



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Politechnika Świętokrzyska
Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego

Kierunek studiów:
Inżynieria Danych

Małgorzata Sokała

Materiały dydaktyczne do przedmiotu

GEOPRZESTRZENNE BAZY DANYCH

opracowane w ramach realizacji Projektu
**„Dostosowanie kształcenia
w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb
współczesnej gospodarki”**
FERS.01.05-IP.08-0234/23

Kielce, 2025





Spis treści

1.	Wprowadzenie do systemów GIS.....	4
2.	Reprezentacja danych przestrzennych – modele danych	7
2.1.	Rastrowy model danych	8
2.2.	Wektorowy model danych	10
2.3.	Reprezentacja pola	11
3.	Sąsiedztwo i odległość obiektów przestrzennych.....	13
3.1.	Odległość obiektów przestrzennych	13
3.2.	Sąsiedztwo obiektów przestrzennych.....	14
3.3.	Macierze wag przestrzennych.....	16
4.	Wizualizacja danych przestrzennych.....	20
4.1.	Kartogram	22
4.2.	Kartodiagram.....	22
4.3.	Mapy izolinii.....	24
4.4.	Mapy kropkowe	25
4.5.	Mapy sygnatur.....	26
4.6.	Mapy chorochromatyczne	26
4.7.	Format shapefile.....	27
5.	Analizy przestrzenne w GIS	28
5.1.	Zasady analizy badawczej w GIS.....	29
5.2.	Wybrane metody analizy danych przestrzennych	31
5.2.1.	Metody analizy topologicznej i relacyjnej	32
5.2.2.	Metody analizy statystycznej i geostatystycznej.....	32
5.2.3.	Metody analizy sieciowej.....	33
5.2.4.	Metody modelowania przestrzennego i symulacji	33
5.2.5.	Metody analizy czasowo-przestrzennej.....	34
5.2.6.	Metody analizy wielokryterialnej.....	34
	Bibliografia.....	35



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Materiały dydaktyczne objęte licencją Creative Commons BY 4.0.

Licencja dostępna pod adresem: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Materiały są przeznaczone wyłącznie do użytku dydaktycznego i nie stanowią porady ani dokumentu o charakterze urzędowym. Pomimo należytej staranności przy przygotowaniu treści, autorka nie gwarantuje kompletności ani wolności od błędów i nie ponosi odpowiedzialności za jakiegokolwiek szkody wynikłe z wykorzystania informacji zawartych w niniejszym opracowaniu.





Niniejsze opracowanie stanowi uzupełniający materiał dydaktyczny do wykładów z przedmiotu Geoprzestrzenne bazy danych GIS. Instrukcje do zajęć laboratoryjnych wraz z niezbędnymi danymi są dostępne dla studentów na platformie Moodle w kursie przedmiotu <https://wzimk-moodle.tu.kielce.pl/course/index.php?categoryid=10>

1. Wprowadzenie do systemów GIS

Obserwowany w ostatnich latach znaczący wzrost znaczenia geoinformacji spowodował gwałtowny rozwój systemów informacji geograficznej (*GIS* – *Geographic Information Systems*) i ich coraz powszechniejsze wykorzystanie w analizach przestrzennych, zarządzaniu środowiskiem, planowaniu przestrzennym, zarządzaniu zasobami oraz w wielu innych dziedzinach interdyscyplinarnych.

GIS to środowisko (system) komputerowe, które integruje narzędzia do pozyskiwania, przechowywania, analizowania i wizualizacji danych o określonej lokalizacji przestrzennej. Z jednej strony GIS to narzędzie technologiczne — oprogramowanie, bazy danych, sprzęt komputerowy — z drugiej strony to system organizacyjny, wykorzystujący zasoby ludzkie i procedury, które sprawiają, że dane przestrzenne mogą być efektywnie przetwarzane i wykorzystywane do wspomagania podejmowania decyzji (Ali, 2020).

Systemy GIS można klasyfikować ze względu na różne kryteria: technologiczne, funkcjonalne, przestrzenne, według skali działania. W tabeli 1 zestawione zostały główne klasyfikacje systemów GIS.

Tabela 1 Podstawowe klasyfikacje systemów GIS

Kryterium klasyfikacji	Kategorie GIS	Charakterystyka
Architektura / sposób dostępu użytkownika do danych	Desktop	Oprogramowanie jest instalowane lokalnie na komputerze użytkownika. Może być wykorzystywane do analiz przestrzennych, tworzenia map, itp. Przykłady: ArcGIS Desktop, QGIS, GRASS GIS.
	Client–Server	Dane przechowywane są na serwerze, z którego są udostępniane usługi a klient (np. aplikacja desktopowa) jedynie łączy się z nimi. Przykłady: ArcGIS Server, GeoServer.
	Web	System dostępny z poziomu przeglądarki internetowej, udostępniający mapy i analizy przez sieć. Przykłady: ArcGIS Online, Mapbox, Google Maps.



Kryterium klasyfikacji	Kategorie GIS	Charakterystyka
Architektura / sposób dostępu użytkownika do danych	Mobilny	Aplikacje GIS działające na smartfonach i tabletach, często zintegrowane z GPS i czujnikami, umożliwiające bezpośrednie zbieranie danych terenowych, inspekcje, monitoring środowiska. Przykłady: ArcGIS Navigator, QField (dla QGIS)
	Cloud	Dane i aplikacje przechowywane w infrastrukturze chmurowej.
Model danych	Wektorowy	Dane reprezentowane są w postaci struktur geometrycznych takich jak : punkty, linie, poligony (wieloboki). Każdy obiekt posiada współrzędne i atrybuty.
	Rastrowy	Dane reprezentowane są w postaci regularnej siatki komórek (piksele), którym przyporządkowuje się określone wartości atrybutu (np. wysokość, natężenie temperatury).
Zasięg przestrzenny i skala szczegółowości	Lokalny/Instytucjonalny	Systemy GIS działające w obrębie jednej instytucji, o zasięgu lokalnym (np. dane o przystankach komunikacji miejskiej).
	Regionalny/Krajowy	Systemy obejmujące znaczne terytorium (region, kraj), integrujące dane z wielu instytucji i poziomów administracyjnych. (np. Geoportal2)
	Globalny	Systemy GIS o skali globalnej (np. platformy satelitarne, globalne bazy danych geograficznych, OpenStreetMap)
Dziedzina zastosowań	Środowiskowy	Są to systemy ukierunkowane na konkretne zastosowania, niejednokrotnie wymagające odpowiednio dostosowanych, specjalistycznych narzędzi, modeli i algorytmów.
	Urbanistyczny	
	Infrastrukturalny	
	Rolniczy	
	Wojskowy	
	Epidemiologiczny	

Źródło: Opracowanie własne na podstawie (Ali, 2020)

Kluczowymi cechami, które wyróżniają systemy GIS i decydują o ich efektywności, są:

1. **Georeferencja** – czyli przypisanie każdemu obiektowi przestrzennemu współrzędnych w określonym układzie odniesienia, dzięki czemu możliwe jest . przestrzenne łączenie danych, analiza ich wzajemnych relacji i wykonywanie zapytań topologicznych. Systemy GIS umożliwiają również wzajemną transformację układów odniesienia, co pozwala na łączenie danych pochodzących z różnych źródeł;
2. **Integracja danych różnego typu** – dane o różnym charakterze, przedstawione w postaci np. zdjęć satelitarnych, wektorów, tabel, dane



sensoryczne, mogą być łączone w jeden system, dzięki czemu możliwe jest wykonywanie analiz zjawisk w oparciu o uzupełniające się informacje;

3. **Warstwowa struktura danych** - dane w GIS są organizowane w odrębne warstwy tematyczne, np. sieci drogowe, rzeki, budynki czy pokrycie terenu. Taki sposób przedstawienia danych umożliwia analizę ich wzajemnych relacji, co pozwala na uzyskanie szczegółowych i wieloaspektowych informacji.
4. **Operacje na danych przestrzennych i topologia** – oprogramowanie GIS umożliwia wykonywanie zapytań przestrzennych i operacji topologicznych, np.: przecięcia i nakładanie warstw, buforowanie, analizy sąsiedztwa i widoczności itp.
5. **Wizualizacja kartograficzna** – narzędzia GIS pozwalają na tworzenie map i wizualizacji przestrzennych (2D, 3D) z wykorzystaniem odpowiedniej symboliki, etykietami, legendą i skalą, co ułatwia interpretację relacji przestrzennych między obiektami i umożliwia prezentację wyników analiz w przystępnej formie graficznej.
6. **Skalowalność i wydajność** – systemy GIS obsługują ogromne zbiory danych (np. zdjęcia satelitarne, modele terenu), co wymaga wydajnej analizy, efektywnego zarządzania pamięcią, optymalizacji zapytań oraz indeksowania przestrzennego.
7. **Dokładność i wiarygodność danych oraz granice błędów** – ponieważ dane przestrzenne pochodzą głównie z pomiarów to cechują się błędami pomiaru, niepewnością lokalizacji i przybliżeniami modeli. Systemy GIS umożliwiają ocenę dokładności, analizę jakości danych i zapis tych informacji w metadanych.
8. **Interaktywność i zapytania użytkownika** – użytkownik systemów GIS może zadawać zapytania przestrzenne, filtrować dane, przeglądać statystyki atrybutów (cech), dynamicznie zmieniać wygląd mapy. Zazwyczaj interfejsy GIS są przyjazne i responsywne.
9. **Skalowalność czasowa** — systemy GIS umożliwiają modelowanie przestrzenno-czasowe zjawisk lub monitorowanie trendów przestrzennych.

Systemy geoinformacyjne realizują szereg funkcji i zadań, które wspierają procesy badawcze i decyzyjne. Do najważniejszych należą (Longley, i in., 2008):

- gromadzenie i pozyskiwanie danych, ich weryfikacja i aktualizacja,
- przechowywanie i zarządzanie danymi,
- przetwarzanie danych (organizacja, analiza),
- udostępnianie i współdzielenie danych / usług,





- zastosowanie danych do modelowania obiektu/zjawisk,
- prezentacja danych posiadających odniesienie przestrzenne w żądanej postaci.

W systemach geoinformacyjnych podstawową rolę odgrywają dane przestrzenne – czyli surowe pomiary, obserwacje lub zbiory informacyjne z przypisaną do nich lokalizacją (np. mapy topograficzne, zdjęcia satelitarne, dane GPS). Dane te, poprzez organizację, analizę i interpretację, zostają przekształcone w informację geograficzną, użyteczną w kontekście podejmowania decyzji. Cały proces jest podtrzymywany przez system GIS, będący integratorem etapów: od danych → poprzez informacje → do wsparcia decyzji.

2. Reprezentacja danych przestrzennych – modele danych

Dane przestrzenne są reprezentantami (faktami) środowiska przyrodniczego łączącymi miejsce, czas i cechy (atrybuty). Atrybuty mogą mieć różny charakter, np. społeczny, gospodarczy lub fizyczny i co do zasady opisują występujące w określonym miejscu i czasie zjawiska/obiekty. Szczegółowość atrybutów zazwyczaj jest ograniczana zmiennością przestrzenną danej cechy (Longley, i in., 2008).

