

Wydział Inżynierii Mechanicznej



Centrum Kompetencji INTERDYSCYPLINARNE CENTRUM ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII

Ekspertyza w ramach Badania Zleconego nr BZ-99/2022/WIM

Temat: Opracowanie analizy wpływu generowanych refleksów świetlnych przez projektowaną farmę fotowoltaiczną i carporty na statki powietrzne wykonujące operacje startu, lądowania oraz kręgi lotniskowe na terenie Portu Lotniczego Olsztyn-Mazury w Szymanach



Zlecający:

Warmia i Mazury Sp. z o. o.
Szymany 150
12-100 Szczytno

Kierownik Zlecenia/Autor Ekspertyzy: Dr inż. Adam Mroziński

DYREKTOR
INTERDYSCYPLINARNEGO CENTRUM
ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII

.....*dr.inż. Adam Mroziński*.....

Podpis

Wrzesień 2022r.

Spis treści

	Str.
Definicje pojęć wykorzystanych w opracowaniu	3
1. Przedmiot i zakres ekspertyzy	5
2. Podstawa ekspertyzy	6
3. Cel opracowania	6
4. Inwestycje w instalacje PV na lotniskach – analiza przykładów działań i inwestycji	8
4.1. Porty lotnicze z instalacjami PV w Europie i na świecie	8
4.2. Porty lotnicze z instalacjami PV w Polsce	12
4.3. Porty lotnicze neutralne pod względem emisji CO ₂ do 2030 roku	14
5. Instalacje PV na lotniskach – analiza możliwości występowania refleksów światła	15
6. Technologie modułów PV i inne czynniki ograniczające refleksy świetlne	19
7. Analiza planowanej instalacji PV	24
7.1. Zakres inwestycji – założenia koncepcyjne	24
7.2. Działania umożliwiające zmniejszenie wpływu refleksów światła na lotnisko	26
8. Oprogramowanie Forge Solar: analiza wpływu refleksów na lotniskach	28
8.1. Dane wejściowe do projektu	28
8.2. Opis wykorzystanej aplikacji Forge Solar	29
8.3. Zdefiniowane dane wykorzystane w aplikacji Forge Solar	33
9. Wyniki analizy i dyskusja	36
10. Podsumowanie	41
11. Literatura	44
12. Dokumenty wykorzystane do opracowania ekspertyzy	47
12.1. Mapa zagospodarowania terenów Portu Lotniczego Olsztyn-Mazury w Szymanach	47
12.2. Koncepcja projektowa wykonania instalacji PV	47
12.3. Wytyczne Federal Aviation Administration	47
12.4. Wytyczne European Union Aviation Safety Agency	47

Definicje pojęć wykorzystanych w opracowaniu

FAA - Federal Aviation Administration – organ nadzoru lotniczego, agencja Ministerstwa Transportu Stanów Zjednoczonych powstała celem regulacji i nadzoru wszystkich aspektów lotnictwa cywilnego w Stanach Zjednoczonych. Została powołana do życia na mocy Federalnej Ustawy o Lotnictwie z 1958 roku jako Federal Aviation Agency. Obecną nazwę przybrała w 1966 roku, kiedy stała się częścią amerykańskiego Ministerstwa Transportu.

EASA - European Union Aviation Safety Agency - Agencja Bezpieczeństwa Lotniczego Unii Europejskiej - odpowiada za zapewnienie bezpieczeństwa i ochrony środowiska w transporcie lotniczym w Europie. Została założona w 2002 roku. Jej członkowie to 27 krajów UE oraz Islandia, Liechtenstein, Norwegia i Szwajcaria.

ATCT - Airport Traffic Control Tower - wieża kontroli ruchu lotniczego – specjalny budynek w porcie lotniczym (zazwyczaj oszklony na okrągło co zapewnia dobrą widoczność całego lotniska i podejść), lub wywyższony oszklony fragment budynku (na mniejszych lotniskach), z którego odbywa się kontrola ruchu lotniczego na polu manewrowym lotniska (na powierzchni lotniska) i w otaczającym lotnisko obszarze.

ATC - Air Traffic Control - Kontrola ruchu lotniczego – służba ustanowiona w celu zapobiegania niebezpiecznym zbliżeniom statków powietrznych ze sobą, zarówno podczas lotu, jak i na lotniskach. Kontrola ruchu lotniczego ma też na celu usprawnianie i utrzymywanie uporządkowanego przepływu ruchu lotniczego. Do służby kontroli ruchu lotniczego zalicza się:

- kontrolę obszaru (**ACC** – Area Control Centre) – ustanowioną w celu sprawowania kontroli ruchu lotniczego wobec lotów kontrolowanych wykonywanych w drogach lotniczych i górnej przestrzeni powietrznej.
- kontrolę zbliżania (**APP** – Approach Control) – ustanowioną w celu sprawowania kontroli ruchu lotniczego w odniesieniu do lotów kontrolowanych statków powietrznych przylatujących i odlatujących z lotnisk komunikacyjnych oraz przecinających rejony kontrolowane tych lotnisk.
- kontrolę lotniska (**TWR** – Tower) – ustanowioną w celu sprawowania kontroli ruchu lotniczego w ruchu lotniskowym.
- kontrolę ruchu naziemnego (**GND** – Ground Controller) – ustanowioną w celu sprawowania kontroli ruchu lotniczego wobec statków powietrznych znajdujących się na polu manewrowym lotniska kontrolowanego.

Statek powietrzny – statek latający zdolny do unoszenia się (lotu) w atmosferze na skutek statycznego lub aerodynamicznego oddziaływania powietrza. Polskie prawo lotnicze wyróżnia jedenaście klas statków powietrznych (samolot, szybowiec, motoszybowiec, śmigłowiec, wiatrakowiec, balon, sterowiec, hybryda, spadochron ratowniczy, statek bezzałogowy ciężki, urządzenie latające).

ULC – Urząd Lotnictwa Cywilnego – Urząd Lotnictwa Cywilnego będącego organem centralnej administracji rządowej w Polsce właściwym w sprawach lotnictwa cywilnego.

Lotnisko – Port lotniczy – wydzielony obszar na lądzie, wodzie lub innej powierzchni, w całości lub w części przeznaczony do wykonywania startów, lądowań i naziemnego lub

nawodnego ruchu statków powietrznych, wraz ze znajdującymi się w jego granicach obiektami i urządzeniami budowlanymi o charakterze trwałym, wpisany do rejestru lotnisk. Ich wyposażenie zróżnicowane jest w zależności od liczby odprawianych pasażerów i przeładowywanych towarów. Port lotniczy powinien posiadać: przynajmniej jeden pas startowy, drogi zjazdu z pasa startowego, płytę postojową, budynek terminalu (mieszczącego poczekalnię, bagażownię, strefę odprawy, strefę sklepów wolnocłowych, siedzibę zarządu lotniska). Na lotnisku może znajdować się również terminal cargo (towarowy, pocztowy).

Krąg lotniskowy (Airfield traffic pattern albo Aerodrome traffic circuit) - oznacza określoną trasę, na której statek powietrzny wykonuje lot w sąsiedztwie lotniska. Głównym zadaniem kręgu lotniskowego jest uporządkowanie ruchu nad lotniskiem, a jego poszczególne elementy mają swoje określone nazwy stosowane w komunikacji radiowej co ułatwia orientację wszystkim samolotom znajdującym się nad lotniskiem. Wysokość lotu po kręgu (na pozycji z wiatrem) wynosi zwykle od 1000 stóp nad terenem. W niniejszym opracowaniu kierowano się definicją kręgu lotniskowego wg okólnika doradczego nr 001/2010 Urzędu Lotnictwa Cywilnego z sierpnia 2010 roku. Po konsultacjach ze zleceniodawcą przyjęto wartość 1500 stóp – 450 metrów.

Odbite światło słoneczne - refleksy światła - odbłask lub błysk (Solar Glint and Glare) – światło słoneczne odbite od błyszczącej powierzchni modułu PV, które może wpływać na bezpieczeństwo ruchu lotniczego.

Warstwa ARC na modułach PV - warstwa Anti Reflective Coating na modułach PV zmniejszająca odbicie promieni słonecznych od powierzchni modułu.

Olśnienie - warunki widzenia powstałe na skutek niewłaściwego rozkładu, bądź zakresu luminancji, lub też występowania zbyt dużych kontrastów luminancji. Powoduje uczucie przykrości i niewygodę widzenia. Ponadto powodować może obniżenie zdolności rozpoznawania szczegółów lub przedmiotów

Luminancja - wielkość fotometryczna będąca miarą natężenia oświetlenia padającego w danym kierunku. Opisuje ilość światła, które przechodzi lub jest emitowane przez określoną powierzchnię i mieści się w zadanym kącie bryłowym. Jest to miara wrażenia wzrokowego, które odbiera oko ze świecącej powierzchni. Jednostką luminancji w układzie SI jest kandela na metr kwadratowy (cd/m^2)

Wartości referencyjne modułu PV - wartości wyrażające przedział/poziom dopuszczalny w jakim powinien mieścić się prawidłowy wynik badania/deklaracji cech dostawcy modułów PV, przyjętych do realizacji planowanej inwestycji farmy PV. Jeżeli wynik wykracza poza ten przedział (brak wymaganej cechy), oznacza to wynik nieprawidłowy.

Moduł referencyjny PV - moduł spełniający wymogi dopuszczalnych wartości referencyjnych, przyjętych do realizacji planowanej inwestycji farmy PV.

1. Przedmiot i zakres ekspertyzy

Przedmiotem niniejszej ekspertyzy jest przeprowadzenie badań i analiz w zakresie możliwości generowania refleksów świetlnych przez moduły PV, które będą funkcjonować na:

- a) Planowanej do zbudowania przez Zarząd Portu Lotniczego Olsztyn-Mazury w Szymanach farmie PV zlokalizowanej obok terenów lotniska.
- b) Planowanych do zbudowania na tzw. carportach z instalacjami PV na terenach parkingów portu lotniczego.

Do badań i analiz przyjęto, że zastosowane w ramach inwestycji instalacje PV będą musiały charakteryzować takimi parametrami projektowymi i cechami technologicznymi, które pozwolą je eksploatować w otoczeniu portu lotniczego. Założono jednak, że opracowana ekspertyza będzie obejmować dwa warianty:

- a) Wykorzystywane do budowy instalacji PV moduły PV (ew. warstwy szklane stosowane do ich produkcji) będą posiadały testy refleksyjności weryfikowane niezależnymi badaniami. Biorąc pod uwagę ciągły postęp w zakresie technologii modułów PV nie jest możliwe wskazanie szczegółowo określonego współczynnika antyrefleksyjności dla modułów PV, które powinny być zastosowane na analizowanej inwestycji. Wskazane zostaną parametry referencyjne, dla takiego modułu PV. Rolą inwestora jest wybór takiego rozwiązania technologicznego, które będzie maksymalnie ograniczało efekt odbicia światła na terenie lotniska oraz będzie spełniało założenia budżetowe.
- b) Wykorzystywane do budowy instalacji PV moduły będą rozwiązaniami standardowymi, które stosuje się obecnie w instalacjach farm PV. Wariant drugi przyjęto biorąc pod uwagę dużą odległość od pasa startowego lokalizacji farmy PV przewidzianą do realizacji oraz fakt, że koszt systemów modułów PV posiadających wysokie parametry testów refleksyjności jest bardzo wysoki. W przypadku potwierdzenia tego wariantu taki zostanie rekomendowany inwestorowi.

W zakresie cech modułów PV ekspertyza będzie się też odnosiła do profili odbicia od materiału modułów PV, które są w bazach danych programu symulacyjnego Forge Solar, wykorzystywanego obecnie bardzo często do obliczeń i analiz na świecie i zgodnego z wytycznymi Federal Aviation Administration.

W ekspertyzie wskazano wartości referencyjne modułów PV, które powinny być zastosowane podczas inwestycji, aby zminimalizować możliwość powstawania refleksów światła. Posługując się programem symulacyjnym Forge Solar określono ryzyko generowania refleksów świetlnych utrudniających pracę personelu TWR i wykonywania manewrów przez statki powietrzne przy uwzględnieniu dobowego i całorocznego ruchu słońca.

Analiza zawiera także sposoby eliminacji generowania refleksów świetlnych przez farmę fotowoltaiczną m.in. poprzez właściwe ustawienia modułów fotowoltaicznych. Obszar planowanej farmy fotowoltaicznej, oraz usytuowanie wieży kontroli ruchu została zdefiniowana przez inwestora w postaci mapy zagospodarowania lotniska, która została udostępniona wykonawcy ekspertyzy.

W analizie wzięto pod uwagę obowiązujące przepisy, między innymi art. 87 a, ust. 1 Prawo lotnicze: „Emisja wiązki lasera lub światła z innych źródeł w strefach przestrzeni powietrznej – Zabrania się emitowania lub powodowania emisji, w strefach przestrzeni powietrznej wykorzystywanej do żeglugi powietrznej wiązki lasera lub światła z innych źródeł w kierunku statku powietrznego w sposób mogący spowodować olśnienie, oślepienie lub wystąpienie poświaty i mogący stworzyć zagrożenie bezpieczeństwa statku powietrznego albo życia lub zdrowia załogi lub pasażerów na jego pokładzie”.

W analizie wzięto pod uwagę wytyczne Federal Aviation Administration, która wydała zalecenia dot. farm fotowoltaicznych na terenie lotnisk. 3.1.2 Reflectivity FAA Airport Solar Guide – Technical Guidance for Evaluating Selected Solar Technologies on Airports. Wykorzystywany program symulacyjny spełnia te wytyczne [53].

W analizie wzięto również pod uwagę wytyczne Agencji Bezpieczeństwa Lotniczego Unii Europejskiej, które traktowane są jako zalecenia [54].

2. Podstawa ekspertyzy

Ekspertyzę opracowano na podstawie:

- a) Podpisanego dokumentu zlecenia wykonania prac badawczych przez zlecającego Warmia i Mazury Sp. z o.o. Ekspertyza opracowana została na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich.
- b) Podstawą przygotowania ekspertyzy był stan branży techniki i inżynierii instalacji PV w otoczeniu lotnisk, funkcjonujący wg wiedzy autora na miesiąc wrzesień 2022 roku. Do symulacji wykorzystano program komputerowy Forge Solar dedykowany do przeprowadzania symulacji olśnień potencjalnie generowanych przez farmy fotowoltaiczne. Program Forge Solar, działa w oparciu o technologię SGHAT (Solar Glare Hazard Analysis Tool). SGHAT została opracowana przez amerykańską firmę SANDIA Laboratories. Forge Solar spełnia wymagania FAA i inne wymagania prawne [28].
- c) Przy tworzeniu ekspertyzy posłużono się dostępnymi wydawnictwami książkowymi, periodykami fachowymi, raportami firm doradczych i stowarzyszeń branżowych oraz innymi opracowaniami i referatami z zakresu odnawialnych źródeł energii oraz transportu lotniczego w tym publikacjami własnymi. Wykorzystane pozycje zestawione zostały w bibliografii na końcu ekspertyzy.

3. Cel opracowania

Biorąc pod uwagę zapisy zamówienia, doniesienia literaturowe oraz wymogi prawne konieczne jest przeprowadzenie badań, dotyczących generowania refleksów świetlnych przez planowaną do zbudowania przez Spółkę zarządzającą Portem Lotniczym Olsztyn-Mazury w Szymanach farmę fotowoltaiczną, zlokalizowaną na gruntach dzierżawionych od Województwa Warmińsko - Mazurskiego oraz przez carporty nad częścią parkingów na terenie portu lotniczego. Konieczne jest określenie wpływu projektowanej farmy PV na wieżę kontroli

ruchu lotniczego (TWR) oraz statki powietrzne wykonujące operacje startu i lądowania oraz kręgi lotniskowe. Analiza została przeprowadzona z wykorzystaniem dedykowanego oprogramowania do prognozowania obliczeniowego wpływu refleksów świetlnych. Celem ekspertyzy jest:

- Wykonanie analizy występowania refleksów światła z instalacji PV na terenie lotniska za pomocą oprogramowania Forge Solar do przewidywania występowania oślnienia, które uwzględnia wytyczne Federal Aviation Administration oraz wytyczne European Union Aviation Safety Agency.
- Zbadanie efektów refleksów i ich wpływu na otoczenie techniczne lotniska przy funkcjonowaniu zakładanej do zbudowania farmy PV oraz instalacji na carportach.
- Określenie odpowiednich środków zaradczych w celu zmniejszenia ewentualnych niekorzystnych oddziaływań planowanej do zbudowania farmy PV na funkcjonowanie lotniska.

