Olga Czaplikowska

e-mail: olga.czaplikowska@gmail.com

ORCID: 0009-0002-6257-4803

Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu

Paradoks Braessa w warunkach rzeczywistych

DOI: 10.15611/2023.85.5.03
JEL Classification: R41

Streszczenie: Celem badawczym pracy jest omówienie zjawiska paradoksu Braessa w ujęciu teoretycznym i praktycznym. Obiektami badań są głównie miasta znajdujące się w różnych częściach świata, na których można zobrazować owe nieintuicyjne zdarzenie. Ponadto w artykule zwrócono uwagę na współczesne problemy związane z transportem w mieście, wyjaśnienie, czym jest paradoks Braessa i zilustrowanie działania tego mechanizmu w warunkach praktycznych. Zastosowane metody badawcze to przede wszystkim krytyczna analiza literatury, proste metody statystyczne, a także studium przypadku. Najważniejszy wniosek z pracy stanowi spostrzeżenie, że choć model przedstawiony przez Braessa zawiera dużo uproszczeń i nie jest doskonały, to jego główną ideę można zaobserwować w rzeczywistych warunkach, co sugeruje, że nie są to wyłącznie akademickie rozważania z pobieżnymi dowodami empirycznymi.

Słowa kluczowe: paradoks Braessa, ruch drogowy, zarządzanie transportem

1. Wstęp

Dwie trzecie światowej populacji będzie mieszkać w miastach do 2050 roku, wobec czego zrozumienie wzorców mobilności w tych strefach stało się kluczowe dla optymalizacji ruchu drogowego. Ruch samochodowy badano na różnych poziomach szczegółowości, głównie na poziomie teoretycznym pojedynczego pasa ruchu za pomocą różnych narzędzi. Opracowane modele opierają się na danych dotyczących określonego obszaru, takiego jak populacja czy zatrudnienie, i są wykorzystywane do prognozowania ruchu w danej infrastrukturze (lub projekcie) i jego wpływu, np. na środowisko. We wszystkich przypadkach modele te są dostrojone do konkretnych obszarów i nie ma jak dotąd ogólnego modelu, który jest w stanie przewidzieć wielkości wartości związanych z ruchem drogowym dla dowolnego miasta i wskazać krytyczne parametry oraz dominujące mechanizmy ruchu na obszarach miejskich (Verbavatz i Barthelemy, 2019). Wraz z szybkim rozwojem pojazdów silnikowych, powtarzające się zatory komunikacyjne powodują opóźnienia, zanieczyszczenie powietrza i zwiększają ryzyko wypadków, które są zwykle spowodowane faktem, że przepustowość dróg nie może zaspokoić rosnącego zapotrzebowania na ruch. Konwencjonalne metody, takie jak budowa nowych tras lub poszerzanie zatłoczonych ulic w celu poprawy infrastruktury drogowej, stają się kosztowne i niewłaściwe, bio-

rąc pod uwagę ograniczone zasoby gruntów w miastach (Yang i in., 2017). Stała analiza ruchu drogowego jest konieczna, aby w sposób efektywny reagować na nowe wyzwania rzeczywistości.

2. Problemy identyfikowane z transportem w mieście

Współczesna mobilność miejska charakteryzuje się zatorami komunikacyjnymi, zanieczyszczeniem, stratą czasu, hałasem i znaczną nieefektywnością pod względem pojemności i zużycia przestrzeni w skali wymaganej do umożliwienia wydajnego funkcjonowania nowoczesnej gospodarki miejskiej. Wykorzystanie samochodów na obszarach miast stanowi tylko mniej niż 5% żywotności samochodu. Oznacza to, że przez 95% czasu samochód jest zaparkowany, zużywając cenną przestrzeń (Ceder, 2021). W przeciwieństwie do jazdy na obszarach wiejskich, rosnący rytm życia miejskiego powoduje, że ludzie doceniają zaoszczędzony czas i zwiększoną wygodę.

