

Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu

Anna Kochanek

**Model integracji sztucznej inteligencji i analiz
przestrzennych w procesie podejmowania
decyzji lokalizacyjnych dla obiektów
odnawialnych źródeł energii**

Nowy Sącz 2025

Redaktor Naukowy
dr inż. Anna Kochanek

Recenzje
prof. dr hab. inż. Krzysztof Gaska
dr hab. inż. Mateusz Malinowski, prof. URK

Redaktor Techniczny
dr Tamara Bolanowska-Bobrek

© Copyright by Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu
Nowy Sącz 2025

ISBN 978-83-67661-58-4

Wydawca
Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu
ul. Staszica 1, 33-300 Nowy Sącz
tel.: +48 18 443 45 45, e-mail: sog@ans-ns.edu.pl

Adres redakcji
Wydawnictwo Naukowe Akademii Nauk Stosowanych w Nowym Sączu
ul. Staszica 1, Nowy Sącz 33-300
tel.: +48 18 443 45 45, e-mail: tbolanowska@ans-ns.edu.pl

Druk
Wydawnictwo i drukarnia NOVA SANDEC s.c.
Mariusz Kałyniuk, Roman Kałyniuk
ul. Lwowska 14, 33-300 Nowy Sącz
tel.: +48 18 441 02 88, e-mail: biuro@novasandec.pl

Spis treści

WPROWADZENIE	7
1. RAMY TEORETYCZNE TRANSFORMACJI ENERGETYCZNEJ.....	12
1.1. Bezpieczeństwo energetyczne kraju	13
1.1.1. Aspekt techniczny	15
1.1.2. Aspekt ekonomiczny	16
1.1.3. Aspekt społeczny	18
1.1.4. Aspekt środowiskowy i polityczny	19
1.2. Polityka energetyczno-klimatyczna Unii Europejskiej	21
1.2.1. Ramy regulacyjne i dyrektywy	23
1.2.2. Cele klimatyczne i zrównoważony rozwój	24
1.2.3. Programy finansowania transformacji energetycznej	25
1.2.4. Polityki transformacji energetycznej w krajach Unii Europejskiej	26
1.3. Uwarunkowania transformacji energetycznej w Polsce	28
2. CHARAKTERYSTYKA TECHNOLOGII ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII.....	29
2.1. Instalacja fotowoltaiczna jako źródło energii pozyskiwanej z promieniowania słonecznego	30
2.1.1. Charakterystyka instalacji fotowoltaicznej	30
2.1.2. Oddziaływanie na środowisko	32
2.1.3. Społeczne i przestrzenne aspekty rozwoju instalacji fotowoltaicznych	33
2.2. Biogaz jako źródło energii pozyskiwanej z fermentacji materii organicznej.....	34
2.2.1. Geneza i charakterystyka biogazu	35
2.2.2. Dostępność i rodzaje substratów	35
2.2.3. Oddziaływanie na środowisko	37
2.2.4. Zastosowania i znaczenie dla gospodarki lokalnej	38
2.3. Energia wiatrowa jako źródło energii pozyskiwanej z siły wiatru.....	39
2.3.1. Zasada działania i globalne znaczenie energetyki wiatrowej	40
2.3.2. Statystyki rozwoju	40
2.3.3. Oddziaływanie na środowisko i społeczności lokalne	41
2.3.4. Perspektywy i kierunki rozwoju energetyki wiatrowej.....	43
2.4. Hybrydowe systemy odnawialnych źródeł energii	44
2.4.1. Charakterystyka systemów hybrydowych	44
2.4.2. Korzyści środowiskowe i energetyczne	45
2.4.3. Przykłady istniejących połączeń technologii	47
3. PRAWNE ASPEKTY PLANOWANIA I PROJEKTOWANIA WYBRANYCH OBIEKTÓW ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII.....	49
3.1. Uwarunkowania prawne rozwoju energetyki słonecznej w Polsce.....	49
3.2. Uwarunkowania prawne budowy i funkcjonowania biogazowni w Polsce	51
3.3. Uwarunkowania prawne energetyki wiatrowej w Polsce.....	52

4. SYSTEMY INFORMACJI PRZESTRZENNEJ W PLANOWANIU	
LOKALIZACJI OZE.....	56
4.1. Definicje i terminologia systemów przestrzennych	56
4.2. Modele i struktury danych przestrzennych	57
4.3. Funkcje, analizy i wizualizacje przestrzenne	58
4.4. Pozyskiwanie, gromadzenie i integracja danych geoprzestrzennych.....	59
5. ANALIZY ŚRODOWISKOWE W PLANOWANIU LOKALIZACJI	
ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII	60
5.1. Metody analiz przestrzennych w lokalizacji i ocenie potencjału odnawialnych źródeł energii	61
5.2. Stan badań nad wykorzystaniem narzędzi GIS w energetyce odnawialnej	61
5.3. Integracja GIS i sztucznej inteligencji w modelowaniu, prognozowaniu i optymalizacji rozmieszczenia infrastruktury OZE.....	62
6. INTELIGENTNE SYSTEMY UCZENIA MASZYNOWEGO I MODELE	
JĘZYKOWE W PROCESACH DECYZYJNYCH	64
7. METODYKA OCENY LOKALIZACJI ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII	66
7.1. Kryteria i ograniczenia lokalizacyjne.....	66
7.2. Miary spójności przestrzennej w aspekcie konfiguracji topologicznej.....	68
7.3. Metody wielokryterialne i wagi kryteriów w systemach wspomagania wyboru lokalizacji OZE	68
7.4. Walidacja, analiza wrażliwości i niepewności	69
8. PROCESY OBLICZENIOWE I SELEKCJA DANYCH W ANALIZIE	
PRZESTRZENNEJ.....	71
8.1. Przygotowanie danych jako proces integracji danych.....	71
8.1.1. Definicja i znaczenie w integracji danych	71
8.1.2. Etapy procesu.....	72
8.1.3. Przygotowanie danych legislacyjnych.....	73
8.2. Rozproszona platforma obliczeniowa typu Apache Spark	73
8.2.1. Architektura i model danych	74
8.2.2. Komponenty systemu Spark	74
8.2.3. Zalety i ograniczenia Apache Spark	75
8.2.4. Przykład zastosowania analiz dużych zbiorów dokumentów legislacyjnych.....	75
8.3. Przetwarzanie danych przestrzennych w środowisku Apache Sedona.....	76
8.3.1. Charakterystyka integracji Apache Spark i Apache Sedona	76
8.3.2. Obsługa i reprezentacja danych przestrzennych	77
8.3.3. Operacje i metody analizy przestrzennej	77
8.3.4. Powiązanie danych legislacyjnych z lokalizacjami przestrzennymi	78
8.4. Klasteryzacja danych.....	78
8.4.1. Definicja i podstawowe założenia	78
8.4.2. Algorytmy klasteryzacji	79
8.4.3. Przykłady zastosowań.....	79
8.5. Integracja procesów obliczeniowych	80
8.5.1. Przetwarzanie i transformacja danych z wykorzystaniem Apache Spark.....	80
8.5.2. Sedona i Spark w kontekście rozszerzenia analiz o wymiar przestrzenny	81
8.5.3. Klasteryzacja i przetwarzanie języka naturalnego w analizie dokumentów prawnych.....	81

9. CEL I METODYKA BADAŃ.....	82
10. AKTUALNE METODY PLANOWANIA I PROJEKTOWANIA OBIEKTÓW ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII.....	88
10.1. Procedury formalno-prawne w procesie lokalizacji nowych obiektów odnawialnych źródeł energii	88
10.2. Systemy Informacji Geograficznej w procesie decyzyjnym.....	89
11. AKTUALNA PRAKTYKA PODEJMOWANIA DECYZJI O LOKALIZACJI OBIEKTÓW OZE.....	91
11.1. Charakterystyka lokalizacji inwestycji.....	91
11.2. Miejscowy Plan Zagospodarowania Przestrzennego	93
11.3. Uwarunkowania środowiskowe i prawne	95
11.3.1. Pomniki przyrody.....	95
11.3.2. Rezerваты przyrody i parki krajobrazowe	95
11.3.3. Parki narodowe i zespoły przyrodniczo-krajobrazowe.....	96
11.4. Obszary Natura 2000.....	97
11.5. Analizy środowiskowe i przestrzenne terenu inwestycji.....	98
11.5.1. Analiza kąta nachylenia terenu	98
11.5.2. Analiza relacji sąsiedztwa drzewostanu z inwestycją.....	99
11.5.3. Analiza hydrograficzna i hydrologiczna w kontekście zagrożenia powodziowego	101
11.5.4. Analiza geologiczna i zagrożenie osuwiskowe.....	103
11.5.5. Analiza bonitacji gleby na podstawie rejestru gruntów	104
11.5.6. Analiza sieci drogowej	105
11.5.7. Analiza relacji odległościowych	107
11.6. Analiza nasłonecznienia jako przykład czynnika wpływającego na budowę instalacji fotowoltaicznej.....	108
11.7. Analiza dostępności substratów jako istotny czynnik wpływający na budowę biogazowni rolniczej	109
11.8. Analiza wietrzności jako przykład czynnika wpływającego na budowę farmy wiatrowej	110
11.9. Analiza wrażliwości ornitologicznej	112
11.10. Podsumowanie analizy przestrzennej.....	113
12. AUTORSKI SYSTEM DYNAMICZNEGO GENEROWANIA WARUNKÓW BRZEGOWYCH	116
12.1. Wprowadzenie do systemu.....	116
12.2. Krok 1 – Budowa i organizacja Bazy Wiedzy	118
12.2.1. Reprezentacja modułu wiedzy eksperckiej	121
12.2.2. Zestaw pytań aktualizacyjnych w procesie detekcji zmian legislacyjnych.....	125
12.2.3. Benchmark oceny modelu LLM w regulacjach OZE i procesie analizy	127
12.3. Krok 2 – Dynamiczne douczanie modelu LLM bazujące na wiedzy prawnej	128
12.3.1. Moduł RAG jako mechanizm dynamicznego pozyskiwania informacji	130
12.3.2. Trwałe douczanie modelu językowego – moduł LoRA.....	132
12.3.3. Lista wymagań jako centralny komponent systemu	136
12.3.4. Metodyka generowania i walidacji listy sygnałów	138
12.4. Krok 3 – Analiza zapytań i przetwarzanie danych przestrzennych.....	141
12.4.1. Analiza zasobów i mapowanie wymagań	141
12.4.2. Przetwarzanie danych i zastosowanie technologii Spark-Sedona w klastrach obliczeniowych i przetwarzaniu równoległym danych przestrzennych	143

12.4.3. Klasteryzacja danych przestrzennych	146
12.4.4. Miary spójności przestrzennej klastrów	150
12.4.5. Wielokryterialna metoda hierarchicznej analizy klastrów	152
12.4.6. Prezentacja wyników analizy	156
12.4.7. Znaczenie etapu dla praktyki inwestycyjnej	156
12.5. Potencjał rozwoju i ryzyka wdrożenia systemu	157
13. WALIDACJA SYSTEMU NA WYBRANYM PRZYKŁADZIE	159
13.1. Cel wdrożenia	159
13.2. Źródła danych	159
13.3. Odbiorcy i interesariusze	159
13.4. Wdrożenie w jednostce i środowisko testowe	160
13.5. Środowisko programowe	161
13.6. Działania aplikacji	163
13.6.1. Przyjęcie i przetworzenie danych wejściowych	163
13.6.2. Agregacja wyników i wizualizacja	165
13.6.3. Proces douczania modelu	166
13.6.4. Ewaluacja algorytmów klasteryzacji	169
PODSUMOWANIE PRACY I WNIOSKI KOŃCOWE	173
BIBLIOGRAFIA	178
SPIS RYSUNKÓW	196
SPIS TABEL	198
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW	199

WPROWADZENIE

Bezpieczeństwo energetyczne należy do priorytetów państw całego świata, zarówno w sferze społecznej, gospodarczej, środowiskowej, jak i politycznej. Jednym z głównych działań mających na celu jego wzmocnienie jest rozwój odnawialnych źródeł energii (OZE), które pozwalają zwiększyć niezależność od dostaw surowców zewnętrznych (nieodnawialnych: ropy, węgla i gazu).

Polska dysponuje stosunkowo wysokim potencjałem w zakresie wdrażania odnawialnych źródeł energii, a obecne uwarunkowania sprawiają, że ich szersze wykorzystanie staje się koniecznością w kontekście dążenia do zrównoważonego rozwoju (Sołowiej i in., 2021). Stanowi to ważny czynnik transformacji energetycznej, szczególnie w obliczu rosnącej troski o środowisko i ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. W Polsce, podobnie jak w innych krajach Unii Europejskiej, dynamiczny rozwój OZE zyskuje na znaczeniu, co wynika z założeń polityki klimatycznej oraz dążenia do zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego. Wykorzystanie energii słonecznej, wiatrowej, biogazu oraz innych OZE ma istotny wpływ na zrównoważony rozwój kraju i uniezależnienie się od tradycyjnych paliw kopalnych.

Prawidłowe usytuowanie instalacji odnawialnych źródeł energii jest warunkiem ich efektywnego funkcjonowania, a także społecznej, ekonomicznej i środowiskowej akceptacji. O doborze właściwej lokalizacji i precyzyjnym rozmieszczeniu elementów technologii OZE decydują:

- 1) Potencjał zasobów odnawialnych źródeł (warunki wietrzne, nasłonecznienie, zacienienie, dostępność biomasy, sprawność eksploatacyjna, gradient geotermalny, parametry hydrologiczne) i inne właściwości charakterystyczne dla danego typu technologii.
- 2) Integracja z systemem elektroenergetycznym, w której znaczenie ma nie tylko odległość od punktu przyłączenia, ale także zdolność przesyłowa sieci, dostępna moc przyłączeniowa oraz ryzyko okresowych ograniczeń wytwarzania energii.
- 3) Oddziaływanie instalacji na środowisko oraz bioróżnorodność poprzez minimalizację kolizji z ptakami i nietoperzami, poszanowanie korytarzy migracyjnych i obszarów chronionych, ograniczanie hałasu, efektu migotania cienia, presji krajobrazowej oraz barier dla zwierząt.
- 4) Ekonomia projektu, w tym struktura nakładów inwestycyjnych, koszty operacyjne w cyklu życia instalacji oraz oczekiwana stopa zwrotu z kapitału (z uwzględnieniem ryzyk: technicznych, regulacyjnych i rynkowych).
- 5) Zgodność prawna oraz planistyczna, obejmująca spójność inwestycji z miejscowymi planami zagospodarowania przestrzennego lub decyzjami o warunkach zabudowy, decyzjami o środowiskowych uwarunkowaniach, strefami ochronnymi oraz spełnienie minimalnych odległości od zabudowy i innych wymogów specyficznych dla konkretnej branży.

- 6) Uwarunkowania geologiczne i bezpieczeństwo konstrukcji, nośność oraz jednorodność gruntu, brak torfowisk i osuwisk, kontrola osiadania gruntu, odporność na powódzie, wichury, pożary i oblodzenia oraz prawidłowe wykonanie fundamentów
- 7) Akceptacja społeczna i ład przestrzenny, co powinno ograniczyć liczbę konfliktów z mieszkańcami, rolnikami oraz branżą turystyczną, a także łatwiejsze i szybsze procedowanie inwestycji.
- 8) Gospodarka wodna oraz gruntowa, unikanie podtopień i erozji, właściwa melioracja, poszanowanie gleb o wysokiej klasie bonitacyjnej oraz korzyści ekologicznych i cieków.

Decyzje o wyborze lokalizacji i finalnym posadowieniu instalacji odnawialnych źródeł energii nie są proste i wymagają uwzględnienia wielu, często sprzecznych ze sobą, kryteriów. W przypadku tak wrażliwych technologii proces ten staje się szczególnie złożony, gdyż wymaga jednoczesnego godzenia interesów technicznych, ekonomicznych, środowiskowych i społecznych. Przy wyborze lokalizacji należy optymalizować uzysk energii i koszty inwestycji, a zarazem minimalizować negatywny wpływ na krajobraz, bioróżnorodność i komfort życia mieszkańców.

Trudność podejmowania optymalnej decyzji o lokalizacji pogłębia niepewność danych dotyczących zasobów, geologii czy zjawisk pogodowych, a także asymetrię pomiędzy korzyściami systemowymi a lokalnymi kosztami środowiskowymi oraz społecznymi. Całość dodatkowo komplikuje odmienna dynamika rozwoju sieci, procedur administracyjnych i finansowania, a także zmienność regulacyjna, która ogranicza przewidywalność i stabilność procesu inwestycyjnego. Dlatego w procesie podejmowania decyzji dotyczących lokalizacji i posadowienia instalacji odnawialnych źródeł energii, coraz częściej wykorzystuje się analizę wielokryterialną *Multi Criteria Decision Analysis* (MCDA) (Generowicz, 2018).

Analiza wielokryterialna zintegrowana z systemami informacji przestrzennej stanowi narzędzie wspierające proces lokalizacji obiektów energetycznych. Umożliwia jednoczesne uwzględnienie wielu czynników, takich jak: uwarunkowania środowiskowe, dostępność infrastruktury technicznej, koszty inwestycyjne czy ograniczenia przestrzenne i ich wizualizację w postaci map atrakcyjności lokalizacyjnej (Malinowski i in., 2021). Dzięki temu proces decyzyjny staje się szybszy, bardziej obiektywny i łatwiejszy do uzasadnienia, a ryzyko błędów wynikających z subiektywnej oceny zostaje znacząco ograniczone. Należy jednak zaznaczyć, że pomimo licznych zalet, analiza tego typu pozostaje procesem stosunkowo pracochłonnym, ponieważ wymaga specjalistycznej wiedzy i kompetencji, starannego doboru kryteriów, ustalenia wag oraz zaawansowanej obróbki i interpretacji danych środowiskowych.

Współczesne podejścia rozszerzają klasyczne MCDA o komponent przestrzenny, integrując je z narzędziami *Geographic Information System* GIS i metodami takimi jak *Analytic Hierarchy Process* (AHP). GIS odgrywa tu kluczową rolę, umożliwiając precyzyjne odwzorowanie warunków środowiskowych i infrastrukturalnych, analizę przestrzennych zależności między kryteriami i tworzenie scenariuszy alternatywnego zagospodarowania przestrzeni. Dzięki temu proces decyzyjny zyskuje wymiar nie tylko ilościowy, ale również przestrzenny, co znacząco podnosi trafność i wiarygodność uzyskanych wyników.

Aktualnie coraz częściej integruje się narzędzia sztucznej inteligencji z danymi środowiskowymi. Algorytmy uczenia maszynowego i systemy agentowe pozwalają na dynamiczne modelowanie złożonych zależności pomiędzy kryteriami, a także symulowanie behawioryzmów różnych interesariuszy. Takie podejście umożliwia tworzenie bardziej elastycznych i adaptacyjnych modeli decyzyjnych, które lepiej odzwierciedlają złożoność procesów przestrzenno-społeczno-środowiskowych.

W dostępnej literaturze naukowej i branżowej brakuje informacji o istnieniu zdefiniowanych modeli bazujących na integracji danych środowiskowych, prawnych oraz sztucznej inteligencji i GIS, umożliwiających precyzyjne podejmowanie decyzji o lokalizacji nowych obiektów energetycznych. Wykorzystanie tego typu algorytmów (złożonych systemów) w odniesieniu do problematyki optymalnego lokalizowania obiektów i instalacji OZE powinno doprowadzić do znacznego ograniczenia konfliktów z lokalnymi społecznościami i samorządami, a w efekcie pozwolić na zwiększenie uzysku energii z takich instalacji. Istotne z kognitywnego i utylitarnego punktu widzenia staje się więc opracowanie oraz walidowanie zintegrowanego narzędzia dla inwestorów i samorządów lokalnych, wspomagającego optymalny wybór lokalizacji obiektów OZE.

Zidentyfikowana w literaturze luka uzasadnia sformułowanie problemu badawczego zawierającego się w pytaniu: *Czy opracowany w ramach badań autorski System Dynamicznego Generowania Warunków Brzegowych integrujący dane środowiskowe prawne z elementami sztucznej inteligencji pozwala na usprawnienie procesu podejmowania decyzji dotyczących lokalizacji i posadowienia obiektów odnawialnych źródeł energii?*

W odniesieniu do głównego problemu badawczego przyjęto następującą hipotezę: *Opracowany w ramach badań autorski System Dynamicznego Generowania Warunków Brzegowych, integrujący dane środowiskowe z elementami sztucznej inteligencji, może usprawnić proces podejmowania decyzji przestrzennych dotyczących lokalizacji nowych inwestycji OZE poprzez zwiększenie spójności, wiarygodności i adaptacyjności wyników analiz wielokryterialnych.*

Głównym celem pracy jest opracowanie oraz walidacja autorskiego Systemu Dynamicznego Generowania Warunków Brzegowych (SDGWB), wykorzystującego integrację danych środowiskowych i prawnych z elementami sztucznej inteligencji w ramach architektury agenta hybrydowego, wspierającego proces podejmowania decyzji przestrzennych dotyczących lokalizacji i posadowienia inwestycji OZE.

Realizacja głównego celu pracy i rozwiązanie przyjętego problemu badawczego wymagało wyznaczenia celów oraz hipotez szczegółowych, które zostały omówione w rozdziale „Cel i metodyka badań”

Nowość prowadzonych badań polega na opracowaniu po raz pierwszy modelu decyzyjnego o niespotykanym dotąd stopniu automatyzacji i uniwersalności zastosowań. Opracowane narzędzie integruje algorytmy analityczne w taki sposób, że użytkownik–decydent nie musi posiadać specjalistycznej wiedzy teoretycznej ani praktycznej z zakresu obsługi oprogramowania GIS, AHP czy innych metod wielokryterialnych. Cały proces analizy zostaje wykonany automatycznie przez zaprojektowane narzędzie, co znacząco upraszcza procedurę podejmowania decyzji przestrzennych.

Obiektem badań był obszar miasta Nowy Sącz i gminy Stary Sącz. Wybór tego terenu nie był przypadkowy, gdyż charakteryzuje się on zróżnicowaną i urozmaiconą rzeźbą terenu, a także występowaniem niekorzystnych warunków środowiskowych

i przestrzennych. Dzięki temu stanowił on wymagający, a zarazem reprezentatywny obiekt testowy do weryfikacji skuteczności opracowanego modelu. Przeprowadzone badania pozwoliły sprawdzić, jak system radzi sobie w warunkach rzeczywistych, w których analiza przestrzenna wymaga uwzględnienia dużej liczby czynników różnego rodzaju.

Struktura niniejszego opracowania została podzielona na następujące części: podstawy teoretyczne, charakterystyka technologii i uwarunkowania prawne budowy obiektów OZE, aspekty metodyczne oraz część empiryczna, w której zaprezentowano autorskie rozwiązanie badawcze oraz jego walidację i weryfikację.

We wprowadzeniu określono przesłanki podjęcia tematu, zdefiniowano problem badawczy, sformułowano cel główny i cele szczegółowe, a także wskazano zakres oraz uzasadnienie naukowe pracy. Część druga stanowi ramę teoretyczną, w której omówiono zagadnienia bezpieczeństwa energetycznego i roli odnawialnych źródeł energii, zaprezentowano politykę oraz cele Unii Europejskiej, z uwzględnieniem mechanizmów ich finansowania, a także przeanalizowano trendy i uwarunkowania rozwoju OZE w Polsce w kontekście struktury krajowego miksu energetycznego.

Trzecią część pracy poświęcono charakterystyce wybranych technologii odnawialnych źródeł energii, obejmującej instalację fotowoltaiczną (PV), biogaz, energetykę wiatrową i inne źródła alternatywne. Analizie poddano zarówno aspekty techniczne, środowiskowe, projektowe, jak i ekonomiczne. Szczególne miejsce w pracy zajmuje ujęcie hybrydowych konfiguracji OZE, które stanowią rozwiązanie zwiększające bezpieczeństwo dostaw energii i racjonalizujące wykorzystanie zasobów.

W kolejnej części pracy omówiono uwarunkowania prawne planowania oraz projektowania instalacji odnawialnych źródeł energii. Uwzględniono zarówno regulacje ogólne, jak też specyficzne ramy prawne odnoszące się do PV, biogazu i energetyki wiatrowej. Równolegle zaprezentowano funkcje systemów informacji przestrzennej w planowaniu energetyki odnawialnej, definiując podstawowe pojęcia, struktury danych przestrzennych, a także narzędzia analityczne i wizualizacyjne. Przedstawiono też zagadnienia związane z pozyskiwaniem, integracją oraz gromadzeniem danych geoprzestrzennych, a także przeanalizowano zastosowania GIS w ocenie zasobów środowiskowych, analizie potencjału energetycznego oraz prognozowaniu lokalizacji instalacji. W tym kontekście omówiono integrację GIS ze sztuczną inteligencją oraz potencjał metod hybrydowych w modelowaniu i optymalizacji procesów decyzyjnych.

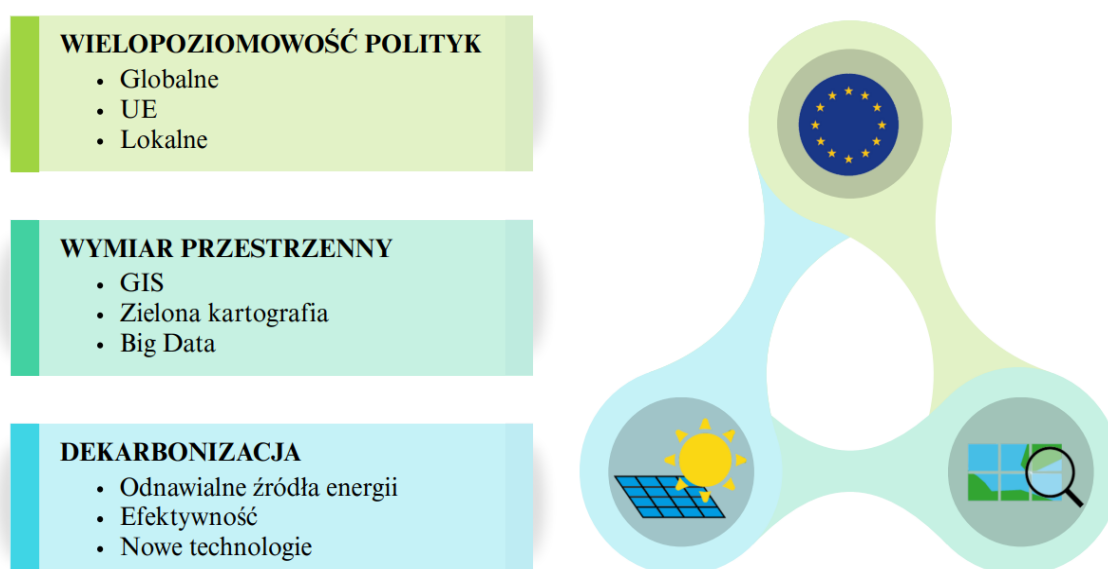
Następne rozdziały dotyczą inteligentnych systemów wspomaganie decyzji, bazujących na uczeniu maszynowym i dużych modelach językowych. Przedstawiono ich zastosowanie w pozyskiwaniu i interpretacji danych prawnych, aktualizacji baz wiedzy, benchmarkingu oraz ocenie jakości przetwarzanych informacji. Integralną częścią pracy jest również metodyka oceny lokalizacji nowych obiektów energetyki odnawialnej, obejmująca identyfikację kryteriów środowiskowych, planistycznych i sieciowych, a także wykorzystanie metod wielokryterialnych, analiz wrażliwości i procedur walidacyjnych. Rozwinięto także problematykę procesów obliczeniowych i selekcji danych, opisując proces *Extract – Transform – Load* (ETL), architekturę platformy Apache Spark, bibliotekę Apache Sedona oraz metody klasteryzacji, ze wskazaniem ich roli w analizie dokumentów prawnych i danych przestrzennych.

Część badawcza stanowiąca zasadniczą część opracowania obejmuje sformułowanie założeń naukowych, określenie przyjętej metodyki badań i szczegółową prezentację autorskiego Systemu Dynamicznego Generowania Warunków Brzegowych. Omówiono w niej kolejne etapy jego funkcjonowania: od pozyskiwania i organizacji wiedzy prawnej, poprzez przetwarzanie oraz generowanie listy wymagań, aż po ich transformację w sygnały techniczne, jak również integrację z danymi środowiskowymi. Przeanalizowano także moduły odpowiedzialne za aktualizację wiedzy, walidację, kontrolę jakości oraz wizualizację wyników. Zaprezentowano wdrożenie systemu na przykładzie empirycznym, wskazując jego walory aplikacyjne, ograniczenia i potencjalne kierunki dalszego rozwoju.

Pracę zamyka podsumowanie zawierające wnioski końcowe, identyfikację nowości naukowej i wskazanie perspektyw kontynuacji badań w obszarze wykorzystania GIS oraz sztucznej inteligencji w procesach lokalizacyjnych inwestycji OZE.

1. RAMY TEORETYCZNE TRANSFORMACJI ENERGETYCZNEJ

Transformacja energetyczna stanowi proces przebudowy systemu wytwarzania oraz użytkowania energii, którego głównym celem jest redukcja emisji gazów cieplarnianych i osiągnięcie neutralności klimatycznej (Bridge, Bouzarovski, Bradshaw, Eyre, 2013; Chatzinikolaou, Vladoš, Kokkinaki, 2025). Proces ten ma charakter nieliniowy, gdyż przebiega w ramach złożonych interakcji technologicznych, społecznych i środowiskowych, co wskazuje na jego interdyscyplinarną i wieloaspektową naturę (Fernandez, 2022). Jego główne elementy, obejmujące dekarbonizację, wielopoziomowość polityk oraz wymiar przestrzenny, przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Trzy filary transformacji energetycznej: dekarbonizacja, wymiar przestrzenny i wielopoziomowość polityk.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Environmental management and decarbonization nexus: A pathway to the energy sector’s sustainable futures”, A.-M.O. Mohamed, M. El-Sayed, R. Ali, 2025, *World*, 6(1), s. 13; „Spatial and energy planning: A means to reach sustainable development goals”, G. Stoeglehner, 2020, *Evolutionary and Institutional Economics Review*, 17(2), s. 473-486.

Fundamentem transformacji energetycznej jest dekarbonizacja, czyli ograniczanie wykorzystania paliw kopalnych na rzecz OZE, większej efektywności energetycznej oraz nowoczesnych technologii, takich jak *Carbon Capture and Storage* (CCS) czy inteligentne sieci (Mohamed, El-Sayed, Ali, 2025). Proces ten korzystnie wpływa na gospodarkę i środowisko, zmniejszając emisje, wzmacniając innowacyjność oraz stabilność systemu energetycznego. Jednocześnie sprzyja tworzeniu nowych miejsc pracy, przyciąga inwestycje technologiczne i zwiększa odporność na wahania cen surowców, wspierając zrównoważony rozwój (Chou, Ngo, Tran, 2023).

Proces ten przebiega w różnym tempie, zależnie od uwarunkowań krajowych, dostępności zasobów i specyfiki gospodarek, co wskazuje na jego zróżnicowany charakter (Ab Aziz, Alshdaifat, 2024). Ważną rolę odgrywają miasta, gdzie integracja polityki energetycznej z gospodarką o obiegu zamkniętym sprzyja redukcji odpadów i optymalizacji przepływów energetycznych (Williams, 2021; Ciula i in., 2024a).

Transformacja ma także wymiar przestrzenny, ponieważ potencjał OZE jest rozmieszczony nierównomiernie, co wymaga wykorzystania analiz przestrzennych i Big Data do oceny ryzyk klimatycznych oraz planowania infrastruktury (Wu, Lv, Qiao, Roth, Zhu, 2024; Zou, Song, Cervone, 2024). Kluczowe staje się więc zintegrowane planowanie przestrzenno-energetyczne, pozwalające łączyć politykę energetyczną z transportem, gospodarką wodną i urbanistyką, minimalizując w ten sposób konflikty lokalizacyjne (Stoeglehner, 2020).

1.1. Bezpieczeństwo energetyczne kraju

Bezpieczeństwo energetyczne już od dziesięcioleci uznawane jest za jeden z fundamentów stabilności politycznej i rozwoju gospodarczego państw. Jego znaczenie ujawnia się w sposób szczególny w okresach kryzysów surowcowych, gdy niedobory energii wpływają nie tylko na gospodarkę, ale też na funkcjonowanie społeczeństw (Smal, Wieprow, 2023). Początkowo termin ten rozumiano jako zdolność do zapewnienia stabilnych dostaw energii w wymaganej ilości i po akceptowalnej cenie (Cherp, Jewell, 2014). Współcześnie znaczenie bezpieczeństwa energetycznego zostało poszerzone i uwzględnia zarówno aspekty ekonomiczne, jak też środowiskowe czy technologiczne (Elkhatat, Al-Muhtaseb, 2024). Oznacza to, że stabilność dostaw energii rozpatrywana jest nie tylko w perspektywie fizycznej dostępności surowców, lecz również w kontekście odporności systemów energetycznych na zakłócenia, ich zdolności adaptacyjnych wobec dynamicznych zmian gospodarczych i zgodności z polityką klimatyczną (Sovacool, 2011). Rosnąca presja związana z koniecznością ograniczenia emisji gazów cieplarnianych sprawia, że bezpieczeństwo energetyczne nie może być już analizowane w oderwaniu od wyzwań środowiskowych (Aasa, Phoya Monko, Musonda, 2025).

W tym kontekście znaczenie odnawialnych źródeł energii systematycznie wzrasta, nadając im charakter kluczowego elementu strategii energetycznych. Energetyka oparta na paliwach kopalnych generuje poważne ryzyka geopolityczne, a zależność od importu ropy i gazu sprawia, że wiele państw pozostaje podatnych na kryzysy polityczne, konflikty zbrojne czy fluktuacje cen na rynkach światowych (Jasiūnas, Lund, Mikkola, 2021). Przykłady ostatnich dekad, w tym kryzys gazowy w Europie w latach 2021-2022, jednoznacznie pokazały, że dominacja surowców importowanych w miksie energetycznym może podważać stabilność gospodarki i bezpieczeństwo polityczne regionu (Azzuni, Breyer, 2018).

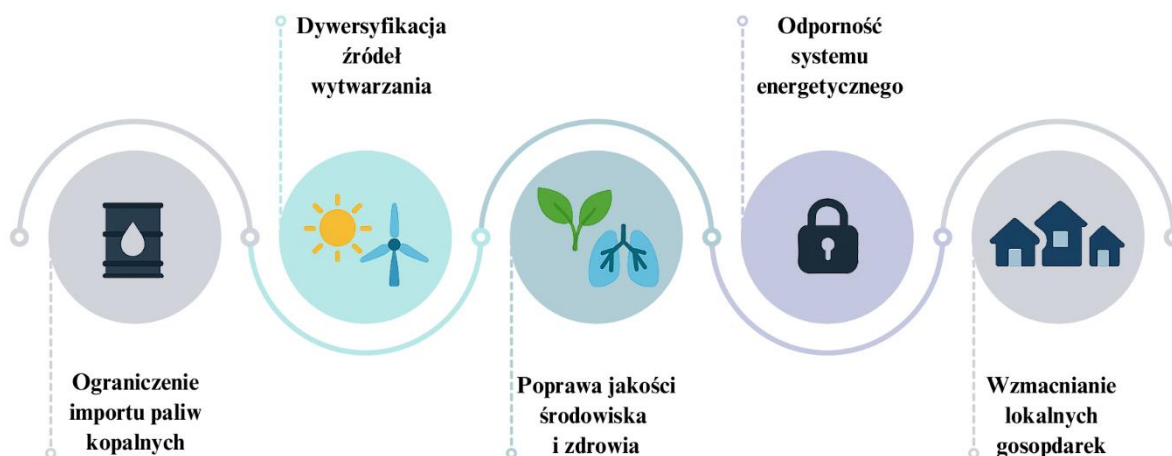
W odróżnieniu od paliw kopalnych, OZE charakteryzują się lokalną dostępnością i praktycznie niewyczerpalnym potencjałem. Energia słońca, wiatru, wody czy biomasy nie podlega monopolizacji w takim stopniu jak ropa czy gaz, a rozwój technologii sprawia, że ich stosowanie staje się coraz bardziej efektywne ekonomicznie. Z perspektywy bezpieczeństwa energetycznego szczególnie ważny jest rozproszony charakter instalacji OZE, co powoduje, że system energetyczny nie jest uzależniony od pracy pojedynczych, dużych elektrowni (Barros, Fajardo, Lara-Borrero, 2025).

Rozproszenie zmniejsza ryzyko poważnych awarii systemowych i czyni infrastrukturę bardziej odporną na zakłócenia naturalne (katastrofy klimatyczne) oraz wynikające z działalności człowieka (ataki cybernetyczne).

Istotne są także aspekty technologiczne i systemowe. Zmienność produkcji energii z OZE, silnie uzależniona od warunków pogodowych, stanowi wyzwanie dla stabilności sieci elektroenergetycznej, na co odpowiedzią jest rozwój różnorodnych technologii magazynowania energii, obejmujących elektrownie szczytowo-pompowe, baterie litowo-jonowe, magazyny wodorowe i ciepłne (Campana, Censi, Ruggieri, Amendola, 2025). Wspierają je inteligentne sieci, które pozwalają bilansować podaż i popyt oraz integrować liczne źródła rozproszone. Połączenie OZE z technologiami cyfrowymi oraz sztuczną inteligencją wzmacnia zdolność systemów do elastycznego reagowania i szybkiego odtwarzania funkcji po zakłóceniach (Tang, Zhu, Gu, Wang, 2024).

Niskie i stale obniżające się koszty technologii, przede wszystkim instalacji fotowoltaicznych i energetyki wiatrowej, sprawiają, że stają się one konkurencyjne wobec paliw kopalnych, nawet bez subsydiów (IRENA, 2023). Rozwój lokalnych instalacji wspiera niezależność regionów, tworzy miejsca pracy i zwiększa akceptację społeczną dla transformacji energetycznej. W wielu krajach gospodarstwa domowe i przedsiębiorstwa produkujące energię na własne potrzeby stają się integralną częścią systemu, co zmniejsza ryzyka związane z centralizacją wytwarzania.

Odnawialne źródła energii nie są więc jedynie elementem polityki klimatycznej, lecz strategicznym filarem bezpieczeństwa państw, łączącym aspekty techniczne, ekonomiczne, społeczne i środowiskowe w jeden spójny model odpornego systemu energetycznego, który został przedstawiony na rysunku 2.



Rysunek 2. Główne elementy bezpieczeństwa energetycznego.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Definitions and dimensions of energy security: A literature review”, A. Azzuni, C. Breyer, 2018, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 7(1), e268; „Evaluating energy security in the Asia Pacific: Toward a more comprehensive approach”, B.K. Sovacool, 2011, *Energy Policy*, 39(11), s. 7472-7479; „The concept of energy security: Beyond the four As”, A. Cherp, J. Jewell, 2014, *Energy Policy*, 75, s. 415-421; *Renewable Power Generation Costs in 2022*, International Renewable Energy Agency (IRENA), 2023, Abu Dhabi: IRENA.

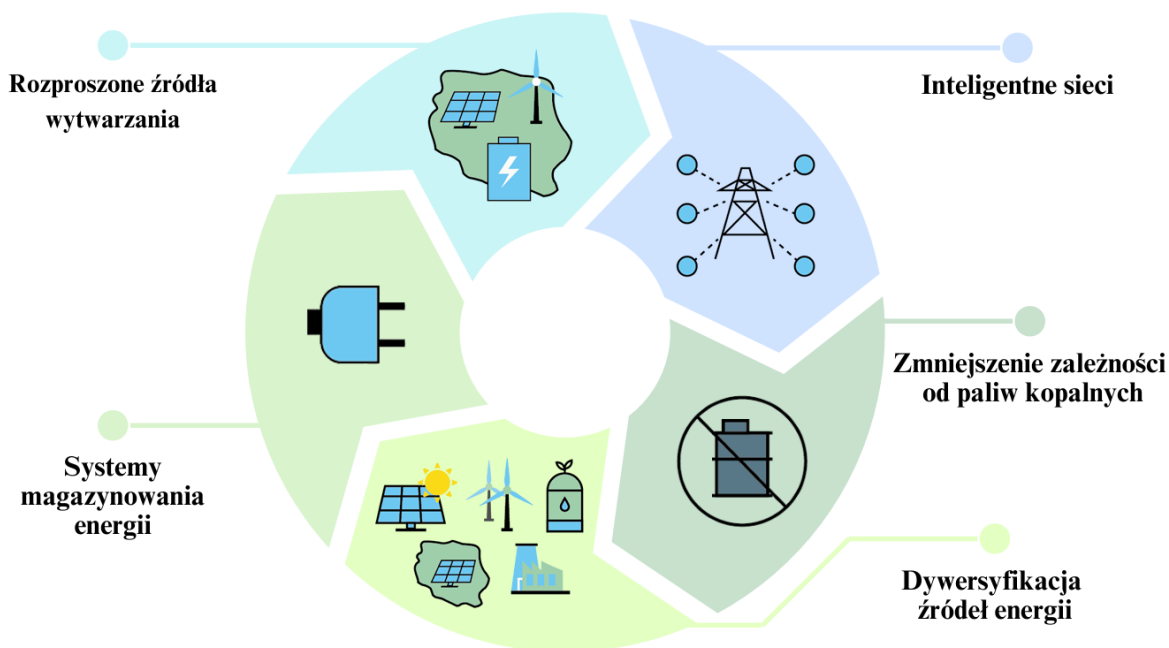
Ważnym aspektem jest także wymiar środowiskowy, gdyż wdrażanie OZE redukuje emisje gazów cieplarnianych i zanieczyszczeń powietrza, co bezpośrednio poprawia jakość życia społeczności oraz ogranicza koszty zdrowotne związane z energią opartą na paliwach kopalnych (Chen, Tee, Elnahass, Ahmed, 2023).

W takim ujęciu bezpieczeństwo energetyczne rozumiane jest nie tylko jako zapewnienie dostaw energii, ale też jako ochrona środowiska i zdrowia publicznego. Nowe technologie magazynowania energii, takie jak akumulatory ze złoża skalnego, pozwalają ograniczać zmienność OZE przy jednoczesnym zmniejszeniu presji środowiskowej (Malinowski i in., 2025).

1.1.1. Aspekt techniczny

Włączanie OZE do krajowych mikśw energetycznych staje się jednym z głównych kierunków rozwoju, wynikających z potrzeby ograniczenia emisji oraz zwiększenia bezpieczeństwa systemowego. Rozwój fotowoltaiki, energetyki wiatrowej, biogazu i małych elektrowni wodnych zmniejsza zależność od importu paliw kopalnych (Saha, Kowsar, Debnath, Ahmed, Alam, 2025). Oparcie energetyki na węglu, ropie czy gazie w warunkach napięć geopolitycznych prowadzi do niestabilnych dostaw oraz większej podatności na globalne wahania cen surowców (Leal Filho i in., 2022).

Jedną z głównych zalet instalacji odnawialnych jest ich rozproszony charakter (rysunek 3).



Rysunek 3. Wymiar techniczny bezpieczeństwa energetycznego.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Realising the potential of renewable energy as a tool for energy security in small island developing states”, W. Leal Filho, A.M. Azul, R. Pretorius, 2022, *Sustainability*, 14(9), s. 4965; „Air quality benefits of renewable energy: Evidence from China’s renewable energy heating policy”, A. Tang, X. Li, Y. Zhou, 2024, *Sustainability*, 16(21), s. 9268.

W przeciwieństwie do elektrowni konwencjonalnych o dużej mocy jednostkowej, instalacje z odnawialnych źródeł są rozmieszczone w wielu lokalizacjach, co obniża ryzyko wystąpienia systemowych przerw w dostawach w przypadku awarii pojedynczych jednostek (Iweh, Gyamfi, Tanyi, Effah-Donyina, 2021).

Rozproszenie zwiększa też odporność krajowych systemów energetycznych na zagrożenia o charakterze naturalnym (powódzie, wichury, upały) i antropogenicznym (cyberataki, sabotaż infrastruktury).

W efekcie wytwarzanie energii ze źródeł odnawialnych zwiększa odporność systemów elektroenergetycznych na zakłócenia zewnętrzne. Ważnym elementem wymiaru technicznego jest zdolność systemu do radzenia sobie ze zmiennością produkcji, charakterystyczną dla źródeł takich jak wiatr czy słońce. W tym kontekście szczególne znaczenie zyskują systemy magazynowania energii od bateryjnych magazynów krótkoterminowych, przez technologie sprężonego powietrza i magazyny ciepłne, aż po elektrownie szczytowo-pompowe (Ejuh Che, Roland Abeng, Iweh, Tsekouras, Fopah-Lele, 2025). Ich rozwój pozwala nie tylko na stabilizację systemu, ale także na zwiększanie elastyczności i bilansowanie podaży z popytem w czasie rzeczywistym (Tang, Zhu, Gu, Wang, 2024).

Równie ważnym elementem są inteligentne sieci elektroenergetyczne (smart grids). Umożliwiają one dynamiczne zarządzanie przepływem energii, włączanie do systemu wielu rozproszonych źródeł wytwórczych oraz elastyczne reagowanie na zmieniające się zapotrzebowanie (Gaska i in., 2020). Dzięki technologiom cyfrowym, takim jak Internet Rzeczy (IoT), sztuczna inteligencja czy systemy przewidywania, operatorzy mogą wcześniej rozpoznać wahania w produkcji energii z OZE, a odbiorcy mogą brać aktywny udział w zarządzaniu popytem (Aslam, Miah, Amin, Shah, Amjady, 2025).

Integracja odnawialnych źródeł energii z rozwiązaniami cyfrowymi i systemami magazynowania pozwala tworzyć inteligentne i trwałe systemy elektroenergetyczne, zdolne do pracy w warunkach rosnącej niepewności. Takie rozwiązania nie tylko podnoszą niezawodność dostaw, ale także ułatwiają osiąganie celów klimatycznych przez zwiększenie udziału niskoemisyjnych źródeł w miksie energetycznym (Mahmood i in., 2024).

W dłuższej perspektywie umożliwiają przejście od centralnych modeli energetyki ku modelom zdecentralizowanym i prosumenckim, które wzmacniają bezpieczeństwo techniczne i stabilność systemu (Tang, Zhu, Gu, Wang, 2024).

1.1.2. Aspekt ekonomiczny

Bezpieczeństwo energetyczne pozostaje w ścisłej relacji z kondycją gospodarczą państw i ich stabilnością makroekonomiczną. Wysokie uzależnienie od importu paliw kopalnych generuje poważne ryzyka gospodarcze, ponieważ wahania cen ropy, gazu czy węgla na rynkach światowych bezpośrednio przekładają się na koszty produkcji, inflację i bilans handlowy (Nashi, Ouakil, 2025). Kryzysy naftowe z lat 70. XX wieku oraz współczesne kryzysy na rynku gazu (w latach 2021-2022) pokazały, jak silnie ceny surowców energetycznych determinują sytuację gospodarczą całych regionów. W takich warunkach zwiększanie udziału odnawialnych źródeł energii staje się skutecznym mechanizmem ograniczania podatności gospodarki na wstrząsy zewnętrzne, gdyż OZE korzysta z na lokalnie dostępnych zasobach, takich jak wiatr, słońce, biomasa czy woda (Sompolska-Rzechuła, Bąk, Becker, Marjak, Perzyńska, 2024).

Z punktu widzenia ekonomii energetycznej rozwój odnawialnych źródeł energii prowadzi do zmniejszenia ryzyka importowego, jak też poprawy bilansu płatniczego państwa.

Każda jednostka energii wyprodukowana lokalnie pochodząca z OZE zastępuje energię wytworzoną z surowców importowanych, ograniczając wydatki na zagraniczne zakupy energii i zwiększając niezależność finansową gospodarki (Streimikiene, Siksnelyte-Butkiene, Lekavicius, 2023). Na poziomie mikroekonomicznym oznacza to również stabilizację kosztów energii dla odbiorców końcowych, ponieważ ceny wytwarzania energii ze źródeł słonecznych i wiatru są znacznie mniej podatne na gwałtowne wahania rynkowe niż ceny gazu czy ropy (Butt i in., 2025).

Rozwój sektora odnawialnych źródeł energii przyczynia się też do tworzenia nowych miejsc pracy i stymulowania innowacyjności technologicznej (Fabra, Gutiérrez, Lacuesta, Ramos, 2024). Według danych międzynarodowych, sektor zielonej gospodarki należy do najszybciej rozwijających się rynków pracy, obejmując nie tylko instalacje fotowoltaiczne i wiatrowe, lecz także przemysł związany z produkcją komponentów, usługi serwisowe i działalność badawczo-rozwojową (Tănasie i in., 2022). Dzięki temu odnawialne źródła energii sprzyjają dywersyfikacji gospodarki oraz uniezależnianiu jej od sektorów wysokoemisyjnych, co w długim okresie zwiększa odporność na globalne kryzysy surowcowe. W wymiarze regionalnym rozwój OZE wspiera lokalne rynki energii i przyczynia się do aktywizacji społeczności (Ma, Wang, 2025).

Wprowadzenie mechanizmów prosumenckich, spółdzielni energetycznych i klastrów energii umożliwia społecznościom lokalnym generowanie dochodów oraz obniżanie kosztów energii, co obrazuje rysunek 4, przedstawiający wpływ lokalnych zasobów OZE na tworzenie miejsc pracy oraz stabilność ekonomiczną.



Rysunek 4. Główne aspekty wymiaru ekonomicznego transformacji energetycznej bazującej na odnawialnych źródłach energii.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „The use of renewable energy sources and environmental degradation in EU countries”, A. Sompolska-Rzechuła, J. Krawiec, K. Mazur, 2024, *Sustainability*, 16(23), s. 10416; „Assessment of hydropower potential in the Upper Indus Basin: A geographic information system-based multi-criteria decision analysis for sustainable water resources in Pakistan”, A.Q. Butt, M.K. Shangguan, D. Waseem, M. Abbas, A. Banerjee, A.N. Yadav, 2025, *Resources*, 14(3), s. 49.

Transformacja energetyczna nabiera też wymiaru społeczno-ekonomicznego, prowadząc do decentralizacji władzy energetycznej i budowania odporności na poziomie lokalnym (Kostecka-Jurczyk, Struś, Marak, 2024).

W ujęciu makroekonomicznym inwestycje w odnawialne źródła energii sprzyjają stabilności długofalowego rozwoju gospodarczego. Kraje intensywnie rozwijające zieloną energetykę zmniejszają swą podatność na kryzysy energetyczne, a jednocześnie zyskują przewagę konkurencyjną w obszarze nowoczesnych technologii. W dłuższej perspektywie takie inwestycje przynoszą korzyści nie tylko w zakresie bezpieczeństwa dostaw oraz redukcji emisji, lecz także w postaci trwalszych podstaw wzrostu gospodarczego (Wen, He, Jing, Haroon, 2025).

1.1.3. Aspekt społeczny

Bezpieczeństwo energetyczne nie ogranicza się jedynie do wymiaru technicznego czy ekonomicznego, ale posiada też silny komponent społeczny. Energetyka oddziałuje na różne aspekty funkcjonowania społeczeństwa, obejmując obciążenia finansowe gospodarstw domowych związane z kosztami energii i konsekwencje jakości powietrza dla zdrowia publicznego oraz zakres uczestnictwa obywateli w procesach decyzyjnych dotyczących transformacji energetycznej (Awolesi, Salter, Reams, 2024).

W tym kontekście szczególnego znaczenia nabierają odnawialne źródła energii, które wnoszą wymierny wkład w poprawę jakości życia obywateli. Produkcja energii z wiatru, słońca czy biomasy przyczynia się do ograniczenia emisji zanieczyszczeń powietrza, co bezpośrednio przekłada się na redukcję chorób układu oddechowego i krążenia, a w efekcie na spadek kosztów zdrowotnych ponoszonych przez społeczeństwo i system ochrony zdrowia (Wei i in., 2024). W literaturze podkreśla się, że przejście na niskoemisyjne źródła energii stanowi nie tylko element polityki klimatycznej, ale też inwestycję w zdrowie publiczne i dobrostan społeczny (Kowalski i in., 2024).

Odnawialne źródła energii pełnią też istotną funkcję w obszarze sprawiedliwości energetycznej. W tradycyjnych, scentralizowanych systemach udział społeczeństwa był ograniczony, a korzyści ekonomiczne koncentrowały się głównie w dużych przedsiębiorstwach. Natomiast zdecentralizowana struktura OZE umożliwia lokalnym społecznościom aktywne uczestnictwo w systemie energetycznym i czerpanie z niego bezpośrednich korzyści (Taiwo, Tozer, 2025).

W skali globalnej rozproszone technologie energetyczne, takie jak małe systemy fotowoltaiczne czy mikroelektrownie wodne, odgrywają istotną rolę w zwiększaniu dostępu do energii w krajach rozwijających się. W wielu regionach Afryki i Azji brak centralnej sieci elektroenergetycznej stanowił dotąd jedną z kluczowych barier rozwoju społeczno-gospodarczego (Santos, Vaz Ferreira, Lanzinha, 2023; Mamat, Erdiwansyah, Rosdi, 2025). Rozwój tanich, modułowych rozwiązań OZE umożliwia elektryfikację obszarów wiejskich, poprawiając warunki życia, dostęp do edukacji, usług medycznych i bezpieczeństwa socjalnego (Temesgen, Bekele, 2025). Tym samym odnawialne źródła energii stają się nie tylko narzędziem transformacji energetycznej, ale także instrumentem walki z ubóstwem i nierównościami.

Istotny jest też aspekt edukacyjny i kulturowy transformacji energetycznej. Rozwój rozwiązań prosumenckich i wspólnotowych sprzyja popularyzacji wiedzy o efektywności energetycznej, kształtowaniu postaw proekologicznych i wzmacnianiu świadomości obywatelskiej.

Dzięki temu rośnie społeczna akceptacja dla zmian, bez której nawet najlepiej zaprojektowane strategie mogą napotkać trudności we wdrażaniu (Rozkwitalska, 2021).

Społeczny wymiar bezpieczeństwa energetycznego obejmuje zagadnienia związane z równością w dostępie do energii. Transformacja oparta na odnawialnych źródłach, prowadzona w sposób zapewniający szeroki udział społeczny, może przyczyniać się do zmniejszania nierówności między regionami, grupami społecznymi i państwami. Bez odpowiednich działań politycznych istnieje jednak ryzyko, że z rozwoju energetyki prosumenckiej będą korzystać głównie gospodarstwa o wyższym statusie ekonomicznym, co mogłoby pogłębiać dysproporcje. Dlatego kluczowe znaczenie ma tworzenie mechanizmów wsparcia i instrumentów finansowych, które umożliwią szeroki i równy udział społeczeństwa w korzyściach wynikających z rozwoju OZE (Volodzkiene, Streimikiene, 2024). Zależności te zilustrowano na rysunku 5.

Odnawialne źródła energii – dzięki swoim cechom technologicznym oraz organizacyjnym – odgrywają centralną rolę w każdym z tych obszarów, czyniąc bezpieczeństwo energetyczne nie tylko kwestią infrastrukturalną, ale także elementem spójności społecznej i jakości życia obywateli.



Rysunek 5. Elementy społecznego wymiaru bezpieczeństwa energetycznego.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Conversion of sewage sludge into biofuels via different pathways and their use in agriculture: A comprehensive review”, Z. Kowalski, A. Makara, J. Kulczycka, A. Generowicz, P. Kwaśnicki, J. Ciuła, A. Gronba-Chyła, 2024, *Energies*, 17(6), s. 1383; „GIS-based assessment of economically feasible off-grid mini-grids in Ethiopia”, A.L. Temesgen, G. Bekele, 2025, *Discover Energy*, 5(1), s. 12.

1.1.4. Aspekt środowiskowy i polityczny

Rola OZE w kształtowaniu bezpieczeństwa energetycznego obejmuje nie tylko aspekty techniczne i ekonomiczne, ale także wymiar środowiskowy i polityczny. Oba te obszary są ze sobą ściśle powiązane, ponieważ stabilność energetyczna państw coraz częściej zależy od zdolności do prowadzenia polityki zgodnej z zasadami zrównoważonego rozwoju i wymogami ochrony klimatu.

Produkcja energii z paliw kopalnych stanowi jedno z głównych źródeł emisji gazów cieplarnianych i zanieczyszczeń powietrza. Rozwój OZE pozwala ograniczać emisję CO₂ i innych substancji szkodliwych (SO₂, NO_x, pyłów zawieszonych), co bezpośrednio przekłada się na poprawę jakości środowiska i zdrowia publicznego.

Tym samym bezpieczeństwo energetyczne zaczyna być postrzegane także jako bezpieczeństwo ekologiczne oraz zdrowotne, czyli zdolność państwa do zapewnienia obywatelom warunków życia wolnych od zagrożeń wynikających z degradacji środowiska (Bąk, Wawrzyniak, Oesterreich, 2024).

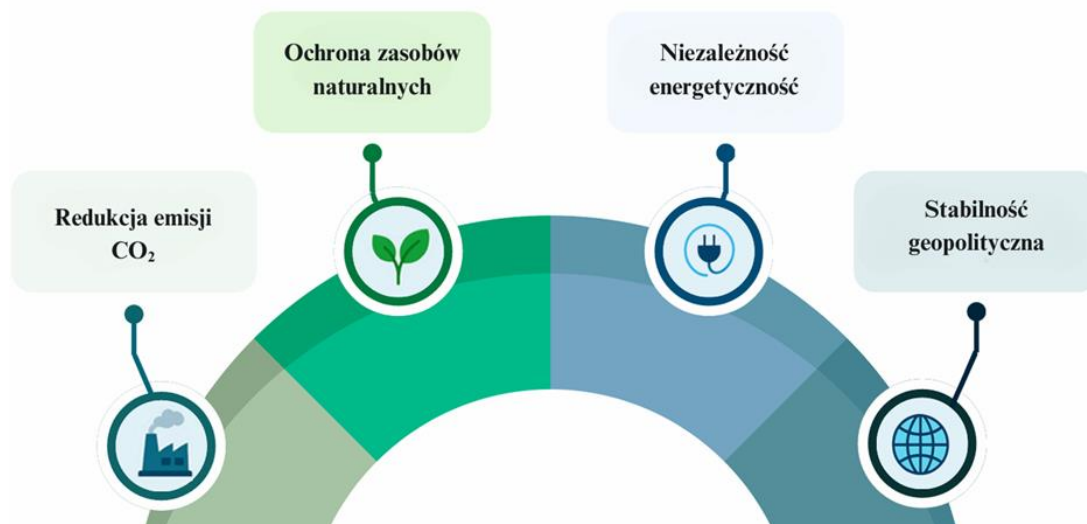
Odnawialne źródła energii odgrywają również istotną rolę w ochronie zasobów naturalnych. W przeciwieństwie do energetyki konwencjonalnej nie wymagają intensywnej eksploatacji surowców nieodnawialnych, a ich ślad wodny i materiałowy jest znacząco mniejszy. Ponadto rozwój technologii OZE wspiera realizację globalnych celów klimatycznych, takich jak osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 roku w Unii Europejskiej czy cele Agendy 2030 ONZ dotyczące zrównoważonej energii (cel 7). W konsekwencji inwestycje w OZE stają się narzędziem zarówno ochrony środowiska, jak też wzmacniania międzynarodowego wizerunku państw, które są postrzegane jako odpowiedzialne i proekologiczne (https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_pl).

W kontekście politycznym odnawialne źródła energii wzmacniają niezależność państw. Mniejsze uzależnienie od importu ropy i gazu pozwala ograniczać ryzyka geopolityczne oraz unikać presji zewnętrznej. Dywersyfikacja źródeł energii zwiększa elastyczność polityki zagranicznej, a państwa rozwijające OZE zyskują większą suwerenność w decyzjach gospodarczych i międzynarodowych (Ronoh, 2025).

Na arenie międzynarodowej transformacja energetyczna oparta na odnawialnych źródłach energii staje się istotnym elementem kształtowania pozycji negocjacyjnej państw. Kraje o wysokim udziale zielonej energii mogą odgrywać bardziej aktywną rolę w globalnych negocjacjach klimatycznych i ograniczać ryzyka związane z niestabilnością rynków surowcowych. W tym kontekście bezpieczeństwo energetyczne nabiera wymiaru strategicznego, stanowiąc fundament stabilności politycznej, bezpieczeństwa narodowego i długoterminowej przewagi konkurencyjnej w gospodarce światowej (Griffiths, 2019).

Transformacja energetyczna wpisuje się również w logikę geopolityki energii XXI wieku. W miarę jak znaczenie ropy i gazu maleje, a rośnie rola energii elektrycznej oraz technologii niskoemisyjnych (OZE, wodór, magazyny energii), zmieniają się układy sił w relacjach międzynarodowych. Państwa inwestujące w innowacyjne technologie stają się liderami nowego porządku energetycznego, a bezpieczeństwo energetyczne łączy się z przewagą technologiczną i gospodarczą (Wang, Wang, Li, 2024).

Wymiar środowiskowy i polityczny bezpieczeństwa energetycznego wskazuje, że transformacja w stronę OZE nie jest jedynie koniecznością klimatyczną, ale także warunkiem trwałej stabilności systemów politycznych i gospodarczych. OZE pozwalają jednocześnie redukować emisje i chronić środowisko, wzmacniać zdrowie publiczne, budować niezależność energetyczną oraz zwiększać suwerenność państw w relacjach międzynarodowych. Najważniejsze zależności zestawiono na rysunku 6, który ukazuje główne elementy środowiskowego oraz politycznego wymiaru bezpieczeństwa energetycznego (European Commission, 2025). W literaturze podkreśla się również rolę nowoczesnych metod kształtowania krajobrazu w procesie wdrażania inwestycji energetycznych (Kwoczyńska, Litwin, Piech, 2022).



Rysunek 6. Główne elementy środowiskowego i politycznego wymiaru bezpieczeństwa energetycznego.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Assessment of impact of use of renewable energy sources on level of energy poverty in EU countries”, I. Bąk, K. Wawrzyniak, M. Oesterreich, 2024, *Energies*, 17(24), s. 6241; „Application of GIS in Sub-National Energy Planning in Kenya – Integrating Primary Data Into a Least-Cost Electrification Model Using OnSSET (Case Study of Narok County, Kenya)”, D. Ronoh, 2025, *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 13(1), s. 1130549.

1.2. Polityka energetyczno-klimatyczna Unii Europejskiej

Polityka energetyczno-klimatyczna UE opiera się na trzech wzajemnie uzupełniających się filarach: regulacjach prawnych, instrumentach finansowych oraz innowacjach technologicznych i organizacyjnych. Ich spójne wdrażanie sprawia, że transformacja energetyczna w państwach członkowskich ma charakter nie tylko środowiskowy, ale również gospodarczy i społeczny (OECD, 2007).

Pierwszym z filarów są regulacje prawne, które stanowią podstawę ram transformacji. Należą do nich: dyrektywa w sprawie odnawialnych źródeł energii – *Renewable Energy Directive II* (RED II) (European Parliament, Council, 2018), rozporządzenie o neutralności klimatycznej – *European Climate Law* (European Parliament, Council, 2021) czy pakiet *Fit for 55*, zakładający redukcję emisji o co najmniej 55% do roku 2030 (European Commission, 2021). Tworzą one ramy prawne i zapewniają harmonizację działań państw członkowskich w kierunku dekarbonizacji.

Drugim elementem są instrumenty finansowe, wspierające praktyczną realizację transformacji. Fundusz Modernizacyjny i Fundusz Spójności pozwalają finansować modernizację infrastruktury i wsparcie regionów węglowych, mechanizm *Just Transition* wspiera społecznie sprawiedliwą transformację (European Commission, 2020), zaś program *Horizon Europe* finansuje innowacje w obszarze energii i klimatu (Horizon Europe, 2021). Dzięki temu polityka klimatyczna UE nie ogranicza się do regulacji, lecz obejmuje także realne narzędzia finansowania transformacji (European Court of Auditors, 2023). Trzecim obszarem są innowacje technologiczne i organizacyjne, takie jak inteligentne sieci elektroenergetyczne, magazynowanie energii, technologie wodorowe i rozwiązania prosumenckie.

Programy badawczo-rozwojowe i partnerstwa publiczno-prywatne wspierają rozwój tych technologii, zwiększając elastyczność systemów oraz wzmacniając bezpieczeństwo energetyczne (European Environment Agency, 2023).

Całość wpisuje się w szerszą strategię integracji polityki energetycznej UE, której fundamentem jest *Europejski Zielony Ład* (European Commission, 2019) i plan *REPowerEU* (European Commission, 2022). Celem tych działań jest nie tylko ograniczenie emisji i uniezależnienie się UE od importu paliw kopalnych, ale także budowanie solidarności energetycznej oraz wzmocnienie pozycji negocjacyjnej UE na arenie międzynarodowej. Polityka energetyczna i cele UE w tym zakresie zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1

Cele, instrumenty i znaczenie polityk Unii Europejskiej w kontekście transformacji energetycznej

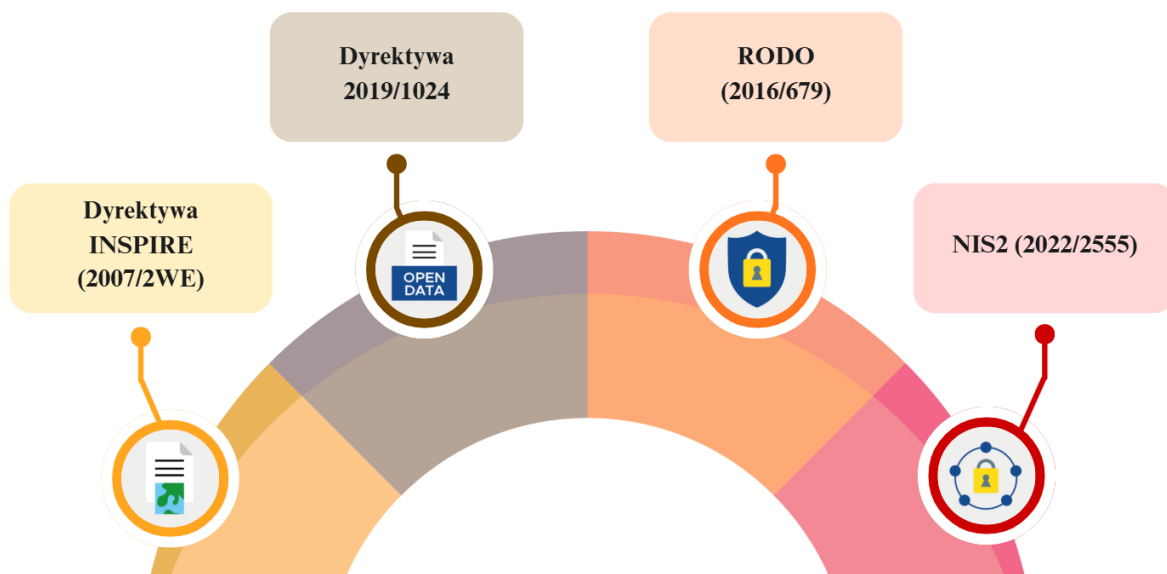
Obszar polityki UE	Cele i założenia	Instrumenty i narzędzia	Znaczenie dla transformacji energetycznej
Regulacje prawne	Redukcja emisji gazów cieplarnianych, zwiększenie udziału OZE, poprawa efektywności energetycznej	Dyrektywy i rozporządzenia UE (np. <i>Fit for 55</i> , <i>EU ETS</i>)	Tworzą spójne ramy prawne, wymuszają dekarbonizację i modernizację systemów
Instrumenty ekonomiczne i finansowe	Wsparcie dla inwestycji w zieloną energię i innowacje technologiczne	Fundusz Modernizacyjny, Fundusz Spójności, środki z polityki rolnej, program <i>Horizon Europe</i>	Zapewniają finansowanie transformacji, zmniejszają ryzyko inwestycyjne, wspierają regiony węglowe
Innowacje organizacyjne i technologiczne	Rozwój inteligentnych sieci, magazynów energii, technologii wodorowych	Programy badawczo-rozwojowe, partnerstwa publiczno-prywatne, wsparcie dla startupów	Zwiększają elastyczność systemów, wspierają nowe modele biznesowe i energetykę obywatelską
Polityka integracyjna UE	Wspólne cele klimatyczne do 2030 i 2050 roku, wzmocnienie jednolitego rynku energii	Europejski Zielony Ład, pakiet <i>REPowerEU</i>	Wzmacniają solidarność energetyczną i wspólną pozycję negocjacyjną UE na arenie międzynarodowej

Źródło: opracowanie własne na podstawie *The European Green Deal*, European Commission, 2019, COM(2019) 640 final, Brussels: European Commission; *The Just Transition Mechanism – for a fair transition*, European Commission, 2020, Brussels: European Commission; *'Fit for 55': Delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality*, European Commission, 2021, COM(2021) 550 final, Brussels: European Commission; *REPowerEU Plan*, European Commission, 2022, COM(2022) 230 final, Brussels: European Commission; *EU support for energy transition: Time to step up action*, European Court of Auditors, 2023, Luxembourg: Publications Office of the European Union; *Trends and projections in Europe 2023*, European Environment Agency, 2023, Copenhagen: EEA; *Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources (RED II)*, European Parliament and the Council, 2018, *Official Journal of the European Union*, L 328, 82-209; *Regulation (EU) 2021/1119 establishing the framework for achieving climate neutrality (European Climate Law)*, European Parliament and the Council, 2021, *Official Journal of the European Union*, L 243, 1-17; *EU Research and Innovation Programme (Horizon Europe 2021)*, European Commission, 2021-2027, Brussels: European Commission; *Instrument mixes for environmental policy*, OECD, 2007, Paris: OECD Publishing.

1.2.1. Ramy regulacyjne i dyrektywy

Fundamentem polityki unijnej jest system dyrektyw i rozporządzeń, które wyznaczają ramy prawne dla działań państw członkowskich. Przykładem jest dyrektywa INSPIRE (2007/2/WE), która zobowiązała kraje UE do budowy infrastruktury informacji przestrzennej, niezbędnej m.in. dla monitorowania środowiska oraz planowania energetycznego (Dyrektywa 2007/2/WE). Dostępność oraz interoperacyjność danych przestrzennych wspierają podejmowanie decyzji w zakresie lokalizacji inwestycji w OZE, zarządzania sieciami czy oceny ryzyk środowiskowych.

Kolejne regulacje odnoszą się do szerszego obszaru zarządzania danymi. Dyrektywa 2019/1024 w sprawie otwartych danych i ponownego wykorzystywania informacji sektora publicznego ustanowiła ramy dla udostępniania danych, które mogą wspierać rozwój innowacyjnych usług energetycznych i cyfryzację sektora energii. Warto podkreślić, że unijna polityka danych łączy kwestie energetyczne z ogólnym ekosystemem cyfrowym, czego przykładem są regulacje dotyczące ochrony danych osobowych (Rozporządzenie (UE) 2016/679 – RODO) oraz cyberbezpieczeństwa (Dyrektywa NIS2 UE– 2022/2555). Ochrona danych i bezpieczeństwo systemów cyfrowych są warunkiem integracji inteligentnych sieci energetycznych oraz rozwoju prosumpcji. Zestawienie kluczowych regulacji unijnych dotyczących danych przestrzennych i cyfryzacji przedstawiono na rysunku 7, który ukazuje powiązania między dyrektywami INSPIRE, 2019/1024, RODO oraz NIS2.



Rysunek 7. Polityka unijna i dane przestrzenne – kluczowe regulacje.

Źródło: opracowanie własne na podstawie Dyrektywa 2007/2/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 14 marca 2007 r. ustanawiająca infrastrukturę informacji przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej, (INSPIRE), 2007, Dziennik Urzędowy UE; Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1024 z dnia 20 czerwca 2019 r. w sprawie otwartych danych i ponownego wykorzystywania informacji sektora publicznego, 2019, Dziennik Urzędowy UE; Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2022/2555 z dnia 14 grudnia 2022 r. w sprawie środków na rzecz wysokiego wspólnego poziomu cyberbezpieczeństwa w całej Unii (NIS2), 2022, Dziennik Urzędowy UE.

1.2.2. Cele klimatyczne i zrównoważony rozwój

Polityka Unii Europejskiej w zakresie energii i klimatu jest ściśle powiązana z długofalowymi celami zrównoważonego rozwoju, stanowiąc jeden z głównych filarów transformacji społeczno-gospodarczej wspólnoty. Od momentu przyjęcia Agendy 2030 ONZ i Porozumienia Paryskiego, UE konsekwentnie buduje ramy prawne i instytucjonalne, które mają umożliwić osiągnięcie neutralności klimatycznej oraz ograniczenie globalnego ocieplenia do poziomu poniżej 2°C, a najlepiej do 1,5°C względem epoki przedindustrialnej.

Strategia Europejskiego Zielonego Ładu, zaprezentowana w 2019 roku, wyznacza ścieżkę dojścia do neutralności klimatycznej w 2050 roku. Dokument ten podkreśla, że transformacja energetyczna nie może być traktowana wyłącznie jako proces techniczny, ale musi stanowić zintegrowane działanie łączące aspekty gospodarcze, środowiskowe i społeczne. W ramach Zielonego Ładu przewidziano także cele pośrednie – redukcję emisji gazów cieplarnianych o co najmniej 55% do 2030 roku w stosunku do poziomu z 1990 roku (European Commission, 2019). Cel ten został formalnie zapisany w Europejskim Prawie Klimatycznym i uszczegółowiony w pakiecie legislacyjnym „Fit for 55”, obejmującym m.in. reformę systemu handlu emisjami (EU ETS), zaostrzenie norm emisyjnych dla transportu oraz zwiększenie udziału energii odnawialnej w miksie energetycznym.

W tym kontekście odnawialne źródła energii są wskazywane jako podstawowy instrument realizacji celów klimatycznych. Rozwój energetyki słonecznej i wiatrowej, biogazu czy technologii wodorowych ma umożliwić stopniowe odchodzenie od paliw kopalnych, zmniejszenie zależności od importu surowców oraz redukcję emisji w sektorach najbardziej emisyjnych, takich jak energetyka, transport i przemysł ciężki. Ponadto produkcja energii z OZE jest ściśle powiązana z innymi celami zrównoważonego rozwoju, w tym z poprawą jakości powietrza i zdrowia publicznego, tworzeniem nowych miejsc pracy oraz wspieraniem innowacyjności technologicznej (Peng i in., 2023).

Cele klimatyczne UE nie są jednak rozpatrywane w izolacji, lecz w szerszym kontekście globalnym. Unia Europejska przedstawia się jako lider działań na rzecz klimatu, starając się nie tylko redukować własne emisje, ale też wyznaczać standardy regulacyjne i finansowe dla partnerów handlowych. W praktyce oznacza to m.in. wprowadzenie mechanizmów takich jak *Carbon Border Adjustment Mechanism* (CBAM), które mają przeciwdziałać „ucieczce emisji” i motywować państwa rozwijające się do podnoszenia ambicji klimatycznych.

Podsumowując, cele klimatyczne i polityka zrównoważonego rozwoju UE są ściśle powiązane. Neutralność klimatyczna do 2050 roku i redukcja emisji o 55% do 2030 roku, to nie tylko kamienie milowe transformacji energetycznej, ale też fundament budowy nowego modelu społeczno-gospodarczego, zbudowanego na zasadach sprawiedliwości społecznej, innowacyjności i ochrony środowiska. W tym działaniu OZE pozostają kluczowym elementem wypełniania zobowiązań międzynarodowych i realizacji Agendy 2030 (Tourais, Videira, 2016).

1.2.3. Programy finansowania transformacji energetycznej

Istotnym elementem polityki Unii Europejskiej jest finansowanie transformacji energetycznej poprzez system różnorodnych programów i funduszy wspólnotowych. Odgrywają one główną rolę w realizacji celów klimatycznych, redukcji emisji gazów cieplarnianych oraz wspieraniu rozwoju gospodarczego zbudowanego na innowacjach oraz zrównoważonym rozwoju. Środki finansowe są kierowane zarówno na rozwój infrastruktury technicznej, jak i na innowacje technologiczne, badania naukowe oraz działania społeczne i lokalne związane z transformacją energetyczną.

Fundusz Spójności oraz Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego (EFRR) stanowią podstawowe instrumenty wspierania inwestycji infrastrukturalnych. Finansują projekty związane z rozwojem odnawialnych źródeł energii (np. farmy wiatrowe, instalacje fotowoltaiczne), poprawą efektywności energetycznej w budownictwie oraz przemyśle, a także modernizacją sieci elektroenergetycznych. Ich rolą jest wyrównywanie poziomów rozwoju gospodarczego oraz technologicznego pomiędzy państwami członkowskimi, dzięki czemu transformacja nie pogłębia różnic regionalnych, lecz sprzyja spójności społeczno-ekonomicznej.

Na innowacje technologiczne i badania naukowe ukierunkowany jest program Horyzont Europa jako największy program badawczo-rozwojowy UE. Jego priorytety obejmują rozwój nowych technologii energetycznych, takich jak wodór, technologie magazynowania energii, inteligentne sieci czy cyfryzacja procesów energetycznych. Dzięki wsparciu projektów pilotażowych i badań stosowanych, program umożliwia tworzenie przełomowych rozwiązań wspierających dekarbonizację gospodarki oraz wzmacniających konkurencyjność przemysłu europejskiego.

Szczególne znaczenie mają też instrumenty skierowane do państw o wysokim udziale paliw kopalnych, w tym do Polski. Fundusz Modernizacyjny koncentruje się na wspieraniu modernizacji sektora energetycznego poprzez finansowanie inwestycji w infrastrukturę niskoemisyjną i technologie przyjazne środowisku.

Z kolei Fundusz Innowacyjny wspiera wdrażanie technologii przełomowych w sektorach trudnych do dekarbonizacji, takich jak przemysł stalowy, cementowy czy chemiczny. Oba instrumenty odgrywają ważną rolę w sprawiedliwej transformacji, umożliwiając stopniowe odchodzenie od węgla przy jednoczesnym wspieraniu konkurencyjności gospodarczej oraz ochronie zatrudnienia (Ociepa-Kubicka, Deska, Ociepa, 2021).

Programy finansowania transformacji w Unii Europejskiej, przedstawione w tabeli 2, stanowią nie tylko instrument gospodarczy, lecz także odgrywają istotną rolę strategiczną. Łączą cele klimatyczne z rozwojem innowacji, wspierają lokalne społeczności i redukują różnice regionalne. Dzięki nim transformacja energetyczna staje się procesem wielowymiarowym, obejmującym technologię, gospodarkę oraz społeczeństwo, a UE zyskuje narzędzie do realizacji swojej wizji neutralności klimatycznej do 2050 roku.

Tabela 2

Programy finansowania transformacji energetycznej w Unii Europejskiej i ich rola w modernizacji sektora energetycznego

Program	Zakres wsparcia	Cel główny	Znaczenie dla transformacji energetycznej
Fundusz Spójności	Projekty infrastrukturalne, w tym rozwój OZE i efektywności energetycznej	Wyrównywanie poziomu rozwoju gospodarczego między regionami	Finansowanie dużych projektów energetycznych, modernizacja sieci
Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego (EFRR)	Inwestycje w odnawialne źródła energii, budownictwo energooszczędne, sieci lokalne	Rozwój regionalny i spójność społeczno-gospodarcza	Wsparcie lokalnych i regionalnych projektów OZE
Horyzont Europa	Badania, innowacje, projekty pilotażowe w zakresie nowych technologii energetycznych	Wzmacnianie konkurencyjności UE poprzez innowacje	Rozwój technologii wodorowych, magazynów energii, inteligentnych sieci
Fundusz Modernizacyjny	Transformacja w państwach o wysokim udziale paliw kopalnych	Modernizacja sektora energetycznego i redukcja emisji	Finansowanie inwestycji w niskoemisyjną infrastrukturę, kluczowy dla Polski
Fundusz Innowacyjny	Technologie niskoemisyjne w sektorach trudnych do dekarbonizacji	Ograniczanie emisji w przemyśle energochłonnym	Wsparcie przełomowych projektów (stal, cement, chemia)
Mechanizmy wsparcia lokalnego (np. spółdzielnie, klastry)	Finansowanie społeczności lokalnych i prosumentów	Aktywizacja społeczna, decentralizacja systemu	Tworzenie lokalnych rynków energii, wzrost odporności społeczno-gospodarczej

Źródło: opracowanie własne na podstawie „The efficiency of EU funding mechanisms in renewable energy transition”, P. Kafel, P. Nowicki, 2023, *Sustainability*, 15(1), s. 496; „EU funds and the energy transition in Central Europe”, A. Ociepa-Kubicka, A. Czaplicka-Kotas, J. Łuszczek, 2021, *Energies*, 14(16), s. 4870.

