

Badanie przepustowości schodów ruchomych w zależności od sposobu ich użytkowania^{1,2}

JAN PASZKOWSKI

mgr inż., Politechnika Krakowska,
tel.: +48 602 293 900,
e-mail: jan.paszkowski.krakow@gmail.com

JAKUB SALACH

inż., Politechnika Krakowska, ul.
Warszawska 24, 31-155 Kraków,
tel.: +48 514 032 154, e-mail:
kuba.salach@gmail.com

Streszczenie: W artykule podjęto temat użytkowania schodów ruchomych i jego wpływu na przepustowość oraz czas podróży. Celem artykułu jest próba wykazania – za pomocą symulacji, dyskusji i pomiarów – że korzystanie z obu stron schodów ruchomych zwiększa ich przepustowość. Przeprowadzono pomiary, jaki procent osób stojących i idących użytkuje schody ruchome, jakie są odstępy między nimi oraz jakie wynikają z tego różnice czasu podróży. Następnie wyniki pomiarów zostały przeanalizowane w programie symulacyjnym, w celu określenia optymalnego dla danego natężenia ruchu sposobu ich użytkowania. Miało to na celu odpowiedź, czy bardziej zasadne jest podróżowanie po schodach ruchomych na stojąco, czy idąc.

Słowa kluczowe: schody ruchome, ruch pieszy, przepustowość.

Wprowadzenie

Urządzenia transportu bliskiego, takie jak windy, ruchome chodniki czy schody ruchome, są powszechnie używane w miejscach, w których przemieszcza się wiele osób. Należą do nich między innymi: porty lotnicze, dworce, terminale przesiadkowe czy przystanki podziemne. Mają za zadanie przewieźć duże potoki pasażerów, którzy chcą szybko dotrzeć do swojego środka transportu, przemieścić się między nimi czy też opuścić budynek dworca, lotniska, galerii handlowej etc. Wśród tych urządzeń jednymi z najpopularniejszych są schody ruchome. Jest to urządzenie służące do przewozu osób pomiędzy kondygnacjami budynku; składa się z konstrukcji nośnej, taśmy stopni i poręczy napędzanych przez zespół napędowy z silnikiem elektrycznym i przekładnią [1]. Schody ruchome są w stanie przemieścić pasażerów w różnych poziomach, w odróżnieniu od windy – z dużą przepustowością. Prędkość schodów ruchomych wynosi od 0,5 m/s do 0,8 m/s, kąt ich nachylenia to zazwyczaj 30–35 stopni, a szerokość 800–1200 mm.

Przykład londyński

Artykuł ten powstał w celu matematycznego zweryfikowania eksperymentu, jaki miał miejsce w Londynie. W metrze londyńskim na ruchomych schodach panuje zasada – osoby z nich korzystające stoją po prawej stronie, a idą po ich lewej stronie. Jest to ułatwienie dla osób spieszących się, które chcą szybciej dostać się do wagonu metra lub wyjść na zewnątrz. W grudniu 2015 roku w celach testowych na schodach ruchomych jednej ze stacji metra nakazano stanie

po obu stronach. Podczas eksperymentu przeprowadzono pomiary maksymalnego natężenia ruchu. Wykazały one, że w sytuacji, gdy korzystający stoją z prawej, a idą z lewej strony, natężenie wynosi 81,25 osoby na minutę, natomiast w przypadku stania po obu stronach – 112,5 osoby, czyli aż o około 27 procent wzrosła liczba osób, która mogła pokonać schody [2]. Przyczyną występowania takiego zjawiska jest różnica w gęstości (liczby osób na jednostkę odległości) spowodowana większym zapotrzebowaniem na przestrzeń podczas chodzenia niż stania, a także dysproporcja idących w stosunku do stojących – tym większa im dłuższe schody (w takim przypadku mniej osób decyduje się iść po schodach).

