



POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji

SZKOŁA DOKTORSKA POLITECHNIKI KOSZALIŃSKIEJ

Dyscyplina Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

mgr inż. Paulina Stałowska

ROZPRAWA DOKTORSKA

**Analiza defektów powierzchniowych wybranych obiektów budowlanych
z wykorzystaniem technologii naziemnego skaningu laserowego**

**Analysis of surface defects of selected building structures
utilizing terrestrial laser scanning technology**

Promotor:

dr hab. inż. Czesław Suchocki, prof. PK

Koszalin 2025

***Pragnę złożyć najszczerze podziękowania mojemu promotorowi
Panu dr hab. inż. Czesławowi Suchockiemu, prof. PK***

*za nieocenione wsparcie, jakie otrzymałam na przestrzeni lat pracy
nad niniejszą rozprawą doktorską.*

Dziękuję za zaangażowanie oraz za dzielenie się swoją wiedzą i bogatym doświadczeniem.

*Dziękuję za wszelkie uwagi merytoryczne, inspirujące sugestie oraz
mobilizację do ciągłego doskonalenia i rozwoju.*

*Dziękuję za wszelką pomoc oraz czas, który mi Pan poświęcił.
Jestem niezmiernie wdzięczna za tę współpracę.*

Koszalin, dn. 11.06.2025

mgr inż. Paulina Stańska

Dyscyplin naukowa: Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

Nr albumu: D-233

O Ś W I A D C Z E N I E

**autora rozprawy doktorskiej o jej oryginalności,
samodzielności jej przygotowania i o nienaruszaniu praw autorskich**

Ja, niżej podpisana*/podpisany* oświadczam, że rozprawa doktorska:

pt.

Analiza defektów powierzchniowych wybranych obiektów budowlanych z wykorzystaniem technologii naziemnego skaningu laserowego

została przygotowana przeze mnie samodzielnie (uwzględniając merytoryczny wkład promotora pracy),

- nie narusza praw autorskich w rozumieniu ustawy z dnia 4 lutego 1994 roku o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz. U. z 2025 r. poz. 24) oraz dóbr osobistych chronionych prawem cywilnym,
- nie stanowi istotnego fragmentu lub innych elementów cudzego utworu,
- wykorzystane w pracy materiały źródłowe zastosowane zostały z zachowaniem zasad prawa cytatu,
- nie zawiera danych i informacji uzyskanych w sposób niedozwolony,
- w całości ani też w części nie była wcześniej podstawą do ubiegania się o nadanie stopnia naukowego doktora ani mnie ani innej osobie.

Paulina Stańska

(czytelny podpis)

* niewłaściwe skreślić

Koszalin, dn. 11.06.2025

Promotor: dr hab. inż. Czesław Suchocki, prof. PK

Nr albumu doktoranta: D-233

Dyscyplin naukowa: Inżynieria Ładuna, Geodezja i Transport

O Ś W I A D C Z E N I E

promotora rozprawy doktorskiej

Ja, niżej podpisana*/podpisany* oświadczam, że rozprawa doktorska

pt.

Analiza defektów powierzchniowych wybranych obiektów
budowlanych z wykorzystaniem technologii naziemnego
skaningu laserowego.

została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do
przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego.

Czesław Suchocki

(czytelny podpis promotora)

* niewłaściwe skreślić

SPIS TREŚCI

WYKAZ ARTYKUŁÓW NAUKOWYCH WCHODZĄCYCH W SKŁAD CYKLU PUBLIKACJI W RAMACH ROZPRAWY DOKTORSKIEJ	7
STRESZCZENIE	8
SUMMARY	10
WYKAZ STOSOWANYCH SYMBOLI I OZNACZEŃ ORAZ SKRÓTÓW	12
1 Wprowadzenie	13
2 Przegląd stanu wiedzy w zakresie przedmiotu pracy	16
3 Hipotezy i cele badawcze	20
4 Schemat programu badawczego	22
5 Teoretyczne aspekty technologii naziemnego skaningu laserowego w kontekście podjętej tematyki badawczej.....	23
5.1 Podstawowe informacje dot. wykorzystanej technologii TLS oraz charakterystyka użytego skanera.....	23
5.2 Rozmiar plamki lasera oraz rozbieżność wiązki lasera w kontekście jakości chmury punktów.....	24
5.3 <i>Edge effect</i> w pomiarach naziemnego skaningu laserowego	27
5.4 Informacja radiometryczna chmury punktów	28
5.5 Wpływ kąta padania wiązki lasera na jakość danych TLS	30
6 Realizacja programu badawczego	32
6.1 Technologia TLS w badaniach pęknięć powierzchni ścian obiektów budowlanych. Etap I programu badawczego.	32
6.1.1 Opracowanie metodyki pomiaru technologią TLS w kontekście detekcji pęknięć powierzchni ścian obiektów budowlanych. Zadanie 1.	34
6.1.2 Informacja radiometryczna chmury punktów w detekcji rys powierzchni ścian obiektów budowlanych. Zadanie 1.1.....	46
6.1.3 Analiza wpływu odległości i kąta padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej na zdolność detekcji pęknięć. Zadanie 1.2.	48
6.2 Technologia TLS w detekcji zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych. Etap II programu badawczego.....	50
6.2.1 Badanie możliwości informacji radiometrycznej chmury punktów w detekcji zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych. Zadanie 2.	51
6.2.2 Opracowanie metodyki pomiaru technologią TLS w kontekście detekcji zmian powierzchniowych łopat turbiny wiatrowej – analizy porównawcze dwóch zaproponowanych metodyk pomiarowych. Zadanie 3.	56

6.2.3	Analiza wpływu wzrostu kąta padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej na jakość danych radiometrycznych w kontekście detekcji zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych. Zadanie 4.	64
6.2.4	Analiza danych radiometrycznych chmury punktów w kontekście detekcji zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych – analizy porównawcze z metodą fotogrametryczną. Zadanie 5.	69
6.2.5	Badanie wpływu długości fali wiązki lasera na skuteczność detekcji nieciągłości powierzchni. Zadanie 6.	76
7	Wnioski końcowe i kierunki dalszych badań	81
8	Bibliografia.....	83

Załączniki do rozprawy

Załącznik 1. Pozostała aktywność naukowa

Załącznik 2. Kopie opublikowanych artykułów naukowych wchodzących w skład cyklu publikacji w ramach rozprawy doktorskiej

Załącznik 3. Oświadczenia autorów artykułów naukowych wchodzących w skład cyklu publikacji w ramach rozprawy doktorskiej

**WYKAZ ARTYKUŁÓW NAUKOWYCH WCHODZĄCYCH W SKŁAD CYKLU
PUBLIKACJI W RAMACH ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

Lp.	Publikacja naukowa	IF ¹	Punktacja wg MEiN/MNiSW ²	Q ³	% ⁴
1.	P. Stałowska, C. Suchocki, M. Rutkowska, (2022) <i>Crack detection in building walls based on geometric and radiometric point cloud information</i> , Automation in Construction, Vol. 134. DOI:10.1016/j.autcon.2021.104065	10.6	140	Q1	70
2.	P. Stałowska, C. Suchocki, (2022) TLS data for cracks detection in building walls, Data in Brief, Vol. 42. DOI:10.1016/j.dib.2022.108247	1.0	40	Q3	75
3.	P. Stałowska, (2023) <i>Possibilities and limitations of terrestrial laser scanning for crack detection in building walls</i> , Environmental Engineering (Lithuania), The 12th International Conference 'Environmental Engineering'. DOI:10.3846/enviro.2023.914	-	20	-	100
4.	P. Stałowska, C. Suchocki, A. Zagubień, (2023) <i>Application of terrestrial laser scanning measurements for wind turbine blade condition surveying</i> , Metrology and Measurement Systems, Vol. 30(3). DOI:10.24425/mms.2023.146419	1.0	100	Q4	70
5.	P. Stałowska, C. Suchocki, A. Zagubień, (2025) <i>Terrestrial Laser Scanning for Wind Turbine Blade Defect Detection</i> , Measurement, Vol. 246. DOI:10.1016/j.measurement.2025.116706	4.8	200	Q1	70
SUMA		17.4	500	-	-

¹ 5-Year Impact Factor (IF)

² Liczba punktów za publikację wg listy Ministerstwa Edukacji i Nauki (do dnia 01 stycznia 2024r.) lub Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (od dnia 01 stycznia 2024r.)

³ Category Quartile (Q) – informacja o kwartyle, w którym znajduje się czasopismo w dziedzinie do jakiej zostało przypisane wg Web of Sciences (Q1 – czasopismo najbardziej rankingowe, Q4 – czasopismo najmniej rankingowe).

⁴ Procentowy udział doktoranta w publikacji naukowej (szczegółowy opis wkładu doktoranta w przygotowanie poszczególnych artykułów został zawarty w oświadczeniach autorów, dołączonych do niniejszej rozprawy – Załącznik 3.).

STRESZCZENIE

Monitoring stanu technicznego wszelkich obiektów budowlanych odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu ich trwałości i bezpieczeństwa. Nowoczesne technologie są nieustannie testowane pod kątem ich skuteczności w realizacji zadań i sprostaniu wyzwaniom stawianym przez branże takie jak inżynieria lądowa, energetyka i wiele innych. W ramach programu badawczego realizowanego w pracy doktorskiej skoncentrowano się na badaniach możliwości i ograniczeń technologii nieziemnego skaningu laserowego (TLS) w wykrywaniu i analizie zmian powierzchniowych wybranych obiektów budowlanych. W kontekście przeprowadzonych badań, zmiany powierzchniowe rozumiane są jako defekty powierzchni takie jak pęknięcia, ubytki i inne nieciągłości struktury powierzchniowej badanego obiektu. Wczesne wykrywanie defektów oraz monitorowanie stopnia ich degradacji jest niezwykle istotne, ponieważ umożliwia podjęcie działań naprawczych na wczesnym etapie. Dzięki szybkiej reakcji można zapobiec poważnym uszkodzeniom, zwiększyć bezpieczeństwo użytkowania oraz zminimalizować koszty związane z remontami i utrzymaniem obiektu. Badania zostały zrealizowane w dwóch głównych obszarach.

Pierwszy etap programu badawczego koncentrował się na wykorzystaniu technologii TLS do detekcji i analizy pęknięć w powierzchni ścian obiektów budowlanych. Zbadano potencjał zarówno informacji geometrycznej, jak i radiometrycznej chmury punktów. Wyniki badań przeprowadzonych w ramach tego etapu zostały przedstawione w trzech publikacjach: P1, P2 i P3.

Badania zaprezentowane w publikacji P1 pozwoliły na opracowanie metodyki pomiaru technologią TLS w kontekście detekcji pęknięć na powierzchniach ścian obiektów budowlanych, z uwzględnieniem parametrów technicznych skanera oraz warunków geometrycznych pomiaru, takich jak odległość od obiektu pomiarowego oraz kąt padania wiązki lasera. Testy przeprowadzono dla dwudziestu różnych warunków pomiarowych, dla których to uzyskano różną skuteczność. Szczegółowe analizy pozwoliły opracować wytyczne dotyczące optymalnych warunków pomiarowych do efektywnego wykrywania pęknięć. Kolejna część badań i weryfikacja opracowanej metodyki na rzeczywistych obiektach budowlanych potwierdziła jej poprawność.

Publikacja P2 obejmuje udostępnienie danych uzyskanych w ramach badań przedstawionych w P1 w systemie Mendeley oraz raportu z przeprowadzonych badań. Jej celem jest upowszechnienie danych dla dalszych badań oraz umożliwienie analizy uzyskanych wyników.

W ramach podjętej tematyki przeprowadzono także badania dodatkowe, które rozszerzyły wiedzę zdobytą w badaniach podstawowych przedstawionych w P1. Uzyskane wyniki badań uzupełniających zostały zaprezentowane w publikacji P3. Pierwsze z nich weryfikują możliwości zastosowania informacji radiometrycznej chmury punktów do detekcji rys. Drugie odnoszą się do wpływu warunków pomiarowych, takich jak odległość od obiektu i kąt padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej, na jakość uzyskiwanych danych w kontekście detekcji pęknięć. Wyniki wskazały nowe możliwości, ale też ograniczenia technologii TLS, co pozwoliło na sformułowanie dodatkowych zaleceń dotyczących warunków pomiarowych dla efektywnej detekcji pęknięć.

Drugi etap programu badawczego koncentrował się na zastosowaniu technologii TLS do wykrywania i identyfikacji zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych. Badania skupiały się przede wszystkim na defektach najczęściej występujących na łopatach, takich jak pęknięcia, oznaki erozji oraz ubytki i przetarcia w powłoce. Defekty te mogą mieć istotny wpływ na obniżenie wydajności turbin ponieważ zakłócają ich aerodynamikę, co prowadzi do zmniejszenia wydajności produkcji energii. W ramach badania analizowano również czy doszło do uszkodzenia systemu ochrony odgromowej montowanego na łopatach. Zaniedbanie jego stanu może zwiększać ryzyko awarii spowodowanej uderzeniem pioruna i obniżać bezpieczeństwo pracy turbiny. Diagnoza stanu technicznego systemu ochrony odgromowej jest zatem kluczowa dla zapewnienia ciągłości pracy turbin. Wyniki badań przeprowadzonych w ramach tego etapu zostały przedstawione w dwóch publikacjach: P4 oraz P5.

W publikacji P4 przedstawiono badania podstawowe, których celem było zbadanie potencjału technologii TLS do detekcji defektów łopat turbin wiatrowych. Prace badawcze zostały podzielone na dwa etapy. W kluczowym, pierwszym etapie, z bezpośrednim dostępem do łopat, wykazano, że dane radiometryczne chmury punktów umożliwiają detekcję najpowszechniej występujących defektów, takich jak ubytki czy oznaki erozji. Następnie opracowano i zweryfikowano dwie różne metodyki pomiarowe. Przeprowadzono gruntowne analizy pod kątem efektywności i aspektów finansowych obydwu podejść, co pozwoliło na wskazanie lepszej procedury skanowania łopat w kontekście detekcji ich defektów.

Badania zaprezentowane w publikacji P5 stanowią rozwinięcie badań podstawowych z publikacji P4. Przeprowadzono badania uzupełniające wykazujące wpływ kąta padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej oraz wpływ długości fali wiązki lasera na jakość danych radiometrycznych i możliwość wykrywania zmian powierzchniowych. Głównym celem tego etapu była szczegółowa analiza porównawcza technologii TLS z fotogrametrią, która obecnie jest wiodącą metodą pomiarową w tym zagadnieniu. Badania wykazały, czy dane radiometryczne chmury punktów mogą stanowić konkurencyjną alternatywę, dostarczając wyniki porównywalne z fotogrametrią. Przeprowadzone analizy wskazały możliwości oraz ograniczenia technologii TLS w detekcji zmian powierzchniowych łopat, wskazując także kierunki dalszych badań i analiz nad wykorzystaniem tej technologii w podjętym problemie badawczym.

Program badawczy pracy doktorskiej dostarcza nowej, wszechstronnej wiedzy dotyczącej zastosowania technologii TLS w detekcji zmian powierzchniowych obiektów budowlanych. W szczególności skupiono się na pęknięciach powierzchni ścian budynków oraz defektach powierzchniowych łopat turbin wiatrowych. Innowacyjność badań polega na sformułowaniu kluczowych wniosków dotyczących optymalizacji warunków pomiarowych w detekcji pęknięć przy użyciu technologii TLS, a także na nowatorskim zastosowaniu TLS w branży energii wiatrowej. Niniejsze badania wyróżnia duże znaczenie aplikacyjne. Przeprowadzony program badawczy przyczynił się do znaczącego rozwoju i udoskonalenia metod monitorowania stanu technicznego obiektów budowlanych.

SUMMARY

Monitoring the technical condition of all construction structures plays a crucial role in ensuring their durability and safety. Modern technologies are continuously tested for their effectiveness in fulfilling tasks and meeting the challenges posed by industries such as civil engineering, energy, and many others. The research program conducted within this doctoral dissertation focused on investigating the capabilities and limitations of terrestrial laser scanning (TLS) technology in detecting and analyzing surface changes in construction objects. In the framework of the conducted study, surface changes are classified as surface defects, including cracks, cavities, and other discontinuities of the surface structure of the investigated object. Early detection of these defects and monitoring their degree of degradation is crucial, as it enables the implementation of repair actions at an early stage. Rapid intervention can prevent severe structural damage, enhance operational safety, and minimize costs associated with repairs and maintenance of the object. The research was carried out in two main areas.

The first stage of the research program focused on utilizing TLS technology for the detection and analysis of cracks on the surfaces of building structures. The potential of both geometric and radiometric point cloud information was investigated. The results of the research conducted in this stage were presented in three publications: P1, P2, and P3.

The studies presented in publication P1 enabled the development of a TLS measurement methodology for detecting cracks in the surfaces of building walls, taking into account the technical parameters of the scanner and the geometric measurement conditions, such as the distance from the measured object and the angle of laser beam incidence. Tests were conducted under twenty different measurement conditions, for which varying levels of efficiency were obtained. Detailed analyses allowed for the development of guidelines for optimal measurement conditions for effective crack detection. The next phase of the research, involving the verification of the methodology in the field, confirmed its accuracy.

Publication P2 involves making the data obtained from the studies presented in P1 available in the Mendeley system, along with a report on the conducted studies. Its purpose is to provide access to the collected data for further research and to enable the analysis of the obtained results.

Additional research was conducted, expanding the knowledge gained from the core studies presented in P1. The results were presented in publication P3. The first part of this research verifies the potential of radiometric point cloud information to detect scratches. The second part examines the impact of measurement conditions, such as the distance from the object and the angle of incidence of the laser beam in the vertical plane, on the quality of the obtained data in the context of crack detection. The results indicated key limitations, which allowed for the formulation of additional recommendations regarding the optimization of measurement conditions for effective crack detection.

The second stage of the research program focused on the application of TLS technology for detecting and identifying surface changes in wind turbine blades. The research concentrated mainly on the defects most commonly encountered on the blades, such as cracks, signs of erosion, and coating damages. These defects can significantly impact turbine performance, as they affect the aerodynamic flow and ultimately reduce the

efficiency of energy production. The study also examined whether the lightning protection system installed on the blades had been damaged. Neglecting its condition can increase the risk of failure caused by lightning strikes and reduce the operational safety of the turbine. Therefore, assessing the technical condition of the lightning protection system is crucial for ensuring the continuous operation of turbines. The results of the research conducted in this stage were presented in two publications: P4 and P5.

Publication P4 presents fundamental research aimed at assessing the potential of TLS technology for detecting defects in wind turbine blades. The research was divided into two stages. In the key first stage, with direct access to the blades, it was demonstrated that the radiometric point cloud information allows for the detection of the most commonly occurring defects, such as material losses or signs of erosion. As the next step, two different measurement methods were developed and validated. Comprehensive analyses were conducted in terms of the effectiveness and financial aspects of both approaches, which enabled the identification of the more effective procedure for scanning blades in the context of defect detection.

The studies presented in publication P5 are an extension of the fundamental research from publication P4. Supplementary research was conducted, demonstrating the impact of angle of incidence of the laser beam in the vertical plane and the wavelength of the laser beam on the quality of radiometric data and the ability to detect surface changes. The primary objective of this stage was to conduct a detailed comparative analysis of TLS technology and photogrammetry, which is currently the leading measurement method in this field. The research aimed to determine whether the radiometric point cloud data could provide a competitive alternative, delivering results comparable to photogrammetry. The analyses highlighted both the capabilities and limitations of TLS technology in detecting blades defects, outlining directions for further studies and analyses on the application of this technology in the investigated research problem.

The research program of the doctoral dissertation provides new, comprehensive knowledge regarding the application of TLS technology in detecting surface changes in construction objects. Particular emphasis was placed on surface cracks in building walls and surface defects of wind turbine blades. The innovation of the research lies in formulating key conclusions regarding the optimization of measurement conditions for crack detection using TLS technology, as well as the novel application of TLS in the wind energy sector. These studies have significant practical importance. The conducted research program has significantly contributed to the development and improvement of methods for monitoring the technical condition of building structures.

WYKAZ STOSOWANYCH SYMBOLI I OZNACZEŃ ORAZ SKRÓTÓW

D	- średnica przysłony [m];
K_a	- stałe oświetlenie przysłony;
P_R	- moc sygnału powracającego [W];
P_T	- moc sygnału wyemitowanego [W];
R	- odległość pomiędzy skanerem a badanym obiektem [m];
$w_{(r)}$	- średnica plamki lasera;
w_0	- największe miejsce wiązki lasera – minimalna średnica plamki lasera (<i>ang. the waist of a Gaussian beam</i>);
α	- kąt padania wiązki lasera [°];
φ	- kąt padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej [°], tj. kąt zawarty pomiędzy kierunkiem wiązki lasera a wektorem normalnym do powierzchni badanego obiektu, zrzutowany na płaszczyznę pionową;
η_{Atm}	- współczynnik atmosferyczny;
η_{Sys}	- współczynnik systemowy;
θ	- rozbieżności wiązki lasera;
λ	- długość fali wiązki lasera [m];
ρ	- współczynnik określający własności odbicia skanowanej powierzchni;
σ	- efektywny przekrój celu [m ²];
LE	- krawędź natarcia, krawędź prowadząca (<i>ang. leading edge</i>)
PS	- powierzchnia/strona ciśnieniowa (<i>ang. pressure side</i>)
SS	- powierzchnia/strona ssąca (<i>ang. suction side</i>)
TE	- krawędź spływu, krawędź zejścia (<i>ang. trailling edge</i>)
TLS	- naziemny skaning laserowy (<i>ang. terrestrial laser scanning</i>)
$UAVs$	- bezzałogowe statki powietrzne (<i>ang. unmanned aerial vehicles</i>)
SHM	- monitoring stanu konstrukcji (<i>ang. structural health monitoring</i>)

1 Wprowadzenie

Technologia naziemnego skaningu laserowego zyskała popularność w latach 90. XX wieku i obecnie jest jedną z najczęściej stosowanych w wielu dziedzinach, a przede wszystkim w inżynierii lądowej i zarządzaniu dziedzictwem kulturowym. Charakteryzuje się przede wszystkim wysoką dokładnością i szybkością akwizycji danych. Jedną z kluczowych jej cech jest bezinwazyjność w pozyskiwaniu danych o obiekcie. Technologia TLS bazuje na zdalnej i bardzo precyzyjnej rejestracji kątów poziomych i pionowych oraz wyznaczonej odległości pomiędzy urządzeniem a obiektem. Taki zestaw danych, uzyskany dla każdego z punktów, umożliwia obliczenie ich współrzędnych przestrzennych (X, Y, Z). Zbiór punktów tworzący tzw. chmurę punktów może dostarczać szczegółowych informacji o zeskanowanej powierzchni. Możliwe jest uzyskanie niezwykle gęstych zestawów danych, a na etapie odpowiedniego post-processingu trójwymiarowych modeli skanowanego obiektu. Oprócz współrzędnych przestrzennych X, Y, Z, każdy z tych punktów dodatkowo posiada także informację radiometryczną wiązki lasera, która również może dostarczać cennych informacji o badanym obiekcie.

Obecnie w wielu obszarach badań preferowane są techniki pomiarowe, które nie ingerują w strukturę powierzchni obiektów, tzw. badania nieniszczące (*ang. non-destructive testing*). Dlatego też, w przypadku obiektów gdzie szczególnie pożądanym jest bezkontaktowy pomiar, tj. w pomiarach obiektów zabytkowych, technologia TLS znajduje szerokie zastosowanie [1–5]. Technologia TLS jest z powodzeniem wykorzystywana również w zadaniach, gdzie użycie tradycyjnych metod pomiarowych wymagających bezpośredniego dostępu do badanego obiektu jest czasochłonne, utrudnione lub niekiedy wręcz niemożliwe. Są to pomiary obiektów o ograniczonym dostępie (np. mosty [6–8]), pomiary trudno dostępnych miejsc takich jak np. wnętrza tuneli [9,10] czy pomiary obiektów nietypowych (np. klify, osuwiska, kable [11–13]). Wszechstronność i zdolność TLS do adaptacji do badań różnych obiektów sprawia, że w licznych branżach inżynierskich i badawczych rozwiązanie to zastępuje tradycyjne metody pomiarowe. Co istotne, w kontekście prowadzonego programu badawczego rozprawy doktorskiej, technologia ta umożliwia również przeprowadzanie pomiarów wysokich obiektów budowlanych (np. kominy [14,15]), zapewniając jednocześnie bezpieczne i szybkie pozyskiwanie danych.

Jednym z obszarów badań, gdzie technologia TLS odgrywa istotną rolę jest monitoring stanu technicznego ścian obiektów budowlanych [16–20]. Jednymi z najpowszechniejszych defektów podlegających obserwacjom i wymagających kontroli są pęknięcia powierzchni ścian. Problem ten może dotyczyć zarówno starych, jak i tych niedawno wzniesionych budynków. Niekiedy jest to jedynie aspekt estetyczny, ale innym razem pęknięcia mogą prowadzić do osłabienia trwałości obiektu i poważnych konsekwencji, co sprawia, że okresowe pomiary diagnostyczne stają się konieczne dla zapewnienia bezpieczeństwa.

Wielu badaczy wykazało, że pęknięcia ścian budynków i innych obiektów budowlanych mogą być efektywnie wykryte w oparciu o chmury punktów pozyskiwane z pomiarów TLS [5,8,21,22], co zostało szerzej omówione w sekcji *Przegląd stanu wiedzy w zakresie przedmiotu pracy*. Dotychczasowe badania wskazywały jednak na skuteczność technologii TLS w konkretnym, podjętym zadaniu. Technologia TLS, podobnie jak inne metody pomiarowe, ma swoje możliwości ale także ograniczenia. Na podstawie przeglądu

stanu wiedzy w zakresie wykrywania pęknięć przy użyciu technologii TLS wysunięto kluczowy wniosek, że wady i ograniczenia tej metody nie zostały dostatecznie omówione. Wiedza na temat zarówno potencjału jak i ograniczeń konkretnej metodyki pomiaru czy modelu używanego skanera, jest niezwykle istotna dla właściwego zaplanowania pomiarów. Dobór odpowiedniej metodyki pomiaru do konkretnego przypadku pęknięcia jest strategiczny dla maksymalizacji efektywności i precyzji pomiaru. Biorąc pod uwagę powszechność pęknięć oraz powagę ich konsekwencji, a także niewystarczające badania na temat ograniczeń technologii TLS, doktorantka postanowiła rozszerzyć badania w tym obszarze.

Zadowolające wyniki uzyskane w pierwszym etapie badań, skłoniły doktorantkę do implementacji technologii TLS także w innej branży. W związku z ogromnym znaczeniem sektora energii odnawialnej we współczesnym świecie, doktorantka zdecydowała zbadać możliwości zastosowania technologii TLS do badań w tym obszarze.

Obecnie energia wiatrowa jest jednym z głównych sposobów pozyskiwania zielonej energii (*ang. green energy*). Według raportu opublikowanego przez WindEUROPE [23], Europa posiada obecnie 285 GW mocy zainstalowanej w energetyce wiatrowej (248 GW na lądzie i 37 GW na morzu). W 2024 roku farmy wiatrowe w UE wygenerowały 475 TWh energii elektrycznej, pokrywając tym samym 19% całkowitego zapotrzebowania na energię elektryczną w UE. Jednakże, oczekiwania na kolejne lata są znacznie większe. Dyrektywa RED III EU/2023/2413 [24] (*ang. Renewable Energy Directive III*) w sprawie odnawialnych źródeł energii, przyjęta w 2023 roku, wyznacza ambitny cel osiągnięcia co najmniej 42,5% udziału odnawialnych źródeł energii (*ang. renewable energy sources*) w ogólnym zużyciu energii w UE do 2030 roku.

Wraz z rosnącym udziałem energii wiatrowej w zasobach odnawialnych źródeł energii, zwiększa się zapotrzebowanie na efektywne metody monitorowania i konserwacji turbin wiatrowych. Ze względu na charakter obiektu, optymalne dla ich diagnostyki są technologie umożliwiające zdalne i nieniszczące pozyskiwanie danych. W związku z powyższym, drugim obszarem badań, niezwykle istotnym w dobie globalnego problemu jakim jest ocieplenie klimatu, jest wykorzystanie technologii TLS w monitorowaniu stanu technicznego łopat turbin wiatrowych.

Łopaty turbin są szczególnie narażone na uszkodzenia, takie jak erozja krawędzi natarcia, ubytki czy pęknięcia, które mogą znacząco obniżać efektywność energetyczną turbiny [25–27]. Regularne inspekcje stanu technicznego łopat są zatem konieczne, aby zapewnić wysoką wydajność turbiny oraz przedłużyć okres jej eksploatacji. Wywiad przeprowadzony wśród firm zajmujących się konserwacją łopat wskazuje, że obecnie najczęściej wykorzystywaną metodą są pomiary fotogrametryczne. Metoda ta ma jednak pewne ograniczenia, zwłaszcza w kontekście warunków atmosferycznych. W związku z tym, branża energetyczna jest wysoce zainteresowana poszukiwaniem nowych rozwiązań. Technologia TLS, dzięki swojej zdolności do dokładnego mapowania powierzchni, stanowi potencjalnie skuteczną alternatywę. Przegląd stanu wiedzy w zakresie wykorzystania technologii TLS w badaniach stanu technicznego turbin wiatrowych wykazuje, że jak dotąd nie przeprowadzono badań nad wykorzystaniem TLS do wykrywania defektów łopat turbin wiatrowych. Doktorantka w ramach swojego programu badawczego bada możliwości

wykorzystanie technologii TLS do wykrywania defektów łopat turbin wiatrowych w oparciu o analizy informacji radiometrycznej chmury punktów.

Przeprowadzony program badawczy ma charakter innowacyjny i aplikacyjny, dostarczając nowej wiedzy oraz oferując nowe spojrzenie na możliwości zastosowania technologii naziemnego skaningu laserowego w detekcji defektów powierzchniowych zarówno w budownictwie, jak i w sektorze energetyki odnawialnej. Badania te wpisują się w aktualne potrzeby i wyzwania, z jakimi zmagają się te branże. Wyniki badań stanowią wkład w doskonalenie metod monitorowania stanu technicznego obiektów budowlanych, co może wpłynąć na poprawę ich trwałości, bezpieczeństwa oraz wydajności.

2 Przegląd stanu wiedzy w zakresie przedmiotu pracy

Przegląd stanu wiedzy został przeprowadzony w ujęciu ogólnym dotyczącym technologii naziemnego skaningu laserowego, oraz bardziej wnikliwe studium literatury zostało przeprowadzone w kontekście dwóch kierunków badawczych jakimi zajmowała się doktorantka.

Monitoring oraz ocena stanu technicznego obiektów budowlanych stanowią niezwykle ważny i stale podejmowany obszar badań w inżynierii lądowej (*ang. structural health monitoring*), a technologia naziemnego skaningu laserowego znajduje w nim szerokie zastosowanie. W pracy [28] Kaartinen i in. dokonali obszernego przeglądu zastosowania technologii LiDAR (*ang. Light Detection and Ranging*) w realizacji tego zadania – w tym także technologii TLS, wykazując jej znaczny potencjał. Kompleksowy przegląd literatury w podjętej tematyce został zaprezentowany również przez Sánchez-Aparicio i in. w pracy [29]. Autorzy przywołali prace dotyczące wykorzystania chmur punktów 3D do detekcji uszkodzeń w obiektach zabytkowych, zwracając szczególną uwagę na zastosowanie naziemnego skaningu laserowego.

Pierwszy z podjętych przez doktorantkę obszarów badań odnosił się do detekcji nieciągłości (pęknięć) na powierzchniach obiektów budowlanych. Pęknięcia te, jako symptomy pogarszającego się stanu technicznego obiektu, stanowią jeden z kluczowych obszarów zainteresowania w ramach badań z zakresu SHM. Liczne badania wykazują, że w oparciu o chmury punktów pozyskiwane z pomiarów TLS możliwa jest detekcja pęknięć ścian budynków, a także innych obiektów budowlanych. Bardzo istotne badania, z punktu widzenia badań prowadzonych w ramach I etapu niniejszej rozprawy, zostały przedstawione przez Laefer i in. w pracy [30]. Autorzy przedstawili model matematyczny umożliwiający określenie minimalnej wykrywalnej szerokości pęknięcia w oparciu o informację geometryczną chmury punktów z pomiarów TLS. W analizach uwzględniono parametry takie jak odległość i kąt skanowania, orientacja pęknięcia oraz jego głębokość. Proponowane założenia teoretyczne zostały zweryfikowane poprzez pomiary przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych. Badania były jednak ograniczone do niewielkich odległości i niewielkich kątów padania, z punktu widzenia zastosowań praktycznych. Dodatkowo, analizy uwzględniały jedynie informację geometryczną chmur punktów. W pracy [31], Rabah i in. przedstawili zautomatyzowaną metodę wykrywania i mapowania pęknięć w powierzchniach betonowych z wykorzystaniem danych z naziemnego skaningu laserowego (TLS), integrując analizę obrazów i chmur punktów. Wyniki badań wykazały dokładność mapowania pęknięć na poziomie 10–38 mm w porównaniu do pomiarów tachimetrycznych, co potwierdziło przydatność tej metody w bezinwazyjnej diagnostyce pęknięć. Metodę detekcji pęknięć w oparciu o chmury punktów z pomiarów TLS zaproponowali także Cho i in. w pracy [32]. Chmury punktów przetwarzano z zastosowaniem struktury Octree. Zastosowane podejście pozwoliło na skuteczną detekcję pęknięć. W pracy [33] Teza i in. również opracowali metodę wykrywania uszkodzeń powierzchniowych w powierzchniach betonowych na podstawie danych z TLS. Proces rozpoznawania uszkodzeń oparto na analizie krzywizny średniej oraz Gaussa. Badacze wykazali skuteczność metody w identyfikacji większych defektów. Jednak analizy pęknięć wykazały, że skuteczność tej metody znacząco maleje w przypadku

drobnych pęknięć – o szerokości mniejszej niż rozdzielczość skanowania. Aktualnie, w wielu obszarach badań bardzo ważną rolę odgrywa automatyzacja przetwarzania danych i usprawnienie etapu post-processingu – także w zagadnieniu detekcji pęknięć [34]. Dlatego zastosowanie sieci neuronowych oraz algorytmów do automatycznej detekcji pęknięć jest topowym kierunkiem badań również w oparciu o dane pozyskane technologią TLS [35,36].

Stosunkowo do niedawna, wyłącznie informacja geometryczna chmury punktów była traktowana jako wartościowa informacja o badanym obiekcie. Informacja radiometryczna była traktowana głównie jako ‘narzędzie dodatkowe’ do wizualizacji chmur punktów, pomijając ją w analizach. Okazuje się jednak, że parametr *intensity* również może dostarczać cennych informacji o stanie analizowanej powierzchni. Pierwsze badania i bardziej szczegółowe analizy informacji radiometrycznej rozpoczęły się około roku 2000 [37–42]. Wówczas wykazano, że znaczący wpływ na wartości parametru *intensity* mają chropowatość oraz kolor badanej powierzchni. W kolejnych latach badacze wykazali również, że *intensity* może być z powodzeniem wykorzystywana do detekcji zawilgocenia skanowanych powierzchni oraz różnego typu zmian biologicznych (mchy, porosty itp.) [16,43–46].

Istnieją również pewne badania, jednak w ograniczonym zakresie, które wskazują na potencjał parametru *intensity* do detekcji pęknięć ścian budynków [47–52]. Między innymi Xu i in. [47] w swoich badaniach wykazali przydatność informacji radiometrycznej chmury punktów uzyskanej z pomiarów TLS, do detekcji pęknięć w powierzchniach betonowych. Badacze opracowali metodę automatycznej identyfikacji pęknięć w betonowych belkach, wykorzystując przekształcone obrazy intensywności z danych TLS. W pracy [48] Suchocki i in. wykazali, że analizując rozkłady wartości parametru *intensity* możliwe jest wykrycie nieciągłości powierzchni w badanych obszarze, takich jak ubytki i pęknięcia. Wysłano wniosek, że w miejscach gdzie występują uszkodzenia powierzchni rozkład wartości parametru *intensity* znacznie odbiega od rozkładu normalnego. W ramach kolejnych badań [49] Suchocki dokonał analizy porównawczej skanerów fazowych i impulsowych pod kątem ich przydatności w detekcji zmian powierzchniowych ścian budynków, w szczególności pęknięć oraz szczelin między ceglami. Badania wykazały, że zmiany właściwości fizykochemicznych badanego obiektu silniej wpływają na rejestrowane wartości *intensity* w przypadku skanerów fazowych. Skanery fazowe, charakteryzując się wyższą czułością w rejestracji danych radiometrycznych, wykazały większą skuteczność w detekcji tych defektów niż skanery impulsowe. Bardzo istotne badania zaprezentowano także w pracy [50]. Dai i in. zaproponowali metodę integrującą analizę danych geometrycznych oraz radiometrycznych chmury punktów z pomiarów TLS do oceny uszkodzeń (defektów) powierzchniowych elewacji budynku. Wykazano, że jednoczesne wykorzystanie obu typów informacji znacząco podnosi dokładność oceny defektów.

Dotychczasowe badania wykazywały możliwości i potencjał technologii TLS w detekcji pęknięć na powierzchniach ścian obiektów budowlanych. Wykazano jednak powodzenie zastosowania danych TLS do detekcji pęknięć w danym, konkretnym przypadku. W podjętym problemie badawczym detekcji pęknięć, kluczowym aspektem jest wpływ podstawowych parametrów pomiaru (skanowania) na jakość uzyskanych chmur punktów – wpływ odległości skanowania oraz kąta padania wiązki lasera. Z kolei jakość chmury punktów rzutuje na możliwość wiarygodnej oceny stanu technicznego powierzchni

badanego obiektu, w tym przypadku na możliwość detekcji pęknięć powierzchni. Zdaniem doktorantki, w efektywnej detekcji i analizie pęknięć na powierzchni ścian obiektów budowlanych strategicznym krokiem jest dobór odpowiedniej metodyki pomiaru (odpowiednich warunków pomiarowych). Znajomość możliwości oraz ograniczeń zastosowanej metodyki pozwoli na skuteczną detekcję pęknięć.

Przeprowadzone studium literatury wskazało luki badawcze. Potwierdzono, że jak dotąd nie przeprowadzono badań weryfikujących wpływ kąta padania wiązki lasera oraz odległości skanowania na możliwość detekcji pęknięć, podejmując jednocześnie analizy wpływu wspomnianych parametrów na informację geometryczną oraz radiometryczną chmury punktów. Podjęcie niniejszego problemu badawczego pozwoliło na opracowanie metodyki pomiaru w celu efektywnej detekcji i oceny pęknięć. Przegląd aktualnego stanu wiedzy wskazał na innowacyjność badań podjętych w niniejszej rozprawie, w szczególności w odniesieniu do zastosowań informacji radiometrycznej chmury punktów.