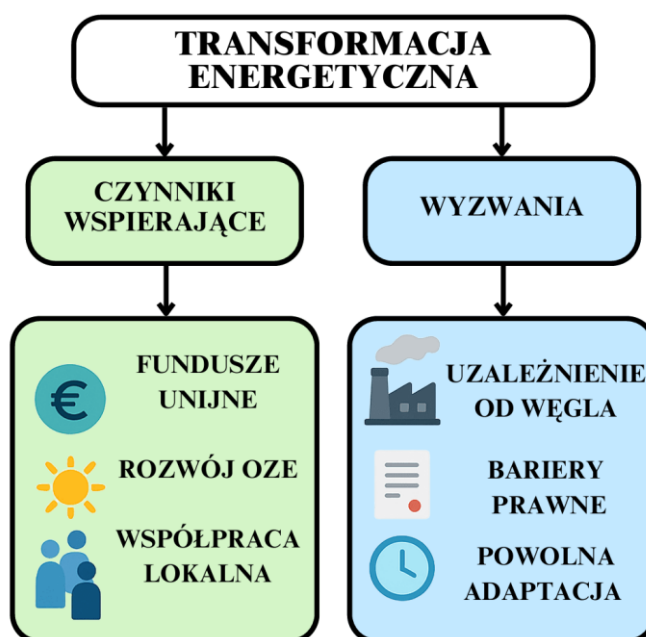
W literaturze podkreśla się, że skuteczność polityki unijnej zależy nie tylko od dostępności środków finansowych, ale także od właściwego miksu instrumentów prawnych, ekonomicznych i społecznych. Programy finansowe, jeśli są zintegrowane z regulacjami prawnymi i mechanizmami wsparcia lokalnych społeczności, mogą przyspieszać procedury inwestycyjne i minimalizować ryzyka związane z transformacją. Jednocześnie skuteczność funduszy zależy od odpowiedniej koordynacji instytucjonalnej, przejrzystości mechanizmów oraz jasnych kryteriów podziału środków, co stanowi warunek budowania zaufania społecznego do transformacji (Kafel, Nowicki, 2023).

1.2.4. Polityki transformacji energetycznej w krajach Unii Europejskiej

Badania wskazują, że implementacja polityki Unii Europejskiej w zakresie energii i środowiska przebiega w sposób zróżnicowany, co wynika z odmiennych uwarunkowań gospodarczych, politycznych oraz instytucjonalnych poszczególnych państw członkowskich.

O ile cele zapisane w dokumentach strategicznych UE są wspólne, to ich realizacja w praktyce wymaga dostosowania do lokalnych warunków zarówno technologicznych, jak i społeczno-ekonomicznych (Nowak, Monteiro, Olcina-Cantos, Vagiona, 2023).

W państwach Europy Północnej i Zachodniej transformacja energetyczna postępuje szybciej dzięki lepiej rozwiniętym rynkom finansowym, większym inwestycjom w badania i rozwój oraz wyższemu poziomowi społecznej akceptacji dla energetyki odnawialnej. Z kolei w Europie Środkowo-Wschodniej, w tym w Polsce, transformacja napotyka na bariery wynikające z historycznego uzależnienia od paliw kopalnych oraz złożonych uwarunkowań strukturalnych. Najważniejsze czynniki wspierające oraz wyzwania we wdrażaniu polityki unijnej w państwach członkowskich zilustrowano na rysunku 8.



Rysunek 8. Czynniki wspierające i wyzwania we wdrażaniu polityki UE.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Spatial planning response to the challenges of climate change adaptation: An analysis of selected instruments and good practices in Europe”, M.J. Nowak, R. Monteiro, J. Olcina-Cantos, D.G. Vagiona, 2023, *Sustainability*, 15(13), s. 10431.

W Polsce wyzwaniem pozostaje utrzymująca się dominacja węgla w miksie energetycznym. Wysoki udział tego surowca wpływa na tempo odchodzenia od konwencjonalnych źródeł energii, generując bariery technologiczne i społeczne, a co za tym idzie – obawy o miejsca pracy w regionach górniczych. Jednocześnie obserwuje się jednak rosnące znaczenie mechanizmów unijnych w finansowaniu transformacji, takich jak Fundusz Modernizacyjny, Fundusz Spójności czy Krajowy Plan Odbudowy, które stają się niezbędnym wsparciem dla rozwoju OZE i modernizacji infrastruktury (Konieczna, 2009).

Integracja polityk energetycznych UE z lokalnymi strategiami rozwoju wymaga dostosowania do specyfiki krajowej gospodarki i systemu społecznego, w tym struktury zatrudnienia, dostępności technologii, kapitału i akceptacji społecznej. W Polsce rozwój energetyki wiatrowej został ograniczony przez regulacje prawne, pomimo dużego potencjału, w sposób szczególny w obszarze offshore.

Badania podkreślają też znaczenie instytucji i kultury administracyjnej, gdyż państwa z silnym samorządem lokalnym skuteczniej łączą cele klimatyczne z rozwojem dzięki większej elastyczności oraz partycypacji obywateli. W Polsce, gdzie procesy decyzyjne są w dużej mierze scentralizowane, adaptacja polityki unijnej wymaga dodatkowych mechanizmów koordynacyjnych i większego zaangażowania jednostek samorządu terytorialnego (Nowak, Monteiro, Olcina-Cantos, Vagiona, 2023).

1.3. Uwarunkowania transformacji energetycznej w Polsce

Transformacja energetyczna w Polsce przebiega w warunkach szczególnych, determinowanych przez historyczne uzależnienie od węgla, regulacje prawne i rosnące znaczenie polityk unijnych. Analizy wskazują, że Polska dysponuje znacznym potencjałem rozwoju energetyki odnawialnej, ale tempo transformacji uzależnione jest od uwarunkowań regulacyjnych i finansowych (Juszczak, Maj, 2020).

Krajowy miks energetyczny, w którym wciąż dominują paliwa kopalne, podlega systematycznym zmianom ukierunkowanym na stopniowe zwiększanie udziału odnawialnych źródeł energii. Proces ten jest jednak złożony i zależny od uwarunkowań prawnych, czynników społeczno-gospodarczych i przestrzennych, co zostało ukazane w tabeli 3.

Tabela 3

Trendy i uwarunkowania transformacji energetycznej w Polsce

Trendy i uwarunkowania	Opis
Struktura miksu energetycznego	Węgiel nadal odpowiada za ponad 60% produkcji energii. Najszybciej rozwija się PV, która w 2023 roku miała ponad 14 GW. Energetyka wiatrowa ograniczana zasadą 10H, ale rozwój offshore na Bałtyku daje nowe perspektywy. Biogaz i biomasa wspierają gospodarkę obiegu zamkniętego. Hydroenergetyka ma ograniczony potencjał, ale małe elektrownie wodne stabilizują system.
Rola OZE w polityce klimatyczno-energetycznej	OZE umożliwiają realizację celów UE i modernizację gospodarki. Wspierają innowacje, cyfrowe systemy monitorowania, GIS w planowaniu inwestycji, a także rozwój energetyki prosumenckiej. Prognozy wskazują na większe znaczenie magazynów energii, technologii hybrydowych i integracji sieci.
Wyzwania i perspektywy	Główne bariery: dominacja węgla, ograniczenia prawne dla wiatru, przepustowość sieci, finansowanie inwestycji. Szanse: wsparcie z Funduszu Modernizacyjnego i KPO, cyfryzacja procesów planistycznych oraz lepsze wykorzystanie danych przestrzennych. Kluczowe będzie pogodzenie polityki krajowej z celami UE.

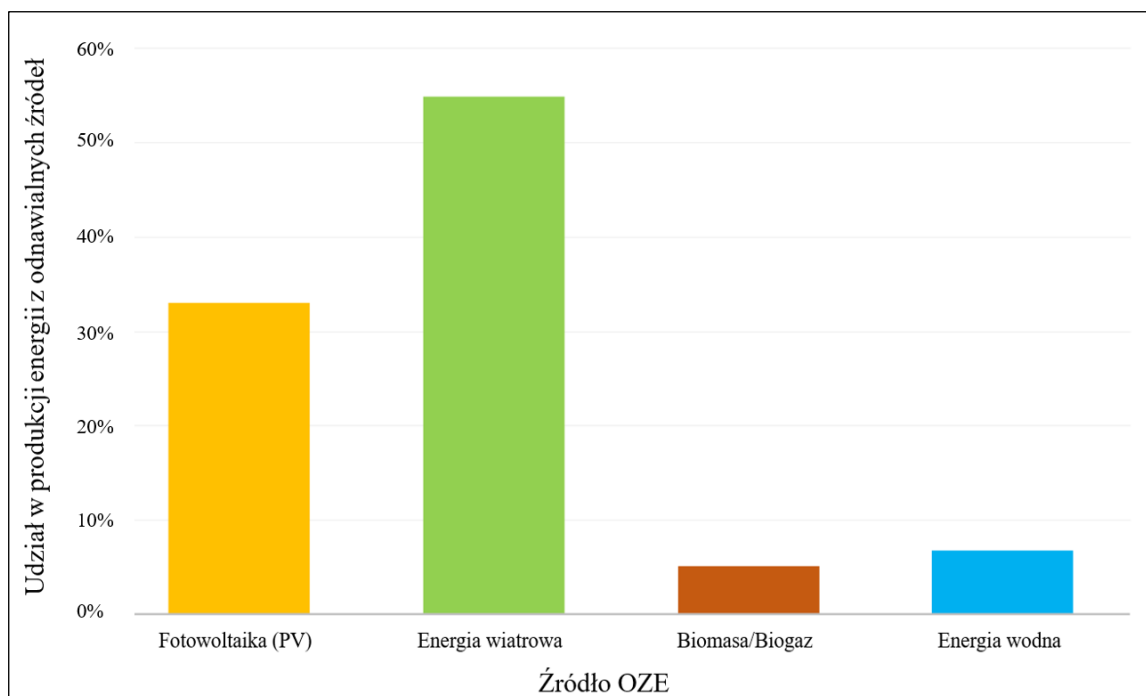
Źródło: opracowanie własne na podstawie „Circular economy implementation based on ISO 14001 within SME organization: How to do it best?”, P. Kafel, P. Nowicki, 2023, *Sustainability*, 15(1), s. 496; „Organizations towards the evaluation of environmental management tools ISO 14001 and EMAS”, A. Ociepa-Kubicka, I. Deska, E. Ociepa, 2021, *Energies*, 14(16), s. 4870.

2. CHARAKTERYSTYKA TECHNOLOGII ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII

Odnawialne źródła energii (OZE) to zasoby naturalne, takie jak słońce, wiatr, woda, biomasa i energia geotermalna, które są odnawiane w krótkim czasie i mogą stanowić trwałą alternatywę wobec paliw kopalnych. Ich rozwój związany jest z transformacją energetyczną, której celem jest ograniczenie emisji cieplarnianych gazów i zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego (Kabeyi, 2022).

Według danych Międzynarodowej Agencji Energetycznej (IEA, 2024c), w 2024 roku przybyło 582 GW nowych mocy w OZE, z czego 452 GW stanowiła energia słoneczna. Analizy Ember 2025 wskazują, że udział OZE w globalnej produkcji energii elektrycznej przekroczył 30%. Spadek kosztów instalacji, zwłaszcza w energetyce słonecznej oraz wiatrowej, sprawia, że technologie te stają się coraz bardziej konkurencyjne (IRENA – *International Renewable Energy Agency*, 2025).

Na rysunku 9 przedstawiono strukturę produkcji energii z odnawialnych źródeł w Polsce w 2024 roku. Największy udział miała energetyka wiatrowa, odpowiadając za ponad połowę całkowitej produkcji z OZE (ok. 55%). Na drugim miejscu uplasowała się instalacja fotowoltaiczna (ok. 33%), co stanowi potwierdzenie jej dynamicznego rozwoju w ostatnich latach. Znacznie mniejszy wkład miały natomiast biomasa i biogaz (ok. 5%) oraz energetyka wodna (ok. 7%).



Rysunek 9. Udział odnawialnych źródeł w produkcji energii elektrycznej w Polsce w 2024 roku. Źródło: opracowanie własne na podstawie „Produkcja energii z fotowoltaiki w Polsce w 2024 roku, Forum Energii”, 2025, pobrane z: <https://www.forum-energii.eu>; „Produkcja energii elektrycznej w Polsce w 2024 r. – struktura i zmiany w miksie energetycznym”, 2025, pobrane z: <https://wysokie.napiecie.pl>.

Coraz większe znaczenie zyskują rozwiązania hybrydowe, które łączą różne technologie, np. instalację fotowoltaiczną z energetyką wiatrową lub biogazem. Takie systemy pozwalają na stabilizację produkcji energii i lepsze dopasowanie jej do zapotrzebowania, a w połączeniu z magazynami energii stanowią fundament nowoczesnych inteligentnych sieci (Chou, Ngo, Tran, 2023).

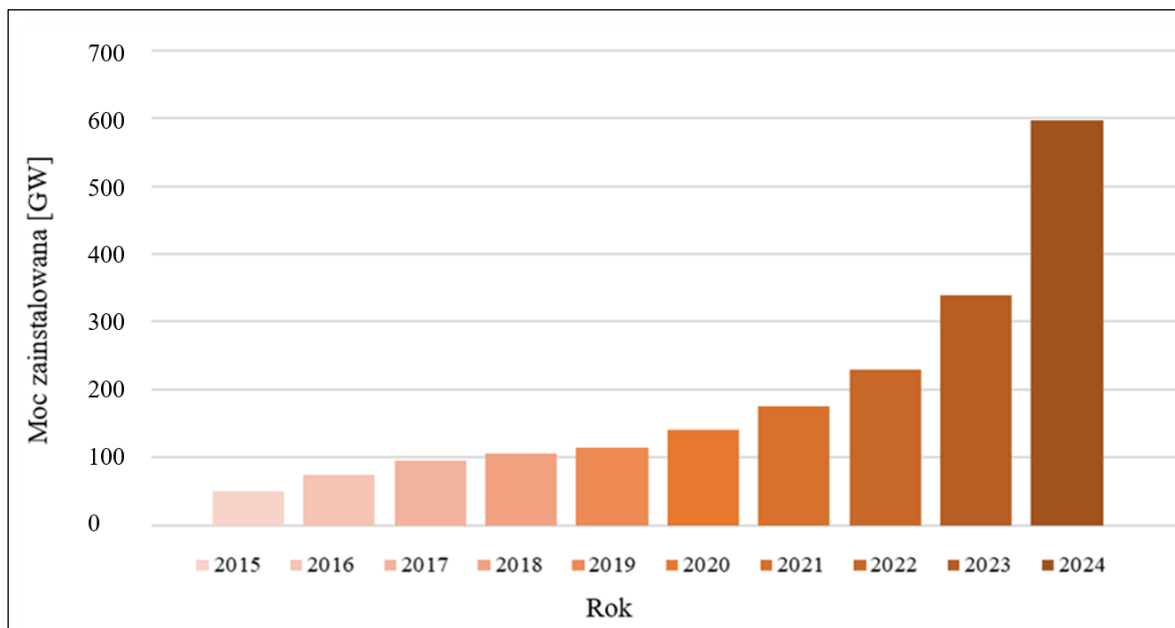
2.1. Instalacja fotowoltaiczna jako źródło energii pozyskiwanej z promieniowania słonecznego

Instalacja fotowoltaiczna to technologia, która umożliwia bezpośrednio przekształcenie energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną za pomocą ogniw półprzewodnikowych. Obecnie dominującą technologią są moduły krzemowe, przy czym moduły monokrystaliczne osiągają wyższą sprawność niż polikrystaliczne. W fazie komercjalizacji znajdują się zaś ogniwa perowskitowe, które dzięki niskiemu kosztowi produkcji mogą w przyszłości zrewolucjonizować rynek (Jowett, 2024).

W ostatnich latach PV stała się jednym z najtańszych źródeł energii elektrycznej. Badania pokazują, że w wielu regionach świata koszty produkcji energii słonecznej spadły poniżej kosztów energii wytwarzanej z paliw kopalnych. Dynamiczny rozwój sektora odzwierciedlają dane Międzynarodowej Agencji Energii Odnawialnej, według których w 2023 roku ponad 70% nowych mocy wytwórczych na świecie pochodziło z instalacji fotowoltaicznych (IRENA, 2023).

2.1.1. Charakterystyka instalacji fotowoltaicznej

Skala wdrożeń PV osiągnęła w 2024 roku bezprecedensowy poziom. Szacunki branżowe wskazują, że w 2024 roku przyłączono ok. 597 GW nowych mocy PV, co wyniosło globalny zasób zainstalowany do ok. 2,2 TW i potwierdziło najwyższe w historii tempo ekspansji technologii (SolarPower Europe, 2025). Dane międzynarodowe potwierdzają, że 452 GW z łącznych 585 GW nowych mocy odnawialnych w 2024 roku stanowiła PV, a odnawialne źródła odpowiadały za 92,5% przyrostu mocy wytwórczych, zwiększając łączny udział OZE w światowej mocy zainstalowanej do 46% (IRENA, 2025). Dynamika popytu skutkowała też historycznym wzrostem generacji słonecznej; w skali roku 2024 największy przyrost produkcji energii ze słońca odnotowano w Chinach, przy jednoczesnych rekordach w UE i USA (Maguire, 2025). Na rysunku 10 zaprezentowano roczne przyrosty mocy PV w skali globalnej w latach 2015-2024, które ilustrują historyczne tempo rozwoju tej technologii.



Rysunek 10. Roczna nowo zainstalowana moc PV na świecie w latach 2015-2024.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Global Market Outlook for Solar Power 2025-2029”, SolarPower Europe, 2025, pobrane z: <https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2025-2029/detail>.

W Unii Europejskiej energia ze źródeł odnawialnych dostarczyła w 2024 roku 47-47,3% produkcji energii elektrycznej netto, przy czym udział energii słonecznej osiągnął ok. 11% miks elektroenergetycznego, co pozycjonuje PV jako jeden z filarów dekarbonizacji (AP News, 2025; Eurostat, 2025a). W ujęciu całej gospodarki udział OZE w końcowym zużyciu energii brutto wzrósł w 2023 roku do 24,5%, a prawnie wiążący cel na 2030 roku został podwyższony do 42,5% (z ambicją 45%), co implikuje dalszą skalę integracji PV w sektorach końcowych (Eurostat, 2025b).

W Polsce łączna moc zainstalowana w systemach fotowoltaicznych (PV) przekroczyła na przełomie marca i kwietnia 2025 roku 22 GW (22 074 MW), według danych operatora systemu przesyłowego, co potwierdza kontynuację silnego trendu prosumenckiego przy jednoczesnym wzroście udziału instalacji wielkoskalowych (Strategic Energy, 2025). W pierwszym kwartale 2025 roku przybyło ok. 637 MW nowych mocy, a łączna zainstalowana moc zbliżyła się do progu 22 GW, zgodnie z danymi Instytutu Energetyki Odnawialnej (IEA – *International Energy Agency*, 2025). Z perspektywy UE odnotowano jednocześnie najwyższe w historii udziały produkcji OZE w wielu państwach członkowskich, co wiąże się z redukcją importu paliw kopalnych, jak również malejącą generacją z węgla i gazu (Eurostat, 2025c).

W wymiarze krajowym rola fotowoltaiki ujawnia się także poprzez wskaźniki społeczno-ekonomiczne, w tym łagodzenie ubóstwa energetycznego poprzez samowystarczalność części gospodarstw domowych i stabilizację rachunków dzięki autokonsumpcji (Bąk i in., 2024). W ujęciu porównawczym na poziomie UE korelacja pomiędzy wzrostem wykorzystania OZE a poprawą wskaźników środowiskowych potwierdza strukturalne znaczenie PV jako nośnika redukcji presji środowiskowej (Sompolska-Rzechuł, Bąk, Becker, Marjak, Perzyńska, 2024).

2.1.2. Oddziaływanie na środowisko

W ocenie cyklu życia (LCA – *Life Cycle Assessment*) instalacja fotowoltaiczna charakteryzuje się niską intensywnością emisyjną i krótkimi czasami energetycznego „zwrotu” w porównaniu z technologiami konwencjonalnymi. Zaktualizowane metaanalizy dotyczące systemów użyteczności publicznej wskazują, że emisje wynoszą od kilkunastu do kilkudziesięciu gramów CO₂e/kWh, czas EPBT (Energy Payback Time) mieści się w przedziale od kilku miesięcy do kilku lat, w zależności od zastosowanej technologii, lokalizacji i miks energetycznego, a tzw. „carbon payback time” pozostaje krótki w scenariuszach zgodnych z celami transformacji energetycznej (NREL, 2024). Ujęcie sektorowe potwierdza niskie emisyjne ślady PV w porównaniu z innymi nośnikami energii niskoemisyjnej, co pozostaje spójne z pracami harmonizacyjnymi i aktualizacjami zestawień LCA (IEA PVPS, 2024). Równoległe opracowania przeglądowe podkreślają znaczenie wyboru granic systemu, miks energetycznego łańcucha dostaw oraz scenariuszy końca życia dla wynikowych wskaźników wpływu (Cellura, Bruno, Longo, Rizzo, 2024).

W fazie eksploatacji oddziaływanie instalacji fotowoltaicznych (PV) na środowisko jest stosunkowo niewielkie. Charakteryzuje je brak emisji zanieczyszczeń w miejscu użytkowania oraz bardzo niskie zużycie wody, ograniczone głównie do okresowego czyszczenia paneli. W krajach o wysokim stopniu rozwoju sektora PV odnotowano znaczące efekty redukcji emisji dwutlenku węgla w skali krajowych elektroenergetycznych systemów, które pozostają w silnej korelacji z rosnącym udziałem fotowoltaiki w miksie energetycznym (Fraunhofer ISE, 2025). Zagadnienia materiałochłonności i krytycznych surowców w łańcuchu wartości stanowią przedmiot inicjatyw normalizacyjnych i ekoprojektowych UE, ukierunkowanych na pomiar oraz redukcję śladu węglowego modułów i zwiększanie przejrzystości środowiskowej wyrobów (Joint Research Centre, 2025).

W perspektywie gospodarki o obiegu zamkniętym kluczowe pozostaje zarządzanie strumieniem odpadów paneli PV. Ramy prawne UE obejmują moduły PV zakresem dyrektywy WEEE (z późn. zm.), ustanawiając cele recyklingu oraz odpowiedzialność producenta, a implementacja podlega sprawozdawczości w Eurostacie (IEA PVPS, 2024; European Recycling Platform, 2023). Dane organizacji branżowych wskazują na rosnące wolumeny odbioru i przetwarzania strumienia PV-WEEE (PV CYCLE, 2024). Monitorowanie postępów w zakresie recyklingu komponentów zielonych technologii, w tym paneli PV, zostało włączone do europejskich pulpitów „zero zanieczyszczeń” jako miernik efektywności systemowej (European Environment Agency, 2024). Równoległe zalecenia dobrych praktyk w zakresie demontażu, kwalifikacji „second life” i selektywnej zbiórki mają na celu maksymalizację odzysku krzemu, szkła, metali oraz tworzyw przy minimalizacji ryzyk środowiskowych (SolarPower Europe, 2024).

Z perspektywy zarządzania ryzykiem środowiskowym istotne są także efekty pośrednie: ślad gruntowy i kolizje przestrzenne z walorami przyrodniczymi. Dowody empiryczne z Anglii wskazują, że lokalizacja farm fotowoltaicznych wrażliwa na uwarunkowania bioróżnorodności może ograniczyć negatywne skutki i sprzyjać pozytywnym usługom ekosystemowym przy odpowiednich praktykach planistycznych (Tinsley, Froidevaux, Jones, 2024).

2.1.3. Społeczne i przestrzenne aspekty rozwoju instalacji fotowoltaicznych

Rozwój PV ma wielowymiarowy charakter społeczno-przestrzenny (rysunek 11). Na poziomie miejskim integracja instalacji dachowych kształtuje lokalne warunki środowiskowe; wykazano, że pokrycia dachowe PV mogą modyfikować sezonową temperaturę powierzchni miejskiej w zależności od form przestrzennych zabudowy, co otwiera dyskusję o synergii z politykami adaptacji do upałów (Pan i in., 2025). W wymiarze infrastrukturalnym implementacje PV integrowane z kolejami turystycznymi czy mobilną zieloną infrastrukturą wspierają dekarbonizację mobilności i usług publicznych, wskazując na rosnący wachlarz zastosowań w tkance miejskiej (Park, Kim, Hyun, 2025; Kaya, 2025).



Rysunek 11. Społeczno-przestrzenne aspekty rozwoju fotowoltaiki.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Circular cities: What are the benefits of circular development?”, J. Williams, 2021 *Sustainability*, 13(10), s. 5725.

Z punktu widzenia urbanistyki i architektury znaczący potencjał leży w instalacji fotowoltaicznej zintegrowanej z budynkiem (BIPV). Metodyki stosujące wolne oraz otwarte oprogramowanie GIS umożliwiają warstwowe oszacowanie potencjału fasad i optymalizację orientacji, co sprzyja racjonalizacji lokalizacji przy zachowaniu ładu przestrzennego (Marcos-Castro, Martín-Chivelet, Polo, 2025). W strefach równikowych i tropikalnych analizy potencjału wykorzystania powierzchni dachów z zastosowaniem narzędzi GIS/RS oraz metod uczenia maszynowego dostarczają władzom publicznym i przedsiębiorstwom wiarygodnych map potencjału energetycznego, wspierając planowanie rozproszonej generacji w miastach (Idrovo-Macancela, Velecela-Zhindón, Barragán-Escandón, Zalamea-León, Mejia-Coronel, 2025).

W skali dzielnic i miast rozwija się koncepcja *Positive Energy Districts* (PED), w której lokalne instalacje PV, często łączone z magazynami energii i zarządzaniem popytem, zapewniają nadwyżkę energii, a partycypacyjne modele zarządzania wzmacniają spójność społeczną i odporność (Siakas, Rahanu, Georgiadou, Lampropoulos, 2025). W literaturze o miastach cyrkularnych podkreśla się znaczenie zintegrowanego gospodarowania zasobami i strumieniami materiałowymi, gdzie PV dzięki długiemu cyklowi życia i możliwości recyklingu może być elementem cyrkularnej infrastruktury energetycznej (Williams, 2021).

Skalowanie PV wiąże się z uwarunkowaniami akceptacji społecznej i planowania przestrzennego. Tzw. zintegrowane planowanie przestrzenno-energetyczne rekomenduje łączenie polityk zagospodarowania przestrzennego z celami energetycznymi oraz klimatycznymi, by minimalizować konflikty o przestrzeń i optymalizować rozmieszczenie mocy (Stoeglehner, 2020). W tym kontekście narzędzia PPGIS oraz scenariusze partycypacyjne w procesie decyzyjnym mogą zmniejszać opór społeczny i poprawiać legitymizację lokalnych inwestycji PV, gdyż transparentnie ujawniają kompromisy użytkowania terenu (Sainz-Ortiz, Somohano-Rodriguez, Pascual-Muñoz, Arroyo, Manana, 2024). Na poziomie polityk publicznych odpowiednie połączenie instrumentów regulacyjnych, ekonomicznych i informacyjnych zwiększa skuteczność wdrożeń. Dobór tych instrumentów powinien uwzględniać ukryte koszty środowiskowe oraz zachęcać konsumentów i inwestorów do działań sprzyjających zrównoważonemu rozwojowi (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2025). Wątek sprawiedliwości energetycznej podkreśla znaczenie PV dla odporności gospodarstw i społeczności wrażliwych. Analizy dla UE pokazują, że rosnące wykorzystanie OZE, przy dobrze zaprojektowanych politykach, może ograniczać ubóstwo energetyczne, przynosząc korzyści ekonomiczne i zdrowotne (Bąk i in., 2024). Przeglądy wskazują także, że powiązanie OZE ze wzrostem gospodarczym zależy od jakości instytucji i mechanizmów integracji rynkowej, też na poziomie lokalnym i prosumenckim (Chou, Ngo, Tran 2023; Dirma, Neverauskienė, Tvaronavičienė, Danilevičienė, Tamošiūnienė, 2024).

2.2. Biogaz jako źródło energii pozyskiwanej z fermentacji materii organicznej

Biogaz jest jednym z kluczowych odnawialnych źródeł energii w gospodarce o obiegu zamkniętym, łącząc produkcję energii z redukcją emisji i zagospodarowaniem odpadów. Powstaje w procesie fermentacji metanowej, czyli beztlenowego rozkładu materii organicznej przez mikroorganizmy. Otrzymana mieszanina metanu i dwutlenku węgla może być wykorzystana do produkcji energii elektrycznej oraz ciepła, a po oczyszczeniu jako biometan może zastąpić gaz ziemny. Biogaz odgrywa ważną rolę w polityce klimatycznej UE, wpisując się w cele Europejskiego Zielonego Ładu (Kochanek i in., 2024b).

W Polsce jego znaczenie wynika z dużej podaży odpadów organicznych z rolnictwa i przemysłu rolno-spożywczego. Największy potencjał mają gnojowica, obornik, resztki poźniwne, odpady poubojowe i bioodpady komunalne. Wykorzystanie tych substratów pozwala ograniczyć składowanie, zredukować niekontrolowaną emisję metanu i odzyskiwać poferment przydatny w nawożeniu.

Rozwój sektora napotyka jednak bariery administracyjne i inwestycyjne, które skutkują niewielką liczbą biogazowni w stosunku do potencjału surowcowego kraju (Kochanek, Ciuła, Cembruch-Nowakowski, Załona, 2025b).

2.2.1. Geneza i charakterystyka biogazu

Biogaz stanowi mieszaninę gazów powstającą w wyniku beztlenowego rozkładu materii organicznej. Dominującymi składnikami są: metan (CH_4) i dwutlenek węgla (CO_2), a w mniejszych ilościach występują siarkowodor (H_2S), para wodna i inne gazy. Zjawisko towarzyszy naturalnym ekosystemom beztlenowym (torfowiska, osady denne, zwacz przeżuwaczy), a w warunkach inżynierskich odtwarzane jest w hermetycznych komorach fermentacyjnych o kontrolowanych parametrach. Z perspektywy bilansu emisyjnego istotą technologii biogazowych jest przechwytywanie i energetyczne wykorzystanie metanu, który w przeciwnym razie przedostałby się do atmosfery jako gaz cieplarniany, co nadaje biogazowi znaczenie klimatyczne wykraczające poza samą produkcję energii (Mohamed, El-Sayed, Ali, 2025).

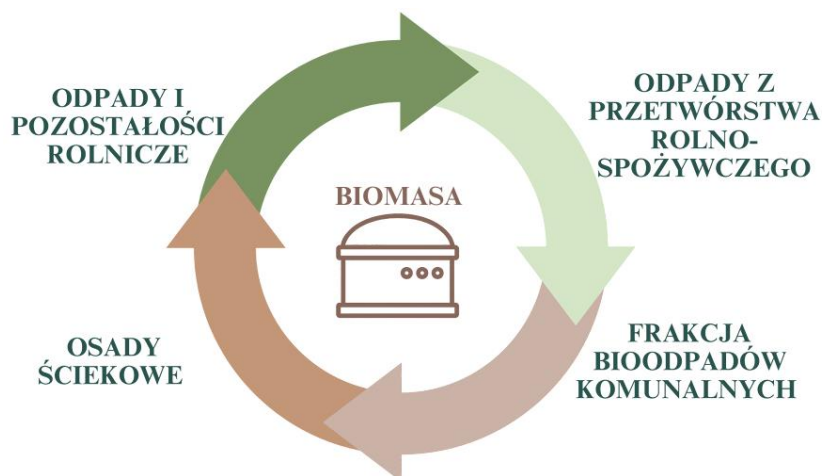
Proces fermentacji metanowej zachodzi etapami: hydrolizy, acidogenezy, acetogenezy oraz metanogenezy, a jego prawidłowy przebieg wymaga: udziału wyspecjalizowanych mikroorganizmów, utrzymania stabilnego pH (najczęściej w zakresie 6,8-7,4), zapewnienia odpowiedniej temperatury (mezofilnej ok. 35-40°C lub termofilnej ok. 50-55°C) oraz warunków sprzyjających konwersji materii organicznej (Bedoić i in., 2021). Produkt procesu można skierować do skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepła *Combined Heat and Power* (CHP), zastosowań cieplnych bądź po oczyszczeniu i uszlachetnieniu jako biometan do sieci gazowej lub transportu. Wymiar systemowy technologii biogazowych obejmuje jednocześnie pełnienie funkcji energetycznej i środowiskowej: stabilizacji frakcji ulegającej biodegradacji odpadów oraz ograniczenia emisji niekontrolowanego CH_4 z rolnictwa i składowisk (Tang, Zhu, Gu, Wang, 2024; Sompolska-Rzechuł, Bąk, Becker, Marjak, Perzyńska, 2024).

W analizach rozwojowych coraz częściej akcentuje się rolę zarządzania środowiskowego i polityk dekarbonizacyjnych, obejmujących standardy zarządcze, mechanizmy finansowe i wskaźniki zrównoważone wspierające technologie ograniczające emisje metanu, w szczególności biogaz (Fernandez, 2022; Ab Aziz, Alshdaifat, 2024). Badania pokazują, że innowacje środowiskowe mogą iść w parze z wyższą produktywnością, jeśli organizacje uwzględniają efekty środowiskowe w swoich modelach działania. Ma to znaczenie także dla podmiotów eksploatujących biogazownie (Wu, Lv, Qiao, Roth, Zhu, 2024).

2.2.2. Dostępność i rodzaje substratów

Rejestr Krajowy Ośrodek Wsparcia Rolnictwa (KOWR) wskazuje, że na początku 2024 roku funkcjonowało 165 instalacji wytwarzających biogaz rolniczy lub energię z biogazu rolniczego. Łączny wolumen możliwej produkcji oszacowano na ponad 638 mln m^3 biogazu rocznie, a łączna moc elektryczna przekraczała 156 MWe (Teraz Środowisko, 2024).

Strumienie substratów biogazowych w Polsce tworzą cztery główne kategorie przedstawione na rysunku 12.



Rysunek 12. Główne strumienie substratów wykorzystywanych do produkcji biogazu.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Biogas production – A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion”, B. Bharathiraja, T. Sudharsana, J. Jayamuthunagai, P. Ramanujam, C. Sivasankaran, J. Iyyappan, 2018, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, s. 570-582.

W wymiarze systemowym bioodpady komunalne stanowią rosnące, wymagalne prawem źródło substratu do kompostowania lub fermentacji. Według Głównego Urzędu Statystycznego w 2023 roku zebrano łącznie 13,4 mln Mg odpadów komunalnych, z czego część frakcji ulegającej biodegradacji kierowana była do procesów R3 (kompostowanie – fermentacja), przy czym zmiana metodyki liczenia tej masy od 2023 roku utrudnia porównania międzyokresowe (Główny Urząd Statystyczny, 2024). W świetle Banku Danych Lokalnych Głównego Urzędu Statystycznego (BDL GUS) dane o kierunkach zagospodarowania po 2023 roku prezentowane są zgodnie z nową definicją strumienia R3, co ma znaczenie dla interpretacji dostępności „miejskiej” bazy substratowej.

W sektorze wodno-ściekowym potencjał biogazowy bazuje na osadach ściekowych, których energetyczne wykorzystanie wpisuje się w koncepcję obiegu zamkniętego. Syntezy technologiczne dla ścieków i osadów wskazują na możliwość konwersji do biogazu i biopaliw w łańcuchach hybrydowych (Kowalski i in., 2024). Równolegle, ujęcia przestrzenne dla regionów przemysłowych pokazują sezonowość i mozaikowość strumieni posubstratowych, co implikuje potrzebę planowania lokalizacji instalacji z użyciem narzędzi GIS (Lovrak, Pukšec, Grozdek, Duić, 2021).

W polskim rolnictwie istotną część potencjału biogazowego tworzą pozostałości zwierzęce. Szacunki rynkowe oraz branżowe wskazują, że łączna moc zainstalowana biogazowni (wszystkich typów) we wrześniu 2024 roku wynosiła około 301 MW, co odpowiada mniej niż 1% mocy Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE). Skala ta ilustruje wciąż niewykorzystany potencjał substratowy w relacji do bazy hodowlanej (Lisiecka, 2024).

Z punktu widzenia emisji metanu do środowiska, krytyczne są dwa strumienie rolnicze: fermentacja jelitowa u bydła i gospodarka odchodami zwierzęcymi. Resortowe dane dla 2023 roku wskazują, że w rolnictwie fermentacja jelitowa odpowiadała za 89,8% emisji CH₄ z sektora, a gospodarka odchodami za 10%. Sektor odpowiadał za 40,7% krajowych emisji CH₄, co podkreśla znaczenie biogazu jako narzędzia redukcyjnego w gospodarce obornikiem i gnojowicą (Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi, 2025).

Strumień odpadów kierowanych do fermentacji jest powiązany z efektywnością selektywnej zbiórki bioodpadów i z ograniczaniem składowania. Raport Instytutu Ochrony Środowiska oparty na BDO podkreśla wagę zmiany kierunków zagospodarowania odpadów w 2023 roku, co wprost przekłada się na wolumen wsadu do instalacji fermentacyjnych oraz redukcję emisji niekontrolowanego CH₄ ze składowisk (Instytut Ochrony Środowiska – PIB, 2025).

2.2.3. Oddziaływanie na środowisko

Bilans środowiskowy produkcji biogazu obejmuje redukcję emisji CH₄ przez kontrolę strumienia odpadów ulegających biodegradacji i substytucję paliw kopalnych w wytwarzaniu energii. Analizy środowiskowe prowadzone w sektorach: ciepłowniczym i komunalnym wskazują na korzyści dla jakości powietrza wynikające z wypierania paliw stałych i gazu ziemnego przez odnawialne nośniki, w tym biogaz (Tang, Zhu, Gu, Wang, 2024). Ponadto w ujęciu makroekonomicznym wzrost udziału OZE z istotnym komponentem biogazowym wiąże się ze statystycznie potwierdzonym ograniczaniem wskaźników degradacji środowiska w krajach Unii Europejskiej (Sompolska-Rzechuła, Bąk, Becker, Marjak, Perzyńska, 2024).

Z perspektywy gospodarki odpadami fermentacja metanowa pełni rolę technologii unieszkodliwiania i odzysku odpadów, zamykając obieg materii organicznej. Studium przypadku dla Polski w ujęciu gospodarki komunalnej wykazało, że integracja strumienia bioodpadów z odzyskiem energii poprawia wskaźniki cyrkularności oraz efektywności ekonomicznej systemów regionalnych (Ciula i in., 2024b). Jednocześnie standardy systemów zarządzania środowiskowego (EMS – *Environmental Management System*) zarówno ISO 14001, jak też *Eco-Management and Audit Scheme* (EMAS) tworzą ramy proceduralne dla ograniczania ryzyk środowiskowych w eksploatacji biogazowni (Ociepa-Kubicka, Deska, Ociepa, 2021). Ich implementacja w sektorach infrastrukturalnych skutkuje lepszą kontrolą emisji zanieczyszczeń do powietrza, gospodarki wodno-ściekowej oraz gospodarki odpadami poprzemysłowymi (Seifert, Damert, Guenther, 2020).

Na poziomie polityk publicznych, przeglądy dowodzą, że instrumenty zarządcze wpisujące redukcję metanu jako priorytet dekarbonizacji sprzyjają wdrażaniu technologii biogazowych, w szczególności w modelach lokalnych (Hazemba, Halog, 2021; Kafel, Nowicki, 2023).

Badania nad relacją między odnawialnymi źródłami energii a energetycznym ubóstwem wskazują, że rozwój OZE, w tym biogazu wykorzystywanego w ciepłownictwie rozproszonym, może przyczynić się do łagodzenia wskaźników ubóstwa energetycznego, pod warunkiem, że towarzyszy mu właściwie zaprojektowany system taryf i inwestycje w infrastrukturę dystrybucji ciepła (Bąk, Wawrzyniak, Oesterreich, 2024).

Z punktu widzenia oceny cyklu życia (LCA) efekt netto biogazu jest silnie zależny od miks substratów i wykorzystania pofermentu. Ujęcia „well-to-wheel” dla strumieni osadowych i komunalnych wskazują na korzystne bilanse, o ile poferment stosowany jest rolniczo z kontrolą ładunków azotu i fosforu, a instalacje wyposażone są w skuteczne systemy odsiarczania i hermetyzacji (Kowalski i in., 2024).

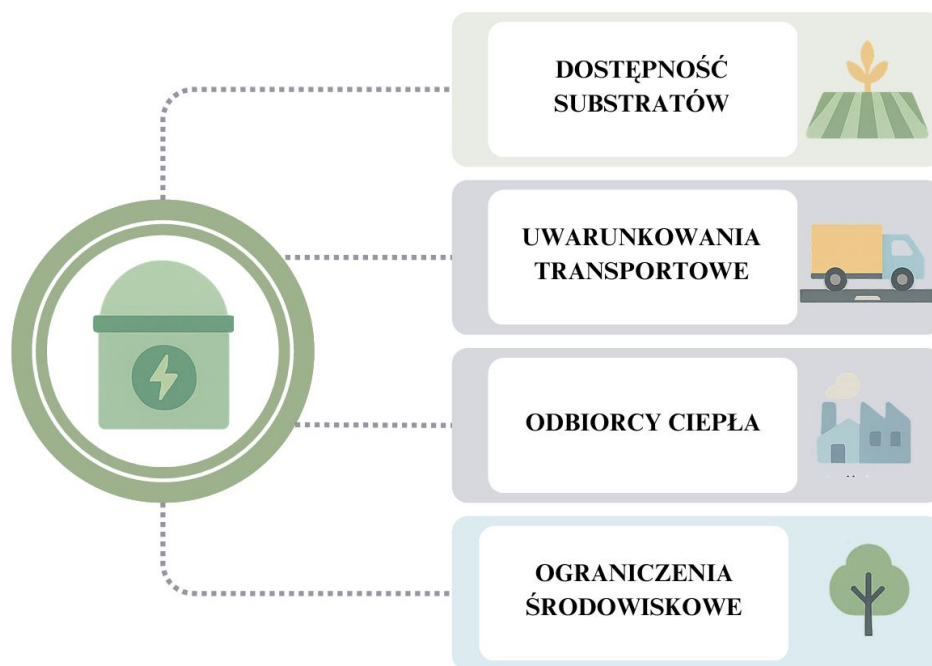
Wreszcie, zintegrowane oceny sektora biogazu wykazują, że kluczowe czynniki środowiskowe to:

- minimalizacja strat metanu na etapie magazynowania i spalania;
- kierowanie biofrakcji do fermentacji zamiast składowania;
- przestrzenno-logistyczna bliskość źródeł substratów i odbiorców ciepła (Bedoic i in., 2021).

2.2.4. Zastosowania i znaczenie dla gospodarki lokalnej

Biogazownie pełnią funkcję lokalnych węzłów energetyczno-środowiskowych. W modelu CHP stabilizują lokalne systemy ciepłownicze, a w wariantcie biometanowym tworzą elastyczne, sezonowo bilansujące źródło gazu odnawialnego do sieci i transportu. Analizy transformacyjne dowodzą, że rozwój portfela OZE z komponentem gazów odnawialnych wzmacnia bezpieczeństwo energetyczne i dywersyfikację, szczególnie w regionach rolniczych (Rabbi, Popp, Máté, Kovács, 2022; Dirma, Neverauskienė, Tvaronavičienė, Danilevičienė, Tamošiūnienė, 2024). Znaczenie to ma wymiar społeczno-ekonomiczny: lokalne łańcuchy dostaw substratów i odbioru ciepła generują przychody dla gospodarstw rolnych i MŚP, a jednocześnie redukuje koszty zewnętrzne gospodarki odpadami.

W warunkach polskich przestrzenne planowanie biogazowni wymaga włączenia kryteriów środowiskowych (rysunek 13).



Rysunek 13. Podstawowe kryteria środowiskowe przestrzennego planowania biogazowni.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „The analysis of geospatial factors necessary for the planning, design, and construction of agricultural biogas plants in the context of sustainable development”, A. Kochanek, J. Ciula, A. Generowicz, O. Mitryasova, A. Jasińska, S. Jurkowski, P. Kwaśnicki, 2024, *Energies*, 17, s. 5619.

Badania przeprowadzone w Polsce wykazały, że integracja czynników przestrzennych i środowiskowych pozwala ograniczyć ryzyka inwestycyjne i ułatwia zarządzanie akceptacją społeczną (Kochanek i in., 2024b).

Z kolei analizy percepcji rolników potwierdzają, że przejrzyste kryteria lokalizacyjne i wsparcie informacyjne, takie jak mapy potencjału czy narzędzia GIS, zwiększają skłonność do inwestowania (Kochanek i in., 2025b). W skali operacyjnej sektor osiąga już istotne wielkości wytwarzania: w 2023 roku produkcja energii elektrycznej z biogazu rolniczego wyniosła blisko 920 GWh, z wyraźnym wzrostem rok do roku (Energia z Rolnictwa, 2024).

Rozwój biogazu skorelowany jest z paradygmatem gospodarki o obiegu zamkniętym oraz nowymi modelami finansowania transformacji niskoemisyjnej. Literatura wskazuje, że przejście od działań punktowych do zintegrowanych strategii środowiskowych zwiększa dostęp do finansowania i innowacyjność, co ma znaczenie dla rozproszonych inwestycji infrastrukturalnych (Fernandez, 2022; Wu, 2023; Ab Aziz i in., 2024). Ujęcie globalne podkreśla też, że dekarbonizacja sektora energii, w tym poprzez ograniczanie metanu, jest spójnym „mostem” do neutralności klimatycznej (Mohamed, El-Sayed, Ali, 2025; Faizi i in., 2024).

Wymiar instytucjonalny rynku odzwierciedlają rejestry i dane operacyjne. Zestawienia Urzędu Regulacji Energetyki (URE) dla małych instalacji OZE pokazują systematyczny wzrost mocy i produkcji w latach 2023-2024, co potwierdza rosnącą rolę energetyki rozproszonej (Urząd Regulacji Energetyki, 2025). Z perspektywy miast i gmin rosnąca dostępność selektywnie zbieranych bioodpadów, raportowana w statystykach BDO, tworzy bazę surowcową do kontraktowania.

Badania potwierdzają, że biogazowe układy CHP na składowiskach odpadów mogą znacząco zwiększyć efektywność odzysku energii i ograniczać emisje (Ciula i in., 2022).

2.3. Energia wiatrowa jako źródło energii pozyskiwanej z siły wiatru

Energia wiatrowa jest jedną z najszybciej rozwijających się technologii odnawialnych na świecie, co wynika zarówno z jej dojrzałości technicznej, jak też rosnącego znaczenia w politykach klimatycznych i bezpieczeństwa energetycznego. Jako źródło bezemisyjne w fazie eksploatacji, wiatr odgrywa istotną rolę w dekarbonizacji systemów elektroenergetycznych, a jego udział w globalnym miksie energii elektrycznej stale rośnie. W 2024 roku wiatr odpowiadał już za ponad 7% światowej produkcji energii elektrycznej, co czyni go kluczowym komponentem strategii transformacji energetycznej wielu państw rozwiniętych i rozwijających się (IRENA, 2025a).

Znaczenie energetyki wiatrowej wynika również z jej potencjału do wspierania lokalnego rozwoju gospodarczego oraz tworzenia miejsc pracy, przy jednoczesnym ograniczaniu zależności od paliw kopalnych. Coraz częściej energia wiatrowa traktowana jest nie tylko jako narzędzie redukcji emisji gazów cieplarnianych, ale też jako element zapewnienia odporności państw na kryzysy surowcowe i niestabilność cen energii. W literaturze podkreśla się, że rozwój wiatru zarówno na lądzie, jak i na morzu stanowi istotny czynnik wzmacniania bezpieczeństwa energetycznego oraz osiągania celów zrównoważonego rozwoju (Dirma i in., 2024; Bertsiou, Theochari, Gergatsoulis, Gerakianakis, Baltas, 2025).

2.3.1. Zasada działania i globalne znaczenie energetyki wiatrowej

Energia wiatru polega na konwersji energii kinetycznej ruchu mas powietrza na energię elektryczną za pośrednictwem turbiny, w której różnica ciśnień po obu stronach łopaty, wynikająca z jej aerodynamicznego profilu, generuje moment obrotowy przenoszony przez wał oraz układ przekształtnikowy do sieci elektroenergetycznej. Technologia ta, oparta na prostym mechanizmie przetwarzania wiatru w ruch obrotowy, a następnie w energię elektryczną, zaliczana jest do grupy wysokowydajnych konwerterów energii przepływów naturalnych i wyróżnia się niską materiałochłonnością w przeliczeniu na jednostkę wytworzonej energii w całym cyklu życia. W efekcie, przy odpowiednio zaprojektowanej infrastrukturze przyłączeniowej, energetyka wiatrowa dostarcza strumień energii elektrycznej o bardzo niskiej emisyjności, co jest kluczowe dla transformacji systemów energetycznych w kierunku neutralności klimatycznej (Mohamed, El-Sayed, Ali, 2025).

Znaczenie globalne sektora wiatrowego wynika z dwóch uzupełniających się ról: redukcji emisji gazów cieplarnianych i poprawy bezpieczeństwa energetycznego przez dywersyfikację źródeł krajowych. Przesunięcie miksu w stronę wiatru zmniejsza ekspozycję gospodarek na wahania cen paliw kopalnych i ryzyka geopolityczne, a równocześnie wspiera budowę portfela technologii zdolnych do dekarbonizacji sektorów trudno redukowalnych poprzez elektryfikację. Z perspektywy polityki energetycznej energia wiatrowa stanowi narzędzie ograniczania importu paliw oraz stabilizacji kosztów wytwarzania w horyzoncie średnio- i długookresowym (Rabbi, Popp, Máté, Kovács, 2022).

W wymiarze jakości powietrza substytucja generacji węglowej i gazowej przez wiatr przynosi bezpośrednie korzyści zdrowotne, redukując emisje SO_2 , NO_x i pyłów zawieszonych. Choć skala efektu zależy od struktury lokalnego miksu energetycznego, liczne analizy wskazują, że szybki wzrost udziału odnawialnych źródeł energii, w tym energetyki wiatrowej, koreluje ze spadkiem stężeń zanieczyszczeń w sektorach ciepłowniczym i elektroenergetycznym. W tym kontekście energetyka wiatrowa pełni równocześnie funkcję interwencji klimatycznej i dźwigni poprawy zdrowia publicznego (Tang, Zhu, Gu, Wang, 2024).

2.3.2. Statystyki rozwoju

Rok 2024 był kolejnym rekordowym okresem dla światowej energetyki wiatrowej: według Global Wind Energy Council przybyło 117 GW nowych mocy zainstalowanych, ustanawiając najwyższy roczny przyrost w historii i potwierdzając odporność sektora pomimo niestabilności regulacyjno-rynkowej w niektórych regionach. Dynamika ta odzwierciedla zarówno przyspieszenie aukcji, jak i skracanie cykli inwestycyjnych na kluczowych rynkach, co zwiększa łączną bazę aktywów oraz gęstość projektów w strefach o najlepszych zasobach wiatrowych (Global Wind Energy Council, 2025a).

W ujęciu zasobów zainstalowanych IRENA szacuje, że na koniec 2024 roku globalna moc wiatrowa osiągnęła ok. 1 133 GW, co sytuowało wiatr w ścisłej czołówce technologii odnawialnych pod względem zdolności wytwórczych. Ta wielkość odpowiada konsekwentnemu trendowi długookresowemu, w którym udział wiatru w nowo oddawanych mocach utrzymuje się na wysokim poziomie, a struktura geograficzna wzrostu rozciąga się od rynków dojrzałych po gospodarki wschodzące (IRENA, 2025a).

Rozkład technologiczny sektora pozostaje zdominowany przez projekty lądowe według *International Energy Agency* (IEA) ok. 93% skumulowanej mocy w 2023 roku stanowił onshore, przy 7% udziału offshore, przy czym to ostatnie rozwija się na wczesnym etapie ekstensywnej ekspansji geograficznej. Dysproporcja ta wynika z niższych barier implementacyjnych, krótszych łańcuchów dostaw i mniejszych nakładów kapitałowych per MW na lądzie, choć wysoka produktywność morskich farm wiatrowych sukcesywnie poprawia konkurencyjność segmentu offshore (IEA, 2024a).

Jednocześnie rynek morski osiągnął w 2024 roku 83,2 GW łącznej mocy, mimo że nowe przyłączenia, wynoszące ok. 8 GW, były niższe niż rok wcześniej. Rekordowa aktywność aukcyjna oraz przyznanie 56,3 GW nowych projektów stworzyły jednak solidny bufor wzrostu na kolejne lata. Z perspektywy portfela inwestycyjnego oznacza to rosnący pipeline oraz głębszą dywersyfikację flot pływających i stałofundamentowych, z koncentracją w Europie oraz Azji, ale rosnącą obecnością projektów w Ameryce Północnej (GWEC, 2025b).

W Europie energia wiatru utrzymuje się jako jeden z filarów generacji: w 2024 roku wytworzyła ok. 17-17,5% energii elektrycznej w UE, przy dalszym wzroście podaży OZE oraz spadku roli węgla w miksie, co podkreśla strategiczną funkcję wiatru w stabilizacji produkcji bezemisyjnej. Relatywnie słabsze warunki wiatrowe w części roku ograniczały wykorzystanie nowych mocy, co unaocznia znaczenie zmienności pogodowej dla wolumenu generacji i potrzebę komplementarnych rozwiązań systemowych (Reuters, 2025).

Prognozy krótkookresowe wskazują na przyspieszenie ekspansji do 2030 roku, pod warunkiem wdrożenia reform w zakresie wzorców aukcyjnych, pozwoleń oraz przyłączeń. IEA przewiduje podwojenie tempa przyrostu mocy w latach 2024-2030 względem 2017-2023, co wymaga korekt w praktykach regulacyjnych i modernizacji sieci przesyłowych. Odpowiedź polityk publicznych w Europie, USA i Indiach stanowi zatem kluczowa determinanta realnego tempa wzrostu (IEA, 2024b).

2.3.3. Oddziaływanie na środowisko i społeczności lokalne

W perspektywie cyklu życia elektrownie wiatrowe należą do technologii o niskim śladzie węglowym. Metaanalizy harmonizujące wyniki LCA wskazują mediany na poziomie od kilku do kilkunastu gramów CO₂-eq/kWh dla instalacji lądowych (onshore) i wartości od kilkunastu do kilkudziesięciu gramów dla instalacji morskich (offshore), co plasuje je zdecydowanie poniżej technologii opartych na paliwach kopalnych bez wychwytywania CO₂. Wartości te implikują znaczne korzyści klimatyczne już w krótkich horyzontach eksploatacyjnych, nawet przy konserwatywnych założeniach dotyczących miks materiałowego oraz intensywności emisji łańcuchów dostaw (UNECE, 2021).

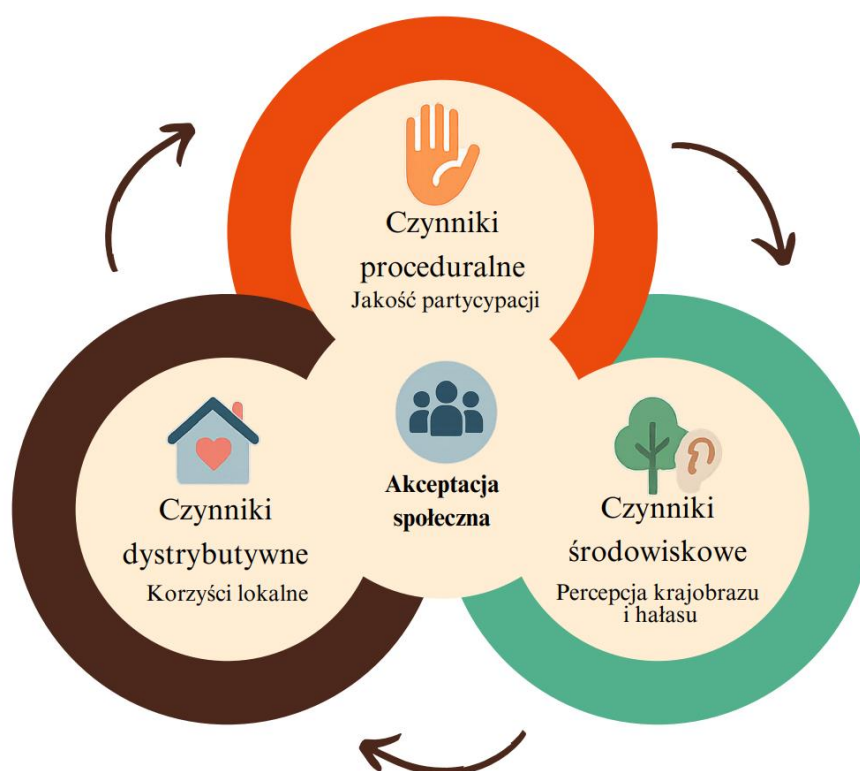
Jednocześnie rozwój sektora generuje wymierne presje na elementy środowiska. Najlepiej udokumentowanym problemem jest śmiertelność nietoperzy w wyniku kolizji i barotraumy, zidentyfikowana jako wiodąca przyczyna antropogenicznej śmiertelności tej grupy kręgowców w otoczeniu turbin. Skala tego zjawiska jest zróżnicowana regionalnie i taksonomicznie, co wymaga adaptacyjnych strategii eksploatacyjnych (Voigt, 2024).

Rosnący korpus dowodów empirycznych potwierdza skuteczność ograniczania pracy turbin przez podnoszenie prędkości załączenia („cut-in”) w okresach wysokiej aktywności nietoperzy.

Metaanalizy wskazują stały, istotny statystycznie spadek liczby kolizji przy relatywnie niewielkiej utracie produkcji energii, co czyni tę interwencję narzędziem pierwszego wyboru w planach zarządzania oddziaływaniami (Whitby, O'Mar, Huso, Frick 2024).

Poza śmiertelnością bezpośrednią istotne są efekty wypierania przestrzennego ptaków i ssaków lądowych. Badania syntetyczne sugerują, że wybrane taksony mogą unikać obszarów w promieniu do kilku kilometrów od instalacji, co pociąga za sobą konieczność kompensacji siedliskowej oraz starannego trasowania infrastruktury dojazdowej (Tolvanen, Routavaara, Jokikokko, Rana, i in., 2023).

Wskaźniki akceptacji społecznej wpływają bezpośrednio na zdolność wdrożeniową sektora, a literatura wskazuje, że heterogeniczność metodologiczna pomiarów utrudnia porównania międzynarodowe, lecz wspólnym mianownikiem pozostają czynniki proceduralne, dystrybutywne i środowiskowe (rysunek 14). Rzetelne kształtowanie procesów deliberacyjnych oraz udział społeczności na wczesnych etapach planowania są krytyczne dla minimalizacji sporów.



Rysunek 14. Wskaźniki akceptacji społecznej.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Deconstructing Viewshed Analysis Makes It Possible to Construct a Useful Visual Impact Map for Wind Projects”, J.F. Palmer, 2022, *Landscape and Urban Planning*, 225, s. 104423.

W perspektywie cyklu życia elektrownie wiatrowe zaliczają się do technologii o niskim śladzie węglowym. Metaanalizy harmonizujące wyniki LCA wskazują mediany na poziomie od kilku do kilkunastu gramów CO₂-eq/kWh dla instalacji lądowych (onshore) i od kilkunastu do kilkudziesięciu gramów dla instalacji morskich (offshore), co lokuje je zdecydowanie poniżej technologii opartych na paliwach kopalnych bez wychwytywania CO₂.

Dowody geograficzno-empiryczne uzupełniają analizy globalne: mapowanie rozmieszczenia istniejącej floty turbin wskazuje wzorce skupień, korytarzy widokowych i konfliktów z walorami krajobrazu, co ułatwia planowanie kompensacji i strefowania inwestycji. Zastosowanie zintegrowanych baz przestrzennych pozwala lepiej przewidywać kumulatywne oddziaływania wizualne w skali regionów (Gleason i in., 2025).

W relacji z lokalnymi społecznościami kluczowa jest jakość procesu planistycznego oraz narzędzia partycypacyjne. Zastosowanie public participation GIS (PPGIS) w decyzjach dotyczących OZE umożliwia transparentną identyfikację miejsc konfliktowych, preferencji mieszkańców oraz scenariuszy alternatywnych, zwiększając legitymizację decyzji i ograniczając ryzyko sporów sądowych (Rösch i in., 2025).

Mimo wysokiego poparcia deklaratywnego w wielu państwach europejskich, praktyka wdrożeniowa bywa utrudniana przez spory prawne i proceduralne. Przykłady regionalne pokazują, że skumulowane odwołania mogą czasowo paraliżować rozwój portfela projektów, co z kolei wpływa na stabilność inwestycji przemysłowych uzależnionych od dostępu do zielonej energii. Zidentyfikowane bariery potwierdzają potrzebę usprawnienia ścieżek pozwoleń i wzmocnienia standardów konsultacji (Reuters, 2025).

Z perspektywy makro-środowiskowej rosnący udział OZE, w tym wiatru, wiąże się statystycznie z niższą degradacją środowiska w ujęciu porównawczym krajów UE, co ilustrują badania panelowe nad relacją wykorzystania OZE i wskaźników presji środowiskowej. Wynik ten wzmacnia argumentację na rzecz przyspieszenia integracji wiatru z systemem energetycznym jako narzędzia polityki środowiskowej (Sompolska-Rzechuł, Bąk, Becker, Marjak, Perzyńska, 2024).

2.3.4. Perspektywy i kierunki rozwoju energetyki wiatrowej

Trajektoria wzrostu sektora do 2030 roku zależy w dużej mierze od reform regulacyjnych oraz zdolności sieci do absorpcji zmiennych strumieni mocy, a aktualne prognozy zakładają znaczące przyspieszenie przyrostów, jeśli poprawie ulegną procesy aukcyjne, przyłączeniowe i administracyjne, a rozwiązania elastyczności systemowej (magazyny, elastyczny popyt) zostaną skalowane proporcjonalnie do podaży mocy wiatrowych. Perspektywa ta pozostaje spójna z celami neutralności klimatycznej dużych gospodarek (IEA, 2024b).

W segmencie offshore obserwuje się szybki postęp w technologiach pływających, który otwiera dostęp do głębokich akwenów i rozszerza mapę lokalizacji poza tradycyjne szelfy. Jednocześnie globalna podaż projektów potwierdzona w aukcjach w 2024 roku kreuje „pipeline”, umożliwiający efekt skali w produkcji komponentów oraz usług portowych, co może obniżyć koszty kapitałowe w średnim okresie (GWEC, 2025b).

Równolegle, w obszarze planowania przestrzennego oraz wyboru lokalizacji, standardem staje się integracja metod wielokryterialnych z systemami GIS, co porządkuje konflikty wymogów środowiskowych, społecznych oraz technicznych. Zastosowania MCDA-GIS przy wyborze miejsc posadowienia farm wiatrowych dokumentują wzrost transparentności procesu i lepsze wyniki środowiskowe dzięki precyzyjniejszej analizie ryzyk (Moltames i in., 2022). Najnowsze europejskie badania podkreślają, że łączenie środowiskowych kryteriów z ograniczeniami technologicznymi i prawnymi, w tym ze strefami wykluczeń, pozwala na optymalizację rozmieszczenia projektów oraz ograniczenie konfliktów społecznych.

Przykłady z obszarów wyspiarskich wskazują, że odpowiednie planowanie skali i rozmieszczenia instalacji umożliwi minimalizację oddziaływania na obszary wrażliwe przy jednoczesnym osiąganiu założonych celów energetycznych (Bertsiou, Theochari, Gergatsoulis, Gerakianakis, Baltas, 2025).

Na poziomie systemowym coraz większą uwagę poświęca się integracji wiatru z innymi technologiami OZE oraz magazynowaniem. Konstrukcje hybrydowe (wiatr-PV-magazyn) zmniejszają wahania profilu generacji oraz poprawiają wskaźniki wykorzystania infrastruktury sieciowej. Zastosowanie narzędzi decyzyjnych i danych przestrzennych wspiera projektowanie takich układów w skali regionalnej i krajowej (Sainz-Ortiz, Somohano-Rodriguez, Pascual-Muñoz, Arroyo, Manana, 2024).

Wyzwania społeczne pozostaną kluczowym czynnikiem granicznym. Najnowsze przeglądy wskazują, że akceptacja wiatru jest relatywnie wysoka w ujęciu porównawczym, lecz wymaga wzmocnienia jakości i wiarygodności metod partycypacyjnych, aby przekładała się na płynność decyzji lokalizacyjnych. Ujednolicenie metodologii badań akceptacji ułatwi porównania i lepsze adresowanie barier (Görsch, Perlaviciute, Steg, 2025).

Należy też oczekiwać intensyfikacji działań w obszarze repoweringu dojrzałych farm, co przynosi znaczące przyrosty produkcji przy mniejszym śladzie przestrzennym niż projekty greenfield. Modernizacja istniejących turbin oraz zagęszczanie układu z zastosowaniem zaawansowanych metod oceny oddziaływania zarówno wizualnego, jak też środowiskowego stanowią preferowane strategie w regionach charakteryzujących się ograniczoną dostępnością terenów pod nowe inwestycje (Financial Times, 2024).

2.4. Hybrydowe systemy odnawialnych źródeł energii

Hybrydowe systemy odnawialnych źródeł energii stanowią zintegrowane układy przetwarzania energii, w których co najmniej dwie technologie OZE, często wraz z magazynowaniem energii i elementami zarządzania popytem, współdziałają w celu zwiększenia niezawodności dostaw, ograniczenia zmienności generacji oraz minimalizacji kosztów i wpływu na środowisko w całym cyklu życia. Współczesne podejście łączy perspektywę energetyczną, środowiskową i zarządczą, podkreślając rolę miksów instrumentów polityki publicznej, norm systemowych i narzędzi cyfrowych do planowania, sterowania i oceny tych układów (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2025). Znaczenie rozwiązań hybrydowych rośnie z dekarbonizacją sektorów trudnych do elektryfikacji, rozwojem sieci inteligentnych i upowszechnieniem rozproszonych źródeł energii, którym towarzyszy integracja przepływów energii, informacji i materiałów w paradygmacie gospodarki o obiegu zamkniętym (Ciula i in., 2024).

2.4.1. Charakterystyka systemów hybrydowych

Podstawą teoretyczną systemów hybrydowych jest komplementarność zasobów, czyli statystyczne i sezonowe różnice w profilu podaży energii. PV oraz wiatr (onshore i offshore) uzupełniają się wzajemnie, biogaz pełni rolę źródła sterowalnego, a geotermia dostarcza stabilnej bazy cieplnej.

Odpowiednie zestawienie tych technologii pozwala ograniczyć wahania produkcji i zmniejszyć zapotrzebowanie na moce rezerwowe (Chou, Ngo, Tran, 2023). Modelowanie portfeli źródeł ujmuje się jako optymalizację wielokryterialną, która uwzględnia niezawodność, koszty, ślad środowiskowy, presję przestrzenną i akceptację społeczną. Prowadzi to do budowy funkcji celu i ograniczeń powiązanych z danymi przestrzennymi (Yuan i in., 2022).

Magazynowanie energii pełni funkcję sprzęgła między źródłami a odbiorem: magazyny elektrochemiczne bilansują krótkoterminowe fluktuacje, podczas gdy magazyny ciepła i wodór lub biometan, w zależności od architektury systemu mogą zapewniać bilans w horyzontach dobowych oraz sezonowych. Dobór architektury hybrydowych magazynów dla stabilnej produkcji zielonego wodoru wymaga sprzężenia decyzji operacyjnych (sterowanie) i inwestycyjnych (wielkość zasobników) (Ji, Rossi, Monforti Ferrario, Mennilli, Comodi, 2025). Systemy sterowania wykorzystują metody data-driven, w tym uczenie głębokie dla danych szeregów czasowych oraz danych czaso-przestrzennych, aby przewidywać generację, zapotrzebowanie i stany sieci oraz wyznaczać reguły zarządzania energią (Wang, Cao, Yu, 2022).

W planowaniu, projektowaniu i eksploatacji hybrydowych OZE kluczową rolę odgrywają systemy GIS i wysokowydajne obliczenia geoinformacyjne, umożliwiające łączenie danych meteorologicznych, środowiskowych, infrastrukturalnych i społecznych w skalowalnych analizach lokalizacyjnych oraz symulacyjnych (Michels i in., 2024). Perspektywa rozwojowa obejmuje chmury obliczeniowe i silniki geoprzetwarzania do pracy na danych wielkoskalowych, co sprzyja ocenie komplementarności zasobów w różnych horyzontach czasowych oraz wariantowaniu topologii układów hybrydowych (Zhang, Xiang, Yue, Gong, Wu, 2024).

Na poziomie standardów i ładu danych znaczenie mają ramy interoperacyjności oraz metadanych, które zapewniają wtórne wykorzystanie i audytowalność danych środowiskowo-energetycznych wykorzystywanych w ocenie wariantów hybrydowych (Řezník i in., 2022). W praktyce zarządczej wdrażanie systemów hybrydowych koreluje z systemami zarządzania zrównoważonym rozwojem (SMSS), które porządkują struktury, role i praktyki organizacyjne w celu osiągania celów środowiskowych oraz energetycznych (Silva i in., 2020). W organizacjach przemysłowych integracja hybrydowych źródeł z procesami operacyjnymi jest wzmacniana przez programy normalizacyjne ukierunkowane na gospodarkę cyrkularną i ekoinnowacje (Kafel, Nowicki, 2023). W ujęciu systemowym hybrydy wpisują się w zintegrowane planowanie przestrzenno-energetyczne, łączące polityki zagospodarowania przestrzennego, transportu i energetyki w celu realizacji celów zrównoważonego rozwoju (Stoeglehner, 2020). Wreszcie, bibliometryczne przeglądy integracji OZE potwierdzają, że hybrydyzacja odgrywa wzrastającą rolę jako wektor równoczesnego wzrostu gospodarczego, bezpieczeństwa energetycznego i redukcji presji środowiskowej (Dirma, Neverauskienė, Tvaronavičienė, Danilevičienė, Tamošiūnienė, 2024).

2.4.2. Korzyści środowiskowe i energetyczne

Hybrydowe systemy odnawialnych źródeł energii stanowią jedno z najbardziej obiecujących rozwiązań transformacji energetycznej, gdyż łączą różne technologie OZE i elementy elastyczności, takie jak magazyny energii czy jednostki biogazowe. Dzięki temu mogą one jednocześnie zwiększać efektywność wykorzystania lokalnych

zasobów, ograniczać negatywne oddziaływania środowiskowe, a także wzmacniać bezpieczeństwo dostaw. W literaturze podkreśla się, że układy hybrydowe odgrywają rolę nie tylko w dekarbonizacji, ale również w poprawie jakości życia społeczności lokalnych poprzez ograniczanie ubóstwa energetycznego i rozwój obiegu zamkniętego. Na rysunku 15 zestawiono kluczowe korzyści środowiskowe, społeczne i systemowe wynikające z wdrażania hybrydowych konfiguracji OZE.



Rysunek 15. Schemat korzyści wynikających z zastosowania hybrydowych systemów odnawialnych źródeł energii.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Assessment of impact of use of renewable energy sources on level of energy poverty in EU countries”, I. Bąk, K. Wawrzyniak, M. Oesterreich, 2024, *Energies*, 17(24), s. 6241; „Conversion of sewage sludge into biofuels via different pathways and their use in agriculture: A comprehensive review”, Z. Kowalski, A. Makara, J. Kulczycka, A. Generowicz, P. Kwaśnicki, J. Ciuła, A. Gronba-Chyła, 2024, *Energies*, 17(6), s. 1383; „Realising the Potential of Renewable Energy as a Tool for Energy Security in Small Island Developing States”, W. Leal Filho, A.-L. Balogun, D. Surroop, A.L. Salvia, K. Narula, C. Li, J.D. Hunt, A. Gatto, A. Sharifi, H., S. Tsani, H. Azadi, 2022, *Sustainability*, 14(9), s. 4965; „Multi-Criteria Decision Methods for Selecting a Wind Farm Site Using a Geographic Information System (GIS)”, R. Moltames, M.S. Naghavi, M. Silakhori, Y. Noorollahi, H. Yousefi, M. Hajiaghaei-Keshteli, B. Azizimehr, 2022, *Sustainability*, 14(22), s. 14742; „Dynamic Web-Based GIS Tool for Pre-Feasibility Evaluation of Renewable Energy Projects”, E. Sainz-Ortiz, F.M. Somohano-Rodriguez, P. Pascual-Muñoz, A. Arroyo, M. Manana, 2024, *Energy Conversion and Management*, 322, s. 119162; „Positive Energy Districts Enabling Smart Energy Communities”, D. Siakas, H. Rahanu, E. Georgiadou, K. Siakas, G. Lampropoulos, 2025, *Energies*, 18(6), s. 3131; „The Use of Renewable Energy Sources and Environmental Degradation in EU Countries”, A. Sompolska-Rzechuła, I. Bąk, A. Becker, H. Marjak, J. Perzyńska, 2024, *Sustainability*, 16(23), s. 10416; „Air Quality Benefits of Renewable Energy: Evidence from China’s Renewable Energy Heating Policy”, A. Tang, Y. Zhu, W. Gu, C. Wang, 2024, *Sustainability*, 16(21), s. 9268; „The Location of Solar Farms within England’s Ecological Landscape: Implications for Biodiversity Conservation”, E. Tinsley, J.S.P. Froidevaux, G. Jones, 2024, *Journal of Environmental Management*, 372, s. 123372.

2.4.3. Przykłady istniejących połączeń technologii

Elektrownie wykorzystujące odnawialne źródła energii (OZE) charakteryzują się zmiennością produkcji, silnie zależną od warunków meteorologicznych, co generuje fluktuacje w dostawie energii elektrycznej. Ponadto, niektóre technologie OZE, takie jak farmy wiatrowe czy biogazownie, mogą spotkać się z oporem społeczności lokalnych ze względu na potencjalny wpływ na środowisko naturalne. Należy jednak zaznaczyć, że skala tych negatywnych skutków jest istotnie mniejsza w porównaniu do tradycyjnych źródeł energii (Feroz, Zo, Chiravuri, 2021).

Zgodnie z ustawową definicją (Dz.U. z 2015 r., poz. 478), hybrydowa instalacja OZE to zespół urządzeń, w którym moc wytwórcza poszczególnych komponentów nie przekracza 80% całkowitej mocy systemu. Energia z tych urządzeń jest wprowadzana do sieci elektroenergetycznej za pośrednictwem urządzenia łączącego, a kluczowym elementem jest magazyn energii, który powinien dostarczać co najmniej 5% rocznej produkcji.

Hybrydowe instalacje OZE są rzadko spotykane w Polsce, co skutkuje ograniczoną świadomością społeczną ich działania. Instalacja fotowoltaiczna hybrydowa łączy systemy on-grid i off-grid z magazynem energii, umożliwiając gromadzenie nadwyżek produkcji i wykorzystanie ich w okresach niedostępności energii odnawialnej (Michalski, Polański, Nemś, 2024).

Inwestycje w hybrydowe instalacje OZE oferują szereg korzyści, w tym zwiększenie lokalnej produkcji energii i redukcję zależności od zewnętrznych źródeł. Taki system, łączący różne źródła energii (np. fotowoltaikę oraz energię wiatrową) z magazynem energii, zapewnia większą stabilność dostaw dla odbiorców i odpowiada na postulat konsumpcji energii w miejscu jej wytworzenia. Dodatkowo, połączenie z siecią elektroenergetyczną zwiększa bezpieczeństwo energetyczne systemu (Urząd Regulacji Energetyki, 2025).

Lokalne zużycie energii obniża koszty i wspiera stabilność krajowego systemu elektroenergetycznego, szczególnie w kontekście rosnącego zapotrzebowania oraz tendencji do zastępowania konwencjonalnych źródeł energią o zmiennej produkcji. Inwestycje w hybrydowe instalacje OZE, łączące stabilne źródła (np. biogazownie) z odnawialnymi (wiatr, PV), są kluczowe dla transformacji energetycznej, a także poprawy jakości środowiska. Optymalnie zaprojektowane systemy te mogą osiągać wysoki stopień wykorzystania mocy zainstalowanej elektrycznej, co zwiększa efektywność korzystania z dostępnych instrumentów wsparcia (Feroz, Zo, Chiravuri, 2021).

Tabela 4 przedstawia główne konfiguracje hybrydowych źródeł odnawialnych wraz z krótkim opisem ich działania, jak również przykładami miejsc, w których są stosowane.

Tabela 4

Konfiguracje hybrydowych źródeł energii odnawialnej, ich działanie i przykłady zastosowań

Konfiguracja	Działanie	Miejsce występowania (przykłady)
PV + Wiatr	PV produkuje w dzień, a wiatr często nocą i zimą, więc profile się uzupełniają. Wspólne przyłącze i sterowanie redukują ścinki mocy i wygładzają profil.	Australia – Kennedy Energy Park; USA – rosnące projekty PV + wiatr
PV + Magazyn (BESS)	PV generuje energię w dzień, a magazyn (BESS – <i>Battery Energy Storage System</i>) pozwala na jej przechowanie i wykorzystanie poza godzinami produkcji, zwiększając poziom własnego zużycia i stabilność pracy systemu.	USA – setki projektów (288 PV + BESS do 2023 roku) – dominująca hybryda
Wiatr + Magazyn (BESS)	Turbiny ładują baterie przy silnym wietrze, gdy ceny są niskie. Magazyn stabilizuje podaż, dostarczając moc przy spadkach.	USA – 19 projektów do 2023 roku, stosowane także w systemach wyspowych
PV + Wiatr + Magazyn	Źródła PV i wiatr dostarczają energię i ładują baterie w różnych porach. Magazyn zapewnia dostawy quasi-ciągłe, umożliwiając produkt „firm power”.	RPA – Scatec Kenhardt (540 MW PV + 225 MW/1,1 GWh BESS)
PV + Hydro (FPV + Hydro)	PV i FPV (<i>Floating Photovoltaics</i>) działa w dzień, a hydro reguluje przepływ i uzupełnia moc poza godzinami słonecznymi. Wspólne sterowanie optymalizuje zrzuty i zmniejsza zmienność.	Brazylia, Azja – FPV na zbiornikach retencyjnych elektrowni wodnych (Singapur, Indie)
CSP + PV (+ TES)	PV dostarcza tanią energię w dzień, a CSP (<i>Concentrated Solar Power</i>) gromadzi ciepło w magazynach TES (<i>Thermal Energy Storage</i>), dzięki czemu po zmroku może dalej wytwarzać prąd i wydłużać czas produkcji.	Chile – Cerro Dominador, Maroko – Noor Midelt
Wiatr + Hydro	Nadwyżki energii z wiatru mogą być wykorzystywane do pompowania wody do zbiornika górnego, a w okresie szczytu spływająca woda napędza turbiny, dostarczając elastyczną moc.	Hiszpania (El Hierro – Gorona del Viento)

Źródło: opracowanie własne na podstawie *EYA Guidelines for Utility-Scale PV Projects*, International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS), 2025; *Concentrating Solar Power: Technology Brief*, International Renewable Energy Agency (IRENA), 2021, Abu Dhabi: IRENA; *Hybrid Tracking Systems: Emerging Trends in U.S. Hybrid Power Plants*, Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), 2024, Berkeley, CA: LBNL; *Hybrid Energy Systems: Complementarity of Wind and Solar Resources*, National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2023, Golden, CO: U.S. Department of Energy, NREL; *Annual Technology Baseline (ATB): Hybrid PV+BESS Configurations*, National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2023, Golden, CO: U.S. Department of Energy, NREL; *Where Sun Meets Water: Floating Solar Handbook for Practitioners*, World Bank, Solar Energy Research Institute of Singapore (SERIS), 2019, Washington, DC: World Bank.

3. PRAWNE ASPEKTY PLANOWANIA I PROJEKTOWANIA WYBRANYCH OBIEKÓW ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII

Rozwój odnawialnych źródeł energii jest silnie uwarunkowany nie tylko aspektami technologicznymi i ekonomicznymi, ale przede wszystkim ramami prawnymi, które wyznaczają możliwości planowania i realizacji inwestycji. Regulacje krajowe i unijne określają procedury związane z lokalizacją instalacji, oceną oddziaływania na środowisko, przyłączeniem do sieci czy udziałem społeczności lokalnych w procesach decyzyjnych. Tym samym prawo stanowi narzędzie zarówno wspierania transformacji energetycznej, jak i potencjalnego źródła barier administracyjnych (Hazemba, Halog, 2021).

Znaczenie aspektów prawnych rośnie wraz z koniecznością wdrażania polityki klimatyczno-energetycznej i realizacją celów neutralności klimatycznej. W przypadku fotowoltaiki, energetyki wiatrowej czy biogazu to właśnie regulacje determinują tempo rozwoju i skalę inwestycji, wpływając na poziom bezpieczeństwa energetycznego, koszty wytwarzania energii i akceptację społeczną. Analiza prawnych uwarunkowań planowania i projektowania stanowi zatem klucz do zrozumienia, jak ramy regulacyjne kształtują praktykę wdrażania technologii odnawialnych i jakie stwarzają możliwości w zakresie zrównoważonego rozwoju (Escobar-Pemberthy, Ivanova, 2020).

