

# **Ryzyko procesów decyzyjnych w aspekcie dokładności baz danych GIS**

---

Beata Hejmanowska

„Ryzyko procesów decyzyjnych w aspekcie dokładności baz danych GIS”

*„Niczego w życiu nie należy się bać, należy to tylko zrozumieć”*

*Maria Skłodowska Curie*

## Spis treści

---

<b>Spis treści</b>	<b>3</b>
<b>1. Wstęp</b>	<b>5</b>
<b>2. Sformułowanie problemu i teza pracy</b>	<b>8</b>
<b>3. Modele danych i rodzaje analiz GIS</b>	<b>10</b>
<b>4. Deterministyczne metody podejmowania decyzji</b>	<b>16</b>
4.1 Ocena wieloparametryczna (Multi-Criteria Evaluation – MCE)	17
4.2 Warianty metody MCE	18
4.3 Metoda OWA	18
4.4 Przykład	20
4.5 Ocena wielopodmiotowa (Multi-Object Evaluation – MOE)	25
<b>5. Niedeterministyczne metody teorii decyzji</b>	<b>28</b>
5.1 Niedokładność danych źródłowych	30
5.2 Błędy modelu	32
5.3 Niedokładność reguł decyzyjnych	34
<b>6. Ryzyko w modelu gridowym na przykładzie analizy dokładności DTM</b>	<b>38</b>
6.1 Modelowanie stref zalewowych.	38
6.1.1 Definicja stref zalewowych.	40
6.1.2 Modelowanie stref zalewowych z uwzględnieniem niedokładności danych źródłowych.	42
6.1.3 Wnioski dotyczące miękkiej metody generowania stref zalewowych wokół rzek	51
6.2 Wpływ niedokładności DTM na błąd nachyleń i ich azymutów.	51
6.2.1 Analiza wzorów do obliczania nachyleń i ekspozycji z DTM	54
6.2.2 Test z wykorzystaniem symulowanego DTM	60
6.2.3 Test z wykorzystaniem rzeczywistego DTM	64
6.2.4 Wnioski dotyczące modelowania błędu nachyleń i azymutów	68
6.2.5 Analiza rozkładu błędu nachyleń w zależności od wartości nachyleń – przykład uwzględnienia błędu modelu w trakcie podejmowania decyzji.	69
<b>7. Ryzyko w modelu wektorowym na przykładzie analizy dokładności powierzchni działki</b>	<b>73</b>
7.1 Podstawy systemu dopłat bezpośrednich do rolnictwa	75
7.2 Określanie powierzchni działki w systemie IACS – przedstawienie problemu	77
7.3 Pojęcie tolerancji technicznej pomiaru.	79
7.4 Określanie błędu powierzchni według wzoru Gauss’a	80
7.5 Przykład kontroli na miejscu	83
7.5.1 Bezpośrednie pomiary GPS	83
7.5.1.1 Wynik pomiaru 1 (A działka duża – 5ha)	85
7.5.1.2 Wynik pomiaru 2 (B działka mała– 30 a)	86
7.5.1.3 Wnioski dotyczące wyników kontroli bezpośredniej w porównaniu z analizą dokładności przeprowadzonej metodą błędu rzeczywistego powierzchni Gauss’a	87
7.6 Analiza dokładności powierzchni działki na przykładzie danych katastralnych	88
7.6.1 Wyniki analiz przestrzennych	89
7.6.2 Wnioski analizy statystycznej błędu powierzchni działki z wykorzystaniem metody buforowej i metody błędu rzeczywistego powierzchni Gauss’a	100
7.7 Dyskusja: określanie dokładności powierzchni w oparciu o wzór na rzeczywisty błąd powierzchni Gaussa a istniejące w Polsce przepisy dotyczące ewidencji gruntów	101
7.7.1 Istniejące przepisy	101

7.7.2	Porównanie wymogów instrukcyjnych z błędem rzeczywistym powierzchni Gauss'a	103
7.7.3	Wnioski z analizy porównawczej wymagań instrukcji geodezyjnych z rzeczywistym błędem powierzchni Gauss'a	105
<b>8.</b>	<b>Wnioski</b>	<b>107</b>
<b>9.</b>	<b>Podsumowanie</b>	<b>111</b>
<b>10.</b>	<b>Bibliografia.</b>	<b>113</b>

---

---

# 1. Wstęp

---

Systemy Informacji Geograficznej (GIS) są tworzone już od wielu lat i ciągle rozwijają się dynamicznie, szczególnie od momentu powstania w latach dziewięćdziesiątych wydajnych systemów informatycznych. Gromadzonych jest coraz więcej danych, zwiększają się systematycznie możliwości analiz, które jesteśmy w stanie wykonywać za pomocą systemów GIS.

Faza intensywnego gromadzenia danych w Polsce wydaje się kończyć i powoli wchodzimy w fazę wykorzystania systemów GIS dla rzeczywistego wspomaganie decyzji.

Bazy GIS są tworzone najczęściej na zamówienie decydentów<sup>1</sup> i podstawowym ich celem jest dostarczenia możliwie wyczerpującej informacji na temat przedmiotu analizy. Poza podstawową funkcją gromadzenia danych system informatyczny GIS, jako tzw. narzędzie do wspomaganie decyzji, powinien pozwolić na optymalizację procesu podejmowania decyzji.

Bazy danych GIS dostarczają dużej ilości informacji oraz narzędzi do ich przetwarzania, co z jednej strony otwiera ogromne możliwości przed decydentami, a z drugiej strony stanowi zagrożenie z powodu możliwości wykorzystania danych w niewłaściwy sposób. Powszechny dostęp do danych, automatyzacja ich przetwarzania może być powodem nieświadomie podjętych błędnych decyzji.

Zgodnie z teorią decyzji, decydent (podmiot analizy), staje przed koniecznością wyboru jednego z przynajmniej dwóch wariantów działania. Istnieją dwie metody teorii decyzji: podejście normatywne i deskryptywne. W podejściu normatywnym dąży się do podjęcia optymalnej decyzji. Podejście deskryptywne opisuje typowe zachowania ludzi w trakcie podejmowania decyzji, a analizie są poddawane różne czynniki mające wpływ na ostateczne decyzje, często bynajmniej nie związane z optymalnym rozwiązaniem [Sokołowska J. Pohorille A. 2000]. Podejście deskryptywne jest w większym stopniu przedmiotem zainteresowania nauk psychologicznych i socjologicznych niż dziedzin technicznych.

„Ze względu na posiadane informacje, możemy podzielić problemy decyzyjne na trzy grupy:

- decyzja podejmowana w warunkach **pewności** - każda decyzja pociąga za sobą określone, znane konsekwencje

---

<sup>1</sup> **Decydent** - podmiot procesu decyzyjnego, dokonujący wyboru ostatecznego wariantu decyzji.

- decyzja podejmowana w warunkach **ryzyka** - każda decyzja pociąga za sobą więcej niż jedną konsekwencję, znamy zbiór możliwych konsekwencji i prawdopodobieństwa ich wystąpienia
- decyzja podejmowana w warunkach **niepewności** - nie znamy prawdopodobieństw wystąpienia konsekwencji danej decyzji.” [[http://pl.wikipedia.org/wiki/Teoria\\_decyzji](http://pl.wikipedia.org/wiki/Teoria_decyzji)]

Jeśli decyzja jest podejmowana w warunkach pewności, mówimy o **deterministycznych** metodach teorii decyzji, natomiast niepewnością i ryzykiem zajmują się metody **niedeterministyczne**.

## Pojęcie ryzyka

„**Ryzyko**: przedsięwzięcie, którego wynik jest nieznany, zależny od przypadku; możliwość, że coś się uda lub nie uda”, [słownik języka polskiego, <http://sjp.pwn.pl/>]. Problem ryzyka jest przedmiotem zainteresowania różnych dziedzin: psychologii, filozofii, ekonomii, inżynierii, medycyny, ubezpieczeń, wojskowości, kryminologii. W każdej z tych dziedzin ryzyko rozumiane jest inaczej i dlatego niemożliwe jest podanie jednej definicji ryzyka. Trudno też tematycznie pogrupować różne dyscypliny, nawet ze względu na sposób rozumienia ryzyka. Psychologia i ekonomia są dziedzinami, w których badania nad ryzykiem są najbardziej rozwinięte. W ekonomii dotyczy to zwłaszcza problematyki zarządzania ryzykiem finansowym. Wyniki badań teoretycznych prowadzone w tych obszarach stosunkowo szybko implementuje się w praktyce. Inne branże w dużej mierze korzystają z wyników badań psychologicznych i ekonomicznych, ale wdrażanie w praktyce teorii zarządzania ryzykiem przebiega znacznie wolniej.

**Ryzyko** jest rozumiane jako potencjalna szkoda wywołana określonym działaniem (zjawiskiem), przy czym zwykle określa się prawdopodobieństwo wystąpienia niepożądanego zjawiska. Z pojęciem ryzyka związane są następujące terminy: prawdopodobieństwo, wartość oczekiwana, zysk, strata, poziom ryzyka, scenariusz. Scenariusz (prawdopodobny scenariusz) łączy ze sobą w jedną całość: ryzyko, stratę i zysk na pewnym poziomie prawdopodobieństwa, [<http://encyclopedia.worldsearch.com>].

Rozwój teorii ryzyka nastąpił po koniec lat 90. Jeden z jej teoretyków: Ron Dembo zdefiniował ogólną metodę szacowania ryzyka jako poziomu starty wywołanej określonym działaniem. Metoda ta została powszechnie wykorzystana w zarządzaniu ryzykiem finansowym.

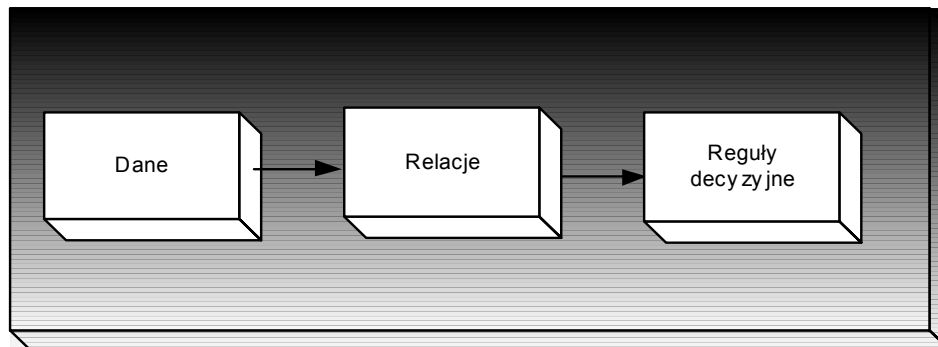
Niezależnie od dziedziny analiza ryzyka związanego z podejmowaniem decyzji przebiega podobnie.

Procedurę podejmowania decyzji można schematycznie przedstawić, jak na rysunku: (Rys. 1). Na początku definiowany jest problem, który ma zostać rozwiązany, następnie sprawdzana jest kompletność **danych** i ewentualnie uzupełniane są dane brakujące. W dalszej kolejności opracowywany jest algorytm rozwiązania problemu, określane są **relacje** pomiędzy danymi

oraz ustalane są kryteria, jakie muszą być spełnione przez wynik analizy. Następnie określone są relacje pomiędzy kryteriami i wybierana jest **reguła decyzyjna**. Algorytm rozwiązania problemu, wspierany narzędziami GIS, jest zbudowany z analiz elementarnych.

GIS jest rozumiany jako przybliżenie świata rzeczywistego, a elementarne opcje systemu służą do obliczania, na podstawie istniejących w systemie danych, innych wielkości.

Zgromadzone dane mogą być ze sobą połączone wzajemnymi relacjami, która za pomocą narzędzi GIS można również modelować.



Rys. 1. Proces wspomaganie decyzji za pomocą systemów GIS

Każdy etap procedury podejmowania decyzji może być obciążony błędami. Dane mogą być obciążone błędami źródeł, z których pochodzą, relacje - błędami modelu, a reguły decyzyjne - wiarygodnością hipotez.

Proces podejmowania decyzji może uwzględniać lub nie uwzględniać analizy ryzyka. Ryzyko bywa szacowane na wszystkich, lub tylko na wybranych, etapach analizy: wprowadzania danych, określania relacji pomiędzy danymi oraz na etapie reguły decyzyjnej (Rys. 1). W każdym przypadku można indywidualnie określić istotność ryzyka związanego z danym elementem analizy.

## Struktura pracy

W pierwszej części pracy (rozdziały: 3, 4 i 5) zamieszczono, opracowane w oparciu o literaturę, podstawy teoretyczne metod wspomaganie decyzji za pomocą systemów GIS. Działanie tych metod zilustrowano własnymi przykładami praktycznymi.

Druga część pracy (rozdziały: 6 i 7) przedstawia autorskie propozycje szacowania ryzyka analizy GIS uwzględniając wpływ błędów danych źródłowych na niedokładność relacji (por. Rys. 1).

W przypadku wykorzystywania materiałów z literatury każdorazowo podawane jest źródło.

Przykłady praktyczne zamieszczone w pracy zostały przygotowane w oparciu o dane pochodzące z Wojewódzkiego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Krakowie oraz z Urzędu Gminy Zabierzów (Powiat Krakowski).

## 2. Sformułowanie problemu i teza pracy

---

**Przedmiotem** prowadzonych badań są analizy GIS, w tym głównie **ryzyko** z nimi związane.

Analizy GIS można wykonywać, zakładając bezbłądność bazy danych, rozumianą jako bezbłądność danych, relacji i reguł decyzyjnych. W psychologii nazywa się to podejmowaniem decyzji w warunkach pewności (deterministyczna metoda teorii decyzji).

W przypadku analiz GIS uwzględniających błędności bazy danych mówi się o podejmowaniu decyzji w warunkach ryzyka lub niepewności (niedeterministyczna metoda teorii decyzji).

Pełna analiza ryzyka procesu wspomagania decyzji za pomocą systemu GIS, przeprowadzona metodą niedeterministyczną, powinna uwzględniać błędy danych źródłowych, niedokładność relacji oraz reguł decyzyjnych. Nie zawsze jest możliwe przeprowadzenie analizy ryzyka w pełnym zakresie. Istotność niedokładności poszczególnych elementów może być różna i powinna być każdorazowo przeanalizowana w celu uwzględnienia przede wszystkim niedokładności najistotniejszych elementów.

**W niniejszej pracy skoncentrowano się na podstawowych elementach: danych źródłowych i analizie obciążania modeli GIS błędami danych źródłowych.**

Innym zagadnieniem jest analiza dokładności modelu GIS w stosunku do rzeczywistości, co nie było to przedmiotem analizy w niniejszej pracy. Przykładowo, jeśli analizujemy Numeryczny Model Terenu (DTM<sup>2</sup>) to koncentrujemy się na wpływie niedokładności danych źródłowych, w tym przypadku wysokości, na wynik elementarnej analizy przestrzennej. Czyli interesują nas na przykład błędy nachyleń obliczone z DTM, a nie dokładność DTM w stosunku do rzeczywistości. Dokładność DTM, a właściwie błąd DTM jest elementem wejściowych takiej analizy.

Istnieją generalnie dwa sposoby określania wpływu błędów danych źródłowych na niedokładność analizy. Pierwszy polega na wykorzystaniu zależności funkcyjnej pomiędzy błędem wyniku analizy a błędami danych źródłowych. Drugi wykorzystuje metody probabilistyczne, których zasada jest odmienna i w związku z tym nie korzystają one z powyższej zależności.

Zależność funkcyjna pomiędzy błędem analizy a błędem danych źródłowych może być wyprowadzona w sposób ścisły, lub z wykorzystaniem metod numerycznych. Rozwiązania ścisłe nie są wykorzystywane powszechnie, głównie z uwagi na trudność uzyskania analitycznych funkcji opisujących błąd analizy.

---

<sup>2</sup> DTM - Digital Terrain Model – Numeryczny Model Terenu



Z kolei metody numeryczne, w wyniku których stosunkowo prosto jest uzyskać zależność pomiędzy błędem analizy a błędem danych wejściowych, dostarczają zwykle skomplikowanych wzorów przybliżonych, o wielu współczynnikach, które praktycznie trudno wykorzystywać.

Metody statystyczne, obecnie głównie metoda Monte Carlo, są często stosowane z powodu swojej prostoty. W metodzie Monte Carlo wykonuje się analizę przestrzenną najpierw w oparciu o istniejące w bazie GIS dane. Następnie dane wejściowe są sztucznie zaburzane błędem przypadkowym (o zadanym rozkładzie) i analiza przestrzenna wykonywana jest powtórnie. Potem obliczana jest różnica pomiędzy wynikiem analizy na danych zaburzonych i niezaburzonych. Odchylenie standardowe tak uzyskanej mapy różnicowej<sup>3</sup> traktowane jest jako przybliżenie błędu analizy przestrzennej wykonanej na danych obciążonych błędem.

Wadą metody statystycznej jest przede wszystkim uzyskiwanie jednej wartości błędu analizy przestrzennej (odchylenie statystyczne mapy różnicowej), konieczność wielokrotnego powtarzania analizy w celu uzyskania **rozkładu przestrzennego błędu analizy** oraz praktycznie niemożność wprowadzenia **rozkładu przestrzennego błędu danych źródłowych**.

Analizy GIS przeprowadza się zwykle w sposób etapowy i istotna jest możliwość zarówno wprowadzania jak i uzyskania w wyniku analizy, przestrzennego rozkładu dokładności.

Wydaje się, że tylko metody analityczne całkowicie to umożliwiają i w związku z tym postawiono tezę, następującej treści:

**Analityczne określenie niedokładności wyniku analizy przestrzennej pozwala na szacowanie powierzchniowego rozkładu ryzyka w systemach GIS.**

W pracy podano oryginalne, autorskie rozwiązania analityczne, które mogą być wykorzystane w analizach ryzyka przy podejmowaniu decyzji w warunkach niepewności. Ponadto zaprezentowano przykłady praktyczne dowodzące poprawności postawionej tezy.

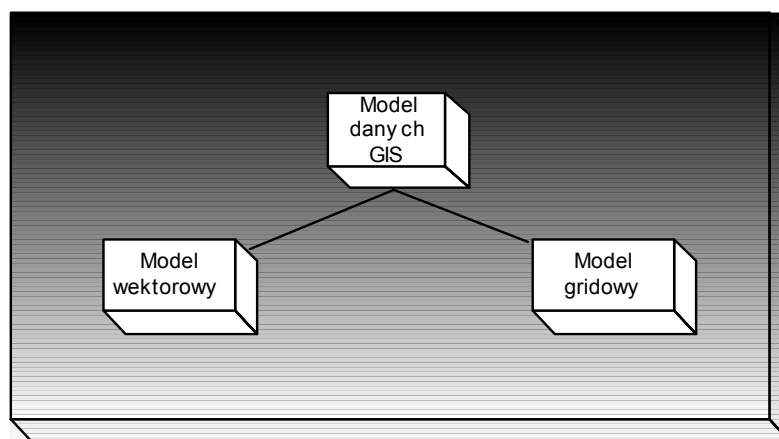
---

<sup>3</sup> Mapa różnicowa – mapa przedstawiająca różnicę pomiędzy wartościami atrybutów na jednej mapie w stosunku do wartości atrybutu na drugiej mapie.

### 3. Modele danych i rodzaje analiz GIS

---

System GIS jest przestrzenną bazą danych, co oznacza, że do każda informacja opisowa (atrybut) jest powiązana z lokalizacją przestrzenną. Z drugiej strony GIS, podobnie jak mapa jest rozumiany jako pewien model rzeczywistości, przy czym modelowanie, po pierwsze polega na przybliżeniu lokalizacji poprzez próbkowanie<sup>4</sup> świata rzeczywistego. Innym zagadnieniem jest modelowanie atrybutów. W systemach GIS rzeczywistość, w sensie lokalizacji jest modelowana na dwa sposoby, za pomocą modelu wektorowego i rastrowego (gridowego), (Rys. 2). Pojęcia: wektor, raster i grid nie mają jednoznacznej definicji we wszystkich dziedzinach nauki. W systemach GIS model wektorowy oznacza, że informacją o położeniu obiektu są współrzędne. Natomiast, jeśli chodzi pojęcia: model rastrowy i model gridowy to w sensie struktury danych są one bardzo bliskie. W modelu rastrowym rzeczywistość jest modelowana za pomocą: macierzy pikseli<sup>5</sup>, a w modelu gridowym za pomocą regularnej siatki kwadratów (Rys. 3). Różnice pomiędzy modelem rastrowym i gridowym są raczej natury interpretacyjnej i nie mają znaczenia z punktu widzenia rodzaju modelu danych GIS. Można przyjąć, że pojęcie raster w większym stopniu jest odpowiednie dla obrazów, a grid dla DTM.

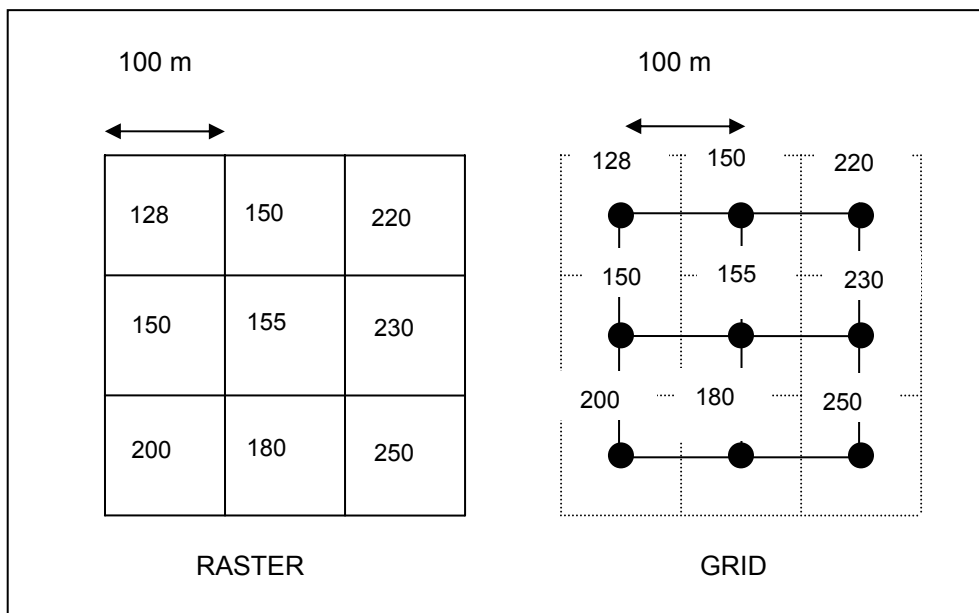


Rys. 2. Model danych GIS

---

<sup>4</sup> Próbkowanie – pozyskiwanie w wybranych punktach informacji o świecie rzeczywistym

<sup>5</sup> Piksel – najmniejszy element obrazu



Rys. 3. Interpretacja modelu rastrowego i gridowego

Rodzaje analiz przestrzennych, bo nie tylko sposób ich przeprowadzenia, zależą od modelu danych, którymi dysponujemy (Rys. 4). Istnieją analizy, które można wykonać zarówno w modelu wektorowym jak i w modelu rastrowym (gridowym) oraz są analizy, które można przeprowadzić jedynie w jednym z modeli. W zależności od potrzeb wykonywanej analizy istnieje konieczność konwersji danych pomiędzy modelem wektorowym i rastrowym.

Ryzyko związane z podejmowaniem decyzji w oparciu o analizy GIS jest uzależnione od niedokładności danych źródłowych, a sposób jego uwzględnienia, od modelu danych. W związku z tym przedmiotem analizy niniejszego rozdziału są różnice pomiędzy modelem rastrowym i wektorowym.

### Model wektorowy

W modelu wektorowym rzeczywistość jest modelowana za pomocą obiektów: punktów, linii, czy obiektów obszarowych (poligonów). Geometria obiektów określona jest za pomocą współrzędnych: punktu, punktów załamania linii czy granicy poligonu<sup>6</sup>. Każdy obiekt posiada unikalny identyfikator, poprzez który następuje połączenie do opisowej bazy danych o atrybutach obiektu. Możliwe jest dołączanie do obiektu wektorowego wielu atrybutów lub zbiorów atrybutów. Model wektorowy wykorzystywany jest wtedy, kiedy w rzeczywistości mamy do czynienia z obiektami, które w naturalny sposób można przedstawić jako punkt, linia, czy poligon (studzienka, oś drogi, działka ewidencyjna).

<sup>6</sup> Granica poligonu – linia zamknięta ograniczająca obiekt obszarowy

## Model gridowy

Rzeczywistość może być modelowana również za pomocą modelu gridowego (rastrowego). Zwykle w ten sposób przedstawia się przestrzenny rozkład zmienności jakiegoś atrybutu (wysokości, temperatury, zanieczyszczenia itp.).

W modelu grid'owym przestrzeń jest podzielona na elementarne pola, piksele tworzące macierz dwuwymiarową o rozmiarze  $m$  na  $n$  ( $m$ -wierszy na  $n$ -kolumn). Bieżące położenie piksela określane jest poprzez numer wiersza ( $i$ ) i numer kolumny ( $j$ ). Najmniejszym elementem macierzy jest piksel, który charakteryzuje atrybut w obrębie oczka siatki (grid'a), na którą podzielony jest dany obszar. Dla każdego oczka siatki (piksela) zapisana jest liczba, która reprezentuje jakąś cechę: typ gleby, wysokość n.p.m., typ użytkowania, kod z planu zagospodarowania przestrzennego, czy w przypadku obrazu - jasność.

## Zastosowania GIS

Celem tworzenia baz danych, w tym baz danych GIS, jest zgromadzenie informacji na wybrany temat. Elektroniczna forma bazy pozwala na efektywne sortowanie danych i przez to na szybki dostęp do wybranych informacji. Właśnie selektywny dostęp do danych umożliwia, w przypadku danych GIS, tworzenie map na życzenie<sup>7</sup>. W zależności od potrzeb można wybrać interesujące obiekty i przedstawić je wspólnie, w postaci mapy tematycznej. Wielu użytkowników może korzystać z tej samej bazy GIS i tworzyć mapy na własne potrzeby. System GIS umożliwia ponadto wykonywanie różnorodnych analiz, zarówno prostych, jak i bardzo złożonych. Analizy mogą dotyczyć części opisowej bazy danych i jej części graficznej. W bazie danych GIS można wykonywać podobne analizy, jakie wykonuje się w bazach danych nieprzestrzennych (analizy statystyczne, graficzne prezentacje wyników analiz itp.). Powiązanie informacji opisowej i przestrzennej umożliwia wykonywanie specyficznego rodzaju analiz i one stanowią przedmiot badań, których wyniki zamieszczone zostały w niniejszej pracy.

Prostą analizą jest pytanie o atrybut, np.: „pokaż drogi krajowe”. Nieco bardziej zaawansowane są operacje buforowania, np.: „pokaż obszary odległe od drogi o 100 m”, czy generowania map spadków i ekspozycji z DTM. Możliwe są także bardzo skomplikowane analizy takie jak: modelowania wilgotności, erozji, czy wielkości produkcji roślinnej (Rys. 4). Niektóre z analiz można wykonać zarówno w modelu wektorowym jak i gridowym, niektóre tylko w modelu wektorowym, a inne tylko w modelu gridowym.

Bardziej zaawansowane analizy przeprowadzane są zwykle w modelu gridowym, ponieważ daje on nieporównywalnie większe możliwości. Poza tym większość analiz, możliwych do wykonania w modelu wektorowym jest również możliwa do wykonania w modelu gridowym (poza analizami typowymi dla modelu wektorowego tj. analizami poprawności geometrycznej i

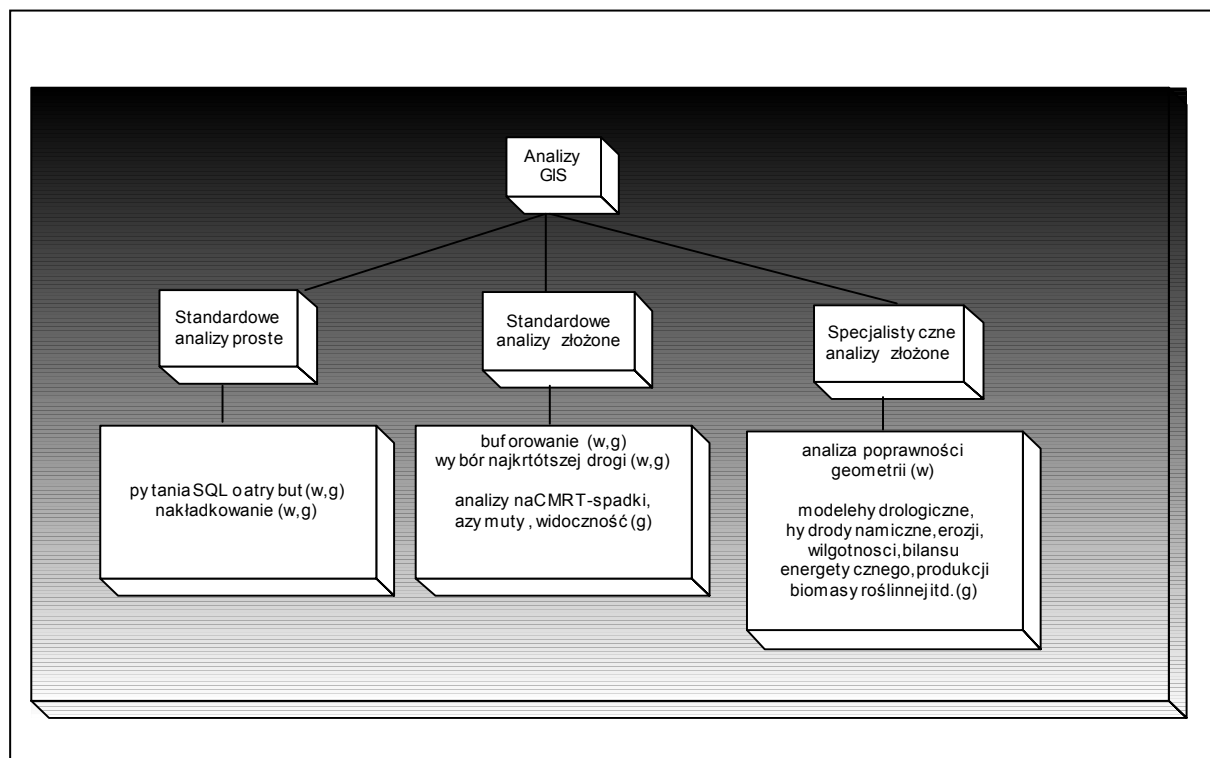
---

<sup>7</sup> Mapa na życzenie – wygenerowana w oparciu o bazę GIS mapa, na której są przedstawione jedynie wybrane warstwy tematyczne.

topologicznej). Poprawność geometryczna, topologiczna jest bardzo istotna na etapie tworzenia bazy danych GIS, czyli wprowadzania danych. Etap właściwych analiz przestrzennych prowadzi się później na danych poprawnych w sensie geometrycznym. Z punktu widzenia stopnia skomplikowania analiz geometrycznych i topologicznych można je zaliczyć do złożonych analiz GIS (Rys. 4).

Jak widać na rysunku: (Rys. 4) dużą grupę analiz stanowią specjalistyczne analizy, w większości gridowe. Ogólnie można je podzielić na analizy: lokalne i globalne. Analizy lokalne dotyczą bezpośrednio danego punktu (algebra map) lub najbliższego jego sąsiedztwa (obliczanie nachyleń i azymutów, filtracje). Analizy globalne obejmują większy obszar (analizy kosztów, widoczności, modele hydrologiczne itp.).

Na poniższym rysunku Rys. 4 podano przykłady różnych analiz przestrzennych, w nawiasie literą: „g” oznaczono, że analizę można wykonać w modelu gridowym, a literą: „w”, że można ją wykonać w modelu wektorowym.



Rys. 4. Analizy GIS ze względu na rodzaj analizy, w nawiasie model danych, który umożliwia wykonanie analizy (w-wektorowy, g-gridowy)

## Przykład 1

W standardowych analizach wykorzystuje się proste operacje matematyczne na atrybutach. Przykładem takiej analizy jest „pytanie o lokalizację”, czyli odpowiedź na pytanie: „gdzie znajdują się obszary spełniające np. 2 warunki:

- jest to obszar leśny

- na glinach piaszczystych?”.

W pierwszym kroku zostaje zadane proste pytanie o atrybut, w wyniku którego z mapy użytkownika terenu zostają wybrane tylko obszary leśne, a z mapy glebowej gliny piaszczyste. Rezultatem zapytania są 2 mapy. Na jednej znajdują się tylko obszary zalesione, a na drugiej tylko obszary występowania glin piaszczystych. Na mapie będącej wynikiem takiego zapytania atrybut obszaru spełniającego zadany warunek ma wartość na przykład jeden, a dla obszaru, na którym warunek ten jest niespełniony wartość zero. W dalszej kolejności następuje nałożenie na siebie obu map, a właściwie pomnożenie atrybutów obu map przez siebie lub inaczej operacja logiczna AND.

## Przykład 2

Analiza może być bardziej skomplikowana i uwzględniać w pierwszym etapie także innego rodzaju analizy przestrzenne: lokalne<sup>8</sup> i globalne<sup>9</sup>. Przykładowo można uwzględnić mapy pochodne DTM, czyli mapy nachyleń lub azymutów. Żeby wygenerować mapę nachyleń, czy azymutów należy wykonać operację lokalną na DTM. W związku z tym analizę z poprzedniego przykładu można poszerzyć i może ona brzmieć: „pokaż obszary leśne na glinach piaszczystych o nachyleniu powyżej 3% i ekspozycjach zachodnich”. W takim przypadku przebieg analizy będzie następujący:

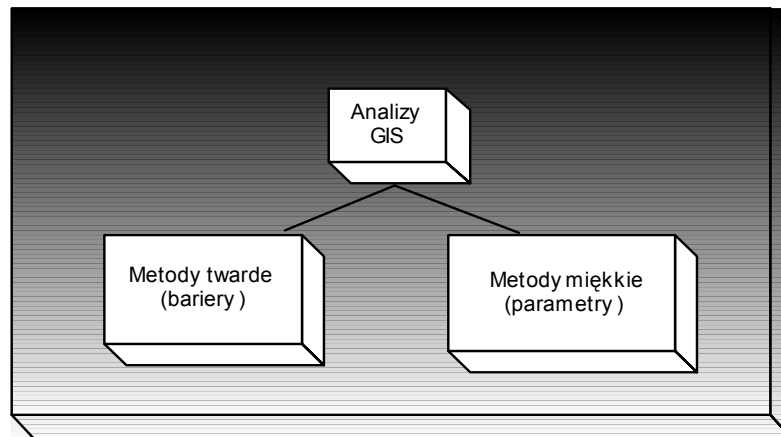
- Wygenerowanie nachyleń i azymutów nachyleń z DTM (analiza lokalna - sąsiedztwa),
- Pytania o atrybut, „pokaż obszary” spełniające następujące warunki:
  - nachylenie >3%,
  - azymut należy do przedziału: 225<sup>0</sup> – 315<sup>0</sup>,
  - obszar leśny,
  - glina piaszczysta.
- Nałożenie na siebie wyników powyższych analiz elementarnych w celu znalezienia części wspólnej, w praktyce polega to na pomnożeniu ich przez siebie (algebra map).

Opisana analiza jest złożona również z tego powodu, że wymaga hybrydowego modelu danych GIS, czyli modelu mieszanego: wektorowo-rastrowego. Do tej pory nie istnieje oprogramowanie, które umożliwiłoby tego typu analizę wprost. Na przykład, mapa użytkownika terenu oraz mapa glebowa, są obiektowe (wektorowe), a DTM gridowy (rastrowy). Analiza wymaga konwersji map wektorowych na raster, i potem wykonanie następnych czynności za pomocą oprogramowania rastrowego. Można wybrać też inne

---

<sup>8</sup> Analiza lokalna – analiza przestrzenna uwzględniająca atrybuty znajdujące się w pikselach sąsiednich stosunku do piksela, dla którego wykonywana jest analiza

rozwiązanie, czyli np. wyliczyć z DTM mapy nachyleń i ekspozycji w modelu rastrowym, zadać zapytanie o atrybut: „pokaż obszary o nachyleniach >3% i ekspozycjach zachodnich”, a następnie dokonać konwersji wyniku na wektor i dalsze analizy logiczne (w tym przypadku nakładkowanie) wykonać w modelu wektorowym.



Rys. 5. Podział analiz GIS ze względu na przyjęte kryterium

Powyżej został opisany krok po kroku przebieg wykonania przestrzennej analizy GIS, na podstawie przyjętych przykładowo kryteriów. W trakcie podejmowania decyzji z wykorzystaniem analiz GIS należy szczególną uwagę zwrócić na właściwy dobór tych kryteriów. Kryteria, czyli warunki jakie musi spełnić wynik analizy przestrzennej mogą być dwojakiego rodzaju: twarde lub miękkie (Rys. 5). W obu omawianych w tym rozdziale przykładach zastosowano twarde kryteria (np. obszar o nachyleniu większym niż 3%). Wartość progowa przyjmowana w analizie przestrzennej z wykorzystaniem twardego kryterium nazywana jest barierą.

W przypadku przeprowadzania analizy z wykorzystaniem kryteriów miękkich, warunki jakie musi spełniać wynik analizy są definiowane w postaci parametru (np. im teren bardziej nachylony tym lepiej). Inaczej mówiąc kryterium definiowane jest nie jako jedna liczba, ale jako przestrzenny rozkład parametru związanego przykładowo z nachyleniem terenu.

Podsumowując - **kryterium** oznacza warunek jaki musi spełnić wynik analizy. Pojęcie parametru pojawia się przy miękkim definiowaniu kryteriów i **parametr** oznacza wielkość związaną z danym kryterium. Na przykład jeśli definiujemy kryterium: „im teren bardziej nachylony tym lepiej” to parametrem związanym z tym kryterium jest mapa nachyleń.

Przyjmowanie kryterium w postaci parametru umożliwia przeprowadzanie bardziej złożonych analiz przestrzennych. Zagadnienie to będzie przedmiotem rozważania w następnym rozdziale.

<sup>9</sup> Analiza globalna – analiza przestrzenna, w której dla każdego piksela analizowane są atrybuty znajdujące się we wszystkich pikselach grida

## **4. Deterministyczne metody podejmowania decyzji**

---

Jakkolwiek zasadnicza część pracy dotyczy problematyki dokładności baz danych przy podejmowaniu decyzji w warunkach niepewności, to jednak dla spójności prezentowanych poglądów niezbędne jest przedstawienie także drugiej strony, czyli problematyki związanej z podejmowaniem decyzji w warunkach pewności. Szczególnie, że w obu przypadkach można rozważać problem ryzyka procesu decyzyjnego.

W niniejszym rozdziale zamieszczono własne przykłady obliczeniowe ilustrujące omawiane zagadnienie.

W normatywnym podejściu do podejmowania decyzji wybierany jest wariant optymalny. Podmiot analizy definiuje zestaw kryteriów, lub częściej różne warianty zestawu kryteriów, które są analizowane w trakcie automatycznego wspomaganie procesu podejmowania decyzji z wykorzystaniem systemu GIS. W zależności od tego czy analizę przeprowadza się dla jednego podmiotu, czy dla wielu podmiotów równocześnie proces oceny kryteriów może przebiegać dwoma metodami [Eastman J.R. 2001]:

- Analiza wieloparametryczna (Multi-Criteria Evaluation – MCE),
- Analiza wielopodmiotowa (Multi-Object Evaluation – MOE).

Analiza wieloparametryczna (MCE) w najprostszej postaci jest poszukiwaniem części wspólnej, czyli poszukiwaniem obszarów, które jednocześnie spełniają wszystkie kryteria. Dwa przykłady takiej analizy, przy przyjęciu kryterium twardego opisano w poprzednim rozdziale. W omawianej analizie ważność wszystkich kryteriów była jednakowa. Oprócz kryteriów typu bariera istnieją kryteria typu parametr. W tym przypadku kryterium nie jest jedną liczbą, ale można go rozumieć jako funkcję np. im dalej od drogi tym lepiej. Tak zdefiniowane kryterium umożliwia wagowanie kryteriów, można na przykład założyć, że warunek związany z odległością od dróg jest najważniejszy.

Ocena wielopodmiotowa (MOE) występuje wtedy, gdy mamy do czynienia z wieloma podmiotami zainteresowanymi analizą. Mogą one być w stosunku do siebie komplementarne lub konfliktowe. Podmioty komplementarne poszukują wspólnych rozwiązań np. lokalizacji przeznaczonej na rekreację równocześnie uwzględniającej wymagania ochrony środowiska. Podmioty konfliktowe poszukują rozwiązania kompromisowego np. dla lokalizacji fabryki i spełniającej wymagania ochrony środowiska.

Ogólnie można powiedzieć, że analizy mogą być wielokryterialne i jednocześnie wielopodmiotowe.



## 4.1 Ocena wieloparametryczna (Multi-Criteria Evaluation – MCE)

Wykonując analizę z wykorzystaniem twardych kryteriów uzyskujemy w wyniku mapę, na której są obszary spełniające i niespełniające zadane warunki. Łączenie kryteriów polega poszukiwaniu części wspólnej. W przypadku miękkiego zdefiniowania kryteriów nie uzyskuje się tak jednoznacznego wyniku analizy. W wyniku takiej analizy można uzyskać jedynie stopień przydatności (inaczej przydatność) danego obszaru do zadanego warunkami analizy celu.

Przydatność jest obliczana na podstawie ważonego łączenia kryteriów [Voogd, H., 1983, Carver, S.J., 1991, Eastman J.R. 2001]:

$$(1) \quad S = \sum_{i=1}^n w_i x_i,$$

gdzie:

- S-przydatność,
- $w$  – waga kryterium,
- $x$  – wartość parametru,
- $i$  – kryterium
- $n$ - ilość kryteriów.

W przypadku konieczności zastosowania dodatkowo barier wzór (1) ulega modyfikacji:

$$(2) \quad S = \sum_{i=1}^n w_i x_i \prod c_j$$

gdzie:

- $c_j$  –j-ta bariera.