Warto podkreślić, że zagadnienie detekcji pęknięć wciąż pozostaje częstym kierunkiem badań, co świadczy o jego istotnym znaczeniu naukowym. W ostatnich latach wielu badaczy wciąż podejmuje prace badawcze w obszarze detekcji pęknięć z wykorzystaniem technologii TLS [53–62], nierzadko łącząc ją z innymi metodami pomiarowymi, takimi jak fotogrametria czy ręczne skanery laserowe.

Drugi obszar badań odnosił się do detekcji defektów powierzchniowych łopat turbin wiatrowych. Monitorowanie stanu technicznego łopat odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu wysokiej efektywności energetycznej oraz bezpieczeństwa eksploatacji turbin. Ze względu na znaczne wysokości turbin, ocena ich stanu technicznego stanowi wyzwanie. Niemniej jednak, regularne inspekcje są niezbędne. Istnieją badania które jednoznacznie wykazują, że uszkodzenia powierzchni łopat prowadzą do pogorszenia ich właściwości aerodynamicznych, co skutkuje obniżeniem wydajności energetycznej turbiny. Szczególną uwagę poświęca się erozji krawędzi natarcia łopaty (LE). Co istotne, chociaż turbiny co do założenia mają działać przez wiele lat, według różnych obserwacji, pierwsze skutki procesów erozyjnych na łopatach pojawiają się nawet już po 2–3 latach od momentu włączenia turbiny do eksploatacji [63]. Sareen i in. w swoich badaniach [25] wykazali, że erozja LE może prowadzić do znacznego wzrostu oporu aerodynamicznego. Udowodnili, że wzrost oporu mieści się w zakresie 6%–500%, w zależności od stopnia erozji. Analizy wykazały, że 80% wzrost oporu może skutkować około 5% spadkiem rocznej produkcji energii. Natomiast przy wzroście oporu o 400% do 500% (stan łopat od umiarkowanej do ciężkiej erozji) można zaobserwować spadek rocznej produkcji energii nawet o około 25%. Podobne wnioski płyną z badań Gauderna [26], który w swoich badaniach analizował różne etapy erozji LE i wykazał, że nawet niewielkie uszkodzenia na krawędzi natarcia łopaty mogą prowadzić do spadku produkcji energii o 4–5% rocznie. Kolejne badania [27] wykazały, że erozja to nie jedyny czynnik obniżający wydajność turbin wiatrowych. Nawet zabrudzenia powierzchni łopat czy lód, również mają istotny wpływ na jej właściwości aerodynamiczne. W pracy zaprezentowano kolejne etapy postępującej erozji LE na przestrzeni 10 lat, gdzie po tym czasie erozja osiągnęła czwarty (najwyższy) poziom uszkodzenia. Pokazano, że w przypadku turbiny oblodzonej, zabrudzonej oraz zerodowanej produkcja mocy może spaść odpowiednio o około 50%, 16% oraz 12.5%. W związku

z powyższym, skuteczna diagnostyka i regularna konserwacja są niezbędne w utrzymaniu wysokiego poziomu wydajności i trwałości turbiny. Skuteczne metody diagnostyczne pozwalające na wykrycie nawet drobnych zmian w strukturze powierzchni łopat mogą przyczynić się do znacznej redukcji strat energetycznych oraz kosztów napraw.

Przeprowadzone studium literatury wskazuje na możliwości szeregu metod diagnostycznych w monitorowaniu stanu technicznego łopat turbin wiatrowych, w kontekście detekcji ich uszkodzeń i defektów strukturalnych [64]: monitoring ultradźwiękowy [65,66], metody akustyczne (sensory emisji akustycznej, pomiary za pomocą mikrofonów) [67–70], inspekcja wizualna (tradycyjne kamery, bezzałogowe statki powietrzne (UAV), UAV + sieci neuronowe) [71–74], termografia [75–77], monitoring wibracyjny [78–80] czy inspekcja radiograficzna [81,82]. Przegląd literatury jasno wskazuje także na rosnące znaczenie UAVs w kontroli stanu technicznego łopat turbin wiatrowych, stanowiących wsparcie i uzupełnienie dla różnych technologii [83–85].

Jednakże w praktyce, metodą detekcji defektów powierzchniowych łopat turbin wiatrowych najczęściej stosowaną przez firmy zajmujące się ich diagnostyką jest obecnie fotogrametria. Zarówno jako fotogrametria naziemna, jak i z wykorzystaniem UAVs. Jednak, ze względu na istotne wyzwania w realizacji tego zadania, poszukiwanie nowych i co raz bardziej efektywnych rozwiązań wciąż pozostaje jednym z kluczowych kierunków rozwoju w branży energetycznej.

Studium literatury wykazuje, że technologia TLS w pewnym zakresie także odnalazła już z powodzeniem swoje zastosowanie w badaniach diagnostycznych turbin wiatrowych [86–94]. Jednak dotychczasowe badania ograniczają się do analiz deformacji i odkształceń (deformacje łopat oraz wieży, pionowość wieży turbiny etc.), z wykorzystaniem danych geometrycznych chmury punktów. Helming i in. w swoich badaniach [86,90] przedstawia technologię TLS jako narzędzie do pomiaru deformacji wieży turbiny, deformacji łopat, a także pomiaru odstępów między łopatą a wieżą, co pozwala na monitorowanie kondycji strukturalnej turbin w szerokim zakresie. Zastosowanie TLS w monitorowaniu stanu technicznego łopat i wieży turbin wiatrowych, w kontekście ich deformacji, zaprezentował także Dilek i in. [87], Grosse i in. [88], czy Mitka i in. [89]. W pracy [92] autorzy łączą technologię TLS z metodą GB-RAR (ang. *Generalized Backward-Forward Recursive Adaptive Filtering*), tworząc narzędzie do monitorowania stanu strukturalnego turbin wiatrowych. W monitorowaniu stanu technicznego konstrukcji nośnych turbin wiatrowych opartym na analizie drgań często stosuje się akcelerometrię. W swoich badaniach Jonscher i in. [94] skupili się na kompensacji błędów przechyłu w pomiarach akcelerometrycznych, a technologia TLS posłużyła jako wsparcie, umożliwiając walidację wyników.

Przeprowadzone studium literatury wskazało luki badawcze. Przegląd aktualnego stanu wiedzy potwierdził, że jak dotąd nie przeprowadzono badań dot. wykorzystania informacji radiometrycznej chmury punktów z pomiarów technologii TLS w detekcji defektów powierzchniowych łopat turbin wiatrowych, wskazując jednocześnie na innowacyjność badań podjętych w niniejszej rozprawie.

3 Hipotezy i cele badawcze

W oparciu o przeprowadzone studium literatury oraz koncepcję badań sformułowano następujące hipotezy rozprawy doktorskiej:

1. *Znajomość możliwości oraz ograniczeń technicznych naziemnego skaningu laserowego w wykrywaniu nieciągłości na powierzchniach obiektów budowlanych usprawnia ich detekcję oraz ułatwia analizę pozyskanych danych (H1)*
2. *Dane radiometryczne z pomiarów naziemnego skaningu laserowego umożliwiają detekcję zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych (H2)*

Aby zweryfikować postawione hipotezy program badawczy obejmował realizację sześciu zadań głównych. Pierwszym zadaniem było opracowanie metodyki pomiaru technologią TLS w kontekście detekcji pęknięć na powierzchni ścian obiektów budowlanych. Zadaniem drugim było zbadanie możliwości zastosowania informacji radiometrycznej chmur punktów do detekcji zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych, przy bezpośrednim dostępie do łopat. Dzięki współpracy z firmą przeprowadzającą prace konserwacyjne turbin wiatrowych, która w ramach tych prac zdemontowała łopaty i umieściła je na ziemi, możliwe było przeprowadzenie szczegółowych badań przy bezpośrednim dostępie do uszkodzonych fragmentów ich powierzchni. W ramach trzeciego zadania opracowano, a następnie przetestowano i przeanalizowano dwie różne metodyki pomiaru, celem wskazania która z nich jest bardziej korzystna dla detekcji zmian powierzchniowych łopat. Czwartym zadaniem było zbadanie wpływu wzrostu kąta padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej na jakość danych radiometrycznych w kontekście detekcji zmian powierzchniowych łopaty turbiny wiatrowej. Piątym zadaniem była kompleksowa analiza informacji radiometrycznej chmury punktów w kontekście identyfikacji defektów łopat turbin wiatrowych, z równoczesną analizą porównawczą wyników uzyskanych przy użyciu technologii TLS z wynikami metody fotogrametrycznej. Ostatnim, szóstym zadaniem głównym było zbadanie czy długość fali wiązki lasera wpływa na jakość danych radiometrycznych w kontekście wykrywania nieciągłości w strukturze powierzchni łopat turbiny wiatrowej. Sprawdzono która z długości fali wiązki lasera w badanym zakresie daje najkorzystniejsze wyniki w wykrywaniu nieciągłości powierzchni.

Ponadto, zrealizowane zostały również zadania dodatkowe, które to stanowiły rozwinięcie badań przeprowadzonych w ramach pierwszego zadania głównego.

Wyniki z poszczególnych etapów badań zostały opublikowane w pięciu publikacjach. Zrealizowane zadania, główne oraz dodatkowe, wraz z odpowiadającymi im publikacjami w których przedstawiono uzyskane wyniki badań zestawiono w tabelach 1 i 2.

Tabela 1. Cele główne programu badawczego zrealizowane w ramach pracy doktorskiej

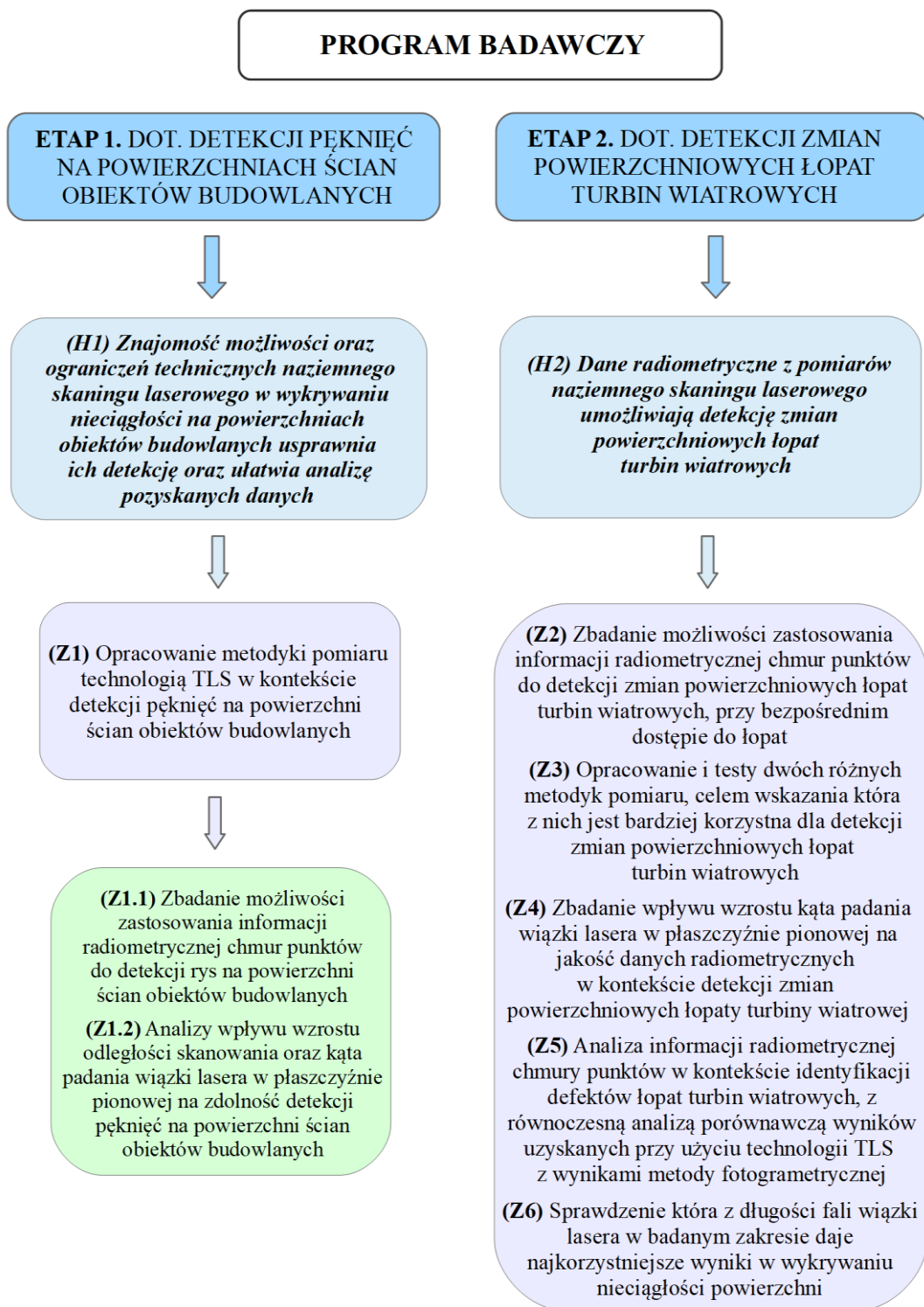
Nr zadania badawczego	Opis/cel zadania	Publikacja, w której przedstawiono wyniki badań
Z1	Opracowanie metodyki pomiaru technologią TLS w kontekście detekcji pęknięć na powierzchni ścian obiektów budowlanych	P1, P2
Z2	Zbadanie możliwości zastosowania informacji radiometrycznej chmur punktów do detekcji zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych, przy bezpośrednim dostępie do łopat	P4
Z3	Opracowano, przetestowano i przeanalizowano dwie różne metodyki pomiaru, celem wskazania która z nich jest bardziej korzystna dla detekcji zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych	P4
Z4	Zbadanie wpływu wzrostu kąta padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej na jakość danych radiometrycznych w kontekście detekcji zmian powierzchniowych łopaty turbiny wiatrowej	P5
Z5	Analiza informacji radiometrycznej chmury punktów w kontekście identyfikacji defektów łopat turbin wiatrowych, z równoczesną analizą porównawczą wyników uzyskanych przy użyciu technologii TLS z wynikami metodą fotogrametrycznej	P5
Z6	Sprawdzenie która z długości fali wiązki lasera w badanym zakresie daje najkorzystniejsze wyniki w wykrywaniu nieciągłości powierzchni	P5

Tabela 2. Cele dodatkowe programu badawczego zrealizowane w ramach pracy doktorskiej

Nr zadania badawczego	Opis/cel zadania	Publikacja, w której przedstawiono wyniki badań
Z1.1	Zbadanie możliwości zastosowania informacji radiometrycznej chmur punktów do detekcji rys na powierzchni ścian obiektów budowlanych	P3
Z1.2	Analizy wpływu wzrostu odległości oraz kąta padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej na zdolność detekcji pęknięć na powierzchni ścian obiektów budowlanych	P3

4 Schemat programu badawczego

Z uwagi na przedmiot badań program badawczy został podzielony na dwa etapy. Etap pierwszy, który dotyczył wykrywania nieciągłości (pęknięć) na powierzchniach ścian obiektów budowlanych przy użyciu technologii TLS. Etap drugi, który dotyczył wykrywania i identyfikacji zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych przy użyciu technologii TLS. Poniżej zaprezentowano schemat programu badawczego, przedstawiający jego etapy, odpowiadające im hipotezy rozprawy doktorskiej oraz zadania do zrealizowania.



Rys. 1. Schemat programu badawczego.

5 Teoretyczne aspekty technologii naziemnego skaningu laserowego w kontekście podjętej tematyki badawczej

5.1 Podstawowe informacje dot. wykorzystanej technologii TLS oraz charakterystyka użytego skanera

Technologia naziemnego skaningu laserowego stanowi zaawansowaną metodę zdalnej i nieniszczącej akwizycji danych przestrzennych, umożliwiającą precyzyjne odwzorowanie geometrii obiektów w postaci trójwymiarowej chmury punktów. Podstawowym produktem pomiarów TLS jest zbiór punktów o współrzędnych przestrzennych (X, Y, Z), których rozmieszczenie zależy od wybranej gęstości skanowania. Każdy punkt zdefiniowany jest w trójwymiarowym układzie odniesienia skanera na podstawie zarejestrowanych kątów poziomych i pionowych oraz wyznaczonej odległości pomiędzy centrum geometrycznym skanera a punktem pomiarowym. Oprócz współrzędnych przestrzennych, rejestrowana jest także informacja radiometryczna, tzw. parametr *intensity*, odzwierciedlająca stosunek energii odbitej do emitowanej. Chmura punktów, będąca finalnym produktem pomiaru TLS po odpowiednim przetworzeniu surowych danych, stanowi kluczowe źródło danych w analizach, oferując wysoki poziom dokładności i szczegółowości.

Ze względu na sposób pomiaru odległości można wyróżnić skanery dalmierzowe (impulsowe lub fazowe) oraz skanery triangulacyjne. Producenci skanerów praktykują przede wszystkim skanery dalmierzowe. Pierwszy typ to tzw. skanery impulsowe, które bazują na pomiarze czasu przelotu wiązki lasera (*ang. the time of flight*). Skaner emituje w kierunku obiektu krótki impuls laserowy, który to następnie jest odbity od jego powierzchni. Po odbiciu impulsu, część tej energii wraca do detektora skanera. Skaner mierzy różnicę czasu między wysłaniem sygnału a jego odbiorem [49]. Drugi typ to tzw. skanery fazowe, które do określenia odległości wykorzystują analizę przesunięcia fazowego fali (*ang. the phase-shift*). Jako przesunięcie fazowe należy rozumieć różnicę faz dla wiązki wysłanej a odebranej [49]. Porównując te dwa rozwiązania, skanery fazowe charakteryzują się większą szybkością skanowania i wyższą dokładnością w porównaniu do skanerów impulsowych. Z kolei skanery impulsowe oferują większy zasięg pomiaru, ale przy nieco mniejszej dokładności i wolniejszej akwizycji danych. Ważne jest odpowiednie dopasowanie rodzaju skanera do realizowanego celu i oczekiwanej dokładności.

Doktorantka w swoich badaniach wykorzystuje wysokiej klasy skaner fazowy Z + F 5016 IMAGER (wyprodukowany w 2019 r.). Najważniejsze parametry techniczne skanera zostały zestawione w Tabeli 3. Jak podaje producent, maksymalna szybkość akwizycji danych wynosi 1 100 000 pikseli/s. Skaner może pracować w zakresie 0,3-365 m, a błąd zakresu wynosi $\pm 1 \text{ mm} + 10 \text{ ppm/m}$. Średnica plamki lasera na tzw. wyjściu wynosi 3,5 mm, a rozbieżność wiązki to 0,3 mrad. Niezwykle ważnym parametrem jest również rozdzielczość skanowania. Dla zastosowanego skanera maksymalna rozdzielczość kątowa w pionie wynosi $0,00026^\circ$ (0,93 arcsec), a maksymalna rozdzielczość kątowa w poziomie wynosi $0,00018^\circ$ (0,65 arcsec). Skaner Z+F IMAGER 5016 oferuje 7 poziomów rozdzielczości skanowania: *preview*, *low*, *middle*, *high*, *super high*, *ultra high*, and *extremely high*. W praktyce oznacza to, że skanując np. w rozdzielczości *super high*, całą scenę 3D można zmierzyć z rozdzielczością 3.1mm/10m, a wybierając *extremely high*

z rozdzielczością 0.8mm/10m. Wybrana przez badacza rozdzielczość skanowania bezpośrednio wpływa na gęstość chmury punktów, a to z kolei rzutuje na jej jakość. Należy jednak pamiętać, że stopień zagęszczenia chmury punktów jest również wysoce powiązany z czasem rejestracji danych. Gęstsza chmura punktów będzie wymagała dłuższego czasu skanowania. Wpływ na gęstość chmury punktów ma również odległość skanowania. Co ciekawe, jak najmniejsza odległość i jak najwyższa rozdzielczość nie zawsze powinny iść w parze. Producenci skanerów laserowych zaznaczają, że jednocześnie małe odległości od obiektu i wysokie rozdzielczości mogą spowodować znaczne nakładanie się sąsiednich punktów pomiarowych, co w efekcie może spowodować zbędną redundancję danych (*ang. data overload*). Istotną rolą badacza jest optymalne dopasowanie gęstości chmury punktów do wymagań dokładnościowych realizowanego zadania.

Tabela 3. Kluczowe parametry techniczne skanera Z + F IMAGER 5016 [95]

typ dalmierza	fazowy (<i>phase-shift</i>)
długość fali wiązki lasera	1500 nm
średnica plamki lasera (na wyjściu)	3,5 mm
rozbieżność wiązki lasera	0,3 mrad
max. szybkość (częstotliwość) skanowania	~ 1 100 000 pikseli/s
zakres skanowania	0,3 - 365 m
błąd zakresu	≤ 1 mm + 10 ppm/m
max. rozdzielczość kątowna w pionie	0.00026°
max. rozdzielczość kątowna w poziomie	0.00018°
pole widzenia w pionie / poziomie	320° / 360°
max. rozdzielczość skanowania	0.8 mm / 10 m 80 000 pikseli/360° (<i>extremely high</i>)
temperatura pracy	-10 ... +45 °C

5.2 Rozmiar plamki lasera oraz rozbieżność wiązki lasera w kontekście jakości chmury punktów

Jednym z kluczowych parametrów technicznych skanera jest rozmiar plamki wiązki lasera, który bezpośrednio wpływa na precyzję wykonywanych pomiarów. Mniejsza plamka lasera pozwala na rejestrowanie drobniejszych detali, co jest szczególnie istotne w przypadku pomiarów takich elementów jak pęknięcia czy mikrouszkodzenia powierzchni.

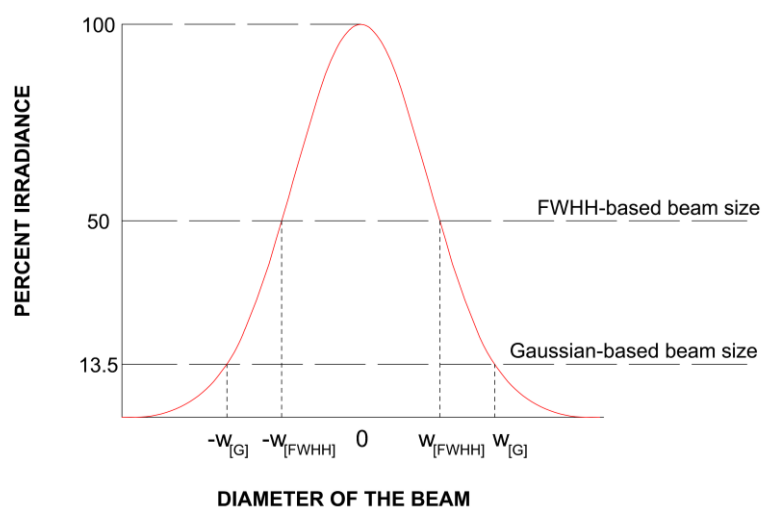
Wśród producentów skanerów popularne są dwie definicje rozmiaru plamki wiązki lasera [52,96,97]. Pierwsza z nich opiera się na modelu rozkładu Gaussa dla intensywności wiązki. Zgodnie z tym modelem, definicja rozmiaru plamki to średnica, przy której intensywność wiązki zmniejsza się do wartości e^{-2} . Ponieważ e jest stałą matematyczną i wynosi w przybliżeniu 2.7183, e^{-2} wynosi w przybliżeniu 0,135 (13,5%). Oznacza to, że w myśl tego modelu rozmiar plamki to średnica w której intensywność wiązki wynosi 13,5% swojej maksymalnej wartości (czyli maksymalnej intensywności w jej centrum). Druga definicja oparta jest na zasadzie *the full-width half-height* (FWHH). Jak sama nazwa wskazuje, zgodnie z tym modelem rozmiar plamki to średnica, przy której intensywność

wiązki zmniejsza się do 50% swojej maksymalnej wartości. Rozkład intensywności dla obu modeli przedstawiono na Rys. 2.

W analizach rozmiaru wiązki lasera w modelu rozkładu Gaussa istotne jest określenie jej przebiegu wzdłuż kierunku rozchodzenia się. Wówczas, rozmiar plamki można obliczyć za pomocą następującego równania [97,98]:

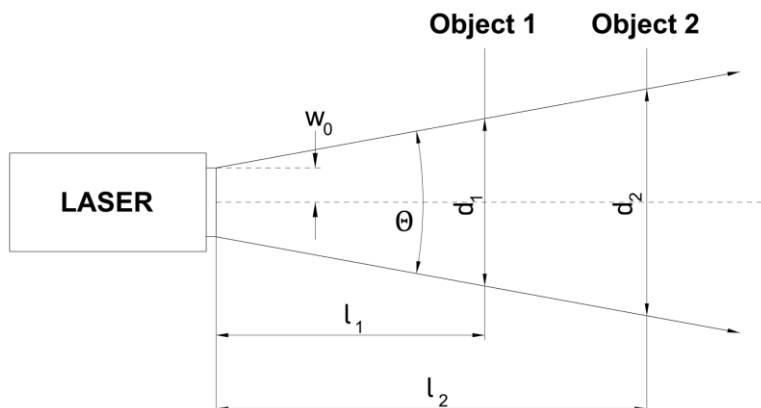
$$w(r) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda r}{\pi w_0^2}\right)^2} \quad (1)$$

gdzie, w_0 to 'the waist of a Gaussian beam', tzn. najwyższe miejsce wiązki i tym samym minimalna średnica plamki, r to odległość, a λ to długość fali wiązki laserowej.



Rys. 2. Rozkład intensywności w oparciu o model rozkładu Gaussa oraz model FWHH [96,99].

Kolejnym parametrem, bezpośrednio związanym z rozmiarem plamki wiązki lasera i mającym równie istotne znaczenie dla dokładności pomiarów oraz jakości uzyskanych chmur punktów, jest rozbieżność wiązki lasera (Rys. 3.). Zgodnie z literaturą, dywergencja wiązki lasera jest miarą kątową wzrostu średnicy wiązki w funkcji odległości od instrumentu optycznego, z którego wiązka laserowa jest emitowana [100]. Parametr ten opisuje, w jaki sposób wiązka ulega rozszerzeniu po opuszczeniu urządzenia pomiarowego. Im większa rozbieżność wiązki, tym trudniejsze staje się uchwycenie drobnych detali.



Rys. 3. Zależność między rozbieżnością wiązki a wzrostem średnicy plamki lasera w funkcji odległości [52,99].

Wartość rozbieżności wiązki lasera może być obliczona za pomocą poniższego równania [52]:

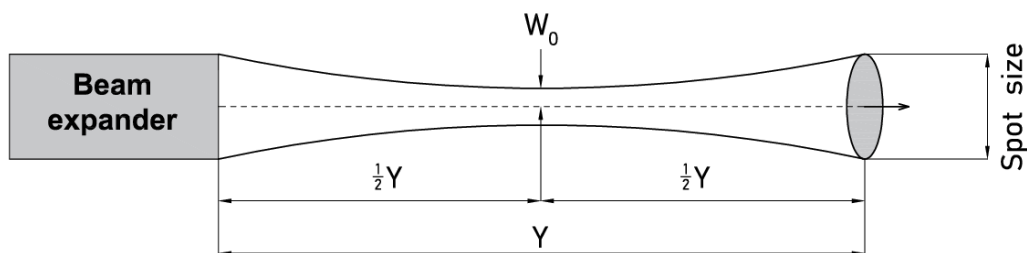
$$\theta = \frac{d_2 - d_1}{l_2 - l_1} \quad (2)$$

gdzie d_1 i d_2 są znanymi średnicami wiązki w dwóch niezależnych punktach, a odpowiednio l_1 i l_2 są odległościami do tychże punktów.

Wykorzystując wartości minimalnej średnicy plamki w_0 oraz długości fali wiązki laserowej λ , rozbieżności wiązki lasera może być obliczona również za pomocą niniejszego równania [98]:

$$\theta = \frac{2\lambda}{\pi w_0} \quad (3)$$

Oczywistym jest fakt, że mniejszy rozmiar plamki na tzw. wyjściu oraz mniejsza rozbieżność wiązki lasera gwarantują wyższą precyzję pomiarów oraz lepszą jakość chmury punktów. W związku z tym, niektórzy producenci skanerów laserowych wykorzystują rozwiązanie tzw. wiązki skolimowanej [96,97]. Poprzez zastosowanie statycznego ekspandera wiązki (tj. układu soczewek), który działa jak odwrócony teleskop, możliwe jest utrzymanie zmniejszonej średnicy wiązki lasera na znacznym obszarze określonego zakresu działania skanera. W rezultacie minimalny rozmiar plamki osiągany jest w połowie ścieżki wiązki laserowej. Rozwiązanie wiązki skolimowanej w TLS przedstawiono na Rys. 4. Należy jednak podkreślić, że poza zakresem Y średnica wiązki zwiększa się znacznie szybciej niż w przypadku, gdyby wiązka nie była skolimowana.



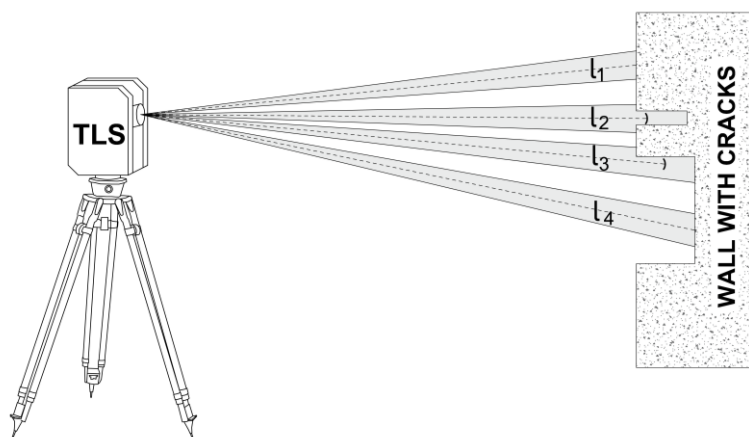
Rys. 4. Zjawisko skupiania i rozpraszania wiązki lasera dla wiązki kolimowanej [96,99].

Wielkość plamki lasera oraz rozbieżność wiązki lasera to parametry techniczne skanera, na które badacz nie ma bezpośredniego wpływu i nie może ich w żaden sposób modyfikować. Niemniej jednak, znajomość tych parametrów – w szczególności wielkości plamki lasera na tak zwanym wyjściu, rodzaju zastosowanego rozwiązania dotyczącego rozbieżności wiązki oraz samej wartości rozbieżności – ma kluczowe znaczenie dla badacza. Wiedza ta, uwzględniając także przybliżoną odległość skanowania, pozwala oszacować wielkość plamki lasera już na powierzchni badanego obiektu (defektu). Taka informacja ma fundamentalne znaczenie w analizach chmur punktów. Szczególnie w badaniach nad drobnymi detalami, takimi jak pęknięcia czy inne niewielkie defekty powierzchniowe, które to stanowią przedmiot zainteresowania doktorantki w niniejszej pracy badawczej.

5.3 *Edge effect* w pomiarach naziemnego skaningu laserowego

Edge effect (w dosłownym tłumaczeniu efekt krawędziowy) jest niezwykle ważną kwestią z punktu widzenia badań podjętych przed doktorantką, tj. w zagadnieniu wykrywania nieciągłości na powierzchniach obiektów budowlanych. Związany jest bezpośrednio z powyżej opisanymi parametrami technicznymi skanera: rozmiarem plamki lasera oraz rozbieżnością wiązki.

W przypadku gdy badany obiekt (skanowana powierzchnia) ma niedoskonałości takie jak pęknięcia, wgłębienia itp., plamka lasera może uchwycić skanowany fragment obiektu na cztery różne sposoby. Możliwości te przedstawiono na Rys. 5.



Rys. 5. *Edge effect* w pomiarach nieciągłości powierzchni technologią TLS [99].

Z wpływem *edge effect* (efektu krawędziowego) mamy do czynienia przede wszystkim w sytuacji l_3 . Wówczas, odległość od obiektu jest wyliczana jako średnia wartość dla dwóch powierzchni, co wprost rzutuje na otrzymaną informację zarówno geometryczną jak i radiometryczną chmury punktów. Dodatkowo, *edge effect* związany jest również z różnicami w odbiciu wiązki lasera od dwóch powierzchni o różnych właściwościach fizycznych, co wpływa na uzyskaną informację radiometryczną chmury punktów. Minimalizacja wpływu tego efektu byłaby możliwa wyłącznie poprzez zmniejszenie rozmiaru plamki lasera. Jednak rozmiar plamki jest parametrem stałym, charakterystycznym dla danego modelu skanera i badacz nie ma możliwości jego modyfikacji.

Okazuje się jednak, że w kontekście detekcji nieciągłości powierzchni, wpływ efektu krawędziowego zamiast być postrzegany jako wada czy ograniczenie technologii TLS, może być uznany za jej istotną zaletę. Zjawisko to zostało szczegółowo omówione w ramach pierwszego etapu programu badawczego (podrozdział 6.1), w którym doktorantka koncentrowała się na wykrywaniu pęknięć na powierzchniach ścian budynków.

Doktorantka w swoich badaniach wykazuje, że zjawisko efektu krawędziowego może umożliwić zlokalizowanie oraz zidentyfikowanie nawet niewielkich pęknięć, które podczas oceny wizualnej gołym okiem mogłyby pozostać niezauważone. Tym samym, zastosowanie technologii TLS w praktyce inżynierskiej może znacząco usprawnić ocenę stanu powierzchni obiektów budowlanych.

5.4 Informacja radiometryczna chmury punktów

Naziemne skanery laserowe poza informacją geometryczną rejestrują również informację radiometryczną powracającej wiązki lasera. Jest to tzw. parametr *intensity*, który reprezentuje matematyczną zależność pomiędzy sygnałem wyemitowanym, a odebrany przez detektor skanera [16,101]. Sposób odbicia wiązki lasera przez daną powierzchnię jest silnie uzależniony przede wszystkim od jej własności fizykochemicznych. Początkowo, parametr *intensity* był wykorzystywany jedynie do celów wizualizacyjnych chmur punktów. Jednakże w ostatnich latach coraz więcej badań wskazuje na jego znacznie większy potencjał, wykazując że może dostarczać cennych informacji o badanym obiekcie.

Parametr *intensity*, jako zależność pomiędzy sygnałem wyemitowanym a odebrany, opisuje tzw. równanie laserowe [102]:

$$P_R = \frac{P_T \sigma D^4}{16 R^4 \lambda^2 K_a^2} \eta_{Atm} \eta_{Sys} \quad (4)$$

gdzie:

- P_R – moc sygnału powracającego (W);
- P_T – moc sygnału wyemitowanego (W);
- R – odległość pomiędzy skanerem a obiektem (m);
- σ – efektywny przekrój celu (m^2);
- λ – długość fali wiązki lasera (m);
- D – średnica przysłony (m);
- η_{Atm} – współczynnik atmosferyczny;
- η_{Sys} – współczynnik systemowy;
- K_a – stałe oświetlenie przysłony

Jednakże, wzorem w powyższej postaci (4) posługuje się zazwyczaj w opracowaniach dotyczących lotniczego skaningu laserowego (*Airborne Laser Scanning* - ALS). Natomiast w odniesieniu do naziemnego skaningu laserowego wykorzystuje się uproszczoną wersję tego równania, która to zakłada, że powierzchnia odbijająca plamkę lasera jest powierzchnią lambertowską i zawsze większą od powierzchni plamki lasera (5)[40,101]:

$$P_R = \frac{\pi P_T \rho \cos \alpha}{4 R^2} \eta_{Atm} \eta_{Sys} \quad (5)$$

gdzie:

- α – kąt padania wiązki lasera ($^\circ$);
- ρ – współczynnik określający własności odbicia powierzchni.

Literatura dodatkowo wskazuje na jeszcze dwa równania, w zależności od relacji między wielkością plamki lasera a wielkością powierzchni skanowanej: gdy plamka lasera jest nieco większa od celu, oraz gdy plamka lasera jest znacznie większa od celu. Wówczas, równanie laserowe przyjmuje postać odpowiednio (6) i (7) [48]:

$$P_R = \frac{\pi P_T \rho \cos \alpha}{4 R^3} \eta_{Atm} \eta_{Sys} \quad (6)$$

$$P_R = \frac{\pi P_T \rho \cos \alpha}{4 R^4} \eta_{Atm} \eta_{Sys} \quad (7)$$

W literaturze spotyka się podział powyższych parametrów, wpływających na wartość parametru *intensity* powracającej wiązki lasera, na trzy grupy. Pierwsza z nich obejmuje parametry, które są stałe podczas całego pomiaru (procesu skanowania) lub zmieniają się nieznacznie, nie wpływając tym samym na moc zarejestrowanej wiązki lasera. Do tej grupy należą moc sygnału wyemitowanego (P_T) oraz współczynnik systemowy (η_{Sys}), które są stałymi parametrami technicznymi danego skanera i zazwyczaj nieznane użytkownikowi. Trzeci i ostatnim parametrem tej grupy jest współczynnik atmosferyczny (η_{Atm}), który teoretycznie może wpływać na moc odbieranego sygnału laserowego. Jednak w przypadku pomiarów wewnątrz, gdzie co do zasady panują stabilne warunki atmosferyczne, wartość tego współczynnika pozostaje niezmienna. Z kolei w przypadku pomiarów wykonywanych na zewnątrz, z założenia przeprowadzanych w krótkim czasie, ewentualne niewielkie zmiany warunków pogodowych nie mają istotnego wpływu na wyniki, dlatego mogą być pomijane analizach [103,104].

Druga grupa obejmuje parametry, które zmieniają się w trakcie pomiaru, ale mogą być skorygowane poprzez właściwą standaryzację danych. Do tej kategorii należą kąt padania wiązki lasera (α) oraz odległość (R) między instrumentem a skanowanym obiektem. Wpływ tych parametrów na moc powracającej energii został szeroko opisany w literaturze przez wielu badaczy [101,105–108]. Literatura podaje dwa podejścia do korekcji danych radiometrycznych z pomiaru naziemnego skaningu laserowego. Pierwsze z nich, tzw. podejście modelowe (*model-driven approach*), opiera się na zastosowaniu przekształconego równania laserowego [109,110]. Drugie podejście, bazujące na danych (*data-driven approach*), wykorzystuje surowe dane pomiarowe do korekcji [103,105].

Trzecią grupę stanowi jeden parametr – współczynnik określający własności odbicia skanowanej powierzchni (ρ), który jest silnie uzależniony od jego właściwości fizykochemicznych. Wielu badaczy wykazało, że szczególny wpływ mają barwa, tekstura (chropowatość) oraz wilgotność skanowanej powierzchni [16,38,42,45,48,111]. Cechy te wpływają na sposób absorpcji i dyspersji wiązki lasera, co przekłada się na zmiany w zarejestrowanej mocy sygnału. Analizując wartość *intensity* można zidentyfikować różne zmiany powierzchniowe skanowanego obiektu.

