnych obrazów, możliwym było szybkie przeliczenie liczby pikseli budynków i drzew i na tej podstawie wyznaczenia View Factors. Poniższe zestawienia mają charakter informacyjny i zostały włączone jako kontekstowe uzupełnienie głównej analizy SVF.

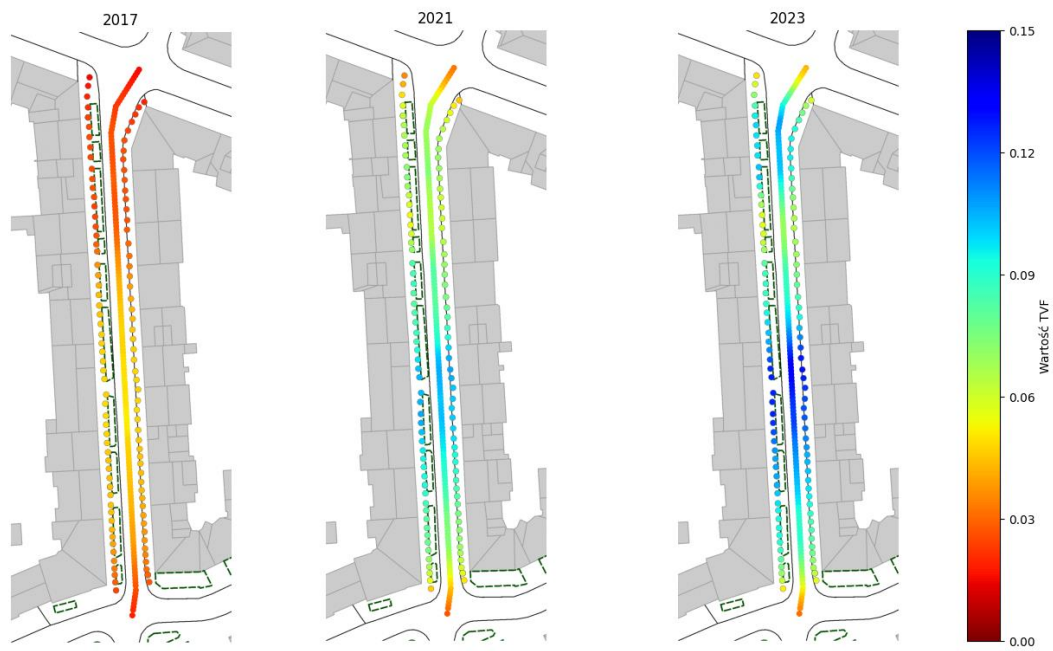
Wyznaczone wartości współczynników przedstawiono na mapach (Rysunek 56, Rysunek 58) oraz w formie wykresów liniowych (Rysunek 57, Rysunek 59), analogicznie do analiz przeprowadzonych dla Sky View Factor.



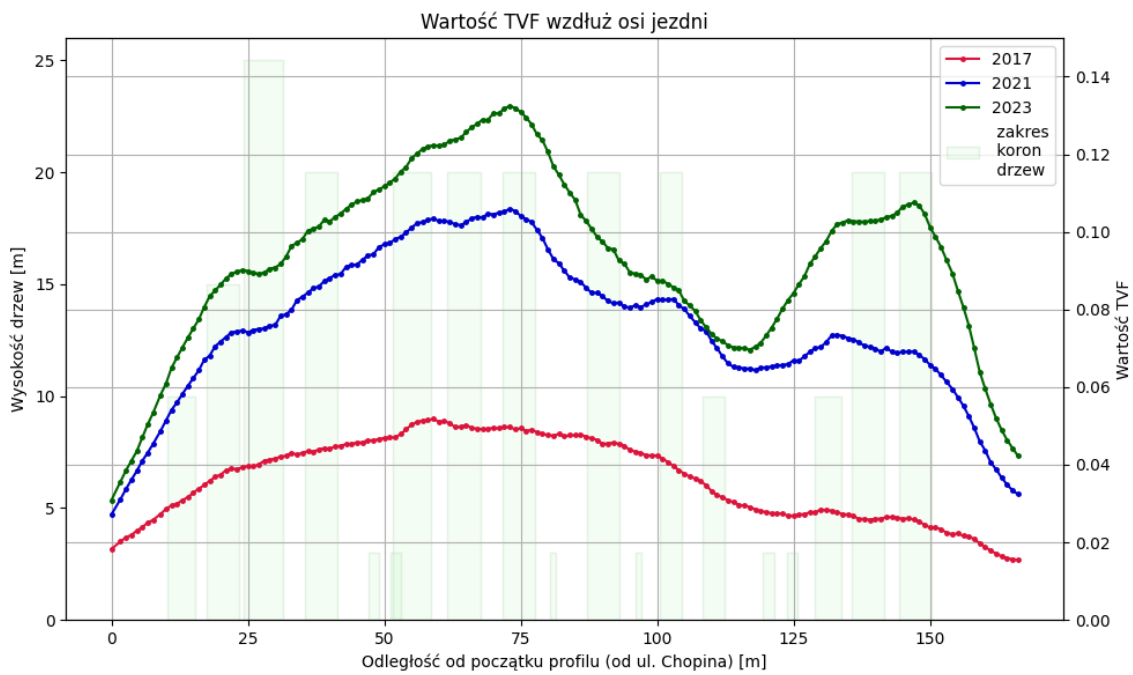
Rysunek 56. Mapa wartości BVF z metody hybrydowej z chmur z ALS



Rysunek 57. Wartości BVF wzdłuż osi jezdni z metody hybrydowej z chmur z ALS



Rysunek 58. Mapa wartości TVF z metody hybrydowej z chmur z ALS



Rysunek 59. Wartości TVF wzdłuż osi jezdni z metody hybrydowej z chmur z ALS

### 6.3.2. Chmura punktów z rejestracji kamerą sferyczną

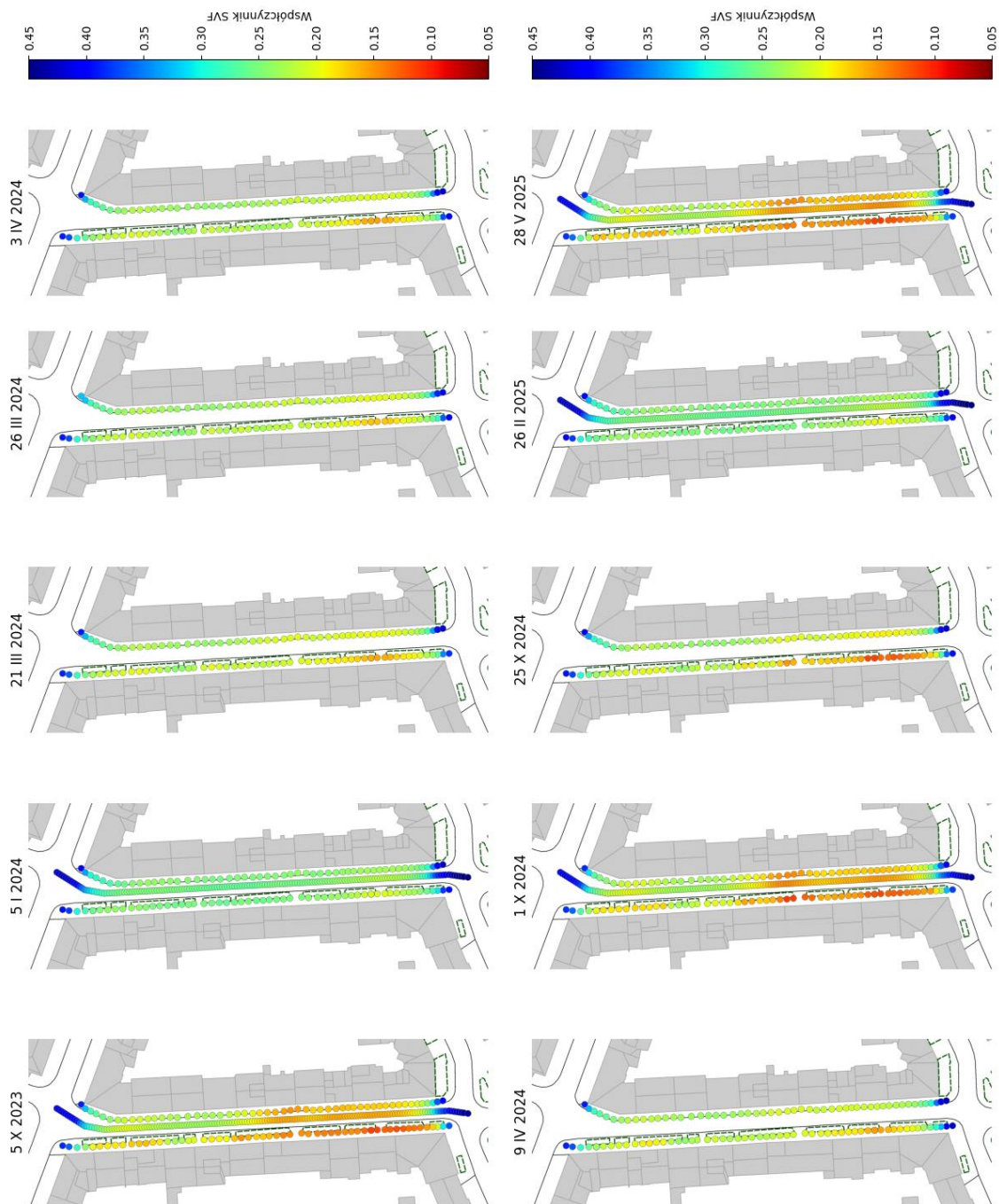
Rejestracje kanionu wykonano w kilku momentach roku. Wszystkie chmury punktów zostały opracowane zgodnie z metodyką opisaną w 5.4.4 i 5.5.2. Obliczenia wykonano w stu dwunastu lokalizacjach (tożsamy z zdjęciami wysokorozdzielczymi fish-eye z 25 II 2025) dla wszystkich zestawów danych, natomiast dla osi jezdni SVF wyznaczono w stanie bezlistnym i z pełnymi liśćmi. W przypadku wykresów, w tle zaznaczono zakres koron drzew na podstawie danych uzyskanych z Zarządu Zieleni Miejskiej.

Tabela 12. Zestawienie statystyk SVF wyznaczonego metodą hybrydową z chmur z kamery sferycznej

<i>ZESTAW</i>	<i>5 X 2023</i>	<i>5 I 2024</i>	<i>21 III 2024</i>	<i>26 III 2024</i>	<i>3 IV 2024</i>
min	0.1135	0.2046	0.1578	0.1685	0.1529
max	0.4002	0.4233	0.4213	0.4131	0.4238
mean	0.1977	0.2595	0.2277	0.2343	0.2349
<i>ZESTAW</i>	<i>9 IV 2024</i>	<i>1 X 2024</i>	<i>25 X 2024</i>	<i>26 II 2025</i>	<i>28 V 2025</i>
min	0.1533	0.1114	0.1143	0.1962	0.1122
max	0.4305	0.4025	0.4203	0.4204	0.4015
mean	0.2336	0.1986	0.2203	0.2562	0.1952

Najmniejsze wartości współczynnik osiąga w okresach letnio-jesiennych, najwyższy natomiast zimą. Wiosną SVF stopniowo maleje, co potwierdza zjawisko sezonowości. Różnice pomiędzy wartościami maksymalnymi a minimalnymi dla konkretnej daty są znaczące, można zatem mówić o dużej zmienności lokalnej widoczności nieba w obrębie kanionu. Porównanie średnich wartości SVF dla analogicznych pór roku w kolejnych latach sugeruje ich wysoką powtarzalność, z niewielkimi odchyleniami, które mogą odzwierciedlać m.in. sezonowy przyrost roślinności. Analizując rozkład przestrzenny współczynnika (Rysunek 60) na przestrzeni kilkunastu miesięcy, zauważalne jest zmniejszenie widoczności nieba w okresach letnich w południowej części kanionu, zwłaszcza po stronie zachodniego chodnika, co należy łączyć z wieloma drzewami w tej strefie. Zaobserwować można, że dynamika zmian sezonowych wzdłuż chodnika wschodniego, jest zdecydowanie mniejsza niż w przypadku drugiej strony kanionu. Największą widocznością, bez względu na porę roku, cechują się lokalacje bliżej skrzyżowań.

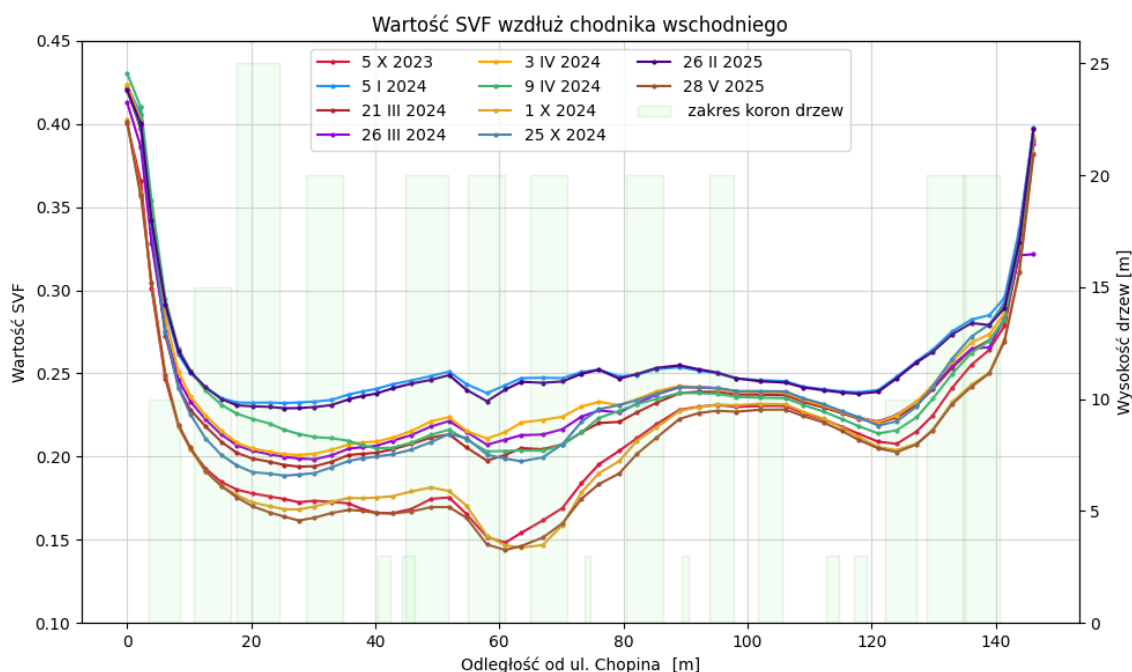
Aby szczegółowo przeanalizować zmiany SVF, wykonano wykresy przebiegu wartości współczynnika wzdłuż obu chodników (Rysunek 61, Rysunek 63). W przypadku strony wschodniej, wyniki dzielą się na trzy wyraźne grupy. Pierwsza dotyczy zestawów zimowych (5 I 2024 i 26 II 2025), druga - przejściowa (wczesna wiosna/późna jesień: 21 III 2024, 26 III 2024, 3 IV 2024, 9 IV 2024, 25 X 2024), natomiast trzecia zawiera wyniki z pełni sezonu wegetacyjnego (5 X 2023, 1 X 2024, 28 V 2025). Dla rozróżnienia przyjęto określenia grupa bezlistna, przejściowa i z liśćmi.



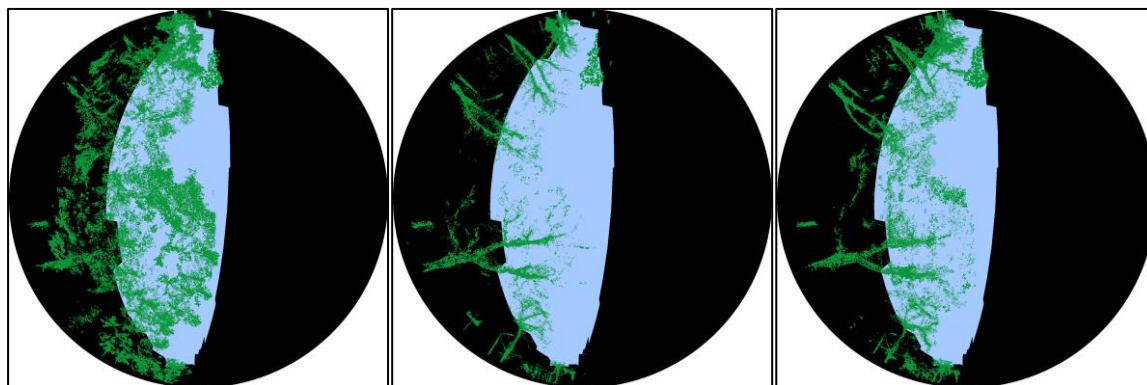
Rysunek 60. Mapy wartości SVF z metoda hybrydowej z chmur z kamery sferycznej

We wszystkich przypadkach, następuje gwałtowne zmniejszenie wartości współczynnika wraz z wchodzeniem do kanionu od ulicy Chopina (do około osiemnastego metra). Następnie występuje spłaszczenie krzywych do czterdziestego metra, powolny wzrost do punktu przeięcia w pięćdziesiątym drugim metrze. Dla większości wykresów, w okolicach sześćdziesiątego metra zaobserwować można minimum globalne, które wypada bezpośrednio pod wysokim drzewem, przewieszającym się nad ulicą, jednak nie jest to jedyna przyczyna obniżenia wartości współczynnika. Dzięki wirtualnym obrazom z trzech wybranych okresów przedstawionych na (Rysunek 62), można stwierdzić, że

dotychczasowym czynnikiem przesłaniającym niebo jest znak drogowy. W dalszej części wykresu SVF stopniowo wzrasta do osiemdziesiątego dziewiątego metra, by od sto szóstego ponownie maleć do minimum lokalnego w sto dwudziestym czwartym metrze (z wyjątkiem zestawów z okresu zimowego, dla których pozostaje na porównywalnym poziomie). W końcowym fragmencie kanionu SVF dynamicznie wzrasta.



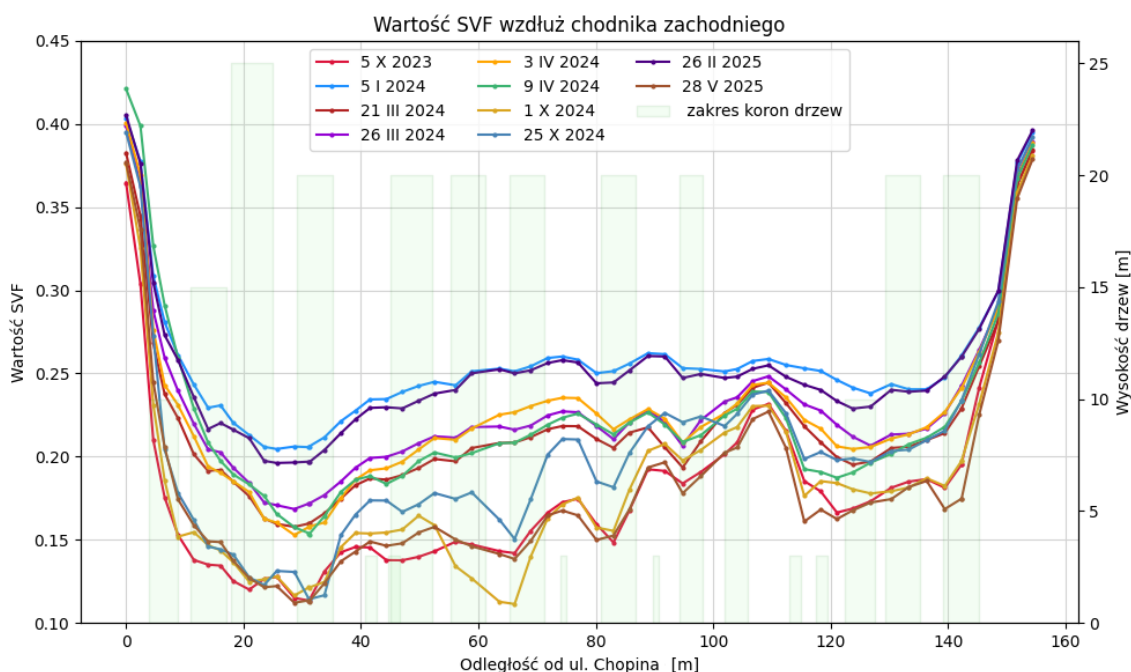
Rysunek 61. Wartości SVF wzdłuż chodnika wschodniego z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej



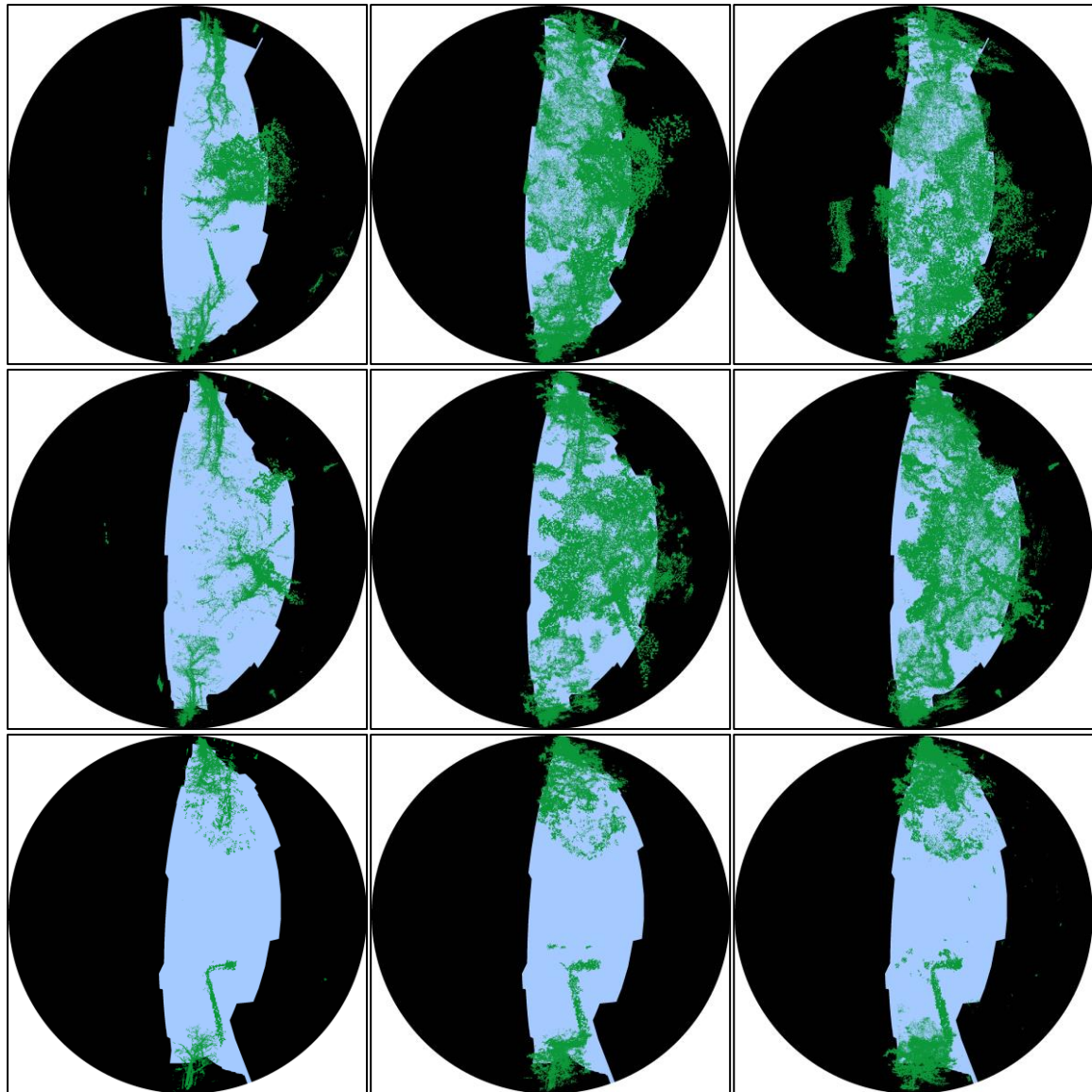
Rysunek 62. Wizualizacja wyników metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej, chodnik wschodni, minimum globalne, obrazy z 5 X 2023, 5 I 2024 i 3 IV 2024

Po stronie zachodniej, analogicznie jak po wschodniej, wyniki są rozmieszczone w trzech grupach. Wyjątek stanowi wykres z 25 X 2024, który znajduje się pomiędzy grupą przejściową a grupą z liśćmi. Jednoznacznie można stwierdzić, że strona zachodnia cechuje się dużo większą dynamiką zmian względem wschodniego chodnika. Niezależnie od daty, na początkowym odcinku profilu (do około osiemnastego metra) wartość SVF gwałtownie się obniża. W kolejnym fragmencie, do czterdziestego metra, kształt krzywych ma łagodniejszy przebieg, jednocześnie różnice sezonowe są dobrze dostrzegalne. W tym

odcinku zauważyć można minimum lokalne w okolicach trzydziestego trzeciego metra, a najniższe wartości współczynnik osiąga w okresach rozwiniętych liści. Po czterdziestym metrze następuje stopniowy wzrost widoczności nieba. Tendencja ta utrzymuje się dla wszystkich analizowanych dat. W przypadku grupy zestawów z liśćmi, w pięćdziesiątym drugim metrze występuje punkt przegięcia i wartości SVF zaczynają maleć do minimum globalnego w sześćdziesiątym piątym metrze, by ponownie wzrastać. Pozostałe krzywe systematycznie rosną do siedemdziesiątego szóstego metra profilu. Na odcinku między osiemdziesiątym a sto dwudziestym metrem, dla wszystkich zestawów danych występują naprzemiennie minima i maksima lokalne, których przebieg jest do siebie zbliżony. Miejscem charakterystycznym jest sto dziesiąty metr, gdzie wszystkie wartości SVF zawierają się w przedziale (0.20-0.26) i jest to zdecydowanie najbardziej otwarta przestrzeń między elewacjami (z wyłączeniem skrzyżowań), co związane jest z przerwą w wysokich nasadzeniach. Następnie wartość współczynnika spada, a dynamika zmiany zależna jest od sezonu. W grupie przejściowej i z liśćmi przebieg krzywych gwałtownie opada, natomiast w bezlistnej zmiana jest mniej dynamiczna. Ostatni odcinek kanionu charakteryzuje się wzrostem wartości SVF, co związane jest z otwarciem horyzontu na skrzyżowaniu z ulicą Lea.