3.1. Uwarunkowania prawne rozwoju energetyki słonecznej w Polsce

Budowanie elektrowni fotowoltaicznych staje się coraz bardziej popularne w Polsce. Choć przedsięwzięcie to jest proekologiczne, to nie zwalnia ono z obowiązku przestrzegania oraz stosowania aktualnie obowiązujących przepisów prawa. Aby wybudować farmę fotowoltaiczną, należy zaprojektować jej wielkość, moc, położenie i konstrukcję w oparciu o niżej wymienione akty prawne i normatywne.

Pierwszym aktem prawnym, który musi zostać uwzględniony, jest Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne (Dz.U. z 2024 r., poz. 266). Celem tej ustawy jest zapewnienie rozwoju kraju we wszystkich aspektach dotyczących energii. Prawo to pomaga zapewnić bezpieczeństwo energetyczne państwa i ma za zadanie przeciwdziałać działaniom monopolistycznym, czyli działaniom rynkowym, w których sprzedaje oraz produkuje tylko jeden przedsiębiorca. Polityka energetyczna państwa ma zapewnić odbiorcom stałą dostawę energii. Określa warunki użytkowania wyprodukowanej energii. Każde przedsiębiorstwo wytwarzające energię, zgodnie z art. 44 (Ewidencja księgowa i sprawozdania finansowe przedsiębiorstw energetycznych), musi:

- sporządzić roczne sprawozdanie finansowe zgodnie z przyjętymi procedurami;
- prowadzić badania i analizy strat oraz zysków energii wyprodukowanej w określonym czasie.

Następnym aktem prawnym obowiązującym przy tego rodzaju inwestycji jest Ustawa z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania

na środowisko (Dz.U. z 2023 r., poz. 1094). Dotyczy ona zasad dostępu do informacji środowiskowych, udziału społeczeństwa w procesach decyzyjnych oraz oceny wpływu planowanych przedsięwzięć na środowisko.

Kolejnym aktem prawnym, który należy uwzględnić na etapie projektowania, jest Ustawa z dnia 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym (Dz.U. z 2003 r., Nr 80, poz. 717 z późn. zm.). Reguluje ona kwestie związane z ustalaniem lokalizacji inwestycji celu publicznego, wydawaniem decyzji o warunkach zabudowy i sporządzaniem miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego w gminach.

Ważna w tej kwestii jest także Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane (Dz.U. z 2024 r., poz. 338 z późn. zm.). Po zaprojektowaniu instalacji fotowoltaicznej, w oparciu o powyższą ustawę, można ubiegać się o pozwolenie na budowę elektrowni fotowoltaicznej. Aby uzyskać zgodę na budowę farmy fotowoltaicznej, należy dostarczyć:

- odpowiedni wniosek;
- projekt budowlany;
- oświadczenie o prawie do dysponowania nieruchomością do celów budowlanych;
- decyzję środowiskową;
- warunki zabudowy.

Uzyskanie pozwolenia na budowę jest uzależnione od stopnia skomplikowania projektu i trwa od jednego do kilku miesięcy (Dz.U. z 1994 r., Nr 89, poz. 414).

Kolejnym ważnym aktem prawnym jest Ustawa z dnia 3 lutego 1995 r. o ochronie gruntów rolnych i leśnych (Dz.U. z 2024 r., poz. 82). Reguluje ona zasady ochrony gruntów rolnych i leśnych oraz rekultywacji i poprawiania wartości użytkowej gruntów. Przewiduje także ograniczanie przeznaczania gruntów na cele nierolnicze i nieleśne, a także precyzuje możliwości wyłączania gruntów z produkcji rolniczej lub leśnej. Zadaniem ustawy jest też zapobieganie degradacji gruntów i określenia zasad ich zagospodarowania. Ustawa przewiduje i uprawnia do pobierania dochodów dla budżetu województwa, związanego z wyłączeniem z produkcji rolnej gruntów rolnych.

Następnym aktem prawnym jest Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 17 grudnia 2019 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku (Dz.U. z 2019 r., poz. 2448). Rozporządzenie to określa dopuszczalne poziomy pól elektromagnetycznych w środowisku, zróżnicowane w zależności od rodzaju terenu, w szczególności dla obszarów przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową i miejsc dostępnych dla ludności.

Kolejnym dokumentem prawnym jest Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 2 czerwca 2016 r. w sprawie wymagań dla sprzętu elektrycznego (Dz.U. z 2016 r., poz. 806). Określa ono szczegółowe wymagania dotyczące sprzętu elektrycznego przeznaczonego do użytkowania przy napięciu nominalnym od 50 V do 1000 V prądu przemiennego i od 75 V do 1500 V prądu stałego. Rozporządzenie określa również:

- procedurę oceny zgodności sprzętu elektrycznego;
- zakres dokumentacji technicznej dla sprzętu elektrycznego;
- sposób oznakowania sprzętu elektrycznego i elementy deklaracji zgodności.

Istotne jest również Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 30 października 2002 r. w sprawie minimalnych wymagań dotyczących bezpieczeństwa i higieny pracy w zakresie użytkowania maszyn przez pracowników podczas pracy (Dz.U. z 2002 r., Nr 191, poz. 1596 z późn. zm.). Określa ono wymagania dotyczące użytkowania, budowy, sterowania, kontroli i bezpiecznej eksploatacji maszyn w celu ograniczenia ryzyka wypadków przy pracy.

Należy także wspomnieć o Rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 10 września 2019 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko (Dz.U. z 2019 r., poz. 1839 z późn. zm.). Określa ono rodzaje przedsięwzięć, które mogą w znaczący sposób wpływać na środowisko naturalne i zasady kwalifikowania ich do obowiązku przeprowadzenia oceny oddziaływania na środowisko. W kontekście inwestycji fotowoltaicznych akt ten precyzuje, w jakich przypadkach budowa farmy fotowoltaicznej wymaga sporządzenia raportu OOS bądź też uzyskania decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach przedsięwzięcia.

3.2. Uwarunkowania prawne budowy i funkcjonowania biogazowni w Polsce

Problematyka budowy biogazowni w Polsce została uregulowana w polskim porządku prawnym. Unormowania regulujące działalność w zakresie wytwarzania biogazu rolniczego i energii elektrycznej pochodzącej z niego zawarte są w ustawie Prawo energetyczne oraz ustawie o odnawialnych źródłach energii. Szczegóły budowy biogazowni określa ustawa o ułatwieniach w przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie biogazowni rolniczych, a także ich funkcjonowaniu (Dz.U. z 2023 r., poz. 1597).

Budowa biogazowni wymaga uzyskania szeregu decyzji i pozwoleń od władz lokalnych. Mogą się one różnić w zależności od rodzaju działalności i lokalizacji biogazowni. Wymagane są licencje, pozwolenia i zgody od lokalnych organizacji rządowych, organizacji ochrony środowiska i innych właściwych organów. Ponadto każda biogazownia musi być wpisana do rejestru wytwórców biogazu rolniczego prowadzonego przez Krajowy Ośrodek Wsparcia Rolnictwa. Aby pobudzić rynek biogazu, w 2023 roku wprowadzono specustawę biogazową, ułatwiającą procedurę realizacji tego typu inwestycji poprzez przyspieszenie procesu wydawania wymaganych decyzji. Ponadto biogazownie na terenie gospodarstwa o powierzchni nie większej niż 1 ha zostały zwolnione z obowiązku zmiany przeznaczenia gruntów.

Ustawa ta umożliwia budowę biogazowni rolniczej na terenie do 1 ha terenu należącym do zakładu przetwórstwa rolno-spożywczego, gdy w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego ujęto przeznaczenie związane z rolnictwem, produkcją lub magazynowaniem. Również dla biogazowni rolniczej o mocy powyżej 1 MW przewidziano możliwość szczególnego trybu lokalizacji na podstawie uchwały lokalizacyjnej rady gminy (Dz.U. z 2023 r., poz. 1597).

Biogazownie powyżej mocy 1 MW korzystają z systemu aukcyjnego, czyli systemu wsparcia dla wytwórców energii elektrycznej z OZE w Polsce. Urząd Regulacji Energetyki ogłasza aukcje (konkursy), w których biorą udział inwestorzy. W systemie aukcyjnym nie biorą zazwyczaj udziału inwestorzy, którzy chcą wybudować biogazownie o mocy niższej niż 1 MW. Dla małych biogazowni bardziej opłacalna jest taryfa FiT lub taryfa FiP.

Taryfy te mają obowiązywać przez 15 lat, ale tylko do końca 2035 roku. Taryfa FiT polega na sprzedaży niewykorzystanej energii do sprzedawcy zobowiązanego, a taryfa FiP polega na znalezieniu odbiorcy energii, który zakupi ją jednorazowo. Dodatkowo system FiT umożliwia sprzedaż energii elektrycznej z biogazu po stałej cenie równej 95% ceny referencyjnej. System FiP umożliwia sprzedaż energii elektrycznej z biogazu po stałej cenie równej 90% ceny referencyjnej. Cena referencyjna ustalona jest w rozporządzeniu Ministra Klimatu i Środowiska (Dz.U. z 2015 r., poz. 478).

Biogazownie o większej mocy mają większe możliwości tworzenia nowych gałęzi przemysłu. Przykładem jest produkcja nawozów naturalnych z substancji pofermentacyjnych. Polska posiada duży potencjał jako rynek sprzedający biogaz. Wzrost nowych inwestycji w biogazownię jest widoczny w statystykach produkcji energii z OZE. Dodatkowo znacząca pozycja sektora rolno-spożywczego w Polsce pozwala zapewnić odpowiednią ilość surowców do produkcji biogazu. Warto więc, też ze względu na dynamicznie zmieniające się uwarunkowania prawne, obserwować ten rynek (Dz.U. z 2015 r., poz. 478).

W przypadku planowanej budowy biogazowni rolniczej obowiązek uzyskania decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach (DUŚ) zależy od wielkości instalacji oraz jej lokalizacji. Zgodnie z rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 10 września 2019 roku w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko (Dz.U. z 2019 r., poz. 1839 z późn. zm.), biogazownie rolnicze o mocy powyżej 0,5 MW zaliczane są do przedsięwzięć mogących potencjalnie znacząco oddziaływać na środowisko. Organ właściwy do wydania decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach (najczęściej wójt, burmistrz lub prezydent miasta) może, po analizie karty informacyjnej przedsięwzięcia, nałożyć obowiązek przeprowadzenia oceny oddziaływania na środowisko (OOS).

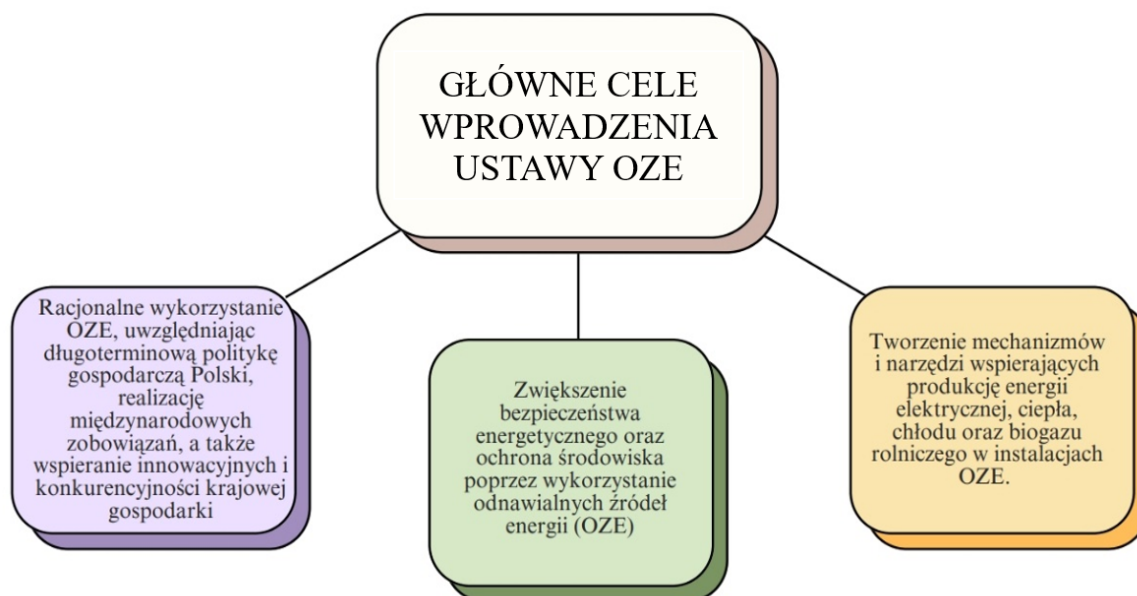
Biogazownie o mocy powyżej 1 MW zaliczane są już do przedsięwzięć zawsze znacząco oddziałujących na środowisko, co oznacza, że przeprowadzenie pełnej procedury OOS oraz uzyskanie decyzji o uwarunkowaniach środowiskowych (DUŚ) jest w ich przypadku obowiązkowe.

Dla biogazowni rolniczych o mocy nieprzekraczającej 0,5 MW, zlokalizowanych na terenach przeznaczonych w planie zagospodarowania przestrzennego pod działalność rolniczą lub produkcyjną, DUŚ zazwyczaj nie jest wymagana, o ile przedsięwzięcie nie znajduje się w pobliżu obszarów chronionych (obszarów Natura 2000).

3.3. Uwarunkowania prawne energetyki wiatrowej w Polsce

Podstawowym dokumentem prawnym regulującym rozwój energetyki wiatrowej na lądzie w Polsce jest Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii, zwana inaczej „*Ustawą OZE*”. Wprowadza ona do polskiego prawa postanowienia Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r., która promuje wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych, zastępując i uchylając wcześniejsze dyrektywy: 2001/77/WE i 2003/30/WE (European Parliament and the Council, 2018).

Rysunek 16 ukazuje główne cele wprowadzenia Ustawy OZE (Dz.U. z 2015 r., poz. 478).



Rysunek 16. Główne cele wprowadzenia ustawy OZE.

Źródło: opracowanie własne na podstawie Ustawy z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz.U. z 2015 r., poz. 478).

Z punktu widzenia lądowej energetyki wiatrowej, ustawa OZE reguluje następujące kwestie:

- zasady i warunki prowadzenia działalności związanej z wytwarzaniem energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii, w tym energii wiatrowej;
- mechanizmy oraz narzędzia wspierające produkcję energii elektrycznej w instalacjach OZE, takie jak system aukcyjny i system wsparcia oparty na świadectwach pochodzenia;
- zasady wydawania gwarancji pochodzenia energii elektrycznej produkowanej w instalacjach OZE, które stanowią dobrowolny instrument wsparcia, poświadczający, że energia została wyprodukowana bez emisji gazów cieplarnianych, choć nie przyznają one praw majątkowych jak świadectwa pochodzenia;
- kary finansowe, które Prezes Urzędu Regulacji Energetyki może nakładać na producentów energii. W rozumieniu ustawy OZE instalacją jest np. farma wiatrowa, czyli zespół urządzeń służących do wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych.

Kwestie związane z przyłączaniem instalacji OZE do sieci energetycznej są nadal regulowane przez Ustawę z dnia 10 kwietnia 1997 r. – Prawo energetyczne. Ustawa OZE, wraz z przepisami Prawa energetycznego, wspólnie tworzą ramy prawne dla funkcjonowania lądowej energetyki wiatrowej w Polsce.

Ważnym aktem prawnym jest także Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych, która wprowadziła zasadę 10H, zakazującą budowy elektrowni wiatrowych w odległości mniejszej niż dziesięciokrotność wysokości elektrowni od budynków mieszkalnych i obszarów chronionych. W efekcie znacząco ograniczyła rozwój lądowej energetyki wiatrowej (Dz.U. z 2016 r., poz. 961).

Z kolei 23 kwietnia 2023 roku weszła w życie nowelizacja ustawy z dnia 9 marca 2023 roku dotycząca inwestycji w elektrownie wiatrowe. Nowelizacja utrzymuje zasadę 10H, ale dopuszcza możliwość ustalenia w planie zagospodarowania przestrzennego innej, minimalnej odległości, wynoszącej co najmniej 700 m. Przepisy dotyczące udziału mieszkańców gmin jako prosumentów wirtualnych wejdą w życie w 2024 roku (Dz.U. z 2023 r., poz. 553).

W pierwotnej wersji projektu rząd zaproponował, żeby minimalna odległość, jaką można ustalić w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego, wynosiła 500 m. Ostatecznie jednak Sejm przyjął nowelizację z poprawką, która zwiększyła minimalną odległość do 700 m od budynków mieszkalnych lub budynków o funkcji mieszanej, w których znajduje się część mieszkalna, jako warunek lokalizacji i budowy elektrowni wiatrowych (Teraz Środowisko, 2023).

Nowelizacja ustawy wiatrakowej nie zmieniła zasad lokalizacji elektrowni wiatrowych, które nadal muszą być ustalane na miejscowych planach zagospodarowania przestrzennego (MPZP), zgodnie z art. 4 ust. 1 Ustawy z dnia 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym. Miejscowy Plan Zagospodarowania Przestrzennego, zgodnie z ustawą, musi określać wysokość, średnicę wirnika oraz liczbę turbin wiatrowych, obejmując obszar, na którym elektrownie mają być zlokalizowane, z uwzględnieniem minimalnej odległości 700 m od zabudowań. Zachowanie tej odległości jest obowiązkowe już na etapie sporządzania MPZP, ze względu na konieczność przeprowadzenia strategicznej oceny oddziaływania na środowisko, zgodnie z ustawą z 2008 roku o udostępnianiu informacji o środowisku. Uchwały dotyczące MPZP, które nie spełniają tych wymogów, mogą zostać zaskarżone do Wojewódzkiego Sądu Administracyjnego i unieważnione w całości lub części. Wojewoda posiada nadzór nad uchwałami rady gminy i może je uchylić w przypadku naruszeń, co uniemożliwi publikację planu (Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej, 2024).

Ustawa wiatrakowa umożliwia zaskarżenie uchwały rady gminy dotyczącej MPZP przewidującego lokalizację lądowych elektrowni wiatrowych przez właścicieli i użytkowników wieczystych nieruchomości mieszkalnych, znajdujących się w odległości mniejszej, niż wynikającej z zasady 10H lub 700 m od planowanej elektrowni. Skarżący nie muszą wykazywać interesu prawnego ani udowadniać, że ich interes został naruszony, co w innych przypadkach mogłoby utrudniać skuteczne zaskarżenie MPZP. Naczelny Sąd Administracyjny podkreśla, że brak planu miejscowego wyklucza możliwość wydania decyzji o warunkach zabudowy dla elektrowni wiatrowych.

Nowelizacja ustawy wiatrakowej wprowadziła obowiązek sporządzania miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego dla całego obszaru gminy, w której mają być lokalizowane elektrownie wiatrowe. Zakazuje ona też ich lokalizacji na terenach parków narodowych, rezerwatów przyrody, parków krajobrazowych oraz obszarów Natura 2000, zgodnie z ustawą o ochronie przyrody z 2004 roku. Dodatkowo, elektrownie wiatrowe muszą być oddalone od parków narodowych zgodnie z zasadą 10H, a od rezerwatów przyrody co najmniej 500 m. Ustawa nałożyła też na wójtów, burmistrzów i prezydentów miast obowiązek przeprowadzenia przynajmniej jednej publicznej dyskusji, w ciągu 30 dni od uchwały o przystąpieniu do sporządzenia MPZP i po ogłoszeniu o wyłożeniu projektu planu do publicznego wglądu. Nowelizacja ustawy ma także zastosowanie do postępowań o pozwolenie na budowę elektrowni wiatrowych, które zostały wszczęte przed jej wejściem w życie (Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości, 2025).

Prosument wirtualny to odbiorca końcowy, który wytwarza energię z OZE na własne potrzeby, w instalacji przyłączonej do sieci dystrybucyjnej, lecz znajdującej się w innym miejscu niż punkt dostawy energii. Instalacja ta nie jest podłączona do wewnętrznej sieci budynku wielolokalowego. Ponadto, dla odbiorców innych niż gospodarstwa domowe, produkcja energii nie może stanowić głównej działalności gospodarczej. Zgodnie z nowelizacją ustawy wiatrakowej, inwestor budujący elektrownię wiatrową ma obowiązek przeznaczyć co najmniej 10% mocy zainstalowanej na potrzeby mieszkańców gminy przez 15 lat od pierwszego wytworzenia energii i jej wprowadzenia do sieci. Mieszkańcy mogą zgłaszać chęć objęcia udziału do 2 kW mocy na każdy punkt poboru energii. W przypadku nadmiernego zapotrzebowania, moc zostanie proporcjonalnie rozdzielona. Ta regulacja jest nowością, gdyż wcześniejsze przepisy nie przewidywały takiej możliwości. Przepis nie dotyczy inwestycji z pozwoleniem na budowę przed 2 lipca 2024 roku (Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości, 2025).

Zmiany wprowadzone w Ustawie z dnia 9 marca 2023 r. o inwestycjach w elektrownie wiatrowe oraz niektórych innych ustawach można uznać za liberalizację wcześniejszych przepisów, szczególnie w zakresie regulacji dotyczących minimalnych odległości lokalizacji elektrowni wiatrowych. Nowelizacja ta, oprócz realizacji Polityki Energetycznej Polski 2040 (PEP2040), ma na celu także osiągnięcie celów pakietu „Fit for 55”, ogłoszonego przez Unię Europejską 14 lipca 2021 roku. Pakiet ten zakłada redukcję emisji gazów cieplarnianych o co najmniej 55% do 2030 roku i osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 roku. Osiągnięcie tych celów bez rozwoju odnawialnych źródeł energii (OZE) jest niemożliwe (Komisja Europejska, 2025).

Nowelizacja ustawy wiatrakowej jest kolejnym krokiem w realizacji założeń „Fit for 55”, ponieważ rozwój energetyki wiatrowej zwiększy udział zielonej energii w Polsce, jednocześnie zmniejszając zapotrzebowanie na energię z elektrowni ciepłych, które nadal dominują w polskim miksie energetycznym. Działalność energii wiatrowej w Polsce jest regulowana przez przepisy dotyczące odnawialnych źródeł energii oraz ochrony środowiska. Ważne są także regulacje określające lokalizację turbin i zasady wspierania rozwoju tego sektora (Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości, 2025).

Ważnym dokumentem jest Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 10 września 2019 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko (Dz.U. z 2019 r., poz. 1839 z późn. zm.), określające rodzaje przedsięwzięć, które mogą w istotny sposób wpływać na środowisko naturalne, oraz przypadki, w których wymagane jest uzyskanie decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach (DUŚ). W odniesieniu do energetyki wiatrowej akt ten precyzuje, że budowa elektrowni wiatrowych o określonej mocy i wysokości wież kwalifikuje się do przedsięwzięć zawsze znacząco oddziałujących na środowisko, co oznacza obowiązek przeprowadzenia oceny oddziaływania na środowisko (OOS). Procedura ta ma na celu ograniczenie potencjalnego wpływu inwestycji na krajobraz, przyrodę oraz zdrowie ludzi.

4. SYSTEMY INFORMACJI PRZESTRZENNEJ W PLANOWANIU LOKALIZACJI OZE

Systemy Informacji Przestrzennej (SIP) to nowoczesne narzędzia, które integrują dane powiązane z lokalizacją geograficzną, umożliwiając ich gromadzenie, analizę i wizualizację. Kluczową cechą tych systemów jest możliwość łączenia współrzędnych przestrzennych z charakterystyką geometryczną obiektów, co pozwala na precyzyjne odwzorowanie kształtu, wymiarów i położenia elementów przestrzeni (Bielecka, 2006). Tak zdefiniowane dane stają się podstawą nie tylko dla planowania i projektowania inwestycji, lecz także dla zarządzania infrastrukturą oraz monitorowania zmian w środowisku (Widacki, 2004). Dzięki temu SIP odgrywają coraz większą rolę w gospodarce przestrzennej, wspierając procesy decyzyjne administracji publicznej, biznesu i instytucji badawczych (Gao, Mai, 2018).

W literaturze podkreśla się także znaczenie rozróżnienia między Systemem Informacji Geograficznej (GIS) a Systemem Informacji o Terenie (SIT). GIS bazuje głównie na danych wtórnych oraz mapach średnio- i małoskalowych, co sprawia, że jest szeroko wykorzystywany do analiz przestrzennych oraz wizualizacji danych o charakterze regionalnym czy globalnym. SIT pracuje z kolei na danych pierwotnych, pozyskiwanych z pomiarów geodezyjnych lub wielkoskalowych zdjęć lotniczych, co pozwala na bardzo dokładne odwzorowanie zjawisk w skali lokalnej. W praktyce oba systemy wzajemnie się uzupełniają: GIS dostarcza ogólnego obrazu przestrzeni, a SIT pozwala na szczegółowe analizy oraz podejmowanie decyzji operacyjnych (Kochanek, Generowicz, Załona, 2025c).

4.1. Definicje i terminologia systemów przestrzennych

Systemy Informacji Przestrzennej (SIP), w tym Geograficzne Systemy Informacji (GIS), przedstawione w tabeli 5, stanowią dziś jedno z kluczowych narzędzi w procesie planowania i rozwoju odnawialnych źródeł energii (OZE). W dobie transformacji energetycznej, ukierunkowanej na dekarbonizację i redukcję emisji gazów cieplarnianych, precyzyjna analiza przestrzenna pozwala na dobór optymalnych lokalizacji dla inwestycji, integrację nowych technologii z istniejącą infrastrukturą, a także minimalizowanie oddziaływania na środowisko naturalne oraz społeczeństwo (Goodchild, 2010).

GIS nie tylko wspiera proces decyzyjny, ale także umożliwia symulację różnych scenariuszy rozwoju, np. rozmieszczenia farm wiatrowych w zależności od prędkości i kierunku wiatru czy potencjału nasłonecznienia na danym obszarze. Wdrażanie SIP w planowanie OZE staje się więc nieodzownym elementem zarówno w polityce energetycznej państw, jak też w strategiach przedsiębiorstw energetycznych (Smith, Goodchild, Longley, 2020).

Tabela 5

Terminologia systemów informacji przestrzennej

Terminologia	Opis
SIP Systemy Informacji Przestrzennej	Obejmują zintegrowane zestawy narzędzi informatycznych, baz danych, algorytmów analitycznych i technik wizualizacyjnych, które umożliwiają kompleksową pracę z danymi przestrzennymi. SIP pozwalają nie tylko na ich gromadzenie, lecz także na dynamiczne modelowanie procesów zachodzących w przestrzeni geograficznej.
GIS Geographic Information System	Definiowany jest jako system komputerowy, który umożliwia wprowadzanie, przechowywanie, analizowanie i wizualizowanie danych przestrzennych. Jego podstawową cechą jest możliwość powiązania informacji opisowych (atrybutów) z ich lokalizacją przestrzenną, co pozwala na wielowymiarową analizę zjawisk. GIS bywa traktowany jako fundament współczesnych badań nad przestrzenią, a jego rozwój określa się mianem <i>GIScience</i> – nauki o systemach informacji geograficznej (Litwin i in., 2017).
SIT Spatial Information Technology	Jest natomiast terminem bardziej ogólnym, odnoszącym się do całego zestawu technologii wykorzystywanych do pozyskiwania i analizy danych geoprzestrzennych, w tym m.in. teledetekcji, systemów nawigacji satelitarnej (GPS, Galileo), modelowania 3D czy baz danych przestrzennych.

Źródło: opracowanie własne na podstawie *Systemy Informacji Geograficznej: Teoria i zastosowanie*, E. Bielecka, 2003, Warszawa: Wydawnictwo Polsko-Japońskiej Akademii Technik Komputerowych; *GIS. Obszary zastosowań*, D. Gotlib, A. Iwaniak, R. Olszewski, 2007, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN; „Twenty years of progress: GIScience in 2010”, M.F. Goodchild, 2010, *Journal of Spatial Information Science*, 1, s. 3-20.

4.2. Modele i struktury danych przestrzennych

W ramach SIP funkcjonują dwa podstawowe modele danych przestrzennych: wektorowy oraz rastrowy, które w praktyce często są ze sobą łączone w analizach hybrydowych, co zostało przedstawione w tabeli 6.

Tabela 6

Modele danych przestrzennych i ich zastosowanie w analizach przestrzennych

Terminologia	Opis
Model wektorowy	Model wektorowy reprezentuje przestrzeń za pomocą punktów, linii i poligonów, co umożliwia opis obiektów dyskretnych, takich jak działki, sieci przesyłowe czy lokalizacje elektrowni. Topologia pozwala analizować relacje przestrzenne, np. sąsiedztwo. W planowaniu OZE służy m.in. do oceny odległości instalacji od obszarów chronionych.
Model rastrowy	Dzieli przestrzeń na regularną siatkę pikseli, gdzie każda komórka zawiera określoną wartość. Jest niezastąpiony w analizie danych ciągłych (nasłonecznienia, pokrycia terenu, kierunku i siły wiatru czy ukształtowania terenu). W badaniach nad potencjałem OZE model rastrowy umożliwia np. tworzenie map zasobów energetycznych na podstawie danych satelitarnych.
Topologia	Jest to zestaw reguł określających powiązania między obiektami wektorowymi, przykładowo która linia przylega do którego poligonu. Dzięki niej możliwe jest modelowanie sieci przesyłowych energii, identyfikacja węzłów krytycznych czy analiza spójności infrastruktury.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „*Systemy informacji geograficznej: teoria i zastosowania*”, E. Bielecka, 2006, Warszawa: Wydawnictwo Polsko-Japońskiej Wyższej Szkoły Technik Komputerowych.

4.3. Funkcje, analizy i wizualizacje przestrzenne

Podstawową zaletą SIP jest możliwość wykonywania zaawansowanych analiz przestrzennych na warstwach tematycznych. Tabela 7 przedstawia główne funkcje systemów informacji przestrzennej, obejmujące organizację danych w postaci warstw tematycznych, wykonywanie analiz przestrzennych oraz wizualizację wyników.

Tabela 7

Funkcje, analizy i metody wizualizacji w systemach informacji przestrzennej

Terminologia	Opis
Warstwy tematyczne	Dane w GIS organizowane są w postaci warstw. Przykładowo, w analizie lokalizacji farm wiatrowych można nakładać na siebie warstwy: prędkości wiatru, ukształtowania terenu, odległości od sieci energetycznych i ograniczeń środowiskowych (Kang, Li, Liu, 2020).
Analizy przestrzenne	Obejmują m.in. obliczanie buforów (np. stref ochronnych wokół obszarów Natura 2000), analizę widoczności (dla oceny wpływu turbin wiatrowych na krajobraz), czy analizę wielokryterialną (MCDA), która pozwala na wybór najbardziej optymalnych lokalizacji pod względem ekonomicznym, ekologicznym i społecznym (Kochanek, 2025b).
Wizualizacja danych	Wyniki analiz mogą być prezentowane w formie map, wykresów, modeli 3D czy interaktywnych paneli. Rozwój nowoczesnych koncepcji, takich jak kataster wielowymiarowy, wspiera możliwości opisu i analizy przestrzeni w kontekście planowania energetyki odnawialnej (Litwin, Gniadek, Budkowski, 2022).

Źródło: opracowanie własne na podstawie „GIS-Based Spatial Analysis of Healthcare Accessibility: A Review of Recent Literature and Future Directions”, C. Kang, Y. Li, L. Liu, 2020, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(14), s. 5151.

SIP znajdują szerokie zastosowanie w planowaniu i eksploatacji OZE, co zostało pokazane w tabeli 8.

Tabela 8

Zastosowanie SIP

Terminologia	Opis
Administracja publiczna	Wykorzystuje SIP do planowania przestrzennego, wydawania decyzji środowiskowych i monitorowania realizacji inwestycji. SIP wspiera również tworzenie strategii energetycznych gmin i powiatów.
Środowisko	SIP umożliwia analizę wpływu inwestycji OZE na ekosystemy, krajobraz i klimat lokalny. W połączeniu z danymi teledetekcyjnymi możliwe jest monitorowanie zmian w użytkowaniu gruntów czy wpływu instalacji na migracje ptaków.
Transport	SIP służą do planowania tras przesyłu energii, lokalizacji stacji ładowania pojazdów elektrycznych czy integracji OZE z inteligentnymi systemami transportowymi
Rolnictwo i biogaz	Dzięki SIP można ocenić potencjał biomasy w danym regionie, wskazać najbardziej opłacalne lokalizacje biogazowni oraz ocenić wpływ inwestycji na produkcję rolną

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Biogas production – A review on composition, fuel properties, feedstock and principles of anaerobic digestion”, B. Bharathiraja, T. Sudharsana, J. Jayamuthunagai, P. Ramanujam, C. Sivasankaran, J. Iyyappan, 2018, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, s. 570-582; „Przegląd technologii produkcji biogazu”, J. Kwaśny, M. Banach, Z. Kowalski, 2012, *Czasopismo Techniczne*, 17(109), 83-102.

4.4. Pozyskiwanie, gromadzenie i integracja danych geoprzestrzennych

Jednym z głównych wyzwań w pracy z SIP jest dostęp do danych o odpowiedniej jakości i rozdzielczości. Źródła danych zostały przedstawione w tabeli 9.

Tabela 9

Źródła i integracja danych w systemach informacji przestrzennej

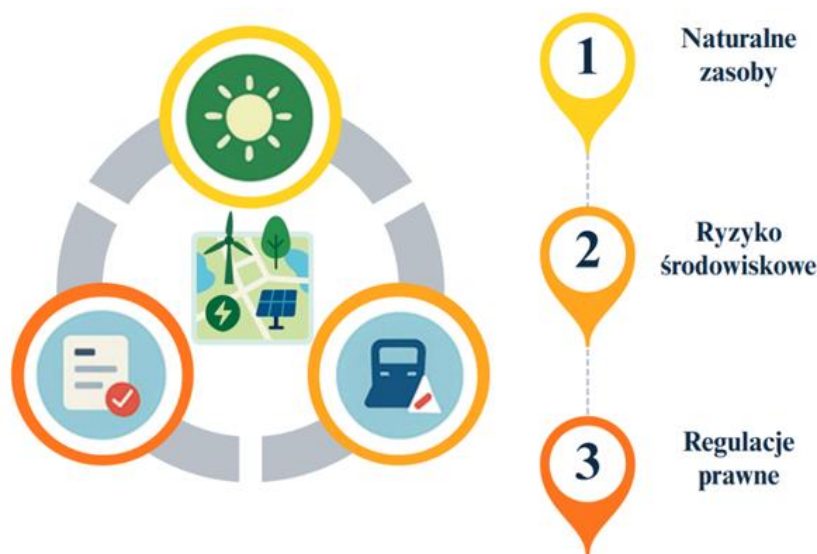
Terminologia	Opis
Mapy tematyczne	Stanowią podstawowe źródło informacji o warunkach przestrzennych. Mogą obejmować mapy pokrycia terenu, mapy glebowe, mapy nasłonecznienia czy mapy korytarzy ekologicznych. W planowaniu OZE mapy tematyczne pozwalają np. na wykluczenie obszarów chronionych.
Bazy referencyjne	Obejmują dane o granicach administracyjnych, sieciach transportowych i energetycznych, ukształtowaniu terenu czy warunkach meteorologicznych. Integracja różnych baz pozwala na kompleksową ocenę potencjału inwestycyjnego danego regionu.
Integracja danych	Dzięki standardom interoperacyjności (np. INSPIRE w UE) możliwe jest łączenie danych z różnych źródeł: rejestrów państwowych, danych satelitarnych, baz meteorologicznych czy lokalnych pomiarów. Zintegrowane bazy umożliwiają przeprowadzanie wieloaspektowych analiz i prognoz, np. w zakresie produkcji energii w zależności od warunków klimatycznych.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Wpływ regulacji prawnych na gospodarkę odpadami komunalnymi w wybranych gminach wiejskich”, A. Sobolewska, M. Sobolewski, 2017, *Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego. Ekonomia i Organizacja Gospodarki Żywnościowej*, 120, s. 89-95.

5. ANALIZY ŚRODOWISKOWE W PLANOWANIU LOKALIZACJI ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII

Rozwój odnawialnych źródeł energii (OZE) stanowi kluczowy element transformacji energetycznej, ukierunkowanej na redukcję emisji i wzrost bezpieczeństwa energetycznego. Wraz ze wzrostem znaczenia instalacji fotowoltaicznych, wiatrowych i biogazowych, rośnie zapotrzebowanie na narzędzia umożliwiające precyzyjną ocenę przestrzenną i środowiskową potencjalnych lokalizacji. Szczególną rolę odgrywają tu systemy informacji geograficznej (GIS), które integrując dane środowiskowe, techniczne i społeczno-ekonomiczne, umożliwiają tworzenie modeli planistycznych wspierających procesy decyzyjne (Moltames i in., 2022).

GIS znajduje zastosowanie w analizie zasobów naturalnych, ocenie barier infrastrukturalnych i prawnych, a także redukcji ryzyka środowiskowego oraz inwestycyjnego. W połączeniu z metodami wielokryterialnego wspomaganie decyzji (MCDA) pozwala wskazywać obszary optymalne dla farm wiatrowych, instalacji PV, biogazowni czy małych elektrowni wodnych, co zaprezentowano na rysunku 17 (Prieto-Amparán i in., 2021).



Rysunek 17. Zastosowanie GIS w planowaniu lokalizacji odnawialnych źródeł energii.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „A Regional GIS-Assisted Multi-Criteria Evaluation of Site-Suitability for the Development of Solar Farms”, J.A. Prieto-Amparán, A. Pinedo-Alvarez, C.R. Morales-Nieto, M.C. Valles-Aragón, A. Álvarez-Holguín, F. Villarreal-Guerrero, 2021, *Land*, 10, s. 217.

Ważnym kierunkiem rozwoju jest integracja GIS z analizą dużych zbiorów danych i sztuczną inteligencją. Platformy obliczeniowe, takie jak Google Earth Engine oraz algorytmy uczenia maszynowego zwiększają dokładność prognoz dotyczących produkcji energii oraz ryzyka lokalizacyjnego. Dzięki temu GIS przekształca się z klasycznego narzędzia kartograficznego w podstawę zaawansowanych modeli optymalizacyjnych, wspierających transformację energetyczną (Hochmair, Juhász, Li, 2025).

5.1. Metody analiz przestrzennych w lokalizacji i ocenie potencjału odnawialnych źródeł energii

Metody GIS stosujące wielokryterialne metody wspomagania decyzji (MCDA) stanowią obecnie trzon procedur lokalizacyjnych dla OZE, pozwalając systematycznie łączyć kryteria środowiskowe, przestrzenne, prawne i ekonomiczne w celu wyznaczania obszarów preferencyjnych dla farm wiatrowych i fotowoltaicznych (PV) oraz ich wariantów hybrydowych (wiatr, PV) (Moltames i in., 2022; Prieto-Amparán i in., 2021; Bertsiou, Theochari, Gergatsoulis, Gerakianakis, Baltas, 2025). W przypadku energetyki wiatrowej dojrzałe ramy SMCA/AHP uzupełnia się o analizy ograniczeń i wrażliwości, co potwierdzają studia klasyczne i najnowsze prace wdrożeniowe w warunkach krajowych, gdzie dodatkowo konfrontuje się modele teoretyczne z uwarunkowaniami praktycznymi (Miller, Li, 2014; Yousefi, Motlagh, Montazeri, 2022; Amsharu, Łaska, 2023; Amsharuk, Łaska, 2024). Nowsze prace integrują MCDA z oceną cyklu życia (LCA), umożliwiając jednoczesne ważenie aspektów przestrzennych oraz śladu środowiskowego na etapie preselekcji lokalizacji (Demir i in., 2024).

W fotowoltaice tradycyjne analizy zastępowane są zautomatyzowanymi narzędziami, łączącymi dane wysokościowe, modele promieniowania oraz kryteria dopuszczalności. Stosuje się je w analizach regionalnych, dachowych instalacjach PV oraz w rozwiązaniach typu BIPV, agro- czy akwafotowoltaice (Al-Abadi i in., 2025; Aziz i in., 2025; de L. Marcos-Castro i in., 2025; Jamroeni i in., 2024). Rozwiązania te coraz częściej wykorzystują dedykowane narzędzia open-source (np. SolarQGIS) oraz modelowanie 3D dla dokładniejszej estymacji zasobów słonecznych i cieniowania (Ilba, 2025; Adjiski i in., 2022). W ujęciu techniczno-ekonomicznym oceny potencjału rozszerza się o projekty hybrydowe (PV-desalination, PV-H₂), w których mapy przydatności łączą wskaźniki zasobowe z kosztami, dostępnością infrastruktury oraz ograniczeniami środowiskowymi (Dahri i in., 2025; Aziz i in., 2025).

W bioenergetyce i energii wodnej GIS wykorzystywany jest do kwantyfikacji dostępności substratów oraz sieci logistycznych, a także do identyfikacji biegów rzek o parametrach odpowiednich dla elektrowni przepływowych, przy jednoczesnym równoważeniu produkcji energii i wymogów ekosystemowych (Uyan, Ertunç, 2023; Kochanek, Kobylarczyk, 2024a). W praktyce wdrożeniowej w Polsce rozwijane są listy czynników geograficznych (np. odległości od zabudowy, sieci i obszarów chronionych) oraz reguły dyskwalifikacji, które podnoszą powtarzalność i przejrzystość analiz lokalizacyjnych (Amsharuk, Łaska, 2023; Amsharuk, Łaska, 2024).

5.2. Stan badań nad wykorzystaniem narzędzi GIS w energetyce odnawialnej

W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój narzędzi GIS wspierających planowanie i analizę inwestycji w odnawialne źródła energii. Zmiany te wynikają z coraz większej dostępności danych satelitarnych, rozwoju technologii obliczeń chmurowych i rosnącego znaczenia metod analiz wielkoskalowych. Dzięki platformom chmurowym badacze i praktycy mogą pracować na ogromnych zbiorach danych w skali krajowej czy nawet kontynentalnej, bez konieczności utrzymywania lokalnych serwerów obliczeniowych typu *High Performance Computing* (HPC). Pozwala to na szybkie i powtarzalne analizy potencjału OZE oraz ryzyk środowiskowych i inwestycyjnych (Gorelick i in., 2017; Michels i in., 2024; Zhang, Xiang, Yue, Gong, 2024).

Równolegle rozwijają się techniki przetwarzania równoległego i zarządzania danymi wielkoskalowymi. Dzięki nim powstają dobre praktyki, które umożliwiają bardziej efektywne i replikowalne analizy. Oznacza to, że te same modele i procedury można stosować w różnych regionach oraz projektach, co zwiększa porównywalność wyników i ich użyteczność dla decydentów (Werner, 2019; Zou, Song, Cervone, 2024; Helmi, Farhan, Nasr, 2018).

Kolejnym kierunkiem rozwoju są mobilne i webowe interfejsy GIS, które skracają drogę „od danych do decyzji”. Dzięki nim wyniki analiz są łatwiej dostępne dla inwestorów, samorządów czy społeczności lokalnych. Zamiast skomplikowanego oprogramowania desktopowego, coraz częściej korzysta się z aplikacji online, które pozwalają wizualizować potencjał OZE, oceniać ryzyka środowiskowe i generować raporty wspierające procesy decyzyjne (Gao, Mai, 2018; Sainz-Ortiz, Somohano-Rodriguez, Pascual-Muñoz, Arroyo, Manana, 2024).

Fundamentem całego systemu narzędzi pozostają standardy interoperacyjności danych i usług, takie jak wytyczne *Open Geospatial Consortium* (OGC) czy normy ISO. To one zapewniają spójność metadanych i umożliwiają łączenie różnych usług przestrzennych: map (WMS), danych wektorowych (WFS) czy danych rastrowych (WCS). Dzięki temu produkty analityczne mogą być zintegrowane w ramach jednego procesu planistycznego, co jest szczególnie istotne w energetyce, gdzie decyzje wymagają łączenia wielu źródeł danych (Brodeur, Coetzee, Danko, Garcia, Hjelmager, 2019; Open Geospatial Consortium, 2025; International Organization for Standardization, 2014).

W praktyce sektorowej widoczna jest też specjalizacja narzędzi GIS. Powstają dedykowane moduły do:

- modelowania promieniowania słonecznego i zacielenia 3D;
- inwentaryzacji potencjału dachowego z wykorzystaniem danych LiDAR – *Light Detection and Ranging*;
- szybkiej oceny wykonalności inwestycji dzięki darmowym i otwartym rozwiązaniom (FOSS – *Free and Open Source Software*).

Narzędzia te umożliwiają coraz dokładniejsze analizy i wspierają podejmowanie decyzji zarówno na poziomie lokalnym (wybór dachu pod instalację PV), jak też krajowym (planowanie mocy farm wiatrowych). Coraz częściej GIS staje się więc nie tylko narzędziem technicznym, ale integralnym elementem procesów planistycznych i politycznych związanych z transformacją energetyczną (Ilba, 2025; Adjiski, Kaplan, Mijalkovski, 2023; Tian, Zünd, Bettencourt, 2021; Marcos-Castro, Martín-Chivelet, Polo, 2025; Sainz-Ortiz, Somohano-Rodriguez, Pascual-Muñoz, Arroyo, Manana, 2024).

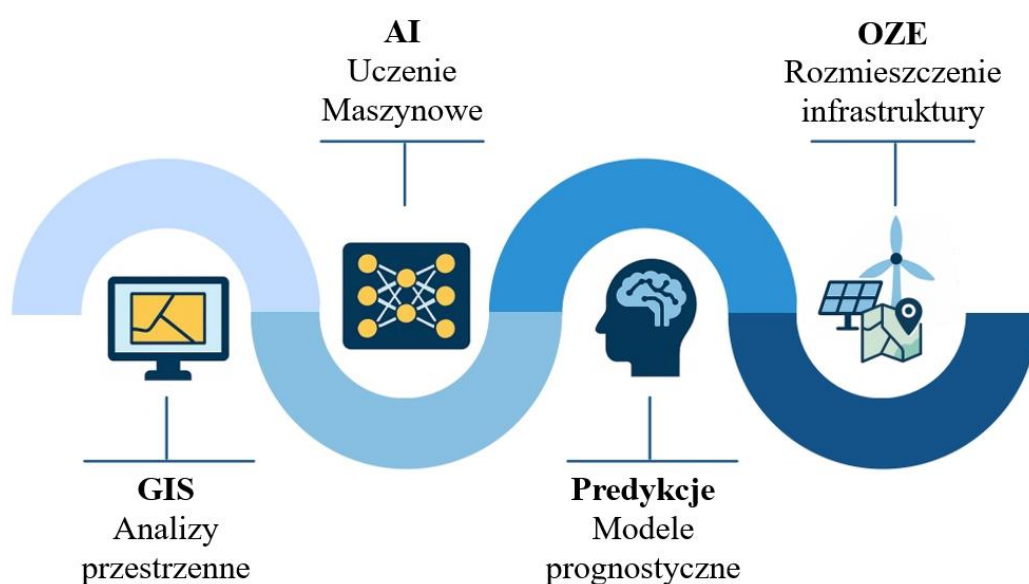
5.3. Integracja GIS i sztucznej inteligencji w modelowaniu, prognozowaniu i optymalizacji rozmieszczenia infrastruktury OZE

Integracja GIS oraz AI staje się kluczowa dla przejścia od statycznych map przydatności do dynamicznych, prognostycznych modeli rozmieszczenia infrastruktury OZE, obejmujących uczenie nadzorowane i nienadzorowane, a także głębokie sieci do modelowania zjawisk czasoprzestrzennych (Hochmair, Juhász, 2025; Wang, Cao, Yu, 2022).

Proces ten został zilustrowany na rysunku 18, gdzie przedstawiono integrację analiz przestrzennych GIS, metod sztucznej inteligencji oraz modeli predykcyjnych prowadzących do optymalnego rozmieszczenia infrastruktury OZE.

Zastosowania obejmują m.in. sprzężenie transformera, sieci neuronowych i automatu komórkowego do symulacji przekształceń urbanistycznych istotnych dla konkurencji o teren pod OZE, jak też łączenie sztucznej inteligencji (AI – *Artificial Intelligence*), z modelowaniem agentowym dla odwzorowania zachowań aktorów i popytu na infrastrukturę (Li i in., 2024; Guo, Liu, 2024). W segmencie PV oraz planowania gruntów, uczenie maszynowe na platformach chmurowych (GEE) służy do mapowania pokrycia oraz trendów, co wzmacnia wiarygodność prognoz zasobowych i ograniczeń środowiskowych (Feizizade, Omarzadeh, Kazemi Garajeh, Lakes, Blaschke, 2021; Tesfaye, Elias, Warkineh, Tekalign, Abebe, 2024).

Przykłady wykorzystania metod AI do optymalizacji jednostek kogeneracyjnych zasilanych biogazem pokazują potencjał takich rozwiązań w transformacji energetycznej (Gaska i in., 2023).



Rysunek 18. Integracja GIS i AI w optymalizacji rozmieszczenia infrastruktury OZE.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Advancing AI Driven Geospatial Analysis and Data Generation: Methods, Applications and Future Directions”, H.H. Hochmair, L. Juhász, H. Li, 2025, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14, s. 56.

W modelowaniu ryzyk i wielohazardowych uwarunkowań lokalizacyjnych skuteczne okazują się kompozycje algorytmów *Machine Learning* (ML) oraz metaheurystyk dla integracji wieloźródłowych danych przestrzennych, które można włączyć do pętli optymalizacji lokalizacyjnej (Bordbar, Aghamohammadi, Pourghasemi, Azizi 2022; Singha, Rana, Pham, Nguyen, Łupikasza, 2024).

Z kolei modele sekwencyjne (CNN-LSTM – *Convolutional Neural Network-Long Short-Term Memory*) i systemy rekomendacyjne rozwijają funkcje predykcyjne i operacyjne serwisów lokalizacyjnych związanych z eksploatacją OZE, np. w utrzymaniu czy zarządzaniu popytem (Pandey i in., 2024). Uzupełniając rozwija się pełna automatyzacja pipeline’ów od danych satelitarnych do estymacji potencjału dachowego i mocy, a także wykorzystanie generatywnej AI do skalowalnych analiz hydrologicznych na potrzeby lokalizacji OZE i infrastruktury towarzyszącej (Sullivan, Witayangkurn, 2025). W regionach o złożonej morfologii terenu integracja RS, GIS i MCDM z komponentami algorytmicznymi umożliwia bardziej realistyczną ocenę potencjału PV oraz kosztów implementacyjnych (Feng i in., 2025).

6. INTELIGENTNE SYSTEMY UCZENIA MASZYNOWEGO I MODELE JĘZYKOWE W PROCESACH DECYZYJNYCH

W ostatnich latach narzędzia złożone z uczenia maszynowego (ML) i dużych modeli językowych (LLM) stały się kluczowym elementem wspierania procesów decyzyjnych w administracji publicznej, sektorze energetycznym, finansowym oraz biznesie. Ich rosnące znaczenie wynika z coraz większej złożoności otoczenia regulacyjnego, technologicznego i społecznego, które generuje ogromne ilości danych wymagających szybkiego przetwarzania i interpretacji. Tradycyjne metody analizy nie są w stanie efektywnie radzić sobie z taką skalą i dynamiką informacji, dlatego algorytmy uczenia maszynowego oraz LLM stają się niezbędnym wsparciem dla decydentów (Aggeri, 2017).

Modele językowe nowej generacji potrafią nie tylko analizować duże zbiory dokumentów (akty prawne, raporty techniczne czy dane środowiskowe), ale również łączyć je w formie zrozumiałych podsumowań i rekomendacji (Li, Zhang, Wang, Feng, 2020). Dzięki temu proces podejmowania decyzji staje się bardziej przejrzysty, a dostęp do wiedzy szybki i intuicyjny. Co więcej, integracja LLM z uczeniem maszynowym umożliwia budowę systemów zdolnych do prognozowania skutków wdrażanych polityk publicznych, modelowania ryzyka gospodarczego i środowiskowego (Ye, Wu, Oguchi, Tang, Pei, Wu, 2025), a także wspierania działań operacyjnych w administracji czy sektorze prywatnym w czasie rzeczywistym (Wereda, Załona, 2020; Brom, Engemann, Breed, Pasgaard, Onaolapo, Svenning, 2023). Przegląd głównych obszarów wykorzystania ML i LLM przedstawiono w tabeli 10.

Tabela 10

Obszary wykorzystania ML i LLM oraz ich wpływ na podejmowanie decyzji

Obszar zastosowania	Funkcja systemów ML/LLM	Efekt końcowy
Regulacje prawne	Analiza zmian i streszczanie dokumentów	Ułatwione dostosowanie polityki i prawa
Gospodarka i energetyka	Prognozowanie trendów	Lepsze planowanie strategiczne
Klimat	Ocena ryzyka klimatycznego	Zmniejszenie podatności na zagrożenia
Inwestycje	Wsparcie procesów inwestycyjnych	Efektywniejsze decyzje biznesowe
Interfejs użytkownika	Przetwarzanie języka naturalnego	Zrozumiałość wyników dla niespecjalistów
Governance	Integracja danych i analiz	Spójny ekosystem decyzyjny (<i>smart governance</i>)

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Shaping the Image as a Management Instrument in the Contemporary Enterprise”, W. Wereda, T. Załona, 2020, Scientific Papers of Silesian University of Technology, *Organization and Management Series*, 145, s. 597-611.

Jednym z najbardziej dynamicznych kierunków rozwoju LLM jest połączenie ich z podejściem Retrieval-Augmented Generation (RAG). Metoda ta umożliwia wzbogacenie generacji językowej o bezpośredni dostęp do zewnętrznych baz wiedzy, co znacząco zwiększa rzetelność i aktualność odpowiedzi. W kontekście prawa oznacza to możliwość automatycznego wyszukiwania najnowszych zmian w aktach prawnych i przedstawiania ich w formie zwiezłych streszczeń (Aggeri i in., 2011).

Rozwiązania tego typu są szczególnie użyteczne w sektorach regulowanych, takich jak energetyka czy ochrona środowiska, gdzie tempo wprowadzania nowych dyrektyw i rozporządzeń wymaga stałego monitorowania. Dzięki LLM zintegrowanym z RAG możliwe jest bieżące powiązanie treści ustaw z ich praktycznymi konsekwencjami dla przedsiębiorstw oraz instytucji publicznych (Luisetto, Cabianca, Sahu, 2016). Co więcej, automatyczne generowanie streszczeń zwiększa przejrzystość informacji oraz wspiera prawo obywateli do dostępu do danych publicznych (Wereda, Załona, 2020).

Kolejnym kluczowym obszarem jest możliwość dostosowania LLM do konkretnych domen tematycznych przez technikę *Low-Rank Adaptation* (LoRA). Metoda ta pozwala na douczanie modeli na niewielkich zestawach danych przy zachowaniu wysokiej efektywności obliczeniowej. Dzięki temu organizacje mogą szybko i stosunkowo tanio budować wyspecjalizowane systemy analityczne, np. do analizy dokumentów środowiskowych czy raportów energetycznych (Helmi, Farhan, Nasr, 2018).

Zaletą LoRA jest to, że douczanie bazuje na zweryfikowanych źródłach, co zmniejsza ryzyko tzw. halucynacji modeli (Stojanovic, Stojanovic, 2013). Dzięki temu LLM mogą analizować złożone raporty łączące dane liczbowe i narracyjne, np. oceny oddziaływania na środowisko, zapewniając decydentom szybki i wiarygodny dostęp do kluczowych informacji (Todaro, Daddi, Testa, Iraldo, 2019).

Wdrażanie systemów opartych na ML i LLM wymaga rygorystycznej walidacji. Jednym z podstawowych narzędzi kontroli jakości są benchmarki, czyli zestandaryzowane testy pozwalające na ocenę skuteczności modeli w zadaniach takich jak klasyfikacja, streszczanie, prognozowanie. Umożliwiają one porównanie różnych rozwiązań oraz identyfikację modeli najbardziej odpowiednich do praktycznego zastosowania (Guo, Liu, 2024).

Drugim istotnym elementem są tzw. bramki decyzyjne (*decision gates*), które pełnią rolę filtrów bezpieczeństwa. W procesach wdrożeniowych pozwalają one na etapowe dopuszczanie technologii do praktyki – tylko te systemy, które spełnią kryteria jakościowe, mogą przejść do kolejnych faz implementacji (Zaresefat, Derakhshani, Griffioen, 2024). Rozwiązanie to ogranicza ryzyko związane z niepożądanymi błędami systemowymi i wpisuje się w koncepcję odpowiedzialnej sztucznej inteligencji (*responsible AI*), akcentującej przejrzystość i zgodność etyczną (Uribe, Ortiz-Marcos, Uruburu, 2018).

W przyszłości można oczekiwać standaryzacji tego typu benchmarków na poziomie międzynarodowym, podobnie jak w przypadku norm ISO w zarządzaniu jakością. Byłby to ważny krok w kierunku bezpiecznego oraz przewidywalnego wykorzystania LLM i ML w procesach decyzyjnych (Munyaka i in., 2023).

7. METODYKA OCENY LOKALIZACJI ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII

Proces oceny lokalizacji odnawialnych źródeł energii (OZE) stanowi kluczowy etap planowania i wdrażania projektów związanych z transformacją energetyczną. Od właściwego określenia kryteriów środowiskowych, planistycznych i infrastrukturalnych zależy bowiem zarówno efektywność ekonomiczna inwestycji, jak też jej zgodność z zasadami zrównoważonego rozwoju. Z jednej strony wymaga to szczegółowej analizy przestrzennej, a z drugiej zastosowania metod wielokryterialnych, które pozwalają na zintegrowanie różnorodnych uwarunkowań w spójny model decyzyjny. W praktyce oznacza to nie tylko wskazanie obszarów potencjalnie korzystnych dla rozwoju farm wiatrowych, fotowoltaicznych czy biogazowych, ale także uwzględnienie szeregu ograniczeń wynikających z prawa ochrony środowiska, zagospodarowania przestrzennego i możliwości przyłączeniowych do sieci elektroenergetycznej (Baseer, Rehman, Meyer, Alam, 2017).

Rzeczonych metod oceny lokalizacji OZE postępuje w kierunku integracji trzech głównych komponentów: kryteriów oraz ograniczeń przestrzennych, metod wielokryterialnego wspomaganie decyzji, a także procedur walidacyjnych, które pozwalają na sprawdzenie jakości oraz odporności uzyskanych wyników. Każdy z tych elementów ma odrębną rolę i wymaga zastosowania specyficznych narzędzi analitycznych.

7.1. Kryteria i ograniczenia lokalizacyjne

Pierwszym krokiem w metodyce oceny lokalizacji OZE jest identyfikacja kryteriów i ograniczeń (rysunek 19) determinujących możliwość realizacji inwestycji. Kryteria środowiskowe obejmują m.in. dostępność zasobów naturalnych, takich jak prędkość wiatru, nasłonecznienie oraz uwarunkowania wynikające z ochrony bioróżnorodności. Badania prowadzone w Arabii Saudyjskiej wykazały, że analiza przestrzenna oparta na GIS pozwala na precyzyjne określenie obszarów najbardziej sprzyjających lokalizacji farm wiatrowych z uwzględnieniem minimalizacji wpływu na ekosystemy (Jahangir, Razeghi, Naseri, Yousefi, Noorollahi, 2025; Elkadeem, Younes, Sharshir, Campana, Wang, 2021).

Jednym z istotnych aspektów są ograniczenia planistyczne, które wynikają z obowiązujących regulacji prawnych i planów zagospodarowania przestrzennego. W wielu krajach inwestycje OZE podlegają restrykcjom odległościowym w stosunku do zabudowy mieszkalnej, obszarów chronionych czy szlaków komunikacyjnych. Jak wskazano (Palmer, 2022), analiza widoczności turbin wiatrowych (tzw. *viewshed analysis*) jest istotnym elementem procesu planistycznego, gdyż wpływa na akceptację społeczną projektów. Podobne wnioski płyną z badań nad wpływem farm fotowoltaicznych na krajobraz przyrodniczy, gdzie wykazano znaczące ryzyko kolizji z celami ochrony bioróżnorodności (Tinsley, Froidevaux, Jones, 2024).



Rysunek 19. Kategorie kryteriów decydujących o lokalizacji inwestycji OZE.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Optimizing offshore wind export cable routing using GIS-based environmental heatmaps”, J.T. Backstrom, N.M. Warden, C.M. Walsh, 2024, *Wind Energy Science*, 9(3), s. 1105-1121; „The location of solar farms within England’s ecological landscape: Implications for biodiversity conservation”, E. Tinsley, J.S.P. Froidevaux, G. Jones, 2024, *Journal of Environmental Management*, 372, s. 123372.

Kolejnym ograniczeniem jest infrastruktura sieciowa. Koszty przyłączenia instalacji do sieci elektroenergetycznej i parametry przesyłowe determinują opłacalność inwestycji. T.D. Kontos, L. Katikas i M. Kavouras zaproponowali zastosowanie algorytmów wyznaczania tras kabli przesyłowych z użyciem metod najmniejszego kosztu (*least-costpath*), co pozwala na uwzględnienie zarówno aspektów technicznych, jak i środowiskowych. W przypadku projektów offshore GIS wykorzystywany jest do tworzenia tzw. map cieplnych (*heatmaps*), które wskazują najbardziej optymalne trasy eksportowe energii do lądu (Backstrom, Warden, Walsh, 2024).

Niezwykle istotne jest też uwzględnienie czynników społecznych. A. Kochanek (2025a) wskazuje, że percepcja lokalnych społeczności wobec biogazowni w Polsce jest silnie związana z ich lokalizacją, sąsiedztwem zabudowy i infrastrukturą wiejską. Podobne uwarunkowania występują w przypadku małych elektrowni wodnych, gdzie konieczne jest pogodzenie potrzeb energetycznych z wymogami środowiskowymi, np. zapewnieniem przepływów ekologicznych w rzekach (Garcia, Estrada, Acuña, 2024).

Na kształtowanie się tych postaw oraz decyzji inwestycyjnych znaczący wpływ mają również wójtowie, burmistrzowie i inne władze lokalne, których stanowisko często decyduje o akceptacji lub sprzeciwie wobec planowanych przedsięwzięć. Nie bez znaczenia pozostaje także polityka regionalna, obejmująca zarówno strategie rozwoju energetyki odnawialnej, jak i instrumenty wsparcia finansowego czy planowania przestrzennego, które mogą sprzyjać bądź utrudniać realizację tego typu inwestycji.

7.2. Miary spójności przestrzennej w aspekcie konfiguracji topologicznej

Spójność przestrzenna stanowi jedno z kluczowych kryteriów oceny jakości struktur przestrzennych, w tym klastrów powstałych w procesie grupowania obiektów geograficznych. Odnosi się ona do stopnia, w jakim elementy składające się na analizowaną jednostkę tworzą układ zwarty, ciągły oraz pozbawiony niepożądanych fragmentacji. W kontekście analiz przestrzennych oznacza to, że jednostki powinny nie tylko wykazywać podobieństwo atrybutowe, lecz również pozostawać w relacji sąsiedztwa i wzajemnej przyległości (Appiah, Schröder, Forkuo, Bugri, 2015). Odróżnia to miary spójności od klasycznych technik grupowania, które mogą tworzyć zbiory nieprzylegających obszarów, a przez to nieodzwierciedlających rzeczywistych struktur osadniczych lub funkcjonalnych (Aggeri, 2017; Klonner, Marx, Usón, 2016).

Podstawowym narzędziem opisu spójności jest liczba komponentów spójnych (K), gdzie komponent definiuje się jako podzbiór działek lub jednostek połączonych relacją sąsiedztwa topologicznego. Idealnym rozwiązaniem jest sytuacja, w której każdy klaster tworzy jedną składową ($K = 1$), co wskazuje na pełną ciągłość przestrzenną. Jeżeli wartość ta jest większa, badany obszar cechuje się fragmentaryzacją. W literaturze wskazuje się także na znaczenie wskaźników zwartości geometrycznej, obliczanych m.in. jako stosunek powierzchni klastra do powierzchni minimalnego prostokąta obejmującego (MBR) lub obróconego (MRR). Im wyższa wartość wskaźnika, tym bardziej regularny i zwarty kształt klastra, co z kolei ułatwia interpretację funkcjonalną układów przestrzennych (Malczewski, 2006).

Uzupełniającą kategorię stanowią miary fragmentacji i rozciągłości. Przykładem jest wskaźnik perforacji, określający udział powierzchni pustych wewnątrz badanego klastra oraz wskaźnik U , wskazujący udział największej spójnej składowej w ogólnej liczbie jednostek. Ponadto stosuje się wskaźniki wydłużenia, bazujące na stosunku boków minimalnego prostokąta obróconego, a także promień efektywny, opisujący przeciętną odległość obiektów od geometrycznego środka ciężkości. Kompleksowe podejście, łączące wiele wskaźników, pozwala najpełniej oddać złożoność układów przestrzennych i ich funkcjonalną spójność (Moltames i in., 2022).

7.3. Metody wielokryterialne i wagi kryteriów w systemach wspomagania wyboru lokalizacji OZE

Po zidentyfikowaniu kryteriów i ograniczeń kolejnym etapem metodyki oceny lokalizacji OZE jest zastosowanie metod wielokryterialnych. Jedną z najczęściej stosowanych technik jest Analytic Hierarchy Process (AHP), opracowana przez T.L. Saaty'ego (1980). Metoda ta pozwala rozłożyć złożony problem na hierarchiczne poziomy: od celu głównego, przez kryteria i podkryteria, po warianty decyzyjne.

Głównym elementem analizy są porównania parami poszczególnych kryteriów oraz wariantów decyzyjnych (w obrębie analizowanych kryteriów), które umożliwiają nadawanie wag kryteriom na podstawie wiedzy eksperckiej i preferencji decydentów (Saaty, 1980).

Zastosowanie AHP w analizach GIS umożliwia tworzenie map przydatności lokalizacyjnej, które łączą aspekty środowiskowe, społeczne i ekonomiczne. Badania dowodzą, że metoda ta jest uniwersalna i sprawdza się nie tylko w energetyce, lecz także w analizie ryzyka powodziowego, planowaniu transportu czy gospodarce przestrzennej (Pimenta i in., 2025). W odniesieniu do OZE AHP pozwala na ocenę lokalizacji farm wiatrowych i fotowoltaicznych w sposób transparentny oraz powtarzalny, integrując różnorodne kryteria i ułatwiając proces decyzyjny (Muhammad, Ali, Khan, Abdullah, 2024).

W ostatnich latach rozwijane są także hybrydowe podejścia, takie jak AHP w połączeniu z logiką rozmytą, TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution*) czy metodą *Multi-Influencing Factor* (MIF). Pozwalają one na lepsze uwzględnienie niepewności i zmienności danych przestrzennych (Rane i in., 2024; Belaid i in., 2025).

Szczególne znaczenie ma sposób ważenia kryteriów, czyli różne preferencje (ekonomiczne, środowiskowe, społeczne) mogą prowadzić do istotnie odmiennych rekomendacji lokalizacyjnych, co podkreślają badania nad agrifotowoltaiką w Niemczech (Hauger, Lieb, Glaser, 2025) czy przydatnością gruntów pogórnich pod instalacje PV (Shi, Li, Li, Bai, 2025).

Dzięki swojej strukturze oraz przejrzystości metoda AHP pozostaje jednym z najczęściej stosowanych narzędzi do analiz przestrzennych i wspierania decyzji, zapewniając wysoką użyteczność w planowaniu lokalizacji instalacji odnawialnych źródeł energii.

7.4. Walidacja, analiza wrażliwości i niepewności

Ostatnim etapem metodyki oceny lokalizacji OZE jest weryfikacja uzyskanych wyników oraz ocena ich odporności na zmiany danych wejściowych i parametrów analizy. Na tym etapie nie tylko sprawdza się poprawność techniczną wyników, lecz także analizuje ich stabilność w różnych wariantach obliczeń, co pozwala ocenić, na ile są one powtarzalne oraz wiarygodne.

Walidacja umożliwia porównanie rezultatów modelu z danymi referencyjnymi lub obserwacjami terenowymi, natomiast analiza wrażliwości identyfikuje czynniki, które w największym stopniu wpływają na wynik końcowy. Uzupełnia je analiza niepewności, określająca zakres potencjalnych odchyleń wynikających z jakości danych, przyjętych założeń lub uproszczeń obliczeniowych. Wspólnie procedury te wzmacniają wiarygodność opracowania, zmniejszają ryzyko błędnych decyzji inwestycyjnych i pomagają lepiej interpretować uzyskane rezultaty. Zestawienie głównych elementów tych procedur przedstawiono w tabeli 11.

Tabela 11

Walidacja, analiza wrażliwości i niepewności w ocenie lokalizacji OZE

Obszar	Opis	Przykłady
Walidacja wyników	Weryfikacja modeli i analiz przy użyciu rzeczywistych danych terenowych i statystycznych wskaźników. Zapobiega błędnym decyzjom inwestycyjnym.	Modele podatności na osuwiska, Analizy ryzyka pożarowego (<i>weight of evidence</i>).
Analiza wrażliwości	Ocena wpływu zmian w danych wejściowych i wagach kryteriów na wynik analizy. Umożliwia testowanie odporności modeli.	Symulacje Monte Carlo dla systemów solarnych wspierających produkcję wodoru.
Analiza niepewności	Uwzględnia niepewność danych (np. środowiskowych, klimatycznych, hydrologicznych) i jej wpływ na optymalność lokalizacji.	Kalibracja modeli hydrologicznych SWAT dla oceny potencjału hydroenergetycznego.
Znaczenie praktyczne	Zwiększenie wiarygodności wyników, możliwość oszacowania ryzyka inwestycyjnego oraz podniesienie jakości decyzji lokalizacyjnych.	Praktyczne zastosowania w walidacji modeli lokalizacyjnych i ocenie ryzyk inwestycyjnych.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „A GIS-based on application of Monte Carlo and multi-criteria decision-making approach for site suitability analysis of solar-hydrogen production: Case of Cameroon”, F.M.I. Flora, 2025, *Heliyon*, 11(1), e41541; „Analysis of wildfire susceptibility by weight of evidence, using geomorphological and environmental factors in the Marche Region, Central Italy”, M. Gentilucci, M. Barbieri, H. Younes, H. Rihab, G. Pambianchi, 2024, *Geosciences*, 14(5), s. 112; „An Integrated GIS and SWAT Hydrological Modeling Approach Scientifica”, R. Bhattarai, B.K. Mishra, D. Bhattarai, D. Khatiwada, P. Kumar, G. Meraj, 2024, *Scientifica*, 2024, s. 1007081.

8. PROCESY OBLICZENIOWE I SELEKCJA DANYCH W ANALIZIE PRZESTRZENNEJ

Nowoczesne systemy analityczne, w tym te wykorzystywane do analizy dokumentów legislacyjnych, wymagają zaawansowanych procesów obliczeniowych i skutecznych metod selekcji danych. W dobie cyfryzacji i gwałtownego przyrostu informacji niezbędne stało się stosowanie złożonych procesów integracji danych, takich jak ETL, oraz platform obliczeniowych o dużej skali, jak Apache Spark i Apache Sedona. Równolegle rozwijane są metody klasteryzacji, umożliwiające semantyczne grupowanie dokumentów prawnych (Bajdur, Zieliński, Gronba-Chyła, 2023). Ostatecznym celem jest integracja tych procesów w spójnych przepływach danych, które pozwalają łączyć dane tekstowe, przestrzenne i metadane w ramach jednego systemu analitycznego (Maguire i in., 1991; Che, Yin, Jin, Wu, 2024).

8.1. Przygotowanie danych jako proces integracji danych

W dobie gwałtownego przyrostu danych oraz ich różnorodności pod względem formatu i źródła, kluczowym wyzwaniem staje się zapewnienie spójności oraz interoperacyjności informacji. Dane pochodzą z różnych źródeł: od baz relacyjnych, przez strumienie czasu rzeczywistego, po pliki tekstowe i dokumenty niestrukturalne. Bez ich odpowiedniego przygotowania i ujednolicenia nie jest możliwe efektywne przeprowadzanie analiz, w tym zastosowań zaawansowanych metod sztucznej inteligencji czy eksploracji języka naturalnego (Chrisman, 1997).

8.1.1. Definicja i znaczenie w integracji danych

Proces ETL jest jedną z fundamentalnych metod zarządzania i integracji danych w systemach informatycznych. Jego głównym celem jest umożliwienie pozyskiwania informacji z wielu źródeł, ich przekształcenie w spójną i znormalizowaną postać oraz załadowanie do repozytoriów analitycznych, takich jak hurtownie danych, bazy operacyjne czy systemy big data. Dzięki temu procesowi możliwe jest tworzenie jednolitego środowiska danych, które stanowi podstawę do dalszej analizy, eksploracji czy uczenia maszynowego (Maguire, 2025).

Znaczenie procesu ETL rośnie w kontekście współczesnych potrzeb integracji informacji o charakterze heterogenicznym. Dane do przetwarzania pochodzą z wielu źródeł: baz relacyjnych, systemów GIS i danych przestrzennych, a także strumieni z interfejsów API (*Application Programming Interface*). W przypadku sektora legislacyjnego oznacza to konieczność scalania danych z repozytoriów prawnych (ISAP w Polsce), międzynarodowych baz danych (EUR-Lex) i lokalnych rejestrów prowadzonych przez organy administracji. Brak standaryzacji formatów dokumentów (PDF, XML, HTML, pliki tekstowe) powoduje, że bez zastosowania procesów ETL dane te są trudne do analizy i nieprzydatne w kontekście automatycznego przetwarzania języka naturalnego (Řezník i in., 2022, Falzone, Romain, 2022; Graziuso, Mancini, Francavilla, Grimaldi, Guarnaccia, 2021; Njoku i in., 2022).

Zarządzanie procesami ETL wspiera także politykę otwartych danych (open data), która w ostatnich latach zyskała na znaczeniu w administracji publicznej. Ustawa Foundations for Evidence-Based Policymaking Act w Stanach Zjednoczonych (2018) czy europejskie regulacje dotyczące ponownego wykorzystania informacji sektora publicznego podkreślają konieczność zapewnienia interoperacyjności i dostępności danych. ETL stanowi w tym kontekście narzędzie pozwalające na przełożenie abstrakcyjnych norm prawnych na konkretne praktyki gromadzenia i integracji danych (International Organization for Standardization, 2014).

8.1.2. Etapy procesu

Pierwszym etapem procesu ETL jest wydobycie danych z heterogenicznych źródeł. Źródła te mogą obejmować:

- tradycyjne bazy relacyjne (PostgreSQL, Oracle);
- interfejsy API udostępniane przez instytucje publiczne;
- pliki w formatach niestrukturalnych (PDF, DOC, TXT);
- strumień danych (aktualizacje w czasie rzeczywistym).

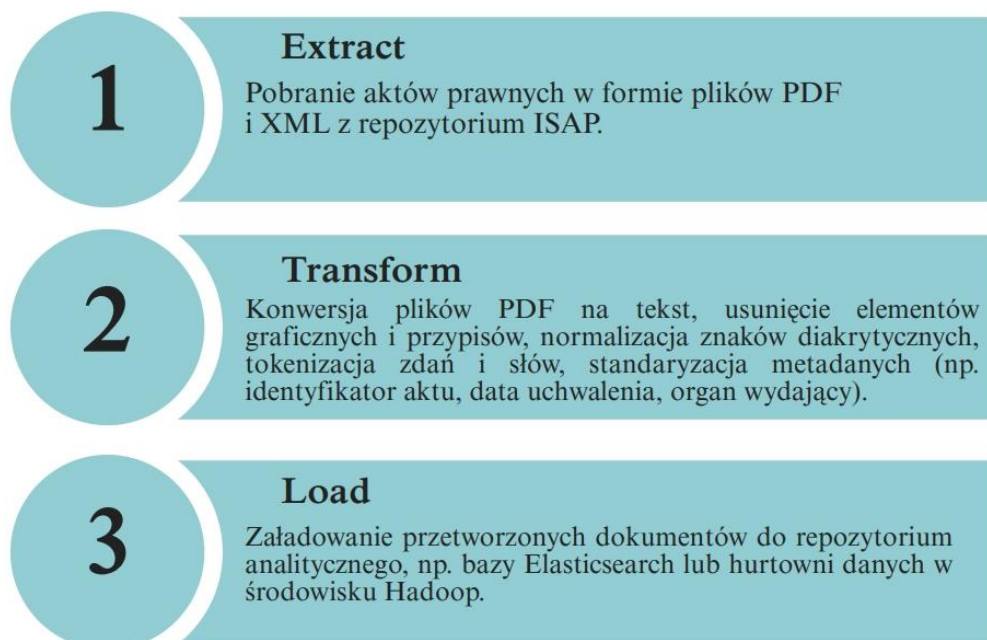
Na tym etapie szczególnie istotne jest uwzględnienie semantycznej zgodności danych, co realizowane jest m.in. przez metadane. Standard ISO 19115 dotyczący opisu informacji geograficznych stanowi przykład ujednoliconego podejścia, które może być rozszerzone również na dane prawne, umożliwiając ich późniejsze łączenie z danymi przestrzennymi (ISO, 2014). W praktyce oznacza to oznaczanie aktów prawnych metadanymi dotyczącymi daty wejścia w życie, organu wydającego czy zakresu geograficznego obowiązywania. Drugi etap, czyli transformacja danych, obejmuje operacje zapewniające ich spójność i przydatność, takie jak czyszczenie (usuwanie duplikatów, błędów OCR i zbędnych elementów), filtrowanie istotnych fragmentów dokumentów, standaryzacja formatów (np. konwersja do XML lub JSON) i wzbogacanie o dodatkowe atrybuty, np. kategorię aktu prawnego czy odwołania do innych ustaw (Mats, Mitryasova, Salamon, Kochanek, 2025; Kochanek, 2025d).

M.M. Helmi, M.S. Farhan i M.M. Nasr (2018) wskazują, że włączenie procesów transformacji do środowisk chmurowych umożliwia wykonywanie tych operacji w sposób rozproszony, co jest szczególnie istotne przy pracy z bardzo dużymi zbiorami dokumentów. W sektorze prawnym transformacja może obejmować np. automatyczne łączenie akt nowelizujących z tekstami jednolitymi, co pozwala na tworzenie ujednoliconych wersji przepisów gotowych do dalszej analizy.

Ostatnim etapem jest ładowanie danych do repozytoriów docelowych. Mogą to być zarówno hurtownie danych (Oracle Data Warehouse), jak i systemy big data. W kontekście legislacyjnym dane mogą być ładowane do repozytoriów analitycznych, które następnie są wykorzystywane przez narzędzia NLP do analizy języka prawniczego. Kluczowe jest zapewnienie zgodności ze standardami otwartych danych, co umożliwia ich dalsze wykorzystanie przez obywateli i przedsiębiorstwa (Office of Management and Budget, CDO Council, 2018).

8.1.3. Przygotowanie danych legislacyjnych

Dobrym przykładem praktycznego zastosowania procesu ETL jest przygotowanie danych z Internetowego Systemu Aktów Prawnych (ISAP) do analizy języka naturalnego (NLP). Proces ten obejmuje kilka kroków, przedstawionych na rysunku 20.



Rysunek 20. Proces ETL na przykładzie danych legislacyjnych z ISAP.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Geospatial big data: Theory, methods, and applications”, L. Zou, Y. Song, G. Cervone, 2024, *Annals of GIS*, 30(4), s. 353-368.

Tak przygotowane dane mogą następnie być analizowane za pomocą algorytmów NLP, np. do ekstrakcji nazw instytucji, klasyfikacji aktów prawnych według tematyki czy budowy sieci powiązań między przepisami. W badaniach nad geoinformatyką i przetwarzaniem języka prawnego wskazuje się, że tego typu rozwiązania zwiększają transparentność prawa oraz ułatwiają jego stosowanie przez obywateli (Zou, Song, Cervone, 2024).

8.2. Rozproszona platforma obliczeniowa typu Apache Spark

Współczesne analizy wymagają pracy na dużych, zróżnicowanych i często napływających w czasie rzeczywistym zbiorach danych, z którymi tradycyjne, scentralizowane systemy bazodanowe sobie nie radzą. Rozwiązaniem są skalowalne platformy rozproszone, takie jak Apache Spark, który dzięki elastycznej architekturze i wsparciu dla różnych modeli analitycznych zyskał dominującą rolę w ekosystemie danych (Werner, 2019).

Spark powstał jako rozwinięcie ograniczeń Hadoop MapReduce, zapewniając wielokrotnie wyższą wydajność dzięki przetwarzaniu in-memory oraz bardziej złożonej optymalizacji przepływu zadań. W kontekście analizy dokumentów legislacyjnych platforma ta ma ogromne znaczenie, ponieważ pozwala na równoległe przetwarzanie milionów aktów prawnych w różnych formatach (PDF, XML, JSON), łączenie ich z metadany, a następnie analizę treści za pomocą metod uczenia maszynowego (Werner, 2019).