W związku z powyższym, równanie laserowe (5) można zapisać w uproszczonej postaci [44]:

$$P_R = \rho \cdot C_1 \cdot C_2 \quad (8)$$

gdzie:

ρ – współczynnik określający własności odbicia skanowanej powierzchni;

C_1 – parametr stały dla konkretnego skanera, $C_1 = \pi P_T \eta_{Atm} \eta_{Sys}$;

C_2 – parametr zmienny, który można zredukować poprzez standaryzację danych,

$$C_2 = \frac{\cos \alpha}{4R^2}.$$

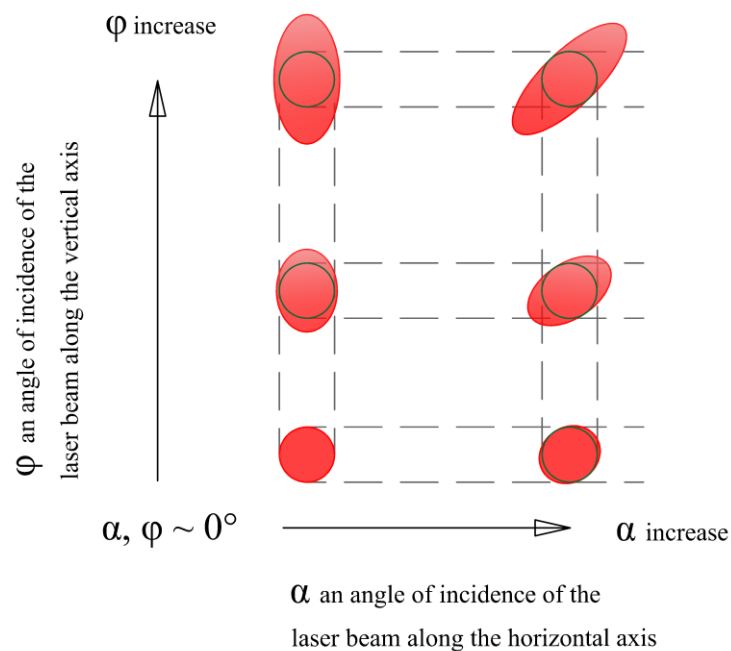
Pomimo wielu lat badań nad możliwościami wykorzystania wartości *intensity* chmury punktów, obszar ten wciąż stanowi otwarty problem naukowy, wymagający dalszych analiz. Doktorantka w swoich badaniach koncentruje się na ocenie potencjału wartości *intensity* chmury punktów w identyfikacji zmian powierzchniowych na obiektach budowlanych. W ramach pierwszego etapu przeprowadzane są badania i analizy mające na celu detekcję pęknięć na powierzchniach ścian budynków z wykorzystaniem informacji radiometrycznej chmury punktów. Natomiast w drugim etapie badania obejmują analizę informacji radiometrycznej chmury punktów w celu detekcji zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych, które są uznawane jako defekty.

5.5 Wpływ kąta padania wiązki lasera na jakość danych TLS

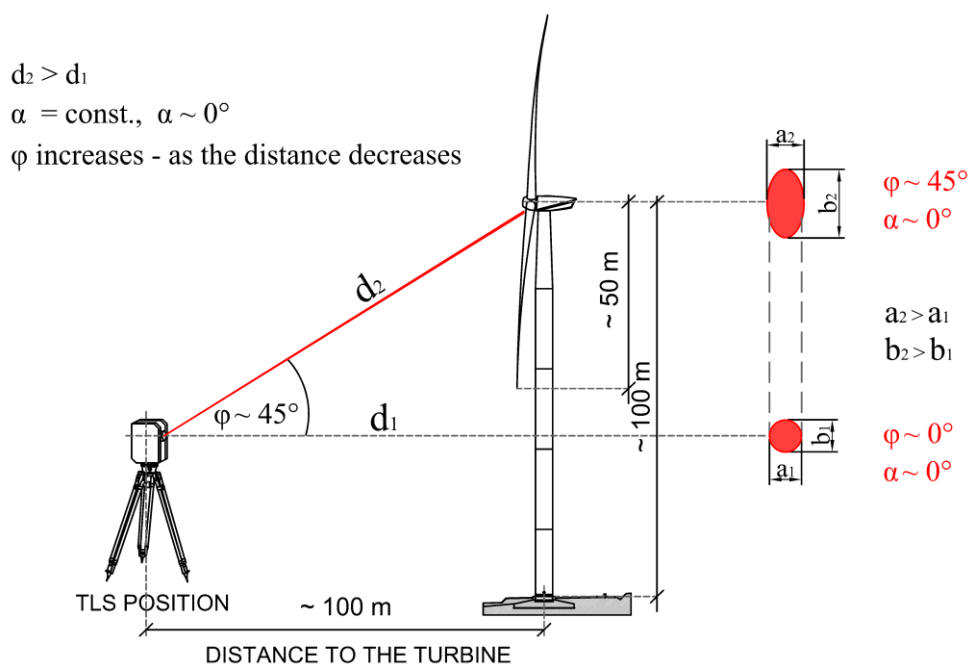
W jednym z obszarów badań podjętych przez doktorantkę, dotyczącym diagnostyki stanu technicznego łopat turbin wiatrowych za pomocą technologii TLS, kluczowe znaczenie ma również kąt padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej (ϕ). Niestety, wpływ tego parametru pomiaru jest nieunikniony w tego typu badaniach.

Z uwagi na charakter badanego obiektu (łopata turbiny umieszczona wysoko), skaner musi być umieszczony stosunkowo nisko względem łopaty, co skutkuje stosunkowo dużym kątem padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej. Wraz ze wzrostem kąta padania wiązki lasera, plamka lasera ulega zniekształceniu z okręgu w elipsoidę (Rys. 6.) co ma wpływ na dokładność pozyskiwania danych. Jeśli odległość od badanego obiektu zostanie zwiększona, kąt padania w płaszczyźnie pionowej zmaleje, jednak wiąże się to ze wzrostem rozmiaru plamki lasera, co również wpływa negatywnie na jakość uzyskanej chmury punktów. W efekcie, kluczowym zadaniem pozostaje zrównoważenie wpływu obu tych parametrów pomiaru przez dobór optymalnej pozycji skanowania. Wybór ten ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia pozyskiwanych danych wysokiej jakości. Na Rys. 7. zaprezentowano problem związany z dużym kątem padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej podczas wykonywania pomiarów łopat turbin wiatrowych przy użyciu technologii TLS.

W związku z powyższym, jako jedno z zadań badawczych niniejszej rozprawy, doktorantka podjęła się analizy jak zwiększenie kąta padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej wpływa na możliwość detekcji defektów powierzchniowych łopat turbin wiatrowych oraz na wiarygodność ich zobrazowania przez chmurę punktów (możliwość prawidłowego określenia kształtu i wymiarów defektu). Wyniki tych analiz zostały przedstawione w sekcji 6.2.3. (*Zadanie 4*).



Rys. 6. Zależność między kątem padania wiązki lasera a zniekształceniem plamki lasera [112].



Rys. 7. Problem dużego kąta padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej (φ) podczas wykonywania pomiarów łopat turbin wiatrowych z wykorzystaniem technologii TLS [112].

Wpływ wzrostu kąta padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej został także zbadany w odniesieniu do I etapu programu badawczego i badań dot. pęknięć powierzchni ścian obiektów budowlanych. W ramach zadania dodatkowego (*Zadanie 1.2.*) zbadano wpływ dwóch parametrów pomiaru, tj. odległości oraz kąta padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej, na pogorszenie jakości chmury punktów w kontekście możliwości detekcji pęknięć. Wyniki tych analiz zostały przedstawione w sekcji 6.1.3.

6 Realizacja programu badawczego

Niniejszy rozdział prezentuje wyniki przeprowadzonych badań, zorganizowane w dwóch głównych podrozdziałach, odpowiadających etapom programu badawczego. Każdy z podrozdziałów został podzielony na kolejne sekcje, w których szczegółowo omówiono realizację poszczególnych zadań badawczych.

Dla każdego z realizowanych zadań przedstawiono metodykę i sposób przeprowadzania pomiarów oraz uzyskane dane. Wyniki badań poddano szczegółowym analizom pod kątem weryfikacji postawionych hipotez. Sformułowane na ich podstawie wnioski stanowią istotny wkład w rozwój i pozyskanie nowej wiedzy w podjętych obszarach badań. Do przetwarzania danych oraz wizualizacji wyników wykorzystano oprogramowanie o otwartym dostępie CloudCompare, które umożliwia szczegółowe mapowanie chmur punktów i analizę wyników.

6.1 Technologia TLS w badaniach pęknięć powierzchni ścian obiektów budowlanych. Etap I programu badawczego.

Etap I programu obejmował badania nad pęknięciami powierzchni ścian obiektów budowlanych z wykorzystaniem technologii TLS. Symptomy takie jak pęknięcia i inne nieciągłości skanowanej powierzchni są wskaźnikami pogarszającego się stanu technicznego budynku, mogącymi sygnalizować potencjalne osłabienie konstrukcji. Jak wykazuje przegląd literatury, skuteczne wykrywanie takich zmian, w szczególności za pomocą technik nieniszczących, wciąż jest topowym i nieustannie podejmowanym zagadnieniem w inżynierii budowlanej.

Przegląd literatury wykazał, że pęknięcia powierzchni ścian budynków i innych obiektów budowlanych mogą być z powodzeniem wykryte na podstawie chmury punktów z pomiaru TLS, a skuteczna może być zarówno informacja geometryczna jak i radiometryczna [48,49]. Technologia TLS wykazuje znaczny potencjał, niemniej jednak jak każda metoda pomiarowa ma również pewne ograniczenia. Na podstawie przeglądu literatury doktorantka wysunęła wniosek, że ograniczenia i wady tej technologii w kontekście wykrywania defektów powierzchni ścian obiektów budowlanych nie zostały dostatecznie zbadane.

Doktorantka uważa, że skuteczne planowanie pomiarów dla określonych celów wymaga dogłębnej znajomości zarówno możliwości, jak i ograniczeń stosowanej technologii, a nawet konkretnej metodyki pomiarowej. Kluczowe znaczenie ma dobór odpowiedniej metodyki do konkretnego zadania, aby zmaksymalizować efektywność pomiaru. Zważywszy na powszechność występowania pęknięć w ścianach obiektów budowlanych, ich potencjalnie poważne konsekwencje oraz niedostateczną ilość badań dotyczących ograniczeń technologii TLS, doktorantka zdecydowała się pogłębić wiedzę w tym obszarze badań.

W swoich badaniach doktorantka koncentruje się przede wszystkim na pęknięciach. Ubytki nie zostały uwzględnione, ponieważ ich większe rozmiary sprawiają, że są one znacznie łatwiejsze do detekcji. Na Rys. 8. zostały zaprezentowane przykładowe pęknięcia, będące obiektem badań w podjętym zagadnieniu.

Głównym celem I etapu programu badawczego jest opracowanie metodyki pomiaru TLS do wykrywania pęknięć powierzchni ścian obiektów budowlanych z uwzględnieniem parametrów technicznych skanera oraz „geometrycznych” warunków pomiaru (**Zadanie 1.**). Doktorantka zbadała następującą zależność - zdolność detekcji oraz prawidłowej oceny szerokości pęknięć z wykorzystaniem technologii naziemnego skaningu laserowego w zależności od dwóch parametrów pomiaru: odległości skanowania oraz kąta padania wiązki lasera. Wszelkie analizy i dyskusje przeprowadzono w oparciu o zarówno geometryczną jak i radiometryczną informację chmury punktów. Doktorantka jest przekonana, że integracja obu rodzajów analizowanych informacji przyczyni się do zwiększenia skuteczności w detekcji pęknięć. Takie podejście stanowi istotny wkład zarówno z perspektywy naukowej, jak i praktycznej.

Uzyskane wyniki skłoniły doktorantkę do poszerzenia zakresu badań i przeprowadzono badania dodatkowe. Pierwsze z nich weryfikują możliwości informacji radiometrycznej chmury punktów do detekcji rys (**Zadanie 1.1.**). Drugie odnoszą się do oceny wpływu warunków pomiarowych, takich jak odległość od obiektu i kąt padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej, na jakość uzyskiwanych danych (**Zadanie 1.2.**).

Opis przebiegu oraz uzyskane wyniki z realizacji poszczególnych zadań z I etapu zostały w skróconej wersji przedstawione poniżej w podrozdziałach 6.1.1., 6.1.2, 6.1.3. Natomiast całość uzyskanych wyników została zaprezentowana w publikacjach P1, P2 oraz P3, które to w pełnej swojej treści stanowią załącznik do niniejszej rozprawy.



Rys. 8. Obiekt badań I etapu programu badawczego - przykładowe pęknięcia powierzchni ścian obiektów budowlanych.

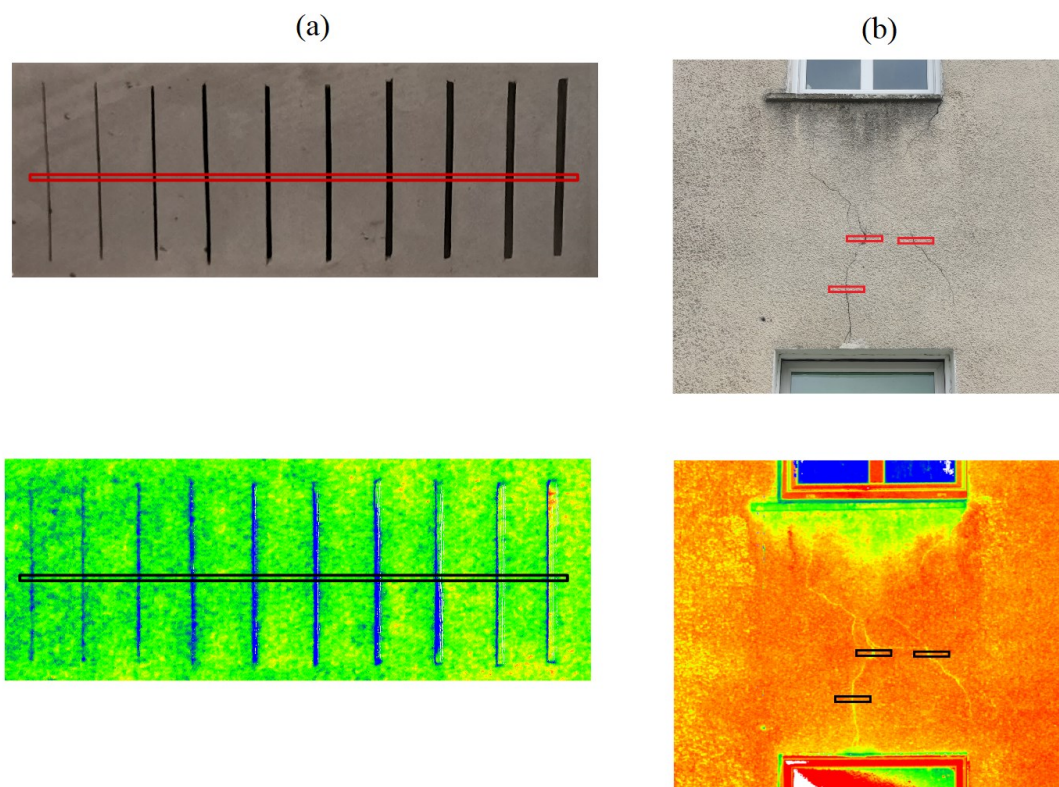
6.1.1 Opracowanie metodyki pomiaru technologią TLS w kontekście detekcji pęknięć powierzchni ścian obiektów budowlanych. Zadanie 1.

Aby zrealizować zamierzone zadanie i uzyskać rzetelne wyniki, badania zostały podzielone na dwa etapy.

Pierwszy etap, stanowiący fundament badań, przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych. Doktorantka przygotowała próbkę z białego silikatu, zawierającą dziesięć rowków symulujących pęknięcia o szerokościach od 1 mm do 10 mm. Próbkę zeskanowano i poddano analizie możliwość detekcji zasymulowanych pęknięć w 20 różnych warunkach pomiarowych. Skanowanie przeprowadzono z czterech różnych odległości (5 m, 10 m, 15 m oraz 20 m) przy pięciu kątach padania wiązki lasera (0° (0°), 20° (około 18°), 40° (około 36°), 60° (około 54°) oraz 80° (około 72°)) dla każdej z tych odległości. Schemat metodyki pomiaru w warunkach laboratoryjnych przedstawiono na Rys. 10. Pomiary przeprowadzono z rozdzielczością skanowania *extremely high*, co w zastosowanym skanerze odpowiada 0.8mm/10m.

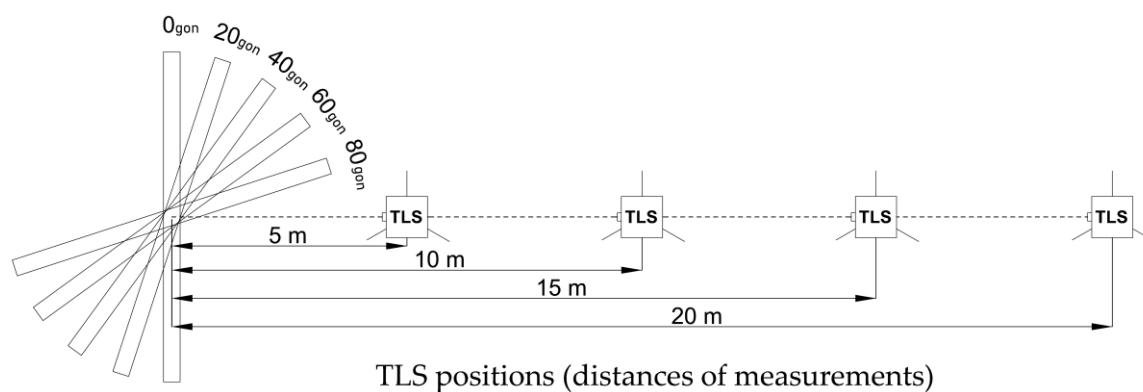
Drugi etap, mający na celu sprawdzenie skuteczności opracowanej metodyki pomiaru, przeprowadzono w warunkach terenowych w oparciu o badania realnych obiektów posiadających naturalne pęknięcia powierzchni. W celu zapewnienia wiarygodnych wyników weryfikacja była oparta na trzech budynkach, a wybrane obiekty różniły się kolorem, chropowatością powierzchni oraz szerokością i głębokością pęknięć. Pierwszy obiekt badawczy został zeskanowany w trzech różnych warunkach pomiarowych: przy kącie padania i odległości wynoszących 5° (około $4,5^\circ$) i 4.4 m, 7° (około $6,3^\circ$) i 13.8 m oraz 37° (około $33,3^\circ$) i 15.3 m. Drugi obiekt zeskanowano w dwóch warunkach pomiarowych: przy kącie padania i odległości wynoszących 2° (około $1,8^\circ$) i 5.1 m oraz 44° (około $39,6^\circ$) i 8.9 m. W przypadku ostatniego, trzeciego obiektu pomiar wykonano wyłącznie w jednych warunkach pomiarowych: przy kącie padania wynoszącym 26° (około $23,4^\circ$) i odległości 3.5 m. Było to spowodowane lokalizacją sąsiednich budynków, która uniemożliwiała skanowanie ściany budynku w innych warunkach pomiarowych. W ocenie doktorantki, ten scenariusz jest szczególnie istotny, gdyż badacz nierzadko nie ma pełnej swobody w wyborze stanowiska i zmuszony jest dostosować się do otoczenia badanego obiektu. Dlatego też, doktorantka w swoich analizach postanowiła uwzględnić również taki przypadek. W badaniach terenowych pomiary przeprowadzono również w rozdzielczości *extremely high* (0.8mm/10m).

Rys. 9a przedstawia fotografię badanej próbki silikatowej z etapu laboratoryjnego oraz jej chmurę punktów. Zaznaczony obszar stanowi fragment wybrany do dalszych analiz. Rys. 9b prezentuje fotografię jednego z zeskanowanych budynków (obiekt 1), jego chmurę punktów oraz zaznaczone fragmenty pęknięć wybrane do analiz.



Rys. 9. *Obiekt badań: 9a – testowana próbka silikatowa z etapu laboratoryjnego; 9b – ściana jednego z analizowanych budynków z etapu terenowego (obiekt 1).*

Object of measurements
and incidence angles



Rys. 10. *Schemat metodyki pomiaru w warunkach laboratoryjnych [99].*

Podczas pomiarów prowadzonych w warunkach laboratoryjnych, w pobliżu badanej próbki, umieszczono i zarejestrowano za pomocą skanera specjalne sztuczne cele (tarczki) Z + F. Dzięki temu, w pierwszym kroku pre-processingu wszystkie uzyskane chmury punktów zostały sprowadzone do tego samego układu odniesienia współrzędnych. Następnie, fragmenty zbiorów danych (chmur punktów) zostały wyeksportowane do dalszych analiz. Sprowadzenie całości badań do jednego układu współrzędnych umożliwiło wybranie do analiz dokładnie tej samej części próbki silikatowej dla wszystkich

pomiarów (wszystkich warunków pomiarowych). Zastosowanie takiego podejścia pozwoliło na uzyskanie wyników na wysokim poziomie wiarygodności.

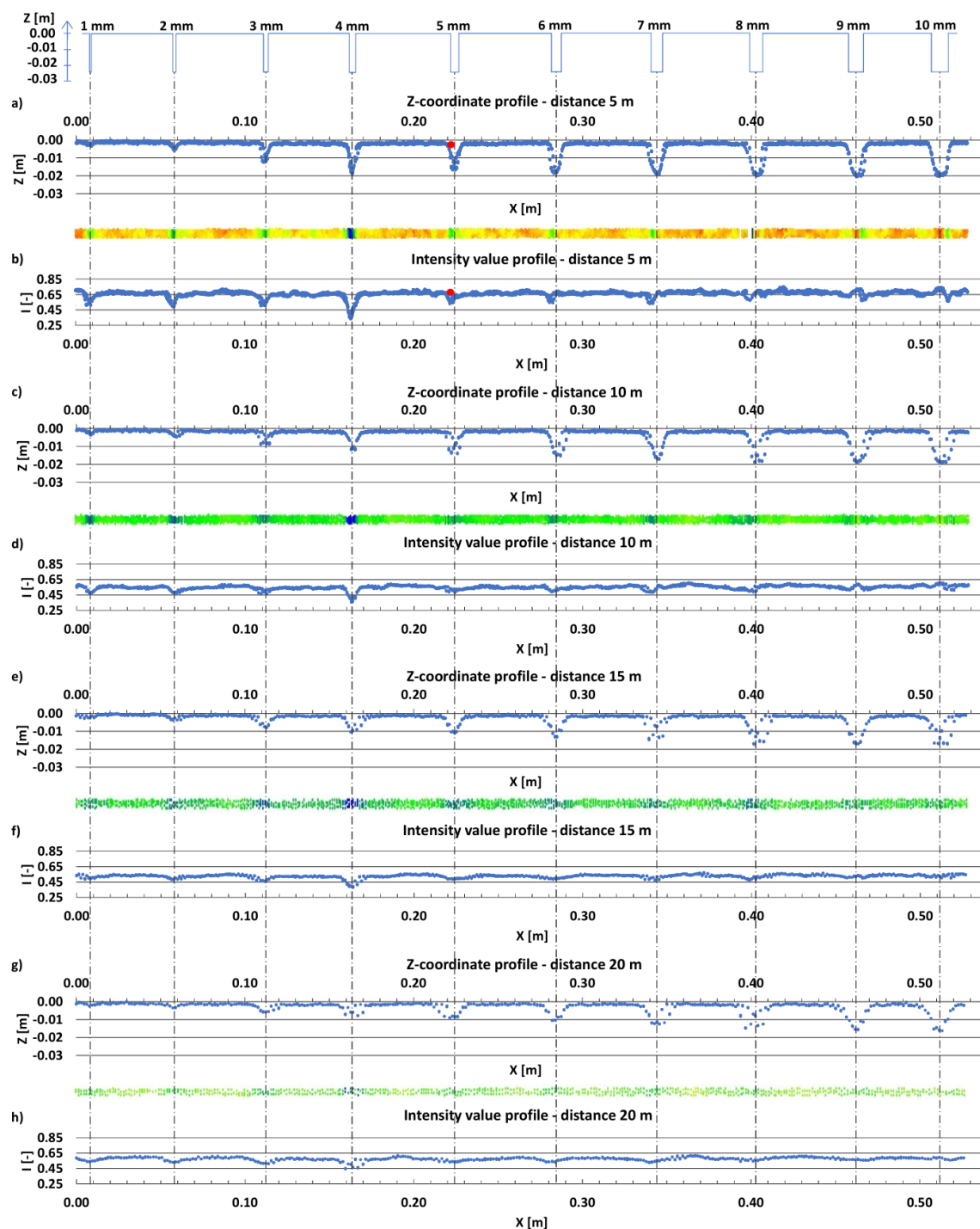
Z chmur punktów wycięto pasma o szerokości 0,003 m, które posłużyły do opracowania profili. Jak zostało już wspomniane, w swoich badaniach doktorantka koncentruje się na analizie potencjału oraz ograniczeń zarówno informacji geometrycznej jak i radiometrycznej chmury punktów. W związku z tym, analizy przeprowadzono generując dwa rodzaje profili: pierwszy typ ilustruje rozmieszczenie punktów w układzie współrzędnych OXZ, natomiast drugi przedstawia rozkład wartości intensywności w układzie współrzędnych OXI (gdzie I oznacza parametr *intensity*). Dla każdego zestawu warunków pomiarowych, tj. dla każdej odległości skanowania i każdego kąta padania wiązki lasera, zostały opracowane obydwa rodzaje profili. W rezultacie, do analiz przygotowano łącznie 40 profili (20 par profili), które umożliwiły kompleksowe badanie i ocenę wpływu odległości skanowania i kąta padania wiązki lasera na detekcję pęknięć. Jako przykład, na Rys. 11 zaprezentowano profile wygenerowane dla kąta padania wiązki lasera wynoszącego 0°. Wszystkie 40 profili zamieszczono w publikacji P1.

Uzyskane wyniki cechowały się znaczną różnorodnością, co wskazuje na złożoność analizowanego zagadnienia. Jednocześnie, zróżnicowanie wyników potwierdziło zasadność podjęcia problemu badawczego, podkreślając potrzebę szczegółowego zrozumienia wpływu warunków pomiarowych na detekcję pęknięć. Analizy potwierdziły potencjał technologii TLS w detekcji pęknięć, ujawniając jednocześnie istotne ograniczenia tej metody. Poniżej przedstawiono wnioski wyciągnięte dla każdego kąta padania wiązki lasera.

Wnioski uzyskane z analizy wyników pomiarów dla kąta padania 0° [99]

W przypadku pęknięć o szerokości 1 mm, dane geometryczne niestety okazały się nieskuteczne. Wykazały pewne zmiany na powierzchni, jednak nie były one wystarczająco wyraźne i jednoznaczne, niezależnie od odległości pomiaru. Z kolei dane radiometryczne wykazały skuteczność w detekcji pęknięć o szerokości 1 mm na odległości do około 10 m. Ta sytuacja jest szczególnie istotna dla podjętego problemu badawczego. Jednocześnie podkreśla ograniczenia technologii TLS w zakresie wykrywania drobnych defektów, oraz potwierdza przypuszczenia doktorantki, że informacje radiometryczne mogą skutecznie uzupełniać dane geometryczne. Dla pęknięć o szerokości 2 mm wykrywalność była możliwa zarówno przy użyciu danych geometrycznych, jak i radiometrycznych, ale tylko do 10 m; powyżej tej odległości skuteczne były wyłącznie dane geometryczne. Pęknięcia o szerokości 3 mm były skutecznie wykrywane z wykorzystaniem obu typów danych do odległości 5 m, a dla większych odległości dane geometryczne zapewniały bardziej wiarygodne wyniki. W przypadku pęknięć o szerokości 4 mm oba typy danych pozwalały na wykrycie do 15 m, a dla pęknięć o szerokości powyżej 4 mm dane geometryczne były bardziej efektywne. Co istotne, dane radiometryczne traciły na skuteczności powyżej 15 m. Pewne zmiany wartości parametru *intensity* wystąpiły także przy odległościach 15 m i 20 m, jednak tak marginalne zmiany mogą wynikać z wielu innych czynników, takich jak zmiany chropowatości czy koloru. W związku z tym, skoki wartości nie były wystarczająco duże, aby jednoznacznie zidentyfikować pęknięcie. W interesujący sposób zostały zarejestrowane dane radiometryczne podczas pomiarów z odległości 5 m. W przypadku pęknięć

o szerokości 5-10 mm zarejestrowano jedynie ich krawędź, co związane jest z omawianym *edge effect* i wynika ze zmniejszenia siły odbicia wiązki lasera na brzegach pęknięć (zobrazowane czerwonymi punktami na Rys. 11a i 11b). Taka sytuacja dostarcza informacji o potencjalnym defekcie w tym miejscu. Zjawisko to podkreśla konieczność jednoczesnej analizy obu typów danych – geometrycznych i radiometrycznych. Integracja tych informacji pozwala na bardziej kompleksową analizę defektów.



Rys. 11. Profile wygenerowane dla kąta padania wiązki lasera 0° i odległości 5 m (a, b), 10 m (c, d), 15 m (e, f) i 20 m (g, h) [99].

Wnioski uzyskane z analizy wyników pomiarów dla kąta padania 20° [99]

W przypadku pęknięć o szerokości 1 mm i 2 mm dane geometryczne chmur punktów niestety okazały się nieskuteczne. Odnotowano zaś pewne zmiany wartości *intensity*, zwłaszcza przy odległościach 5 m i 10 m; dla pozostałych odległości zmiany te również wystąpiły ale były zbyt niejednoznaczne. Pęknięcia o szerokości 3 mm i 4 mm były wykrywalne na podstawie obu typów danych na odległości do 10 m (dla 4 mm także na 15 m). Pęknięcie o szerokości 5 mm wykrywano z odległości do 15 m za pomocą danych geometrycznych oraz do 10 m przy użyciu danych radiometrycznych. Pęknięcia o szerokości 6 mm były wykrywalne na każdej testowanej odległości przy użyciu obu typów danych. Stosunkowo podobne wyniki uzyskano dla pęknięć 7 mm i 8 mm. Obywa typy danych umożliwiły detekcję, dla wszystkich analizowanych odległości. Jednak dane radiometryczne ze zwiększonym wskazaniem na lewe krawędzie (w szczególności dla odległości 5 m i 10 m). Dla pęknięć o szerokości 9 mm i 10 mm wyniki były mniej efektywne niż dla wcześniej omawianych. Dane geometryczne pozwalały na wykrycie pęknięć przy zachowaniu odległości do 15 m, podczas gdy dane radiometryczne jedynie do 5 m i rejestrując jedynie lewą krawędź pęknięć.

Wnioski uzyskane z analizy wyników pomiarów dla kąta padania 40° [99]

Wyniki pomiarów dla kąta padania wiązki lasera równego 40° wskazały już na liczne ograniczenia technologii TLS. Wykrywanie pęknięć o szerokości 1 mm, 2 mm oraz 3 mm jest niemożliwe przy zastosowaniu zarówno danych geometrycznych, jak i radiometrycznych, niezależnie od odległości. Dla pęknięć o szerokości od 4 mm do 6 mm, jedynie dane geometryczne są skuteczne. Nie mniej jednak, umożliwiły ich wykrycie jedynie z odległości 5 m, dla pozostałych odległości zmiany wartości nie były wystarczająco wyraźne, aby zapewnić jednoznaczną identyfikację. Pęknięcia o szerokości 7 mm i 8 mm wykrywane były przy użyciu danych radiometrycznych tylko z odległości 5 m; dla dalszych odległości wyniki były niejednoznaczne. W przypadku danych geometrycznych wykrywalność tych pęknięć była możliwa z odległości 5 m i 10 m. (dla 8 mm także na 15 m). Dla pęknięć o szerokości 9 mm i 10 mm, efektywne były dane geometryczne i pozwoliły na ich wykrycie do 10 m. Wyniki ewidentnie wskazują, że dla pomiarów przy kącie padania 40° dane geometryczne są znacznie bardziej efektywne od danych radiometrycznych. Możliwe jest wykrycie pęknięć o szerokości 4 mm i większych, jednak pomiary powinny być przeprowadzane z minimalnych odległości, najlepiej do 10 m, aby zapewnić wystarczającą jakość chmury punktów.

Wnioski uzyskane z analizy wyników pomiarów dla kąta padania 60° [99]

Najważniejszym wnioskiem jaki wyciągnięto z analizy pomiarów wykonanych przy kącie padania 60° było stwierdzenie, że wykrycie pęknięć z odległości 10 m, 15 m i 20 m nie jest możliwe, zarówno na podstawie danych geometrycznych, jak i radiometrycznych. Pewne zmiany wartości *intensity* wystąpiły przy odległości 10 m, ale nie były one wystarczająco wyraźne, aby jednoznacznie potwierdzić obecność pęknięcia. Zatem, skuteczne wykrycie pęknięć przy takim kącie padania jest możliwe jedynie z bliskich odległości skanowania, rzędu 5 m. Wówczas możliwa jest detekcja pęknięć o szerokości od 7 mm do 10 mm za pomocą danych geometrycznych. Z kolei dane radiometryczne dostarczyły informacji o pęknięciach od 4 mm do 10 mm, jednak z różną efektywnością. W przypadku danych

radiometrycznych należy zwrócić uwagę na szczególną sytuację. W odróżnieniu od profili wartości *intensity* dla pozostałych kątów padania 0° , 20° i 40° , w tym przypadku wartości *intensity* delikatnie zmniejszają się, a następnie znacząco wzrastają na krawędzi pęknięcia. Wyjaśnienie tego zjawiska przedstawiono w sekcji 'Discussions' w publikacji P1. Podsumowując, dla omawianych warunków pomiarowych dane radiometryczne pozostają bardziej efektywne w przypadku pęknięć o mniejszych szerokościach rzędu 4-5 mm, natomiast dane geometryczne dla pęknięć o szerokości od 7 mm wzwyż.

Wnioski uzyskane z analizy wyników pomiarów dla kąta padania 80° [99]

Ostatnie już analizy w etapie laboratoryjnym wykonano dla kąta padania równego 80° . Analiza wyników wskazuje, że dane geometryczne nie zapewniają skutecznego wykrywania pęknięć, niezależnie od odległości. Jedynie dane radiometryczne okazały się efektywne w detekcji pęknięć przy tak dużym kącie padania wiązki lasera. W pomiarach dla kąta padania równego 80° wartości *intensity* również wzrastają na krawędzi pęknięcia. Przy odległości skanowania 5 m zmiany wartości *intensity* dla pęknięć o szerokości 1–3 mm były marginalne, natomiast dla pęknięć o szerokości 4–10 mm skoki wartości *intensity* były wyraźnie widoczne. Przy odległości 10 m dane radiometryczne wykazały niewielkie zmiany wartości dla pęknięć o szerokości 4–7 mm i wyraźniejsze zmiany dla pęknięć o szerokości 8–10 mm. Wyniki te sugerują, że dane radiometryczne są dominującym źródłem informacji w detekcji pęknięć przy dużych kątach padania wiązki lasera, jednakże tylko dla pęknięć o szerokości 4 mm i większej.

Wyniki przeprowadzonych analiz zostały zestawione w pięciu tabelach, gdzie każda tabela odpowiada wynikom dla jednego kąta padania wiązki lasera. Jako przykład poniżej zostały zaprezentowane tabele dla kątów padania 0° oraz 20° (Tabela 4 oraz 5). Oznaczenia 'Z' i 'I' symbolizują odpowiednio detekcję pęknięcia na podstawie danych geometrycznych oraz radiometrycznych. Użyto trzech rodzajów oznaczeń: '+' oznacza wykrywalne, '-' oznacza niewykrywalne, natomiast symbol 'e' oznacza sytuację, w której możliwe było wykrycie jedynie krawędzi pęknięcia.

Dodatkowo, wyniki zaprezentowano również w formie graficznej, aby wyraźnie zobrazować granice walidacji zastosowanej metodyki pomiaru (Rys. 12. poniżej). Jako przykład zostały zaprezentowane wyniki dla kątów padania 0° , 20° oraz 40° . Fioletowe linie reprezentują informację radiometryczną chmury punktów, zielone linie informację geometryczną.

Realizacja badań oraz analiz na etapie laboratoryjnym pozwoliła na osiągnięcie założonego celu i opracowanie wytycznych dotyczących wyboru odpowiedniej metodyki pomiaru do detekcji pęknięć. Taka forma przedstawienia wyników, w sposób przejrzysty i klarowny pozwala jednoznacznie określić zarówno możliwości, jak i ograniczenia naziemnego skaningu laserowego w detekcji pęknięć na powierzchniach ścian obiektów budowlanych w określonych warunkach pomiarowych. Opracowane tabele i diagramy mogą być interpretowane w dwojaki sposób. Po pierwsze, jakie warunki pomiarowe (odległość i kąt skanowania) muszą zostać spełnione, aby możliwe było wykrycie pęknięcia o danej (przewidywanej) szerokości. Po drugie, oceniono który typ danych - geometryczne

czy radiometryczne - wykazują większą skuteczność w detekcji pęknięcia o danej szerokości.

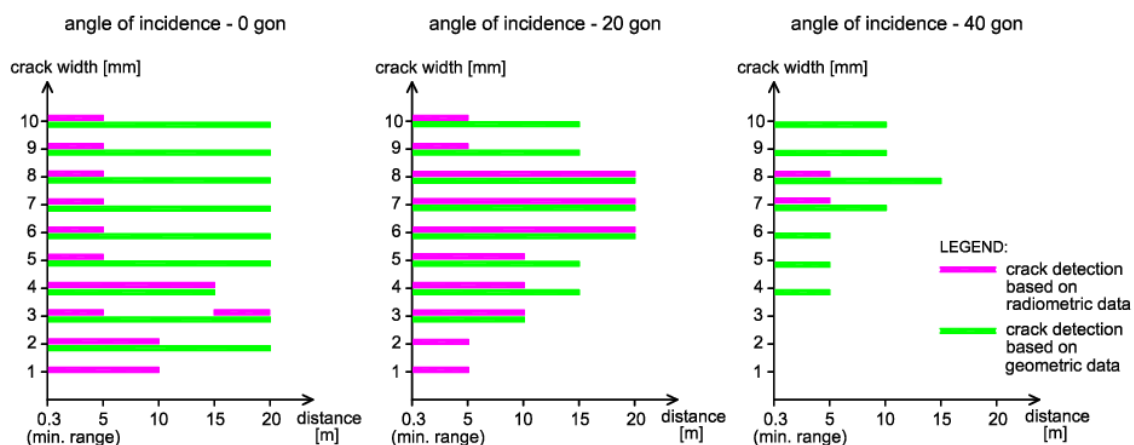
Niemniej jednak, mimo obiecujących wyników, opracowana metodyka wymagała weryfikacji, przeprowadzenia dalszych analiz oraz potwierdzenia jej skuteczności w praktyce. Etapem weryfikacji były badania przeprowadzone na rzeczywistych obiektach budowlanych. Tak kompleksowe podejście, obejmujące zarówno badania laboratoryjne, jak i pomiary budynków (tym samym rzeczywistych pęknięć), umożliwiła ostateczne potwierdzenie skuteczności metodyki i jej użyteczności w pomiarach detekcji pęknięć w różnorodnych warunkach pomiarowych.