Ze względu na wielość i charakter atrybutów zasadne jest pogrupowanie ich w cztery podstawowe rodzaje, które zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2 Rodzaje atrybutów

Rodzaj atrybutu	Charakterystyka	Przykład
Nominalne	Służą do identyfikacji lub odróżnienia jednego obiektu od drugiego. Mogą być wyrażone w postaci liczb, liter lub kolorów. Na tych atrybutach nie wykonuje się działań arytmetycznych.	Nazwy miejscowości, numery domów.
Porządkowe	Służą do właściwego uszeregowania obiektów. Mogą być wyrażone w postaci liczb, liter. Nie wykonuje się na nich operacji arytmetycznych, ale można określać medianę lub wartość środkową.	Klasy gruntów, kategorie dróg.
Interwałowe	Są to atrybuty ilościowe, których istota sprowadza się do różnicy wartości pomiędzy obiektami.	Temperatura w skali Celsjusza.
Ilorazowe	Są to atrybuty ilościowe, dla których możliwe jest obliczenie ich wzajemnego stosunku.	Powierzchnia, liczba ludności, długość

Źródło: Opracowanie własne na podstawie (Longley, i in., 2008)

W systemach GIS występują również atrybuty danych, których nie można zakwalifikować do żadnego z przedstawionych powyżej typów. Są one uzależnione



od charakteru obiektu/zjawiska, które opisują, np. przedstawiają kierunek lub cykliczność.

Reprezentacja rzeczywistych obiektów przestrzennych określana jest przez model danych przestrzennych, od którego zależy zakres i forma reprezentowanych informacji, a w konsekwencji możliwość i efektywność ich przetwarzania. Generalnie, środowisko geograficzne może być reprezentowane przez obiekty dyskretne i przez pola. Obiekty są odróżniane na podstawie ich wymiarów topologicznych, a następnie klasyfikowane do kategorii: punkt, linia, wielobok (powierzchnia), pola natomiast są rozróżniane na podstawie zmiennej, mierzonej w każdym ich punkcie i mogącej mieć charakter nominalny, porządkowy, interwałowy, ilorazowy lub cykliczny – tak jak atrybuty. Ponieważ mamy do czynienia z dwoma typami pól: pole wektorowe (wyrażane przez wielkość i kierunek) i pole skalarne (wyrażane przez wartość), to modele reprezentujące dane przestrzenne mają taki charakter (Longley, i in., 2008).

Dane o charakterze dyskretnym lub częściowo ciągłym (drogi, sieć osadnicza) są reprezentowane przez wektorowy model danych, natomiast dane o charakterze ciągłym (pokrycie terenu) przedstawiane są w postaci modelu rastrowego. Model wektorowy często uzupełnia model rastrowy. W praktyce stosuje się konwersję rastrów na wektory (wektoryzacja) oraz wektorów na rastry (rasteryzacja), w zależności od wymagań analizy. Integracja obu modeli pozwala na bardziej kompleksowe podejście do modelowania zjawisk przestrzennych.

2.1. Rastrowy model danych

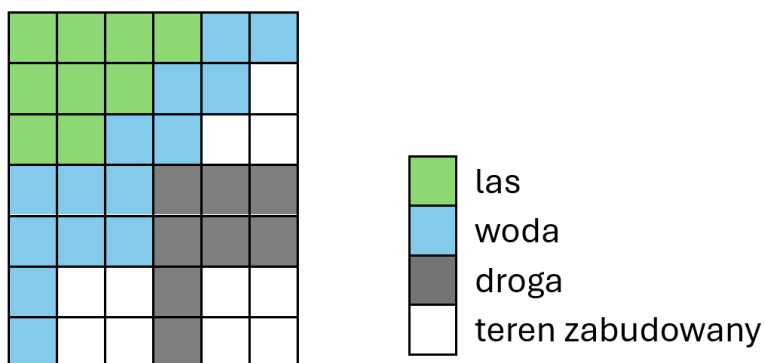
Model rastrowy opiera się na reprezentacji przestrzeni za pomocą regularnej siatki komórek (pikseli) ułożonej w postaci macierzowej, w której wiersz i kolumna macierzy rastrowej jednoznacznie definiuje położenie komórki. Każda komórka (piksel) posiada przypisaną wartość, która reprezentuje wybraną cechę obiektu lub zjawiska. Wartości te mogą być całkowitymi, zmiennoprzecinkowymi lub inną wartością reprezentującą brak danych (no data). Wartości całkowite najlepiej nadają się do reprezentowania danych kategoriowych (dyskretnych), a wartości zmiennoprzecinkowe – do reprezentowania powierzchni ciągłych. Przykład układu komórek w modelu rastrowym przedstawiono na rysunku 1

Podstawowym parametrem rastra jest jego rozdzielczość przestrzenna, czyli wymiar jednej komórki w terenie (np. 10 m, 30 m). Rozdzielczość rastra decyduje o szczegółowości odwzorowania, tzn.: im mniejsza komórka, tym większa dokładność, ale też większy rozmiar pliku. Określając rozmiar komórki uwzględnia się: rozdzielczość przestrzenną danych wejściowych, analizy które mają zostać wykonane na rastrze, czas reakcji i rozmiar wynikowej bazy danych. Zazwyczaj, dla prawidłowości odwzorowania przyjmuje się, że długość komórki nie powinna być



większa niż $\frac{1}{2}$ wymiaru najmniejszego obiektu na rastrze, natomiast przypisanie danemu pikselowi określonej wartości odbywa się poprzez wybór największego udziału albo poprzez określenie wartości środka piksela.

[Tekst alternatywny: rysunek przedstawia rastrowy model danych w postaci czterokolorowej siatki kwadratów. Kolory kwadratów są rozmieszczone nierównomiernie, a każdy kolor odpowiada innemu pokryciu terenu. Kolor zielony to las, kolor niebieski to woda, kolor szary to droga, kolor biały to teren zabudowany]



Rys. 1 Rastrowy model danych

Struktura rastrowa umożliwia prostą i jednoznaczną reprezentację pól ciągłych, takich jak wysokość terenu, temperatura, wilgotność czy pokrycie terenu.

Wśród rastrów można wyróżnić:

- **rastry modele numeryczne** (np. numeryczny model terenu – NMT), są to rastry do reprezentacji danych, zmieniających się w sposób ciągły na całej powierzchni terenu,
- **rastry tematyczne** (np. mapa użytkowania terenu, mapa gleb), są to rastry łączące dane z różnych źródeł, przetworzone w celu uzyskania zbioru przydatnego dla określonej aktywności,
- **rastry obrazowe/bazowe** (np. zdjęcia satelitarne, ortofotomapy), często będące tłem dla innych warstw obiektów.
- **rastry będące atrybutami**. (Esri, 2025)

Z punktu widzenia analiz przestrzennych rastry charakteryzują parametry takie jak:

- **rozdzielczość przestrzenna**, czyli wielkość piksela w jednostkach terenowych,



- **rozdzielczość radiometryczna**, która określa zdolność rozróżniania poziomów promieniowania (jasności) wyrażoną w bitach (np. 8-bitowe, 16-bitowe),
- **rozdzielczość spektralna**, czyli liczba i zakres kanałów rejestracji promieniowania elektromagnetycznego,
- **rozdzielczość czasowa**, czyli częstotliwość rejestracji obrazów,
- **układ odniesienia**, to jest układ współrzędnych, w którym zakotwiczone są dane rastrowe. (Narodowy System Informacji Satelitarnej, 2023)

Do najczęściej stosowanych formatów danych rastrowych należą GeoTIFF, IMG, NetCDF czy JPEG2000. Format GeoTIFF jest powszechnie stosowany ze względu na możliwość przechowywania informacji georeferencyjnych.

2.2. Wektorowy model danych

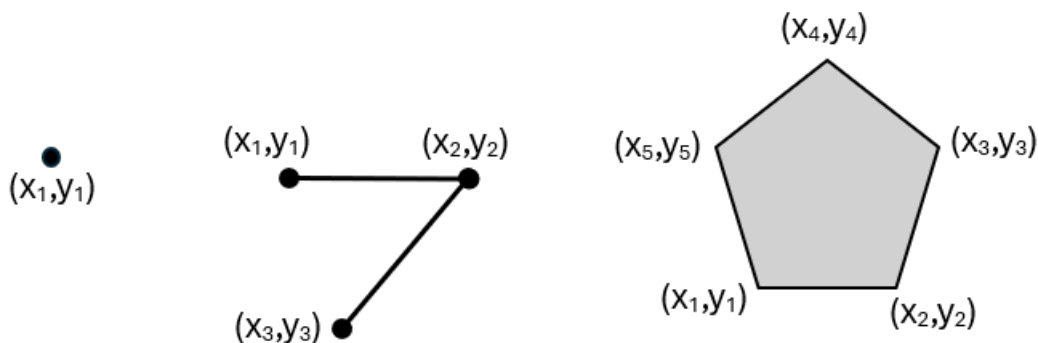
Model wektorowy jest jednym z podstawowych sposobów reprezentacji danych geograficznych w systemach informacji przestrzennej. Rzeczywiste obiekty dyskretne są w sposób naturalny odwzorowywane w zbiór jednoznacznych obiektów z określoną geometrią i atrybutami, przedstawionych w postaci: punktów, linii i poligonów (wieloboków). Szczególnym przypadkiem modelu wektorowego, jest model TIN, czyli sieć nieregularnych trójkątów, stosowany do odwzorowania powierzchni rzeźby terenu z zachowaniem informacji o strukturze i relacjach topologicznych (Gotlib, i in., 2012).

Model wektorowy jest stosowany w przypadkach, w których istotna jest precyzja kształtów obiektów. Dzięki temu modelowi łatwo jest przechowywać topologię, relacje semantyczne i szczegółowe atrybuty obiektów, przy czym każdy obiekt może być opisany dowolną liczbą atrybutów różnego typu (np. dane liczbowe, dane tekstowe, dane typu data, dźwięk, animacja).

Podstawowe elementy modelu wektorowego to punkty, linie i poligony. Punkty reprezentują obiekty jednoznacznie zlokalizowane w przestrzeni, linie – obiekty jednowymiarowe, a poligony – obiekty powierzchniowe. Topologia opisuje relacje przestrzenne między obiektami, takie jak sąsiedztwo, przyleganie czy inkluzja. Przekładowe zobrazowanie takich obiektów przedstawiono na rysunku.2.



[Tekst alternatywny: rysunek przedstawia wektorowy model danych w postaci trzech osobnych obiektów geometrycznych. Pierwszy to punkt, drugi to łamana, trzeci to wielobok. Obiekty mają podane współrzędne symboliczne.]



Rys. 2 Wektorowy model danych

Topologia to kluczowa cecha modelu wektorowego. Obejmuje reguły określające poprawność relacji między obiektami: brak nakładania się poligonów, poprawne łączenie linii w węzłach, spójność obiektów sieciowych. Algorytmy topologiczne wspierają m.in. planarizację sieci czy analizę sąsiedztwa.