Charakterystyka ruchu pieszego

Ruch pieszy (co do jego charakterystyki, nie zachowania) można opisać parametrami podobnymi do ruchu samochodowego – prędkość [km/h], gęstość [os/km], natężenie [os/h]. W przypadku natężeń przewyższających maksymalne (przepustowość) można również określić długość kolejki i szybkość jej przyrastania. Najważniejsza różnica, która wpływa na różnice przepustowości, związana jest z ilością zajmowanego miejsca podczas stania i chodzenia. Według HCM [3], osoba stojąca zajmuje około 0,3 m² przestrzeni – 0,5 m długości, 0,6 m szerokości. Osoba idąca zajmuje około 0,75 m² – czyli 1,25 m przestrzeni przed i za sobą. Oznacza to, że gęstość ruchu na schodach będzie 2,5 razy mniejsza w przypadku poruszania się na schodach niż stania, a z tego wynika, że prędkość przy poruszaniu się (plus prędkość schodów ruchomych) powinna być 2,5 razy większa niż prędkość w przypadku wyjazdu po schodach na stojąco.

Prędkość ruchu pieszych określa się za pomocą losowej wartości z podanego rozkładu. W literaturze można spotkać kilka publikacji z takimi danymi. HCM rekomenduje zastosowanie wartości 1,2 m/s lub 1 m/s w przypadku, gdy udział osób powyżej 65. roku życia przekracza 20%. W przypadku poruszania się po schodach (o nachyleniu powyżej 10 stopni) prędkość zaleca się zmniejszyć o 0,1 m/s. Również dokładny opis prędkości pieszych znajduje się w dokumencie: „Guidelines on evacuation analysis for new and existing passenger ships” [4]. Znajdują się tam dokładne rozkłady prędkości w zależności od wieku i płci pasażerów, zarówno dla płaskich przejść, jak i schodów. Kolejną publikacją, dedykowaną dla schodów, jest [5], w której zbadano różnice prędkości w wchodzeniu po schodach pod górę w zależności od ich długości.

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2019. Wkład autorów w publikację: J Paszkowski 50%, J. Salach 50%.

² Artykuł opracowano na podstawie wystąpienia na V Konferencji „Osiągnięcia Studentkich Kół Naukowych Uczelni Technicznych” – STUKNUT’19 w Gdańsku (26.10.2019 – 02.11.2019).

Pomiary

Pomiary zostały wykonane w ciągu dwóch dni roboczych 20.05 (poniedziałek) oraz 23.05 (czwartek) w dwóch przedziałach godzinowych 08:00–10:00 oraz 15:00–17:00 na terenie Galerii Krakowskiej – w miejscu tranzytu ruchu pieszego między przystankami autobusowymi, tramwajowymi i przejściem podziemnym prowadzącym do dworca kolejowego i autobusowego (rys 1 i 2). Badana próba wynosiła 137 osób korzystających ze schodów ruchomych oraz 92 osoby korzystające ze schodów zwykłych. Łączna liczba przebadanych klientów wynosiła 229.

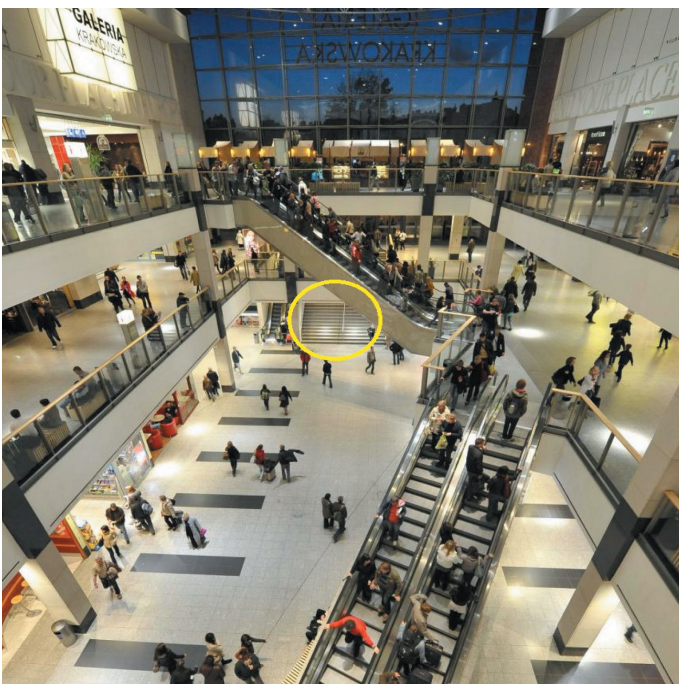
Podczas pierwszego badania zmierzono czas jazdy schodami ruchomymi, czas oczekiwania na wejście na ruchome schody (długość kolejki) oraz liczbę schodów, jaka dzieli poszczególne osoby korzystające z urządzenia. Ostatnią miarą była liczba osób korzystających z ruchomych schodów.

