

Wykorzystanie analiz sieciowych GIS w planowaniu lokalizacji przystanków komunikacji miejskiej na przykładzie miasta Brzeg Dolny¹

JAKUB KACZOROWSKI

Politechnika Warszawska, plac Politechniki 1, 00-661 Warszawa, Koło Naukowe Gospodarki Przestrzennej, tel. 508 077 226, e-mail: jkkaczorowski@gmail.com

Streszczenie: Artykuł porusza temat analiz przestrzennych i technologii GIS oraz możliwości ich wykorzystania w projektowaniu optymalnej lokalizacji przystanków komunikacji miejskiej. Część projektu bada skupia się na wyznaczeniu liczby ludności poszczególnych budynków mieszkalnych miasta z wykorzystaniem danych BDOT10k, ustaleniu lokalizacji najważniejszych generatorów ruchu i stworzeniu warstwy sieciowej z drogami i ciągami pieszymi. Na kolejnym etapie wykonano przestrzenne analizy sieciowe (analizy alokacji) w celu wyznaczenia optymalnych lokalizacji przystanków, badając ich pieszą dostępność komunikacyjną. Wykonane analizy dowiodły, że technologia GIS może być perspektywicznym narzędziem przy projektowaniu optymalnej lokalizacji przystanków.

Słowa kluczowe: analizy przestrzenne, analizy sieciowe, dostępność komunikacyjna, transport publiczny, Brzeg Dolny.

Wprowadzenie do problemu

Przez ostatnie dziesięciolecie miasta stały się podstawowym środowiskiem funkcjonowania człowieka. Coraz szybszy napływ ludności, przyspieszenie tempa i różnorodności życia oraz związana z tym zwiększona mobilność powodują, że do prawidłowego funkcjonowania organizmu miejskiego wymagane jest nie tylko odpowiednie funkcjonalnie zagospodarowanie przestrzeni, ale także efektywne powiązanie jej komunikacją. W sytuacji wzmożonej urbanizacji władze miast muszą zapewnić odpowiednią funkcjonalność systemów transportowych, która nie tylko pozwoli na swobodne dotarcie do miejsca zamieszkania, pracy czy koncentracji usług, ale także na to, aby odbywało się to w sposób niezawodny, szybki i dogodny, nie ograniczając wolności jednostki do przemieszczania się w przestrzeni i realizacji jej celów.

W sytuacji coraz większej kongestii w układach komunikacyjnych, a jednocześnie rosnącej świadomości potrzeby zrównoważonego rozwoju i mobilności, coraz częściej jako najbardziej wydajny, a jednocześnie ekologiczny i spełniający funkcje socjalne, uznaje się transport publiczny. Pozwalając na ograniczenie zatłoczenia ulic oraz zmniejszenie komunikacji indywidualnej, przy jednoczesnej możliwości kształtowania za jego pomocą rozwoju miasta, jest on jedną z metod walki z bolączkami współczesnych miast – brakiem dostępności komunikacyjnej, zatorami drogowymi czy rozlewaniem się miast. Aby układ transportu zbiorowego mógł funkcjonować jak najskuteczniej, należy w odpowiedni sposób, uwzględniając lokalne uwarunkowania, układ ten

zaplanować, a następnie utrzymać jego funkcjonowanie. W tym celu warto korzystać z narzędzi, które mogą to ułatwić.

Technologia GIS i jej wykorzystanie w transporcie

Aby zapewnić prawidłowe funkcjonowanie transportu, coraz częściej wykorzystuje się systemy informacji geograficznej (GIS) i wykonywane z ich pomocą analizy przestrzenne. Zarówno przedsiębiorstwa prywatne zajmujące się przewozem towarów i osób, jak i administracja publiczna z jednostkami odpowiedzialnymi za transport publiczny, wykorzystują analizy geograficzne do wytworzenia cennych informacji, które posłużą im później do podjęcia decyzji. Dzięki pozyskaniu, powiązaniu i wykorzystaniu danych przestrzennych dotyczących różnych gałęzi życia w mieście, a następnie użyciu odpowiednich funkcji oprogramowania, decydenci są w stanie – korzystając z otrzymanych wyników – wybierać optymalne rozwiązania zarówno z punktu widzenia organizatora transportu, jak i mieszkańca.

Technologia GIS pozwala w ten sposób ustalić w fazie projektowania, gdzie najlepiej zlokalizować przystanki komunikacji publicznej, jakie będzie ich obciążenie i potrzebny tabor oraz najkorzystniejsza trasa przebiegu linii komunikacyjnej, a w trakcie funkcjonowania usługi transportowej umożliwia śledzenie pojazdów, przekazywanie informacji o transporcie publicznym czy wyszukiwanie dopasowanych pod użytkownika sposobów przejazdu. Artykuł pokazuje wykorzystanie technologii GIS w fazie projektowania lokalizacji przystanków komunikacji miejskiej, demonstrując na realnym przykładzie małego miasta, jak można wprowadzać w życie przyjętą metodykę.

W przypadku zastosowań do działań tzw. miękkich, jak planowanie przebiegu trasy transportu publicznego, znajdowanie lokalizacji najbliższego obiektu, szukanie optymalnej lokalizacji nowego obiektu czy analiza dostępności komunikacyjnej, stosuje się przestrzenne analizy sieciowe. Jest to typ analiz przestrzennych w systemach informacji przestrzennej, dla których podstawą działania są dane, na które składają się dwa zbiory tworzące sieć – węzły (wierzchołki) i ich połączenia, czyli nieprzecinające się linie łamane. W praktyce siecią są odpowiednio przekształcone zbiory danych dotyczące przebiegu ulic, sieci uzbrojenia terenu czy tras komunikacji miejskiej i reprezentuje ona wszelkie możliwe trasy połączeń [1, s. 271]. Analiza sieci utworzonej zgodnie z tym modelem ma na celu rozwiązanie określonego zadania, jak np. wyznaczenie trasy najszybszego przejazdu w sieci drogowej. W oprogramowaniu ArcGIS

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2021.

Pro, zastosowanym w przedstawianych tu badaniach, do rozwiązywania analiz sieciowych wykorzystuje się algorytm Dijkstry, który bazuje na teorii grafów.