Tabela 4. Wyniki pomiarów dla kąta padania wiązki lasera wynoszącego 0° [99].

	1 mm		2 mm		3 mm		4 mm		5 mm		6 mm		7 mm		8 mm		9 mm		10 mm	
	Z	I	Z	I	Z	I	Z	I	Z	I	Z	I	Z	I	Z	I	Z	I	Z	I
5 m	-	+	+	+	+	+	+	+	+	e	+	e	+	e	+	e	+	e	+	e
10 m	-	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
15 m	-	-	+	-	+	+	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
20 m	-	-	+	-	+	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-

Tabela 5. Wyniki pomiarów dla kąta padania wiązki lasera wynoszącego 20° [99].

	1 mm		2 mm		3 mm		4 mm		5 mm		6 mm		7 mm		8 mm		9 mm		10 mm	
	Z	I	Z	I	Z	I	Z	I	Z	I	Z	I	Z	I	Z	I	Z	I	Z	I
5 m	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	e	+	e	+	e	+	e
10 m	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+/e	+	+/e	+	-	+	-
15 m	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-	+	+	+	+/e	+	+/e	+	-	+	-
20 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+/e	+	+/e	-	-	-	-



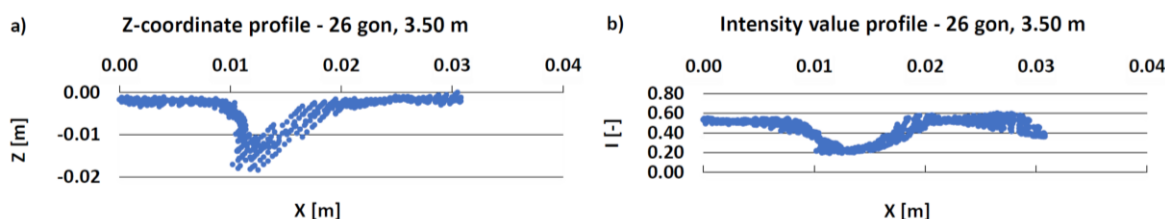
Rys. 12. Graficzna reprezentacja wyników dla detekcji pęknięć na podstawie danych geometrycznych i radiometrycznych chmury punktów z pomiarów TLS [99].

Aby zapewnić większą spójność z wynikami laboratoryjnymi, pomiary w warunkach terenowych przeprowadzono przy zastosowaniu bardzo zbliżonych warunków pomiarowych (porównywalne wartości kątów padania wiązki lasera i odległości skanowania). Do analiz wybrano po kilka fragmentów chmury punktów z każdego pomiaru (kilka fragmentów każdego pęknięcia). Selekcja ta była uzasadniona naturalnym charakterem analizowanych pęknięć, które wykazywały zmienną szerokość i głębokość. Z uzyskanych chmur punktów wyodrębniono pasma o szerokości 0,006 m, które posłużyły

do opracowania profili. Przykłady analiz uzyskanych danych i wyników weryfikacji przedstawiono poniżej.

Weryfikacja wyników dla warunków pomiarowych: kąt padania wiązki lasera 20° , odległość skanowania 5 m

W podobnych warunkach zastał pomierzony Obiekt 3 – kąt padania 26° i odległość 3.5 m. Niniejsza weryfikacja była niezwykle istotną częścią badań. Bezpośredni dostęp do budynku umożliwił szczegółową weryfikację opracowanej metodyki pomiaru oraz profili z etapu laboratoryjnego. Przeanalizowano kilka fragmentów badanego pęknięcia, uzyskując bardzo wysoką zgodność wyników. Profile i analizę dla jednego z nich przedstawiono poniżej.



Rys. 13. Profile wygenerowane dla kąta padania wiązki lasera $\sim 20^\circ$ i odległości ~ 5 m [99].

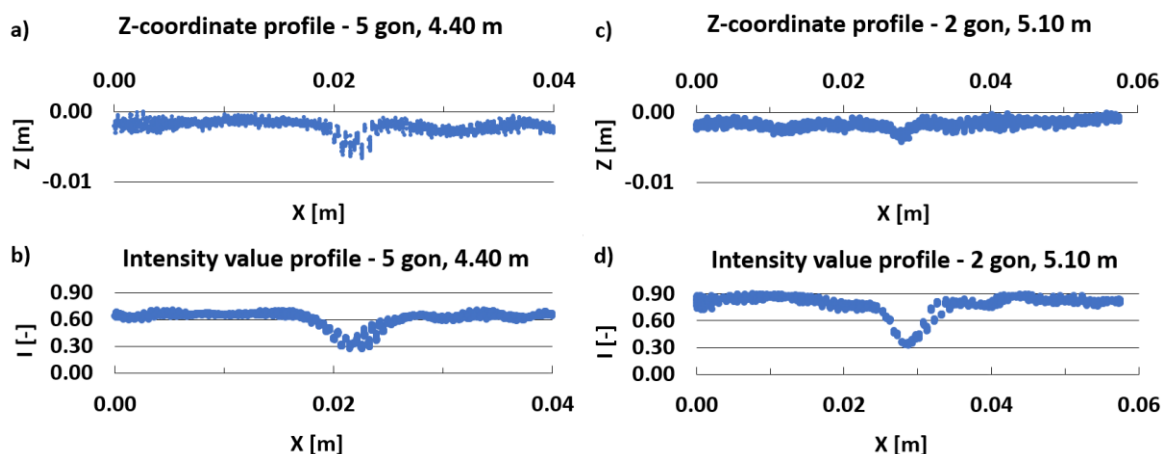
Profile stworzone dla analizowanego pęknięcia porównano z odpowiadającymi im profilami opracowanymi podczas etapu laboratoryjnego (Fig. 10a oraz 10b w publikacji P1). Podobnie jak w przypadku badań laboratoryjnych, zarówno informacja geometryczna, jak i radiometryczna okazała się skuteczna w detekcji pęknięcia w omawianych warunkach terenowych. Na podstawie przeprowadzonych analiz oszacowano, że szerokość badanego pęknięcia wynosi od 5 mm do 7 mm. Pomiar rzeczywistego wymiaru analizowanego pęknięcia wykazał, że jego szerokość wynosiła 6,69 mm (Rys. 14.), co potwierdziło wysoką dokładność opracowanych profili. Uzyskane wyniki wskazały, że możliwe jest nie tylko skuteczne wykrywanie pęknięć, ale także poprawna ocena ich szerokości. Wynik ten, jak również analogiczne analizy innych pęknięć, potwierdziły zasadność bazowania na profilach opracowanych w warunkach laboratoryjnych. Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazywały, że opracowana metodyka pomiaru ma duży potencjał aplikacyjny, umożliwiając wiarygodną detekcję pęknięć na podstawie danych TLS – pod warunkiem zachowania odpowiednich warunków pomiarowych.



Rys. 14. Fotografia analizowanego pęknięcia; obiekt 3 [99].

Weryfikacja wyników dla warunków pomiarowych: kąt padania wiązki lasera 0° , odległość skanowania 5 m

W podobnych warunkach zostały pomierzone dwa obiekty, Obiekt 1 (5° ; 4.4m) oraz Obiekt 2 (2° ; 5.1m). Budynki różniły się rodzajem i kolorem elewacji, co z pewnością wpłynęło na wartości parametru *intensity*. Analogicznie do poprzednio opisywanego pęknięcia, analizując opracowane profile z odpowiadającymi im profilami z etapu laboratoryjnego (Fig. 9a oraz 9b w publikacji P1), wyciągnięto wnioski.



Rys. 15. Profile wygenerowane dla kąta padania wiązki lasera $\sim 0^\circ$ i odległości ~ 5 m: obiekt 1 (a, b) oraz obiekt 2 (c, d) [99].

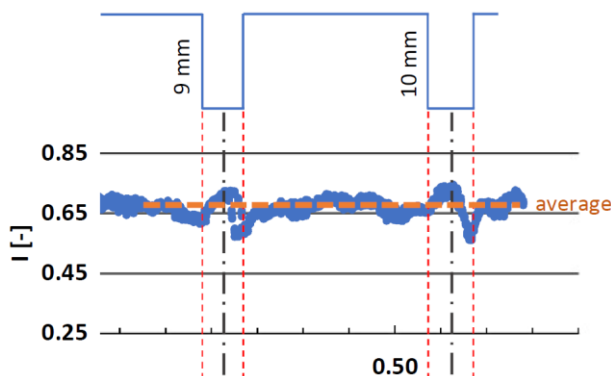
W przypadku obu pęknięć zarówno dane radiometryczne, jak i geometryczne okazały się użyteczne. Przypadek pęknięcia na Obiekcie 2. potwierdza zasadność równoczesnego analizowania obu typów informacji. W przypadku informacji radiometrycznej występują bardziej zauważalne zmiany wartości, przez co wyraźniej wskazuje na obecność pęknięć w porównaniu z danymi geometrycznymi. Podobne zależności zaobserwowano w etapie laboratoryjnym dla pęknięć o najmniejszych szerokościach. W oparciu o przeprowadzone analizy oszacowano, że szerokość badanych pęknięć wynosi około 3 mm.

Rozważany przypadek okazał się szczególnie interesujący i warty analiz również ze względu na dodatkowy aspekt. Pęknięcie na Obiekcie 1 było zlokalizowane na znacznej wysokości. W przypadku pomiarów z niewielkiej odległości skutkuje to istotnym wzrostem kąta padania w płaszczyźnie pionowej. Wartościowe wydaje się zbadanie, w jakim stopniu takie warunki pomiarowe wpływają na jakość uzyskiwanych chmur punktów. Rysunek 15 przedstawia, wyniki dla obu analizowanych pęknięć były zbliżone. Detekcja pęknięcia była możliwa nawet przy znacznym kącie padania w płaszczyźnie pionowej. Jednak zauważalne szумы w informacjach geometrycznych (Rys.15a) sugerują, że pomiary w takich warunkach mogą być obciążone dodatkowymi błędami. Obserwacje te wskazują na konieczność dalszych badań, mających na celu określenie wpływu kąta padania w płaszczyźnie pionowej na jakość danych w kontekście detekcji i prawidłowej oceny pęknięć. W odpowiedzi na te wątpliwości, w ramach niniejszej rozprawy przeprowadzono dodatkowe badania, które zdefiniowano jako cel dodatkowy (Zadanie 1.2.). Wyniki tych badań znajdują się w podrozdziale 6.1.3. i przyczyniają się do lepszego zrozumienia ograniczeń oraz możliwości technologii TLS.

Analiza wyników dotycząca kolejnych warunków pomiarowych została przedstawiona w publikacji P1.

Przeprowadzone badania i analizy przyniosły satysfakcjonujące rezultaty, jednak w toku prac pojawiła się potrzeba dodatkowych dyskusji na temat sposobu analizy i oceny szerokości pęknięć na podstawie opracowanych profili. W publikacji P1 zamieszczono rozdział poświęcony tym rozważaniom (rozdział *Discussions*). W niniejszym konspekcie przedstawiono wybrane fragmenty tych dyskusji.

Szczególną uwagę poświęcono zagadnieniu detekcji pęknięć na podstawie danych radiometrycznych. Wyniki badań wykazały, że w pewnych przypadkach możliwa jest jedynie detekcja krawędzi pęknięcia, co skłoniło do dalszych analiz. Badania ujawniły dwa scenariusze: pierwsza sytuacja, w której określenie która z krawędzi została wykryta i ocena pęknięcia nie jest możliwa; druga sytuacja, w której możliwe jest jednoznaczne określenie krawędzi i oszacowanie szerokości pęknięcia. Szczególnie interesujące wyniki uzyskano dla pęknięć o szerokościach 9 mm i 10 mm w warunkach pomiarowych – odległość skanowania 5 m i kąt padania wiązki 0° (Rys. 16).



Rys. 16. Detekcja krawędzi pęknięcia i analiza szerokości pęknięcia na podstawie informacji radiometrycznej chmury punktów [99].

Wstępne spostrzeżenia sugerowały, że uzyskane dane nie pozwalają na wiarygodną identyfikację pęknięć. Dalsze, bardziej szczegółowe analizy wykazały jednak, że oszacowanie szerokości pęknięcia jest możliwe, choć wymaga odpowiedniej interpretacji wyników. Dla szerokich pęknięć zauważono, że informacje radiometryczne charakteryzują się wyższymi wartościami wewnątrz pęknięcia w porównaniu z pęknięciami węższymi. Wysoce prawdopodobną przyczyną tego zjawiska jest różnica w chropowatości powierzchni próbki i wnętrza symulowanego pęknięcia. Dodatkowo, w przypadku szerszych pęknięć, wiązka lasera w całości trafia do ich wnętrza, co znacząco wpływa na zarejestrowane wartości *intensity* powracającej wiązki.

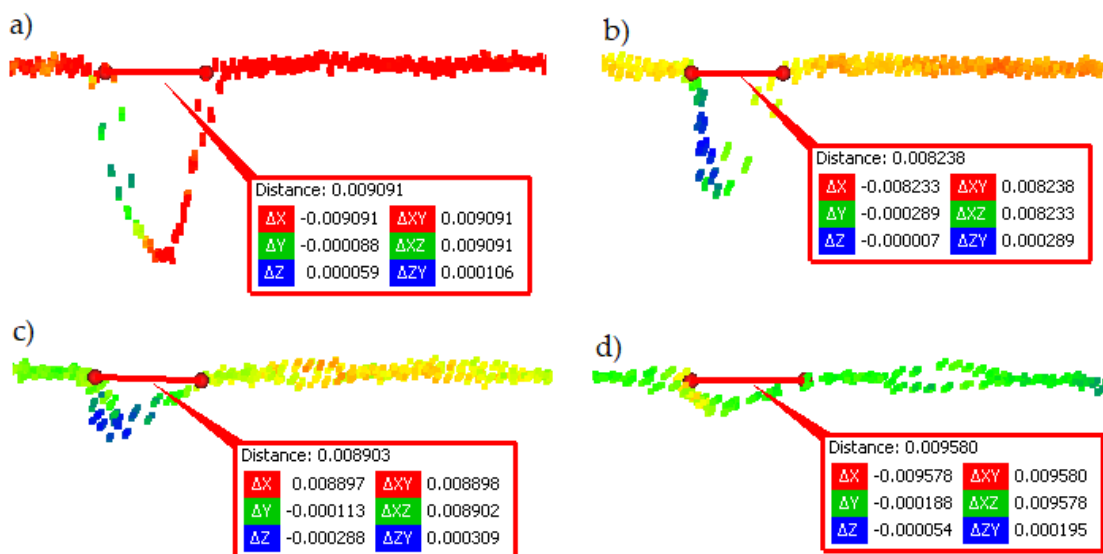
W tego typu przypadkach interpretacja danych powinna być przeprowadzana w sposób następujący. Minimalne wartości parametru *intensity* występują na krawędzi pęknięcia - w tym przypadku na prawej krawędzi (Rys. 16). Następnie wartości *intensity* gwałtownie wzrastają, finalnie osiągając poziom znacznie wyższy niż wartości średnie zarejestrowane w pobliżu pęknięcia. Co istotne, maksymalne wartości parametru *intensity* występują w okolicy centralnej części pęknięcia. Taka charakterystyka dostarcza informacji

o orientacji pęknięcia (kierunek drugiej krawędzi pęknięcia) oraz może być użyteczna przy oszacowywaniu jego szerokości. Należy jednak podkreślić, że opisywany scenariusz wystąpił jedynie dla dwóch badanych pęknięć. Wymaga zatem dalszych badań w celu potwierdzenia i uogólnienia wysuniętych wniosków. Konieczne jest przeprowadzenie dodatkowych eksperymentów i analiza większej liczby próbek. Niemniej jednak, wyniki te podkreślają potencjał opracowanej metodyki, jednocześnie wskazując kierunki przyszłych badań nad jej doskonaleniem.

Przeprowadzone dyskusje uwypukliły jeszcze jeden istotny aspekt. Podkreślają znaczenie szczegółowej analizy danych zamiast ich powierzchownego traktowania. Staranna i dogłębna interpretacja może ujawnić istotne wnioski, nawet jeśli początkowo dane wydają się być mało obiecujące.

Dodatkową kwestią poruszoną w *Discussions* publikacji P1 jest identyfikacja pęknięć z wykorzystaniem informacji geometrycznej. Dyskusje te mają kluczowe znaczenie z punktu widzenia aplikacyjnego, w rzeczywistych zastosowaniach technologii TLS. Pierwszorzędnym celem badań było opracowanie efektywnego schematu pomiarowego umożliwiającego detekcję pęknięć. Jednak, oprócz informacji o samym wystąpieniu pęknięcia, równie istotnym aspektem jest zdolność do wiarygodnej oceny jego szerokości. W związku z tym przeanalizowano wiarygodność oceny szerokości pęknięć na podstawie informacji geometrycznej chmury punktów.

Analizy przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania CloudCompare, jak zaprezentowano na Rys. 17. (przykład analizowanego pęknięcia o szerokości 7 mm). Na podstawie tej oraz analogicznych analiz dla innych przypadków pęknięć stwierdzono, że szerokość pęknięcia jest na ogół przeszacowywana o około 2 mm, a w pojedynczych przypadkach o 3 mm. Warto podkreślić, że dla kątów padania wynoszących 20° i 60° uzyskano niemal identyczne wyniki, co wskazuje na pewną stabilność pomiarów dla odległości skanowania 5 m.



Rys. 17. Analiza wiarygodności określenia szerokości pęknięcia na podstawie informacji geometrycznej chmury punktów; przykład analizowanego pęknięcia o szerokości 7 mm przy kącie padania wynoszącym a) 0°, b) 20°, c) 40° oraz d) 60° [99].

Dodatkowe rozważania zostały omówione w rozdziale 4. *Discussions* publikacji P1. Przeprowadzone analizy mają kluczowe znaczenie dla prawidłowej oceny szerokości pęknięć. Wskazują one dodatkowe istotne możliwości, ale też i ograniczenia efektywnego wykorzystywania informacji geometrycznej i radiometrycznej chmury punktów w identyfikacji pęknięć powierzchni ścian obiektów budowlanych

Przeprowadzone badania oraz analizy zostały zaprezentowane w publikacji P1. Dodatkowo, surowe dane zostały zdeponowane i udostępnione w systemie Mendeley w ramach publikacji P2.

Przeprowadzone badania oraz analizy pozwoliły w pełni zrealizować Zadanie 1, oraz potwierdzić pierwszą z postawionych w niniejszej rozprawie doktorskiej hipotezę.

(Zadanie 1) Opracowanie metodyki pomiaru technologią TLS w kontekście detekcji pęknięć na powierzchni ścian obiektów budowlanych

(H1) Znajomość możliwości oraz ograniczeń technicznych naziemnego skaningu laserowego w wykrywaniu nieciągłości na powierzchniach obiektów budowlanych usprawnia ich detekcję oraz ułatwia analizę pozyskanych danych

Wszystkie analizy przeprowadzone w ramach badania doprowadziły do wysunięcia następujących wniosków ogólnych [99]:

- (1) efektywna detekcja pęknięcia o szerokości 1 mm jest możliwa przy wykorzystaniu danych radiometrycznych, jednak wyłącznie na niewielkiej odległości (do około 10 m) oraz przy małym kącie padania wiązki lasera (do około 20°).
- (2) w przypadku pęknięcia o szerokości 2 mm wyniki są bardzo zróżnicowane – przy kącie padania wynoszącym około 0° bardziej wartościowe są dane geometryczne, natomiast przy kącie padania wynoszącym około 20° dane radiometryczne okazują się bardziej przydatne, jednak przy ograniczonej odległości skanowania; dla kątów padania powyżej 20° żaden z tych typów danych nie pozwala na detekcję pęknięcia.
- (3) pęknięcie o szerokości 3 mm jest wykrywalne z podobną skutecznością za pomocą obu typów danych, jednak przy kącie padania do około 20° ; dla pomiarów przy kątach padania powyżej 20° detekcja staje się niemożliwa.
- (4) dla pęknięć o szerokości 4 mm i większych, przy kącie padania do około 40° dane geometryczne są bardziej wartościowe niż dane radiometryczne.
- (5) dla pęknięć o szerokości 4 mm i większych, przy kącie padania powyżej 40° dane radiometryczne okazują się bardziej wartościowe niż dane geometryczne, zachowując odpowiednią odległość skanowania.
- (6) przy bardzo dużych kątach padania (około 80°) jedynie dane radiometryczne umożliwiają detekcję pęknięcia.
- (7) najlepsze wyniki pod względem wiarygodności oceny szerokości pęknięcia na podstawie danych geometrycznych uzyskano w pomiarach z odległości do 5 m.
- (8) określając szerokość pęknięć na podstawie informacji geometrycznej chmury punktów wartość ta jest na ogół przeszacowywana o około 2–3 mm, co należy uwzględnić przy interpretacji wyników i ostatecznej ocenie szerokości pęknięcia.

Poza ogólnymi wnioskami przedstawionymi powyżej, kluczowym rezultatem przeprowadzonych badań są opracowane tabele oraz wykresy. Stanowią one kompleksowe podsumowanie wszystkich wykonanych badań, przeprowadzonych analiz i wysuniętych wniosków. Dostarczają praktycznych wytycznych do zastosowania odpowiedniej metodyki pomiaru z wykorzystaniem technologii TLS w kontekście detekcji pęknięć powierzchni ścian obiektów budowlanych.

Dodatkowo, równie istotnym efektem niniejszych badań są opracowane w etapie laboratoryjnym profile oraz rozdział przeprowadzonych dyskusji. Elementy te dostarczają cennych wskazówek dotyczących właściwej interpretacji pozyskanych chmur punktów.

Choć zamierzone zadanie badawcze zostało pomyślnie zrealizowane, a postawiona hipoteza potwierdzona, w trakcie prowadzonych analiz pojawiły się interesujące wyniki, które wskazały kierunki warte dalszego zgłębiania i skłoniły doktorantkę do rozszerzenia zakresu badań. W związku z tym, w ramach pierwszego etapu programu badawczego, tj. *Technologia TLS w badaniach pęknięć powierzchni ścian obiektów budowlanych*, przeprowadzono dwa badania dodatkowe (Zadanie 1.1. oraz Zadanie 1.2.), których wyniki zaprezentowano poniżej.

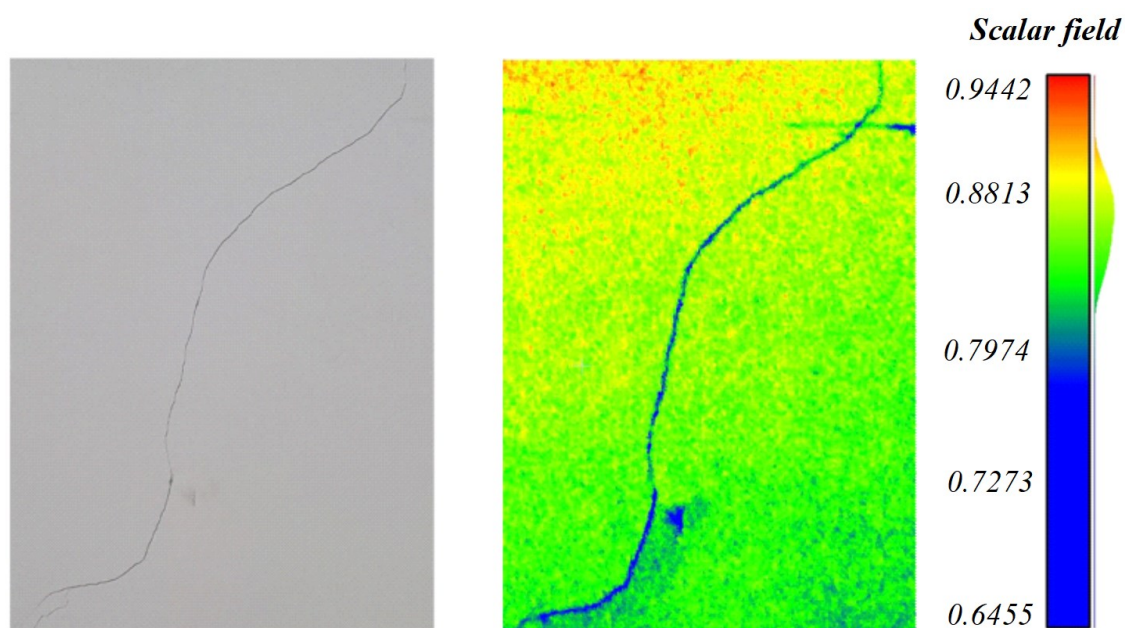
6.1.2 Informacja radiometryczna chmury punktów w detekcji rys powierzchni ścian obiektów budowlanych. Zadanie 1.1.

Analizy przeprowadzonych dotychczas badań podstawowych wykazały, że wykorzystując informację radiometryczną chmury punktów z pomiarów TLS, możliwe jest skuteczne wykrycie pęknięć o szerokości nawet 1 milimetra. Jednakże, możliwe jest to przy spełnieniu określonych warunków pomiarowych - stosunkowo niewielka odległość od skanowanego obiektu (maksymalnie około 10 m) oraz konieczność zachowania możliwie najmniejszego kąta padania wiązki lasera (najlepiej nieprzekraczającego 20°).

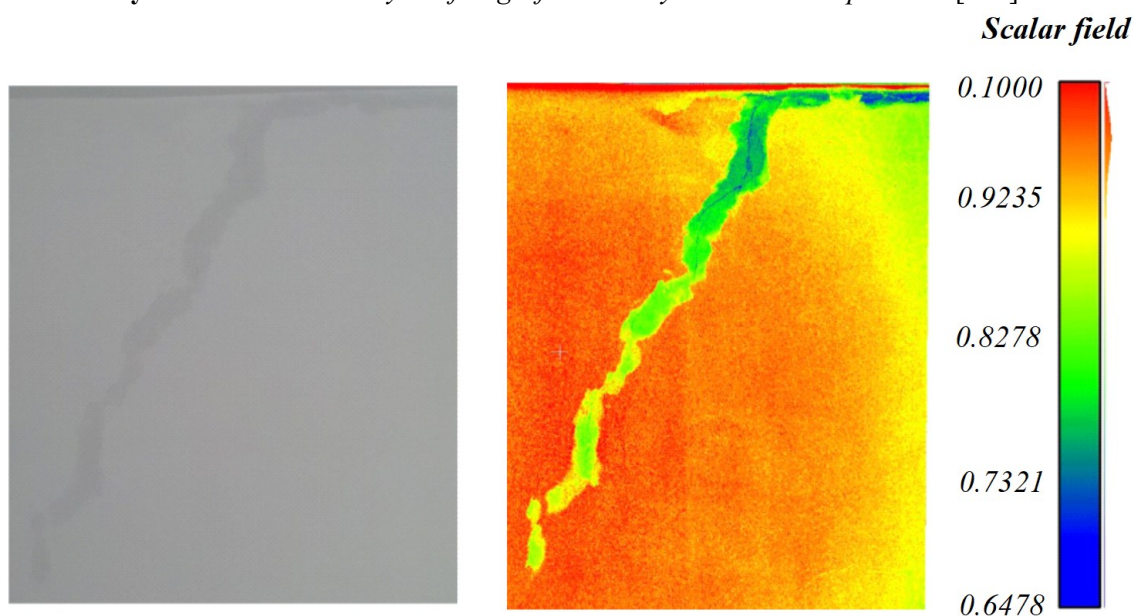
W związku z obiecującymi wynikami pojawiło się pytanie: czy możliwe jest również wykrywanie rys na podstawie parametru *intensity*, przy równie sprzyjających warunkach pomiarowych?

Polskie normy budowlane, oparte na Eurokodzie 2 (PN-EN 1992-1-1:2008), podają maksymalne dopuszczalne szerokości rys w elementach żelbetowych w zależności od klasy ekspozycji, czyli warunków środowiskowych w jakich znajduje się konstrukcja. Graniczne wartości dopuszczalnych szerokości rys wynoszą odpowiednio 0,3 mm lub 0,4 mm. W związku z powyższym, takie rysy stanowiły obiekt niniejszych badań.

Uwzględniając odpowiednie warunki pomiarowe, przeanalizowano dwa rodzaje defektów: rysę oraz rysę zaszpachlowaną. Warto podkreślić, że w przypadku rysy zaszpachlowanej jej wykrycie gołym okiem z odległości około 5 metrów stanowiło wyzwanie. Uzyskane wyniki przedstawiono poniżej (rysa – Rys.18., rysa zaszpachlowana – Rys. 19.). Pomiary przeprowadzono w rozdzielczości extremely high (0.8mm/10m).



Rys. 18. Analizowana rysa - fotografia oraz uzyskana chmura punktów [113].



Rys. 19. Analizowana rysa zaszpachlowana - fotografia oraz uzyskana chmura punktów [113].

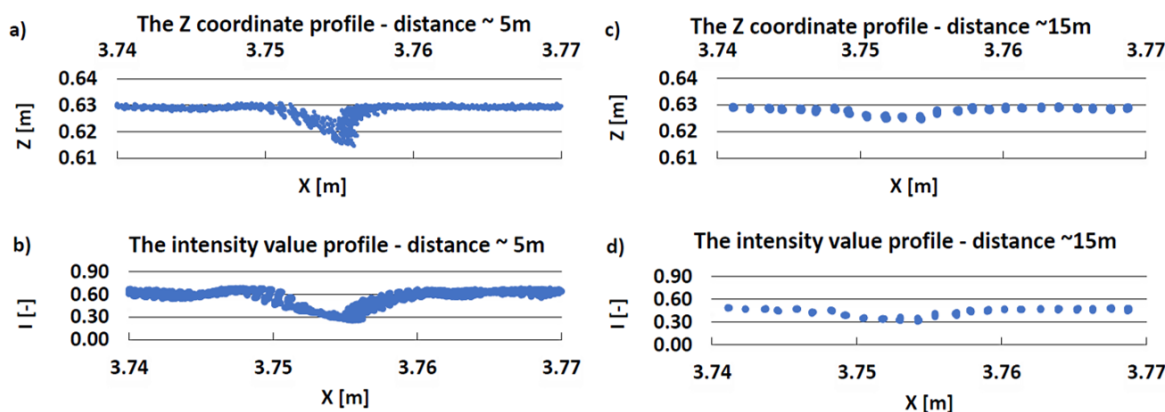
Uzyskane wyniki okazały się niezwykle zadowalające. Wykazano, że przy zachowaniu odpowiednich warunków pomiarowych, dane radiometryczne chmury punktów mogą stanowić skuteczne narzędzie do wykrywania rys. Szczególnie zaskakujące są wyniki dotyczące rysy zaszpachlowanej. Chmura punktów wyraźnie wykazała miejsce gdzie ponownie zaczęła powstawać rysa. Na podstawie parametru *intensity* możliwe jest potwierdzenie obecności rysy, jednak precyzyjne określenie szerokości w przypadku tak małych wartości stanowi wyzwanie. W detekcji rys, aby zapewnić dostateczną gęstość chmury punktów, kluczowe jest ustawienie maksymalnej rozdzielczości skanowania.

Przeprowadzone badania zostały zaprezentowane w publikacji P3.

6.1.3 Analiza wpływu odległości i kąta padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej na zdolność detekcji pęknięć. Zadanie 1.2.

Kolejne badania dodatkowe weryfikowały wpływ wzrostu kąta padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej na skuteczność detekcji pęknięć. Jest to bezpośrednio związane z odległością pomiędzy skanerem a skanowanym obiektem. Wraz ze zmniejszaniem się odległości kąt padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej wzrasta, co powoduje większe rozmycie plamki lasera i pogorszenie jakości uzyskanej chmury punktów. Testy te nabierają szczególnego znaczenia w sytuacjach, gdzie ze względu na warunki przestrzenne/otoczenie badanego obiektu pomiar musi być przeprowadzony z niewielkiej odległości, a pęknięcie znajduje się na dużej wysokości (np. pomiary wewnątrz małych przestrzeni, ściany sąsiednich budynków znajdujące się w bliskiej odległości).

To samo pęknięcie zostało zeskanowane w dwóch różnych warunkach pomiarowych, przy tym samym kącie padania wiązki lasera w płaszczyźnie poziomej ($\sim 0^\circ$). Pomiary przeprowadzono z rozdzielczością skanowania *extremely high* (0.8mm/10m). Warunki pomiarowe były następujące: pomiar nr 1 – odległość skanowania około 5 m i duży kąt padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej; pomiar nr 2 – odległość skanowania około 15 m i znacznie mniejszy kąt padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej. W związku z tym nasuwa się pytanie: pogorszenie którego z warunków pomiarowych – odległości czy kąta padania w płaszczyźnie pionowej – ma bardziej negatywny wpływ na jakość uzyskanych danych i możliwość detekcji pęknięcia? W badaniu analizowano pęknięcie o szerokości około 4 mm, a analizy obejmowały zarówno informacje geometryczną, jak i radiometryczną chmury punktów.



Rys. 20. Profile wygenerowane dla kąta padania wiązki lasera $\sim 0^\circ$ w płaszczyźnie poziomej oraz: odległości ~ 5 m (większy kąt padania w płaszczyźnie pionowej) (a, b); odległości ~ 15 m (mniejszy kąt padania w płaszczyźnie pionowej) (c, d) [113].

Na podstawie uzyskanych chmur punktów przygotowane zostały profile dla obu przypadków warunków pomiarowych (Rys. 20.).

Badania wykazały, że detekcja pęknięcia przy zachowaniu małej odległości skanowania była możliwa zarówno przy użyciu informacji geometrycznej, jak i parametru *intensity* – mimo dużego kąta padania w płaszczyźnie pionowej. W przeciwieństwie do pomiarów przy zachowaniu większej odległości – mimo znacznie mniejszego kąta padania w płaszczyźnie pionowej, niestety żadna z informacji nie była wystarczająco dokładna.

W związku z tym, na podstawie przeprowadzonych badań i analiz stworzonych profili wysunięto wniosek, że zwiększenie odległości ma bardziej negatywny wpływ na zdolność detekcji pęknięcia niż zwiększenie kąta padania w płaszczyźnie pionowej.

Badania uzupełniające przeprowadzone w ramach *Zadanie 1.1.* oraz *Zadanie 1.2.* zostały zaprezentowane w publikacji P3. Dostarczyły dodatkowej wiedzy na temat możliwości oraz ograniczeń technologii TLS w detekcji pęknięć oraz rys na powierzchniach ścian obiektów budowlanych. Potwierdzają one również hipotezę *H1* postawioną w rozprawie. Uzyskane wyniki wykazują kolejne wymagania i zasady których badacz powinien przestrzegać podczas wykonywania pomiarów, aby uzyskana chmura punktów była wartościowa i umożliwiała identyfikację pęknięć. Sformułowano dwa dodatkowe istotne wnioski:

- (1) parametr *intensity* może dostarczać cennych informacji o pogarszającym się stanie ściany już na bardzo wczesnym etapie dzięki możliwości detekcji rys, w odpowiednich warunkach pomiarowych. Wartość parametru *intensity* może stanowić wskazówkę, sugerując konieczność przeprowadzenia pomiarów kontrolnych w najbliższym czasie.
- (2) przy ustalaniu warunków pomiarowych, w celu uzyskania wartościowej chmury punktów, badacz powinien ustawić pozycję skanera TLS możliwie jak najbliżej badanego obiektu – nawet kosztem dużego kąta padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej i wynikającego z tego rozmycia plamki lasera. Zwiększenie odległości skanowania znacznie bardziej negatywnie wpływa na jakość chmury punktów niż wzrost kąta padania wiązki w płaszczyźnie pionowej.

Niniejsze badania stanowiły ostatni element I etapu programu badawczego dot. zastosowania technologii TLS w badaniach pęknięć na powierzchni ścian obiektów budowlanych.

6.2 Technologia TLS w detekcji zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych. Etap II programu badawczego.

Etap II programu obejmował badania nad zastosowaniem technologii TLS do detekcji i identyfikacji zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych. Energia wiatrowa, jako jedno z głównych źródeł zielonej energii, odgrywa coraz większą rolę w kontekście globalnego wyzwania jakim jest ocieplenie klimatu. Wraz z dynamicznym wzrostem udziału energii wiatrowej w odnawialnych źródłach energii, wzrasta zapotrzebowanie na innowacyjne i efektywne metody diagnostyki i konserwacji turbin. Badania wykazują, że zły stan techniczny łopaty znacząco obniża jej efektywność energetyczną. Dlatego regularne inspekcje stanu technicznego łopat są niezbędne, aby utrzymać wysoką wydajność turbiny i wydłużyć jej okres eksploatacji.

Ze względu na trudny dostęp do łopat turbin preferowane są techniki zdalne i nieniszczące. Obecnie najczęściej stosowaną metodą diagnostyczną jest fotogrametria, która choć skuteczna, wykazuje pewne ograniczenia, szczególnie w niekorzystnych warunkach atmosferycznych.

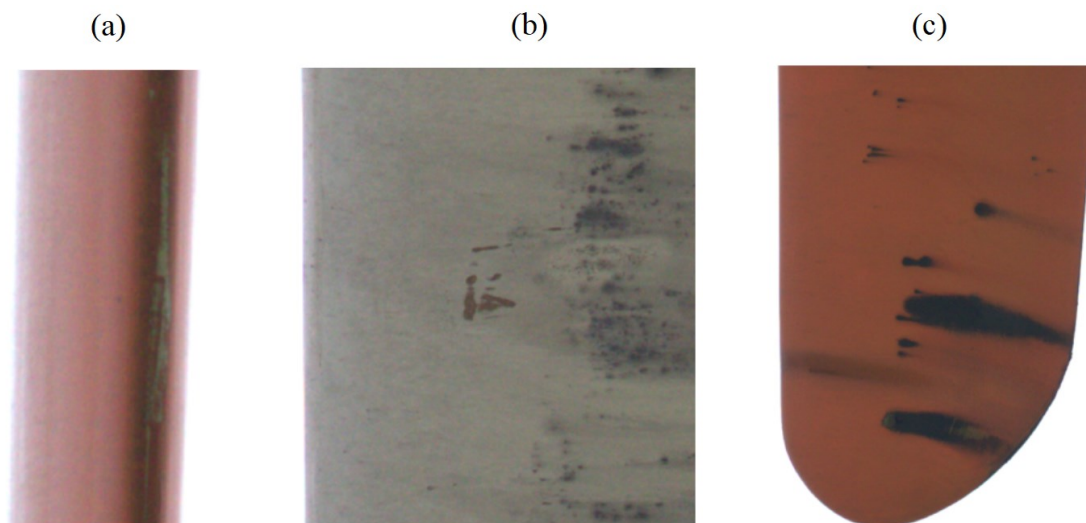
Technologia TLS, dzięki zdolności do szczegółowego odwzorowywania i analizy stanu technicznego obiektów budowlanych, stanowi potencjalną alternatywę dla dotychczas stosowanych metod. Dotychczasowe zastosowania TLS w sektorze energii wiatrowej skupiały się głównie na ocenie deformacji elementów turbin, takich jak odkształcenia wież czy skręt łopat. Natomiast wykorzystanie tej technologii do detekcji defektów powierzchniowych łopat pozostaje obszarem niezbadanym.