Geometria obiektów wektorowych jest zawsze powiązana z danymi opisowymi, czyli atrybutami. Najczęściej stosuje się model relacyjny, w którym każdemu obiektowi przypisany jest rekord w tabeli atrybutów. Nowoczesne systemy GIS umożliwiają także stosowanie modelu obiektowego.

Najpopularniejsze formaty plikowe to Shapefile, GeoJSON, KML oraz nowoczesny standard GeoPackage. Do zaawansowanych zastosowań używa się baz danych przestrzennych takich jak PostGIS czy Oracle Spatial.

2.3. Reprezentacja pola

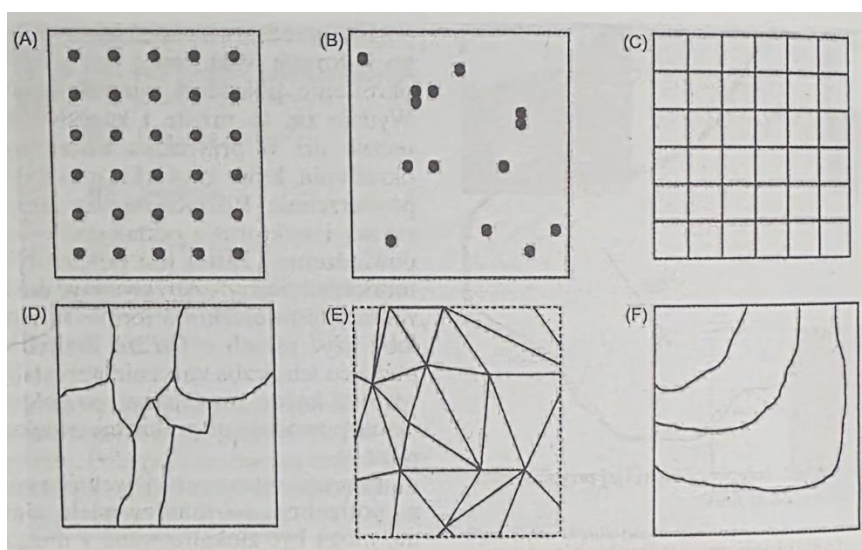
Do tworzenia reprezentacji pól w systemach GIS alternatywnie wykorzystuje się (Longley, i in., 2008):

- wartości zmiennej w każdym z regularnie rozmieszczonych w przestrzeni punktów,
- wartości zmiennej pola w każdym z nieregularnie rozmieszczonych w przestrzeni punktów,

- C. wartości zmiennej w każdym z pikseli o regularnych kształtach
- D. wartości zmiennej w każdym z pól o nieregularnych kształtach,
- E. liniową zmienność cechy wewnątrz sieci trójkątów o różnych wymiarach,
- F. wartości izolinii.

Podejścia A i C należą do metod rastrowych, podejścia B, D, E, F należą do metod wektorowych, przy czym podejście B – wykorzystuje punkty, F – wykorzystuje linie, natomiast D i E – wykorzystują wieloboki. Przykładowe zobrazowanie tych podejść przedstawiono na rysunku 3.

[Tekst alternatywny: rysunek przedstawia sześć kwadratów koloru białego, oznaczonych literami od A do F, na których przedstawiono kolejno regularnie rozmieszczone punkty w 6 wierszach i 5 kolumnach, nieregularnie rozmieszczone kilkanaście punktów, kwadraty w 6 rzędach i 6 kolumnach, przylegające do siebie, o nieregularnych kształtach wielokąty, przylegające do siebie, o nieregularnych kształtach trójkąty, trzy nieregularne, rozłączne łamane.]



Rys. 3 Sposoby reprezentacji pola (A) – regularna siatka punktów, (B) nieregularne rozmieszczenie punktów, (C) regularne komórki (piksele) (D) Wielokąty o nieregularnych kształtach, (E) nieregularne trójkąty, (F) Linie reprezentujące poziomicę.

Źródło: (Longley, i in., 2008)

Przedstawione powyżej opcje – które mogą być stosowane zależnie od potrzeb – wykorzystują wirtualne obiekty dla przedstawienia ciągłych zjawisk.



3. Sąsiedztwo i odległość obiektów przestrzennych

W analizach przestrzennych konieczne jest uwzględnienie faktu, że poszczególne obiekty nie są izolowane a interakcje między nimi mogą wpływać w sposób znaczący na inne obiekty. Zgodnie z pierwszą zasadą geografii (prawo Toblera) obiekty blisko zlokalizowane mają więcej podobieństw i związków niż obiekty odległe. Stąd wynika potrzeba określenia zasięgu (obszaru) interakcji przestrzennych zależnego od względnego położenia obiektów. W tym celu wykorzystuje się określenie odległości i sąsiedztwa między obiektami.

3.1. Odległość obiektów przestrzennych

Pojęcie odległości w przestrzeni geograficznej nie jest jednoznaczne. W zależności od przyjętego modelu przestrzeni może oznaczać zarówno fizyczną odległość geodezyjną między punktami na powierzchni Ziemi, jak i odległość euklidesową w przestrzeni kartezjańskiej, odległość sieciową w systemach transportowych czy odległość topologiczną w strukturach grafowych. Ponieważ miara odległości określa, w jaki sposób kwantyfikowane są relacje przestrzenne i jak duży wpływ mają poszczególne obiekty na siebie nawzajem, to jest kluczowa dla wielu metod analitycznych, takich jak interpolacja krigingowa, analizy autokorelacji przestrzennej, modelowanie regresyjne z komponentem przestrzennym czy analizy skupień. (Haining, 2003)

Miary odległości można przypisać do kilku kategorii, z których każda znajduje zastosowanie w innych kontekstach badawczych i wymaga odmiennych procedur obliczeniowych, są to (Haining, 2003):

1. **miary geometryczne** – oparte na modelach kartezjańskich i euklidesowych; stosowane m.in. w analizach geostatystycznych, Najczęściej stosowana jest metryka euklidesowa albo metryka miejska;
2. **miary geodezyjne** – takie jak ortodroma (odległość po powierzchni kuli) lub loxodroma (linia o stałym azymucie) uwzględniają krzywiznę powierzchni ziemi, co ma kluczowe znaczenie dla poprawnego szacowania dystansu pomiędzy punktami położonymi w różnych szerokościach geograficznych;
3. **miary sieciowe (grafowe)** – w których odległość pomiędzy dwoma punktami nie jest definiowana bezpośrednio w przestrzeni geometrycznej, lecz jako suma długości krawędzi najkrótszej ścieżki w grafie. Wybór odpowiedniej miary zależy od charakteru sieci: może to być minimalna długość trasy, minimalny czas przejazdu, koszt ekonomiczny, itp.;



4. **miary topologiczne** – stosowane w przypadkach, gdy istotne jest wyłącznie to, czy obiekty są ze sobą sąsiadujące lub połączone w strukturze przestrzennej. Są to macierze sąsiedztwa binarnego lub ważonego;
5. **miary specyficzne dla danych atrybutowych** – stosowane w przypadku, gdy konieczne jest uwzględnienie nie tylko położenia geograficznego, ale również podobieństwa cech obiektów (np. w analizach demograficznych, społecznych, środowiskowych). Przykładem jest odległość Mahalanobisa, zwana odległością statystyczną, która uwzględnia korelacje pomiędzy zmiennymi.

Dobór miary odległości powinien być podporządkowany kilku zasadniczym kryteriom: charakter przestrzeni i układu odniesienia, skala analizy, charakter analizowanego zjawiska, dostępność danych i możliwości obliczeniowe, czułość metody analitycznej na wybór miary. W praktyce analitycznej często stosuje się analizy porównawcze, w których testuje się kilka miar odległości, oceniając ich wpływ na wyniki końcowe (red. Suchecka J., 2014).

3.2. Sąsiedztwo obiektów przestrzennych

Sąsiedztwo obiektów przestrzennych stanowi jedno z kluczowych pojęć w analizach przestrzennych, geostatystyce oraz systemach informacji geograficznej (GIS). Od sposobu, w jaki definiuje się relacje pomiędzy obiektami w przestrzeni, zależy wiele wniosków badawczych dotyczących rozkładu zjawisk, ich współzależności oraz dynamiki przestrzennej (red. Suchecka J., 2014). Sąsiedztwo, to relacja pomiędzy jednostkami przestrzennymi, które spełniają określone kryteria bliskości. Może to być zarówno bliskość geometryczna oparta na odległości, bliskość logiczna, wynikająca z topologii (wspólne granice lub wierzchołki) jak i bliskość funkcjonalna, wynikająca z przepływów, sieci transportowych czy zależności społeczno-ekonomicznych (Gotlib , i in., 2012) (red. Suchecki B., 2010)

Najprostszym i najczęściej stosowanym podejściem określenia sąsiedztwa są modele geometryczne, które opierają się na pomiarach odległości między obiektami. Odległość ta może być liczona w sposób euklidesowy, geodezyjny, bądź z wykorzystaniem metryk niestandardowych, takich jak metryka Manhattan czy Minkowskiego. Sąsiedztwo w tym ujęciu definiuje się zwykle poprzez przyjęcie określonej wartości promienia bufora – obiekty znajdujące się w odległości mniejszej niż przyjęty próg uznaje się za sąsiadujące. Alternatywnie można też przyjąć stałą liczbę k najbliższych sąsiadów (*k-nearest neighbors*, KNN), co pozwala na elastyczne modelowanie relacji przestrzennych w zróżnicowanych układach (red. Suchecka J., 2014)



Kolejnym typem modeli sąsiedztwa są modele topologiczne, które nie odnoszą się bezpośrednio do odległości geometrycznych, lecz do relacji wynikających ze struktury przestrzennej obiektów. Jest to sąsiedztwo oparte na wspólnej granicy. W uogólnionej postaci można zdefiniować je następująco: „Dwa obszary są sąsiednie n -tego rzędu (gdzie n jest liczbą naturalną), jeżeli trzeba przekroczyć przynajmniej n granic, aby przejść od jednego obszaru do drugiego.” (red. Suchecki B., 2010). Tak zdefiniowane sąsiedztwo nie może być bezpośrednio stosowane do obiektów punktowych, stąd dokonuje się teselacji (tj. transformacji danych punktowych do obszarowych), której rezultatem jest wyznaczenie poligonów.

Najczęściej stosowane jest sąsiedztwo typu *queen*, *bishop* i *rook* – zapożyczone z terminologii szachowej. W konfiguracji wieża za sąsiadujące uznaje się obiekty mające wspólną granicę, w konfiguracji gońca – obiekty, mające wspólny tylko punkt, natomiast w konfiguracji królowej – jednostki, które mają wspólną granicę lub punkt. Tego rodzaju podejście jest szczególnie często wykorzystywane w analizach przestrzennych z wykorzystaniem danych administracyjnych (red. Suchecka J., 2014).