4. Inwestycje w instalacje PV na lotniskach – analiza przykładów działań i inwestycji

4.1. Porty lotnicze z instalacjami PV w Europie i na świecie

Lotniska w Unii Europejskiej są w przededniu dostosowywania prowadzonych działalności do wyśrubowanych norm środowiskowych wpisanych w treść pakietu Fit for 55 oraz REPowerEU. Skala tego typu działań wychodzi poza Europę. Międzynarodowa Organizacja Lotnictwa Cywilnego (ICAO - International Civil Aviation Organization) prowadzi działania na rzecz wdrożenia systemu CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation). System ten ma wdrożyć standard ochrony środowiska dla wszystkich zrzeszonych lotnisk, który będzie się skupiać na zrównoważonym rozwoju. Działania będą zmierzać w kierunku uzyskania standardu niektórych lotnisk np. w Szwecji czy Japonii, które już osiągnęły zerową emisyjność [31].

Porty lotnicze coraz częściej wskazują cel zerowej emisji, promując wdrażanie instalacji OZE, stosując instalacje LED do oświetlenia czy też korzystając z pojazdów o niskim wpływie na środowisko w postaci pojazdów elektrycznych albo wodorowych [31][32].

Branża lotnicza od dawna jest krytykowana przez organizacje ekologiczne w zakresie wskazywanej bardzo dużej emisji dwutlenku węgla pochodzących z samolotów i obiektów portów lotniczych. Według Air Transport Action Group (ATAG) lotnictwo odpowiada za 12% wszystkich emisji CO₂ ze źródeł transportowych [15].

Stąd porty lotnicze w wielu krajach podejmują plany projektowe i inwestycje w farmy PV zlokalizowane na ich gruntach, albo na dachach lub elewacjach budynków. Lotniska z racji braku obiektów zacinających i przewadze terenów płaskich są bardzo dobrymi lokalizacjami na montaż systemów PV oraz małych turbin wiatrowych. Lotniska ze swoją nadwyżką wykorzystywanej powierzchni gruntów (m.in. tzw. tereny buforowe) mogą nie tylko być samowystarczalne, ale także generować wystarczającą ilość energii elektrycznej, aby wysłać nadmiar z powrotem do sieci [16][15][17].

Przykładem takich działań mogą być lotniska Kansai Airports Group w Japonii. Na jednym z lotnisk zrzeszonych - międzynarodowym porcie lotniczym Kansai zainstalowano turbiny wiatrowe Zephyr9000 o średnicy 5,5 m o mocy znamionowej 4,9 kW i rocznej wydajności 8 809 kWh. Lotnisko posiada również instalację dachową PV z 72 560 modułami PV, która generuje moc 12 MW [32].



Rysunek 1 Małe turbiny wiatrowe i instalacje PV w międzynarodowym porcie lotniczym Kansai - instalacja dachowa [31][32]

Znane są przypadki dużych inwestycji jak np. w Melbourne w Australii, gdzie instalacja PV zapewnia od 15% do 20% dostaw energii dla lotniska. Farma usytuowana jest na powierzchni 150 000 m². Zapewnia wystarczającą moc dla czterech terminali na terenie tego portu lotniczego. Jest to największy tego typu projekt w Australii i działała na drugim najbardziej ruchliwym lotnisku, generując 17 GW godzin energii elektrycznej rocznie. Innym australijskim lotniskiem z instalacją PV jest Międzynarodowy Port Lotniczy Darwin, który rozszerzy w najbliższym czasie moc swojej posiadanej instalacji PV równej 4 MW o dodatkowe 40 MW [13] [14].

Lotniska mają duże możliwości umiejscowienia instalacji PV zaczynając od dachów budynków, przez carporty nad parkingami, kończąc na terenach wokół lotnisk i samych pasów startowych. Przykładem spektakularnej instalacji PV na carportach jest farma PV mocy 2,67 MW zainstalowana na carportach na powierzchni 20289,9 m² przy międzynarodowym lotnisku w Cochin w Indiach. Instalacja taka umożliwia redukcję 1868 ton CO₂ rocznie [33].



Rysunek 2 Instalacja PV o mocy 2.67 MW w formie Carportów na Cochin International Airport Ltd. [33]

Międzynarodowy port lotniczy Cochin wyróżnia się dodatkowo tym, że poza carportami ma farmę PV na gruncie. To pierwsze na świecie lotnisko w pełni zasilane energią słoneczną, które jest zasilane przez elektrownię fotowoltaiczną o mocy 40 MW [35][36].



Rysunek 3 Instalacja farmy PV na międzynarodowym porcie lotniczym Cochin składa się z 46 150 paneli słonecznych, które są rozmieszczone na 45 akrach ziemi przy lotnisku [35][36]

W 2014 r. w międzynarodowym porcie lotniczym w Kuala Lumpur zainstalowano system PV o mocy 19 MW, aby zapewnić lotnisku 26 000 MWh rocznie [14][15][17][18].

Jedną z większych farm PV w USA zamontowanych na lotnisku znajduje się w porcie lotniczym Indianapolis, gdzie 76 000 paneli słonecznych na 162 akrach produkuje 17,5

megawatów energii [23]. USA jest liderem w tym zakresie. W roku 2020 wg przeprowadzonych badań aż 20 procent z 488 lotnisk publicznych funkcjonujących w USA posiadało instalacje PV [34].



Rysunek 4 Instalacja PV na lotnisku Chattanooga Metropolitan [18]

Przykładem lotniska zasilanego przez PV może być też port lotniczy w Tennessee, który stał się pierwszym lotniskiem w USA, które produkuje od 2019 roku całą energię elektryczną z energii słonecznej. Warto wspomnieć, że projekt ten został sfinansowany z dotacji Federalnej Administracji Lotnictwa USA. Poza tym w USA z energii PV korzysta Międzynarodowy port lotniczy Paul. W 2015 r. zakończono tam prace nad instalacją z 11 835 modułami PV na dachach konstrukcji parkingowych. Zainstalowana moc 3 MW dostarcza około 20% energii potrzebnej do funkcjonowania dwóch terminali i pozwala zaoszczędzić około 14 milionów dolarów w ciągu 30 lat. Poniżej przedstawiono przykłady instalacji PV funkcjonujących na lotniskach na świecie.



Rysunek 5 Instalacja PV podczas budowy na lotnisku w Melbourne [14] oraz na międzynarodowym lotnisku w Darwin [19]



Rysunek 6 Instalacja PV na międzynarodowym lotnisku w Dusseldorfie [21] oraz na międzynarodowym lotnisku w Denver w USA [20]



Rysunek 7 Instalacja PV na międzynarodowym lotnisku Thunder Bay oraz na międzynarodowym porcie lotniczym w Indianapolis [20]

Jeśli chodzi o znaczące inwestycje na portach lotniczych w Europie można tutaj wskazać instalacje farmy PV o mocy 15MW, zainstalowaną na lotnisku Schiphol w Amsterdamie. Wg doniesień prasowych na farmie zainstalowano 125 000 modułów cienkowarstwowych ze specjalnymi powłokami antyrefleksyjnymi, tak aby pochłaniały padające światło i jak najmniej odbijały. Wg inwestora zapewniło to, poza odpowiednim ustawieniem farmy (azymut kat pochylenia), minimalizację potencjalnego negatywnego wpływu refleksów światła na ruch lotniczy [44].



Rysunek 8 Instalacja farmy PV o mocy 15MW na lotnisku Schiphol w Amsterdamie [44]

Na terenie Międzynarodowego Portu Lotniczego we Wiedniu na 24 hektarach zainstalowano 55 000 nowych paneli słonecznych. Roczną produkcję szacuje się na 30 GWh. Flughafen Wien wcześniej ogłosił, że szczytowa moc zakładu wyniesie 24 MW, co przekłada się na dostarczenie do sieci maksymalnie 20 MW.

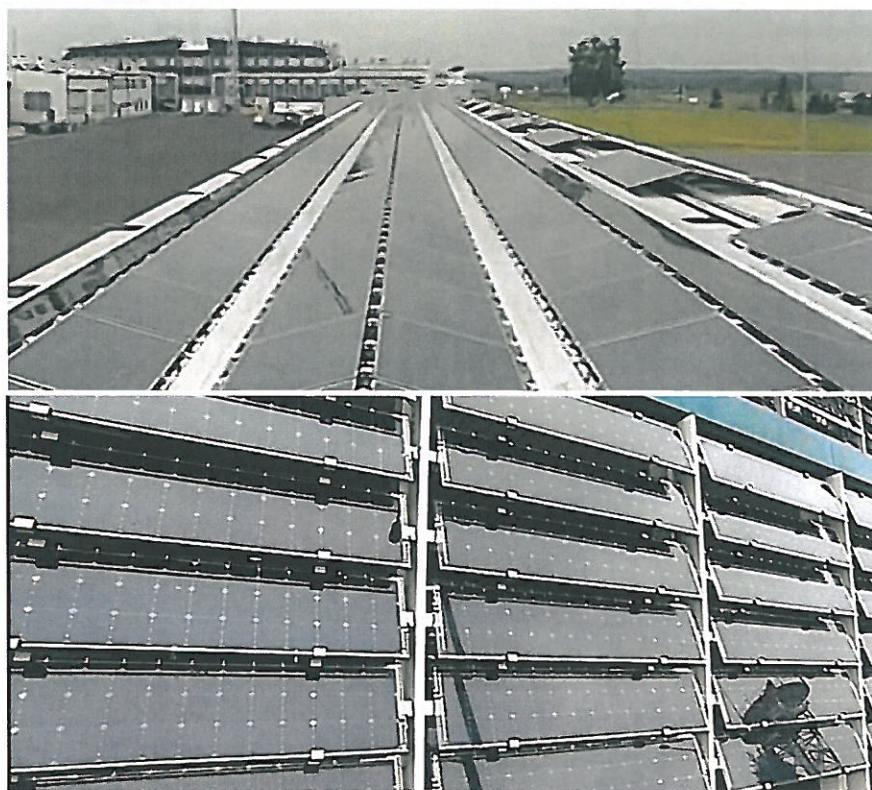


Rysunek 9 Instalacja farmy PV na terenie Międzynarodowego Portu Lotniczego we Wiedniu [48]

Działania portów lotniczych zmierzają w kierunku bardzo dużych inwestycji. Przykładem może być kanadyjski port lotniczy w Edmonton o zapowiadanej mocy 120 MW. Będzie to więc największa farma PV zlokalizowana na lotnisku na świecie [40]

4.2. Porty lotnicze z instalacjami PV w Polsce

Działania w zakresie inwestycji w instalacje OZE obserwujemy również na polskich lotniskach, na poziomie projektowania i wykonywania takich instalacji. Pierwszym portem lotniczym, który zainwestował w instalacje PV był Port Lotniczy Rzeszów-Jasionka [41].



Rysunek 10 Instalacje PV na dachach oraz elewacjach budynków Portu Lotniczego Rzeszów-Jasionka [41]

Instalacja PV na terenie Portu Lotniczego Rzeszów-Jasionka o mocy 450 kW została zamontowana na dachach oraz elewacji (na powierzchni 2,5 tys. m²) [41][42].

Następną znaczącą instalacją PV w polskim porcie lotniczym była inwestycja na dachu terminala T1 na lotnisku im. Chopina w Warszawie, gdzie funkcjonuje instalacja PV o mocy 800 kW i pokrywa ona od 15 do 20% zapotrzebowania energetycznego tego budynku [43].



Rysunek 11 Instalacja PV na dachu terminala T1 na lotnisku im. Chopina w Warszawie [43]

Szereg dużych inwestycji jest dopiero planowanych. Poznański Port Lotniczy zamierza pozyskiwać energię z fotowoltaiki, a nadwyżkę wykorzystać do produkcji certyfikowanego zielonego wodoru. Zainstalowane panele fotowoltaiczne wyprodukują energię, która w wyniku elektrolizy zgromadzonej wody opadowej, pochodzącej z powierzchni utwardzonych lotniska, zamieni się w zielony wodór. Cała inwestycja ruszy jeszcze w 2022 roku, a do jej realizacji wykorzystane będą unijne środki z Wielkopolskiego Regionalnego Programu Operacyjnego [37].

Podobne działania podjął ostatnio Port Lotniczy Bydgoszcz, który rozpoczął budowę swojej niezależności energetycznej. Zamontowano już pierwszych 110 modułów PV. Wkrótce na lotnisku powstanie jedna z największych farm fotowoltaicznych w kraju. Zaplanowano bowiem dla Portu Lotniczego Bydgoszcz budowę farmy PV na powierzchni 50 ha niezagospodarowanych obecnie terenów lotniska. Planowana instalacja będzie miała moc 25 MW [38][39].



Rysunek 12 Instalacja PV o mocy 50kWp na terenie Portu Lotniczego Bydgoszcz [38]

Szacuje się, że planowana inwestycja zapewni roczny przychód dla inwestora na poziomie nawet 21 mln zł. Dodatkowo pozwoli ograniczyć ilość emitowanego do atmosfery CO₂ o 17.255 mln ton rocznie.

4.3. Porty lotnicze neutralne pod względem emisji CO₂ do 2030 roku

Obecnie szereg portów lotniczych na świecie ogłasza plany osiągnięcia neutralności pod względem emisji CO₂ do 2030 roku. W tym celu opracowuje i wdraża się specjalne programy ekologiczne obejmujące m.in. poprawę efektywności energetycznej, wykorzystanie źródeł energii wolnych od CO₂, w tym rozszerzenie wykorzystania energii geotermalnej do ogrzewania i chłodzenia oraz budowę systemów PV. Ponadto lotniska stawiają na elektromobilność oraz wdrażanie technologii wodorowych [44][45][46].

Instalacje fotowoltaiczne mogą być wykorzystywane do dostarczania energii do różnych zastosowań i na różną skalę. Można zauważyć, że z biegiem lat technologia fotowoltaiczna stała się dojrzałą technologią. Obecnie instalacje fotowoltaiczne są coraz bardziej widoczne w regionach, w których przemieszczają się ludzie, takich jak domy, biura, lotniska, stacje kolejowe, autostrady itp. Ponadto moduły PV mogą być montowane na zbiornikach wodnych za pomocą specjalnych konstrukcji montażowych [1][2][3].

Kluczowy dla wykorzystania potencjału energetyki słonecznej w Unii Europejskiej ma być nowy program poświęcony dachowej fotowoltaice - European Solar Rooftops Initiative. Komisja Europejska chce stopniowo wprowadzać obowiązek montażu dachowych instalacji fotowoltaicznych na kolejnych obiektach [47]:

- Od 2026 roku obligatoryjna ma być instalacja fotowoltaiki na wszystkich nowych obiektach publicznych i komercyjnych o powierzchni użytkowej ponad 250 m².
- Od 2027 roku obowiązek ma objąć istniejące budynki publiczne i komercyjne o powierzchni użytkowej ponad 250 m².
- Natomiast od roku 2029 obowiązek montażu fotowoltaiki ma objąć wszystkie nowe domy.

Budowa dużej ilości szklanych powierzchni modułów PV może jednak spowodować na niektórych obszarach zjawiska odbijanie światła od tych powierzchni. W wielu branżach, np. motoryzacyjnej i transporcie zjawisko odbijania się promieni słonecznych od powierzchni płaskich (woda, śnieg, lód) traktowane jest jako zjawisko szkodliwe.