Unia Europejska jest trzecim co do wielkości rynkiem sprzedaży pojazdów po Chinach i USA, które w 2011 roku kupiły 14 mln pojazdów. Udział samochodów różni się znacznie między miastami, np. w Wielkiej Brytanii od zaledwie 9% w Londynie do nawet 85% w Swindon. Gdy odsetek pojazdów osobowych wzrasta w mieście, zwiększa się również ilość gruntów wykorzystywanych do transportu. W połączeniu z ekstremalną ilością ziemi wymaganej do parkowania, samochody zużywają aż 70% gruntów śródmiejskich w niektórych amerykańskich miastach. W przeprowadzonym badaniu na 12 miastach USA wskazano, że wzrost o 10 p.p. w odsetku osób dojeżdżających do pracy samochodem wiązał się ze wzrostem o ponad 2500 m^2 miejsc parkingowych na 1000 osób i spadkiem o 1700 osób na km^2. W miastach o wyższym wskaźniku korzystania z samochodów (blisko 30%) około dwa razy więcej ziemi przeznacza się na parkowanie dla każdego mieszkańca i pracownika (Nieuwenhuijsen i Khreis, 2016) wobec czego najbardziej wymagającym środkiem transportu pod względem przestrzeni jest prywatny pojazd. Na przykład podróż samochodem do domu lub do pracy zajmuje 90 razy więcej miejsca, niż gdyby tę samą podróż odbywał autobus lub tramwaj. W przypadku samego parkowania typowe miejsce parkingowe ma szerokość 2,4-3,0 m i głębokość 5,5-6,0 m, co daje łącznie 13-19 m^2. Parking poza ulicą wymaga zazwyczaj 28-33 m^2 na przestrzeń, w tym pasów dojazdowych, co pozwala na 250-370 samochodów na hektar, w zależności od projektu. Jednakże aż do 20 rowerów może zazwyczaj zmieścić się w całkowitej przestrzeni zwykle wymaganej do zaparkowania jednego pojazdu.

2.1. Udział ruchu samochodowego w zagrożeniach środowiskowych

Ruch samochodowy i związana z nim infrastruktura przyczyniają się do trzech kluczowych zagrożeń środowiskowych: zanieczyszczenia powietrza, hałasu i lokalnego wzrostu temperatury. W Europie (UE 27) 41% ludności miejskiej mieszka na obszarach, na których w 2010 roku przekroczono dobową dopuszczalną wartość dla

pyłu zawieszonego (PM10), podczas gdy 7% mieszka na terenach, na których w tym samym roku przekroczono roczną wartość dwutlenku azotu (NO_2). Ruch samochodowy przyczynia się w znacznej części do zanieczyszczenia powietrza w miastach, ale zakres różni się w zależności od czynników, takich jak: skład floty samochodowej, gęstość samochodów, warunki ruchu i układu poza miastem. Zakres udziału ruchu drogowego w stężeniach cząstek stałych w miastach w Europie waha się od 9 do 53% dla PM10 i od 9 do 66% dla PM2,5 oraz wyższym zakresie dla NO_2 wynoszącym ponad 80% (Nieuwenhuijsen i Khreis, 2016). Wskaźniki ruchu, takie jak odległość do głównych dróg, długość otaczających ulic i natężenie ruchu, wyjaśniają znaczną część zmienności zanieczyszczenia powietrza na obszarach miejskich.

Efekt miejskiej wyspy ciepła jest często obserwowany tam, gdzie otwarte, zalesione lub zielone tereny zostały zastąpione asfaltem. Determinantami wysp ciepła są gęstość zaludnienia, brak zielonej roślinności, urbanistyka i sieć dróg. Poza infrastrukturą związaną z ruchem drogowym, ruch pojazdów silnikowych uwalnia również antropogeniczne ciepło poprzez emisje z rury wydechowej (czarny węgiel, dwutlenek węgla, metan, podtlenek azotu), które wraz z efektami ponownego promieniowania gęstych struktur miejskich i długoterminową zmianą klimatu mogą potencjalnie zwiększyć letnie temperatury w miastach i przyczynić się do efektu miejskiej wyspy ciepła (Nieuwenhuijsen i Khreis, 2016).