W związku z tym, że kryteria są trudno porównywalne między sobą, bo trudno porównać wartości nachyleń w stopniach z odległością w metrach, wprowadza się standaryzację parametrów odpowiadających poszczególnym kryteriom:

$$(3) \quad x_i = (R_i - R_{\min}) / (R_{\max} - R_{\min}) \cdot d$$

gdzie:

- $x_i$ - parametr odpowiadający danemu warunkowi po standaryzacji,
- $R_i$ – wartość parametru przed standaryzacją,
- $R_{\min}, R_{\max}$  –minimalna i maksymalna wartość parametru kryterium,
- $d$  – przedział standaryzacji.

## 4.2 Warianty metody MCE

Analiza kryteriów w może odbywać się 3 sposobami:

- Metodą nakładkowania - przykład takiej analizy znajduje się w rozdziale 3 – metoda twarda.
- Metodą liniowego wagowania (Weighted Linear Combination - WLC) – metoda miękka.
- Metodą uporządkowanej średniej ważonej (Ordered Weighted Average – OWA) – metoda miękka.

W ogólności metoda nakładkowania polega na pomnożeniu przez siebie lub dodaniu do siebie wszystkich wyników analiz elementarnych, czyli spełniających pojedyncze kryteria.

W wyniku analizy tą metodą wybierana jest albo część wspólna (operacja logiczna AND) wszystkich wyników analiz elementarnych albo wykonywana jest suma logiczna (OR). Inaczej mówiąc, w operacji AND za obszar, który spełnia wyniki analizy uznany zostaje obszar, dla którego zostały spełnione wszystkie kryteria, podczas kiedy w operacji OR wystarczy, że zostało spełnione, chociaż jedno kryterium.

Pozostałe dwie metody WLC i OWA są metodami miękkimi, a ich wykorzystanie pozwala na uwzględnienie kryteriów w mniej radykalny sposób niż w metodzie nakładkowania.

Metoda liniowego wagowania WLC polega na pomnożeniu każdego parametru przez wagę kryterium i zsumowaniu parametrów związanych ze wszystkimi kryteriami (wzór (1)). Tak uzyskany wynik jest następnie mnożony przez bariery zgodnie z wzorem (2), o ile oczywiście dodatkowo zdefiniowano kryterium w postaci bariery.

Metoda uporządkowanej średniej ważonej OWA stanowi rozwinięcie metody liniowego wagowania WLC. W metodzie tej wprowadza się dodatkowy zestaw wag porządkujących. Można powiedzieć, że metoda OWA jest najogólniejszym przypadkiem analizy, podczas gdy metoda nakładkowania i metoda liniowego wagowania są szczególnymi przypadkami metody OWA.

## 4.3 Metoda OWA

Działanie metody uporządkowanej średniej ważonej (Ordered Weighted Average – OWA) jest zależne od kompletu parametrów związanych z kryteriami w każdym punkcie. Omówione zostanie to na przykładzie. Weźmy pod uwagę 3 kryteria. Załóżmy, że wartości parametrów odpowiadające poszczególnym kryteriom uwzględniają już wagi, czyli obliczono zgodnie z wzorem (1) iloczyn  $w_i x_i$ . Uszeregujmy wyniki zgodnie z uzyskanymi wartościami, od najmniejszej do największej, załóżmy, że jest to zestaw następujących liczb [79,126,229]. Kolejność liczb w nawiasie zależy jedynie od wartości parametrów, a nie zależy od tego, jakie

to jest kryterium. W metodzie OWA tak zwagowane i uszeregowane parametry są mnożone przez wagi porządkujące, a wynik jest sumowany w celu otrzymania ostatecznej wartości przydatności w danym punkcie. Zestaw wag porządkujących zależy od intencji autora analizy, który w przypadku analizy zachowawczej (bezpiecznej) – operacji bez ryzyka, czyli AND, przyjmie wagi porządkujące [1,0,0]. W przypadku takiej analizy największą wagę, równą 1 ma najmniejsza wartość kryterium – w tym przypadku: 79. Inne kryteria nie mają żadnego wpływu na ostateczny wynik. Zestaw wag [0,0,1] reprezentuje wynik operacji OR, a zestaw [0.33,0.33,0.33] - wynik analizy metodą WLC. Obliczenie przydatności na podstawie różnego zestawu wag porządkujących zamieszczono w tabeli: [Tab 1].

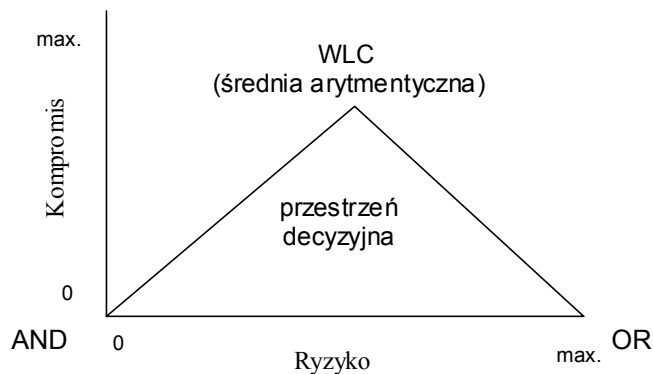
**Tab 1. Obliczenie przydatności na podstawie różnego zestawu wag porządkujących**

Wartość parametru			Ostateczna przydatność
79	126	229	
Wagi porządkujące			
0	0	1	229
0.1	0.2	0.7	193
0	0.5	0.5	178
0.33	0.33	0.33	143
0.5	0.5	0	102
0.7	0.2	0.1	103
1	0	0	79

Analizy z wykorzystaniem metody wag porządkujących prowadzi się wtedy, kiedy z jakiegoś powodu nie ma możliwości uzyskania rozwiązania całkowicie spełniającego zadane warunki. W wyniku analizy GIS uzyskuje się bowiem obszary spełniające zadane warunki. Może się jednak okazać, że uzyskany w ten sposób obszar jest zbyt mały, żeby można było go wykorzystać zgodnie z zaplanowanym a priori celem. Istnieje wtedy możliwość przeprowadzenia analizy wariantowej wykorzystując kompromis pomiędzy kryteriami, możliwość kompensowania się kryteriów i rozważając związane z tym ryzyko.

Ogólnie schemat działania zgodnie z metodą OWA ilustruje rysunek: Rys. 6. Zestaw wag - [1,0,0] reprezentuje wynik operacji AND i charakteryzuje się minimalnym poziomem ryzyka (kompromis=0, ryzyko =0), zestaw - [0,0,1] operację OR (kompromis=0, ryzyko maksymalne). Z lewej strony wykresu znajduje się, więc obszar decyzyjny pozbawiony ryzyka, z prawej obciążony maksymalnie ryzykiem, a w środku punkt maksymalnego kompromisu. Poruszając się z zestawem wag uporządkowanych po osi odciętych możemy zmierzać w kierunku zarówno zwiększania ryzyka (w prawo) lub jego zmniejszania (w lewo). Metoda średniej ważonej WLC jest szczególnym przypadkiem metody wag uporządkowanych OWA, kiedy przyjmując zestaw wag - [0.33,0.33,0.33], uzyskuje się średnie ryzyko, maksymalny kompromis i nie kompensuje się kryteriów (por. Rys. 6. ). Dla odmiany, zestaw wag uporządkowanych - [0.5, 0.3, 0.2] powoduje, że podejmujemy bezpieczniejszą (bardziej zachowawczą) decyzję niż w metodzie WLC - [0.33,0.33,0.33]. Przyjęcie natomiast zestawu wag - [0.2, 0.3, 0.5] skutkuje tym, że podejmujemy decyzje z większym ryzykiem, ale istnieje

również możliwość kompensacji niskich wartości przydatności dla jakiegoś kryterium poprzez wysokie wartości innego. Działanie metody wag porządkujących zilustrowano na poniższym przykładzie.



Rys. 6. Kompromis w zależności od ryzyka [zmodyfikowany za Eastman J.R. 2001]

#### 4.4 Przykład

Przedmiotem przykładowej analizy był wybór lokalizacji w okolicy Krakowa. Analizowany obszar stanowił kwadrat 40x40 km. Do analizy przyjęto następujące kryteria:

- im bliżej dróg krajowych i wojewódzkich tym lepiej,
- im bliżej rzek tym lepiej,
- im mniejsze nachylenie terenu tym lepiej.

Jako barierę przyjęto istniejącą już na danym terenie zabudowę mieszkalną lub infrastrukturę.

Przebieg analizy można przedstawić następująco:

1. Zapytanie o atrybut: „pokaż drogi krajowe i wojewódzkie”.
2. Obliczenie odległości od dróg (od wyniku powyższego zapytania).
3. Obliczenie odległości od rzek.
4. Obliczenie nachyleń z DTM.
5. Standaryzacja parametrów zgodnie ze wzorem (3).
6. Wykonanie analizy WLC z dwoma zestawami wag (0.33/0.33/0.33 –średnia arytmetyczna, 0.7/0.2/0.1 – średnia ważona).

7. Wykonanie analizy OWA z maksymalnym, minimalnym ryzykiem oraz wykorzystując metodę kompensacji parametrów (wagi porządkujące odpowiednio: 0/0/1, 1/0/0, 0.2/0.3/0.5).

W analizie WLC realizowany jest wzór (2), czyli wartość parametru jest mnożona przez wagę przypisaną do danego kryterium, operacja ta wykonywana jest dla każdego kryterium, wyniki są sumowane i po pomnożeniu przez kryterium typu bariera stanowią ostateczną wartość przydatności w danym punkcie. Przykładowe obliczenie znajduje się w tabeli: Tab 2

**Tab 2. Obliczanie przydatności w metodzie WLC**

Kryterium	Waga parametru		Przydatność	
	I	II	I	II
Odległość od dróg - 79	0.33	0.7	142	103
Nachylenie – 126	0.33	0.2		
Odległość od rzek - 229	0.33	0.1		

W metodzie OWA oprócz wagi przypisywanej kryteriom wprowadzany jest drugi zestaw wag, związany z wartością danego parametru w danym punkcie. Waga nie jest przypisana do kryterium, ale zależy od wzajemnego położenia względem siebie wartości parametrów po ich uporządkowaniu od najmniejszej do największej wartości. Ostateczne wagi uzyskuje się mnożąc wagi kryteriów z wagami porządkującymi, a następnie przeprowadzając ich modyfikacje, tak, żeby suma wag wynosiła 1. Przykładową analizę zamieszono w tabeli: Tab 3 Obliczenia wykonano dla zestawu wartości kryteriów (79/126/229) pozwalając na pewną kompensację kryteriów, przyjmując wagi porządkujące (0.2/0.3/0.5), czyli wagiując najmocniej małe wartości przydatności. Umożliwia to kompensację niskiego wyniku dla kryterium ważniejszego (w tym przypadku związanego z odległością od dróg i mającego początkowo wagę 0.7) poprzez wysoką wartość dla kryterium mniej ważnego (w tym przypadku związanego z odległością od rzek, mającego początkowo wagę 0.1). Nadanie, zatem w/w zestawu wag porządkujących ostatecznie spowodowało zmniejszenie wagi dla pierwszego kryterium z 0.7 na 0.56, a zwiększenie dla ostatniego z 0.1 na 0.2, co w wyniku dało wartość ostateczną kryterium: 120 (dla porównania w metodzie o średniej arytmetycznej wynik wynosi 142, a w metodzie ważonej, bez uwzględnienia wag porządkujących - 103).

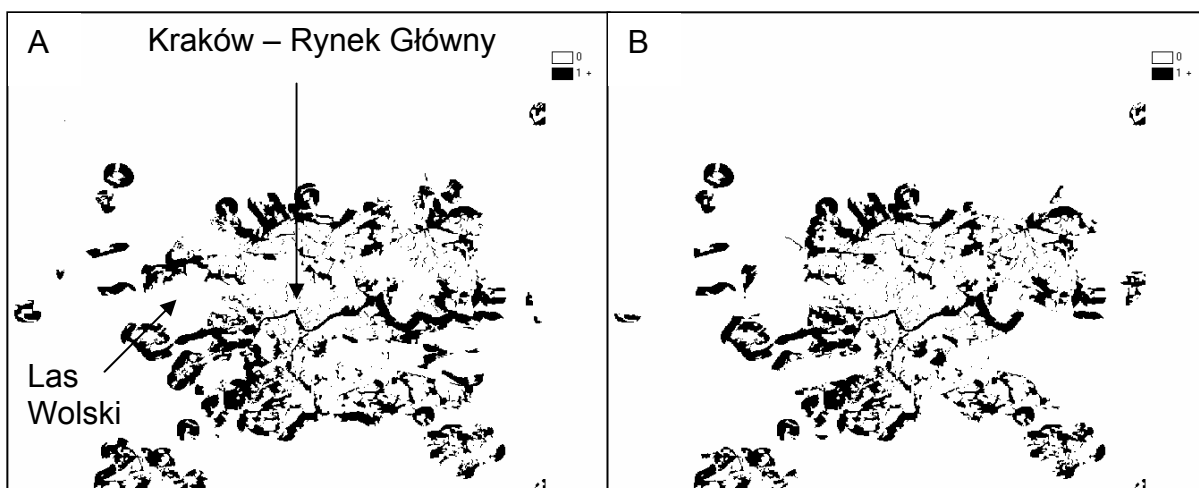
**Tab 3. Obliczanie przydatności w metodzie OWA – kompensacja kryteriów, zwiększanie ryzyka - zestaw wag porządkujących: 0.2/0.3/0.5**

Kryterium	Waga parametru	Waga porządkująca	Iloczyn wag	Waga zmodyfikowana	Wynik
Odległość od dróg - 79	0.7	0.2	0.14	0.56	120
Nachylenie – 126	0.2	0.3	0.06	0.24	
Odległość od rzek - 229	0.1	0.5	0.05	0.2	
Suma	1	1	0.25	1	

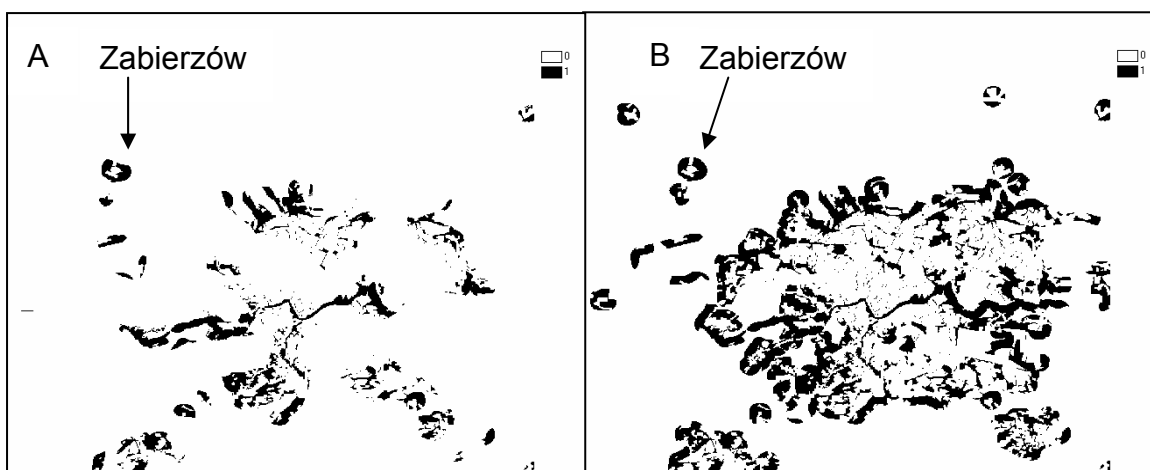
Metoda kompensacji opisana powyżej powoduje, że uzyskujemy wyższy wynik przydatności niż w tzw. metodach klasycznych „twardych”, czyli przesuwamy się na diagramie decyzyjnym w prawo, w kierunku ryzyka.

Wynik analizy metodą średniej ważonej (WLC) i uporządkowanej średniej ważonej (OWA) dla rejonu Krakowa przedstawiono na poniższych rysunkach. Na rysunku: Rys. 7 zamieszczono wynik analizy WLC po przyjęciu wag kryteriów: 0.33/0.33/0.33 (średnia arytmetyczna) i 0.7/0.2/0.1 (średnia ważona: odległość od dróg ważniejsza niż odległość od wody).

Wzmocnienie kryterium związanego z drogami powoduje zmniejszenie obszarów spełniających tak sformułowane kryterium. Porównanie wyników przy przyjęciu minimalnego i maksymalnego ryzyka zamieszczono na rysunku Rys. 8. Jak można było oczekiwać obszarów, w przypadku minimalizacji ryzyka (A), jest znacznie mniej niż przy jego maksymalizacji (B). Fragment wyniku analizy, jak na rysunku: Rys. 8 A i B, dla okolic Zabierzowa zamieszczono na rysunkach: Rys. 9 i Rys. 10, wykorzystując jako podkład ortofotomapę oraz dane katastralne. Na rysunkach białymi strzałkami pokazano obszary, które w jednej metodzie zostały uznane za przydatne jako lokalizacja spełniająca zadane warunki, a w drugiej metodzie uznane za nieprzydatne do tego celu.



Rys. 7. Wynik analizy WLC przy przyjęciu jednakowych wag dla wszystkich kryteriów (0.33/0.33/0.33), oraz różnych wag dla różnych kryteriów (0.7/0.2/0.1)

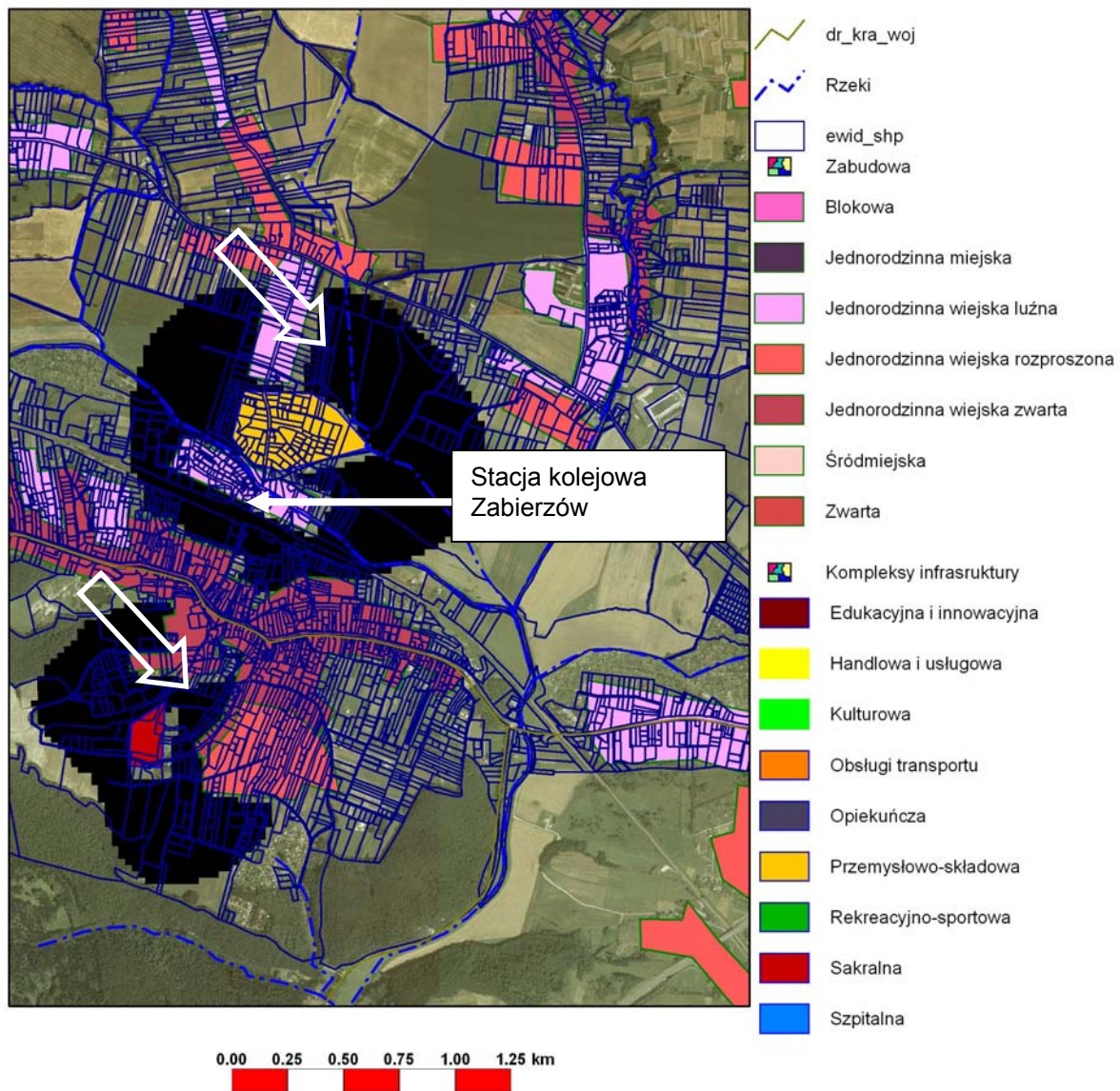


Rys. 8. Metoda OWA przy założeniu zestawu wag (0.3/0.3/0.3) i wag porządkujących (A -minimalizujących ryzyko 1/0/0, B -maksymalizujących ryzyko 0/0/1)



Rys. 9. Analiza za pomocą metody OWA o minimalnym ryzyku: 1/0/0 (fragment gminy Zabierzów), fragment Rys. 8 A.





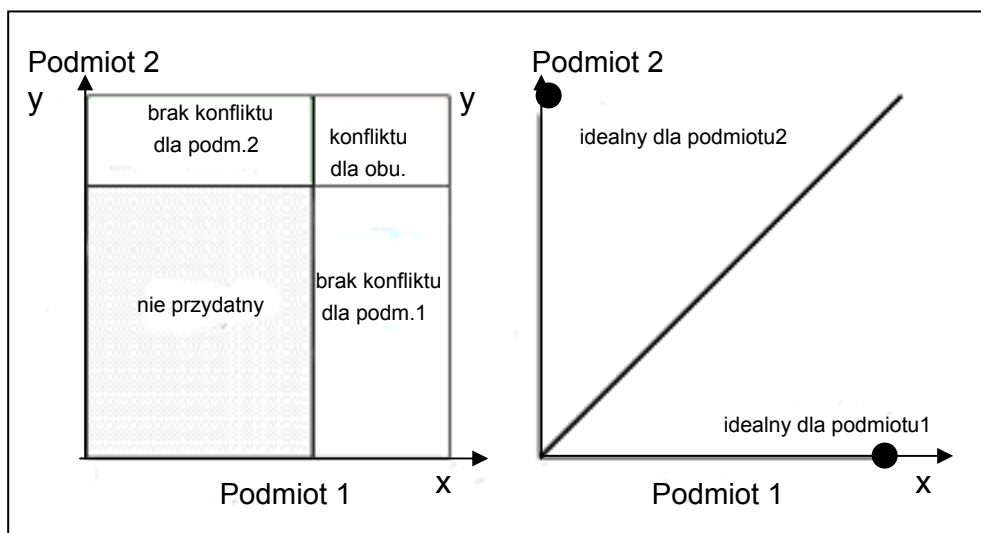
Rys. 10. Analiza za pomocą metody OWA o maksymalnym ryzyku: 0/0/1 (fragment gminy Zabierzów), fragment Rys. 8 B.

W podsumowaniu można powiedzieć, że świadome podejmowanie decyzji polega na odpowiednim wyborze kryteriów, odpowiednim ich zwagowaniu i wybraniu optymalnego poziomu ryzyka przy uzyskaniu możliwego kompromisu.

#### 4.5 Ocena wielopodmiotowa (Multi-Object Evaluation – MOE)

Ocena wielopodmiotowa może dotyczyć podmiotów mających wspólne cele (komplementarne) lub mających cele przeciwstawne (konfliktowe) [Eastman J.R. 2001]. W pierwszej sytuacji, proces decyzyjny może być przeprowadzony w oparciu o jedną z metod MCE. Zwykle, w modelach decyzyjnych, w przypadku sytuacji konfliktowej, obszar może zostać przydzielony tylko jednemu podmiotowi. Rozwiązywanie sytuacji konfliktowej może przebiegać etapowo. Po pierwsze należy podmioty uszeregować zgodnie z priorytetem ważności, następnie wybrać podmiot o najwyższym priorytecie i dla niego wykonać analizę

przydatności. Potem można wynik tej analizy potraktować jako kryterium typu bariera i przystąpić do dalszej analizy biorąc pod uwagę interesy następných podmiotów. Na poniższym diagramie (Rys. 11) przedstawiono graficznie sytuację konfliktową pomiędzy dwoma podmiotami.



Rys. 11. Sytuacja konfliktowa dla dwóch podmiotów [zmodyfikowany za Eastman J.R. 2001]

Na lewej części diagramu (Rys. 11) na osi x znajduje się przydatność dla podmiotu 1, a na osi y dla podmiotu 2. Na przykład na osi x znajduje się stopień przydatności danego terenu ze względu na nachylenie stoków (np. w celu budowy trasy narciarskiej) – czyli mapa pochodna z mapy nachyleń, a na osi y stopień przydatności obszaru ze względu na ochronę środowiska – czyli np. mapa pochodna z mapy zawierającej kompleksy przyrodnicze. Oczywiście parametry, przed porównaniem muszą zostać zestandaryzowane np. zgodnie ze wzorem (3). Na osi x po prawej stronie znajdują się obszary, które są najbardziej odpowiednie dla podmiotu 1, a na osi y u góry najbardziej odpowiednie dla podmiotu 2. Są to obszary nie konfliktowe, problem polega na tym, że zwykle powierzchnia tych obszarów jest znikomo mała i niewystarczająca do praktycznego wykorzystania. W związku z tym prawie zawsze istnieje konieczność wykorzystania obszarów konfliktowych, z prostokąta w prawym górnym rogu. W tym przypadku pomocna staje się linia rozgraniczająca interesy obu podmiotów (diagram po prawej stronie na Rys. 11). Proces decyzyjny w takim przypadku przebiega iteracyjnie i polega obrazowo mówiąc na poruszaniu się wzdłuż linii rozgraniczającej w dół, aż do uzyskania zadawalająco dużej powierzchni wynikowej. Linia rozdzielająca na powyższym rysunku jest nachylona pod kątem  $45^{\circ}$  i tak jest w przypadku 2 podmiotów o takim samym priorytecie ważności, jeśli któryś z podmiotów jest ważniejszy wtedy następuje nachylenie tej linii. Tangens kąta nachylenia odpowiada stosunkowi wag przypisanych do podmiotów.

## Przykład

Na poniższym przykładzie został zilustrowany przypadek konfliktowej analizy decyzyjnej związanej z przebiegiem autostrady na południu Krakowa [Drzewiecki W., Hejmanowska B., Pirowski T., 1999]. W modelowaniu uwzględniono następujące kryteria-parametry (w nawiasie: grupa interesów):

1. długość drogi (kierowcy);
2. nachylenie terenu, nie przekraczające 8% (kierowcy);
3. odległość od zabudowy (mieszkańcy);
4. odległość od lasów i gruntów ornych (ekologia);
5. koszt wykupu terenu (inwestor);
6. koszt równania ziemi (inwestor);
7. koszt budowy ekranów akustycznych (inwestor).

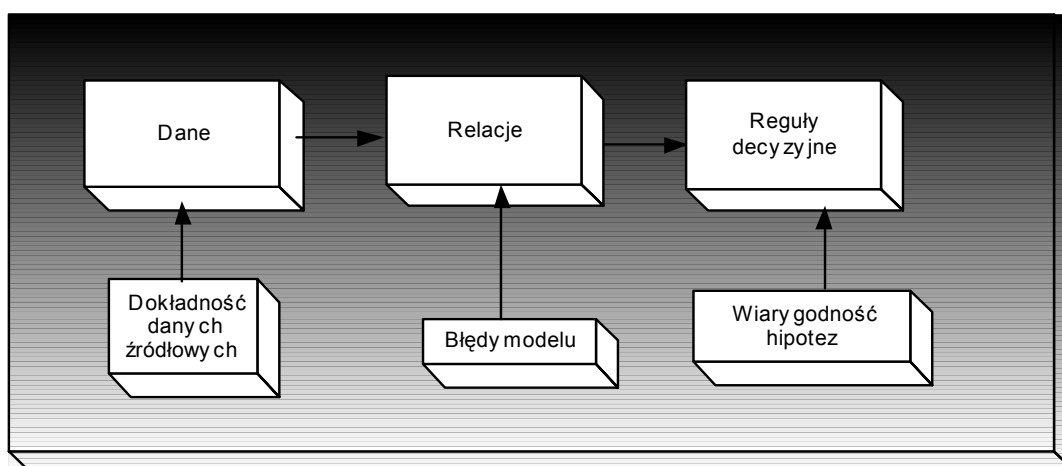


Rys. 12. Obszar analiz z trzema trasami przebiegu obwodnicy [Drzewiecki W., Hejmanowska B., Pirowski T., 1999]

Dla poszczególnych grup interesów otrzymano odmienne przebiegi tras: najkrótsza – trasa nr 3, korzystna dla mieszkańców - trasa nr 1, najtańsza dla inwestora - trasa nr 2. Analiza ma charakter teoretyczny z uwagi na fakt wybudowania już tej części autostrady. Jest to zmodyfikowany wariant nr 2, z tym, że autostrada została poprowadzona z północno zachodniej części kompleksu leśnego. W wyniku przeprowadzonej analizy droga numer 2 przecina ten kompleks leśny por. strzałka na Rys. 12).

## 5. Niedeterministyczne metody teorii decyzji

W rzeczywistości proces decyzyjny, z różnych powodów, przebiega najczęściej w warunkach niepewności. Wykorzystując jakiegokolwiek dane należy mieć świadomość ich dokładności (wiarygodności), która już na początku obciąża proces decyzyjny. W dalszej kolejności źródłem błędów jest niemożność idealnego opisu/wymodelowania relacji pomiędzy danymi. Na końcu, źródłem błędów jest wybrana reguła decyzyjna. Istnieje możliwość różnych kombinacji uwzględnienia niedokładności baz danych GIS w procesach decyzyjnych (Rys. 13). Można na przykład uwzględnić tylko niedokładność danych i dalej analizę przeprowadzić „twardą” regułą decyzyjną, bez analizowania błędów modelu relacji. Na drugim końcu jest przypadek pełnej analizy dokładności i w konsekwencji wykorzystania „miękkiej” reguły decyzyjnej podając prawdopodobieństwo przydatności/wystąpienia jakiegoś zjawiska.



Rys. 13. Problem niedokładności w procesie podejmowania decyzji

### Dokładność danych źródłowych

Dokładność danych źródłowych, w bazie danych GIS, może być określona, w przypadku danych pomiarowych, np. poprzez błąd średni kwadratowy. Błąd ten może dotyczyć niedokładności związanej z lokalizacją przestrzenną oraz z niedokładnością atrybutów. W przypadku DTM niedokładność sytuacyjna może być zdefiniowana jako np. błąd średni kwadratowy położenia punktu:  $m_{\text{pkt}}^2 = m_x^2 + m_y^2$ , a błąd atrybutu jako błąd określenia wysokości:  $m_z$ . W przypadku danych niemierzalnych dokładność można wyrazić w sposób proporcjonalny, np. jako proporcjonalny błąd nadmiaru lub/i niedomiary wynikowej klasy uzyskanej w rezultacie automatycznej klasyfikacji obrazu.

## **Błędy relacji (modelu)**

Źródłowe dane, w trakcie wykonywania analizy przestrzennej są poddawane wielu przekształceniom, transformacjom, służą do obliczania innych wielkości, są wprowadzane jako dane wejściowe do różnych modeli. Wszystkie te działania są obciążone błędami pochodzącymi zarówno od danych źródłowych (błędy danych źródłowych przenoszą się na wynik analizy) jak również niedokładnością modelu (nieadekwatnością modelu w stosunku do rzeczywistości).

Właściwie każda, nawet najprostsza analiza jest modelowaniem jakiejś innej wielkości, na podstawie współrzędnych obliczana jest powierzchnia obiektu, z DTM generowane są nachylenia. W obu tych przypadkach, w systemie GIS, wykorzystywany jest wybrany algorytm obliczeniowy, w sposób mniej, lub bardziej adekwatnie modelujący rzeczywiste wartości: powierzchni obiektu lub kąta nachylenia powierzchni terenu w danym punkcie.

Nieadekwatność modelu w stosunku do rzeczywistości oraz błąd danych źródłowych sumują się i określają niedokładność relacji (modelu).

## **Wiarygodność reguł decyzyjnych**

Analiza przestrzenna wykonywana jest zwykle etapowo i składa się z poszczególnych analiz cząstkowych. Reguły decyzyjne precyzują wzajemne połączenie ze sobą relacji (modeli), rozumianych jako analizy cząstkowe, oraz definiują ostateczną regułę wyboru. Oprócz „twardych” metod decyzyjnych, w których nie bierze się pod uwagę niedokładności reguły decyzyjnej, można także wykorzystać metody oparte na definiowanych poziomach wiarygodności [Eastman J.R. 2001]:

- prawdopodobieństwie (metoda „rozmyta”),
- prawdopodobieństwie warunkowym (metoda Bayes’a),
- ufności i wiarygodności (metoda Dempster-Shafer’a).

Wykorzystanie miękkich reguł decyzyjnych ma sens wtedy, gdy brana jest pod uwagę niedokładność danych lub relacji. Różne metody decyzyjne mogą być w takim przypadku wybrane i ostatecznie one również (oprócz dokładności danych i relacji) wpływają ostatecznie na wiarygodność wyniku analizy.

Jedną z „miękkich” metod jest „rozmyta” reguła decyzyjna. Jej charakter jest podobny do przyjmowania do analizy kryterium o charakterze parametru. W metodzie MCE można np. przyjąć jako kryterium parametr: im dalej od rzeki tym lepiej. W tym przypadku nie zostaje uwzględniona niedokładność danych źródłowych, ani niedokładność modelu, ale w sposób „rozmyty” określone zostaje kryterium.

W odróżnieniu od powyższej sytuacji, w „rozmytych” regułach decyzyjnych określane jest prawdopodobieństwo wystąpienia jakiegoś zjawiska, co może mieć związek np. z dokładnością danych źródłowych.

## 5.1 Niedokładność danych źródłowych

Proces podejmowania decyzji zawsze należy rozpocząć od rozpoznania dokładności danych źródłowych, czyli od oszacowania ich błędu. W dużej mierze dane podstawowe pochodzą z map, które powinny być wykonywane z określoną dokładnością. Może się zdarzyć, że, pomimo, że znana jest nominalna wartość błędu istnieje potrzeba jego weryfikacji. Sytuacja taka ma miejsce w przypadku kontroli produktu geodezyjnego np. DTM dostarczonego na konkretne zamówienie, który powinien spełniać określoną dokładność, np. +/-1.5 m na poziomie ufności 95%. Wykonawca powinien, po wyprodukowaniu DTM, przeprowadzić pomiar kontrolny i określić dokładność DTM. Wykonując n-pomiarów kontrolnych można obliczyć błąd średni kwadratowy ( $\sigma$ ) i następnie przedział ufności z następującego wzoru:

$$(4) \quad e = z \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

- z-zmienna standardowego rozkładu normalnego (1.96 dla poziomu ufności 95%),
- $\sigma$  - wartość błędu średniego kwadratowego,
- n- ilość pomiarów.

Wykonano przykładowo 20 pomiarów kontrolnych. Uzyskano błąd średni kwadratowy ( $\sigma$ ) +/- 1.5m . Przedział ufności obliczony ze wzoru (4), przyjmując poziom ufności 95%, wynosi: 0.66 m. Oznacza to, że w 95 przypadkach na 100 błąd średni kwadratowy modelu uzyskany np. przez firmę kontrolującą powinien znaleźć się w przedziale (+/-0.84, +/-2.16 m).

Można sytuację odwrócić i przekształcić wzór (4) w celu obliczenia minimalnej liczby pomiarów (n) jaką trzeba wykonać, żeby sprawdzić czy dany DTM spełnia nominalną dokładność [por. np. Starzyńska W. 2000, Eastman J.R. 2001]:

$$(5) \quad n = z^2 \sigma^2 / e^2,$$

Załóżmy, że sprawdzany jest DTM o nominalnej dokładności  $\sigma = +/-1.5$  m, a dokładność ta została określona na poziomie prawdopodobieństwa 95% ( $z=1.95$ ), z przedziałem ufności  $e = 0.2$  m. Po podstawieniu tych wartości do wzoru: (5) otrzymamy wartość  $n= 216$ . Oznacza to, że jeśli wykonany zostanie pomiar kontrolny w 216 punktach i potwierdzony założony poziom dokładności DTM to oznacza, że istnieje 95% prawdopodobieństwa, że w rzeczywistości różnica pomiędzy DTM, a wysokością pomierzoną w dowolnym punkcie będzie równa +/- 1.5m z tolerancją +/- 0.2m. W zależności od przyjętego przedziału ufności (e) ilość niezbędnych pomiarów (n) jest inna, im ten przedział jest mniejszy tym ilość pomiarów większa (Tab 4).

**Tab 4. Minimalna ilość punktów kontrolnych (n) w celu sprawdzenia dokładności DTM:  $\sigma = \pm 1.5m$ , prawdopodobieństwo 95%, dla różnych wartości przedziału ufności, (e).**

e [m]	N
0.01	86436
0.05	3457
0.1	864
0.2	216
0.5	35

Dokładność danych pomiarowych takich jak np. DTM można określać w [m] za pomocą błędu średniego kwadratowego, oraz dokonywać jej weryfikacji jak to zostało opisane powyżej. Nie dla wszystkich jednak danych gromadzonych w bazach danych GIS jest możliwe szacowanie błędu w taki sposób. Często mamy bowiem na przykład do czynienia z mapami pochodnymi obrazów satelitarnych. W tym przypadku z reguły trudno podać wartość błędu  $\sigma$ , a dokładność szacowana jest tzw. błędem proporcjonalnym, określającym, jaki procent obszaru został poprawnie sklasyfikowany np. metodą klasyfikacji nadzorowanej wielospektralnego obrazu satelitarnego. Jednak również w tym przypadku jest możliwa analiza dokładności danych źródłowych. Jeżeli przyjmie się jako błąd standardowy ( $\sigma$ ) [np. Starzyńska W. 2000]:

$$(6) \quad \sigma = \sqrt{\frac{p \cdot (1-p)}{n}}$$

gdzie:

- p- szacunkowy błąd proporcjonalny,

to po przekształceniu można obliczyć minimalny rozmiar próbki kontrolnej [por. np. Starzyńska W. 2000, Eastman J.R. 2001]:

$$(7) \quad n = z^2 p (1-p)/e^2.$$

Określenie błędu proporcjonalnego (p) polega na sprawdzeniu w terenie poprawności atrybutu w wybranych punktach. Załóżmy, że sprawdzamy wynik klasyfikacji obrazu, którego rezultatem jest mapa użytkowania terenu z określonymi kategoriami (atrybutami). W wyniku weryfikacji terenowej uzyskujemy wartości prawdziwe atrybutu (prawdziwy typ użytkowania) w punktach kontrolnych. Dane te możemy porównać z wartościami atrybutów na mapie użytkowania po klasyfikacji. Porównanie to może zostać przeanalizowane statystycznie, a zbiorczy wynik zaprezentowany w tabeli, jak poniżej (Tab 5).

**Tab 5. Macierz błędów proporcjonalnych**

<b>Rzeczywisty typ użytkowania terenu</b>								
<b>Wynik klasyfikacji</b>		<b>Las</b>	<b>Teren zabudowany</b>	<b>Łąki</b>	<b>Pola uprawne</b>	<b>Woda</b>	<b>Suma</b>	<b>Błąd nadmiaru</b>
	<b>Las</b>	80	0	0	0	1	81	<b>0.01</b>
	<b>Teren zabudowany</b>	5	70	12	3	4	94	<b>0.21</b>
	<b>Łąki</b>	0	8	30	14	0	52	<b>0.42</b>
	<b>Pola uprawne</b>	0	3	14	82	1	100	<b>0.18</b>
	<b>Woda</b>	0	2	0	0	15	17	<b>0.12</b>
	<b>Suma</b>	85	83	56	99	21	344	
	<b>Błąd niedomiaru</b>	<b>0.06</b>	<b>0.16</b>	<b>0.46</b>	<b>0.17</b>	<b>0.29</b>		<b>0.19</b>

Macierz błędów zawiera zarówno informacje na temat „niedoszacowania” danej kategorii (analiza kolumn) jak i „przeszacowania” (analiza wierszy). W kolumnie, pojawienie się wartości poza przekątną świadczy, że dana kategoria została mylnie zakwalifikowana jako inna (jest jej za mało). W wierszu natomiast, dane poza przekątną oznaczają, że piksel, który w rzeczywistości nie jest daną kategorią został do niej zakwalifikowany, czyli tej kategorii jest za dużo. Wartość całkowitego błędu (p) można odczytać w prawym dolnym narożniku.

W tym przypadku, zakładając  $p = 0.19$ ,  $e = 0.10$  i prawdopodobieństwo 95%, należałoby wykonać pomiar kontrolny w co najmniej 59 punktach w celu sprawdzenia wyniku klasyfikacji

## 5.2 Błędy modelu

Pierwszym etapem, w procedurze wspomaganie decyzji za pomocą GIS, jest zgromadzenie danych wejściowych np.: DTM i mapy użytkowania terenu powstałej w wyniku klasyfikacji obrazu. Jeśli znany jest błąd danych wejściowych to przenosi się on na wynik każdej wykonywanej analizy stając się błędem modelu, który definiuje ta analiza. Załóżmy, że istnieje potrzeba zamodelowania w oparciu o DTM mapy rozkładu temperatur. Z danych o średnich rocznych temperaturach w pomierzonych w stacjach meteorologicznych można określić empirycznie zależność pomiędzy temperaturą, a wysokością, np. wykorzystując metodę regresji liniowej. W wyniku takiej analizy można uzyskać wzór na obliczenie temperatury (T) w zależności o wysokości (H) wraz z analizą dokładności współczynników równania regresji np.:

$$(8) \quad T = A Z + B,$$

gdzie:



- $A=-0.005$ ,  $m_A=+/-0.00058$ ,
- $B=27$ ,  $m_B=+/- 1.24$

Zakładając błąd DTM  $m_z$  można z prawa przenoszenia się błędów obliczyć:

$$(9) \quad m_T^2 = 0.00058^2 Z^2 + (-0.005)^2 m_z^2 + 1.24^2$$

Przykładowo dla  $m_z = +/-10$  m i  $Z = 2000$  m błąd temperatury  $m_T = +/-1.7^\circ\text{C}$ .