Bardziej zaawansowane modele topologiczne obejmują sąsiedztwo definiowane przy użyciu diagramów Woronoja lub triangulacji Delaunaya. W podejściu Woronoja każdemu punktowi w przestrzeni przypisuje się region, w którym jest on najbliższym punktem w stosunku do wszystkich innych. Dwa punkty są sąsiadami, jeśli ich regiony Voronoi mają wspólną granicę. Z kolei triangulacja Delaunaya opiera się na konstrukcji sieci trójkątów łączących punkty w sposób maksymalizujący najmniejszy kąt w zbiorze kątów ze wszystkich trójkątów triangulacji (długości krawędzi trójkątów nie muszą być minimalizowane), co zapewnia stabilną strukturę sąsiedztwa. Oba podejścia mają szerokie zastosowanie w analizie danych punktowych, np. w meteorologii, hydrologii czy ekologii krajobrazu (Nowosad, 2020)

Modele funkcjonalne sąsiedztwa, to takie, w których sąsiedztwo definiowane jest poprzez relacje wynikające z przepływów, interakcji lub sieci infrastrukturalnych. Przykładem może być powiązanie między jednostkami przestrzennymi przez sieci transportowe (np. drogi, linie kolejowe), przepływy ludności lub zależności gospodarcze. W tym przypadku sąsiedztwo jest pojęciem bardziej relacyjnym niż geometrycznym, a jego struktura może być asymetryczna (np. kierunkowe przepływy migracyjne) (Longley, Batty, 2003)

W praktyce często stosuje się podejścia hybrydowe, które łączą różne definicje sąsiedztwa w celu lepszego odwzorowania złożonych procesów przestrzennych. Na przykład w badaniach epidemiologicznych można jednocześnie uwzględniać sąsiedztwo geograficzne (bliskość miejsc zachorowań) oraz sąsiedztwo funkcjonalne



(np. połączenia transportowe umożliwiające rozprzestrzenianie się chorób). Podejścia te są szczególnie przydatne w badaniach miejskich i regionalnych, gdzie procesy społeczne i przestrzenne są silnie zintegrowane (Suchecka, 2014; Śleszyński, 2014).

Jednym z kluczowych aspektów związanych z arbitralnością definiowania jednostek przestrzennych i granic ich sąsiedztwa jest szczegółowo opisany w literaturze problem MAUP (*modifiable areal unit problem*) (Openshaw, 1984). Problem ten przejawia się jako efekt skali (wyniki różnią się w zależności od wielkości jednostek) i efekt strefy (wyniki zmieniają się w zależności od kształtu i rozmieszczenia jednostek). W praktyce oznacza to, konieczność starannego doboru sposobu definiowania relacji sąsiedzkich, w celu uniknięcia zniekształcenia rzeczywistych zależności przestrzennych.

3.3. Macierze wag przestrzennych

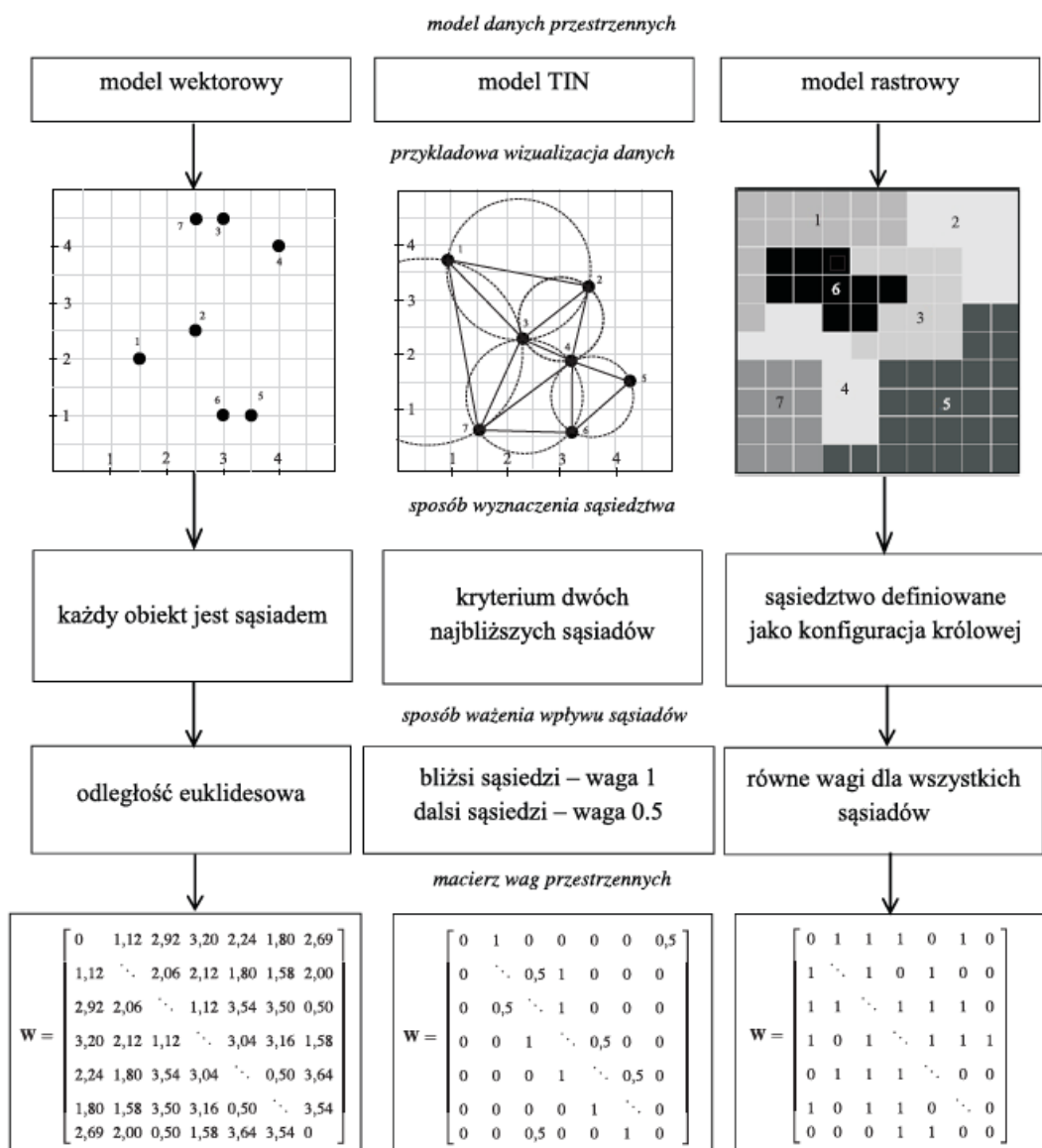
Wzajemne relacje przestrzenne pomiędzy obiektami mogą zostać przełożone na zapis macierzowy w postaci macierzy wag, które umożliwiają eliminowanie negatywnego wpływu autokorelacji przestrzennej na szacowanie parametrów modelu ekonometrycznego oraz na identyfikację efektów przestrzennych. Najprostszą postacią macierzy wag jest macierz sąsiedztwa, czyli macierz kwadratowa z zerami na przekątnej głównej, gdzie sąsiedztwo pomiędzy obiektami jest oznaczane wartością binarną (1 – gdy obiekty sąsiadują, 0 – gdy obiekty nie sąsiadują). Przykład rozkładu obiektu i macierz wag przestrzennych dla różnych modeli danych, zamieszczono na rys. 4.

Ogólnie, **nie ma ściśle określonego sposobu konstrukcji macierzy wag** $W = [w_{ij}]$, która w pełni odzwierciedlałaby relacje przestrzenne między obiektami, jednakże większość macierzy spełnia następujące warunki (red. Suchecka J., 2014):

1. $w_{ij} \geq 0$, dla $i, j = 1, 2, \dots, N$ (**nieujemność elementów macierzy**)
2. $w_{ii} = 0$ dla $i, j = 1, 2, \dots, N$ (**brak autoselekcji**)
3. $\sum_{i=1}^N w_{ij} = 1$ dla $j = 1, 2, \dots, N$ (**standaryzacja wierszami elementów macierzy**) lub standaryzacja oparta na innych regułach (np. min–max, spektralna i tzw. Schematem kodowania stabilizującym wariancję.)
4. $w_{ij} = w_{ji}$ dla $i, j = 1, 2, \dots, N$ (**symetria oddziaływania w parach**)

Brak spełnienia któregoś z powyższych warunków jest możliwy i wynika często z podejścia do budowy macierzy wag.

[Tekst alternatywny: rysunek przedstawia trzy ścieżki tworzenia map wag przestrzennych ułożone kolumnowo. Pierwsza odpowiada wektorowemu modelowi danych, druga - modelowi TIN, trzecia – modelowi rastrowemu. W każdej kolumnie zamieszczono kolejno: przykładową wizualizację danych w modelu, podano sposób wyznaczania sąsiedztwa, sposób ważenia wpływu sąsiadów, a jako ostatni element każdej kolumny zamieszczono macierz wagową.]



Rys. 4 Przykład budowy macierzy wag dla różnych modeli danych przestrzennych.

Źródło: (red. Suchecka J., 2014)

Zgodnie z przyjętą definicją, **macierz wag przestrzennych** W określa się jako **nieujemną**, jeżeli wszystkie jej elementy w_{ij} przyjmują wartości nieujemne. Oznacza



to, że siła powiązania pomiędzy każdą parą jednostek przestrzennych x_i oraz x_j wyrażana jest wyłącznie poprzez przypisanie liczby o wartości równej zero lub dodatniej. Tego rodzaju konstrukcja macierzy wynika z klasycznego podejścia do opisu relacji przestrzennych, które opiera się na pojęciu odległości geograficznej między obserwacjami. W konsekwencji, w wielu praktycznych zastosowaniach naturalną formą odwzorowania zależności pomiędzy elementami zbioru $x_1, x_2, \dots, x_N$ jest **nieujemna macierz wag** W , w której każda wartość odzwierciedla natężenie przestrzennego sąsiedztwa lub stopień wzajemnego oddziaływania między obiektami (red. Suchecka J., 2014).

Pojęcie **autoselekcji** (*reflexivity, self-influence, self-reflection*) odnosi się do sytuacji, w której dany obiekt przestrzenny oddziałuje sam na siebie. W klasycznym ujęciu macierzy wag przestrzennych, opartym na wykorzystaniu odległości geograficznej jako podstawy pomiaru siły relacji między jednostkami, taka forma samooddziaływania jest z założenia wykluczona. Wynika to z faktu, iż dla każdego obiektu s_i zachodzi relacja $s_i - s_i = 0$, co implikuje brak możliwości przypisania niezerowej wartości wagowej dla powiązania danego obiektu z samym sobą. W konsekwencji każda macierz wag przestrzennych W , w której elementy w_{ij} wyznaczone są na podstawie miary odległości (w tym również macierze sąsiedztwa), spełnia warunek braku autoselekcji. Zasada ta znajduje zastosowanie nie tylko w kontekście przestrzeni geograficznej, lecz także w przypadku innych przestrzeni metrycznych, takich jak przestrzeń ekonomiczna czy społeczna (red. Suchecka J., 2014).