8.2.1. Architektura i model danych

Fundamentem działania Apache Spark jest model danych *Resilient Distributed Dataset* (RDD), który wprowadza koncepcję odpornego, rozproszonego zbioru danych. RDD zapewnia:

- podział danych na partycje rozproszone pomiędzy węzły klastra;
- odporność na awarie poprzez możliwość odtworzenia danych z historii transformacji;
- leniwe wykonywanie operacji, co pozwala na optymalizację przetwarzania.

RDD jest szczególnie przydatne w analizach iteracyjnych, np. podczas trenowania algorytmów NLP na korpusie dokumentów legislacyjnych. Dzięki podziałowi zbioru na partycje możliwe jest równoczesne uczenie modeli językowych na wielu fragmentach danych, co znacznie skraca czas obliczeń w porównaniu z przetwarzaniem sekwencyjnym (Wang, Cao, Yu, 2022).

Wraz z rozwojem systemu Spark wprowadzono dodatkowe abstrakcje danych, takie jak DataFrames i Datasets, które oferują bardziej przyjazny interfejs użytkownika, optymalizację zapytań i zgodność z SQL – *Structured Query Language*. Pozwoliło to na jeszcze większe upowszechnienie *Sparka* w analizach biznesowych i administracyjnych, gdzie wymagane jest przetwarzanie złożonych danych tekstowych oraz tabelarycznych w jednym środowisku (Michels i in., 2024).

8.2.2. Komponenty systemu Spark

Apache Spark to nie tylko silnik obliczeniowy, ale cały system modułów odpowiadający na różne potrzeby analityczne. W tabeli 12 zostały zaprezentowane główne komponenty Apache Spark.

Tabela 12

Główne komponenty systemu Apache Spark i ich zastosowania w analizie dokumentów prawnych

Komponent	Opis	Przykłady zastosowań
Spark SQL	Moduł umożliwiający wykonywanie zapytań SQL na danych w Spark. Integruje dane tabelaryczne z nieustrukturyzowanymi.	Analiza dokumentów prawnych, w których obok tekstu występują metadane w tabelach lub strukturach XML.
Spark Streaming	Narzędzie do analizy danych napływających w czasie rzeczywistym.	Monitorowanie nowych aktów prawnych w ISAP czy EUR-Lex i ich natychmiastowa klasyfikacja tematyczna.
MLlib	Biblioteka uczenia maszynowego zawierająca algorytmy klasyfikacji, regresji, klasteryzacji i redukcji wymiarowości.	Automatyczne przypisywanie dokumentów legislacyjnych do kategorii tematycznych (podatkowe, środowiskowe, energetyczne).
GraphX	Moduł do analizy grafów, pozwalający badać relacje między obiektami w zbiorach danych.	Analiza powiązań między ustawą a jej nowelizacjami oraz powiązań transgranicznych regulacji w UE.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Parallel processing strategies for big geospatial data”, M. Werner, 2019, *Frontiers in Big Data*, 2, s. 1-12.

Wszystkie te moduły tworzą spójny system, w którym możliwe jest łączenie metod przetwarzania wsadowego i strumieniowego, analizy semantycznej i sieciowej, a także klasycznych zapytań SQL.

8.2.3. Zalety i ograniczenia Apache Spark

Apache Spark – jako jedna z najważniejszych platform obliczeniowych – znajduje szerokie zastosowanie w analizie dużych zbiorów danych dzięki swojej wydajności i elastyczności. Jego mocne strony obejmują m.in. przetwarzanie in-memory, wysoką skalowalność oraz możliwość pracy w trybach wsadowym i strumieniowym. Jednak pełne wykorzystanie możliwości Spark wiąże się także z pewnymi ograniczeniami, takimi jak wysokie zapotrzebowanie na pamięć RAM czy skomplikowana konfiguracja klastra. W tabeli 13 przedstawiono główne zalety i wady tej technologii w kontekście praktycznych zastosowań (Werner, 2019).

Tabela 13

Zalety i ograniczenia platformy Apache Spark

Aspekt	Zalety	Ograniczenia
Wydajność	Przetwarzanie in-memory umożliwia przechowywanie danych w pamięci operacyjnej, co przyspiesza działanie w porównaniu z Hadoop MapReduce.	Wysokie zapotrzebowanie na pamięć RAM, co ogranicza zastosowanie przy słabszej infrastrukturze.
Skalowalność	Obsługa klastrów składających się z setek lub tysięcy węzłów umożliwia pracę na petabajtowych zbiorach danych.	Koszt utrzymania dużych klastrów i infrastruktury obliczeniowej.
Uniwersalność	Możliwość pracy w trybie wsadowym i strumieniowym zapewnia szerokie spektrum zastosowań, między innymi analizę dokumentów legislacyjnych w czasie rzeczywistym.	Konieczność skomplikowanej konfiguracji i dostosowania do różnych scenariuszy.
Interoperacyjność	Integracja z wieloma źródłami danych: HDFS, bazy relacyjne, NoSQL, chmura.	Wymaga specjalistycznej wiedzy IT do konfiguracji i utrzymania.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Green Cartography: A research agenda towards sustainable development”, M. Wu, M., Lv, G., Qiao, L., Roth, R., Zhu, A-X., 2024, *Annals of GIS*, 30(1), s. 15-34.

Mimo tych ograniczeń Spark pozostaje jedną z najbardziej wszechstronnych i wydajnych platform analitycznych, szczególnie w projektach wymagających łączenia analizy tekstu, metadanych i strumieni informacji w czasie rzeczywistym.

8.2.4. Przykład zastosowania analiz dużych zbiorów dokumentów legislacyjnych

Jednym z praktycznych przykładów zastosowania Apache Spark jest analiza dokumentów legislacyjnych w systemie ISAP. Proces przebiega następująco:

- Dokumenty w formatach PDF i XML są ładowane do środowiska Spark.
- Spark SQL umożliwia ich przetwarzanie i wydobywanie metadanych, takich jak data uchwalenia czy organ legislacyjny.
- MLlib stosowane jest do klasyfikacji dokumentów na podstawie ich treści (prawo podatkowe, prawo pracy, ochrona środowiska).

- GraphX tworzy sieć powiązań między aktami prawnymi, które akty nowelizują inne.
- Spark Streaming monitoruje w czasie rzeczywistym nowe publikacje w ISAP i automatycznie aktualizuje repozytorium analityczne.

Dzięki temu możliwe jest stworzenie kompleksowego systemu analizy prawa, który nie tylko organizuje dokumenty, ale również wskazuje powiązania i umożliwia prognozowanie trendów legislacyjnych. Badania (Michels i in., 2024; Zhang, Xiang, Yue, Gong, Wu, 2024) potwierdzają, że Spark jest szczególnie skuteczny w środowiskach wymagających integracji danych wieloźródłowych i wieloformatowych, co czyni go idealnym narzędziem dla sektora prawnego.

8.3. Przetwarzanie danych przestrzennych w środowisku Apache Sedona

Wraz z rozwojem technologii big data coraz większego znaczenia nabiera analiza danych przestrzennych, które stanowią istotny element w wielu obszarach decyzyjnych – od planowania urbanistycznego, przez zarządzanie środowiskiem, po legislację obejmującą regulacje obszarowe.

Dane geograficzne są jednak szczególnie wymagające ze względu na swoją złożoność: zawierają informacje o geometrii obiektów (punkty, linie, poligony), ich atrybutach i relacjach przestrzennych. Klasyczne platformy obliczeniowe, takie jak Apache Spark, nie posiadały natywnych funkcji obsługi danych przestrzennych, co ograniczało ich przydatność w analizach geoprawnych. W odpowiedzi na tę lukę opracowano Apache Sedona (wcześniej GeoSpark) – rozproszone rozszerzenie Spark, umożliwiające skalowalne przetwarzanie danych przestrzennych (Goodchild, 2009).

Sedona rozwija możliwości Spark o operacje typowe dla systemów GIS, zachowując jednocześnie elastyczność oraz wydajność charakterystyczną dla obliczeń rozproszonych. Dzięki temu stała się jednym z kluczowych narzędzi do analiz, w których łączy się dane tekstowe i przestrzenne, co ma szczególne znaczenie w kontekście prawa i polityk publicznych, gdzie przepisy często określają granice geograficzne obowiązywania regulacji (Longley, Goodchild, Maguire, 2015).

8.3.1. Charakterystyka integracji Apache Spark i Apache Sedona

Apache Sedona działa jako biblioteka zintegrowana z systemem Apache Spark, co oznacza, że korzysta z tego samego modelu obliczeń rozproszonych. Umożliwia przechowywanie oraz przetwarzanie obiektów geograficznych w dużych klastrach obliczeniowych. Sedona zapewnia:

- wsparcie dla standardowych formatów danych przestrzennych (WKT, WKB, GeoJSON, Shapefile);
- kompatybilność z zapytaniami SQL poprzez rozszerzenie Spark SQL o funkcje geoprzestrzenne;
- możliwość integracji z innymi modułami Spark (Streaming, MLlib, GraphX).

Dzięki temu użytkownicy mogą w jednym środowisku analizować zarówno treść dokumentów (akty prawne w formie tekstowej), jak i ich komponenty przestrzenne (obszar obowiązywania regulacji środowiskowych). Integracja ta sprawia, że Sedona jest platformą szczególnie przydatną w projektach wymagających połączenia analizy legislacyjnej z analizą geograficzną, takich jak ocena wpływu regulacji na konkretne regiony (Ranatunga, Ødegård, Onstein, Jetlund, 2024).

8.3.2. Obsługa i reprezentacja danych przestrzennych

Sedona umożliwia obsługę podstawowych typów danych przestrzennych:

- punkty, np. lokalizacja inwestycji, siedziby instytucji, punkty pomiarowe;
- linie, np. przebieg rzek, dróg, granice działek ewidencyjnych, trasy komunikacyjne;
- poligony (obszary chronione), gminy, województwa, obszary Natura 2000.

Reprezentacja obiektów przestrzennych w Sedona jest zgodna ze standardami OGC (*Open Geospatial Consortium*), co zapewnia interoperacyjność z istniejącymi systemami GIS. Dzięki temu dane pochodzące z różnych źródeł, takich jak systemy ewidencji gruntów, rejestry ochrony środowiska czy dokumenty planistyczne, mogą być przetwarzane i integrowane w jednolitym środowisku analitycznym (*Open Geospatial Consortium*, 2025).

8.3.3. Operacje i metody analizy przestrzennej

Jednym z największych atutów Sedona są jej funkcje analizy przestrzennej, które umożliwiają wykonywanie skomplikowanych operacji GIS w środowisku big data. Podstawowe operacje i metody analizy przestrzennej w Apache Sedona zestawiono w tabeli 14.

Tabela 14

Operacje i metody analizy przestrzennej w Apache Sedona

Metoda	Opis	Przykład zastosowania
Operatory topologiczne	Sprawdzają relacje między obiektami geograficznymi (np. intersects, within, buffer, union).	Analiza kolizji farmy wiatrowej z obszarami chronionymi.
Złączenia przestrzenne	Łączą dane na podstawie ich położenia geograficznego (spatial joins).	Przypisanie aktów prawnych do granic jednostek administracyjnych.
Indeksowanie przestrzenne	Wykorzystanie struktur R-Tree i QuadTree do szybkiego wyszukiwania obiektów i zapytań w dużych zbiorach danych.	Obsługa miliardów rekordów w analizach lokalizacyjnych OZE.
Zapytania geoprzestrzenne w SQL	Integracja analiz przestrzennych z językiem SQL, umożliwiająca selekcję obiektów według relacji przestrzennych.	Wybór obszarów Natura 2000 przecinających się z planowanymi inwestycjami energetycznymi.

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Green cartography: Towards environmentally sustainable geospatial visualization”, M. Wu, Z. Lv, X. Qiao, R. Roth, Q. Zhu, 2024, *Annals of GIS*, 30(2), s. 113-130.

Dzięki tym funkcjom Sedona łączy klasyczne możliwości GIS z mocą obliczeń rozproszonych Apache Spark, czyniąc ją wyjątkowym narzędziem w analizach przestrzennych wymagających dużej skali przetwarzania (Wu, Lv, Qiao, Roth, Zhu, 2024).

8.3.4. Powiązanie danych legislacyjnych z lokalizacjami przestrzennymi

Apache Sedona znajduje szerokie zastosowanie w analizach, w których dane prawne i przestrzenne muszą być łączone w jednym modelu. Przykłady obejmują:

- regulacje środowiskowe – powiązanie treści aktów prawnych; dotyczących ochrony przyrody z konkretnymi obszarami Natura 2000 lub parkami narodowymi;
- planowanie przestrzenne – analiza zgodności inwestycji z dokumentami planistycznymi i strefami ochronnymi;
- zarządzanie ryzykiem – przypisywanie regulacji prawnych do obszarów zagrożonych powodzią, pożarem lub innymi zjawiskami naturalnymi;
- analizy porównawcze – badanie różnic w zasięgu terytorialnym obowiązywania prawa krajowego i międzynarodowego.

Przykładowo, w kontekście prawa ochrony środowiska, Sedona może zostać wykorzystana do określenia, które fragmenty regulacji odnoszą się do konkretnych obszarów geograficznych i jakie skutki prawne wynikają z ich lokalizacji. Z kolei w administracji samorządowej narzędzie to umożliwia sprawdzanie zgodności planowanych inwestycji z obowiązującymi regulacjami ochronnymi, co wspiera procesy decyzyjne w gospodarce przestrzennej (United Nations Committee of Experts on Global Geospatial Information Management, 2025).

8.4. Klasteryzacja danych

Rosnąca dostępność danych w administracji, nauce i biznesie zwiększa znaczenie metod eksploracji służących do odkrywania ukrytych wzorców i struktur. Jednym z częściej stosowanych podejść jest klasteryzacja, która grupuje obiekty według podobieństwa i w odróżnieniu od klasyfikacji, nie wymaga wcześniejszego etykietowania, ponieważ algorytmy samodzielnie wykrywają naturalne grupy w zbiorze.

W geoinformatyce klasteryzację stosowano m.in. do analizy wielohazardowego ryzyka (Bordbar, Aghamohammadi, Pourghasemi, Azizi, 2022), ale też dobrze sprawdza się w badaniach nad systemami prawnymi, gdzie pozwala tworzyć mapy tematyczne prawa i powiązania semantyczne między dokumentami (Fagerholm i in., 2021).

8.4.1. Definicja i podstawowe założenia

Klasteryzacja to proces grupowania obiektów w taki sposób, aby elementy należące do jednego klastra były bardziej podobne do siebie niż do elementów w innych klastrach. Podobieństwo może być mierzone różnymi metrykami, odległością euklidesową, kosinusową bądź też metryką Levenshteina dla tekstów prawnych. Podstawowym założeniem jest istnienie ukrytej struktury w danych, której algorytm jest w stanie się nauczyć.

W odróżnieniu od metod klasyfikacyjnych, klasteryzacja jest metodą uczenia nienadzorowanego, czyli nie wymaga etykiet w danych wejściowych. Dzięki temu można ją stosować w sytuacjach, gdy brak jest wcześniejszej wiedzy o kategoriach, co czyni ją szczególnie przydatną w analizie prawa, gdzie akty często nie posiadają jednoznacznych oznaczeń tematycznych (Madanchian, Taherdoost, 2025).

Dodatkową zaletą klasteryzacji jest jej zdolność do odkrywania nowych powiązań i wzorców w danych, które mogą nie być oczywiste przy zastosowaniu tradycyjnych metod analitycznych.

W przypadku analizy legislacyjnej pozwala ona np. grupować dokumenty według ukrytych podobieństw językowych lub semantycznych, co ułatwia identyfikację trendów regulacyjnych, powtarzających się schematów prawnych czy nawet potencjalnych luk w systemie prawnym. Dzięki temu klasteryzacja może pełnić rolę nie tylko narzędzia porządkującego, lecz także eksploracyjnego, wspierającego proces formułowania hipotez badawczych oraz podejmowania decyzji w zakresie polityki publicznej i zarządzania informacją prawną (Ashihara i in., 2020).

8.4.2. Algorytmy klasteryzacji

W literaturze oraz praktyce najczęściej stosowane są trzy klasy algorytmów klasteryzacyjnych, które zostały przedstawione w tabeli 15.

Tabela 15

Wybrane algorytmy klasteryzacji i ich zastosowania

Algorytm	Opis	Zastosowanie / Ograniczenia
K-Means	Jeden z najprostszych i najczęściej używanych algorytmów, przypisuje dane do klastrów poprzez minimalizację odległości od centroidu.	Skuteczny przy danych o strukturze kulistej, ograniczenia przy zbiorach nieregularnych.
DBSCAN (<i>Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise</i>)	Metoda oparta na gęstości punktów, umożliwia wykrywanie klastrów nieregularnych i rozpoznawanie „szumu”.	W analizach legislacyjnych: grupowanie artykułów prawnych o podobnej treści bez prostej struktury tematycznej.
Klasteryzacja hierarchiczna	Buduje dendrogram przedstawiający relacje między obiektami na różnych poziomach szczegółowości.	Analiza prawa od szerokich kategorii (np. prawo gospodarcze) po szczegółowe podzbiory (np. prawo spółek).

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Multi-hazard spatial modeling via ensembles of machine learning and meta-heuristic techniques”, M. Bordbar, H. Aghamohammadi, H.R. Pourghasemi, Z. Azizi, 2022, *Scientific Reports*, 12(1), s. 11504; „Criteria for AI Adoption in HR: Efficiency vs. Ethics. Computers”, M. Madanchian, H. Taherdoost, 2025, *Computers*, 258, s. 233-241.

8.4.3. Przykłady zastosowań

Jednym z przykładów jest segmentacja dokumentów legislacyjnych według tematyki. Klasteryzacja umożliwia automatyczną segmentację aktów prawnych w oparciu o ich treść. Przykładowo, algorytm K-Means zastosowany do reprezentacji tekstów ustaw w postaci wektorów (TF-IDF, embeddingi semantyczne), co pozwala pogrupować je w kategorie takie jak prawo podatkowe, administracyjne czy środowiskowe. Takie podejście zwiększa efektywność wyszukiwania dokumentów oraz ułatwia ich analizę tematyczną (Bordbar, Aghamohammadi, Pourghasemi, Azizi, 2022).

Kolejnym przykładem jest grupowanie artykułów prawnych o podobnej treści. Algorytmy DBSCAN lub hierarchiczne mogą grupować poszczególne artykuły ustaw na podstawie ich semantyki. Pozwala to wykryć, że przepisy o ochronie środowiska w różnych ustawach mają podobną strukturę i cel, co umożliwia szybkie tworzenie powiązań między dokumentami. Jest to zadanie, które w analizie ręcznej zajęłoby znacznie więcej czasu (Clark i in., 2025).

Klasteryzacja pozwala też na analizę dynamiki prawa w czasie. Przykładowo, grupując akty prawne według ich treści i śledząc zmiany w liczebności poszczególnych klastrów, można analizować, które dziedziny prawa rozwijają się szybciej, a które pozostają stabilne. K. Fedra i R.F. Reitsma (1990) już w latach 90. wskazywali, że tego typu analizy w systemach wspomagania decyzji zintegrowanych z GIS pozwalają uchwycić dynamikę zmian regulacyjnych w powiązaniu z przestrzenią geograficzną.

Klasteryzacja danych jest jedną z najważniejszych metod eksploracji, umożliwiającą identyfikację ukrytych struktur w dużych i złożonych zbiorach. Jej zastosowanie w analizie prawa otwiera nowe perspektywy w zakresie automatycznej segmentacji dokumentów, identyfikacji powiązań semantycznych oraz monitorowania trendów legislacyjnych. Dzięki wykorzystaniu algorytmów takich jak K-Means, DBSCAN czy klasteryzacja hierarchiczna możliwe staje się zbudowanie systemów analitycznych wspierających prawników, legislatorów i obywateli w lepszym zrozumieniu oraz stosowaniu prawa.

8.5. Integracja procesów obliczeniowych

W nowoczesnych systemach informatycznych kluczowym wyzwaniem nie jest już samo pozyskanie danych czy zastosowanie pojedynczego narzędzia analitycznego, lecz integracja różnych procesów obliczeniowych w spójne środowisko analizy. Dopiero połączenie metod ETL, platform rozproszonych takich jak Apache Spark, narzędzi geoprzestrzennych typu Apache Sedona oraz metod klasteryzacji i przetwarzania języka naturalnego pozwala na kompleksowe podejście do analizy danych.

W kontekście prawa oraz legislacji oznacza to możliwość równoczesnego przetwarzania treści dokumentów, ich metadanych oraz kontekstu przestrzennego, np. zasięgu obowiązywania regulacji. Integracja procesów obliczeniowych pozwala nie tylko zwiększyć wydajność analizy, ale także nadać jej wielowymiarowy charakter, obejmujący poziom tekstu, poziom przestrzenny, a także analizy semantyczne i trendowe (Stojanovic, Stojanovic, 2013).

8.5.1. Przetwarzanie i transformacja danych z wykorzystaniem Apache Spark

Łączenie procesu ETL z Apache Spark pozwala na realizację transformacyjnych zadań w skali masowej. Spark, dzięki swojej architekturze in-memory, jest w stanie równolegle przetwarzać dane wydobyte przez proces ETL i transformować je do postaci użytecznej w dalszej analizie (Werner, 2019).

W przypadku danych legislacyjnych oznacza to możliwość:

- pobierania dokumentów z repozytoriów (ISAP, EUR-Lex);
- transformacji do formatów strukturalnych (JSON, XML);
- automatycznego wzbogacania danych o metadane, np. daty wejścia w życie aktu, organu wydającego, rodzaju regulacji;
- zapisu do rozproszonych repozytoriów (HDFS, hurtownie danych).

Połączenie ETL i Spark eliminuje ograniczenia klasycznych rozwiązań ETL, które nie są skalowalne dla miliardów rekordów. Dzięki Spark transformacja i ładowanie danych mogą być prowadzone równocześnie na wielu węzłach obliczeniowych, co przyspiesza proces przygotowania korpusów legislacyjnych (Michels i in., 2024).

8.5.2. Sedona i Spark w kontekście rozszerzenia analiz o wymiar przestrzenny

Apache Sedona, jako rozszerzenie Spark, wnosi do systemu możliwość przetwarzania danych przestrzennych. Integracja obu środowisk oznacza, że dane tekstowe (np. treść aktów prawnych) i dane geoprzestrzenne (np. obszar obowiązywania regulacji) mogą być analizowane równocześnie w tym samym środowisku obliczeniowym (Goodchild, 2009). Przykładowo:

- Sedona pozwala przypisać dokumentom legislacyjnym atrybut przestrzenny („ustawa dotycząca obszaru Natura 2000”);
- Spark umożliwia ich dalszą transformację i analizę (wykrycie kolizji regulacyjnych w różnych obszarach geograficznych).

Takie podejście ma kluczowe znaczenie w politykach środowiskowych oraz urbanistycznych, gdzie przepisy prawa często definiują obszary chronione, granice urbanizacji czy strefy inwestycyjne. Dzięki integracji Spark i Sedona możliwe jest tworzenie kompleksowych modeli łączących regulacje prawne z przestrzenią geograficzną, co wspiera podejmowanie decyzji w administracji publicznej (Open Geospatial Consortium, 2025; United Nations Committee of Experts on Global Geospatial Information Management, 2025).

8.5.3. Klasteryzacja i przetwarzanie języka naturalnego w analizie dokumentów prawnych

Trzecim elementem integracji procesów obliczeniowych jest połączenie metod klasteryzacji z narzędziami NLP (Natural Language Processing). W praktyce polega to na tym, że treść dokumentów legislacyjnych jest najpierw przetwarzana za pomocą narzędzi NLP (np. tokenizacja, lematyzacja, embeddingi semantyczne), a następnie wyniki te są grupowane przy użyciu algorytmów klasteryzacji (np. K-Means, DBSCAN, klasteryzacja hierarchiczna) (Madanchian, Taherdoost, 2025). Pozwala to m.in. na:

1. automatyczne tworzenie klastrów dokumentów według tematyki;
2. identyfikację powiązań między artykułami prawnymi w różnych ustawach;
3. analizę trendów legislacyjnych w długiej perspektywie;
4. budowę map semantycznych prawa, które ukazują jego strukturę w sposób bardziej intuicyjny niż klasyczne klasyfikacje prawne.

Integracja NLP i klasteryzacji znajduje zastosowanie m.in. w monitorowaniu zmian w prawie podatkowym oraz środowiskowym, ponieważ pozwala automatycznie wykrywać, które przepisy ewoluują w podobnym kierunku, a które rozwijają się niezależnie. Jak wskazuje H. Li i in. (2024), wykorzystanie nowoczesnych modeli głębokiego uczenia (np. transformers) w połączeniu z metodami nienadzorowanego grupowania pozwala na uzyskanie wyników trudnych do osiągnięcia przy użyciu tradycyjnych metod analizy prawnej.

9. CEL I METODYKA BADAŃ

Głównym celem pracy jest opracowanie oraz weryfikacja funkcjonowania autorskiego Systemu Dynamicznego Generowania Warunków Brzegowych (SDGWB), bazującego na integracji danych środowiskowych i prawnych oraz sztucznej inteligencji w ramach architektury agenta hybrydowego, wspierającego proces podejmowania decyzji przestrzennych dotyczących lokalizacji i posadowienia nowych obiektów OZE. Opracowany w ramach badań system przeznaczony jest do gromadzenia, aktualizowania i przekształcania informacji, a także do tworzenia i kontrolowania spójnego zestawu wymagań decyzyjnych. Rozwiązanie to ma umożliwić uwzględnienie zmieniających się uwarunkowań prawnych, środowiskowych, technicznych i społecznych, a także dynamiczne dostosowywanie procesu decyzyjnego do nowych danych i scenariuszy przestrzennych, pozyskiwanych z repozytoriów w czasie rzeczywistym. Osiągnięcie głównego celu pracy wymagało sformułowania i realizacji następujących celów szczegółowych:

1. Opracowanie architektury autorskiego Systemu Dynamicznego Generowania Warunków Brzegowych (SDGWB), wspierającego analizę i interpretację danych środowiskowych poprzez integrację modułów przetwarzania języka naturalnego, bazy wiedzy oraz narzędzi modeli językowych, służących do automatycznego tworzenia list wymagań i sygnałów dla hybrydowego agenta GIS.
2. Zaprojektowanie w systemie SDGWB zasady istotności, która nadaje priorytet zweryfikowanym danym środowiskowym, a dane pozyskiwane automatycznie traktuje jako uzupełnienie analiz, zapewniając jakość i wiarygodność wyników.
3. Opracowanie mechanizmów walidacji i autokorekty, obejmujących benchmarki oraz system wieloetapowej weryfikacji, prowadzących do zwiększenia poziomu zaufania do wyników i przejścia od wspomagania użytkownika do modelu o wysokim stopniu autonomii.
4. Zintegrowanie danych pochodzących z wielu źródeł poprzez rozwój metod integracji informacji środowiskowych, prawnych, społecznych, jakościowych i przestrzennych, w celu usprawnienia procesów oceny z uwzględnieniem zarówno wymagań obligatoryjnych, jak również dodatkowych kryteriów decyzyjnych.
5. Zweryfikowanie systemu SDGWB obejmujące testowanie funkcjonalności systemu, ocenę jego potencjału praktycznego oraz analizę możliwości wykorzystania narzędzia we wspieraniu rozwoju odnawialnych źródeł energii.

Problem badawczy podjęty w niniejszej pracy sprowadza się do pytania: *Czy opracowany w ramach badań autorski System Dynamicznego Generowania Warunków Brzegowych integrujący dane środowiskowe prawne z elementami sztucznej inteligencji pozwala na usprawnienie procesu podejmowania decyzji dotyczących lokalizacji i posadowienia obiektów odnawialnych źródeł energii?*

Przez usprawnienie procesu podejmowania decyzji rozumie się zautomatyzowanie oraz przyspieszenie etapów analizy poprzez ograniczenie manualnych czynności związanych z pozyskiwaniem, łączeniem i interpretacją danych prawnych oraz środowiskowych, co prowadzi do skrócenia czasu pracy i zmniejszenia nakładu pracy pracowników. Usprawnienie obejmuje także redukcję błędów użytkownika dzięki standaryzacji procedur analitycznych, automatycznej walidacji danych i eliminacji subiektywności wynikającej z różnego poziomu doświadczenia analityków. W efekcie proces powinien stać się bardziej powtarzalny, obiektywny i transparentny, a uzyskane wyniki powinny się cechować wyższą wiarygodnością i spójnością niż w przypadku tradycyjnych metod.

W odniesieniu do głównego problemu badawczego przyjęto hipotezę zakładającą, że: opracowany w ramach badań autorski System Dynamicznego Generowania Warunków Brzegowych (SDGWB), integrujący dane środowiskowe i prawne z elementami sztucznej inteligencji, może usprawnić proces podejmowania decyzji przestrzennych dotyczących lokalizacji i posadowienia nowych inwestycji OZE poprzez zwiększenie spójności, wiarygodności i adaptacyjności analiz wielokryterialnych.

W ramach głównego problemu badawczego wyróżniono również problemy szczegółowe, którymi są następujące pytania:

1. W jaki sposób integracja interpretacji przepisów prawnych (w tym regulacji środowiskowych i energetycznych), danych środowiskowych oraz wiedzy eksperckiej z zakresu inżynierii środowiska i energetyki w architekturze hybrydowej SDGWB wpływa na mechanizm podejmowania decyzji dotyczących oceny środowiskowej lokalizacji nowych inwestycji OZE?
2. W jaki sposób integracja wiedzy eksperckiej (w obszarze oddziaływań na komponenty środowiska, ryzyk środowiskowych oraz uwarunkowań energetycznych), przetwarzania języka naturalnego (NLP), zasady istotności oraz krzyżowej weryfikacji źródeł prawa zapewnia spójność, aktualność i wiarygodność wymagań prawnych i środowiskowych automatycznie generowanych przez system SDGWB?
3. W jaki sposób architektura systemu SDGWB, integrująca wieloczynnikową analizę (wykorzystując kryteria: środowiskowe, techniczne, energetyczne i ekologiczne), dane środowiskowe i interakcję konwersacyjną, prowadzi do zwiększenia autonomii procesu oceny lokalizacji obiektów OZE, umożliwiając kompleksową ocenę potencjalnych terenów inwestycyjnych i rozwój systemu od narzędzia wspomagającego decyzje do modelu o wysokiej autonomii?
4. Jak integracja wiedzy z zakresu inżynierii środowiska, prawa i energetyki w ramach hybrydowej architektury SDGWB wpływa na efektywność procesu decyzyjnego w zakresie oceny oddziaływania na środowisko nowych inwestycji OZE?
5. W jakim stopniu system SDGWB spełnia założone funkcjonalności (identyfikacja ograniczeń środowiskowych, analiza wrażliwości przestrzennej, ocena zgodności z wymaganiami formalno-prawnymi i środowiskowymi) i jaki jest jego potencjał praktycznego zastosowania w rzeczywistych procesach decyzyjnych?

W ramach procesu badawczego i w celu rozwiązania szczegółowych problemów badawczych przyjęto hipotezy szczegółowe, które zakładają, że:

Hipoteza 1: Zastosowanie Systemu Dynamicznego Generowania Warunków Brzegowych (SDGWB) umożliwia automatyczną interpretację przepisów prawnych, środowiskowych i energetycznych oraz ich integrację z danymi przestrzennymi i wiedzą ekspercką, co usprawnia ocenę oddziaływań środowiskowych i techniczno-energetycznych oraz wspiera wybór optymalnej lokalizacji inwestycji OZE.

Hipoteza 2: Budowa repozytorium wiedzy eksperckiej, w połączeniu z modułem przetwarzania języka naturalnego (NLP) oraz mechanizmami krzyżowej weryfikacji źródeł prawa (ISAP, publikatory, BIP), zapewnia spójność, aktualność i wiarygodność generowanych wymagań, a tym samym podnosi poziom zaufania do wyników systemu.

Hipoteza 3: Wieloczynnikowa analiza (prawna, administracyjna, środowiskowa i społeczna) z integracją danych przestrzennych oraz interakcją konwersacyjną umożliwia wybór optymalnych lokalizacji nowych obiektów OZE i wspiera rozwój narzędzi inżynierii środowiska w tym zakresie.

Realizacja sformułowanych celów badawczych oraz weryfikacja przyjętych hipotez wymagała zaprojektowania spójnej i wieloetapowej metodyki postępowania badawczego, integrującej zarówno analizy teoretyczne, jak też praktyczne aspekty funkcjonowania systemu.

Kolejne części pracy podzielono na dwa segmenty tematyczne. W pierwszym z nich zaprezentowano najczęściej stosowane rozwiązanie algorytmiczne do wskazywania optymalnych lokalizacji nowych obiektów OZE. Metoda ta skupia się na wykorzystaniu systemów analizy przestrzennej. W rozdziałach 10 i 11 omówiono klasyczną metodę lokalizacji obiektów w przestrzeni, jednocześnie wskazując na brak mechanizmów, które zautomatyzowałyby interpretację prawa, zapewniały jego aktualność oraz umożliwiały łączenie go z analizą geoprzestrzenną w sposób powtarzalny i wiarygodny.

Aktualnie stosowane metody przygotowania wymagań prawnych i lokalizacyjnych dla inwestycji OZE bazują na manualnej analizie dokumentów legislacyjnych (opisane w rozdziale 10.1) i ich zestawianiu z wynikami analiz przestrzennych GIS (opisane w rozdziale 10.2). W praktyce oznacza to, że specjalista musi samodzielnie przeszukiwać liczne źródła prawa (ISAP, Dziennik Ustaw, BIP, publikatory lokalne), interpretować ich treść, identyfikować wymagania dotyczące lokalizacji obiektów energetycznych, a następnie łączyć je z danymi przestrzennymi takimi jak MPZP, obszary chronione, ograniczenia środowiskowe, dostępność infrastruktury czy parametry terenu. Proces ten jest czasochłonny, podatny na błędy oraz trudny do standaryzacji, wymaga równoczesnego korzystania z różnych narzędzi prawnych i pakietów GIS.

Na tym tle pojawia się pytanie badawcze dotyczące tego, w jaki sposób mechanizmy integrujące wiedzę ekspercką, przetwarzanie języka naturalnego (NLP) oraz krzyżową weryfikację źródeł prawa wpływają na spójność, aktualność i wiarygodność automatycznie generowanych wymagań prawnych w systemach wspomaganie decyzji dla inwestycji OZE.

Z uwagi na złożony charakter tej problematyki, obejmującej uwarunkowania prawne, przestrzenne, środowiskowe i algorytmiczne, konieczne stało się opracowanie procedury badawczej umożliwiającej systematyczne przełożenie założeń koncepcyjnych na operacyjną oraz dydaktyczną strukturę modelu SDGWB. Ta procedura badawcza została zilustrowana w drugim segmencie analitycznym, w rozdziałach 12 i 13.

W konsekwencji proces badawczy oparto na metodzie badań projektowych *Design Science Research* (DSR), której celem jest tworzenie, implementacja i empiryczna weryfikacja narzędzi oraz metod wspierających rozwiązywanie złożonych problemów decyzyjnych. Zgodnie z przyjętą metodyką, proces badawczy został podzielony na trzy zasadnicze etapy, obejmujące także kroki pośrednie dla każdego z nich, co umożliwiło przeprowadzenie szczegółowej analizy poszczególnych zagadnień oraz zachowanie spójności całego toku badań. Struktura kroków przedstawia się następująco:

1. Krok I – Modelowanie koncepcyjne
 - 1.1. Definicja celów autorskiego Systemu Dynamicznego Generowania Warunków Brzegowych (SDGWB) (rozdziały 12.1)
 - Określenie funkcji systemu oraz zdefiniowanie zakresu danych (GIS, prawo, wiedza ekspercka).
 - Identyfikacja ograniczeń formalnoprawnych i przestrzennych oraz analiza uwarunkowań technicznych, społecznych, ekonomicznych i ekologicznych wpływających na lokalizację obiektu OZE.
 - 1.2. Modelowanie architektury systemu (rozdział 12.4.2)
 - Projekt warstw systemu (Baza Wiedzy (BW), NLP, GIS, AHP, Walidacja) oraz określenie przepływu danych między nimi.
 - Definicja interfejsów pomiędzy modułem językowym a warstwami geoprzestrzennymi.
 - Zdefiniowanie procesu ETL dla danych prawnych i przestrzennych.
 - 1.3. Modelowanie Bazy Wiedzy (BW) (rozdziały: 12.2.1, 12.2.2, 12.2.3)
 - Strukturyzacja kryteriów prawnych i technicznych.
 - Podział na dane zweryfikowane, eksperckie i automatyczne.
 - Opracowanie schematów aktualizacji i wersjonowania.
 - Zdefiniowanie metadanych i priorytetów źródeł.
 - 1.4. Modelowanie procesów analitycznych (rozdziały: 12.4.3-12.4.5)
 - Definicja etapów selekcji i procesu klasteryzacji działek,
 - Definicja metody wielokryterialnego AHP oraz reguł integracji wyników (rankingi działek).
 - 1.5. Opracowanie założeń walidacji i autokorekty (rozdziały: 12.3.4 i 12.5)
 - Zasady wykrywania niepewności danych.
 - Projekt testów i benchmarków.
2. Krok II – Implementacja rozwiązania
 - 2.1. Implementacja architektury SDGWB (rozdział 12.1)
 - Budowa modułów systemu: Moduł Bazy Wiedzy, Moduł NLP, Moduł RAG, Moduł LoRA, Moduł GIS oraz Moduł walidacji i kontroli jakości.
 - Integracja między modułami.
 - 2.2. Budowa SDGWB i rozwój bazy wiedzy (rozdziały: 12.2, 12.3.1, 12.3.2)
 - Budowa Bazy Wiedzy poprzez gromadzenie danych prawnych i środowiskowych, modułowe zapisanie warunków brzegowych, kodowanie wymagań w JSON oraz powiązanie reguł prawnych z atrybutami GIS.

- Priorytetyzacja informacji obejmująca Priorytet I – dane zweryfikowane, Priorytet II – wiedzę ekspercką oraz Priorytet III – dane automatyczne (RAG).
- 2.3. Implementacja klasteryzacji danych przestrzennych (rozdziały 12.4.3, 12.4.4)
 - Standaryzacja danych przestrzennych, indeksowanie przestrzenne (QuadTree, R-Tree) oraz podział zbiorów na partycje w środowisku Spark.
 - Klasteryzacja działek, eliminacja wąskich gardeł (algorytm MRR) oraz testy spójności klastrów (K, MBR, MRR).
 - Wyznaczenie potencjalnych lokalizacji (klastrów), przekazanie klastrów do modułu AHP.
- 2.4. Implementacja wielokryterialnej metody AHP (rozdziały 7.3, 12.4.5, 13.6.4)
 - Zdefiniowanie kryteriów i wykonanie obliczeń metodą AHP.
 - Przeliczenie wag na ranking działek, identyfikacja lokalizacji predysponowanych oraz przekazanie wyników do modułu raportowania.
- 3. Krok III – Walidacja systemu SDGWB
 - 3.1. Walidacja danych wejściowych (rozdziały 11.5-11.6)
 - Weryfikacja jakości danych GIS.
 - Walidacja źródeł prawnych.
 - Test zgodności modułu RAG.
 - 3.2. Walidacja modułów systemu (rozdziały 12.3.4, 12.4.4, 13.6.4)
 - Test dopasowania wymagań do atrybutów oraz poprawności generowania warunków brzegowych.
 - Testy obejmują ocenę spójności klastrów (K, MBR, MRR), testy porównawcze różnych algorytmów oraz analizę wydajności (czas, RAM, CPU).
 - Walidacja metody AHP obejmuje walidację spójności CR, test stabilności wag oraz analiza wrażliwości wag kryteriów.
 - 3.3. Walidacja wyników systemu (rozdziały: 12.5, 13.6.2, 13.6.3).
 - 3.4. Raportowanie wyników i wizualizacja (rozdziały: 12.4.6, 13.6.2, 13.6.4)
 - Ranking działek.
 - Mapy interaktywne klasyfikacji.
 - Tabele spełnienia kryteriów.
 - Eksport danych (JSON, PDF).

Przedstawiona metodyka badawcza stanowi podstawę dla całego procesu projektowania, implementacji i oceny autorskiego Systemu Dynamicznego Generowania Warunków Brzegowych (SDGWB). Cele badawcze oraz sformułowane problemy i hipotezy wyznaczyły kierunki analityczne oraz zakres empirycznej weryfikacji, umożliwiając jednoznaczne powiązanie uwarunkowań prawnych, przestrzennych i środowiskowych z algorytmicznymi mechanizmami działania systemu. Pozwoliło to ukierunkować cały proces na identyfikację czynników decydujących o jakości, rzetelności i elastyczności wykonywanych analiz przestrzennych.

Przyjęta struktura metodyczna stworzyła klarowne ramy postępowania, obejmujące etap modelowania koncepcyjnego, etap implementacji rozwiązania oraz etap walidacji systemu. Pozwoliło to na systematyczne przełożenie założeń teoretycznych na praktyczne rozwiązania technologiczne, a następnie na ich krytyczną ocenę pod kątem funkcjonalności i użyteczności. Metodyka pełni tym samym funkcję punktu odniesienia dla interpretacji uzyskanych wyników i stanowi podstawę do dalszych analiz prezentowanych w kolejnych częściach pracy, ukierunkowanych na weryfikację postawionych hipotez oraz ocenę praktycznego potencjału systemu SDGWB.

10. AKTUALNE METODY PLANOWANIA I PROJEKTOWANIA OBIEKTÓW ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII

Według A. Siwkowskiej (2023), przedsięwzięcia związane z odnawialnymi źródłami energii są uzależnione od specyfiki danej inwestycji, a głównie od jej mocy nominalnej, która określa zdolność do generowania energii elektrycznej. Proces planowania inwestycji opartych na odnawialnych źródłach energii rozpoczyna się od etapu koncepcyjnego, którego głównym celem jest identyfikacja lokalizacji spełniającej wymagania zasobowe, techniczne i środowiskowe.

10.1. Procedury formalno-prawne w procesie lokalizacji nowych obiektów odnawialnych źródeł energii

Realizacja inwestycji w zakresie odnawialnych źródeł energii wymaga przejścia standardowej procedury inwestycyjno-budowlanej i uzyskania odpowiednich decyzji administracyjnych, wydawanych w oparciu o akty prawne regulujące tę problematykę (Godlewska, Góralski, Goss, Gunia, 2025). Na etapie koncepcyjnym, w zależności od rodzaju projektowanej inwestycji, analizie podlegają mapy wietrzności, nasłonecznienia i potencjału substratów, jak również wstępne uwarunkowania środowiskowe oraz infrastrukturalne. Chociaż w tym procesie wykorzystywane są narzędzia przestrzenne, takie jak systemy informacji geograficznej, ostateczne decyzje lokalizacyjne podejmowane są przede wszystkim na podstawie wiedzy i doświadczenia ekspertów branżowych.

Kolejnym etapem procesu jest weryfikacja formalno-prawna, obejmująca zarówno przepisy ustawowe i rozporządzenia, jak i akty prawa miejscowego, w tym miejscowe plany zagospodarowania przestrzennego bądź decyzję o warunkach zabudowy oraz zagospodarowania terenu. Analiza tego rodzaju jest złożona, gdyż wymaga znajomości poszczególnych regulacji prawnych, a także umiejętności interpretacji ich wzajemnych powiązań i hierarchii (Kuna-Kasprzyk, Maj, 2023). W tym obszarze szczególne znaczenie odgrywa czynnik ludzki, który z jednej strony umożliwia elastyczność interpretacyjną, z drugiej jednak stwarza ryzyko błędów, niejednoznaczności oraz wydłużenia procesu decyzyjnego (Kwiatkowska, 2007).

W przypadku inwestycji z zakresu odnawialnych źródeł energii (OZE) obowiązek przeprowadzenia oceny oddziaływania na środowisko (OOS) wynika z polskiej ustawy implementującej dyrektywę EIA (Dyrektywy 2011/92/UE z późn. zm. 2014/52/UE; Ustawa z dnia 3 października 2008 r., 2024). Charakter procedury zależy od kwalifikacji przedsięwzięcia.

Instalacje wiatrowe o łącznej mocy nominalnej nie mniejszej niż 100 MW, a także wszystkie zlokalizowane na obszarach morskich Rzeczypospolitej Polskiej, zostały zaliczone do przedsięwzięć mogących zawsze znacząco oddziaływać na środowisko. W tym przypadku przeprowadzenie oceny oddziaływania na środowisko (OOS) jest obowiązkowe (Rozporządzenie RM z 10 września 2019 r., § 2 ust. 1 pkt 5).

Pozostałe instalacje wiatrowe, m.in. te o wysokości masztu ≥ 30 m lub sytuowane w formach ochrony przyrody, a także elektrownie wodne należą do grupy mogących potencjalnie znacząco oddziaływać, dla których obowiązek pełnej OOŚ ustala się na etapie wstępnego postępowania (Rozporządzenie RM z 10 września 2019 r., § 3 ust. 1 pkt 6 i pkt 5). Instalacje fotowoltaiczne kwalifikowane są obecnie jako przedsięwzięcia potencjalne, przy progach powierzchniowych: $\geq 0,5$ ha na obszarach objętych formami ochrony przyrody (lub ich otulinach) i ≥ 2 ha na pozostałych terenach (Rozporządzenie RM z 10 sierpnia 2023 r., § 1 i dodany § 3 ust. 1 pkt 54a).

Biogazownie co do zasady podlegają kwalifikacji jako przedsięwzięcia potencjalnie znacząco oddziałujące na środowisko, zwykle na podstawie przepisów dotyczących zabudowy przemysłowej oraz instalacji do przetwarzania odpadów, przy czym zakres tej kwalifikacji zależy od konfiguracji technologii i skali inwestycji (Wyrok WSA w Rzeszowie z 29.05.2024 r., II SA/Rz 381/24). O tym, czy dla inwestycji potencjalnej trzeba przeprowadzić pełną OOŚ, rozstrzyga organ w decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach po zasięgnięciu opinii RDOŚ oraz organów sanitarnych (Ustawa z 3 października 2008 r., art. 59, 63-64).

Kolejny etap stanowi ocena techniczna i infrastrukturalna, w ramach której badana jest dostępność sieci elektroenergetycznej, dróg transportowych i warunków gruntowych. Analizy realizowane są w dużej mierze manualnie z wykorzystaniem dokumentacji technicznej, danych od operatorów sieci i opracowań geotechnicznych. Brak szerokiej automatyzacji powoduje, że trafność i kompletność ocen zależy głównie od doświadczenia ekspertów oraz aktualności danych źródłowych.

Ostatnim etapem procesu jest przygotowanie pełnej dokumentacji inwestycyjnej, obejmującej raporty, analizy i wymagane operaty techniczno-projektowe. Dokumentacja ta składana jest w organach administracji publicznej w formie wniosku o pozwolenie na budowę i podlega manualnej weryfikacji przez urzędników oraz specjalistów branżowych. Taki model postępowania wydłuża procedury i zwiększa ryzyko rozbieżności interpretacyjnych, gdyż ocena w istotnym stopniu zależy od czynnika ludzkiego.

10.2. Systemy Informacji Geograficznej w procesie decyzyjnym

Systemy informacji geograficznej (GIS) stanowią dziś podstawowy komponent aparatu decyzyjnego w planowaniu i zarządzaniu środowiskowym. W teorii zarządzania mogą być one uznane za instrumenty wspierające realizację zadań z zakresu rozwoju zrównoważonego, takich jak planowanie (Skopeliti, Stratigea, Krassanakos, Lagarias, 2025), monitorowanie (Qwaider, Al-Ramadan, Shafiullah, Islam, Warku, 2023) czy optymalizacja (Šoltésová, Iannaccone, Štrba, Sidor, 2025).

Systemy Informacji Przestrzennej (SIP, ang. GIS) odgrywają coraz większą rolę w procesach planistycznych i decyzyjnych związanych z inwestycjami w odnawialne źródła energii. W literaturze wskazuje się, że mogą być traktowane zarówno jako narzędzia techniczne, służące do gromadzenia i wizualizacji danych, jak również instrumenty zarządcze wspierające realizację polityk zrównoważonego rozwoju (Aggeri, 2017; Aggeri, Labatut, 2011; Wereda, Załona, 2020).

Najważniejszą funkcją SIP jest wspieranie planowania przestrzennego i wyboru lokalizacji inwestycji. Systemy te integrują dane środowiskowe, infrastrukturalne i prawne, co umożliwia obiektywizację analiz porównawczych oraz ograniczenie ryzyka konfliktów społecznych i środowiskowych (Malczewski, 2006; Rahman, Szabó, 2022). W praktyce

szczególne znaczenie mają metody wielokryterialne (MCDA), pozwalające uwzględnić m.in. jakość powietrza, poziom hałasu, ryzyko powodziowe czy obecność form ochrony przyrody (Nowak, Monteiro, Olcina-Cantos, Vagiona, 2023; Taoukidou, Karpouzou, Georgiou, 2025). Dzięki temu możliwe jest wskazanie obszarów najbardziej perspektywicznych dla potencjalnych lokalizacji farm fotowoltaicznych, wiatrowych czy biogazowych (Moltames i in., 2022; Prieto-Amparán i in., 2021).

Oprócz planowania, SIP odgrywają kluczową rolę w monitorowaniu i kontroli procesów środowiskowych (Kochanek, 2025b). Pozwalają one na śledzenie zmian pokrycia terenu, tempa urbanizacji oraz skali wylesienia, a także na ocenę poziomu zanieczyszczeń (Calka, Szostak, 2025; Jaywant, Arif, 2024). W literaturze podkreśla się też ich zastosowanie w klasyfikacji obszarów zagrożonych powodziami, pożarami czy osuwiskami, co ma znaczenie dla zarządzania ryzykiem i planowania działań prewencyjnych (Pimenta i in., 2025; Ye i in., 2025). Systemy te ułatwiają ponadto komunikację między interesariuszami, tworząc wspólny język wizualny, który sprzyja koordynacji działań planistycznych i kryzysowych (Wereda, Załona, 2020).

Pomimo licznych zalet, skuteczność SIP w procesie inwestycyjnym pozostaje ograniczona. Kluczowe znaczenie ma jakość i aktualność danych źródłowych, które często są uśrednione i niepełne. Ograniczenia wynikają również z wysokich kosztów technologii, niedoborów kompetencyjnych użytkowników, a także barier prawno-organizacyjnych związanych z dostępem do danych oraz koordynacją działań instytucji (Stoeglehner, 2020; Krstić, Tadić, Miglietta, Porrini, 2025). Istotnym zagrożeniem jest nadmierne zaufanie do modeli przestrzennych, które przy błędnych założeniach mogą prowadzić do podejmowania niewłaściwych decyzji lokalizacyjnych.

Systemy Informacji Przestrzennej stanowią ważne narzędzie wspierające proces planowania i realizacji zwłaszcza nowych inwestycji. Ich potencjał polega na integracji różnorodnych danych oraz tworzeniu spójnego obrazu przestrzennego, co sprzyja podejmowaniu decyzji opartych na rzetelnych analizach. Skuteczność SIP uzależniona jest od jakości i ilości danych, dostępnych zasobów oraz od właściwego osadzenia analiz w szerszym procesie decyzyjnym. W konsekwencji SIP należy traktować jako instrument wspomagający, a nie zastępujący wiedzę i doświadczenie eksperta w ocenie złożonych uwarunkowań inwestycyjnych.

11. AKTUALNA PRAKTYKA PODEJMOWANIA DECYZJI O LOKALIZACJI OBIEKTÓW OZE

Analiza uwarunkowań środowiskowych i geoprzestrzennych przeprowadzona została w oparciu o dostępne portale geodezyjne i systemy informacji przestrzennej, które umożliwiają integrację i wizualizację różnorodnych danych środowiskowych oraz geoprzestrzennych. Wykorzystanie tych narzędzi pozwoliło na precyzyjne określenie położenia inwestycji względem form ochrony przyrody, infrastruktury technicznej, uwarunkowań geologicznych i hydrologicznych. Dodatkowo analizę uzupełniono o dane ewidencyjne, co umożliwiło pełną ocenę zgodności lokalizacji inwestycji z obowiązującymi przepisami i planami zagospodarowania przestrzennego.

11.1. Charakterystyka lokalizacji inwestycji

Wszystkie dane wykorzystane do analizy terenu przeznaczonego pod budowę planowanej instalacji hybrydowej w miejscowości Stary Sącz pozyskano z Państwowego Zasobu Geodezyjnego i Kartograficznego (PZGiK). Na podstawie oprogramowania geoinformacyjnego zidentyfikowano numery ewidencyjne działek gruntu, na których zlokalizowana będzie inwestycja. Ustalono, że obszar inwestycyjny położony jest na terytorium Rzeczypospolitej Polskiej, w województwie małopolskim, w gminie Stary Sącz. Całkowita powierzchnia terenu przewidzianego pod inwestycję wynosi 47 017 m². Szczegółowy wykaz działek, na których planowana jest realizacja instalacji hybrydowej, przedstawiono w tabeli 16.

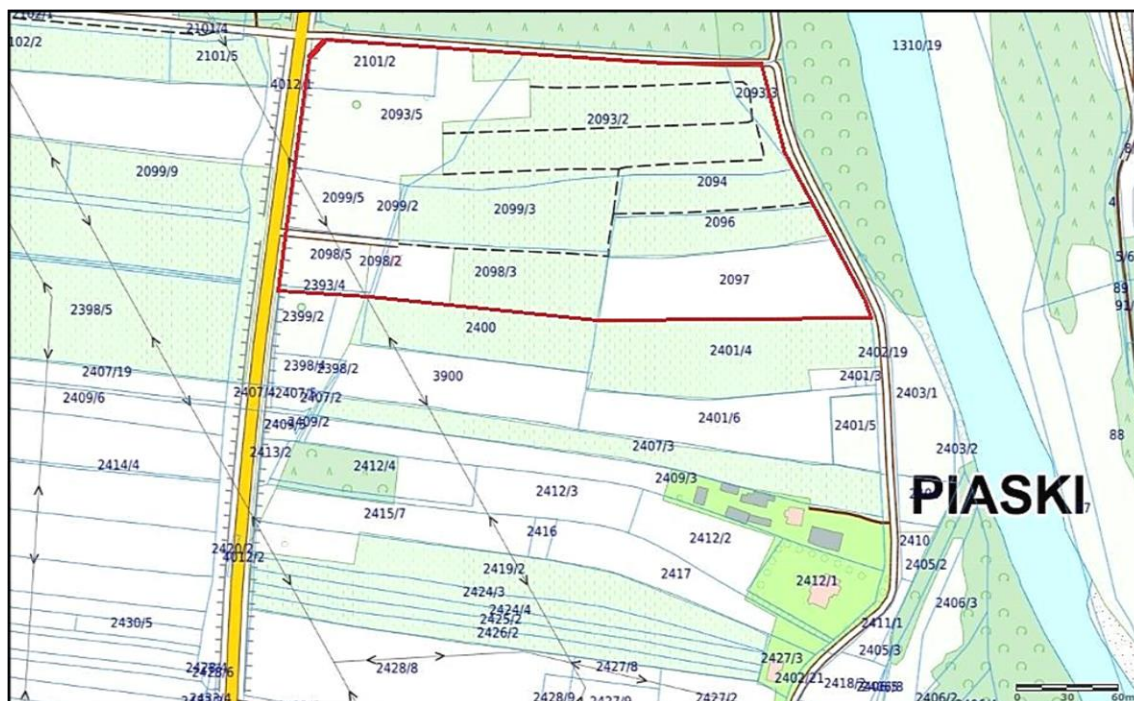
Tabela 16

Działki wraz z powierzchnią wchodzące w skład nieruchomości planowanej inwestycji

Numer działki	Powierzchnia działki (m ²)
121016_4.0015.2101/2	0,2195
121016_4.0015.2093/2	1,2052
121016_4.0015.2093/5	0,6122
121016_4.0015.2093/3	0,0800
121016_4.0015.2099/5	0,2146
121016_4.0015.2098/5	0,1923
121016_4.0015.2099/2	0,0093
121016_4.0015.2098/2	0,0097
121016_4.0015.2099/3	0,4758
121016_4.0015.2098/3	0,5056
121016_4.0015.2094	0,2581
121016_4.0015.2096	0,2946
121016_4.0015.2097	0,6106
121016_4.0015.2393/4	0,0142

Zródło: opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z PZGiK w Nowym Sączu.

Wszystkie wymienione działki tworzą spójną nieruchomość, na której zostanie zlokalizowana pełna infrastruktura planowanej hybrydowej instalacji odnawialnych źródeł energii. Przewidywaną powierzchnię inwestycji wraz z jej lokalizacją ukazano na mapie topograficznej (rysunek 21).



Rysunek 21. Teren inwestycji z zaznaczonymi na czerwono granicami na mapie topograficznej.
Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem serwisu Geoportal360 na podstawie strony: <https://sip.gison.pl/starysacz> (dostęp: 25.08.2025).

W celu podkreślenia możliwości przestrzennej reprezentacji obszaru inwestycji uruchomiono dodatkową warstwę wizualizacji w postaci mapy satelitarnej (rysunek 22).



Rysunek 22. Teren obiektu z zaznaczonymi granicami na ortofotomapie.
Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem serwisu Geoportal360 na podstawie strony: <https://sip.gison.pl/starysacz> (dostęp: 25.08.2025).

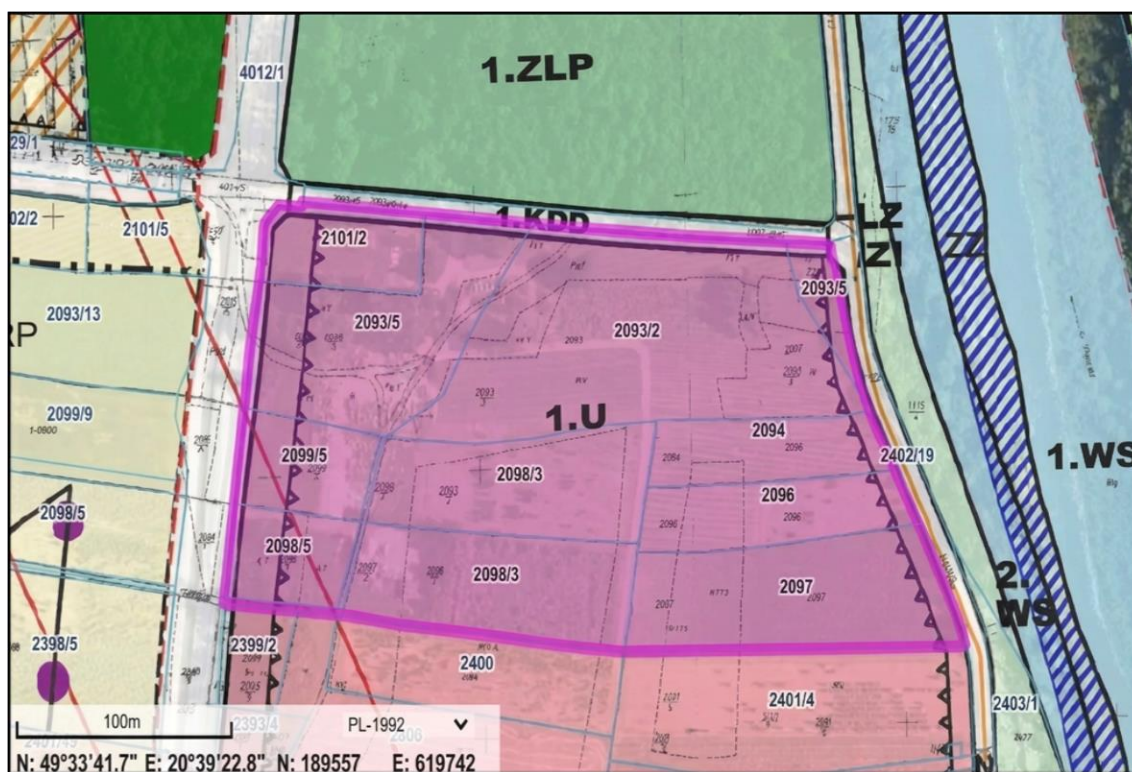
11.2. Miejsowy Plan Zagospodarowania Przestrzennego

Jednym z kluczowych dokumentów analizowanych na etapie rozpoczęcia procesu projektowego jest miejscowy plan zagospodarowania przestrzennego (MPZP). Zawiera on zarówno część graficzną, jak i tekstową, określającą przeznaczenie terenu oraz szczegółowe zasady jego zagospodarowania.

Dla przedmiotowego obszaru inwestycji podstawą jest uchwała Rady Miejskiej w Starym Sączu nr XLI/527/2013 z dnia 16 września 2013 r. w sprawie uchwalenia MPZP (plan nr 8, Miasto Stary Sącz), z późniejszymi zmianami wprowadzonymi uchwałą z dnia 16 września 2024 roku.

Z ustaleń MPZP wynika, że planowana inwestycja zlokalizowana zostanie na terenach zabudowy usługowej, co umożliwi realizację inwestycji o charakterze energetycznym, przy spełnieniu dodatkowych warunków technicznych i środowiskowych.

Aby zobrazować ustalenia planu, poniżej przedstawiono fragment MPZP (rysunek 23), obejmujący obszar inwestycji i odpowiadającą mu legendę z oznaczeniami funkcji terenu (rysunek 24).



Rysunek 23. Miejskowy plan zagospodarowania przestrzennego obejmujący teren inwestycji z dnia 05.09.2025 roku.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Urzędu Gminy Stary Sącz.

I. PRZEZNACZENIE TERENÓW		1.-2. KDW	TERENY KOMUNIKACJI - DROGA WEWNĘTRZNA
TERENY ZIELENI I WÓD		K	TERENY KOMUNIKACJI
1.WS	TERENY WÓD ŚRÓDLĄDOWYCH PŁYNĄCYCH (RZĘKA POPRAD)	TERENY INFRASTRUKTURY TECHNICZNEJ	
2.WS	TERENY URZĄDZEŃ WODNYCH, ZWIĄZANYCH Z FUNKCJONOWANIEM ELEKTOWNI WODNEJ	NU	TERENY GOSPODARKI ODPADAMI
ZL	TERENY LASÓW	II. INNE USTALENIA PLANU	
1.-2.ZLP	TERENY LASÓW OCHRONNYCH SKARBU PAŃSTWA		GRANICA OBSZARU OBJĘTEGO USTALENIAMI PLANU STARY SĄCZ NR 8
LZ/ZI	TERENY ZIELENI		LINIE ROZGRANICZAJĄCE TERENY O RÓŻNYM PRZEZNACZENIU
ZI	TERENY ZIELENI IZOLACYJNEJ	1.MN/U	OZNACZENIA CYFROWO-LITEROWE
TERENY ROLNE			NIEPRZEKRACZALNE LINIE ZABUDOWY
RZ	TERENY ROLNE	III. OZNACZENIA INFORMACYJNE	
1.-2.RU	TERENY PRODUKCJI ROLNEJ		POŁUDNIOWOMAŁOPOLSKI OBSZAR CHRONIONEGO KRAJOBRAZU - CAŁY OBSZAR OPRACOWANIA
TERENY ZABUDOWY MIESZKANIOWEJ JEDNORODZINNEJ I USŁUG			OTULINA POPRADZKIEGO PARKU KRAJOBRAZOWEGO - CAŁY OBSZAR OPRACOWANIA
1.-2.MN/U	TERENY ZABUDOWY MIESZKANIOWEJ JEDNORODZINNEJ I USŁUG		OBSZARY SZCZEGÓLNEGO ZAGROŻENIA POWODZIĄ Q1% WYZNACZONE W "STUDIUM OKREŚLAJĄCYM GRANICE OBSZARÓW BEZPOŚREDNIEGO ZAGROŻENIA POWODZIĄ DLA TERENÓW NIEOBWAŁOWANYCH W ZLEWNI DOLNEGO DUNAJCA" SPORZĄDZONYM PRZEZ DYREKTORA RZGW W KRAKOWIE
TERENY ZABUDOWY USŁUGOWEJ			OBSZAR GŁÓWNEGO ZBIORNIKA WÓD PODZIEMNYCH NR 437 - DOLINA DUNAJCA - CAŁY OBSZAR OPRACOWANIA
1.U	TERENY ZABUDOWY USŁUGOWEJ		OBSZAR NAJWYŻSZEJ OCHRONY DLA GZWP NR 437 - DOLINA DUNAJCA - CAŁY OBSZAR OPRACOWANIA
2.U/P	TERENY ZABUDOWY USŁUGOWEJ I PRODUKCYJNEJ		SIECI ENERGETYCZNE 15kV I 30 kV
TERENY PRODUKCYJNE			KANAŁY DESZCZOWE
1.-3.PPn	TERENY ZABUDOWY PRODUKCYJNEJ		KOLEKTORY KANALIZACJI SANITARNEJ
TERENY KOMUNIKACJI			PROJEKTOWANY GAZOCIĄG WYSOKIEGO CIŚNIENIA WRAZ ZE STREFĄ OGRANICZONEGO UŻYTKOWANIA
1.KDG	TERENY KOMUNIKACJI - DROGA PUBLICZNA KLASY GŁÓWNEJ		STREFA PROGNOZOWANEGO NEGATYWNEGO ODDZIAŁYWANIA SKŁADOWISKA KOMUNALNEGO - 100m
1.-2.KDD	TERENY KOMUNIKACJI - DROGI PUBLICZNE KLASY DOJAZDOWEJ		

Rysunek 24. Legenda do MPZP Stary Sącz z dnia 05.09.2025 roku.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Urzędu Gminy Stary Sącz.

Na podstawie ustaleń MPZP, wizji lokalnej oraz pomiarów w programie Gison określono najbliższe elementy otoczenia:

- ok. 30 m – tereny rolne, które nie będą miały istotnego wpływu na realizację inwestycji;
- ok. 12 m – grunty Lasów Ochronnych Skarbu Państwa;
- ok. 40 m – wody płynące (ciek wodny);
- w sąsiedztwie – linie elektroenergetyczne o napięciu 15 kV i 30 kV wraz ze strefami technicznymi;
- w sąsiedztwie – projektowany gazociąg wysokiego ciśnienia ze strefą ograniczonego użytkowania.

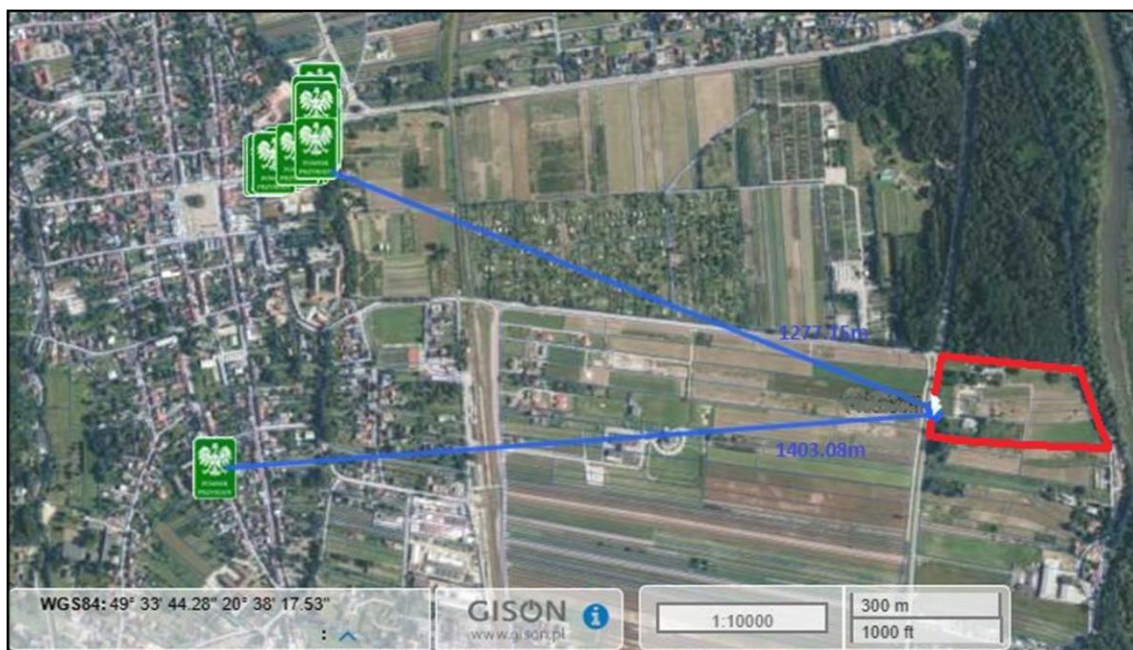
W promieniu ok. 42 m od planowanej inwestycji zlokalizowane są także tereny zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej i usługowej.

11.3. Uwarunkowania środowiskowe i prawne

Analiza środowiskowa dla inwestycji obejmowała identyfikację obszarów chronionych, pomników przyrody, a także parków narodowych i krajobrazowych. Wykorzystano do tego program Geoportal Krajowy Geoserwis GDOŚ, nadzorowany przez Generalną Dyрекcję Ochrony Środowiska, który stanowi interaktywną mapę form ochrony przyrody w Polsce z podziałem na warstwy tematyczne.

11.3.1. Pomniki przyrody

Na rysunku 25 zaprezentowano mapę topograficzną z oznaczeniem pomników przyrody położonych w otoczeniu analizowanego terenu.



Rysunek 25. Mapa topograficzna form ochrony przyrody w Starym Sączu.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Generalnej Dyrekcji Ochrony Środowiska.

Analiza wykazała, że najbliższy pomnik przyrody znajduje się w odległości ok. 1,3 km od planowanej inwestycji. W świetle Rozporządzenia Ministra Środowiska (Dz.U. z 2017 r., poz. 2300), minimalny odstęp, jaki musi zostać zachowany między pomnikiem przyrody a zabudową bądź też inwestycją, wynosi 20 m. Tak znaczne przekroczenie tego dystansu całkowicie eliminuje ewentualne przeciwwskazania środowiskowe w tym zakresie.

11.3.2. Rezerваты przyrody i parki krajobrazowe

Kolejnym etapem była analiza pod kątem występowania rezerwatów przyrody oraz parków krajobrazowych, które są obszarami objętymi szczególną ochroną z uwagi na walory przyrodnicze, krajobrazowe i kulturowe. Szczegółowe zasady zagospodarowania przestrzennego w ich otoczeniu reguluje ustawa o ochronie przyrody (Dz.U. z 2004 r., Nr 92, poz. 880 z późn. zm.).

Na rysunku 26 przedstawiono mapę topograficzną z oznaczeniem rezerwatów i parków krajobrazowych w rejonie Starego Sącza.



Rysunek 26. Mapa topograficzna parków krajobrazowych i rezerwatów.

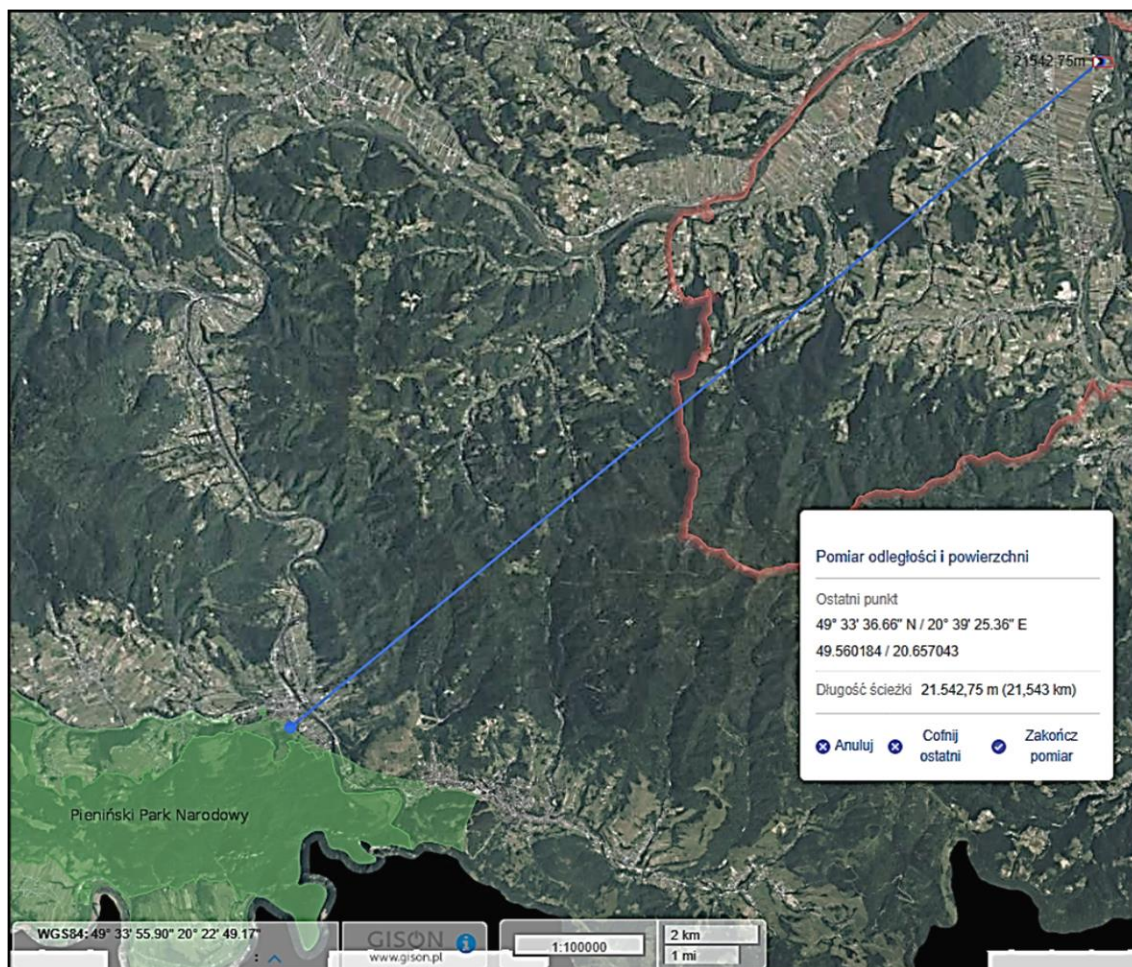
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Generalnej Dyrekcji Ochrony Środowiska.

Analiza wskazuje, że obszar inwestycyjny obiektu nie znajduje się w granicach Popradzkiego Parku Krajobrazowego ani w otulinie Popradzkiego Parku Krajobrazowego. Brak jest zatem formalnych ograniczeń wynikających z tej formy ochrony przyrody.

11.3.3. Parki narodowe i zespoły przyrodniczo-krajobrazowe

Następnie przeanalizowano położenie obszaru względem parków narodowych oraz zespołów przyrodniczo-krajobrazowych. W parkach narodowych obowiązuje całkowity zakaz realizacji inwestycji budowlanych, z wyjątkiem określonych działań infrastrukturalnych (np. przebudowy istniejących dróg lub linii elektroenergetycznych). Ponadto ustawa o ochronie środowiska (Dz.U. z 2004 r., Nr 92, poz. 880) zakazuje przedsięwzięć mogących powodować emisję substancji toksycznych i niebezpiecznych, które mogłyby negatywnie oddziaływać na środowisko.

Na rysunku 27 ukazano mapę topograficzną parków narodowych i zespołów przyrodniczo-krajobrazowych.

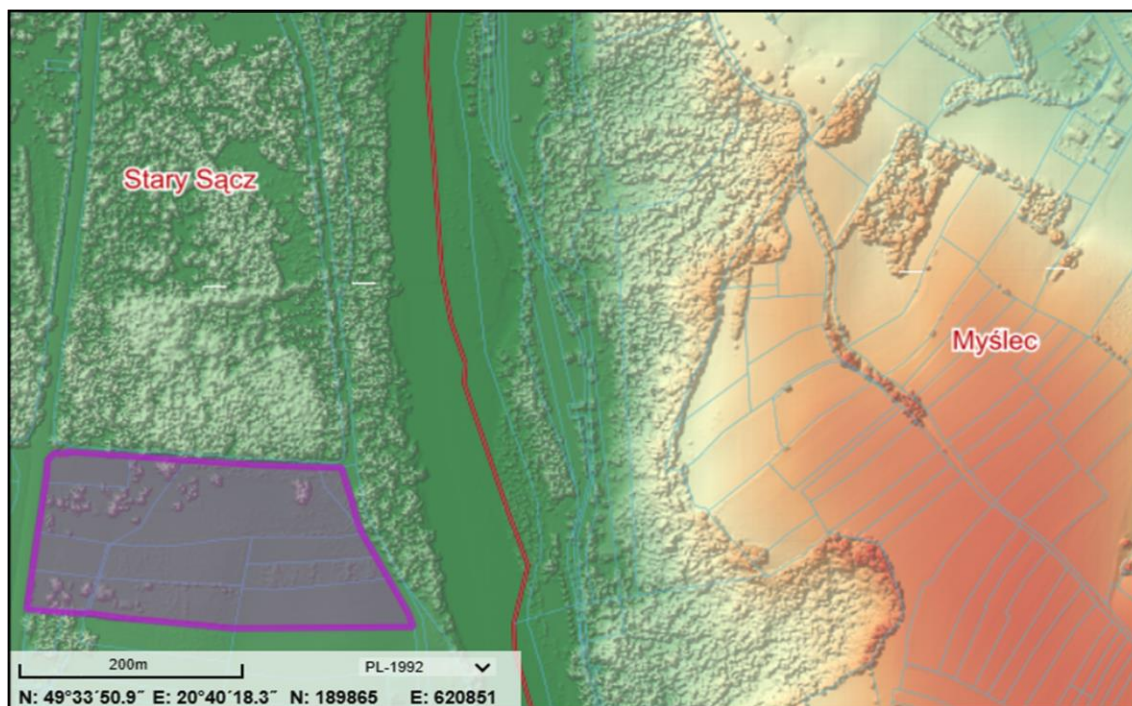


Rysunek 27. Mapa topograficzna Parków Narodowych i Zespołów Przyrodniczo-Krajobrazowych. Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Generalnej Dyrekcji Ochrony Środowiska.

Obszar Parku Narodowego oznaczono warstwą w kolorze zielonym. Najbliższy Park Narodowy znajduje się w odległości 21,54 km w linii prostej od nieruchomości inwestycyjnej. Jest to Pieniński Park Narodowy, którego położenie nie ingeruje w możliwość realizacji inwestycji. Teren inwestycji nie znajduje się też w obrębie programu Natura 2000, który obejmuje ochroną wszystkie tereny, siedliska przyrodnicze czy gatunki uważane na obszarze Unii Europejskiej za rzadkie i cenne.

11.4. Obszary Natura 2000

Ostatnim etapem była analiza obszarów objętych ochroną w ramach sieci Natura 2000, obejmującej siedliska i gatunki cenne w skali Unii Europejskiej. Wyniki analizy wykazały, że planowana inwestycja nie znajduje się w granicach obszaru Natura 2000, a tym samym nie generuje dodatkowych wymogów środowiskowych w tym zakresie.



Rysunek 29. Wizualizacja numerycznego modelu terenu (NMT) w postaci zacieleniowania – Stary Sącz.

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem programu Geoportal360 na podstawie strony <https://sip.gison.pl/starysacz> (dostęp: 25.08.2025).

Analiza wykazała, że nachylenie terenu na badanym terenie nie jest jednorodne. Dla części obszaru, na którym planowana jest budowa instalacji fotowoltaicznej, konieczne będzie przeprowadzenie niwelacji gruntu, polegającej na usunięciu lub dosypaniu odpowiednich mas ziemnych w celu wyrównania powierzchni. Proces ten realizuje się poprzez wyznaczenie warstw i określenie powierzchni płaskich oraz nachylonych, a następnie doprowadzenie ich do wymaganych parametrów projektowych.

Uzyskana siatka wysokościowa umożliwiła precyzyjne określenie ukształtowania całej działki inwestycyjnej, a także identyfikację obszarów wymagających korekt niwelacyjnych. W szczególności należy wziąć pod uwagę różnicę wysokości między terenem inwestycji a przylegającą drogą, aby zapewnić prawidłowe odwodnienie i komunikację.

Wnioski z analizy NMT wskazują, że profilowanie terenu jest niezbędnym etapem przygotowania inwestycji. Choć samo profilowanie nie wymaga uzyskania odrębnego pozwolenia administracyjnego, w praktyce prace te powinny być powierzone podmiotom wyspecjalizowanym, dysponującym odpowiednim sprzętem geodezyjnym i budowlanym.

11.5.2. Analiza relacji sąsiedztwa drzewostanu z inwestycją

Wydajność instalacji fotowoltaicznych zależy w znacznym stopniu od ilości promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni paneli. Jednym z kluczowych czynników ograniczających sprawność systemu jest zacielenie, którego źródłem mogą być zarówno elementy infrastruktury, jak i drzewostan znajdujący się w otoczeniu inwestycji.

Dlatego na etapie projektowania elektrowni PV przeprowadzono szczegółową analizę przestrzennego rozmieszczenia zadrzewienia w sąsiedztwie działki inwestycyjnej. Celem było wykluczenie lub ograniczenie ryzyka zacienienia, które w sposób bezpośredni obniża produkcję energii elektrycznej.