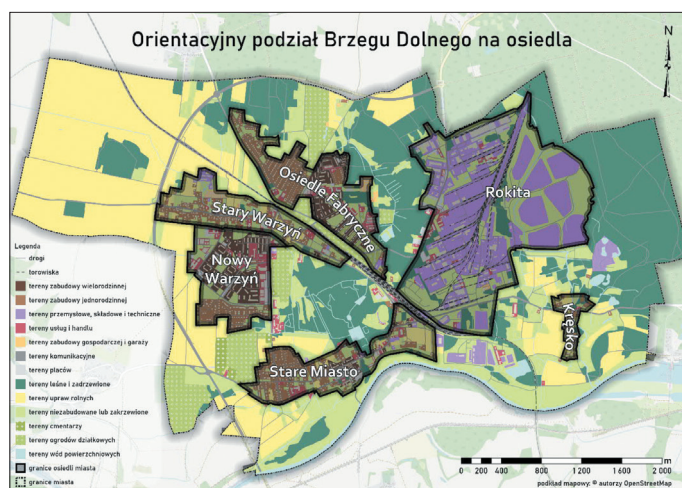
Po opracowaniu sieci w oprogramowaniu ArcGIS Pro można wykonać szereg analiz sieciowych. Jednym z rodzajów analiz sieciowych, które nie są zwykle wykorzystywane w transporcie, natomiast będą wykorzystane prototypowo w planowaniu transportu w tej pracy, są analizy alokacji (lub lokacji-alokacji, *Location-Allocation*). Ten typ analiz pozwala na wskazanie optymalnych lokalizacji obiektów w taki sposób, aby przydzielić do nich popyt w najbardziej efektywny sposób, zgodnie z typem problemu i określonymi kryteriami, np. aby wskazane obiekty objęły jak największą liczbę potencjalnych użytkowników lub, by zmaksymalizować udział obiektu w rynku. W analizach tych podaje się potencjalne nowe lokalizacje dla obiektu, wskazuje się w większości przypadków również maksymalną odległość lub czas, dla którego algorytm może, licząc po sieci drogowej według wskazanego środka transportu, przydzielić punkty popytu od nowego obiektu. W przypadku większości rodzajów tej analizy uzyskuje się także optymalną liczbę obiektów, które spełnią postawione wymagania. W wyniku analizy uzyskiwane są optymalne lokalizacje dla nowych obiektów, przypisując do każdego obiektu wszystkie punkty popytu, które mógłby on obsługiwać.

Aby optymalnie zaprojektować linię komunikacyjną, wymagana jest znajomość infrastruktury transportowej obszaru, położenia generatorów ruchu i celów oraz potrzeb i motywacji podróżnych [3]. Artykuł skupia się na etapie dotyczącym wskazania lokalizacji przystanków – miejsc wymiany pasażerskiej. Przy rozmieszczaniu przystanków należy z jednej strony uwzględnić potrzeby pasażerów, a więc przystanki powinny być zlokalizowane jak najbliżej celu podróży i miejsca zamieszkania, w miejscach o dogodnym dostępie dla pasażerów, jednak odległość między przystankami powinna być na tyle duża, by utrzymać wysoką prędkość przejazdu pojazdu – każdy dodatkowy przystanek to utrata średnio około 30 sekund w czasie przejazdu [5], a także zwiększenie zużycia energii. Odległość między przystankami powinna wynikać ze struktury urbanistycznej miasta, a optymalna maksymalna odległość od przystanku danego środka komunikacji miejskiej do celu jest przedmiotem licznych badań, jednak najczęściej podaje się, że zainteresowanie transportem publicznym drastycznie spada wśród osób, które mają do przejścia na przystanek więcej niż 400 metrów, dochodząc do zera dla odległości 700 metrów [4, s. 250], natomiast mniejsza odległość niż 400 metrów jest szeroko akceptowana [2]. Tak więc przystanki należy lokalizować tak, aby dostępność komunikacyjna (liczba objętych obiektów) w obszarze 400 metrów pieszo do przystanku była jak największa.

Charakterystyka obszaru opracowania dolnobrzezkiej komunikacji miejskiej

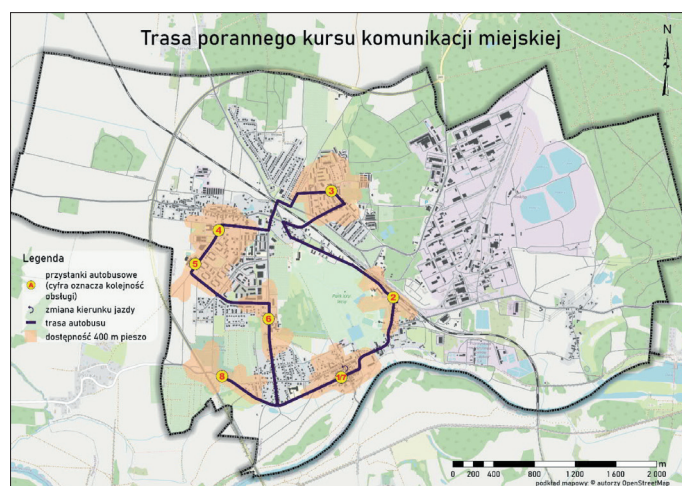
Obszarem opracowania jest Brzeg Dolny, miasto o populacji 12 506 osób, zlokalizowane w północno-wschodniej części województwa dolnośląskiego, w powiecie wo-

łowskim, w odległości około 28 kilometrów od centrum Wrocławia. Od lat systematycznie zwiększa się tu liczba samochodów osobowych na 1000 mieszkańców i obecnie wynosi 692 samochody na 1000 mieszkańców. Jest to wartość większa zarówno od średniej liczby samochodów w województwie dolnośląskim, jak i w Polsce. Struktura funkcjonalno-przestrzenna Brzegu Dolnego nie tworzy spójnego, jednolitego organizmu (rys. 1). Wynika to z faktu, iż każda część miasta powstawała i funkcjonowała de facto oddzielnie. Podział na poszczególne organizmy wzmacnia również biegnąca przez środek miasta linia kolejowa, która stanowi główną barierę, zarówno funkcjonalno-przestrzenną, jak i komunikacyjną.



Rys. 1. Struktura funkcjonalno-przestrzenna i podział miasta na osiedla
Źródło: opracowanie własne

19 lutego 2018 roku Urząd Miasta uruchomił kursowanie miejskiej linii autobusowej o jednym kursie w dni powszednie rano i po południu. Linia kursowała rano z Rynku przez dworzec kolejowy, szkoły na Osiedlu Fabrycznym i Warzyniu, szpital oraz Rynek, kończąc trasę przy cmentarzu komunalnym (rys. 2). Natomiast po południu linia wyruszała spod szpitala, następnie przejeżdżała obok szkół, ponownie obok szpitala, następnie obok cmentarza, Rynku i kończyła trasę pod dworcem kolejowym.



Rys. 2. Przebieg trasy porannego kursu komunikacji miejskiej w Brzegu Dolnym
Źródło: opracowanie własne

Czas przejazdu obydwu kursów wynosi 30 minut, prędkość komunikacyjna (uwzględniająca przejazd i postoje) wynosi 18,2 km/h. Kursowanie komunikacji miejskiej zostało zawieszono 12 listopada 2020 roku do odwołania w związku z pandemią choroby zakaźnej COVID-19 wywołanej przez koronawirusa SARS-CoV-2.

Opisany przebieg trasy z usytuowanymi w ten sposób przystankami obejmuje około 70% zabudowy wielorodzinnej Osiedla Fabrycznego, mniej niż połowę zabudowy wielorodzinnej Nowego Warzynie oraz jedynie centralną część Starego Miasta. Z analiz dostępności przystanków (metodyka została opisana w dalszej części pracy) wynika, że w odległości 400 metrów od przystanków znajduje się: dla kursu porannego – 358 z 1051 budynków mieszkalnych (34,1%), zamieszkałych przez około 7715 z 12 506 mieszkańców (61,7%), a dla kursu popołudniowego – 338 z 1051 budynków mieszkalnych (32,2%), zamieszkałych przez około 6503 z 12 506 mieszkańców (52%).

