

Wyznaczanie tras rurociągów z zastosowaniem Systemów Informacji Geograficznej

Pipelines routing with the use of Geographic Information Systems

Maciej Witek, Paweł Wlazło^{*)}

Słowa kluczowe: systemy informacji przestrzennej, wybór trasy rurociągu, ścieżka optymalna, najniższe nakłady na budowę

Streszczenie

Niniejszy artykuł ma na celu przedstawienie możliwości automatyzacji procesu wyboru trasy rurociągów, z zastosowaniem narzędzi geoprzetwarzania, wbudowanych w systemy informacji przestrzennej (GIS). Ze zbioru dostępnych w Polsce otwartych danych przestrzennych, zaproponowano zestaw warstw tematycznych oraz zakres czynności przygotowawczych, niezbędnych do dostosowania danych do analizy. Zdefiniowane zostały preferencje lokalizacji gazociągu, poprzez przypisanie poszczególnym warstwom tematycznym kosztu, odpowiadającego wzrostowi trudności usytuowania sieci w terenie. Wynikiem analizy, składającej się z sześćdziesięciu procesów o kolejności, parametrach i zakresie przetwarzania zdefiniowanych w aplikacji ModelBuilder, była optymalna trasa gazociągu średniego podwyższonego ciśnienia o najniższym nakładzie finansowym. W związku z zawężeniem zakresu analizowanych materiałów źródłowych, jedynie do otwartych danych przestrzennych oraz brakiem możliwości weryfikacji ich aktualności, zaproponowana metoda ma duży potencjał zastosowania jedynie na wczesnych etapach projektowania obiektów liniowych. Jednocześnie, mimo stosunkowo niepewnego wyniku końcowego, pozwala projektantom i osobom decyzyjnym na wizualizację możliwych problemów w terenie, określenia potencjalnych lokalizacji inwestycji oraz szacunkowych nakładów finansowych, koniecznych do realizacji rurociągu.

Keywords: geographic information systems, pipelines routing, optimal path, lowest construction expenditures

Abstract

This article presents the possibilities of automating the pipelines routing process using geoprocessing tools, embedded in geographic information systems (GIS). From the set of open spatial data available in Poland, a set of thematic layers and a range of preparation process, necessary to adapt the data for analysis, were proposed. The preferences of the gas pipeline location have been defined by assigning to individual thematic layers a cost, corresponding with the increase in difficulty of network localization in a given area. The result of the analysis, consisting of sixty processes with the order, parameters and processing range defined in the ModelBuilder application, was the optimal route of the medium elevated pressure gas pipeline with the lowest financial construction expenditures. Due to the narrowing of the scope of analyzed source materials only to open spatial data and the inability to verify their validity, the proposed method has a great potential for use only at the early stages of the project. However, despite the relatively uncertain final result, it allows designers and decision-makers to visualize possible problems, determine potential investment locations and estimated financial expenses required for pipeline localization..

1. Wstęp

Rozwój systemów informacji geograficznej (*ang.* GIS – *Geographic Information System*) oraz rosnąca ilość dostępnych bezpłatnych danych przestrzennych, otwiera nowe możliwości w wielu dziedzinach badań i zastosowań technicznych. Od lat systemy GIS stosowane są jako wspomaganie procesu projektowania inwestycji liniowych, dzięki czemu projektanci i inwestorzy mogą wypracować optymalną lokalizację, uwzględniającą uwarunkowania terenowe, planistyczne i środowiskowe. Prezentacja oraz integracja danych przestrzennych pozyskanych z różnych źródeł, ewidencja zdarzeń, uzgodnień i porozumień oraz wyznaczanie stref kontrolowanych,

buforów bezpieczeństwa oraz zakresów oddziaływania inwestycji, to zastosowania systemów informacji geograficznej pojawiające się na etapie projektowym i wykonawczym praktycznie każdej inwestycji liniowej. Warto jednak zwrócić uwagę na inne przydatne narzędzia, wbudowane zarówno w płatne jak i otwarte oprogramowania GIS. Przykładem rozwiązania pozwalającego na wspomaganie procesu projektowego już na etapie koncepcyjnym, są narzędzia wyznaczające trasę pomiędzy określonymi punktami węzłowymi w terenie, z wykorzystaniem analizy kosztów. Niniejszy artykuł ma na celu przedstawienie możliwości wyznaczenia trasy rurociągu lądowego o najniższym koszcie metodą ścieżki optymalnej, z zastosowaniem ogólnodostępnych w Polsce otwartych danych przestrzennych.

^{*)} Maciej Witek, dr hab. Inż., Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, e-mail: maciej.witek@pw.edu.pl, Paweł Wlazło, mgr inż., Absolwent kierunku Geodezja i Kartografia w specjalności Fotogrametria, Teledetekcja i Systemy Informacji Geograficznej, Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie.

2. Narzędzia wyznaczania trasy o najniższym koszcie

Do analizy możliwej lokalizacji rurociągu lądowego wykorzystane zostało oprogramowanie ArcGIS Pro firmy ESRI, wyposażone w narzędzie „ścieżka optymalna” (ang. *optimal path*). Ścieżka optymalna jest to najbardziej korzystna trasa pomiędzy punktem początkowym a celem lub kilkoma punktami pośrednimi, uwzględniająca określone przez użytkownika parametry [7]. W zależności od kryteriów poszukiwania, optymalizacja może polegać na wyznaczeniu trasy najkrótszej, najszybszej, o najniższym koszcie realizacji w terenie, o największym zysku lub uwzględniającej zbiór kilku kryteriów [8]. Wyznaczenie ścieżki optymalnej leży u podstaw rozwiązania wielu zagadnień, między innymi w takich dziedzinach jak transport, logistyka, nawigacja i planowanie przestrzenne [6]. W omawianym przypadku kryterium poszukiwania będzie ścieżka o najniższym koszcie realizacji, rozumianym jako nakład inwestycyjny. Narzędzie operuje na danych rastrowych w związku z czym, źródłowe dane przestrzenne pozyskane w formacie wektorowym, należy przed analizą poddać konwersji do formatu rastrowego.

Podstawą do wyznaczenia trasy o najniższym nakładzie finansowym realizacji w terenie jest utworzenie dla obszaru analizy rastra, w którym każdy piksel obrazu przyjmuje wartość odpowiadającą kosztowi, jaki trzeba ponieść, przechodząc przez niego na kolejny piksel sąsiadujący. W omawianym przypadku będzie to polegało na przypisaniu pewnym zidentyfikowanym czynnikom terenowym, występującym na analizowanym obszarze, wartości odpowiadającej wpływowi danego czynnika na zwiększenie trudności pokonania dystansu między punktami pośrednimi lub końcowymi trasy. Określając wartości dla wszystkich zidentyfikowanych na danym terenie czynników, zdefiniowany zostaje raster powierzchni kosztów. W przypadku, gdy danemu czynnikowi zostanie przypisana wartość NoData (brak danych), jest on traktowany jako bariera niemożliwa do przekroczenia.