Na rysunku 30 ukazano lokalizację drzewostanu wokół terenu przeznaczonego pod inwestycję wraz z pomiarami odległości w różnych kierunkach.



Rysunek 30. Lokalizacja drzewostanu w otoczeniu działki inwestycyjnej wraz z pomiarami odległości.

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem programu CRFS.

Analiza wykazała, że:

- od strony południowej i zachodniej nie występują przeszkody terenowe powodujące zacienienie;
- od strony północnej i częściowo wschodniej teren sąsiaduje z obszarami zalesionymi;
- odległość drzewostanu od granicy działki po stronie wschodniej waha się w przedziale 4,5-9,1 m.

W świetle obowiązujących zaleceń technicznych przyjęto konieczność zachowania buforu w postaci 30 m odległości pomiędzy panelami PV a linią drzewostanu. Rozwiązanie to pozwoli uniknąć efektu zacienienia, szczególnie w godzinach porannych i popołudniowych, kiedy promieniowanie słoneczne pada pod małym kątem.

Na analizowanym obszarze zaplanowano rozmieszczenie elementów instalacji hybrydowej w sposób dostosowany do warunków środowiskowych:

- farma fotowoltaiczna zostanie zlokalizowana w południowej części działek, zapewniając pełną ekspozycję na promieniowanie słoneczne;
- tereny sąsiadujące od północy oraz wschodu, w pobliżu drzewostanu, przeznaczono pod infrastrukturę towarzyszącą, dla której zacienienie nie stanowi istotnego ograniczenia.

Przeprowadzona analiza jednoznacznie wskazuje, że uwzględnienie odpowiednich odległości od istniejącego drzewostanu umożliwia optymalne usytuowanie farmy PV i minimalizację strat związanych z zacienieniem.

11.5.3. Analiza hydrograficzna i hydrologiczna w kontekście zagrożenia powodziowego

Zagrożenie powodziowe stanowi istotny czynnik ryzyka lokalizacyjnego dla inwestycji budowlanych, w szczególności dla obiektów energetycznych o charakterze infrastrukturalnym. W Polsce największe niebezpieczeństwo powodzi dotyczy obszarów dolin rzecznych oraz terenów nadmorskich, przy czym poszczególne typy powodzi mogą występować z różną częstotliwością i intensywnością. Najczęstszą przyczyną powodzi są intensywne opady atmosferyczne i nagłe wezbrania rzek.

Powódź jest zjawiskiem gwałtownym i w znacznym stopniu niekontrolowanym, co powoduje, że społeczności lokalne nie są w stanie jej powstrzymać, a jedynie ograniczać potencjalne straty. W przypadku rzeki Poprad, która stanowi istotny element analizowanego obszaru, w ostatnich latach obserwuje się wzrost częstotliwości wezbrań stanu wód. Zjawisko to jest po części rezultatem spadku naturalnej retencji i intensywnego zagospodarowania doliny.

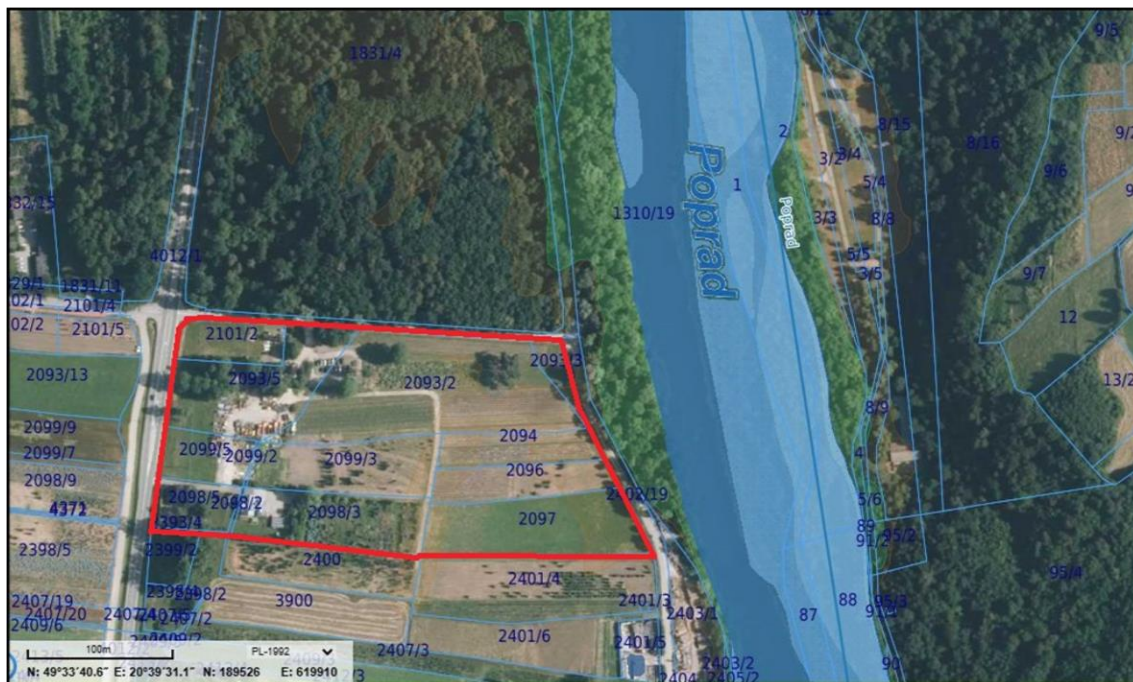
Średni spadek terenu w dolinie Popradu wynosi 2,14 ‰, co powoduje prędkość przepływu wody 0,8-1,2 m·s⁻¹ w warunkach normalnych i do 2,4 m·s⁻¹ przy wysokich stanach wód. Rzeka ma ok. 170 km długości, z czego ponad 100 km leży na Słowacji, a 31 km stanowi granicę polsko-słowacką. Jej źródła znajdują się w Tatrach Wysokich, gdzie powstaje z połączenia Hińczowego Potoku i potoku Krupa wypływającego z Popradzkiego Stawu.

Ważnym czynnikiem antropogenicznym zwiększającym zagrożenie powodziowe jest działalność człowieka, w szczególności intensywna zabudowa i urbanizacja, które przyczyniają się do przyspieszenia spływu powierzchniowego oraz powstawania gwałtownych fal powodziowych.

Aby ocenić, czy działka inwestycyjna znajduje się w bezpiecznej lokalizacji, wykorzystano mapy zagrożenia powodziowego (MZP). Dokumenty te umożliwiają określenie ryzyka wystąpienia zalania i podjęcie odpowiednich działań prewencyjnych. Do analizy użyto programu GISON, w którym przeprowadzono symulacje hydrologiczne dla scenariuszy powodzi o różnym prawdopodobieństwie wystąpienia.

Na rysunkach 31 i 32 ukazano wyniki symulacji zagrożenia powodziowego:

- Q1 – prawdopodobieństwo wystąpienia raz na 100 lat (powódź stuletnia);
- Q10 – prawdopodobieństwo wystąpienia raz na 10 lat (powódź dziesięcioletnia).



Rysunek 31. Symulacja zagrożenia powodziowego – scenariusz Q1.
Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem programu GISON.



Rysunek 32. Symulacja zagrożenia powodziowego – scenariusz Q10.
Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem programu GISON.

Analiza wyników symulacji wykazała, że w obu wariantach Q1 i Q10 widoczna jest zmiana zasięgu rzeki Poprad w wyniku wezbrań. Teren przeznaczony pod inwestycję nie znajduje się w strefie zagrożenia powodziowego. Oznacza to, że ryzyko zalania planowanej infrastruktury jest znikome, a lokalizacja spełnia kryteria bezpieczeństwa hydrologicznego.

11.5.4. Analiza geologiczna i zagrożenie osuwiskowe

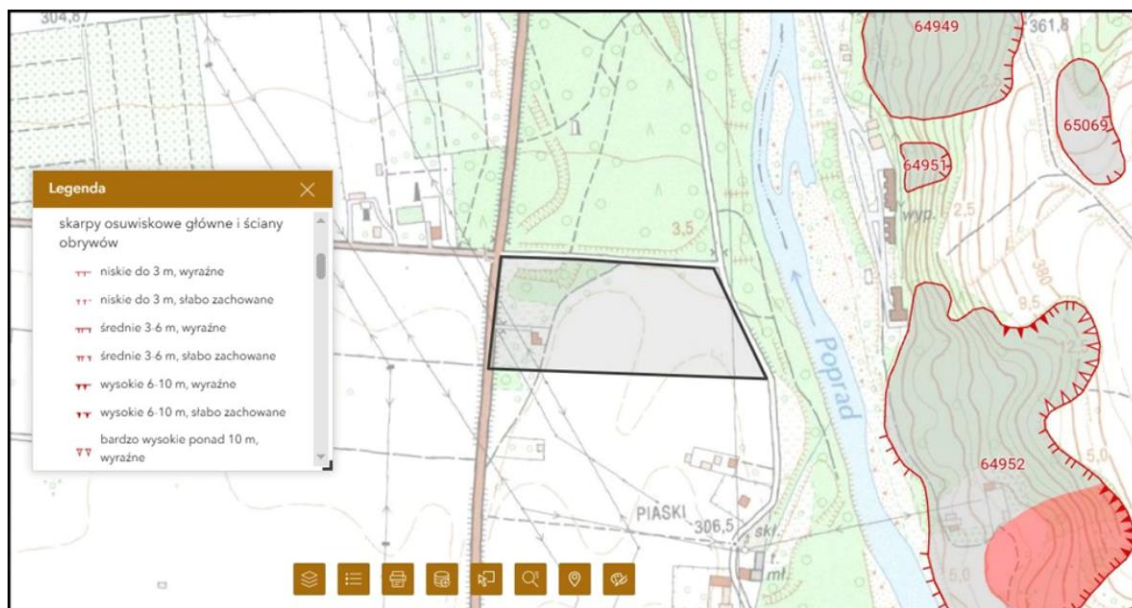
Stabilność podłoża gruntowego stanowi jeden z kluczowych czynników determinujących możliwość lokalizacji inwestycji budowlanych. W przypadku obiektów energetycznych, takich jak elektrownie hybrydowe, szczególnego znaczenia nabiera ryzyko występowania osuwisk, które mogą stanowić bezpośrednie zagrożenie dla trwałości konstrukcji oraz bezpieczeństwa eksploatacji.

Osuwiska definiowane są jako translokacje mas ziemnych i skalnych, wywołane zarówno czynnikami naturalnymi, jak i działalnością człowieka. Procesy te polegają na przemieszczaniu się materiału glebowego i skalnego wzdłuż powierzchni poślizgu, co może prowadzić do zniszczenia infrastruktury i zagrożenia dla środowiska.

Analiza gruntu pod kątem zagrożenia osuwiskowego obejmowała m.in.:

- pomiar głębokości występowania wód gruntowych;
- badania składu chemicznego gruntu;
- określenie wartości pH gleb;
- weryfikację występowania czynnych osuwisk w rejestrze SOPO (System Ośłony Przeciwośuwiskowej).

Na rysunku 33 przedstawiono mapę czynnych osuwisk w rejonie inwestycji z zaznaczoną lokalizacją analizowanej działki.

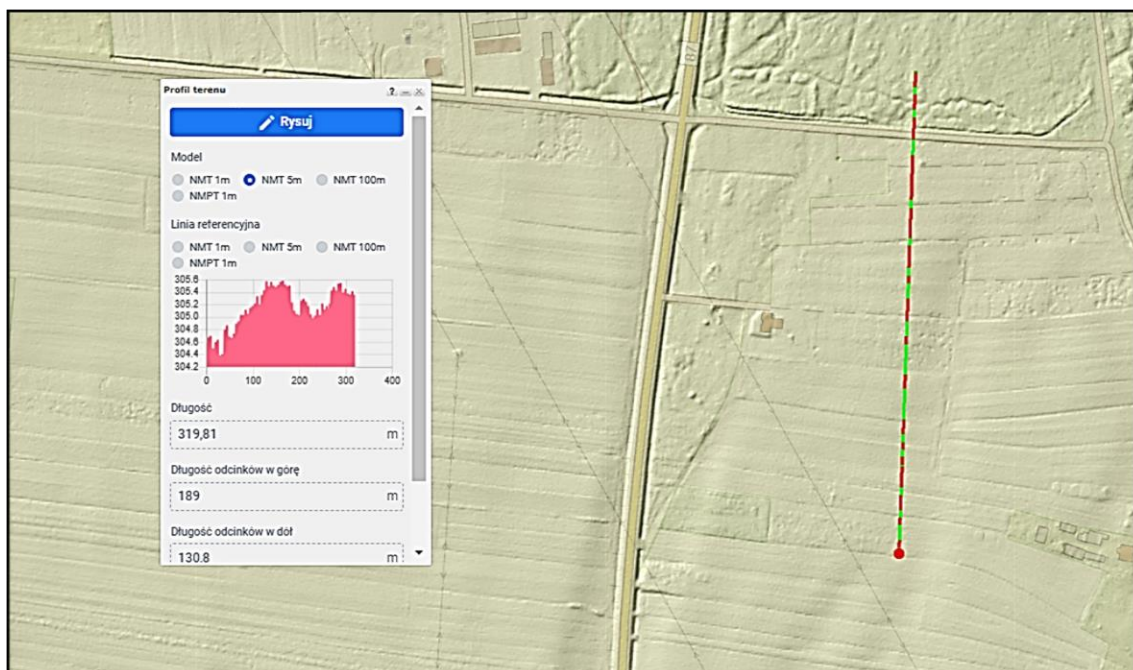


Rysunek 33. Mapa czynnych osuwisk z oznaczoną działką inwestycyjną.

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem <https://mapa.osuwiska.pgi.gov.pl/> (dostęp: 25.08.2025).

Wyniki analizy dowodzą, że w otoczeniu działki inwestycyjnej występuje znacząca liczba czynnych osuwisk, jednak żadne z nich nie znajduje się bezpośrednio na terenie przeznaczonym pod inwestycję. Dla uzupełnienia oceny stabilności przeprowadzono analizę profilu wysokościowego działki.

Profil terenu, przedstawiony na rysunku 34, obrazuje zmienność wysokości bezwzględnych na odcinku przecinającym obszar inwestycji.



Rysunek 34. Profil wysokościowy działki inwestycyjnej.

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem programu Geoportal360 na podstawie strony <https://sip.gison.pl/starysacz> (dostęp: 25.08.2025).

Interpretacja profilu wykazała, że powierzchnia terenu cechuje się stosunkowo niewielkim zróżnicowaniem. Łączna długość odcinków nachylonych w górę wyniosła 189 m, a odcinków nachylonych w dół jedynie 130,8 m. W analizie próbkowania uzyskano pełen zestaw współrzędnych wysokościowych, które umożliwiają precyzyjne wyznaczenie fragmentów wymagających ewentualnej niwelacji.

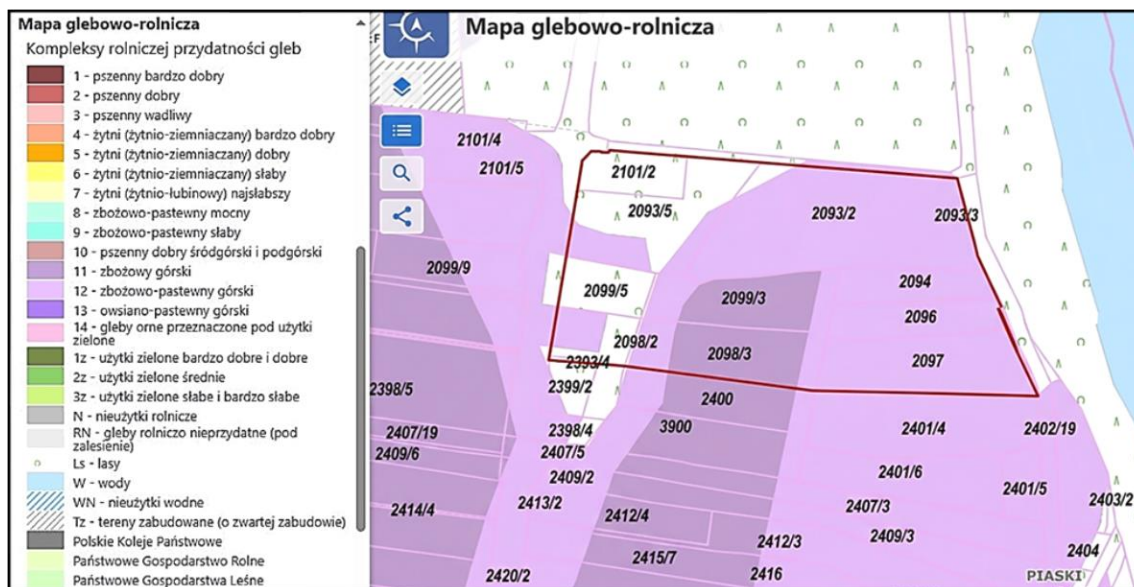
W kolejnym etapie dokonano obliczenia objętości mas ziemnych w odniesieniu do płaszczyzny odniesienia. Pozwoliło to na określenie minimalnych i maksymalnych wysokości w obrębie działki. Najniższy punkt terenu znajduje się na wysokości 304,3 m n.p.m., a najwyższy na wysokości 305,5 m n.p.m. Największe zmiany wysokości odnotowano w odległości ok. 140 m od najniższej krawędzi nieruchomości.

11.5.5. Analiza bonitacji gleby na podstawie rejestru gruntów

Ocena jakości gleb na obszarze planowanej inwestycji stanowi istotny etap procesu inwestycyjnego, gdyż warunki glebowe decydują zarówno o możliwościach użytkowania rolniczego, jak i o formalnych procedurach związanych z uzyskaniem zezwoleń na zmianę sposobu użytkowania terenu. Bonitacja gleb pozwala na określenie ich żyzności, stosunków wodnych i stopnia przydatności rolniczej, co ma znaczenie przy weryfikacji zasadności lokalizacji inwestycji energetycznych.

W analizie dla obszaru Stary Sącz wykorzystano mapy glebowo-rolnicze dostępne w systemie GeoMałopolska.

Na rysunku 35 ukazano rodzaje gleb zidentyfikowanych na działce inwestycyjnej.



Rysunek 35. Mapa rodzajów gleb na działce inwestycyjnej wraz z granicami działek.

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem GeoMałopolska na podstawie strony <https://mapy.malopolski.pl/> (dostęp: 25.08.2025).

Wyniki analizy wskazują, że grunty objęte przedsięwzięciem należą do kompleksu owsiano-pastewnego górskiego. Kompleks ten charakteryzuje się pochodzeniem mineralnym i wykształceniem w obrębie gleb brunatnych wylugowanych, powstałych ze skał osadowych o spoiwie węglanowym. Gleby te cechują się przeciętną wartością rolniczą oraz ograniczoną przydatnością dla intensywnych upraw, lecz dobrze nadają się do trwałych użytków zielonych.

W świetle obowiązujących przepisów grunty te nie należą do klas I-III, które podlegałyby szczególnej ochronie oraz obowiązkowi uzyskania decyzji o wyłączeniu z produkcji rolnej. Oznacza to, że realizacja inwestycji hybrydowej na wskazanym terenie nie będzie wymagała dodatkowych procedur w tym zakresie.

Podsumowując, bonitacja gleb wykazała występowanie gleb o średniej przydatności rolniczej (kompleks owsiano-pastewny górski), brak kolizji z przepisami o ochronie gruntów najwyższej klasy oraz możliwość przeznaczenia terenu na cele inwestycyjne bez konieczności prowadzenia dodatkowych procedur związanych z ochroną gruntów rolnych.

11.5.6. Analiza sieci drogowej

Dostęp komunikacyjny do terenu inwestycji stanowi jeden z kluczowych warunków powodzenia przedsięwzięcia budowlanego. Zgodnie z przepisami Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. z 2002 r., Nr 75, poz. 690 z późn. zm.), każda nieruchomość przeznaczona pod inwestycję musi posiadać zapewniony dostęp do drogi publicznej. Jeżeli działka nie graniczy bezpośrednio z drogą, dostęp ten realizowany jest poprzez ustanowienie służebności drogowej.

Dla planowanej elektrowni hybrydowej w Starym Sączu dostęp komunikacyjny oceniono jako korzystny. Bezpośrednio do granicy działki inwestycyjnej przylegają drogi gminne oznaczone symbolem 1.KDD i 2.KDD, które zostały utwardzone oraz przystosowane do ruchu pojazdów ciężkich.

Na rysunku 36 zaprezentowano przebieg drogi gminnej 1.KDD i 2.KDD w sąsiedztwie działki inwestycyjnej, z oznaczeniem w kolorze żółtym drogi publicznej klasy głównej.



Rysunek 36. Droga gminna zapewniająca dostęp do działki inwestycyjnej.

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem programu sip.gison.pl/starysacz_planowanie.

Parametry dróg dojazdowych odpowiadają wymaganiom stawianym tego typu inwestycjom. Ich nawierzchnia jest odpowiednio utwardzona, a szerokość jezdni wynosi ok. 5 m, co umożliwia bezproblemowe mijanie się pojazdów ciężarowych poruszających się w przeciwnych kierunkach.

Analiza potwierdziła, że infrastruktura drogowa w otoczeniu działki pozwala na sprawny transport elementów technologicznych elektrowni hybrydowej, w tym paneli fotowoltaicznych, turbin oraz urządzeń związanych z budową biogazowni. Co istotne, dobra dostępność komunikacyjna minimalizuje też koszty eksploatacyjne w trakcie późniejszego funkcjonowania obiektu.

Podsumowując, teren inwestycji posiada korzystne położenie względem sieci dróg publicznych, zapewniając bezpośredni dostęp do drogi gminnej 1.KDD oraz alternatywny dojazd od strony drogi publicznej klasy głównej, a także odpowiednią szerokość i utwardzenie jezdni, umożliwiające transport technologiczny oraz eksploatacyjny.

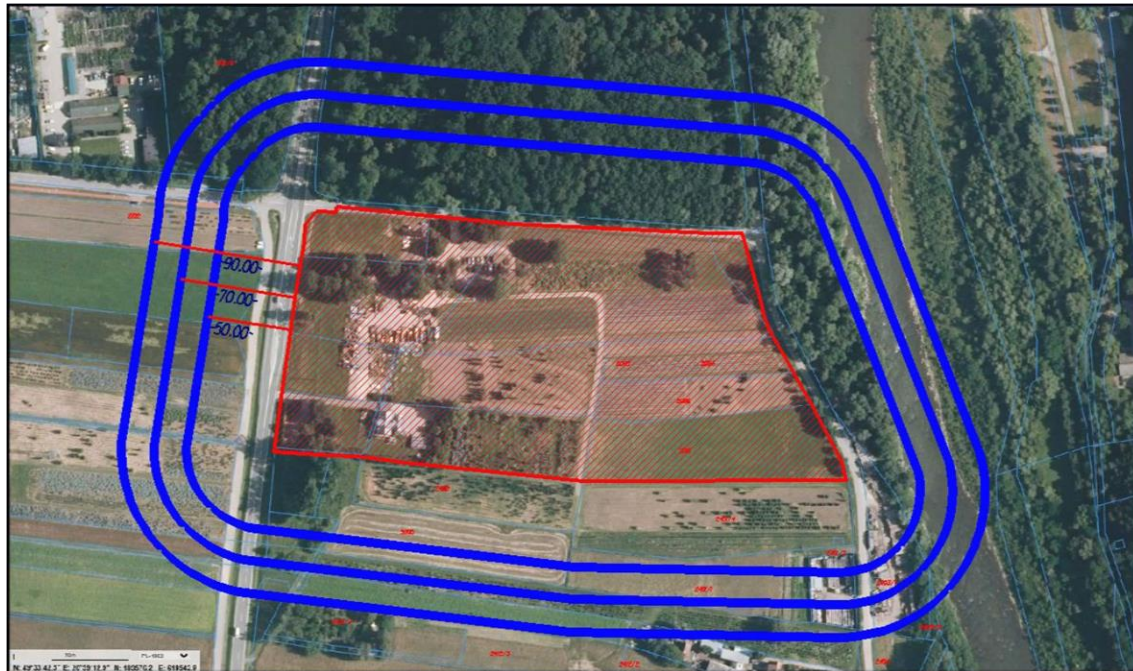
11.5.7. Analiza relacji odległościowych

Relacje odległościowe stanowią istotny element analiz przestrzennych w procesie planowania inwestycji. Pojęcie to odnosi się do zależności pomiędzy obiektami lub punktami w przestrzeni na podstawie ich wzajemnych odległości. W odniesieniu do inwestycji energetycznych umożliwiają one ocenę poprawności lokalizacji obiektów względem granic działek ewidencyjnych, sąsiedniej zabudowy oraz elementów infrastruktury technicznej.

W przypadku planowanej inwestycji w Starym Sączu szczególne znaczenie ma odległość projektowanej zabudowy od granic działek ewidencyjnych oraz sąsiednich form zagospodarowania terenu. Kwestie te regulują przepisy prawa budowlanego oraz warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (zgodnie z § 12 Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r.; Dz.U. z 2002 r., Nr 75, poz. 690 z późn. zm.).

Choć regulacje te odnoszą się przede wszystkim do zabudowy kubaturowej, w praktyce wyznaczają też ramy lokalizacji infrastruktury technicznej towarzyszącej inwestycjom energetycznym. W analizowanym przypadku szczególną uwagę zwrócono na usytuowanie farmy fotowoltaicznej, zabudowy gospodarczej, a także elementów towarzyszących w stosunku do granic działek i sąsiednich obszarów chronionych.

Relacje odległościowe dla terenu inwestycji zobrazowano na ortofotomapie, przedstawionej na rysunku 37. Widoczne są na niej granice działek ewidencyjnych (linie jasno niebieskie), strefy techniczne oraz pasy odległościowe (linie niebieskie), a także przebieg rzeki Poprad i fragmenty terenów leśnych.



Rysunek 37. Ortofotomapa terenu inwestycji z zaznaczonymi granicami działek ewidencyjnych i strefami odległościowymi.

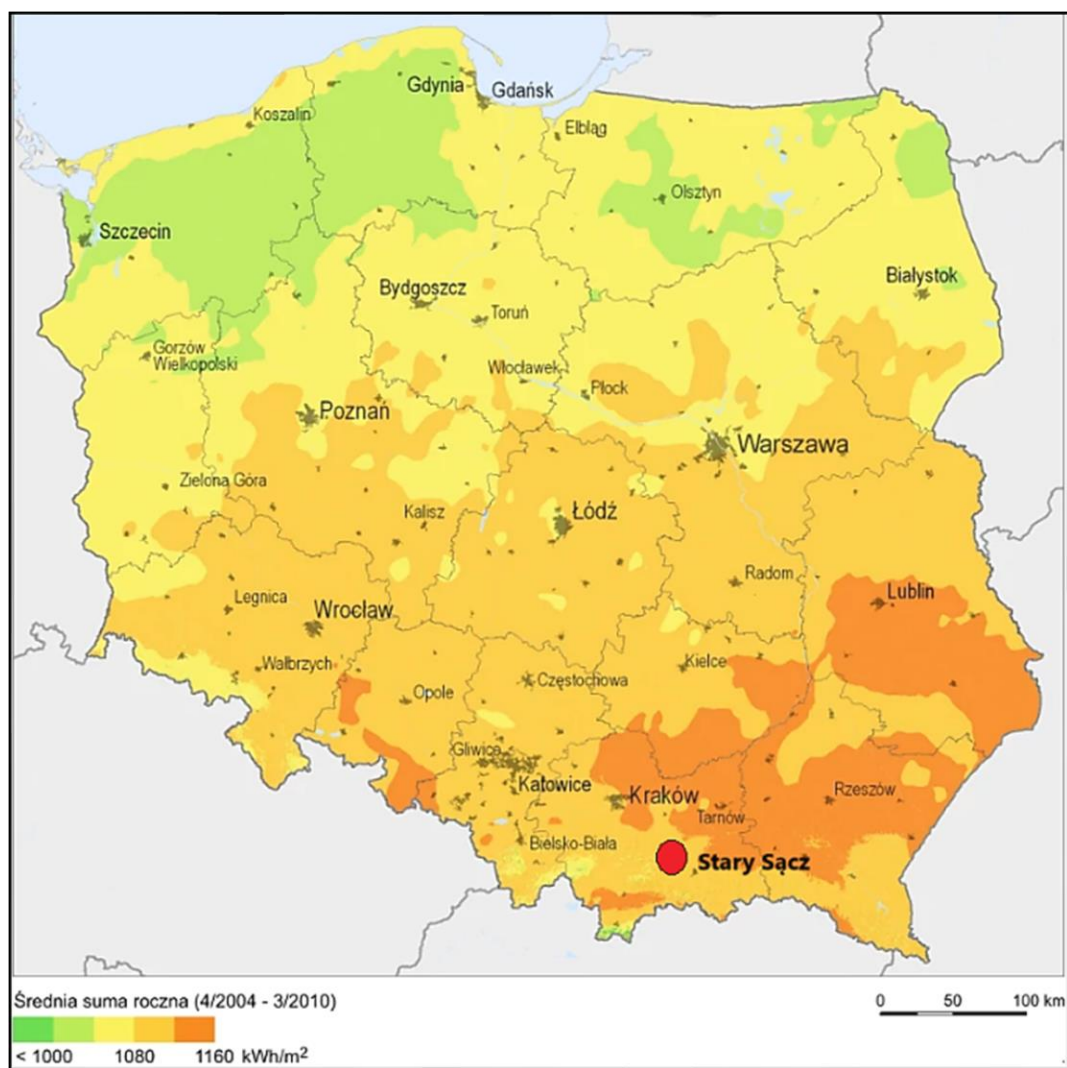
Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem programu Geoportal360 na podstawie strony <https://sip.gison.pl/starysacz> (dostęp: 25.08.2025).

Podsumowując, rozmieszczenie elementów inwestycji zostało zaplanowane z uwzględnieniem wymogów prawnych oraz zasad dobrego sąsiedztwa. Przyjęte rozwiązania odległościowe zapewniają bezpieczeństwo eksploatacji instalacji oraz ograniczają możliwość wystąpienia konfliktów społecznych i środowiskowych.

11.6. Analiza nasłonecznienia jako przykład czynnika wpływającego na budowę instalacji fotowoltaicznej

Czynnikiem wpływającym na efektywność pracy instalacji fotowoltaicznych jest poziom nasłonecznienia, rozumiany jako suma promieniowania słonecznego docierającego do jednostki powierzchni w określonym czasie (Kochanek, Kobylarczyk, 2024a). W warunkach klimatycznych Polski średni roczny potencjał nasłonecznienia wynosi od 1100 do 1250 kWh·m⁻², przy czym wartości te różnią się w zależności od regionu oraz lokalnych uwarunkowań środowiskowych.

Na rysunku 38 przedstawiono mapę nasłonecznienia Polski z oznaczeniem lokalizacji Starego Sącza jako miejsca planowanej inwestycji.



Rysunek 38. Mapa nasłonecznienia Polski z oznaczeniem miejscowości inwestycyjnej
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej.

W literaturze i praktyce projektowej wskazuje się, że optymalne parametry usytuowania paneli fotowoltaicznych to:

- kierunek południowy, zapewniający maksymalną ekspozycję na promieniowanie;
- kąt nachylenia modułów w zakresie 33-37°, co umożliwia uzyskanie największej ilości energii w skali roku;
- eliminacja czynników zacieniających (drzewostanu, wysokiej zabudowy), które mogłyby obniżyć sprawność całego systemu (Kochanek, Kobylarczyk, 2024a).

Analiza wskazuje, że Stary Sącz znajduje się w obszarze o wysokim poziomie nasłonecznienia, wynoszącym średnio ok. 1080 kWh·m⁻²·rok⁻¹. Wartość ta, choć nieco niższa od maksymalnych notowanych w Polsce, pozwala na efektywną eksploatację elektrowni fotowoltaicznej.

W ramach badań nasłonecznienia stosuje się różne metody:

- mapy nasłonecznienia, sporządzane na podstawie danych satelitarnych i meteorologicznych;
- symulacje komputerowe (np. w programach architektonicznych takich jak SketchUp z rozszerzeniami do analizy nasłonecznienia), które pozwalają na prognozę dopływu promieniowania w cyklu rocznym;
- pomiary terenowe, realizowane przy użyciu specjalistycznych mierników, umożliwiające obserwację rzeczywistych warunków nasłonecznienia i efektu zacienienia obiektów w otoczeniu.

W praktyce zaleca się, aby szczegółowe analizy nasłonecznienia wykonywane były przez wyspecjalizowane firmy zajmujące się projektowaniem i montażem instalacji fotowoltaicznych. Pozyskane w ten sposób dane pozwalają na odpowiedni dobór technologii, parametrów modułów i konfiguracji instalacji w taki sposób, by maksymalnie wykorzystać potencjał lokalizacji i ograniczyć ryzyko strat produkcyjnych.

Podsumowując, warunki nasłonecznienia w Starym Sączu są korzystne, zatem umożliwiają lokalizację farmy fotowoltaicznej. Uwzględnienie optymalnych parametrów montażu paneli (kierunek południowy, kąt nachylenia 33-37°) i eliminacja czynników zacieniających pozwolą na osiągnięcie wysokiej efektywności energetycznej planowanej instalacji PV.

11.7. Analiza dostępności substratów jako istotny czynnik wpływający na budowę biogazowni rolniczej

Efektywność funkcjonowania biogazowni rolniczej w dużej mierze zależy od dostępności substratów organicznych, które stanowią podstawowy surowiec do produkcji biogazu. Substraty te mogą pochodzić z różnych źródeł, takich jak rolnictwo, przemysł spożywczy, gospodarka komunalna czy sektor leśny, a ich ilość, jakość oraz stabilność dostaw determinują zarówno uzysk energetyczny, jak również ekonomikę przedsięwzięcia.

W praktyce należy również uwzględnić wahania sezonowe w dostępności surowców oraz możliwą konkurencję pomiędzy biogazowniami a innymi gałęziami przemysłu wykorzystującymi te same substraty (przemysł paszowy).

W przypadku planowanej inwestycji w Starym Sączu szczególne znaczenie ma lokalizacja w sąsiedztwie terenów rolniczych oraz lasów, co umożliwia pozyskiwanie odpadów drzewnych z sektora leśnego, odchodów zwierzęcych, płynnych nawozów naturalnych i innych odpadów organicznych z gospodarstw rolnych oraz roślin energetycznych, takich jak kukurydza, z lokalnych upraw.

Transport substratów przewidziano drogą lądową, przede wszystkim za pomocą samochodów ciężarowych. Szacuje się, że dostawy będą realizowane w promieniu ok. 100 km od lokalizacji inwestycji. Warto jednak zaznaczyć, że ze względów ekonomicznych preferowany jest krótszy dystans dostaw (30-50 km), co ogranicza koszty logistyczne i wpływ transportu na środowisko.

Współpraca z lokalnymi rolnikami oraz przedsiębiorstwami zajmującymi się zagospodarowaniem odpadów organicznych zapewni ciągłość dostaw substratów. Taka kooperacja wpisuje się w koncepcję gospodarki o obiegu zamkniętym, przyczyniając się do ograniczenia ilości odpadów i ich ponownego wykorzystania w procesach energetycznych.

Podsumowując, analiza dostępności substratów wykazała, że:

- obszar inwestycji dysponuje odpowiednim potencjałem surowcowym;
- kluczowe substraty będą pochodzić z rolnictwa, sektora leśnego i lokalnych upraw energetycznych;
- promień logistyczny do 100 km zapewnia wystarczającą elastyczność dostaw, przy czym najbardziej racjonalne są źródła zlokalizowane bliżej (30-50 km);
- realizacja inwestycji jest spójna z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym.

Jak zauważa Autorka, lokalizacja biogazowni rolniczych wymaga spełnienia wielu warunków prawnych i technicznych, dlatego wykorzystanie systemów GIS usprawnia proces planowania (Kochanek i in., 2024b; Kochanek i in., 2025a).

11.8. Analiza wietrzności jako przykład czynnika wpływającego na budowę farmy wiatrowej

Warunki wietrzności są jednym z podstawowych czynników determinujących możliwość lokalizacji farm wiatrowych. Potencjał energetyczny wiatru ocenia się na podstawie danych długoterminowych: atlasów wiatru, map zasobów oraz lokalnych pomiarów anemometrycznych prowadzonych zwykle na wysokości 80-120 m. Analiza tych danych pozwala oszacować spodziewaną produkcję energii elektrycznej oraz określić stabilność pracy turbin.

W praktyce do opisu zasobów wiatrowych stosuje się model rozkładu Weibulla, który charakteryzuje zmienność oraz średnią prędkość wiatru w danej lokalizacji. Dodatkowo wykorzystywane są róże wiatrów, czyli diagramy przedstawiające udział poszczególnych kierunków w generowaniu prędkości oraz częstotliwości wiatru. Dane te są kluczowe dla optymalnego usytuowania turbin względem dominujących kierunków. Na rysunku 39 zaprezentowana została mapa zasobów energii wiatru w Polsce.



Rysunek 39. Mapa zasobów energii wiatru w Polsce.
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IMGW.

Mapa wskazuje, że najkorzystniejsze warunki wiatrowe występują w północnej części kraju, przede wszystkim w pasie nadmorskim (województwo pomorskie i zachodniopomorskie) oraz na obszarach pojeziernych. Regiony centralne, obejmujące m.in. Mazowsze i Wielkopolskę, posiadają warunki umiarkowane, pozwalające na rozwój energetyki wiatrowej przy zastosowaniu turbin o wyższej sprawności.

Z kolei południe Polski, w tym Małopolska oraz Stary Sącz, należy do stref uznawanych za mało korzystne. Wynika to z uwarunkowań geograficznych: obecności gór i dolin rzecznych, które ograniczają średnią prędkość wiatru oraz sprzyjają występowaniu turbulencji. W praktyce oznacza to, że inwestycje w farmy wiatrowe w tym regionie wymagają szczegółowych i długoterminowych pomiarów lokalnych, a także analizy opłacalności.

Podsumowując, analiza zasobów wiatru wskazuje, że:

- północ Polski dysponuje warunkami bardzo korzystnymi lub wybitnie korzystnymi warunkami dla rozwoju energetyki wiatrowej;
- centralna część kraju oferuje warunki korzystne i umiarkowane;
- południe, w tym Stary Sącz, charakteryzuje się warunkami mało korzystnymi, co ogranicza potencjał inwestycyjny.

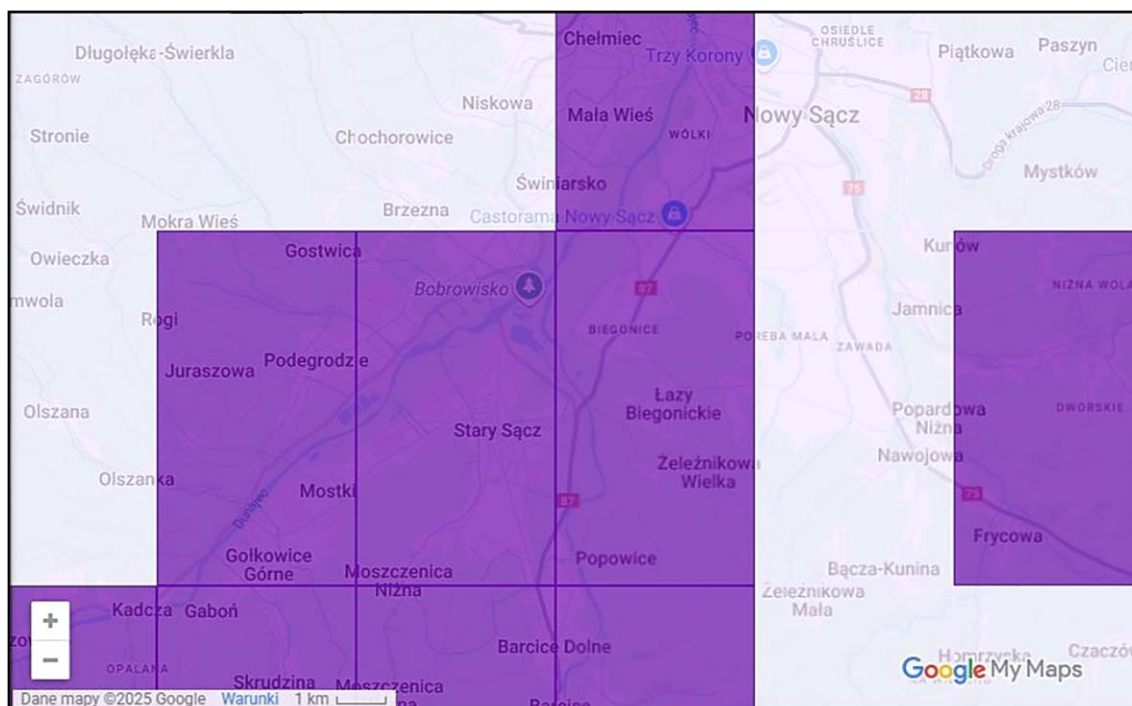
Dla lokalizacji w Starym Sączu decyzja o budowie elektrowni wiatrowej powinna być poprzedzona rocznymi pomiarami prędkości i kierunków wiatru oraz analizą wpływu lokalnych uwarunkowań terenowych i środowiskowych.

11.9. Analiza wrażliwości ornitologicznej

Planowanie inwestycji energetycznych, w szczególności farm wiatrowych i fotowoltaicznych, wymaga uwzględnienia czynników przyrodniczych związanych z ochroną ptaków. Oddziaływanie elektrowni na awifaunę może przyjmować formę bezpośrednią (kolizje z turbinami) lub pośrednią (fragmentacja siedlisk, zakłócenia tras migracyjnych, zmiana warunków żerowiskowych).

Aby ocenić potencjalne ryzyko kolizji, wykorzystuje się mapy wrażliwości ornitologicznej (mapy wrażliwości). Powstają one w oparciu o dane monitoringowe oraz obserwacje terenowe, wskazując obszary o różnorodnym stopniu wrażliwości środowiskowej. Pozwala to na identyfikację lokalizacji konfliktowych i rekomendowanych do wyłączenia z lokalizacji inwestycji.

Na rysunku 40 ukazano mapę Polski, ilustrującą ogólną wrażliwość przestrzenną terenów względem lokalizacji farm wiatrowych z punktu widzenia ochrony ptaków.



Rysunek 40. Mapa wrażliwości ornitologicznej Polski.

Źródło: opracowanie własne na podstawie <https://otop.org.pl/naszeprojekty/pilnujemy/mapy-wrazliwosci-energetyka-wiatrowa/> (dostęp: 28.08.2025).

W analizie uwzględnia się przede wszystkim korytarze migracyjne ptaków wędrownych, strefy gniazdowania i lęgowiska, miejsca żerowania i odpoczynku oraz obecność gatunków chronionych w ramach obszarów Natura 2000 i innych form ochrony przyrody.

W przypadku inwestycji zlokalizowanej w Starym Sączu istotne znaczenie ma położenie w dolinie Popradu, która pełni rolę korytarza ekologicznego i siedliska wielu gatunków ptaków wodno-błotnych oraz drapieżnych. Choć działka inwestycyjna nie znajduje się w granicach obszaru Natura 2000, w jej sąsiedztwie mogą występować gatunki objęte ochroną na poziomie krajowym i unijnym.

Analiza map kolizyjności umożliwia wstępne określenie poziomu ryzyka środowiskowego:

- obszary o wysokiej wrażliwości – należy wyłączyć spod lokalizacji turbin wiatrowych;
- obszary o średniej wrażliwości – wymagają dodatkowych badań przyrodniczych;
- obszary o niskiej wrażliwości – potencjalnie dopuszczalne przy zachowaniu standardowych procedur środowiskowych.

W praktyce ocena oddziaływania na ptaki realizowana jest w ramach procedury oceny oddziaływania na środowisko (OOŚ). Wymaga ona szczegółowych badań ornitologicznych prowadzonych przez co najmniej jeden rok, tak by uchwycić sezonowe zmiany w składzie gatunkowym i intensywności migracji.

Podsumowując, dla inwestycji w Starym Sączu:

- lokalizacja nie leży w granicach Natura 2000;
- ze względu na sąsiedztwo doliny rzecznej wymagane są szczegółowe badania ornitologiczne;
- wyniki map wrażliwości i monitoringów terenowych pozwolą na określenie dopuszczalnych parametrów turbin oraz środków minimalizujących (wyłączenia pracy w okresach migracyjnych, ograniczenia wysokości konstrukcji).

11.10. Podsumowanie analizy przestrzennej

Przeprowadzona analiza środowiskowa i przestrzenna lokalizacji planowanej instalacji hybrydowej OZE w Starym Sączu umożliwiła kompleksową ocenę jej uwarunkowań przyrodniczych, technicznych i formalno-prawnych, której syntetyczne wyniki przedstawiono w tabeli 17.

Tabela 17

Zbiornicze zestawienie wyników analizy środowiskowej i przestrzennej planowanej instalacji hybrydowej OZE w Starym Sączu

Obszar analizy	Zakres oceny	Wyniki	Wnioski
Kąt nachylenia terenu (NMT)	Numeryczny model terenu, profil wysokościowy, zacięniowanie	Różnice wysokości umiarkowane (304,4-305,6 m n.p.m.), konieczne miejscowe niwelacje gruntu	Profilowanie terenu nie stanowi bariery dla inwestycji
Sąsiedztwo drzewostanu (zacięniowanie)	Analiza odległości drzew od granic działek	Brak zagrożenia zacięniowaniem od południa i zachodu, las od północy i wschodu (4,5-9,1 m)	Bufor 30 m zapewnia bezpieczeństwo pracy PV
Hydrologia (zagrożenie powodziowe)	Mapy zagrożenia powodziowego Q1 i Q10, analiza Popradu	Powódzie ograniczone do koryta rzeki, teren inwestycji poza strefą zagrożenia	Brak ryzyka powodziowego dla inwestycji
Geologia (osuwiska)	Dane SOPO, mapa czynnych osuwisk, profil terenu	Najbliższe czynne osuwisko nie znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie, niewielkie zróżnicowanie wysokości	Brak zagrożeń osuwiskowych bezpośrednio na działce
Bonitacja gleb	Dane ewidencyjne, GeoMałopolska	Kompleks gleb owsiano-pastewnych górskich, brak gleb I-III klasy	Brak konieczności wyłączenia z produkcji rolnej
Dostępność komunikacyjna	Drogi gminne i ich parametry	Dostęp do drogi 1.KDD i 2.KDD, szerokość ~5 m; utwardzona nawierzchnia	Drogi umożliwiają transport technologiczny i eksploatacyjny
Relacje odległościowe	Odległości od granic działek i najbliższej linii energetycznej 110 kV	Linia energetyczna 110kV w odległości ok. 137 m, pasy ochronne przy lasach i gruntach rolnych	Rozmieszczenie inwestycji zgodne z przepisami i dobrym dostępem do sieci energetycznej
Nasłonecznienie (PV)	Dane IMGW, mapa nasłonecznienia	Potencjał: ~1080 kWh·m ⁻² ·rok ⁻¹ , optymalne nachylenie 33-37°, kierunek południowy	Lokalizacja korzystna dla farmy PV
Substraty (biogazownia)	Źródła substratów: rolnictwo, przemysł, lasy	Dostępne odpady rolnicze, drzewne, kukurydza, promień dostaw ~100 km (preferowane ≤ 50 km)	Wystarczający potencjał surowcowy, konieczna logistyka
Wietrzność (farma wiatrowa)	Atlas zasobów wiatru, mapa IMGW	Region mało korzystny, ograniczone zasoby wiatru, wysokie turbulencje	Inwestycje wiatrowe obarczone ryzykiem, wymagają rocznych pomiarów
Wrażliwość ornitologiczna	Mapy kolizyjności, dolina Popradu	Obszar korytarza migracyjnego ptaków, brak Natura 2000 na działce	Konieczne roczne badania ornitologiczne i środki minimalizujące

Źródło: opracowanie własne.

Zestawienie zawarte w tabeli 17 syntetyzuje wyniki przeprowadzonych analiz środowiskowych, przestrzennych oraz technicznych, umożliwiając ich całościową interpretację. Na tej podstawie sformułowano wnioski zbiorcze, które określają potencjał inwestycyjny i uwarunkowania formalno-prawne planowanej instalacji hybrydowej OZE w Starym Sączu. Wnioski te przedstawiają się następująco:

- Energetyka fotowoltaiczna i biogazowa. Lokalizacja w Starym Sączu spełnia wymagane kryteria dla inwestycji fotowoltaicznych oraz biogazowych. Potencjał nasłonecznienia na poziomie ok. $1080 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$ oraz dostępność substratów organicznych w promieniu do 100 km zapewniają warunki umożliwiające efektywną i stabilną eksploatację tych instalacji.
- Energetyka wiatrowa. Potencjał wiatrowy regionu należy uznać za ograniczony – wynika to z mało korzystnych warunków wietrznych charakterystycznych dla obszarów podgórskich. Ewentualna realizacja inwestycji wiatrowych wymagałaby przeprowadzenia szczegółowych pomiarów prędkości wiatru oraz analizy opłacalności projektu, co znacząco zwiększa niepewność inwestycyjną.
- Środowisko przyrodnicze. Lokalizacja inwestycji nie koliduje z obszarami objętymi ochroną prawną (Natura 2000, parki narodowe, pomniki przyrody). Teren znajduje się w otulinie Popradzkiego Parku Krajobrazowego, jednak fakt ten nie stanowi przeszkody formalnej ani przyrodniczej dla realizacji przedsięwzięcia.
- Bezpieczeństwo terenu. Analiza hydrologiczna i geologiczna potwierdziła brak istotnych zagrożeń środowiskowych. Obszar inwestycji znajduje się poza strefami ryzyka powodziowego, a także w bezpiecznej odległości od czynnych osuwisk, co sprzyja stabilności długoterminowej eksploatacji.
- Uwarunkowania komunikacyjne. Inwestycja posiada korzystne położenie względem sieci drogowej. Bezpośredni dostęp do dróg gminnych o odpowiednich parametrach technicznych umożliwia zarówno transport elementów technologicznych podczas budowy, jak i sprawną logistykę w okresie eksploatacji.
- Aspekty formalno-prawne. Realizacja inwestycji wymaga uzyskania stosownych decyzji administracyjnych, w tym decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach, pozwolenia na budowę oraz uzgodnień branżowych. Procedury te nie stanowią jednak przeszkody w świetle dotychczasowych analiz lokalizacyjnych.

12. AUTORSKI SYSTEM DYNAMICZNEGO GENEROWANIA WARUNKÓW BRZEGOWYCH

System Dynamicznego Generowania Warunków Brzegowych (SDGWB) to koncepcyjne rozwiązanie służące tworzeniu, aktualizowaniu oraz kontrolowaniu jednolitego zestawu wymagań, który następnie transformowany jest w listę sygnałów wykorzystywanych przez hybrydowego agenta analizy geoprzestrzennej GIS.

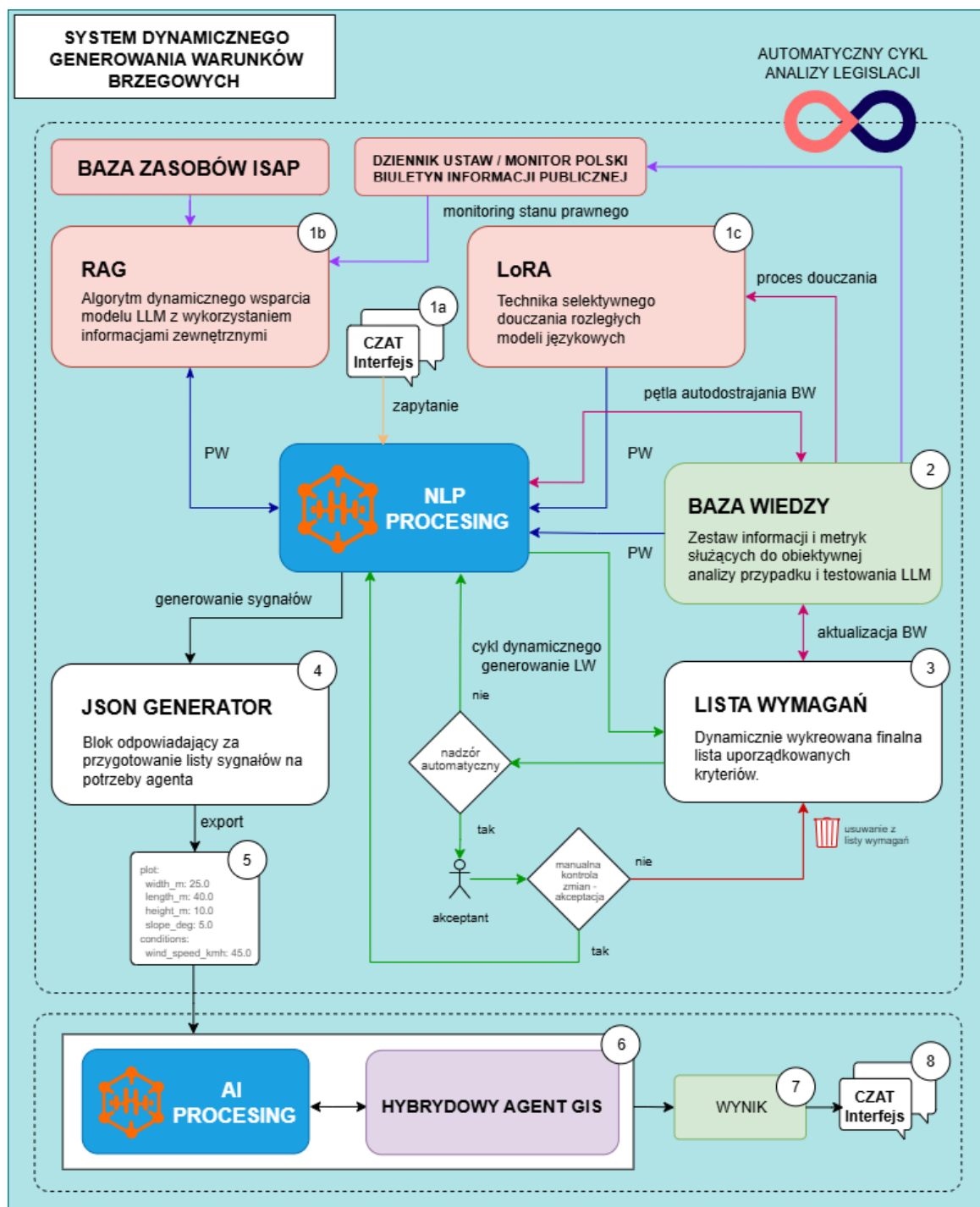
12.1. Wprowadzenie do systemu

Architektura systemu obejmuje wyodrębnione moduły realizujące dedykowane procesy cząstkowe, a podstawowym mechanizmem inicjującym jego działanie jest interakcja konwersacyjna ukierunkowana na wyszukiwanie działek spełniających kryteria lokalizacyjne dla inwestycji z zakresu odnawialnych źródeł energii (OZE) oraz konfiguracji hybrydowych w ramach ściśle określonego obszaru terytorialnego. Całość procesu osadzona jest w nadrzędnym automatycznym cyklu analizy legislacji, który w istotnym stopniu bazuje na Bazie Wiedzy (BW).

Repozytorium to obejmuje wiedzę ekspercką oraz metryki decyzyjne i zawiera m.in. wykaz monitorowanych aktów prawnych. Bieżące śledzenie zmian legislacyjnych realizowane jest poprzez interfejsy udostępniane przez oficjalne publikatory prawa, takie jak Dziennik Ustaw i Monitor Polski, w zakresie ustaw i rozporządzeń. Dla pełnej analizy system wykorzystuje również treści lokalnych aktów normatywnych publikowanych w Biuletynie Informacji Publicznej (BIP), co stanowi etap szczególnie wymagający ze względu na brak spójności struktur, formatów i klasyfikacji treści w różnych Biuletynach Informacji Publicznej.

Integralnym elementem systemu jest Internetowy System Aktów Prawnych (ISAP), którego funkcją jest krzyżowa weryfikacja wymagań oraz dostarczanie ujednoliconych informacji, tak aby informować użytkownika oraz aktualizować Bazę Wiedzy o zmianach w systemie prawnym zarówno w przypadku nowelizacji istniejących regulacji, jak i pojawiania się nowych aktów. Schemat (rysunek 41) przedstawia SDGWB oparty na automatycznym cyklu analizy legislacji. W jego centrum znajduje się moduł NLP, który integruje dane z repozytorium zasobów, narzędzi analitycznych oraz wiedzy eksperckiej, a następnie porządkuje je w listy wymagań i sygnały sterujące dla agentów GIS. Tak zaprojektowany mechanizm automatyzuje proces interpretacji przepisów i ich praktycznego zastosowania w doborze lokalizacji pod inwestycje OZE.

System realizuje trzy współbieżne procesy. Pierwszym jest dynamiczna analiza danych, której rezultaty uzupełnione informacjami z BW stanowią wejście dla procesu douczania. Drugim jest adaptacyjne douczanie, odpowiedzialne za dostosowywanie modeli i komponentów systemu do nowych danych oraz zmieniających się wymagań. Trzecim natomiast jest analiza zapytań kontekstowych, wspierająca decyzje dotyczące lokalizacji obiektów energetycznych i ich hybryd.



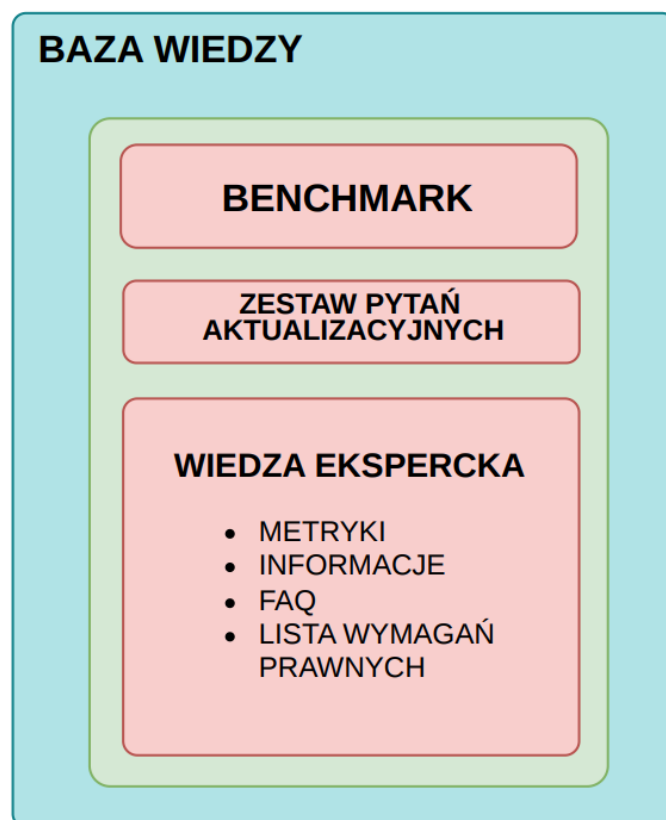
Rysunek 41. Schemat koncepcyjny Systemu Dynamicznego Generowania Warunków Brzegowych.
Źródło: opracowanie własne.

System rozwija koncepcję integracji przetwarzania języka naturalnego i baz wiedzy poprzez implementację modułów opartych na architekturach LLM, RAG oraz LoRA. Takie podejście umożliwia nie tylko automatyczne generowanie list wymagań oraz sygnałów sterujących dla hybrydowego agenta GIS, ale także adaptacyjne dostosowywanie struktur decyzyjnych do dynamicznie zmieniających się uwarunkowań prawnych i kontekstowych.

W ramach współdzielonej architektury wyodrębniono trzy procesy operacyjne: dynamiczną analizę danych, ukierunkowaną na identyfikację zmian oraz anomalii w strumieniach informacyjnych, adaptacyjne douczanie zapewniające bieżącą aktualizację modeli analitycznych oraz analizę zapytań kontekstowych, której celem jest precyzyjne wspieranie decyzji lokalizacyjnych dotyczących inwestycji z zakresu odnawialnych źródeł energii i ich konfiguracji hybrydowych.

12.2. Krok 1 – Budowa i organizacja Bazy Wiedzy

Pierwszym krokiem w tworzeniu systemu wspierającego proces analizy prawnej i technicznej w obszarze odnawialnych źródeł energii jest budowa Bazy Wiedzy (BW), która stanowi fundament całego modelu. Bez niej niemożliwe byłoby zarówno generowanie list wymagań, jak i walidacja zgodności inwestycji oraz dalsze douczanie modeli językowych. BW pełni rolę centralnego repozytorium obejmującego przepisy prawne wraz z ich interpretacjami, metrykami i wartościami referencyjnymi. Jej zadaniem jest zapewnienie spójności danych oraz możliwość ich ponownego wykorzystania w procesach przetwarzania. Struktura i zawartość BW zostały ukazane na schemacie (rysunek 42).

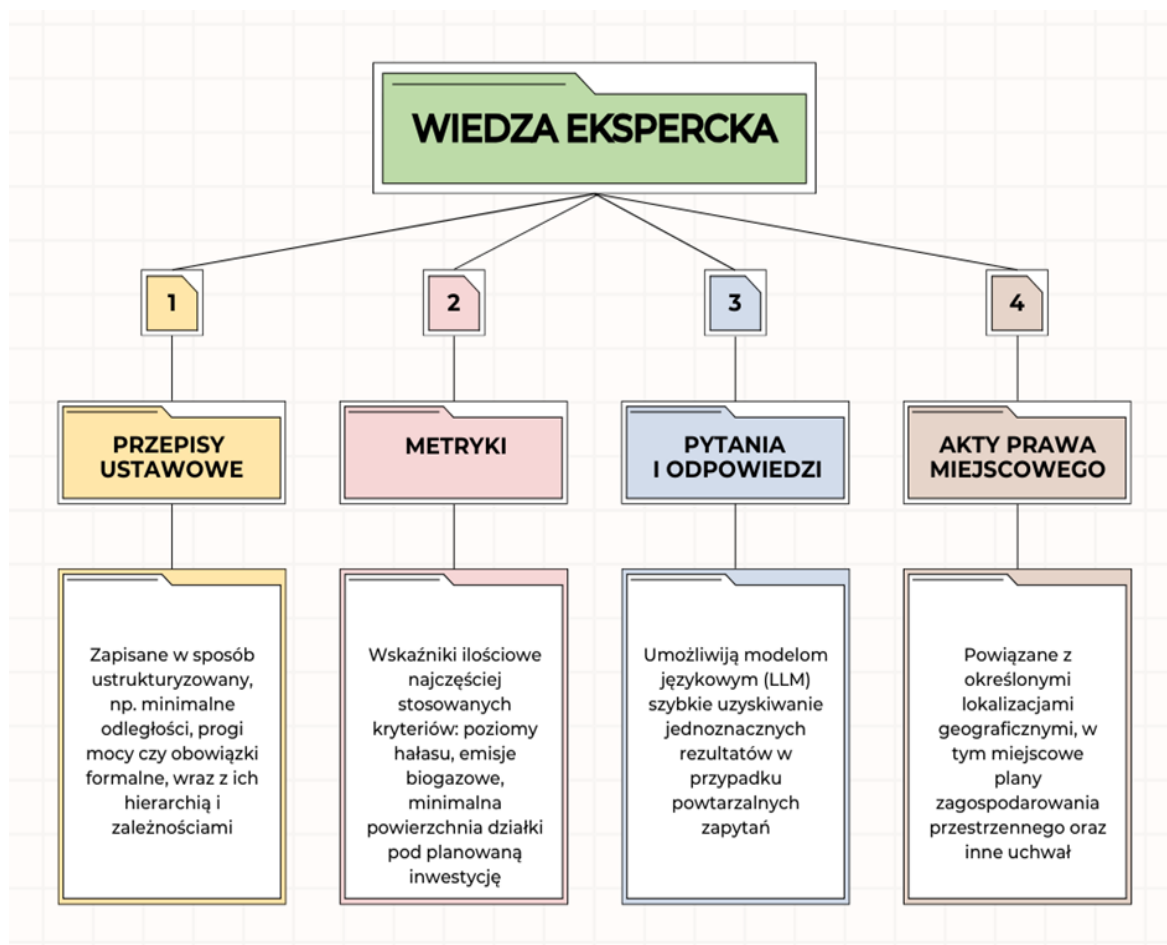


Rysunek 42. Struktura Bazy Wiedzy.
Źródło: opracowanie własne.

Elementy składowe Bazy Wiedzy w kontekście odnawialnych źródeł energii (OZE) obejmują trzy zasadnicze komponenty: wiedzę ekspercką, zestaw pytań aktualizacyjnych oraz benchmark. Każdy z nich pełni funkcję swoistej matrycy weryfikacyjnej, stanowiącej źródło informacji o wysokim stopniu wiarygodności.

Wartość poznawcza i punktowa tych informacji jest znacząco wyższa w porównaniu z danymi pozyskanymi w sposób automatyczny, co wynika z ich zweryfikowanego charakteru, osadzenia w praktyce oraz większej odporności na błędy systemowe.

Najbardziej rozbudowanym komponentem Bazy Wiedzy jest wiedza ekspercka, która stanowi fundament całego systemu. Obejmuje ona cztery uzupełniające się kategorie: przepisy ustawowe, metryki oceny o charakterze ilościowym, zestaw pytań oraz odpowiedzi, a także akty prawa miejscowego. Wspólnie tworzą one spójne repozytorium informacji zapewniające zarówno podstawy normatywne, jak również praktyczne narzędzia wspierające proces analizy lokalizacji inwestycji OZE (rysunek 43).

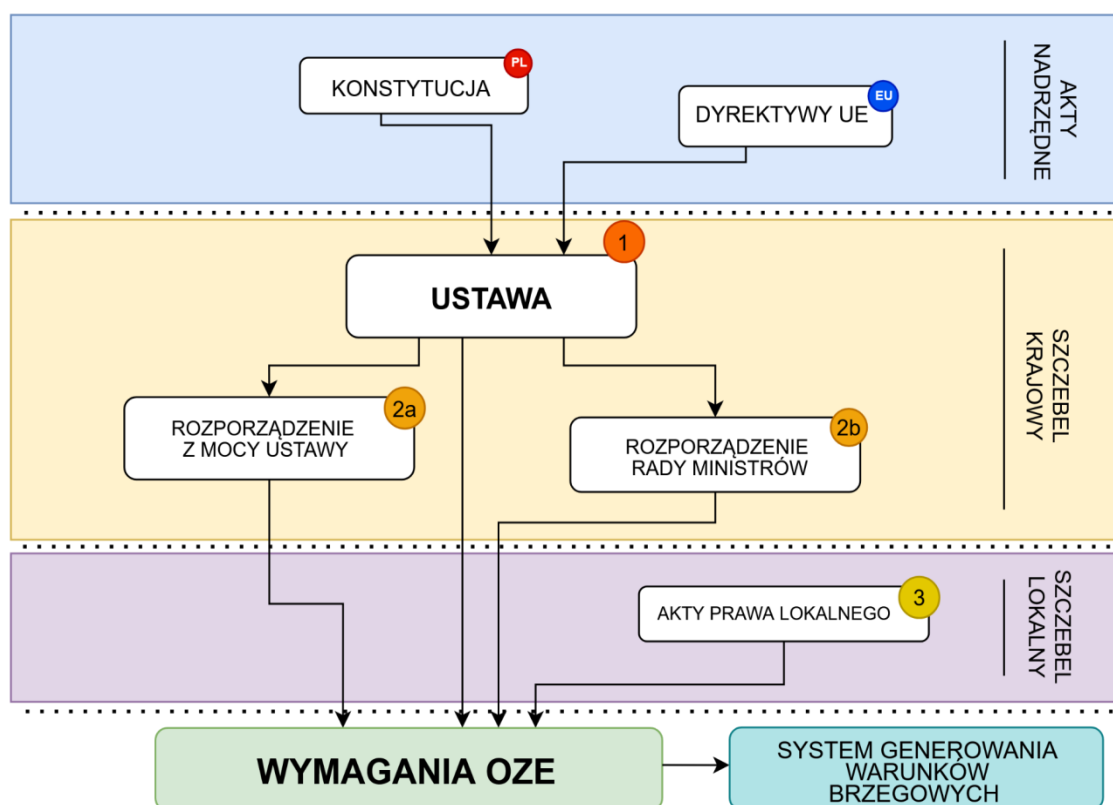


Rysunek 43. Główne kategorie wiedzy eksperckiej w systemie.
Źródło: opracowanie własne.

Baza Wiedzy podlega procesowi ciągłej aktualizacji, realizowanej zarówno w trybie automatycznym – poprzez integrację z systemami monitorującymi zmiany legislacyjne (ISAP, Dziennik Ustaw, Monitor Polski), jak i w trybie manualnym – w ramach procedur zatwierdzania eksperckiego. Mechanizm ten zapewnia jej rolę stabilnego fundamentu systemu, umożliwiając jednocześnie kontrolowaną ingerencję operatora w przebieg procesów analitycznych. Należy podkreślić, że pełna automatyzacja aktualizacji możliwa będzie dopiero po osiągnięciu przez system odpowiedniego poziomu zaufania do jakości generowanych wyników co stanowi warunek jego dojrzałości oraz przejścia do stadium pełnej autonomii. BW pozostaje najwyżej

punktowanym źródłem wiedzy, zarówno w procesie analizy wymagań w ramach przetwarzania zapytań NLP, jak i w procesie douczania, gdzie pełni funkcję nadrzędnego punktu referencyjnego.

Struktura wiedzy eksperckiej stanowi fundament systemu i pozostaje ściśle powiązana z otoczeniem regulacyjnym. Hierarchia aktów prawnych określa zakres oraz sposób formułowania wymagań w obszarze odnawialnych źródeł energii. Uwzględnienie relacji pomiędzy aktami nadrzędnymi, przepisami krajowymi oraz prawem lokalnym jest niezbędne dla zapewnienia spójności i poprawności procesu analitycznego. Schemat przedstawiony na rysunku 44 obrazuje wielopoziomowy układ źródeł prawa i jego przełożenie na mechanizm generowania warunków brzegowych.



Rysunek 44. Relacje pomiędzy aktami prawnymi a systemem wspierania analizy inwestycji OZE.

Źródło: opracowanie własne.

Reprezentacja wiedzy prawnej oraz technicznej wymaga nie tylko właściwej klasyfikacji źródeł, lecz również zastosowania ujednoliconego formatu danych, który umożliwia ich dalsze przetwarzanie i integrację w ramach systemu. Zgodnie z założeniami projektu, przeprowadzono proces transformacji danych z formy nieustrukturyzowanej na format *Java Script Object Notation* (JSON), co zapewnia ich kompatybilność z algorytmami przetwarzania maszynowego. Wykorzystanie hierarchicznej struktury oraz właściwości samodokumentujących się formatu JSON umożliwia stworzenie czytelnej oraz łatwo dostępnej biblioteki danych, przystosowanej do analizy zarówno manualnej, jak i automatycznej.

12.2.1. Reprezentacja modułu wiedzy eksperckiej

W obrębie Bazy Wiedzy zaprojektowano zróżnicowane struktury JSON, których forma odpowiada charakterowi opisywanych encji. Obejmują one m.in. listy wymagań prawnych, przepisy ustawowe i rozporządzenia wraz z konkluzjami wykorzystywanymi do definiowania oraz interpretacji metryk, a także zestaw najczęściej zadawanych pytań, umożliwiających w dalszych etapach szybkie wyszukiwanie i dopasowanie w ramach mechanizmów RAG. Struktury te odzwierciedlają szerokie możliwości rozbudowy zasobów Bazy Wiedzy.

Na potrzeby analizy przestrzennej przygotowano strukturę JSON, reprezentującą relacje odległościowe projektowanych instalacji OZE względem innych obiektów. W pracy zastosowano dwa poziomy zapisu: wariant uproszczony – prezentujący podstawowe atrybuty i relacje, a także wariant rozszerzony – w którym ujęto elementy meta-informacyjne, statusy regulacyjne, odniesienia do aktów prawnych i informacje o planowanych nowelizacjach.

Podstawą struktury systemu jest tablica, w której każdy wpis opisuje metrykę przypisaną do określonego typu obiektu. Elementy zawierają kategorię instalacji, rodzaj kryterium, minimalną wartość wyrażoną w metrach oraz pole z uwagami. Uwagi wyjaśniają specyfikę danej relacji odległościowej, wskazują podstawy prawne lub normatywne i ewentualne zastrzeżenia interpretacyjne. Tak zaprojektowana struktura umożliwia efektywne zarządzanie wymaganiami przestrzennymi dla instalacji OZE oraz ich automatyczne przetwarzanie przez moduły NLP. W tabeli 18 zestawiono kategorie metryk wraz z ich charakterystyką.

Tabela 18

Główne elementy struktury JSON dla metryk odległości OZE

Element	Opis
metryki_odleglosci_OZE	baza ekspercka dotycząca metryk odległości posadowienia obiektów OZE
kategoria_obiektu	rodzaj instalacji
Warunek	wymaganie wynikające z aktów normatywnych
Wartość	wartość określona w aktach normatywnych
Jednostka	jednostka miary
Uwagi	dodatkowe informacje, jeżeli zostały określone
Źródło	podstawa prawna

Źródło: opracowanie własne.

Przedstawiona struktura danych JSON stanowi podstawę do tworzenia jednolitej biblioteki wymagań przestrzennych (odległościowych) dla instalacji OZE. Dzięki formalizacji w postaci atrybutów i ich jednoznacznych definicji możliwe jest efektywne zarządzanie informacją oraz jej dalsze przetwarzanie w procesach analizy, walidacji oraz douczania modeli NLP. W celu zilustrowania sposobu formalizacji wiedzy eksperckiej w systemie SDGWB opracowano przykładową strukturę JSON, obejmującą metryki odległości dla farm wiatrowych, instalacji fotowoltaicznych, biogazowni oraz magazynów energii. Każdy wpis reprezentuje encję opisującą określony typ obiektu wraz z odpowiadającymi mu wymaganiami prawnymi, minimalną wartością w jednostkach metrycznych oraz podstawą normatywną, co zaprezentowano w algorytmie 1.

Algorytm 1. Struktura JSON relacji odległościowych obiektów OZE względem infrastruktury towarzyszącej.

```
{
  "metryki_odleglosci_OZE": [

    {
      "kategoria_obiektu": "Biogazownie Rolnicze",
      "kryterium": "Odległość od budynków mieszkalnych",
      "wartość": ≥20,
      "jednostka": "m",
      "uwagi": "Wymagania mogą się różnić w zależności od lokalnych przepisów (inne wymagania w MPZP i inne wymagania w Decyzji o warunkach zabudowy w przypadku braku MPZP na danym terenie).",
      "źródło": "Rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle rolnicze i ich usytuowanie."
    },
    {
      "kategoria_obiektu": "Instalacje fotowoltaiczne (mikroinstalacje)",
      "kryterium": "Odległość od granic działek sąsiednich",
      "wartość": <4,
      "jednostka": "m",
      "uwagi": "Wymagania mogą być niższe w przypadku instalacji na budynkach. Należy uwzględnić przepisy dotyczące ochrony roślin i drzew.",
      "źródło": "Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie."
    }
  ],
  "Cel zachowania odległości <4 m: Dostępność: Umożliwia swobodny dojazd do instalacji w celu prac konserwacyjnych, serwisowych oraz kontrolnych. Relacje sąsiedzkie: Pomaga uniknąć konfliktów i potencjalnych roszczeń ze strony sąsiadów, którzy mogliby poczuć się poszkodowani. (Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie) Ochrona przed zaciemnieniem: Pozwala zminimalizować ryzyko zaciemnienia sąsiedniej działki, co mogłoby wpływać na jej użyteczność."
},
    {
      "kategoria_obiektu": "Elektrownie wiatrowe (małe - do 1 MW)",
      "kryterium": "Odległość od budynków mieszkalnych",
      "wartość": <700,
      "jednostka": "m",
      "uwagi": " W przypadku lokalizowania, budowy lub przebudowy elektrowni wiatrowej odległość tej elektrowni od budynku mieszkalnego albo budynku o funkcji mieszanej jest równa lub większa od dziesięciokrotności całkowitej wysokości elektrowni wiatrowej, chyba że plan miejscowy określa inną odległość, wyrażoną w metrach, jednak nie mniejszą niż 700 metrów.",
      "źródło": "Przepisy budowlane - USTAWA z dnia 20 maja 2016 r. o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych, lokalne plany zagospodarowania przestrzennego."
    },
  ]
}
```

Pola te umożliwiają aktualizację wymagań i ich bieżące śledzenie, co wspiera automatyczną kontrolę zgodności projektów z obowiązującymi przepisami.

W kolejnym kroku zaprezentowano również rozszerzoną reprezentację struktury JSON. Ujęto w niej elementy meta-informacyjne, statusy regulacyjne, odniesienia do aktów prawnych i informacje o planowanych nowelizacjach, co pozwala na wierne odwzorowanie kontekstu normatywnego i śledzenie zmian legislacyjnych w czasie.

Dla poszczególnych typów instalacji udostępniane są atrybuty obejmujące identyfikator techniczny kategorii, pełną nazwę w języku naturalnym, status określający obowiązywanie minimalnych odległości, a także wartość w metrach, jeśli została jednoznacznie określona. Dodatkowo struktura zawiera informacje o podstawach prawnych, planowanych nowelizacjach oraz uwagi kontekstowe.

W przypadku niektórych technologii, takich jak naziemne farmy fotowoltaiczne, nie określono ustawowo jednolitych wartości minimalnych dla całego kraju, dlatego kwestie te regulują miejscowe plany zagospodarowania przestrzennego i szczegółowe warunki techniczne. W odniesieniu do biogazowni rolniczych, minimalne odległości zostały zróżnicowane w zależności od charakteru obiektów sąsiednich. Zestawienie kluczowych elementów struktury JSON przedstawiono w tabeli 19.

Tabela 19

Elementy rozszerzonej struktury JSON dla relacji odległościowych instalacji odległości OZE

Struktura	Opis
Meta	Funkcja opisowa definiująca kontekst oraz zakres wykorzystania danych
Jurisdiction	Pole wskazujące państwo, którego dotyczą przedstawione regulacje prawne (Polska)
as_of	Atrybut określający datę obowiązywania danych, co pozwala na monitorowanie zmian legislacyjnych w czasie
scope_note	Pole zawierające dodatkowe wyjaśnienia dotyczące zakresu danych, w tym informacje, czy odnoszą się one wyłącznie do minimalnych wymogów ogólnokrajowych, czy też lokalne regulacje mogą wprowadzać bardziej restrykcyjne normy
oze_distance_metrics	Sekcja obejmująca kolekcję obiektów, z których każdy odpowiada określonej typowi instalacji OZE, element ten ma postać listy, w której każdy wpis reprezentuje odrębną kategorię instalacji
Type	Techniczny identyfikator kategorii
Name	Pełna nazwa w języku naturalnym
Status	Określenie, czy istnieje prawnie wiążące minimum (binding_minimum) czy brak wartości ogólnokrajowej (no_national_minimum)
min_distance_to_residential_m	Minimalna odległość w metrach (jeśli została określona)
legal_basis	Źródło prawne, np. ustawa, paragraf, odwołanie do systemu ISAP
pending_changes	Planowane zmiany legislacyjne (projekt nowelizacji dotyczący minimalnej odległości)
statutory_min_distance_to_residential_m	Wartość ustawowa, jeśli została jednoznacznie określona, w przypadku jej braku pole przyjmuje wartość null
determined_by	Informacja o tym, co w praktyce reguluje odległości (MPZP, decyzja środowiskowa)
context_notes	Uwagi kontekstowe, obejmujące aspekty praktyczne związane z interpretacją wymagań
min_distances_m	Słownik wartości odległości w zależności od rodzaju obiektów sąsiednich
Sources	Spis źródeł prawnych i materiałów pomocniczych

Źródło: opracowanie własne.

Przedstawiona struktura danych JSON stanowi przykład formalizacji wymagań przestrzennych w systemie SDGWB. Ujęto w niej minimalne odległości określone wprost w aktach prawnych i sytuacje, w których brak wartości ogólnokrajowej oraz decyzje podejmowane są lokalnie. Każdy wpis reprezentuje kategorię obiektu OZE wraz z przypisanymi jej wymaganiami, podstawą prawną i informacjami o potencjalnych zmianach legislacyjnych. Pełny zapis pokazano w algorytmie 2.