Wyjątkiem od tej reguły są sytuacje, w których macierz wag W konstruowana jest w celu odwzorowania zjawisk o charakterze społecznym, behawioralnym lub sieciowym. W modelach takich relacje między jednostkami mogą przyjmować formę bardziej złożoną – obejmującą zarówno powiązania bezpośrednie, jak i pośrednie, a także wzajemne oddziaływania w ramach grup lub wspólnot. W tych przypadkach dopuszcza się wystąpienie autoselekcji w znaczeniu analitycznym, gdy założony model zakłada możliwość, że obiekt w pewnym stopniu wpływa na własne zachowanie poprzez uczestnictwo w strukturze sieciowej (red. Suchecka J., 2014).

Należy jednak wziąć pod uwagę fakt, że nawet w modelach sieciowych możliwe jest zastosowanie podejść metrycznych, które pozwalają na kwantyfikację relacji w sposób zgodny z formalnymi właściwościami metryki. Przykładowo, w analizach sieci transportowych, ekonomicznych lub społecznych można definiować odległość topologiczną lub funkcjonalną między węzłami, co umożliwia zachowanie formalnej spójności modelu przy jednoczesnym uwzględnieniu zjawisk autoselekcji (Śleszyński, 2014).



Standaryzacja (normalizacja) macierzy wag przestrzennych, ma na celu zapewnienie porównywalności oraz spójności wartości zawartych w macierzy poprzez odpowiednie przekształcenie jej elementów. Proces standaryzacji polega na takim przeskalowaniu wartości w poszczególnych wierszach, kolumnach lub w całej macierzy, aby ich suma przyjmowała określoną z góry wartość – najczęściej równą 1. W praktyce oznacza to, że każda wartość w_{ij} zostaje podzielona przez sumę wartości np. w danym wierszu, co prowadzi do uzyskania macierzy, w której suma elementów w każdym wierszu jest identyczna. Tak przeprowadzona standaryzacja umożliwia porównywanie natężenia relacji przestrzennych między jednostkami o różnej liczbie sąsiadów lub zróżnicowanym zasięgu oddziaływania. Przykład różnych wariantów standaryzacji dla macierzy wag określonej wzorem (1) przedstawiają wzory (2a-2d), gdzie 2a – macierz standaryzowana wierszami, 2b – macierz standaryzowana globalnie, 2c – macierz standaryzowana metodą min-max¹, 2d – macierz standaryzowana spektralnie².

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0,33 & 0,33 & 0,33 \\ 0,5 & 0 & 0,5 & 0 \\ 0,33 & 0,33 & 0 & 0,33 \\ 0,5 & 0 & 0,5 & 0 \end{bmatrix} \quad (2a)$$

$$\begin{bmatrix} 0,33 & 0,33 & 0 & 0,33 \\ 0,33 & 0,33 & 0,33 & 0 \\ 0 & 0,33 & 0,33 & 0 \\ 0,33 & 0 & 0 & 0,33 \end{bmatrix} \quad (2b)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0,39 & 0,39 & 0,39 \\ 0,39 & 0 & 0,39 & 0 \\ 0,39 & 0,39 & 0 & 0,39 \\ 0,39 & 0 & 0,39 & 0 \end{bmatrix} \quad (2c)$$

¹ Metoda min-max polega na podziale każdego elementu macierzy przez mniejszą z dwóch wartości: największą sumę z wiersza macierzy lub największą sumę z kolumny macierzy.

² Metoda spektralna polega na podziale każdego elementu macierzy przez moduł największej wartości własnej danej macierzy.



Zasada **symetrii oddziaływania w macierzy wag** $W = [w_{ij}]$, wyrażana warunkiem $w_{ij} = w_{ji}$, jest bezpośrednio powiązana z definicją **metryki przestrzennej**, zgodnie z którą dla dowolnych obiektów s_i, s_j zachodzi zależność $|s_i - s_j| = |s_j - s_i|$. Oznacza to, że w sytuacji, gdy relacje przestrzenne są operacjonalizowane poprzez funkcje odległości lub pojęcie sąsiedztwa, macierz wag W przyjmuje postać **macierzy symetrycznej**. Symetria macierzy implikuje zatem równoważność kierunków oddziaływania pomiędzy parami jednostek przestrzennych, co jest naturalną konsekwencją założenia izotropii przestrzeni (red. Suchecka J., 2014).

Założenie o **symetryczności macierzy wag przestrzennych** pozostaje spełnione jedynie wówczas, gdy konstrukcja macierzy nie uwzględnia dodatkowych kryteriów selekcji relacji przestrzennych. Odstępstwa od symetrii mogą pojawić się w sytuacjach, gdy proces definiowania sąsiedztwa obejmuje procedury optymalizacyjne – na przykład zastosowanie algorytmu k -najbliższych sąsiadów – lub gdy wprowadzane są ograniczenia w postaci progów odległościowych (*critical distance cut-off*). W takich przypadkach liczba oraz rozmieszczenie sąsiadów dla poszczególnych jednostek przestrzennych mogą różnić się między sobą, co prowadzi do zaburzenia symetrii relacji przestrzennych i powoduje, że macierz wag W przestaje być w pełni symetryczna (red. Suchecka J., 2014). Zastąpienie symetrycznej macierzy wag na postać asymetryczną dokonywane jest również poprzez standaryzację wierszami lub kolumnami.

4. Wizualizacja danych przestrzennych

Wizualizacja danych w przestrzennej analizie danych, najczęściej jest dokonywana w postaci różnego typu map. Mapa „jest graficznym, określonym matematycznie modelem rzeczywistości odniesionym do płaszczyzny zgodnie z przyjętą skalą, prezentującą za pomocą symboli wartości atrybutów i związki przestrzenne między nimi” (Medyńska-Gulij, 2019).

Metody wizualizacji zjawisk przestrzennych dzieli się zasadniczo na **metody jakościowe** i **ilościowe**.

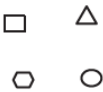
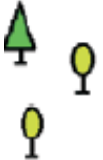
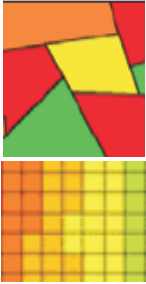
Metody jakościowe odnoszą się do cech niemierzalnych, a ich głównym celem jest przedstawienie przestrzennego rozmieszczenia lub występowania określonego zjawiska, bez wskazywania jego natężenia. Do tej grupy zalicza się między innymi mapy zasięgów, mapy powierzchniowe oraz mapy sygnaturowe.



Metody ilościowe służą zobrazowaniu intensywności lub wartości liczbowych zjawiska w przestrzeni geograficznej. Wśród nich wyróżnia się przede wszystkim kartogram, kartodiagram, mapę izolinii oraz mapę kropkową. Metody te umożliwiają analizę przestrzennego zróżnicowania zjawisk o charakterze mierzalnym, takich jak gęstość zaludnienia, natężenie ruchu czy poziom uprzemysłowienia.

Wymienione sposoby prezentacji danych kartograficznych można ponadto klasyfikować według **typu danych przestrzennych**, które stanowią ich podstawę. Dobór odpowiedniej metody wizualizacji uzależniony jest nie tylko od rodzaju danych, lecz również od przyjętej **skali pomiarowej** – nominalnej, porządkowej, przedziałowej lub ilorazowej – co determinuje możliwości i zakres interpretacji wyników analizy. Zestawienie rodzajów map w odniesieniu do typów danych przestrzennych oraz rodzaju skali pomiarowej przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3 Typy map według metod wizualizacji zjawisk punktowych, obszarowych i powierzchniowych oraz rodzaju skali pomiarowej

Dane jakościowe (skala nominalna)		Dane ilościowe (skala porządkowa, interwałowa)	
Dane punktowe			
	mapa sygnatur punktowych nominalnych		mapa sygnatur punktowych porządkowych
	mapa sygnatur punktowych nominalnych		kartodiagram punktowy prosty mapa kropkowa
	kartodiagram porównawczy punktowy		Kartodiagram sumaryczny strukturalny punktowy
	mapa chorochromatyczna powierzchniowa mapa chorochromatyczna siatkowa (kratkowa)		kartogram kartogram strukturalny



Dane jakościowe (skala nominalna)		Dane ilościowe (skala porządkowa, interwałowa)	
Dane obszarowe			
	mapa symboli (sygnatur) powierzchniowych nominalnych	 	kartodiagram powierzchniowy prosty kartodiagram powierzchniowy
Dane powierzchniowe			
	mapa chorochromatyczna powierzchniowa		mapa izochromatyczna
	mapa chorochromatyczna siatkowa		mapa izoliniowa

Źródło: (red. Suchecka J., 2014)

4.1. Kartogram

Kartogramy (*choropleth maps, colour shaded maps*) należą do najczęściej stosowanych metod wizualizacji danych przestrzennych, szczególnie użytecznych w przypadku prezentacji danych względnych, takich jak udziały procentowe, wskaźniki natężenia czy gęstości. Ich zaletą jest zdolność do syntetycznego przedstawienia zróżnicowania przestrzennego zjawisk, przy jednoczesnym zachowaniu czytelności interpretacyjnej mapy.

Poziom danego zjawiska przedstawia się za pomocą **skali barw**, **skali odcieni szarości** bądź też przy użyciu **skali deseni**, obejmującej wzory kreskowe, kropkowe, liniowe lub kratkowe. Dobór odpowiedniego sposobu wizualizacji uzależniony jest zarówno od rodzaju prezentowanego zjawiska, jak i od poziomu agregacji danych oraz celu analizy kartograficznej (Ratajski, 1989).

4.2. Kartodiagram

Kartodiagramy (*cartodiagrams* lub *diagram maps*) to jedna z klasycznych metod kartograficznej prezentacji danych ilościowych, łącząca cechy map i wykresów statystycznych. Polega ona na przedstawianiu wartości zjawiska za pomocą diagramów (np. słupkowych, kolumnowych, kołowych) umieszczonych w



odpowiednich lokalizacjach przestrzennych – najczęściej w centrach geometrycznych jednostek administracyjnych lub w punktach reprezentujących dane obiekty.