2.2. Parkingi w przestrzeni miejskiej

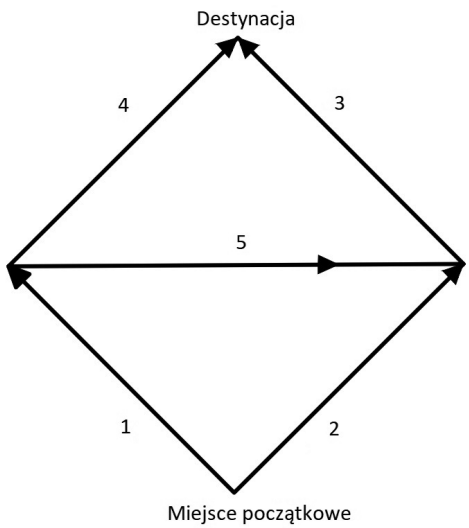
Problem parkowania w miastach i na obszarach miejskich oznacza, że istnieje luka między popytem na parkowanie (liczba samochodów potrzebujących miejsc parkingowych) a podażą miejsc parkingowych (liczba miejsc parkingowych wystarczająca dla samochodów wymagających parkowania). Luka ta wynikać może z kilku powodów. Większość starych i historycznych miast, zwłaszcza stolic, została zapełniona wąskimi uliczkami, kiedy nie było samochodów, a powozy konne. Również gęstość zaludnienia tych miast w tamtym czasie nie była tak wysoka w porównaniu z obecnymi wartościami tego wskaźnika. Ze względu na to, że ulice miast przeważnie nie mogą być przekształcone – z wyjątkiem pewnych ważnych powodów i w ograniczonych przypadkach – te wąskie uliczki stają się odpowiedzialne za przyjmowanie wszelkiego rodzaju pojazdów o dużym zagęszczeniu do poruszania się i parkowania (Ibrahim, 2017). Ponadto w nowych miastach i planowanych obszarach miejskich zawsze występuje błąd w obliczeniach zapotrzebowania na miejsca parkingowe z uwagi na nieoczekiwany wzrost wskaźnika posiadanych samochodów, szczególnie wśród populacji klas o wysokich i średnich dochodach.

Problem parkowania zniekształca projektowanie urbanistyczne. Zwiększenie podaży parkingów poza ulicą w pobliżu lub obok każdego budynku oddala te obiekty od siebie i zwiększa odległości między nimi, co sprawia, że jazda samochodem staje się bardziej konieczna niż dobrowolna, a chodzenie problematyczne. Parkowanie krawężnikowe, które występuje w rzędach przed budynkami, zniekształca drogę pieszych

chcących wejść do tych obiektów. Ze względu na brak wystarczającej liczby miejsc do postoju otwarte obszary, takie jak place publiczne, pola publiczne, miejsca spotkań towarzyskich, znajdują się z czasem pod presją problemu, a w konsekwencji przekształcane są na parkingi. Miejsca postojowe są ogólnie uważane za najmniej efektowny i najbardziej szkodliwy dla środowiska rodzaj użytkowania gruntów. Ze względu na koszty parkingi rzadko są wdrażane z poziomem szczegółowości, który jest odpowiedni dla publicznego placu. Z tego powodu preferowane jest oddzielenie działek powierzchniowych za budynkami lub osłoniętych ogrodzeniami, ścianami lub żywopłotami, aby zamaskować obecność tych obszarów. Parkowanie krawężnikowe tworzy kilka pasów drogi zajmowanych przez samochody, a tym samym zwiększa obciążenie pozostałych pasów drogowych, które czasami stają się jednym pasem ruchu, co prowadzi do gromadzenia się samochodów ponad projektowaną pojemność dróg i powoduje korki. Ponadto, aby zapewnić więcej pasów do postoju przy krawężnikach bez zakłócania przepływu ruchu, szczególnie w wąskich uliczkach lub w centrum miasta, władze lokalne mają tendencję do tworzenia tych pasów kosztem szerokości chodników, co czyni je niestandardowymi i pozbawionymi niektórych funkcji (Ibrahim, 2017). Korzystanie z nich przez pieszych staje się trudne, niewygodne i nieprzyjemne.

3. Zjawisko paradoksu Braessa

Paradoks został po raz pierwszy sformułowany przez niemieckiego matematyka Dietricha Braessa w jego pracy z 1968 roku *Uber ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung*. Opisał on sprzeczne z intuicją zjawisko i wywołał zainteresowanie społeczności naukowej ruchu drogowego, fizyki statystycznej i innych powiązanych obszarów badawczych (Nagurney i Nagurney, 2020). Na rysunku zobrazowany został oryginalny przykład „sieci Braessa" (zob. rys. 1).



Rys. 1. Schemat sieci Braessa

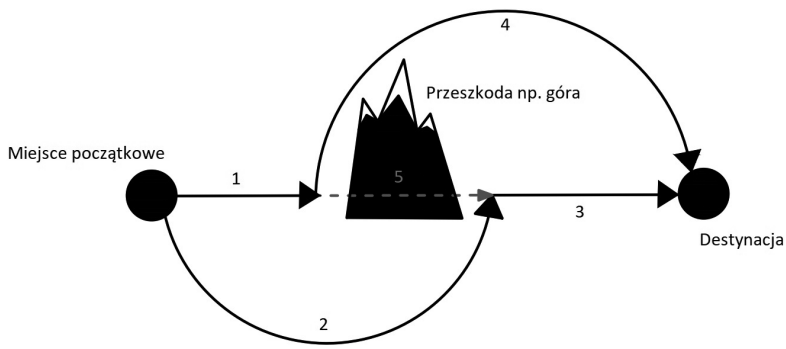
Źródło: opracowanie własne na podstawie (Ye i in., 2021).