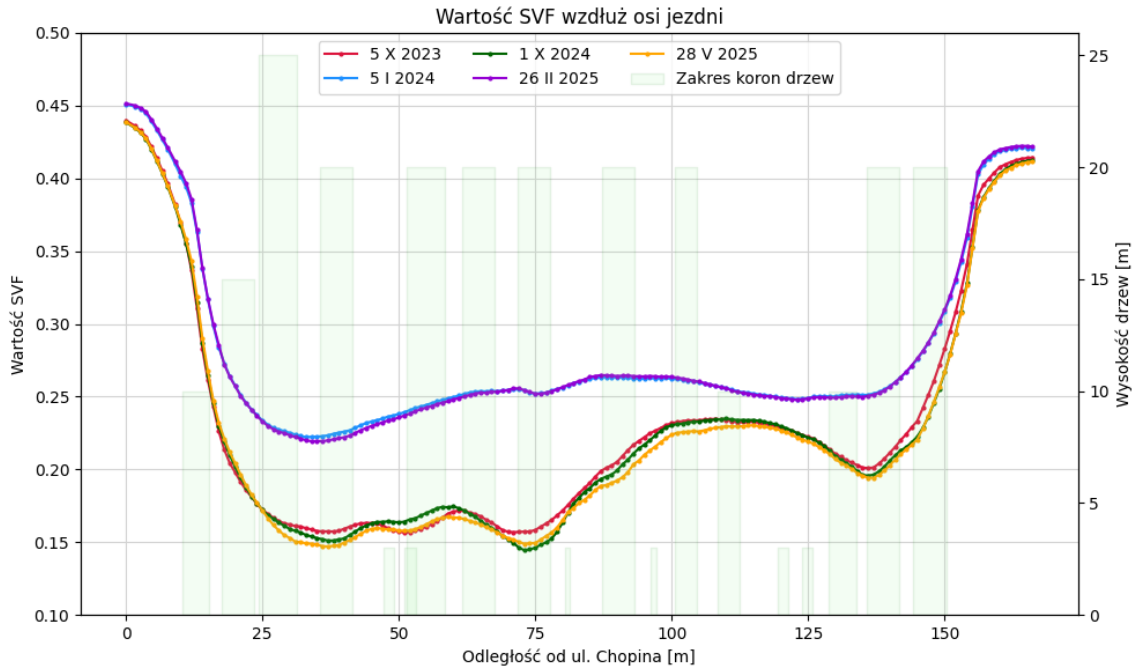


Rysunek 63. Wartości SVF wzdłuż chodnika zachodniego z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej

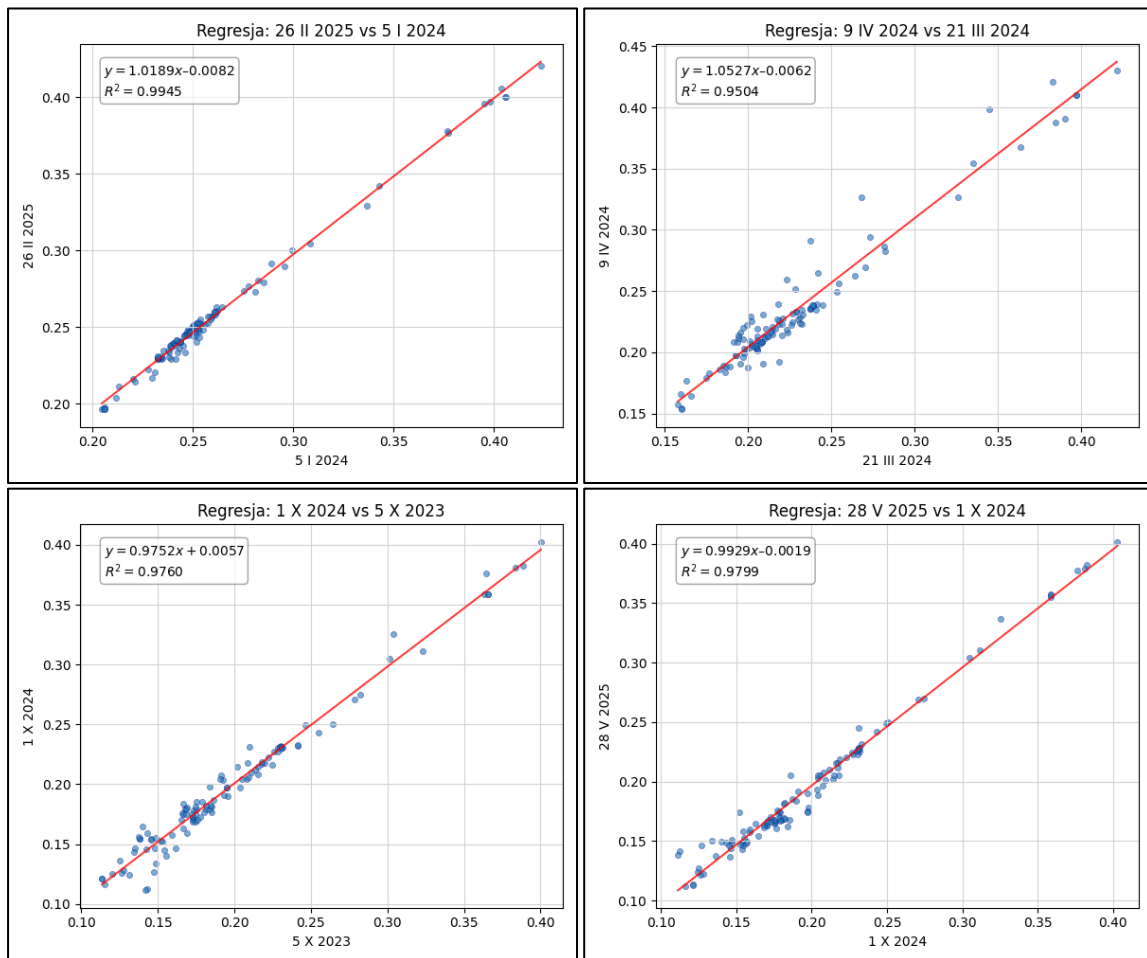


Rysunek 64. Wizualizacja wyników metody hybrydowej, chodnik zachodni, wiersze kolejno: trzydziesty trzeci, sześćdziesiąty piąty i sto dziesiąty metr profilu, kolumny kolejno 5 I 2024, 25 X 2024 i 28 V 2025

Obliczenia w osi jezdni wykonano dla stanu bezlistnego i z liśćmi. Podobnie jak w przypadku chodników, wyniki charakteryzują się wysoką zgodnością sezonową. Kształt krzywych jest bardzo zbliżony do przebiegu dla chodnika wschodniego (Rysunek 65). Ze względu na grupowanie się wyników wykonano regresję liniową pomiędzy wybranymi zestawami z poszczególnych grup, w celu określenia zależności w odpowiadających sobie porach roku (Rysunek 66). Dla omawianych zestawów, analiza regresji wykazała wysoką spójność wyników. Wszystkie modele charakteryzują się współczynnikiem  $R^2$  powyżej 0.95. Współczynniki kierunkowe wpasowanych funkcji zawierają się w przedziale (0.9752 - 1.0527), co oznacza, że zmienność danych pomiędzy zestawami była niewielka. Wyrazy wolne mieściły się w przedziale (-0.0082 - +0.0057). Wartości ujemne oznaczają zmniejszenie widoczności nieba wynikające np. z rozrostu roślinności.



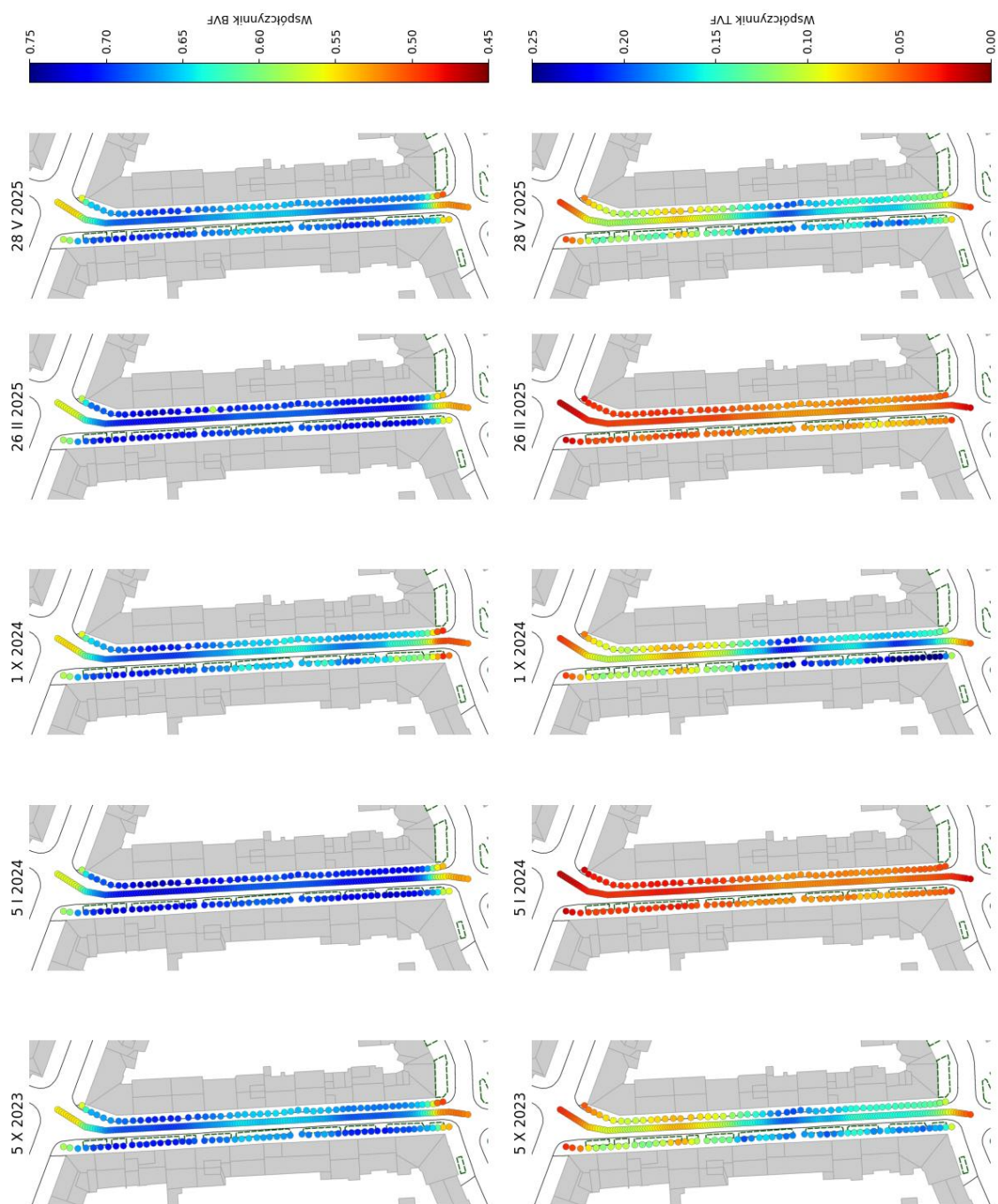
Rysunek 65. Wartości SVF wzdłuż osi jezdni z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej



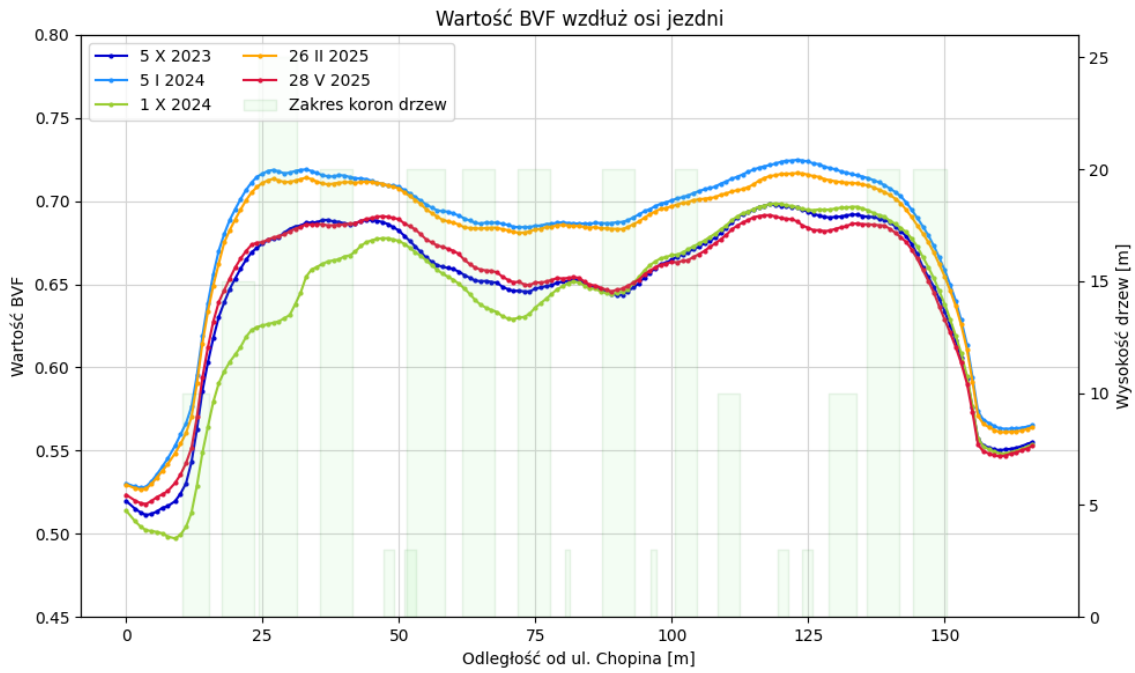
Rysunek 66. Zestawienie regresji liniowej dla wyników z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej z różnych pór roku

### Analizy dodatkowe - Building View Factor (BVF) i Tree View Factor (TVF)

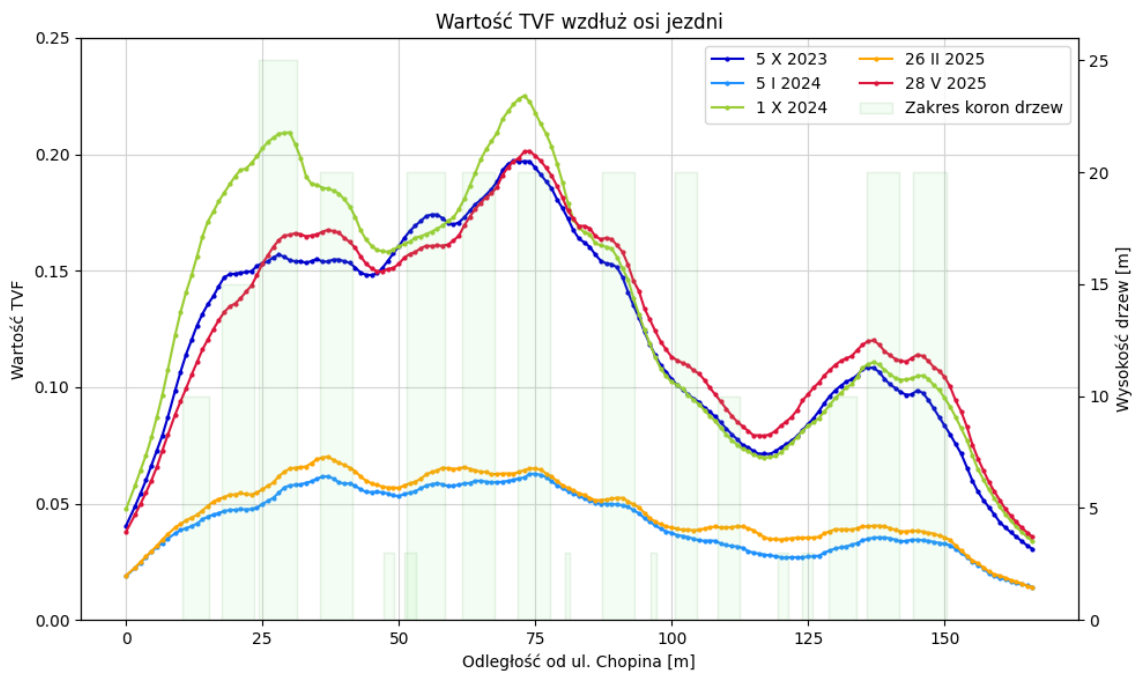
Dla wybranych zestawów przygotowano zestawienia pozostałych View Factors w postaci map (Rysunek 67) i wykresów (Rysunek 68, Rysunek 69).