Przed utworzeniem ścieżki optymalnej, uzyskany raster powierzchni kosztów musi zostać przetworzony przez narzędzie „akumulacja odległości” (ang. *distance accumulation*), w wyniku czego wygenerowane zostają dwa produkty rastrowe, niezbędne do wyznaczenia trasy [5]. Pierwszym jest raster akumulacji odległości, rejestrujący dla każdego piksela obrazu zakumulowany najniższy koszt podróży do punktu źródłowego. Użytkownik może uwzględnić w obliczeniach numeryczny model terenu (NMT), czyli cyfrowy model, stanowiący informację o ukształtowaniu i rzeźbie terenu [2] oraz pionowy i poziomy współczynnik trudności pokonania terenu, odpowiadający np. wpływowi kierunku wiatru podczas jazdy na rowerze lub uwzględniający nachylenie zbocza, podczas wspinaczki na szczyt góry. Na

rys. 1 przedstawiono wpływ NMT na opracowany raster akumulacji kosztów, w kontekście wyboru ścieżki optymalnej między dowolnym węzłem źródłowym S1/S2, a przykładowym punktem D. Drugim produktem jest raster kierunku powrotnego (ang. *back direction raster*), rejestrujący dla każdej komórki obrazu kierunek powrotny do punktu źródłowego, obliczony w stopniach [3]. Następnie powyższe produkty pośrednie zostają użyte przez system GIS do wygenerowania ścieżki optymalnej, dla założonych parametrów.

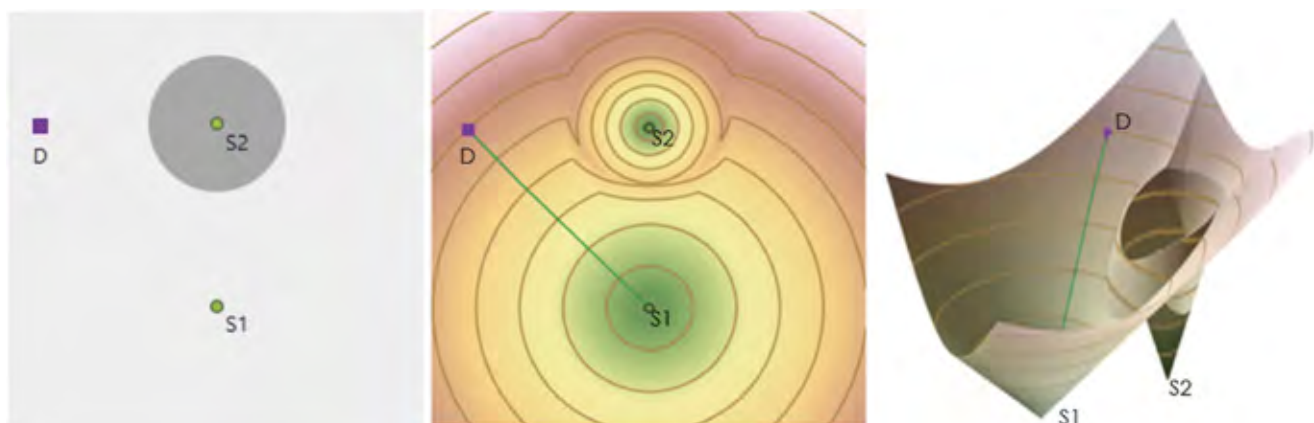
3. Zakres opracowania trasy i dane źródłowe

Na potrzeby prezentacji możliwości wyznaczenia trasy obiektu liniowego z zastosowaniem analizy kosztów, przyjęto następujący scenariusz: pomiędzy istniejącymi punktami węzłowymi, zlokalizowanymi na terenie miejscowości Wólka Radzyńska (pow. legionowski), Radzymin (pow. wołomiński) i Wyszków (pow. wyszkowski) należy zaprojektować rurociąg polietylenowy PE o średnicy 250 mm, przeznaczony do dystrybucji gazu pod ciśnieniem nieprzekraczającym 1.0 MPa. Długość w linii prostej między punktami węzłowymi Wólka Radzyńska – Radzymin wynosi ok. 3,1 km, natomiast odcinka Radzymin – Wyszków ok. 27,1 km. Obszar analizy (kolor czerwony) obejmuje teren powiatów legionowskiego, wołomińskiego i wyszkowskiego w województwie mazowieckim, a wskazane punkty węzłowe połączone są istniejącym gazociągami relacji Nieporęt – Wyszków, wybudowanym w latach osiemdziesiątych (rys. 2). Jest to obszar nizinny zlokalizowany w bezpośrednim sąsiedztwie Zalewu Żegrzyńskiego oraz dolin Bugu i Narwi.



Rys. 2. Zakres obszaru analizy oraz lokalizacja punktów węzłowych

Fig. 2. Extent of the analysis area and location of nodal points



Rys. 1. Wpływ numerycznego modelu terenu na wybór ścieżki optymalnej [4]

Fig. 1. Influence of the digital terrain model on the optimal path selection [4]

Zgodnie z danymi urzędu statystycznego obszar jest słabo zurbanizowany, przeważają tereny wiejskie, istniejąca zabudowa jest rzadka, skupiona głównie w okolicach miejscowości Nieporęt, Radzymin i Wyszki oraz w sąsiedztwie Zalewu Żegrzyńskiego i dopływających cieków wodnych. W zakresie analizy występują tereny chronione przyrodniczo m. in. obszary Natura 2000: Dolina Dolnego Bugu, Ostoja Nadbużańska, Krogulec, Wydmy Lucynowsko-Mostowieckie oraz Puszcza Biała.

Projektowanie i budowa obiektów liniowych jest procesem skomplikowanym, którego koszt całkowity jest trudny do oszacowania oraz niepewny do końca inwestycji. Głównym zadaniem jest znalezienie takiej lokalizacji dla projektowanego obiektu liniowego, która pozwoli na minimalizację kosztów jego budowy oraz ograniczenie możliwości występowania ryzyka na etapie realizacji i utrudnień w późniejszej eksploatacji. Mając na uwadze powyższe, określony został zakres i tematyka niezbędnych danych przestrzennych, obejmujący informację o lokalizacji:

- istniejącej zabudowy,
- terenów polnych i leśnych,
- wód płynących i stojących,
- dróg utwardzonych i nieutwardzonych,
- terenów kolei,
- terenów podmokłych,
- infrastruktury elektroenergetycznej,
- budowli i obiektów inżynierskich,
- obszarów chronionych przyrodniczo,
- obszarów składowisk, wyrobisk, zwałowisk i terenów kopalnianych.

Powyższe dane udostępniane są bezpłatnie przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii, do pobrania za pomocą serwisu Geoportal. Wszystkie określone warstwy stanowiły treść bazy danych obiektów topograficznych w skali 1:10000 (BDOT10k), aktualnej na dzień 31.12.2023. BDOT10k to wektorowa baza danych, zawierająca lokalizację przestrzenną obiektów topograficznych wraz z ich podstawową charakterystyką opisową, której szczegółowość odpowiada klasycznej mapie topograficznej w skali 1:10000 [1]. Z serwisu Geoportal pozyskany został również numeryczny model terenu. Dostępne do pobrania bezpłatne modele terenu, podzielone zostały ze względu na rozmiar oczka siatki modelu (1 x 1 m lub 5 x 5 m), datę pozyskania danych oraz układ współrzędnych wysokościowych. Na potrzeby opracowania pobrano 160 rastrow NMT z oczkiem siatki o rozdzielczości 1 x 1 m, które pozyskane zostały metodą skaningu laserowego w kwietniu 2011 r. Każdy pobrany raster był prostokątem o wymiarach ok. 2,3 x 2,1 km, w związku z czym konieczne było połączenie wszystkich danych częściowych w jeden spójny model, przy pomocy oprogramowania ArcGIS.