W drugiej części pomiarów ustalono dodatkowo liczbę osób wchodzących po ruchomych schodach, mijających osoby stojące w miejscu na danym stopniu.

W przypadku pomiarów związanych ze schodami zwykłymi wzięto pod uwagę czas wejścia po schodach oraz całkowitą liczbę osób przebywających na schodach.



Rys. 1. Lokalizacja ruchomych schodów, na których były przeprowadzane pomiary



Rys. 2. Lokalizacja zwykłych schodów, na których były przeprowadzane pomiary

Rysunki 1 i 2 przedstawiają położenie punktów pomiarowych w Galerii Krakowskiej. Różnica wysokości jest ta sama, jednak schody oddalone są od siebie o około 25 metrów. W związku z tym pasażerowie nie podejmują decyzji w danej chwili, jednak ich wybór jest spowodowany przede wszystkim rodzajem atrakcji, do której zmierzają. W przypadku galerii handlowych różnice poziomów są projektowane w taki sposób, aby klienci w jak największym stopniu skorzystali ze sklepów o największej powierzchni.

W związku z potrzebą scharakteryzowania własności schodów do pomiarów przybrano następujące wartości:

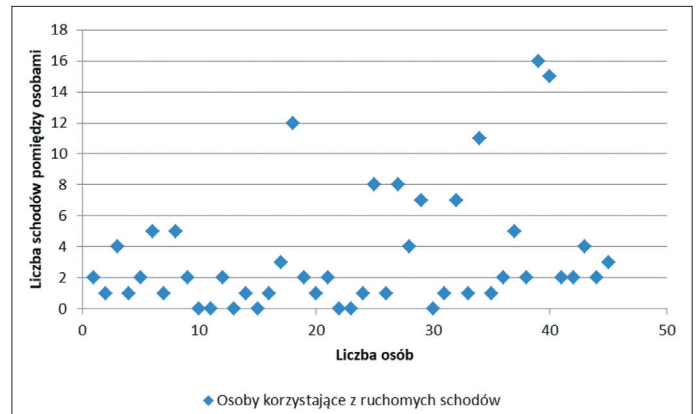
- długość jednego stopnia wynosi 34 cm,
- faktyczny czas przejazdu (stojąc) wynosi 22 s,
- szerokość stopnia wynosi 112 cm.

Pomiary nr 1

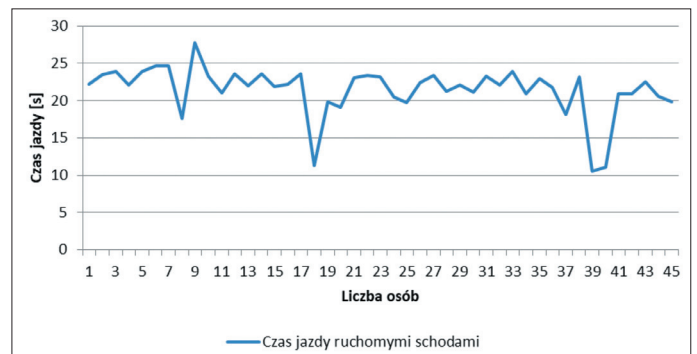
W pomiarach nr 1 identyfikowano liczbę schodów, jaka dzieli poszczególne osoby korzystające z urządzenia, czas jazdy schodami ruchomymi, czas oczekiwania na wejście na ruchome schody (długość kolejki).

Na rysunku 3 widać, że odległość między poszczególnymi osobami to najczęściej wartości w granicach od 0 do 3 schodów. Średnia liczba schodów to 3 w stosunku całości pomiaru.

Na rysunku 4 można zauważyć wyróżniającą się linię trendu w przypadku podróży ruchomymi schodami. Średni czas podróży wynosi 21,43 s. Różnorodność czasu jest spowodowana częstym pokonywaniem ruchomych schodów z inną prędkością. Większość klientów nie pokonuje schodów samodzielnie, jednak pojedyncze osoby pokonywały od 3 do 9 schodów samodzielnie.