Przyjęto dla niego założenie, że wszyscy użytkownicy sieci chcą przejść z tego samego miejsca początkowego do tej samej destynacji. W tym celu mogą wybrać jedną z dwóch dostępnych tras: 1-4 lub 2-3. Droga nr 5 jest uważana za dodaną do sieci (lub z niej usuniętą, jeśli mamy do czynienia z sytuacją odwrotną), w wyniku czego powstaje nowo dostępna trasa 1-5-3 lub 2-5-4.

3.1. Działanie mechanizmu

Ustalono, że warunkiem wstępnym wystąpienia paradoksu jest to, że jeśli zostanie zbudowana nowa droga, a tym samym nowa trasa o krótszym czasie przejazdu swobodnego przepływu, optymalny czas podróży użytkownika w sieci może się wydłużyć. Dzieje się tak, jeśli w wyniku przejścia na nową trasę więcej użytkowników wybiera drogi o wysokich kosztach krańcowych, a każdy kolejny użytkownik wybierający jedną z tych tras powoduje znaczne wydłużenie czasu podróży wszystkich kierowców samochodów z nich korzystających. Ponieważ wystąpienie paradoksu było w tych kategoriach rozumiane jako konsekwencja projektu sieci i wyboru funkcji czasu podróży, przy czym określone drogi miały wysokie koszty krańcowe, zjawisko to nie było już uważane za paradoksalne, ale za pseudo-paradoksalne (Bittihn, 2018).

Podstawowym założeniem leżącym u podstaw paradoksu Braessa jest twierdzenie, że użytkownicy sieci ruchu są samolubni, a ich egoistyczne zachowanie doprowadza system do stabilnych stanów sieciowych. W tym kontekście stan sieci odnosi się do zestawu strategii wszystkich użytkowników sieci. Strategia użytkownika oznacza, w jaki sposób kierowca wybiera trasę. Trasa odnosi się natomiast do połączenia między punktem początkowym a docelowym i może składać się z różnych dróg lub, w terminologii sieciowej, krawędzi, które mogą być połączone za pośrednictwem miejsc skrzyżowania. Optymalna dla użytkownika podróż jest realizowana, jeśli wybór trasy (a tym samym ich rozmieszczenie na drogach) prowadzi do równego czasu podróży na wszystkich używanych trasach, który jest krótszy lub równy czasom podróży na nieużywanych krawędziach.



Rys. 2. Przykład realistycznej sieci Braessa

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Bittihn, 2018).

Aby konkretny przykład Braessa był nieco bardziej odpowiedni dla rzeczywistego scenariusza, można wyobrazić sobie sytuację przedstawioną na rysunku 2.

Jedno miasto znajduje się na początku trasy, a inne w miejscu docelowym. Aglomeracje oddziela góra (lub inna przeszkoda, która uniemożliwia budowę drogi o dużej przepustowości). W celu przedostania się z miejsca początkowego do określonej destynacji można wybrać trasę 1-4, która składa się z wąskiej drogi wiejskiej (droga 1) i stosunkowo długiej, ale dobrze rozwiniętej autostrady (droga 4) wokół góry. Alternatywną jest trasa 2-3, która składa się z tych samych elementów, ale w odwrotnej kolejności. Z uwagi na fakt, że wiele samochodów korzysta z obu tras, władze decydują się na wydrążenie tunelu przez górę, aby zbudować drogę nr 5, a tym samym umożliwić wybór trasy 1-5-3. Nowa droga jest nieco dłuższa od dróg nr 1 i 3, ale szersza. Zgodnie z założeniami Bittihn (Bittihn, 2018) w takim przypadku, jeśli 6000 samochodów chce jechać z miejsca początkowego do określonego celu co godzinę, budowa tunelu powoduje wydłużenie czasu podróży o 9 min dla każdego kierowcy samochodu.