Wskazywane są zalecenia stosowania okularów przeciwsłonecznych, najlepiej z soczewkami polaryzacyjnymi, które neutralizują oślepiające refleksy. W słoneczny dzień kierowca jadący bez odpowiednich okularów ma bardziej ograniczone pole widzenia i znacznie mniejszy komfort jazdy. Posiadają one specjalny filtr, który neutralizuje oślepiające słoneczne refleksy, odbijając światło zwiększa kontrast widzenia oraz dodatkowo chroni oczy przed szkodliwym promieniowaniem UV [11].

Czynniki te są najbardziej istotne w branży lotniczej, gdzie ewentualne refleksy światła odbijane od modułów PV zlokalizowanych na lotniskach mogą powodować zagrożenia bezpieczeństwa i obsługi lotnisk [26][27][28][53].

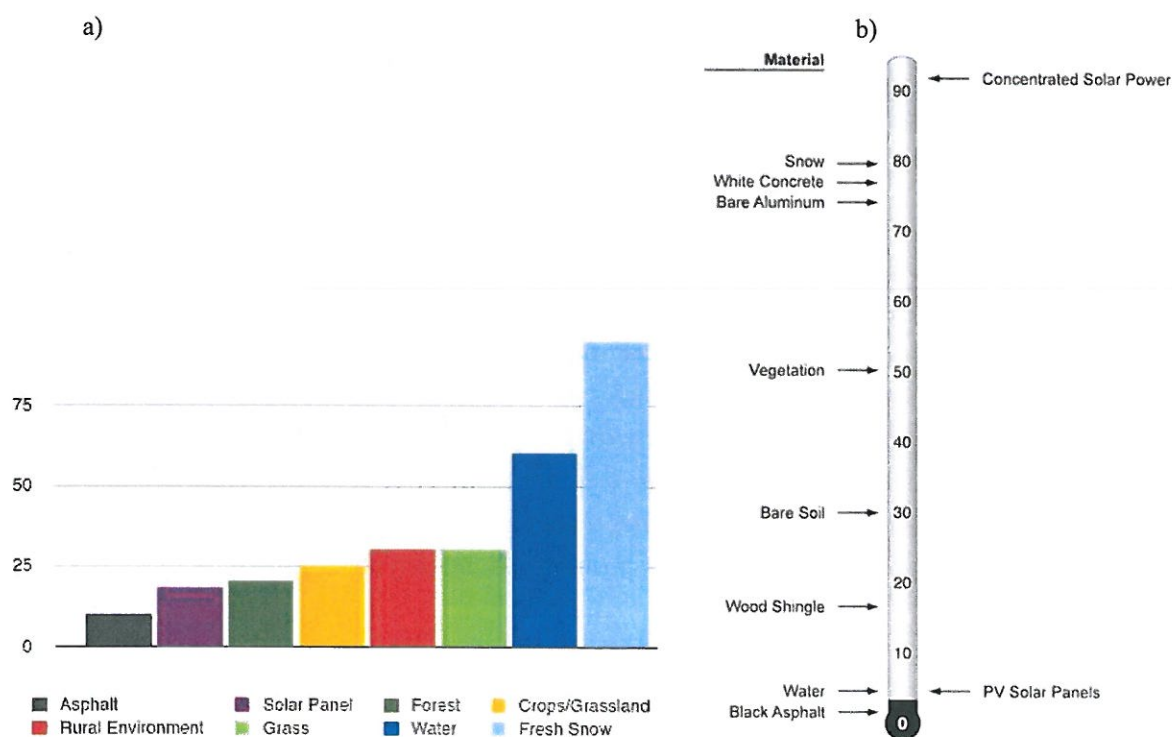
5. Instalacje PV na lotniskach – analiza możliwości występowania refleksów światła

W miarę upowszechniania się instalacji systemów fotowoltaicznych władze wielu krajów i instytucje branżowe coraz częściej analizują potencjalny wpływ modułów PV fotowoltaicznych na otoczenie oraz środowisko. W ustawodawstwie takich krajów, jak Kanada czy Australia, refleksy świetlne od powierzchni są wymienione jako czynniki uciążliwe, podobnie jak hałas [10][11][12].

W przypadku dachowych systemów fotowoltaicznych na obszarach mieszkalnych istnieje większa szansa, że refleksy słoneczne będą odbijane w kierunku pionowym bez negatywnego wpływu na ludzi. Nawet jeśli moduł fotowoltaiczny powoduje olśnienie, jest mało prawdopodobne, aby osoby znajdujące się w pobliżu, go zauważyły ze względu na wysokość budynku. Ale scenariusz zastosowania modułów PV na obiektach typu lotnisko jest inny ze względu na specyfikę i elementy infrastruktury lotniskowej (wieże kontrolne, drogi startowe, drogi kołowania, trasy lotów itp.) [53].

Aby uniknąć sytuacji niekorzystnego, potencjalnego oddziaływania (jego weryfikacji) farm fotowoltaicznych na ruch lotniczy, Federal Aviation Administration w USA (FAA) określiła warunki dotyczące wpływu odbicia promieniowania słonecznego. Zagadnienie to można weryfikować z wykorzystaniem dedykowanego oprogramowania [12].

Na poziomie europejskim swoje wytyczne w tym zakresie wprowadziła Agencja Bezpieczeństwa Lotniczego Unii Europejskiej, które traktowane są jako zalecenia. Agencja ta wyznaczyła graniczną wartość luminancji od generujących je obiektów na poniżej 20.000 cd/m^2 jako wartość dla instalacji fotowoltaicznych na terenie portów lotniczych [54].

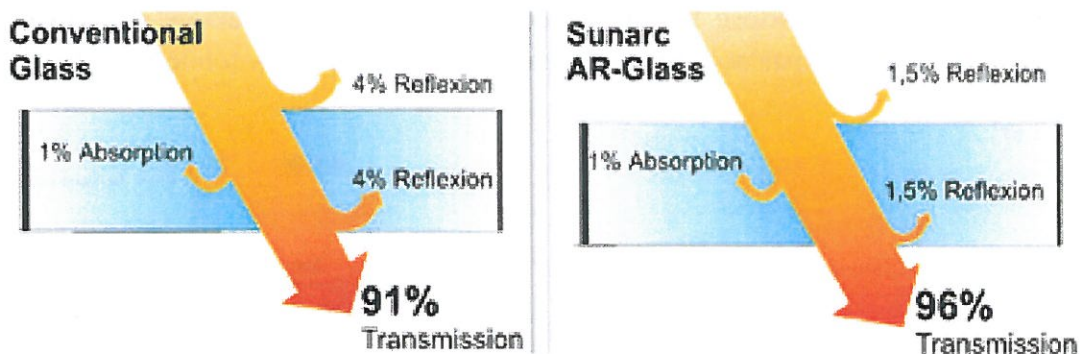


Rysunek 13 Porównanie różnych powierzchni w zakresie stopnia odbijania promieniowania słonecznego – ujęcie procentowe wg źródeł a) [20] oraz b) [24]

Pomijając oczywiste kwestie wymogów wynikających z bezpieczeństwa lotniczego, to co należy przede wszystkim pokreślić to fakt, że współczesne moduły PV są zaprojektowane tak, aby pochłaniały padające światło, a zatem aby odbijały tylko niewielką ilość padającego na nie światła słonecznego w porównaniu z większością innych powierzchni i obiektów. Wynika to z dążenia producentów do tego, aby moduły te pochłaniały jak najwięcej podających promieni słonecznych i przez to produkowały jak najwięcej energii elektrycznej. Przeprowadzone badania wskazują, że typowe moduły PV odbijają znacznie mniej światła niż np. lustro wody, a najbliżej można to porównać do odbicia powodowanego przez np. las [20].

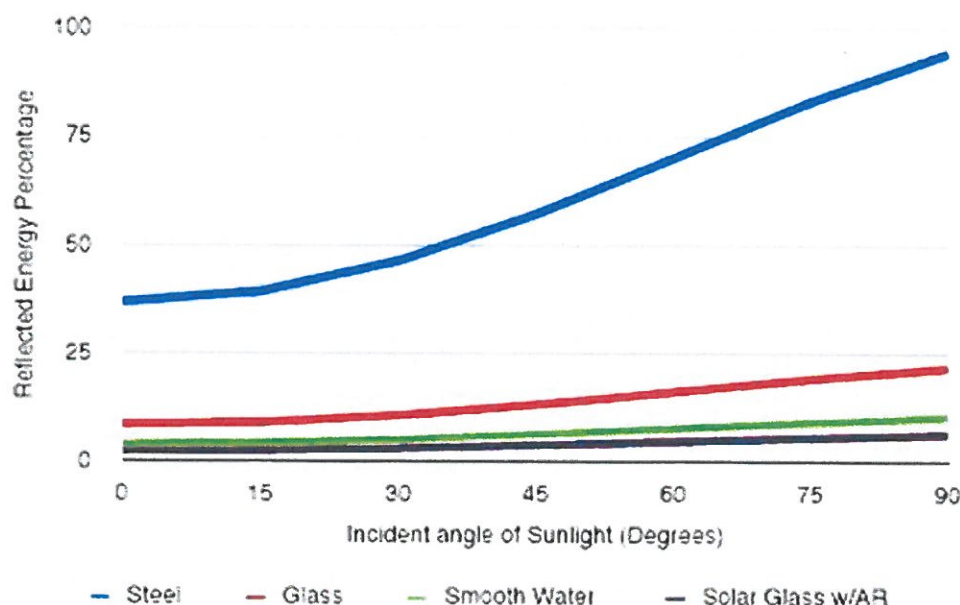
Zagadnienie porównawcze poziomu odbijanego promieniowania słonecznego przedstawiono na rysunku 13.

Aby zrozumieć ideę zagadnienia odbijania się promieniowania słonecznego od powierzchni modułów PV należy wziąć pod uwagę, że podstawowym elementem modułu PV jest szkło. Skutkiem doskonalenia technologii produkcji modułów PV szkło stosowane do modułów PV odbija tylko niewielką część padającego na niego światła – około 2-4%, w zależności od tego, czy w module zastosowano warstwę antyrefleksyjną. W dzisiejszych czasach, aby zwiększyć wydajność i moc modułów PV, większość modułów PV jest pokryta najczęściej powłoką antyrefleksyjną. Poniżej na rysunku 14 znajduje się przykład, w jaki sposób technologia antyrefleksyjna może zwiększyć transmisję światła w szkłe i zmniejszyć odbicie światła [18][20][21].



Rysunek 14 Efekt zastosowania warstwy antyrefleksyjnej na powierzchni modułu PV – [20]

Stopień wartości odbijania się światła od modułów PV prezentuje wykres z rysunku nr 14. Porównuje współczynnik odbicia gładkich powierzchni pod różnymi kątami światła słonecznego. Panele słoneczne pokryte powłoką antyrefleksyjną odbijają mniejszy procent światła niż lustro gładkiej wody. Warto zdawać sobie sprawę, że stal, beton czy las, odbija znacznie więcej padającego światła słonecznego niż każdy inny moduł PV dodatkowo zjawisko to zmienia się w zależności od kata padania promieni słonecznych.



Rysunek 15 Porównanie współczynnika odbicia od gładkich powierzchni pod różnymi kątami światła słonecznego [20]

Wg przeprowadzonego przeglądu literatury w niniejszej ekspertyzie największym zagrożeniem olśnienia w lotnictwie jest samo słońce – szczególnie, gdy jest nisko nad horyzontem. W opracowaniu „Solar photovoltaic energy facilities: assessment of potential for impact on aviation” firma analityczna Spaven Consulting wskazuje, że po analizie baz danych, dotyczących incydentów lotniczych w Wielkiej Brytanii i USA w latach 2000-2010 w których cytowany jako czynnik było olśnienie ze słońca, w przeważającej większości tych przypadków źródłem olśnienia było samo słońce. Kilka innych przypadków dotyczyło głównie odbłasków od wody na asfalcie lub z pobliskiego zbiornika wodnego. W żadnym wypadku nie wymieniono odbłasków z modułów PV lub „podobnych obiektów” jako czynnika przyczyniającego się do wypadku [10][13][15][17][18][19][20][21] [22].

Podobne wnioski zdiagnozowano w raporcie Solar Trade Association (STA), gdzie wskazano „brak przykładów problemów lub utrzymujących się skarg wynikających z rozproszenia uwagi pilota”. W raporcie tym analizowano ponad 200 inwestycji z punktu widzenia zagrożenia refleksami światła z instalacji PV przeprowadzonych dla brytyjskich lotnisk i deweloperów. Żadnemu nie odmówiono pozwolenia na budowę, chociaż niektóre wymagały elementów przeprojektowania [24].

Jako przykład symbiozy instalacji PV oraz portu lotniczego mogą posłużyć dwa kalifornijskie lotniska: Bakersfield i Oakland, gdzie moduły PV zastały zamontowane bezpośrednio przy pasie drogi startowej (zdjęcia poniżej). Obie inwestycje zostały przeanalizowane podczas procesu planowania, aby upewnić się, że odbłaski nie stanowią problemu. W żadnym przypadku nie odnotowano skarg na odbłaski ze strony pilotów od czasu zainstalowania instalacji PV [20].



Rysunek 16 Lokalizacja instalacji PV na lotnisku w Oakland (z lewej) oraz Bakersfield (z prawej) [20]

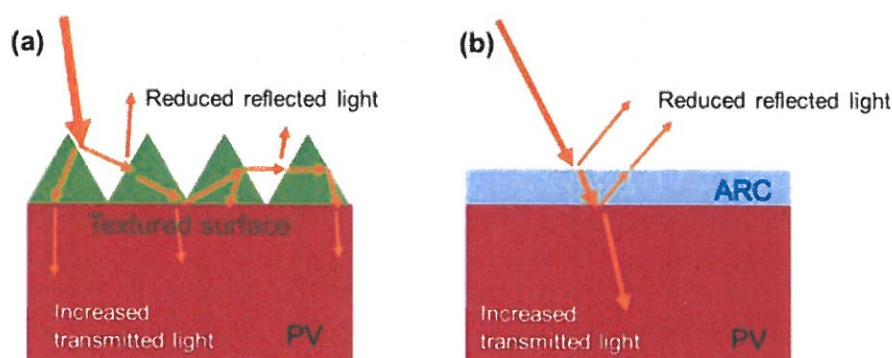
Na temat zastosowania instalacji PV przy lotniskach w USA wielokrotnie w swoich raportach badawczych wypowiadało się też Narodowe Laboratorium Energii Odnawialnej – National Renewable Energy Laboratory (NREL). Przegląd raportów tej instytucji wykazuje, że nowoczesne moduły fotowoltaiczne odbijają zaledwie dwa procent padającego na nie światła słonecznego – mniej niż powierzchnia wody i powierzchnia gleby. Instytucja ta potwierdza również, że większość modułów PV jest zaprojektowana z antyrefleksyjnymi szklanymi powierzchniami przednimi. Bazy danych brytyjskich i amerykańskich zdarzeń lotniczych nie zawierają przypadków wypadków, w których jako czynnik szkodliwy wymieniono olśnienie spowodowane przez instalację PV [25].

Zadaniem projektantów instalacji PV zlokalizowanych w okolicy lotniska jest zaprojektowanie farmy PV w sposób eliminujący możliwość powstawania ewentualnych odbłasków/olśnienia kontroli ruchu lotniczego (ATCT - TWR) oraz braku możliwości olśnienia pilotów statków powietrznych. W związku z tym podczas realizacji projektów PV na lotniskach na świecie wymaga się stosowania modułów z warstwami antyrefleksowymi oraz przeprowadza się analizy występowania refleksów światła.