Rysunek 67. Mapy wartości BVF i TVF z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej



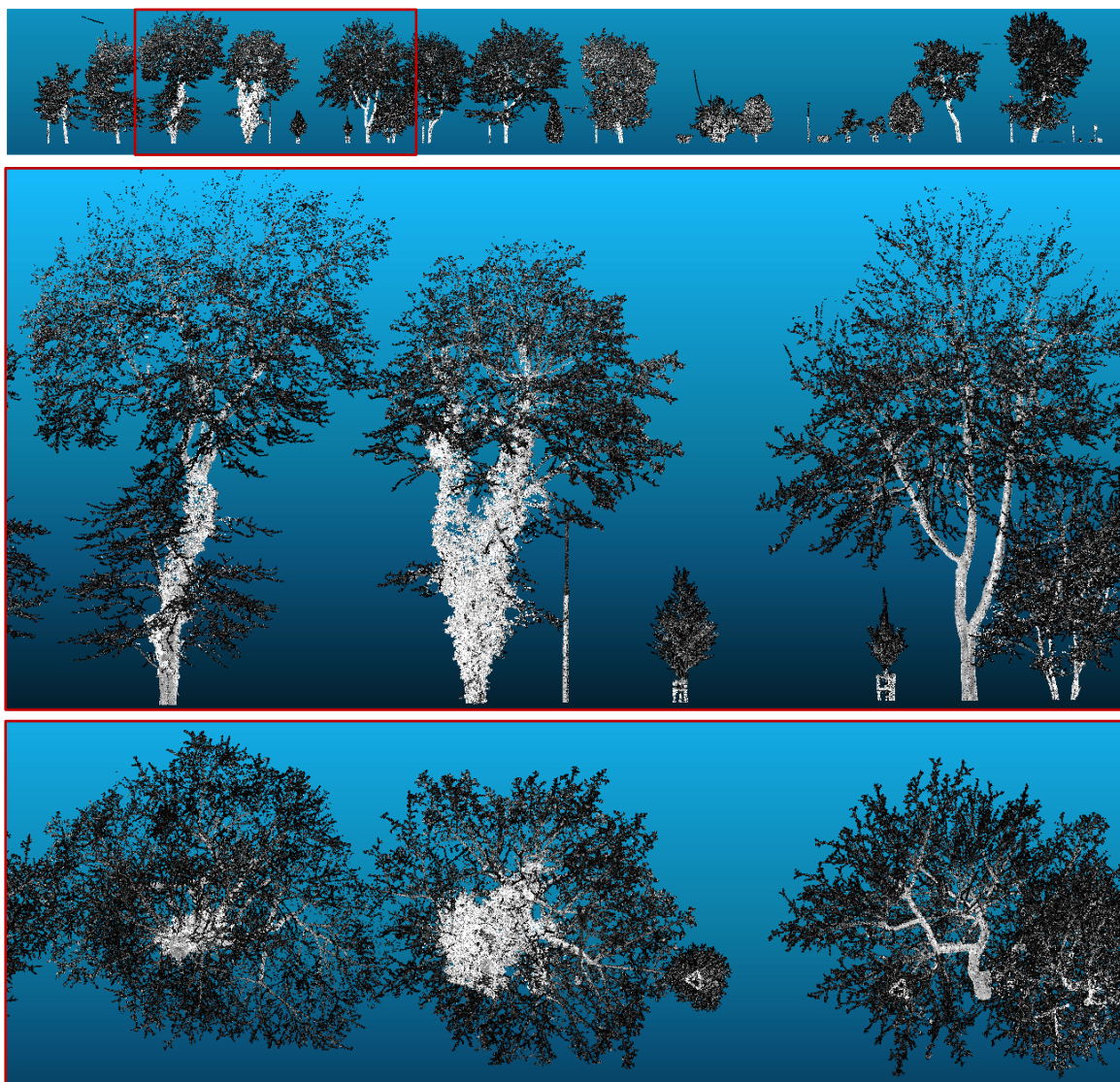
Rysunek 68. Wartości BVF wzdłuż osi jezdni z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej



Rysunek 69. Wartości TVF wzdłuż osi jezdni z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej

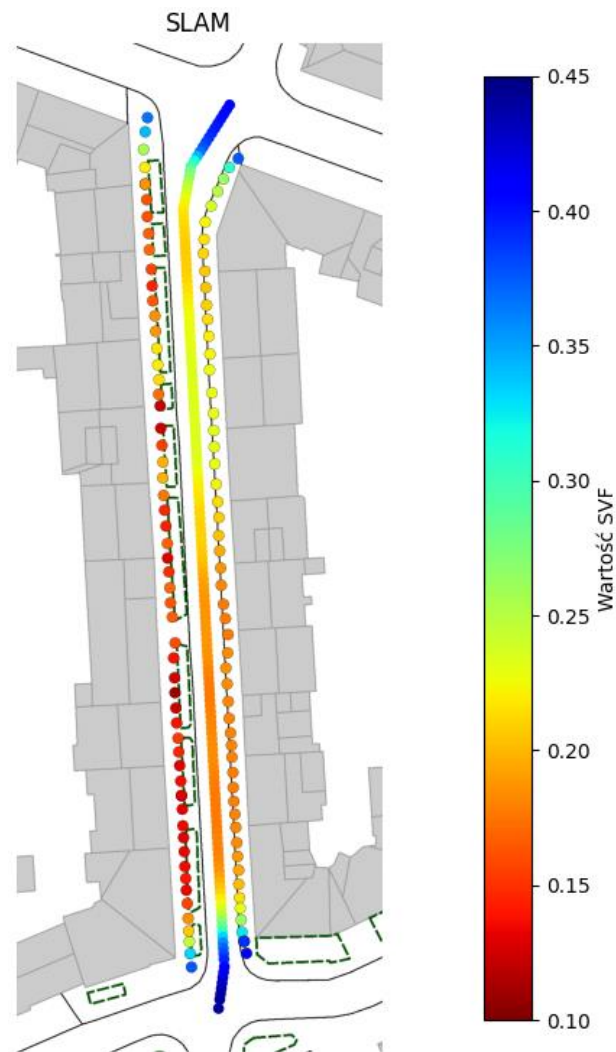
### 6.3.3. Chmura punktów ze skanera SLAM

Ostatni wariant metody hybrydowej zakładał wykorzystanie chmury punktów z mobilnego skanera typu SLAM. Pomiar zrealizowany został w okresie zimowym (2 II 2025) w trakcie przejścia dwoma chodnikami i trwał około dziesięciu minut. Wykorzystany skaner zarejestrował trzy odbicia wiązki. W związku ze specyfiką działania algorytmów SLAM, część punktów w chmurze nie odzwierciedla rzeczywistej struktury przestrzeni. Wynika to głównie z niewielkich przesunięć trajektorii oraz wielokrotnego skanowania tych samych obiektów pod różnymi kątami (przejście w dwie strony ulicą Konarskiego). Pozyskana chmura charakteryzowała się bardzo dużą gęstością - pomimo usunięcia duplikatów punktów i odszumienia, chmura wykorzystana do analiz liczyła ponad dziesięć milionów punktów (Rysunek 70). Filtracja rozrzedza lokalnie chmurę z nadmiarowych punktów, jednakże zawiera ona nadal dużą liczbę punktów ułożonych między gałęziami. Prawdopodobnie są to odbicia tego samego impulsu od kilku gałęzi, co tworzy punkty fałszywe punkty.

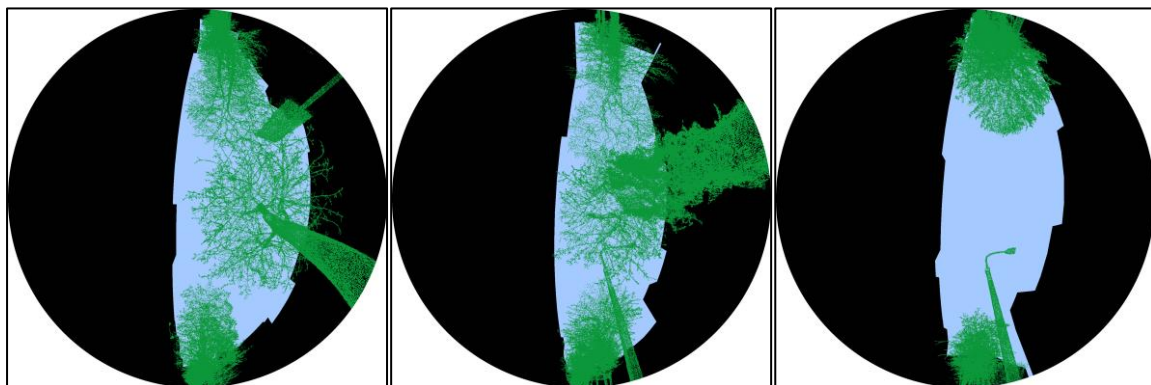


Rysunek 70. Wizualizacja chmury punktów ze SLAM, kolejno wszystkie drzewa wzdłuż Konarskiego, zbliżenie na jedną z najgęstszych stref, widok od dołu.

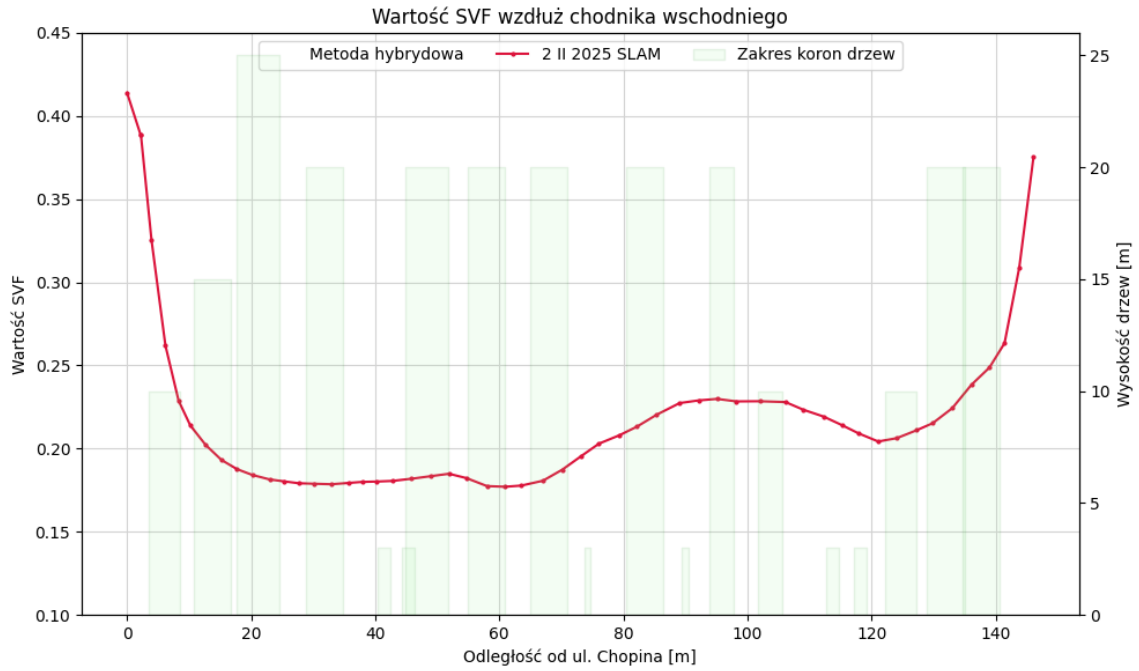
Obliczenia SVF zrealizowano wzdłuż obu chodników i osi jezdni (Rysunek 71) natomiast (Rysunek 72) przedstawia przykładowe obrazy wirtualne z metody hybrydowej. Uzyskane wyniki dla chodników i osi jezdni przedstawiają wykresy (Rysunek 73, Rysunek 74, Rysunek 75).



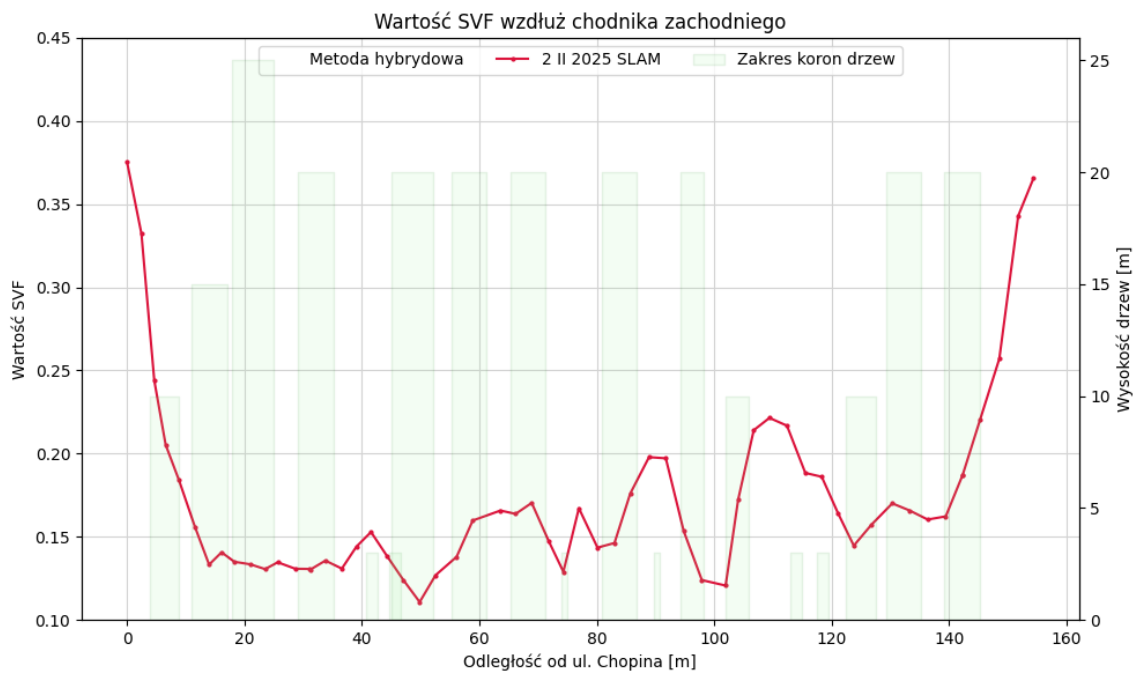
Rysunek 71. Mapa wartości SVF z metody hybrydowej z chmury SLAM



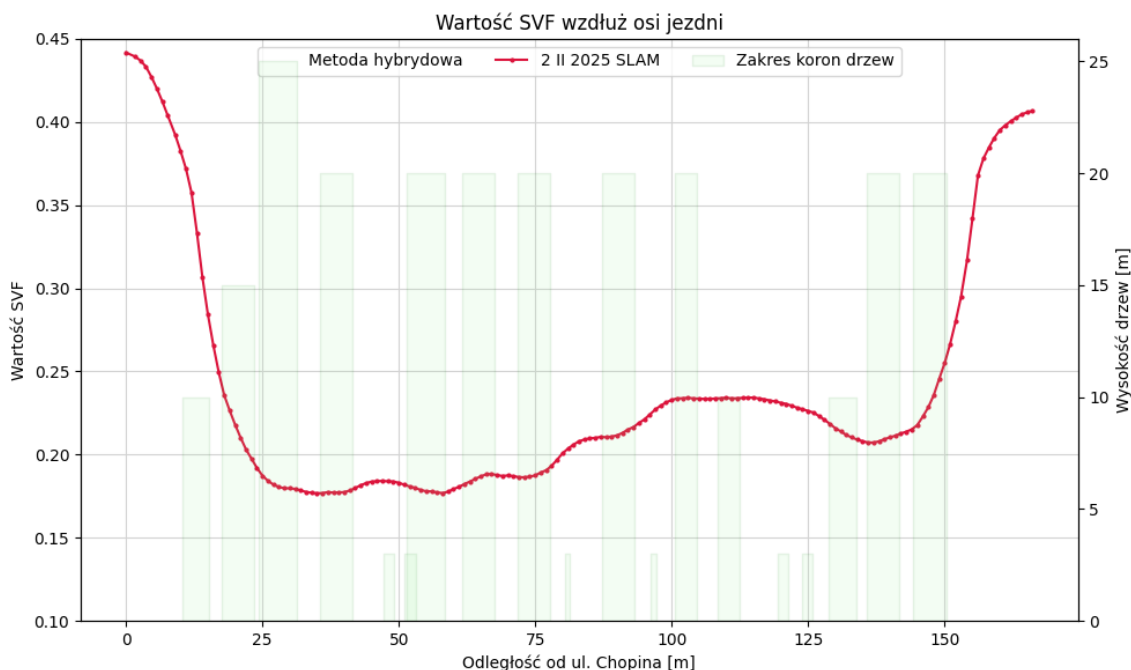
Rysunek 72. Wizualizacja metody hybrydowej z chmury SLAM- chodnik zachodni, obrazy wirtualne



Rysunek 73. Wartości SVF wzdłuż chodnika wschodniego z metody hybrydowej z chmury SLAM



Rysunek 74. Wartości SVF wzdłuż chodnika zachodniego z metody hybrydowej z chmury SLAM

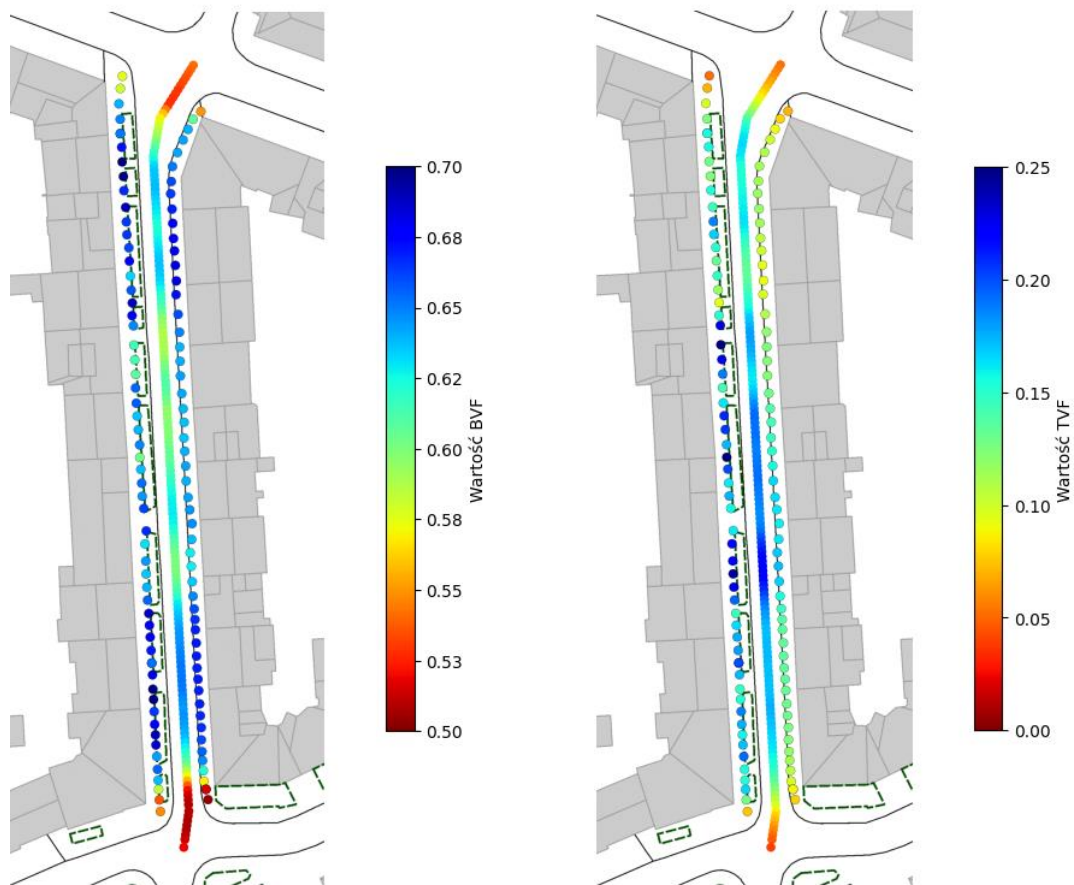


Rysunek 75. Wartości SVF wzdłuż osi jezdni z metody hybrydowej z chmury SLAM

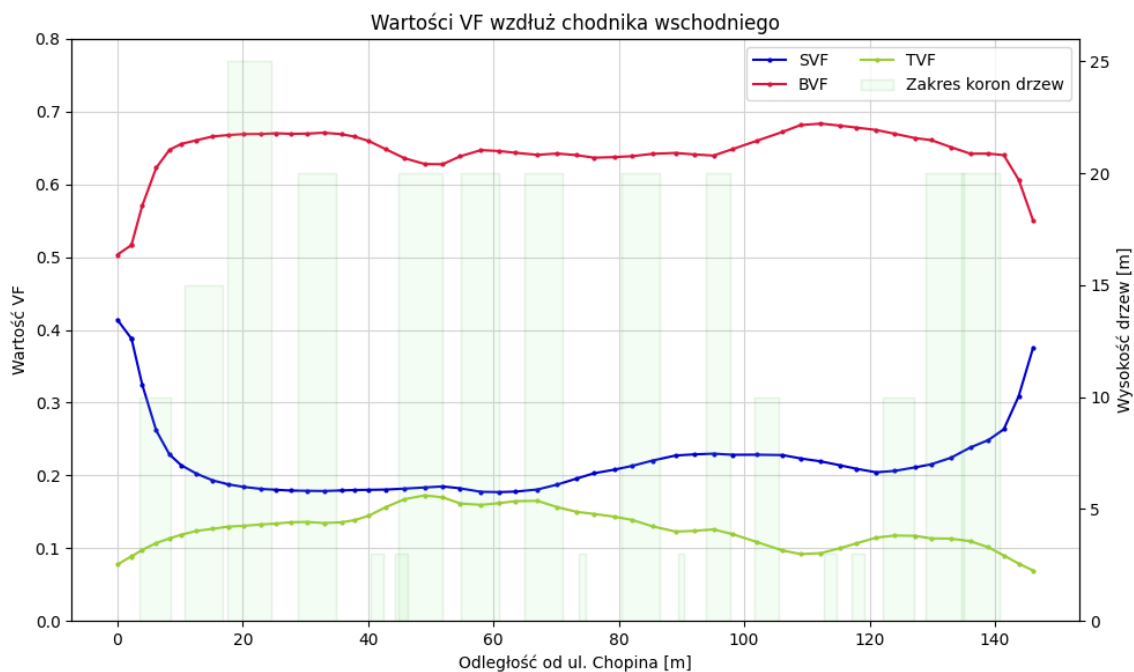
W odniesieniu do omawianych powyżej wyników, SVF wyznaczony metodą hybrydową w oparciu o dane SLAM uzyskał najniższą wartość ze wszystkich obliczeń wykonanych tą metodą (0.1108), pomimo faktu, że reprezentuje stan bezlistny. W przypadku chodnika zachodniego (Rysunek 74) wartości SVF charakteryzują się dużą zmiennością, z kilkoma minimami w bezpośrednim sąsiedztwie wysokich drzew. Najniższe wartości współczynnika osiąga między pięćdziesiątym a osiemdziesiątym metrem oraz między dziewięćdziesiątym szóstym a sto trzecim. Wzdłuż chodnika wschodniego i osi jezdni przebieg wartości współczynnika jest bardziej wyrównany, nie występują tak gwałtowne zmiany jak po stronie zachodniej.

#### ***Analizy dodatkowe - Building View Factor (BVF) i Tree View Factor (TVF)***

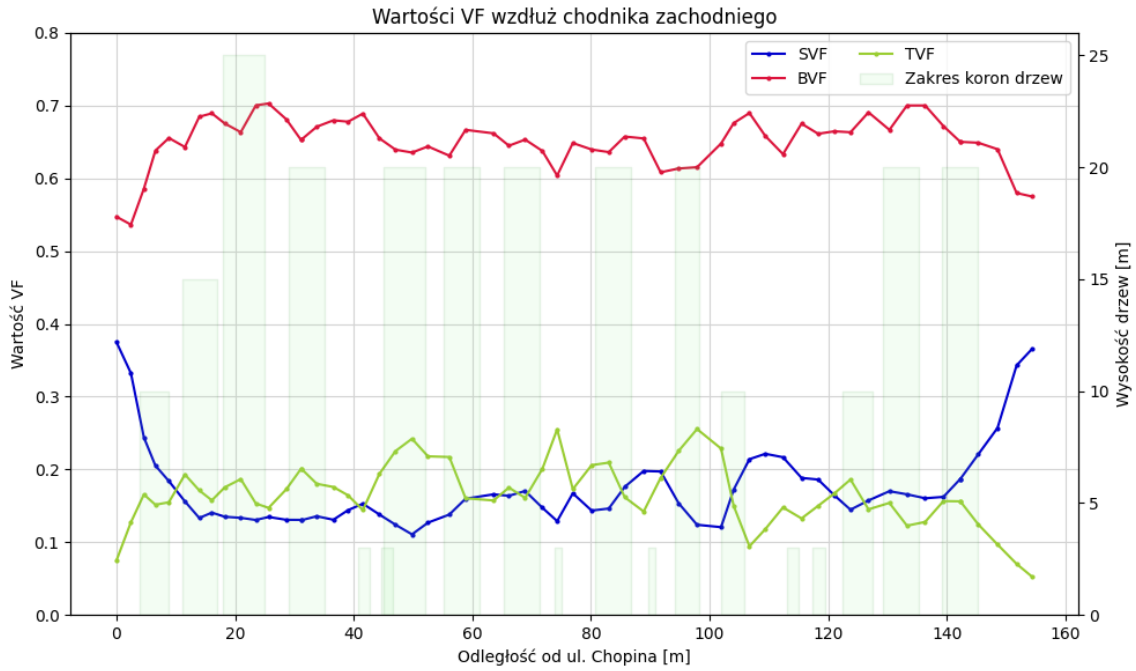
Analogicznie jak dla wcześniejszych omawianych przypadków, przygotowano zestawienie pozostałych obliczonych View Factors w postaci map (Rysunek 76) oraz wykresów (Rysunek 77, Rysunek 78, Rysunek 79).