Przystanki obejmują swoim zasięgiem większość usług zlokalizowanych w mieście, w tym najważniejsze, jak liceum (tylko w kursie porannym), ośrodek sportu, dworzec kolejowy czy szpital i przychodnię. Zasięg przystanków nie obejmuje takich obiektów jak sklepy wielkopowierzchniowe przy Alejach Jerozolimskich, część bibliotek, restauracji czy urzędów pocztowych, w zasięgu nie znajdują się także zakłady PCC Rokita, będące największym pracodawcą w mieście. Jednocześnie trasa linii, różniąc się w obydwu kursach, wydaje się być nazbyt skomplikowana i może być trudna do zrozumienia dla mieszkańców – w jej trakcie autobus musi pokonać ulice, wykonując „ósemkę”, a także nawracać w trakcie trasy. Aby linia pełniła realną funkcję transportową dla mieszkańców, należałoby przeorganizować ją tak, aby umożliwiała prostą i zrozumiałą trasę dojazd z najgęściej zaludnionych osiedli jak najbliżej wszystkich oddalonych punktów zainteresowania, takich jak dworzec kolejowy, miejsca pracy, ośrodek kultury czy sklepy wielkopowierzchniowe. W celu stworzenia nowego przebiegu linii wykorzystano technologię GIS.

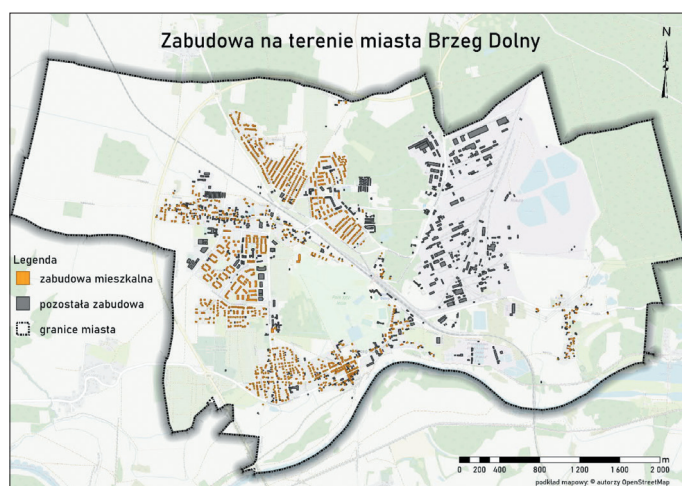
Odpowiednio zaprojektowana linia komunikacji miejskiej powinna obsłużyć jak największą część zabudowy mieszkaniowej i zapewniać wygodny dojazd do wszelkich punktów zainteresowania mieszkańców. Technologia GIS zostanie wykorzystana do wyznaczenia gęstości zabudowy mieszkaniowej, a następnie, za pomocą analizy alokacji, zostaną wyznaczone optymalne lokalizacje przystanków pod względem odległości (trasy piesze) do zabudowy mieszkaniowej i innych celów podróży, dla których ustalone zostaną wagi. Metodyka ta jest pomysłem autorskim i nie była dotychczas wykorzystywana w pracach naukowych lub do celów transportowych. W związku z tym część projektowa pracy ma przede wszystkim sprawdzić możliwości tworzenia przebiegu linii komunikacyjnej z wykorzystaniem takiej metodyki i technologii GIS.

Wyznaczenie gęstości zabudowy mieszkaniowej

Pierwszym elementem wymaganym do uzyskania dokładnej analizy przebiegu trasy linii autobusowej jest analiza

koncentracji miejsc zamieszkania ludności. Jako że większość podróży mieszkańców miast zaczyna się lub kończy w ich miejscu zamieszkania, należy przeanalizować, gdzie znajduje się zabudowa mieszkaniowa i jak gęsto jest ona w danej lokalizacji skupiona oraz jaką liczbą mieszkańców się charakteryzuje. W ten sposób można oszacować późniejszą potencjalną liczbę pasażerów w obrębie przystanku, a w dalszej perspektywie – obliczyć potoki pasażerskie, zaplanować odpowiednią liczbę i przebieg linii oraz dobrać wystarczająco pojemny tabor autobusowy. Ze względu na brak dostępu do danych demograficznych o wymaganej szczegółowości, w celu uzyskania liczby ludności zamieszkującej zabudowę mieszkaniową w mieście wykorzystano autorską metodę opartą na danych Głównego Urzędu Statystycznego oraz na danych pochodzących z Bazy Danych Obiektów Topograficznych.

W celu wyodrębnienia budynków mieszczących się w Brzegu Dolnym oraz pełniących funkcję mieszkaniową, wyznaczono spośród budynków jedynie te, które mieszczą się wewnątrz granic miasta, a następnie wyselekcjonowano jedynie budynki mieszkalne (rys. 3).



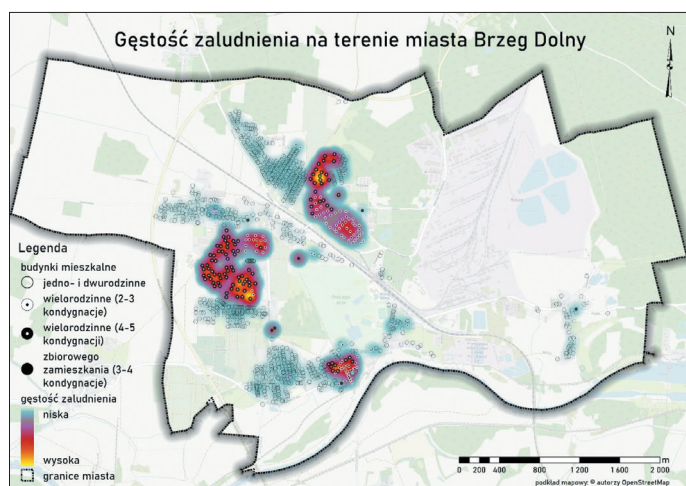
Rys. 3. Zabudowa mieszkalna i pozostała na terenie Brzegu Dolnego

Źródło: opracowanie własne

Aby rozróżnić poszczególne budynki mieszkalne i móc ukazać liczbę mieszkańców każdego z nich, w związku z nieznaną liczbą mieszkań w każdym z budynków, oszacowano ich powierzchnię całkowitą – wykorzystano w tym celu liczbę kondygnacji budynków pomnożoną przez powierzchnię rzutu parteru. Następnie w celu usunięcia wpływu kształtu budynków oraz w celu uzyskania możliwości wykorzystania w dalszych analizach, poligony przedstawiające budynki przekształcono w warstwę punktową.