Doktorantka w swoich badaniach koncentruje się na analizie potencjału informacji radiometrycznej chmury punktów uzyskanej za pomocą technologii TLS do wykrywania i identyfikacji zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych. Badania obejmują defekty najczęściej występujące na łopatach takie jak erozja krawędzi natarcia, ubytki, pęknięcia oraz zarysowania powierzchni. Na Rys. 21. zostały zaprezentowane przykładowe uszkodzenia będące obiektem badań w podjętym zagadnieniu.

W ramach etapu II zrealizowano pięć zadań badawczych (**Zadanie 2 – Zadanie 6**). **Zadanie 2 oraz Zadanie 3** miały charakter badań wstępnych i stanowiły fundament dla dalszych badań. W **Zadaniu 2** dokonano pierwszej oceny możliwości wykorzystania informacji radiometrycznej chmur punktów do wykrywania zmian powierzchniowych łopat, wykorzystując bezpośredni dostęp do obiektu badań. Badania wykazały, że technologia TLS jest obiecującym narzędziem, co umożliwiło przejście do kolejnego etapu, czyli opracowania efektywnej metodyki pomiaru. **Zadanie 3** obejmowało badania już w ujęciu praktycznym. Opracowano i przetestowano dwie różne metodyki pomiaru, mające na celu optymalizację procesu pozyskiwania danych. W kolejnych zadaniach rozszerzono badania o jeszcze bardziej zaawansowane analizy. **Zadanie 4** skupiało się na analizie wpływu kąta padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej na jakość danych radiometrycznych w kontekście wykrycia zmian powierzchniowych łopaty turbiny wiatrowej, co pozwoliło na lepsze zrozumienie i wskazówki do sposobu interpretacji danych. **Zadanie 5** stanowiło kluczową część badań, w ramach której dokonano porównania wyników uzyskanych za pomocą technologii TLS z wynikami pomiarów fotogrametrycznych, oceniając

jej skuteczność. **Zadanie 6** miało charakter badań uzupełniających, w których sprawdzono, która długość fali wiązki lasera w badanym zakresie daje najlepsze rezultaty w wykrywaniu nieciągłości powierzchni.

Opis przebiegu oraz uzyskane wyniki z realizacji poszczególnych zadań z II etapu zostały w skróconej wersji przedstawione poniżej w podrozdziałach 6.2.1. - 6.2.5. Natomiast całość uzyskanych wyników została zaprezentowana w publikacjach P4 (*Zadania 2-3*) oraz P5 (*Zadania 4-6*), które to w pełnej swojej treści stanowią załącznik do niniejszej rozprawy.



Rys. 21. *Obiekt badań II etapu programu badawczego - przykładowe defekty powierzchniowe łopat turbin wiatrowych: (a) erozja krawędzi natarcia, (b) ubytki w powłoce żelowej (laminat został odsłonięty), (c) 'zabrudzenia olejem' oraz uszkodzenie systemu ochrony odgromowej [źródło: fotografie z udostępnionych pomiarów fotogrametrycznych].*

6.2.1 Badanie możliwości informacji radiometrycznej chmury punktów w detekcji zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych. Zadanie 2.

Badania przeprowadzone w ramach Zadania 2 były kluczowe dla całego II etapu programu badawczego, stanowiąc fundament dla kolejnych zadań realizowanych w rozprawie doktorskiej. Ze względu na brak w dotychczasowym stanie wiedzy badań, które jednoznacznie potwierdzałyby przydatność technologii TLS w detekcji defektów powierzchniowych łopat turbin wiatrowych, a w szczególności informacji radiometrycznej chmury punktów, przeprowadzono badania pilotażowe. Ich celem było wstępne zweryfikowanie hipotezy drugiej postawionej w rozprawie.

Aby zrealizować Zadanie 2, badania składały się z dwóch etapów. Pierwszym etapem były pomiary zrealizowane z niewielkiej odległości, wynoszącej około 5–7 m od badanej łopaty. Pomiary przeprowadzono z rozdzielczością skanowania *ultra-high*, co w zastosowanym skanerze odpowiada 1.6mm/10m. Pomiary bliskiego zasięgu przeprowadzono dzięki współpracy z firmą specjalizującą się w inspekcjach stanu technicznego łopat turbin wiatrowych. W ramach przeprowadzanych prac konserwacyjnych zdemontowano łopaty jednej z turbin. Natomiast drugi etap to pomiary tych samych łopat, wykonane w odległości rzędu 60–70 m (rozdzielczość skanowania *extremely-high*;

0.8mm/10m). Analizowane łopaty w momencie przeprowadzania badań miały 20 lat eksploatacji. Łopaty umieszczone na powierzchni ziemi zostały zeskanowane, co stworzyło dogodne warunki do późniejszej szczegółowej analizy pod kątem identyfikacji oraz charakterystyki jej defektów powierzchniowych. Na Rys. 22. przedstawiono fotografię skanowanych łopat.

Opisana procedura pomiarowa miała zasadnicze znaczenie dla całego programu badawczego i realizowała dwa kluczowe cele. Po pierwsze, bezpośredni dostęp do defektów umożliwił porównanie wizualnej oceny uszkodzeń łopat z uzyskanymi chmurami punktów, dostarczając wiedzy na temat wpływu konkretnego typu defektu na zmiany wartości parametru *intensity* chmury punktów. Po drugie, pomiar tych samych uszkodzeń z dwóch różnych odległości pozwolił na porównanie uzyskanych chmur punktów i dokonanie szczegółowej oceny wpływu zwiększenia odległości skanowania na możliwość detekcji defektów łopat z zastosowaniem technologii TLS. Tego rodzaju analizy są niezwykle istotne z praktycznego punktu widzenia i rzeczywistych warunków pomiarowych. W docelowych warunkach pomiarowych łopaty pozostają zamocowane na turbinie, co skutkuje koniecznością przeprowadzania skanowania z odległości wynoszącej co najmniej 50 m (założenie dla turbin o wysokości wieży około 70 m) dla zapewnienia racjonalnego kąta padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej. Zarówno odległość skanowania, jak i kąt padania wiązki są kluczowymi parametrami pomiaru, które bezpośrednio wpływają na jakość uzyskanych chmur punktów. Odpowiednia pozycja skanera względem turbin i odległość skanowania ma strategiczne znaczenie dla efektywności detekcji defektów.

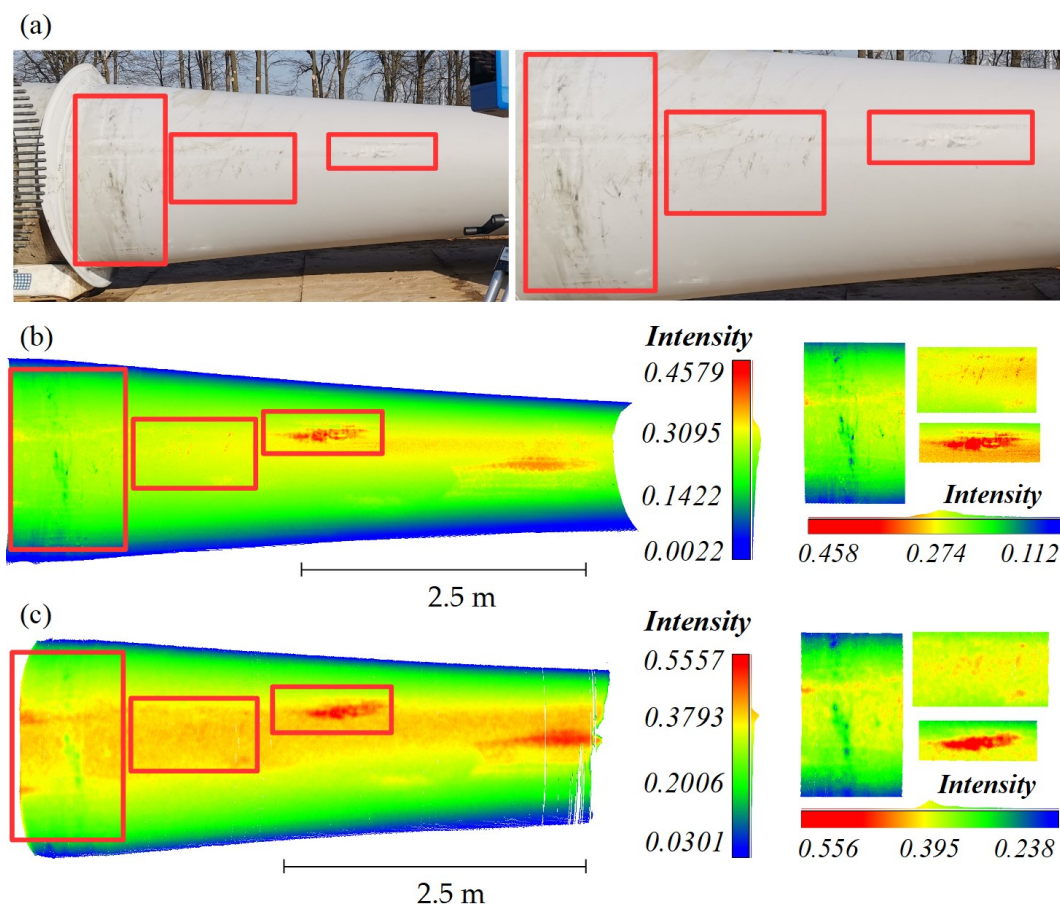


Rys. 22. Obiekt badań w Zadaniu 2. – fotografia skanowanych łopat turbin wiatrowych [114].

Wyniki badań były zgodne z założeniami i wykazały wysoką skuteczność technologii TLS w detekcji defektów powierzchniowych łopat turbin wiatrowych.

W pierwszym etapie, analiza porównawcza rzeczywistego wyglądu uszkodzeń z chmurami punktów uzyskanymi z pomiarów bliskiego zasięgu jednoznacznie wskazała, że dane radiometryczne pozyskane za pomocą TLS wiernie odwzorowują fizyczny stan powierzchni badanych łopat. Rozkład zmian wartości *intensity* z wysokim stopniem wiarygodności odzwierciedlał kształty oraz rozmiary wykrytych uszkodzeń. Uzyskane wyniki dostarczyły ważnych informacji i stanowiły podstawę dla drugiego etapu badań.

Dokładne odwzorowanie defektów z bliska stanowiło punkt odniesienia i umożliwiło walidację skuteczności pomiarów prowadzonych z większych dystansów, co z kolei ma kluczowe znaczenie dla zastosowań praktycznych technologii TLS w diagnostyce łopat turbin wiatrowych. W tym celu, te same uszkodzone fragmenty łopaty, które zostały zeskanowane w bliskim zasięgu, zostały ponownie zeskanowane z odległości 60–70 m, a uzyskane wyniki porównano. Analizy porównawcze przykładowych defektów (przetarcia powłoki) przedstawiono na Rys. 23.



Rys. 23. Obiekt badań w Zadaniu 2. – testowana łopata: (a) fotografia, (b) pomiary bliskiego zasięgu oraz (c) pomiary dalekiego zasięgu [114].

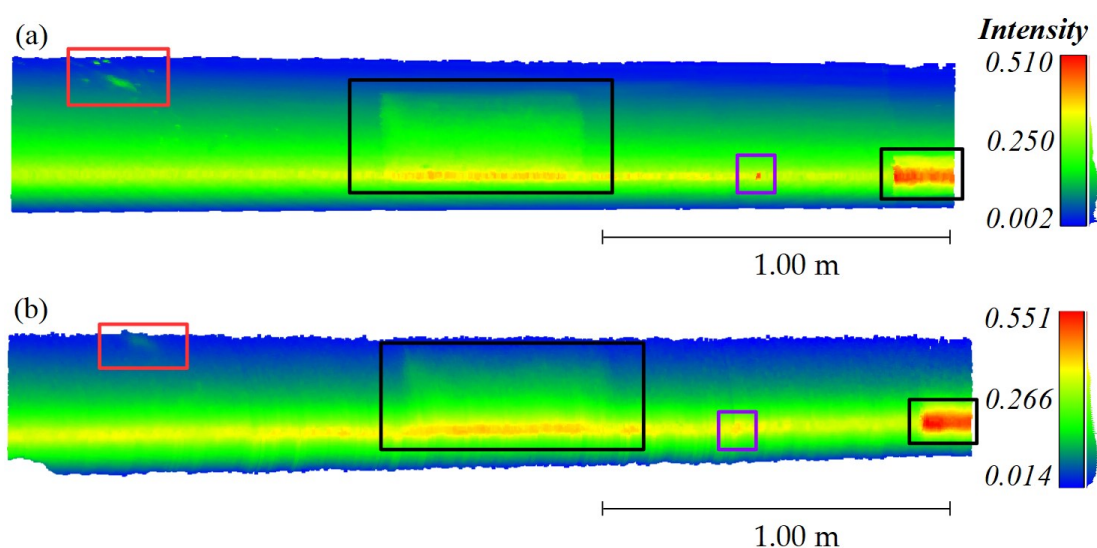
Już wstępne porównania wskazały na znaczące podobieństwa pomiędzy chmurami punktów uzyskanymi z pomiarów bliskiego i dalekiego zasięgu. Wyniki te podkreślają bardzo ważną kwestię w analizach informacji radiometrycznej chmur punktów w kontekście detekcji niewielkich defektów – szczegółowa analiza, obejmująca mniejsze fragmenty

chmur punktów, pozwala na uzyskanie zdecydowanie bardziej efektywnych rezultatów. Po prawej stronie Rys. 23. przedstawiono rozkład wartości *intensity* dla analizowanych defektów. Wyselekcjonowane fragmenty chmur punktów (obszary uszkodzeń łopaty) charakteryzują się dużym stopniem zgodności. Chmury punktów uzyskane z dużych odległości w znacznym stopniu wiarygodności odwzorowują defekty łopaty.

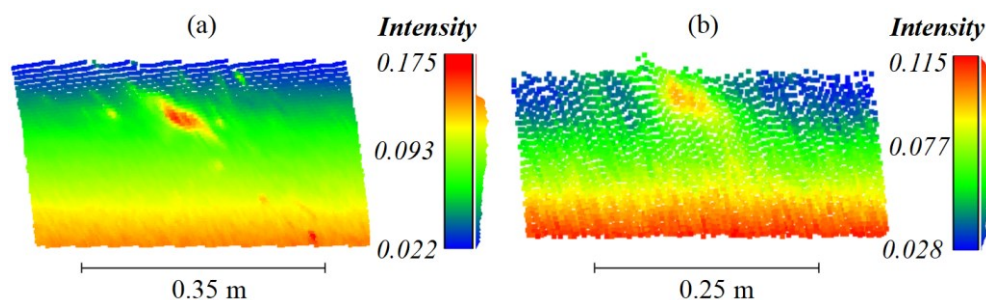
Analogiczne analizy i porównania przeprowadzono dla wielu defektów. Kompleksowe analizy wszystkich łopat umożliwiły wyodrębnienie różnych scenariuszy detekcji: detekcja defektów z obu odległości (obszar zaznaczony na czerwono na Rys. 24 oraz Rys. 25); detekcja naprawionych fragmentów z obu odległości (obszary zaznaczone na czarno na Rys. 24); oraz detekcja defektów możliwa jedynie w pomiarach bliskiego zasięgu (obszar zaznaczony na fioletowo na Rys. 24).

Szczególnie interesujący i wart omówienia okazał się przypadek defektu oznaczonego na czerwono. Uzyskane wyniki po raz kolejny dowiodły, że przy odpowiedniej staranności oraz szczegółowej analizie małych fragmentów, technologia TLS może być niezwykle skuteczna, nawet w sytuacjach gdy dane wyjściowe wydają się na pierwszy rzut oka mało obiecujące. Chmura punktów uchwycona z dużej odległości i analizowana w całości, w tym omawianym obszarze pokazywała tylko delikatne zmiany wartości parametru *intensity*. Taka informacja była wskazówką, że w tym obszarze łopaty może występować defekt. Dalsza analiza, wyselekcjonowanego już fragmentu (Rys. 25), pozwoliła na odwzorowanie defektu, wystarczająco wyraźnie ukazując jego kształt oraz wymiary.

Istotnym czynnikiem wpływającym na widoczność danego defektu jest zakres skali wartości parametru *intensity*. Analiza chmury punktów w całości, która obejmowała przedział parametru *intensity* od 0,014 do 0,551 (zakres $\sim 0,54$) skutkowało mniejszą szczegółowością odwzorowania drobnych zmian. Wyselekcjonowanie mniejszego fragmentu w obrębie defektu pozwoliło na uzyskanie znacznie węższego zakresu wartości *intensity* od 0,028 do 0,115 (zakres $\sim 0,09$), co poskutkowało większą szczegółowością odwzorowania i umożliwiło detekcję defektu. Wyniki te potwierdzają znaczenie szczegółowych analiz.



Rys. 24. Otrzymane chmury punktów oraz obszary wybrane do analiz: (a) pomiar bliskiego zasięgu (b) pomiar dalekiego zasięgu [114].



Rys. 25. Fragment łopaty wybrany do analiz (obszar czerwony na Rys. 24.): (a) pomiary bliskiego zasięgu (b) pomiary dalekiego zasięgu [114].

Szczegółowe analizy przeprowadzono również koncentrując się na defektach, które nie zostały wykryte z dużej odległości (jako przykład, obszar zaznaczony na fioletowo na Rys. 24). Warto zaznaczyć, że analizowany defekt był mały do tego stopnia, że był ledwie dostrzegalny na fotografii wykonanej z kilku metrów od obiektu. Wymiary tego defektu zostały określone przy użyciu oprogramowania CloudCompare, na podstawie chmury punktów uzyskanej z pomiarów bliskiego zasięgu która go uwidoczniła. Okazało się, że defekt miał wymiary około $10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ (Fig. 9 w publikacji P4). Trudność w wykryciu tego uszkodzenia z dużej odległości była bezpośrednio związana z rozmiarem plamki lasera, która wzrasta wraz z odległością skanowania. Dla przykładu, przy odległości skanowania wynoszącej około 70 m, średnica plamki lasera dla użytego skanera osiąga około 24 mm. Jeżeli rozmiar defektu jest mniejszy od średnicy plamki lasera, możliwość jego wykrycia znacząco maleje lub może być to całkowicie niemożliwe. Chociaż taka sytuacja może być postrzegana jako ograniczenie technologii TLS, jednocześnie prowadzi do bardzo ważnego wniosku. Jeśli uszkodzenie zostaje wykryte za pomocą TLS z dużej odległości (w tym przypadku 70 m), wskazuje to na fakt, że jego wymiar/średnica najprawdopodobniej wynosi co najmniej 20 mm. Jest to kluczowa informacja w kontekście praktycznych zastosowań. Z punktu widzenia właścicieli turbin wiatrowych, diagnostyka i naprawa defektów o wymiarach rzędu kilku milimetrów nie jest priorytetem. W praktyce naprawiane są przede wszystkim uszkodzenia o wymiarach co najmniej kilku centymetrów, w zależności od ich rodzaju i potencjalnych konsekwencji dla funkcjonowania turbiny.

Przeprowadzone badania i analizy pozwoliły w pełni zrealizować Zadanie 2, oraz wstępnie potwierdzić drugą z postawionych w niniejszej rozprawie doktorskiej hipotezę.

(H2) Dane radiometryczne z pomiarów naziemnego skaningu laserowego umożliwiają detekcję zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych.

Zrealizowanie zadania doprowadziło do wysunięcia następujących wniosków:

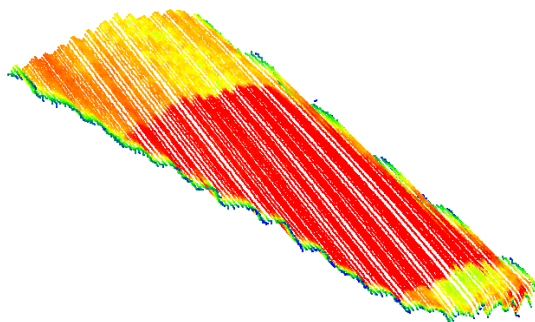
- (1) informacja radiometryczna chmur punktów uzyskanych przy wykorzystaniu technologii TLS może służyć do oceny stanu technicznego łopat turbin wiatrowych w kontekście detekcji uszkodzeń w ich zewnętrznej strukturze, takich jak ubytki, zarysowania oraz oznaki erozji;
- (2) mimo pewnych ograniczeń, technologia TLS spełnia wymogi w ujęciu praktycznym, tj. detekcji defektów o istotnym znaczeniu technicznym.

Mimo pozytywnych wniosków, istnieje jedna istotna kwestia, która wymaga szczególnej uwagi. Aby przeprowadzenie takich pomiarów było możliwe, konieczne jest zatrzymanie pracy turbiny. Unieruchomienie łopat umożliwia ich dokładne zeskanowanie. Jest to jednak kosztowne, ponieważ przestój w pracy turbiny wpływa na obniżenie jej produktywności i generuje straty. Dlatego kolejnym kluczowym zadaniem pozostaje opracowanie metodyki pomiarowej, która pozwoli zminimalizować czas pomiaru przy jednoczesnym zachowaniu dobrej jakości danych. Niniejszy problem badawczy został podjęty w ramach Zadania 3 rozprawy.

6.2.2 Opracowanie metodyki pomiaru technologią TLS w kontekście detekcji zmian powierzchniowych łopat turbiny wiatrowej – analizy porównawcze dwóch zaproponowanych metodyk pomiarowych. Zadanie 3.

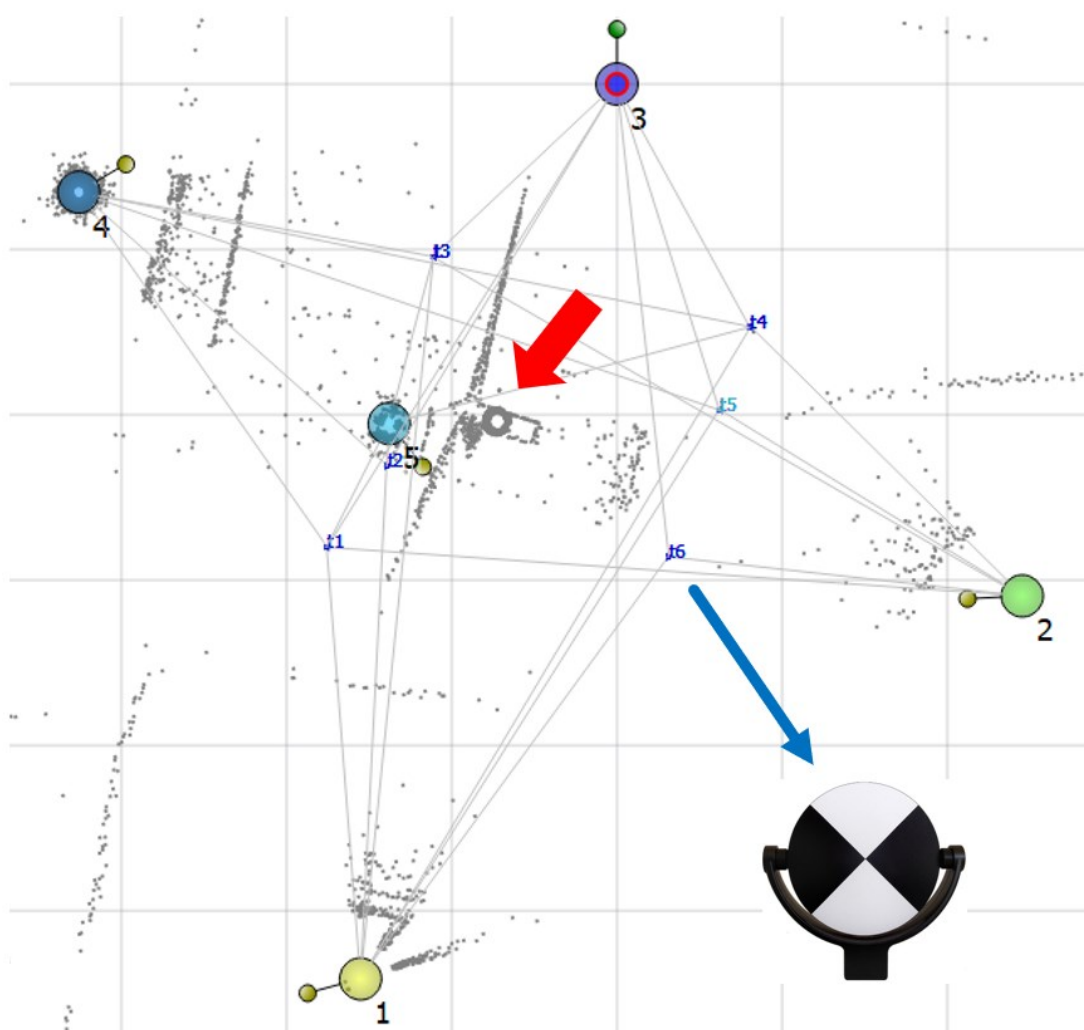
Badania podjęte w ramach Zadania 3 realizowały dwa istotne cele. Po pierwsze, opracowanie i analizę zaproponowanych metodyk pomiarowych z wykorzystaniem technologii TLS, w kontekście detekcji defektów łopat turbin wiatrowych. W ramach tych badań opracowano dwie metodyki pomiaru, które porównano z uwzględnieniem dwóch podstawowych kryteriów – ich efektywności oraz aspektu ekonomicznego związanego z ich zastosowaniem. Po drugie, celem było przeprowadzenie weryfikacji hipotezy $H2$ w ujęciu praktycznym, tj. sprawdzenie, czy informacja radiometryczna chmur punktów uzyskanych za pomocą technologii TLS umożliwia detekcję defektów łopat w rzeczywistych (docelowych) warunkach pomiarowych gdy łopaty są już zainstalowane na turbinie. Docelowe warunki geometryczne pomiaru, tj. odległość skanowania i kąt padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej, mają kluczowy wpływ na jakość uzyskanych chmur punktów.

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły założenia doktorantki, że wykorzystanie informacji geometrycznej chmury punktów w detekcji defektów łopat jest nieskuteczne. Pomimo zatrzymania turbiny na czas pomiaru, łopaty pozostają w stanie nieustannego (choćby niewielkiego) drgania wywołanego oddziaływaniem wiatru. Zjawisko to powoduje znaczne pogorszenie jakości danych geometrycznych. Na Rys. 26 przedstawiono fragment chmury punktów ilustrujący omawiany problem. Widoczny efekt "falującej powierzchni" stanowi konsekwencję drgań łopaty w trakcie skanowania, co skutecznie uniemożliwia wykrywanie defektów powierzchniowych na podstawie informacji geometrycznej chmury punktów.



Rys. 26. Informacja geometryczna chmury punktów w badaniach defektów powierzchniowych łopat turbin wiatrowych z wykorzystaniem technologii TLS.

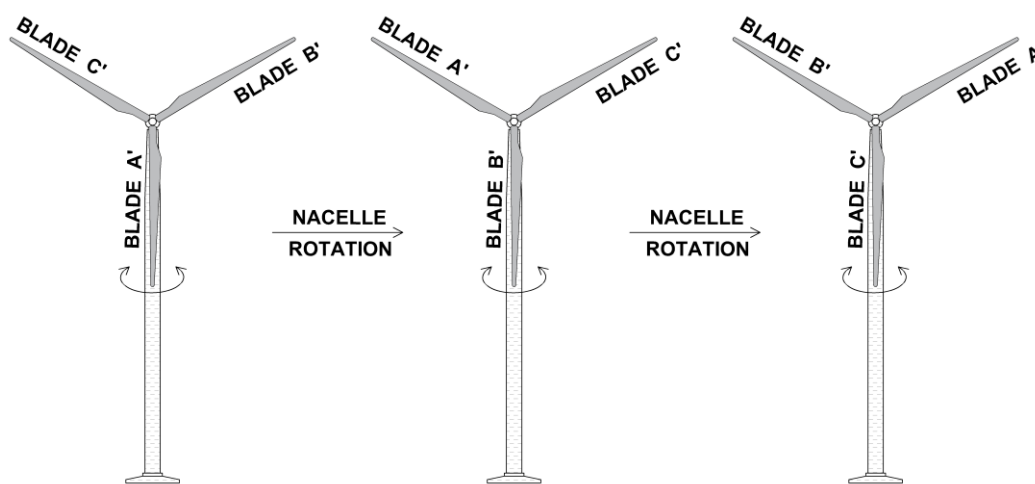
Opracowano pierwszą metodykę pomiaru (ozn. jako metoda nr. 1) dla której procedura pomiarowa przebiegała następująco: turbina została zatrzymana i łopaty turbiny podczas całego procesu pomiaru pozostawały w stanie spoczynku, podczas gdy pozycje skanera były odpowiednio ustalone względem turbiny i zmieniane. Schemat metodyki pomiaru przedstawiono na Rys. 27. Po analizie sytuacji terenowej (tj. ustawienie łopat turbiny) uznano, że pięć lokalizacji skanera będzie optymalnym rozwiązaniem (stanowiska skanera zostały oznaczone jako 1–5 na Rys. 27). Podczas sesji pomiarowej wykorzystano sztuczne cele Z + F profi (oznaczone jako t1–t6 na Rys. 27), które na etapie pre-processingu umożliwiły rejestrację wszystkich uzyskanych chmur punktów w jednym układzie współrzędnych, co z kolei pozwoliło na stworzenie kompletnego modelu 3D turbiny. Parametry badanej turbiny: turbina o mocy 2 MW, wysokość wieży – 80 m, wiek łopat – 24 lata. Zarówno cele Z + F profi jak i łopaty turbin zostały zeskanowane z rozdzielczością *extremely high* (0.8mm/10m).



Rys. 27. Schemat metodyki pomiaru - metoda nr. 1 [114].

Opracowano drugą metodykę pomiaru (ozn. jako metoda nr. 2), dla której procedura pomiarowa przebiegała następująco: łopaty turbiny były poruszane w trakcie pomiaru, podczas gdy skaner znajdował się w jednej, stałej pozycji przez cały czas. Kluczową rolę w realizacji tej metodyki odgrywała współpraca z operatorem odpowiedzialnym

za sterowanie turbiną w trakcie pomiarów. Proces sterowania obejmował rotację łopat w sposób umożliwiający ich pełne skanowanie. Schemat metody pomiarowej nr. 2 oraz sposób obrotu łopat przedstawiono na Rys. 28. W pierwszym kroku łopata A' była ustawiona w pozycji skierowanej w dół; preferowane było równoległe ustawienie względem wieży turbiny. Następnie łopata była obracana wokół swojej osi tak, aby jedna z jej powierzchni (SS lub PS) była skierowana w stronę skanera. Wówczas dokonano pierwszego skanowania. Po dokonaniu pierwszego pomiaru łopata była obracana przez operatora o około 90° i wykonano kolejne pomiary dla kolejnej strony danej łopaty A'. Procedurę powtarzano do momentu, aż wszystkie cztery strony łopaty zostały zeskanowane. Następnie wirnik turbiny był przekręcany, a pomiary drugiej i trzeciej łopaty (łopaty B' oraz C') realizowano w sposób analogiczny do pomiarów pierwszej. Parametry badanej turbiny: turbina o mocy 2 MW, wysokość wieży – 100 m, wiek łopat – 15 lat. Łopaty turbiny zostały zeskanowane z rozdzielczością *extremely high* (0.8mm/10m).



Rys. 28. Schemat metodyki pomiaru - metoda nr. 2 [114].

Pierwszego porównania dokonano pod kątem efektywności zastosowanej metodyki (pierwsze kryterium). W przeprowadzonych analizach nie skupiano się na szczegółowej identyfikacji defektów, lecz na ogólnej ocenie możliwości danej metodyki. Przeanalizowano skuteczność zeskanowania łopat z wykorzystaniem danej metodyki pomiaru, przy czym za pożądane uznano rozwiązanie umożliwiające kompleksowe zeskanowanie każdej z trzech łopat. Łopaty zostały oznaczone jako A,B,C dla metody nr.1, oraz A'B'C' dla metody nr. 2, zgodnie z nomenklaturą przyjętą przez operatora turbiny. Post-processing polegał na analizie chmur punktów, mającej na celu identyfikację obszarów które zostały skutecznie zeskanowane i ogólną ocenę stopnia zeskanowania. Posumowano rezultaty pomiarów i dla każdej z metod sformułowano wnioski.

Najistotniejszym faktem było, że uzyskane chmury punktów potwierdziły hipotezę H2 i wykazały, że informacja radiometryczna z pomiarów technologią TLS może być z powodzeniem wykorzystane do oceny stanu technicznego łopat w kontekście lokalizacji jej defektów powierzchniowych. W przypadku mniejszych defektów, analiza pełnej uzyskanej chmury punktów niekiedy powoduje, że są one odwzorowane niewystarczająco wyraźnie. Podział chmur punktów na sekcje, skutkujący zmianą rozkładu wartości

parametru *intensity*, znacznie zwiększa szczegółowość ich odwzorowania. Taki przykład przedstawiono w Publikacji P4, gdzie zaprezentowano chmurę punktów uzyskaną przy zastosowaniu metody nr. 1 dla SS łopaty B (Fig. 10.; publikacja P4). W metodzie nr. 2 nawet bez podziału uzyskanej chmury punktów na mniejsze fragmenty wiele defektów jest widocznych już bardzo wyraźnie.

Metoda nr. 1 umożliwiła zeskanowanie:

- Pozycja 1: fragment PS łopaty A, SS łopaty B oraz fragment PS łopaty C;
- Pozycja 2: SS i TE łopaty A, fragmentów TE i PS łopaty B, SS i TE łopaty C;
- Pozycja 3: TE oraz fragmentów PS i SS łopaty A, PS łopaty B oraz SS łopaty C;
- Pozycja 4: PS łopaty A, LE łopaty B oraz SS łopaty C;
- Pozycja 5: TE i PS łopaty A, fragmentu SS łopaty B oraz fragmentu SS łopaty C;

Analizując zaproponowaną metodę pod kątem jej efektywności (ocena stopnia zeskanowania), mimo dużej ilości danych obejmującej liczne chmury punktów, niestety nie uzyskano kompleksowych pomiarów łopat turbiny. Na uzyskane wyniki wpływ miał układ łopat, tj. zatrzymanie turbiny oraz pozostawienie łopat w ich standardowej pozycji. Zeskanowanie krawędzi LE łopaty A okazało się niemożliwe, mimo że wybrane stanowisko pomiarowe wskazywało, że wiązka lasera powinna ją uchwycić. Wyniki potwierdziły, jak kluczowe dla efektywności skanowania jest ustawienie skanera oraz obiektu badań i jednocześnie podkreśliły potrzebę weryfikacji metod pomiarowych w rzeczywistych warunkach pomiarowych.

Na tym etapie wysunięto również istotny wniosek dotyczący krawędzi TE. Z uwagi na jej specyficzny kształt oraz wymiary, zeskanowanie jej samej w sobie jest niezwykle trudnym wyzwaniem. Niemniej jednak, chmura punktów obejmująca TE może zostać odtworzona na etapie post-processingu poprzez dokładne zeskanowanie powierzchni SS i PS. Taki zabieg jest możliwy dzięki zastosowaniu tarczek Z +F i późniejszemu połączeniu chmur punktów w model turbiny. Warunkiem koniecznym jest bardzo dokładne zeskanowanie obu powierzchni, tak aby obejmowały one cały zakres, aż do samej ich „krawędzi”.

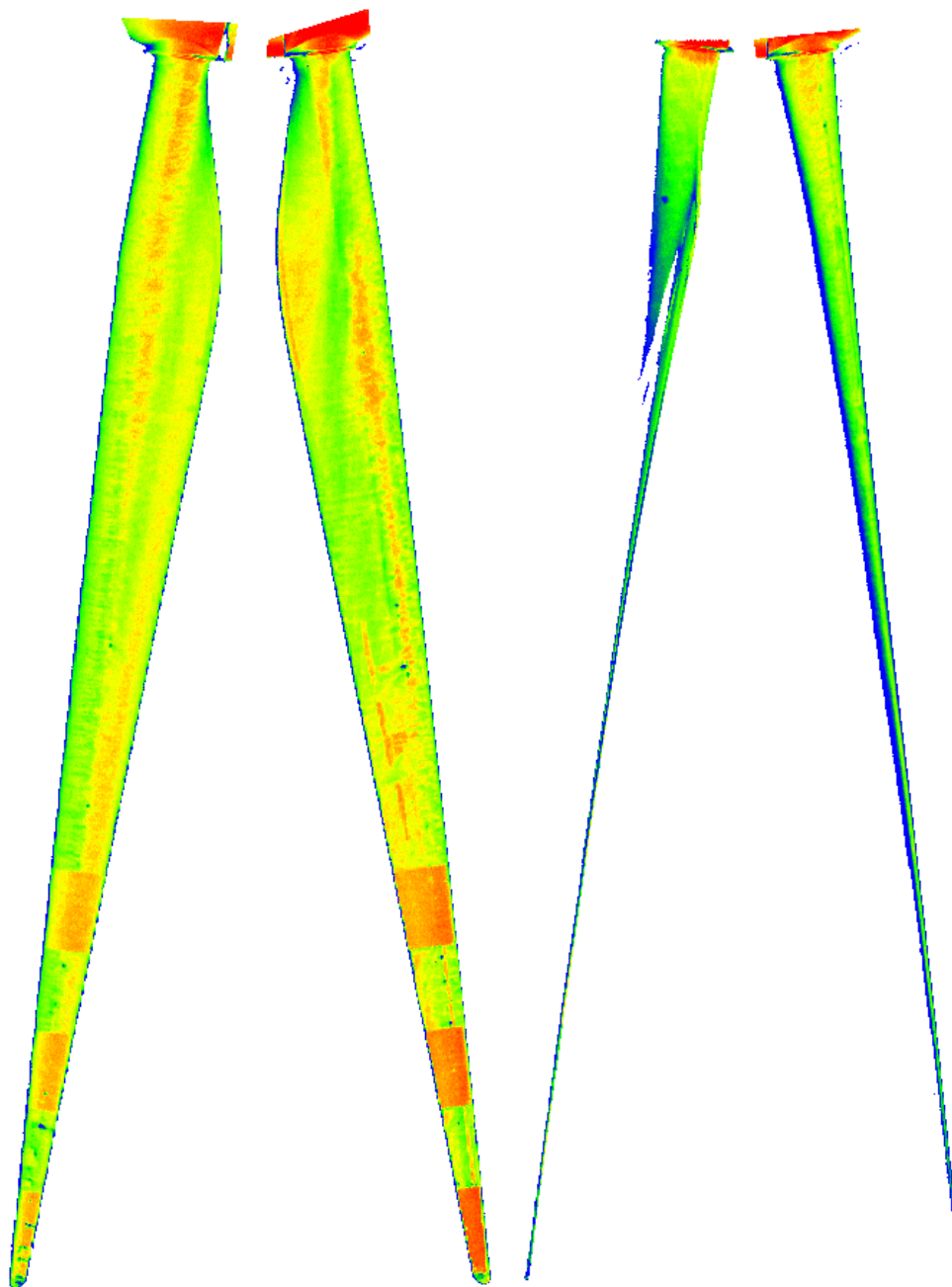
Dla metody nr. 2 już na wczesnym etapie post-processingu wyciągnięto pierwsze wnioski. Jak wspomniano wcześniej, ta metoda pomiarowa zakłada zastosowanie jednej pozycji skanera i rotację łopat turbiny. Dzięki takiemu podejściu, uzyskane rezultaty dla wszystkich łopat są powtarzalne, wykazują jednolity schemat, a cały proces analizy staje się bardziej klarowny i przyjazny dla badacza.