Podsumowując, w bazie GIS istnieje model (równanie (8)), w oparciu o który można obliczyć na podstawie DTM rozkład temperatury. Można również oszacować błąd tego modelu (równanie (9)).

Modelowanie zjawiska przenoszenia się błędów jest trudne z wielu powodów:

- często istnieje korelacja pomiędzy zmiennymi,
- dla ograniczonej ilości operacji GIS znane są rozwiązania analityczne,
- stopień implementacji teoretycznych rozwiązań procesu przenoszenia się błędów do istniejącego oprogramowania GIS jest jeszcze śladowy.

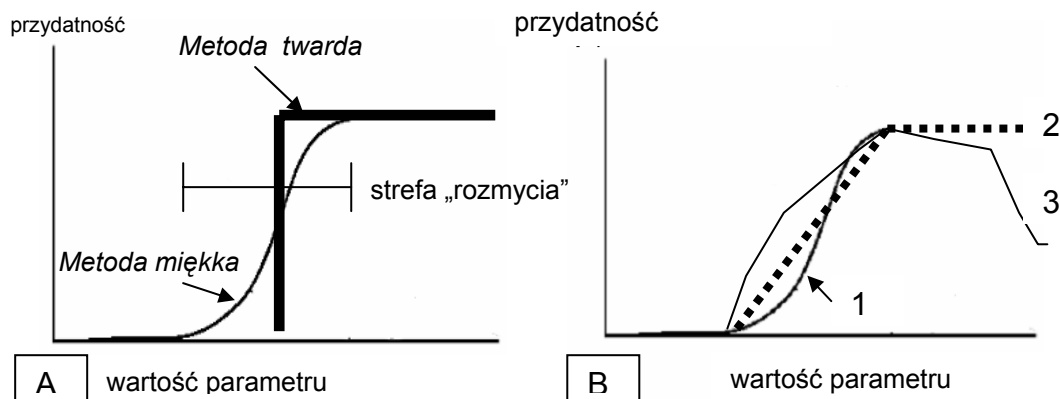
### **Probabilistyczna metoda szacowania wpływu błędów danych źródłowych na wynik analizy GIS**

Obecnie, najpopularniejszą metodą wykorzystywaną do przenoszenia błędów jest metoda Monte Carlo, której główną zaletą jest brak konieczności znajomości analitycznego rozwiązania wpływu błędów danych źródłowych na wynik analizy GIS. Jest to metoda statystyczna, w której modeluje się rozkład błędów danych źródłowych za pomocą rozkładu normalnego, jednostajnego lub innego. Następnie wykonuje się wielokrotnie analizę GIS (100 lub więcej razy) i porównuje wyniki z wynikiem analizy przeprowadzonej na danych nie zaburzonych. Dobrym estymatorem błędów wyniku analizy przestrzennej jest odchylenie standardowe mapy różnicowej [Eastman J.R. 2001]. Wadą tej metody jest konieczność wielokrotnego wykonywania analiz oraz trudność w przestrzennym szacowaniu rozkładu błędów analizy.

### **Niedokładność kryterium**

Oprócz określania wpływu błędów danych źródłowych na wynik analizy przestrzennej można mówić o modelowaniu i niedokładności modelowania kryteriów i barier. Jeśli bariera zostanie zdefiniowana jako: „obszar niezabudowany” to nie ma wątpliwości, autor analizy poszukuje obszaru niezabudowanego. Ale jeżeli bariera jest zdefiniowana w następujący sposób: „obszar o zróżnicowanej rzeźbie terenu” to nie jest to jednoznaczne kryterium. Pomimo to można zadać pytanie: „pokaż obszar o nachyleniu  $> 3.5^\circ$ ”. Oczywiście w tym przypadku jest to kryterium sztuczne, bo w sposób nieuzasadniony powoduje powstanie ostrej granicy pomiędzy obszarem  $3.49^\circ$  i  $3.51^\circ$ . Nie można zdefiniować bariery, czy inaczej niedokładność kryterium stanowi w tym przypadku błąd modelu. Przybliżenie wartości tego

błądu jest możliwe poprzez „rozmycie” granicy, (Rys. 14 A). W zależności od potrzeb, krzywe rozmycia mogą być różne (Rys. 14 B). Jeśli na rysunku: Rys. 14 A zdefiniujemy na osi rzędnych nachylenie jako przydatność, to w strefie rozmycia można zdefiniować, błąd relacji w ten sposób, że jest mniejszy z prawej, a większy z lewej strony. Tak przygotowane kryteria, wraz z definiowanym błędami modelu mogą stanowić dane wejściowe do reguły decyzyjnych.



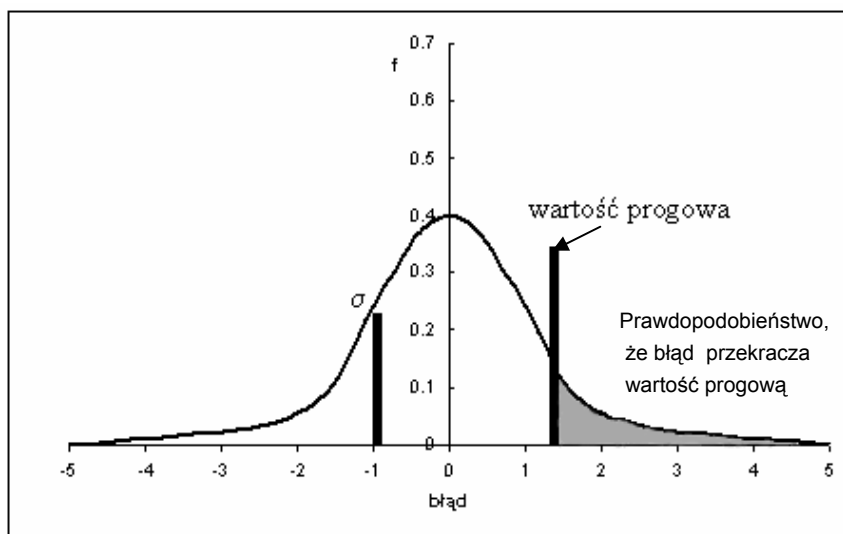
Rys. 14. (A) - Porównanie interpretacji kryterium w metodzie „twardej” i „miękkiej”, (B) - krzywe „rozmycia”: ciągłe (1), nieciągłe (2), definiowane przez użytkowników (3)

### 5.3 Niedokładność reguł decyzyjnych

Końcowym etapem procesu decyzyjnego jest zastosowanie wybranej reguły decyzyjnej i uzyskanie ostatecznego wyniku przeprowadzonych analiz. Podejmowanie decyzji w warunkach niepewności, ma miejsce wtedy, kiedy istnieje potrzeba uwzględnienia niedokładności danych i/lub relacji.

Najprostszym przypadkiem jest sytuacja, w której w wyniku analizy uzyskujemy rozkład przestrzenny jakiegoś atrybutu (mapę temperatur, nachyleń) o określonym również rozkładzie przestrzennym jego błędu. Jeśli założymy, że mamy do czynienia z błędami przypadkowymi, charakteryzującymi się rozkładem Gauss’a (Rys. 15) to możemy podać prawdopodobieństwo wystąpienia/przekroczenia jakiejś wartości ( $\sigma$ ). Czyli np. zamiast pokazania obszaru spełniającego konkretny „twardy” warunek np. jednej wartości temperatury, nachylenia itp. otrzymuje się pewien obszar („rozmyty”) zakresu prawdopodobieństwa. Powracając do przykładu z rozdziału: 5.2 można np. pokazać obszar, dla którego prawdopodobieństwo, że średnia roczna temperatura będzie poniżej  $20^{\circ}$  wynosi powyżej 0.8.

Poniżej omówiono, założenia dwóch „miękkich” reguł decyzyjnych opartych o teorie: Bayes’a i Dempster-Shafer’a [Eastman J.R. 2001].



Rys. 15. Krzywa Gaussa – rozkład błędów przypadkowych

## Teoria Bayes'a

Teorię Bayes'a wykorzystuje się wtedy, kiedy nie ma możliwości bezpośredniego pomiaru jakiegoś zjawiska i na podstawie danych pomiarowych stawiana jest hipoteza wystąpienia tego zjawiska. Na podstawie zmierzonego, zjawiska oraz prawdopodobieństwa a'priori stawiana jest hipoteza wystąpienia innego zjawiska. W efekcie obliczane jest prawdopodobieństwo a' posteriori tego zjawiska.

Zgodnie z teorią Bayes'a można obliczyć prawdopodobieństwo a' posteriori wystąpienia zjawiska:

$$(10) \quad p(h | e) = \frac{p(e|h) \cdot p(h)}{\sum_i p(e|h_i) \cdot p(h_i)}$$

gdzie:

- $p(h|e)$  – prawdopodobieństwo wystąpienia zjawiska, pod warunkiem, prawdziwości a' posteriori hipotezy,
- $p(e|h)$  – prawdopodobieństwo wystąpienia zjawiska, pod warunkiem że hipoteza jest prawdziwa,
- $p(h)$  – prawdopodobieństwo (a'priori), że hipoteza jest prawdziwa.

W przypadku jednej hipotezy  $h$  prawdopodobieństwo, że jest ona prawdziwa jest  $p(h)$ , a że jest nieprawdziwa  $p(\sim h)$ . Załóżmy hipotezę  $h$ , że badany obszar zostanie zalany lub przeciwna  $\sim h$ , że nie zostanie. Prawdopodobieństwo warunkowe  $p(e|h)$  oznacza wystąpienie zjawiska  $e$ , pod warunkiem, że hipoteza jest prawdziwa (rzeczywiste wystąpienie powodzi na danym obszarze pod warunkiem prawdziwości hipotezy  $h$ ). W tym przypadku odnosimy się do

pomiarów terenowych, czy modeli symulacyjnych. I ostatecznie oznaczamy  $p(h|e)$  prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia zjawiska pod warunkiem, że hipoteza jest prawdziwa.

W teorii Bayes'a trudność stanowi fakt, że brak danych uniemożliwia uzyskanie wyniku analizy (ogólnie brak występowania zjawiska oznaczającego prawdziwość hipotezy powoduje przyjęcie hipotezy przeciwnej).

### Teoria Dempster-Shafer'a

W teorii Dempster-Shafer'a istotne założenie polega na możliwości nieznajomości modelu dokładności/niedokładności. Zakłada się, że prawdopodobieństwo, że hipoteza jest prawdziwa nie uzupełnia się do jedności z twierdzeniem, że hipoteza nie jest prawdziwa. Mamy tu do czynienia ze stopniem wiarygodności hipotezy (*belief*).

Teoria ta ma charakter strukturalny. Załóżmy, że rozpatrujemy 3 hipotezy [A], [B], [C]. W teorii Dempster-Shafer'a, mamy do czynienia ze wszystkimi możliwymi kombinacjami hipotez: [A], [B], [C], [AB], [AC], [BC], [ABC]. Pierwsze 3 nazywają się pojedynczymi, a pozostałe złożonymi hipotezami. Oznacza to, że czasem dane uniemożliwiają postawienie prostej hipotezy. Dobrym przykładem jest obraz satelitarny, gdzie czasem można postawić tylko hipotezę, że jest to las liściasty i iglasty, czyli hipotezę [liściasty, iglasty]. Wynikiem analizy za pomocą tej metody jest uzyskanie stopnia wiarygodności każdej z hipotez. Można, zatem uzyskać:

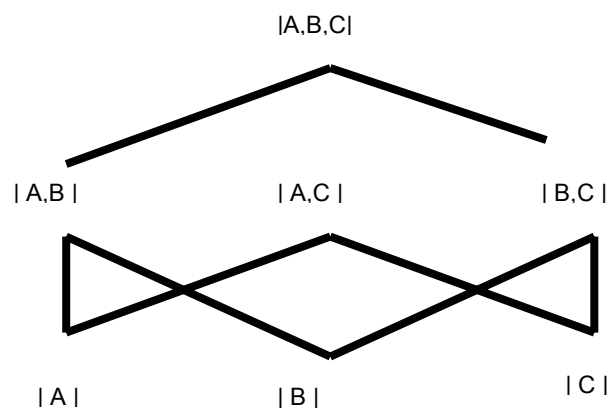
- przyporządkowanie podstawowego prawdopodobieństwa (*basic probability assignment* (BPA)),
- nieświadomość (ignorancję) dokładności (*ignorance*),
- ufność (*belief*), nieufność (*disbelief*), przedział ufności (*belief interval*),
- niewiarygodność (*plausibility*).

Prawdopodobieństwo podstawowe BPA określa udział/stopień wsparcia danej hipotezy przez zjawisko/zdarzenie. Prawdopodobieństwo BPA [A,B] oznacza wsparcie kombinacji zdarzeń [A,B], a nie udział pojedynczych zdarzeń [A] i [B] w potwierdzeniu hipotezy.

Prawdopodobieństwo to może zostać opisane zgodnie z regułą „rozmytą” (Rys. 15, Rys. 14). Suma wszystkich prawdopodobieństw BPA musi równać się 1. W ten sposób pojawia się pojęcie nieznajomości („braku wiedzy” – *ignorance*), czyli prawdopodobieństwo BPA [A,B,C] jako dopełniające do jedności wszystkie inne prawdopodobieństwa.

Ufność (*belief*) definiowana jest jako całkowita suma hipotez z BPA dla wszystkich podzbiorów hipotez. Ufność/poziom ufności hipotezy [A,B] oblicza się jako sumę prawdopodobieństwa podstawowego BPA dla [A,B], [A] i [B] i jest to prawdopodobieństwo, zajścia zdarzenia A lub B. Natomiast niewiarygodność (*plausibility*) oznacza stopień, w którym hipotezy nie mogą być niepotwierdzone. W tym przypadku, inaczej niż w teorii Bayes'a

poziom ufności nie dopełnia do jedności poziomu nieufności i reprezentują raczej stopień w jakim wszystkie hipotezy nie przecinają się z daną hipotezą.



Rys. 16. Hierarchiczna struktura wszystkich kombinacji zdarzeń [A, B, C]

Interpretując parametr *plausibility* można powiedzieć, że o ile poziom ufności (*belief*) określa w sposób „twardy” stopień wsparcia dla hipotezy, to niewiarygodność (*plausibility*) wskazuje na stopień, w jakim hipoteza może się potwierdzić, nawet w przypadku braku wystąpienia „twardego” zdarzenia. Dla hipotezy poziom ufności (*belief*) może być poniżej zadanej granicy, a jednocześnie poziom niewiarygodności powyżej. Różnica pomiędzy tymi wartościami jest definiowana jako przedział ufności (*belief interval*) i określa niedokładność potwierdzenia lub nie hipotezy. Czyli obszary o dużej wartości tego parametru wskazują na konieczność określenia dodatkowego zjawiska. Teoria Dempster-Shafer’a jest bardzo użyteczna w planowaniu procesu gromadzenia danych GIS, ponieważ pozwala na zwiększenie efektywności przy jednoczesnym zwiększeniu dokładności. W porównaniu z teorią Bayes’a metoda ta jest lepsza, ponieważ uwzględnia niedokładność i brak danych. W metodzie Bayes’a hipoteza może być potwierdzona lub nie, i ich prawdopodobieństwa sumują się do jedności. W ten sposób nie można uwzględnić nieświadomości dokładności i jednocześnie brak zdarzenia implikuje zaprzeczenie hipotezy. Jest to sytuacja wyidealizowana nie występująca w realnym świecie. Ma to szczególne znaczenie w przypadku kiedy dysponujemy jedynie wynikami wyrywkowych pomiarów, na podstawie których nie można stwierdzić, że tam gdzie nie ma danych pomiarowych nie występuje dane zjawisko.

Więcej informacji na temat teorii: Bayes’a i Dempster-Shafer’a, wraz z prezentacją przykładów praktycznych można znaleźć w literaturze [np. Eastman J.R. 2001]

## 6. Ryzyko w modelu gridowym na przykładzie analizy dokładności DTM

---

Znaczenie Numerycznego Modelu Terenu (DTM), w systemach GIS jest kluczowe, ponieważ jego obecność otwiera wiele możliwości analiz. Między innymi, możliwe jest generowanie map pochodnych, czyli np. spadków i ekspozycji, co pozwala na rozwiązywanie problemu wyboru lokalizacji jakiegoś obiektu z uwzględnieniem granicznych wartości nachyleń i określonych ekspozycji. Innym przykładem jest modelowanie najbardziej optymalnego połączenia pomiędzy obiektami, minimalizując koszty takiego połączenia (np. wybór przebiegu drogi pomiędzy punktem A i B tak, żeby przechodziła ona przez obszar o nachyleniach nie większych niż 1.5%).

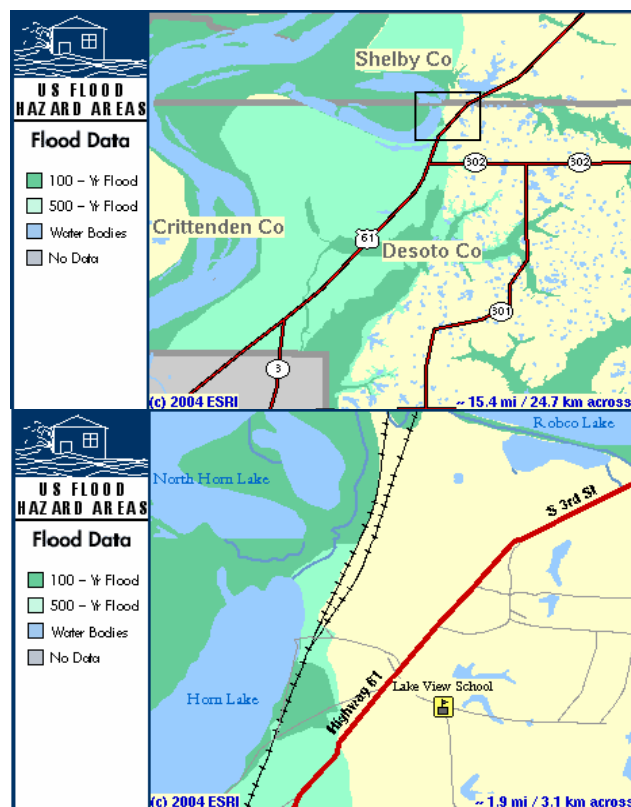
DTM może być wykorzystywany przez różnych specjalistów zajmujących się: geografią, planowaniem przestrzennych, obronnością, ekologią, ochroną środowiska i wieloma innymi dziedzinami. DTM jest niezbędnym elementem systemu GIS, który jest wykorzystywany na przykład do wspomagania decyzji w jednostkach zajmujących się ochroną przeciwpowodziową, w zakresie modelowania stref zalewowych.

Dokładność DTM nie jest z reguły jednorodna przestrzennie. Zależy ona np. od technologii tworzenia modelu terenu. DTM może zostać wygenerowany za pomocą metod fotogrametrycznych i uzupełniony w oparciu o pomiar bezpośredni w miejscach newralgicznych (np. wały przeciwpowodziowe) oraz digitalizację istniejących materiałów kartograficznych (np. w lasach). W związku z tym na obszarze DTM znajdują się miejsca, w których dokładność określenia wysokości jest wysoka, np.  $\pm 0.2$  m i miejsca o dokładności znacznie gorszej np.  $>\pm 1.5$  m.

Uwzględnienie występujących w DTM błędów ma zasadnicze znaczenie dla analiz prowadzonych w systemie GIS. Poniżej zostanie bardziej szczegółowo przedstawiona analiza wpływu błędu DTM: na wyznaczanie stref zalewowych i na wartości nachyleń i ekspozycji.

### 6.1 Modelowanie stref zalewowych.

W niektórych krajach informacje dotyczące przebiegu granic stref zalewowych są udostępniane powszechnie. Celują w tym Amerykanie, którzy jako zasadę ogólną przyjmują udostępnianie obywatelom informacji z grupy tzw. *public domain*. W Stanach Zjednoczonych istnieje Federalna Agencja Zarządzania Ryzykiem (FEMA-Federal Emergency Management Agency), która między innymi zajmuje się zagrożeniem powodziowym. Przykładowo na Rys. 17 naniesiono strefy wody 100 letniej i 500 letniej dla fragmentu rzeki Missisipi w stanie Memphis.



Rys. 17. Obszary wody 100 letniej (kolor zielony) i 500 letniej (kolor jasnozielony), Memphis, Missisipi  
[\[http://www.esri.com/hazards/makemap.html\]](http://www.esri.com/hazards/makemap.html)

Ostatecznym wynikiem modelowania stref zalewowych zawsze jest mapa nie koniecznie papierowa, na której zaznaczone się obszary o określonym ryzyku wystąpienia powodzi. Ryzyko jest najczęściej rozumiane, w tym przypadku jako **ryzyko** wystąpienia określonego **poziomu wody**, rzadko brana jest pod uwagę **niedokładność DTM**.

Funkcjonalność oprogramowania do wspomagania ochrony przeciwpowodziowej zależy od potrzeb jednostki organizacyjnej zajmującej się ochroną przeciwpowodziową (np. od jej kompetencji) oraz od charakteru obszaru, na którym dana jednostka działa (np. potrzeby te są inne w górnej, a inne w dolnej partii rzeki). Prace związane z ochroną przeciwpowodziową są głównie wspomagane za pomocą oprogramowania do modelowania: hydrodynamicznego i hydrologicznego. Pozwala ono na prognozowanie poziomu wody w rzece, w trakcie powodzi i poprzez to umożliwia podejmowanie działań minimalizujących zagrożenie powodziowe. Firmy tworzące specjalistyczne oprogramowanie do modelowania mają w ofercie pakiety wspomagające działanie jednostek ochrony przeciwpowodziowej w różnym zakresie, w tym także w zakresie analiz przestrzennych GIS. Można zaobserwować również inną sytuację tzn. taką, kiedy pakiety GIS mają zaimplementowane algorytmy do analiz hydrologicznych.

Niedokładność DTM jest tylko jednym z elementów możliwych do uwzględnienia podczas prac związanych z ochroną przeciwpowodziową. Zagadnienie niedokładności DTM nie jest dla niej

priorytetowe, z dwóch powodów: dotyczy danych pochodzących ze źródeł zewnętrznych (DTM jest tworzony przez zewnętrznie firmy geodezyjne) a algorytm uwzględnienia niedokładności DTM nie jest standardowo dostępny w systemach informatycznych. Obecnie, kiedy popularną metodą analizy wpływu błędności danych na wynik analizy stała się metoda Monte Carlo, pojawiły się różne projekty dotyczące praktycznych jej zastosowań, między innymi stopniowo również w zakresie ochrony przeciwpowodziowej. Przykładem może być projekt: Interreg Rhine-Meuse Activities (IRMA), w ramach którego powstało oprogramowanie: FLOODMAP uwzględniające w modelowaniu stref zalewowych niedokładność DTM, wykorzystujące metodę Monte Carlo [Krause J. i inni 2003].

Również w Polsce, po powodzi w 1997 roku, w ramach pożyczki Banku Światowego rozpoczęto realizację Projektu Likwidacji Skutków Powodzi, w ramach, którego między innymi są tworzone Ośrodki Koordynacyjno-Informacyjne (OKI) i opracowywany jest system informatyczny do wspomaganie ich działania oraz budowana jest baza danych [<http://www.pcu.org.pl>].

Na etapie zasilania bazy danych GIS powinno się, oprócz danych, gromadzić informacje o ich dokładności. Jednak, z różnych powodów, na tym etapie punkt ciężkości położony jest głównie na wprowadzanie danych, a kontrola ich poprawności wykonywana jest z reguły wyrywkowo. Często wynika to z braku możliwości wykonania właściwej kontroli, co jest spowodowane tworzeniem i wprowadzaniem ogromnej ilości danych do systemu. Problem dokładności danych pojawia się w późniejszej fazie, wykorzystywania danych do wspomaganie decyzji, czyli np. generowania stref zalewowych. Proces generowania stref zalewowych polega na określeniu na mapie granicy stref obszarów, które są zagrożone wystąpieniem powodzi.

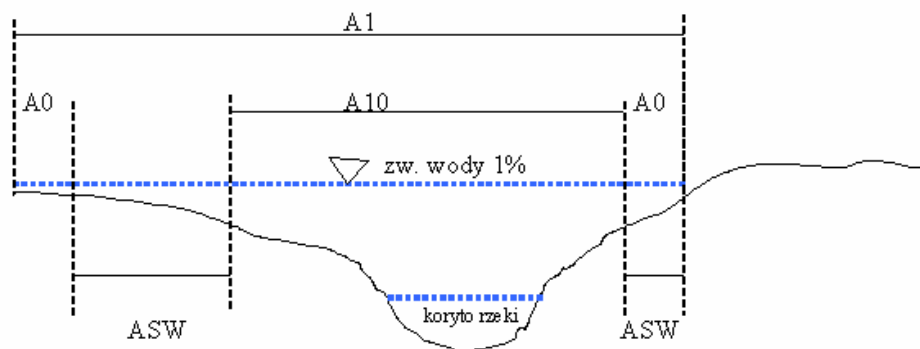
Poniżej w rozdziale 6.1.1 zostało zdefiniowane pojęcie strefy zalewowej zgodnie z przepisami Polskimi, a w rozdziale następnym: 6.1.2 przedstawiono przykład modelowania strefy zalewowej z uwzględnieniem, w sposób analityczny, błędu DTM. Informacje zawarte w tym rozdziale należy rozumieć jako propozycję autorki dotyczącą uwzględnienia rozkładu błędu DTM podczas modelowania stref zalewowych dla rzek, z uwzględnieniem specyfiki modelowania zwierciadła wody na podstawie danych o poziomie wody z modeli hydraulicznych. Proponowana metoda stanowi adaptację rozwiązania przedstawionego przez Eastman'a [Eastman J.R. 2001] a dotyczącego określania wpływu niedokładności DTM na modelowanie stref zalewowych dla zmian poziomu morza.

### **6.1.1 Definicja stref zalewowych.**

Zgodnie z Prawem Wodnym (Art. 9, pkt. 10) jako powódź rozumie się: „takie wezbranie wody w ciekach naturalnych, zbiornikach wodnych, kanałach lub na morzu, podczas którego woda po przekroczeniu stanu brzegowego zalewa doliny rzeczne albo tereny depresyjne i powoduje zagrożenie dla ludności lub mienia”. Woda po wystąpieniu z brzegów rozlewa się na



obszarach sąsiadujących z rzeką. Obszar znajdujący się w pobliżu rzeki i narażony na możliwość wystąpienia powodzi powinien znajdować się pod specjalnym nadzorem. Dlatego też w większości krajów ustanawia się tzw. strefy zagrożenia powodziowego, inaczej strefy zalewów powodziowych. „Wyznaczają one zasięg przestrzenny powodzi na podstawie danych historycznych oraz zagrożeń hydraulicznych o określonym poziomie ryzyka”, [Nachlik E. i inni 2000]. Strefy zagrożenia powodziowego są określane w pobliżu rzek, na obszarach intensywnego spływu powierzchniowego i przymorskich obszarach brzegowych. Wyznaczane są one dla potrzeb prac związanych z szeroko pojętą ochroną przeciwpowodziową rozumianą między innymi jako likwidację przyczyn wpływających na zasięg i charakter zagrożenia powodziowego, implikującą np. zmiany w zagospodarowaniu terenów. Pomimo niejednoznaczności występujących w Prawie Wodnym, za podstawową strefę zagrożenia powodziowego uznaje się strefę określoną wodami powodziowymi o prawdopodobieństwie wystąpienia 1%, tzw. woda stuletnia. Ogólnie, istnieje kilka stref zagrożenia powodziowego: A1, A0, A10 i ASW, (Rys. 18). Strefa A1 jest rozumiana jako zasięg wody 1%. Strefa A0 jest to część strefy A1 o najniższym poziomie zagrożenia, gdzie głębokość wody nie przekracza 0.5 m i prędkości przepływu wody są małe. Natomiast strefa A10 jest to część strefy A1 o najwyższym poziomie zagrożenia określona prawdopodobieństwem wystąpienia 10% i/ albo dużą głębokością, powyżej 1.5 m lub dużą prędkością przepływu  $> 2$  m/s. Strefy ASW określają strefy średniego i wysokiego ryzyka powodzi i występują pomiędzy granicami stref A0 i A10.



Rys. 18. Strefy zalewowe w przekroju poprzecznym rzeki [zmodyfikowany za Nachlik E. i inni 2000].

**Wyznaczone w ten sposób strefy zalewowe uwzględniają prawdopodobieństwo wystąpienia określonego poziomu wody (1 raz na 100 lat), natomiast nie jest w tym przypadku brany pod uwagę błąd DTM.**

Zagrożeniem powodziowym są żywotnie zainteresowani sami mieszkańcy obszarów zagrożonych, jak i instytucje odpowiedzialne za ochronę przeciwpowodziową, a także instytucje, które są w jakimkolwiek stopniu uwarunkowane tym zjawiskiem (np. firmy ubezpieczeniowe). Wydaje się, że celowym byłoby szerokie udostępnienie informacji na temat

zasięgu stref, niezależnie od ewentualnych sytuacji konfliktowych, które mogą być następstwem tego upowszechnienia.

### **6.1.2 Modelowanie stref zalewowych z uwzględnieniem niedokładności danych źródłowych.**

Wyznaczając strefy zalewowe główny nacisk kładzie się na ryzyko związane z częstotliwością występowania danego poziomu wody, stąd też woda 100-letnia czy 1000-letnia. Zasięg takiej strefy zalewowej można np. określić w oparciu o przekazy historyczne mówiące, że w danym miejscu, w danym roku poziom wody znajdował się na określonej wysokości. Często nawet na murach budynków znajdują się tablice informujące o tym fakcie. Granice strefy można wyznaczyć w oparciu o mapę wysokościową. Jeśli wiadomo, że woda była na określonej wysokości, to zalane były wszystkie tereny poniżej tej wartości. Czyli granicą strefy zalewowej byłaby warstwica o wysokości równej zaobserwowanej historycznie wysokości wody. Na terenie dawnej Saksonii, dla bezpieczeństwa do tej wysokości warstwicy dodawano 1m i w ten sposób określano granicę obszaru, w którym nie wolno było się osiedlać. W ten sposób zmniejszono ryzyko, że w terenie dozwolonym do osiedlania się wystąpi powódź.

Obecnie oprócz stref zalewowych, związanych z prawdopodobieństwem naturalnego wystąpienia danej wysokości wody, wyznacza się też możliwe strefy zalewowe w innych przypadkach. Strefy takie mogą powstać na przykład w wyniku celowego zniszczenia fragmentu wału dla zmniejszenia zagrożenia powodziowego w niższym biegu rzeki.

Etapy wyznaczania granicy strefy zalewowej można ogólnie przedstawić następująco. Na podstawie historycznych danych hydrometeorologicznych, modeli hydraulicznych wyznaczany jest poziom wody w punktach na rzece. Po wygenerowaniu powierzchni zwierciadła wody możliwe jest wykonanie przecięcia tej powierzchni z DTM. W wyniku przecięcia uzyskuje się linię, która określa granicę strefy zalewowej. Taki sposób twardy, nie uwzględnia ani niedokładności danych źródłowych (DTM, danych meteorologicznych), ani błędów modeli hydraulicznych.

Metoda miękka, uwzględniająca niedokładność bazy danych, określa prawdopodobieństwo, że dany teren będzie zalany. Po założeniu wartości błędu DTM oraz/lub modelu hydraulicznego obliczane jest prawdopodobieństwo, że zostanie przekroczona jakaś wartość na mapie różnicowej.

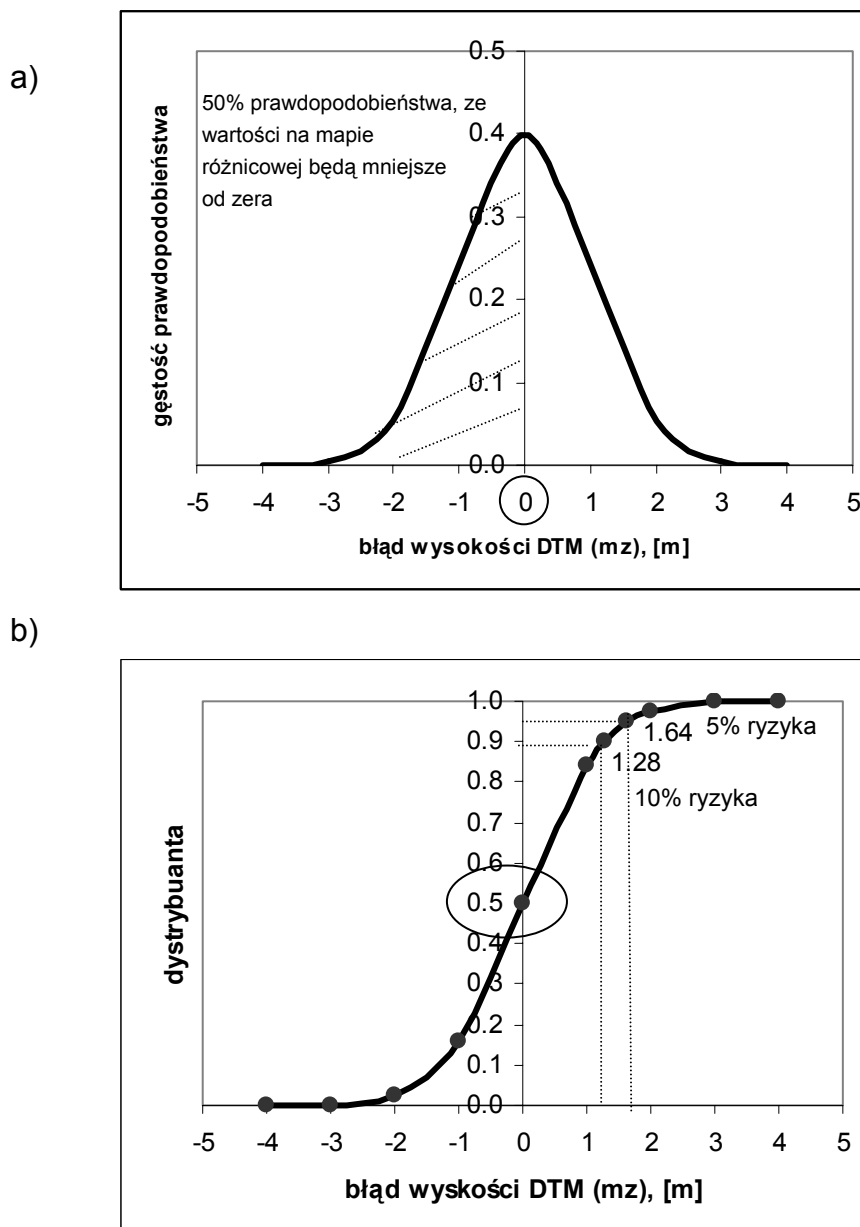
W wyniku przecięcia (odjęcia) powierzchni zwierciadła wody i DTM otrzymujemy mapę różnicową. Na mapie są obszary, dla których wartości różnicy są ujemne (tereny zalane) oraz dodatnie (tereny niezalane). Wartość różnicy określa głębokość wody. Jeśli wykonamy przekształcenia mapy różnicowej w taki sposób, żeby pokazać tylko te punkty, w których wartość różnicy wynosi zero uzyskamy granicę strefy zalewowej.

Zalóżmy na wstępie, że zaniedbujemy błąd prognozowanej wysokości zwierciadła wody w punktach modelowania za pomocą modelu hydraulicznego. Oznacza to, że błąd różnic

wysokości na mapie różnicowej jest równy błędowi wysokości DMT ( $m_z$ ). Załóżmy następnie jednorodny przestrzennie błąd wysokości DTM o rozkładzie normalnym takim, że wartość oczekiwana  $m_z$  wynosi 0 m, a odchylenie standardowe  $\pm 1$  m. Przeanalizujmy diagram na rysunku Rys. 19 a), na którym na osi odciętych znajduje się błąd wysokości  $m_z$  [m] a na osi rzędnych gęstość prawdopodobieństwa (prawdopodobieństwo wystąpienia błędu  $m_z$ ). Zakreskowany z lewej strony obszar oznacza, że prawdopodobieństwo, że wartość różnicy na mapie różnicowej będzie mniejsza niż zero wynosi 50%. Odpowiada to wartości dystrybuanty dla błędu wysokości DTM  $m_z=0$ , która wynosi 0.5, (Rys. 19 b). Strefę zalewową określa się w ten sposób, że zaznacza się obszary, dla których wartości na mapie różnicowej są mniejsze od zera. Można, zatem powiedzieć, że wiarygodność strefy zalewowej na takiej mapie wynosi 50% i istnieje 50-cio procentowe prawdopodobieństwo, że zakres tej strefy będzie inny.

Wykorzystanie wykresu dystrybuanty (Rys. 19 b) umożliwi zastosowanie metody miękkiej dla wyznaczania stref zalewowych. W metodzie tej można, w sposób świadomy, wyznaczyć granicę strefy zalewowej pozostawiając np. 10% ryzyka, lub 5% ryzyka, że woda może zalać obszary, które znajdują się poza zaznaczoną strefą zalewową. W metodzie tej wartości na mapie różnicowej traktowane są jako wartości błędu DTM (Rys. 19 b - wartości na osi odciętych). Wartości błędu DTM, przelicza się na wartości prawdopodobieństwa, że wartość różnicy na mapie różnicowej będzie mniejsza niż dana wartość błędu  $m_z$ . Analizując wykres dystrybuanty (Rys. 19 b), można zauważyć, że aby uzyskać prawdopodobieństwo równe 90%, że teren zostanie zalany (zostawiając 10% ryzyka), trzeba wziąć pod uwagę punkty na mapie różnicowej, dla których różnica jest mniejsza niż 1,28 m, a nie 0 m – jak w metodzie twardej. Analogicznie dla prawdopodobieństwa 95%, czyli 5% ryzyka należy wziąć pod uwagę punkty, dla których wartości na mapie różnicowej są mniejsze niż 1,64 m.

Powyżej została opisana analiza ryzyka związanego z wyznaczaniem granicy strefy zalewowej spowodowanego niedokładnością DTM. Rozważania ryzyka poszerzone o uwzględnienie błędów modelowania hydraulicznego, czyli uwzględniające wartości błędu prognozowanej wysokości zwierciadła wody można przeprowadzić analogicznie. W takim przypadku zamiast błędu  $m_z$  na rysunku (Rys. 19) będzie znajdował się błąd wypadkowy  $m_w = m_z^2 + m_h^2$ , gdzie  $m_h$  – błąd prognozowanej wysokości zwierciadła wody.



Rys. 19. Wykres rozkładu prawdopodobieństwa (a) i dystrybuanty (b) błędu wysokości DTM (mz).

Praktyczne wykorzystanie opisanej metody miękkiej w modelowaniu stref zalewowych wymaga możliwości obliczenia dla każdej wartości na mapie różnicowej wartości dystrybuanty. Z kolei wykres dystrybuanty można sporządzić znając parametry rozkładu błędu analizy ( $m_w$ ). Posługując się oprogramowaniem umożliwiającym automatyczne obliczanie dystrybuanty dla rozkładu o zadanych parametrach wystarczy podać typ rozkładu i jego parametry np. wartość oczekiwaną i odchylenie standardowe. Program automatycznie obliczy wartości prawdopodobieństwa w każdym punkcie, posługując się dystrybuantą. W przypadku korzystania z oprogramowania, które nie pozwala na automatyczne obliczenie dystrybuanty można za pomocą innego programu obliczyć wartości dystrybuanty dla zadanych wartości

błędu wypadkowego ( $m_w$ ) i w oparciu o nie dokonać analizy mapy różnicowej. Analiza taka polega a przeklasyfikowaniu<sup>10</sup> wartości różnic na mapie różnicowej na wartości dystrybuanty.

Podsumowując, na podstawie mapy różnicowej i dystrybuanty generujemy mapę prawdopodobieństwa, że wartość różnicy na mapie różnicowej będzie mniejsza od zera.

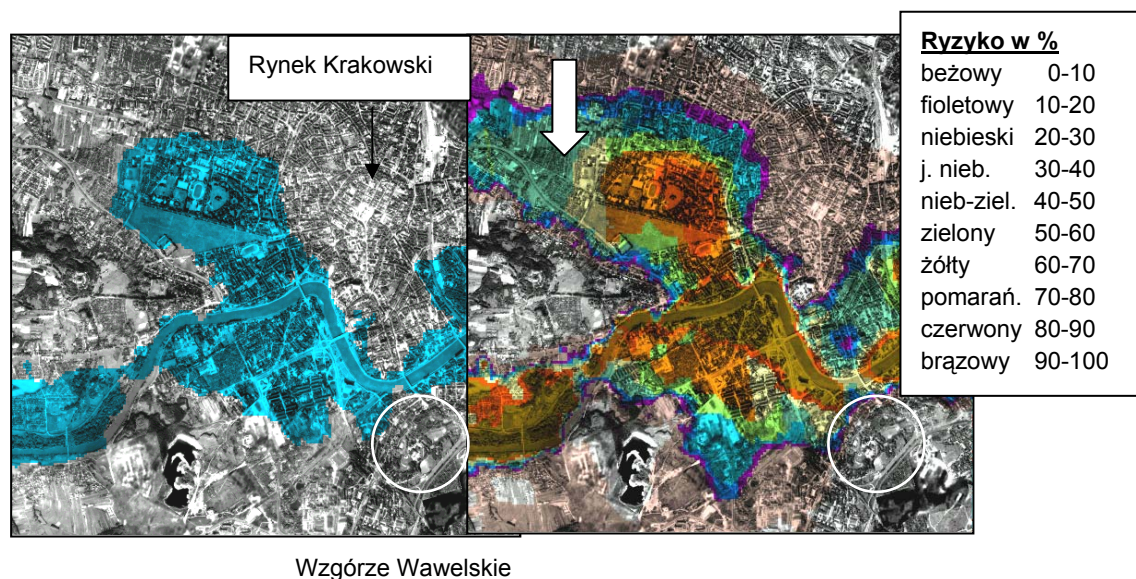
Ostatecznie przeprowadzamy progowanie polegające na wybraniu jedynie tych pikseli, dla których z zadaniem prawdopodobieństwem wartości na mapie różnicowej będą mniejsze od zera. Jednocześnie poza tak zaznaczonym obszarem będą znajdowały się obszary, których ryzyko zalania będzie wynosiło jeden minus wartość prawdopodobieństwa przyjęta w procesie progowania.