Dzięki informacjom zawartym w Bazie Danych Obiektów Topograficznych można wskazać budynki o jednym i dwóch mieszkaniach, zatem znając średnią liczbę mieszkańców na mieszkanie, możliwe jest oszacowanie liczby mieszkańców takich budynków. Dane te dostępne są w Banku Danych Lokalnych Głównego Urzędu Statystycznego i wartość dla Brzegu Dolnego wynosi średnio 2,34 mieszkańca na mieszkanie. Budynkom jednorodzinnym przyznano więc liczbę mieszkańców równą 2,34, dwu-

rodzinnym 4,68, natomiast pozostałą liczbę ludności rozłożono proporcjonalnie po budynkach wielorodzinnych, uzależniając liczbę mieszkańców budynków od jego powierzchni (rys. 4). Uzyskano wartość 1 mieszkańca na 31,9 m² powierzchni całkowitej budynku. Wartość tę zwerifikowano w porównaniu ze średnią powierzchnią użytkową na mieszkańca Brzegu Dolnego, która wynosi według danych GUS 25 m². Przy takiej wartości, średnią wartość 31,9 m² powierzchni całkowitej na mieszkańca uzyskałoby się, uznając za powierzchnię użytkową średnio 78% powierzchni całkowitej, co uznaje się za prawidłowe.



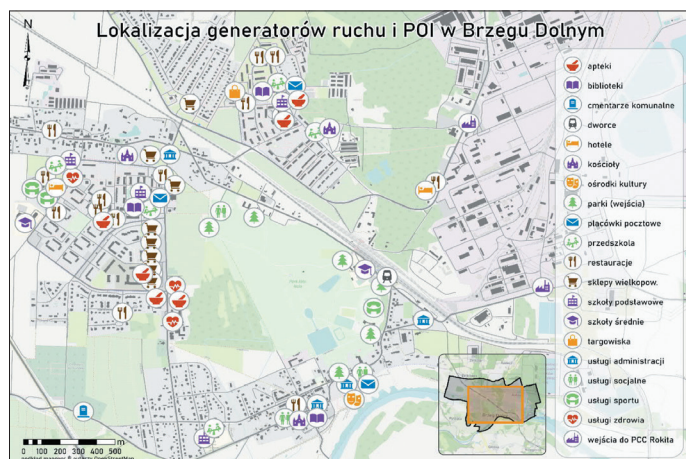
Rys. 4. Szacunkowa gęstość zaludnienia i wskazanie na korelację jej wartości z typologią zabudowy

Źródło: opracowanie własne

Ustalenie lokalizacji i wag pozostałych generatorów ruchu

Jako następny etap, zgodnie z metodyką projektowania komunikacji miejskiej, wykonano analizę lokalizacji najważniejszych generatorów ruchu niebędących budynkami mieszkalnymi (rys. 5).

W przypadku budynków mieszkalnych ich znaczenie dla analizy przebiegu linii autobusowej będzie wyrażone tym, jak wiele osób zamieszkuje każdy budynek, i w związku z tym, jak duża może być potrzeba przewozowa jego mieszkańców. Aby móc określić, jak ważnym jest, aby dany



Rys. 5. Mapa lokalizacji generatorów ruchu niebędących budynkami mieszkalnymi w centralnej części Brzegu Dolnego

Źródło: opracowanie własne

obiekt niemieszalny został objęty transportem publicznym, również zastosowano wobec niego system wag. W tym przypadku wagi zostały określone metodą ekspercką, gdzie największa waga oznacza obiekt o najsilniejszej potrzebie komunikacyjnej. W przypadku chęci uzyskania dokładnych danych na temat zapotrzebowania, aby autobus umożliwił dotarcie do konkretnego obiektu, sugeruje się wykorzystanie narzędzia GIS, jakim jest geoankieta, tworząc wagi na podstawie częstości wskazania danego generatora ruchu przez mieszkańców.

W ramach artykułu wagi niemieszalnych generatorów ruchu zostały określono ekspercko, odnosząc je do wag dla budynków mieszkalnych. Wagi (liczba mieszkańców) dla budynków mieszkalnych wyniosły około 2 dla budynku jednorodzinnego, od około 20 do 40 dla kamienic, około 40 do 100 dla starszej zabudowy wielorodzinnej i 100 do 150 dla nowszej, sięgając 264 dla największego budynku wielorodzinnego.

Doboru wag dokonano w taki sposób, aby korespondował on z realnymi potrzebami mieszkańców – stąd najwyższe wagi otrzymały dworzec kolejowy, miejsca pracy i szkoły średnie, będące codziennymi celami podróży dużej części mieszkańców. Wysokie wagi nadano także obiektom wysokiej rangi, jak urząd miejski, a także popularnym i ważnym obiektom użyteczności publicznej, jak szpital, przychodnia publiczna, ośrodek kultury czy ośrodek sportu. Niższe wagi otrzymały szkoły podstawowe i przedszkola w związku z faktem, iż zgodnie z wcześniejszymi analizami potrzeba dojazdu do nich autobusem jest stosunkowo niewielka w odniesieniu do obwodów szkolnych. W porównaniu do wag popularnych obiektów użyteczności publicznej, takich jak ośrodek kultury, obniżono o około połowę wagi obiektów takich jak apteki, placówki pocztowe i biblioteki, ponieważ, analizując ich dostępność przestrzenną, stwierdzono, że jest do nich zapewniony dogodny pieszy dostęp dla większości mieszkańców osiedli, na których obiekty te są zlokalizowane, i potrzeba dojazdu do nich autobusem jest niewielka. Niskie wagi otrzymały również obiekty użyteczności publicznej odwiedzane sporadycznie jak komisariat policji, urząd pracy lub stadion miejski, natomiast najniższe wagi uzyskały obiekty odwiedzane chętnie przez mieszkańców, jednak zlokalizowane licznie w mieście i dostępne pieszo, jak restauracje czy wejścia do parków. Dzięki takiemu dobraniu wag istnieje pewność, że wszystkie obiekty najważniejsze dla mieszkańców zostaną objęte obsługą przez komunikację miejską.

Uzyskanie warstw z przebiegami ciągów pieszych i dróg

W celu uzyskania warstwy z drogami pieszymi do dalszych analiz dostępności zdecydowano się wykorzystać dane z serwisu OpenStreetMap, którego celem jest stworzenie darmowej, ogólnodostępnej, otwartej i edytowalnej mapy całego świata. Przy wysokiej dokładności danych ich różnorodność zapewnia możliwość wykonania dzięki nim rozmaitych analiz – między innymi pośród danych znajdują się chodniki, drogi rowerowe czy atrybuty o dopuszczeniu ruchu pieszego na danej drodze, a informacje takie nie

znajdują się w Bazie Danych Obiektów Topograficznych. Analizując stan wrysowania dróg, chodników i ścieżek w Brzegu Dolnym na OpenStreetMap, zauważono, że dane posiadają pewne braki – w kwartałach osiedli i przy drogach nie były wrysowane wszystkie chodniki, brakowało połączeń chodników poprzez przejścia dla pieszych, niektóre fragmenty dróg posiadały również błędną geometrię, przez co mogły wystąpić późniejsze przekłamania w analizie sieciowej, nie ukazując realnych dróg dojścia na przystanek z danego punktu. Wykonano poprawki przebiegu dróg oraz wrysowano nowe drogi, chodniki i ścieżki na terenie miasta – korzystano przy tym z ortofotomap lotniczych uzyskanych z Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii oraz serwisu Google Street View, również korzystając ze znajomości terenu przez autora. Wprowadzenie dokładniejszej sieci ulicznej pozwoliło na uzyskanie najbardziej realnych wyników analizy.