Analizując rozwiązanie zaproponowane w metodzie nr. 2 pod kątem efektywności potwierdzono, że zapewnia ono kompleksowy pomiar łopat, obejmujący zeskanowanie wszystkich czterech stron każdej z łopat (PS, SS, LE i TE). W porównaniu do metody nr.1, przy zastosowaniu metody nr. 2 nie występują ‘puste pola’, tj. obszary łopat których nie udało się zeskanować. Przykład takiego kompleksowego zestawu danych przedstawiono poniżej na Rys. 29., gdzie zaprezentowano chmury punktów uzyskane dla łopaty A’.

Na podstawie chmur punktów uzyskanych tą metodą, przeprowadzono bardziej szczegółowe analizy przykładowych defektów, z których niektóre zostały zaprezentowane w publikacji P4 (Fig. 12 oraz Fig. 13). Dla dwóch defektów wykonano przekrój przez

ich środek i opracowano profil rozkładu wartości parametru *intensity*, który wykazał znaczne obniżenie wartości parametru *intensity* w uszkodzonych obszarach. Dla innego defektu określono jego wymiary, co pozwoliło zobrazować jakie uszkodzenia mogą zostać wykryte pomimo znacznej odległości skanowania. Zaprezentowane wyniki nie tylko ponownie potwierdzają, ale również wyraźnie ilustrują skuteczność informacji radiometrycznej w wykrywaniu defektów łopat turbin wiatrowych już w rzeczywistych warunkach pomiarowych.

Na podstawie chmur punktów uzyskanych tą metodą, wyciągnięto także istotny wniosek dotyczący krawędzi TE łopaty. Mimo tak dogodnych warunków pomiaru, bezsprzecznie TE nadal stanowi najbardziej problematyczny obszar inspekcji.



Rys. 29. Przykładowy zestaw danych przy zastosowaniu metodyki pomiaru nr. 2 – chmury punktów uzyskane dla łopaty A' [114].

Podsumowanie przeprowadzonych analiz dla obydwu metod pomiaru zostało zestawione poniżej w Tabeli 6, gdzie symbole '+', '-', oraz '+/-' oznaczają, że powierzchnia/krawędź łopaty została zeskanowana, nie została zeskanowana lub została zeskanowana częściowo.

Tabela 6. Zestawienie analiz uzyskanych danych w kontekście efektywności metodyki pomiarowej (metoda nr. 1 vs. metoda nr. 2) [114].

	Method No. 1			Method No. 2
	A	B	C	A' / B' / C'
PS	+	+	+/-	+
LE	-	+*	-	+*
SS	+	+	+	+
TE	+**!	+/-**!	+**!	+

gdzie:

- * – pomiar LE łopaty możliwy, jednak odpowiednia jakość danych osiągnięta do około 65% długości łopaty;
- ** – pomiar TE łopaty możliwy, jednak odpowiednia jakość danych osiągnięta do około 25% długości łopaty;
- ! – wąska TE w odległych częściach łopaty analizowana jako połączenie krawędzi powierzchni SS i PS łopaty.

Dodatkowo, zostały przeprowadzone także analizy i dyskusje w kontekście jakości uzyskanych chmur punktów. W przypadku powierzchni PS oraz SS łopat, dla obydwu metodyk pomiaru sytuacja jest jednoznaczna. Bardziej szczegółowe analizy były niezbędne w odniesieniu do krawędzi natarcia (LE) oraz krawędzi spływu (TE).

Niestety, w przypadku metody nr. 1, pozycja w jakiej zatrzymano łopaty turbiny, uniemożliwiła efektywny pomiar LE łopat A i C. W przypadku łopaty B pomiar LE był możliwy, jednak analiza uzyskanych chmur punktów wykazała, że około 65% długości LE łopaty (licząc od gondoli) może zostać zeskanowana z dostateczną jakością. Wynika to z faktu, że szerokość LE zmniejsza się wraz z odległością od gondoli. Analogiczna sytuacja występuje dla pomiarów LE łopat mierzonych z wykorzystaniem metody nr. 2. Niniejsze dyskusje zostały oznaczone w Tabeli 6. symbolem „*”.

Podobny problem wystąpił podczas analiz TE. Zadowalający pomiar był możliwy jedynie dla około 25% długości łopaty, tj. w pobliżu gondoli, gdzie szerokość TE jest większa. Wyniki tych dyskusji zostały oznaczone w Tabeli 6. symbolem „**” dla pomiarów uzyskanych obiema metodami.

Dodatkowo, w przypadku pomiarów TE za pomocą metody nr 1, zastosowano symbol „!”. Jak już wspomniano wcześniej – w odległych częściach łopaty TE jest tak wąska, że można ją uznać za połączenie powierzchni SS i PS łopaty, zamiast traktować ją jako „oddzielny obszar”. Konieczne jest uzyskanie satysfakcjonujących skanów obu tych powierzchni. Potwierdzenie, czy udało się prawidłowo odwzorować TE, jest możliwe dopiero po połączeniu chmur punktów i stworzeniu modelu łopaty. W przypadku metody nr 2 sytuacja jest bardziej jednoznaczna. W tej metodzie, ustawienie łopat umożliwia

dokładne zeskanowanie tych powierzchni „od krawędzi do krawędzi” i warunek uzyskania satysfakcjonujących skanów powierzchni SS oraz PS jest spełniony.

W związku z powyższym, porównania pod względem jakości pozyskanych chmur punktów również wskazały na korzyść dla metody nr. 2. W przypadku metody nr. 2 warunki geometryczne dla całego pomiaru pozostają takie same, co pozwala uzyskać tę samą dokładność pomiaru dla wszystkich powierzchni/krawędzi łopat. W metodzie nr. 1 zróżnicowane pozycje skanera oraz odległości od łopat powodują zmienność w dokładności pozyskiwania danych. Ustawienie łopat powoduje, że jedna z nich jest skierowana ku górze i dla niej warunki geometryczne pomiaru są najmniej korzystne (w niniejszych badaniach łopata B). Dla końcowego odcinka łopaty, który znajduje się najwyżej i jednocześnie najdalej od skanera, jakość uzyskanej chmury punktów jest najmniejsza. Aby zachować racjonalny kąt padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej na łopatę B, konieczne było zwiększenie odległości skanera od turbiny, co pogarszało warunki geometryczne pomiaru w porównaniu do metody nr. 2. Uzyskiwanie chmur punktów w zmiennych warunkach geometrycznych pomiaru utrudnia analizę danych, ponieważ wprowadza dodatkową zmienność, która wymaga starannej oceny.

Podsumowując, wyniki badań jednoznacznie wskazują, że metoda nr. 2 zapewnia wyższą efektywność pomiaru. Zastosowanie tej metody pomiaru umożliwia kontrolę powierzchni dla wszystkich trzech łopat. Jednak w uzyskaniu kompleksowego zestawu danych – obejmującego chmury punktów dla wszystkich czterech stron łopaty – warunkiem koniecznym jest współpraca operatora turbiny oraz odpowiedni obrót łopaty.

Drugim aspektem, który poddano analizie, była ocena ekonomiczna obu metod. Kryterium oceny był czas pomiaru, który bezpośrednio wpływa na ekonomiczność zastosowanego podejścia. W pracy turbin wiatrowych każda minuta ma znaczenie, więc zatrzymanie turbiny na godzinę wiąże się z istotnymi stratami energetycznymi. Dla przykładu, turbina wiatrowa o mocy 1 MW w ciągu jednej godziny pracy może wygenerować nawet do 1000 kWh energii. Jednakże, monitorowanie stanu technicznego łopat turbiny przy użyciu technologii TLS bez zatrzymania turbiny jest niemożliwe. Chociaż zatrzymanie turbiny wiatrowej prowadzi do zmniejszonej produkcji energii elektrycznej, regularne monitorowanie stanu technicznego łopat pozostaje nieodzowne. Również z ekonomicznego punktu widzenia, ponieważ niewykryte lub nienaprawione uszkodzenia łopat mogą prowadzić do spadku wydajności turbiny. Choć znaczenie zadania uzasadnia konieczność tymczasowego wyłączenia turbiny, minimalizacja czasu przestoju turbiny pozostaje istotnym celem.

W ramach analizy porównawczej przeanalizowano czas wymagany do realizacji pomiarów dla obu metod. Kluczowym czynnikiem wpływającym na czas skanowania jest szerokość obszaru objętego pomiarem, co z kolei wynika z charakterystyki pracy skanera (jego rotacji w płaszczyźnie poziomej). Im szerszy obszar skanowania, tym dłuższy całkowity czas pomiaru. Dodatkowo, dla zapewnienia jak najlepszej jakości chmur punktów, pomiary przeprowadzono w największej rozdzielczości (*extremely high*), co również wpłynęło na czas skanowania.

W pierwszej kolejności przeanalizowano metodę nr. 1. Czasy pomiaru dla poszczególnych stanowisk skanera wykazywały zróżnicowanie. Rozbieżności te wynikały z różnego sytuowania skanera względem turbiny, co bezpośrednio wpływało na wielkość obszaru skanowania. Czasy skanowania łopat dla poszczególnych pozycji skanera przedstawiały się następująco: pozycje skanera nr 1 oraz 3 ~ 15 minut; pozycje skanera nr 2 oraz 4 ~ 25 minut; pozycja skanera nr 5 ~ 45 minut. Łączny czas skanowania łopat wyniósł zatem około 125 minut. Należy także doliczyć czas potrzebny na zmiany pozycji skanera, skanowanie sztucznych celów Z + F profi w każdej pozycji skanera, oraz czas na wykonanie tzw. *pre-scans* przed przystąpieniem do skanowania właściwego.

W związku z powyższym, uwzględniając czas skanowania łopat (125 minut), cztery zmiany pozycji skanera (40 minut), czas skanowania tarczek Z + F (50 minut), oraz *pre-scans* (3 minuty), całkowity czas realizacji pomiaru za pomocą metody nr. 1 wyniósł 218 minut.

W przypadku metody nr. 2 dla wszystkich pomiarów (skanów) czas był bardzo zbliżony, co wynikało z powtarzalnego schematu i ustawiania kolejnych stron łopat podczas skanowania według tej samej zasady. Obszary skanowania były bardzo porównywalne pod względem rozmiaru. Średni czas skanowania jednej strony łopaty wynosił 3 minuty, co oznacza, że pełny pomiar jednej łopaty trwał łącznie jedynie około 12 minut. W metodzie nr. 2 nie ma konieczności uwzględniania czasu na zmiany pozycji skanera, ale dodatkowy czas musiał być przeznaczony na obrót łopat. Zajmowało to jedynie około minuty na jeden obrót. W tym rozwiązaniu również wykonywano *pre-scans*.

W związku z powyższym, uwzględniając czas skanowania łopat (36 minut), obrót łopat (15 minut), oraz pre-skanowanie (2 minuty), całkowity czas realizacji pomiaru za pomocą metody nr. 2 wyniósł około 53 minuty.

Podsumowując, na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że metoda nr. 2 przewyższa metodę nr. 1 w aspekcie ekonomicznym. Dzięki krótszemu czasowi realizacji pomiarów metoda nr. 2 stanowi zdecydowanie bardziej korzystne rozwiązanie w monitorowaniu stanu technicznego łopat turbin wiatrowych.

Badania zrealizowane w ramach niniejszego **Zadania 3** stanowią niezwykle istotny etap programu badawczego, potwierdzając hipotezę *H2* już w ujęciu praktycznym-

Analizy uzyskanych chmur punktów wykazały skuteczność wykorzystania informacji radiometrycznej chmury punktów z pomiarów technologii TLS w detekcji uszkodzeń zewnętrznej struktury łopat. Opracowano i porównano dwie metodyki pomiaru, które zastosowano do inspekcji łopat w ich rzeczywistej lokalizacji (zamontowane na turbinie wiatrowej). Niniejsze badania wskazały zarówno na możliwości, ale także na kilka istotnych ograniczeń opracowanych metodyk. Analizy porównawcze metod wykazały, że metoda nr. 2 przewyższa metodę nr. 1 zarówno pod względem efektywności pomiaru, jakości otrzymanych danych, jak i aspektów ekonomicznych. Schemat pomiaru zastosowany w metodzie nr. 2 zapewnia kompleksowy pomiar łopat i krótszy czas realizacji zadania, dzięki czemu metoda ta stanowi korzystniejsze rozwiązanie. Ponadto, opracowany schemat pomiarowy zapewnia bardzo zbliżone warunki geometryczne pomiaru dla wszystkich łopat, co stanowi kolejną zaletę metody nr. 2. W kontekście pojedynczego pomiaru, powtarzalność warunków geometrycznych pomiaru oznacza, że uszkodzenia na wszystkich łopatach

są rejestrowane z taką samą dokładnością, co pozwala na bardziej wiarygodną interpretację i ocenę ich stanu technicznego. Co więcej, zastosowany schemat pomiarowy wpływa korzystnie także na realizację pomiarów okresowych. Jest to szczególnie ważne w zadaniach takich jak inspekcja stanu technicznego łopat turbin. Dzięki odpowiedniej stabilizacji stanowisk pomiarowych, podczas kolejnych inspekcji możliwe jest wykorzystanie tych samych lokalizacji skanera i zachowanie bardzo zbliżonych warunków geometrycznych pomiaru. Zachowanie porównywalnych relacji skaner-turbina w kolejnych pomiarach umożliwi wiarygodne monitorowanie stopnia degradacji defektów.

W świetle przeprowadzonych badań i analiz, zaproponowana metodyka pomiaru nr. 2 jest rekomendowana w badaniach stanu technicznego łopat turbin wiatrowych w kontekście detekcji ich defektów powierzchniowych.

Niniejsze badania oraz współpraca podjęta z firmą specjalizującą się w inspekcjach stanu technicznego łopat turbin wiatrowych, stanowiły fundament dla dalszego rozwoju badań w podjętej tematyce. W kolejnych podrozdziałach omówiono kolejne zadania zrealizowane w ramach rozprawy, które dostarczają nowej wiedzy na temat możliwości i ograniczeń technologii TLS w badaniach stanu technicznego łopat turbin wiatrowych w kontekście detekcji ich defektów powierzchniowych.

6.2.3 Analiza wpływu wzrostu kąta padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej na jakość danych radiometrycznych w kontekście detekcji zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych. Zadanie 4.

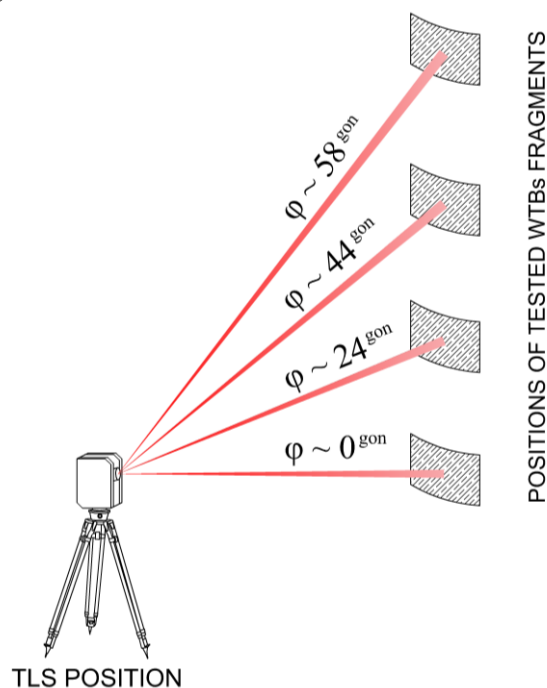
W celu lepszego zrozumienia uzyskiwanych chmur punktów oraz opanowania ich właściwej analizy w kontekście detekcji oraz identyfikacji defektów, przeprowadzono dodatkowe badania. Celem realizowanych badań było zdobycie wiedzy pozwalającej na prawidłową interpretację danych – właściwą interpretację stanu technicznego badanych łopat.

Znaczna wysokość na której znajdują się łopaty powoduje zwiększenie kąta padania wiązki lasera, co z kolei prowadzi do większego zniekształcenia plamki lasera i negatywnie wpływa na jakość pozyskanej chmury punktów. Zbadano zatem wpływ wzrostu kąta padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej na jakość chmur punktów oraz zdolność detekcji i identyfikacji defektów. Wyniki badań poddano analizie w dwóch aspektach: po pierwsze, sama możliwość wykrycia defektu przy tak znaczymy kącie padania; po drugie, wiarygodna ocena jego kształtu/rozmiarów. Niniejszy problem badawczy zrealizowano w ramach Zadania 4 rozprawy, a wyniki badań zaprezentowano w publikacji P5.

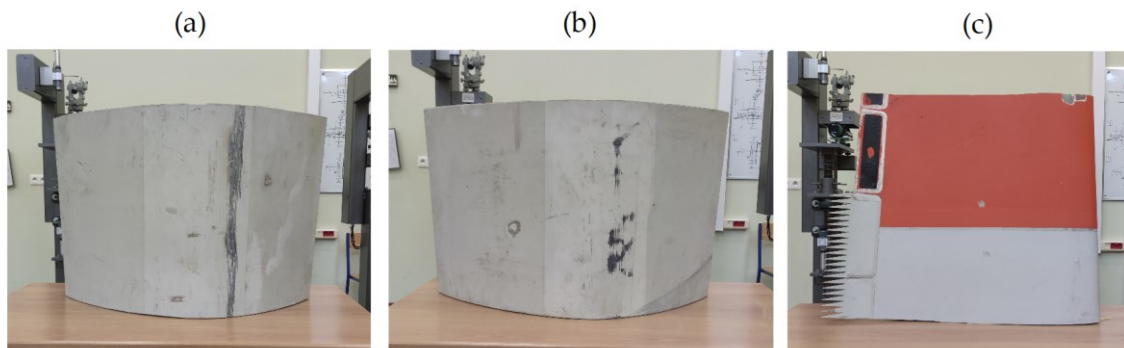
Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych, a obiektem badań były fragmenty łopat pozyskane od firmy specjalizującej się w recyklingu łopat turbin wiatrowych. Wybrane fragmenty łopat charakteryzowały się różnorodnymi, naturalnie występującymi defektami powierzchniowymi. Badane próbki przedstawiono na Rys. 31.

W trakcie badań stanowisko skanera znajdowało się w stałej pozycji. Każdą z próbek kolejno zeskanowano, a następnie zmieniano ich położenie względem skanera uzyskując cztery różne kąty padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej: 0° (pomiar wyjściowy), 24° ($\sim 22^{\circ}$), 44° ($\sim 40^{\circ}$) oraz 58° ($\sim 52^{\circ}$). Schemat metodyki pomiarowej przedstawiono

na Rys. 30. Wyjściowa odległość skanera od badanych próbek (tj. dla kąta padania wiązki lasera 0°) wynosiła 10 m. Pomiary przeprowadzono z rozdzielczością skanowania *ultra-high* (1.6mm/10m).

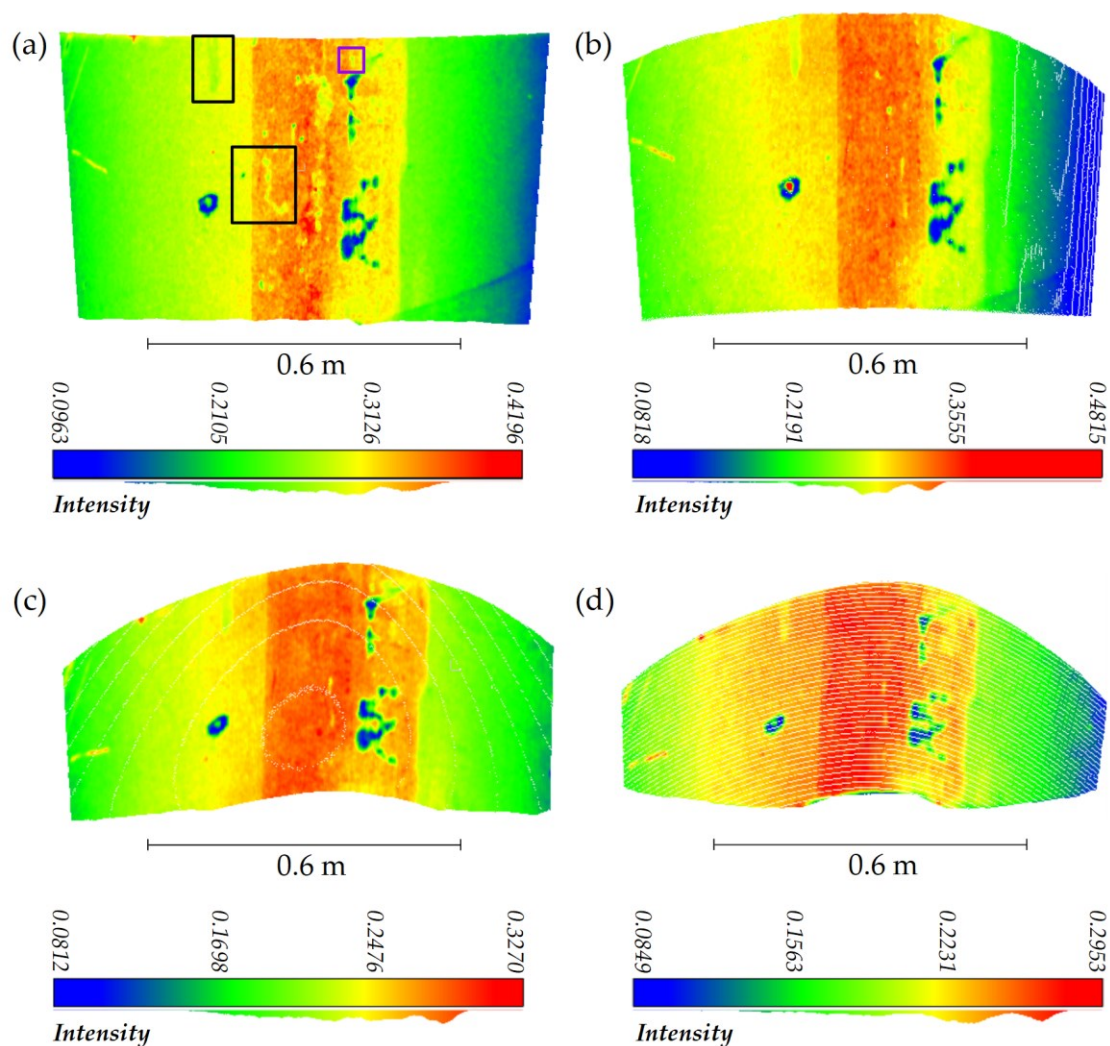


Rys. 30. Schemat metodyki pomiaru - realizacja Zadania 4 [112].



Rys. 31. Fragmenty łopat turbin wiatrowych poddane badaniu: (a) próbka nr. 1, (b) próbka nr. 2, (c) próbka nr. 3 [112].

Przeanalizowano wszystkie defekty występujące na badanych próbkach. Jednakże, ze względu na ich powtarzalny charakter, w publikacji P5 przedstawiono jedynie przykładowe wyniki tych analiz. W niniejszej rozprawie, na Rys. 32. zaprezentowano wyniki uzyskane dla jednej z badanych próbek.



Rys. 32. Wyniki uzyskane dla próbki nr. 2 przy kącie padania wiązki lasera wynoszącym: 0° (a), 24° (b), 44° (c), 58° (d) [112].

Analizy wstępne wykazały, że zwiększanie kąta padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej wpływa na efektywność detekcji defektów, choć w niewielkim stopniu. Uzyskane chmury punktów wskazały, że w pomiarach wykonanych przy największym analizowanym kącie padania (58°) niektóre defekty nie zostały wykryte – w porównaniu z pomiarami wykonanymi przy kącie padania wynoszącym 0° . Szczegółowa analiza wykazała jednak, że były to defekty o marginalnym znaczeniu, tj. zmiany powierzchni które z perspektywy prac konserwacyjnych nie kwalifikują się jako defekty już wymagające naprawy, takie jak drobne (kilkumilimetrowe) lub płytkie przetarcia powierzchni. Sytuację tę ilustruje Rys. 32(a), na którym czarnymi obszarami zaznaczono defekty niewymagające naprawy, ale zostały wykryte z pomiarów wykonanych przy kącie padania wynoszącym 0° . Ponadto, chmury punktów uzyskane przy kącie padania 0° uwiadcniają także większe zabrudzenia powierzchni łopaty, co może wprowadzać w błąd przy ocenie jej stanu technicznego (niewielki obszar fioletowy na Rys. 32(a)).

W świetle uzyskanych wyników wyciągnięto wniosek, że duży kąt padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej nie powinien być postrzegany jako poważne ograniczenie

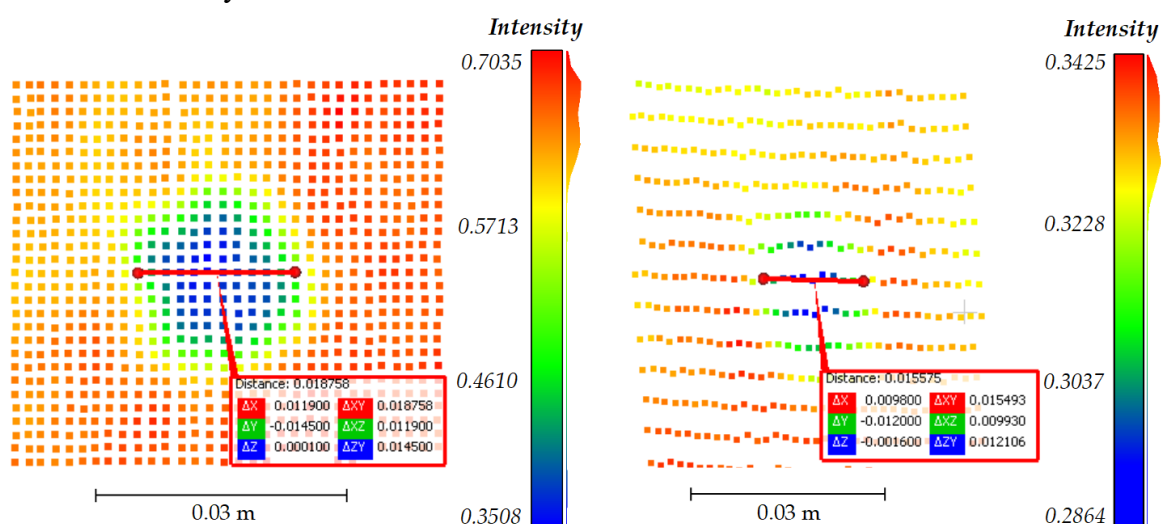
pomiarów TLS. Chmury punktów uzyskane w pomiarach przy kącie padania 58° pozwoliły na detekcję wszystkich istotnych defektów. Uzyskane dane nie zniekształcają zatem oceny badacza na temat stanu technicznego łopaty. Identyfikowane są defekty które już kwalifikują się do naprawy, bądź takie które wymagają ponownej obserwacji i kontroli w najbliższym czasie.

Kolejne analizy przeprowadzono w celu określenia, czy możliwe jest wiarygodne oszacowanie rozmiaru wykrytego defektu.

Dla każdego przypadku ten sam defekt został zwymiarowany na podstawie chmur punktów uzyskanych z pomiarów wykonanych przy wszystkich kątach padania wiązki lasera. Przykład tych analiz zaprezentowano na Rys. 33., gdzie przedstawiono jeden z defektów występujących na próbce nr 3. Po lewej stronie przedstawiono chmurę punktów uzyskaną z pomiaru przy kącie padania 0° (warunki przyjęte za najdogodniejsze), natomiast po prawej stronie zaprezentowano chmurę punktów uzyskaną z pomiaru przy kącie padania 58° (wartość kąta przyjęta za docelową, tj. już w rzeczywistych pomiarach łopat zamontowanych na turbinie).

Dla efektywnej detekcji defektów kluczowy jest rozkład wartości parametru *intensity* w badanym obszarze (wartości uzyskane w miejscu wystąpienia defektu – a wartości uzyskane w jego bliskim otoczeniu). W publikacji P5 zaprezentowano profile rozkładu wartości parametru *intensity* opracowane dla defektu omówionego na Rys. 33. Wyniki pokazują wyraźne różnice wartości *intensity* dla pomiarów wykonanych zarówno przy kącie padania 0° jak i 58° , umożliwiając tym samym określenie miejsc wystąpienia skoków wartości i oszacowanie rozmiaru defektu.

Dla zaprezentowanego przykładu wyniki były następujące: na podstawie chmury punktów uzyskanej przy kącie padania 0° rozmiar defektu został oszacowany na 0.0188m, natomiast na podstawie chmury punktów uzyskanej przy kącie padania 58° rozmiar defektu został oszacowany na 0.0156m.



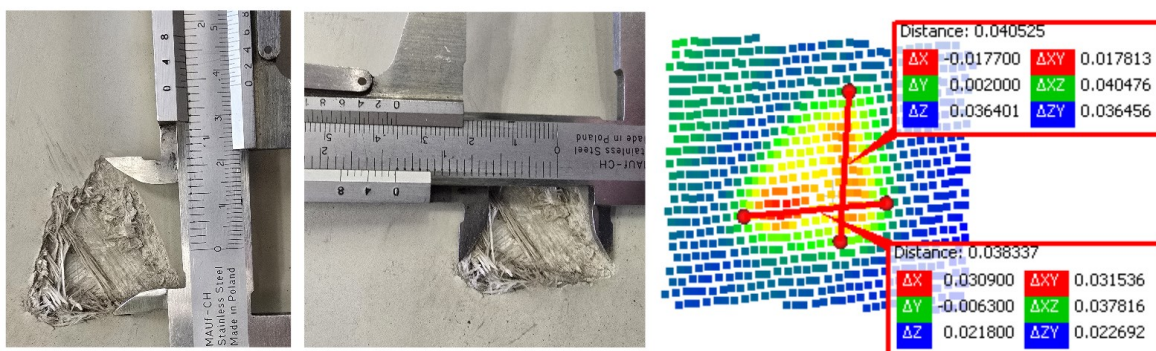
Rys. 33. Przykład wymiarowania defektu: chmura punktów uzyskana z pomiaru przy kącie padania 0° (lewa strona) oraz 58° (prawa strona) [112].

Analogiczne analizy przeprowadzono dla pozostałych defektów i uzyskano zbliżone wyniki. Wysunięto wniosek, że zwiększenie kąta padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej wpływa na jakość uzyskiwanych chmur punktów w stopniu oddziałującym na dokładność określenia rozmiaru defektu. Ma to także związek ze zmniejszoną gęstością chmur punktów uzyskiwanych na większych odległościach skanowania. Warto jednak zaznaczyć, że uzyskana rozbieżność ma charakter marginalny w kontekście defektów łopat turbin wiatrowych. W przypadku łopat turbin wiatrowych do naprawy lub chociażby szczególnej obserwacji kwalifikują się defekty o wymiarach rzędu kilku centymetrów i większe. W związku z tym, wystarczającą jest zdolność oszacowania rozmiaru defektu z kilkumilimetrową dokładnością.

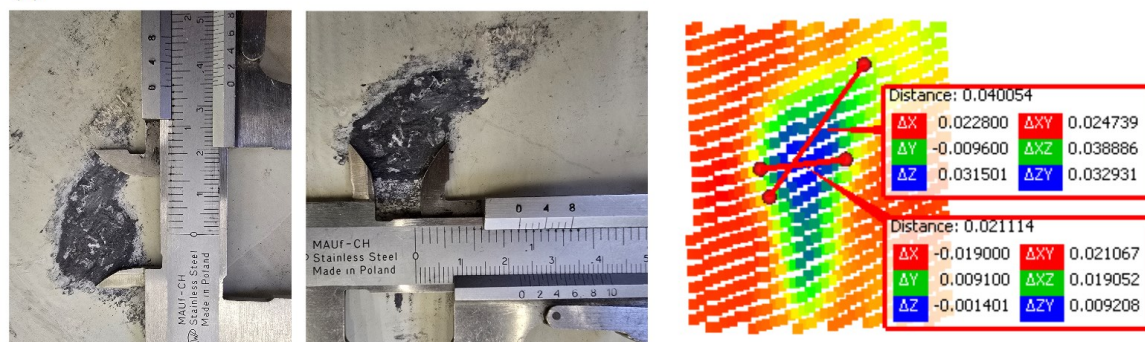
Dokonano także analizy mającej na celu ocenę dokładności wymiarowania defektu na podstawie pomiarów przy największym kącie padania, wynoszącym $\sim 58^\circ$. Jako wartości referencyjne stanowiły rzeczywiste wymiary defektów zwymiarowane przy użyciu suwmiarki. Dla każdego z wykrytych defektów, w oparciu o chmury punktów z pomiarów TLS zostały określone dwa jego wymiary, a następnie porównane z wymiarami rzeczywistymi. Przykład takich analiz został zaprezentowany na Rys. 34.

Wartości uzyskanych rozbieżności określenia wymiarów defektów mieściły się w zakresie od -2.7 mm do +10.5 mm, średni błąd określenia wymiaru defektu wynosi ± 4.2 mm, a odchylenie standardowe dla uzyskanych wyników wyniosło 3.0 mm.

(a)



(b)



Rys. 34. Przykład przeprowadzonych analiz wymiarowania defektu w oparciu o chmury punktów z pomiarów TLS przy największym kącie padania wynoszącym $\sim 58^\circ$.

Warto nadmienić, że badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych, które nie pozwoliły uzyskać takich odległości skanowania jakie zostaną zastosowane w pomiarach terenowych. Niemniej jednak pomiary laboratoryjne przeprowadzono z rozdzielczością *ultra-high* (1.6mm/10m). W praktycznych zastosowaniach zalecana będzie najwyższa rozdzielczość oferowana przez skaner. W przypadku użytego skanera odpowiada to rozdzielczości 0.8mm/10m. Zwiększenie odległości skanowania spowoduje zmniejszenie gęstości chmury punktów, jednak jednocześnie podwojenie rozdzielczości skanowania pozwoli zniwelować ten efekt i ponownie uzyskać większą gęstość chmury punktów.

W oparciu o przeprowadzone badania wysunięto wniosek, że kąt padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej wpływa na efektywność detekcji defektów oraz wiarygodność określenia ich wymiarów w stopniu marginalnym w kontekście problemu badawczego. Stwierdzono, że nawet przy dużym kącie padania wynoszącym $\sim 58^\circ$ możliwa jest skuteczna detekcja istotnych defektów, a ich wymiar/kształt może być wiarygodnie oszacowany. W związku z powyższym, niniejsze badania również potwierdziły hipotezę *H2* postawioną w rozprawie. Otrzymane wyniki mają wysokie znaczenie praktyczne w kontekście pomiarów terenowych i diagnostyki stanu technicznego łopat turbin wiatrowych z wykorzystaniem technologii TLS.

Uzyskane dotychczas wyniki badań stanowiły podstawę do przypuszczeń, że technologia TLS może stanowić potencjalną alternatywę dla fotogrametrii w ocenie stanu technicznego powierzchni łopat i detekcji ich defektów powierzchniowych. Aby potwierdzić swoje założenia, doktorantka przeprowadziła szczegółowe analizy porównawcze tych dwóch technologii w ramach Zadania 5.

6.2.4 Analiza danych radiometrycznych chmury punktów w kontekście detekcji zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych – analizy porównawcze z metodą fotogrametryczną. Zadanie 5.

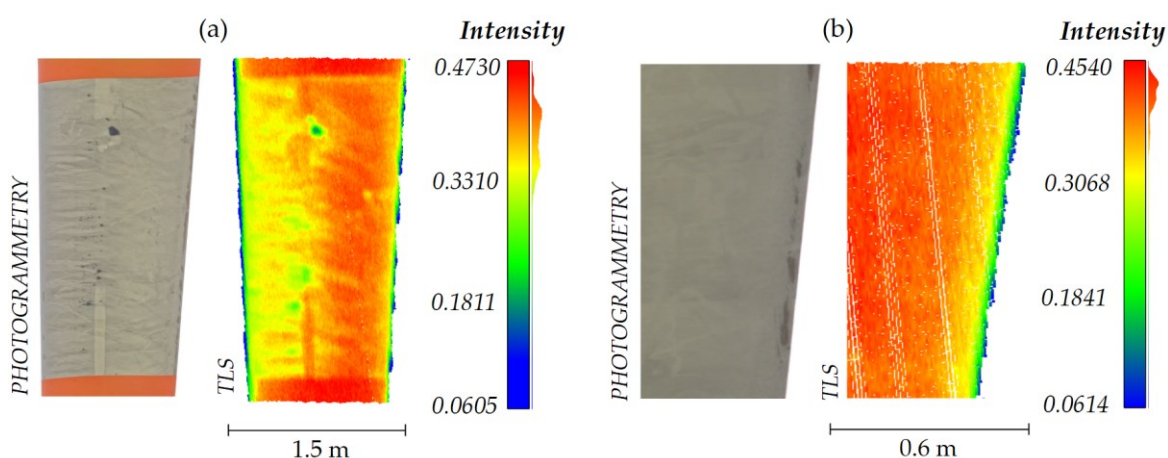
W ramach Zadania 5 programu badawczego przeprowadzono gruntowne analizy porównawcze, weryfikując czy informacja radiometryczna chmury punktów uzyskana z pomiarów technologią TLS może być równie skuteczna w detekcji defektów powierzchniowych łopat, co fotogrametria naziemna. Przeprowadzone analizy miały na celu ocenę stopnia zgodności wyników uzyskanych przy zastosowaniu obu technologii, umożliwiając wskazanie ewentualnych różnic w skuteczności detekcji defektów lub ich wzajemnej komplementarności. Wyniki badań zaprezentowano w publikacji P5.