W celu zilustrowania twardej i miękkiej metody generowania stref zalewowych zamieszczono poniższy przykład.

### Przykład

Przedmiotem analizy był obszar wzdłuż odcinka Wisły w pobliżu centrum Krakowa (Rys. 20).

Wygenerowana za pomocą metody twardej strefa zalewowa została zaznaczona na niebiesko. Prawdopodobieństwo, że teren zostanie zalany przedstawiono w skali barwnej i kolor brązowy oznacza prawdopodobieństwo 90-100%, że obszar zostanie zalany, a kolor beżowy, że prawdopodobieństwo to jest mniejsze niż 10%.



Rys. 20. Przykład strefy zalewowej wygenerowanej na podstawie metody „twardej” (a) i „miękkiej” (b)

<sup>10</sup> Przeklasyfikowanie (ang. reclassification) inaczej reklasyfikacja – podstawowa funkcja w gridowych (rastrowych) systemach GIS polegająca na zamianie istniejących wartości atrybutów dla pikseli na inne zadane wartości.

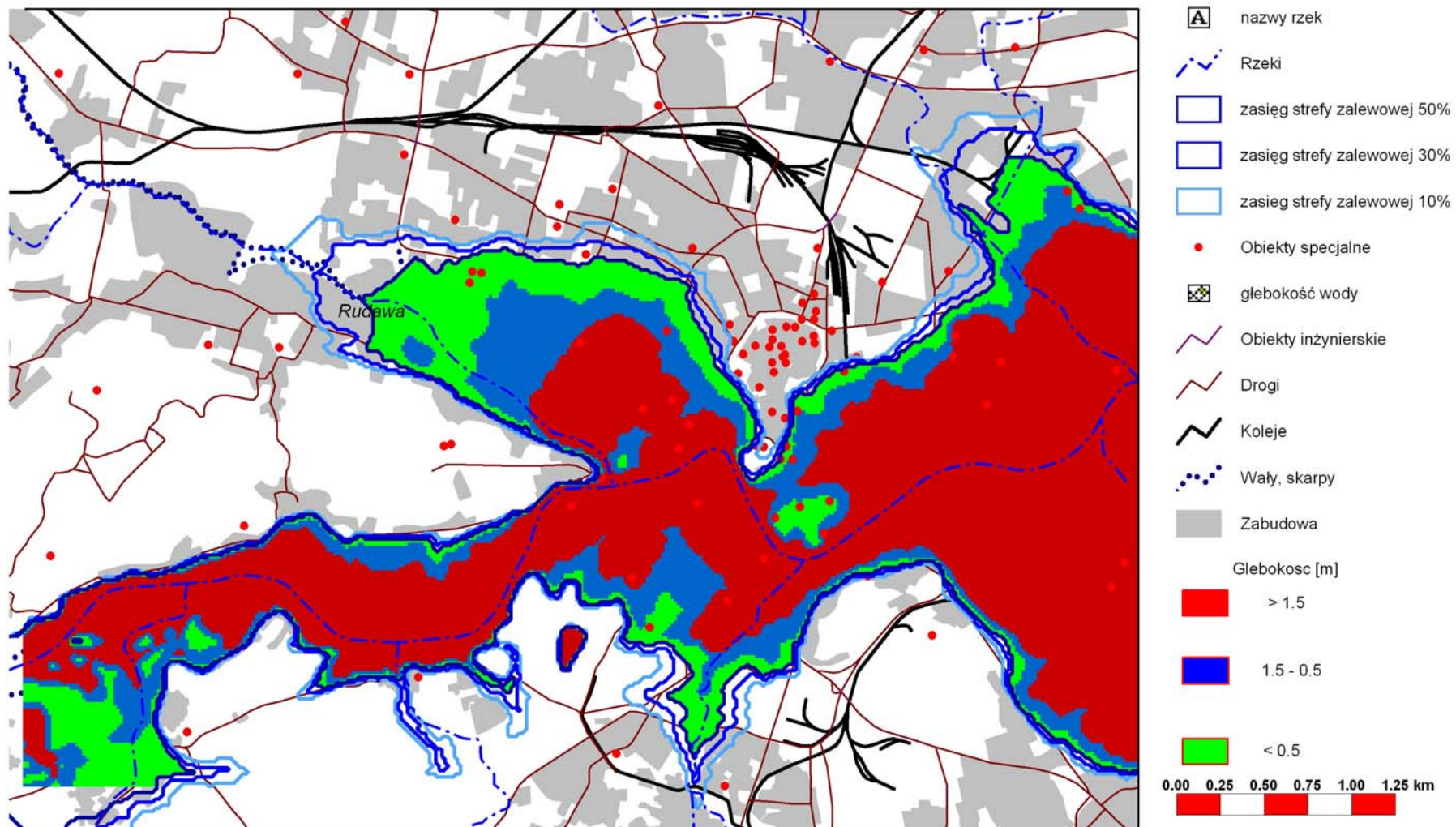
Przeprowadzając w sposób tradycyjny generowanie stref zalewowych metodą twardą należy mieć na uwadze ryzyko związane z pozostawieniem obszarów, dla których istnieje prawdopodobieństwo, że zostaną jednak zalane pomimo, że nie znajdują się w strefie zagrożenia powodziowego. Powierzchnia obszaru zagrożonego powodzią jest zależna od ukształtowania terenu. W obszarach gdzie następuje znaczny wzrost wysokości wraz z oddalaniem się od koryta rzeki powierzchnia obszarów ryzyka wystąpienia powodzi jest mniejsza (por. Wzgórze Wawelskie zaznaczone okręgiem). Kiedy natomiast teren wznosi się tylko nieznacznie wraz z oddalaniem się od koryta rzeki, obszar dla którego istnieje ryzyko powodzi jest większy (por. obszar zaznaczony strzałką na (Rys. 20).

W celu zilustrowania istotności uwzględniania ryzyka związanego z generowaniem stref zalewowych spowodowanego błędem DTM wykonano poniższe analizy z wykorzystaniem, innych niż DTM, danych GIS. Na rysunku Rys. 21 przedstawiono strefy zalewowe zgodnie z obowiązującymi w Polsce przepisami, czyli strefy: AO (kolor zielony), ASW (kolor niebieski), A10 (kolor czerwony), którym odpowiadają głębokości: do 0.5 m, 0.5-1.5 m i powyżej 1.5 m. Na rysunku tym zaznaczono również strefy wygenerowane metodą miękką z pozostawieniem obszarów o różnym stopniu ryzyka: 50% (linia granatowa), 30% (linia niebieska) i 10% (linia jasno niebieska). Ponadto, na rysunek naniesiono punktowe obiekty specjalne, co umożliwia analizę ich położenia zarówno na tle stref o zróżnicowanej głębokości wody jak i na tle stref o różnorodnym poziomie ryzyka wystąpienia powodzi.

Na rysunku następnym Rys. 22 przedstawiono na tle stref o różnym ryzyku wystąpienia powodzi inną wybraną warstwę GIS: infrastrukturę (między innymi kompleksy edukacyjne, handlowe, przemysłowe i szpitalne).

Wykorzystując narzędzia GIS możliwa jest również szczegółowa analiza pojedynczych obiektów, które powinny być w sposób specjalny chronione przed powodzią. Przykład takiej analizy znajduje się na rysunku Rys. 23. Przedstawiono na nim położenie wybranych obiektów (szpitali) na tle stref zalewowych o różnym poziomie ryzyka. Przykładowo Okręgowy Szpital Kolejowy znajduje się poza strefą wyznaczoną metodą twardą, w strefie 30% ryzyka, czyli istnieje 30% prawdopodobieństwo, że zostanie on zalany. Na rysunku, na zielono zaznaczono kompleksy infrastruktury, które znajdują się w strefie 30%, a na żółto 10% ryzyka.

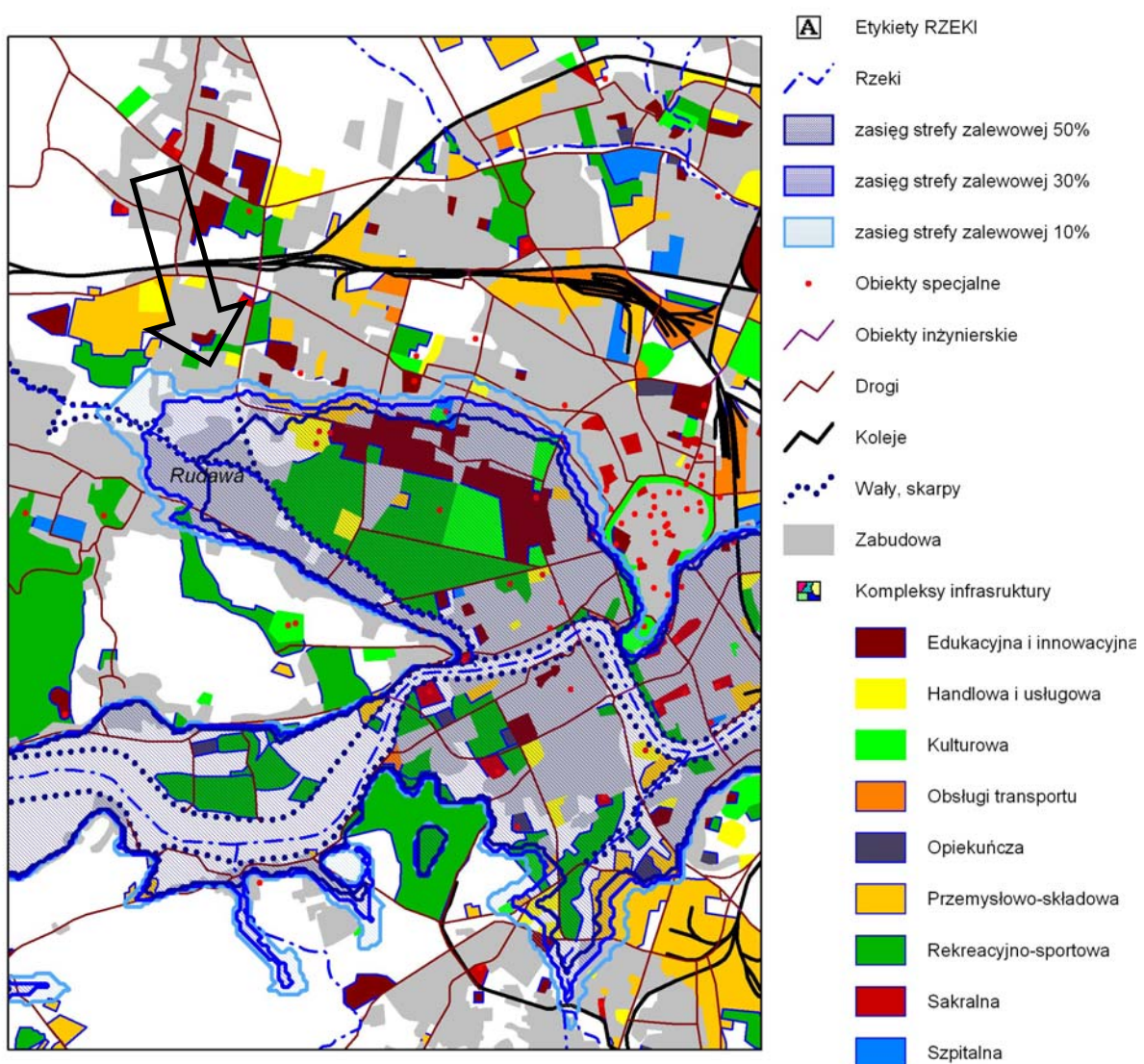




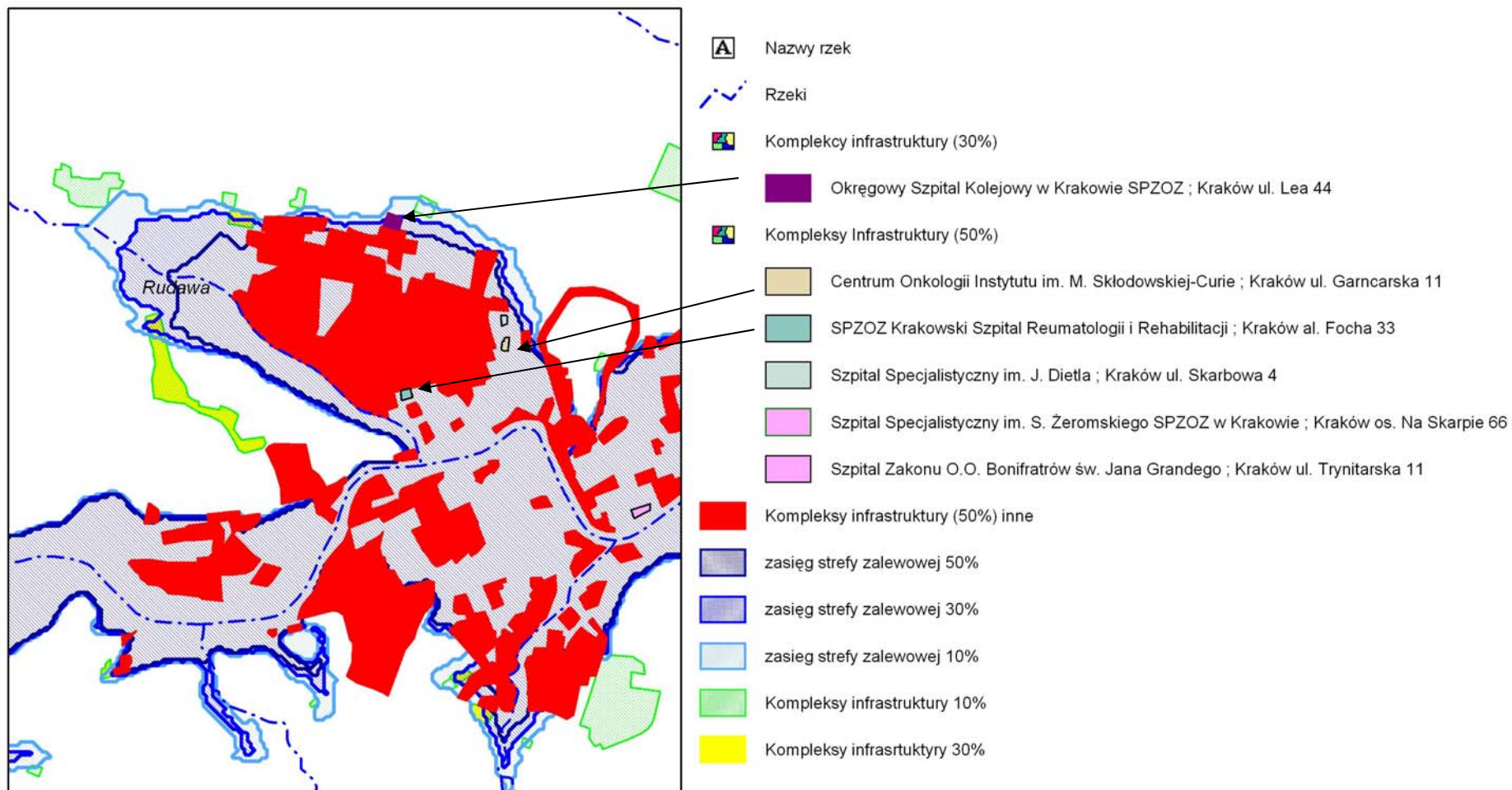
Rys. 21. Strefy głębokości wody w stosunku do poziomu 206 m







Rys. 22. Zasięg stref zalewowych wyznaczonych metodą miękką dla poziomu 206 m z pozostawieniem 50 (kolor granatowy), 30 (kolor niebieski) i 10 (kolor jasno niebieski) procentowego ryzyka.



Rys. 23. Analiza kompleksów infrastruktury w zależności od ryzyka

### 6.1.3 Wnioski dotyczące miękkiej metody generowania stref zalewowych wokół rzek

W poprzednim rozdziale opisano założenia miękkiej metody generowania stref zalewowych, za pomocą której można uwzględnić w tym procesie błąd DTM, lub rozkład błędu DTM oraz błąd wysokości zwierciadła wody. Zamieszczono także przykład ilustrujący istotność uwzględniania błędu DTM w trakcie generowania stref zalewowych. Zaproponowana metoda jest alternatywna zarówno w stosunku do tradycyjnej metody twardej, nieuwzględniającej błędów danych źródłowych, jak i do miękkiej metody Monte Carlo.

Zalety proponowanej metody w stosunku do metody Monte Carlo dwie:

- Brak konieczności wykonywania serii analiz w celu uzyskania miękkiej strefy zalewowej
- Łatwy sposób uwzględnienia **rozkładu** błędów danych źródłowych np. **mapy** błędów DTM.

## 6.2 Wpływ niedokładności DTM na błąd nachyleń i ich azymutów.

Przedmiotem rozważań przeprowadzonych w niniejszym rozdziale jest problem szacowania błędów nachyleń i azymutów obliczonych z DTM. Znane są z literatury badania porównawcze różnych algorytmów do wyznaczania nachyleń i azymutów, wykorzystywane w dostępnych systemach GIS [m.in. Sharpnack D. A., Akin G. 1969, Travis M. R. i in, 1975, Fleming M. D., Hoffer R. M., 1979, Horn B.K.P 1981, Ritter P. 1987, Weih R., Smith J, 1996, Wood J. W, 1996 Drzewiecki W. 1999 i in.]. Wyniki badań literaturowych zostały krótko przedstawione poniżej w celu wyjaśnienia wyboru algorytmu obliczeniowego poddanego przez autorkę dalszej analizie.

Procedura wyznaczania nachylenia stoku w oparciu o mapę warstwicową jest powszechnie znana, choć jej praktyczna realizacja na dużym obszarze jest żmudnym procesem.

Dostępność map gridowych DTM, czyli opisujących wysokość terenu w siatce, daje możliwość automatycznego generowania spadków i nachyleń w każdym punkcie. W systemach GIS są wykorzystane różne, mniej lub bardziej skomplikowane, algorytmy obliczania spadków i azymutów, zawsze związane z analizą pewnego obszaru wokół punktu, dla którego wyznaczany jest spadek i ekspozycja (Rys. 24 - punkt o wysokości  $z_9$ ). Algorytm może wykorzystywać aproksymowaną na podstawie 9 punktów powierzchnię i obliczać kierunek i kąt nachylenia linii największego spadku. W najprostszym ujęciu można wyznaczyć kąt nachylenia jako wypadkową nachylenia wzdłuż osi x i y ze wzoru (11) i odpowiednio ekspozycję tego nachylenia (12).

$Z_5$	$Z_2$	$Z_6$
$Z_1$	<b><math>Z_9</math></b>	$Z_3$
$Z_8$	$Z_4$	$Z_7$

--- $\Delta h$ ---

Rys. 24. Fragment siatki *grid* DTM.

$$(11) \quad S = \arctan \left( \sqrt{\left[ \frac{(z_3 - z_1)}{2\Delta h} \right]^2 + \left[ \frac{(z_4 - z_2)}{2\Delta h} \right]^2} \right)$$

$$(12) \quad A = \arctan \left( \frac{z_3 - z_1}{z_4 - z_2} \right)$$

gdzie:

S- nachylenie,

A – azymut ekspozycji,

$\Delta h$ - wielkość oczka siatki DTM,

$z_i$  – wysokość DTM jak na Rys. 24.

Opisany sposób obliczenia jest najprostszy i zarazem można powiedzieć klasyczny [Reeves, R.G., Anson, A., Landen, D., 1975 – *Manual of Remote Sensing*]. Algorytm oparty na tych wzorach jest nazywany czasem- Rittera, [Ritter P. 1987], a znany także jako metoda Fleminga – Hoffera, [Fleming M. D., Hoffer R. M., 1979]. Istnieją również inne sposoby obliczania nachyleń z DTM, np. bardziej skomplikowany sposób obliczania nachyleń został zaproponowany przez Horna [Horn B.K.P 1981]:

$$(13) \quad S = \arctan \left( \sqrt{\left[ \frac{(z_8 + 2z_1 + z_5) - (z_7 + 2z_3 + z_6)}{8\Delta h} \right]^2 + \left[ \frac{(z_7 + 2z_4 + z_8) - (z_6 + 2z_2 + z_5)}{8\Delta h} \right]^2} \right) \quad \text{Znana jest również}$$

uproszczona wersja powyższego algorytmu, zaproponowana przez Sharpnack'a i Akin'a [Sharpnack D. A., Akin G. 1969]:

$$(14) \quad S = \arctan \left( \sqrt{\left[ \frac{(z_8 + z_1 + z_5) - (z_7 + z_3 + z_6)}{6\Delta h} \right]^2 + \left[ \frac{(z_7 + z_4 + z_8) - (z_6 + z_2 + z_5)}{6\Delta h} \right]^2} \right)$$

W literaturze zostały opisane także inne:

- Metoda „wymuszonej powierzchni kwadratowej” [Wood J. W, 1996]; Algorytm używa powierzchni regresji kwadratowej, w której wymuszane jest przejście przez piksel centralny; Spadek obliczany jest na podstawie pierwszych pochodnych cząstkowych w kierunkach X i Y.
- Modyfikacja metody Fleminga - Hoffer'a: gradienty obliczane są pod kątem 45 stopni w stosunku do głównych osi układu - w metodzie tej używa się wartości czterech narożnych pikseli w oknie 3x3.
- Metoda „prosta” - oparta na wartościach trzech pikseli; Do obliczenia gradientu w kierunku: wschód-zachód używa się wysokości piksela centralnego i jego sąsiada po stronie zachodniej; podobnie w kierunku północ-południe.
- Metoda maksymalnego spadku [Travis M. R. I in, 1975]; Wybierany jest maksymalny spadek spośród ośmiu wartości otrzymanych na podstawie różnic wysokości piksela centralnego i każdego z jego ośmiu sąsiadów; W metodzie tej używana jest informacja pochodząca z dziewięciu komórek, ale wartość spadku otrzymywana jest na podstawie dwóch pikseli.
- Metoda wypadkowej wartości średnich nachyleń wzdłuż osi x i y.

W systemach GIS stosowane są różne algorytmy obliczania nachyleń i ekspozycji, np. w ArcInfo – Horn'a, w ErdasImagine – Sharpnak'a-Akin'a, w Idrisi - Ritter'a, w MGE Grid Analyst - płaszczyzny regresji kwadratowej, GeoMedia Grid - metoda wypadkowej wartości średnich nachyleń wzdłuż osi x i y, a w programie Surfer - Fleming'a-Hoffer'a [Drzewiecki W., Pirowski T. 1999].

Ze względu na dużą różnorodność algorytmów i niejednoznaczność wyników ich oceny oraz faktu, że nie zawsze bardziej skomplikowana obliczeniowo metoda jest lepsza [np. Johns K.H. 1998, Hodgson M. E., 1995, Skidmore A. K, 1998, Florinsky I.V. 1998], do analiz wpływu błędu DTM na wartości nachyleń i azymutów przyjęty został algorytm najprostszy, oparty o wzory (11) i (12).

Problem wpływu błędu DTM na wartości nachyleń (S) i ekspozycji (A) jest pomijany w pakietach oprogramowania GIS (MGE, ARCINFO, ARCVIEW, MAPINFO, GEOMEDIA). W programie IDRISI, w którym implementuje się nowe metody analiz GIS'owskich jest pewna wzmianka na ten temat, mianowicie po wprowadzeniu wartości błędu DTM i wykonaniu obliczeń nachyleń i azymutów pojawia się jeden parametr, który może być rozumiany jako błąd nachyleń. Jest to jedna dla całej mapy wartość (nie komentowana w instrukcji programu).

Z literatury znane są teoretyczne opracowania dotyczące problemu przenoszenia się błędów z DTM na mapy pochodne: nachyleń i ekspozycji. Najbardziej popularna i właściwie dominująca obecnie jest metoda Monte Carlo polegająca na zaburzaniu błędem DTM w sposób

przypadkowy, wykonywaniu analizy GIS i analizowaniu wyniku różnicowego (uzyskanego w oparciu o dane zaburzone i nie). Istnieją także prace, w których analizie poddawane są wzory na nachylenia, azymuty nachyleń, czasem także inne pochodne DTM (np. krzywizny), [Florinsky I.V., 1998, Weih R., Smith J, 1996 ]. Niemniej jednak są to albo rozwiązania przybliżone, albo podane wzory nie mogą zostać w łatwy sposób wykorzystane w istniejącym oprogramowaniu GIS. Z uwagi na brak rozwiązań analitycznych, dla choćby najprostszego przypadku, Autorka poddała analizie wzory (11), (12).

### 6.2.1 Analiza wzorów do obliczania nachyleń i ekspozycji z DTM

Wzór na nachylenia (11) można przekształcić następująco:

$$(15) \quad S = \arctan\left(\frac{1}{2\Delta h} \sqrt{(z_3 - z_1)^2 + (z_4 - z_2)^2}\right)$$

a następnie zróżniczkować ze względu na  $z_1$ .

$$(16) \quad S'_{z_3} = -\frac{1}{2\Delta h} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4\Delta h^2} \left((z_3 - z_1)^2 + (z_4 - z_2)^2\right)\right)^2} \frac{1}{2} \frac{2(z_3 - z_1)}{\sqrt{(z_3 - z_1)^2 + (z_4 - z_2)^2}}$$

$$(17) \quad S'_{z_3} = -\frac{1}{2\Delta h} \frac{4\Delta h^2}{\left(4\Delta h^2 + \left((z_3 - z_1)^2 + (z_4 - z_2)^2\right)\right)^2} \frac{1}{2} \frac{2(z_3 - z_1)}{\sqrt{(z_3 - z_1)^2 + (z_4 - z_2)^2}}$$

Po uproszczeniu i pogrupowaniu można przyjąć parametr M:

$$(18) \quad M = -\frac{2\Delta h}{\left(4\Delta h^2 + (z_3 - z_1)^2 + (z_4 - z_2)^2\right) \sqrt{(z_3 - z_1)^2 + (z_4 - z_2)^2}}$$

i różniczki ze względu na  $z_2, z_3, z_4$  przedstawić następująco:

$$(19) \quad S'_{z_3} = M(z_3 - z_1)$$

$$(20) \quad S'_{z_1} = -M(z_3 - z_1)$$

$$(21) \quad S'_{z_2} = M(z_4 - z_2)$$

$$(22) \quad S'_{z_4} = -M(z_4 - z_2)$$

Błąd nachylenia (S) z prawa przenoszenia błędów można obliczyć następująco, zakładając jednakowy we wszystkich 4 punktach błąd DTM,  $m_z$ :

$$(23) \quad m_S^2 = \left( S_{z_1}^2 + S_{z_2}^2 + S_{z_3}^2 + S_{z_4}^2 \right) m_z^2$$

Po podstawieniu wzorów od (17) do (22) otrzymuje się:

$$(24) \quad m_s^2 = \frac{4\Delta h^2}{\left(4\Delta h^2 + (z_3 - z_1)^2 + (z_4 - z_2)^2\right)^2} \frac{2\left((z_3 - z_1)^2 + (z_4 - z_2)^2\right)}{(z_3 - z_1)^2 + (z_4 - z_2)^2} m_z^2$$

$$(25) \quad m_s^2 = \frac{8\Delta h^2}{\left(4\Delta h^2 + (z_3 - z_1)^2 + (z_4 - z_2)^2\right)^2} m_z^2$$

a po przekształceniu wzór:

$$(26) \quad m_s = \pm \frac{2\sqrt{2}\Delta h}{4\Delta h^2 + (z_3 - z_1)^2 + (z_4 - z_2)^2} m_z$$

Analogicznie zróżniczkowano wzór na azymut nachylenia:

$$(27) \quad A = \arctan \frac{z_3 - z_1}{z_4 - z_2}$$

ze względu na  $z_1$ :

$$(28) \quad A'_{z_3} = \frac{1}{1 + \left(\frac{z_3 - z_1}{z_4 - z_2}\right)^2} \left(\frac{1}{z_4 - z_2}\right)$$

A podstawiając za N:

$$(29) \quad N = \frac{1}{1 + \left(\frac{z_3 - z_1}{z_4 - z_2}\right)^2} = \frac{(z_4 - z_2)^2}{(z_4 - z_2)^2 + (z_3 - z_1)^2}$$

można otrzymać różniczki ze względu na  $z_1, z_2, z_3, z_4$ .

$$(30) \quad A'_{z_1} = N \left(\frac{-1}{z_4 - z_2}\right)$$

$$(31) \quad A'_{z_2} = N(z_3 - z_1) \left(\frac{-1}{(z_4 - z_2)^2}\right)$$

$$(32) \quad A'_{z_4} = N(z_3 - z_1) \left(\frac{1}{(z_4 - z_2)^2}\right)$$

Błąd ekspozycji A z prawa przenoszenia błędów można obliczyć następująco, zakładając jednakowy we wszystkich 4 punktach błąd DTM,  $m_z$ :

$$(33) \quad m_A^2 = \left( A_{z_1}^{\prime 2} + A_{z_2}^{\prime 2} + A_{z_3}^{\prime 2} + A_{z_4}^{\prime 2} \right) m_z^2$$

Po podstawieniu wzorów od (30) do (33) otrzymuje się:



$$(34) \quad m_A^2 = N^2 \left( \left( \frac{1}{z_4 - z_2} \right)^2 + \left( \frac{-1}{z_4 - z_2} \right)^2 + \left( \frac{-(z_3 - z_1)}{(z_4 - z_2)^2} \right)^2 + \left( \frac{(z_3 - z_1)}{(z_4 - z_2)^2} \right)^2 \right) m_Z^2$$

$$(35) \quad m_A^2 = N^2 \left( \frac{2}{(z_4 - z_2)^2} + \frac{2(z_3 - z_1)^2}{(z_4 - z_2)^4} \right) m_Z^2$$

$$(36) \quad m_A^2 = N^2 \left( \frac{2 \left( (z_4 - z_2)^2 + (z_3 - z_1)^2 \right)}{(z_4 - z_2)^4} \right) m_Z^2$$

$$(37) \quad m_A^2 = \left( \frac{(z_4 - z_2)^2}{(z_4 - z_2)^2 + (z_3 - z_1)^2} \right)^2 \left( \frac{2 \left( (z_4 - z_2)^2 + (z_3 - z_1)^2 \right)}{(z_4 - z_2)^4} \right) m_Z^2$$

I ostatecznie:

$$(38) \quad m_A = \pm \sqrt{\frac{2}{(z_4 - z_2)^2 + (z_3 - z_1)^2}} m_Z$$

Wzory (26) i (38) wymagają dostępu do wartości wysokości w 4 punktach i ich praktyczne wykorzystanie nie byłoby możliwe w dostępnych pakietach GIS. Jednak przekształcając wzór (11) można obliczyć wyrażenie  $(z_3 - z_1)^2 + (z_2 - z_4)^2$ :

$$(39) \quad 4\Delta h^2 \tan^2 S = (z_3 - z_1)^2 + (z_4 - z_2)^2$$

i po podstawieniu do wzoru (26) otrzymać:

$$(40) \quad m_S = \pm \frac{2\sqrt{2}\Delta h}{4\Delta h^2 + 4\Delta h^2 \tan^2 S} m_Z$$

i ostatecznie uzyskać następujący wzór na błąd nachyleń:

$$(41) \quad m_S = \pm \frac{\sqrt{2}}{2\Delta h(1 + \tan^2 S)} m_Z$$

A po podstawieniu wzoru (39) do wzoru (38) można otrzymać następujący wzór:

$$(42) \quad m_A = \pm \sqrt{\frac{2}{4\Delta h^2 \tan^2 S}} m_Z$$

a po uproszczeniu wzór na błąd ekspozycji:

$$(43) \quad m_A = \pm \frac{1}{\sqrt{2}\Delta h \tan S} m_Z$$

Wzory (41) i (43) pozwalają przewidywać błędy nachyleń i ekspozycji ( $m_S$  i  $m_A$ ) spowodowane niedokładnością DTM ( $m_Z$ ). Po obliczeniu błędów nachyleń i ekspozycji można przeprowadzić analizę porównawczą pomiędzy na przykład mapą nachyleń i mapą błędów nachyleń w celu



znalezienia obszarów, dla których wartości błędu nachylenia są większe niż wartości nachyleń. W obszarach tych, wartości nachyleń należy traktować z ostrożnością, wręcz uznać je za niewiarygodne.

Analityczna postać proponowanych wzorów (41) i (43) pozwala na łatwą ich adaptację w każdym oprogramowaniu GIS. Ponadto należy zauważyć, że wykonując obliczenia za pomocą tych wzorów uzyskuje się rozkład przestrzenny błędu nachyleń i ekspozycji wykonując jednokrotnie operację algebraiczną, co jest zaletą w porównaniu z metodą Monte Carlo.

Analiza wpływu błędu DTM na błąd nachyleń i ekspozycji przebiega jak poniżej. Załóżmy, że analizujemy DTM o zadanej oczka siatki ( $\Delta h$ ) i błędzie lub rozkładzie błędu DTM ( $m_z$ ).

Obliczenie błędu nachyleń i ekspozycji będzie przebiegało w następujący sposób:

1. Obliczenie nachyleń i ekspozycji za pomocą standardowych opcji programu.
2. Obliczenie błędów nachyleń i ekspozycji za pomocą wzorów: (41) i (43) wykorzystując standardowe opcje algebry map<sup>11</sup>.

Zanim przystąpiono dla testowania wzorów (41) i (43) na danych przestrzennych, analizę postaci tych wzorów przeprowadzono na różnych wartościach liczbowych: oczka siatki ( $\Delta h$ ), błędu wysokości DTM ( $m_z$ ) i wartości nachyleń ( $S$ ). Jako wielkość oczka siatki ( $\Delta h$ ), przyjęto początkowo 30 m. Wyniki obliczeń zamieszczono w tabelach (Tab 6 i Tab 7). Szare tło pól tabeli zastosowano dla wartości nachyleń, dla których wartości błędu nachylenia przekraczają wartości nachyleń. W przypadku azymutów zaznaczono te pola tabeli, dla których błąd azymutu przekracza wartość  $45^\circ$ . Taka zmiana azymutu powoduje bowiem zmianę jakościową ekspozycji np. ze wschodniej na południowo wschodnią. W celu ilustracji graficznej wpływu nachylenia na błąd nachylenia, dla różnych wartości błędu DTM, sporządzono odpowiednie wykresy, jak na rysunku Rys. 25 (dolny wykres). Jest to graficzna ilustracja wzoru (41). Podobny wykres, ale w celu analizy wpływu błędu DTM na błąd ekspozycji (graficzna ilustracja wzoru (43)), zamieszczono na rysunku (Rys. 26). Dla porównania wpływu wielkości oczka siatki na wartość błędu nachylenia sporządzono dolny wykres Rys. 25, pokazujący zależność błędu nachylenia od nachylenia dla oczka siatki równego 50 m.

---

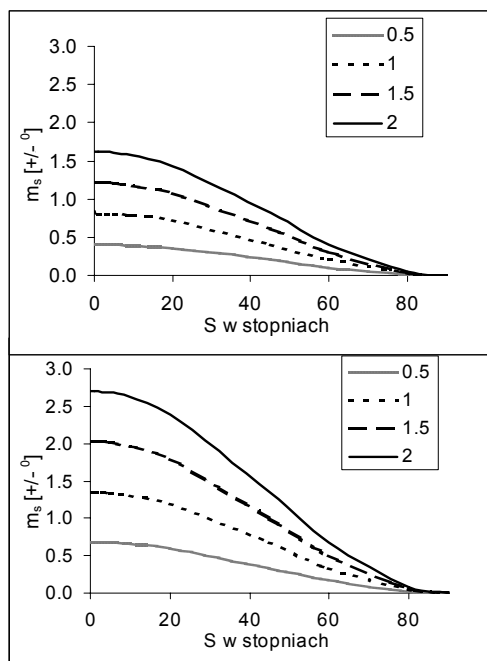
<sup>11</sup> Algebra map – standardowe opcje w gridowym (rastrowym) oprogramowaniu GIS umożliwiające wykonanie operacji algebraicznych na gridach (mnożenie, dzielenie, dodawanie, odejmowanie, funkcje trygonometryczne, eksponentialne, itp.)

**Tab 6. Błąd nachylenia  $m_s$  [ $\pm$   $^{\circ}$ ] w zależności od kąta nachylenia  $S$  [ $^{\circ}$ ] i błędu DTM  $m_z$ [m], (szare tło pola tabeli oznacza, że wartości błędu nachylenia przekraczają wartości nachylenia)**

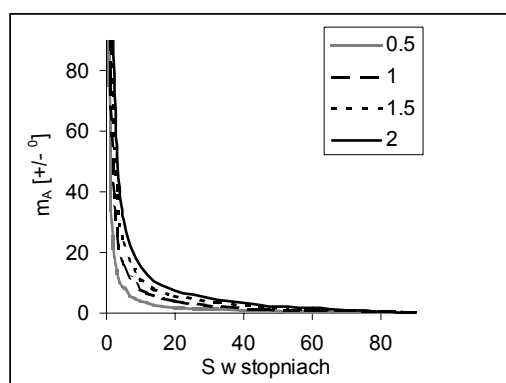
$S$ [ $^{\circ}$ ]	$m_z$ [+/-m]									
	0,1	0,5	1	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	10
0,1	0,14	0,68	1,35	2,02	2,70	4,05	5,40	6,76	8,11	13,51
1	0,14	0,68	1,35	2,02	2,70	4,05	5,40	6,75	8,10	13,51
3	0,13	0,67	1,35	2,01	2,69	4,04	5,39	6,74	8,08	13,47
5	0,13	0,67	1,34	2,02	2,68	4,02	5,36	7,70	8,04	13,41
10	0,13	0,66	1,31	1,97	2,62	3,93	5,24	6,55	7,86	13,11
20	0,12	0,60	1,20	1,80	2,39	3,60	4,80	5,99	7,19	11,99
45	0,08	0,38	0,77	1,14	1,51	2,27	3,02	3,78	4,54	7,57

**Tab 7. Błąd azymutu  $m_A$  [ $\pm$   $^{\circ}$ ] w zależności od kąta nachylenia  $S$  [ $^{\circ}$ ] i błędu DTM  $m_z$ [m], (-) wartości powyżej  $360^{\circ}$ , (szare tło pola tabeli oznacza, że wartości błędu ekspozycji przekraczają wartość:  $45^{\circ}$ )**

$S$ [ $^{\circ}$ ]	$m_z$ [+/- m]									
	0,1	0,5	1	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	10
0,1	77,20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	7,74	38,72	77,43	116,14	154,86	232,29	309,72	-	-	-
3	2,58	12,89	25,78	38,67	51,56	77,34	103,12	128,90	154,68	257,81
5	1,54	7,72	15,44	23,16	30,88	46,33	61,77	77,22	92,66	154,43
10	0,77	3,83	7,66	11,49	15,33	22,99	30,65	38,31	45,98	76,63
20	0,37	1,86	3,71	5,57	7,42	11,14	14,84	18,56	22,27	37,12
45	0,14	0,67	1,35	2,02	2,70	4,05	5,50	6,76	8,11	13,51



Rys. 25. Zależność błędu nachylenia  $m_s$  od nachylenia,  $S$ , dla różnych wartości błędu modelu  $m_z$  (+/- 0.5, 1, 1.5, 2 m) – oczko siatki – 50 m (górny wykres) i 30 m (dolny wykres)



Rys. 26. Zależność błędu azymutu,  $m_A$ , od nachylenia,  $S$ , dla różnych wartości błędu modelu  $m_z$  (+/- 0.5, 1, 1.5, 2 m) – oczko siatki – 30 m.

Przeprowadzona powyżej analiza pozwala stwierdzić, że za pomocą wzorów (41) i (43) można prognozować błąd nachylenia i ekspozycji w zależności od błędu DTM oraz analizować wartości błędu w kontekście wartości nachylenia i ekspozycji. Wykorzystując DTM o oczku siatki 30m i błędzie wysokości większym niż +/- 2 m, dla niewielkich nachyleń, do  $3^0$ , wartości błędu nachylenia i błędu ekspozycji przekraczają wartości nachylenia oraz powodują jakościową zmianę ekspozycji. Oznacza to, że obliczone wartości nachylenia i ekspozycji są w tym przypadku niewiarygodne i istnieje duże ryzyko, że obliczone z DTM nachylenia i azymuty różnią się diametralnie od rzeczywistych nachyleń i ekspozycji. Można ponadto zauważyć, analizując wykres (Rys. 26), w porównaniu z wykresem na rysunku Rys. 25, że wpływ błędu DTM jest większy na wartości ekspozycji niż na wartości nachyleń. Wynika to z postaci wzoru (43), w którym w mianowniku występuje tangens nachylenia ( $S$ ), co powoduje, że błąd ekspozycji rośnie do nieskończoności dla małych kątów.

Powyższy etap można uznać, za ilustrację tabelaryczną i graficzną wzorów (41) i (43) opartą a analizę nieprzestrzenną. W dalszej kolejności przeprowadzono testowanie z wykorzystaniem danych przestrzennych, czyli z wykorzystaniem rozkładu przestrzennego wysokości (DTM). W pierwszym przypadku DTM wygenerowano w sposób sztuczny, wykorzystując symulator liczb losowych. W drugim przypadku wykorzystano rzeczywisty DTM z okolic Krakowa. DTM symulowano za pomocą rozkładu normalnego i jednostajnego przyjmując takie same parametry rozkładu, jakie ma rzeczywisty DTM. Taki sposób testowania wynikał z analizy histogramu<sup>12</sup> rzeczywistego DTM, który z reguły nie ma rozkładu normalnego i zaistniała wątpliwość, czy fakt ten nie jest czynnikiem obciążającym analizę. W trakcie wykonywania testów w oparciu o DTM obliczano rozkład błędów nachyleń i błędów ekspozycji zgodnie z wzorami (41) i (43). Równocześnie, dla porównania wykonywano analizę Monte Carlo.