4. Generowanie ścieżki optymalnej

Po zaimportowaniu wszystkich pozyskanych materiałów źródłowych do oprogramowania ArcGIS Pro, dokonano ich szczegółowego przeglądu. Zakres danych przestrzennych, pochodzących z BDOT10k, obejmował pełną treść bazy dla terenu trzech powiatów, w związku z czym konieczne było odrzucenie niepotrzebnych informacji oraz filtracja i połączenie warstw niezbędnych do przeprowadzenia analizy. Przykładowo, z klasy obiektów „linie napowietrzne”, zawartej w kategorii obiektów „sieci uzbrojenia terenu”, za niezbędne uznano wyłącznie linie elektroenergetyczne wysokiego i najwyższego napięcia. Jest to podyktowane koniecznością zachowania odpowiednio 15 i 30 metrowej minimalnej odległości od skrajnych przewodów linii napowietrznych [9], co znacząco wpływa na możliwość usytuowania infrastruktury gazowej w ich bezpośrednim sąsiedztwie oraz sposób prowadzenia prac budowlanych. Jednocześnie przebudowa tych linii wraz ze zmianą lokalizacji, jest zbyt kosztowna i znacznie utrudniona, ze względu na ich znaczenie dla zasilania elektroenerge-

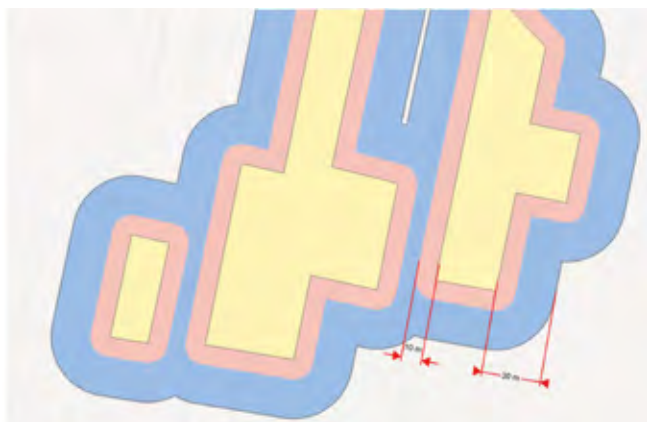
tycznego regionu. Mając na uwadze powyższe, odfiltrowano i usunięto informacje zbędne, a proces powtórzono dla kolejnych warstw, których finalnie uzyskano 18. W tab. 1 zestawiono dane o terenie, wybrane na potrzeby przeprowadzenia analizy.

Tabela 1. Zakres tematyczny wykorzystanych danych przestrzennych z BDOT10k
Table 1. Thematic range of spatial data used from BDOT10k

Nazwa kategorii klas obiektów	Nazwa klasy obiektów	Nazwa obiektu
Sieć wodna	Rzeka i strumień	Rzeka
	Kanał	Strumień potok lub struga
Sieć komunikacyjna	Jezdnia	Jezdnia autostrady
		Jezdnia drogi ekspresowej
		Jezdnia drogi głównej ruchu przyspieszonego
		Jezdnia drogi głównej
		Jezdnia drogi zbiorczej
		Jezdnia drogi lokalnej
		Jezdnia drogi dojazdowej
		Jezdnia drogi innej
	Droga	Autostrada
		Droga ekspresowa
		Droga główna ruchu przyspieszonego
		Droga główna
		Droga zbiorcza
		Droga lokalna
		Droga dojazdowa
		Droga inna
	Tor lub zespół torów	Tor kolejowy
Sieć uzbrojenia terenu	Linia napowietrzna	Linia elektroenergetyczna wysokiego napięcia
		Linia elektroenergetyczna najwyższego napięcia
Pokrycie terenu	Woda powierzchniowa	Woda morska
		Woda płynąca
		Woda stojąca
	Zabudowa	Zabudowa wielorodzinna
		Zabudowa jednorodzinna
		Zabudowa przemysłowo-składowa
		Zabudowa handlowo-usługowa
		Pozostała zabudowa
	Teren leśny i zadrzewiony	Las
		Zagajnik
		Zadrzewienie
	Roślinność trawiasta i uprawa rolna	Roślinność Trawiasta
	Uprawa na gruntach ornych	Uprawa na gruntach ornych
	Składowisko odpadów	Teren składowania odpadów komunalnych
		Teren składowania odpadów przemysłowych
	Wyrobisko i zwałowisko	Wyrobisko
	Pozostały teren niezabudowany	Zwałowisko
		Teren pod urządzeniami technicznymi i budowlanymi
		Teren przemysłowo-składowy
Tereny chronione	Obszar Natura2000	Obszar Natura2000
	Park krajobrazowy	Park krajobrazowy
	Rezerwat	Rezerwat
Budynki, budowle i urządzenia	Budowla inżynierska	Estakada
		Kładka dla pieszych
		Most
		Przejście podziemne dla pieszych
		Przepust
		Tunel
		Wiadukt
Obiekty inne	Budowla ziemna	Wał przeciwpowodziowy lub grobla
	Mokradło	Bagno
	Szuwary	Teren podmokły
		Szuwary

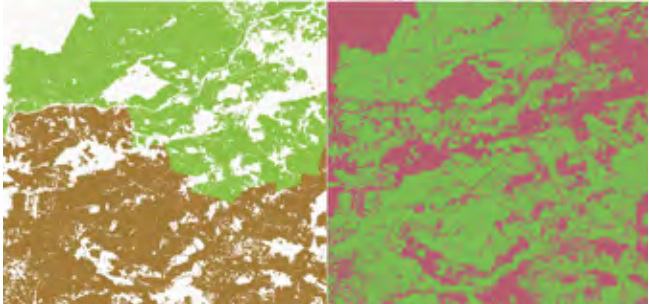
Następnie przystąpiono do opracowania rastra kosztów dla analizowanego obszaru, którego pierwszym etapem było dostosowanie wyselekcjonowanych danych do wymogów analizy. Część warstw została poddana działaniu narzędzia „bufor”, w celu wyznaczenia stref wpływu istniejących obiektów na możliwość lokalizacji w ich sąsiedztwie gazociągu. Na rys. 3 przedstawiony został efekt działania

tego narzędzia, na potrzeby utworzenia z klasy obiektów „zabudowa” (kolor żółty), dwóch warstw stanowiących składową rastra kosztów. Pierwsza warstwa powstała w wyniku utworzenia buforu o szerokości 10 metrów, obejmującego obszary przeznaczone do wyłączenia z analizy, ze względu na istniejącą zabudowę (kolor czerwony). Druga warstwa utworzona przez bufor o szerokości 30 metrów, określała obszar najbliższego sąsiedztwa zabudowy oraz jej potencjalnego rozwoju (kolor niebieski), co wpływa na zwiększone ryzyko lokalizacji inwestycji w tym buforze. W drugiej kolumnie tab. 2 wskazane zostały przyjęte wartości buforów dla każdej z warstw składowych rastra kosztów.