Rys. 3. Struktura liczby schodów między klientami (schody ruchome)



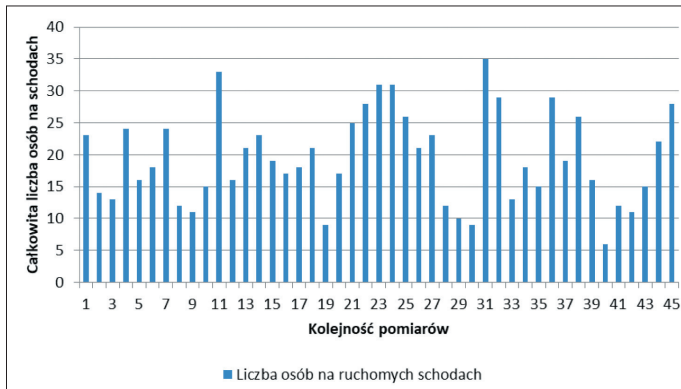
Rys. 4. Charakterystyka czasów podróży schodami ruchomymi

Na rysunku 5 można zauważyć, jak duże były kolejki do ruchomych schodów. Zazwyczaj były to wartości oscylujące między 0 a 6 sekundami. Maksymalną wartością było 10 sekund, jednak w większości przypadków klienci bez oczekiwania w kolejce korzystali ze schodów. Średni czas oczekiwania w kolejce to około 2 sekundy.



Rys. 5. Kolejka osób oczekujących na schody ruchome

Rysunek 6 przedstawia liczbę osób korzystających w danym momencie z ruchomych schodów. Z powyższego wykresu można stwierdzić, że średnia liczba osób przebywających w danej chwili na schodach ruchomych to 19,42 osoby.



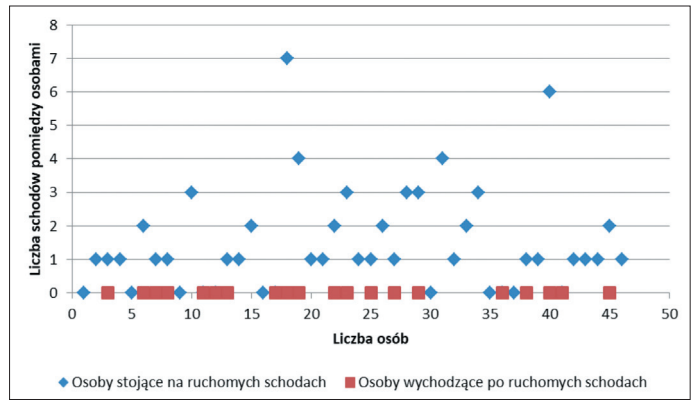
Rys. 6. Całkowita liczba osób przebywających na schodach ruchomych

Pomiary nr 2

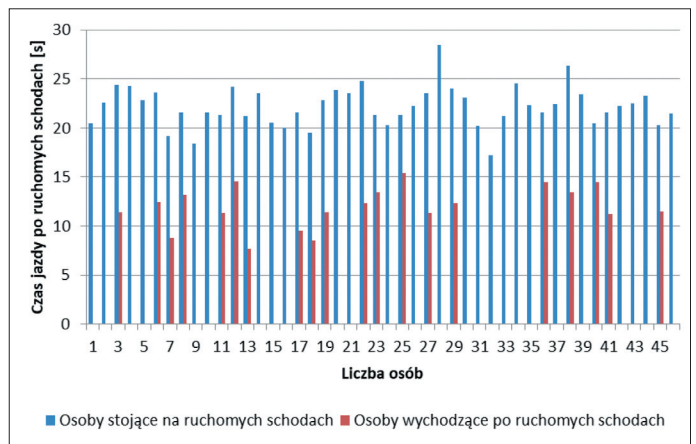
Podczas drugich pomiarów zwrócono uwagę dodatkowo na liczbę osób przemieszczających się schodami ruchomymi.

Seria pierwsza (rys. 7) przedstawia liczbę schodów pomiędzy klientami, którzy pokonują schody ruchome wchodząc po nich (automatycznie wartość jest równa 0). Natomiast w serii drugiej, gdzie pod uwagę wzięto liczbę schodów pomiędzy klientami stojącymi, wartości wahają się pomiędzy 0 a nawet 7 stopniami.