## 6.2.2 Test z wykorzystaniem symulowanego DTM

Po przeanalizowaniu wzorów (41) i (43) z punktu widzenia syntetycznego wpływu wartości:  $S$ ,  $m_z$  i  $\Delta h$  na wartości błędów  $m_S$  i  $m_A$  przeprowadzono obliczenia na danych przestrzennych. Początkowo, testowanie przeprowadzono na dwóch modelach DTM symulowanych generatorem liczb losowych. Symulacje wykonano za pomocą rozkładu normalnego i rozkładu jednostajnego. W obu przypadkach parametry rozkładu przyjmowano takie, jakie występują dla rzeczywistego modelu DTM z okolic Krakowa.

Początkowo zasymulowano model wysokościowy w oparciu o rozkład normalny wysokości o wartości średniej: 232 m i odchyleniu standardowym: 35 m. Histogram takiego DTM można przeanalizować na (Rys. 27 (z lewej)). Na osi odciętych znajdują się wysokości, a na osi rzędnych częstość ich występowania. W związku z tym, że testowanie polegało na porównaniu proponowanej metody z metodą Monte Carlo konieczne było wygenerowanie również rozkładu błędu DTM. Błąd DTM symulowano każdorazowo za pomocą rozkładu normalnego (0,1). Oznacza to, że wprowadzony błąd ma wartość oczekiwana równą zero i odchylenie standardowe równe 1m. Histogram zaburzonego w ten sposób DTM'u zamieszczono na Rys. 27 (z prawej). Następnie obliczono z niezaburzonego błędem DTM'u mapę nachyleń i mapę rozkładu błędów nachyleń z wzoru: (41), Rys. 28. Analizując na tym rysunku histogram nachyleń i błędów nachyleń można stwierdzić, że pomimo założenia rozkładu normalnego DTM rozkład nachyleń i w związku z tym błędów nachyleń nie ma charakteru rozkładu normalnego.

Analizę przeprowadzono po raz drugi, z tym, że DTM zasymulowano rozkładem jednostajnym, o jednakowym prawdopodobieństwie występowania różnych wysokości, Rys. 29. Oznacza to, że prawdopodobieństwo występowania każdej wysokości jest takie samo. Następnie, tak zasymulowany DTM zaburzono błędem nachyleń o rozkładzie normalnym jak wyżej. Histogram DTM, symulowanego rozkładem jednostajnym nachyleń, zaburzonego błędem

---

<sup>12</sup> Histogram – zależność częstości występowania wartości atrybutu grida w zależności od wartości

nachyleń o rozkładzie normalnym, zamieszczono na rysunku Rys. 29 z prawej. Następnie z tego DTM'u wygenerowano nachylenia i błędy nachyleń. Histogramy mapy nachyleń i rozkładu błędu nachyleń znajdują się na rysunku: Rys. 30.

W celu wykonania analizy zgodnie z metodą Monte Carlo w obu przypadkach obliczono nachylenia w oparciu o model DTM zaburzony i niezaburzony oraz wygenerowano odpowiednie obrazy różnicowe, których histogramy znajdują się na Rys. 31. W metodzie Monte Carlo odchylenie standardowe histogramu mapy różnicowej stanowi przybliżenie wartości błędu średniego analizy.

Poniżej porównano wyniki uzyskane za pomocą wzoru (41) i w oparciu o metodę Monte Carlo (Tab 8).

**Tab 8. Porównanie wartości błędu nachylenia obliczonego ze wzoru(41) z odchyleniem standardowym mapy różnicowej (metoda Monte Carlo)**

$m_s$	DTM symulowany rozkładem normalnym	DTM symulowany rozkładem jednostajnym
$m_s$ ze wzoru (41)	+/- 0.73 m	+/-1.33 m
$m_s$ jako odchylenie standardowe mapy różnicowej	+/- 0.79 m	+/-1.29 m

Za pomocą wzoru(41) uzyskano, w przypadku DTM modelowanego rozkładem normalnym, przeciętną wartość błędu  $m_s$  równą +/-0.73 m. W metodzie Monte Carlo uzyskano odchylenie standardowe odpowiedniej mapy różnicowej równe +/- 0.79 m. W przypadku symulowania DTM rozkładem jednostajnym uzyskano odpowiednio:  $m_s$ : +/-1.33 m, a z metody Monte Carlo wartość odchylenia standardowego mapy różnicowej +/-1.29 m. Stanowi to weryfikację proponowanego wzoru (41), na obliczanie błędu nachylenia.

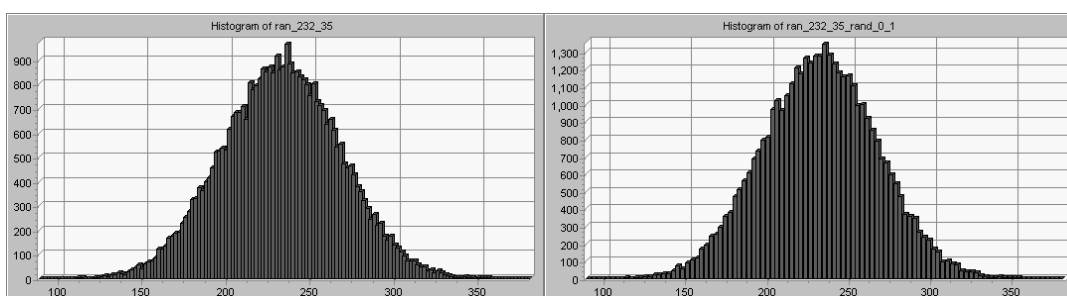
Analiza błędów ekspozycji jest trudniejsza, gdyż nawet małe błędy wysokości mogą spowodować diametralną zmianę azymutu nachylenia. Na rysunkach: Rys. 32 i Rys. 33 znajdują się wyniki analiz błędów ekspozycji obliczonych w oparciu o DTM symulowany rozkładem normalnym. W tym przypadku wartość średnia błędu  $m_A$  obliczona na podstawie wzoru: (43) wynosi: +/-2<sup>0</sup>. Z metody Monte Carlo odchylenie standardowe wynosi: +/-25<sup>0</sup>. W przypadku symulowania DTM rozkładem jednostajnym wartości te wynoszą: +/-22<sup>0</sup> i +/- 75<sup>0</sup>.

Powyższy fakt wymaga komentarza. Ekspozycje obliczono dla DTM'ów symulowanych za pomocą rozkładu normalnego i jednostajnego, jak opisano powyżej. Na rysunku Rys. 32 (z lewej) zamieszczono histogram skumulowany<sup>13</sup> mapy nachyleń wyliczonej z DTM'u generowanego za pomocą rozkładu normalnego (inny sposób przedstawienia histogramu jak na Rys. 28 (z lewej)). Na skumulowanym histogramie nachyleń można zauważyć, że pikseli o małym nachyleniu jest stosunkowo niewiele, stąd też wartość średnia błędu nachylenia wynosi +/-2<sup>0</sup> (z metody Monte Carlo +/- 25<sup>0</sup>). Na rysunku Rys. 34 (z lewej) znajduje się natomiast

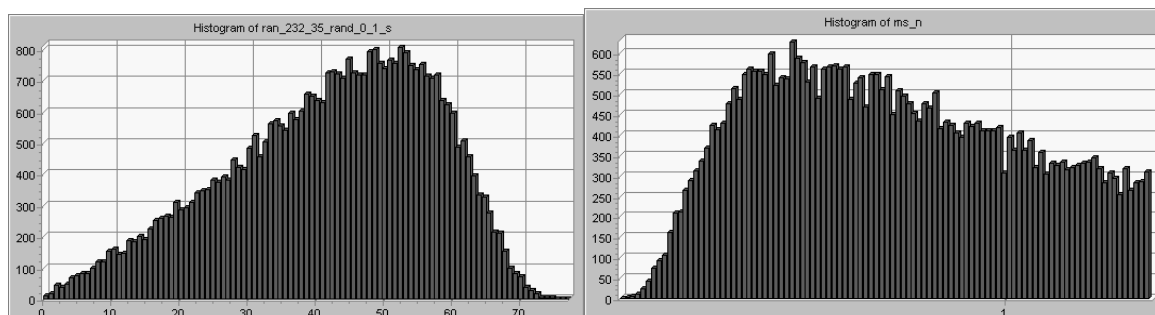
atrybutu.

<sup>13</sup> Histogram skumulowany– zależność pokazująca na osi rzędnych liczbę pikseli grida, dla których wartości atrybutu są mniejsze niż wartość atrybutu na osi odciętych

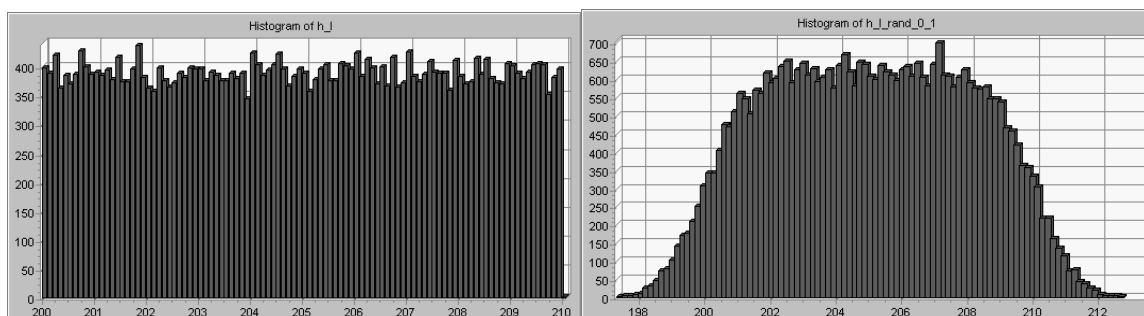
skumulowany histogram mapy nachyleń, odpowiadającej modelowi DTM generowanemu rozkładem jednostajnym. Na skumulowanym histogramie nachyleń można, w tym przypadku zauważyć, że nachylenia zmieniają się w zakresie:  $0-12^{\circ}$ , czyli w ogólności są znacznie mniejsze niż w przypadku generowania DTM'u za pomocą rozkładu normalnego. Powoduje to, że błąd średni ekspozycji wynosi:  $\pm 22^{\circ}$  (z metody Monte Carlo  $\pm 75^{\circ}$ ). Analizując wykresy na rysunkach: Rys. 32 (z prawej) i Rys. 34 (z prawej) można zauważyć, że błędy nachyleń mogą przyjmować bardzo duże wartości przekraczające wartość  $360^{\circ}$ . Wynika to z faktu, że wartości błędu ekspozycji rośnie do nieskończoności dla małych kątów, co jest spowodowane postacią wzoru (43) (por. także Rys. 26). Wartości różnic na mapie różnicowej Rys. 33 i Rys. 35 mogą z kolei wynosić od  $-360^{\circ}$  do  $360^{\circ}$ , co uniemożliwia wykonanie wiarygodnego porównanie błędów ekspozycji obliczonych oboma metodami.



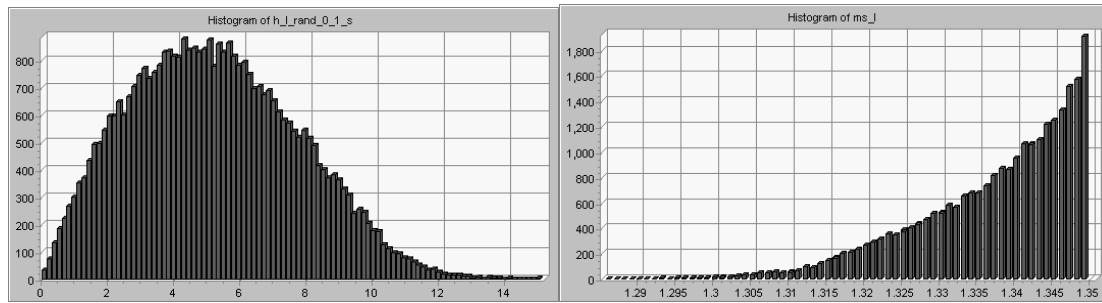
Rys. 27. Histogram DTM'u symulowanego rozkładem normalnym (323m,35m) (z lewej) i DTM'u zaburzonego błędami o rozkładzie normalnym (0m,1m), (z prawej)



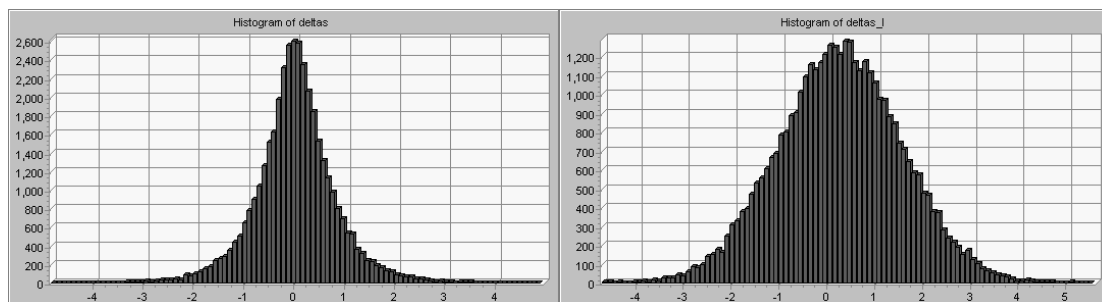
Rys. 28. Histogram nachyleń, S (z lewej) i błędów nachyleń  $m_s$  (z prawej) - obliczone na podstawie DTM jak na Rys. 27; wartość średnia błędu nachylenia ( $m_s$ ):  $0.73^{\circ}$ , maksymalna:  $1.35^{\circ}$



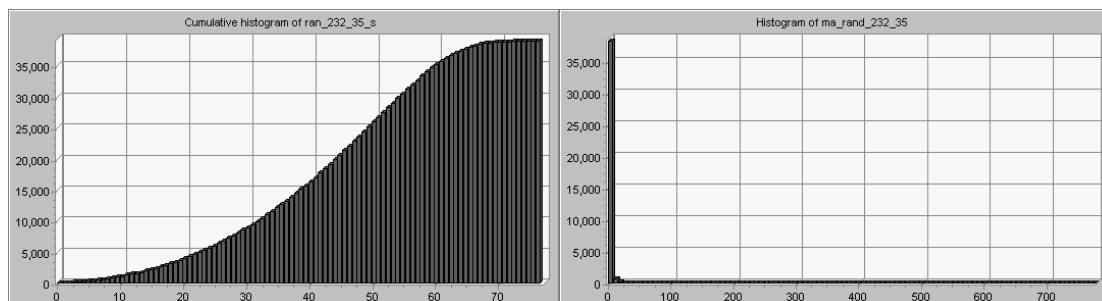
Rys. 29. Histogram DTM'u symulowanego rozkładem o jednakowym prawdopodobieństwie występowania (z lewej) i DTM'u zaburzonego błędami o rozkładzie normalnym (0m,1m), (z prawej)



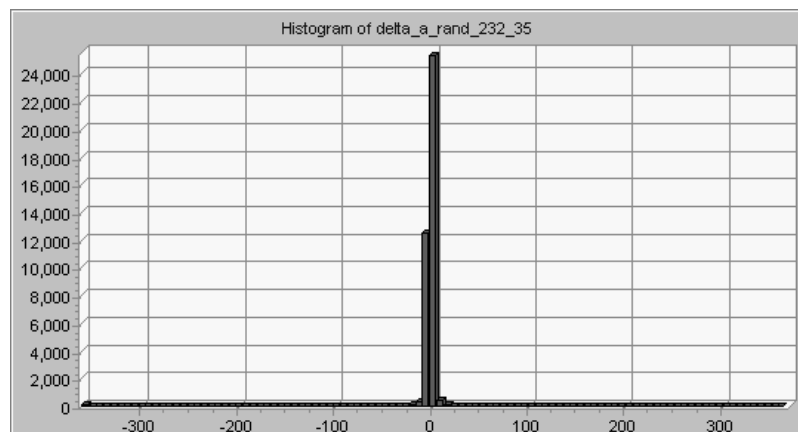
Rys. 30. Histogram nachyleń, S (z lewej) i błędów nachyleń  $m_s$  (z prawej) – obliczone na podstawie DTM'u jak na Rys. 29; wartość średnia błędu nachylenia ( $m_s$ ):  $1.33^{\circ}$ , maksymalna:  $1.35^{\circ}$



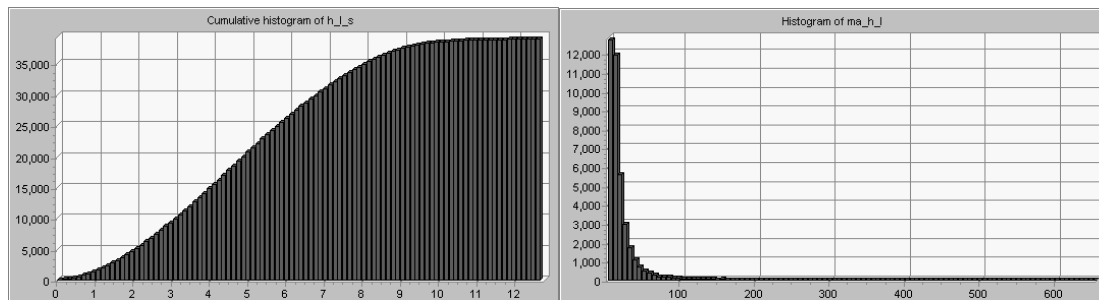
Rys. 31. Histogram różnic nachyleń obliczonych za pomocą modelu zaburzonego i nie zaburzonego – z lewej: DTM symulowany rozkładem normalnym, z prawej: rozkładem jednostajnym; parametry rozkładu różnic odpowiednio:  $(0^{\circ}, 0.79^{\circ})$  i  $(0.27^{\circ}, 1.29^{\circ})$



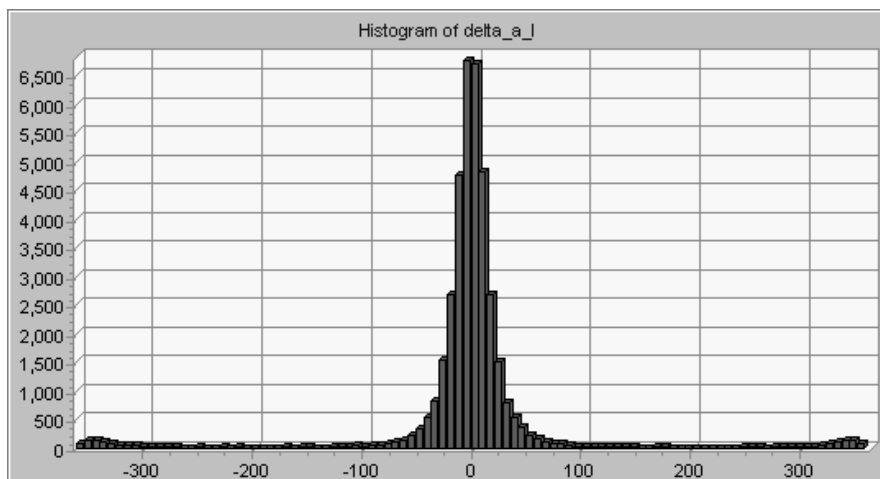
Rys. 32. Skumulowany histogram mapy nachyleń (po lewej - por. Rys. 28), histogram błędu ekspozycji (po prawej); wartość średnia  $m_A = \pm 2^{\circ}$



Rys. 33. Mapa różnicowa ekspozycji dla DTM symulowanego rozkładem normalnym; odchylenie standardowe  $25^{\circ}$



Rys. 34. Skumulowany histogram mapy nachyleń (po lewej - por. Rys. 30), histogram błędu ekspozycji (po prawej); wartość średnia  $m_A = \pm 22^0$

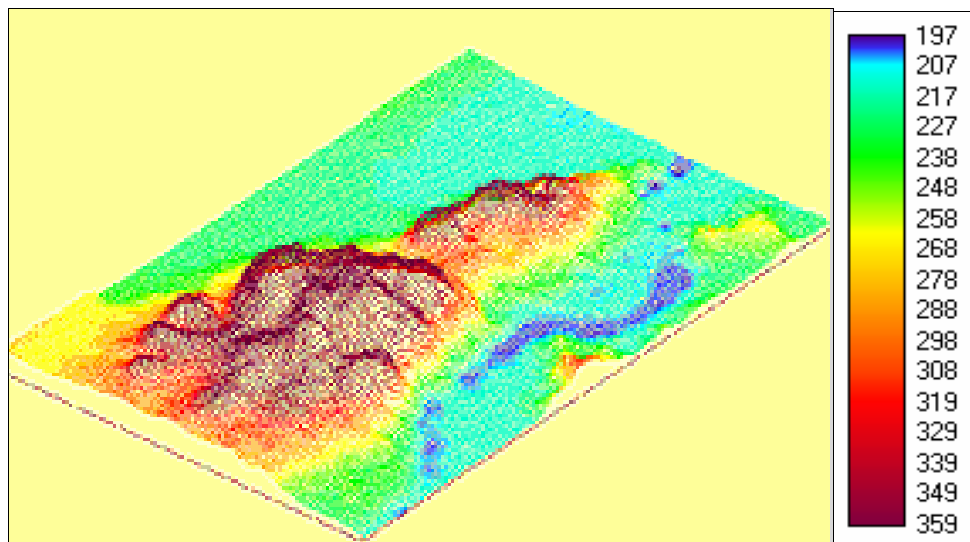


Rys. 35. Mapa różnicowa ekspozycji dla DTM symulowanego rozkładem jednostajnym, odchylenie standardowe  $\pm 75^0$

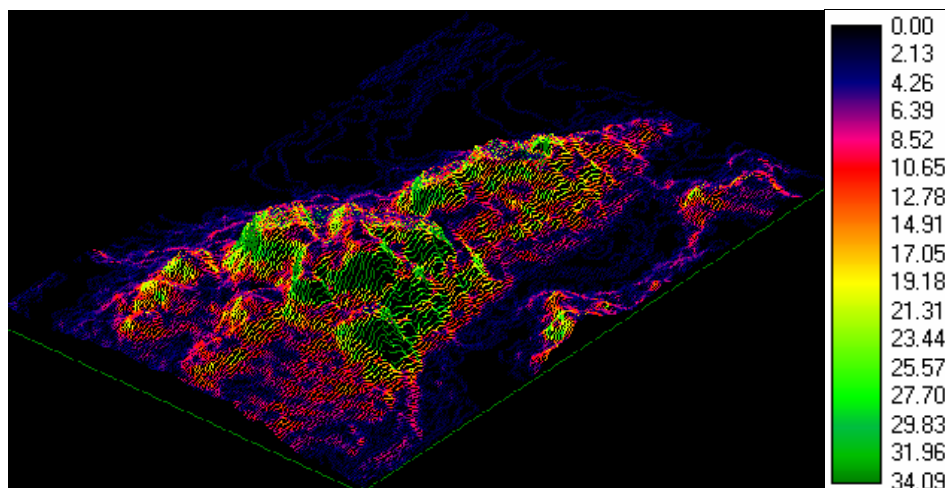
### 6.2.3 Test z wykorzystaniem rzeczywistego DTM

Test z wykorzystaniem rzeczywistego DTM'u przeprowadzono na modelu z okolic Lasu Wolskiego koło Krakowa, o rozkładzie statystycznym wysokości (232,35), Rys. 36, Rys. 39. Na podstawie DTM obliczono nachylenia i azymuty, Rys. 37, Rys. 38, których histogramy znajdują się na rysunkach: Rys. 40. Obliczono mapy błędów nachyleń i azymutów, a ich histogramy zamieszczono na rysunku: Rys. 41. Następnie model wysokościowy został zaburzony błędem przypadkowym o rozkładzie normalnym (0, 1). Wygenerowano mapę nachyleń i azymutów, z modelu bez zniekształceń i ze zniekształceniami. W dalszej kolejności obliczono różnicę pomiędzy mapami nachyleń przed i po zniekształceniu oraz analogicznie mapy azymutów (Rys. 42).

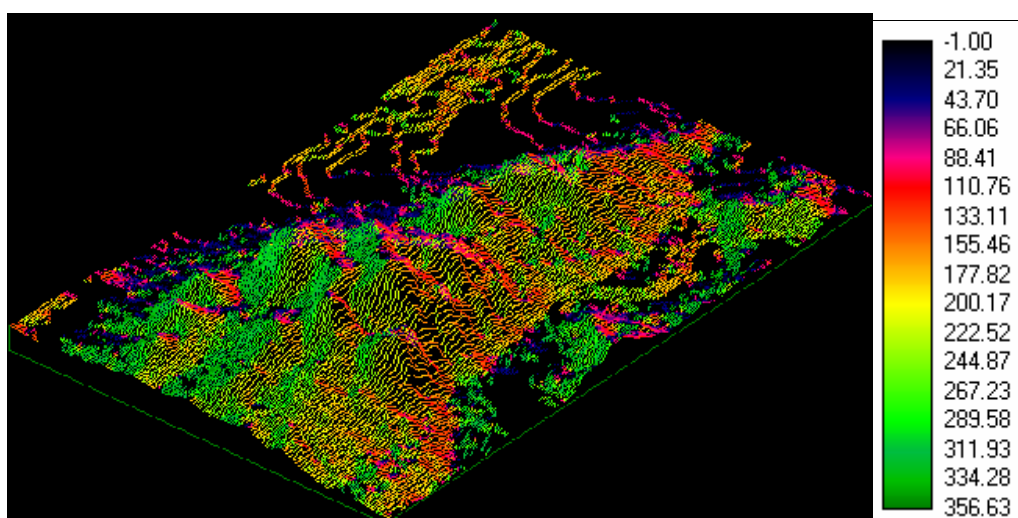




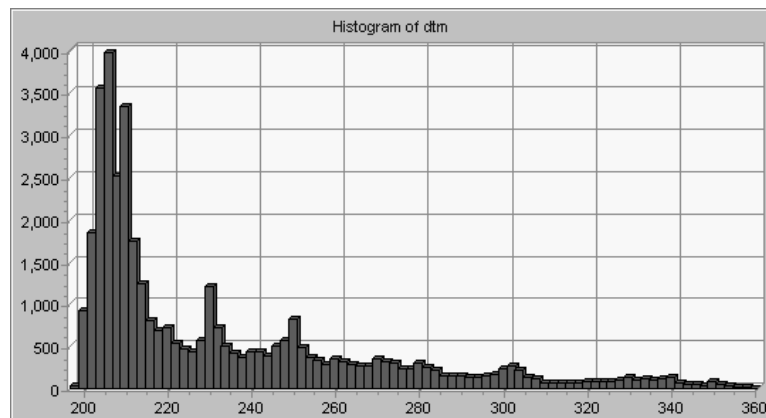
Rys. 36. DTM okolice Lasu Wolskiego (wysokości w m)



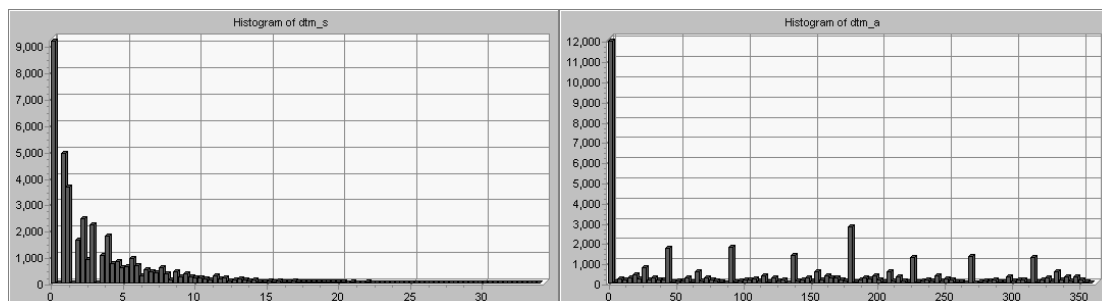
Rys. 37. Mapa nachyleń (w stopniach)



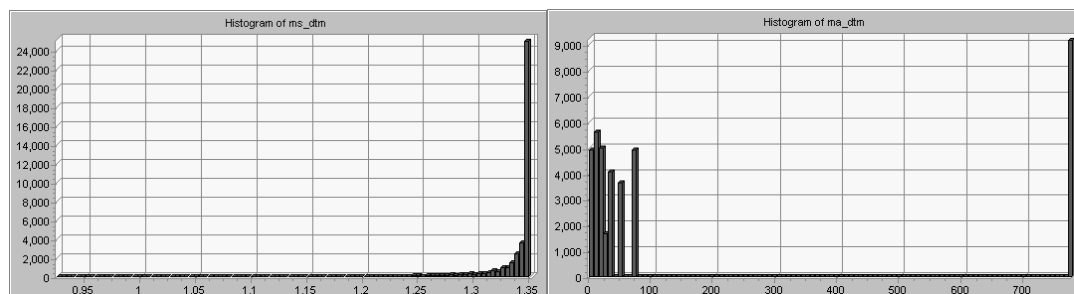
Rys. 38. Mapa ekspozycji (azymut nachylenia w stopniach)



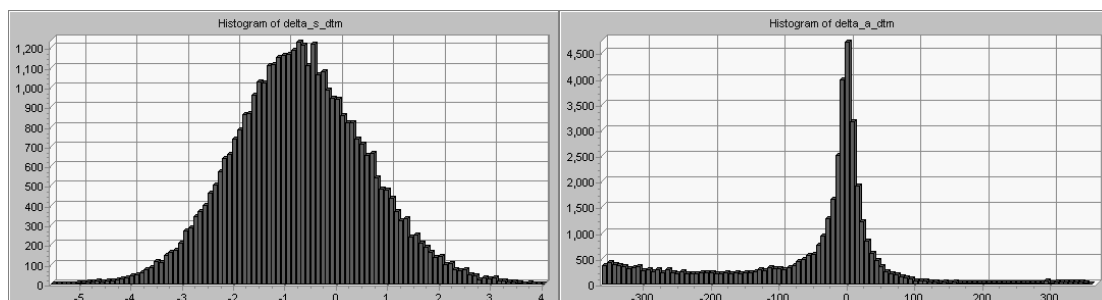
Rys. 39. Histogram DTM jak na Rys. 36



Rys. 40. Histogramy nachyleń (z lewej) i ekspozycji (z prawej) DTM jak na Rys. 36



Rys. 41. Histogram błędów nachyleń (z lewej), wartość średnia  $m_s = \pm 1.33^\circ$  i ekspozycji (z prawej), wartość średnia  $m_a = \pm 206^\circ$ , DTM jak na Rys. 36



Rys. 42. Histogram map różnicowych nachyleń (z lewej), odchylenie standardowe:  $\pm 1.28^\circ$  i ekspozycji (z prawej), odchylenie standardowe:  $\pm 121^\circ$ , DTM jak na Rys. 36 (metoda Monte Carlo)

Wyniki przeprowadzonej analizy są podobne do wyników uzyskanych w oparciu o symulowany DTM.

Średnia wartość błędu nachylenia:  $\pm 1.33^{\circ}$  jest zbliżona do wartości odchylenia standardowego w metodzie Monte Carlo  $\pm 1.28^{\circ}$ . W przypadku błędów ekspozycji zgodność taka nie występuje.

Powyższe rozważania zostały przeprowadzone przy założeniu, że błąd DTM ma charakter rozkładu normalnego o wartości oczekiwanej równej zero i odchyleniu standardowym równym 1 m.

Błąd DTM w rzeczywistości zależy na przykład od skali mapy topograficznej, z której został wykonany. Można powiązać błąd DTM'u z cięciem warstwicowym obowiązującym na danej mapie, przyjmując błąd  $m_z$  jako równy 0.3 razy cięcie warstwicowe. W poniższej tabeli (Tab 9) zamieszczono wyniki obliczeń przyjmując błędy DTM zgodnie z cięciem warstwicowym: 1, 2.5, 5 i 10m, czyli przyjmując wartości błędu:  $\pm 0.3$ , 0.75, 1.5 i 3 m. Obliczenia z wykorzystaniem wzorów: (41) i (43) oraz metody Monte Carlo wykonano dla pola testowego jak na Rys. 36.

**Tab 9. Wartość średnia błędu nachylenia  $m_s$  [ $^{\circ}$ ] w zależności od błędu modelu DTM  $m_z$ [m] dla obszaru testowego jak na Rys. 36**

$m_z$ [m]	$m_s$ [ $^{\circ}$ ] - średnia	$\sigma$ [ $^{\circ}$ ] – odchylenie standardowe map różnicowych
0,3	0.40	0.42
0,75	1.00	0.99
1,5	2.01	1.84
3	4.02	3.33

**Tab 10. Wartość średnia błędu ekspozycji  $m_A$  [ $^{\circ}$ ] w zależności od błędu modelu  $m_z$ [m] dla obszaru testowego jak na Rys. 36**

$m_z$ [m]	$m_A$ [ $^{\circ}$ ] – średnia	$\sigma$ [ $^{\circ}$ ] – odchylenie standardowe map różnicowych
0,3	62	109
0,75	154	118
1,5	310	128
3	-	138

W przypadku tak przeprowadzonej analizy uzyskano zgodność pomiędzy wzorem (41) i metodą Monte Carlo. Nie wystąpiła natomiast zgodności pomiędzy wynikiem modelowania błędów azymutu nachylenia za pomocą wzoru (43) i metodą Monte Carlo. Oznacza to, że wynik ten jest taki sam jak w przypadku wszystkich przeprowadzonych wcześniej analiz. Jeden fakt zasługuje jednak na uwagę, mianowicie w raz ze wzrostem błędu  $m_z$  (Tab 10) odchylenie standardowe mapy różnicowej w metodzie Monte Carlo (czyli wartość przybliżająca błąd ekspozycji) rośnie tylko nieznacznie. Natomiast błąd ekspozycji, obliczony

za pomocą wzoru: (43) wykazuje większy związek pomiędzy błędem DTM, a błędem ekspozycji i wydaje się to mieć logiczne uzasadnienie.

#### **6.2.4 Wnioski dotyczące modelowania błędu nachyleń i azymutów**

Analizy przeprowadzone w podrozdziałach (6.2) pozwalają na sformułowanie dwóch rodzajów wniosków:

- Wnioski dotyczące zjawiska przenoszenia się błędów DTM na błędy map pochodnych, generowanych w oparciu o DTM – map nachyleń i ekspozycji, powszechnie wykorzystywanych w analizach GIS, można powiedzieć, że niezbędnych prawie w każdej analizie przestrzennej.
- Wnioski związane z analizą porównawczą pomiędzy proponowaną metodą analityczną i metodą statystyczną Monte Carlo.

#### **Zjawisko przenoszenia się błędów wysokości DTM na błędy nachyleń i ekspozycji**

Analizy dokładności DTM przeprowadzone w oparciu o wzory (41) i (43) pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Błąd nachyleń i azymutów spadków zależy głównie od błędu DTM, wymiaru oczka siatki  $\Delta h$  i kąta nachylenia  $S$ .
2. Dla terenów o kącie nachylenia  $< 10^0$  błąd nachyleń jest prawie stały, wynika to z postaci wzorów (41). Może to stanowić na przykład wyjaśnienie wykorzystywania tylko jednej wartości błędu nachyleń w programie IDRISI.
3. Niedokładność DTM w większym stopniu wpływa na błąd azymutu niż na błąd nachylenia (szczególnie w terenach o niewielkich deniwelacjach, gdzie możliwa jest diametralna zmiana ekspozycji, stanowi to zagrożenie dla analiz przestrzennych, w których uwzględnia się tylko specyficzne azymuty).

#### **Wyniki analizy porównawczej proponowanej metody analitycznej i metody Monte Carlo**

Przeprowadzona analiza porównawcza proponowanej metody analitycznej i metody Monte Carlo pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. Wyniki modelowania błędów nachyleń za pomocą proponowanej metody analitycznej i metodą Monte Carlo są zbliżone.
2. W przypadku prognozowania błędów ekspozycji nie uzyskano zgodności pomiędzy proponowaną metodą analityczną, a metodą Monte Carlo.

Drugi z wniosków wymaga komentarza. Obliczając błędy nachylenia ze wzoru (43) uzyskuje się, dla małych kątów, nieskończenie wielkie wartości błędów ekspozycji. W przypadku metody Monte Carlo, korzysta się z mapy różnicowej ekspozycji obliczonych w oparciu o nachylenia z oryginalnego modelu DTM i DTM'u zaburzonego błędem przypadkowym. W związku z tym wartości na mapie różnicowej mogą wynosić od  $-360^{\circ}$  do  $360^{\circ}$  i nie można porównać statystycznie z wartościami błędu  $m_A$  obliczonymi za pomocą wzoru (43). Nie są również znane z literatury wyniki wykorzystania metody Monte Carlo do badania wpływu błędu DTM na błędy ekspozycji. Ogólnie wydaje się, że prognozowanie błędów ekspozycji jest trudniejsze niż prognozowanie błędów nachyleń. Potwierdzeniem tego może być na przykład następujący fakt. W programie IDRISI, po wygenerowaniu nachyleń z DTM, z założoną wartością  $m_z$ , podawana jest jedna wartość błędu nachyleń, równa, jak okazało się w trakcie prowadzonych prac badawczych, wartości przeciętnej błędu nachyleń. Po wygenerowaniu z takiego DTM'u ekspozycji podawana jest taka sama wartość błędu jak w przypadku nachyleń. Stanowi to ewidentny błąd w programie i jednocześnie nie daje możliwości wykonania porównania z proponowaną metodą analityczną.

Podsumowując można powiedzieć, że zaletą metody analitycznej jest oprócz możliwości obliczania zarówno błędu nachylenia jak i ekspozycji także łatwość uwzględnienia przestrzennego rozkładu błędu wysokości DTM w prognozowaniu rozkładu przestrzennego błędów nachyleń i ekspozycji. Można nawet uwzględnić inny błąd DTM dla każdego piksela, co praktycznie wydaje się być prawie niemożliwe w przypadku statystycznej metody Monte Carlo. Uwzględnianie zmiennego przestrzennie błędu DTM w analizie dokładności nachyleń i azymutów nachyleń jest ważne z praktycznego punktu widzenia, ponieważ wielkość błędu DTM najczęściej nie jest stała dla całego obszaru. W terenie płaskim błąd jest mniejszy, a w terenie o urozmaiconej rzeźbie większy. Jeśli wykonawca DTM'u dostarczyłby wraz z nim mapę rozkładu błędów DTM, lub np. podał wartość błędu modelu w zależności od urozmaicenia rzeźby możliwe by było przeprowadzenie szczegółowej analizy wpływu błędu modelu na błąd nachyleń i azymutów. W dalszej kolejności można by przeprowadzić próbę uwzględnienia tego błędu podczas analiz przestrzennych. Przykład takiej analizy przedstawiono poniżej.

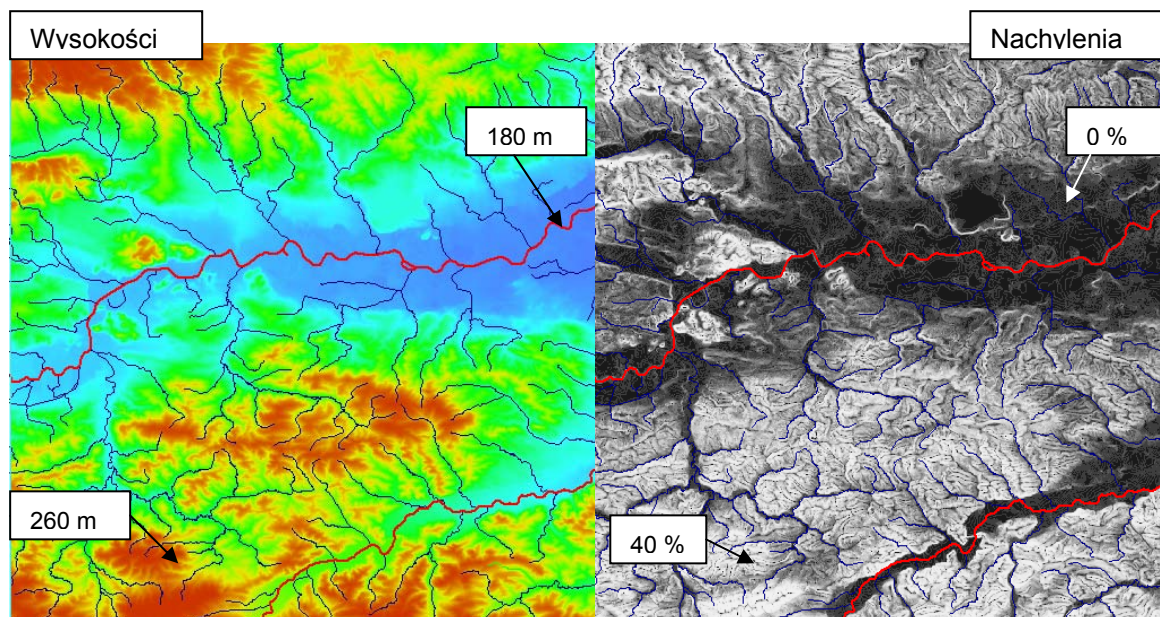
### **6.2.5 Analiza rozkładu błędu nachyleń w zależności od wartości nachyleń – przykład uwzględnienia błędu modelu w trakcie podejmowania decyzji.**

DTM analizowanego obszaru w okolicy Krakowa o rozdzielczości przestrzennej 30 m charakteryzuje się wysokością od 180 do 260 m. Dla tego obszaru z DTM wygenerowano mapę nachyleń, a z niej na podstawie wzoru (41) mapę rozkładu błędu nachyleń. Do obliczeń przyjęto wartości błędu DTM:  $\pm 1.5$  m i  $\pm 1$  m. Na poniższych ilustracjach znajdują się:

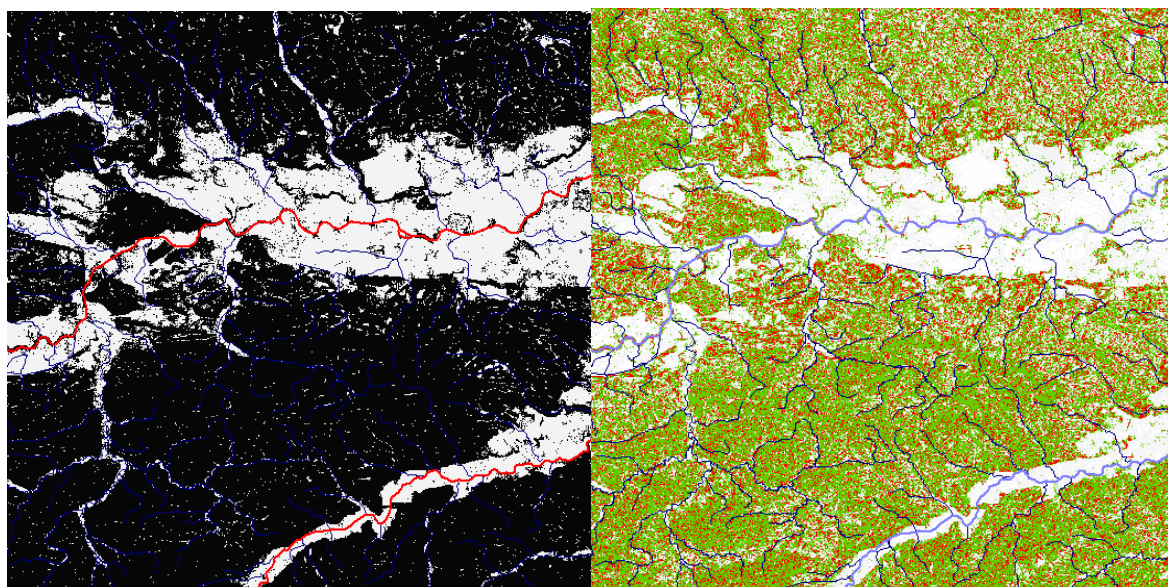
- DTM i mapa rozkładu nachyleń, Rys. 43.
- Mapa błędów nachyleń przekraczających wartości nachyleń i porównanie względnego błędu nachylenia dla wartości błędu DTM:  $\pm 1.5$  m i  $\pm 1$  m, Rys. 44 .