3.2. Wady modelu

Istnieje kilka aspektów w oryginalnym modelu Braessa, a także w wielu późniejszych pracach nad paradoksem, które są ogromnymi uproszczeniami faktycznego ruchu drogowego. Symplifikacje te prowadzą do pytania, czy paradoks rzeczywiście występuje w sieciach ruchu drogowego w sposób opisany w modelu. Prawdziwe obserwacje często nie są systematycznie analizowane, a poprawa ruchu po zamknięciu dróg może również mieć inną przyczynę. Ze względu na uproszczenia, modele te nie mogą być wykorzystywane do przewidywania paradoksu w rzeczywistych sieciach dróg. Struktura przedstawiona przez Braessa jako przykład demonstracyjny jest bardzo prosta i raczej sztuczna. W rzeczywistych sieciach komunikacyjnych taka mała struktura będzie zwykle osadzona w większej, bardziej złożonej sieci dróg. Nawet jeśli pięć ulic jest postrzeganych tylko jako podbudowa większego układu, można założyć, że istnieje więcej połączeń go otaczających. Jeśli przyjmie się strukturę sieci za pewnik i pominie skutki przylegającego większego schematu, nadal istnieje wiele aspektów modelu, które są niedokładne. Można je podzielić na dwie główne kategorie. Pierwsza to opis natężenia ruchu na drogach z fizycznego punktu widzenia. Takie objaśnienie skonstruowane za pomocą liniowych funkcji czasu przejazdu jest nadmiernym uproszczeniem, a korelacje między drogami są niedopracowane. Wpływy większej, otaczającej sieci, w którą wbudowany jest model Braessa, są całkowicie pomijane i nawet jeśli ktoś zdecyduje się przeanalizować tylko samą strukturę sieci, należy zająć się jej warunkami brzegowymi (Bittihn, 2018). Ponadto kwestia, w jaki sposób samochody wchodzą i wychodzą z systemu lub czy w nim pozostają, nie jest poruszana w paradoksie Braessa. Druga kategoria dotyczy założenia o dostępności dokładnych informacji o czasie podróży i całkowicie racjonalnym podejmowaniu decyzji przez kierowców, które jest nierealistyczne. Oprócz tych wątków w literaturze przedmiotu podkreśla się następujące uwagi (Bagloee i in., 2019):

- paradoks Braessa jest wszechobecny zarówno w teorii, jak i praktyce;
- wszelkie zmiany w sieci, od czasu sygnału po dodanie nowych dróg, a także wszelkie zmiany w popycie na podróże mogą pobudzić pojawienie się lub zaniknięcie tego zjawiska;
- wykrywanie paradoksu Braessa w rzeczywistych przykładach jest skomplikowanym zadaniem;
- badania dotyczące tego zjawiska dostosowane do sieci wielkogabarytowych są nieliczne;
- pomimo znaczenia popytu na podróże w paradoksie Braessa jej elastyczność była w dużej mierze ignorowana w poprzednich badaniach.

Paradoks od czasu odkrycia w 1968 roku przyczynił się do wypracowania znaczących badań sieci ruchu naziemnego. Analizowano zwięźle jego pierwotną formę, jak i bardziej ogólny kontekst. Udowodniono również, że paradoks Braessa może występować w naturalnym modelu sieci losowej. Mianowicie dla danego odpowiedniego przepływu całkowitego pokazano, że w prawie wszystkich sieciach istnieje zestaw łączy, których usunięcie poprawia czas podróży. Rozwiązanie ,,najlepsze dla wszystkich użytkowników" oznacza, że całkowite koszty ponoszone przez wszystkich użytkowników są minimalne. Taki przepływ jest określany jako równowaga systemowa. Natomiast gdyby użytkownicy zdecydowali się na współpracę w celu utworzenia takiego balansu, nie byłoby miejsca dla paradoksu Braessa (Bittihn i Schadschneider, 2021).

4. Miasta dotknięte zjawiskiem Braessa

Paradoks Braessa był obserwowany w różnych, rzeczywistych sytuacjach. Pierwsze doniesienia naukowe zostały sporządzone w 1969 roku na przykładzie miasta Stuttgart. Inne przykłady obejmują zamknięcie 42. ulicy w Nowym Jorku z powodu obchodów Dnia Ziemi w 1990 roku, które doprowadziły do skrócenia czasu podróży na wszystkich okolicznych ulicach. W 2010 roku, również w centrum Nowego Jorku, zdecydowano się zamknąć niektóre główne szlaki komunikacyjne na stałe. Oprócz tego, że mieszkańcy i turyści korzystają ze stref przeznaczonych wyłącznie dla ruchu pieszego, poprawił się również ruch na okolicznych ulicach. W 2008 roku przeanalizowano główne drogi sieci ulic Boston-Cambridge, Londynu i Nowego Jorku. Dane o ruchu zostały uzyskane z Map Google i innych źródeł. W badaniu wykorzystano bardziej realistyczne funkcje czasu przejazdu zgodne z funkcjami Biura Dróg Publicznych. Zaobserwowano, że we wszystkich trzech sieciach istnieje kilka tras, które poprawiłyby sytuację komunikacyjną w przypadku ich zamknięcia (Bittihn, 2018). Jednakże skomplikowanym zadaniem jest całkowicie symulować zamknięcia dróg i przewidywać ich skutki w rzeczywistych scenariuszach, ponieważ dla szczegółowych prognoz trzeba znać wszystkie miejsca początkowe i docelowe użytkowników sieci, a także dokładne funkcje czasu podróży każdej z dróg. Podkreśla się również, że różne podejścia do analizy systemów ruchu drogowego mogą prowadzić do niejednoznacznych wniosków.