6. Technologie modułów PV i inne czynniki ograniczające refleksy świetlne

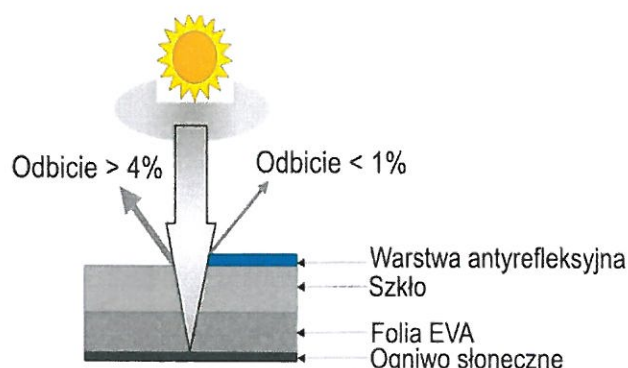
Maksymalna wydajność modułu fotowoltaicznego wymaga, aby padające światło słoneczne nie było odbijane w drodze do warstwy ogniwa PV. Technologie antyodblaskowe można ogólnie podzielić na dwie kategorie [26]:

- stosowanie Powłoki antyrefleksyjnej (ARC) na szkłe modułu, które redukują odbicie na powierzchniach granicznych powyżej warstwy absorbującej światło ogniwa PV;
- stosowanie teksturowanych powierzchni szkła służą podwójnemu celowi zwiększenia przepuszczalności światła, a także zatrzymywania światła w warstwie płyty szklanej. Często najskuteczniejsze strategie wykorzystują kombinację tych technik.



Rysunek 17 Technologie ograniczające odbicia promieniowania światła od modułów PV: a) teksturowanie szkła, b) stosowanie warstw ARC [26]

Kluczowe jest właściwe dobranie parametrów warstwy obniżającej odbicie, dzięki właściwemu współczynnikowi załamania światła. Na właściwości antyrefleksyjne wpływa grubość warstwy, współczynnik załamania, a przy nawet podstawowej kontroli tych parametrów łatwo jest osiągnąć zmniejszenie odbicia o 4-5%. Przykłady zastosowanej technologii tego typu przedstawiono na rysunkach 17, 18 oraz 19 [7].

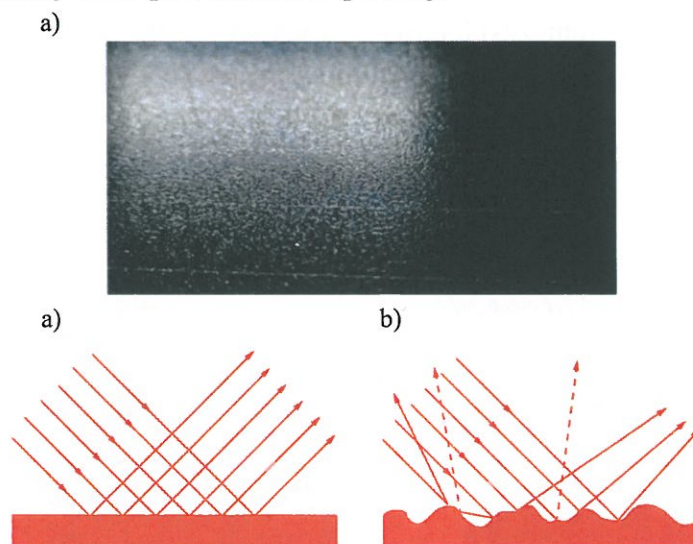


Rysunek 18 Schemat przejścia promieni słonecznych przez strukturę modułu PV [7]

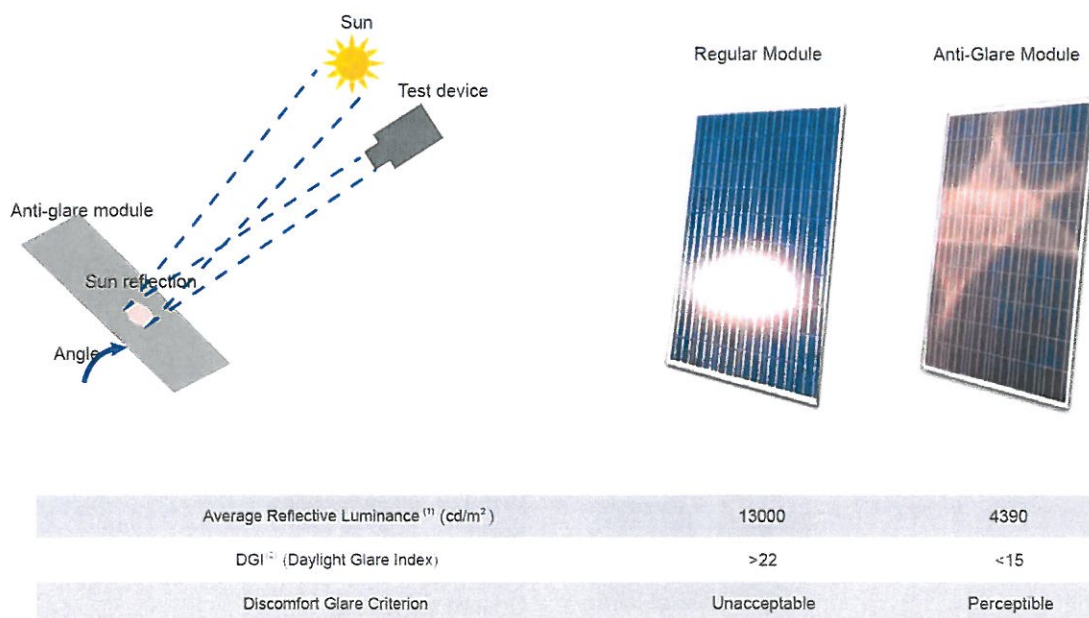
Podkreślić należy raz jeszcze że działania te są stosowane przede wszystkim w celu zwiększenia wydajności modułów. Niejako przy okazji uzyskuje się efekt minimalizowania refleksów światła. Dzięki tym zabiegom szyby modułów PV z powłoką antyrefleksyjną ARC i teksturowaniem powierzchni pozwalają na zwiększenie wydajności modułu od 3,5 do nawet

5% w stosunku do modułów pokrytych klasyczną szybą hartowaną o obniżonej zawartości żelaza. Które tracą z racji odbijania promieniowania słonecznego.

Jako przykład tego typu działań w branży PV można podać powłoki antyrefleksyjne stosowane w modułach PV firmy ZNShine, która stosuje specjalne powłoki porowate oraz warstwy ARC na swoich modułach PV. Powłoki te dzięki specjalnemu składowi warstwy ARC oraz teksturoowaniu tłumią odbijanie się światła na poziomie kilku procent. Efekt wpływu teksturowania i warstwy ARC przedstawiono poniżej.



Rysunek 19: a) Przykład powierzchni ARC ze specjalną teksturą i warstwą ARC dla modułów firmy ZNShine oraz porównanie powierzchni modułu bez tekstury (a) oraz z zastosowaną teksturą (b) - rozpraszanie światła na specjalnej teksturze – źródło www.znshine-solar.pl

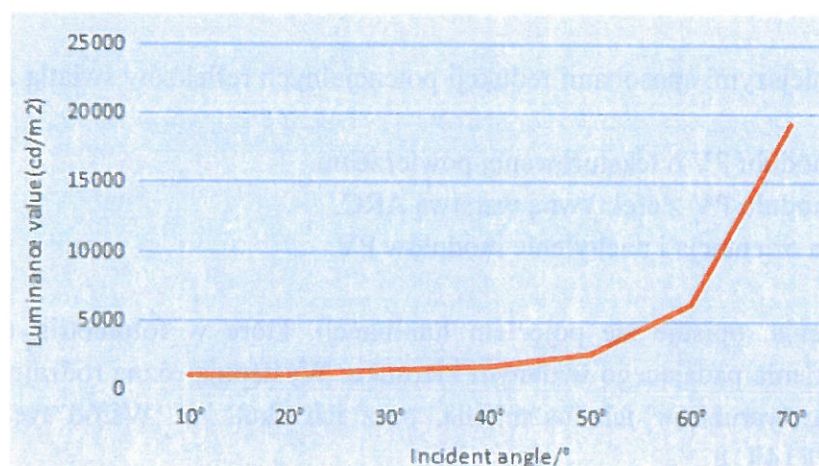


(1). Luminance received by the test device

(2). Daylight Glare Index is an extended simulation module based on UGR, which is defined by CIE (International Commission on Illumination). The index could be used for exterior environment and the lower the better.

Rysunek 20 Przykład realizacji procedury testowania modułów klasycznych PV oraz z zastosowaną warstwą ARC – źródło www.talesun.com

Na rysunku 20 przedstawiono przykład procedury testowania modułów klasycznych PV oraz z zastosowaną warstwą ARC. Firmy produkujące moduły PV prezentują w swojej ofercie informacji o parametrach modułów PV wartości Reflective Luminance Test. Przykład wykresu udostępnianego dla klientów z takiego pomiaru prezentuje rysunek 21.



Rysunek 21 Przykład testu Reflective Luminance Test Report dla modułów firmy ZNShine - źródło www.znshine-solar.pl

Z rysunku 21 wyraźnie widzimy, że problem podwyższonej luminancji dla weryfikowanego modułu PV występuje przy dużych kątach padania promieniowania słonecznego, a więc w godzinach porannych oraz późno południowych.

Po przeglądzie danych i ofert producentów modułów PV deklarujących w swoich ofertach wartość luminancji można podać wartości referencyjne parametrów modułów PV dedykowanych dla lotniska, które dotyczą wartości maksymalnie akceptowalnej luminancji dla założonych kątów padania promieniowania słonecznego na moduł PV. **Są one zgodne co do wartości maksymalnej dla wartości zalecanych przez Agencję Bezpieczeństwa Lotniczego Unii Europejskiej, która wskazuje na wartość luminancji poniżej 20.000 cd/m² jako wartość oczekiwaną z punktu widzenia bezpieczeństwa dla instalacji fotowoltaicznych budowanych na terenie portów lotniczych. Jest wartość zalecana [54].**

Tabela 1. Wartości maksymalnych wartości akceptowalnej luminancji dla referencyjnego modułu PV

Kąt padania	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
Maksymalna akceptowalna wartość mierzonej luminancji [cd/m²] (Nie więcej niż)	1000	1050	1400	1600	2500	6200	19200

Reasumując powyższe rozważania należy jednak stwierdzić, że powłoki antyrefleksyjne nie zapobiegają w 100% wystąpienia zjawiska odbicia światła od modułów PV, ale w określonym zakresie prawie całkowicie zmniejszają one poziom tzw. olśnienia obserwatora. Sytuacje takie zachodzą, gdy słońce znajduje się pod takim kątem, kiedy najbardziej prawdopodobne są bezpośrednie odbicia światła słonecznego w kierunku obserwatora.

Do dokładnej oceny potencjalnego wywoływania refleksów światła przez moduły PV niezbędnym jest określenie [27]:

- Lokalizacji modułów PV.
- Lokalizacji obserwatora.
- Azymutu i kąta pochylenia powierzchni modułów PV.
- Charakterystyki optyczne modułów PV (powłoki ARC, teksturowanie powierzchni szkła modułów PV).

Najskuteczniejszymi sposobami redukcji potencjalnych refleksów światła z modułów PV są [27]:

- Wybór modułu PV o teksturowanej powierzchni.
- Wybór modułu PV z efektywną warstwą ARC.
- Właściwa orientacja i nachylenie modułów PV.

Efekt olśnienia, opisuje się pojęciem luminancji, które w fotometrii, oznacza miarę natężenia oświetlenia padającego w danym kierunku. Występują różne rodzaje olśnień, które dzielimy według warunków ich zaistnienia, oraz ich skutków. Wśród tych pierwszych, wyróżniamy [13][14][18]:

- olśnienie bezpośrednie – powstałe w wyniku bezpośredniej ekspozycji na źródło luminancji;
- olśnienie pośrednie – powstające w wyniku silnej luminancji występującej obok obiektu obserwowanego, w polu widzenia kąтового;
- olśnienie odbiciowe – zaistniałe w wyniku odbijania źródła światła (nie znajdującego się w naszym polu obserwacji).

Ze względu na skalę oddziaływania, olśnienia można podzielić na:

- „przeszkadzające” – olśnienie przeszkadzające to takie, które wpływa na zdolność widzenia, czasowo upośledzając ją. Do tego rodzaju olśnienia może dojść ze względu na zaburzoną adaptację oka lub poprzez obniżenie się tak zwanego kontrastu subiektywnego będącego skutkiem rozproszenia światła w ośrodkach optycznych oka, powodując zmniejszenie jego czułości. Słowem, jest to luminancja zmniejszająca naszą możliwość widzenia, rozróżniania barw i przedmiotów. Upośledzenie widzenia jest czasowe. Powrót oka do wyjściowej kondycji zajmuje zazwyczaj do kilku minut.
- „przykre” – to olśnienie z którym często spotykamy się w miejscach pracy, w tym w przestrzeniach biurowych. Nie obniża ono zdolności widzenia, jednak zdecydowanie męczy wzrok. Olśnienie przykre to przede wszystkim dyskomfort, który można odczuwać, jednak nie do końca świadomie – osoba może być kilka godzin poddawana efektowi olśnienia przykrego, dopiero z czasem odczuje zmęczenie oczu, stres lub irytację.
- „oślepiające” – to najsilniejszy rodzaj tego zjawiska. Olśnienie oślepiające jest tak silne, że przez pewien czas, pod wpływem ekspozycji na wysokie wartości luminancji, nie ma możliwości dostrzeżenia żadnego widzialnego i możliwego do zauważenia (w przyjaznych dla oka warunkach) obiektu.

Poziom skali oddziaływania olśnienia w literaturze bardzo często określa się też pojęciem Daylight Glare Index (DGI) z wartościami od 16 do powyżej 28. Strefa komfortu przyjmowana jest dla wartości niższych niż 22. Na wcześniejszym rysunku nr 16 wskaźnik DGI został dla obu modułów wyznaczony. Wskaźnik DGI wyznacza się w odniesieniu do przyjętego przez International Commission on Illumination tzw. Unified Glare Rating (UGR).

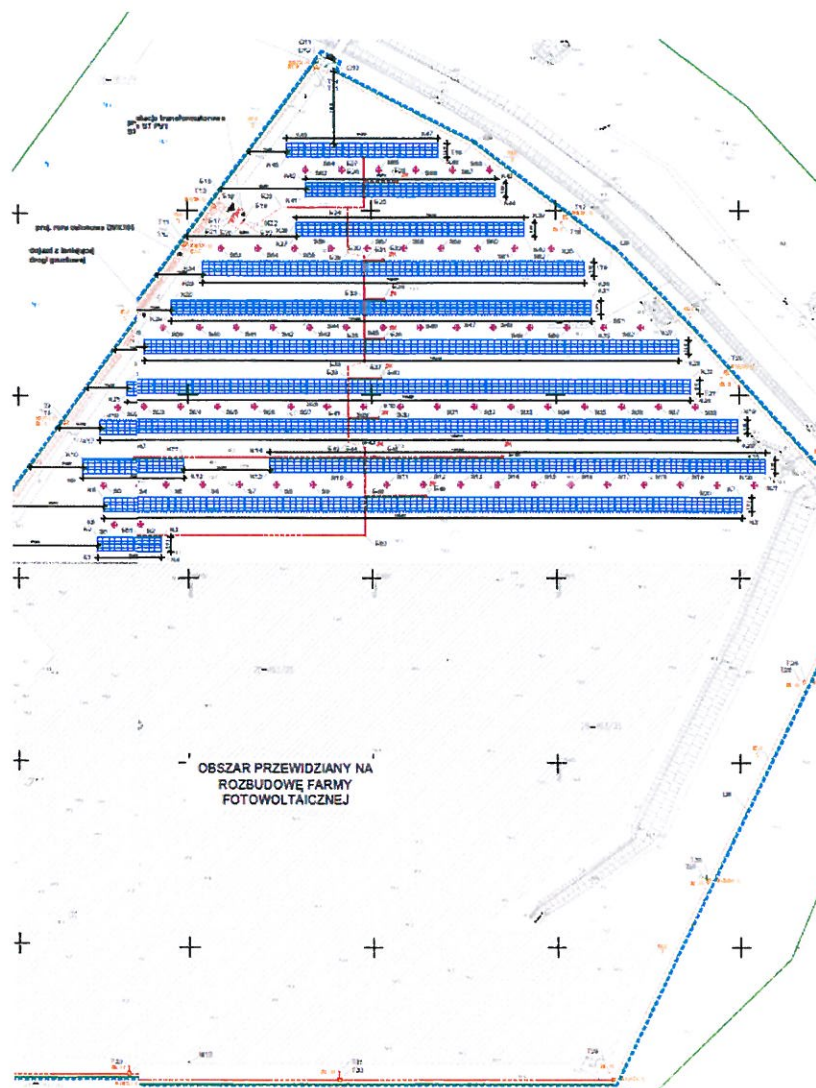
Biorąc to pod uwagę wskazane jest aby powłoki szkła modułów PV wykorzystywanych modułów PV w zastosowaniach przy lotniskach wykazywały wartość nie większą niż 20 Daylight Glare Index (DGI).