Algorytm 2. Struktura JSON relacji odległościowych obiektów OZE względem infrastruktury towarzyszącej.

```
{
  "meta": {
    "jurisdiction": "PL",
    "as_of": "2025-08-29",
    "scope_note": "Zestawienie obejmuje wyłącznie ogólnokrajowe minima
wynikające wprost z aktów prawnych oraz miejsca, gdzie takie minima nie są
określone centralnie. Lokalne MPZP/WZ mogą wprowadzać ostrzejsze wymagania."
  },
  "oze_distance_metrics": [
    {
      "type": "wind_onshore",
      "name": "Elektrownia wiatrowa - lądowa",
      "status": "binding_minimum",
      "min_distance_to_residential_m": 700,
      "determined_by": "Ustawa o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych
(tekst jednolity)",
      "planning_requirement": "lokalizacja wyłącznie na podstawie MPZP",
      "legal_basis": {
        "act": "Ustawa z 20.05.2016 r. o inwestycjach w zakresie elektrowni
wiatrowych (t.j.)",
        "isap_ref": "Dz.U. 2024 poz. 317",
        "key_rule": "≥700m"
      },
      "distance_object_type": "budynek mieszkalny"
    },
    {
      "pending_changes": {
        "proposed_min_distance_m": 500,
        "status": "zawetowane - nieobowiązujące",
        "note": "Nowelizacja z 05.08.2025 r. została zawetowana; ewentualne zmiany
wymagają dalszego procesu legislacyjnego.",
        "reference": "Komunikat Kancelarii Prezydenta z 21.08.2025"
      }
    },
    {
      "type": "pv_ground_farm",
      "name": "Instalacja fotowoltaiczna na gruncie / farma PV",
      "status": "no_national_minimum",
      "statutory_min_distance_to_residential_m": null,
      "determined_by": [
        "MPZP lub decyzja WZ",
        "decyzja środowiskowa (jeśli wymagana)",
        "warunki techniczne/ppoż. obiektów towarzyszących (np. stacje, kontenery itp.)"
      ],
      "context_notes": [
        "Ogólnokrajowe WT dla budynków (§12) określają odległości budynków
od granicy działki (zwykle 3-4 m), ale nie ustanawiają minimalnej
odległości farm PV od zabudowań.",
        "W praktyce gminy czasem wymagają np. ≥4 m od granicy działki w MPZP."
      ]
    }
  ],
  10
}
```

```
"references": {
  "practice_summary": "Brak ogólnokrajowego minimum - często przyjmowane lokalnie ≥4 m od granicy",
  "building_code_context": "WT budynków §12 (odległości budynku od granicy działki)"
},
{
  "type": "biogas_agricultural",
  "name": "Biogazownia rolnicza - komory fermentacyjne i zbiorniki biogazu rolniczego",
  "status": "binding_minimum",
  "min_distances_m": {
    "to_rooms_for_people_or_livestock": 20,
    "to_other_unrelated_buildings": 20,
    "to_neighboring_plot_boundary": 5,
    "to_coal_or_coke_storage": 15,
    "to_other_biogas_fermentation_units": 15
  },
  "legal_basis": {
    "regulation": "Rozporządzenie MRiRW z 13.01.2023 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle rolnicze i ich usytuowanie",
    "paragraph": "§7",
    "publication": "Dz.U. 2023 poz. 297"
  }
},
{
  "sources": [
    {
      "class": "wind_act_consolidated",
      "title": "Ustawa o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych - tekst jednolity",
      "url": "https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20240000317"
    },
    {
      "class": "biogas_regulation"
    }
  ]
}
```

Pierwszy z prezentowanych listingów przedstawia uproszczoną strukturę JSON, obejmującą podstawowe atrybuty wymagań odległościowych dla obiektów OZE, takie jak kategoria instalacji, kryterium odległości, wartość minimalna, jednostka miary oraz źródło prawne.

Drugi listing prezentuje rozszerzoną strukturę JSON zawierającą meta-informacje (jurysdykcja, data obowiązywania, zakres zastosowania), statusy regulacji (*binding_minimum* – „minimalny wymóg prawnie wiążący”, *no_national_minimum* – „brak minimalnego wymogu na poziomie krajowym”), a także pola wskazujące podstawy prawne z odwołaniami do ISAP i planowane nowelizacje. Struktura ta umożliwia zarówno odwzorowanie obowiązujących wymogów, jak i monitorowanie zmian legislacyjnych w czasie.

12.2.2. Zestaw pytań aktualizacyjnych w procesie detekcji zmian legislacyjnych

Celem budowy zestawu pytań aktualizacyjnych jest identyfikacja zmian legislacyjnych z wykorzystaniem technologii Retrieval-Augmented Generation (RAG). Moduł ten stanowi część Bazy Wiedzy i został zaprojektowany w taki sposób, aby umożliwiać precyzyjne definiowanie pytań zakresowych, pozwalających na wykrywanie

modyfikacji w regulacjach prawnych. Szczególny nacisk położono na aktualizację danych dotyczących relacji odległościowych projektowanych obiektów OZE względem innych elementów otoczenia.

Zestaw został przygotowany tak, aby mógł być cyklicznie uruchamiany i służyć do aktualizacji pliku JSON, co pozwala na automatyczne pozyskiwanie informacji i bieżące uaktualnianie danych. Każde pytanie składa się z elementów koncentrujących się nie tylko na ogólnym kontekście oraz wymaganiach, lecz także na specyficznych aspektach metryk, takich jak wartości minimalne, podstawy prawne oraz regulacje regionalne. Zestaw przykładowych pytań aktualizacyjnych przedstawia tabela 20.

Tabela 20

Pytania aktualizacyjne ukierunkowane na identyfikację modyfikacji regulacyjnych

Rodzaj pytania	Zakres	Przykładowe pytania szczegółowe
Aktualność przepisów	Weryfikacja bieżącego stanu prawnego oraz zmian w okresie referencyjnym	Czy w okresie (okres czasowy: ostatni rok) wprowadzono jakiejkolwiek zmiany w przepisach prawnych dotyczących minimalnych odległości dla obiektów OZE w Polsce? • Jeśli tak, proszę podać konkretne przepisy i daty wprowadzenia zmian. • Czy te zmiany wpływają na wartości minimalne określone w obecnym pliku JSON (dla każdego typu obiektu)? Jeśli tak, jakie są nowe wartości? Czy istnieją przewidywane zmiany w przepisach prawnych dotyczące minimalnych odległości dla obiektów OZE w Polsce w ciągu (okres czasowy – następnych 6 miesięcy)? • Jeśli tak, proszę podać źródła informacji o tych przewidywanych zmianach.
Regionalne różnice	Identyfikacja regulacji lokalnych i planistycznych wpływających na odległości	• Czy istnieją regulacje regionalne (w województwach), które modyfikują ogólne wymagania dotyczące odległości dla konkretnego typu obiektu OZE, np. farmy wiatrowej? Jeśli tak, proszę podać konkretne przepisy i daty wprowadzenia zmian. • Czy te regulacje są bardziej restrykcyjne (wyższe minimalne odległości) niż ogólne przepisy krajowe? Czy istnieją lokalne plany zagospodarowania przestrzennego, które nakładają dodatkowe wymagania dotyczące minimalnych odległości dla obiektów OZE w (konkretny region)? • Jeśli tak, proszę podać konkretne plany i ich klauzule.
Nowe technologie	Ocena wpływu innowacji technologicznych na bezpieczeństwo i wymagane odległości	Dla (konkretny typ OZE), czy minimalna odległość powinna być różna w zależności od: • Wysokości turbin? • Mocy instalacji? • Rodzaju terenu (teren zabudowany, teren rolniczy)? Obecności obszarów chronionych lub walorów krajobrazowych w pobliżu? Czy istnieją rekomendowane odległości minimalne opracowane przez organizacje branżowe (Polskie Towarzystwo Energetyki Wiatrowej), które różnią się od przepisów prawnych?

Wartości minimalne	Ustalenie czy odległości powinny być różnicowane według parametrów obiektu lub otoczenia	Dla (konkretny typ obiektu OZE - farma wiatrowa), czy minimalna odległość powinna być różna w zależności od: • Wysokości turbin? • Moc instalacji? • Rodzaju terenu? • Obecności obszarów chronionych lub walorów krajobrazowych w pobliżu? Czy istnieją rekomendowane odległości minimalne opracowane przez organizacje branżowe (np. Polskie Towarzystwo Energetyki Wiatrowej) które różnią się od przepisów prawnych?
Źródła prawne	Weryfikacja kompletności i aktualności podstaw prawnych	Czy obecne źródła prawne (podane w JSON-ie) są nadal aktualne i w pełni adekwatne dla wymaganych minimalnych odległości dla (konkretny typ obiektu OZE)? • Czy istnieją nowsze lub bardziej wiarygodne źródła informacji, które powinny być uwzględnione?

Źródło: opracowanie własne.

Aby zautomatyzować zestaw pytań aktualizacyjnych, można je zapisać w formacie umożliwiającym ich przetwarzanie przez skrypty, takim jak YAML lub JSON. Skrypt może następnie automatycznie wysyłać zapytania do odpowiednich baz danych prawnych, serwisów instytucji rządowych i organizacji branżowych, a na podstawie pozyskanych informacji aktualizować plik JSON zawierający metryki odległości projektowanych obiektów OZE.

12.2.3. Benchmark oceny modelu LLM w regulacjach OZE i procesie analizy

Benchmark stanowi metodologię ilościowego porównania poziomu osiągnięć, efektywności lub jakości danego systemu z ustalonym punktem odniesienia (standardem referencyjnym). Jego celem jest obiektywne oszacowanie aktualnego stanu jakościowego douczanego modelu (LoRA) i identyfikacja obszarów wymagających poprawy lub optymalizacji względem wyznaczonego wzorca.

Struktura benchmarku jest zbudowana na zbiorach przypadków testowych, które reprezentują różne scenariusze związane z wymaganiami prawnymi dotyczącymi OZE. Każdy przypadek testowy jest definiowany przez zestaw danych wejściowych (prompt) i oczekiwanych wyników, co umożliwia obiektywną ocenę wydajności i jakości modelu LLM.

Głównym elementem struktury są przypadki testowe, które charakteryzują się unikalnym identyfikatorem oraz precyzyjnie sformułowanym zapytaniem (prompt). Prompty te symulują rzeczywiste zadania, z którymi model może się spotkać w praktyce. Dla każdego przypadku testowego zdefiniowany jest zestaw słów kluczowych, które stanowią kryteria sukcesu oraz umożliwiają automatyczną ocenę odpowiedzi modelu. Dodatkowo, benchmark zawiera metryki oceny, które opisują sposób mierzenia jakości wygenerowanych treści. Metryki te obejmują aspekty takie jak kompletność informacji, ich dokładność, istotność w kontekście zadania i poziom szczegółowości. Ważnym elementem jest też klasyfikacja trudności każdego przypadku testowego. Umożliwia to priorytetyzację testowania i skupienie się na scenariuszach, które stanowią największe wyzwanie dla modelu LLM. Struktura ta pozwala nie tylko na ocenę ogólnej wydajności modelu, ale też na identyfikację jego mocnych i słabych stron w kontekście konkretnych zadań związanych z prawem i inwestycjami w OZE.

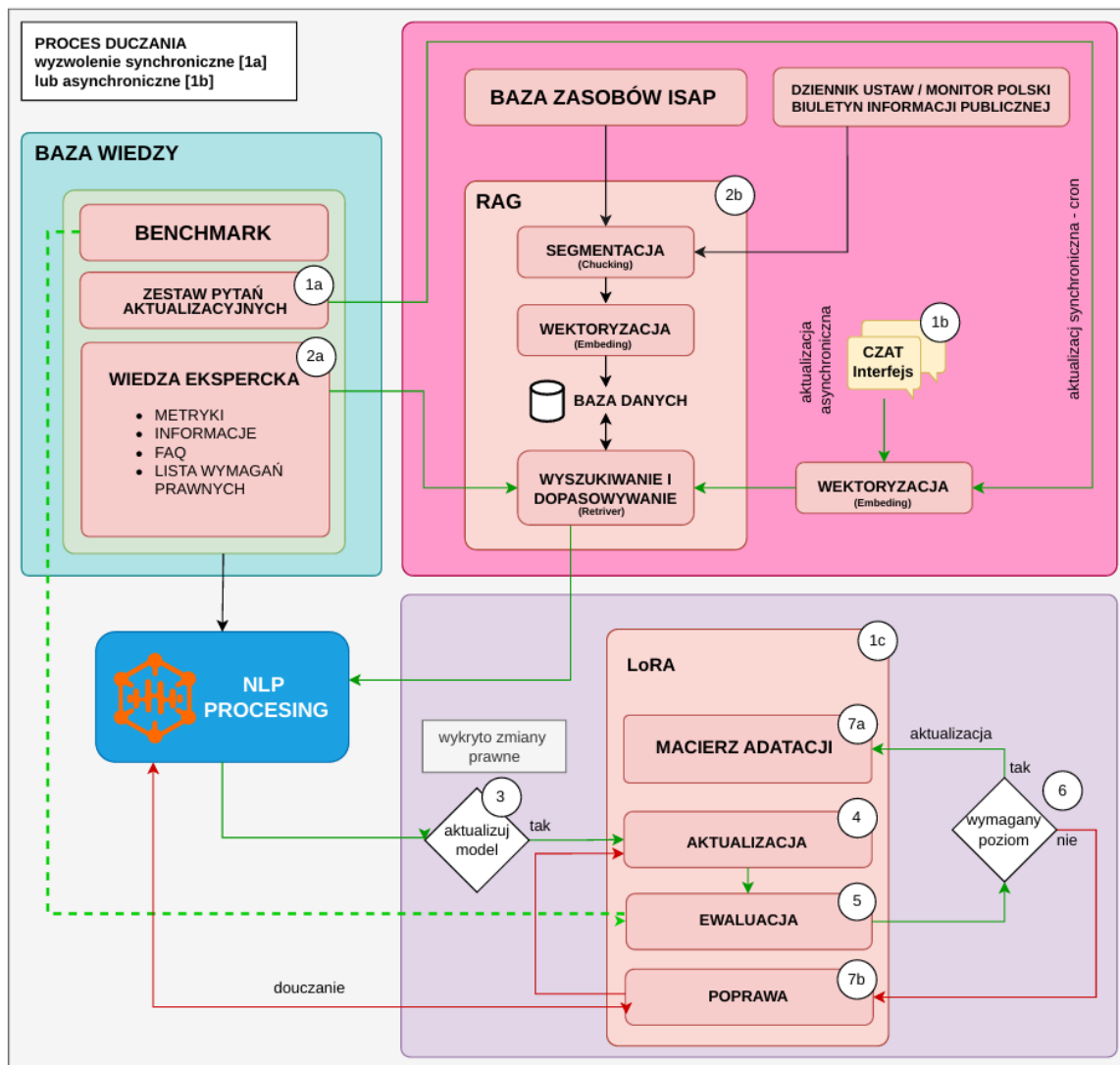
Przykładowa reprezentacja benchmarku w formacie JSON przedstawia algorytm 3. Struktura ta opisuje ustrukturyzowany zestaw przypadków testowych służących do oceny jakości działania systemu LLM w obszarze prawa i regulacji dotyczących lokalizacji oraz posadowienia instalacji OZE.

Algorytm 3. Ustrukturyzowany przypadek testowy do oceny jakości działania systemu LLM w analizie prawnej i lokalizacyjnej budowy biogazowni rolniczej w Polsce.

```
{
  "benchmark_name": "Benchmark LLM - analiza prawna biogazowni rolniczej",
  "description": "Test oceniający zdolność systemu LLM do analizy wymagań prawnych i lokalizacyjnych przy budowie biogazowni rolniczej w Polsce.",
  "version": "1.0",
  "date_created": "2024-02-29",
  "test_cases": [
    {
      "case_id": "OZE-BIOGAZ-001",
      "prompt": "Przeanalizuj wymagania prawne i lokalizacyjne dotyczące budowy biogazowni rolniczej o mocy 0,5 MW w Polsce, w tym konieczne pozwolenia, przepisy środowiskowe i ograniczenia lokalizacyjne.",
      "expected_output_keywords": [
        "Prawo energetyczne",
        "Prawo budowlane",
        "Pozwolenie na budowę",
        "Decyzja środowiskowa (OOŚ)",
        "Ustawa o odpadach i nawozach naturalnych",
        "Przepisy dotyczące planowania przestrzennego (MPZP, decyzja WZ)",
        "Wymogi sanitarne i zapachowe",
        "Przyłączenie do sieci elektroenergetycznej"
      ],
      "evaluation_metrics": [
        "Kompletność",
        "Dokładność",
        "Istotność",
        "Szczegółowość"
      ],
      "difficulty": "Wysoka"
    }
  ]
}
```

12.3. Krok 2 – Dynamiczne douczanie modelu LLM bazujące na wiedzy prawnej

Proces douczania (*fine-tuning*) modelu LLM w obszarze prawa i lokalizacji inwestycji OZE obejmuje integrację wieloźródłowych danych, ich analityczne przetwarzanie i dostrajanie modelu. Tak zdefiniowana procedura zapewnia bieżącą zgodność z obowiązującym stanem prawnym i podnosi jakość wsparcia użytkowników w analizach regulacyjnych. Na rysunku 45 pokazano przebieg procesu: od pozyskiwania oraz strukturyzacji wiedzy prawnej, przez jej konsolidację w Bazie Wiedzy, po wykorzystanie w modułach wspomagających.



Rysunek 45. Proces dynamicznego douczania modelu LLM.
Źródło: opracowanie własne.

W pierwszym etapie system pozyskuje i organizuje wiedzę prawną, integrując akty z różnych źródeł (ISAP, BIP, prawo lokalne, dyrektywy UE). Materiały są segmentowane (chunking), wektoryzowane i indeksowane w bazie wektorowej. Moduł RAG realizuje dynamiczne pobieranie i dopasowanie fragmentów prawa do bieżących zapytań lub zadań aktualizacyjnych, co pozwala jednocześnie unikać przepełniania kontekstu oraz pracować na aktualnych danych. Tą samą ścieżką zasilana jest także baza wiedzy.

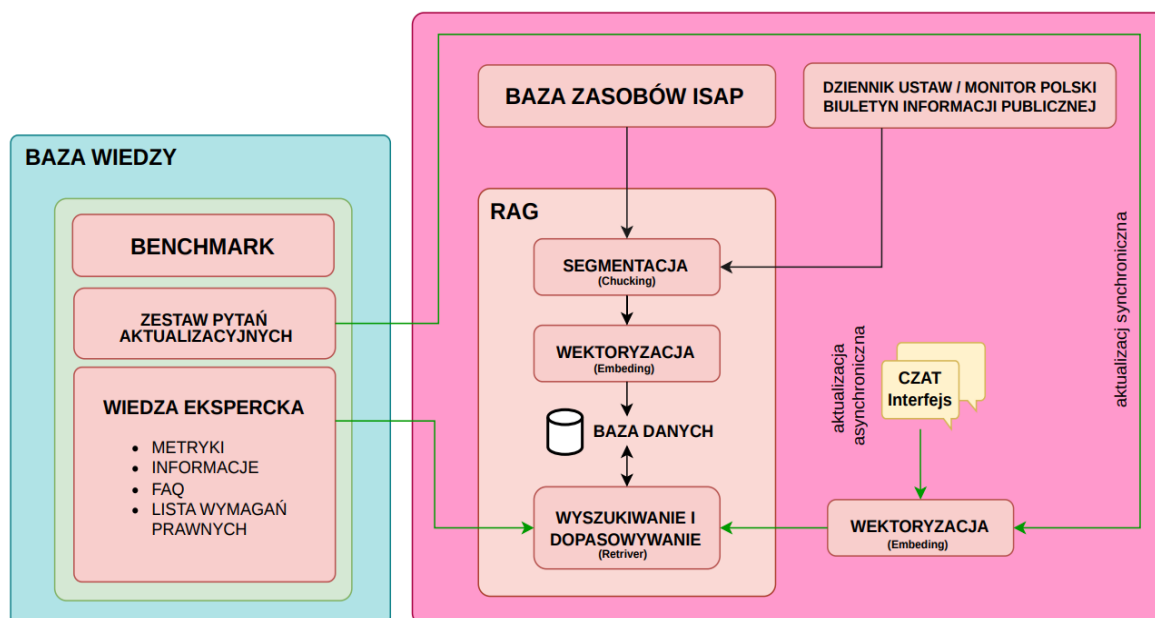
W drugim etapie system wykorzystuje techniki przetwarzania języka naturalnego (NLP) do analizy treści prawnych, co umożliwia automatyczne wydobywanie kluczowych informacji. Na tej podstawie tworzona jest lista wymagań, stanowiąca dynamiczny zestaw warunków brzegowych dla procesów inwestycyjnych.

Zestaw ten może być aktualizowany automatycznie przez system lub zatwierdzany manualnie przez ekspertów w celu zapewnienia wysokiej jakości, a także zgodności z obowiązującymi regulacjami.

W trzecim, końcowym, etapie zweryfikowane wymagania zasilają Bazę Wiedzy i mogą być wbudowywane w model przy użyciu mechanizmu LoRA. LoRA to technika dostrajania, polegająca na dodaniu macierzy niskiego rzędu do wybranych warstw modelu, co pozwala zmieniać jego zachowanie bez pełnego ponownego trenowania modelu bazowego. Dzięki temu model lepiej dostosowuje się do specyfiki analiz prawnych przy relatywnie niskich kosztach obliczeniowych.

12.3.1. Moduł RAG jako mechanizm dynamicznego pozyskiwania informacji

Retrieval-Augmented Generation (RAG) łączy model generatywny z zewnętrzną Bazą Wiedzy. W kontekście OZE jego główną funkcją jest dynamiczne wyszukiwanie oraz pobieranie informacji prawnych w czasie zbliżonym do rzeczywistego. Na rysunku 46 ukazano architekturę systemu RAG zintegrowaną ze źródłami prawnymi, Bazą Wiedzy i interfejsem algorytmu.



Rysunek 46. Architektura systemu RAG i integracja z Bazą Wiedzy oraz źródłami prawnymi.
Źródło: opracowanie własne.

W systemie RAG podstawową jednostką informacji jest rekord wiedzy zapisywany w Bazie Wiedzy w formacie JSON. Każdy rekord stanowi elementarny nośnik treści merytorycznej i zawiera zarówno treść właściwą, na przykład fragment normy lub komentarz ekspercki, jak i bogaty zestaw metadanych. Struktura JSON umożliwia hierarchiczne, jednoznaczne i nadające się do przetwarzania maszynowego przechowywanie informacji, dzięki czemu pełni funkcję pomostu między tekstem prawnym lub eksperckim a jego reprezentacją techniczną.

Każdy rekord posiada unikalny identyfikator i atrybuty opisujące jego źródło, typ, tytuł, zakres stosowania, a także wymagania liczbowe lub logiczne, które mogą zostać wykorzystane w analizach. Uwzględniony jest również kontekst jurysdykcyjny: czas obowiązywania, wersjonowanie i odwołania do oryginalnych źródeł (Dziennika Ustaw, Monitora Polskiego, uchwał lokalnych).

Dokumenty prawne pozyskiwane z ISAP, Monitora Polskiego i Dziennika Ustaw są poddawane wieloetapowemu przetwarzaniu, które prowadzi do ich ujednolicenia i przygotowania do dalszej analizy. Proces ten obejmuje ekstrakcję treści, normalizację, segmentację, wektoryzację, indeksowanie i przetwarzanie LLM. Poszczególne kroki zilustrowano na rysunku 47.



Rysunek 47. Etapy przekształcania dokumentów prawnych w systemie RAG.

Źródło: opracowanie własne.

Cały proces prowadzi do stworzenia ujednoliconych rekordów wiedzy w formacie JSON. Każdy rekord zawiera treść prawną i ekspercką oraz metadane opisujące źródło, kontekst jurysdykcyjny, czas obowiązywania i wersjonowanie. Dzięki temu możliwe jest wierne odwzorowanie treści prawnych oraz ich dalsza segmentacja, wektoryzacja i integracja w bazie semantycznej systemu.

System integruje strukturę wektorową opartą na sztucznej sieci neuronowej dla efektywnego dopasowania semantycznego, z indeksem pełnotekstowym umożliwiającym tradycyjne wyszukiwanie leksykalne. Dodatkowo wykorzystuje bazę kluczy i wartości do precyzyjnej selekcji danych w oparciu o kryteria takie jak minimalne odległości semantyczne czy progi emisji.

Aby zapewnić wysoką jakość informacji, w systemie zastosowano mechanizm walidacji eksperckiej. Zweryfikowane rekordy oznaczane są jako bardziej wiarygodne i otrzymują wyższą wagę w procesie rankingowania odpowiedzi. Dzięki temu odpowiedzi generowane na podstawie RAG nie tylko odzwierciedlają aktualny stan prawny, lecz również korzystają z wiedzy sprawdzonej oraz zatwierdzonej przez ekspertów.

W celu zwiększenia wydajności i ograniczenia kosztów obliczeniowych zastosowano mechanizmy buforowania. Obejmują one przechowywanie wektorowych reprezentacji zapytań, list identyfikatorów wyników wyszukiwania (TopK_IDs) oraz gotowych odpowiedzi dla pytań o wysokim stopniu podobieństwa. Dzięki temu system unika powtarzania kosztownych operacji, skraca czas odpowiedzi i lepiej wykorzystuje wcześniej zgromadzone wyniki. Buforowanie jest kluczowe dla skalowalności systemu i umożliwia efektywne pozyskiwanie wiedzy z dokumentów legislacyjnych.

Zastosowane mechanizmy umożliwiają bieżące śledzenie zmian legislacyjnych oraz dynamiczne dostosowywanie odpowiedzi systemu do stanu prawnego. Przykładowo, przy zapytaniu o minimalną odległość elektrowni wiatrowych od zabudowy mieszkaniowej, system analizuje ISAP oraz uchwały lokalne i aktualizuje listę wymagań w Bazie Wiedzy po wykryciu nowelizacji (przejścia z zasady 10H do minimum 700 m w 2023 roku). Dodatkowo system odnotowuje projekty zmian oraz ich status (weto prezydenckie w 21 sierpnia 2025 roku dotyczące propozycji 500 m), aby unikać przedwczesnego stosowania nieobowiązujących przepisów.

System posiada mechanizm kontroli wiedzy, zbliżony do podejścia LoRA. Może działać automatycznie lub półautomatycznie, gdy ekspert zatwierdza dane sprzeczne z bazą wiedzy lub macierzą adaptacji. Zatwierdzone zmiany wpływają na treść generowanych odpowiedzi, stanowiąc formę asynchronicznego douczania modelu i zapewniając ich zgodność z aktualnym stanem prawnym.

12.3.2. Trwale douczanie modelu językowego – moduł LoRA

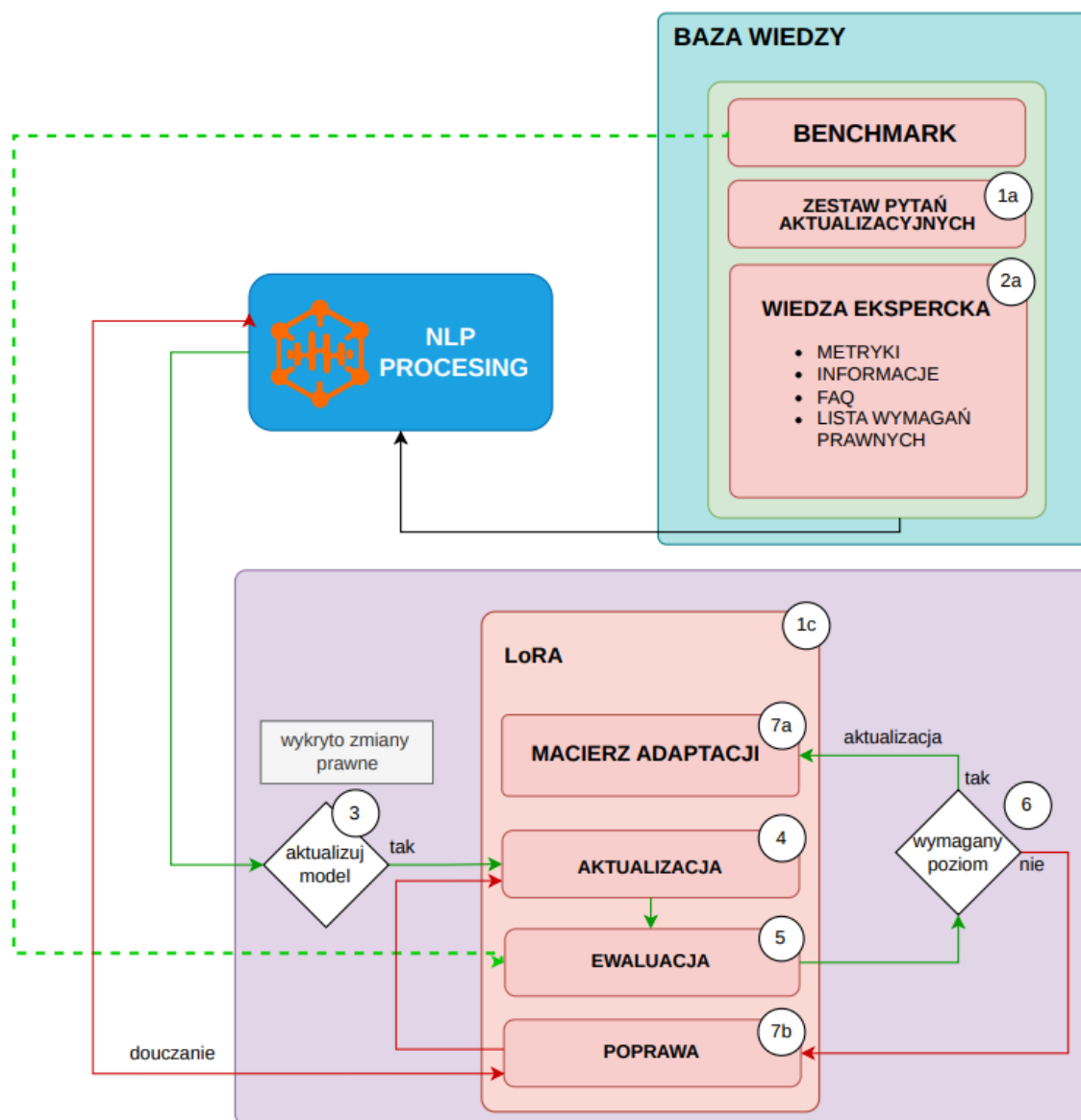
Aktualizowanie modelu LLM z wykorzystaniem techniki LoRA (Low-Rank Adaptation) to proces trwałego podnoszenia jego kompetencji, wsparty walidacją i oceną jakości. Rozwiązanie to pozwala dostosować model do specyficznych zadań z zakresu prawa i inwestycji w odnawialne źródła energii. Dzięki integracji modułów Bazy Wiedzy, RAG, benchmarku i przetwarzania NLP, LoRA umożliwia efektywne dostrajanie poprzez aktualizację jedynie niewielkich macierzy adaptacyjnych, przy zachowaniu nienaruszonej bazy wag.

Podstawowy model pozostaje zamrożony, a zmiany wprowadzane są wyłącznie w warstwie aktualizacji. Takie podejście zapewnia bieżące dostosowanie do zmian legislacyjnych oraz ciągłe doskonalenie systemu, co przekłada się na wysoką trafność i użyteczność generowanych odpowiedzi (rysunek 48).

Proces douczania rozpoczyna się od warstwy bazowej, która korzysta z trzech rodzajów źródeł: metryk i wskaźników technicznych, zestawu pytań aktualizacyjnych wykrywających zmiany w otoczeniu prawnym, a także wiedzy eksperckiej, obejmującej przepisy, informacje uzupełniające, listę wymagań prawnych i odpowiedzi na często zadawane pytania.

Jeśli w treściach publikowanych w systemach promulgacyjnych, takich jak ISAP, Monitor Polski i Dziennik Ustaw, zostaną wykryte zmiany prawne, uruchamiany jest proces aktualizacji modelu. Na tym etapie zastosowanie znajduje LoRA, czyli technika niskowymiarowej adaptacji wag. Proces przebiega w kilku krokach. W pierwszej kolejności aktualizowana jest macierz adaptacyjna, tak aby model odzwierciedlał nową treść prawną. Następnie uruchamiany jest mechanizm testowania w formie benchmarkingu. Polega on na weryfikacji poprawności nowych wymagań przed ich

wprowadzeniem do Bazy Wiedzy i douczeniem LoRA. Benchmark jest zbudowany z zestawu pytań oraz odpowiedzi kontrolnych, które model musi przejść, aby nowa wiedza została zaakceptowana.



Rysunek 48. Proces douczania modelu z wykorzystaniem LoRA.

Źródło: opracowanie własne.

Jeżeli wyniki testów okażą się niesatysfakcjonujące, następuje dalsze uczenie macierzy adaptacyjnej oraz ponowna ewaluacja. Ostatecznie sprawdzane jest, czy odpowiedzi osiągają wymagany poziom jakości. W przypadku pozytywnego wyniku nowa wersja modelu zostaje zatwierdzona, a w przeciwnym system powraca do fazy korekty.

LoRA pełni zatem rolę mechanizmu dynamicznego, a jednocześnie trwałego dostosowywania modelu NLP do zmian prawnych w obszarze OZE. Umożliwia utrzymanie aktualności i spójności generowanych odpowiedzi, przy równoczesnym obniżeniu kosztów obliczeniowych związanych z pełnym trenowaniem modelu. Dzięki temu możliwe jest iteracyjne i stopniowe doskonalenie jakości całego systemu.

Aby zobrazować sposób działania opisanych mechanizmów, poniżej ukazano pseudokod procesu douczania realizowanego w technice LoRA na podstawie wygenerowanego pliku zmian w formacie JSON (algorytm 4).

Algorytm 4. Pseudokod douczania realizowanego w technice LoRA na podstawie wygenerowanego pliku zmian w formacie JSON.

```
CONSTANT MODEL_NAME ← "./gemma-3-12b-it"

FUNCTION TOKENIZE(EXAMPLE, MAX_LEN, TOKENIZER)
  prompt ← "Pytanie:\n" # EXAMPLE.question # "\n Odpowiedź:\n"
  text ← prompt # EXAMPLE.answer # TOKENIZER.EOS_TOKEN

  (ids, mask) ← ENCODE(TOKENIZER, text, MAX_LEN, PAD_TO_MAX=TRUE, TRUNCATE=TRUE)
  input_ids ← ids
  attention_mask ← mask
  labels ← COPY(input_ids)
  (p_ids, _) ← ENCODE(TOKENIZER, prompt, MAX_LEN, PAD_TO_MAX=FALSE, TRUNCATE=TRUE)
  prompt_len ← LENGTH(p_ids)

  FOR t ← 1 TO prompt_len DO
    labels[t] ← -100
  END FOR
  IF ALL_EQUAL(labels, -100) THEN
    last_pos ← SUM(attention_mask) # indeks długości sekwencji ≡ liczba tokenów ≡ L
    IF last_pos ≥ 1 THEN
      labels[last_pos] ← input_ids[last_pos]
    END IF
  END IF
  RETURN { "input_ids": input_ids,
    "attention_mask": attention_mask,
    "labels": labels }
END FUNCTION

PROCEDURE MAIN()
  model_exists ← PATH_EXISTS(OUTPUT_DIR)

  IF model_exists THEN
    PRINT("Odnaleziono model w ", OUTPUT_DIR)
    tokenizer ← LOAD_TOKENIZER(OUTPUT_DIR)
    model_source ← OUTPUT_DIR
  ELSE
    PRINT("Ładowanie modelu z zasobu", MODEL_NAME)
    tokenizer ← LOAD_TOKENIZER(MODEL_NAME)
    model_source ← MODEL_NAME
  END IF

  IF tokenizer.PAD_TOKEN IS NULL THEN
    tokenizer.PAD_TOKEN ← tokenizer.EOS_TOKEN
  END IF
  # Konfiguracja kwantyzacji 4-bit (BitsAndBytes)
  bnb_config ← {
    load_in_4bit: TRUE,
    quant_type: "nf4",
    compute_dtype: FP16,
    double_quant: TRUE
  }
  # Wczytanie danych treningowych
  PRINT("Ładowanie training_data.json")
  IF NOT FILE_EXISTS("training_data.json") THEN
    PRINT("Błąd: brak pliku training_data.json")
    RETURN
  END IF
```

```
data ← JSON_LOAD("training_data.json")
PRINT("Załadowano ", LENGTH(data), " przykładów")
IF LENGTH(data) = 0 THEN
PRINT("Brak danych do trenowania")
RETURN
END IF
max_q_len ← MAX_OVER(data, LENGTH(item.question))
calculated_max_len ← MIN( max_q_len * 2 + 32, 2048 )
PRINT("max_length - ", calculated_max_len)

# Budowa datasetu i tokenizacja
ds ← DATASET_FROM_LIST(data)
tokenized_ds ← MAP(ds, λ x . TOKENIZE(x, calculated_max_len, tokenizer))

# Ładowanie modelu (z istniejącego katalogu lub z HF), z kwantyzacją 4-bit
PRINT("Ładowanie modelu (attn='eager')")
model ← LOAD_CAUSAL_LM(model_source,
quantization=bnb_config,
device_map="auto",
dtype=FP16,
attn_impl="eager")
# LoRA konfiguracja
PRINT("LoRA konfiguracja")
lora_cfg ← {
task_type: "CAUSAL_LM",
r: 16,
alpha: 32,
dropout: 0.05,
bias: "none",
target_modules: ["q_proj", "o_proj", "k_proj", "v_proj",
"gate_proj", "up_proj", "down_proj"]
}
model ← ATTACH_LORA_ADAPTERS(model, lora_cfg)
PRINT_TRAINABLE_PARAMS(model)
# Ustawienie parametrów treningowych
PRINT("XXX konfiguracja argumentów treningowych")
train_args ← {
output_dir: OUTPUT_DIR,
per_device_train_batch_size: 1,
gradient_accumulation_steps: 8,
learning_rate: 2e-4,
num_train_epochs: 10,
warmup_steps: 50,
bf16: TRUE,
logging_steps: 5,
save_steps: 250,
save_total_limit: 3,
weight_decay: 0.01,
remove_unused_columns: FALSE,
label_names: ["labels"]
}
# Inicjalizacja treningu
trainer ← TRAINER(model, train_args, train_dataset = tokenized_ds)
PRINT("Trenowanie rozpoczęte")
trainer.TRAIN(resume_from_checkpoint = model_exists)
# Zapis modelu
SAVE_MODEL(model, OUTPUT_DIR)
SAVE_TOKENIZER(tokenizer, OUTPUT_DIR)
PRINT("model LoRA zapisano w", OUTPUT_DIR)
END PROCEDURE
```

12.3.3. Lista wymagań jako centralny komponent systemu

Lista wymagań stanowi centralny komponent systemu dynamicznego generowania warunków brzegowych, pełniąc funkcję filtra, modułu porządkującego i walidującego kryteria wynikające zarówno z obowiązujących regulacji prawnych, jak też wiedzy eksperckiej. Moduł ten działa jako swoisty „dynamiczny filtr”, który przekształca rozproszone i często niestrukturalne zapisy w spójną oraz jednolitą listę kryteriów podlegających ocenie. Powstała struktura charakteryzuje się uporządkowaniem oraz hierarchicznością, co umożliwia przypisywanie poszczególnych wymagań do określonych kategorii, takich jak minimalne odległości, parametry środowiskowe, progi mocy instalacji czy dopuszczalne wartości emisji hałasu.

Mechanizm funkcjonowania modułu obejmuje także warstwę nadzoru, w ramach której weryfikowana jest poprawność oraz spójność wygenerowanych wymagań. W sytuacjach, gdy pojawiają się niespójności lub brak jednoznaczności, uruchamiany jest etap kontroli manualnej. Na tym etapie ekspert dokonuje analizy i zatwierdzenia proponowanych zmian, zanim zostaną one włączone do obowiązującej listy.

Rezultatem działania modułu jest dynamicznie aktualizowana i zweryfikowana lista wymagań, stanowiąca podstawę dalszej analizy przypadku przekazanego przez użytkownika w module NLP oraz źródło danych do generowania sygnałów w formacie JSON wykorzystywanych przez agenta decyzyjnego. W konsekwencji lista wymagań staje się kluczowym punktem odniesienia dla całego systemu, zapewniając spójność pomiędzy regulacjami prawnymi, wiedzą ekspercką oraz procesem automatycznego wnioskowania.

Warunki są formalnie zdefiniowane, co umożliwia ich automatyczną walidację i monitorowanie. Lista wymagań ma charakter dynamiczny i jest aktualizowana w czasie rzeczywistym w odpowiedzi na zmiany w regulacjach prawnych, np. w przypadku nowelizacji ustawy o OZE lub uchwał lokalnych.

Dla zapewnienia spójności procesu oceny inwestycji odnawialnych źródeł energii opracowano algorytm dynamicznej walidacji wymagań (algorytm 5).

Algorytm 5. Algorytm dynamicznej walidacji wymagań.

```
{
  "lista_wymagań": [
    {
      "if": "instalacja lokalizowana w pobliżu budynków mieszkalnych lub inwentarskich",
      "must": "zachować odległość co najmniej 20 metrów",
      "legal_basis": "Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi, Dz.U. 1997 nr 132 poz. 877"
    },
    {
      "if": "instalacja lokalizowana w pobliżu granicy działki",
      "must": "zachować odległość co najmniej 5 metrów",
      "legal_basis": "Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi, Dz.U. 1997 nr 132 poz. 877"
    },
    {
      "if": "instalacja lokalizowana w pobliżu silosów, składów opału lub innych obiektów",
      "must": "zachować odległość co najmniej 15 metrów",
      "legal_basis": "Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi, Dz.U. 1997 nr 132 poz. 877"
    },
    {
      "if": "instalacja lokalizowana w pobliżu cieków lub zbiorników wodnych powierzchniowych",
      "must": "zachować odległość co najmniej 30 metrów",
      "legal_basis": "Ustawa Prawo wodne, Dz.U. 2017 poz. 1566"
    },
    {
      "if": "instalacja lokalizowana w pobliżu ujęcia wody pitnej",
      "must": "zachować odległość co najmniej 50 metrów",
      "legal_basis": "Ustawa Prawo wodne, Dz.U. 2017 poz. 1566"
    },
    {
      "if": "zbiornik pofermentu lokalizowany w pobliżu rowów melioracyjnych lub wód",
      "must": "zachować odległość co najmniej 25 metrów",
      "legal_basis": "Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi, Dz.U. 1997 nr 132 poz. 877"
    },
    {
      "if": "lokalizacja instalacji na terenie Natura 2000, w parku narodowym lub rezerwacie przyrody",
      "must_not": "realizować inwestycji (zakaz lokalizacji)",
      "legal_basis": "Ustawa o ochronie przyrody, Dz.U. 2004 nr 92 poz. 880"
    },
  ]
}
```

```
"if": "stosowanie pofermentu na gruntach rolnych",
"must": "nie przekroczyć dawki 170 kg azotu na hektar w ciągu roku",
"legal_basis": "Dyrektywa Rady 91/676/EWG + Program działań
ograniczających odpływ azotu, M.P. 2023 poz. 746"
},
{
  "if": "planowana odległość instalacji od sieci elektroenergetycznej lub
gazowej",
  "should": "wynosić od 1 do 2 km (kryterium optymalne)",
  "legal_basis": "Brak ustawowego wymogu - kryterium inwestycyjne"
},
{
  "if": "planowana odległość instalacji od źródeł biomasy",
  "should": "wynosić od 5 do 10 km (kryterium optymalne)",
  "legal_basis": "Brak ustawowego wymogu - kryterium inwestycyjne"
},
{
  "if": "instalacja ma moc większą niż 0,5 MW",
  "must": "uzyskać decyzję o środowiskowych uwarunkowaniach (OOŚ)",
  "legal_basis": "Rozporządzenie Rady Ministrów w sprawie przedsięwzięć
mogących znacząco oddziaływać na środowisko, Dz.U. 2019 poz. 1839"
}
]
```

12.3.4. Metodyka generowania i walidacji listy sygnałów

Po ustaleniu i zweryfikowaniu listy wymagań aktywowany zostaje moduł generatora JSON, którego zadaniem jest translacja kryteriów w postać sygnałów, czyli parametrów dostosowanych do dalszego automatycznego przetwarzania w ramach działania agenta decyzyjnego. Każdy sygnał konstruowany jest jako struktura zawierająca unikalny identyfikator, opis semantyczny, wartość progową bądź warunek logiczny, a także powiązanie z odpowiednimi danymi wejściowymi, takimi jak charakterystyka działki, wyniki pomiarów środowiskowych czy zapisy planistyczne.

Wytworzone sygnały poddawane są następnie procedurze nadzoru. W sytuacji, gdy pojawiają się rozbieżności lub brak pełnej pewności co do ich poprawności, kierowane są one do weryfikacji manualnej, w ramach której ekspert dokonuje oceny i podejmuje decyzję o ich ostatecznym kształcie. Po uzyskaniu akceptacji sygnały eksportowane są w formacie JSON, stając się materiałem wejściowym dla kolejnych modułów systemu przeznaczonych do oceny i analizy projektów inwestycyjnych w zakresie odnawialnych źródeł energii.

Cały proces generowania sygnałów należy zatem traktować nie tylko jako techniczną procedurę przekształcania wymagań w struktury zrozumiałe dla maszyn, lecz także jako narzędzie walidacji i standaryzacji, które zapewnia spójność pomiędzy przepisami prawa, wiedzą ekspercką a funkcjonowaniem systemu analitycznego.

W tabeli 21 zostały przedstawione kategorie listy sygnałów wraz z ich krótką charakterystyką.

Tabela 21

Struktura listy sygnałów wraz z charakterystyką

Nazwa pola	Opis
signals	Klucz główny obiektu JSON. Zawiera tablicę (listę) wszystkich sygnałów, z których każdy reprezentuje jedno wymaganie prawne lub techniczne.
id	Unikalny identyfikator sygnału w systemie (wind_distance_residential, pv_min_area).
description	Opis w języku naturalnym wyjaśniający znaczenie sygnału („Minimalna odległość turbiny wiatrowej od zabudowań mieszkalnych”).
threshold_m	Wartość progowa w metrach: odległość od budynków, dróg, linii energetycznych.
threshold_ha	Wartość progowa w hektarach: minimalna powierzchnia działki pod inwestycję.
threshold_db	Wartość progowa w decybelach: maksymalny dopuszczalny poziom hałasu.
threshold_percent	Wartość progowa w procentach: udział powierzchni biologicznie czynnej.
threshold_mw	Wartość progowa w megawatach: moc zainstalowana źródła OZE.
condition	Wyrażenie logiczne (warunek), które musi zostać spełnione: plot.distance_to_residential >= 700, measurement.noise_db <= 45.

Źródło: opracowanie własne.

W algorytmie 6 zaprezentowano JSON zawierający uporządkowaną listę sygnałów odpowiadających wymaganiom prawnym i technicznym dla lokalizacji oraz eksploatacji instalacji OZE (wiatraki, farmy PV, biogazownie).

Algorytm 6. Uporządkowana lista sygnałów.

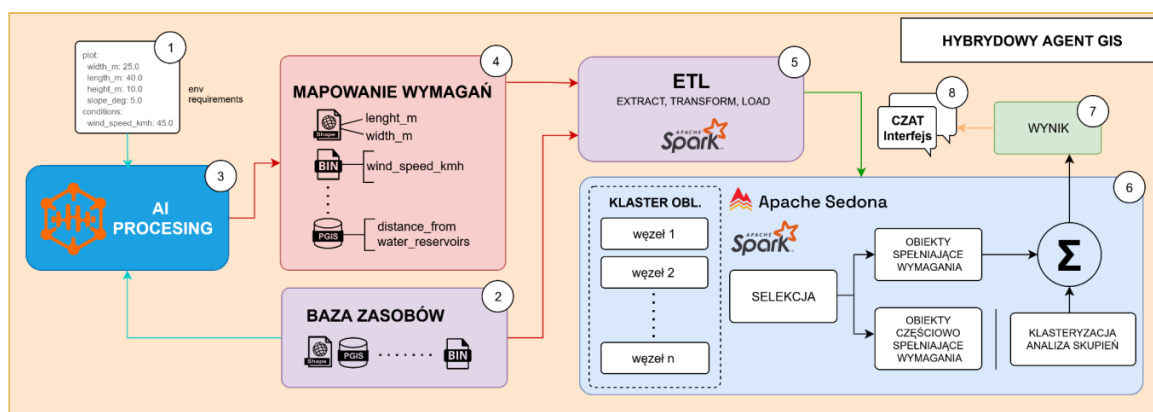
```
{
  "signals": [
    {
      "id": "wind_distance_residential",
      "description": "Minimalna odległość turbiny wiatrowej od zabudowań  
mieszkalnych",
      "threshold_m": 700,
      "condition": "plot.distance_to_residential >= 700"
    },
    {
      "id": "biogas_distance_buildings",
      "description": "Minimalna odległość biogazowni od budynków mieszkalnych  
i inwentarskich",
      "threshold_m": 20,
      "condition": "plot.distance_to_buildings >= 20"
    },
    {
      "id": "biogas_distance_boundary",
      "description": "Minimalna odległość biogazowni od granicy działki",
      "threshold_m": 5,
      "condition": "plot.distance_to_boundary >= 5"
    },
    {
      "id": "pv_land_class",
      "description": "Zakaz lokalizacji farm PV na gruntach klasy I-III",
      "condition": "plot.soil_class not in [I, II, III]"
    },
    {
      "id": "wind_noise_night",
      "description": "Maksymalny poziom hałasu turbin w nocy",
      "threshold_db": 45,
      "condition": "measurement.noise_db <= 45 when time=night"
    },
    {
      "id": "wind_noise_day",
      "description": "Maksymalny poziom hałasu turbin w dzień",
      "threshold_db": 50,
      "condition": "measurement.noise_db <= 50 when time=day"
    },
    {
      "id": "wind_mpzp_required",
      "description": "Lokalizacja turbiny wyłącznie na podstawie MPZP",
      "condition": "legal.has_mpzp == true"
    },
    {
      "id": "pv_env_decision",
      "description": "Obowiązek decyzji środowiskowej dla farm PV > 0,5 MW",
      "threshold_mw": 0.5,
      "condition": "project.power_mw > 0.5 -> legal.env_decision == true"
    },
    {
      "id": "biogas_odor_reporting",
      "description": "Obowiązek raportowania emisji odorów w biogazowni powyżej  
progu",
      "condition": "project.capacity > X -> legal.odor_report == true"
    }
  ]
}
```


12.4. Krok 3 – Analiza zapytań i przetwarzanie danych przestrzennych

System przyjmuje zapytania w języku naturalnym w interfejsie czatowym, analizuje ich treść i wyodrębnia cele, wymagane dane oraz kluczowe metryki. Gdy brakuje informacji, generuje pytania doprecyzowujące. Na tej podstawie dobiera parametry prawne oraz techniczne, uruchamia obliczenia geoprzestrzenne, a wyniki przedstawia w interfejsie czatowym w postaci map i tabel. Proces przetwarzania obejmuje trzy główne etapy:

1. konwersję zapytania na listę wymagań;
2. tłumaczenie listy wymagań na sygnały techniczne w formacie JSON;
3. analizę w środowisku hybrydowego agenta GIS (Apache Spark + Apache Sedona), umożliwiającą selekcję działek, określenie ich parametrów geometrycznych oraz odrzucenie obiektów niespełniających wymogów prawnych i technicznych.

Każdy z tych etapów składa się z bardziej szczegółowych kroków ukazanych na schemacie (rysunek 49).



Rysunek 49. Architektura hybrydowego agenta GIS.

Źródło: opracowanie własne.

12.4.1. Analiza zasobów i mapowanie wymagań

Mapowanie procesu doboru odpowiednich źródeł danych (zasobów) do wymagań przekazanych w postaci listy sygnałów, a także mapowanie atrybutów, umożliwia integrację tych wymagań z danymi przestrzennymi (GIS, SIP). Najważniejszą wartością systemu jest możliwość powiązania wymagań prawnych z informacją przestrzenną: podczas gdy przepisy określają „jakie warunki należy spełnić”, dane GIS i SIP pozwalają zweryfikować „czy konkretna działka rzeczywiście je spełnia”.

Cykl rozpoczyna się przekształceniem listy sygnałów w spójną strukturę zintegrowaną z bazą zasobów. Moduł AI Processing pełni funkcję interpretatora oraz tłumacza pomiędzy opisem semantycznym wymagań a formalnymi atrybutami zapisanymi w bazach przestrzennych i binarnych.

Punktem wyjścia jest lista sygnałów tworzona w module generowania wymagań. Obejmuje ona o parametry geometryczne działki i warunki środowiskowe oraz wartości progowe. Każdy sygnał posiada reprezentację semantyczną i logiczną w formacie JSON.

Zestaw ten trafia do modułu AI Processing, gdzie poddawany jest analizie językowej i ontologicznej. Celem tego etapu jest dynamiczne odwzorowanie opisów sygnałów na atrybuty przechowywane w repozytoriach danych.

Przykładowo, sygnał dotyczący minimalnej odległości od zbiorników wodnych zostaje rozpoznany jako atrybut przestrzenny, który należy powiązać z warstwą GIS reprezentującą zbiorniki wodne i wyrażony w postaci metrycznej.

Na dalszym etapie system NLP tworzy mapowanie wymagań, które ustanawia relacje pomiędzy sygnałami a konkretnymi strukturami danych. Mapowanie to ma charakter złożony i obejmuje zarówno atrybuty geometryczne i powierzchniowe (np. długość i szerokość działki powiązane z warstwami typu Shape), jak również parametry środowiskowe pochodzące z pomiarów zapisanych w formatach binarnych (np. prędkość wiatru), a także relacje przestrzenne wyliczane w bazach GIS (np. odległości od obiektów hydrograficznych).

Równocześnie w proces włączona jest baza zasobów, zawierająca zbiory katastralne, środowiskowe i planistyczne w różnych formatach, takich jak GIS, PGIS oraz dane binarne. Moduł NLP, wykorzystując dynamiczne mapowanie, wskazuje odpowiednie elementy bazy odpowiadające zdefiniowanym wymaganiom. W rezultacie dla każdego sygnału powstają jednoznaczne pary w postaci: wymaganie, atrybut oraz źródło danych.

Tak przygotowane odwzorowanie trafia następnie do modułu ETL, w którym dane są scalane, transformowane i ładowane do dalszych procesów analitycznych. Dzięki temu możliwe jest bezpośrednie porównanie rzeczywistych wartości parametrów przestrzennych i środowiskowych z progami określonymi w liście wymagań, co pozwala na automatyczną weryfikację zgodności lokalizacji z obowiązującymi kryteriami.

Mechanizm jest dynamiczny, ponieważ nie jest zbudowany ze sztywnych, wstępnie zakodowanych reguł, lecz generuje zależności w czasie rzeczywistym, dostosowując się do treści otrzymywanych sygnałów i aktualnego stanu bazy danych. NLP działa jako semantyczny most, który przekształca wymogi użytkownika na formaty liczbowo-przestrzenne, umożliwiając w pełni zautomatyzowane modelowanie zgodności projektów OZE z obowiązującymi normami prawnymi i technicznymi.

Rysunek 50 przedstawia proces realizacji analizy, w którym kolejne etapy od identyfikacji wymagań przez pobranie danych oraz obliczenia geometrii aż do porównania z listą sygnałów są dynamicznie wspierane przez moduł NLP, pełniący rolę semantycznego mostu pomiędzy deklaracjami użytkownika a obliczeniami numeryczno-przestrzennymi.

Ukazany na rysunku proces realizacji znajduje bezpośrednie odzwierciedlenie w zastosowaniach praktycznych. Przykładem może być weryfikacja wymogu minimalnej odległości turbiny wiatrowej od zabudowy. W takim przypadku system analizuje dane GIS zawierające mapę działek i położenie budynków, a następnie automatycznie ocenia zgodność z kryteriami. Dla działki nr 245/3 warunek został spełniony, gdyż odległość wynosi 750 m, a działka nr 246/1 nie spełnia wymogu, gdyż odległość to jedynie 650 m. Tego rodzaju mechanizm umożliwia automatyczną selekcję działek zgodnych z kryteriami inwestycyjnymi OZE.

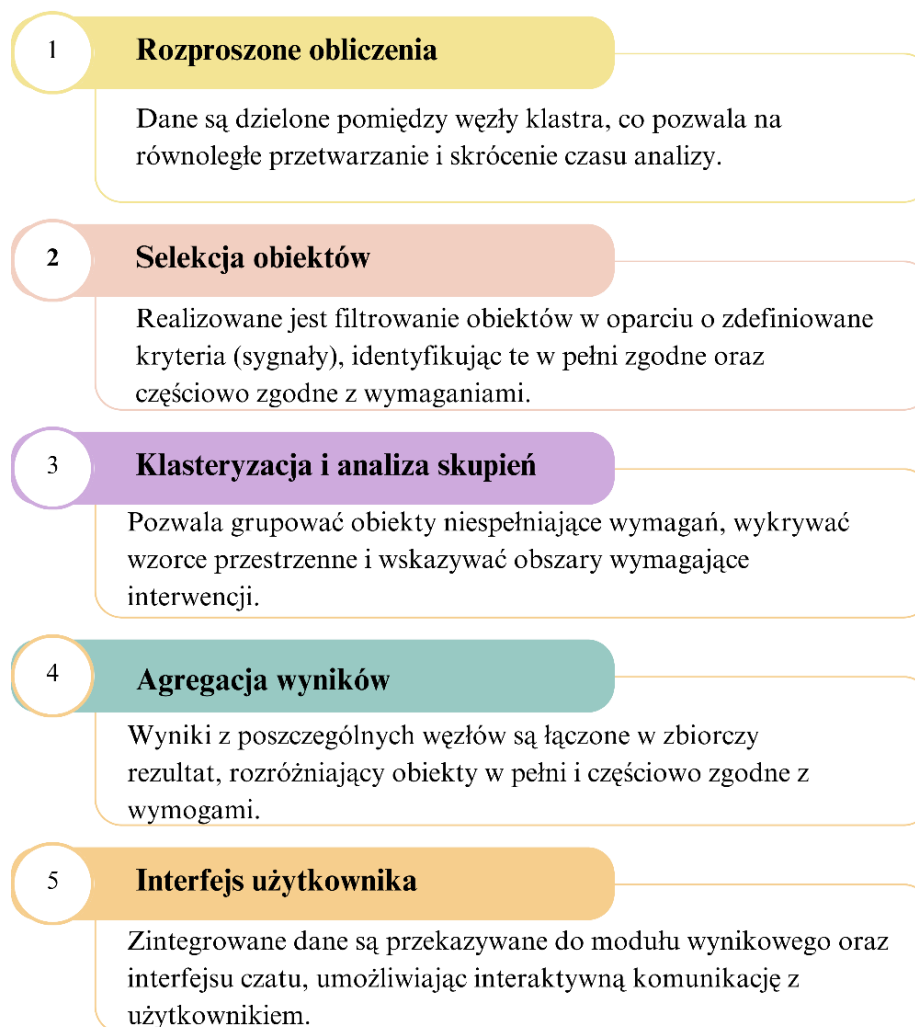


Rysunek 50. Proces realizacji analizy zasobów.
Źródło: opracowanie własne.

12.4.2. Przetwarzanie danych i zastosowanie technologii Spark-Sedona w klastrach obliczeniowych i przetwarzaniu równoległym danych przestrzennych

Proces ETL (Extract, Transform, Load) stanowi kluczowy etap przygotowania danych dla zaawansowanych analiz przestrzennych w środowisku obliczeń rozproszonych. Polega on na przekształceniu surowych danych z heterogenicznych źródeł, takich jak pliki binarne, warstwy GIS i bazy przestrzenne PGIS, w ujednoliconą strukturę gotową do dalszej obróbki. Etap ekstrakcji obejmuje pozyskanie zarówno danych geometrycznych (np. powierzchnia działki, odległość od zbiorników wodnych), jak też atrybutów numerycznych (np. prędkość wiatru). Kolejny etap, transformacji, koncentruje się na normalizacji danych poprzez konwersję układów współrzędnych, czyszczenie, ujednolicanie jednostek miary oraz tworzenie pochodnych wskaźników przestrzennych i geometrycznych. Ostateczny etap, ładowania, polega na umieszczeniu przetworzonych danych w rozproszonym klastrze obliczeniowym Spark, z wykorzystaniem biblioteki Apache Sedona do wykonywania zadań geoinformatycznych.

Apache Sedona, jako rozszerzenie Apache Spark, umożliwia realizację obliczeń przestrzennych w architekturze rozproszonej. W kontekście analizy zgodności obiektów z wymaganiami prawnymi i środowiskowymi, Sedona funkcjonuje na kilku poziomach przedstawionych na schemacie (rysunek 51):



Rysunek 51. Poziomy funkcjonowanie Apache Sedona.
Źródło: opracowanie własne.

W efekcie, ETL i Apache Sedona wspólnie tworzą motor napędowy hybrydowego agenta GIS, zdolnego do automatycznej weryfikacji zgodności projektów OZE z wymogami prawnymi i środowiskowymi na podstawie analizy dużych zbiorów danych w czasie zbliżonym do rzeczywistego. Architektura rozproszona zapewnia skalowalność systemu, umożliwiając efektywne przetwarzanie złożonych problemów analitycznych. Ponieważ dane przestrzenne i prawne są obszerne, konieczne jest wykorzystanie rozwiązań klasy Big Data do ich przetwarzania.

Podział procesu obliczeniowego na kolejne etapy pozwala nie tylko uporządkować przepływ danych, lecz także jasno zdefiniować cele i narzędzia wykorzystywane na każdym z nich. Struktura listy sygnałów, która stanowi podstawę weryfikacji oraz klasyfikacji działek, została zestawiona w tabeli 22.

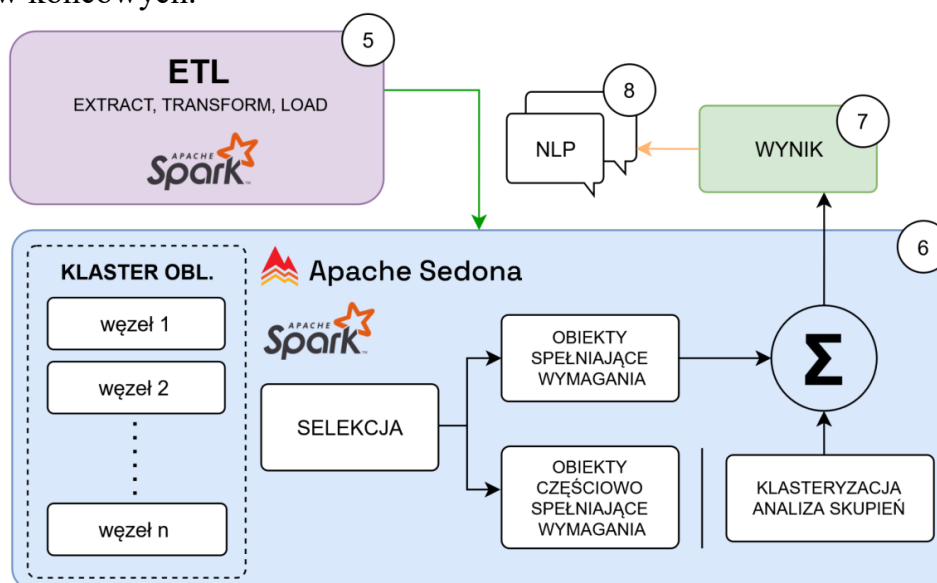
Tabela 22

Struktura listy sygnałów wraz z charakterystyką

Etap	Cel	Opis	Narzędzia
ETL (Extract–Transform–Load)	Zebrańie i ujednolicenie danych z wielu źródeł	Pobranie danych z ISAP, BIP, GIS i innych źródeł, ich standaryzacja i załadowanie do hurtowni danych	Hurtownia danych, proces standaryzacji
Analiza sygnałów	Ocena zgodności parametrów z wymaganiami prawno-technicznymi	Porównanie parametrów działek z listą wymagań	Automatyczna walidacja kryteriów
Selekcja działek	Klasyfikacja zasobów	Podział działek na: spełniające, częściowo spełniające, niespełniające	Podział według zgodności z wymaganiami
Klasteryzacja	Wykrycie grup o podobnych właściwościach	Grupowanie działek według stopnia zgodności z wymaganiami (np. klastry o zbliżonych parametrach)	Sedona, Apache Spark
Agregacja wyników	Synteza wiedzy i prezentacja wyników	Tworzenie raportów zbiorczych i rankingów lokalizacji	Raporty, rankingi, zestawienia

Źródło: opracowanie własne.

Przedstawione zestawienie porządkuje kolejne etapy procesu, definiując ich cele, opis i stosowane narzędzia. Aby lepiej zobrazować sposób ich powiązania w ramach architektury systemu, na rysunku 52 zaprezentowano schemat działania hybrydowego agenta GIS, w którym integracja ETL, Apache Spark i Apache Sedona umożliwia selekcję, klasteryzację oraz dalsze przekształcenia danych, prowadzące do uzyskania wyników końcowych.



Rysunek 52. Architektura hybrydowego agenta GIS.

Źródło: opracowanie własne.

Schemat ilustruje przepływ danych od etapu ekstrakcji i standaryzacji przez selekcję i klasteryzację obiektów aż po integrację z modulem NLP, który umożliwia wygenerowanie wyników w formie zgodnej z wymaganiami użytkownika.

12.4.3. Klasteryzacja danych przestrzennych

W kontekście przetwarzania danych geoinformatycznych klasteryzacja jest techniką analizy przestrzennej, polegającą na grupowaniu obiektów w skupienia na podstawie cech geometrycznych i atrybutowych. Zastosowanie Apache Spark z biblioteką Sedona umożliwia skalowanie obliczeń do bardzo dużych zbiorów poprzez podział danych na partycje przetwarzane równolegle w węzłach klastra. Sedona rozszerza funkcje Sparka o operacje GIS, co pozwala wykonywać obliczenia geometryczne i analizować relacje przestrzenne. Istotną rolę odgrywają indeksy przestrzenne, takie jak QuadTree oraz R-Tree, które optymalizują dostęp do danych według bliskości geograficznej, przyspieszając analizy i ograniczając obciążenie sieciowe.

W ramach opracowanego podejścia rozważano zastosowanie szeregu algorytmów klasteryzacji, w tym KMeans, DBSCAN, metod aglomeracyjnych, a także strategii przeszukiwania w głąb (Depth-First Search, DFS). Dwa z tych podejść zostały dodatkowo zoptymalizowane w kolejnym etapie procesu grupowania. Optymalizacja ta koncentrowała się na identyfikacji i selekcji elementów w obrębie poszczególnych klastrów, z uwzględnieniem wyłącznie sąsiednich działek, których połączenie potencjalnie minimalizuje ograniczenia przestrzenne zdefiniowane przez użytkownika lub wynikające z regulacji prawnych.

Uzyskane wyniki poddano następnie analizie z wykorzystaniem algorytmu MRR (Minimum Reachability Ratio). Jego głównym celem jest eliminacja tzw. „wąskich gardeł”.

W kontekście selekcji działek inwestycyjnych wąskie gardła oznaczają sytuacje, w których ograniczenia przestrzenne mogą znacząco zmniejszyć powierzchnię klastra, prowadząc równocześnie do jego wydłużenia i obniżenia użyteczności.

W celu przejrzystego przedstawienia działania algorytmu w tabeli 23 ukazano funkcje pomocnicze wraz z ich znaczeniem.

Tabela 23

Funkcje pomocnicze wykorzystywane w procedurze klasteryzacji wraz z ich opisem i znaczeniem

Pomocnicze funkcje	Opis
ESTYMUJ_LICZBE_KLASTROW(n)	w praktyce stosuje się zazwyczaj prostą haurystykę Elbow/Silhouette/BIC - RETURN MAX (1, ROUND(SQRT(n)))
KMEANS_PRZYPISANIA (CENTROIDS [0..n-1], K)	funkcja K-Means nad punktami (cx, cy), zwraca wektor przypisań
SRODEK_CIEZKOSCI (geom)	funkcja wyznacza centroid (cx, cy) poligonu
STYKAJA_SIE (geomA, geomB)	zwraca true, jeśli poligony mają dodatni kontakt krawędź-krawędź, wierzchołek-krawędź lub niewielką wspólną granicę
WYMIARY_MRR (geom)	zwraca (szerokość, wysokość) minimalnego obróconego prostokąta otaczającego lub można użyć alg. Rotating Calipers na otoczce wypukłej
SCORE (geom)	Funkcja jakości używana do wyboru "lepszyc" połączeń, gdy wiele opcji jest dopuszczalnych. Przykład: maksymalizacja powierzchni przy karze za odległość do infrastruktury np.: SCORE = POWIERZCHNIA (geom) - λ * ODL_DO_INFRA (geom)

Źródło: opracowanie własne.

Procedura klasteryzacji została zaprojektowana jako sekwencja czterech głównych kroków. Pierwszym z nich jest inicjalizacja, obejmująca przygotowanie danych wejściowych, jak również wstępne utworzenie struktur pomocniczych (algorytm 7).

Algorytm 7. Pseudokod prezentujący pierwszy etap procedury klasteryzacji: inicjalizację danych wejściowych.

```
PROCEDURE KLASTROWANIE_DZIALEK(G, MAX_W, MAX_H):  
  Wejście:  
  G - tablica poligonów  
  MAX_W, MAX_H - maks. dopuszczalne wymiary MRR (szer., wys.)  
  Wyjście:  
  CLUSTER_ID - identyfikator klastra dla każdej działki  
  K - liczba klastrów  
  1) Inicjalizacja  
  n ← SIZE(G)  
  K ← ESTYMUJ_LICZBE_KLASTROW(n) # np. heurystyka  $\sqrt{n}$  lub Silhouette/Elbow  
  C ← [] # środki ciężkości działek  
  FOR i IN 0..n-1:  
    (cx, cy) ← SRODEK_CIEZKOSCI(G[i]) # centroid poligonu  
    APPEND C, (cx, cy)  
  # K-Means (na centroidach), zwraca przypisania INITIAL[i] ∈ {0..K-1}  
  INITIAL ← KMEANS_PRZYPISANIA(C, K)  
  CLUSTER_ID ← ARRAY(n, value = -1) # -1: jeszcze nieprzetworzona  
  ODWIEDZONA ← ARRAY(n, value = FALSE)
```

Drugim krokiem jest budowa skierowanego grafu sąsiedztwa w obrębie klastrów, w którym konstruowane są relacje sąsiedztwa pomiędzy elementami z zachowaniem kierunkowości powiązań (algorytm 8).

Algorytm 8. Pseudokod prezentujący kolejne operacje inicjalizacji i konstruowania skierowanego grafu sąsiedztwa.

```
2) Budowa grafu sąsiedztwa ADJ z R-tree (per klaster)
# Wejście (z kroku 1):
# G[0..n-1] - poligony działek
# INITIAL[i] - ID klastra nadany przez K-Means
# C[i]=(cx,cy) - centroid działki i (opcjonalne, ale potrzebne do wariantu
kierunkowego)
# MU[c]=(mx,my) - centroid klastra c (opcjonalne; zwykle zwraca go K-
Means)
# Parametry numeryczne:
# EPS_BBOX - powiększenie bbox przy zapytaniu (np. 1e-8 jednostek układu)
# EPS_TOUCH - tolerancja topologiczna „styk/mały nakład” (np. 1e-8 *
średnia skala)
# EPS_EQ - tolerancja różnicy odległości w tie-breaku (np. 1e-9)
# Wyjście:
# ADJ[0..n-1] - lista zbiorów sąsiadów dla każdej działki (brak
duplikatów)
# =====

PROCEDURE BUDUJ_ADJ_RTREE(G, INITIAL, C = None, MU = None, DIRECTED =
FALSE):
  n ← SIZE(G)
  K ← 1 + MAX(INITIAL)
  ADJ ← [ SET() FOR _ IN 0..n-1 ]

  # 2.1. Zgrupuj indeksy działek per klaster
  INDEKSY_W_KLAsrze ← [ [] FOR _ IN 0..K-1 ]
  FOR i IN 0..n-1:
    c ← INITIAL[i]
    APPEND(INDEKSY_W_KLAsrze[c], i)

  # 2.2. Dla każdego klastra buduj lokalny R-tree na bboxach działek
  FOR c IN 0..K-1:
    RT ← RTREE_PUSTY()

    # 2.2.1. Wstaw do R-tree wszystkie działki klastra c
    FOR i IN INDEKSY_W_KLAsrze[c]:
      bbox_i ← BBOX(G[i]) # (xmin, ymin, xmax, ymax)
      bbox_i ← ROZSZERZ_BBOX(bbox_i, EPS_BBOX)
      RTREE_INSERT(RT, bbox_i, i)

    # 2.2.2. Dla każdej działki i wyszukaj kandydatów i zweryfikuj dokładnie
    FOR i IN INDEKSY_W_KLAsrze[c]:
      qbox ← ROZSZERZ_BBOX(BBOX(G[i]), EPS_BBOX)
      KANDYDACI ← RTREE_QUERY(RT, qbox) # indeksy potencjalnych sąsiadów
    FOR j IN KANDYDACI:
      IF j = i: CONTINUE # pomiń samą siebie
      # dokładna, odporna weryfikacja „sąsiedztwa”
      IF NOT STYKAJA_SIE_LUB_MALY_NAKLAD(G[i], G[j], EPS_TOUCH):
        CONTINUE
```

```
# --- Wariant domyślny: graf NIESKIEROWANY ---
IF NOT DIRECTED:
  ADJ[i].ADD(j)
  ADJ[j].ADD(i)
  CONTINUE

# Wariant SKIEROWANY (opcjonalnie)
# Reguła: krawędź biegnie do węzła bliższego środkowi klastra MU[c].
# Wymaga centroidów działek C[i] i środka klastra MU[c].
di ← NORM(C[i] - MU[c]) # odległość i → środek klastra
dj ← NORM(C[j] - MU[c])
IF di > dj + EPS_EQ:
  ADJ[i].ADD(j) # i → j (z zewnątrz do środka)
ELSE IF dj > di + EPS_EQ:
  ADJ[j].ADD(i) # j → i
ELSE:
  # remis: deterministyczny tie-break, by uniknąć losowości
  IF i < j: ADJ[i].ADD(j) ELSE: ADJ[j].ADD(i)

RETURN ADJ
```

Trzeci krok to rozwój klastrów z uwzględnieniem ograniczeń MRR przy użyciu algorytmu przeszukiwania w głąb (DFS). Każdy spójny po uwzględnieniu kierunku składnik w macierzy sąsiedztwa ADJ, wyodrębniony w obszarze INITIAL, stanowi finalny klaster, przy czym proces jego rozbudowy jest ograniczany przez wymiary minimalnych prostokątów otaczających (MRR) dla połączonych geometrii.

Ostatnim krokiem jest zakończenie, obejmujące finalizację procesu wraz z zapisem uzyskanych klastrów i ewentualnymi działaniami porządkującymi.

W dalszej kolejności w algorytmie 9 zaprezentowano dwa ostatnie kroki klastryzacji.

Algorytm 9. Pseudokod przedstawiający rozwój klastrów z ograniczeniami MRR oraz etap zakończenia procedury klasteryzacji

```
3) Rozwój klastrów z uwzględnieniem ograniczeń MRR (DFS). Każdy spójny (po skierowaniu) składnik w ADJ w obrębie INITIAL tworzy finalny klaster, ale rozbudowa jest ograniczana wymiarami MRR złączonych geometrii.
AKTUALNE_ID ← 0
FOR i IN 0..n-1:
  IF ODWIEDZONA[i]: CONTINUE
  NODES ← PUSTA_LISTA()
  GEOM_ZLACZONA ← G[i] # geometria kandydata klastra
  ODWIEDZONA[i] ← TRUE
  PUSH(NODES, i)
  # Stos do własnej kontroli wstecz (DFS z oceną dopuszczalności)
  STACK ← PUSTA_STOS()
  PUSH(STACK, i)
  # (Opcjonalnie) kolejka kandydatów posortowanych wg funkcji jakości
  # ale zachowujemy DFS; do wyboru "lepszyc" gałęzi użyjemy SCORE()
  WHILE NOT PUSTY(STACK):
    # Przejrzyj skierowanych sąsiadów
    SASIEDZI ← ADJ[v]
    # Posortuj sąsiadów według potencjalnej poprawy według kryterium (np.
    # większa powierzchnia, mniejsza odległość)
    POSORTOWANI ← SORT(SASIEDZI, key = -SCORE(GEOM_ZLACZONA U G[w]))
    FOR w IN POSORTOWANI:
      IF ODWIEDZONA[w]: CONTINUE
      KANDYDAT_GEOM ← GEOM_ZLACZONA U G[w]
      (mrr_w, mrr_h) ← WYMIARY_MRR(KANDYDAT_GEOM) # minimalny prostokąt
      obrocony
      IF mrr_w ≤ MAX_W AND mrr_h ≤ MAX_H:
        # Akceptujemy rozszerzenie klastra tą działką
        ODWIEDZONA[w] ← TRUE
        PUSH(NODES, w)
        GEOM_ZLACZONA ← KANDYDAT_GEOM
        PUSH(STACK, w)
      ELSE:
        # Odrzucamy tę gałąź (przerwij rozwijanie przez w)
        CONTINUE
    # Po zakończeniu DFS przypisz finalne ID dla wszystkich węzłów w
    # komponencie
    FOR u IN NODES:
      CLUSTER_ID[u] ← AKTUALNE_ID
      AKTUALNE_ID ← AKTUALNE_ID + 1

4) Zakończenie
RETURN (CLUSTER_ID, AKTUALNE_ID)
```

12.4.4. Miary spójności przestrzennej klastrów

Przestrzenna klasyfikacja działek gruntowych przy użyciu algorytmów takich jak k-średnich, metody aglomeracyjne czy DBSCAN polega na grupowaniu obiektów na podstawie ich cech geometrycznych lub odległościowych. Należy jednak zaznaczyć, że te metody niekoniecznie generują klastry odpowiadające spójnym jednostkom zabudowy w przestrzeni. K-średnie, koncentrując się na minimalizacji odległości euklidesowej do centroidów, może prowadzić do łączenia działek oddzielonych fizycznymi barierami. Metody aglomeracyjne, łącząc działki o wystarczającym ogólnym podobieństwie, mogą tworzyć klastry obejmujące obszary nieprzylegające. Algorytm DBSCAN, wykorzystujący gęstość punktów, jest bardziej odporny na takie sytuacje, jednak wymaga starannego doboru parametrów sąsiedztwa oraz minimalnej liczby

obiektów, by zapewnić generowanie klastrow odzwierciedlających rzeczywiste skupiska działek. Dlatego konieczne jest zastosowanie dodatkowych miar spójności przestrzennej, umożliwiających ocenę jakości uzyskanych klastrow i potwierdzenie ich odzwierciedlenia zwartych obszarów zabudowy. W literaturze przedmiotu proponuje się wykorzystanie zestawu wskaźników opartych na analizie topologicznej, geometrycznej i fragmentacyjnej, które wspólnie pozwalają ocenić stopień spójności przestrzennej danego klastra.

Podstawową miarą spójności przestrzennej jest liczba komponentów spójnych oznaczana symbolem K . Komponent spójny definiuje się jako podzbiór działek połączonych relacją sąsiedztwa topologicznego, rozumianego jako wspólna krawędź lub wierzchołek. W idealnym przypadku każdy klastr powinien tworzyć jedną składową, co zapisuje się jako $K = 1$. Jeżeli liczba składowych jest większa, klastr ma charakter fragmentaryczny i nie spełnia kryterium ciągłości przestrzennej.

Kolejną grupę miar stanowią wskaźniki zwartości geometrycznej. Najczęściej stosowany jest klasyczny wskaźnik zwartości, wyrażany wzorem:

$$C = \frac{4\pi A}{P^2}$$

gdzie:

A – pole powierzchni klastra,

P – obwód klastra.

Wskaźnik ten przyjmuje wartości z przedziału od 0 do 1. Wyniki zbliżone do jedności świadczą o regularnym i zwartym kształcie, a niskie wartości wskazują na kształt wydłużony lub silnie nieregularny.

Uzupełnieniem są miary oparte na minimalnym prostokącie obejmującym MBR (ang. Minimum Bounding Rectangle) i minimalnym prostokącie obróconym MRR (ang. Minimum Rotated Rectangle). Ich konstrukcja polega na obliczeniu stosunku pola klastra do pola prostokąta, co zapisuje się odpowiednio jako:

$$MBR = \frac{A_{cluster}}{A_{MBR}}$$

$$MRR = \frac{A_{cluster}}{A_{MRR}}$$

Przyjmuje się, że wyższe wartości wskaźników oznaczają większą zwartość klastra i lepsze dopasowanie do wyznaczonego prostokąta. Wskaźnik MRR jest zawsze większy lub równy wskaźnikowi MBR, gdyż prostokąt obrócony umożliwia dokładniejsze dostosowanie orientacji do kształtu analizowanego obszaru.

Istotną rolę w ocenie jakości klastrow odgrywają także miary fragmentacji. Jedną z nich jest wskaźnik perforacji, który określa udział powierzchni pustych, czyli obszarów nieobjętych działkami, znajdujących się wewnątrz granic klastra. W praktyce oblicza się go jako stosunek powierzchni pustych do powierzchni całkowitej.

Kolejną miarą jest udział największej składowej w całkowitej liczbie działek w klastrze, oznaczany wzorem:

$$U = \frac{\max_i |C_i|}{N}$$

gdzie:

$|C_i|$ – liczność i-tej składowej,

N – liczba działek w całym klastrze.