Rys. 3. Efekt działania narzędzia „bufor” na przykładzie klasy obiektów „zabudowa”
Fig. 3. Result of using the „buffer” tool on the example of “buildings” object class

Przygotowane dane poddano transformacji z formatu wektorowego na rastrowy. Dla każdej warstwy w zakresie analizy utworzony został raster o rozmiarze piksela 1 x 1 m. Następnie przystąpiono do przypisania kosztu wszystkim obiektom odwzorowanym na rastрах. W tym celu każdy obraz poddano procesowi reklasyfikacji, w którym pikselem, odwzorowującym na rastrze lokalizację obiektów w terenie, nadane zostały nowe wartości wskazane w tab. 2. Na rys. 4 przedstawiono efekt reklasyfikacji warstwy „pola i łąki”. Każdemu pikselowi, odwzorowującemu lokalizację terenów polnych, przypisany został koszt o wartości 10 (kolor zielony), a pustym pikselem obrazu, które nie reprezentowały obiektów warstwy, nadana została wartość 0 (kolor bordowy).

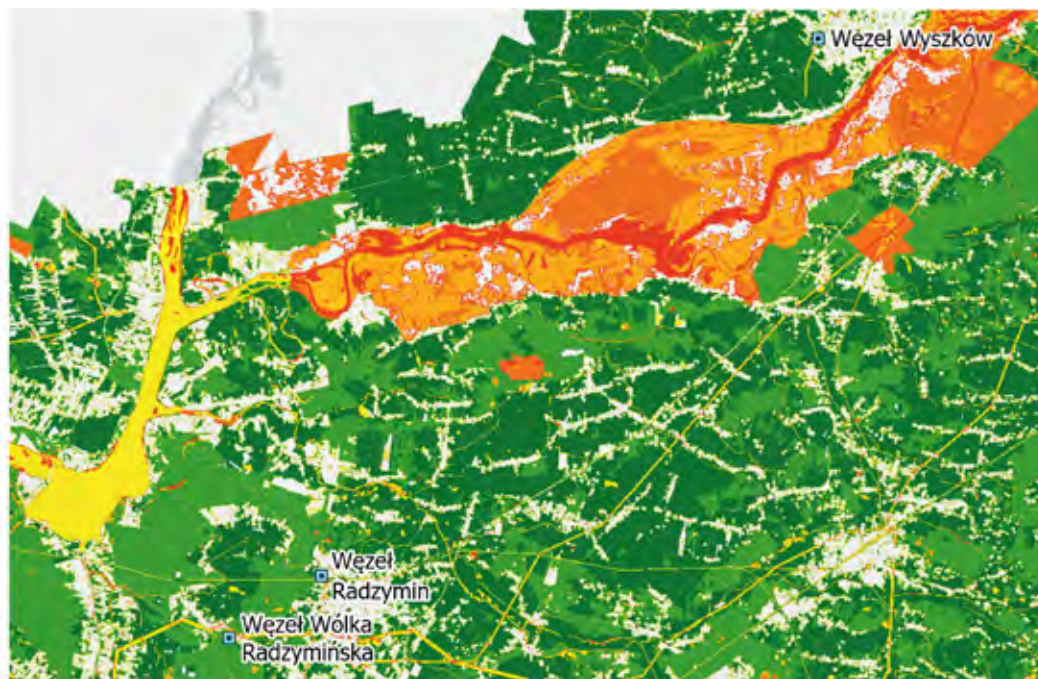


Rys. 4. Raster warstwy „pola uprawne i łąki” przed i po reklasyfikacji
Fig. 4. „Farmlands and meadows” layer raster before and after reclassification process

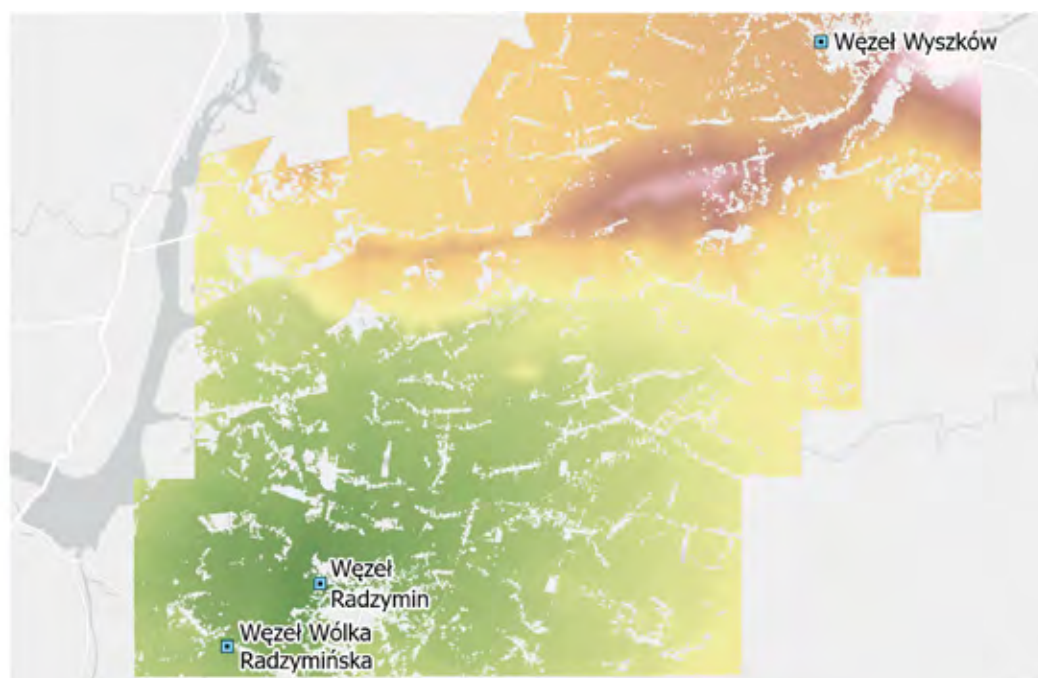
Proces reklasyfikacji przeprowadzono dla każdej z 18 warstw, a następnie przystąpiono do połączenia przygotowanych danych i utworzenia rastra kosztów. Zastosowane zostało do tego narzędzie „kalkulator rastrow” (ang. *raster calculator*), pozwalające na

Tabela 2. Kryteria reklasyfikacji kosztów oraz szerokości przyjętych buforów
Table 2. Criteria of the cost reclassification and width of applied buffers