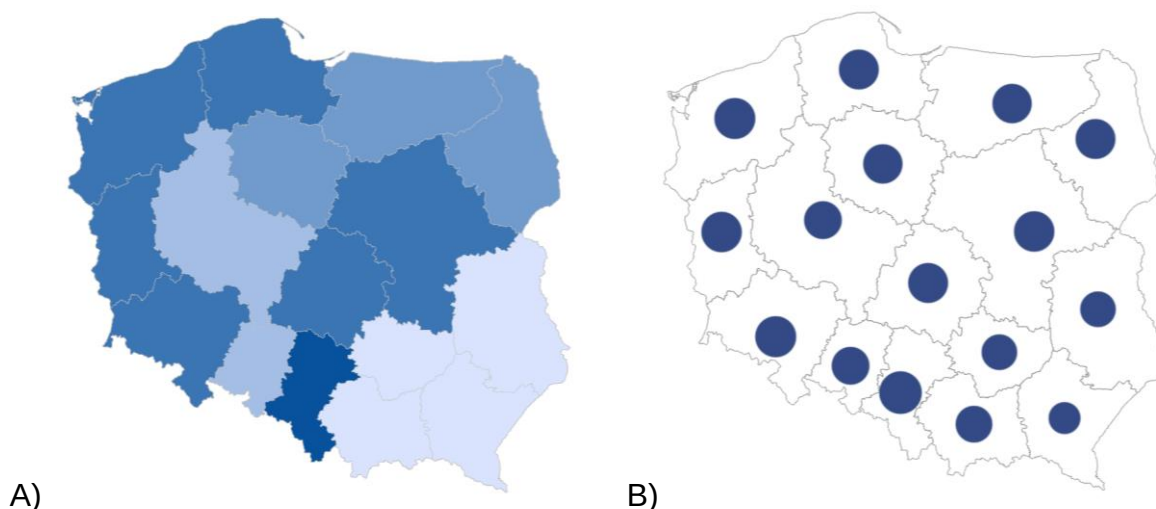
W przeciwieństwie do kartogramów, które operują zróżnicowaniem natężenia barwy lub cieniowania obszarów, kartodiagramy prezentują **wartości bezwzględne lub względne** w sposób bezpośredni – poprzez rozmiar, kształt lub proporcje elementów graficznych. Dzięki temu metoda ta umożliwia jednoczesne przedstawienie **kilku zmiennych** na jednej mapie, co czyni ją szczególnie przydatną w analizach porównawczych oraz badaniach zależności między zjawiskami społeczno-ekonomicznymi.

Kartodiagramy można podzielić na kilka podstawowych typów:

- **kartodiagramy punktowe**, w których symbole umieszczane są w określonych lokalizacjach punktowych,
- **kartodiagramy liniowe**, wykorzystywane do prezentacji zjawisk o charakterze przepływowym (np. natężenia transportu lub migracji),
- **kartodiagramy powierzchniowe**, odnoszące się do jednostek administracyjnych, takich jak powiaty czy województwa.

Dobór rodzaju kartodiagramu uzależniony jest od typu danych (bezwzględnych lub względnych), poziomu ich agregacji oraz przeznaczenia mapy. Istotnym elementem konstrukcyjnym kartodiagramu jest zachowanie odpowiednich proporcji między wielkością symboli a wartością zmiennej, co umożliwia zachowanie poprawności wizualnej i uniknięcie zniekształceń percepcyjnych (Gaździcki, 1990).

[Tekst alternatywny: rysunek przedstawia dwie mapy Polski z wydzielonymi województwami. Lewa mapa przedstawia województwa o różnym nasyceniu koloru niebieskiego. Ciemniejszy odcień oznacza większą wartość wskaźnika urbanizacji. Prawa mapa zawiera naniesione koła niebieskie, o różnej wielkości na białej powierzchni województw. Większy promień koła oznacza większą wartość wskaźnika urbanizacji]



Rys. 5 Wizualizacja wskaźnika urbanizacji (stan na 2024 r) dla poszczególnych województw w postaci: A) kartogramu, B) kartodiagramu.

Źródło: Opracowanie własne z wykorzystaniem danych GUS i Portalu Geostatystycznego

4.3. Mapy izolinii

Mapy izolinii (*isoline maps, isarithmic maps*) należą do grupy ilościowych metod kartograficznej prezentacji danych przestrzennych, w których zjawiska przedstawiane są za pomocą linii łączących punkty o jednakowej wartości określonej zmiennej. Linie te – zwane izoliniami – mogą przyjmować różne nazwy w zależności od rodzaju prezentowanego zjawiska, np. izohipsy (dla wysokości n.p.m.), izotermy (dla temperatury), izobary (dla ciśnienia atmosferycznego) czy izohiety (dla sum opadów).

Podstawową cechą map izolinii jest ich **ciągłość przestrzenna**, umożliwiającą płynne odwzorowanie zmian wartości zjawiska w przestrzeni. W przeciwieństwie do kartogramów czy kartodiagramów, które przedstawiają dane zagregowane w obrębie jednostek administracyjnych, mapy izarytmiczne obrazują **zjawiska o charakterze ciągłym**, dla których wartości są interpolowane pomiędzy punktami pomiarowymi. Dzięki temu metoda ta pozwala na uchwycenie kierunków i gradientów zmian przestrzennych, a także na identyfikację obszarów o zbliżonych parametrach.

Konstrukcja mapy izolinii wymaga określenia **interwału (kroku) między izoliniami**, który decyduje o stopniu szczegółowości prezentacji. Zbyt mały interwał może prowadzić do nadmiernego zagęszczenia linii i utraty czytelności mapy, natomiast zbyt duży — do utraty precyzji i zatarcia istotnych różnic przestrzennych. W praktyce



dobór interwału uzależniony jest od charakteru analizowanego zjawiska, gęstości punktów pomiarowych oraz skali mapy (Gaździcki, 1990).

Mapy izarytmiczne są szczególnie przydatne w **analizach geofizycznych i środowiskowych**, gdzie zjawiska mają charakter ciągły i podlegają płynnym zmianom przestrzennym. Stosuje się je m.in. w meteorologii, klimatologii, hydrologii, geomorfologii oraz geostatystyce. (Gaździcki, 1990).

4.4. Mapy kropkowe

Mapy kropkowe (*dot maps, dot distribution maps*) należą do grupy ilościowych metod kartograficznej prezentacji danych przestrzennych, w których zjawiska przedstawiane są za pomocą punktów (kropek) symbolizujących określoną liczbę jednostek danego zjawiska. Każda kropka na mapie odpowiada z góry ustalonej wartości, np. jednej osobie, gospodarstwu rolnemu, przedsiębiorstwu lub jednostce produkcji. Rozmieszczenie kropek na powierzchni mapy ma na celu odzwierciedlenie przestrzennego rozkładu zjawiska, umożliwiając ocenę jego natężenia, koncentracji i rozproszenia w poszczególnych obszarach.

W zależności od charakteru danych oraz celu opracowania, kropki na mapie mogą być rozmieszczane rzeczywiście lub umownie. W przypadku rozmieszczenia rzeczywistego każda kropka wskazuje faktyczną lokalizację obiektu (np. pojedyncze gospodarstwo rolne, zakład przemysłowy czy źródło emisji zanieczyszczeń). Rozmieszczenie umowne stosuje się natomiast wtedy, gdy brak jest informacji o dokładnym położeniu jednostek lub gdy dane mają charakter zagregowany — wówczas kropki rozmieszcza się losowo lub równomiernie w obrębie danej jednostki przestrzennej, proporcjonalnie do wielkości zjawiska.

W konstrukcji map kropkowych kluczowe znaczenie ma dobór wartości jednostkowej kropki oraz skali kartograficznej. Wartość przypisana jednej kropce powinna być tak dobrana, aby zapewnić równowagę między czytelnością a dokładnością prezentacji. Zbyt duża wartość jednostkowa prowadzi do zatarcia szczegółów przestrzennych i utraty informacji o lokalnych skupieniach zjawiska, natomiast zbyt mała — do nadmiernego zagęszczenia kropek i utrudnienia odczytu mapy (Ratajski, 1989). Równie istotne jest odpowiednie skalowanie i symbolizacja kropek, które muszą być na tyle czytelne, by umożliwiały łatwą interpretację, ale nie dominowały nad ogólnym obrazem mapy.

Zaletą map kropkowych jest ich czytelność i intuicyjność przekazu. Pozwalają one szybko rozpoznać obszary o wysokiej i niskiej koncentracji zjawiska, a także uchwycić wzorce przestrzenne, takie jak skupienia, strefy przejściowe czy obszary



rozproszenia. Do wad tej metody należy zaliczyć subiektywność rozmieszczenia kropek w przypadku danych zagregowanych, ograniczoną możliwość dokładnego odczytu wartości liczbowych oraz trudność w stosowaniu przy dużej rozpiętości danych (Ratajski, 1989).

4.5. Mapy sygnatur

Mapy sygnatur (*symbol maps, proportional symbol maps*) należą do grupy jakościowo-ilościowych metod kartograficznej prezentacji danych przestrzennych, w których zjawiska przedstawiane są za pomocą symboli (sygnatur) umieszczonych w miejscach ich występowania. Sygnatura stanowi graficzny znak zastępujący rzeczywisty obiekt lub zjawisko, a jej kształt, wielkość, barwa lub orientacja odzwierciedlają określone cechy ilościowe lub jakościowe prezentowanego elementu (Ratajski, 1989).

Podstawową cechą map sygnaturowych jest **bezpośrednie powiązanie lokalizacji symbolu z miejscem występowania zjawiska**. Każda sygnatura reprezentuje pojedynczy obiekt, grupę obiektów lub dane dotyczące danego punktu przestrzeni. W zależności od charakteru prezentowanych informacji, sygnatury mogą mieć charakter jakościowy — gdy różne kształty symbolizują różne typy zjawisk (np. fabryki, kopalnie, porty) — lub ilościowy — gdy wielkość lub powierzchnia sygnatur odzwierciedla wartość liczbową (np. produkcję, liczbę ludności, wielkość zużycia surowców)

4.6. Mapy chorochromatyczne

Mapy chorochromatyczne (*chorochromatic maps, qualitative area maps*) należą do grupy jakościowych metod kartograficznej prezentacji danych przestrzennych, w których zjawiska przedstawiane są za pomocą barw lub deseni różnicujących obszary występowania poszczególnych kategorii. Każda barwa lub wzór odpowiada określonemu typowi, klasie lub rodzajowi zjawiska, a granice między nimi wyznaczają zasięgi jego występowania (Ratajski, 1989). Kolory dobiera się tak, aby różnice między kategoriami były wyraźne i jednoznaczne, ponieważ dobór barw i granic kategorii może wpływać na percepcję mapy i interpretację treści. Mapy chorochromatyczne nie obrazują natężenia zjawiska, lecz jego **rozmieszczenie i zróżnicowanie jakościowe** w przestrzeni geograficznej.

Podstawową cechą takich map jest **powierzchniowy charakter prezentacji**, polegający na podziale obszaru na pola o różnej treści tematycznej. Zjawiska przedstawione na tego typu mapach mają zwykle charakter dyskretny lub



kategorialny – występują w postaci odrębnych jednostek o różnych cechach, które nie tworzą ciągłych gradacji wartości.

4.7. Format shapefile

W procesie tworzenia map cyfrowych oraz realizacji analiz przestrzennych wykorzystuje się dane zapisane w różnych formatach plików. Jednym z najczęściej stosowanych i najbardziej rozpowszechnionych formatów grafiki wektorowej jest **format shapefile** (potocznie określany jako pliki *shape*), opracowany przez firmę ESRI. Podstawowe elementy formatu shapefile obejmują kilka wzajemnie powiązanych plików (.shp, .shx, .dbf, .sbn, .prj, .xml) zawierających jedną klasę obiektów, z których każdy pełni odrębną, lecz komplementarną funkcję w procesie przechowywania i interpretacji danych przestrzennych.

Najważniejszym składnikiem jest **plik geometryczny** (.shp), w którym zapisywana jest właściwa geometria obiektów — punkty, linie lub poligony opisujące położenie i kształt elementów przestrzennych. Dane geometryczne są przechowywane w postaci współrzędnych geograficznych lub prostokątnych, zgodnie z przyjętym układem odniesienia (Gotlib, i in., 2012).