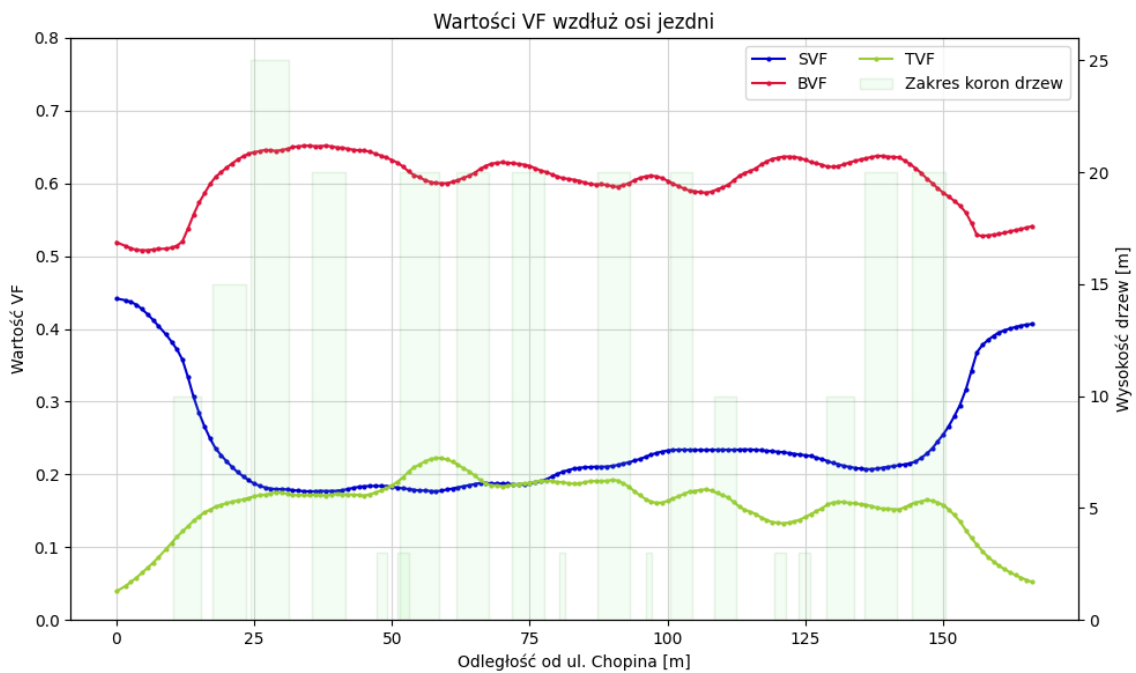
Rysunek 76. Mapy BVF i TVF z metody hybrydowej z chmury SLAM



Rysunek 77. Wartości VF wzdłuż chodnika wschodniego z metody hybrydowej z chmury SLAM



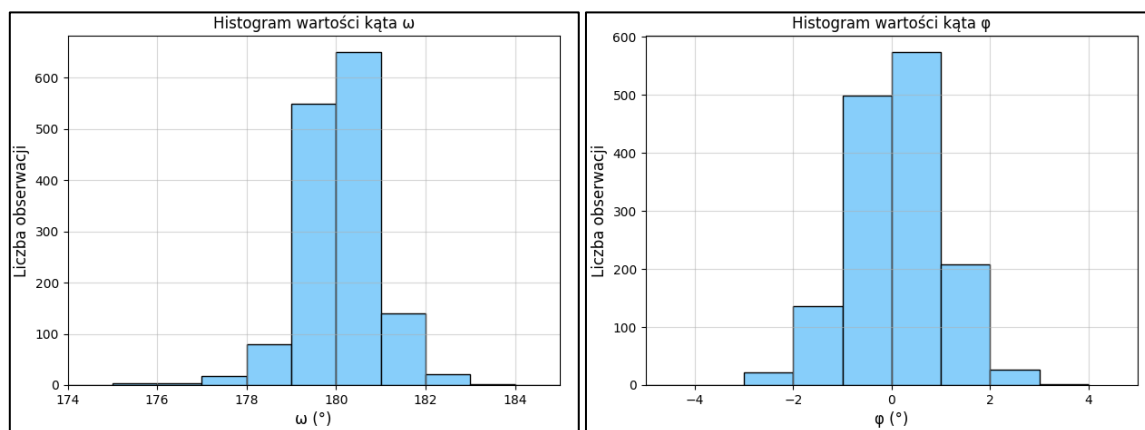
Rysunek 78. Wartości VF wzdłuż chodnika zachodniego z metody hybrydowej z chmury SLAM



Rysunek 79. Wartości VF wzdłuż osi jezdni z metody hybrydowej z chmury SLAM

## 6.4. Wpływ nachylenia zdjęcia na wartość SVF

Zarówno na potrzeby metody fotograficznej, jak i hybrydowej, materiał badawczy pozyskiwany był kamerą sferyczną bez urządzeń stabilizujących. W efekcie praktycznie żadne zdjęcie nie było idealnie skierowane w zenit. W trakcie opracowania wszystkie zdjęcia uzyskały EOZ włącznie z wartościami kątowymi. Przeanalizowano odchylenia od pionu (kąty  $\omega$  i  $\varphi$ ) dla reprezentatywnych zestawów danych obrazowych (Rysunek 80). Zestawienie wartości statystycznych zawiera (Tabela 13). Kąt  $\omega$  oznacza obrót wokół osi wschodniej układu terenowego (PL-1992), a kąt  $\varphi$  obrót wokół osi północnej. Zdjęcie ściśle zenitalne ma kąt  $\omega$  równy  $180^\circ$ , a kąt  $\varphi$  wynosi  $0^\circ$ .

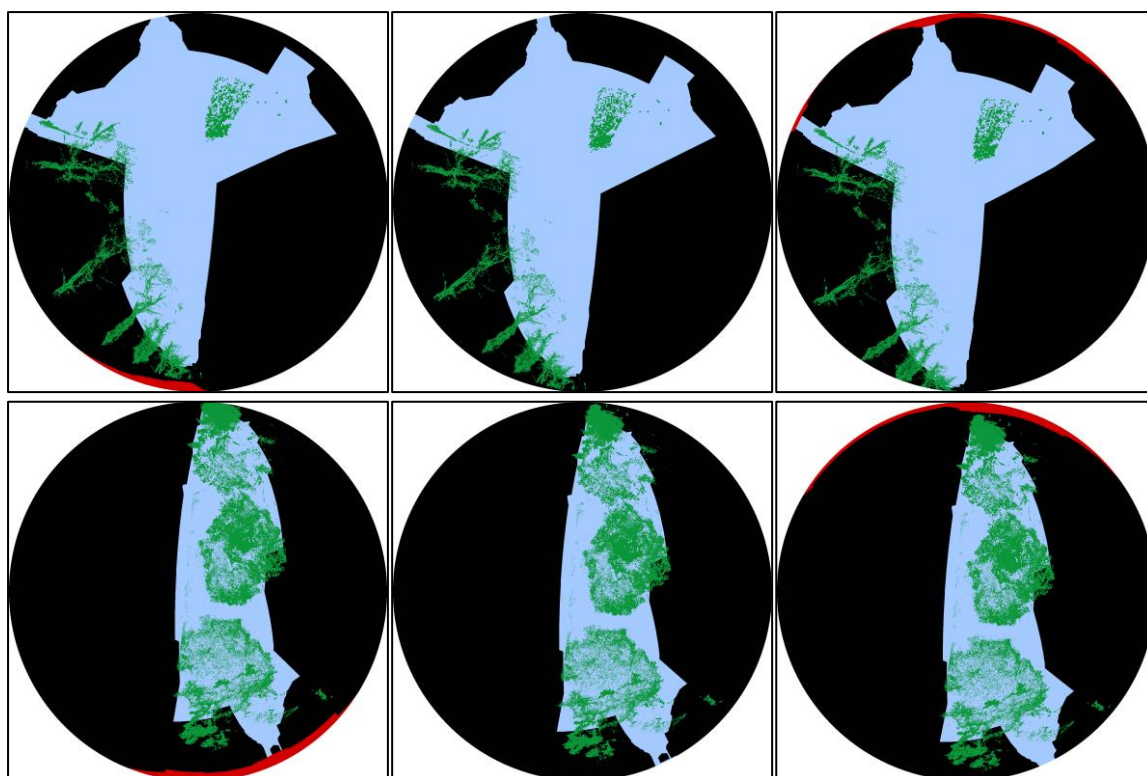


Rysunek 80. Histogramy wartości kątów  $\omega$  i  $\varphi$  uzyskane dla zdjęć

Tabela 13. Zestawienie statystyk dla kątów  $\omega$  i  $\varphi$

Kąt	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>mean</i>	<i>median</i>	<i>std</i>
$\omega$ [ $^\circ$ ]	175.63	183.23	180.09	180.22	0.90
$\varphi$ [ $^\circ$ ]	-2.33	3.16	0.11	0.12	0.92

Z uwagi na specyfikę kanionu (orientacja północ-południe) odchylenia kąta  $\varphi$  miały znikomy wpływ na wyniki. Analiza histogramów i statystyk wykazała, że wartości kąta  $\omega$  tylko sporadycznie odchodziły się od pionu o  $\pm 5^\circ$ . Z tego względu zdecydowano się ocenić wpływ wychylenia  $\omega$  na wartość SVF wyznaczanego metodą hybrydową. W tym celu przeprowadzono dodatkowe obliczenia symulacyjne, które uwzględniły nachylenie zdjęć w płaszczyźnie tego kąta o wartości  $-5^\circ$  oraz  $+5^\circ$ . Realizacja obliczeń opierała się na obrocie zarówno budynków jak i chmury punktów wchodzących w skład trójwymiarowego modelu kanionu. Analizę przeprowadzono wzdłuż obu chodników ulicy Konarskiego z uwzględnieniem chmur punktów z rejestracji kamerą sferyczną w sezonie bezlistnym i z liśćmi (5 I 2024 oraz 28 V 2025). Na podstawie wirtualnych obrazów stwierdzono, że wpływ nachylenia jest niewielki (Rysunek 81 - kolor czerwony) i dotyczy głównie ujawnienia obszaru pod obrysem budynków. Największe zmiany zaobserwować można na skrzyżowaniach, gdzie otwarcie horyzontu, zwłaszcza w dalekim planie, jest zdecydowanie większe. Wyznaczone wartości współczynnika SVF z nachylonych obrazów wirtualnych porównano z oryginalnymi wynikami, a różnice zestawiono w (Tabela 14).



Rysunek 81. Przykład wpływu zmiany kąta  $\omega$ , kolejno od lewej:  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $+5^\circ$ , dla zestawu z sezonu bezlistnego (górze) i z liśćmi (dół). Kolorem czerwonym oznaczono obszar pojawiający się pod budynkami

Tabela 14. Zestawienie statystyk dla różnic SVF z oryginalnych i nachylonych wirtualnych obrazów

<i>Zestaw</i>	<i>Wariant</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>mean</i>	<i>std</i>
5 I 2024	SVF- $5^\circ$ - SVF	-0.0060	0.0036	0.0001	0.0011
	SVF+ $5^\circ$ - SVF	-0.0044	0.0026	0.0002	0.0011
28 V 2025	SVF- $5^\circ$ - SVF	-0.0030	0.0020	0.0002	0.0008
	SVF+ $5^\circ$ - SVF	-0.0058	0.0034	0.0001	0.0011

Na podstawie przeprowadzonych analiz można uznać, że wpływ nachylenia obrazu fish-eye na wartość współczynnika SVF wyznaczanego metodą hybrydową jest nie większy niż 0.005. Taka dokładność w znikomym stopniu zakłóca interpretację wyników.

## 6.5. Porównanie wyników metody hybrydowej (3D) i fotograficznej (2D) wysokorozdzielczej

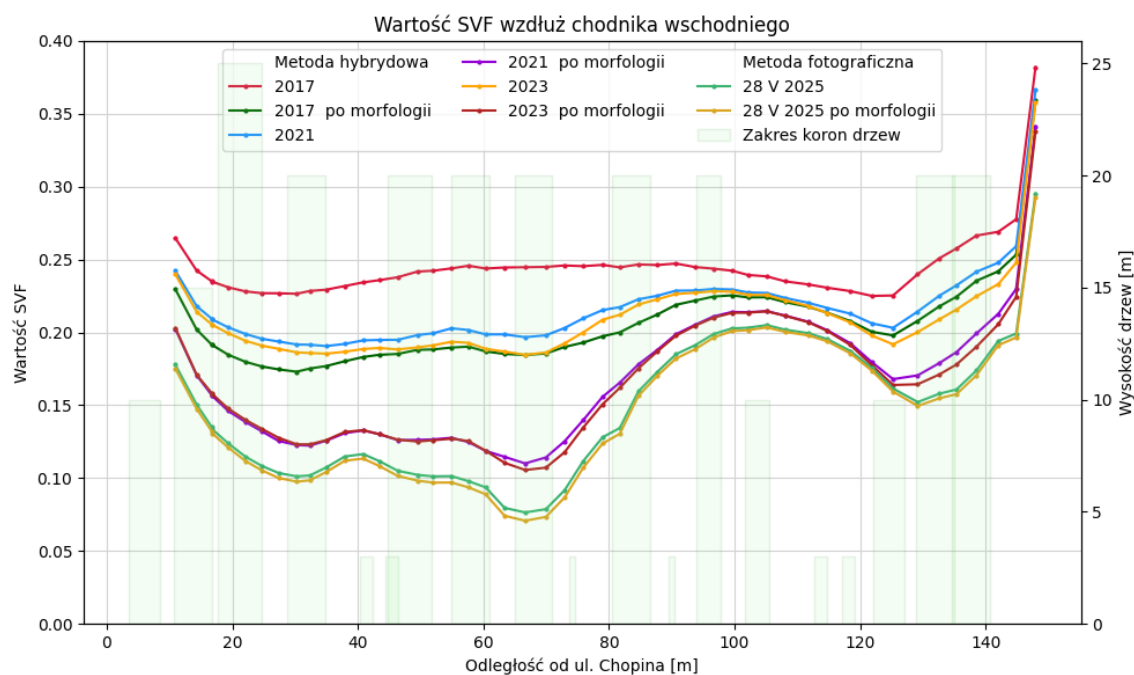
We wszystkich analizowanych wariantach porównano wyniki uzyskane metodą hybrydową i fotograficzną wysokorozdzielczą. Dodatkowo, oceniono wpływ operacji morfologicznych wyniki obu metod.

### 6.5.1. Chmura punktów z ALS

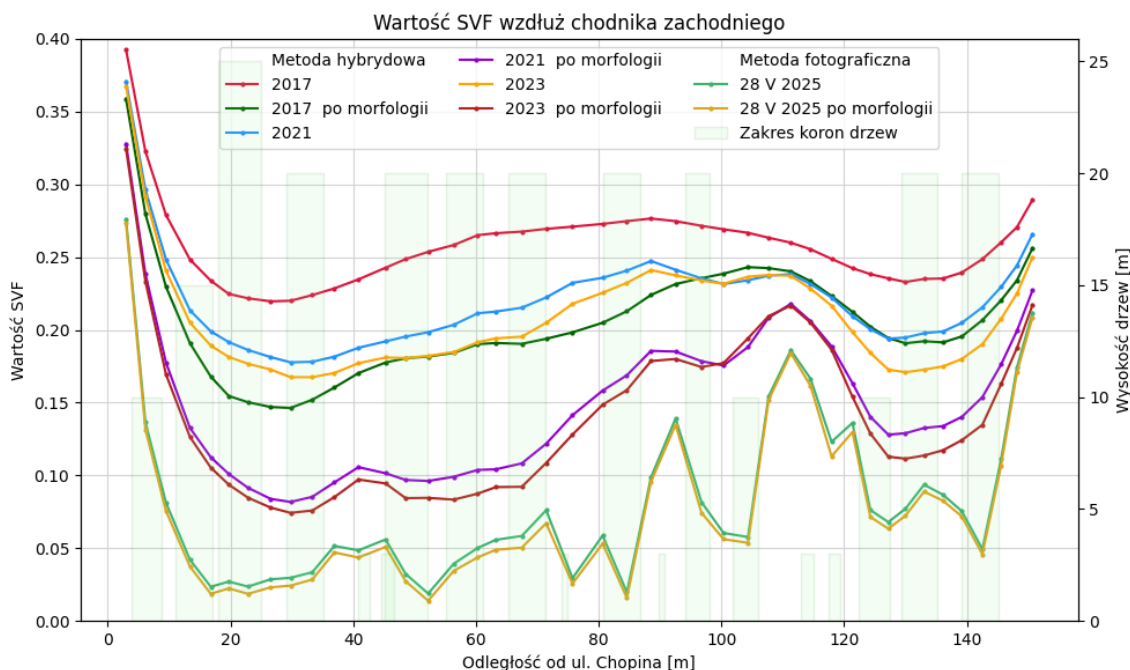
Dane ALS zbierane były w sezonie z liśćmi, dlatego porównanie wyników z obu metod przeprowadzono w odniesieniu do wartości SVF z metody fotograficznej wysokorozdzielczej z 28 V 2025. Analizując oba wykresy (Rysunek 82, Rysunek 83), jednoznacznie można stwierdzić, że wartości SVF wyznaczone metodą hybrydową z chmur ALS znacząco odstają od tych uzyskanych z metody fotograficznej wysokorozdzielczej. Na rozbieżności w wartościach współczynnika wpływają nie tylko zastosowane metody, lecz także rozpiętość czasowa pomiędzy rejestracją ALS a wykonaniem obrazów fish-eye. Pomiędzy najstarszymi danymi ALS a metodą fotograficzną minęło osiem lat. Statystyki uzyskanych wartości zawiera (Tabela 15).

Tabela 15. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmurą ALS z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie statystyczne

Zestaw	Przed morfologią				Po morfologii			
	min	max	mean	std	min	max	mean	std
2017	0.2196	0.3924	0.2502	0.0274	0.1464	0.3593	0.2049	0.0348
2021	0.1777	0.3707	0.2175	0.0312	0.0818	0.3413	0.1578	0.0485
2023	0.1675	0.3673	0.2081	0.0330	0.0743	0.3380	0.1525	0.0505
28 V 2025	0.0188	0.2952	0.1154	0.0609	0.0139	0.2927	0.1114	0.0619



Rysunek 82. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmurą ALS z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie graficzne dla chodnika wschodniego



Rysunek 83. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmur ALS z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie graficzne dla chodnika zachodniego

Średni SVF dla danych z 2017 roku wynosił 0.2502, po operacji morfologicznej spadł do 0.2049. W kolejnych latach trend zbliżania wartości współczynnika po operacji morfologicznej do wyników z metody fotograficznej jest nadal widoczny, niezależnie od lokalizacji, zarówno dla chodnika zachodniego przebiegającego bezpośrednio wzdłuż drzew, jak i dla chodnika wschodniego. Analizując odchylenia standardowe można stwierdzić, że stosowanie operacji morfologicznych zwiększa lokalną zmienność wartości współczynnika, zwłaszcza w przypadku danych z 2021 i 2023 roku, co koreluje ze zmianą kształtu wykresów. Najmniejsze rozbieżności między metodami występują w obszarach o minimalnym przesłonięciu drzew. Zastosowanie operacji morfologicznej uznano za zasadne, ponieważ w każdym przypadku skutkowało obniżeniem wartości SVF i upodobnieniem kształtu krzywych do wyników z metody fotograficznej. Brak pełnej zgodności wynika z różnicy w czasie pozyskania danych i pozwala uwzględnić zmiany w strukturze roślinności.

### 6.5.2. Chmura punktów z rejestracji kamerą sferyczną

Porównanie wyników z obu metod przeprowadzono dla stanu bezlistnego i z pełnymi liśćmi wzdłuż każdego z chodników. Dla okresów zimowych zestawiono wyniki z metody hybrydowej z 5 I 2024 i 26 II 2025 z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą z 25 II 2025. W przypadku wariantu letniego porównano wyniki metody hybrydowej i fotograficznej wysokorozdzielczej z 28 V 2025.

#### *Sezon bezlistny*

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń, zestawiono statystyki uzyskanych wyników z poszczególnych zestawów danych, bez rozróżnienia na chodniki. Szczegóły zawiera (Tabela 16). Analiza wartości statystycznych wskazuje, że średnie wartości z metody hybrydowej są do siebie bardzo zbliżone, mimo że rejestracje dzieli ponad rok. Zastosowanie operacji morfologicznej obniża wartości średnie SVF, zbliżając je tym samym do średnich wartości z metody fotograficznej.

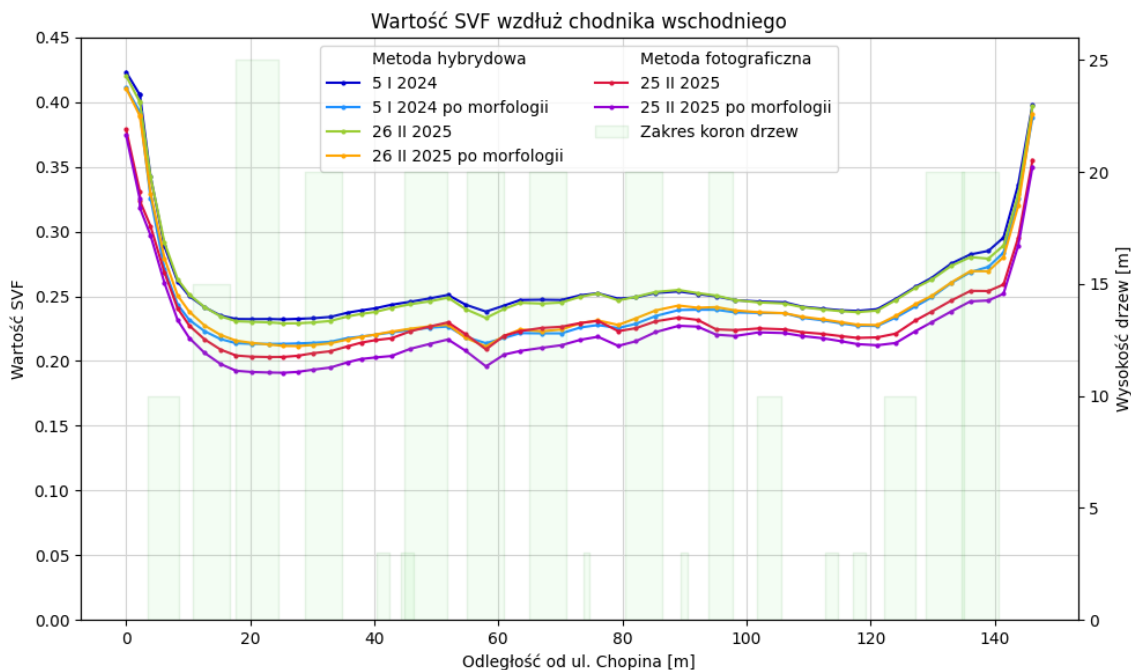
Tabela 16. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie statystyczne, sezon bezlistny

Zestaw	Przed morfologią				Po morfologii			
	min	max	mean	std	min	max	mean	std
24 I 2024	0.2046	0.4508	0.2715	0.0566	0.1806	0.4112	0.2395	0.0468
26 II 2025	0.1962	0.4514	0.2701	0.0578	0.1716	0.4108	0.2391	0.0483
m. fotograficzna	0.1675	0.3790	0.2256	0.0410	0.1519	0.3746	0.2134	0.0439

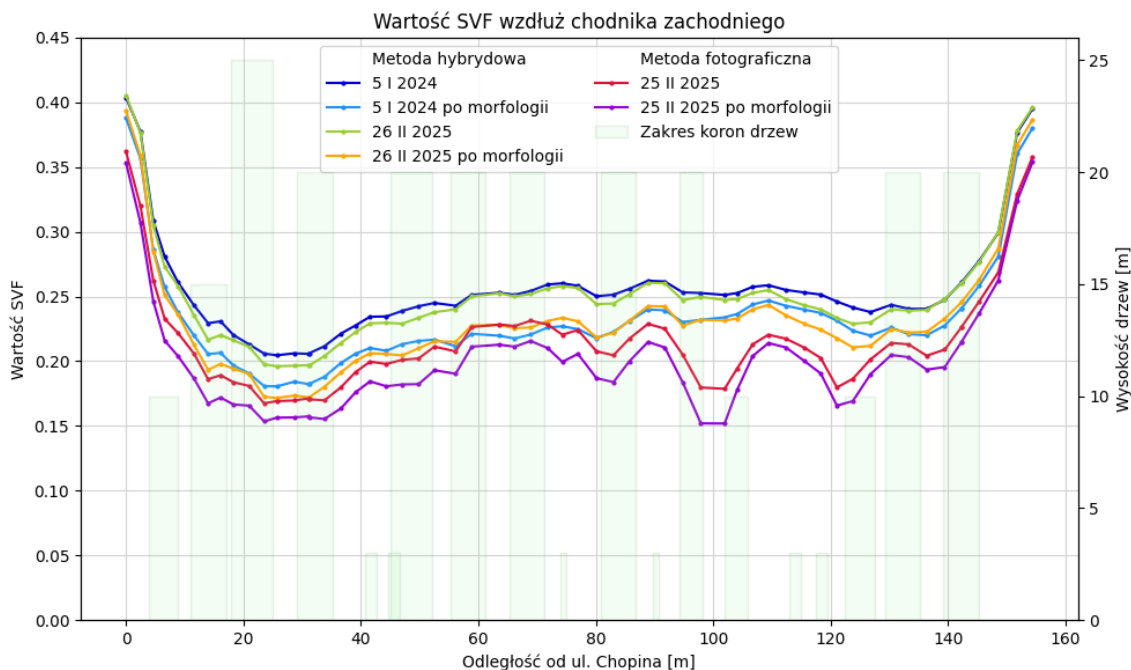
Analizy wykresów dla stanu bezlistnego, w przypadku strony wschodniej, wskazują, że krzywe zachowują niemal identyczny przebieg, różniąc się jedynie poziomem wartości. (Rysunek 84). Co więcej, zaobserwować można, że wyniki uzyskane metodą fotograficzną wysokorozdzielczą są średnio o 0.03 niższe niż z metody hybrydowej. W przypadku stosowania operacji morfologicznej na obrazach z metody fotograficznej, średnia różnica między metodami wzrasta do -0.04. Morfologia na obszarach z niewielkim zadrzewieniem, w znikomym stopniu wpływa na obniżenie wartości SVF. Zastosowanie operacji morfologicznej na wirtualnych obrazach z metody hybrydowej pozwala uzyskać wyniki zbliżone do tych otrzymywanych z metody fotograficznej.