Wartość	Nazwa Warstwy	Bufor na stronę [m]	Uzasadnienie dobranej wartości
10	Pola uprawne i łąki	-	Preferowany teren lokalizacji gazociągu
30	Lasy	-	Preferowany teren lokalizacji gazociągu, koszt zwiększony ze względu na konieczność wykonania wycinki drzew
	Drogi nieutwardzone	zgodnie z atrybutami	Możliwość przekroczenia kolizji wykopem otwartym
50	Sąsiedztwo zabudowy	30,0	Obszary położone w odległości 30,0 metrów od istniejącej zabudowy. Koszt zwiększony ze względu na możliwość lokalizacji nowej zabudowy na przedmiotowym terenie, wpływ na wartość nieruchomości do późniejszej wypłaty odszkodowań
	Drogi utwardzone	zgodnie z atrybutami	Konieczność przekroczenia kolizji metodą bezwykopową
70	Kolej	15,0	Konieczność przekroczenia kolizji metodą bezwykopową oraz pozyskania stosownych zgód lub odstępcstw w zakresie lokalizacji gazociągu na terenie kolejowym
90	Tereny podmokłe	15,0	Teren niepreferowany do lokalizacji gazociągu. Zwiększony koszt prac budowlanych na przedmiotowym obszarze ze względu na konieczność odwodnienia wykopów. Utrudnienia późniejszej eksploatacji oraz możliwość wypłylenia gazociągu
	Wody stojące	10,0	Konieczność przekroczenia kolizji metodą bezwykopową oraz uzyskania szeregu zgód wodnoprawnych
	Wody płynące	10,0	Konieczność przekroczenia kolizji metodą bezwykopową oraz uzyskania szeregu zgód wodnoprawnych
	Linie wysokiego napięcia	17,5	Konieczność przekroczenia kolizji metodą bezwykopową, ograniczenie możliwości lokalizacji gazociągu w przebiegu równoległym – min. 15,0 m od skrajnych przewodów, utrudnione prowadzenie prac pod liniami wysokiego napięcia
	Linie najwyższego napięcia	33,0	Konieczność przekroczenia kolizji metodą bezwykopową, ograniczenie możliwości lokalizacji gazociągu w przebiegu równoległym – min. 30,0 m od skrajnych przewodów, utrudnione prowadzenie prac pod liniami najwyższego napięcia
110	Tereny chronione (środowisko)	-	Teren niepreferowany do lokalizacji gazociągu. Obszar chroniony, konieczność rozszerzonej analizy wpływu na środowisko, ryzyko protestów i oporu społecznego
	Wały przeciwpowodziowe	10,0	Konieczność przekroczenia kolizji metodą bezwykopową oraz uzyskania szeregu zgód wodnoprawnych
NoData (bariera)	Zabudowa	10,0	Teren wyłączony z analizy ze względu na trudność w lokalizacji gazociągu na terenach zabudowanych
	Składowisko odpadów	-	Teren wyłączony z analizy ze względu na utrudnienia w późniejszej eksploatacji spowodowane możliwością składowania materiałów/odpadów na gazociągu
	Wyrobnisko i zwalowisko	-	Teren wyłączony z analizy ze względu na eksploatację górniczą oraz ryzyko ruchów masowych
	Budowla inżynierska	10,0	Teren wyłączony z analizy ze względu na zagrożenie dla eksploatacji budowli inżynierskiej w przypadku awarii gazociągu
	Pozostały teren niezabudowany	-	Teren wyłączony z analizy ze względu na zlokalizowane na nim urządzenia techniczne i składowiska



Rys. 5. Raster kosztów
Fig. 5. Cost raster



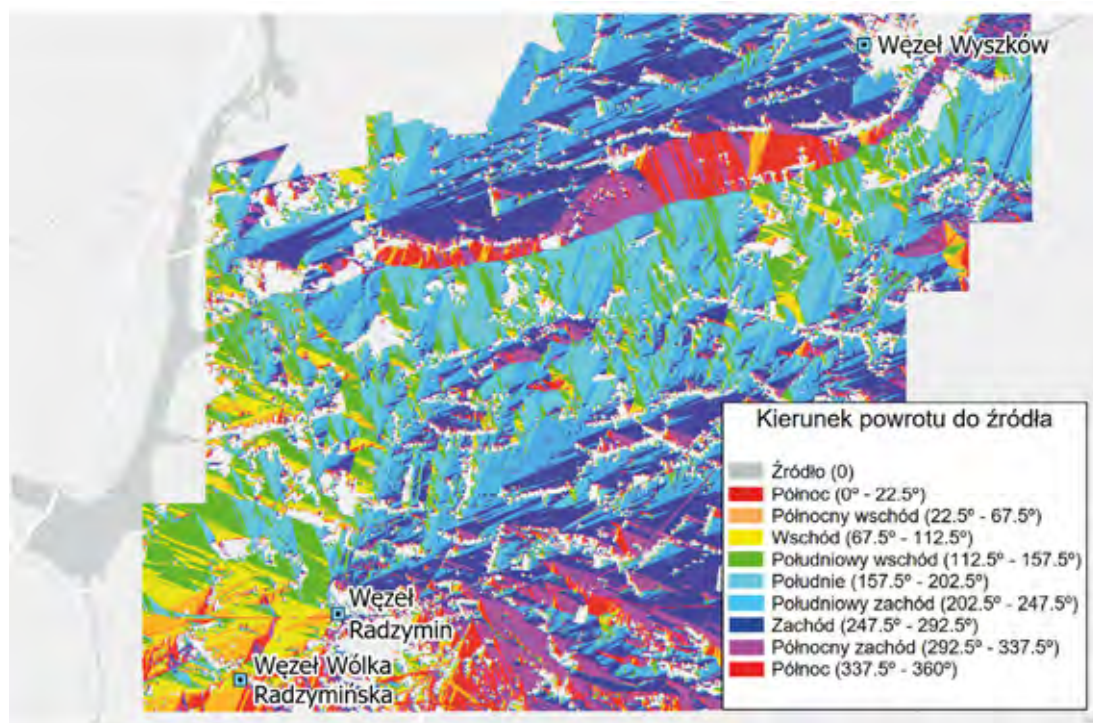
Rys. 6. Raster kosztów zakumulowanych
Fig. 6. Accumulative cost raster

dokonywanie działań matematycznych na obrazach. Każdy z obrazów dodano do siebie w kolejności rosnącej, zaczynając od warstw o najniższym przypisanym koszcie. Jak zostało to już wspomniane w rozdziale 2, obiekty o wartości NoData są traktowane przez algorytm jako bariera nie do przekroczenia, ze względu na brak danych dla przedmiotowego terenu. Dodanie do dowolnego obrazu warstwy o wartości NoData, skutkuje wycięciem wszystkich danych w miejscach lokalizacji jej obiektów, łącznie z danymi innych warstw o zdefiniowanych wartościach. Na rys. 5 przedstawiono uzyskany raster kosztów dla opracowywanego zakresu terenu, kolor szary reprezentuje utworzone bariery. Ostatecznie, przy pomocy narzędzia „Set Null” odfiltrowano wszystkie piksele o wartościach zerowych, które mogłyby wpływać na błędne wyniki analizy.