Drugim istotnym składnikiem jest **plik indeksu kształtów** (.shx), który pełni funkcję pomocniczą, umożliwiając szybki dostęp do poszczególnych rekordów geometrycznych zapisanych w pliku .shp. Plik ten zawiera strukturę indeksową ułatwiającą lokalizowanie i wczytywanie obiektów podczas pracy w środowisku GIS, co znacznie przyspiesza przetwarzanie danych i zwiększa efektywność operacji kartograficznych (Gotlib, i in., 2012).

Kolejnym, niezbędnym elementem formatu jest **plik atrybutowy** (.dbf), zapisany w standardzie dBase. Zawiera on informacje opisowe (atrybuty) przypisane do każdego obiektu geometrycznego, takie jak nazwa, identyfikator, powierzchnia, długość, funkcja użytkowa, przynależność administracyjna lub inne zmienne tematyczne. Dzięki temu format shapefile łączy dane przestrzenne z danymi opisowymi, tworząc spójną strukturę informacji geograficznej (Suchecka, red. 2014).

Ważną rolę odgrywają również **pliki pomocnicze**, wśród których szczególne znaczenie ma **plik projekcyjny** (.prj), zawierający definicję układu współrzędnych oraz odwzorowania kartograficznego, w jakim zapisane są dane geometryczne. Informacje te umożliwiają poprawne pozycjonowanie warstwy w przestrzeni odniesienia i jej integrację z innymi zbiorami danych. Brak pliku .prj może prowadzić do błędnego odwzorowania obiektów w środowisku GIS, szczególnie przy pracy z danymi pochodzącymi z różnych źródeł (Suchecka, red. 2014).



Dodatkowo, format shapefile może być uzupełniany o **plik metadanych** (.xml), który zawiera szczegółowe informacje dotyczące źródła danych, sposobu ich pozyskania, dokładności przestrzennej, daty utworzenia czy autora opracowania. Metadane pełnią istotną funkcję dokumentacyjną i kontrolną, umożliwiając ocenę jakości oraz przydatności danych analizach przestrzennych (Gotlib, i in., 2012).

W niektórych przypadkach wykorzystywane są również inne, mniej rozpowszechnione składniki, takie jak plik .sbn lub .sbx, które zawierają indeksy przestrzenne służące do przyspieszenia wyszukiwania obiektów w dużych zbiorach danych, oraz plik .cpg, definiujący stronę kodową znaków używaną w pliku atrybutowym .dbf, co ma szczególne znaczenie w kontekście poprawnego wyświetlania polskich znaków diakrytycznych.

Taka modularna budowa formatu shapefile umożliwia elastyczne zarządzanie danymi oraz ich integrację w różnych środowiskach programowych. W praktyce każdy zbiór danych w formacie shapefile stanowi zestaw co najmniej trzech podstawowych plików (.shp, .shx, .dbf), które muszą być przechowywane w jednym katalogu i posiadać identyczną nazwę główną, aby mogły być poprawnie interpretowane przez oprogramowanie GIS (Suchecka, red. 2014).

5. Analizy przestrzenne w GIS

Analizy przestrzenne stanowią jeden z kluczowych etapów pracy z danymi geograficznymi w systemach informacji przestrzennej (GIS). Ich istotą jest identyfikacja, opis i interpretacja relacji zachodzących między zjawiskami w przestrzeni geograficznej, a także modelowanie procesów, które kształtują strukturę i dynamikę środowiska geograficznego. Zatem można przyjąć, że analiza przestrzenna jest procesem poznawczym, w którym dane przestrzenne przekształcane są w informację, a następnie w wiedzę o charakterze interpretacyjnym i decyzyjnym (Medyńska-Gulij, 2019).

Z perspektywy metodologicznej analizy przestrzenne w GIS obejmują szeroki wachlarz podejść badawczych – od analiz relacyjnych i topologicznych, przez analizy statystyczne i geostatystyczne, po modelowanie i symulacje przestrzenne. Wspólnym mianownikiem tych metod jest wykorzystanie lokalizacji geograficznej jako podstawowego czynnika integrującego różne typy informacji (Urbański, 2012). Z tego względu analizy GIS stanowią interdyscyplinarne narzędzie badawcze, znajdujące zastosowanie zarówno w naukach przyrodniczych i społecznych, jak i w praktyce planistycznej, inżynierskiej czy zarządczej (Longley, i in., 2008).



Dynamiczny rozwój technologii geoinformacyjnych, wzrost dostępności danych przestrzennych (m.in. z systemów satelitarnych, czujników IoT i otwartych baz danych) oraz integracja GIS z metodami uczenia maszynowego i analityką big data sprawiają, że analizy przestrzenne stają się coraz bardziej złożone i precyzyjne (Longley, i in., 2008). W rezultacie, współczesny GIS przekształca się w środowisko eksploracji danych, które pozwala na wykrywanie nieoczywistych wzorców i relacji przestrzennych, niedostrzegalnych przy zastosowaniu tradycyjnych metod kartograficznych.

5.1. Zasady analizy badawczej w GIS

Współczesne podejście do analizy przestrzennej zakłada nie tylko obliczeniowy, lecz także poznawczy charakter procesu badawczego. Analiza w środowisku GIS łączy w sobie komponenty geometryczne, statystyczne i semantyczne, tworząc podstawę do formułowania hipotez o charakterze przestrzennym. Takie podejście wymaga zachowania metodycznej i systematycznej struktury – od przygotowania danych, poprzez modelowanie przestrzenne, aż po interpretację wyników wizualizacji. W ujęciu Medyńskiej-Gulij metodologicznym punktem wyjścia jest uznanie mapy (i danych przestrzennych) za model zjawisk rzeczywistych, za narzędzie poznawcze, a nie tylko za środek prezentacji (Medyńska-Gulij, 2019).

Etapy analizy badawczej GIS (Medyńska-Gulij, 2019):

1. Definiowanie problemu badawczego i formułowanie hipotez

Każde badanie przestrzenne rozpoczyna się od określenia celu, zakresu i formuły problemu – co chcemy zbadać, jakie są jednostki analizy (np. gminy, powiaty), jakie zmienne przestrzenne będą uwzględnione, jaka tolerancja błędu jest dopuszczalna. Na tym etapie istotne znaczenia ma określenie warstw danych, ich źródła, jakości oraz ograniczeń z punktu widzenia infrastruktury danych przestrzennych.

2. Przygotowanie danych przestrzennych

W obrębie GIS-owej analizy badawczej kluczowe jest zadbanie o jakość danych: ich kompletność, aktualność, spójność i poprawność geometryczną. Konieczne jest uwzględnienie układów współrzędnych, metadanych, standardów oraz procesów walidacji danych. W tym kontekście dane przestrzenne pełnią rolę modelu rzeczywistości, którego ograniczenia wpływają na wiarygodność rezultatów analizy. Przyjęcie właściwej struktury danych umożliwia później zastosowanie właściwych technik analizy przestrzennej.



3. Modelowanie przestrzenne i wybór procedur analitycznych

Analiza badawcza wymaga zastosowania właściwych technik – np. nakładania warstw (overlay), analizy sieciowej, interpolacji, modelowania zmian przestrzennych czy analizy statystycznej w przestrzeni. Fundamentalne znaczenie ma dobór właściwej metody z uwzględnieniem natury zjawiska, typu danych (ilościowe vs. jakościowe), skali przestrzennej i przyjętego odwzorowania. Zastosowane procedury muszą być transparentne, możliwe do replikacji i opatrzone komentarzem dotyczącym ograniczeń oraz możliwych błędów.

4. Wizualizacja wyników i interpretacja przestrzenna

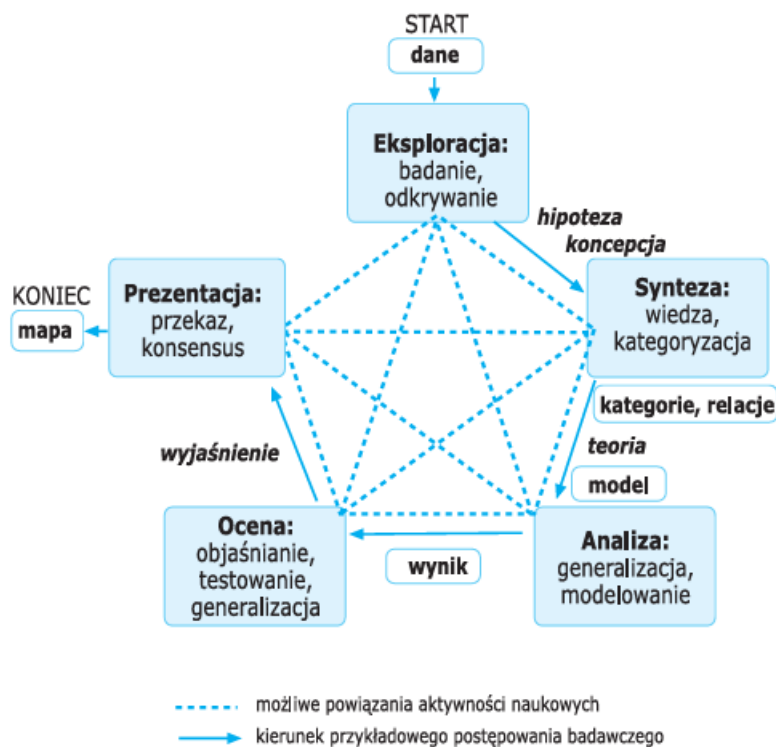
Analiza badawcza kończy się etapem prezentacji wyników w formie mapy, diagramu lub animacji jako narzędzia interpretacji. Wizualizacja powinna umożliwić identyfikację wzorców przestrzennych, granic, skupień, trendów zmian i anomalii. Interpretacja powinna odwoływać się do hipotez badawczych, uwzględniać wpływ zmiennych przestrzennych oraz być krytyczna wobec możliwych skutków złej generalizacji, błędów danych czy nieodpowiednich skal.

5. Weryfikacja rezultatów i sformułowanie wniosków

Kończącym etapem analiz przestrzennych jest weryfikacja wyników – porównanie z danymi odniesienia, analiza błędów, rozważenie alternatywnych scenariuszy oraz sformułowanie wniosków i rekomendacji.

Schemat postępowania w analizach badawczych z wykorzystaniem danych przestrzennych i narzędzi GIS przedstawia rysunek 5.

[Tekst alternatywny: rysunek przedstawia pięć prostokątów obrazujących schemat ścieżki badawczej analizy przestrzennej w GIS wraz z łączącymi je liniami obrazującymi powiązania pomiędzy kolejnymi krokami ścieżki.]



Rys. 6 Przykład ścieżki badawczej w GIScience

Źródło: (Medyńska-Gulij, 2019)

5.2. Wybrane metody analizy danych przestrzennych

Metody analizy danych przestrzennych stanowią fundament nowoczesnych badań geoinformacyjnych. Ich wspólną cechą jest wykorzystanie lokalizacji geograficznej jako kluczowego wymiaru interpretacji danych.