Dzięki współpracy z firmą specjalizującą się w inspekcjach stanu łopat turbin wiatrowych uzyskano raport z inspekcji technicznej przeprowadzonej przy użyciu fotogrametrii naziemnej. Wykorzystano aparat Canon EOS 5D Mark IV. Łopaty tej samej turbiny zostały także zeskanowane z wykorzystaniem technologii TLS, zgodnie z rekomendowaną metodą nr. 2 opracowaną w ramach Zadania 3 rozprawy. Wysokość wieży turbiny – 100m. Pomiary przeprowadzono z rozdzielczością *extremely high* (0.8mm/10m).

Wspomniany raport oraz uzyskane chmury punktów stanowiły podstawę do przeprowadzenia analiz porównawczych rozważanych technologii. Analizy wstępne

wykazały istotne różnice wyników i potwierdziły konieczność przeprowadzenia szczegółowych analiz. Jako przykład na Rys. 35. zaprezentowano dwa scenariusze: (a) przypadek, w którym chmura punktów z pomiarów TLS odzwierciedla defekty łopat w stopniu porównywalnym z fotogrametrią, oraz (b) przypadek, w którym pomiary TLS wykazują mniejszą skuteczność w detekcji defektów, szczególnie w przypadku drobnych uszkodzeń powierzchni.

W związku z powyższym, analizy obejmowały wszystkie trzy łopaty i dla każdego z defektów który został wykazany w raporcie fotogrametrycznym przeanalizowano możliwość jego wykrycia na podstawie danych TLS. Porównania polegały na odpowiednim zestawieniu zdjęcia defektu z odpowiadającym mu fragmentem chmury punktów. Na potrzeby publikacji P5 oraz niniejszej rozprawy wybrano i przedstawiono kilka kluczowych przykładów tych analiz.



Rys. 35. Przykład analizy porównawczej metod pomiarowych - TLS vs fotogrametria [112].

W raporcie fotogrametrycznym zidentyfikowano cztery główne kategorie wad. Pierwsza kategoria to najczęściej występujące wady, sklasyfikowane jako ‘uszkodzenia powłoki żelowej’, które obejmują wszelkie otarcia oraz ubytki tej powłoki. Druga kategoria to erozja krawędzi natarcia, defekt który wymaga szczególnej uwagi. Kolejne defekty zostały sklasyfikowane jako ‘podejrzenie zanieczyszczenia olejem’ (ang. „*suspicion of oil-contaminated pin holes*”). Według raportu może to być brud przypominający olej, który przedostaje się z wnętrza łopaty przez porowatość materiału. Taki stan może być związany z uderzeniem pioruna. Ostatnia, czwarta kategoria to ‘uszkodzenie systemu ochrony odgromowej’, związane z uderzeniami pioruna w łopaty turbiny. Defekty te są identyfikowane na podstawie poczerniałych smug wokół receptorów.

Dodatkowo wskazano także jeden przypadek defektu sklasyfikowanego jako ‘poważne pęknięcia’. Wskazano miejsce w którym podejrzewa się wystąpienia tzw. gwiazdy pęknięć powłoki żelowej łopaty. Stwierdzono podejrzenie uszkodzenia laminatu i ryzyko uderzenia pioruna w łopatę turbiny.

W raporcie fotogrametrycznym wskazywano również miejsca zabrudzeń powłoki, co nie było uznawane za defekt, a służyło jedynie jako informacja.

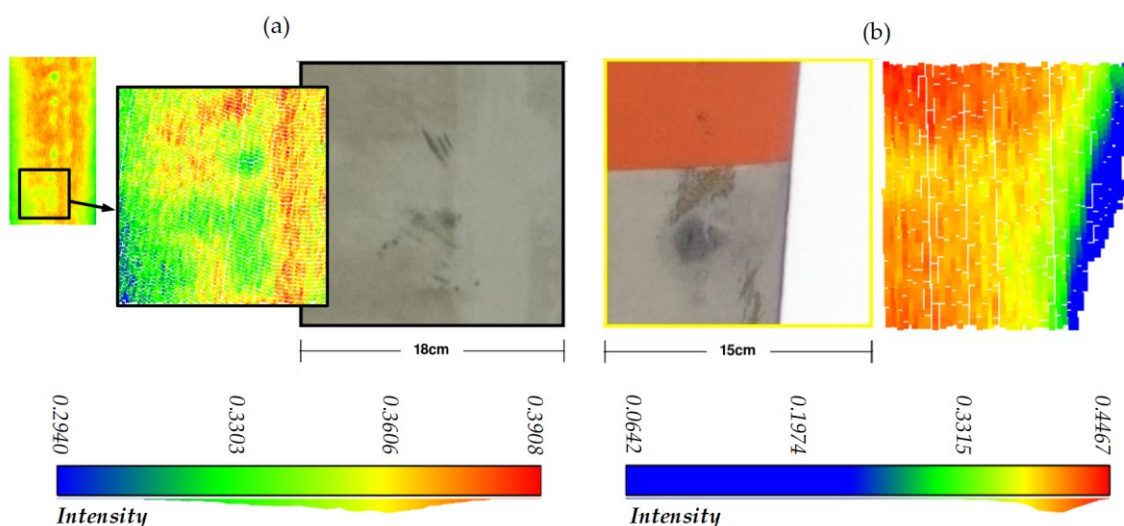
Przeprowadzono szczegółowe analizy porównawcze dla defektów z każdej z tych kategorii. Wyniki badań omówiono poniżej, prezentując tym samym najistotniejsze i najczęściej występujące uszkodzenia powierzchni łopat.

Pierwszą analizowaną grupą były uszkodzenia powłoki żelowej. Przykłady analiz dla takich defektów przedstawiono na Rys. 36. Zgodnie z raportem fotogrametrycznym, we wszystkich przypadkach uszkodzenia te występowały na stronie PS lub SS łopaty. W raporcie wykazano 30 uszkodzeń tego typu, które stanowiły zdecydowaną większość wszystkich wykazanych defektów. Stopień poważności tych uszkodzeń sklasyfikowano jako 'slight damaged' co odpowiadało defektom wymagającym naprawy w ciągu 6 - 12mscy, lub jako 'other' co odpowiadało defektom nie wymagającym naprawy.

Mimo niewielkiego stopnia poważności uszkodzeń, większość tych defektów została również wykryta za pomocą technologii TLS. Przykłady defektów, w których dane radiometryczne z chmur punktów były równie skuteczne jak fotogrametria, przedstawiono na Rys. 35(a) oraz 36(a).

Zauważono pewne trudności w detekcji defektów znajdujących się w pobliżu krawędzi PS i SS. Niestety, większość takich uszkodzeń zlokalizowanych w bezpośrednim sąsiedztwie krawędzi łopat, nie została wykryta przy użyciu informacji radiometrycznej wystarczająco wyraźnie, aby jednoznacznie potwierdzić ich występowanie. Przypadki takie zilustrowano na Rys. 35(b) oraz 36(b). Ograniczenie to jest bezpośrednio związane z odległością skanowania, która wpływa na rozmiar plamki lasera oraz gęstość chmury punktów. Podczas skanowania obszaru krawędzi łopaty, część plamki lasera trafia w defekt, a część już poza powierzchnię łopaty, co sprawia, że wynikowa chmura punktów nie pozwala na detekcję defektu.

W odniesieniu do uszkodzeń powłoki żelowej istotnym aspektem jest to, że w zależności od stopnia uszkodzenia, laminat może już być odsłonięty. Metoda fotogrametryczna w większości przypadków pozwala na określenie czy doszło do odsłonięcia, w przeciwieństwie do technologii TLS co wskazuje na jej ograniczenie.



Rys. 36. Przykład analizy porównawczej metod pomiarowych - defekt 'uszkodzenie powłoki żelowej' [112].

Druga kategoria defektów to oznaki erozji, które najczęściej występują na krawędzi natarcia (LE) łopaty. W raporcie fotogrametrycznym wykazano 4 uszkodzenia tego typu, a ich stopień poważności również sklasyfikowano jako ‘slight damaged’ lub ‘other’.

W jednym z poprzednich etapów badań (realizowanych w ramach zadania 3) wykazano, że w związku ze zmniejszaniem się szerokości LE wraz ze wzrostem odległości od gondoli, skuteczne jej zeskanowanie jest możliwe do około 65% długości łopaty. Jednakże, na tym etapie badań przeprowadzano szczegółowe analizy porównawcze i uzyskane chmury punktów były oceniane już pod kątem możliwości detekcji konkretnych defektów. Sformułowano nowy, niezwykle istotny wniosek. Analizy wykazały, że jakość chmur punktów uzyskanych dla LE łopaty była wystarczająco wysoka tylko na odcinku o długości około 6 m (licząc od gondoli), co odpowiada około 15% długości łopaty. Powyżej tej długości jednoznaczna identyfikacja defektów była utrudniona. Przyczyną jest fizyczne ograniczenie skanera jakim jest rozmiar plamki lasera przy tak dużej odległości skanowania.

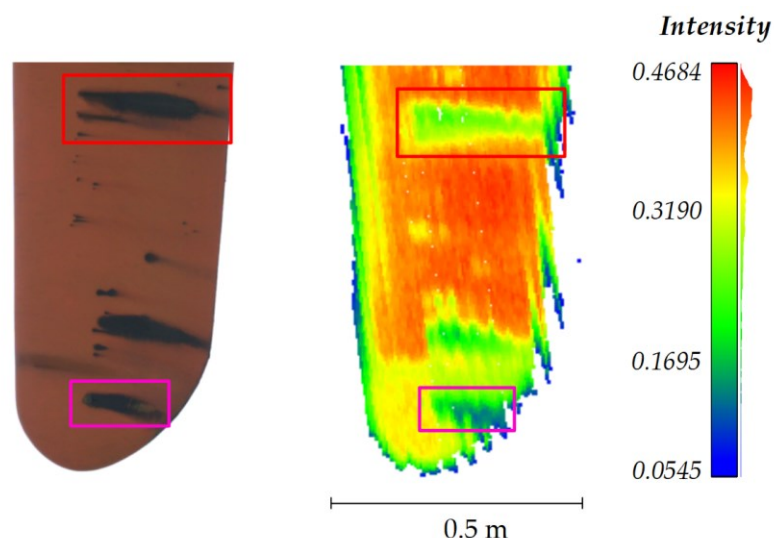
W badanych łopatach oznaki erozji LE występowały na długości w przedziale 33-40m. W związku z tym, metoda fotogrametryczna zapewniła bezwzględnie lepsze wyniki w ocenie stanu technicznego LE łopaty niż technologia TLS.

Trzecia analizowana kategoria to ‘podejrzenie zanieczyszczenia olejem’. W raporcie fotogrametrycznym wykazano 6 uszkodzeń tego typu i dla wszystkich stopień poważności sklasyfikowano jako ‘slight damaged’. Przykład takiego defektu przedstawiono na Rys. 37. (oznaczony obszarem czerwonym). Zgodnie z raportem, podejrzewa się, że może to być zabrudzenie podobne do oleju, obserwowane jako czarne ślady/smugi. Wady te wystąpiły głównie na końcowych fragmentach PS i SS łopat.

W przypadku tego rodzaju defektów technologia TLS wykazała się wysoką skutecznością. Wszystkie defekty przedstawione w raporcie fotogrametrycznym zostały wykryte również za pomocą informacji radiometrycznej chmury punktów z pomiarów TLS. Warto jednak pamiętać, że wady występujące na końcu łopaty powinny być analizowane ze szczególną ostrożnością. Wynika to z faktu, że łopata drży podczas pomiaru, co wpływa na jakość otrzymanej chmury punktów. Stosując segmentację chmur punktów i analizując niewielkie fragmenty, można zapewnić odpowiednią jakość chmury punktów do skutecznej detekcji defektów.

Ostatnia, czwarta analizowana kategoria to ‘uszkodzenia systemu ochrony odgromowej’. Są to niezwykle istotne uszkodzenia, a ich znaczenie wynika przede wszystkim z kwestii bezpieczeństwa. W raporcie fotogrametrycznym wykazano 2 uszkodzenia tego typu. Przykład takiego defektu również zaprezentowano na Rys. 37. (oznaczony obszarem różowym). Podobnie jak w przypadku poprzednich defektów, są one obserwowane jako czarna smuga występująca wokół receptora. Obydwa uszkodzenia zlokalizowano na samych końcach łopat.

W przypadku tych uszkodzeń technologia TLS również wykazała wysoką skuteczność – obydwa defekty zostały zidentyfikowane na podstawie analizy informacji radiometrycznej chmur punktów.



Rys. 37. Przykład analizy porównawczej metod pomiarowych - defekt 'podejrzenie zanieczyszczenia olejem' (obszar czerwony), oraz defekt 'uszkodzenie systemu ochrony odgromowej' (obszar różowy) [112].

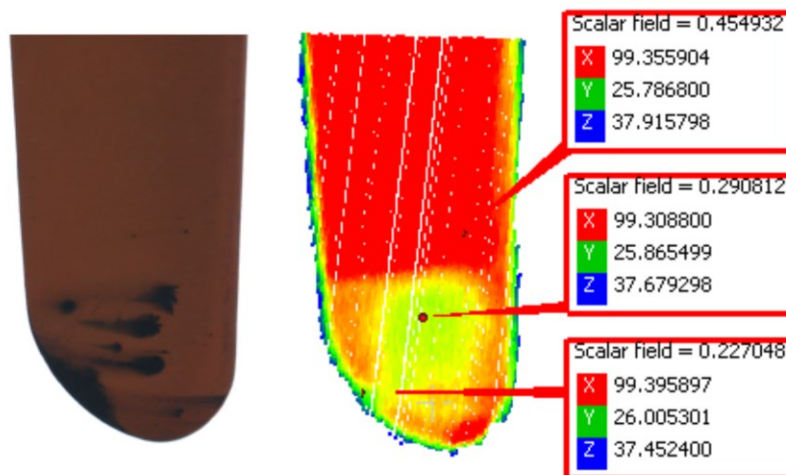
W ramach niniejszych analiz została uwypuklona bardzo istotna kwestia, dotycząca problemu rozpoznawania kategorii uszkodzenia. Na podstawie samej chmury punktów można stwierdzić, że w określonym miejscu (różowy obszar na Rys. 37.) wystąpił defekt, jednak niemożliwe było jednoznaczne określenie, czy jest to tylko 'zanieczyszczenie olejem', czy doszło również do uszkodzenia systemu ochrony odgromowej. Dysponując jednak wiedzą na temat lokalizacji receptorów na badanej łopacie oraz obserwując zmiany wartości *intensity* w ich pobliżu (przyjmujące wydłużony kształt), można podejrzewać, że system został uszkodzony i wymaga to dalszej kontroli. Warto jednak zauważyć, że w przypadku tej kategorii uszkodzeń fotogrametria również ma swoje ograniczenia. Z powodu silnego zaczernienia uszkodzonego fragmentu, defekt ten nie zawsze jest jednoznacznie widoczny na zdjęciach fotogrametrycznych. Wnioski dotyczące możliwego uszkodzenia systemu odgromowego wynikają więc z podejrzeń i doświadczenia technika sporządzającego raport.

Niemniej jednak, w kontekście rozpoznawania kategorii uszkodzenia, fotogrametria okazuje się być bardziej efektywna niż technologia TLS. Na podstawie zdjęć fotogrametrycznych możliwe jest określenie kategorii uszkodzenia, podczas gdy dane z chmur punktów jedynie wskazują na obecność defektu w danym miejscu, ale nie pozwalają jednoznacznie stwierdzić, czy jest to erozja, czy uszkodzenie powłoki.

Przeanalizowano również przypadek defektu sklasyfikowanego jako 'poważne pęknięcia'. Tak zwana gwiazda pęknięć powłoki żelowej wystąpiła na końcu SS łopaty, co zaprezentowano na Rys. 38. Stopień poważności tego defektu sklasyfikowano jako 'substantial damaged' w związku z podejrzeniem uszkodzenia laminatu i ryzykiem uderzenia pioruna.

W przypadku braku uszkodzeń chmura punktów uzyskana dla końcówki łopaty powinna wykazywać bardzo zbliżone wartości *intensity*, co wynika z jednolitego koloru powłoki łopaty w tym fragmencie. Jednakże, w analizowanym przypadku chmura punktów wyraźnie wskazuje na spadki wartości parametru *intensity*, które występują nie punktowo,

a na rozległym obszarze. Jest to jednoznaczny dowód na obecność defektów w tym miejscu. Niestety, na podstawie tych danych nie można jednoznacznie określić rodzaju występującego uszkodzenia.



Rys. 38. Przykład analizy porównawczej metod pomiarowych - defekt 'poważne pęknięcia'.

W diagnostyce stanu technicznego łopat turbin wiatrowych kluczowe znaczenie ma również określenie wymiarów wykrytych defektów, ponieważ ich rozmiar może mieć bezpośredni wpływ na trwałość łopaty oraz efektywność energetyczną turbiny.

Przeprowadzono dodatkowe analizy w celu weryfikacji możliwości technologii TLS do wiarygodnej oceny rozmiaru defektu. Analogicznie do wcześniejszych badań, przeanalizowano różne typy defektów i uzyskane wyniki porównano z danymi fotogrametrycznymi. Przykład takich analiz i wyniki zaprezentowano na Rys. 39.

Porównania wykazały wysoką zgodność wyników uzyskanych przy użyciu obu technologii, co potwierdza, że chmury punktów z pomiarów TLS umożliwiają wiarygodną ocenę wymiarów wykrytych defektów. Jest to istotny aspekt, ponieważ znajomość wymiarów uszkodzenia pozwala na ocenę potencjalnych szkód wynikających z dalszej eksploatacji turbiny oraz odpowiednie planowanie prac naprawczych.

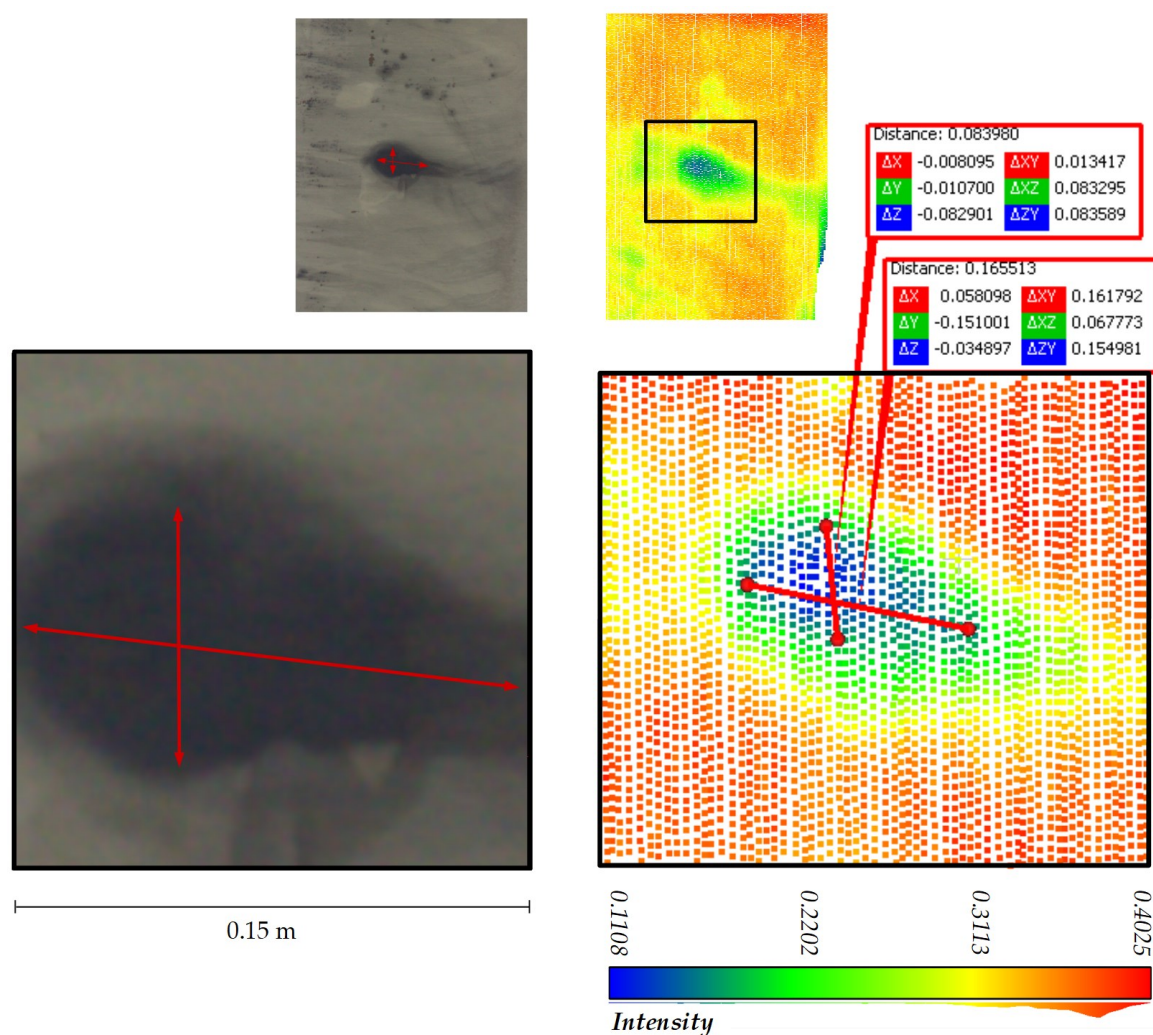


Fig. 39. Przykład analizy porównawczej metod pomiarowych - ocena wiarygodności określenia wymiarów defektu na podstawie danych radiometrycznych chmury punktów z pomiarów TLS [112].

Badania zrealizowane w ramach Zadania 5 pozwoliły zweryfikować hipotezę *H2* postawioną w niniejszej rozprawie w ujęciu praktycznym. Szczegółowe analizy chmur punktów, w tym również analizy porównawcze z metodą fotogrametryczną, wykazały zarówno możliwości jak i istotne ograniczenia technologii TLS w detekcji defektów powierzchniowych łopat turbin wiatrowych i pozwoliły wysunąć następujące wnioski.

W kontekście detekcji defektów powierzchniowych łopat turbin wiatrowych informacja radiometryczna chmury punktów pozyskana z pomiarów naziemnego skaningu laserowego w istotnym stopniu jest spójna z wynikami pomiarów fotogrametrycznych. W wielu przypadkach defekty wykazane w raporcie fotogrametrycznym zostały wykryte również skanowaniem laserowym. Wykazano również, że w przypadku wykrytych defektów, TLS pozwala na wiarygodne określenie ich geometrii, co stanowi istotną zaletę tej technologii. Wiarygodne odwzorowanie wymiarów defektów ma szczególne znaczenie w ocenie ich powagi i potencjalnego zagrożenia dla efektywnej pracy turbiny.

Jednakże, analizy wykazały również kilka istotnych ograniczeń. W przypadku niewielkich defektów zlokalizowanych 'na krawędziach' powierzchni PS oraz SS łopat skuteczność TLS jest niższa w porównaniu do metody fotogrametrycznej. Wspomniane

ograniczenie związane jest bezpośrednio z warunkami geometrycznymi pomiaru, w szczególności z odległością skanowania. Analizy wskazały również na pogorszenie jakości chmury punktów dla krawędzi LE wraz ze wzrostem odległości od gondoli. W tym przypadku przyczyną jest zmniejszająca się szerokość krawędzi LE oraz jej zaokrąglona geometria.

W kontekście rozpoznawania kategorii defektu technologia TLS wykazuje istotne ograniczenia. Analizy wykazały brak ‘cech charakterystycznych chmury punktów’ dla danego rodzaju defektu, co pozwoliłoby na jednoznaczne określenie rodzaju defektu.

Podsumowując, przeprowadzone badania i analizy potwierdzają hipotezę *H2*, stanowiąc, że informacja radiometryczna chmury punktów pozyskana z pomiarów TLS umożliwia detekcję zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych w pewnym stopniu, wskazując jednocześnie ograniczenia tej technologii. Analizy porównawcze wykazały, że pomimo istotnego stopnia zgodności wyników, technologia naziemnego skaningu laserowego nie może w pełni stanowić alternatywy dla metody fotogrametrycznej w zakresie detekcji i identyfikacji defektów powierzchniowych łopat turbin wiatrowych, wykazując mniejszą skuteczność.

Przeprowadzone analizy dostarczyły cennych informacji i pozwoliły wysunąć kolejne istotne wnioski, które wskazują kierunki dalszego rozwoju badań w kontekście inspekcji powierzchni łopat turbin wiatrowych. Niniejsze wnioski i rozważania omówiono w sekcji *Wnioski końcowe i kierunki dalszych badań* rozprawy.

6.2.5 Badanie wpływu długości fali wiązki lasera na skuteczność detekcji nieciągłości powierzchni. Zadanie 6.

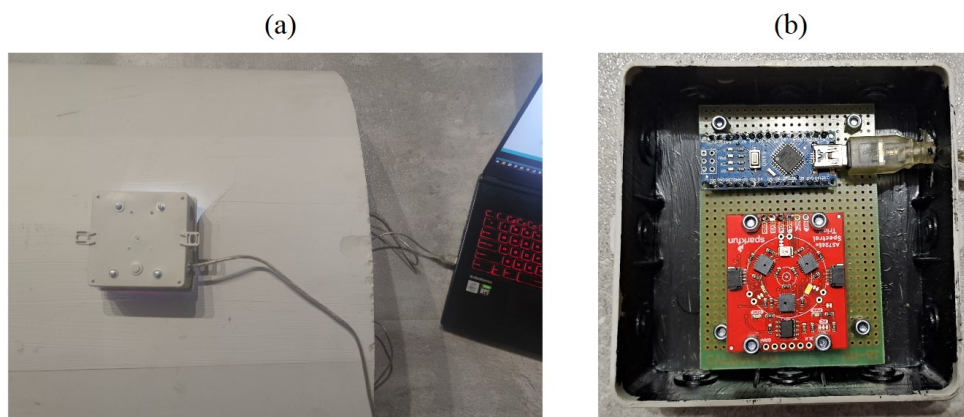
Dotychczas otrzymane wyniki skłoniły do analiz wpływu zmiany długości fali wiązki lasera na jakość otrzymanych danych i możliwość detekcji nieciągłości powierzchni (defektów).

W ramach Zadania 6 przeprowadzono szczegółowe badania mające na celu określenie, które długości fali wiązki lasera z zakresu 410–940 nm wykazują największą skuteczność w wykrywaniu nieciągłości powierzchni łopat turbin wiatrowych. Nieciągłości te identyfikowano jako zmiany wartości współczynnika odbicia. W związku z tym, celem badania było wskazanie długości fali, która ujawniała największe różnice wartości współczynnika odbicia uzyskane dla obszaru nieuszkodzonego w stosunku do wartości uzyskanych dla obszaru uszkodzonego. Badania te odnosiły się do rozważań zawartych w hipotezie *H2* niniejszej rozprawy i umożliwiły pogłębienie wiedzy na temat potencjału informacji radiometrycznej w wykrywaniu defektów łopat turbin wiatrowych. Wyniki badań przedstawiono w publikacji P5.

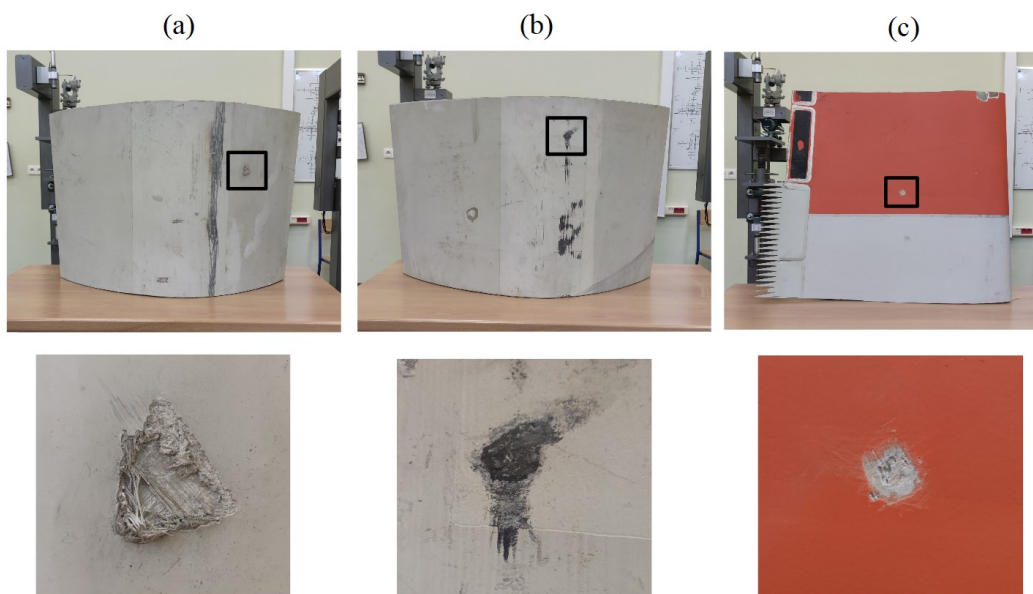
Do niniejszych badań wykorzystano spektrometr (Rys. 40.), opracowany przez zaprzyjaźniony zespół badawczy w ramach badań przedstawionych w pracy [115]. Spektrometr składał się z czujnika SparkFun Triad Spectroscopy Sensor, Niwot, Colorado, USA (AS7265x składający się z trzech czujników spektralnych: AS72651 (UV), AS72652 (WHT) i AS72653 (IR)) oraz mikrokomputera Arduino Nano V3.0 ATMEGA328P.

Wykorzystany czujnik obejmował 18 dyskretnych częstotliwości światła w zakresie długości fal od 410 do 940 nm. Aby wyeliminować wpływ światła otoczenia, czujniki AS7265x zostały umieszczone w specjalnie zaprojektowanej obudowie ochronnej.

Przedmiotem niniejszych badań były te same fragmenty łopat turbin wiatrowych, które zostały wykorzystane podczas realizacji Zadania 4. Do analiz wybrano typy uszkodzeń najczęściej występujących i charakterystycznych dla łopat turbin wiatrowych (zaprezentowane na Rys. 41.).



Rys. 40. Spektrometr: (a) widok ogólny – urządzenie podczas przeprowadzania pomiarów; (b) wnętrze urządzenia [112].

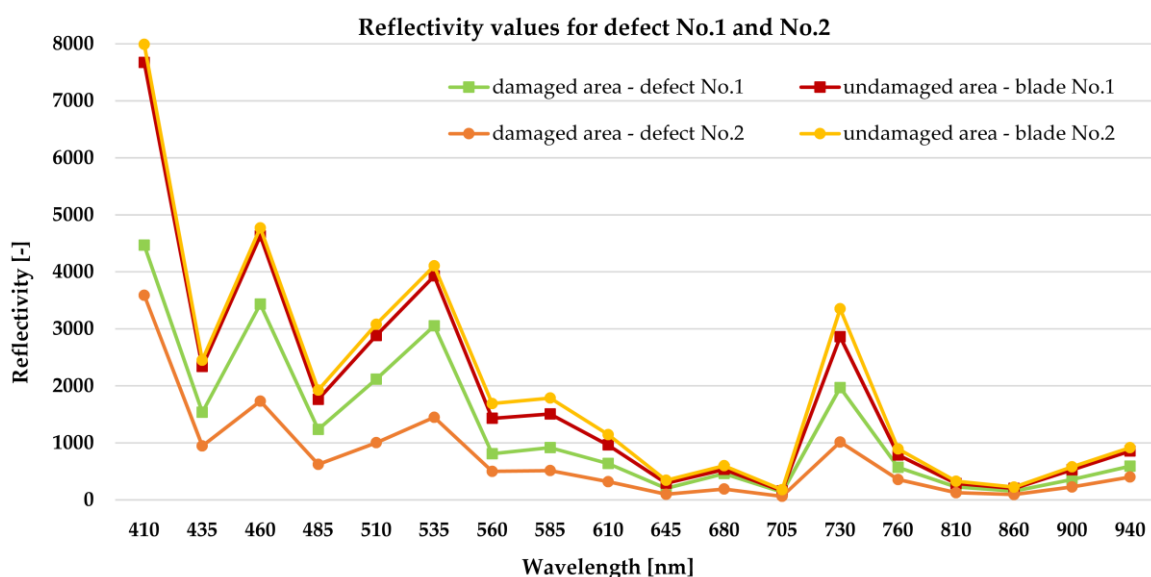


Rys. 41. Fragmenty turbin z zaznaczonymi defektami podlegającymi badaniu: (a) defekt nr.1, (b) defekt nr.2, (c) defekt nr.3 [112].

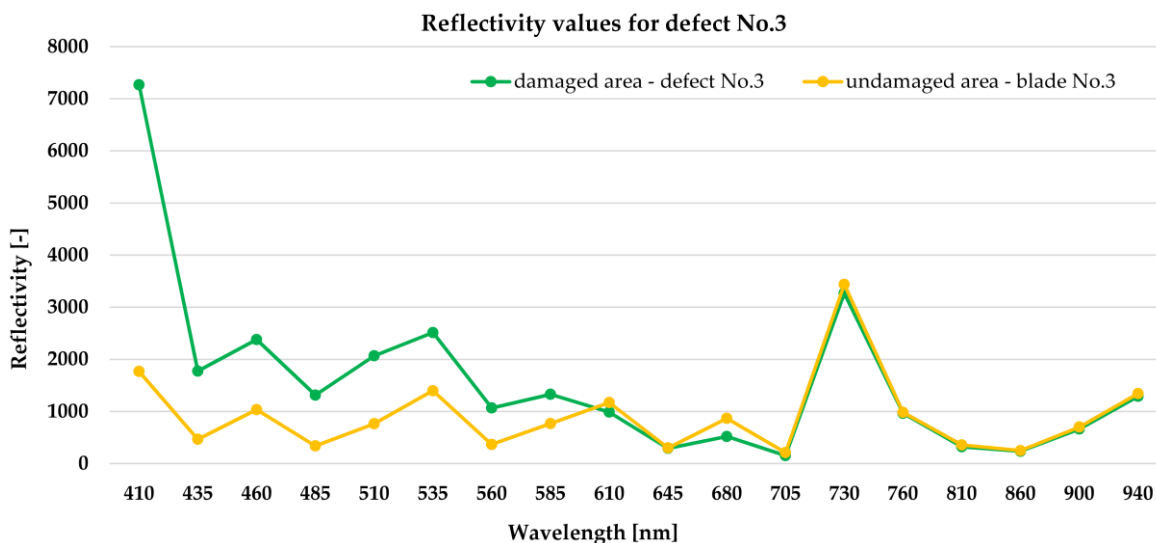
Dla każdego badanego przypadku pierwszym krokiem było zabranie danych dla nieuszkodzonego fragmentu łopaty, zlokalizowanego w bezpośrednim sąsiedztwie badanego defektu, a następnie zabranie danych dla samego defektu. Procedurę pomiarową realizowano poprzez umieszczenie sensora SparkFun powierzchnią pomiarową skierowaną w dół nad analizowanym fragmentem powierzchni łopaty, jak zaprezentowano to

na Rys. 40(a). Dane dla zarówno fragmentu niezniszczonego jak i obszaru defektu rejestrowano przez okres 20-30 sekund, z wykorzystaniem oprogramowania Arduino.

Ze względu na czas trwania pomiarów, dla każdej długości fali zebrano kilkadziesiąt wartości, z których jako wynik ostateczny obliczono średnią arytmetyczną. Przeprowadzono analizy dokładnościowe uzyskanych danych poprzez obliczenie odchyłeń standardowych. Uzyskane wartości odchyłeń standardowych okazały się wyjątkowo niskie, co świadczyło o wysokiej precyzji pomiarów. Uzyskane średnie wartości współczynnika odbicia oraz odpowiadające im wartości odchyłeń standardowych zostały zestawione w Tabeli 7, zamieszczonej na końcu niniejszej sekcji. Rezultaty badań zostały zaprezentowane w formie wykresów (Rys. 42. oraz Rys. 43.). Ze względu na znikome wartości odchyłeń standardowych zrezygnowano z prezentacji słupków błędów na wykresach, gdyż ich przedstawienie skutkowało obniżeniem czytelności danych.



Rys. 42. Wyniki badań dla defektów nr.1. oraz nr.2 [112].



Rys. 43. Wyniki badań dla defektu nr.3 [112].

Dla wszystkich rozważanych typów uszkodzeń niezaprzeczalnie najkorzystniejsze wyniki uzyskano przy długości fali wiązki lasera wynoszącej 410 nm. Bardzo zadowalające różnice wartości uzyskano również dla długości wynoszących 435 nm, 460 nm, 485 nm, 510 nm oraz 535 nm. Aktualnie w skanerach TLS stosuje się długości fal od 532 nm do 1550 nm. Wyniki badań dostarczają istotnych informacji i wskazówek dla firm planujących wykorzystanie naziemnych skanerów laserowych do oceny stanu technicznego łopat turbin wiatrowych, jak również potencjalnie do diagnostyki innych obiektów budowlanych o podobnym charakterze/typie defektów. Ponadto niniejsze badanie ma znaczenie praktyczne i stanowi cenną informację dla producentów skanerów laserowych (w szczególności dronów skanujących), wskazując krótsze długości fal za bardziej skuteczne w wykrywaniu defektów. Wyniki badań mogą wesprzeć dalszy rozwój skaningu laserowego w diagnostyce stanu technicznego obiektów budowlanych.

Niniejsze badania stanowiły ostatni element II etapu programu badawczego dot. zastosowania technologia TLS w detekcji zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych.