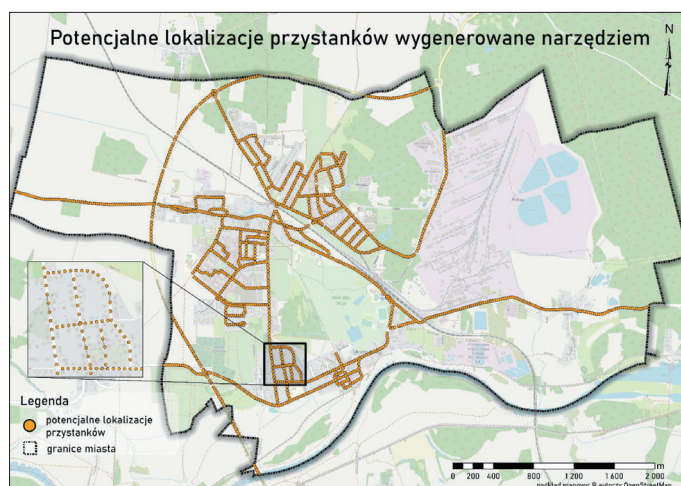
Po wykonaniu poprawek na sieci ulicznej OpenStreetMap wyeksportowano dane dotyczące dróg w Brzegu Dolnym i najbliższej okolicy za pomocą narzędzia Overpass Turbo i zaimportowano je do programu ArcGIS Pro. W celu uzyskania sieci dróg, po których mogą poruszać się piesi, usunięto za pomocą narzędzia *Select by Attributes*, *Select by Location* i *Clip* drogi bez dopuszczonego ruchu pieszego oraz nieistotne dla układu komunikacyjnego. Wsparto się przy tym selekcją manualną, m.in. w przypadku selekcji jezdni dróg niższej klasy do usunięcia, sprawdzając, czy są przy nich chodniki. Usunięto z warstwy drogi proponowane, drogi drugorzędne (posiadają chodniki), wydzielone drogi rowerowe (*cycleway* z atrybutem *foot=no*) oraz drogi na terenie zakładów przemysłowych i ogrodów działkowych (wszelkie z atrybutem *access=private*), nieistotne drogi poza granicami miasta (nieprowadzące pośrednio do zabudowy w mieście), a także jezdnie, przy których znajdują się chodniki.

Następnie przekształcono otrzymaną warstwę na typ danych przeznaczony do realizacji analiz sieciowych, po wcześniejszym podzieleniu dróg funkcją na odcinki w miejscu stykania się z innymi drogami dla umożliwienia poprawnej analizy sieciowej. Po utworzeniu sieci do analizy dotarcia pieszego przystąpiono do uzyskania warstwy dróg, po których mógłby poruszać się autobus – asfaltowe, betonowe lub z płyt betonowych, o odpowiedniej dopuszczalnej nośności. W tym celu wykluczono drogi na terenach prywatnych, drogi planowane, chodniki, schody, drogi gruntowe, rowerowe i ścieżki. Poprzez wizję lokalną znaków drogowych (możliwe także uzyskanie danych od Urzędu Miasta) wynotowano także te drogi, na których dopuszczalna masa całkowita jest mniejsza od 8 ton (stworzono nowe pole w tabeli atrybutów) – tyle, ile wynosi średnia masa całkowita dla autobusów klasy mini – i również usunięto je z selekcji. Do dróg, po których mógłby poruszać się autobus, zaliczono także asfaltowe drogi osiedlowe, ponieważ autobus klasy mikro (na podwoziu samochodu dostawczego, o pojemności 8–20 osób) lub mini (do 7,5 metra długości, o pojemności 30–45 osób), który jest odpowiednim dla potoków pasażerskich w małym mieście [4, s. 183], byłyby

w stanie zmieścić się na takiej drodze. Jednak w przypadku skierowania przez te ulice autobusu trzeba byłoby zlikwidować część miejsc parkingowych w celu zapewnienia możliwości manewru. W zależności od różnych przewidywanych potrzebnych rodzajów taboru, w ogólnym procesie selekcji dróg, należy wybrać jedynie drogi o odpowiednich szerokościach, a także o skrzyżowaniach i zakrętach o odpowiedniej geometrii (lub przeznaczyć je do przebudowy przed uruchomieniem komunikacji miejskiej). Przy tej analizie przeprowadzono uproszczony przebieg selekcji bez uwzględniania dokładnej szerokości oraz geometrii dróg. Aby uzyskać warstwę dróg, na których można zlokalizować przystanki, należało jeszcze usunąć z powyżej uzyskanej warstwy dwa rodzaje fragmentów dróg. Pierwszym z nich są drogi bez chodników, o tak małej szerokości, że zlokalizowanie infrastruktury przystankowej na poboczu jest niemożliwe. Drugim rodzajem dróg do usunięcia są takie, które nie łączą się na dalszym odcinku z innymi drogami i nie istnieje możliwość kontynuowania trasy ani zawracania.

Wyznaczenie optymalnych lokalizacji przystanków

W kolejnym etapie przystąpiono do wyznaczenia najlepszych potencjalnych lokalizacji przystanków autobusowych. Aby móc je wybrać, należało wyznaczyć wszelkie możliwe do rozważenia opcje (rys. 6). W celu ich uzyskania wykorzystano narzędzie *Generate Points Along Lines*, za pomocą którego stworzono warstwę punktową potencjalnych przystanków, zlokalizowanych na drogach, po których może poruszać się autobus, w odstępach co 20 metrów, co jest odległością umożliwiającą wykorzystanie stosunkowo niewielkiej mocy obliczeniowej przy późniejszych analizach, a jednocześnie dającą wymierne wyniki. Punkty te zostały wygenerowane także w miejscach, gdzie nie da się realnie zlokalizować przystanku, np. na środku skrzyżowań, lub jest to możliwe tylko w jedną stronę. Były to jedynie przybliżone wskazania, a ostateczna lokalizacja przystanku powinna zostać wybrana w najbliższym możliwym położeniu od wskazanej, gdzie będzie dozwolona.