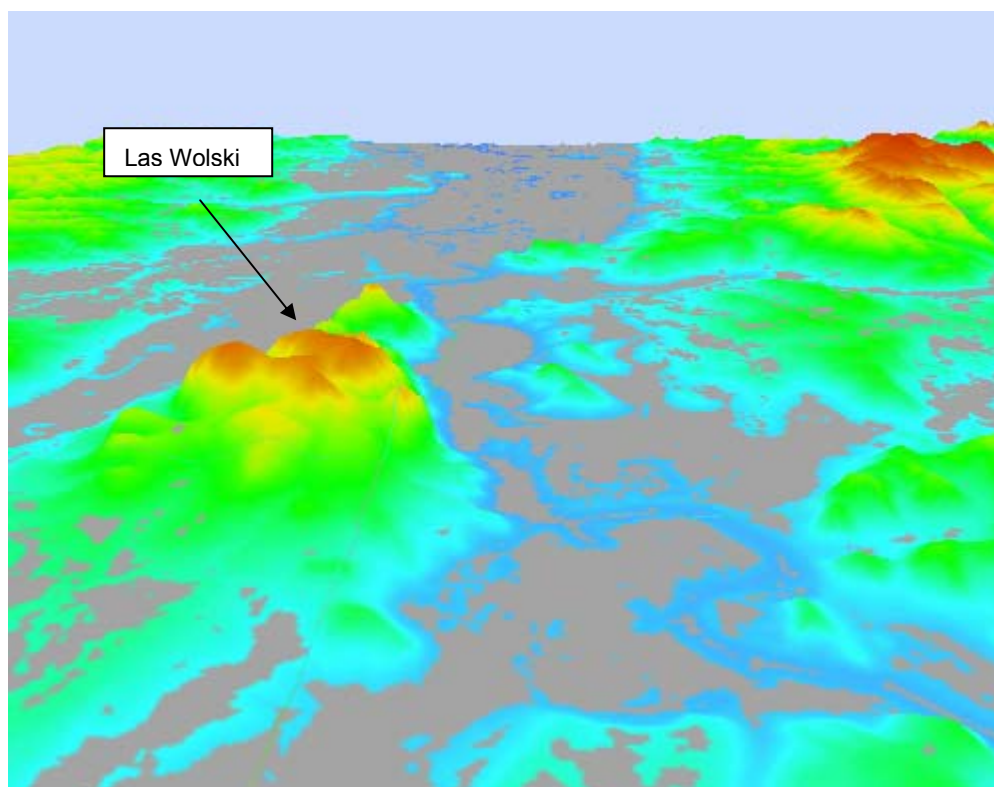
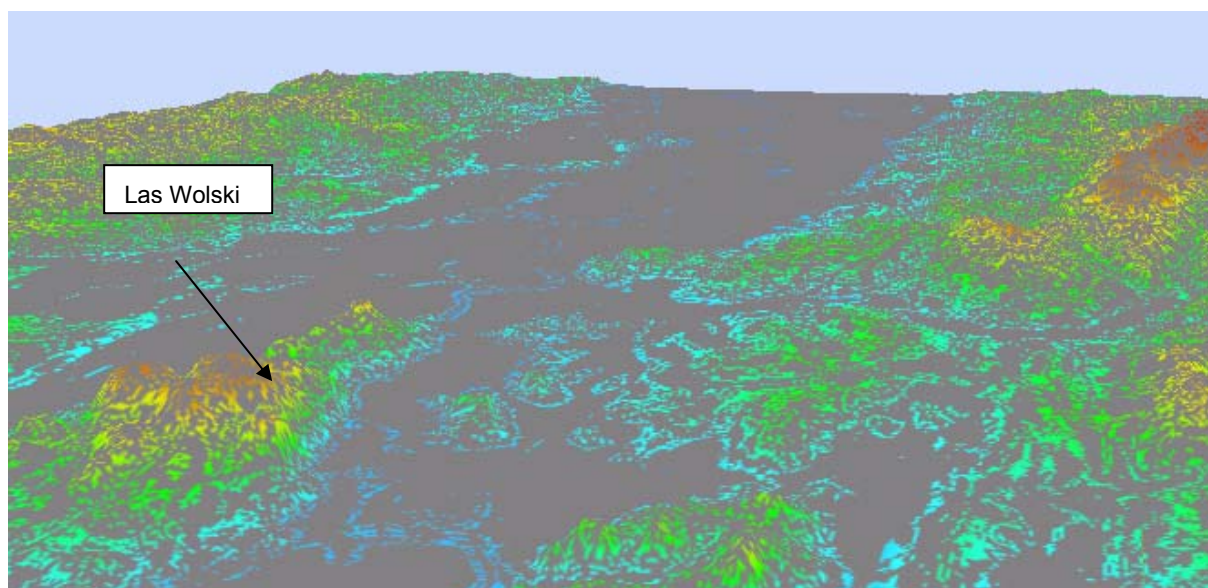
- Porównanie obszarów o wartości błędu względnego powyżej 30% w przypadku błędu DTM: +/-1.5 m i +/-1 m, Rys. 45.



Rys. 43. DTM (z lewej) i mapa rozkładu nachyleń (z prawej), na czerwono: Wisła i Raba.

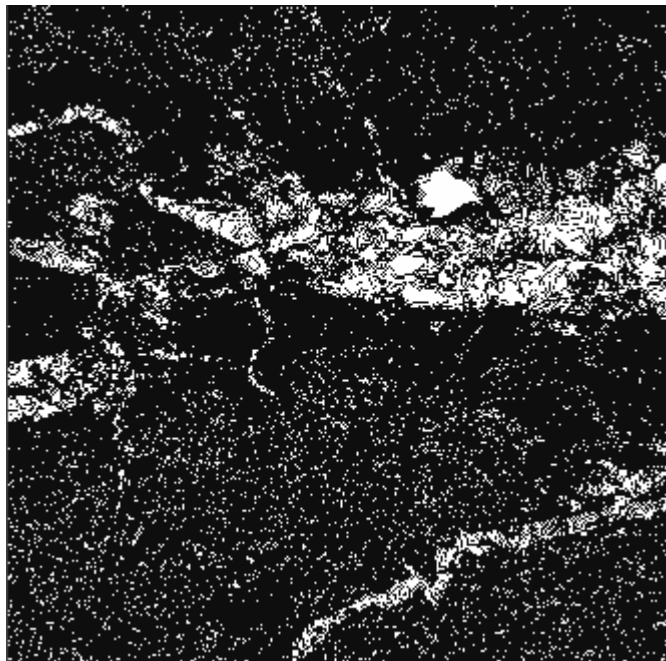


Rys. 44. Mapa błędów nachyleń przekraczających wartości nachyleń (z lewej, przekroczenia kolorem białym), porównanie względnego błędu nachylenia dla wartości błędu DTM: 1.5 m i 1 m (z prawej, kolorem białym – błąd względny powyżej 30%, a kolorem czerwonym – poniżej 30% w obu przypadkach, kolorem zielonym obszary dla których błąd względny przekracza 30% w przypadku błędu DTM: 1.5 m, a jest poniżej 30% dla błędu DTM: 1 m.



Rys. 45. Porównanie obszarów o wartości błędu względnego powyżej 30% w przypadku błędu DTM: 1.5 m (u góry) i 1 m (u dołu).





Rys. 46. Rozkład błędu ekspozycji (na biało bezwzględna wartość błędu przekracza  $30^{\circ}$ )

Zaprezentowany w niniejszym podrozdziale przykład ma na celu zilustrowanie możliwości analizy wpływu błędu nachyleń i ekspozycji w zależności od wartości nachylenia i ekspozycji. Zaznaczano obszary, dla których błąd względny wynosił ponad 30% analizowanej wielkości (nachylenia lub ekspozycji). Wykorzystując wzory (41), (43) można wygenerować mapę błędów nachyleń i ekspozycji, a w dalszej kolejności analizować ich rozkład przestrzenny, w szczególności wyłączać z analiz obszary, dla których błędy przekraczają wartości dopuszczalne, założone z góry przez wykonującego analizę. Przykładowo można wyłączyć z analizy obszary, dla których błąd ekspozycji przekracza  $30^{\circ}$ , (Rys. 46). Ostatecznie można sformułować wniosek, że każdorazowo, po poznaniu i zaakceptowaniu algorytmu obliczeniowego danego systemu GIS (różne algorytmy powodują uzyskiwane różnych wyników) można szacować błąd nachyleń i azymutów. Odrębnym zagadnieniem może być porównanie wpływu wykorzystania algorytmów na wartości nachyleń i azymutów w stosunku do wartości błędów tych wielkości.



## 7. Ryzyko w modelu wektorowym na przykładzie analizy dokładności powierzchni działki

---

W rozdziale 6 przedmiotem zainteresowania był model danych gridowych, a w szczególności dwie analizy: przecięcia (modelowanie stref zalewowych) i obliczania nachyleń i azymutów. W niniejszym rozdziale przedmiotem rozważań będzie wektorowy model danych GIS. W modelu wektorowym, inaczej niż w modelu gridowym, obiekty przestrzenne są definiowane za pomocą współrzędnych. W modelu tym podobnie jak w modelu gridowym możliwe jest wykonywanie szeregu analiz przestrzennych, z tym, że są to innego rodzaju analizy. W modelu gridowym dużą grupę stanowią analizy z uwzględnieniem parametru jako kryterium. Podobna analiza nie jest możliwa do wykonania w modelu wektorowym. Przykładowo, można pokazać obszary odległe o zadaną wartość od jakiegoś obiektu (kryterium typu bariera) ale nie można wygenerować mapy odległości od tego obiektu (kryterium typu parametr). W związku z tym, w przypadku analizy wektorowej, nie pojawia się problem ryzyka jak w metodzie MCE, ponieważ model ten nie umożliwia jej przeprowadzenia. W modelu wektorowym nie można również zastosować miękkich reguł decyzyjnych. Podsumowując, analizy z uwzględnieniem ryzyka, w modelu wektorowym są zawsze analizami w warunkach niepewności, a elementami, które można uwzględniać są błędy danych źródłowych i niedokładności relacji.

Problem uwzględniana niedokładności, w trakcie prowadzenia analiz GIS, jest zagadnieniem stosunkowo nowym. Próby jego rozwiązywania są podejmowane przez specjalistów wykonujących głównie analizy gridowe, ponieważ większość złożonych analiz GIS przeprowadza się w tym modelu. Analizami w modelu gridowym zajmują się przede wszystkim specjaliści z zakresu geografii i determinuje to stopień szczegółowości danych źródłowych, które w tym przypadku pochodzą zwykle z map drobnoskalowych. Poza tym, jak już powiedziano, dominuje tutaj model gridowy, w którym mniejsze znaczenie ma błąd sytuacyjny położenia obiektu, a większy błąd atrybutu np. błąd interpolacji np. wysokości, temperatury.

Inny problem, związany z dokładnością danych źródłowych, pojawia się na mapach wielkoskalowych, które są przedmiotem zainteresowania geodezji. W tym przypadku zarówno model danych jest inny – wektorowy, jak i odmienne są analizy przestrzenne, na których koncentrują się użytkownicy takich danych. Przykładem analizy wektorowej GIS prowadzonej w modelu wektorowym może być np. obliczanie długości obiektu liniowego (drogi) lub powierzchni obiektu powierzchniowego (działki ewidencyjnej). Obie te analizy można oczywiście przeprowadzić w modelu gridowym, w którym także można określić dokładność długości linii, czy powierzchni poligonu. Błąd tych wielkości jest jednak znacznie większy w

modelu gridowym niż w modelu wektorowych, ponieważ jest bezpośrednio związany z wielkością piksela.

Problemem rozważanym w niniejszym rozdziale jest dokładność, z jaką możemy określić powierzchnię obiektu powierzchniowego (np. działki) w modelu wektorowym. Zagadnienie to jest szczególnie ważne w dwóch dziedzinach: kataster i system dopłat bezpośrednich IACS. Materiały w tym zakresie: „Instrukcja techniczna G-5, 2003, Ewidencja Gruntów i Budynków”, „Wytyczne Techniczne G-5.4” z roku 1992 i „Mapy do celów prawnych, podziały i scalanie oraz rozgraniczanie nieruchomości” z roku 1998 nie są dostosowane do obecnych metod pomiarowych. Zawarte w nich przepisy są oparte o wzory empiryczne, uwzględniające zależności dokładności powierzchni działki od wielkości jej powierzchni i wydłużenia. Obecnie obok tradycyjnego bezpośredniego pomiaru geodezyjnego wykorzystuje się do określania powierzchni działki metodę fotogrametryczną i metodę GPS. W obu tych metodach wykonuje się pomiar punktów załamania granicy, czyli pomiar współrzędnych:  $x$  i  $y$ , a nie pomiar kątów i długości, jak w metodzie klasycznej. Ponadto pole powierzchni obliczane jest w przypadku pomiaru fotogrametrycznego lub GPS z wykorzystaniem analizy GIS, co w praktyce oznacza obliczenie jej ze współrzędnych. Taki sposób pomiaru i obliczenia powierzchni powoduje inne podejście do jej dokładności.

Określanie powierzchni działki jest istotne w systemie dopłat bezpośrednich IACS.

Wykorzystywana w do tego celu buforowa metoda<sup>14</sup> oceny dokładności powierzchni, przedstawiana w różnych dokumentach UE nie daje się wykorzystać w warunkach polskich, szczególnie na południu kraju, gdzie występuje bardzo rozdrobniona struktura agrarna. W związku z tym Autorka zaproponowała inną metodę określania dokładności powierzchni działki bezpośrednio związaną z metodyką pomiarową, czyli pomiarem punktów załamania granicy.

W rozdziale 7.1 przedstawione zostały założenia systemu dopłat bezpośrednich do rolnictwa i opisano etapy kontroli prowadzonej w tym systemie. W rozdziale 7.2 szczegółowo został opisany problem związany z określaniem powierzchni działki, a w rozdziale 7.3 przeanalizowano, wykorzystywaną w UE, tzw. tolerancję pomiaru. W rozdziale 7.4 zaproponowano własną metodę określania rzeczywistej dokładności powierzchni działki, a w rozdziale 7.6 zamieszczono wyniki analizy statystycznej działek katastralnych z obszaru Polski południowej. W ostatnim rozdziale 7.7 porównano metodę określania dokładności powierzchni działki zgodnie z wymienionymi powyżej wytycznymi technicznymi i metodą proponowaną przez Autorkę.

---

<sup>14</sup> Metoda buforowa – polega na określeniu dopuszczanej dokładności określenia powierzchni działki jako powierzchni bufora wokół granicy działki, która wynosi: obwód działki pomnożony przez szerokość bufora

## 7.1 Podstawy systemu dopłat bezpośrednich do rolnictwa

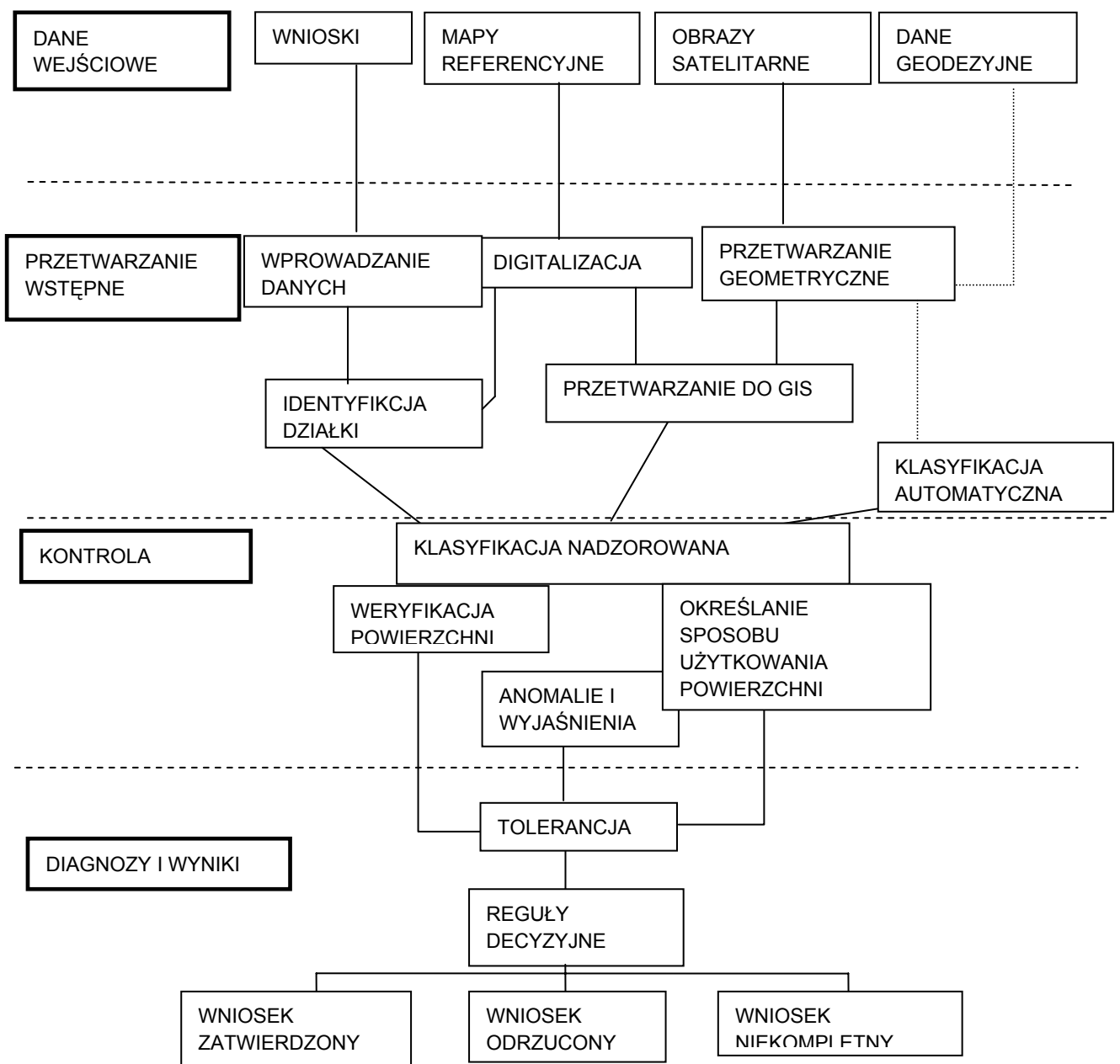
System dopłat bezpośrednich do rolnictwa IACS (Integrated Administration Control System) obejmuje pomoc zarówno w zakresie hodowli, jak i produkcji płodów rolnych. Ważną częścią IACS'u jest tzw. LPIS (Land Parcel Identification System), czyli System Identyfikacji Działek Rolnych. Słowo: „działka” w LPIS'ie rozumiane jest na 2 sposoby: jako działka rolna (czyli zwarty obszar gruntu rolnego, na którym jest prowadzona jedna uprawa, o powierzchni nie mniejszej niż 0.1 ha, wchodzący w skład gospodarstwa rolnego) i tzw. działka referencyjna, którą w Polsce jest działka ewidencyjna. Działka rolna obejmuje uprawianą powierzchnię działki ewidencyjnej. Określenie rzeczywistej powierzchni działki rolnej, poprzez wycięcie z niej części, która nie jest uprawiana wykonywane jest w oparciu o ortofotomapę. System Identyfikacji Działek Rolnych zasilany jest z zasobu geodezyjnego, z którego, w formacie SWDE (Standard Wymiany Danych Ewidencyjnych), pobierane są graficzne i opisowe dane ewidencyjne. Ze względu na różny stopień rozdrobnienia działek w LPIS'ie wykorzystywane są ortofotomapy o różnej rozdzielczości przestrzennej. W Polsce południowej ortofotomapy są produkowane z wielkością piksela 0.25 m, a w pozostałych przypadkach 0.5m.

Co roku wykonywana jest dla wybranej części wniosków, kontrola rzeczywistej powierzchni i typu uprawy. Zwykle kontrola w UE odbywa się z wykorzystaniem danych teledetekcyjnych: ortofotomap lotniczych (**dla określenia powierzchni uprawy**) oraz zobrazowań satelitarnych (**dla określenia typu uprawy**). Istnieje odpowiedni kalendarz, zgodny z rozwojem fenologicznym upraw na podstawie, którego pozyskiwane są wielospektralne dane satelitarne. Rozporządzenie UE [Rozporządzenie Komisji (WE) nr 2419/2001z dnia 11 grudnia 2001 r, Artykuł 32] określa tolerancję dla różnicy pomiędzy powierzchnią zadeklarowaną przez rolnika we wniosku, a rzeczywistą powierzchnią uprawy. Kontrola prowadzona jest najpierw na poziomie działki rolnej, potem na poziomie grupy upraw. Bez konsekwencji można pomylić się **do 3 procent (ale nie więcej niż 2 ha)** pomierzonej powierzchni grupy upraw. Należy zauważyć, że proces kontroli przebiega etapowo, tzn. na podstawie danych teledetekcyjnych dokonywana jest określona, wstępna selekcja wniosków. Wnioski nie zaakceptowane w wyniku kontroli teledetekcyjnej przeznaczane są do kontroli bezpośredniej. Kary dla rolnika są wymierzane jedynie w przypadku stwierdzenia, na podstawie pomiaru bezpośredniego, rozbieżności pomiędzy deklarowaną, a rzeczywistą powierzchnią działki rolnej lub typem uprawy.

Problem dokładności określenia powierzchni działki ma, poza konsekwencjami dla rolnika, konsekwencje szersze, związane z wiarygodnością systemu dopłat w kraju. W przypadku masowych przekroczeń dopuszczalnej tolerancji, system LPIS traci wiarygodność, co ma wpływ na wielkość dopłat pochodzących z UE. W takim przypadku większą częścią dopłat bezpośrednich, w następującym po kontroli roku, może zostać obciążony budżet kraju.

Proces kontroli wniosków schematycznie przedstawiono poniżej (Rys. 47) Po wyborze wniosków do kontroli, zgromadzeniu i wstępnym przetworzeniu niezbędnych materiałów: referencyjnych (LPIS), ortofotomap, zobrazowań satelitarnych i innych materiałów

kartograficznych następuje etap kontroli właściwej. W ramach niej digitalizuje się wszystkie działki rolne kontrolowanego wniosku i określa się powierzchnię każdej z nich. Porównuje się powierzchnie działki rolnej zmierzoną z zadeklarowaną przez rolnika z uwzględnieniem tolerancji związanej z metodą pomiaru. Równoległe, na podstawie danych satelitarnych, określa się typ uprawy. Każda działka uzyskuje na tej podstawie odpowiedni kod. W dalszej kolejności następuje ocena wniosku na poziomie upraw i tym razem cały wniosek dostaje odpowiedni kod. Następnie wniosek jest weryfikowany testami zgodności i kompletności i ostatecznie uzyskuje kod wynikowy: „wniosek zatwierdzony”, „odrzucony” lub „niekompletny”. W dwóch ostatnich przypadkach wniosek odsyłany jest do kontroli na miejscu, czyli do bezpośredniej, terenowej weryfikacji.



Rys. 47. Schemat wykonywania kontroli teledetekcyjnej

## 7.2 Określanie powierzchni działki w systemie IACS – przedstawienie problemu

Działką referencyjną w systemie IACS, w Polsce, jest działka ewidencyjna. Ewidencja gruntów i budynków (EGiB) składa się z tak zwanej części opisowej i części graficznej. Obie te części w chwili obecnej dla większości kraju nie są prowadzone w jednym systemie informatycznym. Tworzenie systemu IACS wymusiło porządkowanie ewidencji w Polsce. Do opracowywanego, dla potrzeb IACS'u, systemu informatycznego, w sposób masowy, na skalę krajową, wprowadza się dane z EGiB. W trakcie tego procesu ujawniają się niespójność zawartości części opisowej i graficznej jak np.:

- działka jest w części opisowej, a nie ma jej w części graficznej i na odwrót,
- powierzchnia działki w części opisowej różni się od powierzchni w części graficznej.

Obecnie rolnik deklarując uprawy wykorzystuje powierzchnie działek ewidencyjnych z części opisowej. Docelowo w systemie IACS powinna znajdować się spójna baza ewidencyjna, w której istniałaby tylko jedna wartość powierzchni z katastru. Uporządkowanie EGiB nie jest celem IACS'u i będzie w ciągu najbliższych lat zadaniem dla służb geodezyjnych. Usunięcie niespójności pomiędzy częścią graficzną i opisową nie oznacza rozwiązania wszystkich problemów. Przebieg granicy działki ewidencyjnej może (pomimo spójności z częścią opisową) nie odzwierciedlać sytuacji rzeczywistej. Czyli zadeklarowana przez rolnika powierzchnia uprawy w oparciu o powierzchnię działki ewidencyjnej może różnić się od powierzchni rzeczywistej.

W systemie IACS, w wyniku tzw. kontroli na miejscu, prowadzonej metodą pomiaru bezpośredniego i metodą teledetekcyjną, pojawia się następna informacja o powierzchni działki. W tym przypadku jest to powierzchnia działki rolnej.

W związku z tym, że przedmiotem dopłat bezpośrednich jest powierzchnia uprawiana rolniczo problem dokładności określania powierzchni ma decydujące znaczenie w następujących dwóch aspektach:

- jaką dokładnością charakteryzują się dane z EGiB dotyczące powierzchni i zgromadzone w LPIS'ie,
- z jaką dokładnością należy mierzyć działkę rolną w trakcie kontroli, żeby uzyskać dokładności wymagane w UE.

Powierzchnię można określać zarówno w oparciu o pomiary bezpośrednie jak i w oparciu o pomiary teledetekcyjne z wykorzystaniem ortofotomap. W UE wymagania dotyczące dokładności powierzchni dla LPIS'u i kontroli są takie same.

## Dokładność wyznaczania powierzchni działki w systemie IACS

W związku z przyjęciem rozliczania powierzchni działek na poziomie grup upraw, w ustawie UE zamieszczono wartości progowe odchyłki pomiędzy powierzchnią zadeklarowaną przez rolnika, a zmierzoną w wyniku kontroli na poziomie: 3%, 2ha i 20% powierzchni upraw należących do jednej grupy [Artykuł 51 Ustawy Nr 796/2004].

Kontrolę w systemie IACS prowadzi się etapowo, zaczynając od poziomu działki, jak to zostało opisane w poprzednim rozdziale. Kontrola na poziomie działki polega na porównywaniu powierzchni każdej działki rolnej zadeklarowanej i zmierzonej. W trakcie porównywania wykorzystywana jest tak zwana tolerancja techniczna. **Tolerancja techniczna** jest to wartość charakteryzująca dokładność pomiaru i związana z technologią stosowaną do pomiaru powierzchni działki. Istnieją dwie możliwości zdefiniowania tolerancji technicznej: jako błąd względny powierzchni lub jako szerokość bufora w metodzie buforowej. Przepisy UE określają maksymalne wartości tolerancji technicznej jako 5% powierzchni działki lub szerokość bufora: 1.5m [Artykuł 30 Ustawy Nr 796/2004].

Jeśli w wyniku pomiaru kontrolnego różnica między powierzchnią działki deklarowaną i pomierzoną i jest większa niż wielkość odchyłki obliczona w oparciu o tak zdefiniowaną tolerancję techniczną to działka otrzymuje odpowiedni kod świadczący o tej niezgodności.

Dla każdej kontrolowanej działki rolnej określa się indywidualnie tolerancję techniczną, która wynosi albo 5% powierzchni albo jest obliczana jako szerokość bufora pomnożona przez obwód działki. Odchyłki powierzchni dla danej działki obliczone w oparciu o tolerancję techniczną 5% i metodą buforową mogą różnić się znacznie od siebie. Wybór tolerancji ma więc duże znaczenie zarówno dla wykonawców przeprowadzających kontrolę, ponieważ determinuje metodykę pomiaru, jak i dla rolników, ponieważ jedna z metod w pewnych przypadkach może być bardziej, a w pewnych mniej restrykcyjna. Metodę buforową można porównać do „grubego sita”. Jest ona korzystna dla rolników, ponieważ w pewnych przypadkach w wyniku jej stosowania uzyskuje się duży przedział pomiędzy wartością pomierzoną, a wartością akceptowaną jako deklarowana. Z drugiej strony wykorzystanie tej metody powoduje, że akceptowane są działki o błędzie określenia powierzchni znacznie większym niż 5%. Fakt ten występuje głównie w przypadku małych działek. Jeśli ich liczba jest stosunkowo niewielka, to ze statystycznego punktu widzenia nie ma to znaczenia. W przypadku obszarów, na których dominują małe działki, dokładność wyznaczenia powierzchni większości działek, stosując metodę buforową, może być znacznie mniejsza niż 5%. Ilustracja tego zagadnienia znajduje się w rozdziale 7.6.

Obie wykorzystywane metody, tzn. oparte na tolerancji technicznej równej 5% błędowi względnemu lub na szerokości bufora wynoszącej 1.5m nie uwzględniają rzeczywistego błędowi powierzchni. Wartości te należy uznać za autorytatywnie przyjęte wartości progowe odchyłki powierzchni. Interesujący więc wydaje się problem określenia, dla każdej działki rzeczywistego błędowi powierzchni, jaki może wystąpić w danej metodzie pomiarowej.

W związku z tym, że ani metody stosowane w systemie IACS, ani w geodezji nie pozwalają na to zaproponowano w rozdziale 7.4 alternatywną metodę określania błędu powierzchni działki (opartą o przekształcony wzór Gauss'a na obliczanie powierzchni ze współrzędnych).

Ogólnie, w następnej części pracy omówiono zalecenia UE dotyczące dokładności wyznaczania powierzchni działki i opisano przykład bezpośredniej kontroli na miejscu. Przykład ten stanowi ilustrację rozbieżności pomiędzy rzeczywistą tolerancją pomiaru powierzchni danej działki a maksymalną tolerancją równą 5% lub 1.5m. W związku z tym, że w krajach UE do szacowania dokładności wyznaczenia powierzchni wykorzystuje się powszechni metodę buforową, metoda ta została szczegółowo omówiona w rozdziale (7.3).

### 7.3 Pojęcie tolerancji technicznej pomiaru.

W UE są sprecyzowane zalecenia dotyczące budowania systemu LPIS, jak i wykonywania kontroli teledetekcyjnej [np. „Discussion Paper „ Land Parcel Identification systems in frame of Regulation EC 1593/2000, “Common technical specifications for the 2002 campaign of remote-sensing control of arable and forage land area-based subsidies”].

Minimalna, dopuszczalna w UE, dokładność ortofotomapy odpowiada dokładności mapy konturowej w skali 1: 10 000, co w przełożeniu na wielkość piksela i błąd średni kwadratowy wynosi:

- wielkość piksela ortofotomapy  $\leq 1$  m,
- błąd średni ortofotomapy  $\leq \pm 2.5$  m.

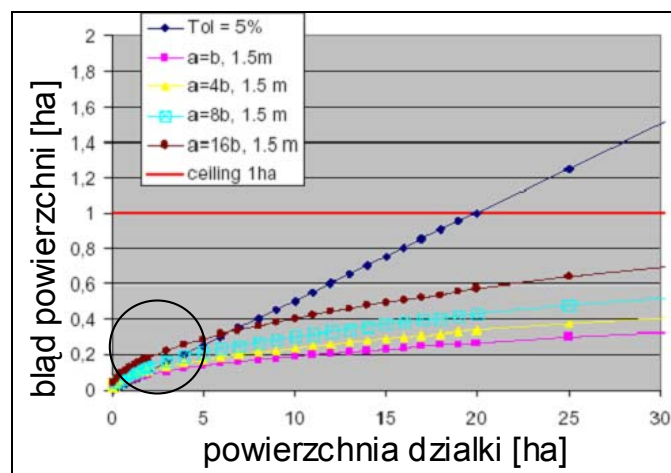
Istnieje również zapis mówiący o tym, że są to jedynie warunki brzegowe, a parametry ortofotomapy powinny być tak dostosowane do lokalnych warunków, żeby spełnić określoną ogólnie tolerancję.

Ortofotmapa stanowi materiał źródłowy do wykonania kontroli powierzchni działki rolnej. Każda działka rolna jest wektoryzowana na ortofotomapie i dla każdej działki określana jest powierzchnia bufora równa obwód pomnożony przez tak zwaną szerokość bufora. W związku z tym, że tolerancja techniczna zależy od metodyki pomiaru, zależy więc od dokładności ortofotomapy. Dla ortofotmapy, o parametrach zdefiniowanych jak powyżej tolerancję techniczną przyjmuje się jako szerokość bufora równą 1.5m. Wiadomo, że błąd pomiaru powierzchni działki zależy nie tylko od jej powierzchni, ale także od kształtu działki, a ściślej mówiąc od stopnia jej wydłużenia. Błąd pomiaru działki kwadratowej będzie mniejszy niż działki wydłużonej o takiej samej powierzchni. Warto zwrócić uwagę na analizę dokładności dla różnych wielkości działek (Rys. 48). Do rozważań przyjęto działkę prostokątną o stosunku boku dłuższego do krótszego równego 4. Tolerancja pomiaru działki o powierzchni 0,5 ha na omawianej ortofotomapie wynosi 0,06 ha, co stanowi 11% powierzchni. Dla działek mniejszych niż 2 ha tolerancja pomiaru przekracza ustawową wartość 5%. W Polsce wielkość działek jest znacznie mniejsza, szczególnie na południu, gdzie często powierzchnia działki nie

przekracza 0,3 ha. Należy zauważyć, że w modelu subsydiowania w zależności od typu uprawy najmniejsza deklarowana działka rolna ma powierzchnię 0,1 ha.

**Tab 11. Powierzchnia bufora w zależności od wielkości działki i błędu ortofotomapy [zmodyfikowana za “Common technical specifications for the 2002 campaign of remote-sensing control of arable and forage land area-based subsidies”]**

Szerokość bufora	1.5m	
Powierzchnia parceli (ha)	tolerancja	
	ha	%
0.5	0.06	11
1	0.08	7.5
2	0.11	5.8
5	0.17	3.4
10	0.24	2.4



Rys. 48. Zależność dokładności wyznaczenia powierzchni [ha] od wielkości powierzchni [ha], z zaznaczonym fragmentem dotyczącym małych działek, analizowanym poniżej, [za “Technical recommendations for the 2004 campaign of control with remote sensing of arable and forage land area-based subsidies, Part 3”]

## 7.4 Określanie błędu powierzchni według wzoru Gauss’a

Opisana powyżej metoda selekcji działek ze względu na zgodność powierzchni deklarowanej i pomierzonej za pomocą progu 5% błędu względnego i metodą buforową są proste i można je wykorzystać w każdym systemie GIS. Niemniej jednak nie dają informacji na temat tego czy powierzchnię danej działki można za pomocą wykorzystywanej metody (np. digitalizacji ortofotomapy o danej rozdzielczości) wyznaczyć z określoną dokładnością. Nie dają również informacji o rzeczywistym błędzie powierzchni.

W niniejszym rozdziale zaproponowano alternatywny sposób określania dokładności wyznaczania powierzchni działki. Przyjęto założenie, że powierzchnię wyznacza się na podstawie współrzędnych punktów załamania granicy (wzór Gauss’a):



$$(44) \quad P = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n x_i (y_{i+1} - y_{i-1})$$

gdzie:

$P$  – pole powierzchni działki,

$x_i, y_i$  – współrzędne  $i$ -tego narożnika działki,

$n$  – ilość narożników działki.

Inaczej wzór (44) można napisać następująco:

$$(45) \quad P = \frac{1}{2} \left[ x_1(y_2 - y_n) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_4 - y_2) + \dots + x_{n-2}(y_{n-1} - y_{n-3}) + x_{n-1}(y_n - y_{n-2}) + x_n(y_1 - y_{n-1}) \right]$$

a następnie zróżniczkować ze względu na współrzędne  $x$  i  $y$  jak poniżej.

$$(46) \quad P'_{x_1} = \frac{1}{2}(y_2 - y_n)$$

$$(47) \quad P'_{x_2} = \frac{1}{2}(y_3 - y_1)$$

.....

$$(48) \quad P'_{x_{n-1}} = \frac{1}{2}(y_n - y_{n-2})$$

$$(49) \quad P'_{x_n} = \frac{1}{2}(y_1 - y_{n-1})$$

$$(50) \quad P'_{y_1} = \frac{1}{2}(x_n - x_2)$$

$$(51) \quad P'_{y_2} = \frac{1}{2}(x_1 - x_3)$$

.....

$$(52) \quad P'_{y_{n-1}} = \frac{1}{2}(x_{n-2} - x_n)$$

$$(53) \quad P'_{y_n} = \frac{1}{2}(x_{n-1} - x_1)$$

Po zsumowaniu kwadratów różniczek po  $x$  i  $y$  można napisać następujący wzór:

$$(54) \quad P'^2 = \frac{1}{4} \left[ (y_2 - y_n)^2 + (y_3 - y_1)^2 + \dots + (y_n - y_{n-2})^2 + (y_1 - y_{n-1})^2 + (x_n - x_2)^2 + (x_1 - x_3)^2 + \dots + (x_{n-2} - x_n)^2 + (x_{n-1} - x_1)^2 \right]$$

lub inaczej:

$$(55) \quad P^2 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n (y_{i+1} - y_{i-1})^2 + (x_{i-1} - x_{i+1})^2$$

W cel uzyskania wzoru na błąd powierzchni należy wprowadzić do wzoru (55) wartość błędu:  $m_x$  i  $m_y$ . Dokładność ortofotomapy podaje się zwykle jako błąd średni położenia punktu ( $m_{pkt}$ ) np.: +/- 1.5 m lub +/- 0.75 m. W związku z tym przyjęto następujące założenie, że  $m_x = m_y$ , a zatem  $m_{pkt} = \sqrt{2}m_x$  i odwrotnie  $m_x^2 = m_{pkt}^2/2$  co po podstawieniu do wzoru: (55) daje wzór:

$$(56) \quad m_p^2 = m_{pkt}^2 \frac{1}{8} \sum_{i=1}^n (y_{i+1} - y_{i-1})^2 + (x_{i-1} - x_{i+1})^2$$

I statecznie wzór na błąd wyznaczenia powierzchni działki wygląda następująco:

$$(57) \quad m_p = m_{pkt} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{i+1} - y_{i-1})^2 + (x_{i-1} - x_{i+1})^2}{8}}$$

gdzie:

$m_p$  – błąd pomiaru powierzchni,

$m_{pkt}$  - błąd położenia punktu na ortofotomapie.

Analizując błąd obliczenia powierzchni (57) w dalszej kolejności przyjęto założenie, że:

$$(58) \quad \frac{m_p}{P} \leq 0,03$$

gdzie:  $m_p$  – błąd pomiaru powierzchni.

Żeby spełnione było powyższe założenie błąd położenia punktu na ortofotomapie powinien spełniać następujący warunek:

$$(59) \quad m_{pkt} \leq \sqrt{\frac{0,0072P^2}{\sum_{i=1}^n (y_{i+1} - y_{i-1})^2 + (x_{i-1} - x_{i+1})^2}}$$

### Przykład.

Poniżej został przeanalizowany przypadek działki prostokątnej o wymiarach: 10x100m, czyli powierzchni 0.1ha. Obliczono błąd powierzchni ze wzoru (57) i metodą buforową przyjmując błąd średni powierzchni i szerokość bufora: 1.5, 0.75 i 0.4 m. Żeby uzyskać błąd względny powierzchni takiej działki mniejszy niż 3% można wykorzystać wzór(59) i obliczyć, że w tym przypadku błąd położenia punktu powinien wynosić +/-0.42 m.

**Tab 12. Błąd wyznaczenia powierzchni działki obliczony za pomocą metody buforowej i ze wzoru (57) dla działki o wymiarach 10x100m**

Błąd średni kwadratowy/ szerokość bufora [m]	Powierzchnia bufora [m <sup>2</sup> ]	% powierzchni działki	mp [m <sup>2</sup> ] ze wzoru (57)	% powierzchni działki
1.5	330	33	107	11
0.75	165	16	53	5
0.40	88	9	28	2.8

W przypadku analizowanej działki żadna z ortofotomap wykonywanych dla potrzeb systemu IACS nie umożliwi obliczenia powierzchni z dokładnością 3%.