Tabela 7. Wyniki badań dot. wpływu długości fali wiązki lasera na możliwość detekcji zmian powierzchniowych (defektów).

długość fali wiązki lasera		410	435	460	485	510	535	560	585	610	645	680	705	730	760	810	860	900	940
defekt nr. 1.	pow. nieuszkodzona - $\bar{x}$	7673.93	2340.27	4631.33	1763.53	2881.33	3929.47	1430.87	1506.33	963.80	292.80	534.47	157.27	2860.93	787.27	287.40	202.87	527.93	856.80
	pow. nieuszkodzona - σ	18.23	4.89	8.19	2.16	4.48	6.95	4.16	4.03	2.61	1.05	2.28	0.44	10.67	2.84	1.02	0.62	1.98	2.64
	defekt - $\bar{x}$	4468.26	1536.74	3434.53	1236.63	2117.21	3052.53	808.79	916.89	639.26	201.26	461.42	135.05	1968.32	571.68	227.84	154.47	358.26	590.00
	defekt - σ	67.22	18.44	26.85	5.41	9.57	20.36	18.40	33.83	29.01	5.63	4.61	1.19	22.08	4.17	1.56	1.23	4.10	5.50
defekt nr. 2.	pow. nieuszkodzona - $\bar{x}$	7990.52	2450.22	4771.22	1925.87	3079.00	4106.87	1689.57	1786.91	1146.48	343.74	599.13	178.09	3352.87	894.74	327.30	225.52	581.30	917.61
	pow. nieuszkodzona - σ	90.47	23.95	39.09	11.26	17.86	30.77	7.57	6.93	4.55	1.22	2.72	0.58	21.31	3.22	1.27	1.02	3.28	6.47
	defekt - $\bar{x}$	3590.25	946.05	1733.95	624.65	1003.45	1449.7	501.1	514.3	320.75	98.55	190.8	63	1014.25	357.5	127.95	94.55	226.75	401.25
	defekt - σ	157.62	41.01	71.66	18.09	36.25	47.74	3.91	9.19	2.98	0.50	1.21	0.00	89.51	9.38	10.02	5.17	13.75	8.86
defekt nr. 3.	pow. nieuszkodzona - $\bar{x}$	1768.79	465.14	1035.86	338.21	764.07	1398.21	366.21	766.00	1170.00	299.43	867.93	209.43	3437.57	981.21	356.64	249.14	701.64	1343.57
	pow. nieuszkodzona - σ	28.96	6.39	11.01	2.24	3.83	15.07	2.54	3.66	4.12	1.55	5.34	1.59	29.01	7.20	3.01	1.88	5.20	14.26
	defekt - $\bar{x}$	7269.90	1774.60	2380.40	1313.60	2068.90	2514.50	1066.30	1328.70	987.90	291.30	519.80	152.80	3268.00	964.30	322.40	235.70	663.00	1290.8
	defekt - σ	66.09	30.03	75.25	9.95	26.99	64.46	33.65	15.10	6.79	0.46	6.91	0.40	24.87	1.68	4.03	1.49	1.79	2.79

7 Wnioski końcowe i kierunki dalszych badań

Program badawczy niniejszej rozprawy doktorskiej obejmował dwa etapy. Zrealizowano sześć zadań głównych oraz dwa zadania dodatkowe. Badania oraz analizy przeprowadzone w ramach programu badawczego potwierdziły postawione w rozprawie hipotezy:

- 1. Znajomość możliwości oraz ograniczeń technicznych naziemnego skaningu laserowego w wykrywaniu nieciągłości na powierzchniach obiektów budowlanych usprawnia ich detekcję oraz ułatwia analizę pozyskanych danych (H1)*
- 2. Dane radiometryczne z pomiarów naziemnego skaningu laserowego umożliwiają detekcję zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych (H2)*

I etap badań odnosił się do hipotezy *H1* i zagadnienia detekcji nieciągłości (pęknięć) na powierzchniach obiektów budowlanych. Głównym celem tego etapu było opracowanie metodyki pomiaru TLS do wykrywania pęknięć na powierzchni ścian budynków. Badania wykazały wpływ zmiany odległości skanowania oraz kąta padania wiązki lasera na zdolność detekcji oraz prawidłowej oceny szerokości pęknięć. Przeprowadzone analizy wykazały możliwości oraz ograniczenia efektywnego wykorzystywania zarówno informacji geometrycznej jak i radiometrycznej chmury punktów, w identyfikacji pęknięć powierzchni ścian obiektów budowlanych. Kluczowym efektem realizacji tego etapu badań były sformułowane wnioski, które jasno wskazują jakie warunki pomiarowe należy spełnić aby zidentyfikować pęknięcie o zadanej szerokości. Opracowane tabele oraz wykresy stanowią kompleksowe podsumowanie przeprowadzonych analiz i wysuniętych wniosków, dostarczając praktycznych wytycznych. Opracowane w ramach tego etapu badań profile oraz sekcja przeprowadzonych dyskusji, zawarte w publikacji P1, dostarczają bezpośrednich wskazówek do właściwej interpretacji pozyskanych chmur punktów i poprawnej oceny szerokości pęknięcia.

Badania dodatkowe wskazały kolejne wymagania i zasady, których badacz powinien przestrzegać podczas wykonywania pomiarów, aby uzyskana chmura punktów była wartościowa i umożliwiała identyfikację pęknięć oraz rys. Wykazano, że przy ustalaniu warunków pomiarowych, badacz powinien ustawić pozycję skanera TLS możliwie jak najbliżej badanego obiektu, nawet kosztem dużego kąta padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej i wynikającego z tego rozmycia plamki lasera. Wykazano, że zwiększenie odległości skanowania znacznie bardziej negatywnie wpływa na jakość chmury punktów niż wzrost kąta padania wiązki w płaszczyźnie pionowej. Kolejne badania uzupełniające wykazały, że przy zachowaniu odpowiednio dogodnych warunków pomiarowych, dane radiometryczne chmury punktów mogą stanowić skuteczne narzędzie do wykrywania rys. W związku z powyższym, dane radiometryczne mogą dostarczać cennych informacji o pogarszającym się stanie powierzchni już na bardzo wczesnym etapie. Niemniej jednak, o ile sama detekcja jest możliwa, to precyzyjne określenie szerokości w przypadku tak małych wartości stanowi wyzwanie dla technologii TLS.

Etap I badań dostarczył nowej wiedzy na temat skuteczności technologii TLS w detekcji pęknięć na powierzchniach obiektów budowlanych, pozwalając na określenie

optymalnych warunków pomiarowych. Uzyskane wyniki mogą przyczynić się do poprawy metod monitorowania stanu technicznego obiektów budowlanych, co ma kluczowe znaczenie dla ich długoterminowej trwałości.

II etap badań odnosił się do hipotezy *H2* i zagadnienia detekcji zmian powierzchniowych łopat turbin wiatrowych. Badania zrealizowane w ramach tego etapu wykazały, że informacja radiometryczna chmur punktów uzyskanych przy wykorzystaniu technologii TLS może służyć do oceny stanu technicznego łopat turbin wiatrowych w kontekście detekcji uszkodzeń w ich zewnętrznej strukturze. Następnie zarekomendowano metodykę pomiaru w celu realizacji tego zadania, która pozwala na uzyskanie kompletnego zestawu danych. Badania dotyczące wpływu kąta padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej na efektywność detekcji defektów oraz wiarygodność określania ich wymiarów wykazały, że istotne uszkodzenia powierzchni mogą być skutecznie wykrywane i analizowane z wystarczającą dokładnością, nawet przy dużych kątach padania wiązki.

Jednakże, oprócz wysokiego potencjału informacji radiometrycznej chmury punktów w realizacji niniejszego zadania, przeprowadzone analizy, a w szczególności analizy porównawcze z metodą fotogrametryczną, wykazały również istotne ograniczenia technologii TLS. Ten etap badań, niezwykle istotny z praktycznego punktu widzenia, wykazał, że niestety pomimo pewnej spójności wyników, technologia TLS nie może w pełni stanowić alternatywy dla metody fotogrametrycznej w zakresie detekcji i identyfikacji defektów powierzchniowych łopat turbin wiatrowych, wykazując mniejszą skuteczność.

Podsumowując całość analiz wysunięto kluczowy wniosek, że wspomniane ograniczenia technologii TLS wynikają z niekorzystnej geometrii pomiaru, w szczególności odległości skanowania. Dla wysokich turbin, warunkiem koniecznym jest zachowanie znacznej odległości pomiędzy stanowiskiem skanera a wieży turbiny. Dlatego też, stwierdzono, że technologia TLS będzie bardziej skuteczna dla mniejszych turbin o wysokości wieży rzędu 70 m, gdzie stanowisko skanera będzie mogło znajdować się znacznie bliżej skanowanego obiektu (łopaty). Potencjalnym rozwiązaniem problemu odnoszącego się do geometrii pomiaru w zastosowaniu technologii TLS może być zastosowanie systemów UAV wyposażonych w skanery laserowe. Wykorzystanie dronów skanujących umożliwi akwizycję danych w lepszych warunkach geometrycznych pomiaru. Przede wszystkim mniejsza odległość skanowania, ale także mniejszy kąt padania wiązki lasera w płaszczyźnie pionowej, spowodują poprawę jakości pozyskanych chmur punktów. Tym samym skuteczność detekcji defektów może być większa. Dodatkowo, lepsza jakość chmury punktów może otworzyć nowe możliwości w zakresie klasyfikacji typu defektów. Niniejsze badania stanowią kierunek dalszych badań doktorantki.

Etap II badań dostarczył nowej wiedzy dla sektora energii odnawialnej na temat stosowania technologii TLS w diagnostyce łopat turbin wiatrowych. Wskazuje na potencjał informacji radiometrycznej chmury punktów w monitorowaniu ich stanu technicznego. Jednocześnie, wykazując pewne ograniczenia technologii TLS, wskazuje kierunek dalszego rozwoju badań, w tym integracji różnych metodologii, aby zwiększyć skuteczność detekcji defektów.

8 Bibliografia

- [1] P.M. Leronés, D.O. Vélez, F.G. Rojo, J. Gómez-García-Bermejo, E.Z. Casanova, Moisture detection in heritage buildings by 3D laser scanning, *Studies in Conservation*. 61 (2016) pp. 46–54.
<https://doi.org/10.1179/2047058415Y.00000000017>.
- [2] L.J. Sánchez-Aparicio, S. Del Pozo, L.F. Ramos, A. Arce, F.M. Fernandes, Heritage site preservation with combined radiometric and geometric analysis of TLS data, *Automation in Construction*. 85 (2018) pp. 24–39.
<https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2017.09.023>.
- [3] Y.J. Hoon, S. Hong, Three-Dimensional Digital Documentation of Cultural Heritage Site Based on the Convergence of Terrestrial Laser Scanning and Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry, *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 8 (2019) pp. 1–14. <https://doi.org/10.3390/IJGI8020053>.
- [4] M.F. Alkadri, S. Alam, H. Santosa, A. Yudono, S.M. Beselly, Investigating Surface Fractures and Materials Behavior of Cultural Heritage Buildings Based on the Attribute Information of Point Clouds Stored in the TLS Dataset, *Remote Sensing*. 14 (2022) pp. 1–24. <https://doi.org/10.3390/RS14020410>.
- [5] M. Damińska-Suchocka, J. Katzer, C. Suchocki, Application of TLS Technology for Documentation of Brickwork Heritage Buildings and Structures, *Coatings*. 12 (2022) pp. 1–16. <https://doi.org/10.3390/COATINGS12121963>.
- [6] H. Löhmus, A. Ellmann, S. Märdla, S. Idnurm, Terrestrial laser scanning for the monitoring of bridge load tests—two case studies, *Survey Review*. 50 (2018) pp. 1–15. <https://doi.org/10.1080/00396265.2016.1266117>.
- [7] B. Riveiro, M.J. DeJong, B. Conde, Automated processing of large point clouds for structural health monitoring of masonry arch bridges, *Automation in Construction*. 72 (2016) pp. 258–268. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.02.009>.
- [8] J. Valença, I. Puente, E. Júlio, H. González-Jorge, P. Arias-Sánchez, Assessment of cracks on concrete bridges using image processing supported by laser scanning survey, *Construction and Building Materials*. 146 (2017) pp. 668–678.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.04.096>.
- [9] W. Wang, W. Zhao, L. Huang, V. Vimarlund, Z. Wang, Applications of terrestrial laser scanning for tunnels: a review, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 1 (2014) pp. 325–337.
[https://doi.org/10.1016/S2095-7564\(15\)30279-8](https://doi.org/10.1016/S2095-7564(15)30279-8).
- [10] C. Cabo, C. Ordóñez, R. Argüelles-Fraga, An algorithm for optimizing terrestrial laser scanning in tunnels, *Automation in Construction*. 83 (2017) pp. 163–168.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.028>.
- [11] H. Hu, T.M. Fernandez-Steege, M. Dong, R. Azzam, Numerical modeling of LiDAR-based geological model for landslide analysis, *Automation in Construction*. 24 (2012) pp. 184–193. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.03.001>.
- [12] L. Xiong, G. Wang, Y. Bao, X. Zhou, K. Wang, H. Liu, X. Sun, R. Zhao, A Rapid Terrestrial Laser Scanning Method for Coastal Erosion Studies: A Case Study at

- Freeport, Texas, USA, *Sensors*. 19 (2019) pp. 1–21.
<https://doi.org/10.3390/S19153252>.
- [13] C. Suchocki, A. Rutkiewicz, J. Katzer, E. Kowalska, Remote estimation of cable tension using catenary theory and point clouds obtained by terrestrial laser scanning, *Measurement*. 236 (2024) pp. 1–10.
<https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2024.115147>.
 - [14] Ž. Pleterski, G. Rak, K. Kregar, Determination of Chimney Non-Verticality from TLS Data Using RANSAC Method, *Remote Sensing*. 16(23) (2024) pp. 1–19.
<https://doi.org/10.3390/RS16234541>.
 - [15] M.Z. Marković, M. Batilović, Đ. Krnić, M. Vujinović, Z. Sušić, APPLICATION OF TERRESTRIAL LASER SCANNING TECHNOLOGY IN THE ANALYSIS OF THE COLUMNS VERTICALITY AND THE CREATION OF A 3D MODEL OF THE SPORTS HALL, *Journal of Faculty of Civil Engineering*. 40 (2024) pp. 48–59.
<https://doi.org/10.14415/JFCE-908>.
 - [16] C. Suchocki, M. Damińska-Suchocka, J. Katzer, J. Janicka, J. Rapiński, P. Stałowska, Remote Detection of Moisture and Bio-Deterioration of Building Walls by Time-Of-Flight and Phase-Shift Terrestrial Laser Scanners, *Remote Sensing*. 12(11) (2020) pp. 1–15. <https://doi.org/10.3390/rs12111708>.
 - [17] H.S. Park, H.M. Lee, H. Adeli, I. Lee, A new approach for health monitoring of structures: Terrestrial laser scanning, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 22 (2007) pp. 19–30. <https://doi.org/10.1111/J.1467-8667.2006.00466.X>.
 - [18] A. Costanzo, M. Minasi, G. Casula, M. Musacchio, M.F. Buongiorno, Combined Use of Terrestrial Laser Scanning and IR Thermography Applied to a Historical Building, *Sensors*. 15 (2014) pp. 194–213. <https://doi.org/10.3390/S150100194>.
 - [19] M.E. Nap, S. Chiorean, C.I. Cira, M.Á. Manso-Callejo, V. Păunescu, E.E. Şuba, T. Sălăgean, Non-Destructive Measurements for 3D Modeling and Monitoring of Large Buildings Using Terrestrial Laser Scanning and Unmanned Aerial Systems, *Sensors*. 23 (2023) pp. 1–26. <https://doi.org/10.3390/S23125678>.
 - [20] J. Armesto-González, B. Riveiro-Rodríguez, D. González-Aguilera, M.T. Rivas-Brea, Terrestrial laser scanning intensity data applied to damage detection for historical buildings, *Journal of Archaeological Science*. 37 (2010) pp. 3037–3047.
<https://doi.org/10.1016/J.JAS.2010.06.031>.
 - [21] S. Zhou, W. Song, Deep learning-based roadway crack classification using laser-scanned range images: A comparative study on hyperparameter selection, *Automation in Construction*. 114 (2020) pp. 1–17.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103171>.
 - [22] H. Yang, X. Xu, Intelligent crack extraction based on terrestrial laser scanning measurement, *Measurement and Control*. 53 (2020) pp. 416–426.
<https://doi.org/10.1177/0020294019877490>.
 - [23] Wind energy in Europe: 2024 Statistics and the outlook for 2025-2030 | WindEurope, (n.d.). <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2024-statistics-and-the-outlook-for-2025-2030/#overview> (accessed April 12, 2025).

- [24] Renewable Energy Directive, (n.d.). https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en#key-facts (accessed April 12, 2025).
- [25] A. Sareen, C.A. Sapre, M.S. Selig, Effects of leading edge erosion on wind turbine blade performance, *Wind Energy*. 17 (2014) pp. 1531–1542. <https://doi.org/10.1002/we.1649>.
- [26] N. Gaudern, A practical study of the aerodynamic impact of wind turbine blade leading edge erosion, *Journal of Physics: Conference Series*. 524 (2014) pp. 1–10. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/524/1/012031>.
- [27] Z. Malecha, K. Sierpowski, Badania numeryczne wpływu erozji oraz zabrudzeń łopaty na pracę turbiny wiatrowej, *Instal* 7-8/2013. (2023) pp. 7–13. <https://doi.org/10.36119/15.2023.7-8.1>.
- [28] E. Kaartinen, K. Dunphy, A. Sadhu, LiDAR-Based Structural Health Monitoring: Applications in Civil Infrastructure Systems, *Sensors*. 22 (2022) pp. 1–32. <https://doi.org/10.3390/S22124610>.
- [29] L.J. Sánchez-Aparicio, F.L. del Blanco-García, D. Mencías-Carrizosa, P. Villanueva-Llauradó, J.R. Aira-Zunzunegui, D. Sanz-Arauz, R. Pierdicca, J. Pinilla-Melo, J. Garcia-Gago, Detection of damage in heritage constructions based on 3D point clouds. A systematic review, *Journal of Building Engineering*. 77 (2023) pp. 1–31. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.107440>.
- [30] D.F. Laefer, L. Truong-Hong, H. Carr, M. Singh, Crack detection limits in unit based masonry with terrestrial laser scanning, *NDT&E International*. 62 (2013) pp. 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.11.001>.
- [31] M. Rabah, A. Elhattab, A. Fayad, Automatic concrete cracks detection and mapping of terrestrial laser scan data, *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. 2 (2013) pp. 250–255. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2013.12.002>.
- [32] S. Cho, S. Park, G. Cha, T. Oh, Development of Image Processing for Crack Detection on Concrete Structures through Terrestrial Laser Scanning Associated with the Octree Structure, *Applied Sciences*. 8 (2018) pp. 1–19. <https://doi.org/10.3390/APP8122373>.
- [33] G. Teza, A. Galgaro, F. Moro, Contactless recognition of concrete surface damage from laser scanning and curvature computation, *NDT and E International*. 42 (2009) pp. 240–249. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.10.009>.
- [34] S.S.R. Krishnan, M.K.N. Karuppan, A.O. Khadidos, A.O. Khadidos, S. Selvarajan, S. Tandon, B. Balusamy, Comparative analysis of deep learning models for crack detection in buildings, *Scientific Reports*. 15 (2025) pp. 1–34. <https://doi.org/10.1038/S41598-025-85983-3>.
- [35] Y. Turkan, J. Hong, S. Laflamme, N. Puri, Adaptive wavelet neural network for terrestrial laser scanner-based crack detection, *Automation in Construction*. 94 (2018) pp. 191–2002. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.06.017>.
- [36] X. Chen, J. Li, S. Huang, H. Cui, P. Liu, Q. Sun, An Automatic Concrete Crack-Detection Method Fusing Point Clouds and Images Based on Improved Otsu's Algorithm, *Sensors*. 21 (2021) pp. 1–19. <https://doi.org/10.3390/S21051581>.

- [37] D. Lichti, B. Harvey, THE EFFECTS OF REFLECTING SURFACE MATERIAL PROPERTIES ON TIME-OF-FLIGHT LASER SCANNER MEASUREMENTS, in: Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa, 2002: pp. 1–9.
- [38] Y. Reshetyuk, Investigation of the Influence of Surface Reflectance on the Measurements with the Terrestrial Laser Scanner Leica HDS 3000, ZFV - Zeitschrift Fur Geodasie, Geoinformation Und Landmanagement. 131 (2006) pp. 96–103.
- [39] S. Soudarissanane, Ree Jane Van, A. Bucksch, R.C. Lindenbergh, Error budget of terrestrial laser scanning: influence of the incidence angle on the scan quality, in: 3D-NordOst, Berlin, 2007: pp. 1–8.
- [40] N. Pfeifer, B. Höfle, C. Briele, M. Rutzinger, A. Haring, Analysis Of The Backscattered Energy In Terrestrial Laser Scanning Data, in: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Beijing, China, 2008: pp. 1045–1052.
- [41] T. Voegtli, I. Schwab, T. Landes, Influences of different materials on the measurements of a terrestrial laser scanner (TLS), in: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, China, 2008: pp. 1061–1066.
- [42] A. Pesci, G. Teza, Effects of surface irregularities on intensity data from laser scanning: An experimental approach, Annals of Geophysics. 51 (2008) pp. 839–848. <https://doi.org/10.4401/ag-4462>.
- [43] C. Suchocki, J. Katzer, An example of harnessing Terrestrial Laser Scanner for remote sensing of saturation of chosen building materials, Construction and Building Materials. 122 (2016) pp. 400–405. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.091>.
- [44] C. Suchocki, J. Katzer, A. Panuś, Remote Sensing to Estimate Saturation Differences of Chosen Building Materials Using Terrestrial Laser Scanner, Reports on Geodesy and Geoinformatics. 103 (2017) pp. 94–105. <https://doi.org/10.1515/rgg-2017-0008>.
- [45] C. Suchocki, J. Katzer, J. Rapiński, Terrestrial laser scanner as a tool for assessment of saturation and moisture movement in building materials, Periodica Polytechnica Civil Engineering. 62 (2018) pp. 1–6. <https://doi.org/10.3311/PPci.11406>.
- [46] L.K. Herrera, S. Le Borgne, H.A. Videla, Modern methods for materials characterization and surface analysis to study the effects of biodeterioration and weathering on buildings of cultural heritage, International Journal of Architectural Heritage. 3 (2009) pp. 74–91. <https://doi.org/10.1080/15583050802149995>.
- [47] X. Xu, H. Yang, I. Neumann, Concrete Crack Measurement and Analysis Based on Terrestrial Laser Scanning Technology, Sensors & Transducers. 186 (2015) pp. 168–172. <http://www.sensorsportal.com> (accessed June 7, 2025).
- [48] C. Suchocki, M. Jagoda, R. Obuchowski, D. Šlikas, J. Sužiedelytė-Visockienė, The properties of terrestrial laser system intensity in measurements of technical conditions of architectural structures, Metrology and Measurement Systems. 25 (2018) pp. 779–792. <https://doi.org/10.24425/mms.2018.124886>.

- [49] C. Suchocki, Comparison of Time-of-Flight and Phase-Shift TLS Intensity Data for the Diagnostics Measurements of Buildings, Materials. 13 (2020) pp. 1–18. <https://doi.org/10.3390/ma13020353>.
- [50] K. Dai, A. Li, H. Zhang, S.E. Chen, Y. Pan, Surface damage quantification of postearthquake building based on terrestrial laser scan data, Structural Control and Health Monitoring. 25 (2018) pp. 1–18. <https://doi.org/10.1002/STC.2210>.
- [51] C. Suchocki, J. Katzer, C. Serrat, M. Jagoda, Application of TLS Intensity Data for Detection of Brick Walls Defects, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 603 (2019) pp. 1–8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/603/2/022100>.
- [52] C. Suchocki, J. Katzer, TLS technology in brick walls inspection, in: 2018 Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics), IEEE, Olsztyn, 2018: pp. 359–363. <https://doi.org/10.1109/BGC-Geomatics.2018.00074>.
- [53] C. Liu, Y. He, Q. Li, F. Wang, Study on the causes of secondary cracks of the eave wall mural of Daxiong Hall at Fengguo Temple in Yixian, Liaoning, China, Heritage Science. 9 (2021) pp. 1–14. <https://doi.org/10.1186/S40494-021-00601-5>.
- [54] M. Oytun, G. Atasoy, Effect of Terrestrial Laser Scanning (TLS) parameters on the accuracy of crack measurement in building materials, Automation in Construction. 144 (2022) pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2022.104590>.
- [55] J. Wu, Y. Shi, H. Wang, Y. Wen, Y. Du, Surface Defect Detection of Nanjing City Wall Based on UAV Oblique Photogrammetry and TLS, Remote Sensing. 15 (2023) pp. 1–26. <https://doi.org/10.3390/RS15082089>.
- [56] M. Miśkiewicz, K. Daszkiewicz, J. Lachowicz, P. Tysiac, P. Jaskula, K. Wilde, Nondestructive methods complemented by FEM calculations in diagnostics of cracks in bridge approach pavement, Automation in Construction. 128 (2021) pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2021.103753>.
- [57] H. Wang, Y. Shi, Q. Yuan, M. Li, Crack Detection and Feature Extraction of Heritage Buildings via Point Clouds: A Case Study of Zhonghua Gate Castle in Nanjing, Buildings. 14 (2024) pp. 1–16. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS14082278>.
- [58] Y. Ge, J. Liu, X. Zhang, H. Tang, X. Xia, Automated Detection and Characterization of Cracks on Concrete Using Laser Scanning, Journal of Infrastructure Systems. 29 (2023) pp. 1–14. <https://doi.org/10.1061/JITSE4.ISENG-1936>.
- [59] R. Pathak, A. Saini, A. Wadhwa, H. Sharma, D. Sangwan, An object detection approach for detecting damages in heritage sites using 3-D point clouds and 2-D visual data, Journal of Cultural Heritage. 48 (2021) pp. 74–82. <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2021.01.002>.
- [60] H. Song, H. Li, G. Yang, T. Zhang, X. Zhu, Y. Gao, Incorporating cracks into the structural analysis of concrete walls using full-dimensional update of point clouds, in: European Group for Intelligent Computing in Engineering, London, 2023: pp. 1–10.
- [61] M. Das Adhikari, T.H. Kim, S.G. Yum, J.Y. Kim, Damage Detection and Monitoring of a Concrete Structure Using 3D Laser Scanning, Engineering

- Proceedings. 36 (2023) pp. 1–5. <https://doi.org/10.3390/ENGPROC2023036001>.
- [62] C. Suchocki, R. Nowak, R. Rutkowski, W. Błaszczak-Bąk, Using handheld 3D laser scanner and high-resolution handheld digital microscope for hybrid building condition measurements, *Measurement*. 253 (2025) pp. 1–17. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2025.117751>.
 - [63] R. Masek, Naprawa oraz wzmocnienie krawędzi natarcia łopat turbin wiatrowych, (n.d.). https://nowa-energia.com.pl/2020/06/09/naprawa-oraz-wzmocnienie-krawedzi-natarcia-lop-at-turbin-wiatrowych/?utm_source=chatgpt.com (accessed January 12, 2025).
 - [64] W. Wang, Y. Xue, C. He, Y. Zhao, Review of the Typical Damage and Damage-Detection Methods of Large Wind Turbine Blades, *Energies*. 15 (2022) pp. 1–31. <https://doi.org/10.3390/EN15155672>.
 - [65] M.A. Oliveira, E.F. Simas Filho, M.C.S. Albuquerque, Y.T.B. Santos, I.C. da Silva, C.T.T. Farias, Ultrasound-based identification of damage in wind turbine blades using novelty detection, *Ultrasonics*. 108 (2020) pp. 1–7. <https://doi.org/10.1016/J.ULTRAS.2020.106166>.
 - [66] K.A. Tiwari, R. Raisutis, Post-processing of ultrasonic signals for the analysis of defects in wind turbine blade using guided waves, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 53 (2018) pp. 546–555. <https://doi.org/10.1177/0309324718772668>.
 - [67] C.Q. Gómez Muñoz, F.P. García Márquez, A New Fault Location Approach for Acoustic Emission Techniques in Wind Turbines, *Energies*. 9 (2016) pp. 1–14. <https://doi.org/10.3390/EN9010040>.
 - [68] Z. Bo, Z. Yanan, C. Changzheng, Acoustic emission detection of fatigue cracks in wind turbine blades based on blind deconvolution separation, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 40 (2017) pp. 959–970. <https://doi.org/10.1111/FFE.12556>.
 - [69] T. Krause, J. Ostermann, Damage detection for wind turbine rotor blades using airborne sound, *Structural Control and Health Monitoring*. 27 (2020) pp. 1–15. <https://doi.org/10.1002/STC.2520>.
 - [70] S. Sun, T. Wang, H. Yang, F. Chu, Damage identification of wind turbine blades using an adaptive method for compressive beamforming based on the generalized minimax-concave penalty function, *Renewable Energy*. 181 (2022) pp. 59–70. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.09.024>.
 - [71] A. Reddy, V. Indragandhi, L. Ravi, V. Subramaniaswamy, Detection of Cracks and damage in wind turbine blades using artificial intelligence-based image analytics, *Measurement*. 147 (2019) pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.07.051>.
 - [72] D. Zhang, R. Watson, G. Dobie, C. MacLeod, A. Khan, G. Pierce, Quantifying impacts on remote photogrammetric inspection using unmanned aerial vehicles, *Engineering Structures*. 209 (2020) pp. 1–28. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.109940>.
 - [73] C. Zhang, C. Wen, J. Liu, Mask-MRNet: A deep neural network for wind turbine

- p>blade fault detection,
- Journal of Renewable and Sustainable Energy*
- . 12 (2020) pp. 1–9.
- <https://doi.org/10.1063/5.0014223/1017508>
- .
- [74] X.Y. Zhao, C.Y. Dong, P. Zhou, M.J. Zhu, J.W. Ren, X.Y. Chen, Detecting surface defects of wind turbine blades using an Alexnet deep learning algorithm, *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics Communications and Computer Sciences*. E102-A (2019) pp. 1817–1824. <https://doi.org/10.1587/transfun.E102.A.1817>.
 - [75] M. Doroshnasir, T. Worzewski, R. Krankenhagen, M. Röllig, On-site inspection of potential defects in wind turbine rotor blades with thermography, *Wind Energy*. 19 (2016) pp. 1407–1422. <https://doi.org/10.1002/WE.1927>.
 - [76] H. Sanati, D. Wood, Q. Sun, Condition Monitoring of Wind Turbine Blades Using Active and Passive Thermography, *Applied Sciences*. 8 (2018) pp. 1–19. <https://doi.org/10.3390/APP8102004>.
 - [77] X. Li, Y. He, H. Wang, G. Sun, J. Yu, X. Du, M. Hu, Y. Wang, Thermal Inspection of Subsurface Defects in Wind Turbine Blade Segments Under the Natural Solar Condition, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 71 (2024) pp. 11488–11497. <https://doi.org/10.1109/TIE.2023.3335455>.
 - [78] G.A. Skrimpas, K. Kleani, N. Mijatovic, C.W. Sweeney, B.B. Jensen, J. Holboell, Detection of icing on wind turbine blades by means of vibration and power curve analysis, *Wind Energy*. 19 (2016) pp. 1819–1832. <https://doi.org/10.1002/WE.1952>.
 - [79] D. Tcherniak, L.L. Mølgaard, Active vibration-based structural health monitoring system for wind turbine blade: Demonstration on an operating Vestas V27 wind turbine, *Structural Health Monitoring*. 16 (2017) pp. 536–550. <https://doi.org/10.1177/1475921717722725>.
 - [80] A. Panagiotopoulos, T. Dmitri, F.D. Spilios, Damage detection on the blade of an operating wind turbine via a single vibration sensor and statistical time series methods: Exploring the performance limits of robust methods, *Structural Health Monitoring*. 22 (2023) pp. 433–448. <https://doi.org/10.1177/14759217221094493>.
 - [81] W. Holub, U. Hassler, Evaluation of Acquisition Geometries for Imaging of Ondulations in Glass-Fiber Reinforced Materials, in: *5th Conference on Industrial Computed Tomography (ICT) 2014*, Wels, Austria, 2014: pp. 53–54.
 - [82] J.G. Fantidis, C. Potolias, D. V. Bandekas, Wind turbine blade nondestructive testing with a transportable radiography system, *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2011 (2011) pp. 1–6. <https://doi.org/10.1155/2011/347320>.
 - [83] S. Zhang, Y. He, Y. Gu, Y. He, H. Wang, H. Wang, R. Yang, T. Chady, B. Zhou, UAV based defect detection and fault diagnosis for static and rotating wind turbine blade: a review, *Nondestructive Testing and Evaluation*. 40(4) (2024) pp. 1691–1729. <https://doi.org/10.1080/10589759.2024.2395363>.
 - [84] Z. Zhang, Z. Shu, Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Assisted Damage Detection of Wind Turbine Blades: A Review, *Energies*. 17 (2024) pp. 1–31. <https://doi.org/10.3390/EN17153731>.
 - [85] S.J. Heo, W.S. Na, Review of Drone-Based Technologies for Wind Turbine Blade Inspection, *Electronics (Switzerland)*. 14 (2025) pp. 1–18.

<https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS14020227>.

- [86] P. Helming, A. Intemann, K.P. Webersinke, A. Von Freyberg, M. Sorg, A. Fischer, Assessing the rotor blade deformation and tower-blade tip clearance of a 3.4 MW wind turbine with terrestrial laser scanning, *Wind Energy Science*. 8 (2023) pp. 421–431. <https://doi.org/10.5194/WES-8-421-2023>.
- [87] A.U. Dilek, A.D. Oguz, F. Satis, Y.D. Gokdel, M. Ozbek, Condition monitoring of wind turbine blades and tower via an automated laser scanning system, *Engineering Structures*. 189 (2019) pp. 25–34. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.03.065>.
- [88] M. Grosse-Schwiep, J. Piechel, T. Luhmann, Measurement of rotor blade deformations of wind energy converters with laser scanners, *Journal of Physics: Conference Series*. 524 (2014) pp. 1–8. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/524/1/012067>.
- [89] B. Mitka, P. Klapa, J. Gniadek, Use of terrestrial laser scanning for measurements of wind power stations, *Geomatics and Environmental Engineering*. 13 (2019) pp. 39–49. <https://doi.org/10.7494/GEOM.2019.13.1.39>.
- [90] P. Helming, A. Von Freyberg, M. Sorg, A. Fischer, Wind Turbine Tower Deformation Measurement Using Terrestrial Laser Scanning on a 3.4 MW Wind Turbine, *Energies*. 14 (2021) pp. 1–14. <https://doi.org/10.3390/en14113255>.
- [91] F. Schill, A. Eichhorn, Investigations of low-and high-frequency movements of wind power plants using a profile laser scanner, in: 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Wien, 2016: pp. 1–8.
- [92] S. Artese, G. Nico, TLS and GB-RAR measurements of vibration frequencies and oscillation amplitudes of tall structures: An application to wind towers, *Applied Sciences (Switzerland)*. 10 (2020) pp. 1–20. <https://doi.org/10.3390/APP10072237>.
- [93] M. Ozbek, An Innovative Structural Damage Detection System for Preventive Maintenance of Wind Turbines, *Arabian Journal for Science and Engineering*. 47 (2022) pp. 13623–13637. <https://doi.org/10.1007/S13369-022-07171-Z>.
- [94] C. Jonscher, P. Helming, D. Märtns, A. Fischer, D. Bonilla, B. Hofmeister, T. Gießmann, R. Rolfes, Dynamic displacement measurement of a wind turbine tower using accelerometers: tilt error compensation and validation, *Wind Energy Science*. 10 (2025) pp. 193–205. <https://doi.org/10.5194/WES-10-193-2025>.
- [95] Laser-3D Jacek Krawiec, (n.d.). <https://www.laser-3d.pl/zoller-frohlich/zf-imager-5016/> (accessed December 2, 2024).
- [96] G. Jacobs, Understanding Spot Size for Laser Scanning, *Professional Surveyor Magazine*. (2006) pp. 1–3.
- [97] G.B. Optics, *Gaussian Beam Optics 2, Technology*. (2006) pp. 1–14.
- [98] A. Pesci, G. Teza, E. Bonali, Terrestrial laser scanner resolution: Numerical simulations and experiments on spatial sampling optimization, *Remote Sensing*. 3 (2011) pp. 167–184. <https://doi.org/10.3390/rs3010167>.
- [99] P. Stałowska, C. Suchocki, M. Rutkowska, Crack detection in building walls based on geometric and radiometric point cloud information, *Automation in Construction*.

- 134 (2022) pp. 1–19. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2021.104065>.
- [100] R. Uppu, Laser Beam Profile , Spot size and Beam Divergence, in: 2017: pp. 1–3.
- [101] R. Blaskow, D. Schneider, Analysis and correction of the dependency between laser scanner intensity values and range, in: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 2014: pp. 107–112. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-107-2014>.
- [102] R. Sabatini, M. Richardson, Airborne Laser Systems Testing and Analysis, AGARDograp, NATO Research and Technology Organization (RTO), 2010.
- [103] T. Xu, L. Xu, B. Yang, X. Li, J. Yao, Terrestrial laser scanning intensity correction by piecewise fitting and overlap-driven adjustment, Remote Sensing. 9 (2017) pp. 1–16. <https://doi.org/10.3390/rs9111090>.
- [104] D. Carrea, A. Abellan, F. Humair, B. Matasci, M.H. Derron, M. Jaboyedoff, Correction of terrestrial LiDAR intensity channel using Oren-Nayar reflectance model: An application to lithological differentiation, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 113 (2016) pp. 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.12.004>.
- [105] S. Kaasalainen, A. Jaakkola, M. Kaasalainen, A. Krooks, A. Kukko, Analysis of incidence angle and distance effects on terrestrial laser scanner intensity: Search for correction methods, Remote Sensing. 3 (2011) pp. 1–15. <https://doi.org/10.3390/rs3102207>.
- [106] A. Kukko, S. Kaasalainen, P. Litkey, Effect of incidence angle on laser scanner intensity and surface data, Applied Optics. 47 (2008) pp. 986–992. <https://doi.org/10.1364/AO.47.000986>.
- [107] K. Tan, X. Cheng, Q. Ju, S. Wu, Correction of Mobile TLS Intensity Data for Water Leakage Spots Detection in Metro Tunnels, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 13 (2016) pp. 1711–1715. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2605158>.
- [108] K. Tan, X. Cheng, Correction of incidence angle and distance effects on TLS intensity data based on reference targets, Remote Sensing. 8 (2016) pp. 1–20. <https://doi.org/10.3390/rs8030251>.
- [109] T. Xu, L. Xu, X. Li, J. Yao, Detection of Water Leakage in Underground Tunnels Using Corrected Intensity Data and 3D Point Cloud of Terrestrial Laser Scanning, IEEE Access. 20 (2018) pp. 1–9. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2842797>.
- [110] B. Höfle, N. Pfeifer, Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 62 (2007) pp. 415–433. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.05.008>.
- [111] M. Balaguer-Puig, A. Molada-Tebar, A. Marqués-Mateu, J.L. Lerma, Characterisation of intensity values on terrestrial laser scanning for recording enhancement, ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XLII-2/W5 (2017) pp. 49–55. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-49-2017>.
- [112] P. Stałowska, C. Suchocki, A. Zagubień, Terrestrial laser scanning for wind turbine blade defect detection, Measurement. 246 (2025) pp. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.116706>.

- [113] P. Stałowska, Possibilities and limitations of terrestrial laser scanning for crack detection in building walls, in: 12th International Conference “Environmental Engineering,” Environmental Engineering (Lithuania), 2023: pp. 1–5. <https://doi.org/10.3846/enviro.2023.914>.
- [114] P. Stałowska, C. Suchocki, A. Zagubień, Application of terrestrial laser scanning measurements for wind turbine blade condition surveying, Metrology and Measurement Systems. 30 (2023) pp. 403–422. <https://doi.org/10.24425/mms.2023.146419>.
- [115] M. Damińska-Suchocka, J. Katzer, Terrestrial Laser Scanning of Lunar Soil Simulants, Materials. 15 (2022) pp. 1–16. <https://doi.org/10.3390/ma15248773>.