Warto również nadmienić rzeczywisty przykład paradoksu Braessa, który wystąpił w Korei Południowej. W Seulu przyspieszenie ruchu wokół miasta zaobserwowano, gdy w 2005 r. autostrada została usunięta w ramach projektu renowacji Cheonggyecheon, co zostało przedstawione na rysunku 3 (Wu, 2020).

Rys. 3. Projekt odbudowy Cheonggyecheon

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Robinson i Myvonwynn, 2011).

Ruch drogowy poprawił się, a na odzyskanym terenie przywrócono koryto rzeki i zaplanowano publiczny teren rekreacyjny. Nie doprecyzowano, jaka miara czasu podróży została wykorzystana przez koreańskich urzędników do oceny jakości przepływu ruchu i jak bardzo go przyspieszył. Zauważono jednak, że obserwowanej poprawy płynności ruchu drogowego nie można przypisać wyłącznie paradoksowi Braessa, a czynniki, takie jak zwiększone inwestycje rządu w systemy transportu publicznego, również stanowiłyby istotny element dla tego przypadku (Wu, 2020).

4.1. Barcelońskie superbloki

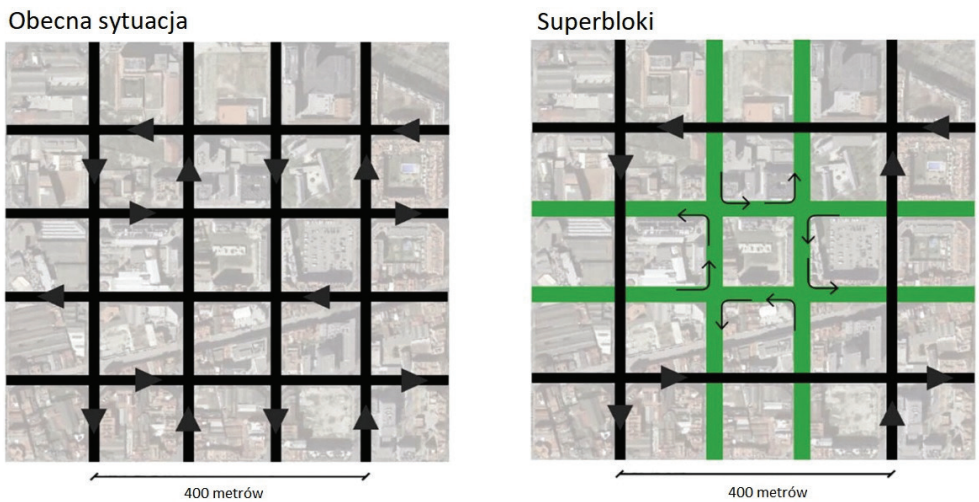
Popularność posiadania prywatnych samochodów w Stanach Zjednoczonych i Europie w latach 50. i 60. XX wieku przyspieszyła dalsze badania w celu udokumentowania i ograniczenia negatywnego wpływu pojazdów silnikowych na miejskie życie uliczne. Europejczycy zaczęli renowację ulic w śródmiejskich dzielnicach handlowych, począwszy od 1953 roku w Kassel w Niemczech. Główna ulica handlowa Kopenhagi, Strøget, była wąska, a kompaktowe centrum miasta szybko zostało zatłoczone poruszającymi się i zaparkowanymi samochodami. W 1962 roku została tymczasowo zamknięta dla pojazdów, wobec czego liczba pieszych wzrosła do 35%. Ulica została następnie zamknięta na stałe w 1964 roku i była przedmiotem badań na temat tego, jak ludzie faktycznie wykorzystują miejską przestrzeń uliczną. Strefa handlowa dla pieszych w Kopenhadze, podobnie jak wiele innych, nadal rozwija się w nieregularny superblok, który obecnie zapewnia 100 000 m^2 przestrzeni dla pieszych – co odpowiada 44 blokom przestrzeni ulicznej w barce-

lońskiej dzielnicy Eixample (Amati i in., 2023). Ważnym odkryciem w badaniu nad ulicami Kopenhagi jest to, że chociaż liczba pieszych korzystających ze Strøget pozostała stała od 1960 do 1980 roku, to liczba osób zaangażowanych w działalność stacjonarną na ulicy znacznie wzrosła.