Dla strony zachodniej zachowana jest tendencja niższych wartości uzyskiwanych z metody fotograficznej niż z hybrydowej, jednak w przebiegu krzywych z poszczególnych metod występuje więcej odstępstw (Rysunek 85). Średnie różnice wynoszą odpowiednio -0.04 dla metody fotograficznej i -0.06 dla wyników po morfologii. Największą różnicę pomiędzy wartościami z metod (-0.07 przed i -0.10 po morfologii) zaobserwować można w okolicach setnego metra profilu. Powodem aż tak wysokiej różnicy są dwa czynniki: pierwszym jest budynek po wschodniej stronie kanionu, który został przebudowany, obecnie jest on wyższy niż w 2017 roku (z którego pochodzą dane wektorowe budynków). Drugim natomiast są gałęzie, głównie jaśminowca i jarzębu, które w przypadku metody hybrydowej okazały się zbyt cienkie, by mogły zostać poprawnie zarejestrowane przez

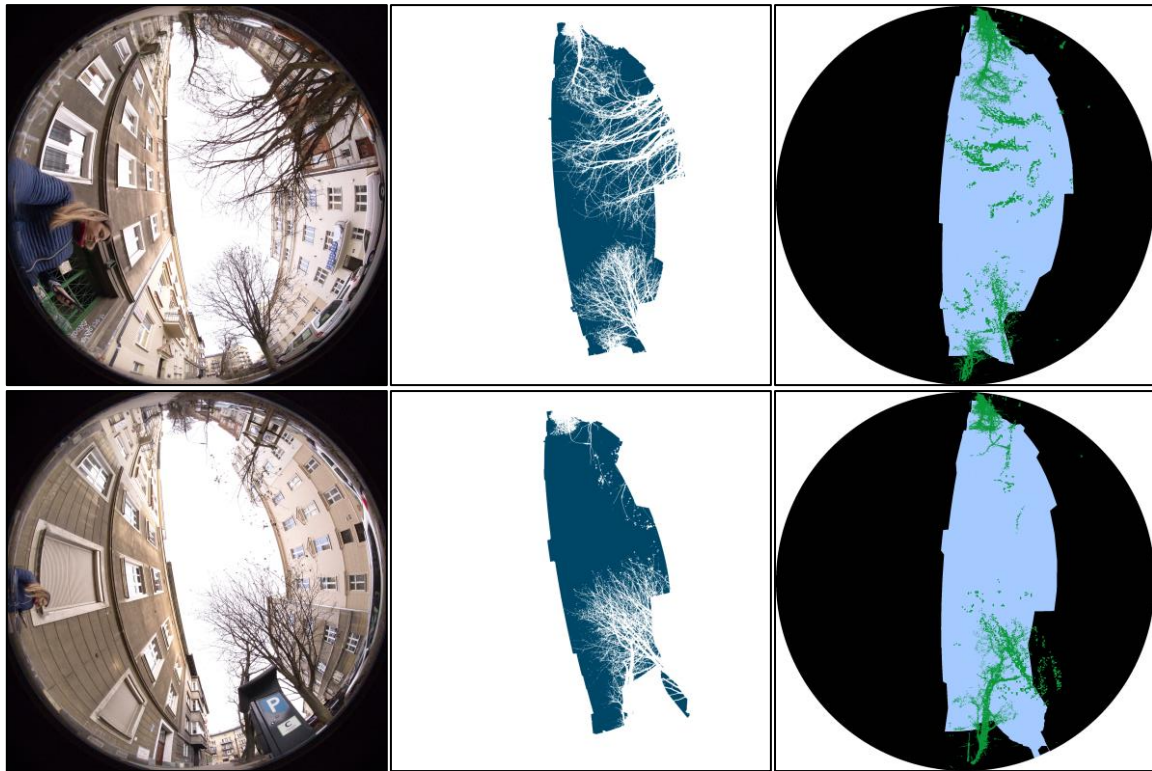
algorytmy SfM-MVS, jednak w metodzie fotograficznej zostały wychwycone jako przesłonięcie nieba. Podobna sytuacja ma miejsce w sto dwudziestym metrze profilu. Tym razem, poza wpływem wcześniej wspomnianego budynku, dodatkowym aspektem wpływającym na obniżenie widoczności nieba w metodzie fotograficznej jest parkometr (Rysunek 86).



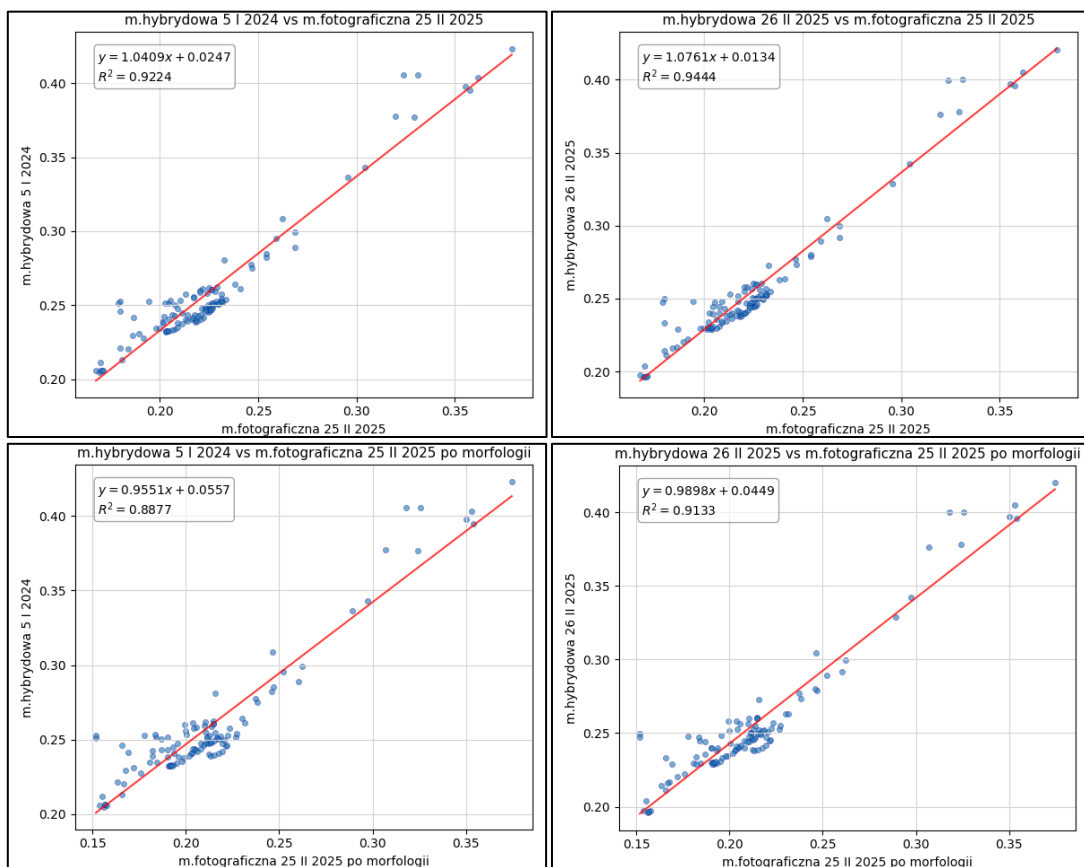
Rysunek 84. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie graficzne dla chodnika wschodniego, sezon bezlistny.



Rysunek 85. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie graficzne dla chodnika zachodniego, sezon bezlistny



Rysunek 86. Wizualizacja wyników z metody fotograficznej wysokorozdzielczej i hybrydowej z rejestracji kamerą sferyczną dla setnego (góra) i sto dwudziestego (dół) metra chodnika zachodniego, kolejno obraz z metody fotograficznej, maska nieba oraz obraz z metody hybrydowej

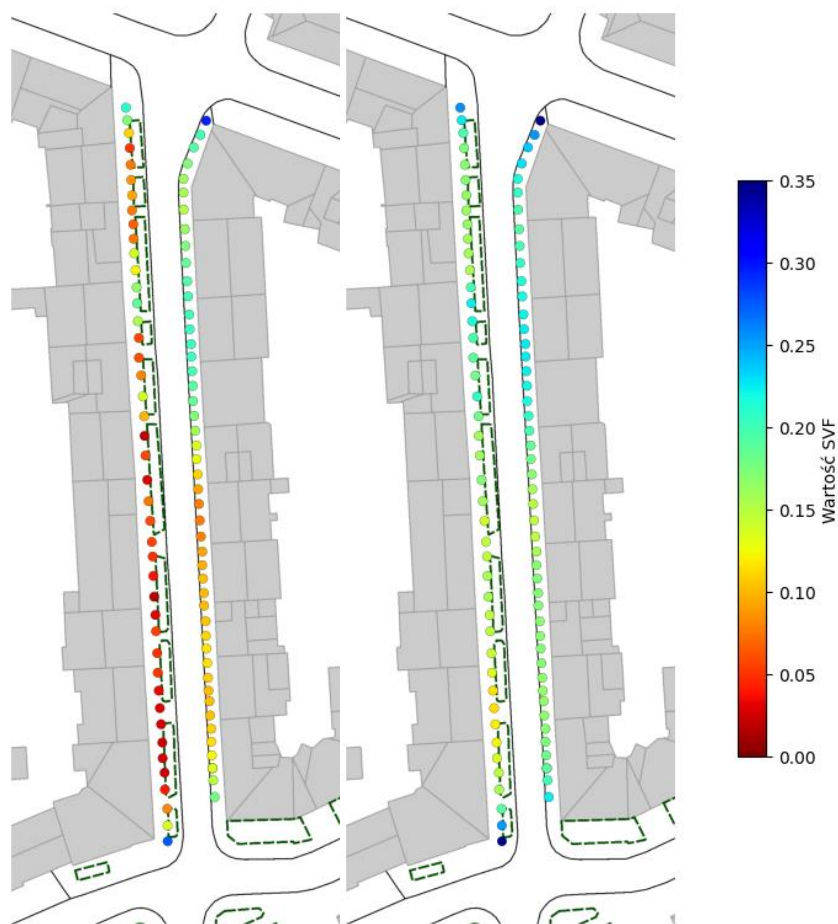


Rysunek 87. Zestawienie regresji liniowej dla wyników z różnych metod

Aby lepiej ocenić zgodność wyników uzyskanych różnymi metodami, przeprowadzono regresję liniową, badając zależność między rezultatami. Na podstawie poniższych wykresów (Rysunek 87) można stwierdzić wysoką zgodność wyników, współczynnik  $R^2$  przekroczył wartość 0.92 dla porównania z oryginalną metodą fotograficzną. Oba współczynniki kierunkowe są powyżej 1.05. Wykonanie operacji morfologicznej spowodowało większe dysproporcje w wyznaczonych wartościach, co przełożyło się na niższy  $R^2$ , nie mniej nadal wysoki odpowiednio 0.89 i 0.91. Natomiast współczynniki kierunkowe spadły nieznacznie poniżej jedności.

### ***Sezon z liśćmi***

Analogiczną analizę przeprowadzono dla wyników uzyskanych z obu metod z 28 V 2025. Ze względu na inne rozmieszczenie przestrzenne zdjęć wykonanych na potrzeby metody fotograficznej, niż w przypadku analizy w okresie zimowym, (Rysunek 88) przedstawia lokalizację wykonanych obliczeń. Na podstawie analizy map SVF jednoznacznie można stwierdzić, że współczynnik z metody fotograficznej wysokorozdzielczej jest zdecydowanie niższy niż w przypadku metody hybrydowej. Po zachodniej stronie kanionu występują miejsca, w których współczynnik jest bliski zera. Im bliżej skrzyżowań, tym mniejsze przesłonięcia horyzontu.

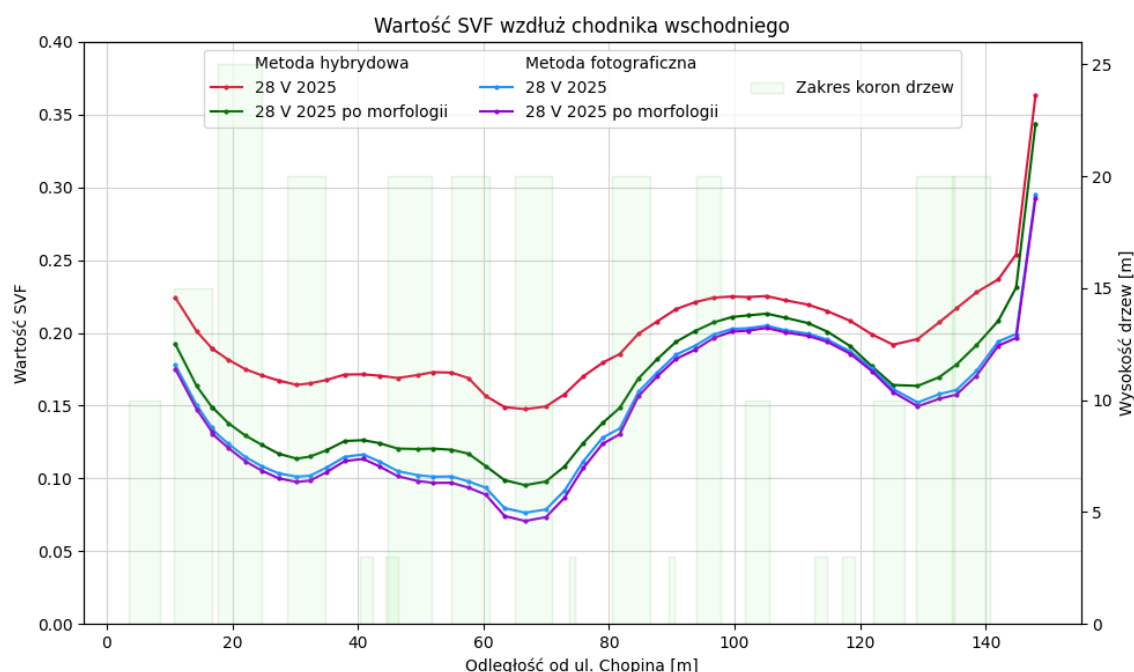


Rysunek 88. Lokalizacje zdjęć i obliczeń dla zestawów z 28 V 2025: po lewej wyniki SVF z metody fotograficznej wysokorozdzielczej, po prawej z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej

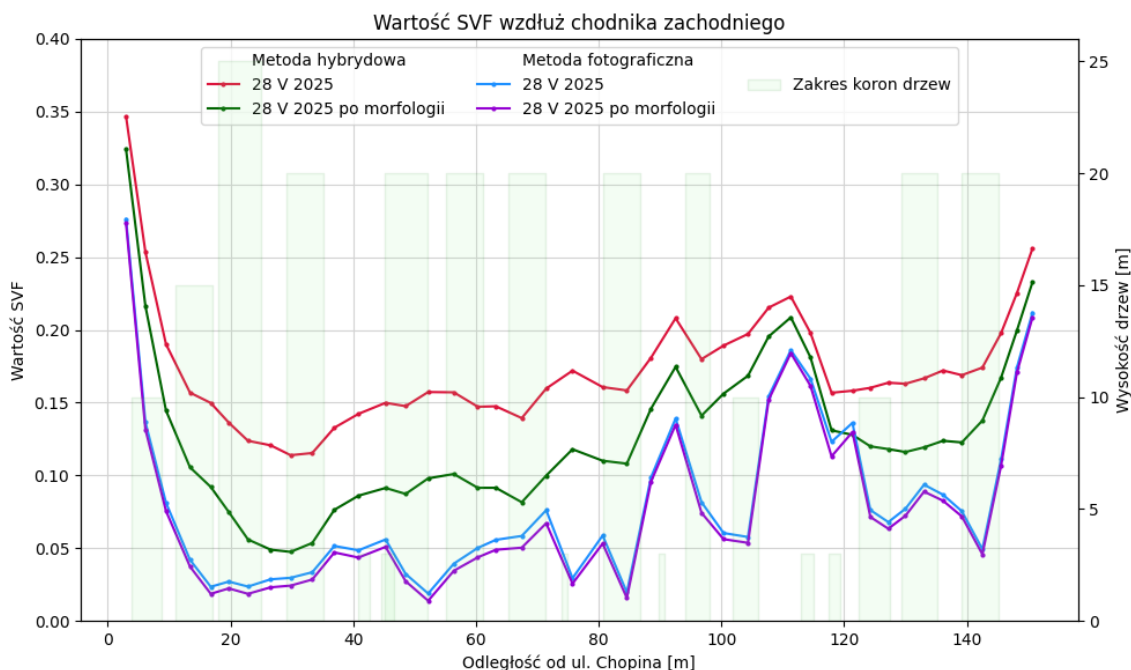
Tabela 17. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmury z kamery sferycznej z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie statystyczne, sezon z liśćmi.

Zestaw	Przed morfologią				Po morfologii			
	min	max	mean	std	min	max	mean	std
28 V 2025	0.1139	0.3633	0.1846	0.0408	0.0475	0.3344	0.1442	0.0533
m. fotograficzna	0.0189	0.2952	0.1154	0.0609	0.0139	0.2927	0.1114	0.0619

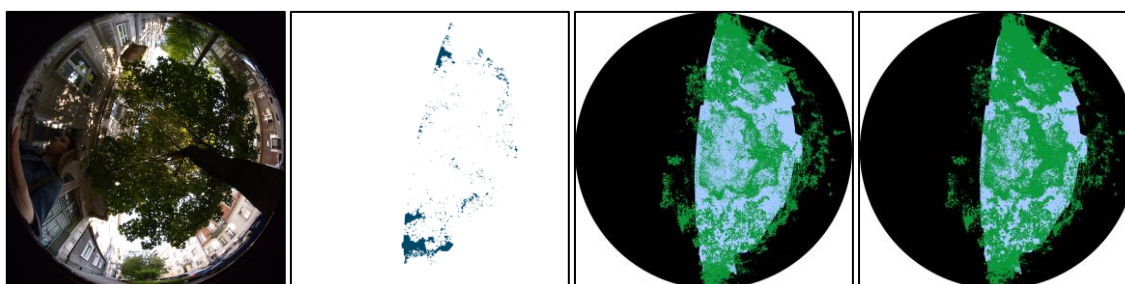
Analiza przebiegu wartości SVF wzdłuż poszczególnych chodników opracowana została z uwzględnieniem wyników operacji morfologicznych dla każdej z metod. Dla strony wschodniej (Rysunek 89) wykonanie morfologii wirtualnego obrazu z metody hybrydowej zbliżyło wartości współczynnika do tych wyznaczonych metodą fotograficzną. Najmniejszą różnicę w wynikach z poszczególnych metod zauważyć można między osiemdziesiątym a sto dwudziestym metrem profilu, czyli ze strefy, w której występuje najmniej drzew przesłaniających niebo. W przypadku morfologii masek z metody fotograficznej wysokorozdzielczej, wartości SVF minimalnie zostały obniżone. Chodnik zachodni (Rysunek 90), cechuje się inną dynamiką zmian widoczności nieba, jednak tendencje po operacjach morfologicznych są tożsame z tymi po stronie wschodniej. Wyniki z metody fotograficznej wysokorozdzielczej są w początkowej części kanionu bardzo niskie, miejscami nie przekraczają 0.05. W dalszej części wykresu występują naprzemiennie minima i maksima lokalne, które można powiązać z położeniem drzew. Większość najmniejszych wartości występuje w bezpośrednim sąsiedztwie wysokich drzew.



Rysunek 89. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmury z kamery sferycznej z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie statystyczne dla chodnika wschodniego, sezon z liśćmi



Rysunek 90. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmury z kamery sferycznej z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie statystyczne dla chodnika zachodniego, sezon z liśćmi



Rysunek 91. Przykład porównania obrazów z różnych metod, kolejno: zdjęcie wysokorozdzielcze, maska nieba, obraz wirtualny z metody hybrydowej przed i po operacji morfologicznej - lokalizacja minimum globalnego wzdłuż chodnika zachodniego

W porównaniu z analizą w sezonie zimowym, w sezonie z liśćmi różnice między metodą hybrydową a fotograficzną są bardziej wyraźne. Wynika to przede wszystkim z obecności gęstych koron drzew, które ograniczają widoczność nieba i powodują bardziej dynamiczne spadki wartości współczynnika widoczności w metodzie fotograficznej. Chmury punktów reprezentujące roślinność zawierają zbyt wiele wolnych przestrzeni, które w wyniku analizy kwalifikowane są do obszaru nieba. Zestawienie analiz dla sezonu zimowego i letniego potwierdza, że operacje morfologiczne skutecznie redukują różnice między metodą hybrydową a fotograficzną, choć stopień zgodności zależy od sezonowego zróżnicowania pokrycia koronami drzew.