Na rysunku 8 można rozgraniczyć dwie serie, gdzie w pierwszej widoczna jest znaczna przewaga czasu podróży schodami, natomiast w serii drugiej, gdy podróżny porusza się schodami, czas podróży automatycznie jest zmniejszony. Średni czas podróży dla osób podróżujących bez przemieszczania się na schodach to 22,2 sekundy, natomiast dla osoby wchodzącej po schodach to 11,95 sekundy.



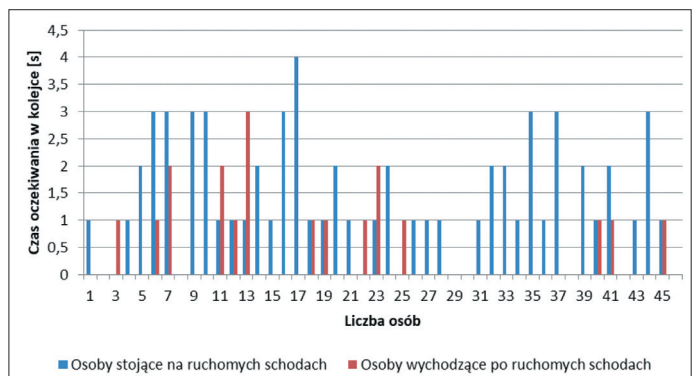
Rys. 7. Struktura liczby schodów między klientami (schody ruchome)



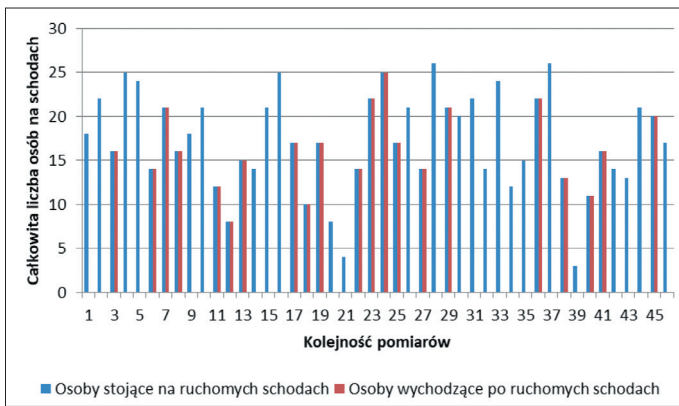
Rys. 8. Czas jazdy osób stojących w miejscu oraz przemieszczających się schodami ruchomymi

W tym przypadku (rys. 9) bardzo dokładnie można zbadać zależność długości kolejki ze względu na plan, w jaki pasażer chce pokonać różnicę wysokości. W większości przypadków osoba, która z góry planuje pokonać ruchome schody w jak najkrótszym czasie, ma zamiar wejść na ruchome schody jak najszybciej. Niestety, w związku w dużym natężeniu ruchu wartości te są niezależne od chęci danego pasażera. Średnia wartość, jaką trzeba odczekać w kolejce, to 1,37 sekundy.

Na rysunku 10 widać ostateczną liczbę osób korzystającą ze schodów w dwóch momentach (podczas postoju w miejscu, jak i również poruszania się po ruchomych schodach). Można znaleźć zależność, że w przypadku, gdy osób na scho-



Rys. 9. Liczba osób oczekująca w kolejce na skorzystanie ze schodów ruchomych



Rys. 10. Całkowita liczba osób korzystająca w danym momencie ze schodów ruchomych

dach jest mniej, czas pokonywania schodów jest krótszy. Jest to spowodowane głównie możliwością pokonania kilku schodów dodatkowo. W tym przypadku średnia liczba osób korzystających z ruchomych schodów to 17,15.

Symulacje

Wykonano symulacje różnych scenariuszy natężenia ruchu pieszego oraz długości schodów w celu oszacowania przyrostu kolejki, czasu pokonania schodów, średniego czasu dla całej populacji w każdej sekundzie symulacji dla dwóch sytuacji: stania i poruszania się.