Pomimo dziesięcioleci badań i stopniowego wzrostu ruchu pieszego obecnie w Barcelonie, podobnie jak w większości miast, znaczna część przestrzeni publicznej wykorzystywana jest na poruszające się pojazdy. Wbrew staraniu się planistów i inżynierów o złagodzenie prędkości ruchu miejskiego, planowanie mobilności zazwyczaj tworzy dysfunkcyjne przestrzenie miejskie. W Barcelonie 85% dróg jest przeznaczonych dla pojazdów, a 60% przestrzeni publicznej jest ogólnie poświęcone przemieszaniu się (Amati i in., 2023).

Superbloki to barceloński program, który jest instrumentem reorganizacji miasta, tak aby pierwszeństwo mieli piesi, następnie rowery, a w końcu transport publiczny. Głównym celem jest poprawa warunków środowiskowych w mieście i uzyskanie wysokiej jakości przestrzeni publicznej dla ludzi (López i in., 2020). Do tej pory program został wdrożony w sześciu dzielnicach, ale celem władz miasta jest rozwój superbloków w całym mieście.

W dzielnicy Eixample, która obejmuje większość centrum miasta i jest ułożona w ortogonalny wzór siatki, superblok obejmie około 400 × 400 m (zob. rys. 4).



Rys. 4. Ukształtowanie dróg w modelu Superbloku

Źródło: opracowanie na podstawie (Amati i in., 2023).

W ramach tych obszarów krawędzie wewnętrzne zapewnią lokalną sieć dróg, która będzie dostępna przede wszystkim dla aktywnego transportu (pieszego i rowerowego), a w drugiej kolejności dla ruchu mieszkalnego o maksymalnej prędkości 20 km/h. Superbloki będą otoczone podstawową siecią dróg, która łączy miasto

i obsługuje ruch tranzytowy z maksymalną prędkością 50 km/h. Oprócz obsługi samochodów i motocykli, podstawowa sieć drogowa będzie zawierać oddzielną infrastrukturę rowerową i pieszą oraz wydzielone pasy szybkiego ruchu dla autobusów. W celu zapewnienia optymalnego dostępu przystanki autobusowe będą umieszczane co 400 m na głównych skrzyżowaniach superbloków, a autobusy będą kursować z dużą częstotliwością, dzięki czemu transport publiczny będzie atrakcyjną alternatywą. Oczekuje się, że wraz z wdrożeniem 503 takich obszarów udział prywatnych pojazdów w transporcie znacznie się zmniejszy, a przepływ ruchu na podstawowej sieci drogowej będzie mniej zatłoczony (Mueller i in., 2020). Poza rekonfiguracją transportu model superbloku przewiduje rozwój otwartej i zielonej przestrzeni publicznej w całym mieście, składającej się z placów, parków, zielonych korytarzy i ogólnego zazielenienia w tych obszarach, jak i poza nimi.

Tylko poprzez zmniejszenie liczby samochodów w ruchu o 13% zostanie uwolnione 71% przestrzeni miejskiej zajmowanej przez samochody. Daje to łącznie ponad 6 mln m^2, przekształcając tym samym Barcelonę w najważniejszy projekt recyklingu miejskiego na świecie bez konieczności wyburzania budynków. Ten nowy model umożliwia skrócenie czasu podróży w mieście o połowę i zwiększa wykorzystanie autobusów jako transportu masowego, który może zastąpić od jednej trzeciej do ponad połowy obecnego wykorzystania samochodów (López i in., 2020). W tym celu konieczne jest zastosowanie również dodatkowych środków infrastruktury drogowej, takich jak zwiększenie liczby pasów dla autobusów i ścieżek rowerowych oraz skuterowych.

5. Zakończenie

W artykule omówiono problemy związane z transportem miejskim oraz zjawisko paradoksu Braessa. Tradycyjne sposoby poprawy ruchu drogowego, takie jak budowa nowych dróg, mogą czasami prowadzić do nieintuicyjnych rezultatów, gdzie zwiększenie przepustowości jednej drogi prowadzi do pogorszenia ruchu w skali całej sieci.