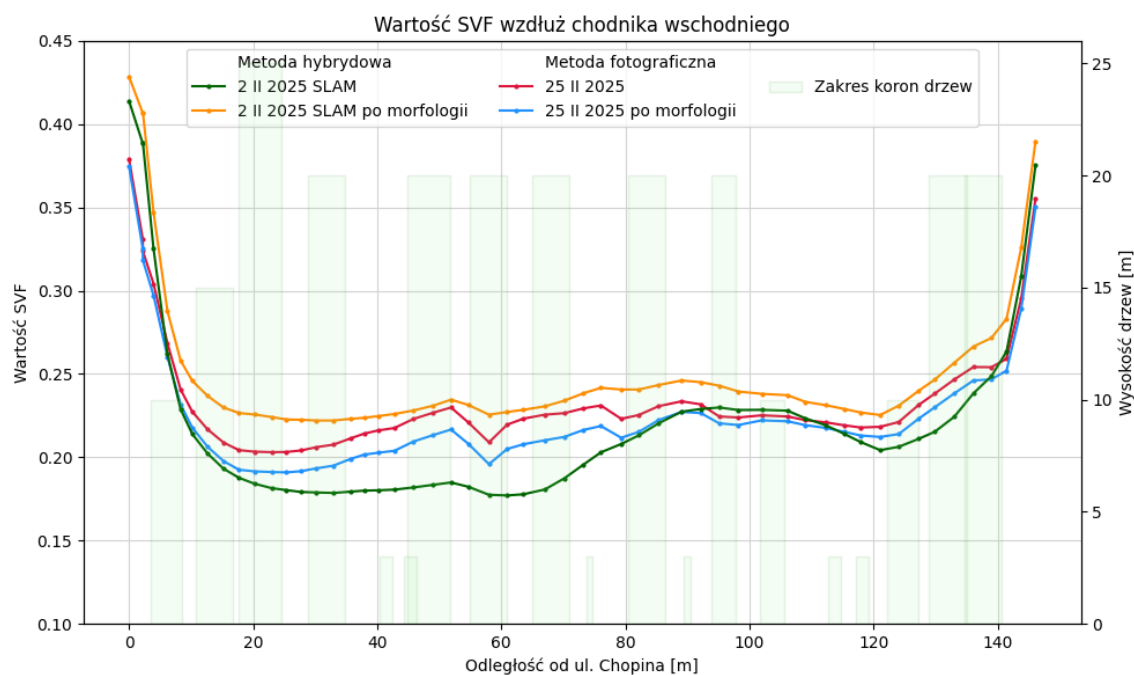
### 6.5.3. Chmura punktów ze skanera SLAM

Analogicznie do poprzednich porównań, poniżej zestawiono wyniki obliczeń wykonanych wzdłuż chodników, uwzględniając zarówno dane z systemu SLAM, oraz wyniki metody fotograficznej wysokorozdzielczej zrealizowanej 25 II 2025 (Rysunek 92, Rysunek 93). Statystyki zestawiono w (Tabela 18).

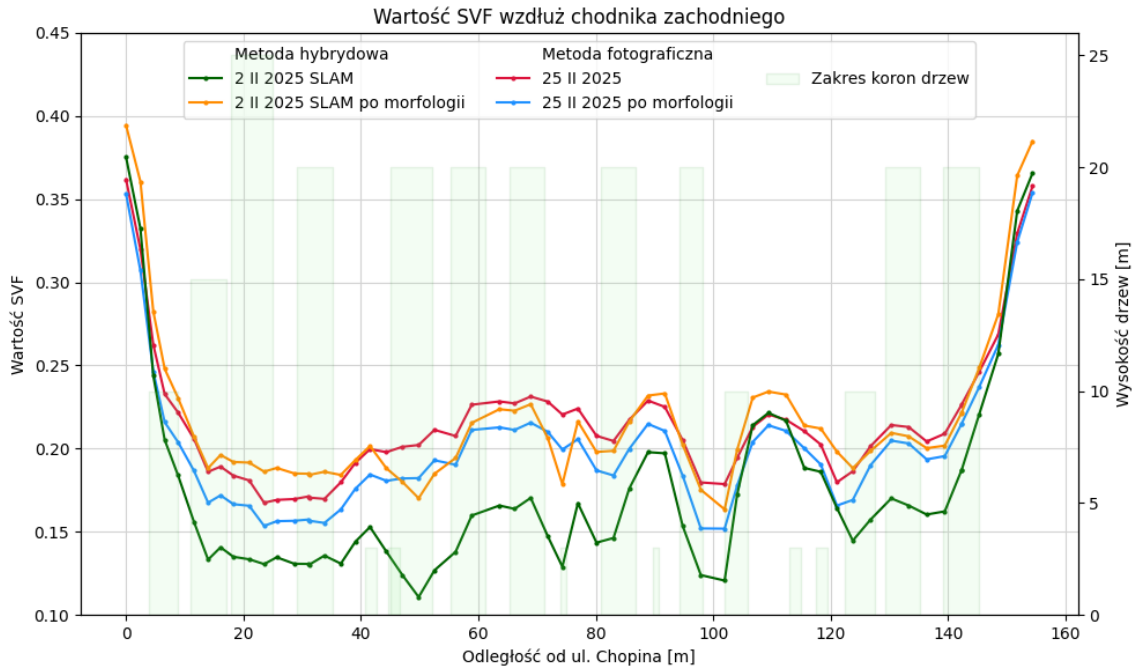
Tabela 18. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmury SLAM z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie statystyczne

Zestaw	Przed morfologią				Po morfologii			
	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>mean</i>	<i>std</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>mean</i>	<i>std</i>
SLAM	0.1108	0.4417	0.2218	0.0716	0.1635	0.4285	0.2353	0.0527
m. fotograficzna	0.1675	0.3790	0.2256	0.0410	0.1519	0.3746	0.2134	0.0439

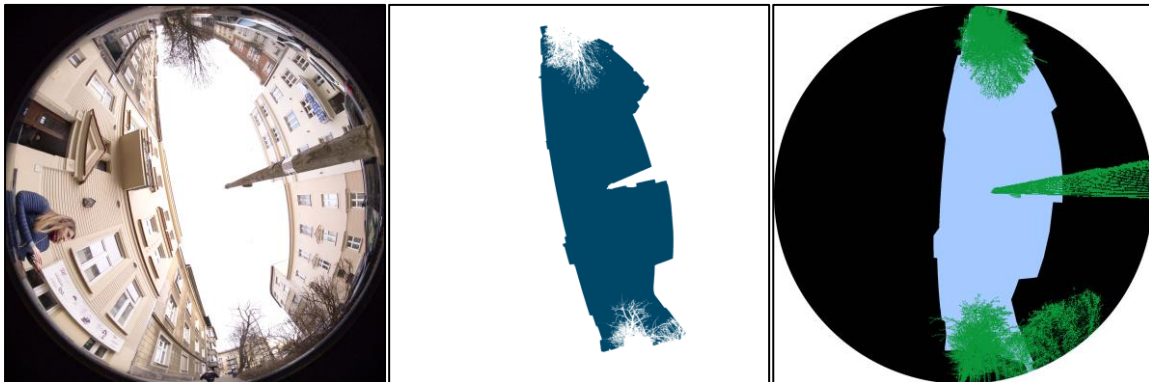
Dla danych SLAM przed zastosowaniem operacji morfologicznych średnia wartość współczynnika wynosiła 0.2218 natomiast po operacjach morfologicznych wzrosła do 0.2353. Jednocześnie odchylenie standardowe spadło z 0.0716 do 0.0527, co wskazuje, że po morfologii rozkład wartości współczynnika stał się bardziej jednorodny. W przypadku obu chodników wartości współczynnika uzyskane z metody hybrydowej są w przeważającej części wykresu niższe niż z metody fotograficznej. Wyjątkiem jest strefa w okolicach setnego (chodnik wschodni) i sto dziesiątego (chodnik zachodni) metra, gdzie nie występuje roślinność. Niższy wynik widoczności nieba z metody fotograficznej wynika z faktu uwzględnienia rzeczywistego kształtu budynków, gdzie w przypadku metody hybrydowej bryła jest znacznie uproszczona (Rysunek 94).



Rysunek 92. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmury SLAM z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie graficzne dla chodnika wschodniego, sezon bezlistny



Rysunek 93. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmury SLAM z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie graficzne dla chodnika zachodniego, sezon bezlistny.



Rysunek 94. Zestawienie obrazów z metody fotograficznej i hybrydowej - sto dziesiąty metr chodnika zachodniego

Zastosowanie operacji morfologicznych w przypadku danych SLAM skutecznie powiększa wolne przestrzenie w chmurze punktów, podnosząc wartości współczynnika i zbliżając je do wyników z metody fotograficznej. Jednakże, równocześnie należy pamiętać, że wpływ na końcową wartość SVF nie opiera się tylko na danych dotyczących roślinności, ale również na budynkach, które w metodzie hybrydowej mają tylko przybliżony kształt.

## 7. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i omówionych w rozdziale 6 analiz możliwe było ocenienie i porównanie metod wieloczasowego wyznaczania współczynnika SVF w kanionach ulicznych. Zrealizowane badania pozwoliły na identyfikację zalet i wad poszczególnych metod oraz określenie przydatności i użyteczności danych przestrzennych o różnym charakterze do wyznaczania współczynnika widoczności. Na tej podstawie sformułowano szereg wniosków dotyczących skuteczności badanych metod, a także możliwości ich rozwoju.

W przypadku kanionów bez drzew zasadniczy wpływ na wartość SVF ma geometria samego kanionu ulicznego. Dynamika zmian widoczności nieba w znacznej mierze zależy od kształtu ulicy i otaczającej jej zabudowy. Im niższy współczynnik geometryczny kanionu (stosunek wysokości elewacji do szerokości ulicy), tym większe przesłonięcia horyzontu. Na przykładzie trzech ulic w Sienie wykazano, że w prostoliniowych kanionach wydzielonych skrzyżowaniami lub placami, wartości SVF są na podobnym poziomie wzdłuż kanionu, z pojedynczymi zmianami wywołanymi elementami wystającymi poza elewacje (np. latarnie). Im bliżej przecięć szlaków komunikacyjnych lub placów, wartości widoczności nieba wzrastają. W sytuacji, gdy do kanionu przylegają place lub dziedzińce, otwarcie horyzontu znacznie wzrasta, jednak ma ono charakter lokalny. Kaniony uliczne, których przebieg jest krzywoliniowy, charakteryzują się mniejszą widocznością nieba ze względu na zamknięcie perspektywy zabudową na dalekim planie.

Kolejnym etapem badań było zastosowanie metody fotograficznej w kanionie zadrzewionym zgodnie z wypracowanymi wcześniej schematami. W takim kanionie wpływ na widoczność nieba ma nie tylko zabudowa, ale także obecność drzew, w mniejszym stopniu infrastruktury technicznej. Tak jak w przypadku kanionów bez roślinności, największe otwarcie horyzontu jest przy skrzyżowaniach. W sąsiedztwie wysokich nasadzeń SVF znacząco spada. Przeprowadzenie analiz wzdłuż dwóch chodników pozwoliło stwierdzić, że lokalizacja drzew, ich wysokość i pokrój, gęstość nasadzenia oraz odległość od obserwatora mają znaczący wpływ na zmiany wartości współczynnika. Co więcej, metoda fotograficzna umożliwiła określenie sezonowej zmienności SVF wynikającej z rozwoju liści. W sezonie bezlistnym widoczność nieba jest wyraźnie większa niż w okresie wegetacji. Zauważono, że wartości współczynnika z obrazów niskorozdzielczych i wysokorozdzielczych wykazują podobny przebieg, jednak ich zgodność jest zależna od okresu wegetacji. W przypadku analiz bez liści, zgodność SVF jest na wyższym poziomie niż w sezonie z liśćmi. Problem prześwietlenia gałęzi na zdjęciach, a co za tym idzie przerw w ich przebiegu na maskach, udało się zminimalizować z wykorzystaniem operacji morfologicznych, dzięki czemu zmniejszono wartości SVF. Wpływ tego działania jest większy w przypadku danych o niższej rozdzielczości oraz w sytuacji, gdy w kadrze znajduje się więcej drzew.

Stosowanie metody fotograficznej w kanionach stanowi jedną z najprostszych metod wyznaczania współczynnika widoczności nieba. W ramach badań skupiono się na analizie obrazów pozyskanych z wykorzystaniem kamery sferycznej, dzięki czemu

zapewniono szeroki kąt widzenia, a co za tym idzie możliwość uchwycenia prawie całej otaczającej przestrzeni. Zaproponowana metodyka przetwarzania nagrań, ekstrakcji pojedynczych obrazów, przekształcenia ich z odwzorowania walcowego do fish-eye a finalnie maskowanie pikseli nieba, zrealizowana została z wykorzystaniem wyłącznie oprogramowania typu open-source (RStudio, biblioteki Python), co jest bardzo dużym atutem tego rozwiązania. Wyjątek stanowił jedynie etap georeferencji, który wymagał użycia licencjonowanego programu. Co więcej, taki sposób postępowania umożliwił z wysoką (rozdzielczością/gęstością) przestrzenną wyznaczyć widoczność nieba, wychwytyjąc nawet minimalne przesłonięcia wywołane np. elementami wystającymi z elewacji czy też infrastrukturą techniczną (znaki drogowe, latarnie). Jednocześnie metoda fotograficzna jest bardzo wrażliwa na warunki atmosferyczne. Pozyskanie danych w trudnych warunkach (niejednorodnie zachmurzone niebo, tarcza słoneczna na niebie) skutkuje prześwietleniem obrazów i wymaga większych nakładów pracy przy opracowaniu masek nieba. Inną niedogodnością mogącą wpływać na wyniki, jest odbijanie się nieba w szybach okien lub też elewacje o kolorze zbliżonym do nieba (w przypadku rejestracji przy zachmurzeniu). Pomimo prostoty i wysokiej dokładności w wynikach, metoda fotograficzna ma charakter lokalny. Prowadzenie analizy w taki sposób na dużych obszarach jest bardzo czasochłonne i nieefektywne. Alternatywą może być wykorzystanie obrazów z serwisów np. Google Street View, co poszerza możliwości stosowania tej metody. Jednak w takim przypadku analiza jest silnie zależna od lokalizacji, ponieważ dostępność oraz częstotliwość rejestracji jest zróżnicowana w zależności od kraju. Utrudnia to również analizę sezonowości, gdyż rzadko wykonywane są rejestracje obejmujące kilka faz wegetacyjnych w roku. Można zatem przyjąć, że metoda fotograficzna stanowi najlepsze rozwiązanie w badaniach o charakterze punktowym lub odcinkowym, a także w celu identyfikacji sezonowych zmian w widoczności nieba.

W dalszej części badań skupiono się na wyznaczeniu współczynnika widoczności nieba na bazie trójwymiarowej reprezentacji kanionu. W literaturze zidentyfikowano niszę badawczą wynikającą z niedostatecznie realistycznych reprezentacji drzew w formie 3D w analizach SVF, co ograniczało możliwość dokładnego określenia ich wpływu na przesłonięcie nieba. Ideą stworzenia hybrydowego modelu kanionu było opracowanie cyfrowej reprezentacji przestrzeni, która w możliwie najbardziej wiarygodny sposób odwzorowywałaby roślinność. Wykorzystanie chmur punktów z trzech źródeł pozwoliło określić przydatność różnych zbiorów danych do analiz SVF z uwzględnieniem rzeczywistego kształtu drzew w modelu. We wszystkich analizach jako komponent bazowy zastosowano modele budynków LOD2 pochodzące z 2017 roku. Geometria zabudowy była uproszczona, a także nie uwzględniała zmian w wysokościach elewacji wywołanych przebudowami w późniejszych latach.

Analiza wyników ze wszystkich trzech wariantów chmur wykazała, że wartość SVF jest odwrotnie zależna od liczby punktów chmury. Im większa gęstość punktów reprezentujących drzewa, tym mniejsza widoczność nieba. Wpływ roślinności na SVF ma charakter lokalny, największe spadki zaobserwować można w bezpośrednim sąsiedztwie roślinności. Najmniej przesłonięć nieba występuje w okolicach niskich nasadzeń (nie wystających powyżej budynków) a także na skrzyżowaniach.

W przypadku chmur punktów z ALS, najstarsze dane ze względu na najmniejszą gęstość skutkowały niedoszacowaniem SVF. W kolejnych latach wartość współczynnika stale malała, co wynikało zarówno z rozrostu roślinności jak i większej liczby punktów chmury. Na przestrzeni lat 2017-2023 SVF spadł średnio o 0.04, z 0.25 na 0.21, co przekłada się na 16% ubytek w widoczności nieba. Pomimo niewielkiej gęstości punktów istnieje możliwość zaobserwowania ogólnych trendów dotyczących zmian współczynnika. Dane ALS należy traktować jako wiarygodne źródło informacji o roślinności, których głównym atutem jest łatwy dostęp oraz możliwość prowadzenia badań na szeroką skalę. Jednocześnie, uzyskiwane wartości SVF są niedoszacowane i nie uwzględniają w pełni rzeczywistego wpływu na widoczność nieba. Co więcej, naloty rzadko kiedy planowane są w sezonie zimowym, co wyklucza uchwycenie sezonowości zmian widoczności nieba.

Rejestracja kamerą sferyczną w różnych fazach wegetacyjnych umożliwiła uchwycenie sezonowych zmian współczynnika. Uzyskane wyniki potwierdziły największą widoczność nieba w miesiącach zimowych, stopniowy spadek SVF wraz z rozwojem liści i najniższe wartości w pełni sezonu wegetacyjnego. Średnia wartość zmian SVF między zimą a latem to aż 23%. Dynamika zmian współczynnika zależy od rozmieszczenia i rozmiaru drzew, a także miejsca obserwacji, co podkreśla kluczową rolę stosowania szczegółowego modelu roślinności. Jednocześnie, opracowane chmury punktów posiadają kilka ograniczeń. Przede wszystkim nie zawierają kompleksowej informacji o koronach drzew, w których występuje wiele prześwitów, zwłaszcza w okresie letnim. W chmurach bez liści wysoko położone, cienkie gałęzie praktycznie nie występują, co wynika ze specyfiki algorytmów SfM-MVS. Wpływa to na częściowe niedoszacowanie przesłonięć nieba.

Wykorzystanie skanera mobilnego pozwoliło odwzorować przestrzeń między elewacjami z uwzględnieniem wszelkich detali, w tym elementów infrastruktury technicznej i drobnych gałęzi. Jednak chmura punktów cechuje się wysokim poziomem zaszumienia, wynikającym zarówno z ograniczeń algorytmu SLAM, jak i przemieszczania się obserwatora wraz ze skanerem, co zwiększyło liczbę punktów chmury generując pozorne przesłonięcie nieba. W konsekwencji SVF charakteryzował się najniższymi wartościami spośród wszystkich analiz przeprowadzonych na danych z podobnego okresu. Ulepszanie algorytmów SLAM oraz redukcja szumów jest perspektywnym rozwiązaniem dla szczegółowych analiz SVF.

Kluczową zaletą metody hybrydowej jest możliwość dywersyfikacji źródeł danych i jednoczesnego wykorzystania zbiorów o charakterze wektorowym czy punktowym. Choć w przeprowadzonych badaniach nie wykorzystano danych rastrowych, koncepcja modelu hybrydowego pozwala na ich uwzględnienie w innych analizach. Dzięki wirtualnemu fotografowaniu obiektywem fish-eye możliwe było wyznaczenie dodatkowych współczynników widoczności, co pozwala na kompleksowe badania dotyczące mikroklimatu kanionów ulicznych.

Kolejno przeanalizowano wpływ nachylenia zdjęcia na wartości wyznaczanego SVF. W odróżnieniu od metody hybrydowej, gdzie wszystkie obrazy wirtualne obliczane były z kątami  $\omega$  i  $\phi$  równymi zero oraz o stałym skręceniu  $\kappa$  względem układu

współrzędnych, obrazy z metody fotograficznej nie były ściśle zenitalne i miały zmienne skrócenie, co mogło wpłynąć na widoczność nieba. Na podstawie przeprowadzonych analiz, stwierdzono, że nachylenie zdjęcia w zakresie  $\pm 5$  stopni zmienia wartość SVF o nie więcej niż 0.005. Z tego względu wpływ nachylenia zdjęcia uznano za zaniedbywalny z praktycznego punktu widzenia.

Porównanie wyników z metody 2D i 3D przeprowadzono w rozróżnieniu na źródło chmury punktów, jednocześnie badając wpływ operacji morfologicznych na wyniki każdej metody. We wszystkich przypadkach podstawową składową różnicą w wartościach SVF jest rozbieżność w wyglądzie zabudowy rzeczywistej i jej wektorowego modelu. Dodatkowym aspektem jest brak informacji o roślinności na dalekim planie w metodzie hybrydowej.

Bezpośrednie zestawianie wyników w przypadku danych ALS obarczone jest rozbieżnością w czasie pozyskania materiałów, co ma bezpośredni wpływ na wynik. Zastosowanie operacji morfologicznych na obrazach wirtualnych z chmurami punktów skutkuje obniżeniem wartości SVF zbliżając je do wyników z metody fotograficznej wysokorozdzielczej. Co więcej, operacja ta zwiększa lokalną zmienność SVF dla metody hybrydowej.

Porównanie w odniesieniu do metody hybrydowej z chmur punktów z kamery sferycznej pozwala stwierdzić, że w sezonie bez liści zgodność metod jest na wyższym poziomie niż w sezonie z liśćmi. W sezonie rozwinięcia liści metoda fotograficzna uwzględnia wszystkie przesłonięcia z nimi związane, natomiast w metodzie hybrydowej korony drzew zawierają wolne przestrzenie, co wpływa na zawyżenie wartości SVF. Operacje morfologiczne wirtualnych obrazów, podobnie jak przy danych z ALS, zbliżają wyniki do metody fotograficznej.

Wyniki z metody hybrydowej z chmury SLAM są najbliższe do tych z metody fotograficznej, ale są zaniżone średnio o 2%. Stosowanie operacji morfologicznych skutecznie rozrzedza drzewa i korzystnie wpływa na zwiększenie widoczności nieba, zbliżając ją do uzyskanej z metody fotograficznej.