Z uzyskanych za pomocą pomiarów wartości odstępów między kolejnymi osobami oraz prędkości ich poruszania się można obliczyć, po jakim czasie nastąpi wejście kolejnej osoby na schody. W każdej sekundzie symulacji jest sprawdzane, czy następna osoba chcąc skorzystać ze schodów zgłasza się szybciej niż kolejna osoba wchodzi na schody – zależy to od ustalonego natężenia ruchu. W przypadku, gdy natężenie jest większe niż przepustowość, dodawane są osoby do kolejki. Za sumę czasu podróży przyjmuje się czas oczekiwania w kolejce plus czas podróży. Wynikiem symulacji jest porównanie czasów w każdej sekundzie symulacji oraz uśredniony czas podróży dla wszystkich osób od początku symulacji. W symulacji porównywana jest sytuacja, gdy wszyscy stoją lub idą, dla jasności wyników.

Jak wynika z pomiarów, gęstość ruchu wynosi 0,67 os./m w przypadku chodzenia oraz 1,78 os./m w przypadku stania. Średnia prędkość wchodzenia po schodach wynosi 0,43 m/s, co jest wynikiem podobnym do tego zbadanego w literaturze (0,48 m/s) [5], a samych schodów – 0,5 m/s. Daje to następującą przepustowość: 3204 os./h dla stania oraz 2243 os./h dla chodzenia. Średni czas podróży wynosi dla schodów o długości 11 metrów: 22 s dla osób stojących oraz 11,8 sekundy dla osób idących. Według normy EN 115–1, dla schodów o szerokości stopnia 1000 mm oraz prędkości 0,5 m/s przepustowość wynosi od 3000 os./h (niezatłoczone) do 6000 os./h (zatłoczone).

Ze względu na różnice przepustowości, porównując te dwie sytuacje, rozważamy trzy przypadki:

1. Poniżej 2243 os./h – nie tworzy się kolejka ani wśród osób wchodzących, ani stojących. Średni czas podróży wynosi około 11,8 sekundy dla osób wchodzących i 22 s dla osób stojących.

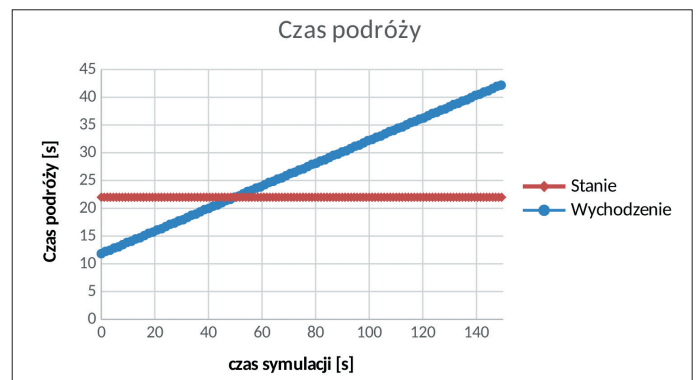
2. Między 2243 a 3204 os./h – tworzy się kolejka wśród osób idących. Z każdą osobą dochodzącą do kolejki, czas podróży osób idących rośnie.
3. Powyżej 3204 os./h – tworzy się kolejka zarówno wśród osób idących, jak i stojących. Czas podróży rośnie wraz ze wzrostem kolejki dla obu przypadków.

Wykonano dwie symulacje: dla przypadku numer 2 – dla natężenia pieszych wynoszącego 2700 os./h oraz dla przypadku numer 3 – dla natężenia pieszych wynoszącego 4000 os./h. Przeanalizowano w nich: czas podróży w zależności od czasu od początku symulacji, średni czas podróży (dla wszystkich osób od początku symulacji) w zależności od czasu od początku symulacji oraz czas podróży w zależności od liczby osób stojących w kolejce.

Symulacja dla natężenia wynoszącego 2700 os./h

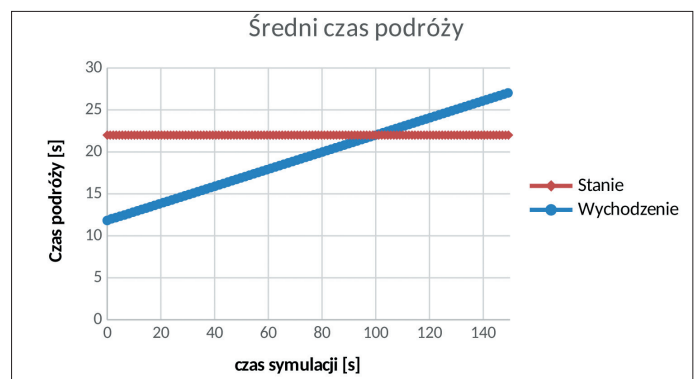
Tak jak wynika z pomiarów, na początku symulacji czas wyjazdu stojąc wynosi 22 s, a idąc – 11,8 sekundy. Przy danym natężeniu ruchu, w przypadku osób wchodzących, kolejka zwiększa się o kolejną osobę co 7,89 sekundy.