7. Analiza planowanej instalacji PV

7.1. Zakres inwestycji – założenia koncepcyjne

Zgodnie z dostarczoną dokumentacją koncepcji projektowej oraz ostatecznego projektu, inwestycja w Porcie Lotniczym Olsztyn-Mazury w Szymanach w zakresie instalacji PV będzie składała się z dwóch części:

- a) Farma PV zamontowana na gruncie na dz. nr 463/35, poza strefą airside lotniska o wstępnej mocy sumarycznej mocy wg dostarczonego przez zlecającego ekspertyzę projektu koncepcyjnego nieprzekraczającej 3 MW (ostatecznie została ona zmniejszona w docelowym projekcie wykonawczym do wartości poniżej 1 MW. Ostateczna weryfikowana moc instalacji na gruncie to 900,48kWp. Na rysunku poniżej wskazano, że potencjalny obszar inwestycyjny docelowo będzie mógł być zwiększony). W opracowanej koncepcji projektowej założono zastosowanie modułów monokrzemowych o mocy 320 - 450 Wp, zamontowanych na konstrukcji montażowej wbijanej w grunt. W koncepcji projektowej założono moduły PV pochylone pod kątem 25° . Azymut południowy. Azymut projektowanej farmy PV jest odchylony od osi pasa startowego o $18,47^\circ$.



Rysunek 22 Schemat rozmieszczenia modułów PV na farmie PV – zgodnie z ostatecznym projektem



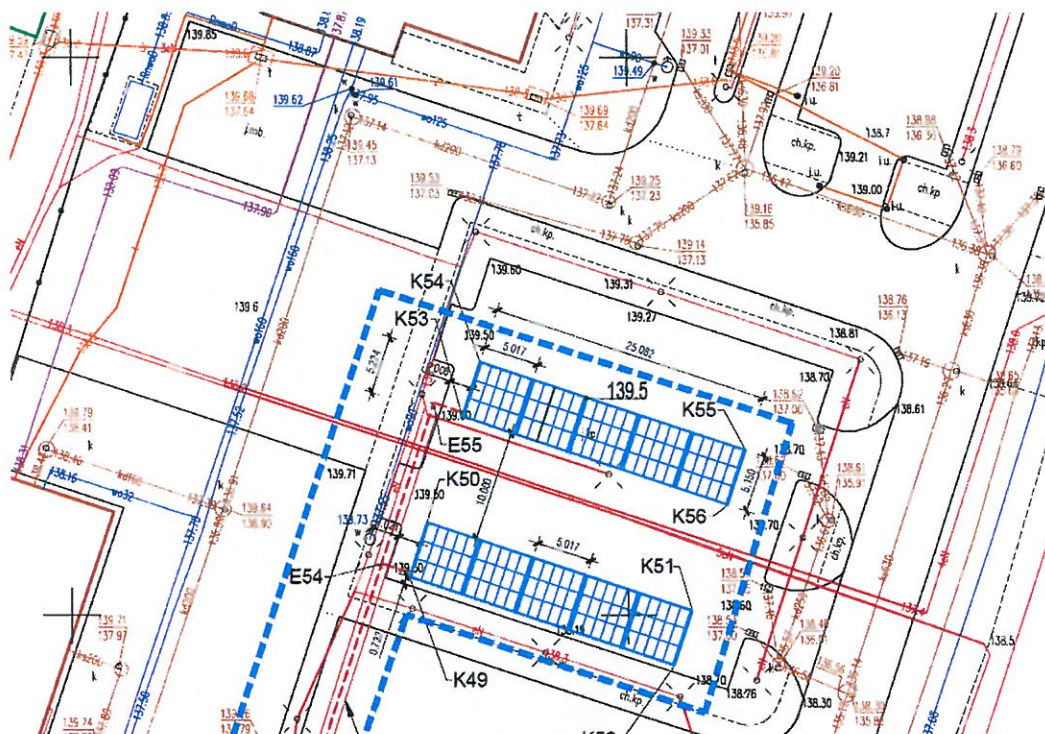
Rysunek 23 Położenie głównej inwestycji – farma PV na gruncie oraz carporty – powierzchnie pod planowane instalacje zostały oznaczone na czerwono

b) Instalacja PV o mocy 46,5 kWp znajdująca się na działce nr 463/37 zamontowana w formie wiat samochodowych (carporty) wraz z planowanymi na etapie koncepcji stacjami do ładowania samochodów elektrycznych (zgodnie z deklaracją Inwestora plany w zakresie montażu ładowarek nie będą wdrażane na etapie inwestycji). Instalacja będzie znajdować się na parkingu przed budynkiem technicznym w sąsiedztwie budynku terminala lotniska. Parametry projektowanych zadaszeń parkingowych z panelami fotowoltaicznymi typu carport:

- Łączna powierzchnia ok 260 m²
- Moc łączna paneli ok. 46,5 kWp (moc pojedynczego panelu 310 W)
- 20 miejsc parkingowych (10 konstrukcji 2-stanowiskowych), łączonych po 5 szt.

- Wymiary pojedynczej konstrukcji 2-stanowiskowej ok. 5m x 5,21m

Zaplanowano zastosowanie modułów monokrzemowych pochyłonych pod kątem 10° oraz odchyleniu od kierunku południowego o $18,38^\circ$ w kierunku zachodnim. Biorąc pod uwagę bliskość pasa startowego zaplanowano wykorzystanie modułów PV w których na etapie koncepcji planuje się wykorzystać szkło z technologią antyrefleksyjną oraz teksturoowaniem. W niniejszej ekspertyzie działanie to zostanie zweryfikowane. W przypadku braku konieczności stosowania tego typu modułów PV zastosowane zostaną standardowe moduły PV.



Rysunek 24 Projekt rozmieszczenia modułów PV na carportach w bliskiej odległości od terminala (działka nr 463/37)

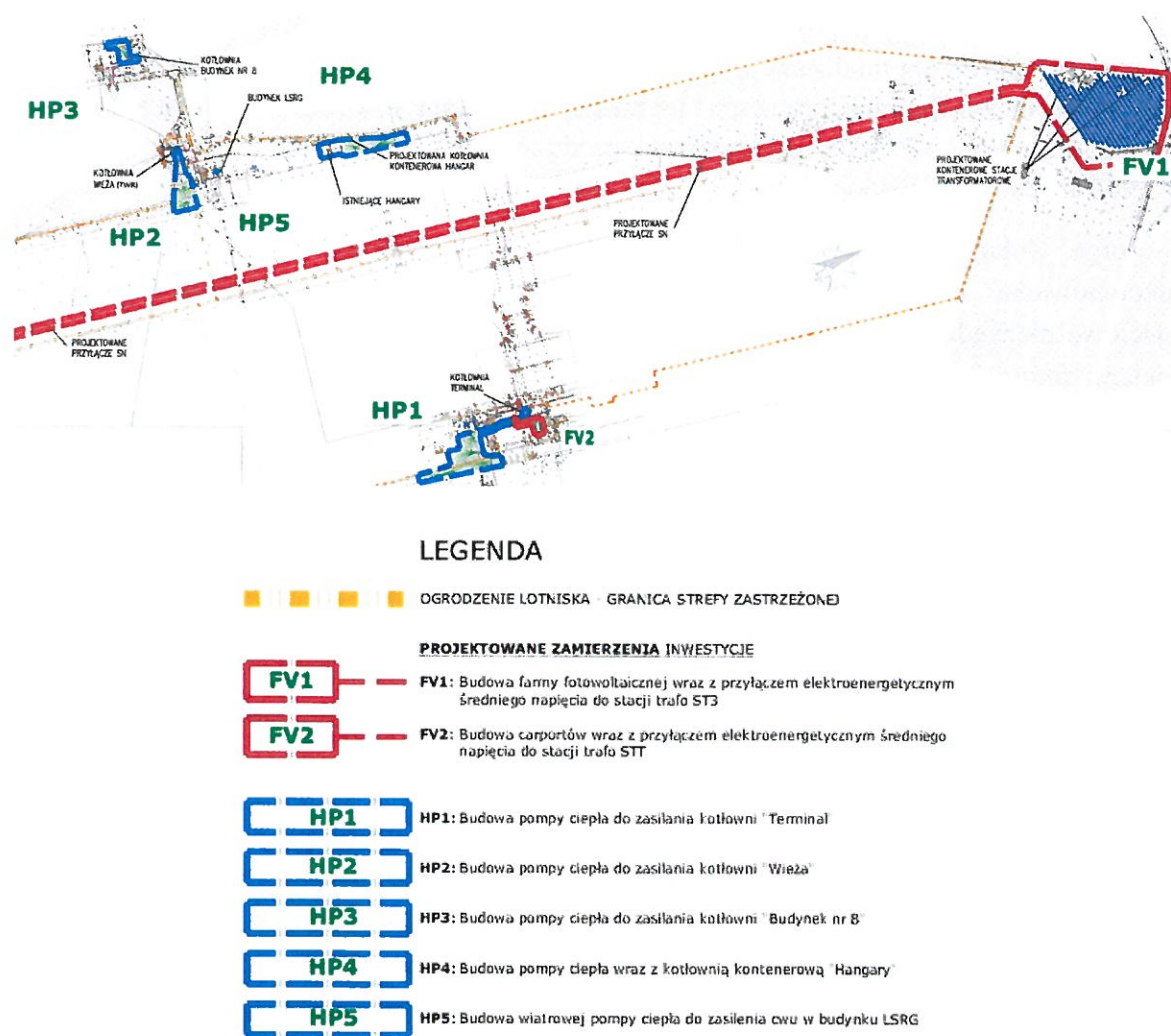
7.2. Działania umożliwiające zmniejszenie wpływu refleksów światła na lotnisko

Z uwagi na zapewnienie bezpieczeństwa operacji lotniczych związanych z ewentualnym oślepieniem pilotów podczas startów i lądowań na skutek odbijania światła od paneli fotowoltaicznych w koncepcji projektowej dostarczonej przez zlecającego niniejsza ekspertyzę dla projektowanej instalacji fotowoltaicznej można zaplanować następujące działania:

- Wykorzystanie modułów PV posiadających szkło ze specjalną teksturą lub powłoką antyrefleksyjną (ARC) na instalacji PV.** Zadaniem powłoki antyrefleksyjnej jest zwiększenie absorpcji energii promieniowania słonecznego w celu zmaksymalizowania transmisji oraz zapobieganie niepożądanemu efektowi odbicia światła od powierzchni paneli fotowoltaicznych. Powyższe działania skutecznie

zapobiegają zjawisku oślepiania pilotów oraz obsługi wieży TWR. Tego typu działania były często podejmowane podczas inwestycji w instalacje PV na analizowanych w niniejszej ekspertyzie inwestycjach na portach lotniczych. Oczywiście podejmowano je po przeprowadzonej symulacji potencjalnego wpływu instalacji PV na ruch lotniczy – diagnozowanie szkodliwych refleksów światła

- b) **Odpowiednia lokalizacja instalacji PV.** Lokalizacja farmy fotowoltaicznej analizowana w niniejszej ekspertyzie została zaplanowana poza granicami części lotniczej lotniska od jego północnej strony, w strefie lanside. Odległość zewnętrznej krawędzi farmy do progu 19 drogi startowej wynosi w prostej linii ok. 855 m, a do progu 01 ok. 3357 m, natomiast od Wieży Kontroli Lotów – TWR ok. 2110 m. Odległość taka zapewnia komfort startów i lądowań, ale przede wszystkim z racji odległości zwiększa się prawdopodobieństwo, że nie wpływa negatywnie na pracę TWR, bo nie powoduje oślepiania kontrolerów lotu podczas obserwacji przestrzeni lotniczej.
- c) **Odpowiedni dobór azymutu i kąta pochylenia modułów PV.** Dodatkowo, bezpieczeństwo pracy operacyjnej jest zapewnione poprzez odpowiednie odchylenie azymutu modułów PV od drogi startowej, które w stosunku do jej osi będą ustawione pod kątem 108 stopni, a więc odchylone stroną pochłaniającą światło od kierunku startów i lądowań oraz od kierunku obserwacji z TWR. Jest to element, który dodatkowo niweluje do minimum ewentualne odbicia i oślepianie pilotów.



Rysunek 26 Obszar lokalizacji instalacji PV oraz instalacji pomp ciepła na terenie Portu Lotniczego Olsztyn-Mazury w Szymanach

Biorąc pod uwagę brak technicznych możliwości przyłączenia do sieci planowanych do zbudowania instalacji PV przez operatora inwestor zaplanował również inwestycje w pompy ciepła w porcie lotniczym (pięć instalacji o całkowitej mocy grzewczej 1500kW). Instalacje te oraz własne zużycie energii będą stanowiły główne odbiorniki produkowanej energii z OZE (Inwestor na obecnym etapie zakłada 100% autokonsumpcję produkowanej energii z systemów PV).

8.2. Opis wykorzystanej aplikacji Forge Solar

Forge Solar to narzędzie online, które jest używane na całym świecie przez przemysł, środowisko akademickie i wojsko do oceny potencjalnych skutków olśnienia z instalacji fotowoltaicznych. Aplikacja działa w oparciu o nagrodzoną przez R&D 100 technologię SGHAT (Solar Glare Hazard Analysis Tool). SGHAT została opracowana przez amerykańską firmę SANDIA Laboratories. Forge Solar spełnia wymagania FAA i inne wymagania prawne [28][29].

Zwalidowane narzędzie Forge Solar wykorzystane do ekspertyzy zapewnia ilościową ocenę, kiedy i gdzie wystąpi olśnienie dla planowanej do zbudowania instalacji PV na lotnisku,

a także daje informacje o potencjalnych skutkach dla oczu. Narzędzie może być również wykorzystywane do optymalizacji projektu instalacji PV (nachylenie i orientacja) w celu oceny alternatywnych konfiguracji, orientacji i lokalizacji instalacji PV, które nie tylko łagodzą skutki odbłyску/olśnienia, ale także optymalizują produkcję energii. Posiada również możliwość modelowania stałych, jednoosiowych i dwuosiowych fotowoltaicznych systemów PV [28][29].