Na podstawie wszystkich przeanalizowanych aspektów, można stwierdzić, że zarówno metoda fotograficzna jak i hybrydowa mogą być stosowane w kanionach ulicznych i każda z nich reprezentatywnie obrazuje trendy zmienności SVF, czy to sezonowe czy długofalowe/wieloletnie. Stosowanie metod nie powinno jednak mieć charakteru zamiennego. Metoda fotograficzna, ze względu na swoją specyfikę, zalecana jest do lokalnego wyznaczenia współczynnika widoczności nieba o wysokiej precyzji. Prowadząc rejestrację wysoką częstotliwością (co kilka dni lub tygodni) można uchwycić wszelkie zmiany w wyglądzie roślinności, jednak opracowanie jest bardzo czasochłonne i żmudne. Metoda hybrydowa, choć nie idealna, sprawdzi się w analizach prowadzonych na większych obszarach, w których uogólnienie modelu zabudowy czy roślinności jest dopuszczalne. Stosowanie ogólnodostępnej informacji dotyczącej drzew (chmury ALS) pozwoli zaobserwować podstawowe trendy w zmienności SVF. W celu dokładniejszych analiz można wykorzystać samodzielnie opracowaną chmurę punktów, zarówno fotogrametrycznie jak i ze skaningu.

## 8. Podsumowanie

Zapotrzebowanie na wyznaczanie SVF na potrzeby analiz związanych z szeroko rozumianym klimatem miejskim stale wzrasta, co wynika z nasilających się zmian klimatycznych w ostatnich latach. Metodyka tworzenia map SVF dla całych miast lub dzielnic jest dobrze opracowana. Zdecydowanie mniej opisanych jest doświadczeń w zakresie metod dedykowanych miejscom z dużą czasoprzestrzenną zmiennością widoczności nieba. W rozprawie przedstawiono dwie metody wyznaczenia SVF w kanionach miejskich, w tym w kanionie zadrzewionym stanowiącym główne pole badawcze.

Przeprowadzona analiza wyników wykazała, że zarówno metoda 2D, jak i 3D zapewniają wysoką czułość na zmiany SVF i mogą być realizowane stosunkowo małym nakładem środków. Wariant metody hybrydowej wykorzystujące dane ALS z pewnością jest najprostszy i najwydajniejszy. Nie pozwala on jednak na badanie współczynnika w okresie bezlistnym. Najbardziej wiarygodne wyniki uzyskuje się z metody fotograficznej bazującej na rejestracji kamerą sferyczną. Można ją rekomendować, gdy konieczne jest wyznaczenie SVF z wysoką rozdzielczością przestrzenną i czasową, ale z ograniczeniem do małych obszarów. Wykorzystanie smartfonów nie powiodło się, jednak użyta kamera sferyczna jest niskobudżetowym, ogólnodostępnym i łatwym użyciu sensorem. W trakcie badań, do przestrzennej orientacji zdjęć wykorzystano program komercyjny, ze względu na bardzo duży wolumen przetwarzanych danych i konieczność poszukiwania optymalnych rozwiązań. W operacyjnym wykorzystaniu metody fotograficznej możliwe jest stosowanie alternatywnych rozwiązań open-source.

Postawiona w pracy teza

***„Zmienność widoczności nieba w zadrzewionych kanionach ulicznych może być wyznaczana i analizowana z wykorzystaniem powszechnie dostępnych sensorów fotograficznych oraz algorytmów stosowanych w fotogrametrii i przetwarzaniu obrazów, zarówno metodami 2D, jak i 3D”***

została w pełni udokumentowana uzyskanymi wynikami.

Na podstawie przeprowadzonych badań możliwe jest wskazanie kilku obszarów rozwoju w badaniach Sky View Factor. Jednym z nich jest opracowanie metod umożliwiających obliczanie współczynnika bezpośrednio na obrazach w odwzorowaniu walcowym wiernoodległościowym, bez przeliczania do projekcji fish-eye. Główna wada metody fotograficznej, jaką jest pracochłonny proces maskowania nieba, może być w przyszłości wyeliminowana poprzez wsparcie algorytmami AI. Innym aspektem jest wykorzystanie sieci neuronowych do klasyfikacji elementów przesłaniających niebo z rozdzieleniem ich na poszczególne klasy. Ciekawą opcją poszerzenia zrealizowanych badań byłaby rejestracja kanionu smartfonem z nakładką fish-eye. Gdyby takie rozwiązanie dawało poprawne wyniki, mogłoby się znacznie przyczynić do popularyzacji metody fotograficznej, być może nawet w formie inicjatywy dla wolontariuszy. W kontekście analiz 3D, kolejnym krokiem jest zbadanie możliwości rekonstrukcji

obiektów roślinnych z wykorzystaniem NeRF. Dodatkowo, interesującym nurtem badawczym jest przeanalizowanie kanionów ulicznych w nachylonym terenie, co powoduje konieczność zmiany sposobu obliczeń z hemisfery na inny, większy fragment sfery.

## 9. Spis literary

- [1] Aghayari, S., Saadatesresht, M., Omidalizarandi, M., Neumann, I., 2017. GEOMETRIC CALIBRATION OF FULL SPHERICAL PANORAMIC RICOH-THETA CAMERA. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* IV-1/W1, 237–245. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-1-W1-237-2017>
- [2] Agisoft Metashape Professional, n.d.
- [3] Akca, D., Gruen, A., 2009. Comparative geometric and radiometric evaluation of mobile phone and still video cameras. *The Photogrammetric Record* 24, 217–245. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2009.00541.x>
- [4] Al-Sudani, A., Hussein, H.E.M., Sharples, S., 2017. Sky View Factor Calculation - A computational-geometrical approach. Presented at the eCAADe 2017 : ShoCK! – Sharing of Computable Knowledge!, Rome, Italy, pp. 673–682. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2017.2.673>
- [5] An, P., Fang, K., Jiang, Q., Zhang, H., Zhang, Y., 2021. Measurement of Rock Joint Surfaces by Using Smartphone Structure from Motion (SfM) Photogrammetry. *Sensors* 21, 922. <https://doi.org/10.3390/s21030922>
- [6] An, S.M., Kim, B.S., Lee, H.Y., Kim, C.H., Yi, C.Y., Eum, J.H., Woo, J.H., 2014. Three-dimensional point cloud based sky view factor analysis in complex urban settings: THREE-DIMENSIONAL POINT CLOUD BASED SKY VIEW FACTOR ANALYSIS. *Int. J. Climatol.* 34, 2685–2701. <https://doi.org/10.1002/joc.3868>
- [7] ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data, 2015. . *photogramm eng remote sensing* 81, 1–26. <https://doi.org/10.14358/PERS.81.3.A1-A26>
- [8] Balloni, E., Gorgoglione, L., Paolanti, M., Mancini, A., Pierdicca, R., 2023. FEW SHOT PHOTOGRAMMETRY: A COMPARISON BETWEEN NERF AND MVS-SFM FOR THE DOCUMENTATION OF CULTURAL HERITAGE. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLVIII-M-2–2023, 155–162. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-155-2023>
- [9] Bay, H., Tuytelaars, T., Van Gool, L., 2006. SURF: Speeded Up Robust Features, in: Leonardis, A., Bischof, H., Pinz, A. (Eds.), *Computer Vision – ECCV 2006, Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 404–417. [https://doi.org/10.1007/11744023\\_32](https://doi.org/10.1007/11744023_32)
- [10] Bottyan, Z., Unger, J., 2003. A multiple linear statistical model for estimating the mean maximum urban heat island. *Theoretical and Applied Climatology* 75, 233–243. <https://doi.org/10.1007/s00704-003-0735-7>
- [11] Brandolini, F., Cremaschi, M., Zerboni, A., Degli Esposti, M., Mariani, G.S., Lischi, S., 2020. SfM-photogrammetry for fast recording of archaeological features in remote areas. *AeC* 31, 33–45. <https://doi.org/10.19282/ac.31.2.2020.04>
- [12] Brown, D.C., 1971. , in: *Close-Range Camera Calibration*. *Photogramm Eng.*, pp. 855–866.
- [13] Cadena, C., Carlone, L., Carrillo, H., Latif, Y., Scaramuzza, D., Neira, J., Reid, I., Leonard, J.J., 2016. Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age. *IEEE Trans. Robot.* 32, 1309–1332. <https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2624754>
- [14] Chapman, L., Thornes, J.E., Bradley, A.V., 2002. Sky-view factor approximation using GPS receivers. *Intl Journal of Climatology* 22, 615–621. <https://doi.org/10.1002/joc.649>
- [15] Charles, R.Q., Su, H., Kaichun, M., Guibas, L.J., 2017. PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation, in: *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Presented at the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE, Honolulu, HI, pp. 77–85. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2017.16>
- [16] Chen, L., Ng, E., An, X., Ren, C., Lee, M., Wang, U., He, Z., 2012. Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach: GIS-BASED SVF ANALYSIS AND APPLICATION IN HONG KONG. *Int. J. Climatol.* 32, 121–136. <https://doi.org/10.1002/joc.2243>

- [17] Cheng, L., Gong, J., Li, M., Liu, Y., 2011. 3D Building Model Reconstruction from Multi-view Aerial Imagery and Lidar Data. *photogramm eng remote sensing* 77, 125–139. <https://doi.org/10.14358/pers.77.2.125>
- [18] Chiang, Y.-C., Liu, H.-H., Li, D., Ho, L.-C., 2023. Quantification through deep learning of sky view factor and greenery on urban streets during hot and cool seasons. *Landscape and Urban Planning* 232, 104679. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104679>
- [19] CloudCompare (version 2.13.alpha) GPL software, 2022.
- [20] Condorelli, F., Rinaudo, F., Salvatore, F., Tagliaventi, S., 2021. A COMPARISON BETWEEN 3D RECONSTRUCTION USING NERF NEURAL NETWORKS AND MVS ALGORITHMS ON CULTURAL HERITAGE IMAGES. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XLIII-B2-2021*, 565–570. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-565-2021>
- [21] Dane pomiarowe LIDAR (LIDAR) – Geoportal.gov.pl [WWW Document], n.d. URL <https://www.geoportal.gov.pl/pl/dane/dane-pomiarowe-lidar-lidar/> (accessed 2.7.25).
- [22] Dane techniczne aparatów w Galaxy S10 | Samsung Polska [WWW Document], n.d. URL <https://www.samsung.com/pl/support/mobile-devices/dane-techniczne-aparatow-w-galaxy-s10/> (accessed 4.25.25).
- [23] Dirksen, M., Ronda, R.J., Theeuwes, N.E., Pagani, G.A., 2019. Sky view factor calculations and its application in urban heat island studies. *Urban Climate* 30, 100498. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100498>
- [24] Du, K., Ning, J., Yan, L., 2020. How long is the sun duration in a street canyon? — Analysis of the view factors of street canyons. *Building and Environment* 172, 106680. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106680>
- [25] Eker, R., Elvanoglu, N., Ucar, Z., Bilici, E., Aydın, A., 2022. 3D MODELLING OF A HISTORIC WINDMILL: PPK-AIDED TERRESTRIAL PHOTOGRAMMETRY vs SMARTPHONE APP 6.
- [26] Elhashash, M., Qin, R., 2022. Investigating Spherical Epipolar Rectification for Multi-View Stereo 3D Reconstruction. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2204.04141>
- [27] Farella, E.M., Morelli, L., Rigon, S., Grilli, E., Remondino, F., 2022. Analysing Key Steps of the Photogrammetric Pipeline for Museum Artefacts 3D Digitisation 28.
- [28] Fischler, M.A., Bolles, R.C., 1981. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Commun. ACM* 24, 381–395. <https://doi.org/10.1145/358669.358692>
- [29] Freitas, S., Catita, C., Redweik, P., Brito, M.C., 2015. Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, 915–931. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.060>
- [30] Furukawa, Y., Hernández, C., 2015. Multi-View Stereo: A Tutorial. *FNT in Computer Graphics and Vision* 9, 1–148. <https://doi.org/10.1561/06000000052>
- [31] Furukawa, Y., Ponce, J., 2010. Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 32, 1362–1376. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2009.161>
- [32] Gál, T., Lindberg, F., Unger, J., 2009. Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: comparison and application to urban climate. *Theor Appl Climatol* 95, 111–123. <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0362-9>
- [33] Gobeawan, L., Lin, E.S., Tandon, A., Yee, A.T.K., Khoo, V.H.S., Teo, S.N., Yi, S., Lim, C.W., Wong, S.T., Wise, D.J., Cheng, P., Liew, S.C., Huang, X., Li, Q.H., Teo, L.S., Fekete, G.S., Poto, M.T., 2018. MODELING TREES FOR VIRTUAL SINGAPORE: FROM DATA ACQUISITION TO CITYGML MODELS. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XLII-4/W10*, 55–62. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W10-55-2018>
- [34] Gong, F.-Y., Zeng, Z.-C., Zhang, F., Li, X., Ng, E., Norford, L.K., 2018. Mapping sky, tree, and building view factors of street canyons in a high-density urban environment. *Building and Environment* 134, 155–167. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.042>
- [35] Gröger, G., Kolbe, T.H., Nagel, C., Häfele, K.-H., 2012. OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard.

- [36] Haala, N., Brenner, C., 1997. Generation of 3D city models from airborne laser scanning data, in: Proceedings EARSEL Workshop on LIDAR Remote Sensing on Land and Sea, Tallinn/Estonia. pp. 105–112.
- [37] Haala, N., Kada, M., 2010. An update on automatic 3D building reconstruction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65, 570–580. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.09.006>
- [38] Hartley, R., Zisserman, A., 2004. *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2nd ed. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511811685>
- [39] Hartley, R.I., Sturm, P., 1997. Triangulation. *Computer Vision and Image Understanding* 68, 146–157. <https://doi.org/10.1006/cviu.1997.0547>
- [40] Harwin, S., Lucieer, A., 2012. Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. *Remote Sensing* 4, 1573–1599. <https://doi.org/10.3390/rs4061573>
- [41] Hirschmuller, H., 2008. Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 30, 328–341. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2007.1166>
- [42] Holmer, B., Postgård, U., Eriksson, M., 2001. Sky view factors in forest canopies calculated with IDRISI. *Theoretical and Applied Climatology* 68, 33–40. <https://doi.org/10.1007/s007040170051>
- [43] Honjo, T., 2017. GitHub - honjo7777/theta2svf: from theta image to calculation of sky view factor [WWW Document]. URL <https://github.com/honjo7777/theta2svf> (accessed 11.2.23).
- [44] Honjo, T., Tzu-Ping Lin, Seo, Y., 2019. Sky view factor measurement by using a spherical camera. *J. Agric. Meteorol.* 75, 59–66. <https://doi.org/10.2480/agrmet.D-18-00027>
- [45] Huai, J., Shao, Y., Jozkow, G., Wang, B., Chen, D., He, Y., Yilmaz, A., 2024. Geometric Wide-Angle Camera Calibration: A Review and Comparative Study. *Sensors* 24, 6595. <https://doi.org/10.3390/s24206595>
- [46] Hug, C., Wehr, A., 1997. Detecting and identifying topographic objects in imaging laser altimeter data. *International archives of photogrammetry and remote sensing* 32, 19–26.
- [47] Ivanova, S.M., Gueymard, C.A., 2019. Simulation and applications of cumulative anisotropic sky radiance patterns. *Solar Energy* 178, 278–294. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.026>
- [48] Jasińska, A., 2022. Evaluation of the Quality of a Checkerboard Camera Calibration Compared to a Calibration on a Laboratory Test Field. *Baltic Surveying* 16, 21–28. <https://doi.org/10.22616/j.balticsurveying.2022.16.003>
- [49] Jasińska, A., Pyka, K., Pastucha, E., Midtiby, H.S., 2023. A Simple Way to Reduce 3D Model Deformation in Smartphone Photogrammetry. *Sensors* 23, 728. <https://doi.org/10.3390/s23020728>
- [50] Jiang, S., You, K., Chen, W., Weng, D., Li, Y., 2024. 3D reconstruction of spherical images based on incremental structure from motion. *International Journal of Remote Sensing* 45, 2596–2621. <https://doi.org/10.1080/01431161.2024.2334810>
- [51] Johnson, G.T., Watson, I.D., 1984. The Determination of View-Factors in Urban Canyons. *J. Climate Appl. Meteor.* 23, 329–335. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023%253C0329:TDOVFI%253E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023%253C0329:TDOVFI%253E2.0.CO;2)
- [52] Kannala, J., Brandt, S.S., 2006. A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye lenses. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 28, 1335–1340. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2006.153>
- [53] Kędzierski, M., 2008. *Metodyka wykonania ortofoto z wykorzystaniem naziemnej kamery z obiektywem “rybie oko.”* Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa.
- [54] Kukulova, Z., Bujnak, M., Pajdla, T., 2008. Polynomial Eigenvalue Solutions to the 5-pt and 6-pt Relative Pose Problems, in: *Proceedings of the British Machine Vision Conference 2008*. Presented at the British Machine Vision Conference 2008, British Machine Vision Association, Leeds, p. 56.1-56.10. <https://doi.org/10.5244/C.22.56>
- [55] Kurczyński, Z., Bakula, K., 2013. Generowanie referencyjnego numerycznego modelu terenu o zasięgu krajowym w oparciu o lotnicze skanowanie laserowe w projekcie ISOK. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 23, 59–68.

- [56] LAS SPECIFICATION, 2013.
- [57] Li, G., Ren, Z., Zhan, C., 2020. Sky View Factor-based correlation of landscape morphology and the thermal environment of street canyons: A case study of Harbin, China. *Building and Environment* 169, 106587. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106587>
- [58] Li, Yong, An, J., He, N., Li, Yanbo, Han, Z., Chen, Z., Qu, Y., 2025. A Review of Simultaneous Localization and Mapping Algorithms Based on Lidar. *WEVJ* 16, 56. <https://doi.org/10.3390/wevj16020056>
- [59] Liang, J., Gong, J., Sun, J., Liu, J., 2017. A customizable framework for computing sky view factor from large-scale 3D city models. *Energy and Buildings* 149, 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.024>
- [60] Lindberg, F., Grimmond, C., 2010. Continuous sky view factor maps from high resolution urban digital elevation models. *Clim. Res.* 42, 177–183. <https://doi.org/10.3354/cr00882>
- [61] Liu, Y., Yu, Z., Song, Y., Yu, X., Zhang, J., Song, D., 2023. The Psychological Influence of Sky View Factor and Green View Index on Pedestrians' Thermal Comfort in Urban Outdoor Spaces (preprint). SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4397686>
- [62] Lowe, D.G., 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60, 91–110. <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
- [63] Luhmann, T., Fraser, C., Maas, H.-G., 2016. Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 115, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.006>
- [64] Ma, X., Zhang, L., Guo, M., Zhao, J., 2021. The effect of various urban design parameter in alleviating urban heat island and improving thermal health—a case study in a built pedestrianized block of China. *Environ Sci Pollut Res* 28, 38406–38425. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13179-z>
- [65] Maas, H.-G., Vosselman, G., 1999. Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54, 153–163. [https://doi.org/10.1016/s0924-2716\(99\)00004-0](https://doi.org/10.1016/s0924-2716(99)00004-0)
- [66] Mandlbürger, G., 2024. Airborne Lidar: A Tutorial for 2025 - LIDAR Magazine [WWW Document]. URL <https://lidarmag.com/2024/12/30/airborne-lidar-a-tutorial-for-2025/> (accessed 7.4.25).
- [67] Marsh, A., 2005. The application of shading masks in building simulation.
- [68] McNeil, A., 2013. The Three-Phase Method for Simulating Complex Fenestration with Radiance.
- [69] Meddens, A.J.H., Vierling, L.A., Eitel, J.U.H., Jennewein, J.S., White, J.C., Wulder, M.A., 2018. Developing 5 m resolution canopy height and digital terrain models from WorldView and ArcticDEM data. *Remote Sensing of Environment* 218, 174–188. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.010>
- [70] Miao, C., Yu, S., Hu, Y., Zhang, H., He, X., Chen, W., 2020. Review of methods used to estimate the sky view factor in urban street canyons. *Building and Environment* 168, 106497. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106497>
- [71] Middel, A., Lukasczyk, J., Maciejewski, R., Demuzere, M., Roth, M., 2018. Sky View Factor footprints for urban climate modeling. *Urban Climate* 25, 120–134. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.05.004>
- [72] Middel, A., Lukasczyk, J., Zakrzewski, S., Arnold, M., Maciejewski, R., 2019. Urban form and composition of street canyons: A human-centric big data and deep learning approach. *Landscape and Urban Planning* 183, 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.12.001>
- [73] Midtby, H.S., 2022. [henrikmidtby/camera-calibration-with-large-chessboards](https://github.com/henrikmidtby/camera-calibration-with-large-chessboards).
- [74] Mildenhall, B., Srinivasan, P.P., Tancik, M., Barron, J.T., Ramamoorthi, R., Ng, R., 2020. NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2003.08934>
- [75] Muñoz, D., Beckers, B., Besuievsky, G., Patow, G., 2018. A technique for massive sky view factor calculations in large cities. *International Journal of Remote Sensing* 39, 4040–4058. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1452071>

- [76] Murtiyoso, A., Grussenmeyer, P., 2023. INITIAL ASSESSMENT ON THE USE OF STATE-OF-THE-ART NERF NEURAL NETWORK 3D RECONSTRUCTION FOR HERITAGE DOCUMENTATION. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLVIII-M-2–2023, 1113–1118. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1113-2023>
- [77] Murtiyoso, A., Markiewicz, J., Karwel, A.K., Grussenmeyer, P., Kot, P., 2024. COMPARISON OF STATE-OF-THE-ART MULTI-VIEW STEREO SOLUTIONS FOR CLOSE RANGE HERITAGE DOCUMENTATION. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLVIII-2/W4-2024, 317–323. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W4-2024-317-2024>
- [78] Oda, C., 2024. [codetracity/theta\\_client\\_bitrate](https://github.com/codetracity/theta_client_bitrate).
- [79] OGC City Geography Markup Language (CityGML) 3.0 Conceptual Model Users Guide [WWW Document], n.d. URL <https://docs.ogc.org/guides/20-066.html#overview-section-levelsofdetail> (accessed 7.5.25).
- [80] Oke, T.R., 1988. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings* 11, 103–113. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6)
- [81] Oke, T.R., 1981. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *J. Climatol.* 1, 237–254. <https://doi.org/10.1002/joc.3370010304>
- [82] Oniga, V.-E., Breaban, A.-I., Pfeifer, N., Diac, M., 2022. 3D Modeling of Urban Area Based on Oblique UAS Images—An End-to-End Pipeline. *Remote Sensing* 14, 422. <https://doi.org/10.3390/rs14020422>
- [83] Open Geospatial Consortium, 2012.
- [84] OpenCV, Open Source Computer Vision Library, 2015.
- [85] Pérez-García, J.L., Gómez-López, J.M., Mozas-Calvache, A.T., Delgado-García, J., 2024. Analysis of the Photogrammetric Use of 360-Degree Cameras in Complex Heritage-Related Scenes: Case of the Necropolis of Qubbet el-Hawa (Aswan Egypt). *Sensors* 24, 2268. <https://doi.org/10.3390/s24072268>
- [86] Remondino, F., El-Hakim, S., 2006. Image-based 3D Modelling: A Review. *The Photogrammetric Record* 21, 269–291. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x>
- [87] Remondino, F., Fraser, C., 2006. ISPRS Commission V Symposium: Image Engineering And Vision Metrology. *Photogrammetric Record* 36, 266–272. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2007.00418.x>
- [88] Rezaei, S., Arefi, H., 2025. Evaluation of Network Design and Solutions of Fisheye Camera Calibration for 3D Reconstruction. *Sensors* 25, 1789. <https://doi.org/10.3390/s25061789>
- [89] RICOH THETA - Kamery 360°: Ricoh Theta X - wyjątkowa jakość [WWW Document], n.d. URL <https://ricohtheta.eu/pl/products/ricoh-theta-x> (accessed 5.4.25).
- [90] Rodak, M., Karpińska, M., Wiśniewski, M., Twardowska, K., Leśniak-Rychlak, D., Jędruch, D., Smaga, M. (Eds.), 2024. *Osiedla mieszkaniowe Krakowa: miniprzewodnik*. Instytut Architektury, Kraków.
- [91] Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K., Bradski, G., 2011. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF, in: 2011 International Conference on Computer Vision. Presented at the 2011 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), IEEE, Barcelona, Spain, pp. 2564–2571. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126544>
- [92] Saif, W., Alshibani, A., 2022. Smartphone-Based Photogrammetry Assessment in Comparison with a Compact Camera for Construction Management Applications. *Applied Sciences* 12, 1053. <https://doi.org/10.3390/app12031053>
- [93] Schneider, D., Schwalbe, E., Maas, H.-G., 2009. Validation of geometric models for fisheye lenses. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64, 259–266. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.01.001>
- [94] Schonberger, J.L., Frahm, J.-M., 2016. Structure-from-Motion Revisited, in: 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Presented at the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE, Las Vegas, NV, USA, pp. 4104–4113. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.445>
- [95] Schwalbe, E., 2005. Geometric modelling and calibration of fisheye lens camera systems. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36.