Przykłady miast, takich jak Nowy Jork i Seul, doświadczonych zjawiskiem paradoksu Braessa pokazują konieczność podejmowania bardziej zrównoważonych i kompleksowych działań w celu optymalizacji ruchu drogowego. W przyszłości, z uwagi na rozwój technologii i zwiększone zapotrzebowanie na transport w mieście, konieczne będą innowacyjne rozwiązania. Jednym z obiecujących kierunków jest rozwój inteligentnych systemów transportowych, które wykorzystują zaawansowane algorytmy, analizę danych i technologie komunikacyjne. Te systemy umożliwiają monitorowanie ruchu drogowego w czasie rzeczywistym, prognozowanie i dostarczanie informacji o warunkach na drogach kierowcom, a także dynamiczne zarządzanie sygnalizacją świetlną i pasami ruchu. Ponadto rozwój alternatywnych form poruszania się po mieście, takich jak transport publiczny czy rower, może przyczynić się do zmniejszenia obciążenia sieci drogowej. Promowanie tych rozwiązań

oraz rozwój infrastruktury wspierającej ich funkcjonowanie są ważnymi krokami w kierunku zrównoważonego transportu w mieście. W przyszłości warto kontynuować badania pod kątem możliwości zastosowania zjawiska paradoksu Braessa w warunkach polskich.

Literatura

Amati, M., Stevens, Q. i Rueda, S. (2023). Taking Play Seriously in Urban Design: The Evolution of Barcelona's Superblocks. *Space and Culture, 0*(0). https://doi.org/10.1177/12063312231159229

Bagloee, S.A., (Avi) Ceder, A., Sarvi, M. i Asadi, M. (2019). Is It Time to Go for No-Car Zone Policies? Braess Paradox Detection. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, (121), 251-264. https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.01.021

Bittihn, S. A. (2018). *Stochastic Transport Models on Simple Networks: Phase Diagrams and Braess Paradox* (PhD thesis). Universität zu Köln.

Bittihn, S. i Schadschneider, A. (2021). The Effect of Modern Traffic Information on Braess' Paradox. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, (571). https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.125829

Ceder, A. (Avi). (2021). Urban Mobility and Public Transport: Future Perspectives and Review. *International Journal of Urban Sciences*, *25*(4), 455-479. https://doi.org/10.1080/12265934.2020.1799846

Ibrahim, H. (2017). Car Parking Problem in Urban Areas, Causes and Solutions. *SSRN Electronic Journal*. https://doi.org/10.2139/ssrn.3163473

López, I., Ortega, J. i Pardo, M. (2020). Mobility Infrastructures in Cities and Climate Change: An Analysis Through the Superblocks in Barcelona. *Atmosphere*, *11*(4). https://doi.org/10.3390/atmos11040410

Mueller, N., Rojas-Rueda, D., Khreis, H., Cirach, M., Andrés, D., Ballester, J., Bartoll, X., …, i Nieuwenhuijsen, M. (2020). Changing the Urban Design of Cities for Health: The Superblock Model. *Environment International*, (134). https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105132

Nagurney, A. i Nagurney, L. S. (2020). *The Braess Paradox. Invited Chapter for International Encyclopedia of Transportation*.

Nieuwenhuijsen, M. J. i Khreis, H. (2016). Car Free Cities: Pathway to Healthy Urban Living. *Environment International*, 94, 251-262. https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.05.032

Robinson, A. i Hopton, M. (2011). *Cheonggyecheon Stream Restoration Project*. Landscape Architecture Foundation. https://doi.org/10.31353/cs0140

Verbavatz, V. i Barthelemy, M. (2019). Critical Factors for Mitigating Car Traffic in Cities. *PLOS ONE*, 14(7). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219559

Wu, Y. (2020). *Braess' Paradox in City Planning*.

Yang, S., Wu, J., Qi, G. i Tian, K. (2017). Analysis of Traffic State Variation Patterns for Urban Road Network Based on Spectral Clustering. *Advances in Mechanical Engineering*, *9*(9). https://doi.org/10.1177/1687814017723790

Ye, J., Jiang, Y., Chen, J., Liu, Z. i Guo, R. (2021). Joint Optimisation of Transfer Location and Capacity for a Capacitated Multimodal Transport Network with Elastic Demand: A Bi-Level Programming Model and Paradoxes. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, (156). https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102540

Braess Paradox in Real-World Conditions

Abstract: The research aim of this paper is to discuss the phenomenon of the Braess paradox in theoretical as well as practical terms. The objects of the research are mainly cities located in different parts of the world, on which this non-intuitive event can be illustrated. Furthermore the article draws attention to contemporary problems related to transport in the city, to explain what the Braess paradox is and to illustrate the operation of this mechanism in practical conditions. The research methods used are mainly a critical analysis of the literature, simple statistical methods, and a case study. The most important conclusion of the paper is that although the model presented by Braess contains a lot of simplifications and is not perfect, its main idea can be observed in real-life conditions, suggesting that these are not purely academic considerations with cursory empirical evidence.

Keywords: Braess paradox, traffic, transport management