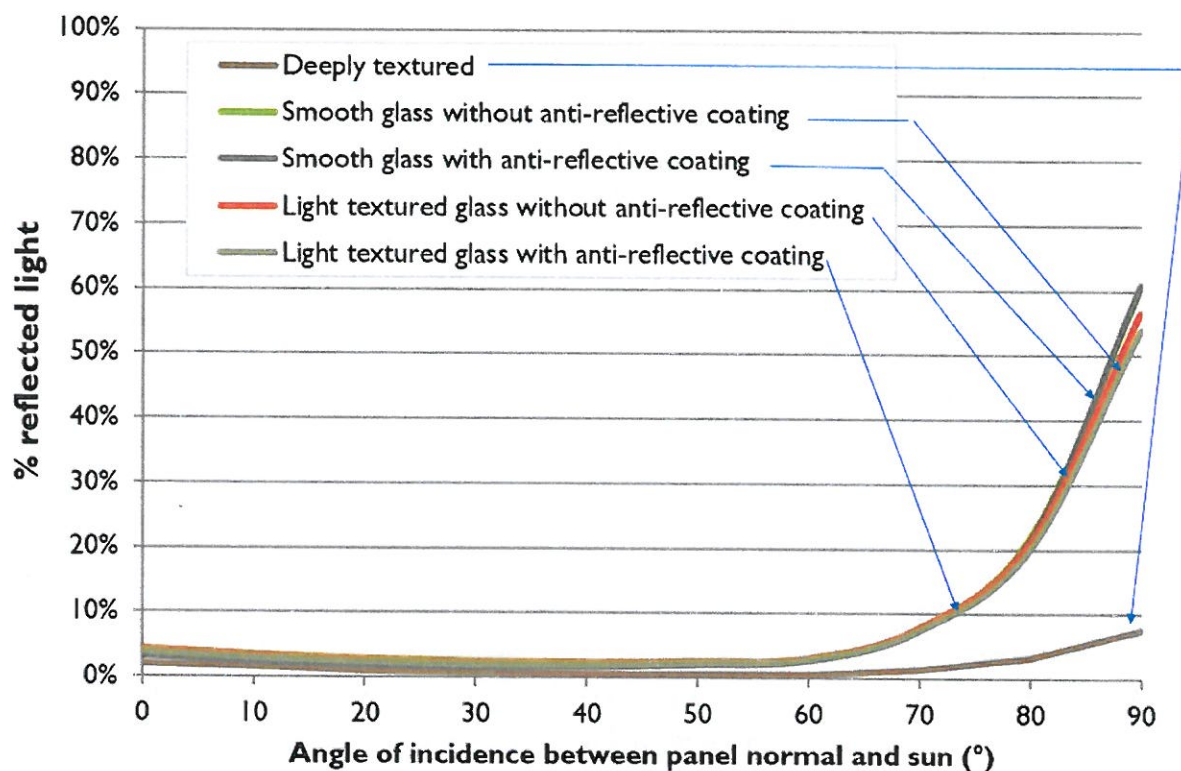
Forge Solar służy do określania występowania olśnienia powstającego wskutek funkcjonowania instalacji PV zlokalizowanych przy lotnisku. Do programu jako dane wejściowe niezbędne jest zdefiniowanie położenie lotniska, wyznaczenie obszaru pokrytego panelami fotowoltaicznymi, która ma być wykorzystywana do budowy farmy PV, wartości bezpośredniego natężenia napromienienia, współczynnika odbicia panelu PV (typ modułu PV). Do programu wprowadza się też dane funkcjonalne lotniska (położenie i długość drogi startowej, ścieżki podejścia, lokalizację TWR). Użytkownik może zlokalizować położenie instalacji PV za pomocą interaktywnej mapy Google dostarczonej przez oprogramowanie. Szerokość i długość geograficzna oraz wysokość są pobierane automatycznie i służą do obliczania pozycji słońca i obliczania wektora padania promieniowania słonecznego na moduły PV. Użytkownik musi wprowadzić zarys proponowanego systemu farmy PV, wraz z danymi lotniska możliwe jest definiowanie orientacji i nachyleniem modułów fotowoltaicznych, oraz współczynnika odbicia.

Na potrzeby niniejszej ekspertyzy analizowano system PV składający się z dwóch instalacji PV o stałym nachyleniu modułów PV (25 stopni oraz 10 stopni) w dwóch wskazanych lokalizacjach (działka z modułami mocowanymi na gruncie przy lotnisku oraz moduły PV na dachach carportów), składające się z modułów fotowoltaicznych z różnymi (wg analizowanych wariantów) materiałami modułów PV w których zastosowano różne technologie (zgodnie z danymi implikowanymi przez program Forge Solar). Weryfikowano potencjalny wybór wariantów modułów PV w aplikacji Forge Solar w których stosowano [55][56]:

- gładkie szkło bez ARC,
- gładkie szkło z ARC,
- lekko teksturowane szkło bez ARC,
- lekko teksturowane szkło z ARC,
- szkło o głębokiej teksturze.

Postać i charakterystyka technologii modułów PV (szkło teksturowane i ARC) zastosowanej w modułach PV w symulacjach jest wartością zaimplementowaną w oprogramowaniu wykorzystywanym do analiz. Autorzy oprogramowania wykorzystali doświadczenia Sandia National Laboratories, które opracowało pięć ogólnych profili odbicia materiału modułów fotowoltaicznych, analizując różne próbki modułów fotowoltaicznych. Profile te są dostępne w aplikacji ForgeSolar i pozwalają na dostosowanie/zmianę właściwości materiału panelu fotowoltaicznego stosowanego podczas analizy [55][56].

Rysunek poniżej ilustruje założone w oprogramowaniu współczynniki procentowe odbicia każdego profilu materiału uwzględnianego w oprogramowaniu jako funkcję kąta padania, gdzie kąt 0° oznacza, że panele są skierowane bezpośrednio na słońce. Na przykład, wysoki kąt patrzenia blisko 90° w przypadku paneli z nachyleniem 0° (leżące płasko) występuje codziennie o wschodzie i zachodzie słońca.



Rysunek 27 Profile odbicia światła typowych materiałów modułów fotowoltaicznych uwzględnianych w oprogramowaniu ForgeSolar [55][56]

Tabela 2. Współczynnik odbicia od powierzchni modułu PV z danym szkłem jako funkcja kąta padania [55]

Kąt (stopnie)	Gładkie szkło bez ARC	Gładkie szkło z ARC	Lekko teksturowane szkło bez ARC	Lekko teksturowane szkło z ARC	Szkło o głębokiej teksturze
0	0,0441	0,0324	0.0431	0,0390	0,0210
10	0,0357	0,0242	0,0333	0,0301	0,0152
20	0,0297	0,0190	0,0266	0,0240	0,0107
30	0,0262	0,0167	0,0229	0,0208	0,0076
40	0,0250	0,0174	0,0223	0,0204	0,0059
50	0,0262	0,0210	0,0247	0,0229	0,0056
60	0,0298	0,0276	0,0302	0,0281	0,0066
70	0,0789	0,0744	0,0776	0,0738	0,0143
80	0,2185	0,2128	0,2097	0,1994	0,0330
90	0,6052	0,6086	0,5666	0,5388	0,0760

To co istotne we wskazaniach opisowych programu wskazano, że powłoki antyrefleksyjne (ARC) i standardowe teksturowanie powierzchni modułów PV mogą zmniejszyć współczynnik odbicia, ale ta redukcja jest zwykle mniejsza niż 8% w relacji do modułów standardowych. Zaobserwowano to podczas symulacji. Najlepsze efekty pozwala uzyskać, wg analiz, które wykorzystuje aplikacja ForgeSolar, szkło głęboko teksturowane. Nie jest ono jednak definiowane, co do parametrów rynkowych tego typu modułów [55][56].

Nie jest to więc łatwe to interpretacji ponieważ nie do końca wiadomo o jakie szkło i o jakie parametry tego szkła chodzi. Aplikacja generuje wyniki dla swoich zaimplementowanych parametrów materiałów modułów PV.

Do analiz wstawiano nachylenie modułów PV w planowanych instalacjach:

- 25 stopni dla projektowanej farmy PV na działce przy lotnisku - zorientowanych na południe.
- 10 stopni dla projektowanych instalacji dla carportów - zorientowanych zgodnie z ustawieniem carportów na istniejącym parkingu.

Narzędzie ForgeSolar nie umożliwia zastosowania wariantów różnych mocy wykorzystywanych modułów PV. Należy z tego wysnuć wniosek, że zastosowanie większych w zakresie mocy nominalnej modułów PV niż wskazano w projekcie koncepcyjnym nie wpłynie na ewentualne zmiany efektów generowania refleksów światła przez instalacje PV.

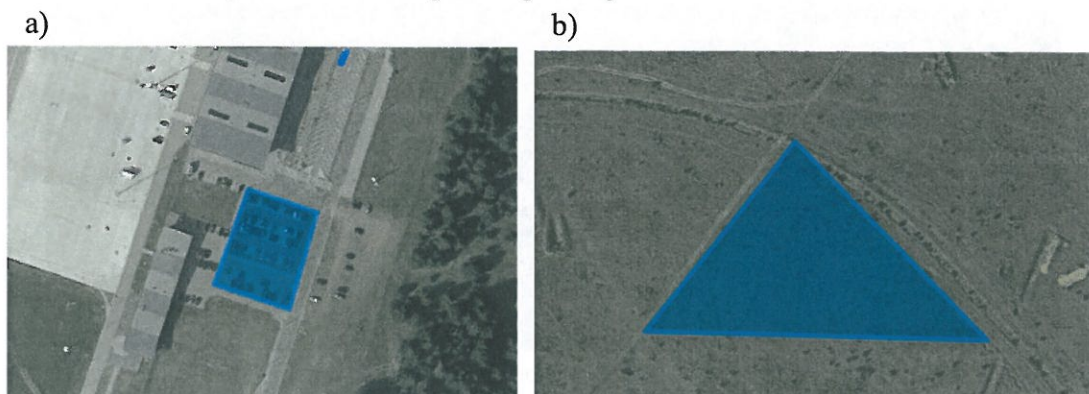
W przypadku wykrycia odblasku narzędzie szacuje położenie i czas trwania olśnienia słonecznego przez cały rok z określonych/zdefiniowanych przez użytkownika punktów obserwacyjnych. Następnie uzyskuje się wynik analizy olśnienia ze strony analizowanych instalacji przy zadeklarowanych parametrach. Określone wyniki zbiorcze oznaczane są kodami kolorów określającymi stopień olśnienia. Wpływ na oczy obserwującego generowany refleks światła słonecznego wg przyjętego kodu można podzielić na trzy kategorie [55][56]:

- **Zielony** - niski potencjał powodowania ewentualnego szkodliwego oddziaływania - poziom akceptowalny.
- **Żółty** - możliwość spowodowania tymczasowego negatywnego oddziaływania wskutek generowanych refleksów światła.
- **Czerwony** - może spowodować negatywne, długotrwałe szkodliwe oddziaływanie wskutek generowanych refleksów światła.

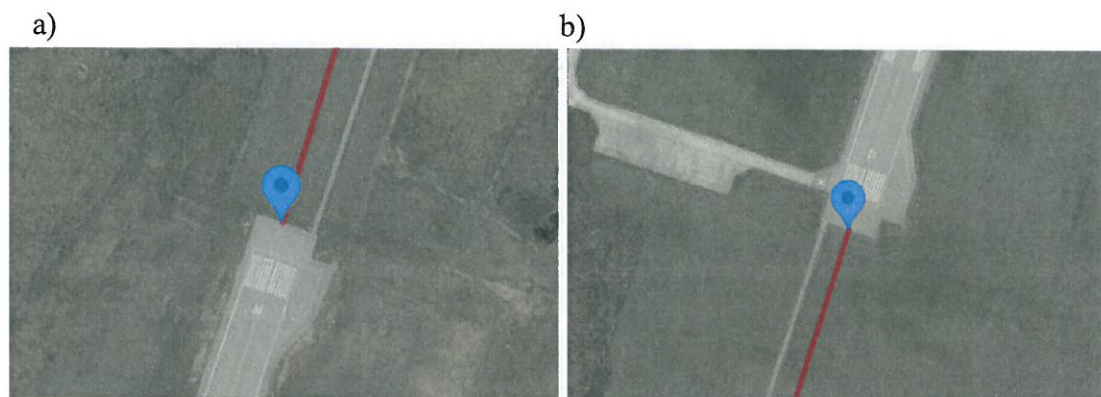
Narzędzie może również przewidywać odpowiedni uzysk energii słonecznej i umożliwia modyfikację konfiguracji farmy PV, takich jak nachylenie, orientacja, kształt itp., aby jednocześnie złagodzić odblaski i zmaksymalizować produkcję energii [28][29][55][56].

8.3. Zdefiniowane dane wykorzystane w aplikacji Forge Solar

Zdefiniowane dane z Portu Lotniczego Olsztyn-Mazury w Szymanach do aplikacji Forge Solar zestawiono na rysunkach oraz opisano poniżej.

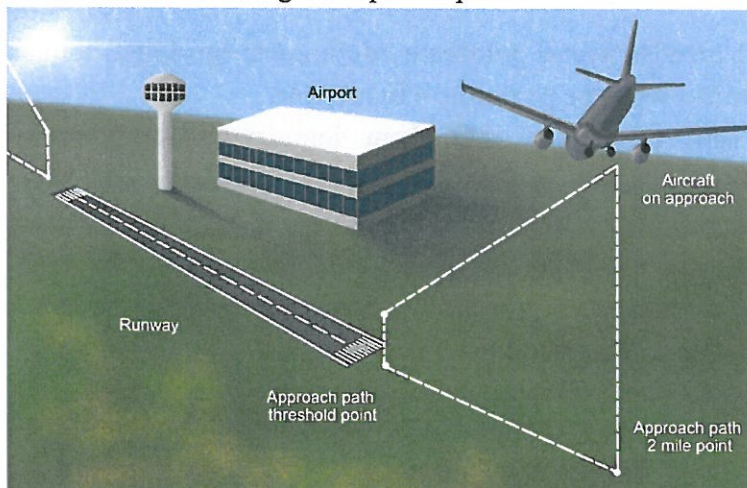


Rysunek 28 Zdefiniowane w aplikacji założenia funkcjonalne planowanych do zbudowania instalacji PV w Porcie Lotniczym Olsztyn-Mazury w Szymanach - położenia obu instalacji PV: a) instalacja na carportach , b) instalacja na działce obok lotniska



Rysunek 29 Zdefiniowane w aplikacji założenia funkcjonalne parametrów działania Portu Lotniczego Olsztyn-Mazury w Szymanach: zdefiniowane strefy podejścia do drogi startowej – tzw. 2-milowe ścieżki podejścia samolotów: a) FP1 oraz b) FP2

Definiowanie w programie 2-milowej ścieżki lotu („FP”) symuluje domyślnie samolot podążający ścieżką podejścia w linii prostej w kierunku pasa startowego oraz ograniczone pole widzenia w celu określenia ewentualnego oślepienia pilotów.

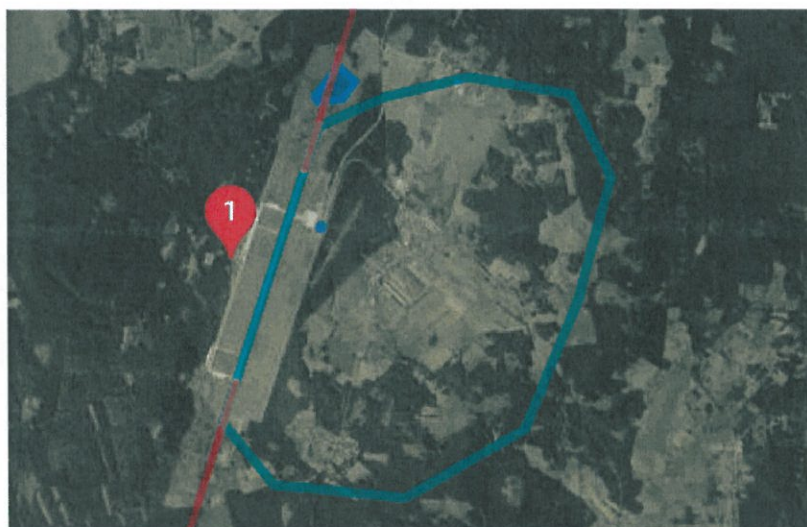


Rysunek 30 Ilustracja samolotu korzystającego z 2-milowej ścieżki podejścia w kierunku lotniska [55][56]



Rysunek 31 Zdefiniowane w aplikacji założenia funkcjonalne parametrów pracy Portu Lotniczego Olsztyn-Mazury w Szymanach: położenie TWR (1-ATCT)

Na rysunku 31 przedstawiono lokalizację TWR. Założono jej wysokość na poziomie 3 metrów.



Rysunek 32 Zdefiniowane w aplikacji założenia funkcjonalne parametrów pracy Portu Lotniczego Olsztyn-Mazury w Szymanach: zdefiniowane kręgi lotniskowe

Na rysunku 32 przedstawiono położenie zdefiniowanego kręgu lotniskowego. Założono wysokość kręgu lotniskowego na poziomie 450 metrów.