## 7.5 Przykład kontroli na miejscu

Przykład opisywany w niniejszym rozdziale został zaprezentowany w celu zilustrowania pojęcia rzeczywistej tolerancji technicznej pomiaru (w rozumieniu systemu IACS) oraz pokazania o ile różni się ona o przyjmowanej *a priori* tolerancji maksymalnej i od błędu rzeczywistego powierzchni Gaussa.

W ramach tak zwanej kontroli na miejscu prowadzonej w systemie IACS wykonuje się pomiar powierzchni działki rolnej i określa się typ jej uprawy.

Powierzchnię działki można wyznaczyć ze współrzędnych w oparciu o pomiar bezpośredni punktów załamania granicy (jak w tradycyjnych w pomiarach geodezyjnych punktów granicznych działki ewidencyjnej). Pomiar bezpośredni są precyzyjne (nawet zbyt precyzyjne w kontekście dokładności w systemie IACS) ale wymagają korzystania ze specjalistycznego sprzętu. W związku z tym w Unii Europejskiej do pomiaru powierzchni działki rolnej wykorzystuje się ręczne, łatwe w obsłudze i tanie, GPS'y o bezwzględnej dokładności położenia punktu wynoszącej ok. +/-5m. Wymaganą dokładność określenia powierzchni uzyskuje się poprzez specjalny sposób pomiaru, tzn. pomiar ciągły. Poniżej przedstawiono wyniki pomiaru kontrolnego wykonanego porównawczo za pomocą ręcznych GPS'ów i tachimetru elektronicznego [Kay.S., i inni 2004].

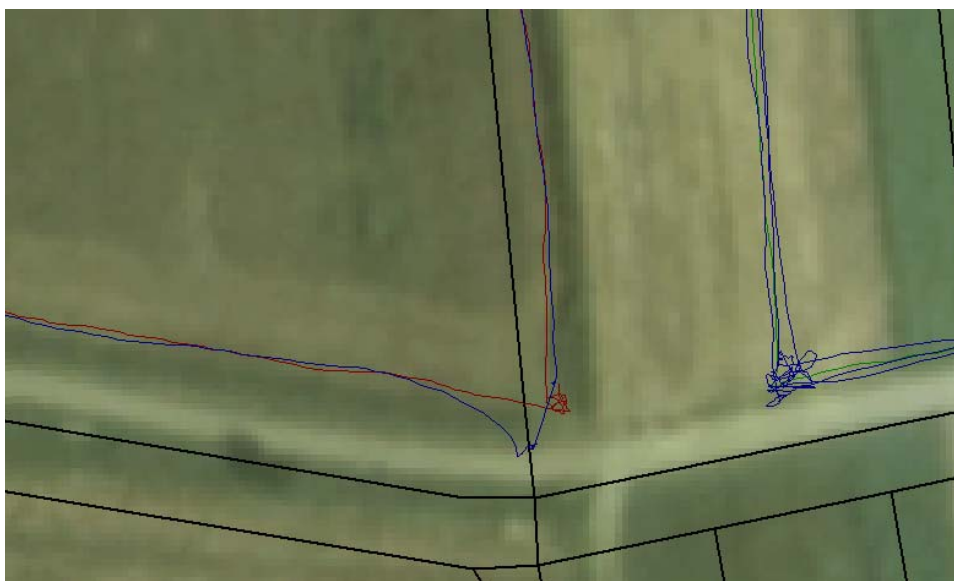
### 7.5.1 Bezpośrednie pomiary GPS

Pomiar bezpośredni GPS wykonano za pomocą ręcznych odbiorników: Satcon, ArpentGIS, Etrex. Zmierzono 2 działki rolne (A - ok. 5 ha i B -30 a). Przebieg granicy działki rolnej A pokrywa się (działki B nie pokrywa się) z granicą działki ewidencyjnej. Obecny układ działek rolnych w sąsiedztwie działki B nie pokrywa się ani z układem działek katastralnych ani z układem działek rolnych zarejestrowanych na archiwalnej ortofotomapie.

Pomiar GPS wykonywano w sposób ciągły (idąc granicą działki z włączonym odbiornikiem – rysunki: Rys. 49, Rys. 50). Dla porównania przeprowadzono również pomiar bezpośredni tachimetrem elektronicznym.



Rys. 49. Przebieg granic działek rolnych (A, B) z pomiaru bezpośredniego GPS, działek ewidencyjnych (kolor czarny) na tle ortofotomapy



Rys. 50. Przebieg granic działek rolnych (A, B) z pomiaru bezpośredniego GPS, działek ewidencyjnych (kolor czarny) na tle ortofotomapy (powiększenie)

W poniższych tabelach przyjęto następujące oznaczenia:

- P – powierzchnia pomierzona za pomocą GPS,
- $P^{sr}$  – średnia powierzchnia pomierzona za pomocą GPS,
- V – różnica pomiędzy powierzchnią pomierzona GPS (P) i średnią powierzchnią ( $P^{sr}$ ),
- $P^k$  – powierzchnia katastralna,
- $P^G$  – powierzchnia pomierzona tachimetrem elektronicznym,

- $O$  – obwód pomierzony za pomocą GPS,
- $P_{buf}$  – powierzchnia bufora równa: obwód ( $O$ ) pomnożony przez tolerancję  $D^T$ ,
- $D^T$  - tolerancja rozumiana jako szerokość bufora; wartość związana z technologią pomiaru i przyjmowana a’priori; w przeprowadzonych analizach przyjęto wartość tolerancji: 1.25m,
- $D_{nr}$ - tolerancja danego pomiaru – szerokość bufora (obliczona indywidualnie dla każdego pomiaru ze wzoru:  $D_{nr}=(P^{sr}-P)/O$ ),
- Reguła decyzyjna: A – pomiar zaakceptowany, R – pomiar odrzucony.

Wykonano kilka niezależnych pomiarów powierzchni ( $P$ ) i obwodu ( $O$ ) działki. Wyznaczono, w oparciu o wartość tolerancji  $D^T=1.25$  m, wielkość bufora:  $P_{buf}$ . Obliczono jaki procent powierzchni  $P^{sr}$  stanowi powierzchnia każdego z pomiarów ( $P/P^{sr}$ ). Następnie, zgodnie z regułą decyzyjną: ‘Jeśli  $P^{sr}<(1.05P)$  to „A” (pomiar jest zaakceptowany), dokonano oceny każdego z pomiarów. Dalej obliczono dla każdego pomiaru tolerancję  $D_{nr}$  i zgodnie z regułą decyzyjną: ‘Jeśli  $D_{nr} < D^T$  to „A” (pomiar zaakceptowany) dokonano oceny każdego z pomiarów. Po przeprowadzeniu analizy tolerancji  $D_{nr}$  dla wykonanych pomiarów można określić rzeczywistą tolerancję techniczną wykonanego pomiaru ( $D^{TR}$ ).

#### 7.5.1.1 Wynik pomiaru 1 (A działka duża – 5ha)

Dla działki dużej, powierzchnie: ewidencyjna, średnia z pomiaru GPS i pomierzona tachimetrem elektronicznym wynoszą:

- $P^k = 54784 \text{ m}^2$ ,
- $P^{sr} = 52754 \text{ m}^2$  ( $P^k = 103.8\% P^{sr}$ ),
- $P^G = \text{I seria } 52508 \text{ m}^2$  ( $P^k = 104.3\% P^G$ ,  $P^{sr} = 100.5\% P^G$ ); II seria  $52438 \text{ m}^2$  ( $P^k = 104.5\% P^G$ ,  $P^{sr} = 100.6\% P^G$ ).

Warto zauważyć, że w przypadku działki A **powierzchnia ewidencyjna jest o ok. 4% większa niż powierzchnia zmierzona**, zarówno za pomocą GPS jak i tachimetrem.

Natomiast dokładność uzyskana za pomocą GPS i metodą tachimetryczną w tym przypadku jest wysoka i wynosi ok. **0.5%**.

**Tab 13. Analiza dokładności pomiaru powierzchni (działka A)**

nr	P [m <sup>2</sup> ]	O [m]	P <sub>buf</sub> [m <sup>2</sup> ]	P <sup>sr</sup> /P [%]	Jeśli P <sup>sr</sup> < 1.05 P	D <sub>nr</sub> [m]	Jeśli D <sub>nr</sub> < D <sup>T</sup>	D <sub>nr</sub> <sup>2</sup> [m <sup>2</sup> ]	VV
1	53257	935m	1168.8	99%	A	-0.54m	A	0.3	253177
2	51769	942m	1177.5	102%	A	1.05m	A	1.1	969897
3	52416	956m	1195.0	101%	A	0.35m	A	0.1	114131
4	52485	946m	1182.5	101%	A	0.28m	A	0.1	72271.4
5	52513	937m	1171.3	100%	A	0.26m	A	0.1	58000.7
6	54083	952m	1190.0	98%	A	-1.40m	A	1.9	1766684
7	50281	945m	1180.8	105%	A	<b>2.62m</b>	<b>R</b>	6.9	6114905
$D^{TR} = \sqrt{VV/(n-1)}$								1.22m	2.2%
95%								2.44m	4.4%

**7.5.1.2 Wynik pomiaru 2 (B działka mała– 30 a)**

Dla działki małej, powierzchnie: ewidencyjna, średnia z pomiaru GPS i pomierzona tachimetrem elektronicznym wynoszą:

- P<sup>k</sup> = brak (działka rolna nie pokrywa się z działką katastralną),
- P<sup>sr</sup> = 3332 m<sup>2</sup>,
- P<sup>G</sup> = I seria 3228 m<sup>2</sup> (P<sup>sr</sup>=103% P<sup>G</sup>); II seria 3180 m<sup>2</sup> (P<sup>sr</sup> =105% P<sup>G</sup>).

W tym przypadku średnia powierzchnia wyznaczona za pomocą pomiaru GPS jest o ok. 4% większa niż obliczona z pomiaru tachimetrycznego.

**Tab 14. Analiza dokładności pomiaru powierzchni (działka B)**

nrr	P [m <sup>2</sup> ]	O [m]	P <sub>buf</sub> [m <sup>2</sup> ]	P <sup>sr</sup> /P [%]	Jeśli P <sup>sr</sup> < 1.05 P	D <sub>nr</sub> [m]	Jeśli D <sub>nr</sub> < D <sup>T</sup>	D <sub>nr</sub> <sup>2</sup> [m <sup>2</sup> ]	VV
1	3233	318m	397.5	103%	A	0.31m	A	0.1	9761
2	3291	302m	377.5	101%	A	0.14m	A	0.0	1665
3	3567	309m	386.3	93%	A	-0.76m	A	0.6	55319
4	3174	299m	373.8	105%	A	0.53m	A	0.3	24901
5	3261	321m	401.3	102%	A	0.22m	A	0.0	5013
6	3173	310m	387.3	105%	<b>R</b>	<b>0.51m</b>	A	0.3	25217
7	3131	331m	413.8	106%	<b>R</b>	<b>0.61m</b>	A	0.4	40321
8	3558	318m	397.5	94%	A	-0.71m	A	0.5	51166
9	3677	311m	388.8	91%	A	-1.11m	<b>R</b>	<b>1.2</b>	119163
10	3253	322m	402.5	102%	A	0.24m	A	0.1	6209
$D^{TR} = \sqrt{VV/(n-1)}$								<b>0.59m</b>	5.5%
95%								1.17m	11%

### 7.5.1.3 Wnioski dotyczące wyników kontroli bezpośredniej w porównaniu z analizą dokładności przeprowadzonej metodą błędu rzeczywistego powierzchni Gauss’a

W niniejszym rozdziale przedstawiono rozważania dotyczące porównania uzyskanej w trakcie pomiarów dokładności powierzchni z maksymalnymi dopuszczalnymi w systemie IACS wartościami tolerancji technicznej oraz dokładnością prognozowaną za pomocą metody obliczania błędu rzeczywistego powierzchni Gauss’a.

Z przeprowadzonej analizy dokładności pomiaru powierzchni działek można wyciągnąć wniosek, że rzeczywista tolerancja techniczna ( $D^{TR}$ ) bezpośredniego pomiaru GPS jest mniejsza niż przyjęta *a priori*  $D^T = 1.25\text{m}$  (oraz mniejsza niż wartość maksymalna 1.5m), i wynosi dla działki o powierzchni 5 ha – 1.22m, co stanowi 2.2% powierzchni działki, a dla działki o powierzchni 30 a – 0.59 m, co stanowi 5.5% powierzchni działki. Zakładając rozkład statystyczny błędów pomiarowych można oczekiwać, że w 95% tolerancja techniczna nie powinna przekroczyć wartości: 2.44 m (4.4% powierzchni działki) dla działki 5ha, i 1.17 m (11% powierzchni działki) dla działki 30 a.

Podsumowując można stwierdzić, że w trakcie kontroli powierzchni działki rolnej rzeczywista tolerancja techniczna różni się od przyjętej *a priori* nominalnej (maksymalnej) tolerancji. Przyjęcie wartości tolerancji ma zasadnicze znaczenie dla przebiegu kontroli, ponieważ działki, dla których następuje przekroczenie tolerancji technicznej są odpowiednio kodowane i przeznaczane do wyjaśnienia. Wykorzystanie tolerancji technicznej jest optymalną i wydaje się jedyną metodą określania dokładności w ciągłych pomiarach GPS (dla działki A ok. 700 punktów pomiarowych, dla działki B ok.235). W przypadku pomiarów punktów załamania granicy działki za pomocą tachimetrii, precyzyjnych pomiarów GPS lub digitalizacji ortofotomapy metoda oceny dokładności powierzchni w oparciu o technikę buforowania w znaczny sposób odbiega od rzeczywistego błędu powierzchni działki (por. rozdział 7.6). Dokładność określenia powierzchni działki na podstawie pomiaru punktowego za pomocą tachimetru lub precyzyjnych pomiarów GPS zależy natomiast wyłącznie od identyfikacji granicy w terenie (0.2-1m). Techniczna dokładność pomiaru jest bowiem w tym przypadku zaniedbywana, pomiar jest znacznie dokładniejszy niż identyfikacja punktu w terenie.

Wykorzystanie w procesie kontroli ortofotomapy wymaga uwzględnienia, charakteryzującego daną ortofotomapę, błędu średniego położenia punktu. Dokładność ortofotomapy jest porównywalna z dokładnością identyfikacji punktu załamania granicy i w związku z tym nie może zostać zaniedbana. Wykorzystywane dla potrzeb IACS’u ortofotomapy charakteryzującej się rozdzielczością: 0.5 m lub 0.25 m i odpowiednio błędem średnim: +/-1.5 m lub +/-0.75m. Przy założeniu błędu identyfikacji punktu załamania granicy: +/-0.5 m i błędu ortofotomapy: +/-0.75 m do analizy dokładności powierzchni należałoby przyjąć: +/-0.90 m.

## Porównanie dokładności pomiaru działki małej B z obliczeniem błędu rzeczywistego powierzchni Gauss’a

W ramach ciągłego pomiaru GPS wykonano pomiar 235 punktów na granicy działki B. Działka ta ma kształt czworokąta i jej powierzchnia została wyznaczona ze współrzędnych na podstawie zdigitalizowanych na ortofotomapie punktów załamania granicy (podobnie jak była też mierzona tachimetrem). Jeśli by obliczyć dokładność ze wzoru na błąd rzeczywisty powierzchni Gauss’a (57) uwzględniając wszystkie punkty pomiarowe i zakładając błąd położenia punktu:  $m_{pkt} = \pm 5\text{ m}$ , to błąd powierzchni wyniósłby  $m_p = \pm 2.4\%$ . W trakcie wykonanych pomiarów uzyskano jednak dokładność: 5.5% (Tab 14). Dla porównania błąd powierzchni działki, po zdigitalizowaniu jej 4 narożników na ortofotomapie o dokładności położenia punktu  $m_{pkt} = \pm 1.5\text{ m}$  wynosi 4.15%, a na ortofotomapie o dokładności  $m_{pkt} = \pm 0.75\text{ m}$  wynosi 2.07%.

**Tab 15. Błąd powierzchni obliczony ze wzoru (57) dla działki, B przy założeniu różnych wartości błędu położenia punktu  $m_{pkt}$**

Sposób pomiaru	$m_{pkt}$	$m_p$ (ze wzoru (57))%
GPS (pomiar ciągły 235 punktów)	$\pm 5\text{ m}$	2.24
GPS (pomiar 4 punktów granicznych)	$\pm 5\text{ m}$	xxxxx
Orto (pomiar 4 punktów granicznych)	$\pm 1.5\text{ m}$	4.15
Orto (pomiar 4 punktów granicznych)	$\pm 0.75\text{ m}$	2.07

Wynik błędu rzeczywistego powierzchni Gauss’a, dla ciągłego pomiaru GPS, równy  $m_p = \pm 2.4\%$  należy uznać za interesujący ze względu na to, że został otrzymany dla odbiornika GPS o małej dokładności,  $m_{pkt} = \pm 5\text{ m}$ . Obrazuje on fakt podnoszenia dokładności określania powierzchni działki w oparciu pomiar ciągły GPS w porównaniu z pomiarem punktowym i stanowi w pewnym sensie uzasadnienie dla takiej technologii pomiaru wykorzystywanej w IACS’ie w UE. Trudno na tym etapie (analizy pojedynczej działki pomierzonej 10-ciokrotnie) wyciągać dalej idące wnioski, szczególnie, że w wyniku rzeczywistego pomiaru uzyskano dokładność 5.5%. Problem jest jednak tak ważny, że planowany jest projekt badawczy, zlecony przez Join Research Centre we Włoszech (ośrodek zajmujący się standardami obowiązującymi w systemie IACS), którego celem jest opracowanie technologii oceny dokładności powierzchni działki.

## 7.6 Analiza dokładności powierzchni działki na przykładzie danych katastralnych

Celem analiz, których wyniki znajdują się w niniejszym rozdziale, było zbadanie jak, ze statystycznego punktu widzenia wygląda problem określania dokładności powierzchni działki. Wiadomo, że błąd względny powierzchni małych działek jest duży (Rys. 48). Z drugiej strony



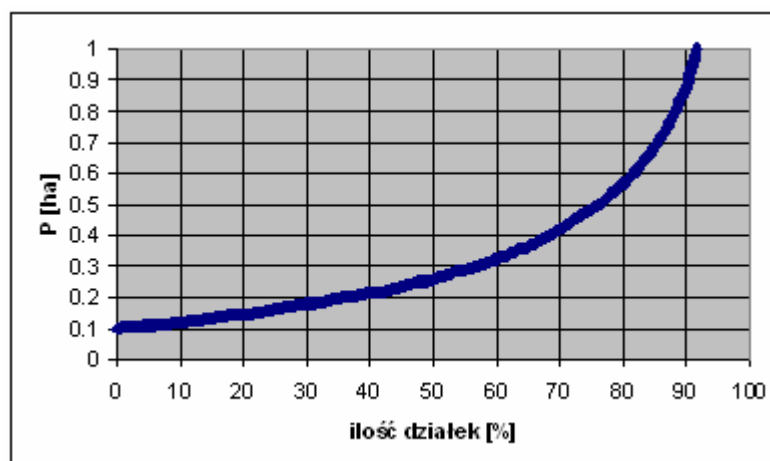
wykonując kontrolę na miejscu powinno się stosować taką metodę pomiarową, która zapewni dokładność nie mniejszą niż 5% powierzchni działki (co w praktyce oznacza, że błąd mniejszy niż 5% powinno się uzyskać w 95% przypadków). Wykonując, bowiem pomiar kontrolny odrzuca się działki, dla których różnica pomiędzy powierzchnią zadeklarowaną przez rolnika a zmierzono przekracza wartość 5%. Metodyka wykonywania kontroli na miejscu polega na zmierzeniu powierzchni i obwodu działki, obliczeniu w oparciu o przyjętą tolerancję techniczną pomiaru szerokości bufora i sprawdzeniu czy powierzchnia deklarowana mieści się w zakresie: powierzchnia zmierzona plus minus powierzchnia bufora.

W rozdziale przeprowadzono analizę dokładności wyznaczania powierzchni działki w oparciu o dane katastralne gminy Zabierzów (Powiat Kraków). W momencie wykonywania analizy, na obszarze gminy znajdowało się 6122 działek. Działki o powierzchni poniżej 0.1 ha (2493 działek – 40% wszystkich działek), dla których nie jest przyznawana dopłata bezpośrednia, zostały wyłączone z analizy. Dla każdej działki większej niż 0.1ha obliczono:

- Błąd powierzchni za pomocą wzoru wyprowadzonego z wzoru Gaussa (57) przyjmując błąd średni położenia punktu charakteryzujący dokładność ortofotmap wykonywanych w Polsce: +/-1.5 m i +/-0.75.
- Powierzchnię bufora zgodnie z tolerancją  $D^T$ : 1.5 m i 0.75 m.

### 7.6.1 Wyniki analiz przestrzennych

W celu scharakteryzowania struktury powierzchni działek w gminie Zabierzów sporządzono wykres zależności powierzchni działki od procentowej liczby działek, których powierzchnia jest mniejsza od wartości powierzchni zaznaczonej na osi rzędnych wykresu (Rys. 51).



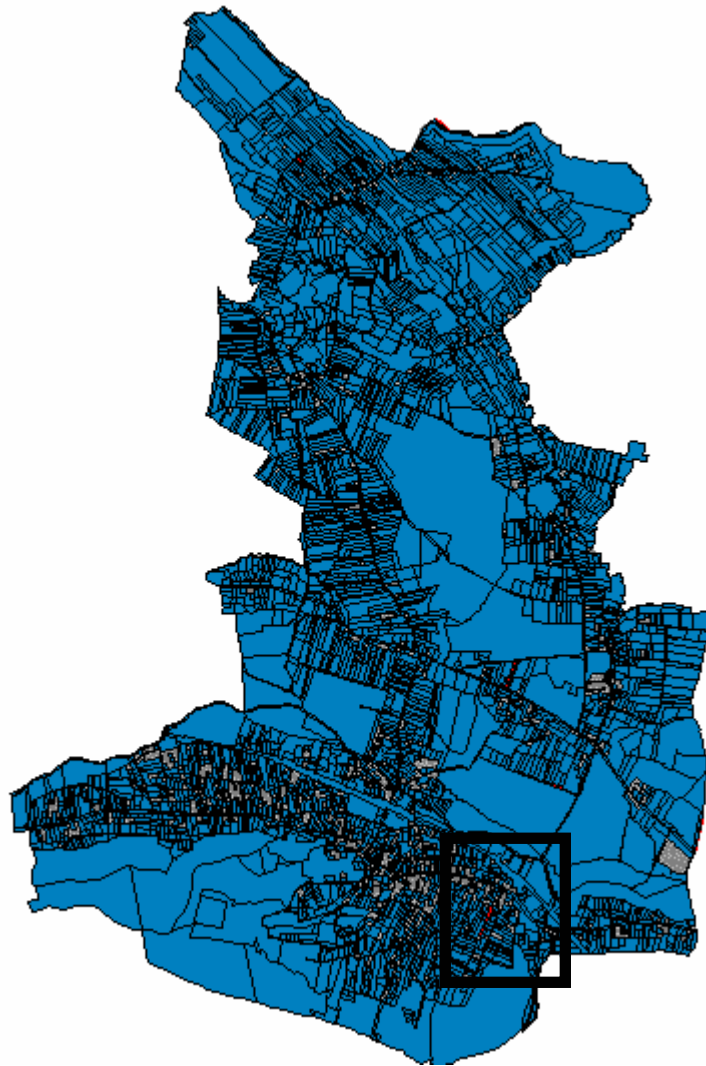
Rys. 51. Zależność powierzchni działki od procentowej ilości działek, dla których powierzchnia jest mniejsza niż wartość powierzchni na osi rzędnych

Następnie obliczono procentowy udział działek, dla których błąd względny przekracza 3% i 5% powierzchni działki (wyniki zamieszczono w tabeli: Tab 16).

**Tab 16. Procentowy udział działek nie przekraczających 3% i 5% próg błędu względnego powierzchni w zależności od sposobu obliczenia**

Liczba działek o powierzchni => 0.1 ha	Metoda Gauss'a $m_{Pow}$		Metoda buforowa $D^T$	
	+/- 0.75m	+/- 1.5m	0.75 m	1.5 m
$m_p \leq 3\%$	3231 (88%)	1225 (34%)	75 (2%)	39 (1%)
$m_p \leq 5\%$	3568 (98%)	2848 (78%)	287 (8%)	94 (3%)

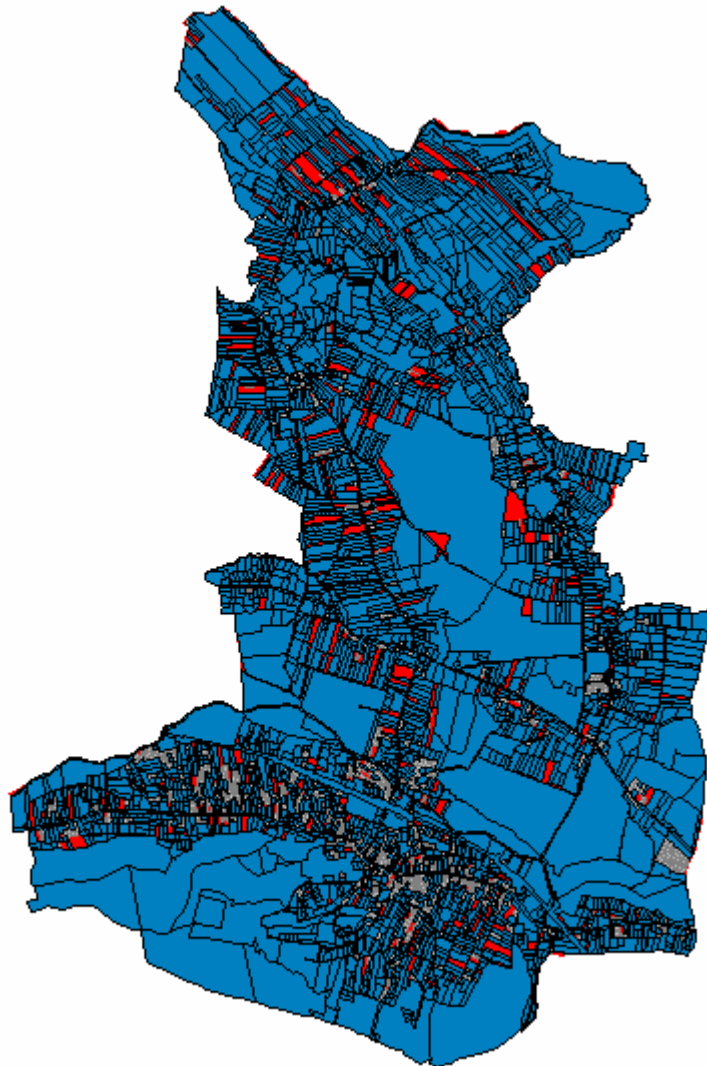
Na rysunkach od Rys. 52 do Rys. 56 znajdują się wyniki analiz przeprowadzonych na danych katastralnych. W kolorze szarym przedstawiono działki poniżej 0.1 ha, w kolorze granatowym działki, dla których błąd względny liczony w/w metodami nie przekracza wartości 5%, a w kolorze czerwonym te, dla których błąd przekracza wartość 5%. Na rysunku: Rys. 52 znajduje się wynik analizy przeprowadzonej z wykorzystaniem wzoru Gauss'a przyjmując  $m_{pkt} = +/- 0.75$  m. Z uwagi na fakt, że istnieje niewiele działek, dla których przy tak przyjętym błędzie położenia punktu błąd powierzchni przekracza 5% pokazano na rysunku: Rys. 53 powiększony fragment gminy Zabierzów (rysunku: Rys. 52). Na rysunku: Rys. 54 przedstawiono wynik analizy w oparciu o wzór Gauss'a i  $m_{pkt} = +/- 1.5$  m, a na rysunkach: Rys. 55 i Rys. 56 wynik analizy przeprowadzonej na podstawie metody buforowej o szerokości bufora,  $D^T$  odpowiednio: 0.75m i 1.5m.



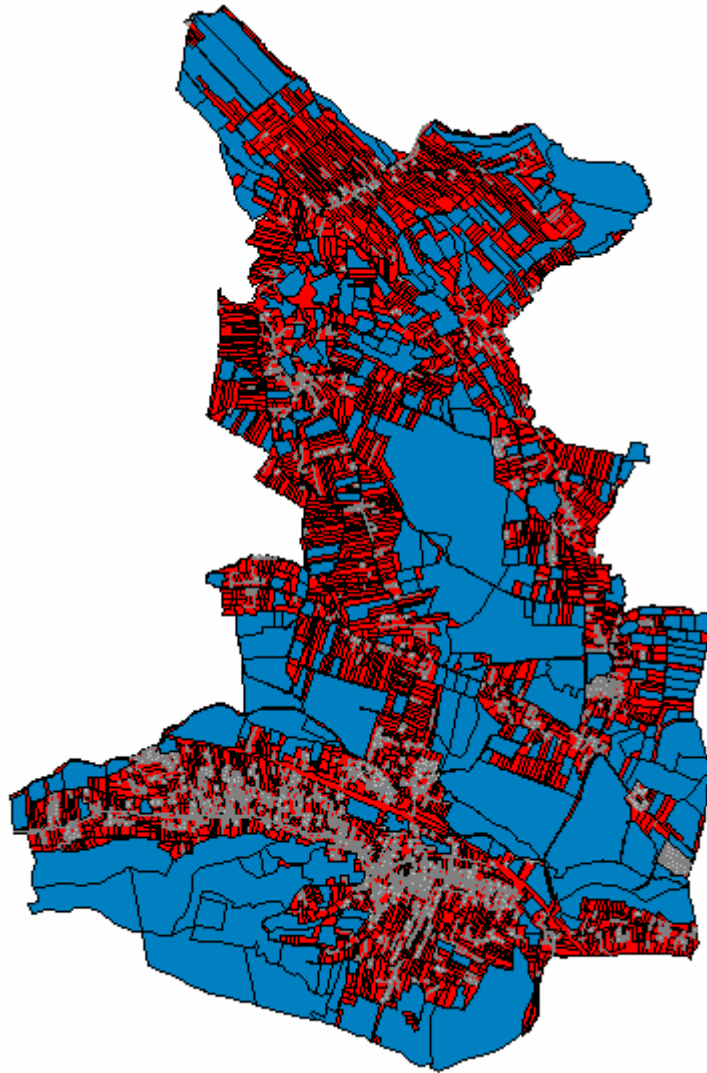
Rys. 52. Działki, dla których błąd względny obliczony **ze wzoru Gauss'a** ( $m_{pkt}=\pm 0.75m$ ) jest mniejszy niż 5% - kolor niebieski, większy niż 5% - kolor czerwony (por. powiększenie na rysunku: Rys. 52), działki o powierzchni poniżej 0.1ha (kolor szary).



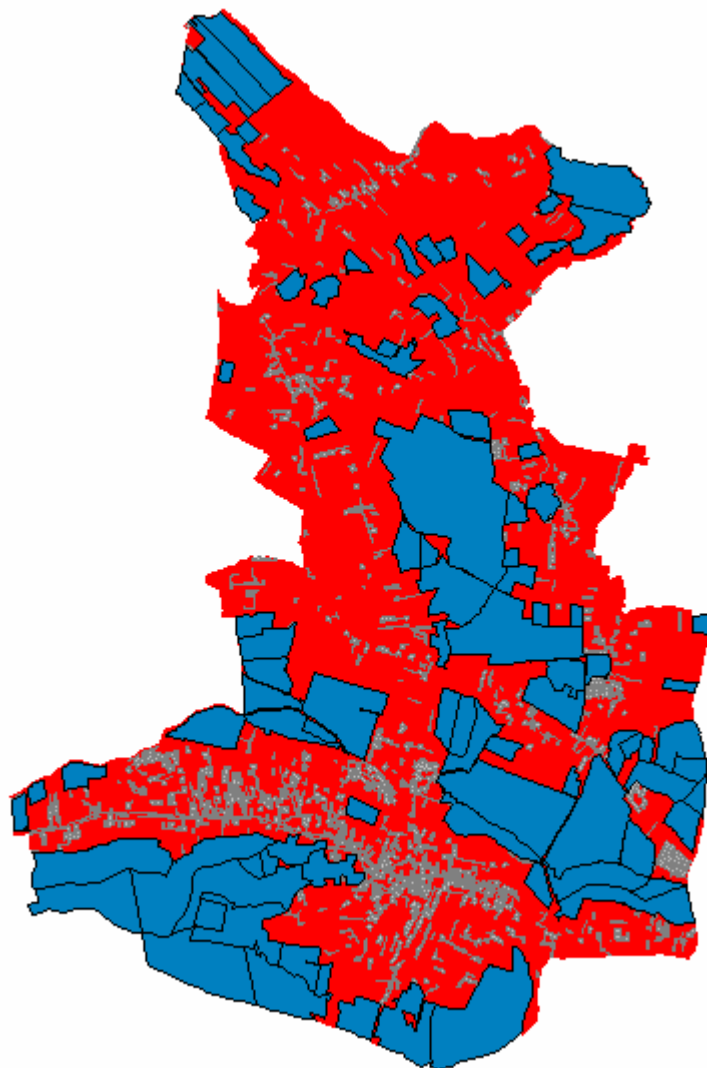
Rys. 53. Powiększenie fragmentu rysunku: Rys. 52



Rys. 54. Działki, dla których błąd względny obliczony ze wzoru Gauss'a ( $m_{pkt} = \pm 1.5m$ ) jest mniejszy niż 5% - kolor niebieski, większy niż 5% - kolor czerwony, działki o powierzchni poniżej 0.1ha (kolor szary).



Rys. 55. Działki, dla których błąd względny obliczony z metody buforowej ( $D^T = 0.75m$ ) jest mniejszy niż 5% - kolor niebieski, większy niż 5% - kolor czerwony, działki o powierzchni poniżej 0.1ha (kolor szary).

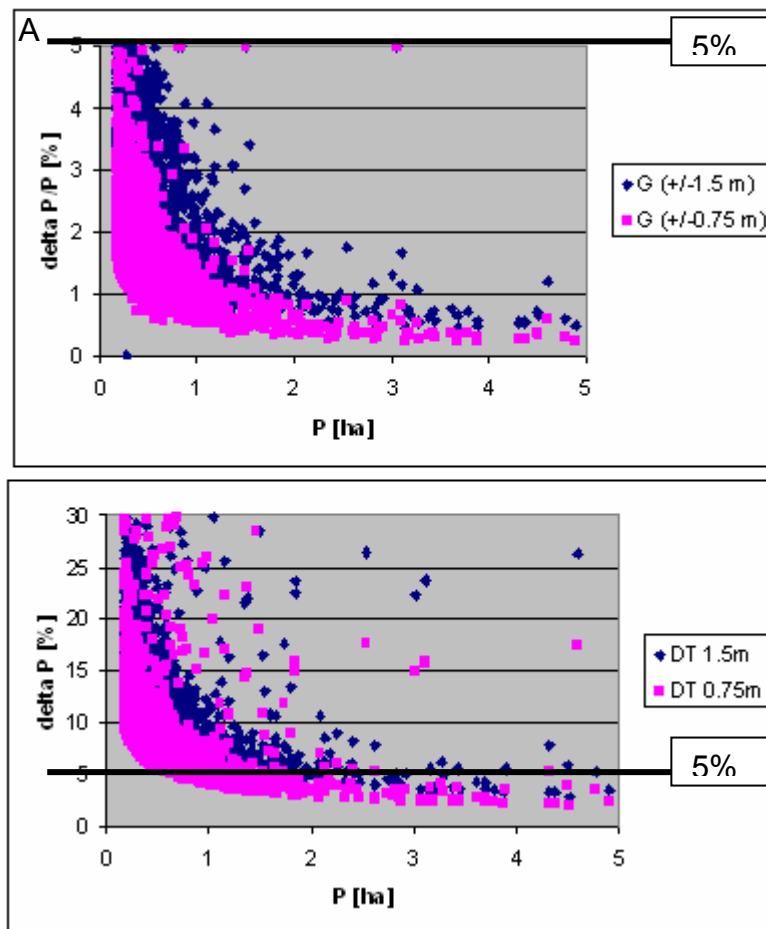


Rys. 56. Działki, dla których błąd względny obliczony z metody buforowej ( $D^T = 1.5m$ ) jest mniejszy niż 5% - kolor niebieski, większy niż 5% - kolor czerwony, działki o powierzchni poniżej 0.1ha (kolor szary).

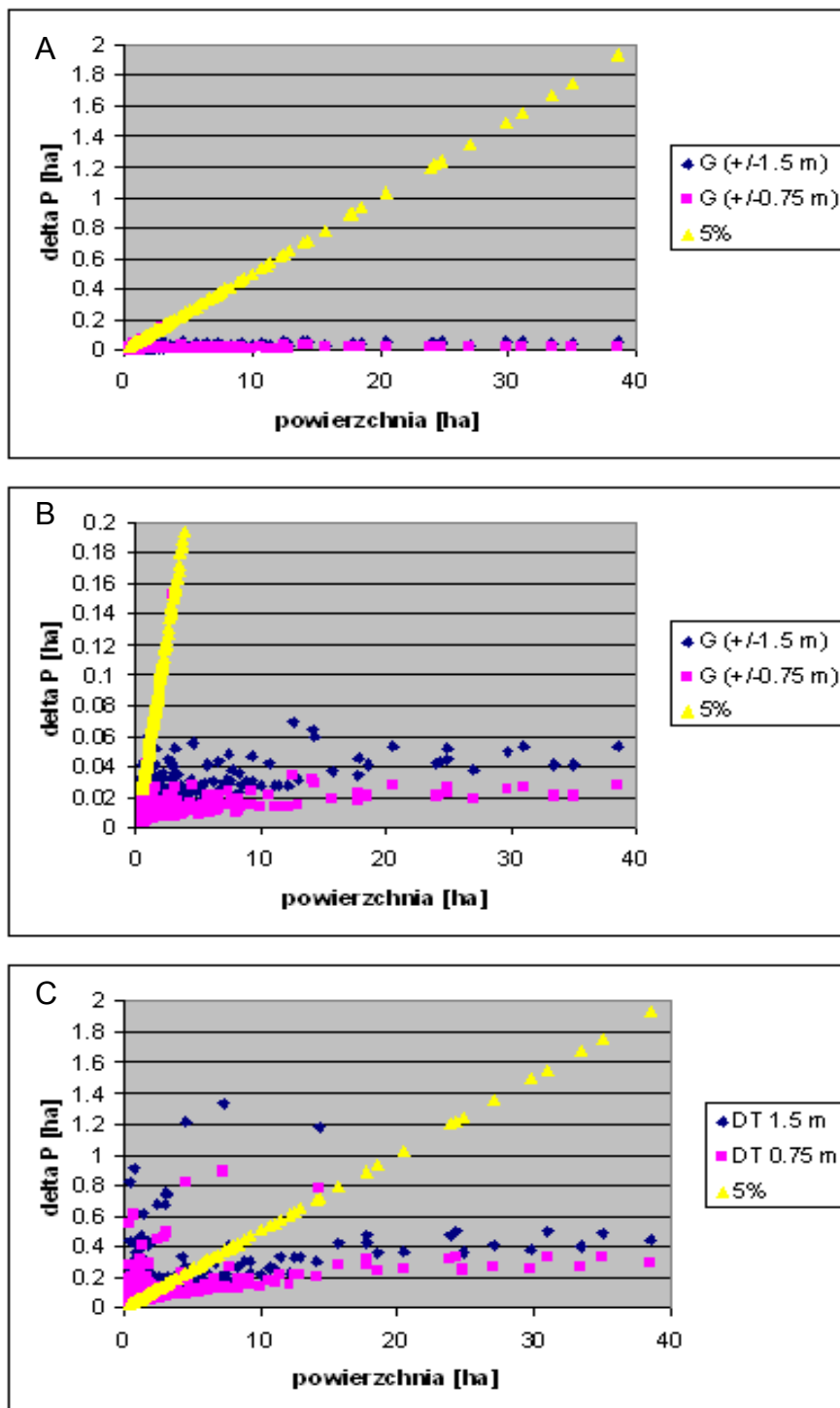
Oprócz wizualnej oceny wyników uzyskanych metodą rzeczywistego błędu powierzchni Gauss'a i metodą buforową przeprowadzona została analiza porównawcza zależności **błędu względnego** powierzchni działki od jej powierzchni, obliczonego na podstawie obu metod (Rys. 57), (na wykresie zaznaczono próg 5%). Prognozowany rzeczywisty błąd powierzchni Gauss'a dla większości analizowanych działek ewidencyjnych jest mniejszy niż 5% powierzchni niezależnie od tego czy błąd położenia punktu wynosi +/-1.5 m, czy +/-0.75m. W przypadku metody buforowej przeciwnie, dla obu wartości tolerancji technicznej: 1.5m i 0.75 m większość odchyłki względna powierzchni dla większości działek przekracza wartość 5%.

Dla porównania wartości **bezwzględnych błędu powierzchni**, w zależności od wielkości powierzchni, sporządzono rysunki: Rys. 58 i Rys. 59 (por. Rys. 48). Linia jasno szarą zaznaczono próg błędu 5-cio procentowego. Przedstawione na rysunkach wykresy stanowią ilustracje wyników działania metody buforowej i opartej o rzeczywisty błąd powierzchni Gauss'a dla działek o różnej powierzchni. W związku z trudnością przedstawienia tego na jednym wykresie (trudność występuje dla małych działek) sporządzono szereg wykresów różniących się wartościami na osi odciętych. Na rysunku Rys. 58 znajdują się wyniki dla wszystkich działek, od 0 do 40 ha. Natomiast na rysunku Rys. 59 przedstawiono zależności w przedziałach: 0.1-0.5 ha, 0.5-1.0 ha i 1-5 ha. Analiza wykresów na tych rysunkach potwierdza raz jeszcze fakt, że metoda buforowa jako metoda szacowania dokładności powierzchni jest najbardziej nieadekwatna w stosunku do rzeczywistości dla małych działek, oraz, że struktura działek w Polsce południowej jest na tyle mała, że zjawisko to nie może być traktowane jako marginalne ze statystycznego punktu widzenia.