W związku z przyrostem kolejki, w 51. sekundzie czas wchodzenia plus stania w kolejce staje się równy czasowi podróży jadąc na stojąco (przy 5 osobach w kolejce), co obrazuje rys. 11.



Rys. 11. Czas podróży w zależności od sekundy symulacji przy natężeniu 2700 os./h

Biorąc jednak pod uwagę średni czas podróży wszystkich osób, czas ten zrówna się dopiero, jak widać na wykresie, w 102. sekundzie, przy 10 osobach w kolejce (rys. 12). W takim przypadku średni czas podróży rośnie o 0,1 s na każdą sekundę symulacji.

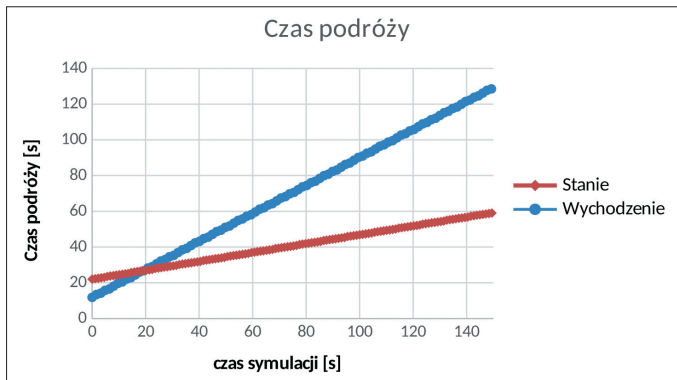


Rys. 12. Średni czas podróży w zależności od sekundy symulacji przy natężeniu 2700 os./h

Symulacja dla natężenia wynoszącego 4000 os./h

Drugim rozpatrywanym przypadkiem było natężenie równe 4000 osób na godzinę. W tej sytuacji zarówno wśród pasażerów stojących, jak i idących, tworzy się kolejka, która sprawia, że czas podróży się wydłuża. W przypadku osób stojących kolejka zwiększa się o jedną osobę co 4,52 sekundy, a w przypadku osób idących – co 2,05 sekundy.

Stojący i idący osiągają taki sam czas podróży (26 sekund) już w 19 sekundzie symulacji (rys. 13). Przyrost czasu podróży dla osób stojących w każdej sekundzie symulacji wynosi 0,22 s, a dla idących – 0,98 s.



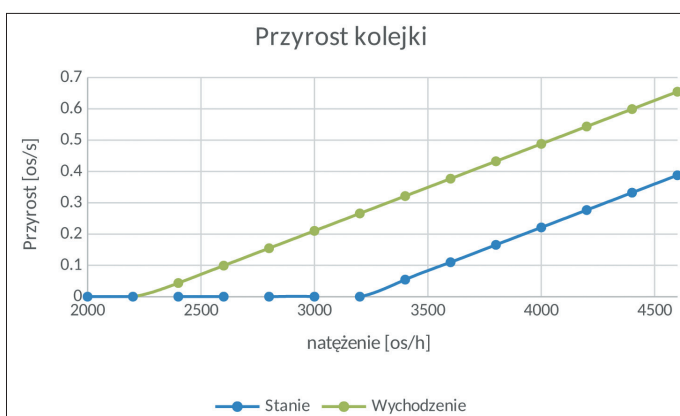
Rys. 13. Czas podróży w zależności od sekundy symulacji przy natężeniu 4000 os./h

Średni czas wyjścia zrównuje się w 38. sekundzie symulacji. Na każdą sekundę symulacji czas podróży stojących wzrasta o 0,12 s, a idących o 0,78 s.