Poza parametrami związanym z ruchem lotniczym niezbędne było zdefiniowanie parametrów charakteryzujących projektowaną instalację farmy PV. Najbardziej istotnymi parametrami zmiennymi będzie tutaj azymut instalacji PV oraz kąt pochylenia modułów PV. W niniejszej ekspertyzie nie realizowano w tym zakresie wariantowania bowiem przyjęto wartości kątów i azymutów z projektów koncepcyjnych oraz ostatecznego projektu dostarczonego przez Zleceniodawcę/Inwestora.

Na polskich szerokościach geograficznych najbardziej optymalnym ustawieniem modułów fotowoltaicznych jest kierunek południowy oraz nachylenie paneli około 25-45 stopni. Poniższa tabela pokazuje procent promieniowania słonecznego docierającego na powierzchnię w zależności od kąta ustawienia paneli (oś pionowa) oraz azymutu (oś pozioma).

Nachylenie		Zachód	PołudniowyZachód		Południe	PołudniowyWschód	Wschód	
płaszczyzny		270°	240°	210°	180°	150°	120°	90°
Pion	90°	51%	62%	69%	72%	70%	63%	52%
	80°	58%	71%	80%	82%	80%	71%	51%
	70°	65%	78%	87%	90%	87%	79%	65%
	60°	71%	84%	93%	96%	94%	85%	72%
	50°	76%	89%	97%	99%	98%	89%	77%
	40°	80%	92%	99%	100%	99%	92%	81%
	30°	83%	93%	99%	100%	100%	93%	84%
	20°	85%	93%	97%	99%	97%	93%	86%
	10°	87%	90%	93%	95%	94%	91%	87%
Poziom	0°	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%

Rysunek 33 Procentowa wielkość promieniowania słonecznego docierająca na powierzchnię w zależności od kąta ustawienia paneli (oś pionowa) i azymutu (oś pozioma) [1][2]

Zadeklarowane w koncepcji projektowej dla analizowanej inwestycji wartości kątów i azymutów gwarantują najwyższą efektywność pracy modułów PV [1][2].

9. Wyniki analizy i dyskusja

Analiza wpływu olśnienia dla projektowanej instalacji PV w ramach ekspertyzy była przeprowadzana w wybranych obszarach za pomocą oprogramowania Forge Solar. W analizie wzięto pod uwagę wytyczne Federalnej Administracji Awiacji USA, która wydała zalecenia dot. farm fotowoltaicznych na terenie lotnisk. 3.1.2 Reflectivity FAA Airport Solar Guide – Technical Guidance for Evaluating Selected Solar Technologies on Airports. Wytyczne te uwzględniają zastosowane do symulacji oprogramowanie Forge Solar. W ramach analiz uwzględniono również wytyczne European Union Aviation Safety Agency. Jej zapisy uznano za zalecenia.

Wyniki analizy pojawienia się zjawiska refleksów świetlnych i olśnienia podsumowano poniżej. Interpretacja wyników opiera się na czasie trwania i kodzie kolorystycznym występowania olśnienia, który definiuje program. Kod koloru identyfikowany dla danych założeń projektu przez program wskazuje intensywność olśnienia rejestrowanego z danego punktu obserwacyjnego. Kody programu są indywidualną miarą generowanych raportów tego oprogramowania i nie są powiązane liczbowo z opisywanym wcześniej wskaźnikami Daylight Glare Index (DGI) czy Unified Glare Rating (UGR).

W ramach wykorzystywanej aplikacji niski potencjał intensywności olśnienia odpowiada kolorowi zielonemu. Kolor żółty wskazuje na możliwość niskiego natężenia olśnienia, a kolor czerwony w programie odpowiada olśnieniu o dużej, nieakceptowanej intensywności.

Podczas przeprowadzonych analiz i symulacji nie rejestrowano nigdy kodu czerwonego wskazującego na znaczne i szkodliwe dla pracy portu lotniczego zagrożenie olśnieniem.

Weryfikowano warianty zastosowanych modułów PV w których zastosowano:

- Gładkie szkło bez ARC.
- Gładkie szkło z ARC.
- Lekko teksturowane szkło bez ARC.
- Lekko teksturowane szkło z ARC.
- Szkło o głębokiej teksturze.

Projektowana instalacja PV w założonym optymalnym układzie z punktu widzenia generowanych refleksów wg przeprowadzonej symulacji wskazuje występowanie tylko dopuszczalnych (zaznaczonych kolorem zielonym) wskazań pojawienia olśnień, wywołanych powstałymi refleksami światła od modułów PV.

Wariant modułów ze szkłem gładkim bez ARC

Poniżej przedstawiono interpretację wyników symulacji dla założonych parametrów gdy zastosowane są standardowe moduły PV z gładkim szkłem bez ARC.

Summary of Results Glare with low potential for temporary after-image predicted

PV Array	Tilt °	Orient °	Annual Green Glare		Annual Yellow Glare		Energy kWh
			min	hr	min	hr	
PV array 1	10.0	198.0	7,608	126.8	0	0.0	87,410.0
PV array 2	25.0	180.0	19,024	317.1	0	0.0	1,923,000.0

Total annual glare received by each receptor; may include duplicate times of glare from multiple reflective surfaces

Receptor	Annual Green Glare		Annual Yellow Glare	
	min	hr	min	hr
Route 1	21,445	357.4	0	0.0
FP 1	3,466	57.8	0	0.0
FP 2	0	0.0	0	0.0
1-ATCT	1,721	28.7	0	0.0

Rysunek 34 Podsumowanie symulacji dla wariantu inwestycji z modułami PV ze szkłem bez ARC i bez tekstury [55]

W wariantcie tym zaobserwować można generowany tylko kod zielony. Dla takiego poziomu refleksów światła zgodnie z zapisami w programie Forge Solar nie są konieczne żadne środki zaradcze.

Wariant modułów ze szkłem gładkim oraz zastosowanym ARC

Poniżej przedstawiono interpretację wyników symulacji dla założonych parametrów gdy zastosowane są standardowe moduły PV z gładkim szkłem oraz z ARC.

Summary of Results Glare with low potential for temporary after-image predicted

PV Array	Tilt °	Orient °	Annual Green Glare		Annual Yellow Glare		Energy kWh
			min	hr	min	hr	
PV array 1	10.0	198.0	9,127	152.1	0	0.0	87,410.0
PV array 2	25.0	180.0	22,412	373.5	0	0.0	1,923,000.0

Total annual glare received by each receptor; may include duplicate times of glare from multiple reflective surfaces

Receptor	Annual Green Glare		Annual Yellow Glare	
	min	hr	min	hr
Route 1	25,439	424.0	0	0.0
FP 1	3,995	66.6	0	0.0
FP 2	0	0.0	0	0.0
1-ATCT	2,105	35.1	0	0.0

Rysunek 35 Podsumowanie symulacji dla wariantu inwestycji z modułami PV ze szkłem bez tekstury oraz zastosowanym ARC [55]

W wariantcie tym zaobserwować można generowany tylko kod zielony. Dla takiego poziomu refleksów światła nie są konieczne żadne środki zaradcze.

Wariant modułów ze szkłem standardowo teksturowanym oraz bez ARC

Poniżej przedstawiono Interpretację wyników symulacji dla założonych parametrów gdy zastosowane są moduły PV z klasycznym teksturowaniem oraz bez ARC.

Summary of Results Glare with low potential for temporary after-image predicted

PV Array	Tilt °	Orient °	Annual Green Glare		Annual Yellow Glare		Energy kWh
			min	hr	min	hr	
PV array 1	10.0	198.0	10,120	168.7	0	0.0	87,410.0
PV array 2	25.0	180.0	24,798	413.3	0	0.0	1,923,000.0

Total annual glare received by each receptor; may include duplicate times of glare from multiple reflective surfaces.

Receptor	Annual Green Glare		Annual Yellow Glare	
	min	hr	min	hr
Route 1	28,228	470.5	0	0.0
FP 1	4,367	72.8	0	0.0
FP 2	0	0.0	0	0.0
1-ATCT	2,323	38.7	0	0.0

Rysunek 36 Podsumowanie symulacji dla wariantu inwestycji z modułami PV ze szkłem z klasycznym teksturowaniem oraz bez ARC [55]

W wariacie tym zaobserwować można generowany tylko kod zielony. Dla takiego poziomu refleksów światła nie są konieczne żadne środki zaradcze.

Wariant modułów ze szkłem standardowo teksturowanym oraz z ARC

Poniżej przedstawiono Interpretację wyników symulacji dla założonych parametrów gdy zastosowane są moduły PV z klasycznym teksturowaniem oraz z ARC.

Summary of Results Glare with low potential for temporary after-image predicted

PV Array	Tilt °	Orient °	Annual Green Glare		Annual Yellow Glare		Energy kWh
			min	hr	min	hr	
PV array 1	10.0	198.0	9,679	161.3	0	0.0	87,410.0
PV array 2	25.0	180.0	23,795	396.6	0	0.0	1,923,000.0

Total annual glare received by each receptor; may include duplicate times of glare from multiple reflective surfaces

Receptor	Annual Green Glare		Annual Yellow Glare	
	min	hr	min	hr
Route 1	27,043	450.7	0	0.0
FP 1	4,204	70.1	0	0.0
FP 2	0	0.0	0	0.0
1-ATCT	2,227	37.1	0	0.0

Rysunek 37 Podsumowanie symulacji dla wariantu inwestycji z modułami PV ze szkłem z teksturowaniem oraz z ARC [55]

W wariacie tym zaobserwować można generowany tylko kod zielony. Dla takiego poziomu refleksów światła nie są konieczne żadne środki zaradcze.

Wariant modułów ze szkłem o głębokiej teksturze

Poniżej przedstawiono Interpretację wyników symulacji dla założonych parametrów gdy zastosowane są moduły PV ze szkłem z głębokim teksturowaniem.

Summary of Results Glare with low potential for temporary after-image predicted

PV Array	Tilt °	Orient °	Annual Green Glare		Annual Yellow Glare		Energy kWh
			min	hr	min	hr	
PV array 1	10.0	198.0	155,348	2,589.1	0	0.0	87,410.0
PV array 2	25.0	180.0	149,189	2,486.5	0	0.0	1,923,000.0

Total annual glare received by each receptor; may include duplicate times of glare from multiple reflective surfaces.

Receptor	Annual Green Glare		Annual Yellow Glare	
	min	hr	min	hr
Route 1	230,917	3,848.6	0	0.0
FP 1	63,357	1,056.0	0	0.0
FP 2	0	0.0	0	0.0
1-ATCT	10,263	171.1	0	0.0

Rysunek 38 Podsumowanie symulacji dla wariantu inwestycji z modułami PV ze szkłem o głębokiej teksturze [55]

W wariancie tym zaobserwować można również generowany tylko kod zielony. Dla takiego poziomu refleksów światła nie są konieczne żadne środki zaradcze. Występuje zatem niski potencjał powodowania ewentualnego szkodliwego oddziaływania na lotnisko - poziom akceptowalny.

Za pomocą wykresów oraz tabel generowanych przez program symulacyjny można przeanalizować rozkład czasowy potencjalnego olśnienia dla analizowanych wariantów. Jak widać dla zdefiniowanych stref podejścia do drogi startowej – ścieżek podejścia samolotów FP1 oraz FP2, przyjętego położenia kręgów lotniskowych (założono jeden Route 1) oraz położenia wieży TWR zarejestrowano tylko dopuszczalne wartości (kolor zielony).

Podczas przeprowadzonych symulacji nie zarejestrowano ani kodu żółtego ani czerwonego.

Proponowany stopień poziomu oddziaływania olśnienia i działania i ewentualne działania łagodzące dla planowanej do budowy instalacji farmy PV podano w tabeli nr 3 poniżej [28][29][30].

Tabela 3. Stopień wpływu olśnienia na każdy wybrany obszar kodu oddziaływania olśnienia wywołanego modułami PV – zgodnie z aplikacją Forge Solar [28][29][30]

Stopień odblasku	Definicja	Kod koloru dla efektu olśnienia (zgodnie z FAA)	Stan łagodzenia skutków
Bez wpływu	Odbicie od modułu fotowoltaicznego nie występuje w żadnym momencie	Nie dotyczy	Nie są wymagane żadne środki zaradcze
Niski	Odbicie słoneczne pojawia się w pewnym momencie z małą intensywnością	Zielony kod 	Nie są wymagane żadne środki zaradcze
Wysoki	Występuje znaczny poziom odbicia światła słonecznego i wpływa na widoczność z wrażliwych receptorów	Żółty kod 	Dodatkowe środki zaradcze są obowiązkowe w przypadku zatwierdzenia projektu PV – nie zdiagnozowano podczas badań
Bardzo Wysoki	Występuje nieakceptowany poziom odbicia światła słonecznego	Czerwony kod 	Brak możliwości wykonania instalacji PV dla wstawionych założeń projektowych – nie zdiagnozowano podczas badań

10. Podsumowanie

- a) W przeprowadzonej analizie wzięto pod uwagę obowiązujące przepisy, między innymi art. 87 a, ust. 1 Prawo lotnicze: „Emisja wiązki lasera lub światła z innych źródeł w strefach przestrzeni powietrznej – zabrania się emitowania lub powodowania emisji, w strefach przestrzeni powietrznej wykorzystywanej do żeglugi powietrznej wiązki lasera lub światła z innych źródeł w kierunku statku powietrznego w sposób mogący spowodować olśnienie, oślepienie lub wystąpienie poświaty i mogący stworzyć zagrożenie bezpieczeństwa statku powietrznego albo życia lub zdrowia załogi lub pasażerów na jego pokładzie”.
- b) W analizie niniejszej wzięto pod uwagę głównie wytyczne Federalnej Administracji Awiacji USA, która wydała zalecenia dot. farm fotowoltaicznych na terenie lotnisk. 3.1.2 Reflectivity FAA Airport Solar Guide – Technical Guidance for Evaluating Selected Solar Technologies on Airports. Wytyczne te uwzględnia wykorzystywany program symulacyjny Forge Solar [53].
- c) Ani wytyczne ICAO (International Civil Aviation Organization), ani EASA (European Union Aviation Safety Agency) nie odnoszą się szczegółowo do inwestycji w zakresie budowy farm PV na lotniskach lub w pobliżu lotniska. Jak dotąd, oprócz wspomnianej amerykańskiej FAA, istnieje bardzo niewiele wytycznych, które pomagają europejskim portom lotniczym określić, co jest w tym zakresie bezpieczne. W analizie wzięto również pod uwagę wybrane wytyczne Agencji Bezpieczeństwa Lotniczego Unii Europejskiej - EASA (European Union Aviation Safety Agency), które potraktowane zostały jako zalecenia [54]
- d) W przeprowadzonym przeglądzie dotychczasowych inwestycji w instalacje PV na świecie, w Europie oraz w Polsce wykazano, że porty lotnicze coraz częściej inwestują w tego typu instalacje. Aby sprostać względem bezpieczeństwa i uniknąć efektu odbijania światła, które mógłby stanowić zagrożenie na skoncentrowanego na lotnisku ruchu lotniczego, w instalacjach wykorzystuje się najczęściej moduły pokryte specjalnym, antyrefleksyjnym szkłem lub z zastosowaniem teksturowania. Nie udało się w zakresie przeprowadzonego przeglądu uzyskać szczegółowych danych co do rejestrowanych wartości refleksów światła na analizowanych lotniskach. Inwestorzy wskazywali jednak fakt przeprowadzania symulacji refleksów światła z wykorzystaniem aplikacji, które wykazują konieczność jego zastosowania.
- e) **Analizowany rozkład czasowy występowania potencjalnego olśnienia dla zdefiniowanych parametrów Portu Lotniczego Olsztyn-Mazury w Szymanach: stref podejścia do drogi startowej – ścieżek podejścia samolotów FP1 oraz FP2, przyjętego położenia kręgu lotniskowego (Route 1) oraz położenia wieży TWR nie wykazuje ryzyka generowania refleksów świetlnych utrudniających pracę personelu TWR i wykonywania manewrów przez statki powietrzne przy uwzględnieniu dobowego i całorocznego ruchu słońca dla wszystkich analizowanych wariantów modułów PV.** Do analiz potwierdzających to stwierdzenie wykorzystywano oprogramowanie Forge

Solar, które spełnia wymagania FAA. **Refleksy światła pojawiają się w określonych okresach czasu z małą intensywnością, charakteryzowaną przez aplikację Forge Solar kodem zielonym, który nie wymaga żadnych dodatkowych środków zaradczych.**

- f) Ekspertyza opiera się na założeniu potencjalnego wykorzystania w planowanej do zbudowania instalacji PV określonych modułów PV, których parametry będą zgodne z wymaganymi parametrami referencyjnymi. Proponowane parametry/cechy modułu PV uznanego jako referencyjny. **Wytyczne te należy rozumieć jako dodatkowe zalecenie:**
- Powłoka modułów PV wykorzystywanych do farmy PV w analizowanej lokalizacji powinna charakteryzować się wartością wskaźnika Daylight Glare Index (DGI) nie większą niż 20.
 - Wartości referencyjne parametrów modułów PV dedykowanych dla lotniska, które dotyczą wartości maksymalnie akceptowalnej luminacji dla założonych kątów padania promieniowania słonecznego na moduł PV przedstawiono poniżej:

Kąt padania	10 ⁰	20 ⁰	30 ⁰	40 ⁰	50 ⁰	60 ⁰	70 ⁰
Maksymalna akceptowalna wartość mierzonej luminacji [cd/m ²] (Nie więcej niż)	1000	1050	1400	1600	2500	6200	19200

Proponowane działania ze strony inwestora mogą dotyczyć również:

- zastosowania modułów fotowoltaicznych ze specjalną powłoką antyrefleksyjną (ARC),
- zastosowania modułów fotowoltaicznych ze specjalnym teksturowaniem.