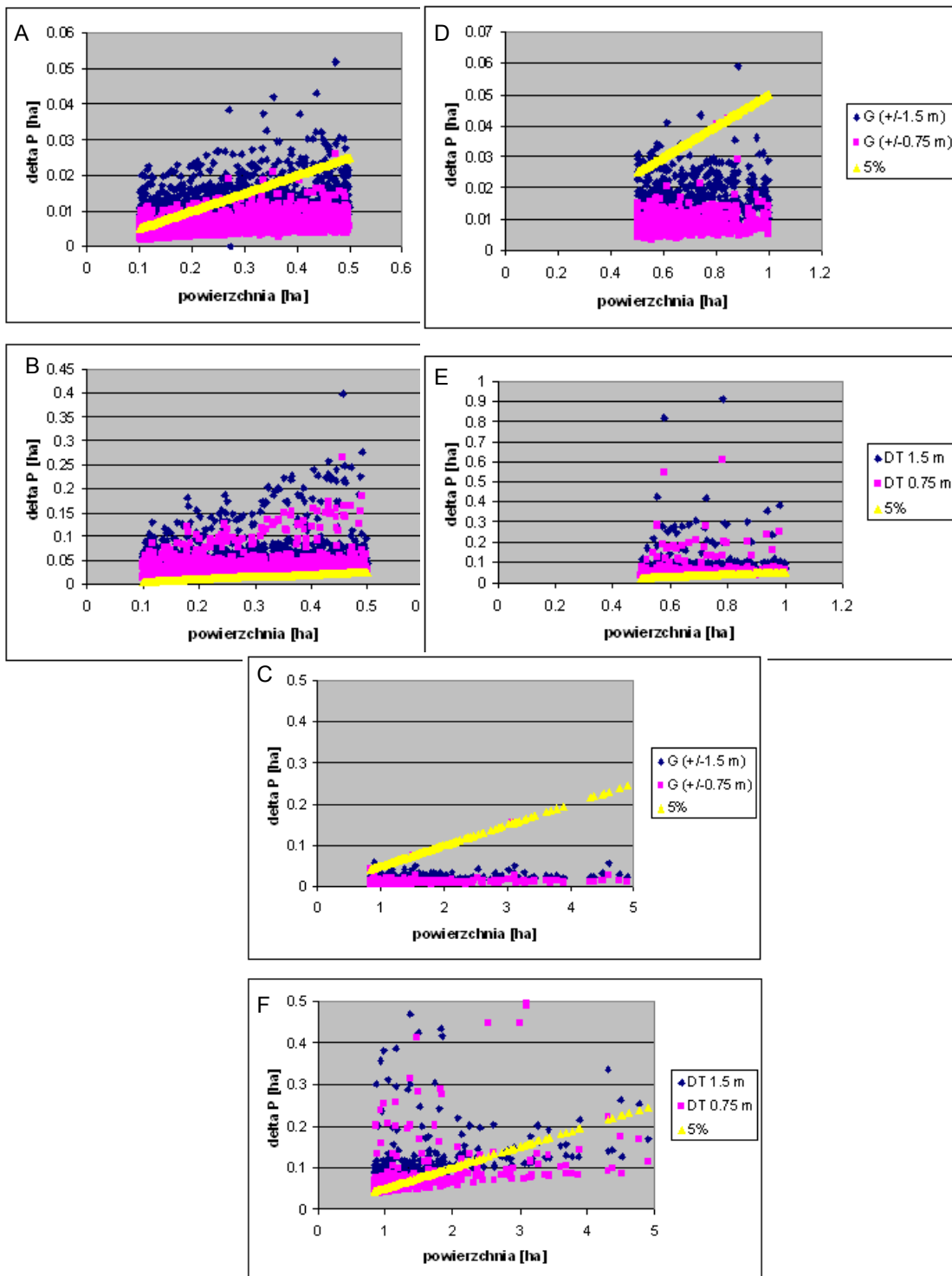




Rys. 57. Porównanie zależności błędu względnego powierzchni działki od jej powierzchni – metodą rzeczywistego błędu Gauss'a (A) i metodą buforową (B)



Rys. 58. Zależność błędu powierzchni działki od jej od powierzchni: A, – metoda błędu rzeczywistego powierzchni Gauss'a przy założeniu błędu położenia punktu:  $\pm 1.5\text{ m}$  i  $\pm 0.75\text{ m}$  (B – powiększenie), C – metoda buforowa: 1.5 m, 0.75 m



Rys. 59. Zależność błędu powierzchni działki od jej od powierzchni: A, B, C – metoda rzeczywistego błędu powierzchni Gauss'a przy założeniu błędu położenia punktu: +/- 1.5 m i +/- 0.75 m, D, E, F – metoda buforową: 1.5 m, 0.75 m

## 7.6.2 Wnioski z analizy statystycznej błędu powierzchni działki obliczonego za pomocą metody buforowej i metody błędu rzeczywistego powierzchni Gauss'a

W trakcie oceny dokładności powierzchni działki, wybór tolerancji technicznej jest sprawą kluczową. Dla potrzeb systemu IACS, zgodnie z wytycznymi technicznymi dotyczącymi kontroli, jako wartość maksymalną tolerancji przyjmowany jest bufor 1.5 m lub próg 5%. W Polskich wytycznych technicznych z 2004 roku dotyczących kontroli na miejscu tolerancja techniczna została przyjęta zgodnie z powyższymi wytycznymi technicznymi UE. Zalecono jednak, żeby metodę buforową stosować wyjątkowo. Wydaje się to słuszne w kontekście przeprowadzonych analiz. Z przykładów zamieszczonych w rozdziale poprzednim 7.6.1 wynikają bowiem następujące wnioski (dotyczą one działek o powierzchni większej niż 0.1ha):

1. Zastosowanie tolerancji technicznej równej 1.5 m powoduje, że jedynie w 1% przypadków powierzchnia bufora jest mniejsza niż 3%, a w 3% przypadków mniejsza niż 5% powierzchni działki.
2. Zastosowanie dwukrotnie mniejszej szerokości bufora - 0.75 m powoduje niewielkie zmiany w porównaniu do wyniku analizy metodą buforową przy przyjęciu szerokości bufora 1.5 m; próg 3% powierzchni działki nie został przekroczony w 2% działek, a próg 5% w 8% działek.

Oznacza to, że metoda buforowa, nawet po przyjęciu mniejszej tolerancji niż maksymalna, czyli równej 0.75 m akceptuje, jako poprawne, takie działki, dla których prognozowane odchyłki względne przekraczają wartość 5%. Ze statystycznego punktu widzenia sytuacja taka występuje w prawie wszystkich przypadkach (w podanym przykładzie wystąpiła w 97% przypadków). Oznacza to, że zastosowanie tolerancji technicznej równej szerokości bufora: 0.75 m daje wynik, w 97% diametralnie inny niż wynik zastosowania tolerancji 5%. Przeprowadzone rozważania dotyczą przyjętych, zgodnie z założeniami wytycznych technicznych, hipotetycznych wartości tolerancji. Uzyskane wyniki stanowią niewątpliwą ilustrację, jak ważny jest wybór tolerancji technicznej.

Wybór tolerancji technicznej powinien jednak odzwierciedlać dokładność metody pomiarowej. Jeśliby założyć, że błąd powierzchni wyprowadzony ze wzoru Gauss'a jest błędem rzeczywistym powierzchni, to mógłby on zostać uznany jako wielkość charakteryzującą dokładność metody pomiarowej. Analiza tego błędu pozwala stwierdzić, że jeśli prognozowany błąd położenia punktu na ortofotomapie wynosiłby  $\pm 1.5$  m to w 34% przypadków, w analizowanej gminie Zabierzów błąd względny powierzchni byłby mniejszy niż 3%, a w 78% przypadków byłby mniejszy niż 5%. Jeśli natomiast błąd położenia punktu wynosiłby  $\pm 0.75$  m, co odpowiada ortofotomapie w skali 1: 13 000, czyli takiej jaka wykonywana jest dla tego obszaru, to błąd względny powierzchni byłby mniejszy niż 3% w 88% przypadków, a mniejszy niż 5% w 98% przypadków.

W niniejszej pracy zaproponowano wzór (56), który nazwano wzorem na rzeczywisty błąd powierzchni Gauss'a. Wzór ten mógłby być pomocny w opracowaniu metodyki kalibracji metod pomiaru powierzchni działki dla potrzeb systemu IACS. Celem kalibracji byłoby określenie dokładności badanej metody pomiarowej. Proces kalibracji metody pomiarowej powinien polegać na wykonaniu szeregu pomiarów, określonych działek, w określonych warunkach. W związku ze specyfiką działki rolnej jako przedmiot analizy (przedmiot kalibracji) powinien zostać przyjęty kompleks: metoda pomiarowa, działka rolna, warunki pomiaru. Te trzy elementy bowiem wpływają na dokładność metody. Wiadomo, że na dokładność takiego kompleksu wpływa urządzenie pomiarowe, typ GPS, czy skala ortofotomapy. Ponadto mierzony obiekt może być mniej lub bardziej identyfikowalny w terenie, czyli mieć różną dokładność identyfikacji punktu załamania granicy. Po za tym na dokładność metody pomiarowej wpływ mają warunki zewnętrzne pomiaru, niezwiązane z wykorzystywanym urządzeniem jak np. zacinienie, brak widoczności, ukształtowanie terenu i itp. W trakcie kalibracji metody pomiarowej należy wskazać zestaw działek, które mają zostać pomierzone w określonych warunkach, w określonej liczbie serii, przez określoną liczbę osób. Następnie powinna zostać przeprowadzona statystyczna analiza dokładności, np. wykorzystująca normy ISO 5725. Ostatecznym wynikiem kalibracji powinna być wartość tolerancji technicznej, jaka powinna być zastosowana dla ogólnie pojętej (jak wyżej) metody pomiarowej, obejmującej: urządzenie pomiarowe, obiekt i warunki pomiaru. Tolerancja techniczna jest do tej pory przyjmowana jako szerokość bufora i nie ma ona w pełni uzasadnienia fizycznego, czyli połączenia bezpośredniego ze źródłem błędu, jakim jest błąd położenia punktu. Takie powiązanie ma niewątpliwie proponowana metoda oparta o rzeczywisty błąd powierzchni Gauss'a. Proponowana metoda, oparta o błąd położenia punktu wydaje się być uniwersalna i możliwa do wykorzystania zarówno do pomiaru ciągłego GPS, do pomiaru na ortofotomapie, jak i do tradycyjnego pomiaru bezpośredniego.

Przedstawione w powyższym akapicie propozycje dotyczące kalibracji metody pomiaru powierzchni działki są przedmiotem oferty do zamówionego projektu UE, który jest koordynowany przez Autorkę i będzie wkrótce realizowany [Hejmanowska B., Oszczak S., Palm R., 2004]. Wynikiem tego projektu będzie propozycja określania technicznej tolerancji pomiaru być może oparta o rzeczywisty błąd powierzchni Gauss'a.

## **7.7 Dyskusja: określanie dokładności powierzchni w oparciu o wzór na rzeczywisty błąd powierzchni Gaussa a istniejące w Polsce przepisy dotyczące ewidencji gruntów**

### **7.7.1 Istniejące przepisy**

Dokładność pomiaru powierzchni działki jest regulowana w Polsce kilkoma przepisami. Działka, w tych zapisach rozumiana jest jako działka ewidencyjna. Istniejące przepisy dotyczące określania powierzchni działki ewidencyjnej to między innymi:

- Wytyczne Techniczne G-5.4 – „Opracowanie dokumentacji wyjściowej do odnowienia ewidencji gruntów z zastosowaniem technologii fotogrametrycznej”, 1992,
- „Mapy do celów prawnych, podziały i scalanie oraz rozgraniczanie nieruchomości”, 1998
- Instrukcja techniczna G-5 – „Ewidencja Gruntów i Budynków” , 2003

Wymienione przepisy określają między innymi dokładność analitycznego obliczenia powierzchni oraz dopuszczalną różnicę pomiędzy powierzchnią ewidencyjną, a powierzchnią uzyskaną w wyniku terenowego pomiaru kontrolnego.

W Wytycznych technicznych G-5.4 określona jest np. dopuszczalna odchyłka powierzchni uzyskana w wyniku pomiaru kontrolnego, (odchyłka pomiaru kontrolnego, 1992, wzór (60),

*„Wytyczne Techniczne G-5.4, 1992, §57*

*5. W przypadku terenowej kontroli prawidłowości określenia powierzchni działek gruntowych dla potrzeb ewidencji gruntów, tok postępowania polega na:*

- a) niezależnym kontrolnym pomiarze punktów załamań granic działek gruntowych,*
- b) obliczeniu współrzędnych punktów załamań działek a następnie powierzchni tych działek dla ok. 10% działek.*

*6. Dopuszczalna różnica przy porównaniu powierzchni działek objętych pomiarem kontrolnym nie może przekraczać wielkości wyznaczonych z wzoru:*

$$(60) \quad \Delta P = 0.4 \cdot \sqrt{2P} \cdot \sqrt{\frac{1+K^2}{2K}}$$

*gdzie:*

*$\Delta P$  – dopuszczalna odchyłka powierzchni uzyskana w wyniku pomiaru kontrolnego [ $m^2$ ],*

*$P$  – powierzchnia [ $m^2$ ],*

*$K$  – wydłużenie działki (stosunek długości do szerokości działki ewidencyjnej). „*

W §57, punkt 3 tych samych Wytycznych Technicznych G-5.4, 1992 znajduje się wzór na dopuszczalną odchyłkę powierzchni ewidencyjnej podczas wykonywania modernizacji ewidencji gruntów (odchyłka przy modernizacji EGB, 1992):

$$(61) \quad \Delta P = 0.001 \cdot P + 0.0002 \cdot M \cdot \sqrt{P}$$

gdzie:

M – mianownik skali mapy.

Natomiast w przepisach: „Mapy do celów prawnych, podziały i scalanie oraz rozgraniczanie nieruchomości, 1998” (rozdział I, punkt B) podany jest inny wzór na dopuszczalną odchyłkę (odchyłka przy podziałach i scalaniu, 1998):

$$(62) \quad \Delta P = 2 \cdot (0.002 \cdot P + 0.2 \cdot \sqrt{P}).$$

Zgodnie z najnowszą Instrukcją techniczną G-5, 2003, „Ewidencja Gruntów i Budynków” obowiązująca jest następująca formuła (odchyłka G5, 2003):

$$(63) \quad \Delta P = 0.001 \cdot P + 0.2 \cdot \sqrt{P}$$

Wzór (61) sprowadza się do wzoru (63), jeśli przyjmie się mianownik skali mapy równy 1000, co w przypadku map ewidencyjnych w terenach wiejskich nie występuje, ponieważ dla tych terenów wykonuje się mapy w skali 1: 2000 lub 1:5000.

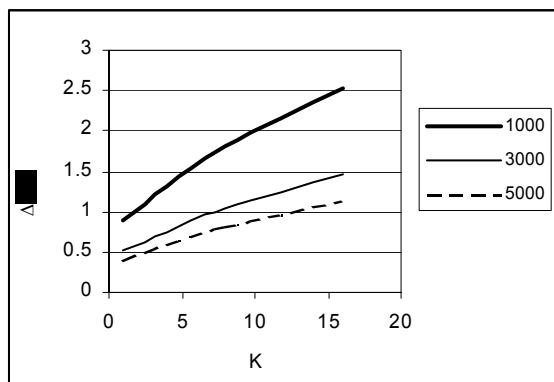
### 7.7.2 Porównanie wymogów instrukcyjnych z błędem rzeczywistym powierzchni Gauss’a

Omówione powyżej wzory różnią się od siebie i ich porównanie wymaga przeprowadzenia analizy zależności błędu względnego powierzchni od powierzchni. W związku z tym, że problem uzyskania odpowiedniej dokładności, wymaganej przepisami polskimi i UE, występuje dla małych działek do analizy porównawczej przyjęto działki o powierzchni od 0.1ha do 3ha.

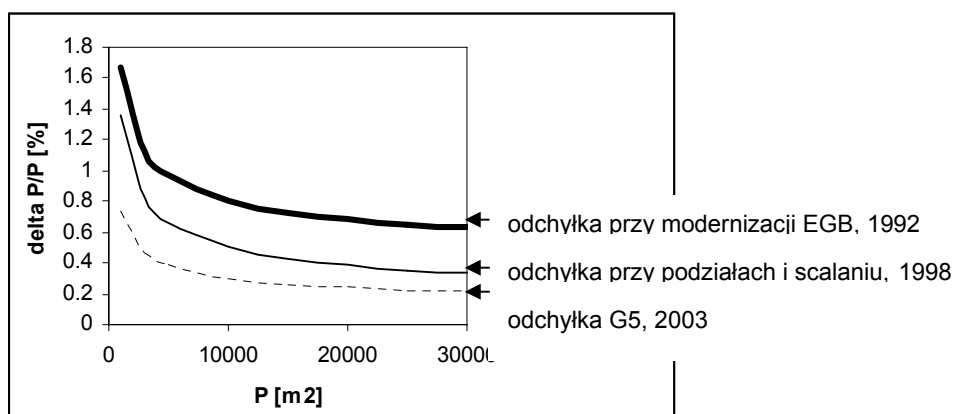
Na rysunku: Rys. 60 przedstawiono wyniki obliczeń dopuszczalnych odchyłek powierzchni działki ewidencyjnej z wykorzystaniem wzoru na odchyłkę pomiaru kontrolnego, 1992, (wzór (60)), dla współczynnika wydłużenia K od 1 do 15. Pozostałe wzory nie uwzględniają wydłużenia działki, a jedynie wiążą, w sposób empiryczny błąd względny powierzchni działki z wielkością jej powierzchni. Wzory te zostały więc przeanalizowane oddzielnie.

Porównanie zależności odchyłki względnej od powierzchni obliczone za pomocą wzorów:

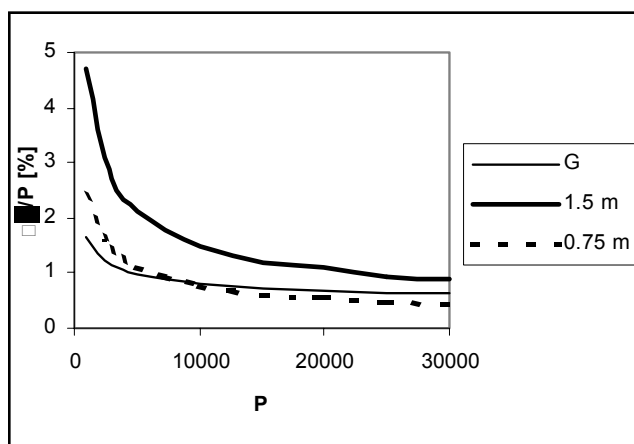
(61) - odchyłka przy modernizacji EGB, 1992, (62) - odchyłka przy podziałach i scalaniu, 1998 i wzoru (63) - odchyłka G5, 2003 zamieszczono na rysunku: Rys. 61. Natomiast na rysunku: Rys. 62 zaprezentowano porównanie zależności odchyłki względnej od powierzchni obliczonej za pomocą wzoru: (62), z zależnością pomiędzy błędem średnim kwadratowym powierzchni obliczonym ze wzoru Gauss’a (57), przyjmując  $m_{pkt} : +/- 1.5 \text{ m}$  i  $+/- 0.75 \text{ m}$ .



Rys. 60. Zależność odchyłki względnej powierzchni ( $\Delta P/P$  od współczynnika wydłużenia działki ( $K$ ) dla powierzchni: 1000, 3000, 5000 m<sup>2</sup> [%] – wzór na odchyłkę pomiaru kontrolnego, 1992 (wzór (60))-



Rys. 61. Zależność odchyłki względnej powierzchni ( $\Delta P/P$  [%]) od powierzchni  $P$  [m<sup>2</sup>] z pomocą wzorów: (61), (62), (63)



Rys. 62. Zależność odchyłki względnej powierzchni ( $\Delta P/P$ ) od powierzchni ( $P$ ), obliczona ze wzoru na odchyłkę przy modernizacji EGB, 1992, wzór (61) - G, oraz obliczona ze wzoru na rzeczywisty błąd powierzchni Gauss'a wzór (57), przyjmując  $m_{pkt} = 1.5m$  i  $0.75m$



### 7.7.3 Wnioski z analizy porównawczej wymagań instrukcji geodezyjnych z rzeczywistym błędem powierzchni Gauss’a

Jak widać na rysunku: Rys. 61, dopuszczalne odchyłki, zgodnie z polskimi przepisami geodezyjnymi, we wszystkich przypadkach wynoszą poniżej 3% powierzchni działki ewidencyjnej. Wymagania dotyczące dokładności są możliwe do spełnienia wykorzystując bezpośredni pomiar terenowy, który technicznie umożliwia większą, niż wymagana, dokładność. W terenach rolnych pozostaje jednak problem identyfikacji punktu załamania granicy w terenie, który z powodu braku graniczników może być trudny do zdefiniowania i charakteryzować się błędem znacznie większy niż 0.2 m i wynosić 0.5 m (jak dla szczegółów sytuacyjnych III grupy).

Wszystkie wzory: (60), (61), (62) i (63) mają postać empiryczną i podane są bez wyprowadzenia, a w przypadku wzoru: (60) wymagana jest znajomość współczynnika wydłużenia (K).

Tradycyjny pomiar geodezyjny polega na pomiarze kąta i długości, na tej podstawie wyznacza się współrzędne punktów. W przypadku sieci geodezyjnych w oparciu o błąd pomiaru kąta i długości wylicza się błąd położenia punktu. Podczas pomiaru działki ewidencyjnej nie prowadzi się tego rodzaju analizy i dokładność wiąże się z powierzchnią działki ewentualnie z błędem pomiaru (zwykle długości boku, jeśli działka ma kształt regularny). Wykorzystując ortofotomapę dla pomiaru powierzchni działki (ewidencyjnej lub rolnej) przeprowadza się digitalizację punktów załamania granicy i wylicza powierzchnię ze współrzędnych. Nie ma w tym przypadku pośredniego pomiaru długości i kąta, których dokładność wpływa na błąd położenia punktu. Dokładność ortofotomapy, zależną od rozdzielczości ortofotomapy, można zdefiniować średnim błędem kwadratowym położenia punktu, który zwykle wynosi od 2 do 2.5 wielkości piksela. Zmienia to klasyczne podejście do dokładności powierzchni oparte o wielkość działki i/lub także jej kształt.

Analizując wykres na rysunku: Rys. 62 można stwierdzić, że błąd ortofotomapy wykonanej ze zdjęć 1:13000, charakteryzujący się błędem położenia punktu równym  $\pm 0.75$  m umożliwia uzyskanie dokładności określenia powierzchni zbliżonej do wymagań instrukcyjnych (krzywa – G, wzór odchyłka przy modernizacji EGB, 1992 (61)). Nie umożliwia natomiast uzyskania dokładności zgodnie z wzorami: (62), (63). Wydaje się, że w terenach rolnych w ogóle nie można uzyskać takiej dokładności. Jeżeli podstawimy do wzoru na odchyłkę G5, 2003, czyli wzoru (63), powierzchnię działki równą 0.1 ha czyli 1000 m<sup>2</sup> to obliczymy dopuszczalną odchyłkę powierzchni równą: 7.3 m<sup>2</sup>. Jeśli zastosujemy wzór Gauss’a, w odwrotny sposób niż do tej pory, tzn. obliczymy z niego wielkość błędu położenia punktu na podstawie błędu powierzchni, równego w tym przypadku 7.3 m<sup>2</sup>, to uzyskamy wartość  $m_{\text{pkt}}$  równą:  $\pm 0.1$  m, wzór (64). Uzyskanie takiej dokładności położenia punktu w przypadku działki rolnej jest niemożliwe.

$$(64) \quad m_{pkt} = 2\sqrt{2}m_p \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(y_{i+1} - y_{i-1})^2 + (x_{i-1} - x_{i+1})^2}}$$

## 8. Wnioski

---

Ryzyko procesów decyzyjnych jest związane z błędami danych źródłowych, niedokładnością modeli oraz stopniem wiarygodności reguł decyzyjnych. Analiza ryzyka może uwzględniać wszystkie wymienione elementy lub tylko niektóre z nich. W pracy **skoncentrowano się na błędach danych źródłowych i ich wpływie na wykonywane w systemach GIS analizy**. Wpływ błędów danych źródłowych na wynik analizy przestrzennej można oszacować metodami analitycznymi, numerycznymi i statystycznymi.

Metody analityczne, dzięki stosowaniu ścisłych zależności funkcyjnych pomiędzy błędami danych źródłowych a błędami modelu, umożliwiają obliczenie wartości błędu analizy dla każdego obiektu (piksela, obiektu wektorowego). **Mapa przestrzennego rozkładu błędu analizy GIS** uzyskana za pomocą metod analitycznych pozwala na rozważenie **przestrzennego rozkładu ryzyka** w trakcie procesu podejmowania decyzji. Wadą tej metody jest konieczność dysponowania związkiem analitycznym.

Metody numeryczne dostarczają wzorów empirycznych, w oparciu o które również można szacować przestrzenny rozkład błędu analizy. Wadą tej metody jest empiryczna postać wzorów, czyli trudność w interpretacji współczynników i nieelegancka postać równania, oraz w pewnych przypadkach kłopotliwe ich praktyczne wykorzystanie.

Wzory analityczne czy numeryczne, będące podstawą obu metod, są dla każdej analizy inne i z reguły, systemy GIS nie udostępniają gotowych opcji dla obliczania błędu analizy w oparciu o te metody. Dlatego, dopiero ostatnio, dzięki zastosowaniu probabilistycznej metody Monte Carlo, rozpoczął się, na szerszą skalę, proces szacowania niedokładności analiz przestrzennych GIS spowodowanych błędami danych źródłowych. Zainteresowanie tą metodą jest spowodowane, z jednej strony prostotą jej implementacji w systemie informatycznym (systemy GIS coraz częściej dysponują do tego celu gotowymi algorytmami), z drugiej strony również nieskomplikowanym sposobem przeprowadzenia takiej analizy. Główną wadą metody Monte Carlo jest konieczność wykonywania wielokrotnych symulacji.

Podsumowując, wydaje się, że najlepszą metodą jest jednak analityczna metoda oceny błędu i w związku z tym w pracy zaproponowano rozwiązania analityczne służące do szacowania ryzyka na przykładzie trzech wybranych analiz przestrzennych:

- Modelowanie stref zalewowych wokół rzek.
- Generowanie map nachyleń i ekspozycji z DTM.
- Obliczanie powierzchni działki.

Wnioski dotyczące poszczególnych analiz zaprezentowano częściowo w pracy na końcu każdego z rozdziałów, w których zajmowano się daną analizą. Poniżej przedstawiono najistotniejsze fakty związane z przeprowadzonymi analizami:

#### 1. Modelowanie stref zalewowych

- a) Obecnie w Polsce trwają prace nad tworzeniem Ośrodków Koordynacyjno- Informacyjnych przy Regionalnych Zarządach Gospodarki Wodnej, których zadaniem jest ochrona przeciwpowodziowa, temat modelowania stref zalewowych jest więc na tym etapie bardzo istotny.
- b) W Polsce, w modelowaniu stref zalewowych nie uwzględnia się ani dokładności procesu modelowania powierzchni zwierciadła wody, ani dokładności DTM.
- c) Z literatury znany jest projekt, w ramach którego powstał program do uwzględniania niedokładności DTM w modelowaniu stref zalewowych (w oparciu o metodę Monte Carlo). Metoda ta została zaimplementowana w systemie informatycznym: FLOODMAP.
- d) Proponowana w pracy metoda pozwala na uwzględnienie w trakcie generowania stref zalewowych niedokładności danych źródłowych (DTM i innych np. związanych z modelowaniem hydrologicznym).
- e) Zaproponowana metoda jest alternatywna zarówno w stosunku do tradycyjnej metody twardej, nieuwzględniającej błędów danych źródłowych, jak i do miękkiej metody Monte Carlo.

#### 2. Określanie dokładności map pochodnych DTM: map spadów i ekspozycji:

- a) Ekspozycje i spadki są najczęściej wykorzystywanymi w analizach GIS produktami pośrednimi z DTM, co oznacza, że określanie ich dokładności jest bardzo istotne w kontekście szacowania ryzyka analiz GIS.
- b) Istniejące metody wyznaczania niedokładności rezultatu analizy przestrzennej, w wyniku której obliczane są nachylenia i ekspozycje:
  - są oparte o przybliżone wzory uzyskane w wyniku numerycznej analizy wzorów do obliczania nachyleń i ekspozycji z DTM lub
  - wykorzystują metodę statystyczną -Monte Carlo
- c) Zaproponowana przez Autorkę nowa metoda bazuje na analitycznym rozwiązaniu umożliwiającym obliczanie błędów nachyleń i ekspozycji. W pracy między innymi

wykazano zależność błędu nachyleń i ekspozycji od wartości nachyleń, oczka siatki DTM oraz błędu DTM.

- d) Porównanie wyników analizy przeprowadzonej za pomocą proponowanej metody analitycznej i metody Monte Carlo pozwala stwierdzić, że wartości błędów nachyleń z obu metod są podobne, natomiast zgodności takiej nie uzyskano dla wartości ekspozycji.

### 3. Określanie dokładności powierzchni działki rolnej dla potrzeb systemu dopłat bezpośrednich do rolnictwa IACS.

- a) Stosowana w UE kontrola dokładności określania powierzchni działki rolnej oparta jest o metodę buforową. W metodzie tej dokładność powierzchni działki równa się obwód działki razy szerokość bufora, która w UE przyjmowana jest jako 1.5m.
- b) W pracy wykazano, że w przypadku specyficznej struktury działek rolnych np. w Polsce południowej zastosowanie bufora 1.5 m jest ze statystycznego punktu widzenia niewłaściwe (błąd powierzchni 99% działek gminy testowej przekracza wartość 5%).
- c) Po przeanalizowaniu dostępnych instrukcji geodezyjnych dotyczących określania dopuszczalnych odchyłek powierzchni działek ewidencyjnych stwierdzono, że istniejące wzory mają charakter empiryczny i nie wiadomo jaki jest związek pomiędzy tymi formułami a błędami danych źródłowych. Ponadto obliczone za pomocą tych wzorów dopuszczalne odchyłki powierzchni nie mają zastosowania w przypadku pomiaru działek rolnych, ponieważ z praktycznego punktu widzenia nie można wykonać pomiaru spełniającego te wymagania.
- d) Zaproponowano alternatywną metodę określania dokładności powierzchni działki w oparciu o wzór Gauss'a. W metodzie tej po wprowadzeniu średniego błędu położenia punktu (charakteryzującego np. ortofotmapę dla terenów Polski południowej: 0. +/- 75 m) można obliczyć rzeczywisty błąd powierzchni.
- e) Wydaje się, że w oparciu o tę metodę można, w sposób, bardziej niż dotychczas, zbliżyć do rzeczywistości, określać błąd powierzchni działki.
- f) Autorce nie jest znane zastosowanie analitycznego rozwiązania tego problemu, zarówno w zakresie katastru jak i kontroli powierzchni działek rolnych w IACS'ie.

W pracy skoncentrowano się na jednym z etapów analizy ryzyka związanego z procesem podejmowania decyzji, mianowicie z przenoszeniem się błędów danych na wykonywane w systemach GIS analizy. Jest to pierwszy etap w niedeterministycznym procesie podejmowania decyzji. Uwzględniając błąd danych źródłowych (np. błąd DTM) można wygenerować

równocześnie z mapą nachyleń mapę błędów nachyleń. Mapa błędów nachyleń może być podstawą do określania prawdopodobieństwa w miękkich metodach decyzyjnych, określania prawdopodobieństwa w metodzie „rozmytej”, prawdopodobieństwa warunkowego w metodzie Bayes’a, oraz poziomu ufności i wiarygodności w metodzie Dempster-Shafer’a.

## 9. Podsumowanie

---

W dzisiejszych czasach, kiedy coraz powszechniejsze staje się w Polsce korzystanie z przestrzennych baz danych (GIS) ważne jest rozbudzanie świadomości dotyczącej dokładności danych znajdujących w tych bazach. Szczególnie, że w tworzonych obecnie w Polsce bazach danych GIS nie gromadzi się informacji o dokładności danych źródłowych, a już zupełnie nie uwzględnia się wpływu dokładności danych na wynik prowadzonych analiz.

W zależności od rodzaju zgromadzonych danych możemy mieć do czynienia z różnego rodzaju dokładnością. Może ona dotyczyć:

- przestrzennego położenia obiektów,
- jakościowej i ilościowej wiarygodności atrybutu.

Zgromadzone w przestrzennej bazie GIS, obciążone błędami, dane są poddawane dalszemu przetworzeniu np. na podstawie DTM wyliczane są nachylenia i azymuty, za pomocą modeli hydraulicznych obliczany jest poziom wody w rzece. Błędy danych źródłowych przenoszą się dalej na wyniki analiz przestrzennych. Pierwszym etapem jest poznanie wielkości błędów danych źródłowych. W dalszej kolejności kluczowa jest analiza wpływu tych błędów na wykonywaną analizę, ma to zasadnicze znaczenie dla świadomego korzystania z bazy danych. Niedokładność danych źródłowych, błędy w modelowaniu zjawisk zachodzących w środowisku, wiarygodność procesów decyzyjnych są czynnikami determinującymi ryzyko podejmowania decyzji w oparciu o bazę danych GIS.

Poruszana w pracy problematyka stanowi ogromne, wielowątkowe zagadnienie i usystematyzowanie jej wydaje się ważne, szczególnie, że nie istnieją w Polsce żadne opracowania na ten temat.

Oprócz ogólnej problematyki podejmowania decyzji i ryzyka z tym związanego, opisanych na podstawie literatury, w pracy przedstawiono autorskie propozycje dotyczące wybranych praktycznych przykładów szacowania ryzyka wyniku analizy przestrzennej.

We wszystkich trzech przypadkach wygenerowano mapy rozkładu błędu wyniku analizy przestrzennej. Na ich podstawie można szacować poziom ryzyka i podjąć ostatecznie decyzję dotyczącą wyboru obiektów czy lokalizacji spełniających przyjęte w analizie kryteria poprzez zbadanie stopnia ich spełnienia lub zbadania ryzyka ich niespełnienia. W oparciu o rozwiązania analityczne istnieje także możliwość ilościowego oszacowania przestrzennego rozkładu ryzyka. Zaproponowana metoda pozwala na opracowanie mapy przedstawiającej obszary, dla których przy zadanej granicy strefy zalewowej, pozostaje np. 10-procentowe ryzyko, że teren zostanie jednak zalany, albo, mapy obszarów, dla których występuje ryzyko,

Beata Hejmanowska

„Ryzyko procesów decyzyjnych w aspekcie dokładności baz danych GIS”

że błąd nachyleń jest większy niż np. 30% nachylenia, albo mapy rozkładu działek, dla których istnieje ryzyko przekroczenia błędu granicznego powierzchni.

W związku z powyższym należy uznać, że teza pracy została udowodniona.



## 10. Bibliografia.

---

1. Carver, S.J., 1991 – “Integrating Multi-Criteria Evaluation with Geographical Information Systems” - International Journal of Geographical Information Systems 5(3): 321-339
2. Drzewiecki W., Mularz S., Pirowski T. , 1999 – „Generowanie map spadków i ekspozycji pod nadzorem różnych systemów GIS” – Geodezja, Tom 5, Zeszyt 1
3. Drzewiecki W., Pirowski T. , 1999 – niepublikowane seminaria Zakładu Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH w Krakowie
4. Drzewiecki W., Hejmanowska B., Pirowski T., 1999 -“ Analizy przestrzenne z wykorzystaniem Komputerowego Atlasu Województwa Krakowskiego” – Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Nr 9, 1999, Olsztyn-Mierki,
5. Eastman J.R. 2001 – „Guide to GIS and Image Processing” – Idrisi Manual Version 32.20
6. Ehlschlaeger C.R., Shortridge A. – “Modeling elevation uncertainty in Geographical analyses” – Uncertainty, Session 9B
7. Florinsky I.V. 1998– “Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models” – Int. J. Geographical Information Science, vol. 12, no 1
8. Fleming M. D., Hoffer R. M., 1979 - “Machine processing of Landsat MSS data and DMA topographic data for forest cover type mapping” - LARS Technical Report 062879.Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University, West Lafayette, Indiana
9. Grzechnik B., Marzec Z. 1998. Mapy do celów prawnych, podziały i scalanie oraz rozgraniczanie nieruchomości – 1998
10. Hejmanowska B. , 2000, - „Wpływ niedokładności Cyfrowego Modelu Terenu na błąd nachyleń i ekspozycji” - Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji Nr 10, 2000, Kalwaria
11. Hejmanowska B., 2003 – „Data inaccuracy in geographic system – propagation of DTM and ortophotomaps in the spatial analysis”, – Machów/Jeziorko” – Geodezja 40, Prace Komisji Geodezji i Inżynierii Środowiska, PAN, Oddział w Krakowie
12. Hejmanowska B., 2003 – „GIS-IACS, Działki do kontroli, Dokładność określania na ortofotomapie powierzchni działki rolnej”, Geodeta nr 12

13. Hejmanowska B., Oszczak S., Palm R., 2004 – “Validation of methods for measurement of land parcel areas” – niepublikowana oferta do projektu finansowanego przez Join Research Centre, Ispra Włochy
14. Hodgson Michael E., 1995 – “What Cell Size Does the Computed Slope/Aspect Angle Represent?”, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 61 No. 5,
15. Horn B. K. P., 1981 Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE*, 69(1)
16. Jankowski P., Nyerges T.L., Smith A., Moore T.J., Horvath E., 1997 – “Spatial group choice; a SDSS tool for collaborative spatial decision making” - *Int. J. Geographical Information Science*, vol. 11, no 6
17. Jones Kevin H., 1998 - “A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM” - *Computers & Geosciences*, Vol. 24, No. 4
18. Kay S., Wróbel A., Hejmanowska B. , 2004 – „Kontrola na miejscu” – *Studia Podyplomowe – „Fotogrametria, teledetekcja i GIS jako narzędzia wspomagania systemu IACS” – prace nie publikowane*
19. Konieczny J.J. – 2001- „Dostosowanie metodyki Zintegrowanego Systemu Kontroli i Zarządzania Przestrzenią Rolniczą (IACS) do warunków polskich”, *Seria Monograficzna Instytutu Geodezji i Kartografii, Warszawa*
20. Krause J., Urich S., Bormann H., Diekkrüger B. 2003 – „Uncertainty Analysis of a Floodrisk Mapping Procedure Applied in Urban Areas”, *Hydrology Division - Geographical Institute University of Bonn* – <http://www.giub.uni-bonn.de/hrg/Poster%20and%20Presentations/nizza02.pdf>
21. Malczewski J. 1996 – “A GIS-based approach to multiple criteria group decision-making” - – *Int. J. Geographical Information Science*, vol. 10, no 8
22. Nachlik E., Kostecki S., Gądek W., Stochmal R., 2000 – „Strefy zagrożenia powodziowego”, *Rodzaje stref, podstawy ich ustalania i doświadczenia praktyczne – Komponent B.4 projektu Likwidacji Skutków Powodzi finansowego w ramach kredytu Banku Światowego, Biuro Koordynacji Projektu Banku Światowego we Wrocławiu*
23. Perlitsh Wechsler S.– “Digital Elevation Model (DEM) Uncertainty: Evaluation and Effect on Topographic Parameters” - [http://www.csulb.edu/~wechsler/Dissertation/P262/\\_Author\\_Information](http://www.csulb.edu/~wechsler/Dissertation/P262/_Author_Information)
24. Qihao Weng – “Quantifying Uncertainty of Digital Elevation, Models Derived from Topographic Maps”- In: *Advances in Spatial Data Handling*, edited by D. Richardson and P. van Oosterom, Springer-Verlag, New York, pp.403-418.

25. Reeves, R.G., Anson, A., Landen, D., 1975 - „Manual of Remote Sensing” . American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia
26. Ritter P., 1987 – “A vector-based slope and aspect generation algorithm” - Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 53(8)
27. Saaty, T.L., 1977 – “A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures”. J. Math. Psychology, 15: 234-281
28. Sharpnack D. A., Akin G., 1969 – “An algorithm for computing slope and aspect from elevations” - Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1969, 35(3)
29. Skidmore A. K., 1989 – “ A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model” - International Journal of Geographical Information Systems, 3(4)
30. Sokołowska J., Pohorille A. – „Model of risk and choice: challenge or danger” – Acta Psychologica, 104 (2000), 339-369
31. Starzyńska W. 2000 – “ Statystyka praktyczna”. Wydawnictwa Naukowe PWN
32. Travis M. R. I in. 1975 – “VIEWIT computation of seen areas, slope and aspect for land-use planning” - U.S. Dept. of Agriculture Forest Service Gen. Techn. Rep. PSW 11/1975, Pacific Southwest Forest and Range Experimental Station, Berkley, California
33. Voogd, H., 1983 – “Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning” - Pion, Ltd., London
34. Wood J. W., 1996 – “The geomorphological characterisation of digital elevation models” - Ph. D. Dissertation, Dep. of Geography, University of Leicester U.K.
35. Weih R., Smith J. 1996 – The influence of cell slope computation algorithms on a common forest management“ – Digital Terrain Modeling II, Session 13A, 7th International Symposium on Spatial Data Handling, August 12-16, 1996, Delft
36. Wechsler S.P. 2001 – „DEM Uncertainty: Evaluation and Effect on Topographic Parameters”, Praca doktorska, Wydział Geografii, California State University, USA
37. Wytyczne Techniczne G-5.4 – „Opracowanie dokumentacji wyjściowej do odnowienia ewidencji gruntów z zastosowaniem technologii fotogrametrycznej”, 1992,
38. „Mapy do celów prawnych, podziały i scalanie oraz rozgraniczanie nieruchomości”, 1998
39. Instrukcja techniczna G-5 – „Ewidencja Gruntów i Budynków” , 2003