Z metodologicznego punktu widzenia analizy przestrzenne w GIS można podzielić na kilka podstawowych grup. Do najczęściej wyróżnianych należą: analizy topologiczne i relacyjne, służące badaniu logicznych zależności między obiektami; analizy statystyczne i geostatystyczne, umożliwiające ilościowy opis i modelowanie zmienności zjawisk; analizy sieciowe, pozwalające na badanie struktur o charakterze grafowym; modelowanie i symulacje przestrzenne, stosowane do prognozowania i oceny procesów zachodzących w środowisku; analizy czasowo-przestrzenne, integrujące wymiar przestrzenny i temporalny; oraz analizy wielokryterialne, wspomagające procesy decyzyjne w warunkach niepewności i wielowymiarowości danych (Medyńska-Gulij, 2019; Gotlib, i in., 2012).



5.2.1. Metody analizy topologicznej i relacyjnej

Analiza topologiczna i relacyjna stanowi podstawę funkcjonowania narzędzi GIS, umożliwiając badanie wzajemnych zależności przestrzennych między obiektami geograficznymi. Jej istotą jest identyfikacja relacji takich jak sąsiedztwo, przyleganie, zawieranie czy przecinanie. Metody te pozwalają zrozumieć strukturę przestrzeni niezależnie od położenia obiektów w układzie współrzędnych. Do najczęściej stosowanych należą:

- analiza sąsiedztwa (np. buforowanie – *buffer analysis*),
- analiza relacji przestrzennych (*overlay, intersect, union*),
- wyszukiwanie obiektów w określonym promieniu (*spatial query*).

Analizy te mają szerokie zastosowanie w analizie sieciowej i planowaniu przestrzennym – od identyfikacji obszarów konfliktów przestrzennych, przez delimitację stref ochronnych, po analizę dostępności przestrzennej (Gotlib, i in., 2012, Medyńska-Gulij, 2019).

5.2.2. Metody analizy statystycznej i geostatystycznej

Analizy te pozwalają na ilościowe ujęcie zjawisk przestrzennych oraz ich zmienności w przestrzeni, skupiając się na pomiarze intensywności. Obejmują one zarówno klasyczne metody statystyki opisowej (średnia, wariancja, odchylenie standardowe), które mogą być uzupełniane o miary autokorelacji przestrzennej, takie jak wskaźnik Morana (I) czy statystyka Getisa-Ord (G_i^*), jak i techniki uwzględniające położenie geograficzne.

Do najczęściej stosowanych należą:

- analiza autokorelacji przestrzennej (np. współczynnik Morana I),
- analiza skupień przestrzennych (*spatial clustering*),
- interpolacja przestrzenna (np. kriging, IDW, spline),
- analiza trendów i powierzchni regresyjnych.

W praktyce analizy statystyczne i geostatystyczne stosowane są m.in. w badaniach środowiskowych (analiza zanieczyszczeń powietrza, rozkład opadów), w planowaniu przestrzennym (gęstość zaludnienia, rozkład usług) oraz w geologii (analiza właściwości gruntu). Dzięki integracji z bazami danych przestrzennych, metody te umożliwiają zarówno opis, jak i predykcję zjawisk geograficznych, stanowiąc pomost między analizą statystyczną a modelowaniem przestrzennym (Gotlib i in. 2012).



5.2.3. Metody analizy sieciowej

Analiza sieciowa stanowi wyspecjalizowany typ analizy przestrzennej, której przedmiotem są zjawiska zachodzące w strukturach o charakterze sieciowym – takich jak sieci transportowe, hydrologiczne czy energetyczne. Podstawowym założeniem jest reprezentacja przestrzeni jako grafu złożonego z węzłów (nodes) i łączy (edges), między którymi zachodzą relacje topologiczne (Gaździcki, 1990). Do najczęściej stosowanych procedur analizy sieciowej należą:

- analiza najkrótszej ścieżki (*shortest path*),
- modelowanie czasu dojazdu (*service area analysis*),
- analiza przepustowości i natężenia ruchu (*flow analysis*)
- alokacja zasobów (*location-allocation analysis*).

Metody te są wykorzystywane do optymalizacji procesów logistycznych, planowania infrastruktury oraz zarządzania kryzysowego. Wymagają one nie tylko danych geometrycznych, ale również opisowych – takich jak przepustowość, koszt czy czas przejazdu – które pozwalają na bardziej realistyczne odwzorowanie zjawisk zachodzących w przestrzeni sieciowej (Urbański, 2012).

5.2.4. Metody modelowania przestrzennego i symulacji

Modelowanie przestrzenne obejmuje metody pozwalające na tworzenie abstrakcyjnych reprezentacji zjawisk geograficznych (modeli przestrzennych) oraz symulację ich zachowania w zmiennych warunkach.

Modele przestrzenne można podzielić na deterministyczne i stochastyczne. Deterministyczne opierają się na znanych relacjach między zmiennymi, natomiast stochastyczne uwzględniają niepewność i zmienność losową (Urbański, 2012). W GIS szczególną rolę odgrywają modele oparte na danych rastrowych – takie jak modele wysokości terenu (DTM) czy modele hydrologiczne – które umożliwiają analizę procesów ciągłych w przestrzeni. Z kolei modele agentowe (*agent-based models*) pozwalają na symulację zachowań jednostek w przestrzeni i ich wpływu na kształtowanie się struktur przestrzennych (Medyńska-Gulij, 2019).

Modelowanie przestrzenne i symulacje są szeroko wykorzystywane w badaniach środowiskowych, urbanistyce, zarządzaniu zasobami naturalnymi oraz w prognozowaniu zmian użytkowania ziemi. Ich zaletą jest możliwość testowania scenariuszy alternatywnych i oceny skutków decyzji przestrzennych jeszcze przed ich wdrożeniem (Gotlib i in., 2012).



Przykładowe modelowanie przestrzenne to :

- modelowanie hydrologiczne (np. zasięg powodzi),
- modelowanie zmian pokrycia terenu (np. *LULC – Land Use Land Cover*),
- modelowanie wielokryterialne (*multi-criteria evaluation, MCE*).

5.2.5. Metody analizy czasowo-przestrzennej

Analizy czasowo-przestrzenne integrują wymiar przestrzenny i temporalny danych geograficznych, umożliwiając badanie dynamiki zjawisk w czasie. Dane do tych analiz mogą być rejestrowane w postaci sekwencji zdarzeń, serii czasowych lub trajektorii obiektów ruchomych (Medyńska-Gulij, 2019).

Techniki analizy czasowo-przestrzennej obejmują m.in.:

- analizę zmian w czasie (*change detection*),
- analizę trajektorii obiektów (*trajectory analysis*)
- animację kartograficzną jako narzędzie geowizualizacji procesów.

Metody te są szczególnie przydatne w monitorowaniu zmian użytkowania terenu, analizie zjawisk klimatycznych czy badaniach migracji ludności.

5.2.6. Metody analizy wielokryterialnej

Analiza wielokryterialna (*Multi-Criteria Spatial Analysis, MCSA*), której wynikiem jest mapa preferencji lub oceny przydatności danego obszaru, umożliwia podejmowanie decyzji przestrzennych w warunkach złożoności i wielowymiarowości danych. Jej istotą jest łączenie różnych kryteriów – często sprzecznych – w celu wyboru optymalnego rozwiązania przestrzennego (Urbański, 2012).

Proces analizy wielokryterialnej obejmuje cztery główne etapy: identyfikację kryteriów, ich normalizację, określenie wag oraz agregację wyników (Gotlib i in., 2012). W GIS stosuje się różne techniki agregacji, takie jak metoda sum ważonych, analiza AHP (*Analytic Hierarchy Process*) czy metoda dominacji Pareto.

Integracja metod MCSA z narzędziami GIS pozwala na wspomaganie procesów decyzyjnych w planowaniu przestrzennym, zarządzaniu środowiskiem i gospodarce komunalnej, a wizualizacja wyników ułatwia porównanie alternatywnych wariantów decyzji.



Bibliografia

✓ materiały zwarte

1. Gaździcki, J. (1990). Podstawy teoretyczne kartografii matematycznej. Warszawa: Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych.
2. Gotlib, D., Iwaniak, A., & Olszewski, R. (2012). *GIS. Obszary Zastosowań*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN S.A.
3. Haining, R. (2003). *Spatial Data Analysis: Theory and Practice*. Cambridge University Press.
4. Longley, P., & Batty, M. (2003). *Advanced Spatial Analysis*. Redlands: ESRI.
5. Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2008). *GIS. Teoria i praktyka*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
6. Medyńska-Gulij, B. (2019). *Geowizualizacja. Zasady i metody kartograficznej prezentacji danych przestrzennych*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
7. Olszewski, R. (2015). *Wprowadzenie do kartografii i topografii*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
8. Suachecki B. red. (2010). *Ekonometria przestrzenna. Metody i modele analizy danych przestrzennych*. Warszawa: Wydawnictwo C.H. BECK.
9. Suachecka J. red. (2014). *Statystyka przestrzenna. Metody analiz struktur przestrzennych*. Warszawa: Wydawnictwo C.H. BECK.
10. Śleszyński, P. (2014). *GIS w badaniach społeczno-ekonomicznych*. Warszawa: IGiPZ PAN.
11. Urbański, J. (2012). *GIS w badaniach przyrodniczych*. Gdańsk: Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego. Dostępny z https://kzzl.urk.edu.pl/d/TDHEGWDqnZwMvDzlQBkVdQQEqVBAvEVIPOEsFI2IYDwoTOhRsODMaSX9bYH5BARqVGylHASMBFRd2GzY0KhQWTVtxBUE-PV0QOjc-K1QNBQdRYBcbKwwXF3YbACpnVKAfFjQQbDgzGkl8Xio/gis_w_badaniach_przyrodniczych.pdf

✓ artykuły naukowe

1. Ali, E. (2020). Geographic information system (GIS): definition, development, applications & components. Department of Geography, Ananda Chandra College. India, 158. Dostępny z https://www.researchgate.net/publication/340182760_Geographic_Information_System_GIS_Definition_Development_Applications_Components





2. Openshaw, S. (1984). The Modifiable Areal Unit Problem, *Concepts and Techniques in Modern Geography*(38). Dostępny z:
<https://www.uio.no/studier/emner/sv/iss/SGO9010/openshaw1983.pdf>
3. Nowosad, M. (2020). Enviromental data visualisation using Delaunay triangulation. *Journal Computer Science Institute*, 17. Dostępny z:
<https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-f8c4f02f-f86d-4e37-bcd8-9b9c1dbe0efc/c/nowosad.pdf>

✓ źródła internetowe

1. Esri. (2025, 06 23). Dostępny z:
<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>
2. GUS – Bank Danych Lokalnych <https://bdl.stat.gov.pl/BDL/start>
3. GUS – Portal Geostatystyczny <https://portal.geo.stat.gov.pl/>
4. Narodowy System Informacji Satelitarnej. (2023, 04 04). Dostępny z: Polska Agencja Kosmiczna : https://nsisplatforma.polsa.gov.pl/baza-wiedzy/wiedza-ogolna/rozdz_zob_sat