Przygotowany zestaw danych źródłowych, w skład którego wchodził utworzony raster kosztów, warstwa lokalizacji punktów węzłowych oraz numeryczny model terenu, opracowano z zastosowaniem narzędzia akumulacji odległości. Wygenerowany został

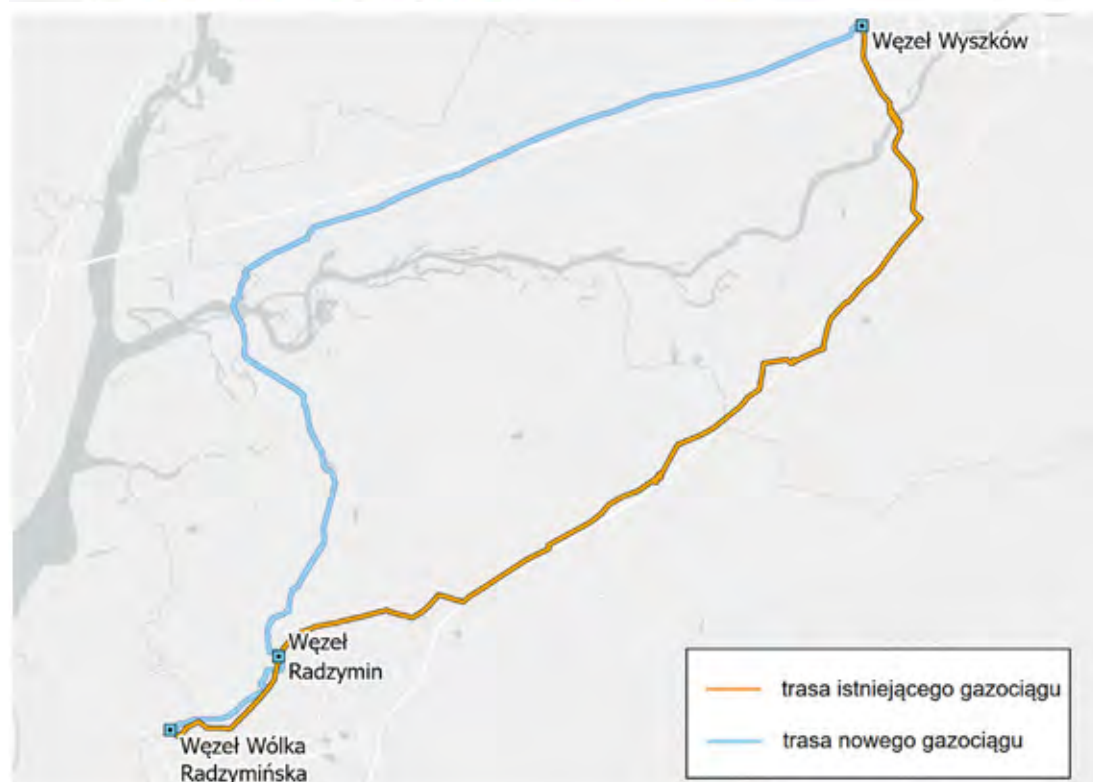
raster kosztów zakumulowanych (rys. 6) oraz kierunku powrotnego (rys. 7). Nie zdefiniowano pionowego i poziomego współczynnika trudności pokonania terenu, ani innych dodatkowych parametrów wpływających na wynik końcowy analizy.

Warto zwrócić uwagę, że model NMT użyty do analizy akumulacji dystansu, może zostać również wykorzystany w procesie tworzenia rastra kosztów. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu narzędzia analizy spadków (ang. *slope*), służącego do określenia szybkości zmiany wysokości dla każdej komórki modelu [10]. Pozwala ono na weryfikację obszaru opracowania pod kątem występującego nachylenia powierzchni terenu oraz identyfikację miejsc niepreferowanych do lokalizacji gazociągu, ze względu na występowanie dużych spadków terenu. Uwzględnienie powyższego czynnika w rastrze kosztów, może przyczynić się do zmniejszenia na etapie budowy ilości koniecznych do zastosowania łuków w płaszczyźnie pionowej oraz odsunięcia inwestycji od obszarów potencjalnego występowania ruchów masowych gruntu.



Rys. 7. Raster kierunku powrotnego

Fig. 7. Back-direction raster



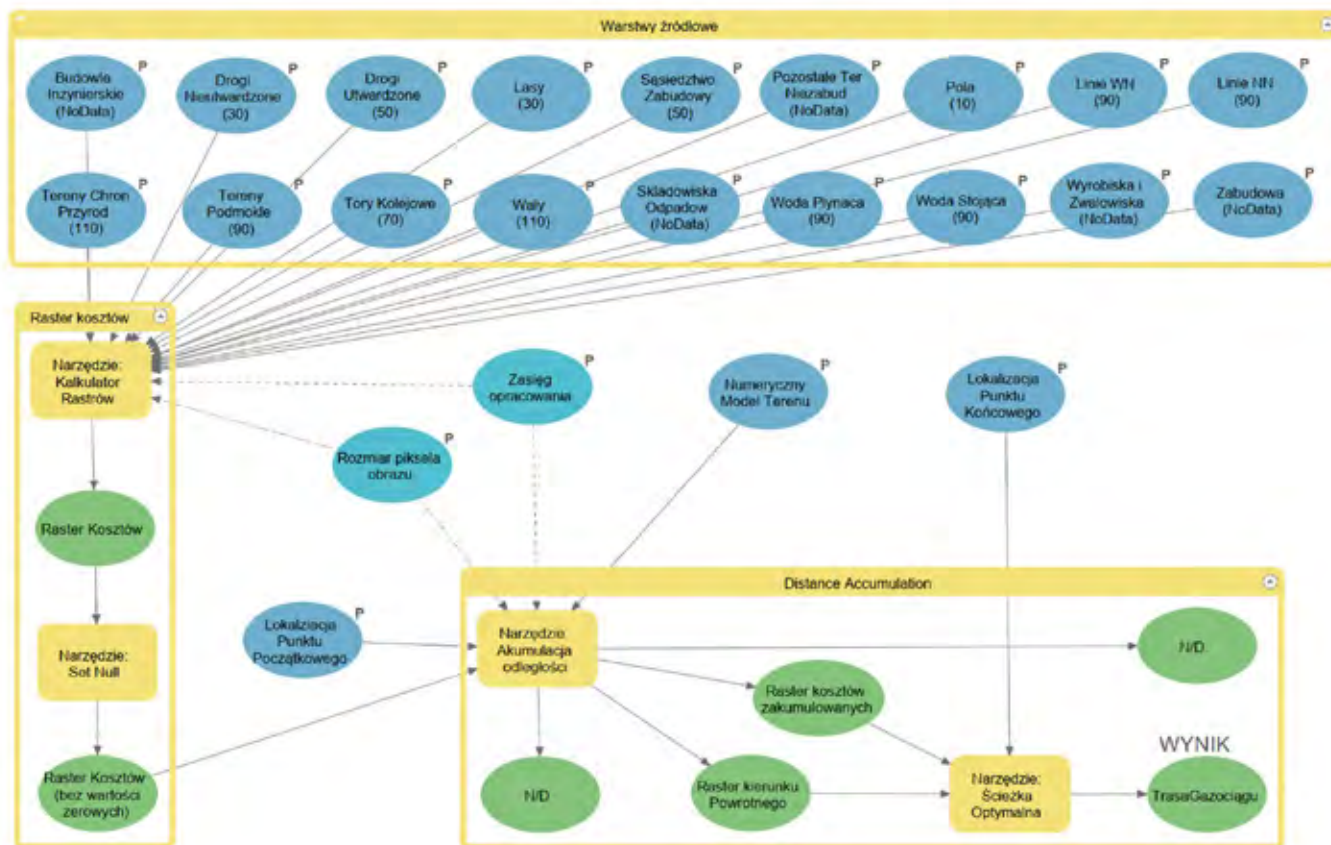
Rys. 8. Opracowana trasa nowego gazociągu oraz przebieg sieci istniejącej