Należy zaznaczyć, że działanie takie powinno być poprzedzone rachunkiem ekonomicznym inwestora. Wybór rozwiązania opartego o szkło teksturowane oznacza zdecydowanie wyższe koszty inwestycyjne.

Przeprowadzone symulacje dla założonych parametrów projektowych instalacji PV nie wykazały dużych różnic wartości czasu trwania potencjalnego olśnienia pomiędzy standardowym modulem PV oraz modułami PV z powłoką ARC oraz z głębokim teksturowaniem na poziomie kodu zielonego.

Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki w analizach modelowania, które uzyskano w wykorzystywanym w niniejszej ekspertyzie oprogramowaniu Forge Solar należy powyższe stwierdzenie traktować jako zalecenie, które nie musi być wykonywane biorąc pod uwagę spełnianie wymagań FAA.

- g) W ekspertyzie podkreśla się duże znaczenie czynnika technologicznego wykonania modułów PV. Producenci modułów PV zwykle zmniejszają współczynnik odbicia promieniowania światła od swoich modułów stosując niską zawartość żelaza w szkło

o wysokiej przepuszczalności, a następnie stosując powłokę antyrefleksyjną. W ostatnich generacjach modułów PV na rynku zaczęto stosować specjalne warstwy grafenowe. Dodatkowo uznani producenci przeprowadzają badania Reflective Luminance Test szkła używanego do budowy modułów PV, które wyznaczają poziom luminacji dla określonego ustawienia kąтового modułu PV podczas eksploatacji modułu PV. Inną możliwą technologią, mającą na celu ograniczenie odbicia i olśnienia od występującej instalacji PV jest wykorzystanie modułów PV z zastosowanym teksturowaniem powierzchni modułów PV. Przeprowadzone w ramach ekspertyzy symulacje wyraźnie wskazują przewagę takiego rozwiązania w relacji do klasycznych modułów PV. Chropowata/teksturowana powierzchnia modułów PV redukuje odbicia promieniowania słonecznego. Należy jednak zaznaczyć, że różnice te wynikają z założonego w oprogramowaniu Forge Solar modelu występowania refleksów światła dla określonych technologii modułów PV przy różnych kątach padania promieniowania słonecznego – rys 27.

- h) Biorąc pod uwagę ciągły postęp w zakresie technologii modułów PV nie jest możliwe wskazanie właściwego współczynnika absorpcji/antyrefleksyjności dla modułów PV, technologii warstw ARC, czy też wykonanego teksturowania, które powinny być zastosowane na analizowanej inwestycji w odniesieniu do danych zawartych w programie Forge Solar. W przypadku konieczności zagwarantowania wysokiego poziomu bezpieczeństwa (wyższego niż wymogi FAA) do budowy planowanej farmy fotowoltaicznej zlokalizowanej na badanym lotnisku należy zastosować moduły fotowoltaiczne o parametrach absorpcji/antyrefleksyjności nie gorszej niż wskazane w analizie wartości referencyjnych.
- i) Ponieważ projekt i rozmieszczenie modułów PV mają bardzo istotny wpływ na ryzyko powstawania olśnienia oraz nie są wolne od nieprzewidzianych czynników (np. model matematyczny przyjęte przez Autorów oprogramowania Forge Solar do symulacji rzeczywistych warunków zawiera pewne uproszczenia), zaleca się przeprowadzenie szczegółowej analizy wpływu olśnienia dla projektowanej instalacji fotowoltaicznej po każdej zmianie cech/parametrów instalacji PV.

11. Literatura

Artykuły i książki

- [1] Flizikowski J. Mroziński A.: Inżynieria instalacji fotowoltaicznych. Monografia pod redakcją A. Mrozińskiego. Wydawnictwo Graffpol. Bydgoszcz 2016
- [2] Mroziński A.: Poradnik dobrych praktyk wdrażania instalacji odnawialnych źródeł energii. Wydawnictwo 1studio.pl Arkadiusz Bartnik, ISBN 978-83-943206-0-7, Bydgoszcz 2015
- [3] Mostafa M.F.A., Aleem S.H.E.A., Zobaa A.F.: Risk assessment and possible mitigation solutions for using solar photovoltaic at airports. 2016 18th International Middle-East Power Systems Conference, MEPCON 2016 - Proceedings
- [4] Yu Bin ZHU: The Potential Hazard Analysis Method of Glare for Photovoltaic near airports or within. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 392 (2018) 062148 - <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/392/6/062148/pdf>
- [5] Sreenath S., Sudhakar K., Yusop A.F., Cuce E., Solomin E.: Analysis of solar PV glare in airport environment: Potential solutions. Results in Engineering, Volume 5, March 2020, 100079 - <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100079>
- [6] Sreenath S., Sudhakar K., Yusop A.F.: SWOT analysis of solar PV systems in airport environment. International Journal on Emerging Technologies. Volume 10, Issue 2, 2019, Pages 1-7
- [7] Stapiński T., Marszałek K., Jaglarz J.: Właściwości optyczne pokryw antyrefleksyjnych dla zastosowań fotowoltaicznych. Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 90 NR 9/2014 - <http://pe.org.pl/articles/2014/9/25.pdf>
- [8] Baxter G., Srisaeng P., Wild G.: Sustainable airport energy management: the case of Kansai international airport. International Journal for Traffic and Transport Engineering (IJTTE), 2018, 8(3):334-358 - DOI: 10.7708/ijtte.2018.8(3).07
- [9] Sukumaran Sreenath S., Sudhakar K., Fitri Yusop A.: Airport-based photovoltaic applications. Progress in Photovoltaics, 2020, 28(8): 833-853 - DOI: 10.1002/pip.3265

Dane pozyskane z Internetu

- [10] <https://renews.biz/66679/solar-capacity-installations-in-2021-could-hit-209gw> (dostęp 09.2022r.)
- [11] <https://blogtransportowy.pl/poradzic-oslepiajacym-sloncem-zima/> (dostęp 06.2021r.)
- [12] <https://bangordailynews.com/2012/08/31/news/solar-panels-blocked-after-nh-airport-controllers-complain-of-glare/> (dostęp 09.2022r.)
- [13] https://airport.nridigital.com/air_nov20/solar_power_airports (dostęp 09.2022r.)
- [14] <https://www.pv-magazine-australia.com/2020/08/07/fly-me-to-the-sun-melbourne-airports-record-solar-farm/> (dostęp 09.2022r.)
- [15] <https://www.pv-magazine-australia.com/2020/08/04/csiro-report-shows-flightpath-to-hydrogen-fuelled-commercial-aviation/> (dostęp 09.2022r.)
- [16] <https://www.pv-magazine-australia.com/2018/09/06/northern-territory-airports-to-add-solar-farms/> (dostęp 09.2022r.)

- [17] <https://www.pv-magazine-australia.com/2019/07/17/australian-airports-turn-to-emissions-linked-financing-amid-growing-appetite-for-sustainable-lending/> (dostęp 09.2022r.)
- [18] <https://cleantechnica.com/2019/08/21/usas-first-100-solar-airport-comes-up-at-chattanooga-in-the-heart-of-trump-land/> (dostęp 09.2022r.)
- [19] <https://palisadepartners.com.au/darwin-airport-completes-4mw-large-scale-solar-power-facility/> (dostęp 09.2022r.)
- [20] <https://www.solarchoice.net.au/blog/solar-panels-near-airports-glare-issue/> (dostęp 09.2022r.)
- [21] <https://www.aviationpros.com/aircraft/commercial-airline/news/10599152/dsseldorf-international-airport-goes-solar> (dostęp 09.2022r.)
- [22] <https://www.solarchoice.net.au/wp-content/uploads/Reflectivity-of-Solar-Electric-PV-Modules.pdf.pdf> (dostęp 09.2022r.)
- [23] <https://panethos.wordpress.com/2015/11/20/the-worlds-largest-airport-solar-farm-is-where/> (dostęp 09.2022r.)
- [24] <https://www.savemoneycutcarbon.com/learn-save/do-i-need-to-worry-about-glare-from-solar-panels/> (dostęp 09.2022r.)
- [25] <https://www.nrel.gov/state-local-tribal/blog/posts/research-and-analysis-demonstrate-the-lack-of-impacts-of-glare-from-photovoltaic-modules.html> (dostęp 09.2022r.)
- [26] <https://www.renewableenergyworld.com/baseload/minimization-of-reflected-light-in-photovoltaic-modules/> (dostęp 09.2022r.)
- [27] <https://www.pagerpower.com/news/solar-panel-glare/> (dostęp 09.2022r.)
- [28] www.forgesolar.com (dostęp 09.2022r.)
- [29] <https://federallabs.org/technology/solar-glare-hazard-analysis-tool-sghat-1> (dostęp 09.2022r.)
- [30] <https://federallabs.org/labs/sandia-national-laboratories-snl> (dostęp 09.2022r.)
- [31] <https://www.wnp.pl/logistyka/bedzie-globalny-ekostandard-dla-lotnisk-europa-i-tak-juz-go-wyprzedza.622467.html> (dostęp 09.2022r.)
- [32] <https://www.internationalairportreview.com/article/161550/aviation-sustainable-kansai-airports/> (dostęp 09.2022r.)
- [33] <https://www.tatapowersolar.com/project/2-67-mw-solar-plant-carport-cochin-international-airport-ltd/> (dostęp 09.2022r.)
- [34] <https://pvbuzz.com/488-public-airports-solar-panels/> (dostęp 09.2022r.)
- [35] <https://www.forbesindia.com/article/sustainability-special/behind-the-scenes-at-cialmdash-the-worlds-first-solarpowered-airport/50319/1> (dostęp 09.2022r.)
- [36] <https://www.internationalairportreview.com/news/76928/firts-fully-solar-powered-airport/> (dostęp 09.2022r.)
- [37] <https://www.rynek-lotniczy.pl/wiadomosci/port-poznanlawica-zmniejszy-swoj-slad-weglowy-14594.html> (dostęp 09.2022r.)
- [38] <https://www.rynek-lotniczy.pl/mobile/port-lotniczy-bydgoszcz-na-drozdzie-do-niezaleznosci-energetycznej-14970.html> (dostęp 09.2022r.)
- [39] <http://www.pvinfo.pl/farma-pv-na-lotnisku-w-bydgoszczy> (dostęp 09.2022r.)
- [40] <https://airport-world.com/worlds-largest-airport-located-solar-farm-coming-to-edmonton/> (dostęp 09.2022r.)
- [41] <https://rzeszow.tvp.pl/15487106/port-lotniczy-rzeszowjasionka-zainwestowal-w-odnawialne-zrodla-energii> (dostęp 09.2022r.)
- [42] <https://www.gramwzielone.pl/energia-sloneczna/11163/pierwsze-lotnisko-w-polsce-z-instalacja-fotowoltaiczna> (dostęp 09.2022r.)
- [43] <https://pvplus.pl/realizacje/lotnisko-im-chopina/> (dostęp 09.2022r.)

- [44] <https://www.pv-magazine.com/2018/04/19/fs-solar-energizes-15-mw-solar-facility-at-amsterdams-schiphol-airport/> (dostęp 09.2022r.)
- [45] <https://ratedpower.com/blog/green-airports/> (dostęp 09.2022r.)
- [46] <https://www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/lotniska-slاد-weglowy-emisje-CO2-7494.html> (dostęp 09.2022r.)
- [47] <https://www.gramwzielone.pl/energia-sloneczna/107963/fotowoltaika-bedzie-obowiazkowa-to-element-nowego-planu-brukseli> (dostęp 09.2022r.)
- [48] <https://balkangreenenergynews.com/vienna-airport-completes-austrias-biggest-solar-power-plant/> (dostęp 09.2022r.)

Raporty

- [49] Raport International Civil Aviation Organization (ICAO) - https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO_UNDP_GEF_RenewableEnergyGuidance.pdf

Akty prawne

- [50] Ustawa z dnia 16 października 2019 r. o zmianie ustawy – Prawo ochrony środowiska oraz niektórych innych ustaw - Dz. U. 2019 poz. 2166
- [51] Ustawa z dnia 24 lutego 2020 r o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym - Dz.U. 2020 poz. 293
- [52] Ustawa z dnia 19 lipca 2019 r. o zmianie ustawy o odnawialnych źródłach energii oraz niektórych innych ustaw - Dz.U. 2019 poz. 1524
- [53] Technical Guidance for Evaluating Selected Solar Technologies on Airports - www.faa.gov/airports/environmental/policy_guidance/media/FAA-Airport-Solar-Guide-2018.pdf
- [54] Easy Access Rules for Aerodromes (Regulation (EU) No 139/2014) - <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-aerodromes-regulation-eu-no-1392014>

Wykorzystane oprogramowanie

- [55] ForgeSolar (Enterprise subscription) - <https://www.forgesolar.com/>
- [56] <https://www.forgesolar.com/help/#glare>

12. Dokumenty wykorzystane do opracowania ekspertyzy

12.1. Mapa zagospodarowania terenów Portu Lotniczego Olsztyn-Mazury w Szymanach

Mapa zawiera wskazany obszar planowanej farmy fotowoltaicznej, oraz usytuowanie wieży kontroli ruchu – TWR.

12.2. Koncepcja projektowa wykonania instalacji PV

Koncepcja projektowa budowy farmy fotowoltaicznej na gruncie oraz carportów parkingowych z instalacjami PV o łącznej mocy 3 MW wraz z niezbędną infrastrukturą techniczną na terenie portu lotniczego Olsztyn-Mazury w Szymanach.

12.3. Wytyczne Federal Aviation Administration

Zalecenia dotyczące farm fotowoltaicznych na terenie lotnisk. 3.1.2 Reflectivity FAA Airport Solar Guide – Technical Guidance for Evaluating Selected Solar Technologies on Airports – dokument dostępny w formie elektronicznej na stronie [www: www.faa.gov/airports/environmental/policy_guidance/media/FAA-Airport-Solar-Guide-2018.pdf](http://www.faa.gov/airports/environmental/policy_guidance/media/FAA-Airport-Solar-Guide-2018.pdf)

12.4. Wytyczne European Union Aviation Safety Agency

Zalecenia dotyczące farm fotowoltaicznych na terenie lotnisk w zakresie maksymalnych akceptowalnych wartości mierzonej luminancji - dokument dostępny w formie elektronicznej na stronie [www: https://www.easa.europa.eu/en/document-library/agency-decisions/ed-decision-2022013r](https://www.easa.europa.eu/en/document-library/agency-decisions/ed-decision-2022013r)