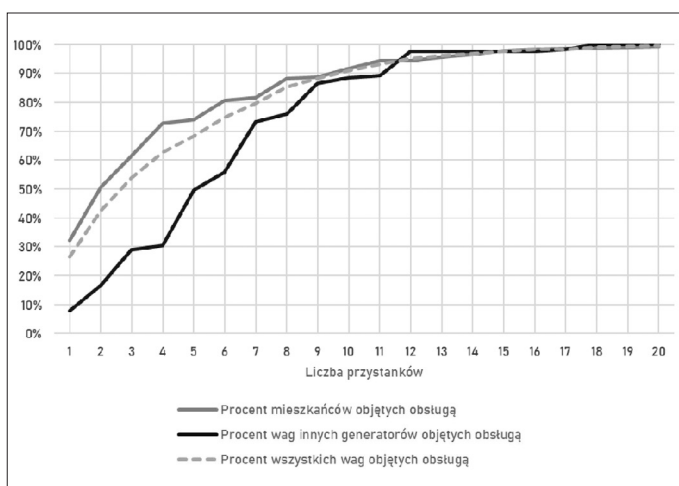
Rys. 6. Przystanki autobusowe wygenerowane narzędziem *Generate Points Along Lines*
Źródło: opracowanie własne

Dysponując warstwą z wszystkimi możliwymi lokalizacjami przystanków, przystąpiono do wykonania analizy alokacji, która służy do wskazania przystanków (wyboru spośród wszystkich proponowanych lokalizacji), które spełnią potrzebę dostępności dla jak największej liczby mieszkańców (rys. 7). Tworząc analizę, można wybrać, czy powinna ona uwzględniać stworzenie konkretnej liczby przystanków, ewentualnie stworzenie takiej ich liczby, aby uzyskać pełną dostępność mieszkańców do komunikacji, lub by ją zmaksymalizować przy jednoczesnej minimalizacji liczby przystanków (możliwe różne scenariusze analizy alokacji). Do analizy dodano potencjalne przystanki, miejsca zamieszkania i inne generatory z uzyskanych wcześniej warstw punktowych. W celu dokładnej analizy wykorzystano uzyskaną wcześniej orientacyjną liczbę mieszkańców oraz określone ekspercko wagi dla każdego budynku.

Analizę przeprowadzono w taki sposób, aby maksymalna odległość do przystanku wyniosła 400 metrów. Ponieważ należy dążyć do minimalizacji liczby postojów przy względnej maksymalnej zapewnionej dostępności komunikacyjnej, wykonano szereg analiz dla różnej liczby przystanków, sprawdzając, ile wynosi obsłużona „waga” (liczba mieszkańców i wartość wagowa generatorów niemieszkalnych) oraz oceniając, czy lokalizacja części przystanków nie odbiega w zbyt dużym stopniu od głównej sieci ulic, tak aby móc później przeprowadzić przez nie trasę autobusu bez nadmiernej liczby wjazdów kieszeniowych i pętli.

Dalsze analizy w celu uzyskania lokalizacji przystanków wykonywano w trybie *Maximize Coverage*, w którym algorytm stara się zmaksymalizować liczbę objętych przez przystanki punktów, lokalizując taką liczbę przystanków, jaką poda użytkownik. Choć metodyka planowania komunikacji miejskiej wskazuje, aby na tym etapie wyznaczyć krańce trasy linii w celu umożliwienia zmiany kierunku jazdy, nie zdecydowano się na wskazanie takich miejsc jako obowiązkowe przystanki, aby nie ograniczać możliwych przebiegów trasy – krańce trasy z miejscami do zawracania zostałyby wskazane później, po wykonaniu analiz lokalizacji przystanków i przebiegu tras.

W celu przeanalizowania, jaka liczba przystanków zapewni odpowiednio efektywną obsługę, wykonano kolejne scenariusze analizy *Maximize Coverage* dla różnej liczby przystanków, uzyskując lokalizacje przystanków i wagi obiektów objętych obsługą przez te przystanki. Zanim przystąpiono do analiz, wrysowano do analizy lokacji jedną barierę liniową przy wejściu na kładkę do dworca kolejowego od strony Osiedla Fabrycznego, tak aby droga dojścia od północnej strony torów nie była obejmowana przez przystanek po południowej stronie torów. Wykonano ten krok, aby umożliwić dotarcie do stacji kolejowej zarówno z przystanku przy dworcu (po południowej stronie torów), jak i od przystanku, który będzie sięgał do kładki od północnej strony torów. Wykonane następnie analizy zwróciły informacje o obsługiwanych przy założonej liczbie przystanków wagach obiektów i pozwoliły ocenić, jaka liczba przystanków jest najlepsza do obsługi Brzegu Dolnego (rys. 7).



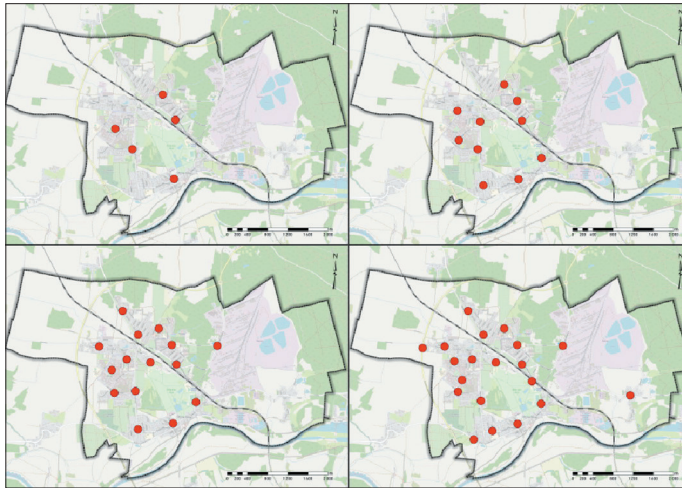
Rys. 7. Wykres zależności obsługiwanych wag punktów popytu od liczby przystanków
Źródło: opracowanie własne

Jak wynika z analizy powyższego wykresu, odpowiednie zlokalizowanie już jednego przystanku – w centrum osiedla Nowy Warzyń – zapewniło obsługę ponad 30% mieszkańców. Umieszczenie drugiego przystanku w centrum Osiedla Fabrycznego spowodowało osiągnięcie progu dostępności dla 50% mieszkańców. Kolejne przystanki zapewniły obsługę kolejno: centrum Starego Miasta (ponad 60% obsługiwanych mieszkańców i niemal 30% obsługiwanych innych generatorów ruchu), południowej części Osiedla Fabrycznego (ponad 70% mieszkańców) i południowej części Nowego Warzynia (osiągnięcie niemal 50% obsługiwanych generatorów niemieszkalnych).

Szósty przystanek zapewnił obsługę północno-wschodniej części Warzynia (niemal 75% obsługi ogółu wag), a siódmy przy dworcu kolejowym zapewnił wzrost obsługiwanych wag generatorów niemieszkalnych niemal o 20 punktów procentowych. Kolejne przystanki umieszczone zostały: w północno-zachodniej części Nowego Warzynia, w centralnej części Osiedla Fabrycznego i w zachodniej części Starego Miasta – przy dziesięciu przystankach przekroczono próg objęcia obsługą 90% mieszkańców i 90% wag obiektów. Jedenasty przystanek umieszczony został w zachodniej, jednorodzinnej części Osiedla Fabrycznego, a dwunasty przy głównej bramie zakładów Rokita, przekraczając 95% obsługi wszystkich wag i generatorów niemieszkalnych oraz niemalże 95% mieszkańców miasta.