Wysokie wartości wskaźnika U świadczą o dominacji jednej zwartej grupy działek, nawet jeśli w obrębie klastra występują mniejsze, odseparowane fragmenty.

Uzupełniającym narzędziem oceny spójności przestrzennej są miary rozciągłości oraz orientacji. Na podstawie minimalnego prostokąta obróconego można wyznaczyć wskaźnik wydłużenia, definiowany jako stosunek długości dłuższego boku do długości krótszego. Im wyższa jest jego wartość, tym bardziej wydłużony i mniej regularny jest kształt klastra. Inną miarą jest promień efektywny, który określa średnią odległość działek od geometrycznego środka ciężkości klastra, a także umożliwia ocenę stopnia rozproszenia jednostek względem centrum.

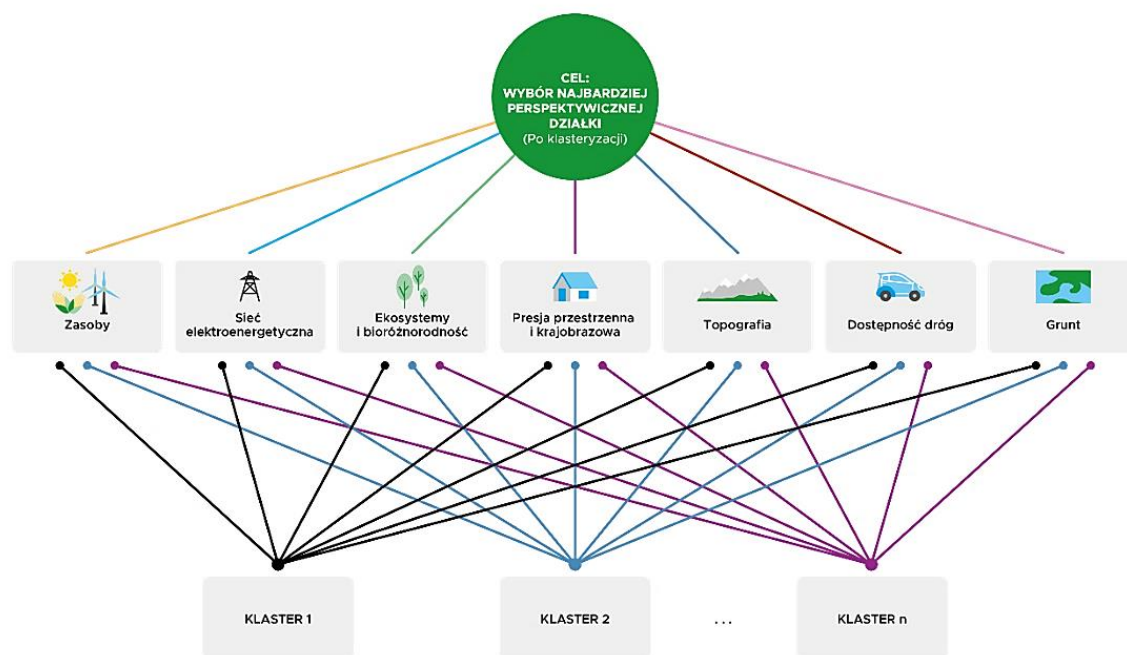
Ocena jakości klastrow w procesie grupowania działek powinna przebiegać wieloetapowo. W pierwszej kolejności należy wyeliminować te klastry, które nie tworzą spójnych komponentów topologicznych. Następnie należy ocenić ich zwartość i kształt przy wykorzystaniu wskaźników MBR i MRR oraz przeanalizować stopień fragmentacji. Ostateczna decyzja powinna być podejmowana na podstawie łącznej analizy wielu wskaźników, gdyż żaden pojedynczy miernik nie jest w stanie w pełni odzwierciedlić złożonego charakteru struktury przestrzennej klastra. Zastosowanie takiego podejścia pozwala na wyodrębnienie klastrow, które w największym stopniu odpowiadają zwartym i funkcjonalnie spójnym obszarom zabudowy.

12.4.5. Wielokryterialna metoda hierarchicznej analizy klastrow

Metoda Analytic Hierarchy Process w opracowanym systemie wykorzystana została na etapie wyboru działek wytypowanych w procesie klasteryzacji jako moduł ważenia kryteriów w systemie wspomagania decyzji. Moduł ten uruchamiany jest po zakończeniu procesu klasteryzacji obszarów i służy do nadania wag czynnikom wpływającym na atrakcyjność działek w ramach alternatywnych lokalizacji. Wynik działania modułu wykorzystywany jest następnie do budowy rankingów działek.

Analiza uwzględnia czynniki mierzalne, możliwe do zweryfikowania na podstawie dostępnych danych pozyskanych w toku wcześniejszych etapów analizy. Takie podejście zapewnia obiektywność oraz powtarzalność oceny. W modelu nie uwzględnia się czynników o charakterze koniecznym, takich jak spełnienie warunków formalnoprawnych, gdyż traktowane są one jako wymóg podstawowy stanowiący punkt wyjścia do dalszej selekcji.

W metodzie AHP buduje się hierarchiczny diagram problemu decyzyjnego, w którym cel główny dekomponowany jest na zestaw kryteriów oraz ewentualnych podkryteriów (Gaska i in., 2021). Schemat hierarchicznej struktury procesu decyzyjnego w analizowanym przypadku przedstawiono na rysunku 53.



Rysunek 53. Hierarchiczna struktura procesu decyzyjnego wyboru najbardziej optymalnych klastrow.
Źródło: opracowanie własne.

W opracowanym modelu zastosowano kryteria oceny lokalizacji ukazane w tabeli 24.

Tabela 24

Kryteria lokalizacyjne dla inwestycji w odnawialne źródła energii

Kod	Kryterium	Opis
K1	Zasoby energetyczne	Potencjał wykorzystania odnawialnych źródeł energii, takich jak wiatr, energia słoneczna czy biomasa.
K2	Topografia terenu	Ukształtowanie powierzchni wpływające na możliwość instalacji i efektywność inwestycji.
K3	Sieć elektroenergetyczna	Dostępność i bliskość infrastruktury przesyłowej umożliwiającej przyłączenie do systemu.
K4	Dostępność dróg	Możliwość transportu elementów inwestycji, w szczególności wielkogabarytowych.
K5	Grunt	Właściwości podłoża i warunki geotechniczne warunkujące stabilność i koszty budowy.
K6	Oddziaływanie na ekosystemy i bioróżnorodność	Ryzyko negatywnego wpływu na siedliska, gatunki chronione i procesy ekologiczne.
K7	Presja przestrzenna i krajobrazowa	Potencjalne konflikty z walorami krajobrazowymi, obszarami chronionymi i ciągłością korytarzy ekologicznych.

Źródło: opracowanie własne.

W ramach realizacji metody AHP przeprowadzono kolejne etapy postępowania. Pierwszym z nich było utworzenie macierzy porównań parami – A. Dla każdego czynnika wykonuje się porównania parami w odniesieniu do celu głównego.

Decydent (ekspert) określa, który czynnik ma większe znaczenie i w jakim stopniu (zgodnie ze skalą Saaty’ego przyznaje punkty od 1 do 9). Dzięki temu powstaje macierz porównań dla wszystkich kryteriów.

Wagi w tabeli porównań zostały określone na podstawie opinii ekspertów z zakresu projektowania, budownictwa, GIS i inżynierii środowiska. Eksperti cechujący się silnymi kompetencjami z zakresu wiedzy merytorycznej stanowili połowę tej grupy. Druga połowa ekspertów to lokalni aktywiści, samorządowcy oraz przedstawiciele władz gminnych i lokalnych struktur decyzyjnych. Sumaryczna liczba ekspertów wyniosła 20. A. Generowicz i in. (2018) wskazują, że taka liczba ekspertów jest wystarczającą, aby w miarodajny sposób wyznaczyć wagi poszczególnych kryteriów optymalizacyjnych. Proces nadawania wag polegał na:

1. zebraniu stanowisk specjalistów posiadających doświadczenie praktyczne w realizacji podobnych projektów;
2. uwzględnieniu wiedzy eksperckiej dotyczącej znaczenia poszczególnych kryteriów dla jakości i efektywności końcowego rozwiązania;
3. przypisanie wag w drodze konsensusu, tak aby możliwie najtrafniej odzwierciedlały rzeczywisty wpływ poszczególnych kryteriów na całe przedsięwzięcie.

Dla n kryterium $A = [a_{ij}]$ kryteriów tworzy się macierz porównań, w której każdy element a_{ij} oznacza względne znaczenie kryterium i względem j .

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$$

Dla wyznaczonych wag macierz przedstawiono w tabeli 25.

Tabela 25

Macierz kryteriów wyboru lokalizacji

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
K1	1	3	4	5	6	6	7
K2	$\frac{1}{3}$	1	2	3	5	5	6
K3	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	1	2	4	4	5
K4	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	3	3	4
K5	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	1	2	3
K6	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	2
K7	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1

Źródło: opracowanie własne.

W dalszym kroku procedury AHP przeprowadza się normalizację kolumn macierzy. Każdą kolumnę macierzy dzieli się przez sumę elementów tej kolumny:

$$\tilde{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}}$$

Na podstawie macierzy porównań wyznacza się wartości własne i wektory priorytetów, które reprezentują względne znaczenie poszczególnych kryteriów. W rezultacie otrzymujemy zestaw wag sumujących się do 1, które odzwierciedlają hierarchię ważności czynników lokalizacyjnych.

Wektor wag otrzymuje się jako $w = w_1, w_2, \dots, w_n$ średnią arytmetyczną wartości w każdym wierszu znormalizowanej macierzy:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij}}{n}$$

AHP umożliwia obliczenie wskaźnika spójności (Consistency Ratio – CR), który pozwala ocenić, czy dokonane porównania są logiczne i wewnętrznie spójne. Wartość CR poniżej 0,1 oznacza, że oceny są akceptowalne.

Aby ocenić jakość macierzy porównań, obliczono wartość własną λ_{max} macierzy i wartości pośrednie. Wartość własna największa przedstawia się wzorem:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{w_i}.$$

Następnie obliczono wskaźnik niespójności CI :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1},$$

oraz wskaźnik spójności CR :

$$CR = \frac{CI}{RI},$$

gdzie:

RI to losowy wskaźnik spójności (Random Index), którego wartości zależą od liczby kryteriów (w analizowanym przykładzie dla $n=7$, $RI=1,32$).

Na podstawie przeprowadzonych iteracji zgodnie z metodyką AHP zostały ustalone wagi odpowiadające ważności poszczególnych kryteriów lokalizacyjnych:

- Zasoby energetyczne: 0.402.
- Sieć elektroenergetyczna: 0.220.
- Dostępność dróg: 0.150.
- Topografia: 0.101.
- Grunt: 0.056.
- Ekosystemy i bioróżnorodność: 0.042.
- Presja przestrzenna i krajobrazowa: 0.030.

Największą wagę uzyskały zasoby energetyczne, co wskazuje na ich dominującą rolę w ocenie lokalizacji. W dalszej kolejności plasują się: dostęp do sieci elektroenergetycznej i dostępność dróg. Trzy wymienione kryteria tworzą łącznie 0,772 całkowitej wagi, co potwierdza, że determinanty energetyczne, przyłączeniowe i transportowe są kluczowe na etapie wyboru działek. Topografia i grunt mają znaczenie uzupełniające. Najniższe wagi dotyczą kryteriów środowiskowych, co nie oznacza ich pominięcia, lecz odzwierciedla przyjęte założenie, że wymagania formalnoprawne są spełnione na wcześniejszym etapie.

Jakość ocen potwierdzono miarami spójności: największa wartość własna $\lambda_{\max} = 7.370$, wskaźnik niespójności $CI = 0.062$ i wskaźnik spójności $CR = 0.047$ przy losowym wskaźniku odniesienia $RI = 1,32$ dla siedmiu kryteriów. Ponieważ $CR < 0,10$, oceny uznaje się za spójne i akceptowalne.

W przedstawionej architekturze AHP stanowi konkretny moduł systemu odpowiedzialny za wyznaczenie wag kryteriów lokalizacyjnych dla działek wskazanych po klasteryzacji. Zastosowanie porównań parami umożliwia przejrzyste i kontrolowalne przełożenie preferencji decydentów na wartości liczbowe, a test spójności (CR) pozwala na ich weryfikację. W efekcie system otrzymuje stabilny wektor wag, który można bezpośrednio wykorzystać do budowy rankingów bądź też do scenariuszowych analiz wrażliwości.

12.4.6. Prezentacja wyników analizy

Wyniki analizy muszą być przedstawione w przejrzysty i intuicyjny sposób dla końcowego użytkownika. Dlatego system udostępnia:

- Interaktywne mapy – działki oznaczone kolorami (zielone – spełniające wszystkie kryteria, żółte – częściowo spełniające, czerwone – niespełniające).
- Tabele wymagań – zestawienie poszczególnych kryteriów wraz z informacją o ich realizacji.
- Eksport w formatach JSON i PDF – umożliwiający dalsze wykorzystanie danych w innych aplikacjach (np. narzędzia planistyczne, raporty środowiskowe).

Przykładowa odpowiedź udostępniona przez interfejs czatowy może brzmieć:

„Działka nr 240/3 w gminie X spełnia wszystkie wymagania dla hybrydowej instalacji OZE o mocy 2 MW. Działka nr 240/1 nie spełnia wymogu odległości od linii energetycznej < 30 m.”

Do odpowiedzi dołączona jest zarówno mapa, jak i tabela kryteriów, co daje użytkownikowi pełne wizualne uzasadnienie podjętej decyzji.

12.4.7. Znaczenie etapu dla praktyki inwestycyjnej

W trzecim etapie procesu dynamicznego generowania warunków brzegowych abstrakcyjne normy i regulacje prawnodostępne są formalnie zinterpretowane oraz kodowane jako konkretne zmienne operacyjne. Dzięki temu uzyskuje się zestaw danych, które można bezpośrednio wykorzystać w mechanizmach planowania, analizy oraz podejmowania decyzji.

W tabeli 26 ukazano konkretne korzyści dla inwestorów OZE, wynikające z automatycznej analizy zgodności działek z wymogami prawnymi i środowiskowymi. Dzięki temu proces oceny potencjału inwestycyjnego staje się szybszy, bardziej transparentny, a także pozwala na redukcję kosztów oraz czasu potrzebnego na przeprowadzenie pełnej analizy wstępnej.

Tabela 26

Korzyści zastosowania automatycznej analizy prawnej i środowiskowej dla inwestorów oraz administracji publicznej

Korzyść dla inwestorów	Opis
Szybka ocena potencjału	Automatyczne przypisywanie wartości prawnych do obszarów umożliwia natychmiastową analizę zgodności działki z wymogami prawnymi.
Redukcja kosztów i czasu	Eliminacja ręcznych przeglądów dokumentów oraz przyspieszenie procesów analizy i weryfikacji w obszarze prawnym i ochrony środowiska.
Transparentność procesu	Każde kryterium decyzyjne jest powiązane z konkretnym aktem prawnym, co pozwala na łatwe śledzenie podstawy prawnej oceny.
Usprawniona komunikacja	Jednoznaczne raporty i interfejsy API ułatwiają wymianę informacji pomiędzy inwestorem a organami administracji publicznej.

Źródło: opracowanie własne.

System przynosi administracji i samorządom wymierne korzyści, ponieważ automatycznie generuje raporty zgodności z przepisami ochrony środowiska, co skraca czas wydawania decyzji. Umożliwia natychmiastową weryfikację wniosków inwestorów na podstawie zdefiniowanych reguł prawnych, ograniczając ryzyko błędów, a także integruje wymogi transformacji energetycznej z aktualnymi regulacjami, usprawniając planowanie przestrzenne i zapewniając bardziej efektywne oraz spójne zarządzanie obszarem.

12.5. Potencjał rozwoju i ryzyka wdrożenia systemu

Opracowany model dynamicznego generowania warunków brzegowych dla obiektów odnawialnych źródeł energii stanowi innowacyjne połączenie metod informatycznych i prawniczych. Jego unikalność polega na synergicznym zastosowaniu trzech kluczowych elementów: automatyzacji analizy prawa przy użyciu NLP, dynamicznego pozyskiwania wiedzy (RAG) i jej utrwalania (LoRA), a także integracji wymagań prawnych z danymi geoprzestrzennymi.

W celu całościowej oceny opracowanego systemu przeprowadzono analizę SWOT, obejmującą identyfikację jego mocnych i słabych stron, a także szans i zagrożeń wynikających z otoczenia zewnętrznego (rysunek 54).



Rysunek 54. Analiza SWOT opracowanego systemu.
Źródło: opracowanie własne.

Zastosowanie automatycznej analizy zgodności działań z wymogami prawnymi i środowiskowymi niesie za sobą szereg korzyści, takich jak przyspieszenie procesu oceny inwestycyjnej, większą transparentność oraz redukcję kosztów. Jednocześnie wdrożenie tego typu technologii wiąże się z wyzwaniami, takimi jak: zależność od jakości danych czy konieczność uwzględnienia dynamicznych zmian w przepisach.

W perspektywie średnio- i długoterminowej zaproponowany model dynamicznego generowania warunków brzegowych wykazuje potencjał integracji z inteligentną infrastrukturą regulacyjną sektora OZE. Jego zdolność do bieżącej analizy i interpretacji przepisów prawnych oraz ich przestrzennego kontekstu może znacząco usprawnić procesy inwestycyjne i administracyjne.

Podsumowując, opracowany system stanowi innowacyjne rozwiązanie wspierające rozwój odnawialnych źródeł energii. Wykorzystanie automatyzacji analizy prawnej, przetwarzania języka naturalnego, uczenia maszynowego oraz danych przestrzennych umożliwia ciągłe monitorowanie zmian legislacyjnych i ich praktyczne zastosowanie.

Wdrożenie tego rozwiązania odpowiada na kluczowe wyzwania transformacji energetycznej: przyspiesza procesy inwestycyjne, obniża koszty analiz prawno-środowiskowych i zwiększa transparentność decyzji administracyjnych. Choć związane z nim są wyzwania techniczne i instytucjonalne, jego potencjał wskazuje na możliwość stworzenia fundamentu dla nowoczesnych narzędzi wspierających rozwój energetyki odnawialnej nie tylko w Polsce, ale również w Unii Europejskiej.

13. WALIDACJA SYSTEMU NA WYBRANYM PRZYKŁADZIE

13.1. Cel wdrożenia

Implementacja systemu stanowi integralną część szerszego projektu pilotażowego realizowanego w jednej z gmin południowej Polski. Celem pilotażu jest identyfikacja obszarów, w których opracowany algorytm może skutecznie wspierać działalność administracji lokalnej.

W rozdziale przedstawiono wdrożenie tego algorytmu, które jest zgodne ze wszystkimi założeniami opisanymi w rozdziale 12. System obniża barierę wejścia dla użytkowników w porównaniu z tradycyjnymi narzędziami oraz przyczynia się do redukcji kosztów utrzymania, w tym kosztów związanych z aktualizacją baz danych i map zasobów.

13.2. Źródła danych

W badaniach wykorzystano: dane z lokalnego systemu informacji przestrzennej, zasoby geoprzestrzenne dostępne na poziomie powiatu i województwa oraz informacje z ośrodków dokumentacji geodezyjnej i kartograficznej. Dodatkowo wykonano digitalizację wybranych fragmentów map zagospodarowania przestrzennego, aby dostosować je do obowiązujących wymagań prawa miejscowego.

Obszarem badań były miasto Nowy Sącz i gmina Stary Sącz. Baza wiedzy została poszerzona o wytyczne wynikające z obowiązujących przepisów prawa miejscowego. O wyborze gminy do realizacji projektu zdecydowała dostępność odpowiedniej infrastruktury komputerowej oraz dotychczasowe doświadczenia samorządowców i urzędników w prowadzeniu przedsięwzięć związanych z odnawialnymi źródłami energii.

13.3. Odbiorcy i interesariusze

Aplikacja jest narzędziem przeznaczonym przede wszystkim dla pracowników administracji samorządowej, ale przydatnym także dla projektantów i inwestorów.

System wspiera administrację samorządową w obsłudze wniosków, weryfikacji zgodności inwestycji z przepisami i w ograniczaniu błędów proceduralnych. Projektanci i biura planistyczne zyskują wsparcie na etapie koncepcyjnym, możliwość szybkiej oceny lokalizacji oraz narzędzie do analizy zgodności projektów z wymaganiami technicznymi i prawnymi, co pozwala zmniejszyć ryzyko formalne. Inwestorzy uzyskują dostęp do aktualnych danych o działkach i mogą identyfikować obszary o wysokim potencjale inwestycyjnym. System wspiera też redukcję kosztów i czasu przygotowania przedsięwzięcia oraz zwiększa przewidywalność decyzji inwestycyjnych. Struktura potencjalnych odbiorców oraz interesariuszy została ukazana na rysunku 55, który przedstawia ich podział według ról oraz zakresu wykorzystania systemu.



Rysunek 55. Główne grupy odbiorców i interesariuszy systemu.

Źródło: opracowanie własne.

Podsumowując, aplikacja integruje zaawansowane rozwiązania sztucznej inteligencji z funkcjami GIS, oferując cenne narzędzie dla wszystkich zaangażowanych w procesy planowania przestrzennego i inwestycyjnego. Dzięki intuicyjnemu interfejsowi konwersacyjnemu i automatyzacji wielu zadań pozostaje ona łatwa w obsłudze nawet dla użytkowników, którzy nie posiadają specjalistycznej wiedzy z zakresu analizy danych geoprzestrzennych.

13.4. Wdrożenie w jednostce i środowisko testowe

Aby możliwe było przeprowadzenie procesu weryfikacji, konieczne było uruchomienie i odpowiednie skonfigurowanie systemu w środowisku testowym. W tym celu wykorzystano trzy jednostki obliczeniowe. Pierwsza z nich została wyposażona w dwa procesory, które łącznie oferują 64 rdzenie oraz 128 wątków, pracujących z częstotliwością od 2.1 do 4.1 GHz. Procesory dysponują 60 MB pamięci podręcznej L3, a ich współczynnik TDP wynosi około 225 W każdy. System wyposażono w 128 GB pamięci DDR5 RDIMM ECC 4800 MT/s. Warstwę danych tworzy osiem dysków SATA 6 Gb/s o pojemności 1.92 TB każdy, zamontowanych w systemie hot-plug. System operacyjny uruchamiany jest z karty rozruchowej, która obejmuje dwa nośniki M.2 NVMe 960 GB połączone w macierz RAID 1. Część akceleryjną stanowią dwa pasywnie chłodzone procesory graficzne klasy centrów danych, każdy o mocy ok. 300 W oraz pamięci 48 GB GDDR6 ECC. Druga jednostka wykorzystuje dwa procesory serwerowe architektury x86-64, z których każdy ma 16 rdzeni i 32 wątki, pracujące z częstotliwością od 2.0 do 4.0 GHz oraz 30 MB pamięci podręcznej L3. Współczynnik TDP wynosi ok. 150 W. System dysponuje 256 GB pamięci DDR5 RDIMM ECC 5600 MT/s w konfiguracji czterech modułów po 64 GB.

Trzecia jednostka, przeznaczona do testów, oparta jest na procesorze AMD Ryzen 7 7700X, który udostępnia 8 rdzeni i 16 wątków, przy współczynniku TDP wynoszącym 65 W.

Płyta główna obsługuje standard PCIe 5.0 $\times$ 16 oraz pamięci DDR5. W systemie zainstalowano 64 GB pamięci DDR5-6000 (2×32 GB), z czego efektywnie dostępne jest ok. 60.4 GB. Akcelerację obliczeń zapewnia karta graficzna NVIDIA GeForce RTX 4080 z 16 GB pamięci VRAM. Dane przechowywane są na nośniku NVMe PCIe 4.0 TLC o pojemności 2 TB.

System operacyjny we wszystkich jednostkach stanowi Ubuntu 24.04 LTS. Do przeprowadzenia testów zastosowano dwa środowiska uruchomieniowe: instalacje natywne oraz konteneryzację z wykorzystaniem platformy Docker.

Przeniesienie danych do systemu umożliwiło pełny dostęp do informacji przestrzennych obejmujących między innymi zbiorniki wodne, sieci komunikacyjne, zabudowę, infrastrukturę energetyczną, obszary przyrodnicze i systemy kanalizacyjne i gazowe. System generuje mapy wietrzności, nasłonecznienia i nachylenia działek. Stanowią one podstawę do analizy hierarchicznej AHP oraz ustalenia priorytetów lokalizacyjnych.

13.5. Środowisko programowe

Architektura testowa zakłada izolację środowisk uruchomieniowych za pomocą kontenerów, standaryzację interfejsu danych oraz spójny model analityczny obejmujący przetwarzanie danych technicznych i geoprzestrzennych. Uwzględnia też komponent uczenia maszynowego i interaktywną warstwę prezentacji wyników. Powiązanie tych systemów stanowi fundament obliczeniowy i programistyczny, natomiast rozwiązania dedykowane przypisano do poszczególnych aplikacji.

W ramach przyjętej koncepcji zrezygnowano z podejścia monolitycznego na rzecz architektury mikroservisów, która lepiej odpowiada zastosowanym technologiom oraz przyszłym kierunkom rozwoju systemu. Podstawowe narzędzia programowe wykorzystywane we wszystkich aplikacjach zostały zestawione w tabeli 27.

Tabela 27

Główne elementy środowiska programowego

Rodzaj oprogramowania	Opis	Odniesienie
Python (wersja 3.11.13)	Język programowania pełniący funkcję narzędzia analitycznego i integracyjnego, umożliwiający łączenie bibliotek numerycznych, uczenia maszynowego i przetwarzania geoprzestrzennego.	https://www.python.org/ (dostęp: 27.08.2025)
Streamlit (wersja 1.48.1)	Lekkie środowisko do budowy interfejsów webowych umożliwiających szybką prezentację wyników i iteracje eksperymentalne.	https://streamlit.io/ (dostęp: 27.08.2025)
PostgreSQL (wersja 16.4-1) with PostGIS (wersja 3.4.3)	Relacyjna baza danych z rozszerzeniem przestrzennym PostGIS.	https://www.postgresql.org.pl/ (dostęp: 27.08.2025)
QGIS (Quantum GIS version 3.44.1-Solothurn)	Oprogramowanie GIS stosowane do przygotowania i walidacji warstw wektorowych przed ich importem do bazy PostGIS.	https://qgis.org/ (dostęp: 27.08.2025)
Apache Spark (version 3.5.1)	Implementuje równoległe przetwarzanie danych w modelu DataFrame i RDD z optymalizacją planów zapytań przez silnik Catalyst oraz zarządzaniem pamięcią i kodem pośrednim przez warstwę Tungsten, co pozwala na efektywną analizę dużych wolumenów danych.	https://spark.apache.org/ (dostęp: 27.08.2025)

**Model integracji sztucznej inteligencji i analiz przestrzennych
w procesie podejmowania decyzji lokalizacyjnych dla obiektów odnawialnych źródeł energii**

Apache Sedona w wersji 1.7.2	Apache Sedona w wersji 1.7.2 rozszerza Spark o typy i funkcje przestrzenne, w tym operatory ST oraz przestrzenne złączenia i indeksy, a także partycjonowanie przestrzenne, co umożliwia skalowanie zapytań GIS w klastrze.	https://sedona.apache.org/latest/ (dostęp: 27.08.2025)
Pandas	Dostarcza kolumnowy model ramek danych z wektorowymi operatorami transformacji, grupowania i łączenia, zapewniając operacje na danych tabelarycznych z optymalizacjami pamięciowymi.	https://pandas.pydata.org/ (dostęp: 27.08.2025)
GeoPandas (wersja 1.1.1)	Rozszerza Pandas o typy geometrii oraz operacje projekcji i relacji przestrzennych, integrując się z mechanizmami indeksowania przestrzennego i ujednolicając dostęp do analiz GIS w Pythonie.	https://geopandas.org/en/stable/ (dostęp: 27.08.2025)
Scikit-learn (version 1.7.1)	Dostarcza klasycznych algorytmów uczenia nienadzorowanego, w tym metod klasteryzacji, wraz z ustandaryzowanym interfejsem dopasowania i walidacji, co sprzyja replikowalności wyników.	https://scikit-learn.org/stable/ (dostęp: 27.08.2025)
PyDeck (version 0.9.1)	umożliwia wizualizację map przez powiązanie z silnikiem webowym opartym na akceleracji graficznej, co pozwala renderować duże zbiory punktów i wielokątów z interaktywnymi warstwami	https://deckgl.readthedocs.io/en/latest/ (dostęp: 27.08.2025)
Docker, Docker Compose	Platforma konteneryzacyjna zapewniająca przenośność i powtarzalność środowiska uruchomieniowego.	https://www.docker.com/ (dostęp: 27.08.2025)
NumPy	Zapewnia wielowymiarowe tablice i operatory wektorowe będące podstawą obliczeń numerycznych, a także interoperacyjność pamięciową z pozostałymi bibliotekami.	https://numpy.org/ (dostęp: 27.08.2025)
Shapely 2.1.1	Realizuje deterministyczne operacje na geometrii planarnej zgodne z paradygmatem OGC, w tym przecięcia, bufor i otoczki, co umożliwia dokładne wnioskowanie geometryczne w przepływach danych.	https://shapely.readthedocs.io/en/stable/ (dostęp: 27.08.2025)
SQLAlchemy	Działa jako warstwa abstrakcji zapytań i mapowania obiektowo relacyjnego, zapewniając bezpieczne budowanie zapytań, pulę połączeń oraz przenośność logiki dostępu do danych.	https://www.sqlalchemy.org/ (dostęp: 27.08.2025)
GPUUtil 1.4.0 oraz psutil 7.0	Służą do monitoringu wykorzystania zasobów sprzętowych, odpowiednio akceleratorów graficznych i zasobów systemu operacyjnego, co umożliwia sprzężenie zwrotne między obciążeniem a politykami uruchomieniowymi.	https://pypi.org/project/GPUUtil/ , https://psutil.readthedocs.io/en/latest/ (dostęp: 27.08.2025)
Parquet 2.11/2.12 i GeoParquet	zapewniają kolumnowy zapis danych z kompresją i mechanizmami odczytu selektywnego przez przenoszenie predykatów, przy czym wariant geoparquet dodaje formalną specyfikację reprezentacji geometrii wraz z metadanymi układu odniesienia, co redukuje koszty wejścia wyjścia i ułatwia wymianę między narzędziami	https://pypi.org/project/GPUUtil/ , https://geoparquet.org/ (dostęp: 27.08.2025)
Ollama i Gemma-3-12b-it	Ollama wraz z modelem gemma 4B stanowi środowisko wykonywania lokalnych modeli językowych z uproszczonym cyklem dystrybucji i zarządzania wagami, a także z mechanizmami strumieniowania odpowiedzi i wsparciem kwantyzacji, co umożliwia uruchamianie agentów na zasobach brzegowych i w środowiskach o ograniczonej łączności.	https://github.com/ollama/ollama , https://huggingface.co/google/gemma-3-12b-it (dostęp: 27.08.2025)

Źródło: opracowanie własne na podstawie stron zaprezentowanych w tabeli.

Tak przygotowany stos technologiczny pozwala połączyć integralność danych oraz obsługę zapytań przestrzennych w relacyjnej bazie danych z elastycznością analiz rozproszonych i możliwością interaktywnej wizualizacji wyników.

Integracja metod klasteryzacji z agentami językowymi umożliwia strukturyzację danych przy użyciu algorytmów nienadzorowanych. Pozwala też udostępniać wyniki analityczne w postaci konwersacyjnej. Dzięki temu proces odkrywania i walidacji hipotez badawczych ulega znacznemu przyspieszeniu.

13.6. Działania aplikacji

13.6.1. Przyjęcie i przetworzenie danych wejściowych

W kontekście całościowego ujęcia systemu momentem przyjęcia danych wejściowych jest wprowadzenie zapytania w języku naturalnym do interfejsu algorytmu SDGWB. Odpowiednio przygotowany prompt systemowy analizuje treść zapytania, przeprowadzając segmentację i kategoryzację informacji, a także oddziela cel od danych i metryk.

Interfejs zaprojektowano jako proaktywny w przypadku braków informacyjnych, agent semantyczny generuje komunikaty doprecyzowujące:

„Wykryłem jedną wartość: 100.0 m. Podaj drugi wymiar.”

System rozpoznaje jednostki miar, wartości liczbowe i kontekst normatywny, czyli akty prawne, progi odległości oraz minimalne wymiary.

Ekran aplikacji, obrazujący uruchomienie wyuczonego modelu językowego Gemma 3_12b_OZE_LoRA i sposób definiowania zapytania, ukazano na rysunku 56.

Agentowy system analizy wymagań OZE - załadowano model Gemma3 12B OZE LoRA

Znajdź dogodnie działki pod elektrownie PV o wymiarach 100 x 120 metrów. Dla działek niespełniających tych wymiarów uruchom klasteryzację metodą K-Means w wersji zoptymalizowanej.

Opisz wymagania lub odpowiedz na pytanie asystenta...



Rysunek 56. Ekran systemu agentowego analizy wymagań OZE z wykorzystaniem modelu Gemma3 12b OZE_LoRA.

Źródło: opracowanie własne na podstawie wdrażanego systemu.

Aplikacja stanowi konwersacyjny system analizy GIS, w którym użytkownik formułuje wymagania w języku naturalnym, a moduł sztucznej inteligencji automatycznie interpretuje treść zapytania, dobiera odpowiednie parametry legislacyjne oraz inicjuje obliczenia przestrzenne.

Interfejs konwersacyjny umożliwia zadawanie pytań o charakterze aplikacyjnym, np.:

„Znajdź dogodne działki pod elektrownię fotowoltaiczną
o wymiarach 100 × 120 metrów”

W procesie interpretacji agent semantyczny identyfikuje jednostki miar, wartości liczbowe i kontekst normatywny. W obliczeniach metrycznych stosowany jest układ EPSG:2180, a pomiary odległości i wymiary liczone są w metrach.

Mechanizm działania interfejsu konwersacyjnego został zobrazowany na zrzucie ekranu, który przedstawia proces zadawania zapytania w języku naturalnym, jego interpretację przez moduł AI oraz wygenerowanie komunikatu doprecyzowującego brakujące parametry (rysunek 57).

	↑ cluster_ic	n_plots	numer_dzialki	width_m	height_m	dist_road
256	883	9	31, 32, 37/6, 30/15, 30/13, 30/12, 34, 33, 30/14	62.9	62.9	
257	887	7	130/3, 128/3, 133/1, 133/8, 133/7, 128/4, 130/2	51.6	51.6	
258	889	10	86/12, 103/7, 87/28, 86/13, 103/3, 8/3, 103/2, 87/29, 103/1, 87/27	58.5	62.8	
259	895	9	199/4, 202/10, 195/1, 197, 199/3, 202/11, 202/9, 202/8, 198	54.5	61	
260	897	4	19/6, 19/10, 19/8, 19/4	56.3	56.3	
261	901	4	389, 396/1, 388/1, 396/2	56.5	58.4	
262	902	7	424/1, 423/7, 423/5, 425/3, 423/6, 425/4, 423/8	53.9	61.6	
263	914	2	64/13, 64/6	50.9	50.9	
264	917	6	155/17, 155/9, 140/4, 155/18, 155/16, 140/3	55.5	64.3	
265	922	5	14/1, 13/1, 13/5, 14/5, 13/6	50.5	63.9	
266	925	6	837/4, 837/5, 837/7, 837/6, 896/2, 896/1	50.5	64.6	

 Znajdź dogodne działki pod elektrownię PV o wymiarach 100 × 120 metrów. Dla działek niespełniających tych wymiarów uruchom klasteryzację metodą K-Means w wersji zoptymalizowanej.

 Wykryłem jedną wartość: 100.0 m. Podaj drugi wymiar (np. '100.0 na 120').

120 

Rysunek 57. Zrzut ekranu interfejsu konwersacyjnego SDGWB.

Źródło: opracowanie własne.

Agent mapuje zapytanie na ograniczenia przestrzenne i regulacyjne, uzupełniając brakujące wartości na podstawie wzorców, takich jak domyślne parametry legislacyjne czy minimalne bufory (np. strefy ochronne). W dalszym etapie ścieżka przetwarzania uruchamia hybrydowego agenta GIS.

Wyniki obliczeń są równocześnie wizualizowane w postaci mapy i zestawiane w tabelach analitycznych. Taki mechanizm umożliwia użytkownikowi prowadzenie iteracyjnego dialogu z systemem, w trakcie którego doprecyzowuje on kryteria wyszukiwania, a model zapewnia poprawność formalną parametrów i przekształca je w operacyjne zapytania przestrzenne.

13.6.2. Agregacja wyników i wizualizacja

Interaktywna mapa podkładowa *Open Street Map* (OSM) została zintegrowana z warstwami tematycznymi i sekcją podsumowania tabelarycznego. Działki spełniające kryteria oznaczane są zielonym kolorem. Na rysunku 58 znajdują się dwa rozwijane zestawienia: lista pojedynczych działek oraz zestawienie klastrów działek wraz z aktualną liczbą wyników (np. 74 i 85).

Mechanizmy wizualizacji oraz prezentacji wyników zostały odwzorowane w interfejsie aplikacji. Zrzut ekranu przedstawia główny widok systemu, w którym interaktywna mapa OSM z warstwami tematycznymi została połączona z sekcją tabelaryczną, a działki spełniające kryteria wyróżniono jako poligony.

Na rysunku 58 zaprezentowano układ elementów interfejsu i sposób prezentacji danych przestrzennych oraz atrybutowych.



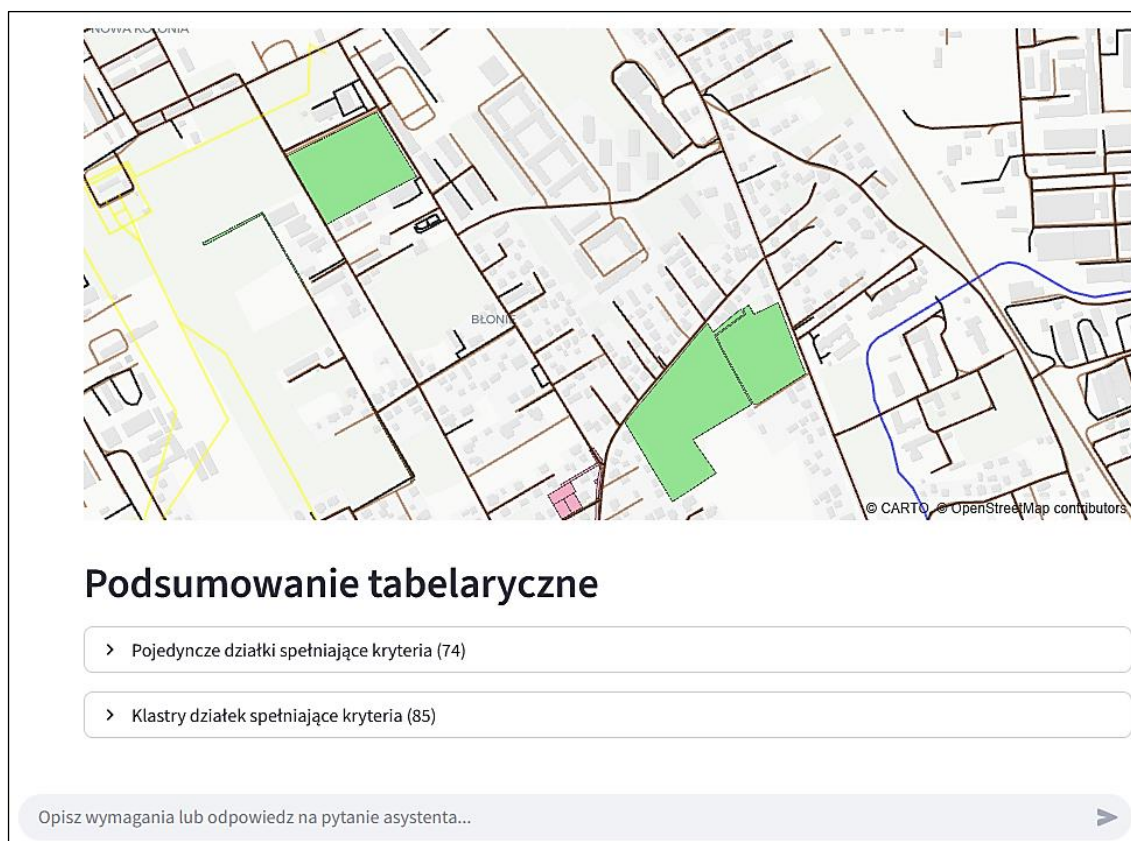
Rysunek 58. Interaktywny widok systemu selekcji działek inwestycyjnych

Źródło: opracowanie własne na podstawie wdrażanego systemu.

W widoku tabelarycznym przedstawiane są atrybuty wyników przestrzennych, w tym identyfikator klastra, liczba działek składowych, numery ewidencyjne oraz przybliżone wymiary minimalnego prostokąta obejmującego geometrię. Dodatkowo prezentowane są odległości od elementów infrastruktury technicznej, co umożliwia weryfikację zgodności z wymaganiami prawnymi dotyczącymi sąsiedztwa dróg, cieków wodnych i linii energetycznych.

Proces przetwarzania obejmuje dwa tryby działania. Pierwszy dotyczy selekcji pojedynczych działek spełniających bezpośrednio zadane kryteria wymiarowe. Drugi obejmuje tworzenie skupisk działek w przypadku, gdy pojedyncze obiekty są zbyt małe. W tym trybie stosowana jest wariantowa klasteryzacja, np. metodą K-Means, uzupełniona o test spójności geometrycznej, kontrolę wymiarów klastra oraz analizę minimalnego prostokąta obróconego.

Na zrzucie ekranu ukazano interaktywną mapę OSM z warstwami tematycznymi i wyniki klasteryzacji działek. Obiekty spełniające kryteria oznaczono jako wyróżnione poligony kolorem różowym (rysunek 59).



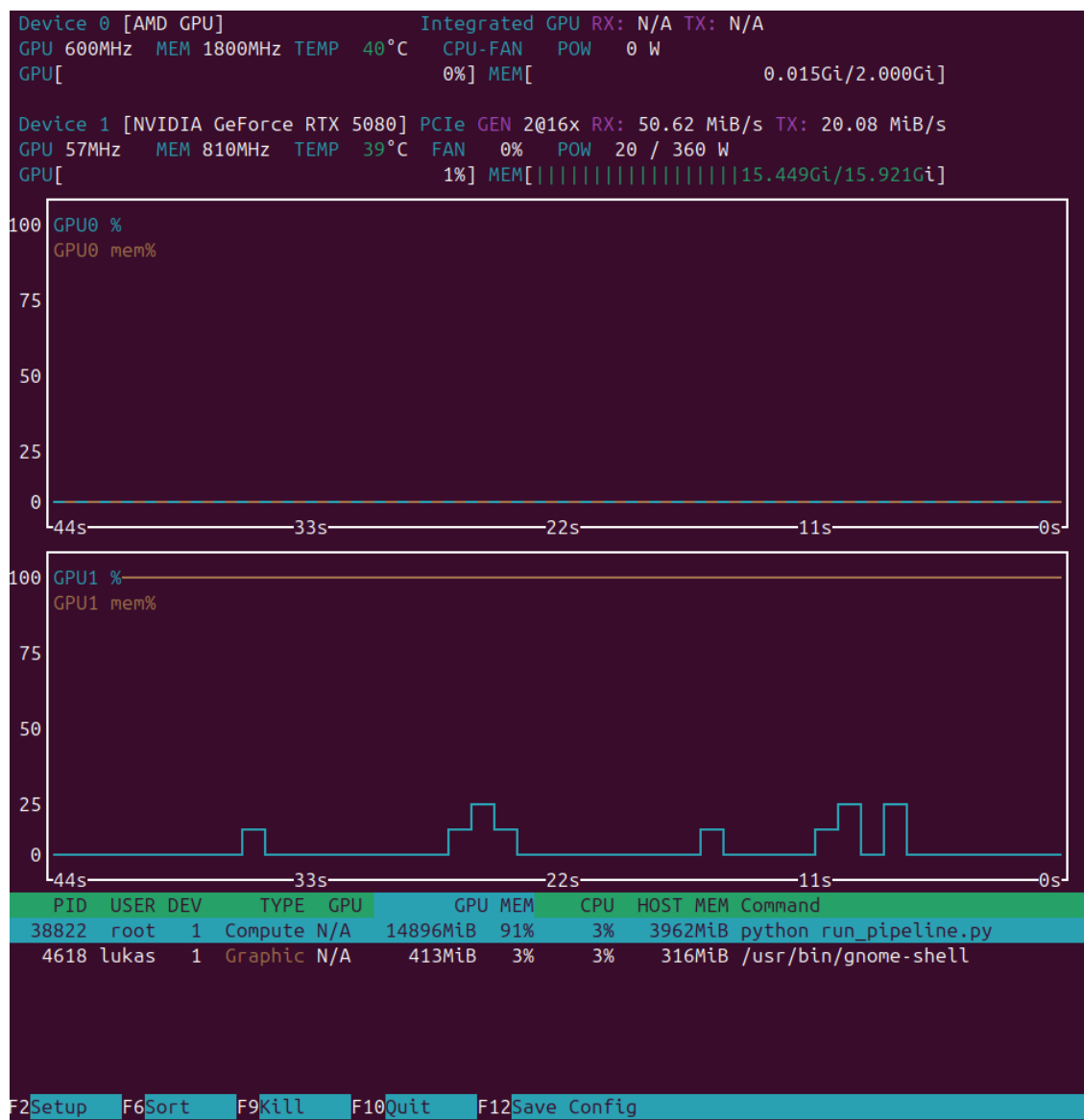
Rysunek 59. Interaktywna mapa OSM z warstwami tematycznymi i wynikami klasteryzacji działek.

Źródło: opracowanie własne na podstawie wdrażanego systemu.

13.6.3. Proces douczania modelu

W ramach dokonywanych analiz przeprowadzono proces douczania dużego modelu językowego z rodziny Gemma, a konkretnie modelu Gamma-3-12b-it, z wykorzystaniem techniki LoRA. Metoda ta nie modyfikuje parametrów bazowego modelu, lecz wprowadza dodatkowe parametry o niskim rzędzie, które podlegają treningowi. Dzięki temu znacząco ograniczono koszty obliczeniowe i zużycie pamięci, co ma szczególne znaczenie przy pracy z modelami o miliardach parametrów i pozwala na ich praktyczne zastosowanie w warunkach ograniczonych zasobów sprzętowych.

W celu zobrazowania przebiegu douczania modelu Gemma-3-12b-it metodą LoRA, na rysunku 60 przedstawiono monitor zasobów obliczeniowych, dokumentujący obciążenie GPU, CPU i pamięci.



Rysunek 60. Monitor zasobów obliczeniowych (GPU, CPU, pamięć) podczas douczania modelu Gemma-3-12b-it metodą LoRA.

Źródło: opracowanie własne na podstawie wdrażanego systemu.

Dalej zaprezentowano rejestry zdarzeń, obejmujące kolejne etapy procesu, w tym przygotowanie środowiska, inicjalizację modelu, tworzenie warstw LoRA oraz generowanie komunikatów potwierdzających poprawność działania i gotowość modelu do dalszego użycia (rysunek 61).

W początkowej fazie konfiguracji środowiska zastosowano tryb obliczeń półprecyzyjnych QLoRA (4-bit, NormalFloat4 – nf4) z treningiem adapterów w precyzji bfloat16 oraz float16, a także przeniesieniem części obliczeń optymalizatora na CPU. Takie podejście pozwoliło zachować równowagę między dokładnością a wydajnością obliczeń.

Wykorzystanie pamięci GPU wynosiło maksymalnie 14.6 GiB, a dostępna pamięć CPU ok. 48.6 GiB. Dane treningowe zapisano w formacie JSON, obejmującym 438 rekordów i ponad 51 tys. tokenów. Maksymalną długość sekwencji określono na 117 tokenów.

```
0[|||] 9.0%] 4[|||] 18.6%] 8[| 1.3%] 12[|| 8.3%]
1[|| 3.2%] 5[|| 4.4%] 9[|| 2.5%] 13[|| 1.9%]
2[|| 3.8%] 6[|| 3.2%] 10[|| 5.1%] 14[ 0.0%]
3[|||||||] 75.9%] 7[| 1.3%] 11[||||| 23.4%] 15[|| 1.3%]
Mem[|||||||] 16.4G/60.4G Tasks: 229, 2194 thr, 284 kthr; 3 running
Swp[|| 376K/40.0G] Load average: 1.43 1.29 2.30
Uptime: 01:33:22

Services
Log Dashboard
training-service 08858367 RESTART STOP TERMINAL
[2025-09-01 07:06:07] INFO Konfiguracja startowa:
[2025-09-01 07:06:07] INFO BASE_MODEL_NAME = google/gemma-3-12b-it
[2025-09-01 07:06:07] INFO TRAINED_MODEL_NAME = gemma3-epic
[2025-09-01 07:06:07] INFO OLLAMA_MODEL_NAME = gemma3-epic
[2025-09-01 07:06:07] INFO DEVICE = cuda
[2025-09-01 07:06:07] INFO API_BASE_URL = http://qa-database-api:5525
[2025-09-01 07:06:07] INFO OLLAMA_HOST = http://ollama:11434
[2025-09-01 07:06:07] INFO GGUF_OUTTYPE = f16
[2025-09-01 07:06:07] INFO FORCE_CPU_CONVERSION = False
[2025-09-01 07:06:07] INFO GPU_MAX_MEMORY = 14GiB
[2025-09-01 07:06:07] INFO CPU_MAX_MEMORY = 48GiB
[2025-09-01 07:06:07] STEP Etap 0: Sprawdzanie wymagań wstępnych...
[07:06:07] Repozytorium llama.cpp już istnieje.
[07:06:07] Token Hugging Face załadowany.
[07:06:07] Sprawdzanie połączenia z serwerem Ollama...
[07:06:07] Serwer Ollama jest dostępny.
[2025-09-01 07:06:07] SUCCESS Etap 0 (wymagania wstępne) zakończony w 1ms
[2025-09-01 07:06:07] STEP Etap 1: Pobieranie danych treningowych...
[2025-09-01 07:06:07] INFO Pobieranie danych z: http://qa-database-api:5525/untrained-questions
[07:06:07] Pobrano i zapisano 438 przykładów do /app/training_data.json
[2025-09-01 07:06:07] SUCCESS Pobieranie i zapis danych (438 rekordów) zakończony w 5ms
[2025-09-01 07:06:07] SUCCESS Etap 1 (pobieranie danych) zakończony w 5ms
[2025-09-01 07:06:07] STEP Etap 2: Uruchamianie fine-tuningu LoRA...
[2025-09-01 07:06:07] INFO ładowanie tokenizera z: /app/gemma3-epic
[2025-09-01 07:06:08] INFO ładowanie danych z pliku: /app/training_data.json
[2025-09-01 07:06:08] INFO Najdłuższe pytanie ma 53 tokenów
[2025-09-01 07:06:08] INFO Ustawiono max_length na: 117
Map: 100%| 438/438 [00:00<00:00, 6065.20 examples/s]
[2025-09-01 07:06:08] INFO ładowanie modelu bazowego: google/gemma-3-12b-it
```

Rysunek 61. Rejestry dokumentujące przebieg douczania modelu Gemma-3-12B-it metodą LoRA.

Źródło: opracowanie własne na podstawie wdrażanego systemu.

Ważnym elementem procesu jest zastosowanie LoRA, polegające na zamrożeniu wag modelu bazowego i dodaniu niskowymiarowych dekompozycji do wybranych macierzy wagowych. W efekcie znacząco zredukowano czas oraz koszty uczenia. Przepustowość przetwarzania danych wynosiła ok. 6000 tokenów na sekundę, co jest typowe dla fine-tuningu modeli o tej skali. Po zakończeniu optymalizacji model został zapisany w formacie GGUF, zoptymalizowanym pod kątem późniejszego wykorzystania w środowiskach inferencyjnych.

Przed wdrożeniem przeprowadzono walidację integralności plików poprzez obliczenie sumy kontrolnej SHA256. Nowa wersja modelu została zarejestrowana i udostępniona na lokalnym serwerze Ollama.

Pojedynczy, krótszy przebieg walidacyjny trwał ok. 22 min, a pełne rundy szkoleniowe (z rosnącą liczbą pytań do ok. 1050, większymi tablicami i dłuższymi sekwencjami) trwały 45-50 min.

Cały przebieg procesu ilustruje efektywne dostrajanie wielkoskalowych modeli językowych do specyficznych danych treningowych. Zastosowanie tej metody pozwala na osiągnięcie znaczącego dopasowania funkcjonalności modelu przy minimalnym nakładzie obliczeniowym i zużyciu pamięci, zachowując jednocześnie szeroką wiedzę uogólnioną zakodowaną w modelu bazowym. LoRA jest obecnie jedną z najczęściej stosowanych metod personalizacji dużych modeli językowych w praktycznych zastosowaniach.

13.6.4. Ewaluacja algorytmów klasteryzacji

Widok główny systemu łączy interaktywną mapę podkładową OSM z warstwami tematycznymi oraz sekcją „Podsumowanie tabelaryczne”. Nad mapą wyróżniono na zielono poligony działek predysponowanych, a poniżej znajdują się akordeony prezentujące listę pojedynczych obiektów oraz klastrow wraz z bieżącą krotnością wyników (np. 74 i 85). W widoku tabelarycznym przedstawiane są atrybuty wyników przestrzennych, takie jak identyfikator klastra, liczba składowych działek, numery ewidencyjne, wymiary prostokąta minimalnego i odległości od elementów infrastruktury, co umożliwia walidację wymagań prawnych.

System działa w dwóch trybach: selekcji pojedynczych działek spełniających zadane kryteria oraz budowy skupisk w przypadku zbyt małych obiektów. W tym drugim wariancie stosowana jest klasteryzacja, np. metodą K-Means, uzupełniona o test spójności geometrycznej i kontrolę wymiarów klastra.

W celu porównania efektywności zastosowanych podejść zestawiono czasy analizy i wykorzystanie zasobów dla różnych algorytmów klasteryzacji (tabela 28).

Tabela 28

Czas realizacji procesu od momentu zgromadzenia wszystkich wymagań

Czas realizacji [s]	Seria 1	Seria 2	Seria 3	Seria 4	Seria 5
Podział	14,25	14,44	16,21	14,73	13,61
Klasteryzacja	33,35	31,89	29,98	30,98	32,85
Filtrowanie	160,29	122,88	179,54	110,16	148,13
Wizualizacja	47,25	39,09	53,25	38,02	39,37
Suma czasów	255,14	208,3	278,98	193,89	233,96

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych testowych.

Chociaż wartości te przekraczają orientacyjną granicę 30 s, stanowią znaczną redukcję w porównaniu z tradycyjnymi metodami GIS, które zazwyczaj angażują specjalistów z zakresu projektowania, prawa i geoinformatyki. Uzyskane wyniki są szczególnie korzystne, biorąc pod uwagę ograniczone zasoby platformy testowej i odnosząc je do potencjalnych wdrożeń produkcyjnych.

Jak pokazano w tabeli 29, poszczególne algorytmy klasteryzacji różnią się zarówno czasem działania, jak i zapotrzebowaniem na zasoby. Dla pełniejszej oceny wydajności przeanalizowano też średni czas realizacji całego procesu, obejmującego pełny przebieg wraz z klasteryzacją.

Tabela 29

Średni czas realizacji pełnego procesu wraz z klasteryzacją

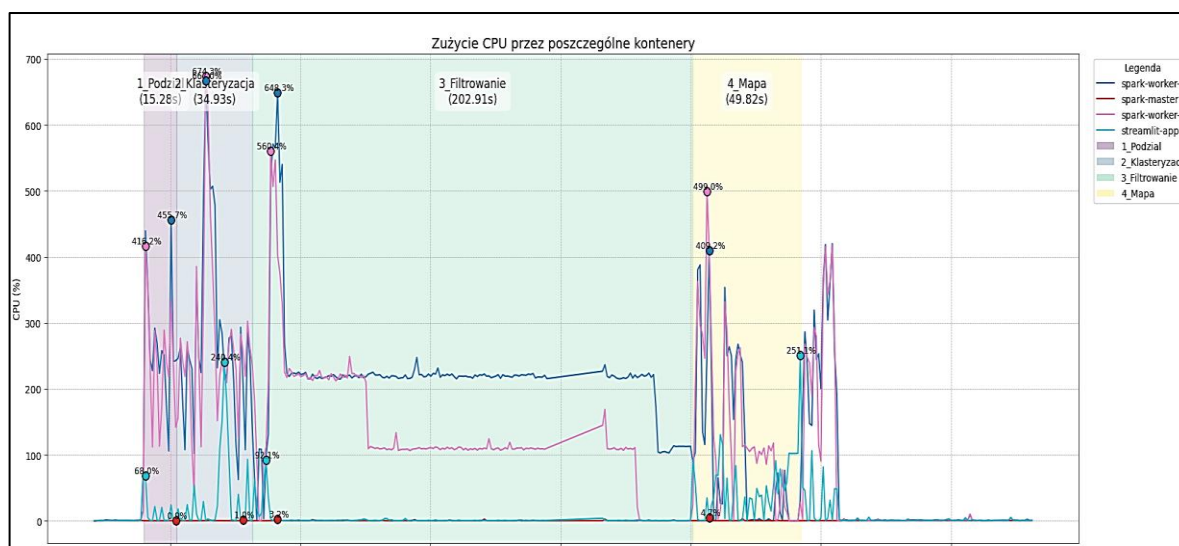
Średnie czasy analizy wymagań bez klasteryzacji	Śr. czas analizy Spark/Sedona [s]	Szczytowe RAM Spark/Sedona 2 nody [MB]	Szczytowe CPU Spark/Sedona [%]
Usprawnione przeszukiwanie w głąb	284,43	12976,19	401,1
K-Means (usprawniony)	234,054	11896,27	432,53
K-Means	242,914	6242,42	306,924
Klasteryzacja aglomeracyjna	1739,54	13103,4	459,63

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych testowych.

Tabela 29 ukazuje zestawienie technik klasteryzacji wraz z czasem realizacji i zużyciem zasobów. Najszybszym algorytmem okazał się K-means. Usprawniona wersja K-Means osiągnęła drugi wynik i jest rekomendowana jako domyślny algorytm klasteryzacji, dzięki znacznemu wzrostowi jakości w porównaniu do podstawowej wersji. Badania wykazały, że klasyczny, nieuprawniony algorytm często uzyskiwał jedynie średni poziom jakościowy w ujęciu spójności przestrzennej. Dotyczy to szczególnie liczby komponentów o wysokiej spójności i wskaźnika zwartości (compactness index).

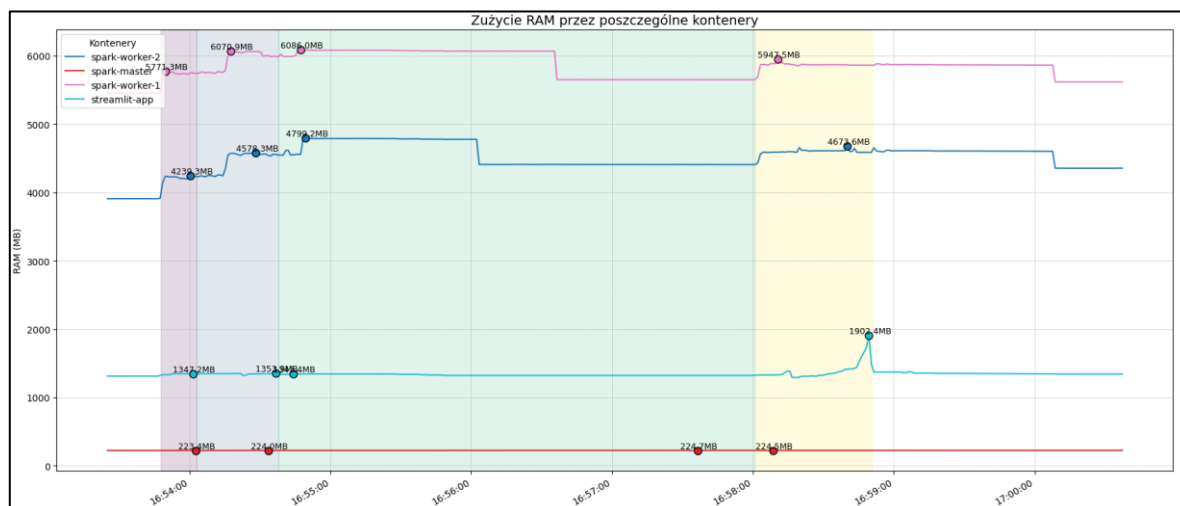
Algorytm aglomeracyjnej klasteryzacji odznacza się znaczącym czasem wykonania w porównaniu do pozostałych i jako taki powinien być wykonywany w momencie, gdy jakość pozostałych algorytmów jest niewystarczająca bądź też, gdy wymagane są szczególnie spójne i drobiazgowe wyniki.

Dla uzupełnienia analizy zestawiono szczegółowe wyniki dotyczące wykorzystania zasobów obliczeniowych przez poszczególne kontenery w trakcie pełnego przebiegu procesu. Uwzględniono zarówno poziom obciążenia CPU (rysunek 62), jak i zużycie pamięci RAM (rysunek 63) w kolejnych etapach przetwarzania.



Rysunek 62. Analiza poziomu obciążenia CPU przez kontenery w poszczególnych etapach procesu.

Źródło: opracowanie własne na podstawie wdrażanego systemu.



Rysunek 63. Analiza zużycia RAM przez kontenery w poszczególnych etapach procesu.
Źródło: opracowanie własne na podstawie wdrażanego systemu.

Rysunek 62 obrazuje zmienność wykorzystania CPU i pamięci RAM w kolejnych etapach procesu, wskazując na najwyższe obciążenie w fazie filtrowania.

Aby dokładniej przeanalizować wykorzystanie zasobów, w tabeli 30 zestawiono szczegółowe dane dotyczące konsumpcji CPU i pamięci przez poszczególne aplikacje wchodzące w skład rozwiązania.

Tabela 30

Prezentacja konsumpcji zasobów przez poszczególne aplikacje wchodzące w skład rozwiązania

Etap	container_name	avg_cpu_%	max_cpu_%	avg_mem_mb	max_mem_mb
1_Podzial	spark-master	0,21	0,91	223,16	223,44
1_Podzial	spark-worker-1	241,69	416,23	5741,54	5771,34
1_Podzial	spark-worker-2	270,17	455,68	4216,02	4239,33
1_Podzial	streamlit-app	10,37	68	1342,57	1347,24
2_Klasteryzacja	spark-master	0,22	1,02	223,25	224
2_Klasteryzacja	spark-worker-1	266,99	674,26	5931,66	6070,93
2_Klasteryzacja	spark-worker-2	278,29	667,03	4446,18	4578,3
2_Klasteryzacja	streamlit-app	32,92	240,43	1346,39	1353,88
3_Filtrowanie	spark-master	0,3	3,21	223,77	224,73
3_Filtrowanie	spark-worker-1	130,61	560,38	5925,8	6085,96
3_Filtrowanie	spark-worker-2	216,01	648,34	4574,28	4799,24
3_Filtrowanie	streamlit-app	2,47	92,12	1328,79	1343,43
4_Wizualizacja	spark-master	0,32	4,67	224,31	224,48

4_Wizualizacja	spark-worker-1	128,55	499,01	5861,61	5947,52
4_Wizualizacja	spark-worker-2	102,28	409,18	4592,62	4673,6
4_Wizualizacja	streamlit-app	48,72	251,06	1382,61	1902,38

Źródło: opracowanie własne na podstawie wdrażanych danych testowych.

Dane szczegółowe umożliwiają ocenę rozkładu obciążenia między aplikacje w kolejnych etapach procesu. W celu uzyskania pełniejszego obrazu wydajności zestawiono też wyniki w ujęciu sumarycznym, obejmujące średnie i maksymalne zużycie CPU oraz pamięci RAM dla każdego etapu (tabela 31).

Tabela 31

Sumaryczne zużycie zasobów w poszczególnych etapach procesu

Suma	avg_cpu	max_cpu	avg_mem_mb	max_mem_mb
Podział	522,44	940,82	11523,29	11581,35
Klasteryzacja	578,42	1584,93	11948	12227,84
Filtrowanie	349,39	1304,05	12052,64	12453,36
Wizualizacja	279,87	1163,92	12061,15	12747,98

Źródło: opracowanie własne na podstawie wdrażanych danych testowych.

Przeprowadzone pomiary wykazały, że największe obciążenie procesora generował etap klasteryzacji, co potwierdza jego wysoką złożoność obliczeniową. Największe zużycie pamięci RAM odnotowano z kolei podczas filtrowania i wizualizacji danych, co wskazuje na intensywny pod względem wykorzystania pamięci charakter.

Uzyskane wyniki wskazują, że warto rozważyć dalszą optymalizację etapów najbardziej wymagających zasobowo. Szczególnie korzystne może okazać się usprawnienie zarządzania pamięcią operacyjną, co mogłoby przyczynić się do zmniejszenia ryzyka powstawania wąskich gardeł i ułatwić skalowanie procesu dla większych zbiorów danych.

PODSUMOWANIE PRACY I WNIOSKI KOŃCOWE

W świecie rzeczywistym coraz wyraźniej dostrzega się potrzebę usprawnienia procesów zachodzących na styku pozyskiwania zasobów naturalnych i ochrony środowiska, tak żeby możliwe było pogodzenie rozwoju gospodarczego z troską o zachowanie równowagi ekologicznej.

W szczególności pojawia się problem wynikający z faktu, że rosnąca potrzeba wytwarzania energii pozostaje w konflikcie z wymogami ochrony środowiska. Dlatego niezbędne staje się staranne planowanie oraz projektowanie instalacji z odnawialnych źródeł energii, które pozwolą zaspokoić potrzeby społeczne i gospodarcze, a jednocześnie ograniczą negatywny wpływ na środowisko.

W ostatnich latach coraz wyraźniej widać, że procesy dotyczące zagospodarowania przestrzeni, korzystania z zasobów przyrodniczych i rozwoju infrastruktury wymagają nowego podejścia. Dynamiczny wzrost zapotrzebowania na energię sprawia, że działania inwestycyjne często napotykają na ograniczenia wynikające z regulacji środowiskowych oraz konieczności ochrony cennych obszarów przyrodniczych.

W tej sytuacji szczególnie istotne staje się tworzenie takich rozwiązań projektowych i analitycznych, które umożliwią rozwój energetyki bazującej na źródłach odnawialnych, jednocześnie respektując ograniczenia środowiskowe i przestrzenne. Precyzyjne określanie warunków lokalizacyjnych oraz racjonalne gospodarowanie przestrzenią pozwala minimalizować potencjalne konflikty, a równocześnie wspierać bezpieczną i zrównoważoną transformację energetyczną.

W niniejszej pracy zaprezentowano działania zmierzające do zaprojektowania systemu wspierającego proces podejmowania decyzji dotyczących lokalizacji nowych obiektów OZE. Celem było opracowanie rozwiązania, które umożliwi bardziej świadome, sprawne i zrównoważone planowanie ich rozwoju. W obszarze systemów decyzyjnych oraz analiz geoprzestrzennych główne trudności wynikają z potrzeby posiadania specjalistycznej wiedzy, szczególnie w zakresie obsługi zaawansowanych narzędzi GIS oraz z konieczności właściwej interpretacji przepisów prawnych obejmujących wiele obszarów regulacyjnych. Tradycyjne podejścia wymagają od użytkowników zarówno wysokich kompetencji technicznych, jak i dobrej orientacji w prawodawstwie, co utrudnia szerokie, jak również efektywne wykorzystanie dostępnych narzędzi analitycznych.

Pomimo tych ograniczeń wykorzystanie systemów GIS wciąż pozostaje główną ścieżką postępowania w procesie projektowania nowych inwestycji z zakresu OZE. W obliczu istniejącej potrzeby usprawnienia tych procesów, rozumianego jako automatyzacja i przyspieszenie analiz poprzez ograniczenie manualnych czynności, standaryzację procedur oraz zwiększenie obiektywności i powtarzalności wyników, głównym celem pracy było opracowanie oraz przetestowanie autorskiego Systemu Dynamicznego Generowania Warunków Brzegowych (SDGWB).

W związku z tym zaprojektowano oraz zweryfikowano autorski System Dynamicznego Generowania Warunków Brzegowych. Rozwiązanie to zostało opracowane jako integracja danych przestrzennych GIS z elementami sztucznej inteligencji w ramach architektury agenta hybrydowego, wspierającego proces podejmowania decyzji przestrzennych dotyczących lokalizacji i posadowienia nowych obiektów OZE ze szczególnym uwzględnieniem warunków środowiskowych.

Opracowana koncepcja eliminuje bariery takie jak: konieczność znajomości dużej liczby aktów prawnych, podatność procesu analitycznego na błędy użytkownika i spadek jakości pracy wynikający ze zmęczenia pracowników. Cele te osiągnęte są poprzez zastosowanie metod przetwarzania języka naturalnego, w szczególności dużych modeli językowych, zintegrowanych w architekturze hybrydowego agenta GIS.

Po raz pierwszy zastosowano podejście, które pozwala użytkownikowi komunikować swoje potrzeby w intuicyjnym interfejsie, bez konieczności korzystania ze złożonych interfejsów graficznych typowych dla tradycyjnych narzędzi, takich jak ArcGIS, QGIS czy inne systemy geoprzestrzenne.

W wyniku testowania autorskiego algorytmu wykazano pozytywny efekt zastosowania opracowanego systemu. Architektura została zaprojektowana i opisana jako kompletny łańcuch przetwarzania: od specjalistycznej prawno-przestrzennej bazy wiedzy (BW), poprzez moduł NLP generujący i nadzorujący centralną listę wymagań, aż po sygnały w formacie JSON przekazywane do agenta GIS wykonującego analizy przestrzenne. Nadzorowana lista wymagań pełni rolę rdzenia sterującego systemem, który automatycznie przekształca zapytania użytkownika w parametry i zapytania analityczne, zapewniając spójny i nieprzerwany przepływ informacji.

Ważnym elementem systemu są mechanizmy, które dbają o jego aktualność i poprawność działania. Wykorzystano do tego metody RAG i LoRA, stałe monitorowanie źródeł prawnych (ISAP, Dz.U., BIP) oraz zasadę podwójnej weryfikacji. System zapewnia rzetelne wyniki, możliwe do szybkiej weryfikacji i oceny.

Przeprowadzono analizę warstwy funkcjonalnej, w której system automatyzuje selekcję działek spełniających kryteria użytkownika wyrażone w języku naturalnym. Dodatkowo grupuje działki o częściowym dopasowaniu, tworząc klastry o określonych właściwościach przestrzennych i środowiskowych. Ostateczny wybór oraz hierarchizacja klastrów są realizowane z wykorzystaniem analizy wielokryterialnej AHP, co zapewnia przejrzystą i uzasadnioną ocenę ich przydatności.

Głównym celem pracy było opracowanie oraz weryfikacja funkcjonowania autorskiego Systemu Dynamicznego Generowania Warunków Brzegowych (SDGWB), wykorzystującego integrację danych środowiskowych i prawnych z elementami sztucznej inteligencji w ramach architektury agenta hybrydowego, wspierającego proces podejmowania decyzji przestrzennych dotyczących lokalizacji i posadowienia inwestycji OZE.

Cel pracy został zrealizowany, a testowanie systemu wskazało, że opracowany algorytm usprawnia proces podejmowania decyzji przestrzennych. SDGWB automatyzuje interpretację przepisów prawa i ich zestawienie z danymi środowiskowymi, integruje wyniki z metodami wielokryterialnego wspomagania decyzji i dostarcza jednoznacznych rezultatów, takich jak selekcja działek czy ranking lokalizacji.

Uzyskane wyniki pozwoliły na weryfikację pytań badawczych i rozwiązanie problemów szczegółowych:

1. Integracja źródeł prawa, danych środowiskowych, przestrzennych i wiedzy eksperckiej.

Walidacja algorytmu przedstawiona w podrozdziałach 13.6.1 i 13.6.2 potwierdza, że system SDGWB skutecznie łączy przepisy prawa z danymi środowiskowymi, przestrzennymi i wiedzą ekspercką. System automatycznie interpretuje regulacje, przekształca je w sygnały sterujące agentami GIS i przypisuje do odpowiednich warstw przestrzennych. Dzięki temu uzyskiwane wyniki są spójne i wolne od błędów typowych dla manualnej interpretacji, co znacząco usprawnia proces oceny lokalizacji OZE.

2. Zaprojektowanie zasady istotności i kontroli jakości danych.

W rozdziale 13 potwierdzono skuteczność mechanizmów zapewniających aktualność i wiarygodność danych w systemie SDGWB. Moduł RAG poprawnie identyfikuje zmiany przepisów, a techniki LoRA umożliwiają stałe douczanie oraz aktualizację Bazy Wiedzy. Dodatkowa kontrola jakości oparta na zasadzie „dwóch par oczu” eliminuje sygnały niepewne i przypadki niejednoznacznej interpretacji. W efekcie system generuje wymagania spójne, aktualne i zgodne z prawem, co potwierdza pełną realizację celu dotyczącego zasady istotności.

3. Zwiększenie poziomu autonomii procesu decyzyjnego oraz redukcja ryzyka błędów interpretacyjnych.

Wyniki przedstawione w podrozdziałach 13.6.1-13.6.4 potwierdzają, że system SDGWB osiągnął zakładany poziom autonomii w procesie analitycznym. Algorytmy klasteryzacji działają samodzielnie, zapewniając stabilne i powtarzalne wyniki, natomiast moduły odpowiedzialne za ocenę spójności automatycznie weryfikują poprawność i dopasowanie sygnałów wejściowych. System generuje też rankingi lokalizacyjne i wizualizacje wyników bez udziału operatora GIS, co znacząco ogranicza ryzyko błędów interpretacyjnych oraz zwiększa niezależność całego procesu decyzyjnego. W efekcie potwierdzono pełną realizację celu dotyczącego autonomii systemu.

4. Skrócenie czasu przeprowadzenia analizy.

Testowanie algorytmu wykazało (13.6.1, 13.6.2), że proces ten przebiega bez udziału eksperta ds. GIS czy prawnika, co znacząco redukuje czas potrzebny na przygotowanie analizy. System automatycznie przetwarza dane wejściowe i zestawia je z warstwami GIS. W klasycznych analizach GIS czas przygotowania wynosi nawet do kilku dni, a z wykorzystaniem algorytmu czas ten zamyka się w jednym „przebiegu modelu”. Rozwiązanie pojedynczego problemu w zakresie wskazania optymalnej lokalizacji nowego obiektu OZE trwało ok. 22 min, a pełne rundy szkoleniowe (z rosnącą liczbą pytań do ok. 1050, większymi tablicami i dłuższymi sekwencjami) od 45 do 50 min. Czas realizacji analizy zależy przede wszystkim od liczby działek ewidencyjnych poddanych analizie i mocy obliczeniowej serwerów.

5. Potwierdzenie poprawności działania SDGWB.

Walidacja przeprowadzona w rozdziale 13 jednoznacznie potwierdziła poprawność działania SDGWB i jego przydatność w procesach decyzyjnych dotyczących lokalizacji inwestycji OZE. Testy funkcjonalne wykazały, że system prawidłowo realizuje pełen cykl pracy, obejmujący przyjęcie danych, generowanie wymagań i sygnałów oraz wykonanie analiz GIS, przy zachowaniu stabilności działania i zgodności modułów

z założoną architekturą. Wyniki analiz przestrzennych potwierdziły praktyczną użyteczność systemu, który tworzył spójne rankingi działek, mapy klasyfikacji oraz zestawienia odpowiadające rzeczywistym uwarunkowaniom terenowym i środowiskowym. Dodatkowo walidacja algorytmów klasteryzacji wykazała, że zastosowane metody obliczeniowe są stabilne, odporne oraz zapewniają powtarzalne wyniki, co dowodzi poprawności implementacji modeli analitycznych. Ocena potencjału praktycznego potwierdziła natomiast, że SDGWB działa efektywnie na rzeczywistych danych planistycznych i może być z powodzeniem stosowany w jednostkach samorządu terytorialnego.

Do najważniejszych osiągnięć wzbogacających dotychczasowy stan wiedzy w zakresie inżynierii środowiska i energetyki, a w szczególności automatyzacji procesu podejmowania decyzji o nowych lokalizacjach obiektów OZE zalicza się:

1. Wykazanie po raz pierwszy możliwości interdyscyplinarnej integracji przepisów prawa, danych środowiskowych oraz wiedzy eksperckiej (z zakresu inżynierii środowiska i energetyki) w ramach jednego systemu wykorzystującego sztuczną inteligencję.
2. Potwierdzenie, że opracowany system poprawnie wykorzystuje dane środowiskowe, prawne i techniczne zamieniając je na sygnały dla agentów geoinformacyjnych, dając jednoznaczne i powtarzalne wyniki, umożliwiając wskazanie optymalnej lokalizacji obiektów OZE.
3. Wykazanie wysokiego poziomu autonomii systemu, obejmującego automatyczne generowanie wymagań lokalizacyjnych i ich powiązanie z warstwami środowiskowymi, klasteryzację oraz tworzenie rankingów potencjalnych lokalizacji obiektów OZE bez udziału operatora.
4. Potwierdzenie użyteczności systemu w planowaniu inwestycji energetycznych (większa przejrzystość, mniej błędów interpretacyjnych, szybsze analizy i ograniczenie ręcznej interpretacji regulacji).
5. Wykazanie, że system wspiera planowanie lokalizacji różnych obiektów OZE przez analizę wymagań lokalizacyjnych dla: instalacji fotowoltaicznych, wiatrowych i biogazowych, ocenę ich komplementarności przestrzennej oraz wskazywanie lokalizacji sprzyjających układom hybrydowym przy zachowaniu uwarunkowań i ograniczeń środowiskowych.
6. Przeprowadzenie weryfikacji funkcjonowania systemu na danych rzeczywistych potwierdzającej poprawność działania modułów, spójność wyników oraz przydatność systemu dla praktyki (samorządy, inwestorzy, biura projektowe).

Zrealizowane badania pozwoliły na weryfikację przyjętych hipotez, które zostały jednoznacznie potwierdzone w toku analiz, wykazując, że:

Hipoteza 1: System SDGWB umożliwia automatyczną interpretację przepisów prawnych, środowiskowych i energetycznych oraz ich interdyscyplinarną integrację z danymi przestrzennymi i wiedzą specjalistyczną, co usprawnia ocenę oddziaływań środowiskowych i techniczno-energetycznych oraz wspiera wybór optymalnej lokalizacji inwestycji OZE.

Hipoteza 2: Budowa repozytorium wiedzy eksperckiej, w połączeniu z modułem przetwarzania języka naturalnego NLP i mechanizmami krzyżowej weryfikacji źródeł prawa zapewnia spójność, aktualność i wiarygodność wymagań, podnosząc tym samym poziom zaufania do wyników systemu.

Hipoteza 3: Architektura systemu, oparta na wieloczynnikowej analizie oraz interakcji konwersacyjnej, umożliwia kompleksową ocenę lokalizacji planowanych obiektów OZE i wspiera rozwój narzędzi inżynierii środowiska w tym zakresie, wskazując jednocześnie potencjał ewolucji systemu w kierunku rozwiązań o wyższym stopniu autonomii decyzyjnej.

W przyszłości warto poszerzyć badania o kilka istotnych obszarów. Po pierwsze, zasadne wydaje się rozwinięcie monitoringu prawa w ujęciu end to end, umożliwiającego śledzenie całej ścieżki od wykrycia zmiany legislacyjnej w źródłach takich jak ISAP czy BIP aż po automatyczną modyfikację listy sygnałów, z równoczesnym rejestrowaniem decyzji eksperckich.

Istotnym kierunkiem dalszych badań powinny być również aspekty społeczne. Rozszerzenie systemu o narzędzia partycypacyjne (ankiety, mapy gęstości skarg), modele konfliktów lokalizacyjnych i moduły akustyczne mogłoby zwiększyć jego wartość w procesie decyzyjnym.

Ostatecznie, rozwój SDGWB powinien zmierzać ku zwiększonej autonomii systemu przy jednoczesnym zachowaniu nadzoru eksperckiego. W tym kontekście pożądane są rozwiązania obejmujące progowe mechanizmy zaufania do źródeł, uczenie przyrostowe (LoRA) oraz prowadzenie transparentnej ewidencji decyzji, co pozwoli ograniczyć obciążenie ekspertów i równocześnie utrzymać transparentność procesu. Przeprowadzone badania i testy prototypu potwierdziły zasadność przyjętych założeń oraz wskazały na realny potencjał systemu w usprawnianiu procesów decyzyjnych dotyczących lokalizacji i posadowienia inwestycji OZE.

Wyniki te otwierają przestrzeń do dalszych analiz i rozwinięć, ukierunkowanych na poszerzanie funkcjonalności, wzmacnianie praktycznego znaczenia oraz zwiększanie efektywności, wiarygodności i autonomii SDGWB, m.in. przez integrację z dodatkowymi źródłami danych i technologiami obliczeniowymi.