Fig. 8. Calculated route of the new gas pipeline and the route of the existing network

Ostatnim krokiem procesu było wygenerowanie trasy projektowanego gazociągu PE DN 250 o najniższym koszcie lokalizacji, z wykorzystaniem narzędzia ścieżki optymalnej. Na rys.8 zaprezentowano trasę istniejącego oraz nowego gazociągu średniego podwyższonego ciśnienia, łączącego miejscowości Wólka Radzyńska, Radzymin i Wyszków.

W celu zachowania klarowności przetwarzania danych oraz ułatwienia przeprowadzenia kolejnych analiz dla bieżącego lub nowego zakresu terenu, przygotowany został model automatycznej analizy w aplikacji ModelBuilder. Jest to moduł wbudowany w system ArcGIS, pozwalający na wizualizację wszystkich procesów, przeprowadzonych podczas analizy w postaci schematu bloko-

wego, określającego rodzaj oraz kolejność zastosowania narzędzi geoprzetwarzania, koniecznych do uzyskania oczekiwanego wyniku końcowego. Dla każdej warstwy przygotowano indywidualną ścieżkę dostosowania danych do wymaganej formy, poprzez zdefiniowanie parametrów i rodzaju niezbędnych procesów, np. selekcji, buforowania, konwersji do formatu rastrowego i reklasyfikacji. Finalny model analizy na potrzeby uzyskania ścieżki optymalnej, wymagał przeprowadzenia 60 operacji na danych wejściowych, a całkowity czas jej opracowania wyniósł ok. 80 minut. Na rys. 9 przedstawiono uproszczony model analizy, pomijający dostosowanie warstw danych źródłowych do wymaganej formy, ze względu na stopień rozbudowania.



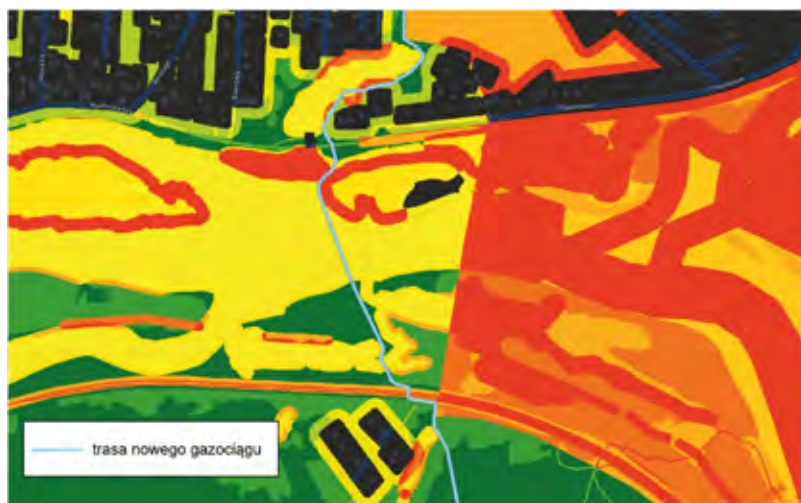
Rys. 9. Uproszczony schemat opracowania danych w aplikacji ModelBuilder

Fig. 9. Simplified data processing scheme in the ModelBuilder application

5. Analiza wygenerowanej trasy

W wyniku analizy danych dla obszaru o powierzchni 878 km², opracowana została koncepcyjna trasa gazociągu średniego podwyższonego ciśnienia o średnicy 250 mm, zasilającego miejscowości Wólka Radzyńska, Radzymin i Wyszaków, o łącznej długości 39,81 km. Wygenerowana trasa całkowicie zmieniła przebieg, w stosunku do lokalizacji istniejącego gazociągu o długości 38,26 km, który został wybudowany w latach osiemdziesiątych XX wieku na terenach wykorzystywanych wówczas jako pola uprawne. Rozwój obszaru aglomeracji warszawskiej, poprawa komunikacji, w tym budowa trasy szybkiego ruchu S8, a także lokalizacja terenów chronionych Natura 2000 w rejonie doliny Bugu, znacznie zwiększają koszty lokalizacji inwestycji w przebiegu równoległym. Powyższe czynniki wymuszają konieczność przesunięcia nowego gazociągu w kierunkach mniej zurbanizowanych w zachodniej i północnej części obszaru, co wpływa na wydłużenie jego trasy o 1,55 km, co stanowi ok. 4% długości rurociągu istniejącego.

Bezpośredni wpływ na wyznaczoną algorytmicznie lokalizację gazociągu miała wartość kosztu, nadana każdej z analizowanych warstw. Modyfikacja wielkości przyjętych nakładów finansowych może przyczynić się do zmiany proponowanego sytuowania nowej sieci. Przykładem jest warstwa obszarów chronionych przyrodniczo, której wartość została celowo podniesiona, z zamysłem ograniczenia wpływu inwestycji na środowisko, co jednocześnie w największym stopniu wpłynęło na wyznaczenie miejsca przekroczenia rurociągiem rzeki Bug w zachodniej części obszaru. Obniżenie kosztu lokalizacji gazociągu na tych terenach, mogłoby wpłynąć na zmianę przebiegu



Rys. 10. Trasa nowego gazociągu w rejonie przekroczenia rzeki Bug

Fig. 10. The route of the new gas pipeline in the area of crossing the Bug river

opracowanej trasy i lokalizację gazociągu w śladzie istniejącej sieci, bądź utworzenie nowego wariantu hybrydowego.

Wygenerowana automatycznie trasa zawierała też kilka istotnych niedoskonałości. W rejonie przekroczenia Bugu linia gazociągu została wielokrotnie załamana, co wynika z występowania na tym terenie kilku rodzajów obiektów o znacznej różnicy wartości kosztu, m.in: wód, wałów przeciwpowodziowych, pól uprawnych i zabudowy. Narzędzie ścieżka optymalna, dążąc do minimalizacji kosztów, dokonało wielokrotnego załamania trasy, zwiększając ilość łuków w płaszczyźnie poziomej, często przebiegając po granicy obiektu terenowego o wyższym nakładzie finansowym (rys. 10).

W zastosowanym oprogramowaniu GIS nie ma możliwości wprowadzenia takich kryteriów, aby narzędzie ścieżki optymalnej, obliczając trasę o najniższym koszcie, dążyło do minimalizacji liczby łuków oraz automatycznie definiowało tereny, które wymagają zastosowania długich przekroczeń bezwykopowych.