- [96] Shervais, K., 2016. Structure from Motion (SfM) Photogrammetry Field Methods Manual for Students. URL [https://d32ogoqmya1dw8.cloudfront.net/files/getsi/teaching\\_materials/high-rez-topo/sfm\\_field\\_methods\\_manual.v2.pdf](https://d32ogoqmya1dw8.cloudfront.net/files/getsi/teaching_materials/high-rez-topo/sfm_field_methods_manual.v2.pdf) (accessed 1.7.25).
- [97] Shin, Y.-H., Son, K.-W., Lee, D.-C., 2022. Semantic Segmentation and Building Extraction from Airborne LiDAR Data with Multiple Return Using PointNet++. *Applied Sciences* 12, 1975. <https://doi.org/10.3390/app12041975>
- [98] Sönmez, F.F., Ziar, H., Isabella, O., Zeman, M., 2019. Fast and accurate ray-casting-based view factor estimation method for complex geometries. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 200, 109934. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.109934>
- [99] Stewénius, H., Engels, C., Nistér, D., 2006. Recent developments on direct relative orientation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 60, 284–294. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2006.03.005>
- [100] Steyn, D.G., 1980. The calculation of view factors from fisheye-lens photographs: Research note. *Atmosphere-Ocean* 18, 254–258. <https://doi.org/10.1080/07055900.1980.9649091>
- [101] Steyn, D.G., Hay, J.E., Watson, I.D., Johnson, G.T., 1986. The Determination of Sky View-Factors in Urban Environments Using Video Imagery. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 3, 759–764. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1986\)003%253C0759:TDOSVF%253E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1986)003%253C0759:TDOSVF%253E2.0.CO;2)
- [102] Tommaselli, A.M.G., Garcia, T.A.C., Castanheiro, L.F., Campos, M.B., Santos, G.H., 2023. EFFECTS OF HYPER HEMISPHERICAL FIELD IN BUNDLE ADJUSTMENT WITH FISHEYE IMAGES. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLVIII-1/W1-2023, 503–509. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-503-2023>
- [103] Tregenza, P.R., 1987. Subdivision of the sky hemisphere for luminance measurements. *Lighting Research & Technology* 19, 13–14. <https://doi.org/10.1177/096032718701900103>
- [104] Triggs, B., McLauchlan, P.F., Hartley, R.I., Fitzgibbon, A.W., 2000. Bundle Adjustment — A Modern Synthesis, in: Triggs, B., Zisserman, A., Szeliski, R. (Eds.), *Vision Algorithms: Theory and Practice, Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 298–372. [https://doi.org/10.1007/3-540-44480-7\\_21](https://doi.org/10.1007/3-540-44480-7_21)
- [105] Varlık, A., Dursun, İ., 2024. Three-Dimensional Web-Based Client Presentation of Integrated BIM and GIS for Smart Cities. *Buildings* 14, 3021. <https://doi.org/10.3390/buildings14093021>
- [106] Wang, Xiaofeng, Zhu, Z., Qin, F., Ye, Y., Huang, G., Chi, X., He, Y., Wang, Xingang, 2022. MVSTER: Epipolar Transformer for Efficient Multi-View Stereo. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2204.07346>
- [107] What is Dual Pixel Autofocus? Camera tech explained - Android Authority [WWW Document], n.d. URL <https://www.androidauthority.com/dual-pixel-autofocus-explained-1102293/> (accessed 4.25.25).
- [108] What Is SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)? - MATLAB & Simulink [WWW Document], n.d. URL <https://www.mathworks.com/discovery/slam.html> (accessed 7.5.25).
- [109] Xia, Y., Yabuki, N., Fukuda, T., 2021. Sky view factor estimation from street view images based on semantic segmentation. *Urban Climate* 40, 100999. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100999>
- [110] Xu, Q., Li, J., Tao, W., Ming, D., 2019. Efficient large-scale geometric verification for structure from motion. *Pattern Recognition Letters* 125, 166–173. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2018.09.028>
- [111] Yan, Z., Mazzacca, G., Rigon, S., Farella, E.M., Trybala, P., Remondino, F., 2023. NERFBK: A HOLISTIC DATASET FOR BENCHMARKING NERF-BASED 3D RECONSTRUCTION. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLVIII-1/W3-2023, 219–226. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W3-2023-219-2023>
- [112] Yi, Y.K., Kim, H., 2017. Universal Visible Sky Factor: A method for calculating the three-dimensional visible sky ratio. *Building and Environment* 123, 390–403. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.044>
- [113] Zeng, L., Lu, J., Li, W., Li, Y., 2018. A fast approach for large-scale Sky View Factor estimation using street view images. *Building and Environment* 135, 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.009>

- [114] Zhang, J., Gou, Z., Lu, Y., Lin, P., 2019. The impact of sky view factor on thermal environments in urban parks in a subtropical coastal city of Australia. *Urban Forestry & Urban Greening* 44, 126422. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126422>
- [115] Zhang, Y., Zhang, Z., Zhang, J., Wu, J., 2005. 3D Building Modelling with Digital Map, Lidar Data and Video Image Sequences. *The Photogrammetric Record* 20, 285–302. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2005.00316.x>
- [116] Zhang, Z., 2004. *Emerging Topics in Computer Vision*. Prentice Hall Professional Technical Reference: Upper Saddle River, USA.
- [117] Zhang, Z., 2000. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* 22, 1330–1334. <https://doi.org/10.1109/34.888718>
- [118] Zhu, Z., Kleinn, C., Nölke, N., 2021. Assessing tree crown volume—a review. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 94, 18–35. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa037>
- [119] Zięba-Kulawik, K., Skoczylas, K., Wężyk, P., Teller, J., Mustafa, A., Omrani, H., 2021. Monitoring of urban forests using 3D spatial indices based on LiDAR point clouds and voxel approach. *Urban Forestry & Urban Greening* 65, 127324. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127324>

## 9. Spis ilustracji

Rysunek 1. Schemat obliczeń metodą autorstwa Johnson i Watson, na podstawie (Johnson and Watson, 1984) .....	12
Rysunek 2. Schemat obliczeń metodą autorstwa Bottyan i Unger, na podstawie (Bottyan and Unger, 2003) .....	12
Rysunek 3. Przykład wyznaczenia SVF na obrazie fish-eye. a) obrazy z Google Street View, b) filtr Sobela wspierany algorytmem zalewania (flood-fill), c) klasyfikacja nieba (Middel et.all 2018) .....	13
Rysunek 4. Przykład obliczenia SVF algorytmem ray-casting (Yi and Kim, 2017) .....	14
Rysunek 5. Przykładowe podziały hemisfery (Marsh, 2005) .....	15
Rysunek 6. Przykład kanionu ulicznego w Gdańsku i Nowym Jorku, źródło: Google Earth.....	17
Rysunek 7. Przykład modernistycznego osiedla mieszkaniowego Mistrzejowice, Kraków. Źródło: Google Earth .....	18
Rysunek 8. Schemat pozyskiwania danych ALS (Mandlbürger, 2024) .....	19
Rysunek 9. Wizualizacja chmury punktów z geoportalu, po lewej w RGB, po prawej według klasyfikacji	20
Rysunek 10. Schemat działania algorytmów SLAM, (“What Is SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)? - MATLAB & Simulink,”).....	21
Rysunek 11. Schemat ilustrujący standard LOD w wersji 2.0 i 3.0 (Varlık and Dursun, 2024).....	22
Rysunek 12. Idea wyznaczenia CHM (Meddens et al., 2018).....	23
Rysunek 13. Wizualizacja sposobów reprezentacji roślinności za pomocą poziomów LOD (Gobeawan et al., 2018).....	24
Rysunek 14. Wizualizacja danych udostępnianych przez GUGiK, fragment ul. Konarskiego w Krakowie, budynki LOD2 i roślinność LOD1 .....	24
Rysunek 15. Przykład wokselizacji chmury punktów (Zięba-Kulawik et al., 2021).....	25
Rysunek 16. Reprezentacja drzewa w zależności od rozmiaru wksela (Zhu et al., 2021).....	25
Rysunek 17. Porównanie rzutu środkowego z odwzorowaniem fish-eye wiernoodległościowym i równopowierzchniowym .....	26
Rysunek 18. Schemat metody wyszukiwania podobieństw Structure-from-Motion (SfM) (Shervais, 2016).....	30
Rysunek 19. Szczegółowy schemat działania SfM (Schonberger and Frahm, 2016).....	31
Rysunek 20. Agregacja kosztów w przestrzeni rozbieżności paralaksy, na podstawie (Hirschmuller, 2008) .....	33
Rysunek 21. Schemat działania NeRF (Mildenhall et al., 2020).....	34
Rysunek 22. Przeliczanie współrzędnych przestrzennych na płaskie (hemisferyczne).....	37
Rysunek 23. Lokalizacja ulicy Konarskiego - podkłady, Open Street Map i Google Satellite Map .....	39
Rysunek 24. Ulica Konarskiego - rozkład gatunkowy drzew (źródło informacji o gatunkach: Zarząd Zieleni Miejskiej w Krakowie) .....	40
Rysunek 25. Badane kaniony uliczne w historycznym centrum Sieny, podkład Google Satellite Map .....	41
Rysunek 26. Przykład kanionu ulicznego w Sienie - Casato di Sotto (po lewej), Via di Salicotto (po prawej) - Google Street View .....	41
Rysunek 27. Wykorzystanie urządzenia fotograficzne do rejestracji: po lewej Samsung Galaxy S10, po prawej Ricoh THETA X.( <a href="https://www.samsung.com/pl/smartphones/galaxy-s10/specs/">https://www.samsung.com/pl/smartphones/galaxy-s10/specs/</a> ; <a href="https://ricohtheta.eu/pl/products/ricoh-theta-x">https://ricohtheta.eu/pl/products/ricoh-theta-x</a> ) .....	43
Rysunek 28. Przykład zastosowania wtyczki Theta bitrate do rozdzielania obrazu panoramicznego na obrazy fish-eye .....	44
Rysunek 29. Laboratorium kalibracji skanerów laserowych i kamer cyfrowych ( <a href="https://cenagis.edu.pl/laboratoria/">https://cenagis.edu.pl/laboratoria/</a> ) .....	46
Rysunek 30. Przykładowy fragment zdjęcia sferycznego przetworzonego skryptem (Honjo, 2017) do dwóch obrazów fish-eye - po lewej wiernopowierzchniowe, po prawej wiernoodległościowe .....	47
Rysunek 31. Szkic osnowy, podkład Google Satellite Map .....	48
Rysunek 32. Przykładowe fotopunkty - kolejno: przecięcie szpalet, tabliczka orientacyjna, element znaku drogowego, element elewacji .....	48
Rysunek 33. Schemat pozyskiwania nagrań smartfonem .....	49
Rysunek 34. Wykorzystany skaner Emesent Hovermap (źródło: <a href="https://geotronics.com.pl/produkty-i-rozwiazania/systemy-mobilne/emesent-hovermap">https://geotronics.com.pl/produkty-i-rozwiazania/systemy-mobilne/emesent-hovermap</a> ).....	51
Rysunek 35. Kanion w Sienie, Casato di Sotto - przykład maskowania nieba na zdjęciach fish-eye (niebo w kolorze ciemnoniebieskim).....	52

Rysunek 36. Przykład maskowania nieba, ul Konarskiego, kolejno zdjęcie oryginalne, maska z automatyzacji, maska po korektach w obszarze budynków.....	53
Rysunek 37. Badane kaniony uliczne w historycznym centrum Sieny, podkład Google Satellite Map.....	56
Rysunek 38. Wartości SVF wzdłuż Via S.Martino .....	57
Rysunek 39. Zestawienie obrazów i masek kolejno dla początku kanionu, punktu o najniższym SVF (sześćdziesiąty pierwszy metr), końca kanionu.....	57
Rysunek 40. Wartości SVF wzdłuż Via di Salicotto .....	58
Rysunek 41. Zestawienie obrazów i masek kolejno: początek kanionu na dziedzińcu, minimum lokalne w piętnastym metrze, przejście na pierwszy plac, początek drugiego odcinka, powrót do osi kanionu, wejście na drugi plac .....	59
Rysunek 42. Wartości SVF wzdłuż Casato di Sotto.....	60
Rysunek 43. Zestawienie obrazów i masek, Casato di Sotto, kolejno: początek kanionu, dalszy odcinek, najbardziej zakręcający, skrzyżowania z Vicolo di S. Salvatore, Vicolo Ugurgieri, Vicolo delle Pietre .....	61
Rysunek 44. Wartości SVF wzdłuż chodnika wschodniego z metody fotograficznej.....	62
Rysunek 45. Wartości SVF wzdłuż chodnika zachodniego z metody fotograficznej .....	63
Rysunek 46. Przykładowe dane i maski z metody fotograficznej wysokorozdzielczej 28 V 2025 - chodnik wschodni, kolejno: trzydziesty, sześćdziesiąty szósty i sto piąty metr profilu .....	65
Rysunek 47. Przykładowe dane i maski z metody fotograficznej wysokorozdzielczej 28 V 2025 - chodnik zachodni, kolejno: osiemdziesiąty czwarty, sto dziesiąty i sto czterdziesty drugi metr profilu.....	65
Rysunek 48. Przykład danych, maski poprawionej i po operacji morfologicznej z 5 I 2024 (góra) i 21 III 2024 (dół).....	66
Rysunek 49. Wartości SVF przed i po morfologii masek dla wybranych zestawów z metody fotograficznej, chodnik wschodni.....	67
Rysunek 50. Wartości SVF przed i po morfologii masek dla wybranych zestawów z metody fotograficznej, chodnik zachodni.....	67
Rysunek 51. Zestawienie obrazów wirtualnych dla przykładowej lokalizacji na zachodnim chodniku, kolejno rok 2017, 2021 i 2023.....	69
Rysunek 52. Mapa wartości SVF z metody hybrydowej z chmur z ALS.....	70
Rysunek 53. Mapa różnic SVF z metody hybrydowej z chmur z ALS .....	71
Rysunek 54. Regresja SVF z metody hybrydowej z chmur z ALS .....	72
Rysunek 55. Wartości SVF wzdłuż osi jezdni z metody hybrydowej z chmur z ALS .....	73
Rysunek 56. Mapa wartości BVF z metody hybrydowej z chmur z ALS .....	75
Rysunek 57. Wartości BVF wzdłuż osi jezdni z metody hybrydowej z chmur z ALS .....	75
Rysunek 58. Mapa wartości TVF z metody hybrydowej z chmur z ALS .....	76
Rysunek 59. Wartości TVF wzdłuż osi jezdni z metody hybrydowej z chmur z ALS .....	76
Rysunek 60. Mapy wartości SVF z metoda hybrydowej z chmur z kamery sferycznej .....	78
Rysunek 61. Wartości SVF wzdłuż chodnika wschodniego z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej.....	79
Rysunek 62. Wizualizacja wyników metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej, chodnik wschodni, minimum globalne, obrazy z 5 X 2023, 5 I 2024 i 3 IV 2024.....	79
Rysunek 63. Wartości SVF wzdłuż chodnika zachodniego z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej .....	80
Rysunek 64. Wizualizacja wyników metody hybrydowej, chodnik zachodni, wiersze kolejno: trzydziesty trzeci, sześćdziesiąty piąty i sto dziesiąty metr profilu, kolumny kolejno 5 I 2024, 25 X 2024 i 28 V 2025 .....	81
Rysunek 65. Wartości SVF wzdłuż osi jezdni z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej .....	82
Rysunek 66. Zestawienie regresji liniowej dla wyników z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej z różnych pór roku.....	82
Rysunek 67. Mapy wartości BVF i TVF z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej.....	83
Rysunek 68. Wartości BVF wzdłuż osi jezdni z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej .....	84
Rysunek 69. Wartości TVF wzdłuż osi jezdni z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej .....	84
Rysunek 70. Wizualizacja chmury punktów ze SLAM, kolejno wszystkie drzewa wzdłuż Konarskiego, zbliżenie na jedną z najgęstszych stref, widok od dołu. ....	85
Rysunek 71. Mapa wartości SVF z metody hybrydowej z chmury SLAM.....	86
Rysunek 72. Wizualizacja metody hybrydowej z chmury SLAM- chodnik zachodni, obrazy wirtualne .....	86
Rysunek 73. Wartości SVF wzdłuż chodnika wschodniego z metody hybrydowej z chmury SLAM .....	87
Rysunek 74. Wartości SVF wzdłuż chodnika zachodniego z metody hybrydowej z chmury SLAM.....	87
Rysunek 75. Wartości SVF wzdłuż osi jezdni z metody hybrydowej z chmury SLAM .....	88

Rysunek 76. Mapy BVF i TVF z metody hybrydowej z chmury SLAM .....	89
Rysunek 77. Wartości VF wzdłuż chodnika wschodniego z metody hybrydowej z chmury SLAM .....	89
Rysunek 78. Wartości VF wzdłuż chodnika zachodniego z metody hybrydowej z chmury SLAM .....	90
Rysunek 79. Wartości VF wzdłuż osi jezdni z metody hybrydowej z chmury SLAM .....	90
Rysunek 80. Histogramy wartości kątów $\omega$ i $\varphi$ uzyskane dla zdjęć .....	91
Rysunek 81. Przykład wpływu zmiany kąta $\omega$ , kolejno od lewej: $-5^\circ$ , $0^\circ$ , $+5^\circ$ , dla zestawu z sezonu bezlistnego (górze) i z liśćmi (dół). Kolorem czerwonym oznaczono obszar pojawiający się pod budynkami .....	92
Rysunek 82. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmur ALS z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie graficzne dla chodnika wschodniego .....	93
Rysunek 83. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmur ALS z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie graficzne dla chodnika zachodniego .....	94
Rysunek 84. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie graficzne dla chodnika wschodniego, sezon bezlistny. ....	96
Rysunek 85. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie graficzne dla chodnika zachodniego, sezon bezlistny .....	96
Rysunek 86. Wizualizacja wyników z metody fotograficznej wysokorozdzielczej i hybrydowej z rejestracji kamerą sferyczną dla setnego (górze) i sto dwudziestego (dół) metra chodnika zachodniego, kolejno obraz z metody fotograficznej, maska nieba oraz obraz z metody hybrydowej .....	97
Rysunek 87. Zestawienie regresji liniowej dla wyników z różnych metod .....	97
Rysunek 88. Lokalizacje zdjęć i obliczeń dla zestawów z 28 V 2025: po lewej wyniki SVF z metody fotograficznej wysokorozdzielczej, po prawej z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej .....	98
Rysunek 89. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmury z kamery sferycznej z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie statystyczne dla chodnika wschodniego, sezon z liśćmi .....	99
Rysunek 90. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmury z kamery sferycznej z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie statystyczne dla chodnika zachodniego, sezon z liśćmi .....	100
Rysunek 91. Przykład porównania obrazów z różnych metod, kolejno: zdjęcie wysokorozdzielcze, maska nieba, obraz wirtualny z metody hybrydowej przed i po operacji morfologicznej - lokalizacja minimum globalnego wzdłuż chodnika zachodniego .....	100
Rysunek 92. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmury SLAM z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie graficzne dla chodnika wschodniego, sezon bezlistny .....	101
Rysunek 93. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmury SLAM z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie graficzne dla chodnika zachodniego, sezon bezlistny. ....	102
Rysunek 94. Zestawienie obrazów z metody fotograficznej i hybrydowej - sto dziesiąty metr chodnika zachodniego .....	102

## 10. Spis tabel

Tabela 1. Klasy chmury punktów udostępnianych przez GUGiK (“Dane pomiarowe LIDAR (LIDAR) – Geoportal.gov.pl,”).....	20
Tabela 2. Zestawienie przykładowych oprogramowań fotogrametrycznych wykorzystujących SfM i MVS33	
Tabela 3. Zestawienie charakterystyk pól badawczych.....	42
Tabela 4. Specyfikacja obiektywów Samsung Galaxy S10 (“Dane techniczne aparatów w Galaxy S10   Samsung Polska,”).....	43
Tabela 5. Specyfikacja skanera Emesent Hovermap (źródło: <a href="https://geotronics.com.pl/dokumenty/broszury/systemy-mobilne/emesent-hovermap-arkusz-danych.pdf">https://geotronics.com.pl/dokumenty/broszury/systemy-mobilne/emesent-hovermap-arkusz-danych.pdf</a> ).....	51
Tabela 6. Zestawienie rozdzielczości generowanych wirtualnych obrazów .....	54
Tabela 7. Specyfikacja zestawów opracowanych dla ulicy Konarskiego.....	55
Tabela 8. Zestawienie statystyk dla różnic w SVF z metody fotograficznej przed i po operacjach morfologicznych.....	66
Tabela 9. Zestawienie charakterystyk udostępnionych danych z ALS (geoportal.gov.pl).....	68
Tabela 10. Zestawienie statystyk SVF z metody hybrydowej z chmur z ALS.....	69
Tabela 11. Zestawienie różnic SVF z metody hybrydowej z chmur z ALS.....	69
Tabela 12. Zestawienie statystyk SVF wyznaczonego metodą hybrydową z chmur z kamery sferycznej....	77
Tabela 13. Zestawienie statystyk dla kątów $\omega$ i $\phi$ .....	91
Tabela 14. Zestawienie statystyk dla różnic SVF z oryginalnych i nachylonych wirtualnych obrazów .....	92
Tabela 15. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmurą ALS z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie statystyczne.....	93
Tabela 16. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmur z kamery sferycznej z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie statystyczne, sezon bezlistny .....	95
Tabela 17. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmury z kamery sferycznej z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie statystyczne, sezon z liśćmi.....	99
Tabela 18. Porównanie SVF z metody hybrydowej z chmury SLAM z metodą fotograficzną wysokorozdzielczą - ujęcie statystyczne .....	101