Ta liczba przystanków została uznana za optymalną, ponieważ osiągnięto bardzo wysoki poziom obsługi punktów popytu, a dodawanie kolejnych przystanków skutkowało niewielkimi przyrostami wag (mniej niż 1%) objętych punktów w stosunku do poprzednich przystanków, bowiem obejmowało jedynie mniejsze skupiska zabudowy jednorodzinnej. Jedynymi nieobjętymi niemieszkalnymi generatorami ruchu pozostał cmentarz oraz jedno wejście do parku.

Następne przystanki lokowane były głównie na oddalonych od dotychczasowych przystanków częściach ulic oraz w mało zaludnionych obszarach, co uniemożliwiłoby skuteczną obsługę za pomocą jednej linii autobusowej, ponie-



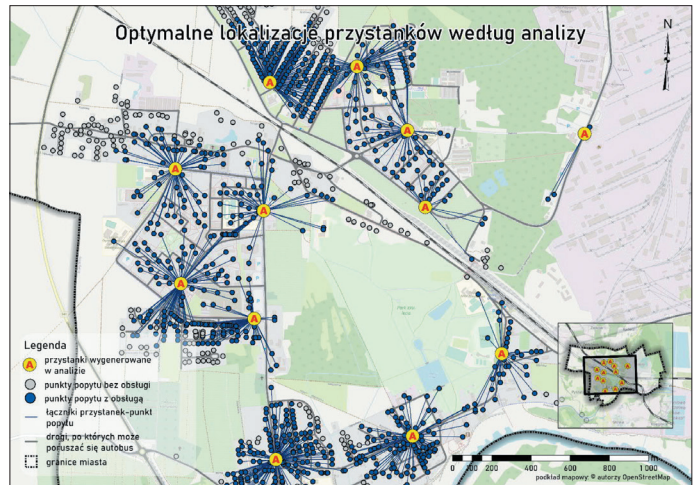
Rys. 8. Wygenerowane w analizie optymalne lokalizacje dla 5, 10 i 15 i 20 przystanków
Źródło: opracowanie własne

waż wymagałoby wydłużenia trasy i wielokrotnego zawracania (rys. 8). Za najlepsze rozwiązanie uznano zatem scenariusz z liczbą 12 przystanków o wskazanych na rysunku 9 lokalizacjach.

Warto zwrócić uwagę, jak wygląda porównanie obsługi komunikacyjnej przy obecnej (czasowo zawieszonej) komunikacji miejskiej oraz w przypadku wykorzystania przystanków umieszczonych według analizy alokacji w technologii GIS, przyjmując taką samą liczbę przystanków jak dla obecnej komunikacji miejskiej (w jedną stronę trasa ma 7 przystanków, a w drugą 8). Przy 7 przystankach rozmieszczonych przez analizę alokacji osiągnięto obsługę niemal 30% więcej mieszkańców miasta i niemal 20% więcej wag pozostałych generatorów ruchu (tab. 1).

Wygenerowane przystanki charakteryzują się zróżnicowanym obciążeniem, tj. liczbą osób, które mieszkają najbliżej danego przystanku oraz sumą wag innych generatorów ruchu, z których najbliżej jest do danego przystanku (tab. 2). Z badania wynika, iż najbardziej obciążone ruchem przez mieszkańców będą przystanki w najgęściej zaludnionych obszarach Nowego Warzynia, Osiedla Fabrycznego oraz przystanek na Starym Mieście przy Rynku. Najważniejszymi pod względem zapewniania dostępu do niemieszkalnych generatorów ruchu okazały się być przystanki przy ulicy Kolejowej obok dworca, na granicy Nowego i Starego Warzynia przy ośrodku sportowym oraz przy Rynku i zakładach PCC Rokita. Najmniejszym obciążeniem charakteryzują się przystanki zlokalizowane wśród zabudowy jednorodzinnej – na Starym Mieście przy ulicy Odrodzenia oraz na Osiedlu Fabrycznym przy ulicy Wierzbowej. Jeżeli przystanki te będą utrudniały przeprowadzenie trasy przez wszystkie przystanki, można rozważyć ich likwidację, natomiast jeśli znajdują się one na trasie pomiędzy przystankami o większym obciążeniu, należy je pozostawić w celu utrzymania dostępności komunikacyjnej dla mieszkańców zabudowy jednorodzinnej – mała odległość do przystanku może być zachętą do korzystania z komunikacji miejskiej.

Po ustaleniu, jakie obiekty należy objąć obsługą komunikacyjną, dzięki wykorzystaniu technologii GIS udało się



Rys. 9. Optymalne usytuowanie przystanków przy scenariuszu 12 przystanków – analiza alokacji w trybie *Maximize Coverage*
Źródło: opracowanie własne

wyznać przez analizę alokacji, jaka lokalizacja przystanków obejmie jak najwięcej mieszkańców i innych generatorów ruchu. Po tym etapie należy skierować przez nie trasę linii autobusowej. W przypadku małego miasta o stosunkowo zwartej zabudowie i nieskomplikowanej sieci ulicznej wystarczająca jest jedna linia autobusowa o odpowiedniej częstotliwości. Można wykonać to zadanie przy użyciu narzędzia *Route*. Należy pamiętać, że uzyskane lokalizacje przystanków są orientacyjne i, aby uniknąć zawrotek i podjazdów, należy je przesunąć tak, aby uzyskać optymalny przebieg linii. Sprawdzić należy też możliwość zawrócenia autobusu.

Podsumowanie i wnioski

Komunikacja miejska jest elementem pozwalającym na zrównoważony rozwój miast – umożliwia zmniejszenie uciążliwości transportu indywidualnego i ułatwia utrzymanie zwartości miast, jednocześnie pozwala na spełnienie potrzeb bytowych mieszkańców. Jej odpowiednie planowanie, uwarunkowane znajomością sieci ulicznej, specyfiki miasta, lokalizacji zabudowy oraz celów podróży, ich popularności i realnych potrzeb mieszkańców, jest kluczowe dla poprawnego funkcjonowania systemu transportowego miasta.

Tabela 1

Porównanie obsługi obecnej komunikacji miejskiej oraz obsługi dla tej samej liczby przystanków zlokalizowanych poprzez analizę alokacji					
Liczba przystanków	Udział procentowy objętych budynków mieszkalnych [%]	Udział procentowy objętych innych generatorów ruchu [%]	Udział procentowy mieszkańców objętych obsługą [%]	Udział procentowy wag innych generatorów objętych obsługą [%]	Udział procentowy wszystkich wag objętych obsługą [%]
7 (kurs popołudniowy)	33,5	57,9	52,8	55,6	53,5
7 (analiza)	35,9	76,3	81,7	73,3	79,7
8 (kurs poranny)	35,4	59,2	62,6	59,5	61,9
8 (analiza)	44,5	88,2	88,3	76,0	85,4

Źródło: opracowanie własne

Funkcjonowanie komunikacji miejskiej w Brzegu Dolnym, w świetle przeanalizowanych uwarunkowań, można uznać za kluczowe dla zapewnienia potrzeb wszystkich mieszkańców. Dzięki wykorzystaniu odpowiednio zorganizowanych danych oraz dokładnemu przeanalizowaniu lokalizacji punktów popytu i ich wag, uzyskanych dzięki dokładnemu poznaniu struktury funkcjonalno-przestrzennej miasta, przeprowadzone analizy sieciowe z wykorzystaniem technologii GIS pozwoliły na przeprowadzenie procesu tworzenia nowej lokalizacji przystanków w mieście. Oprogramowanie GIS umożliwiło przeanalizowanie rozmaitych scenariuszy, z uwzględnieniem różnych algorytmów oraz zróżnicowanej liczby przystanków. W badaniach opisanych w artykule przyjęto określone wagi dla poszczególnych obiektów, co przyniosło pozytywny skutek, jednak ich zmiana mogłaby spowodować zupełnie inny zaproponowany układ przystanków – i w następstwie przebieg linii. Ważnym jest więc, aby dobór wag był jak najbardziej dopasowany do specyfiki miasta. Aby jak najdokładniej ją scharakteryzować, należy poznać potrzeby mieszkańców.