Przyrost kolejki w zależności od natężenia ruchu

Na podstawie pomiarów i symulacji obliczono przyrost liczby osób w kolejce w każdej sekundzie symulacji, oraz optymalną kolejkę (taką, w której czas osób wchodzących i stojących będą sobie równe) w zależności od natężenia ruchu pieszego. Przyrost osób w kolejce przedstawiono w osobach na sekundę w odniesieniu do natężenia ruchu pieszego i przedstawiono na wykresie 14.

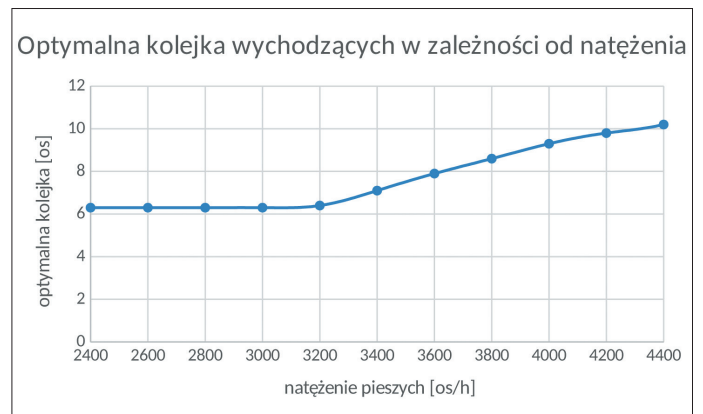
Na rys. 14 widać dwie sytuacje – zarówno przypadku stania, jak i wchodzenia – poniżej oraz powyżej przepustowości. Przepustowość w sytuacji, gdy ludzie wchodzą wy-



Rys. 14. Prędkość przyrostu kolejki w zależności od natężenia ruchu

nosi 2243, a gdy stoją – 3204 osoby na godzinę. Kolejka w każdej sekundzie symulacji przyrasta o 0,28 osoby więcej na każde 1000 osób na godzinę natężenia.

Optymalna kolejka, przy której czas stania i wyjścia jest jednakowy, dla sytuacji, w której tworzy się kolejka jedynie dla osób wchodzących, wynosi 6,3 osoby. Po przekroczeniu przepustowości schodów, na których wszyscy stoją, wartości optymalnej kolejki rosną w tempie około 3,2 osoby w kolejce na 1000 pasażerów na godzinę natężenia ruchu (rys. 15).



Rys. 15. Wielkość kolejki, dla której występuje taki sam czas podróży dla wchodzących i stojących w zależności od natężenia ruchu

Podsumowanie

Artykuł był próbą odpowiedzi na pytanie, czy, biorąc pod uwagę średni czas podróży, lepiej jest wchodzić, czy stać na schodach ruchomych. Odpowiedź nie jest jednoznaczna – w przypadku natężenia ruchu mniejszego niż przepustowość podczas wchodzenia, osoby wchodzące są w stanie zaoszczędzić czas w stosunku do sytuacji, gdyby zmuszone były stać. Jednak w sytuacji, gdy przed schodami tworzy się kolejka około 6 osób (spowodowana przez mniejszą gęstość, a co za tym idzie przepustowość osób wchodzących) – czas tracony w niej nie zostanie zrekomensowany poprzez szybsze wyjście po schodach.

Literatura

1. Urząd Dozoru Technicznego: schody ruchome, chodnik ruchomy: nazwa, definicja i podleganie https://www.udt.gov.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=-553:schody-ruchome-chodnik-ruchomy-nazwa-definicja-i-podleganie&catid=160&Itemid=555 (dostęp: 22.05.19)
2. *The tube at a standstill: why TfL stopped people walking up the escalators.*, The Guardian 16.01.2016.
3. *Capacity Analysis of Pedestrian and Bicycle Facilities Recommended Procedures for the „Pedestrians”*, Chapter of the Highway Capacity Manual, Federal Highway Administration Research and Technology, luty 1998.
4. *Guidelines on evacuation analysis for new and existing passenger ships*, International Maritime Organisation, Maritime safety committee, MSC.1/Circ.1533, czerwiec 2016.
5. Kretz T., Grünebohm A., Kessel A., Klüpfel H., Meyer-König T., & Schreckenberger M. (2008), *Upstairs walking speed distributions on a long stairway*, Safety Science, 46(1).