Niewątpliwą zaletą zastosowania ścieżki optymalnej, pod kątem planowania trasy sieci gazowej jest to, że dążąc do minimalizacji kosztów algorytm zawsze stara się pokonać przeszkodę terenową pod kątem prostym. Przykładowo, w przypadku skrzyżowania projektowanej trasy z drogą utwardzoną (koszt: 50) zlokalizowaną na terenach uprawnych (koszt: 10) pod innym kątem niż 90°, wzrasta długość przekroczenia droższego obiektu, a co za tym idzie całkowity koszt budowy (rys. 11).

Opracowana trasa może zostać poddana korektom, w celu dostosowania jej do obowiązujących w Polsce przepisów techniczno-budowlanych dla sieci gazowych. Należy również dokonać analizy możliwości zmiany trasy gazociągu w rejonach „wąskich gardel terenowych”, gdzie pojawienie się nowej zabudowy lub innych obiektów uniemożliwi realizację inwestycji. Stosowne zmiany pozwolą na minimalizację ryzyka zaistnienia opóźnień w harmonogramach, wynikających z konieczności znalezienia nowego wariantu trasy na późniejszych etapach oraz pozyskania zamiennych decyzji administracyjnych.



Rys. 11. Przykładowe przekroczenie drogi ul. Wólka Somiankowska we wsi Michalin
Fig. 11. Example of crossing the road Wólka Somiankowska St. in Michalin village

6. Podsumowanie

Trasowanie rurociągów na podstawie otwartych danych przestrzennych, z zastosowaniem narzędzia ścieżki optymalnej, dostępne w systemach GIS, pozwala w sposób przybliżony zwizualizować w terenie możliwą lokalizację projektowanego obiektu liniowego o najniższym koszcie budowy. Jednocześnie należy zwrócić uwagę, że przedstawiona metodyka pozwala na szybką oraz względnie taną analizę bardzo dużych obszarów terenu, w celu połączenia wielu punktów węzłowych ścieżkami o najniższym koszcie lokalizacji w terenie.

Długość wygenerowanego algorytmicznie wariantu przebiegu gazociągu średniego podwyższonego ciśnienia, pomiędzy miejscowościami Wólka Radzyńska, Radzymin i Wyszaków, wyniosła 39,81 km i jest dłuższa o 1,55 km (ok. 4%) od trasy istniejącego gazociągu, który został zaprojektowany około 40 lat temu. Trasa o najniższym koszcie uzyskana w procesie analizy danych, odbiega całkowicie od istniejącego przebiegu sieci gazowej. Wynika to z postępującej urbanizacji obszaru w rejonie istniejącej sieci oraz mniejszego rozwoju zabudowy w rejonie zachodnim i północnym.

Podstawą do przeprowadzenia wiarygodnej analizy, wykorzystującej automatyczne algorytmy trasowania obiektu liniowego, jest przypisanie wszystkim czynnikom terenowym, występującym

w obszarze opracowania, takich wartości kosztów, które w sposób jednoznaczny odzwierciedlą preferencje inwestora w zakresie usytuowania sieci. Dzięki temu, już na etapie przedprojektowym, możliwe jest wyeliminowanie wariantów tras trudnych do zrealizowania oraz wstępne określenie wielkości możliwych nakładów inwestycyjnych na budowę rurociągu.

Możliwość realizacji obiektu liniowego w uzyskanej w wyniku analizy trasie, jest zależna przede wszystkim od aktualności otwartych danych przestrzennych takich jak baza danych BDOT10k. Kilkumiesięczna nieaktualność danych źródłowych ma potencjał zmiany opracowanej ścieżki albo istotnego jej wydłużenia, ze względu na rozwój zabudowy mieszkalnej. Na potrzeby niniejszego artykułu, nie zostały uwzględnione informacje z urzędów, dotyczące wydanych decyzji o warunkach zabudowy i pozwoleń na budowę, co może prowadzić do konieczności korekty trasy.

W analizie nie uwzględniono danych, dotyczących charakterystyki geologicznej i hydrogeologicznej, a zwłaszcza występowania gruntów słabonośnych i poziomu wód podziemnych na obszarze opracowania. Wskazane braki w danych wpływają na zwiększenie ryzyka wykonalności trasy, przy akceptowalnym nakładzie finansowym, co predysponuje stosowanie zaproponowanej metody trasowania wyłącznie na koncepcyjnych lub wstępnych etapach projektowania inwestycji. Tym niemniej dane geologiczne mogą być uwzględnione w modelu automatycznej analizy w aplikacji ModelBuilder, o ile zostaną pozyskane.

Utworzenie rastra kosztów, w oparciu o płatne dane przestrzenne, pochodzące z zasobu prowadzonego przez Powiatowe Ośrodki Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej oraz inne instytucje udostępniające komercyjnie przydatne materiały źródłowe, ma potencjał znacznego zwiększenia prawdopodobieństwa realizacji inwestycji w wygenerowanej algorytmicznie trasie.

Oszczędność czasowa wynikająca z automatyzacji procesu trasowania, postępujący rozwój algorytmów wyznaczania ścieżki optymalnej oraz zwiększająca się ilość, dokładność i aktualność otwartych danych przestrzennych, pozwalają założyć, że zaprezentowana w artykule metoda analizy pozwoli wkrótce na uzyskanie jeszcze dokładniejszych wyników końcowych.

LITERATURA

- [1] Baza danych obiektów topograficznych – Główny Urząd Geodezji i Kartografii. <<https://www.geoportal.gov.pl/pl/dane/baza-danych-obiektow-topograficznych-bdot10k/>> (dostęp: 30.03.2025).
- [2] Butowt J., Kaczyński R., 2010. *Fotogrametria*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa.
- [3] Connect locations with optimal paths. <<https://doc.arcgis.com/en/allsource/latest/analysis/geoprocessing-tools/spatial-analyst/connect-locations-with-optimal-paths.htm>> (dostęp: 30.03.2025).
- [4] Distance accumulation algorithm <<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/distance-accumulation-algorithm.htm>> (dostęp: 30.03.2025).
- [5] How distance accumulation works. <<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-distance-accumulation-works.htm>> (dostęp: 30.03.2025).
- [6] Kozieł G., 2014. „Algorytmy wyznaczania optymalnej trasy przejazdu”. *Logistyka* 3/ (3):206-3212.
- [7] Mitchell J. S. B., 2000. Chapter 15: *Geometric Shortest Path and Network Optimization*. Sack J. – R., Urrutia J. (red.) Handbook of Computational Geometry, North-Holland Pub. Co. 633-701.
- [8] Roohnavazfar M., Manerba D., De Martin J. C., Tadei R., 2019. *Optimal path in multi-stage stochastic decision networks*. Operation Research Perspectives Volume 6 (2019), 100124.
- [9] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 6 lutego 2003 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas wykonywania robót budowlanych,
- [10] Witek M., Wlazło P., 2022. „Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych w procesie budowy rurociągów lądowych”. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* (7): 2-7. 7ST-IG