Najważniejszym wnioskiem jest fakt, że wykorzystanie technologii GIS w planowaniu transportu publicznego może przynosić wymierne skutki – m.in. w postaci zwiększonej dostępności komunikacyjnej. Odpowiednio dobrane analizy przestrzenne pozwalają na uzyskiwanie efektywniejszych rozwiązań oraz na lepsze gospodarowanie obszarami i zapewnianie wyższej jakości życia.

Dzięki użyciu autorskiej metody, wykorzystującej mało popularną jeszcze w analizach przestrzennych analizę alo-

kacji, udało się zaproponować lokalizacje przystanków, które objęły dostępnością w odległości 400 metrów aż 94% mieszkańców i wagi 97% niemieszkalnych generatorów ruchu. Dotychczasowa trasa linii autobusowej, znacznie dłuższa, o długości aż 9,1 km, oraz o wyznaczonych arbitralnie lokalizacjach, objęła jedynie 63% mieszkańców i 60% niemieszkalnych generatorów ruchu.

Wyniki analizy przedstawionej w artykule mogą być też zaczątkiem do dyskusji na temat tego, czy przystanki powinny się lokalizować w pobliżu skrzyżowań czy obiektów użyteczności publicznej niezależnie od odległości przystanku do zabudowy mieszkaniowej (jak jest to praktykowane najczęściej w obecnie funkcjonującej komunikacji miejskiej), czy powinno się je lokalizować w obszarze realnej dostępności kilkuset metrów, tak, by było do nich stosunkowo blisko zarówno od jak najliczniejszej zabudowy mieszkaniowej, jak i od innych obiektów, czyli by znajdowały się niejako „w pół drogi”.

Możliwość generowania wielu wariantów i porównywania ich pozwala na jak najlepsze dopasowanie ich do układu konkretnego miasta, czyli na wybór optymalnego rozwiązania. Ponadto, w przyszłości tak zbudowana baza danych może być aktualizowana i posłużyć do tworzenia nowych wariantów lokalizowania przystanków, np. budowy nowych osiedli mieszkaniowych czy powstawania nowych generatorów ruchu lub istotnych inwestycji wpływających na przemieszczanie się mieszkańców, a także tworzenia symulacji dla potrzeb planowania przestrzennego.

Efektywniejsze usytuowanie przystanków dzięki analizom przestrzennym jest potwierdzeniem tezy, że zastosowanie GIS może przynosić zarówno pozytywne skutki dla gospodarki, jak i dla funkcjonowania miasta. Odpowiednie poprowadzenie linii autobusowej zapewni nowym podróżnym dostęp do transportu publicznego i umożliwi im transport do pożądanego celu podróży. Analiza sytuacji w Brzegu Dolnym pokazała, że analizy alokacji, użyte na odpowiednich danych po przebadaniu uwarunkowań miasta, mogą być stosowane w projektowaniu przebiegów tras linii komunikacyjnych i mogą dawać obiecujące wyniki także przy zastosowaniu w innych miastach.

Tabela 2

Obciążenie proponowanych przystanków			
Przystanek	Obciążenie mieszkańcami	Obciążenie wagami niemieszkalnych generatorów ruchu	Obciążenie wagami w sumie
Kolejowa przy ulicy Urzkiej	150,7 os. (1,3%)	710 (18,9%)	860,7 (5,6%)
Odrodzenia przy Rynku	1333,6 os. (11,4%)	430 (11,5%)	1763,6 (11,4%)
Aleje Jerozolimskie przy ulicy Odrodzenia	383,2 os. (3,3%)	80 (2,1%)	463,2 (3,0%)
Ulica Ossolińskiego przy Alejach Jerozolimskich	792,6 os. (6,7%)	400 (10,7%)	1192,6 (7,7%)
Słowackiego między ulicami Ossolińskiego a Leśmiana	2792,1 os. (23,8%)	190 (5,1%)	2982,1 (19,2%)
Wyszyńskiego przy ulicy Wilczej	1222,7 os. (10,4%)	415 (11,1%)	1637,7 (10,6%)
Aleje Jerozolimskie przy ulicy Osiedlowej	995,6 os. (8,5%)	375 (10%)	1370,6 (8,8%)
Wierzbowa przy ulicy Jaworowej	322,9 os. (2,7%)	30 (0,8%)	352,9 (2,3%)
Wyspiańskiego	1973,1 os. (16,8%)	170 (4,5%)	2143,1 (13,8%)
Jana Pawła II przy ulicy Zwycięstwa	1218,4 os. (10,4%)	230 (6,1%)	1448,4 (9,3%)
Lelewela przy ulicy Robotniczej	559,3 os. (4,3%)	400 (10,7%)	959,3 (6,2%)
Sienkiewicza przy ulicy Zielonej	0 os. (0%)	320 (8,5%)	320 (2,1%)
Suma	11744,2 os. (100%)	3750 (100%)	15494,2 (100%)

Źródło: opracowanie własne

Literatura

- Dębińska E., Cichociński P., Krystek K., *Problemy prowadzenia analiz sieciowych w przestrzeni trójwymiarowej z wykorzystaniem oprogramowania Network Analyst (ArcGIS) i pgRouting (PostGIS)*, „Roczniki Geomatyki”, 2017, tom XV, nr 3(38).
- Dybalski J., *Jak daleko do przystanku to daleko?*, 2014, www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/jak-daleko-do-przystanku-to-za-daleko-2440.html (dostęp: 23.05.2021).
- Kisielewski P., Ulman B., *Projektowanie sieci komunikacji miejskiej w oparciu o kompleksowe badania ruchu*, „Logistyka – nauka”, 2015, nr 4.
- Madej B., Pruciak K., Madej R., *Publiczny transport miejski: zasady tworzenia rozkładów jazdy w komunikacji lokalnej (miejskiej i aglomeracyjnej)*, Warszawa 2017.
- Sołtysiak A. i in., *Analiza czasu wymiany potoków pasażerskich na przystankach autobusowych w Bydgoszczy*, „Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe”, 2017, nr 6.