W perspektywie dalszego rozwoju koncepcja SDGWB może zostać rozszerzona na inne typy projektów budowlanych, z uwzględnieniem ich specyfiki funkcjonalnej i wymagań regulacyjnych. Takie podejście pozwoliłoby zwiększyć uniwersalność systemu, a jednocześnie podnieść sprawność procesów kontrolnych związanych z planowaniem przestrzennym i oceną zgodności inwestycji z obowiązującymi normami prawnymi.

Istotnym obszarem rozwijanym w przyszłości powinny stać się też metody hybrydowe łączące modele językowe z analityką przestrzenną czasu rzeczywistego, pozwalające na bieżąco reagować na zmieniające się uwarunkowania środowiskowe, społeczne i regulacyjne. Tak zintegrowane podejście umożliwiłoby przekształcenie SDGWB w adaptacyjny ekosystem decyzyjny nowej generacji, zdolny do operacyjnej współpracy z platformami planistycznymi, systemami monitorowania i narzędziami oceny oddziaływania inwestycji w pełnym cyklu ich życia.

BIBLIOGRAFIA

- Ab Aziz, N.H.A., Alshdaifat, S.M. (2024). ESG reporting: Impacts, benefits and challenges. In H. Alshurafat, A. Hamdan, J. Sands (eds.), *Sustainable horizons for business, education, and technology* (pp. 69-76). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-2981-4_5.
- Adjiski, V., Kaplan, G., Mijalkovski, S. (2023). Assessment of the solar energy potential of rooftops using LiDAR datasets and GIS-based approach. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 8(2). <https://doi.org/10.26833/ijeg.1112274>.
- Aggeri, F. (2017). How can performativity contribute to management and organization research? Theoretical perspectives and analytical framework. *M@n@gement*, 20(1), 28-69. <https://shs.cairn.info/journal-management-2017-1-page-28?lang=en>.
- Aggeri, F., Labatut, J. (2011). Looking at management through its instruments: A genealogical analysis of instrument-based approaches of management. *Working Paper*, Centre de Gestion Scientifique (CGS), Mines ParisTech. <https://hal.science/hal-00639734v1>.
- Al-Abadi, A.M., Handhal, A.M., Abdulhasan, M.A., Ali, W.L., Hassan, J.J., Al Aboodi, A.H. (2025). Optimal siting of large photovoltaic solar farms at Basrah governorate, Southern Iraq using hybrid GIS-based Entropy-TOPSIS and AHP-TOPSIS models. *Renewable Energy*, 241, 122308. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.122308>.
- Amsharuk, A., Łaska, G. (2023). The approach to finding locations for wind farms using GIS and MCDA: Case study based on Podlaskie Voivodeship, Poland. *Energies*, 16(21), 7107. <https://doi.org/10.3390/en16207107>.
- Amsharuk, A., Łaska, G. (2024). Site selection of wind farms in Poland: Combining theory with reality. *Energies*, 17(11), 2635. <https://doi.org/10.3390/en17112635>.
- AP News. (2025). *Europe posts record year for clean energy use as Trump pulls US toward fossil fuels*. Associated Press. <https://apnews.com/article/4a6ff96bbde3251cb42109e1d9d4b399>.
- Appiah, D.O., Schröder, D., Forkuo, E.K., Bugri, J.T. (2015). Application of geo-information techniques in land use and land cover change analysis in a peri-urban district of Ghana. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(3), 1265-1289. <https://doi.org/10.3390/ijgi4031265>.
- Ashihara, K., El Vaigh, C.B., Chu, C., Renoust, B., Okubo, N., Takemura, N., Nakashima, Y., Nagahara, H. (2020). Improving topic modeling through homophily for legal documents. *Applied Network Science*, 5(1), 77. <https://doi.org/10.1007/s41109-020-00321-y>.
- Awolesi, O., Salter, C.A., Reams, M. (2024). A Systematic Review on the Path to Inclusive and Sustainable Energy Transitions. *Energies*, 17(14), 3512. <https://doi.org/10.3390/en17143512>.
- Aziz, M.T., Haque, A., Islam, M.R., Hosen, M.B., Kader, Z., Aziz, M.A., Saha, O.R. (2025). Site suitability assessment for solar powered green hydrogen production plants: A GIS based AHP and Fuzzy AHP approach for Bangladesh. *Renewable Energy*, 254, 123675. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123675>.
- Azzuni, A., Breyer, C. (2018). Definitions and dimensions of Energy security: A literature review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 7(1), e268. <https://doi.org/10.1002/wene.268>.
- Backstrom, J.T., Warden, N.M., Walsh, C.M. (2024). Optimizing offshore wind export cable routing using GIS-based environmental heat maps. *Wind Energy Science*, 9, 1105-1121. <https://doi.org/10.5194/wes-9-1105-2024>.

- Bajdur, W., Zielińska, A., Gronba-Chyła, A. (2023). Product life cycle assessment (LCA) as a tool for environmental management. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 25, 389-398. <https://doi.org/10.54740/ros.2023.040>
- Barros, R.P., Fajardo, A., Lara-Borrero, J. (2025). Decentralized Renewable-Energy Desalination: Emerging Trends and Global Research Frontiers—A Comprehensive Bibliometric Review. *Water*, 17(14), 2054. <https://doi.org/10.3390/w17142054>
- Baseer, M.A., Rehman, S., Meyer, J.P., Alam, M.M. (2017). GIS-based site suitability analysis for wind farm development in Saudi Arabia. *Energy*, 141, 1166-1176. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.016>.
- Bąk, I., Wawrzyniak, K., Oesterreich, M. (2024). Assessment of impact of use of renewable energy sources on level of energy poverty in EU countries. *Energies*, 17(24), 6241. <https://doi.org/10.3390/en17246241>.
- Bedoić, R., Smoljanić, G., Pukšec, T., Čuček, L., Ljubas, D., Duić, N. (2021). Geospatial analysis and environmental impact assessment of a holistic and interdisciplinary approach to the biogas sector. *Energies*, 14(17), 5374. <https://doi.org/10.3390/en14175374>.
- Belaid, A., Guermoui, M., Riche, A., Arrif, T., Maamar, H., Mohamed Kamel, C., Rabehi, A., Mahmoud Al Rahhal, M. (2025). High-resolution mapping of concentrated solar power site suitability in Ghardaïa, Algeria: A GIS-based fuzzy logic and multi-criteria decision analysis. *IEEE Access*, 13, 231-255. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3522572>.
- Bertsiou, M.M., Theochari, A.P., Gergatsoulis, D., Gerakianakis, M., Baltas, E. (2025). Optimal site selection for wind and solar parks in Karpathos Island using a GIS-MCDM model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(3), 125. <https://doi.org/10.3390/ijgi14030125>.
- Bharathiraja, B., Sudharsana, T., Jayamuthunagai, J., Ramanujam, P., Sivasankaran, C., Iyyappan, J. (2018). Biogas production – A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 570-582. (PDF) Biogas production – A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion.
- Bhattarai, R., Mishra, B.K., Bhattarai, D., Khatiwada, D., Kumar, P., Meraj, G. (2024). Assessing hydropower potential in Nepal's Sunkoshi River Basin: An integrated GIS and SWAT hydrological modeling approach. *Scientifica*, 2024, 1007081. <https://doi.org/10.1155/2024/1007081>.
- Bielecka, E. (2003). *Systemy informacji geograficznej: Teoria i zastosowanie*. Warszawa: Wydawnictwo Polsko-Japońskiej Akademii Technik Komputerowych.
- Bielecka, E. (2006). *Systemy informacji geograficznej: teoria i zastosowania*. Warszawa: Wydawnictwo Polsko-Japońskiej Wyższej Szkoły Technik Komputerowych.
- Bordbar, M., Aghamohammadi, H., Pourghasemi, H.R., Azizi, Z. (2022). Multi-hazard spatial modeling via ensembles of machine learning and meta-heuristic techniques. *Scientific Reports*, 12, 1451. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05364-y>.
- Bridge, G., Bouzarovski, S., Bradshaw, M., Eyre, N. (2013). Geographies of energy transition: Space, place and the low-carbon economy. *Energy Policy*, 53, 331-340. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.10.066>
- Brodeur, J., Coetzee, S., Danko, D., Garcia, S., Hjelmager, J. (2019). Geographic information metadata—An outlook from the international standardization perspective. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(6), 280. <https://doi.org/10.3390/ijgi8060280>.
- Brom, P., Engemann, K., Breed, C., Pasgaard, M., Onalapo, T., Svenning, J.-C. (2023). A decision support tool for green infrastructure planning in the face of rapid urbanization. *Land*, 12(2), 415. <https://doi.org/10.3390/land12020415>.

- Butt, A.Q., Shangguan, D., Waseem, M., Abbas, A., Banerjee, A., Yadav, N. (2025). Assessment of hydropower potential in the Upper Indus Basin: A geographic information system-based multi-criteria decision analysis for sustainable water resources in Pakistan. *Resources*, 14(3), 49. <https://doi.org/10.3390/resources14030049>.
- Całka, B., Szostak, M. (2025). GIS-based environmental monitoring and analysis. *Applied Sciences*, 15(6), 3155. <https://doi.org/10.3390/app15063155>
- Campana, P., Censi, R., Ruggieri, R., Amendola, C. (2025). Smart Grids and Sustainability: The Impact of Digital Technologies on the Energy Transition. *Energies*, 18(9), 2149. <https://doi.org/10.3390/en18092149>.
- Cellura, M., Bruno, M., Longo, S., Rizzo, G. (2024). A review on life cycle environmental impacts of emerging solar cells. *Science of the Total Environment*, 925, 173818. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168019>.
- Chatzinikolaou, D., Vlados, C., Kokkinaki, A. (2025). The ecosystems perspective in energy research: A new field is born? *International Journal of Energy Economics and Policy*. <https://doi.org/10.32479/ijEEP.16030>.
- Che, L., Yin, S., Jin, J., Wu, W. (2024). Assessment and simulation of urban ecological environment quality based on geographic information system ecological index. *Land*, 13(5), 687. <https://doi.org/10.3390/land13050687>.
- Chen, X.H., Tee, K., Elnahass, M., Ahmed, R. (2023). Assessing the environmental impacts of renewable energy sources: A case study on air pollution and carbon emissions in China. *Journal of Environmental Management*, 345, 118525. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118525>.
- Cherp, A., Jewell, J. (2014). The concept of Energy security: Beyond the four As. *Energy Policy*, 75, 415-421. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.09.005>.
- Chou, C.-H., Ngo, S.L., Tran, P.P. (2023). Renewable energy integration for sustainable economic growth: A bibliometric analysis. *Sustainability*, 15(20), 15030. <https://doi.org/10.3390/su152015030>.
- Chrisman, N.R. (1997). *Exploring geographic information systems*. Wiley.
- Ciuła, J., Generowicz, A., Generowicz, A., Gaska, K., Gronba-Chyła, A. (2022). Efficiency analysis of the generation of energy in a biogas chp system and its management in a waste landfill – case study. *Journal of Ecological Engineering*, 23(7), 143-156.
- Ciuła, J., Generowicz, A., Gronba-Chyła, A., Wiewiórska, I., Kwaśnicki, P., Cygnar, M. (2024a). Analysis of the Efficiency of Landfill Gas Treatment for Power Generation in a Cogeneration System in Terms of the European Green Deal. *Sustainability*, 16(4), 1479. <https://doi.org/10.3390/su16041479>
- Ciuła, J., Sobiecka, E., Załona, T., Rydwańska, P., Oleksy-Gębczyk, A., Olejnik, T.P., Jurkowski, S. (2024b). GIS-based approaches in renewable energy development in Poland. *Sustainability*, 16(15), 6493. <https://doi.org/10.3390/su16156493>.
- Clark, L.P., Zilber, D., Schmitt, C., Fargo, D. C., Reif, D.M., Motsinger-Reif, A.A., Messier, K.P. (2025). A review of geospatial exposure models and approaches for health data integration. *Journal of Exposure Science Environmental Epidemiology*, 35, 131-148. <https://doi.org/10.1038/s41370-024-00712-8>.
- Cova, T.J. (1999). GIS in emergency management. In P.A. Longley, M.F. Goodchild, D.J. Maguire, D.W. Rhind (red.), *Geographical information systems: Principles, techniques, applications and management* (s. 845-858). John Wiley Sons.
- Dahri, N., Séjine, H., Bouamrane, A., Pham, Q.B., Abida, H., Gagnon, A.S., Anane, M. (2025). Suitability Map for Solar Photovoltaic Desalination Farms Using GIS and Multi-Criteria Decision Analysis. *Environmental Earth Sciences*, 84, 6. <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12152-0>.

- Demir, A., Dinçer, A.E., Çiftçi, C., Gülçimen, S., Uzal, N., Yılmaz, K. (2024). Wind farm site selection using GIS-based multicriteria analysis with life-cycle assessment integration. *Earth Science Informatics*, 17, 1591-1608. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01227-4>.
- Demir, G., Riaz, M., Deveci, M. (2024). Wind farm site selection using geographic information system and fuzzy decision-making model. *Expert Systems with Applications*, 255, 124772. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124772>
- Dirma, V., Neverauskienė, L.O., Tvaronavičienė, M., Danilevičienė, I., Tamošiūnienė, R. (2024). The impact of renewable energy development on economic growth. *Energies*, 17(24), 6328. <https://doi.org/10.3390/en17246328>.
- Ejuh Che, E., Roland Abeng, K., Iweh, C.D., Tsekouras, G.J., Fopah-Lele, A. (2025). The Impact of Integrating Variable Renewable Energy Sources into Grid-Connected Power Systems: Challenges, Mitigation Strategies, and Prospects. *Energies*, 18(3), 689. <https://doi.org/10.3390/en18030689>.
- Elkadeem, M.R., Younes, A., Sharshir, S.W., Campana, P.E., Wang, S. (2021). Sustainable siting and design optimization of hybrid renewable energy system: A geospatial multi-criteria analysis. *Applied Energy*, 295, 117071. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117071>
- Elkhatat, A., Al-Muhtaseb, S. (2024). Climate Change and Energy Security: A Comparative Analysis of the Role of Energy Policies in Advancing Environmental Sustainability. *Energies*, 17(13), 3179. <https://doi.org/10.3390/en17133179>.
- Energia z Rolnictwa. (2024, 19 kwietnia). *Biogaz rolniczy – podsumowanie 2023 r.* Pobrane z: <https://www.energiazrolnictwa.pl/biogaz-rolniczy-podsumowanie-2023-r/>.
- Escobar-Pemberthy, N., Ivanova, M. (2020). Implementation of multilateral environmental agreements: Rationale and design of the Environmental Conventions Index. *Sustainability*, 12(17), 7098. <https://doi.org/10.3390/su12177098>.
- European Commission. (2019). *The European Green Deal* (COM(2019) 640 final). Brussels: European Commission. Pobrane z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>.
- European Commission. (2020). *The Just Transition Mechanism – for a fair transition*. Brussels: European Commission. Pobrane z: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/finance-and-green-deal/just-transition-mechanism_en.
- European Commission. (2021). *'Fit for 55': Delivering the EU's 2030 climate target on the way to climate neutrality* (COM(2021) 550 final). Brussels: European Commission. Pobrane z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0550>.
- European Commission. (2021-2027). *Horizon Europe: EU research and innovation programme*. Brussels: European Commission. Pobrane z: https://cinea.ec.europa.eu/programmes/horizon-europe_en.
- European Commission. (2022). *REPowerEU plan* (COM(2022) 230 final). Brussels: European Commission. Pobrane z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52022DC0230>.
- European Commission. (2025). *Długoterminowa strategia do roku 2050*. Komisja Europejska. Pobrane z: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_pl.
- European Court of Auditors. (2023). *EU support for energy transition: Time to step up action*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- European Environment Agency. (2023). *Trends and projections in Europe 2023*. Copenhagen: European Environment Agency. Pobrane z: <https://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2023>.
- European Environment Agency. (2024). *Recycling materials from green energy technologies (Signal)*. Pobrane z: <https://www.eea.europa.eu/en/european-zero-pollution-dashboards/indicators/recycling-from-green-technology>.

- European Parliament and the Council. (2018). Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources (RED II). *Official Journal of the European Union*, L 328, 82-209.
- European Parliament and the Council. (2021). Regulation (EU) 2021/1119 establishing the framework for achieving climate neutrality (European Climate Law). *Official Journal of the European Union*, L 243, 1-17.
- European Parliament, Council of the European Union. (2001). Directive 2001/77/EC of the European Parliament and of the Council of 27 September 2001 on the promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal electricity market. *Official Journal of the European Communities*, L 283, 33. Pobrane z: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2001/77/oj>.
- European Recycling Platform. (2023). *WEEE Directive: European Parliament adopts amendments*. Pobrane z: <https://erp-recycling.org/news-and-events/2023/12/weee-directive-european-parliament-adopts-amendments/>.
- Eurostat. (2025a, March). *Electricity from renewable sources reaches 47% in 2024*. Pobrane z: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250319-1>.
- Eurostat. (2025b). *Renewable energy statistics—Statistics explained*. Pobrane z: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics.
- Eurostat. (2025c). *Renewable energy supply grew by 3.4% in 2024*. Pobrane z: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250702-1>.
- Fabra, N., Gutiérrez, E., Lacuesta, A., Ramos, R. (2024). Do renewable energy investments create local jobs? *Journal of Public Economics*, 239, 105212. <https://doi.org/10.1016/j.jpu.2024.105212>.
- Fagerholm, N., Raymond, C.M., Olafsson, A.S., Brown, G., Rinne, T., Hasanzadeh, K., Broberg, A., Kytä, M. (2021). A methodological framework for analysis of participatory mapping data in research, planning, and management. *International Journal of Geographical Information Science*, 35(9), 1848-1875. <https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1869747>.
- Faizi, A., Ak, M.Z., Shahzad, M.R., Yüksel, S., Toffanin, R. (2024). Environmental impacts of natural resources, renewable energy, technological innovation, and globalization: Evidence from the Organization of Turkic States. *Sustainability*, 16(22), 9705. <https://doi.org/10.3390/su16229705>.
- Falzone, C., Romain, A.-C. (2022). Establishing an air quality index based on proxy data for urban planning. Part 1: Methodological developments and preliminary tests. *Atmosphere*, 13(9), 1470. <https://doi.org/10.3390/atmos13091470>.
- Fedra, K., Reitsma, R.F. (1990). Decision support and geographical information systems. In H.J. Scholten J.C.H. Stillwell (eds.), *Geographical information systems for urban and regional planning* (pp. 177-190). Springer.
- Feizizadeh, B., Omarzadeh, D., Kazemi Garajeh, M., Lakes, T., Blaschke, T. (2021). Machine learning data-driven approaches for land use/cover mapping and trend analysis using Google Earth Engine. *Journal of Environmental Planning and Management*, 66(4), 665-697. <https://doi.org/10.1080/09640568.2021.2001317>.
- Feng, X., Zhang, Z., Chen, Q., Guo, Z., Zhang, H., Wang, M., Gao, W., Liu, X. (2025). Integrating remote sensing, GIS, and multi-criteria decision making for assessing PV potential in mountainous regions. *Renewable Energy*, 241, 122340. Pobrane z: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122340>.
- Fernandez, V. (2022). Environmental management: Implications for business performance, innovation, and financing. *Technological Forecasting and Social Change*, 182, 121797. Pobrane z: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121797>.
- Feroz, A.K., Zo, H., Chiravuri, A. (2021). Digital transformation and environmental sustainability: A review and research agenda. *Sustainability*, 13(3), 1530.

- Financial Times. (2024). The problem with Europe's ageing wind farms. Pobrane z: <https://www.ft.com/content/7f742d23-673b-47d3-9ce9-64fa5d322abe>.
- Flora, F.M.I. (2025). A GIS-based application of Monte Carlo and multi-criteria decision-making approach for site suitability analysis of solar-hydrogen production: Case of Cameroon. *Heliyon*, 11(1), e41541. Pobrane z: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41541>.
- Fraunhofer ISE. (2025). *Photovoltaics Report* (29 May 2025). Pobrane z: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>.
- Gao, S., Mai, G. (2018). Mobile GIS and Location-Based Services. In Comprehensive Geographic Information Systems (vol. 1, pp. 384-397). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09710-4>.
- Gao, S., Mai, G. (2018). Mobile GIS and location-based services. W Comprehensive Geographic Information Systems (vol. 1, ss. 384-397). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09710-4>.
- Garcia, X., Estrada, L., Acuña, V. (2024). Assessing small hydropower viability in water-scarce regions: Environmental flow and climate change impacts using a SWAT+ based tool. *Environmental Sciences Europe*, 36(1), 38. <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00938-1>.
- Gaska, K., Generowicz, A. (2020). SMART Computational Solutions for the Optimization of Selected Technology Processes as an Innovation and Progress in Improving Energy Efficiency of Smart Cities—A Case Study. *Energies*, 13(13), 3338. <https://doi.org/10.3390/en13133338>.
- Gaska, K., Generowicz, A., Gronba-Chyła, A., Ciula, J., Wiewiórska, I., Kwaśnicki, P., Mala, M., Chyła, K. (2023). Artificial Intelligence Methods for Analysis and Optimization of CHP Cogeneration Units Based on Landfill Biogas as a Progress in Improving Energy Efficiency and Limiting Climate Change. *Energies*, 16(15), 5732. <https://doi.org/10.3390/en16155732>.
- Gaska, K., Generowicz, A., Ocioń, P., Stelmach, S. (2021). Location of the waste incineration plant with particular emphasis on the environmental criteria. *Journal of Cleaner Production*, 303, 126887. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126887>.
- Generowicz, A. (2018). Multicriterial analysis in selecting a waste management system in region. *Economics, Ecology, Socium*, 2(2), 22–34. <https://doi.org/10.31520/2616-7107/2018.2.2-4>.
- Gentilucci, M., Barbieri, M., Younes, H., Rihab, H., Pambianchi, G. (2024). Analysis of wildfire susceptibility by weight of evidence, using geomorphological and environmental factors in the Marche Region, Central Italy. *Geosciences*, 14(5), 112. <https://doi.org/10.3390/geosciences14050112>.
- Geoportal360. Pobrane z: <https://sip.gison.pl/starysacz>.
- Gleason, M., Lopez, A., Rivers, M. (2025). Mapping and characterizing the visual impacts of the existing US wind turbine fleet. *Applied Energy*, 378, 124801. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124801>.
- Global Wind Energy Council. (2025a). Wind industry installs record capacity in 2024 despite policy instability. Pobrane z: <https://www.gwec.net/gwec-news/wind-industry-installs-record-capacity-in-2024-despite-policy-instability>.
- Główny Urząd Statystyczny. (2024). Ochrona środowiska w 2023 r. Pobrane z: https://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5484/12/7/1/ochrona_srodowiska_w_2023_r..pdf.
- Godlewski, R., Góralski, J., Goss, M., Gunia, W. (2025). *Prawo budowlane. Komentarz*. Wolters Kluwer.
- Goodchild, M. F. (2009). Geographic information systems and science: Today and tomorrow. *Annals of GIS*, 15(1), 3-9. <https://doi.org/10.1080/19475680903250715>.
- Goodchild, M. F. (2010). Twenty years of progress: GIScience in 2010. *Journal of Spatial Information Science*, 1, 3-20. (PDF) Twenty years of progress: GIScience in 2010.

- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- Görsch, R., Perlaviciute, G., Steg, L. (2025). A systematic review of public acceptability and perceived impacts of eleven energy sources and mitigation technologies. *Global Environmental Change*. Advance. Pobrane z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378025000512>.
- Gotlib, D., Iwaniak, A., Olszewski, R. (2007). *GIS. Obszary zastosowań*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Graziuso, G., Mancini, S., Francavilla, A.B., Grimaldi, M., Guarnaccia, C. (2021). Geo-crowdsourced sound level data in support of the community facilities planning: A methodological proposal. *Sustainability*, 13(10), 5486. <https://doi.org/10.3390/su13105486>.
- Griffiths, S. (2019). Energy diplomacy in a time of energy transition. *Energy Strategy Reviews*, 26, 100386. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100386>.
- Guo, Z., Liu, X. (2024). How artificial intelligence cooperating with agent-based modeling for urban studies: A systematic review. *Transactions in GIS*, 28(6), 13152. <https://doi.org/10.1111/tgis.13152>.
- GWEC. (2025b). *Offshore wind installed capacity reaches 83 GW as new report finds 2024 a record year for construction and auctions; plus Global Offshore Wind Report 2025*. Pobrane z: <https://www.gwec.net/gwec-news/offshore-wind-installed-capacity-reaches-83-gw-as-new-report-finds-2024-a-record-year-for-construction-and-auctions>; <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Williams-et-al-2025.pdf>.
- Hauger, S., Lieb, V., Glaser, R. (2025). Spatial potential analysis and site selection for agrivoltaics in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 213, 115469. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115469>.
- Hazemba, M., Halog, A. (2021). Systematic review of how environmental management policies are incorporated into national development plans in order to achieve sustainable development. *Environmental Challenges*, 3, 100041. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100041>.
- Helmi, A.M., Farhan, M.S., Nasr, M.M. (2018). A framework for integrating geospatial information systems and hybrid cloud computing. *Computers Electrical Engineering*, 67, 145-158. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2018.03.027>.
- Hochmair, H.H., Juhász, L., Li, H. (2025). Advancing AI driven geospatial analysis and data generation: Methods, applications and future directions. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14, 56. <https://doi.org/10.3390/ijgi14020056>.
- Idrovo-Macancela, A., Velecela-Zhindón, M., Barragán-Escandón, A., Zalamea-León, E., Mejía-Coronel, D. (2025). GIS-based assessment of photovoltaic solar potential on building rooftops in equatorial urban areas. *Heliyon*, 11, e41425. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41425>.
- IEA. (2024a). *Wind*. Pobrane z: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/wind>.
- IEA. (2024b). *Renewables 2024-Executive summary (wind outlook 2024-2030)*. Pobrane z: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024/executive-summary>.
- Ilba, M. (2025). SolarQGIS: A QGIS application for calculating solar radiation on 3D vector GIS data. *SoftwareX*, 31, 102230. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2025.102230>.
- Instytut Ochrony Środowiska – PIB. (2025). *Składowanie odpadów komunalnych w Polsce w 2023 r.* Pobrane z: <https://ios.edu.pl/aktualnosci-en-pl/raport-skladowanie-odpadow-komunalnych-w-polsce-w-2023-r/>.
- International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS). (2025). *EYA guidelines for utility-scale PV projects*. IEA PVPS.

- International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. (2024). *Environmental life cycle assessment of electricity from PV systems-2023 data update (Fact sheet)*. Pobrane z: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/05/Slides_IEA-PVPS-T12_Fact-Sheet-update-2023_v2.0.pdf.
- International Organization for Standardization (ISO). (2014). *ISO 19115-1:2014 – Geographic information – Metadata – Part 1: Fundamentals*. International Organization for Standardization.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2021). *Concentrating solar power: Technology brief*. Abu Dhabi: IRENA.
- International Renewable Energy Agency. (2023). *Renewable power generation costs in 2022*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. Renewable Power Generation Costs in 2022.
- International Renewable Energy Agency. (2025). *Renewable energy capacity statistics 2025*. Pobrane z: <https://www.irena.org/Data/Statistical-publications/Yearbooks>.
- Iweh, C.D., Gyamfi, S., Tanyi, E., Effah-Donyina, E. (2021). Distributed Generation and Renewable Energy Integration into the Grid: Prerequisites, Push Factors, Practical Options, Issues and Merits. *Energies*, 14(17), 5375. <https://doi.org/10.3390/en14175375>.
- Jahangir, M.H., Razeghi, M., Naseri, A., Yousefi, H., Noorollahi, Y. (2025). Hybrid solar-wind farm site selection for reverse osmosis desalination: A case study in Sistan and Baluchestan using Geographic Information System. *Energy Reports*, 13, 60596078. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.05.030>.
- Jasiūnas, J., Lund, P. D., Mikkola, J. (2021). Energy system resilience – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111476. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111476>.
- Jaywant, S.A., Arif, K.M. (2024). Remote sensing techniques for water quality monitoring: A review. *Sensors*, 24(24), 8041. <https://doi.org/10.3390/s24248041>.
- Jin, L., Rossi, M., Monforti Ferrario, A., Mennilli, F., Comodi, G. (2025). Designing hybrid energy storage systems for steady green hydrogen production in residential areas: A GIS-based framework. *Applied Energy*, 389, 125765. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125765>.
- Joint Research Centre. (2025). *Photovoltaic panels: New rules for assessment of the carbon footprint*. Pobrane z: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/photo-voltaic-panels-new-rules-assessment-carbon-footprint-2025-07-07_en.
- Jowett, P. (2024). Oxford PV starts commercial distribution of perovskite solar modules. *pv magazine*. Pobrane z: <https://www.pv-magazine.com/2024/09/05/oxford-pv-starts-commercial-distribution-of-perovskite-solar-modules/>.
- Juszczak, A., Maj, M. (2020). *Rozwój i potencjał energetyki odnawialnej w Polsce*. Warszawa: Polski Instytut Ekonomiczny.
- Kabeyi, M.J.B. (2022). Sustainable energy transition for renewable and low carbon grid electricity generation and supply. *Frontiers in Energy Research*, 9, 743114. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.743114>.
- Kafel, P., Nowicki, P. (2023). Sustainable development and ESG reporting: Bibliometric analysis. *Sustainability*, 15(1), 496. <https://doi.org/10.3390/su15010496>.
- Kang, C., Li, Y., Liu, L. (2020). GIS-based spatial analysis of healthcare accessibility: A review of recent literature and future directions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(14), 5151. <https://doi.org/10.3390/ijerph17145151>.
- Kaya, Ö. (2025). Photovoltaic mobile charging station for green infrastructure: A data-driven case study. *Urban Climate*, 60, 102358. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102358>.
- Klonner, C., Marx, S., Usón, T., Porto de Albuquerque, J., Höfle, B. (2016). Volunteered geographic information in natural hazard analysis: A systematic literature review of current approaches with a focus on preparedness and mitigation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(7), 103. <https://doi.org/10.3390/ijgi5070103>.

- Kochanek, A. (2025a). The usefulness of public geoportal functions in planning and preliminary environmental assessment of rural areas. *Journal of Ecological Engineering*, 26(12), 45-54.
- Kochanek, A., Ciula, J., Cembruch-Nowakowski, M., Załona, T. (2025b). Polish Farmers' Perceptions of the Benefits and Risks of Investing in Biogas Plants and the Role of GISs in Site Selection. *Energies*, 18(15), 3981. <https://doi.org/10.3390/en18153981>.
- Kochanek, A., Ciula, J., Generowicz, A., Mitryasova, O., Jasińska, A., Jurkowski, S., Kwaśnicki, P. (2024b). The Analysis of Geospatial Factors Necessary for the Planning, Design, and Construction of Agricultural Biogas Plants in the Context of Sustainable Development. *Energies*, 17(22), 5619. <https://doi.org/10.3390/en17225619>.
- Kochanek, A., Generowicz, A., Załona, T. (2025c). The Role of Geographic Information Systems in Environmental Management and the Development of Renewable Energy Sources—A Review Approach. *Energies*, 18(17), 4740. <https://doi.org/10.3390/en18174740>.
- Kochanek, A., Janczura, J., Jurkowski, S., Załona, T., Gronba-Chyła, A., Kwaśnicki, P. (2025d). The analysis of exhaust composition serves as the foundation of sustainable road transport development in the context of meeting emission standards. *Sustainability*, 17(8), 3420. <https://doi.org/10.3390/su17083420>.
- Kochanek, A.J., Kobylarczyk, S. (2024a). The analysis of the main geospatial factors of a photovoltaic power plant. *Journal of Ecological Engineering*, 25(4), 49-65. <https://doi.org/10.12911/22998993/183628>.
- Komisja Europejska. (2025). Pobrane z: https://commission.europa.eu/index_pl.
- Konieczna, R. (2009). Wsparcie finansowe inwestycji proekologicznych w Polsce a efekty ich wdrożenia *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN*, 75, 71-83. Pobrane z: <https://bibliotekanauki.pl/articles/394313>.
- Kontos, T.D., Katikas, L., Kavouras, M. (2025). A least-cost path algorithm utilizing directional graphs and shape optimization techniques for offshore wind farm cost modelling in the North and Central Aegean Sea, Greece. *Information Geography*, 2, 100021. <https://doi.org/10.1016/j.infgeo.2025.100021>.
- Kostecka-Jurczyk, D., Struś, M., Marak, K. (2024). The Role of Energy Cooperatives in Ensuring the Energy and Economic Security of Polish Municipalities. *Energies*, 17(13), 3082. <https://doi.org/10.3390/en17133082>.
- Kowski, Z., Makara, A., Kulczycka, J., Generowicz, A., Kwaśnicki, P., Ciula, J., Gronba-Chyła, A. (2024). Conversion of sewage sludge into biofuels via different pathways and their use in agriculture: A comprehensive review. *Energies*, 17(6), 1383. <https://doi.org/10.3390/en17061383>.
- Krstić, M., Tadić, S., Miglietta, P.P., Porrini, D. (2025). Enhancing biodiversity and environmental sustainability in intermodal transport: A GIS-based multi-criteria evaluation framework. *Sustainability*, 17(4), 1391. <https://doi.org/10.3390/su17041391>.
- Kuna-Kasprzyk, A., Maj, J. (2023). Proces inwestycyjno-budowlany. W: *Poradnik dla organów administracji i inwestorów* (s. 35-48). Wolters Kluwer.
- Kwiatkowska, A. M. (2007). *Systemy wspomagania decyzji. Jak korzystać z wiedzy i informacji w praktyce*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Kwoczyńska, B., Litwin, U., Piech, I. (2022). Modern Methods and Techniques in Landscape Shaping with Various Functions on the Example of Southern Poland. *Applied Sciences*, 12(4), 1948. <https://doi.org/10.3390/app12041948>.
- Lawrence Berkeley National Laboratory. (2024). *Hybrid tracking systems: Emerging trends in U.S. hybrid power plants*. Lawrence Berkeley National Laboratory.

- Leal Filho, W., Balogun, A.-L., Surroop, D., Salvia, A.L., Narula, K., Li, C., Hunt, J.D., Gatto, A., Sharifi, A., Feng, H., Tsani, S., Azadi, H. (2022). Realising the potential of renewable energy as a tool for energy security in small island developing states. *Sustainability*, 14(9), 4965. <https://doi.org/10.3390/su14094965>.
- Li, H., Liu, Z., Lin, X., Qin, M., Ye, S., Gao, P. (2024). A novel spatiotemporal urban land change simulation model: Coupling transformer encoder, convolutional neural network, and cellular automata. *Journal of Geographical Sciences*, 34(12), 2263-2287. <https://doi.org/10.1007/s11442-024-2292-1>.
- Li, X., Zhang, H., Wang, H., Feng, J. (2020). The effect of digital transformation strategy on performance: The moderating role of cognitive conflict. *International Journal of Business Analytics*, 31(3), 441-462.
- Lisiecka, D. (2024, 19 grudnia). Stabilny, choć powolny wzrost mocy zainstalowanej w zakresie biogazu. *Magazyn Biomasa*. Pobrane z: <https://magazynbiomasa.pl/wzrost-mocy-zainstalowanej-powolny-ale-stabilny/>.
- Litwin, U., Gniadek, J., Budkowski, S. (2022). *Kataster wielowymiarowy – nowoczesny sposób opisu przestrzeni*. Kraków: Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie.
- Litwin, U., Szafrńska, B. (2017). *Zastosowanie GIS w planowaniu prac urzędniowo-rolnych na obszarze województwa małopolskiego*. Kraków: Uniwersytet Rolniczy w Krakowie.
- Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rhind, D.W. (2015). *Geographic information science and systems*. Wiley.
- Lovrak, A., Pukšec, T., Grozdek, M., Duić, N. (2021). An integrated GIS approach for assessing seasonal variation and spatial distribution of biogas potential from industrial residues and by-products. *Energy*, 229, 122016. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122016>.
- Luisetto, M., Cabianca, L., Sahu, R. (2016). Management instrument in pharmaceutical care and clinical pharmacy. *International Journal of Economics Management Sciences*, 5(5), 373. Pobrane z: <https://pdfs.semanticscholar.org/9186/707f102e5f1994337519ccc5efaa1431dd35.pdf>.
- Ma, B., Wang, A. (2025). Exploring the role of renewable energy in green job creation and sustainable economic development: An empirical approach. *Energy Strategy Reviews*, 58, 101642. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101642>.
- Madanchian, M., Taherdoost, H. (2025). Criteria for AI adoption in HR: Efficiency vs. ethics. *Computers*, 258, 233-241. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.04.261>
- Magazyn Biomasa. (2024, 19 grudnia). *Stabilny, choć powolny wzrost mocy zainstalowanej w biogazie*. Pobrane z: <https://magazynbiomasa.pl/wzrost-mocy-zainstalowanej-powolny-ale-stabilny/>.
- Maguire, R. (2025). Key solar themes to track after 2024 investors. *Reuters*. Pobrane z: <https://www.reuters.com/business/energy/key-solar-themes-track-after-torrid-2024-investors-maguire-2025-01-07/>.
- Mahmood, M., Chowdhury, P., Yeassin, R., Hasan, M., Ahmad, T., Chowdhury, N.-U.-R. (2024). Impacts of digitalization on smart grids, renewable energy, and demand response: An updated review of current applications. *Energy Conversion and Management: X*, 24, 100790. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100790>
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703-726. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>.
- Malinowski, M., Bodziacki, S., Famielec, S., Huputyś, D., Kurpaska, S., Latała, H., Basak, Z. (2025). Environmental Impact Assessment of Heat Storage System in Rock-Bed Accumulator. *Energies*, 18(13), 3360. <https://doi.org/10.3390/en18133360>.

- Malinowski, M., Guzdek, S., Petryk, A., Tomaszek, K. (2021). A GIS and AHP-based approach to determine potential locations of municipal solid waste collection points in rural areas. *Journal of Water and Land Development*, 51(X-XII), 94-101. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.139109>.
- Mamat, R., Ghazali, M. F., Erdiwansyah, Rosdi, S.M. (2025). Potential of renewable energy technologies for rural electrification in Southeast Asia: A review. *Cleaner Energy Systems*, 12, 100207. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2025.100207>.
- Mapy Małopolski. Pobrane z: [https://mapymalopolski.pl/app/cat/?category=Mapy Ma%C5%82opolski](https://mapymalopolski.pl/app/cat/?category=Mapy%20Ma%C5%82opolski).
- Mapy wrażliwości – energetyka wiatrowa. Pobrane z: <https://otop.org.pl/naszeprojekty/pilnujemy/mapy-wrazliwosci-energetyka-wiatrowa/>.
- Marcos-Castro, A., Martín-Chivelet, N., Polo, J. (2025). Enhanced GIS methodology for building-integrated photovoltaic façade potential based on free and open-source tools and information. *Remote Sensing*, 17(9), 954. <https://doi.org/10.3390/rs17060954>.
- Marszałek Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej. (2023, 25 maja). Obwieszczenie w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (Dz.U. z 2023 r., poz. 1094). *Dziennik Ustaw RP*.
- Marszałek Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej. (2024, 16 stycznia). Obwieszczenie w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o ochronie gruntów rolnych i leśnych (Dz.U. z 2024 r., poz. 82). *Dziennik Ustaw RP*.
- Mats, A., Mitryasova, O., Salamon, I., Kochanek, A. (2025). Atmospheric air temperature as an integrated indicator of climate change. *Ecological Engineering Environmental Technology*, 26(3), 352-360. <https://doi.org/10.12912/27197050/200307>.
- Michalski, M., Polański, J., Nemš, M. (2024). Storing electric energy generated by a photovoltaic installation to increase profit from its sale—Case study in Poland. *Sustainability*, 16(13), 5635. <https://doi.org/10.3390/su16135635>.
- Michels, A.C., Padmanabhan, A., Xiao, Z., Kotak, M., Baig, F., Wang, S. (2024). CyberGIS-Compute: Middleware for democratizing scalable geocomputation. *SoftwareX*, 26, 101691. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2024.101691>.
- Miller, A., Li, R. (2014). A geospatial approach for prioritizing wind farm development in Northeast Nebraska, USA. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 3(3), 968-979. <https://doi.org/10.3390/ijgi3030968>.
- Minister Gospodarki. (2002, 30 października). Rozporządzenie w sprawie minimalnych wymagań dotyczących bezpieczeństwa i higieny pracy w zakresie użytkowania maszyn przez pracowników podczas pracy (Dz.U. z 2002 r., Nr 191, poz. 1596; zm. Dz.U. z 2003 r., Nr 178, poz. 1745). *Dziennik Ustaw RP*.
- Minister Rozwoju. (2016, 2 czerwca). Rozporządzenie w sprawie wymagań dla sprzętu elektrycznego (Dz.U. z 2016 r., poz. 806). *Dziennik Ustaw RP*.
- Minister Środowiska. (2017, 4 grudnia). Rozporządzenie w sprawie kryteriów uznawania tworów przyrody żywej i nieożywionej za pomniki przyrody (Dz.U. z 2017 r., poz. 2300). *Dziennik Ustaw RP*.
- Minister Zdrowia. (2019, 17 grudnia). Rozporządzenie w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku (Dz.U. z 2019 r., poz. 2448). *Dziennik Ustaw RP*.
- Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi. (2025). *Emisje gazów cieplarnianych z rolnictwa – udział metanu w 2023 r.* Pobrane z: <https://www.gov.pl/web/rolnictwo/emisje-gazow-cieplarnianych-ghg-z-rolnictwa>.

- Mohamed, A.-M. O., El-Sayed, M., Ali, R. (2025). Environmental management and decarbonization nexus: A pathway to the energy sector's sustainable futures. *World*, 6(1), 13. <https://doi.org/10.3390/world6010013>.
- Moltames, R., Naghavi, M.S., Silakhori, M., Noorollahi, Y., Yousefi, H., Hajiaghaei-Keshteli, M., Azizimehr, B. (2022). Multi-criteria decision methods for selecting a wind farm site using GIS. *Sustainability*, 14(22), 14742. <https://doi.org/10.3390/su142214742>.
- Muhammad, S., Ali, T., Khan, Y., Abdullah, S. (2024). Optimal photovoltaic location selection systems through TOPSIS, AHP, and GIS techniques: a case study in Pakistan. *The European Physical Journal Plus*, 139(12). <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-024-05860-2>
- Munyaka, J.-C. B., Chenal, J., de Roulet, P.T.H., Mandal, A.K., Pudasaini, U., Otieno, N.O. (2023). Multi-level participatory GIS framework to assess mobility needs and transport barriers in rural areas: A case study of rural Mumias East, a sub-county of Kakamega, Kenya. *Sustainability*, 15(9344). <https://doi.org/10.3390/su15129344>.
- Nashi, R., Ouakil, H. (2025). Energy price shocks and current account balances: What role for economic structure, energy dependency and renewable energy development? *Sustainable Futures*, 9, 100402. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100402>.
- National Renewable Energy Laboratory (Smith, B.L., Sekar, A., Mirletz, H., Heath, G., Margolis, R.). (2024). *An updated life cycle assessment of utility-scale solar photovoltaic systems installed in the United States*. Pobrane z: <https://docs.nrel.gov/docs/fy24osti/87372.pdf>.
- Njoku, E.A., Akpan, P.E., Effiong, A.E., Babatunde, I.O., Owoseni, O.A., Olanrewaju, J.O. (2022). Evaluation of geostatistical and multiple regression models for assessment of spatial characteristics of carbon monoxide concentration in a data-limited environment. *Applied Geography*, 149, 102816. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102816>.
- Nowak, M.J., Monteiro, R., Olcina-Cantos, J., Vagiona, D.G. (2023). Spatial planning response to the challenges of climate change adaptation: An analysis of selected instruments and good practices in Europe. *Sustainability*, 15(13), 10431. <https://doi.org/10.3390/su151310431>.
- Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 24 stycznia 2024 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo energetyczne. (2024). *Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej*.
- Ociepa-Kubicka, A., Deska, I., Ociepa, E. (2021). Organizations towards the evaluation of environmental management tools ISO 14001 and EMAS. *Energies*, 14(16), 4870. <https://doi.org/10.3390/en14164870>.
- Office of Management and Budget (OMB), CDO Council. (2018). *Phase 2 implementation guidance for the Foundations for Evidence-Based Policymaking Act*. U.S. Office of Management and Budget. Pobrane z: M-25-05-Phase-2-Implementation-of-the-Foundations-for-Evidence-Based-Policymaking-Act-of-2018-Open-Government-Data-Access-and-Management-Guidance.pdf.
- Open Geospatial Consortium (OGC). (2025). *OGC standards overview*. Open Geospatial Consortium. <https://www.ogc.org>.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2007). *Instrument mixes for environmental policy*. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264018419-en>.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2025). *Instrument mixes for environmental policy: Executive summary*. Pobrane z: <https://www.oecd.org/env/tools-evaluation/39667944.pdf>.
- Palmer, J.F. (2022). Deconstructing viewshed analysis makes it possible to construct a useful visual impact map for wind projects. *Landscape and Urban Planning*, 225, 104423. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104423>.

- Pan, Z., Zhang, L., Dong, L., Xu, W., Li, G., Yuan, Y., Wang, C., Yu, B. (2025). Exploring the seasonal impact of photovoltaic roofs on urban land surface temperature under different urban spatial forms. *Renewable Energy*, 244, 122724. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122724>.
- Pandey, A., Mannepal, P.K., Gupta, M., Srivastava, A., Bhattacharyya, A., Dangi, R., Choudhary, G. (2024). A deep learning-based hybrid CNN-LSTM model for location-aware web service recommendation. *Neural Processing Letters*, 56(2), 234. <https://doi.org/10.1007/s11063-024-11687-w>.
- Park, J., Kim, M., Hyun, C.-U. (2025). Assessing the applicability of a railway-integrated photovoltaic system for sustainable urban tourist trains. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 82, 104468. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104468>.
- Parlament Europejski i Rada. (2007, 14 marca). Dyrektywa 2007/2/WE ustanawiająca infrastrukturę informacji przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej (INSPIRE). *Dziennik Urzędowy UE*. Pobrane z: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2007/2/oj>.
- Parlament Europejski i Rada. (2011). Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2011/92/UE w sprawie oceny skutków wywieranych przez niektóre przedsięwzięcia publiczne i prywatne na środowisko. *Dziennik Urzędowy UE*.
- Parlament Europejski i Rada. (2014). Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/52/UE zmieniająca dyrektywę 2011/92/UE w sprawie oceny skutków wywieranych przez niektóre przedsięwzięcia publiczne i prywatne na środowisko. *Dziennik Urzędowy UE*.
- Parlament Europejski i Rada. (2016, 27 kwietnia). Rozporządzenie (UE) 2016/679 w sprawie ochrony osób fizycznych w związku z przetwarzaniem danych osobowych (RODO). *Dziennik Urzędowy UE*. Pobrane z: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj>.
- Parlament Europejski i Rada. (2019, 20 czerwca). Dyrektywa (UE) 2019/1024 w sprawie otwartych danych i ponownego wykorzystywania informacji sektora publicznego. *Dziennik Urzędowy UE*. Pobrane z: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/1024/oj>.
- Parlament Europejski i Rada. (2022, 14 grudnia). Dyrektywa (UE) 2022/2555 w sprawie środków na rzecz wysokiego wspólnego poziomu cyberbezpieczeństwa w całej Unii (NIS2). *Dziennik Urzędowy UE*. Pobrane z: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2555/oj>.
- Peng, K., Feng, K., Chen, B., Shan, Y., Zhang, N., Wang, P., Fang, K., Bai, Y., Zou, X., Wei, W., Geng, X., Zhang, Y., Li, J. (2023). The global power sector's low-carbon transition may enhance sustainable development goal achievement. *Nature Communications*, 14(1), 3144. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38987-4>
- Pimenta, L., Duarte, L., Teodoro, A.C., Beltrão, N., Gomes, D., Oliveira, R. (2025). GIS-based flood susceptibility mapping using AHP in the urban Amazon: A case study of Ananindeua, Brazil. *Land*, 14(8), 1543. <https://doi.org/10.3390/land14081543>.
- Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości. (2025). Pobrane z: <https://www.parp.gov.pl>.
- Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej. (2024). 700 metrów w ustawie wiatrakowej: mała poprawka – drastyczne zmiany (analiza). PSEW. <https://www.psew.pl/700-metrow-w-ustawie-wiatrakowej-mala-poprawka-drastyczne-zmiany-analiza/>
- Prieto-Amparán, J.A., Pinedo-Alvarez, A., Morales-Nieto, C.R., Valles-Aragón, M.C., Álvarez-Holguín, A., Villarreal-Guerrero, F. (2021). A regional GIS-assisted multi-criteria evaluation of site-suitability for the development of solar farms. *Land*, 10(2), 217. <https://doi.org/10.3390/land10020217>.
- PV CYCLE. (2024). *Annual report 2023*. Pobrane z: <https://www.pvcycle.org/web/content/website.annualreport/17/attachedpdf>.
- Qwaider, S., Al-Ramadan, B., Shafiullah, M., Islam, A., Worku, M.Y. (2023). GIS-based progress monitoring of SDGs towards achieving Saudi Vision 2030. *Remote Sensing*, 15(24), 5770. <https://doi.org/10.3390/rs15245770>.

- Rabbi, M.F., Popp, J., Máté, D., Kovács, S. (2022). Energy security and energy transition to achieve carbon neutrality. *Energies*, 15(21), 8126. <https://doi.org/10.3390/en15218126>.
- Rahman, M.M., Szabó, G. (2022). Sustainable urban land-use optimization using GIS-based multicriteria decision-making (GIS-MCDM) approach. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(5), 313. <https://doi.org/10.3390/ijgi11050313>.
- Ranatunga, S., Ødegård, Å., Onstein, E., Jetlund, A. (2024). Digital twins for geospatial decision making. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-4-2024, 271-278. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-2024-271-2024>.
- Rane, N.L., Günen, M.A., Mallick, S.K., Rane, J., Pande, C.B., Giduturi, M., Bhutto, J.K., Yadav, K.K., Tolche, A.D., Alreshidi, M.A. (2024). GIS-based multi-influencing factor (MIF) application for optimal site selection of solar photovoltaic power plant in Nashik, India. *Environmental Sciences Europe*, 36, 1. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00832-2>.
- Řezník, T., Raes, L., Scott, A., Lathouwer, B., Perego, A., Charvát, K., Kafka, K. (2022). Improving the documentation and findability of data services and repositories: A review of (meta)data management approaches. *Computers Geosciences*, 164, 105134. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105194>.
- Ronoh, D. (2025). Application of GIS in sub-national energy planning in Kenya – Integrating primary data into a least-cost electrification model using OnSSET (case study of Narok County, Kenya). *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 13(1), 1130549. <https://doi.org/10.46830/wriprn.23.00040>.
- Rösch, C., Fakharizadehshirazi, E., Tinsley, E. (2025). Public participation GIS scenarios for decision-making on land-use requirements for renewable energy systems. *Energy, Sustainability and Society*, 15(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s13705-025-00518-y>.
- Rozkwitalska, M. (2021). Social Learning for Energy Transition—A Literature Review. *Energies*, 14(24), 8531. <https://doi.org/10.3390/en14248531>.
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 10 sierpnia 2023 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko (Dz.U. z 2023 r., poz. 1614).
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 10 września 2019 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko (Dz.U. z 2019 r., poz. 1839).
- Saaty, T.L. (1980). The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).
- Saha, S., Kowsar, A., Debnath, S.C., Ahmed, K., Alam, F. (2025). Techno-economic analysis of integrated PV/Biogas/Wind/Hydrogen polygeneration energy systems for green transportation in Bangladesh context. *Renewable Energy Focus*, 54, 100707. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2025.100707>.
- Sainz-Ortiz, E., Somohano-Rodriguez, F.M., Pascual-Muñoz, P., Arroyo, A., Manana, M. (2024). Dynamic web-based GIS tool for pre-feasibility evaluation of renewable energy projects. *Energy Conversion and Management*, 322, 119162. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119162>.
- Salim, S.S., Luxembourg, S.L., Smekens, K., Dalla Longa, F., van der Zwaan, B. (2026). Pathways to climate neutrality: Europe's energy transition under the Green Deal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226(Part B), 116272. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116272>.
- Santos, M.M., Vaz Ferreira, A.T., Lanzinha, J.C.G. (2023). Overview of Energy Systems in Africa: A Comprehensive Review. *Solar*, 3(4), 638-649. <https://doi.org/10.3390/solar3040034>.
- Seifert, C., Damert, M., Guenther, E. (2020). Environmental management in German hospitals—A classification of approaches. *Sustainability*, 12(11), 4428. <https://doi.org/10.3390/su12114428>.
- Shi, F., Li, X., Li, M. I., Bai, B. (2025). Site selection strategy for photovoltaic power plants construction on gangue hills: An integrated method based on GIS and AHP-TOPSIS. *Energy Strategy Reviews*, 59, 101722. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101722>.

- Siakas, D., Rahanu, H., Georgiadou, E., Siakas, K., Lampropoulos, G. (2025). Positive energy districts enabling smart energy communities. *Energies*, 18(12), 3131. <https://doi.org/10.3390/en18123131>.
- Silva, C., Magano, J., Moskalenko, A., Nogueira, T., Dinis, M.A.P., Pedrosa e Sousa, H.F. (2020). Sustainable management systems standards (SMSS): Structures, roles, and practices in corporate sustainability. *Sustainability*, 12, 5892. <https://doi.org/10.3390/su12155892>.
- Singha, C., Rana, V.K., Pham, Q.B., Nguyen, D.C., Łupikasza, E. (2024). Integrating machine learning and geospatial data analysis for comprehensive flood hazard assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 48497-48522. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34286-7>.
- Siwkowska, A. (2023). Proces inwestycyjno-budowlany dla instalacji OZE. W: *Ochrona środowiska* (ss. 11-108). Warszawa: C.H. Beck.
- Skopeliti, A., Stratigea, A., Krassanakis, V., Lagarias, A. (2025). Geographic information systems and cartography for a sustainable world. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(7), 254. <https://doi.org/10.3390/ijgi14070254>.
- Smal, T., Wieprow, J. (2023). Energy Security in the Context of Global Energy Crisis: Economic and Financial Conditions. *Energies*, 16(4), 1605. <https://doi.org/10.3390/en16041605>.
- Smith de, M.J., Goodchild, M.F., Longley, P.A. (2020). *Geospatial analysis: A comprehensive guide to principles, techniques and software tools* (6th ed.). The Winchelsea Press.
- Sobolewska, A., Sobolewski, M. (2017). Wpływ regulacji prawnych na gospodarkę odpadami komunalnymi w wybranych gminach wiejskich. *Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego. Ekonomia i Organizacja Gospodarki Żywnościowej*, 120, 89-95. <https://doi.org/10.22630/EIOGZ.2017.120>.
- SolarPower Europe. (2024). *End-of-life management: Best practice guidelines (v1.0)*. Pobrane z: <https://www.solarpowereurope.org/insights/thematic-reports/end-of-life-management-best-practice-guidelines-version-1-0>.
- SolarPower Europe. (2025). *Global market outlook for solar power 2025-2029*. Pobrane z: <https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2025-2029/detail>.
- Šoltésová, M., Iannaccone, B., Štrba, L., Sidor, C. (2025). Application of GIS technologies in tourism planning and sustainable development: A case study of Gelnica. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(3), 120. <https://doi.org/10.3390/ijgi14030120>.
- Sompolska-Rzechuła, A., Bąk, I., Becker, A., Marjak, H., Perzyńska, J. (2024). The use of renewable energy sources and environmental degradation in EU countries. *Sustainability*, 16(23), 10416. <https://doi.org/10.3390/su162310416>.
- Sołowiej, P., Pochwatka, P., Wawrzyniak, A., Łapiński, K., Lewicki, A., Dach, J. (2021). The Effect of Heat Removal during Thermophilic Phase on Energetic Aspects of Biowaste Composting Process. *Energies*, 14(4), 1183. <https://doi.org/10.3390/en14041183>.
- Sovacool, B.K. (2011). Evaluating Energy security in the Asia Pacific: Toward a more comprehensive approach. *Energy Policy*, 39(11), 7472-7479. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.10.008>.
- SOPO – System Osłony Przeciwoświatowej. Pobrane z: <https://mapa.osuwiska.pgi.gov.pl/>.
- Stoeglehner, G. (2020). Integrated spatial and energy planning: A means to reach sustainable development goals. *Evolutionary and Institutional Economics Review*, 17(2), 473-486. <https://doi.org/10.1007/s40844-020-00160-7>.
- Stojanovic, N., Stojanovic, D. (2013). High-performance computing in GIS: Techniques and applications. *International Journal of Reasoning-Based Intelligent Systems*, 5(1), 42-49. <https://doi.org/10.1504/IJRIS.2013.055126>.
- Strategic Energy. (2025, April). *Poland exceeds 22 GW in solar capacity and secures 10.8 GW in wind: System stability under pressure?* Pobrane z: <https://strategicenergy.eu/poland-system-stability-under-pressure/>.

- Streimikiene, D., Siksnelyte-Butkiene, I., Lekavicius, V. (2023). Energy Diversification and Security in the EU: Comparative Assessment in Different EU Regions. *Economies*, 11(3), 83. <https://doi.org/10.3390/economies11030083>.
- Sullivan, J., Witayangkum, A. (2025). Automatic estimation of solar rooftops and power generation from publicly available satellite imagery through georeferencing and large-scale support. *IEEE Access*, 13, 20740-20749. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3535817>.
- Szeląg-Sikora, A., Oleksy-Gębczyk, A., Ciula, J., Cembruch-Nowakowski, M., Peter-Bombik, K., Rydwańska, P., Załona, T. (2025). Energy Transformation Within the Framework of Sustainable Development and Consumer Behavior. *Energies*, 18(1), 75. <https://doi.org/10.3390/en18010075>.
- Taiwo, E.O., Tozer, L. (2025). Community energy justice: A review of origins, convergence, and a research agenda. *Energy Research Social Science*, 123, 104036. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.104036>.
- Tănăsie, A.V., Năstase, L.L., Vochița, L.L., Manda, A.M., Bototeanu, G.I., Sitnikov, C.S. (2022). Green Economy–Green Jobs in the Context of Sustainable Development. *Sustainability*, 14(8), 4796. <https://doi.org/10.3390/su14084796>.
- Tang, A., Zhu, Y., Gu, W., Wang, C. (2024). Air quality benefits of renewable energy: Evidence from China's renewable energy heating policy. *Sustainability*, 16(19), 9268. <https://doi.org/10.3390/su16219268>.
- Taoukidou, N., Karpouzou, D., Georgiou, P. (2025). Flood hazard assessment through AHP, fuzzy AHP, and frequency ratio methods: A comparative analysis. *Water*, 17(14), 2155. <https://doi.org/10.3390/w17142155>.
- Temesgen, A.L., Bekele, G. (2025). GIS-based assessment of economically feasible off-grid mini-grids in Ethiopia. *Discover Energy*, 5(1), 12. <https://doi.org/10.1007/s43937-025-00073-9>.
- Teraz Środowisko. (2023). *Poprawka do ustawy wiatrakowej. Minimalna odległość wyniesie 700 m.* Teraz-Środowisko. <https://www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/poprawka-ustawa-wiatrakowa-700-m-12967.html>.
- Teraz Środowisko. (2024). *Biogaz i biometan w Polsce 2024–INSIGHT (wywiad i zestawienia KOWR)*. Pobrane z: <https://www.teraz-srodowisko.pl/publikacje/biogaz-biometan-insight-Polska-2024/teraz-srodowisko-publicacja-biogaz-biometan-insight-Polska-2024.pdf>.
- Tesfaye, W., Elias, E., Warkineh, B., Tekalign, M., Abebe, G. (2024). Modeling of land use and land cover changes using Google Earth Engine and machine learning approach: Implications for landscape management. *Environmental Systems Research*, 13(1), 31. <https://doi.org/10.1186/s40068-024-00366-3>.
- Tian, A., Zünd, D., Bettencourt, L.M.A. (2021). Estimating rooftop solar potential in urban environments: A generalized approach and assessment of the Galápagos Islands. *Frontiers in Sustainable Cities*, 3, 632109. <https://doi.org/10.3389/frsc.2021.632109>.
- Tinsley, E., Froidevaux, J.S.P., Jones, G. (2024). The location of solar farms within England's ecological landscape: Implications for biodiversity conservation. *Journal of Environmental Management*, 372, 123372. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123372>.
- Todaro, N.M., Daddi, T., Testa, F., Iraldo, F. (2019). Organization and management theories in environmental management systems research: A systematic literature review. *Business Strategy and the Environment*, 3(1), 39-54. <https://doi.org/10.1002/bsd.2.77>.
- Tolvanen, A., Routavaara, H., Jokikokko, M., Rana, P. (2023). How far are birds, bats, and terrestrial mammals displaced from onshore wind power development? – A systematic review. *Biological Conservation*, 287, 110246. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110246>.
- Tourais, P., Videira, N. (2016). Why, how and what do organizations achieve with the implementation of environmental management systems?—Lessons from a comprehensive review on the Eco-Management and Audit Scheme. *Sustainability*, 8(3), 283. <https://doi.org/10.3390/su8030283>.

- UNECE. (2021). *Life cycle assessment of electricity generation options* (ss. 26-27: wind LCA ranges). Pobrane z: https://unece.org/sites/default/files/2021-11/LCA_final.pdf.
- United Nations Committee of Experts on Global Geospatial Information Management (UN-GGIM). (2025). *Integrated Geospatial Information Framework (IGIF)*. United Nations Statistics Division. <https://ggim.un.org>.
- Uribe, D.F., Ortiz-Marcos, I., Uruburu, Á. (2018). What is going on with stakeholder theory in project management literature? A symbiotic relationship for sustainability. *Sustainability*, 10(1300). <https://doi.org/10.3390/su10041300>.
- Urząd Regulacji Energetyki [URE]. (2025). *Funkcjonowanie elektroenergetyki i sektora gazownictwa w Polsce w latach 2023-2024*. Pobrane z: Funkcjonowanie elektroenergetyki i sektora gazownictwa w Polsce w latach 2023-2024 – najnowszy raport Prezesa URE – Aktualności – Urząd Regulacji Energetyki.
- Urząd Regulacji Energetyki. (2025). *W 2024 r. w małych instalacjach OZE wyprodukowano niemal 4,8 TWh energii (raport)*. Pobrane z: <https://www.ure.gov.pl/pl/urzad/informacje-ogolne/aktualnosci/12642%2CRaport-URE-w-2024-r-w-malych-instalacjach-OZE-wyprodukowano-niemal-48-TWh-energi.pdf>.
- Ustawa – Prawo budowlane z dnia 7 lipca 1994 r. (Dz.U. z 1994 r., Nr 89, poz. 414; t.j. Dz.U. z 2025 r., poz. 418).
- Ustawa – Prawo geodezyjne i kartograficzne z dnia 17 maja 1989 r. (Dz.U. z 1989 r., Nr 30, poz. 163).
- Ustawa o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych z dnia 20 maja 2016 r. (Dz.U. z 2016 r., poz. 961).
- Ustawa o ochronie przyrody z dnia 16 kwietnia 2004 r. (Dz.U. z 2004 r., Nr 92, poz. 880; t.j. Dz.U. z 2024 r., poz. 1478).
- Ustawa o odnawialnych źródłach energii z dnia 20 lutego 2015 r. (Dz.U. z 2015 r., poz. 478).
- Ustawa o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym z dnia 27 marca 2003 r. (Dz.U. z 2003 r., Nr 80, poz. 717).
- Ustawa o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko z dnia 3 października 2008 r. (Dz.U. z 2008 r., Nr 199, poz. 1227, z późn. zm.).
- Ustawa o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (t.j. Dz.U. z 2024 r., poz. 1112).
- Ustawa o ułatwieniach w przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie biogazowni rolniczych, a także ich funkcjonowaniu z dnia 13 lipca 2023 r. (Dz.U. z 2023 r., poz. 1597).
- Ustawa o zmianie ustawy o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych oraz niektórych innych ustaw z dnia 9 marca 2023 r. (Dz.U. z 2023 r., poz. 553).
- Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. – Prawo energetyczne (Dz.U. z 2024 r., poz. 266).
- Uyan, M., Ertunc, E. (2023). GIS-based optimal site selection of the biogas facility installation using the best–worst method. *Chemical Engineering Research and Design*, 192, [in press]. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.10.058>.
- Voigt, C. C. (2024). Toward solving the global green–green dilemma between bats and wind energy. *BioScience*, 74(4), 240-253. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa084>.
- Volodzkiene, L., Streimikiene, D. (2024). Towards Energy Equity: Understanding and Addressing Multifaceted Energy Inequality. *Energies*, 17(17), 4500. <https://doi.org/10.3390/en17174500>.
- Wang, Q., Wang, X., Li, R. (2024). Geopolitical risks and energy transition: The impact of environmental regulation and green innovation. *Humanities and Social Sciences Communications*, 11, 1272. <https://doi.org/10.1057/s41599-024-03770-3>.
- Wang, S., Cao, J., Yu, P.S. (2022). Deep learning for spatio-temporal data mining: A survey. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 34(7), 3681-3700. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2020.3025580>.

- Wei, H., Yu, Q., Chen, D., Zhang, M., Guan, Q., Hang, B., Snijders, A. M., Covaci, A., Xia, Y. (2024). Energy transition in residential buildings and chronic respiratory diseases. *The Innovation*, 5(3), 100597. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100597>
- Wen, B., He, Y., Jing, X., Haroon, M. (2025). Advancing renewable energy and green finance for economic growth and ecological resilience. *Energy Strategy Reviews*, 59, 101747. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101747>.
- Wereda, W., Załona, T. (2020). Shaping the image as a management instrument in the contemporary enterprise. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*, 145, 597-611. <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2020.145.44>.
- Werner, M. (2019). Parallel processing strategies for big geospatial data. *Frontiers in Big Data*, 2, 1-12. <https://doi.org/10.3389/fdata.2019.00044>.
- Whitby, M.D., O'Mara, M.T., Huso, M., Frick, W.F. (2024). A decade of curtailment studies demonstrates a consistent reduction in bat fatalities at wind turbines in North America. *Ecology and Evolution*, 14(1), e12371. <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12371>.
- Widacki, W. (2004). Systemy informacji geograficznej w programach edukacyjnych uniwersyteckich studiów przyrodniczych w Polsce. *Roczniki Geomatyki*, 2(3), 11-23. Pobrane z: <http://rg.ptip.org.pl/index.php/rg/article/viewFile/RG2004-3-Widacki/832>
- Williams, J. (2021). Circular cities: What are the benefits of circular development? *Sustainability*, 13(10), 5725. <https://doi.org/10.3390/su13105725>.
- Wojewódzki Sąd Administracyjny w Rzeszowie. (2024, 29 maja). Wyrok WSA w Rzeszowie, II SA/Rz 381/24 (kwalifikacja biogazowni w praktyce na podstawie § 3 ust. 1 pkt 47 i pkt 54 rozporządzenia). *Inforlex*.
- World Bank, Solar Energy Research Institute of Singapore. (2019). *Where sun meets water: Floating solar handbook for practitioners*. World Bank.
- Wu, M., Lv, G., Qiao, L., Roth, R., Zhu, A.-X. (2024). Green cartography: A research agenda towards sustainable development. *Annals of GIS*, 30(1), 15-34. <https://doi.org/10.1080/19475683.2024.2305321>.
- WysokieNapięcie.pl. (2025). Produkcja energii elektrycznej w Polsce w 2024 r. – struktura i zmiany w miksie energetycznym. Pobrane z: <https://wysokienapiecie.pl>.
- Ye, C., Wu, H., Oguchi, T., Tang, Y., Pei, X., Wu, Y. (2025). Physically-based and data-driven models for landslide susceptibility: Principles, applications, challenges. *Remote Sensing*, 17(13), 2280. <https://doi.org/10.3390/rs17132280>.
- Yousefi, H., Motlagh, S.G., Montazeri, M. (2022). Multi-criteria decision-making system for wind farm site-selection using geographic information system (GIS): Case study of Semnan Province, Iran. *Sustainability*, 14(13), 7640. <https://doi.org/10.3390/su14137640>.
- Yuan, Z., Wen, B., He, C., Zhou, J., Zhou, Z., Xu, F. (2022). Application of multi-criteria decision-making analysis to rural spatial sustainability evaluation: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 6572. <https://doi.org/10.3390/ijerph19116572>.
- Zaresefat, M., Derakhshani, R., Griffioen, J. (2024). Empirical Bayesian kriging, a robust method for spatial data interpolation of a large groundwater quality dataset from the Western Netherlands. *Water*, 16, 2581. <https://doi.org/10.3390/w16182581>.
- Zhang, X., Xiang, L., Yue, P., Gong, J., Wu, H. (2024). Open Geospatial Engine: A cloud-based spatiotemporal computing platform. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-4-2024, 453-459. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-2024-453-2024>.
- Zou, L., Song, Y., Cervone, G. (2024). Geospatial big data: Theory, methods, and applications. *Annals of GIS*, 30(4), 411-415. <https://doi.org/10.1080/19475683.2024.2419749>.

Spis rysunków

Rysunek 1. Trzy filary transformacji energetycznej: dekarbonizacja, wymiar przestrzenny i wielopoziomowość polityk.	12
Rysunek 2. Główne elementy bezpieczeństwa energetycznego.....	14
Rysunek 3. Wymiar techniczny bezpieczeństwa energetycznego.	15
Rysunek 4. Główne aspekty wymiaru ekonomicznego transformacji energetycznej bazującej na odnawialnych źródłach energii.	17
Rysunek 5. Elementy społecznego wymiaru bezpieczeństwa energetycznego.....	19
Rysunek 6. Główne elementy środowiskowego i politycznego wymiaru bezpieczeństwa energetycznego.	21
Rysunek 7. Polityka unijna i dane przestrzenne – kluczowe regulacje.	23
Rysunek 8. Czynniki wspierające i wyzwania we wdrażaniu polityki UE.	27
Rysunek 9. Udział odnawialnych źródeł w produkcji energii elektrycznej w Polsce w 2024 roku.....	29
Rysunek 10. Roczna nowo zainstalowana moc PV na świecie w latach 2015-2024.	31
Rysunek 11. Społeczno-przestrzenne aspekty rozwoju fotowoltaiki.	33
Rysunek 12. Główne strumienie substratów wykorzystywanych do produkcji biogazu.	36
Rysunek 13. Podstawowe kryteria geoinformacyjne przestrzennego planowania biogazowni.	38
Rysunek 14. Wskaźniki akceptacji społecznej.	42
Rysunek 15. Schemat korzyści wynikających z zastosowania hybrydowych systemów odnawialnych źródeł energii.	46
Rysunek 16. Główne cele wprowadzenia ustawy OZE.....	53
Rysunek 17. Zastosowanie GIS w planowaniu lokalizacji odnawialnych źródeł energii.	60
Rysunek 18. Integracja GIS i AI w optymalizacji rozmieszczenia infrastruktury OZE	63
Rysunek 19. Kategorie kryteriów decydujących o lokalizacji inwestycji OZE.	67
Rysunek 20. Proces ETL na przykładzie danych legislacyjnych z ISAP.	73
Rysunek 21. Teren inwestycji z zaznaczonymi na czerwono granicami na mapie topograficznej.	92
Rysunek 22. Teren obiektu z zaznaczonymi granicami na ortofotomapie.	92
Rysunek 23. Miejscowy plan zagospodarowania przestrzennego obejmujący teren inwestycji z dnia 05.09.2025 roku.....	93
Rysunek 24. Legenda do MPZP Stary Sącz z dnia 05.09.2025 roku.	94
Rysunek 25. Mapa topograficzna form ochrony przyrody w Starym Sączu.....	95
Rysunek 26. Mapa topograficzna parków krajobrazowych i rezerwatów.....	96
Rysunek 27. Mapa topograficzna Parków Narodowych i Zespołów Przyrodniczo-Krajobrazowych.	97
Rysunek 28. Numeryczny profil terenu inwestycyjnego.	98
Rysunek 29. Wizualizacja numerycznego modelu terenu (NMT) w postaci zacieniowania – Stary Sącz.	99
Rysunek 30. Lokalizacja drzewostanu w otoczeniu działki inwestycyjnej wraz z pomiarami odległości.	100
Rysunek 31. Symulacja zagrożenia powodziowego – scenariusz Q1 102	102
Rysunek 32. Symulacja zagrożenia powodziowego – scenariusz Q10 102	102
Rysunek 33. Mapa czynnych osuwisk z oznaczoną działką inwestycyjną.	103
Rysunek 34. Profil wysokościowy działki inwestycyjnej.	104

Rysunek 35. Mapa rodzajów gleb na działce inwestycyjnej wraz z granicami działek.	105
Rysunek 36. Droga gminna zapewniająca dostęp do działki inwestycyjnej.	106
Rysunek 37. Ortofotomapa terenu inwestycji z zaznaczonymi granicami działek ewidencyjnych i strefami odległościowymi.	107
Rysunek 38. Mapa nasłonecznienia Polski z oznaczeniem miejscowości inwestycyjnej	108
Rysunek 39. Mapa zasobów energii wiatru w Polsce.....	111
Rysunek 40. Mapa wrażliwości ornitologicznej Polski.....	112
Rysunek 41. Schemat koncepcyjny Systemu Dynamicznego Generowania Warunków Brzegowych.....	117
Rysunek 42. Struktura Bazy Wiedzy.	118
Rysunek 43. Główne kategorie wiedzy eksperckiej w systemie.	119
Rysunek 44. Relacje pomiędzy aktami prawnymi a systemem wspierania analizy inwestycji OZE.....	120
Rysunek 45. Proces dynamicznego douczania modelu LLM.....	129
Rysunek 46. Architektura systemu RAG i integracja z Bazą Wiedzy oraz źródłami prawnymi.....	130
Rysunek 47. Etapy przekształcania dokumentów prawnych w systemie RAG.	131
Rysunek 48. Proces douczania modelu z wykorzystaniem LoRA.	133
Rysunek 49. Architektura hybrydowego agenta GIS.	141
Rysunek 50. Proces realizacji analizy zasobów.....	143
Rysunek 51. Poziomy funkcjonowanie Apache Sedoma.	144
Rysunek 52. Architektura hybrydowego agenta GIS.	145
Rysunek 53. Hierarchiczna struktura procesu decyzyjnego wyboru najbardziej optymalnych klastrów.....	153
Rysunek 54. Analiza SWOT opracowanego systemu.	158
Rysunek 55. Główne grupy odbiorców i interesariuszy systemu.....	160
Rysunek 56. Ekran systemu agentowego analizy wymagań OZE z wykorzystaniem modelu Gemma3 12b OZE_LoRA.....	163
Rysunek 57. Zrzut ekranu interfejsu konwersacyjnego SDGWB.	164
Rysunek 58. Interaktywny widok systemu selekcji działek inwestycyjnych.....	165
Rysunek 59. Interaktywna mapa OSM z warstwami tematycznymi i wynikami klasteryzacji działek.	166
Rysunek 60. Monitor zasobów obliczeniowych (GPU, CPU, pamięć) podczas douczania modelu Gemma-3-12b-it metodą LoRA.	167
Rysunek 61. Rejestry dokumentujące przebieg douczania modelu Gemma-3-12B-it metodą LoRA.	168
Rysunek 62. Analiza poziomu obciążenia CPU przez kontenery w poszczególnych etapach procesu.	170
Rysunek 63. Analiza zużycia RAM przez kontenery w poszczególnych etapach procesu. ...	171

Spis tabel

Tabela 1. Polityka i cele UE	22
Tabela 2. Programy finansowania transformacji – podsumowanie.....	25
Tabela 3. Trendy i uwarunkowania transformacji energetycznej w Polsce.....	28
Tabela 4. Konfiguracje hybrydowych źródeł energii odnawialnej – działanie i przykłady zastosowań.....	48
Tabela 5. Terminologia systemów informacji przestrzennej	57
Tabela 6. Modele danych przestrzennych i struktur	57
Tabela 7. Funkcje, analizy i wizualizacja.....	58
Tabela 8. Zastosowanie SIP.....	58
Tabela 9. SIP i dostęp do danych.....	59
Tabela 10. Obszary wykorzystania ML i LLM oraz ich wpływ na podejmowanie decyzji	64
Tabela 11. Walidacja, analiza wrażliwości i niepewności w ocenie lokalizacji	70
Tabela 12. Główne komponenty ekosystemu Apache Spark i ich zastosowania w analizie dokumentów prawnych	74
Tabela 13. Zalety i ograniczenia Apache Spark	75
Tabela 14. Operacje i metody analizy przestrzennej w Apache Sedona	77
Tabela 15. Wybrane algorytmy klasteryzacji i ich zastosowania	79
Tabela 16. Działki wraz z powierzchnią wchodzące w skład nieruchomości planowanej inwestycji.....	91
Tabela 17. Zbiorcze zestawienie wyników analizy środowiskowej i przestrzennej planowanej instalacji hybrydowej OZE w Starym Sączu	114
Tabela 18. Główne elementy struktury JSON dla metryk odległości OZE.....	121
Tabela 19. Elementy rozszerzonej struktury JSON dla relacji odległościowych instalacji odległości OZE.....	123
Tabela 20. Pytania aktualizacyjne ukierunkowane na identyfikację modyfikacji regulacyjnych	126
Tabela 21. Struktura listy sygnałów wraz z charakterystyką	139
Tabela 22. Struktura listy sygnałów wraz z charakterystyką	145
Tabela 23. Funkcje pomocnicze wykorzystywane w procedurze klasteryzacji wraz z ich opisem i znaczeniem.	146
Tabela 24. Kryteria lokalizacyjne dla inwestycji w odnawialne źródła energii.....	152
Tabela 25. Macierz kryteriów wyboru lokalizacji.....	154
Tabela 26. Korzyści zastosowania automatycznej analizy prawnej i środowiskowej dla inwestorów oraz administracji publicznej	157
Tabela 27. Główne elementy środowiska programowego.....	161
Tabela 28. Czas realizacji procesu od momentu zgromadzenia wszystkich wymagań.....	169
Tabela 29. Średni czas realizacji pełnego procesu wraz z klasteryzacją.....	170
Tabela 30. Prezentacja konsumpcji zasobów przez poszczególne aplikacje wchodzące w skład rozwiązania	171
Tabela 31. Sumaryczne zużycie zasobów w poszczególnych etapach procesu	172

Wykaz ważniejszych skrótów

Skróty w języku polskim

BDL GUS – Bank Danych Lokalnych Głównego Urzędu Statystycznego
BIP – Biuletyn Informacji Publicznej
BW – Baza Wiedzy
Dz.U. – Dziennik Ustaw
DUŚ – Decyzja o Środowiskowych Uwarunkowaniach
GDOŚ – Geoportal Krajowy Geoserwis
EEFR – Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego
ISAP – Internetowy System Aktów Prawnych
KOWR – Krajowy Ośrodek Wsparcia Rolnictwa
KSE – Krajowy System Energetyczny
MPZP – Miejscowy Plan Zagospodarowania Przestrzennego
NMT – Numeryczny Model Terenu
OOŚ – Ocena Oddziaływania na Środowisko
OZE – Odnawialne Źródła Energii
PZGiK – Państwowy Zasób Geodezyjny i Kartograficzny
SDGWB – System Dynamicznego Generowania Warunków Brzegowych
SIP – Systemy Informacji Przestrzennej
SIT – System Informacji o Terenie
UE – Unia Europejska

Skróty w języku angielskim

AHP – Analytic Hierarchy Process
AI - Artificial Intelligence
API – Application Programming Interface
BESS – Battery Energy Storage System
CCS - Carbon Capture and Storage
CHP – Combined Heat and Power
CBAM – Carbon Border Adjustment Mechanism
CSP – Concentrated Solar Power
CNN-LSTM – Convolutional Neural Network- Long Short-Term Memory
DBSCAN – Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise
DSR – Design Science Research
ELI – European Legislation Identifier
EMAS – Eco-Management and Audit Scheme
EMS – Environmental Management System
ETL – Extract – Transform – Load
EPSG – European Petroleum Survey Group
ESG – Environmental, Social, Governance
FOSS – Free and Open Source Software
FPV – Floating Photovoltaics

GIS – Geographic Information System
IEA – International Energy Agency
IRENA – International Renewable Energy Agency
JSON – JavaScript Object Notation
LCA – Life Cycle Assessment
LiDAR – Light Detection and Ranging
LLM – Large Language Model
LoRA – Low-Rank Adaptation
MCDA – Multi Criteria Decision Analysis
MIF - Multi-Influencing Factor
ML – Machine Learning
NLP – Natural Language Processing
OGC – Open Geospatial Consortium
OSM – Open Street Map
PV – Photovoltaic
RED II – Renewable Energy Directive II
RAG – Retrieval-Augmented Generation
RDD – Resilient Distributed Dataset
SQL – Structured Query Language
TES – Thermal Energy Storage
TOPSIS – Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution