

**MODELOWANIE I SYMULACJA PROCESÓW EWAKUACJI
Z WYKORZYSTANIEM OPROGRAMOWANIA FLEXSIM – STUDIUM
PRZYPADKU
MODELLING AND SIMULATION OF EVACUATION PROCESSES
WITH THE USAGE OF FLEXSIM SOFTWARE – A CASE STUDY**

Krzysztof JURCZYK
kjurczyk@zarz.agh.edu.pl

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Zarządzania
Katedra Inżynierii Zarządzania

Witold Aleksander CEMPEL
witold.cempel@flexsim.pl

InterMarium Sp. z o.o.

Streszczenie: Symulacja komputerowa stanowi doskonałe narzędzie służące analizie złożonych procesów. Znajduje zastosowanie w sytuacjach, gdy zawodzą dostępne metody analityczne jednocześnie dostarczając jak największą liczbę informacji o analizowanym procesie. W niniejszym artykule wykazano możliwość zastosowania oprogramowania do symulacji procesów dyskretnych FlexSim w weryfikacji przyjętych założeń dotyczących sposobu przeprowadzania ewakuacji budynku Szkoły Podstawowej im. Św. Kingi w Podstolicach. Celem badań było wykazanie możliwości ewakuacji osób przebywających na terenie placówki w zadanym czasie.

Abstract: Computer simulation is an excellent tool for the analysis of complex processes. It can be used in situations where the available analytical methods cannot be implemented. The article addresses the possibility of using FlexSim 3D discrete event simulation software in verification of current assumptions regarding the evacuation plan the building of the Elementary School named after St. Kinga in Podstolice, Wieliczka. The aim of the research was to prove the possibility of evacuating people staying in the facility in a given time.

Słowa kluczowe: ewakuacja, modelowanie, symulacja, FlexSim

Keywords: evacuation, modelling, simulation, FlexSim

WSTĘP

Stale rosnąca liczba mieszkańców miast w połączeniu z nieuchronnie malejącymi zasobami gruntów dostępnych pod nowe inwestycje budowlane doprowadziły do wykształcenia się tendencji w urbanistyce polegającej na powstawaniu wielopiętrowych budynków zarówno mieszkaniowych jak i biurowych (Li i in., 2017). W budynkach takich zawsze przebywa bardzo duża liczba osób, zatem szczególnego znaczenia nabierają kwestie bezpieczeństwa. Jedną z nich bez wątpienia są odpowiednie procedury ewakuacyjne, które w sytuacji wystąpienia zagrożenia umożliwią sprawne usunięcie z budynku osób w nim przebywających i ich bezpieczny transport do strefy bezpieczeństwa.

Problematyka wypracowania odpowiednich procedur ewakuacyjnych stanowi zatem główne wyzwanie dla architektów i projektantów budynków. W niniejszej pracy wykazano możliwość wykorzystania oprogramowania do symulacji procesów dyskretnych FlexSim w weryfikacji przyjętych założeń dotyczących sposobu przeprowadzania ewakuacji budynku. Badania przeprowadzono korzystając z planów architektonicznych Szkoły Podstawowej im. Św. Kingi w Podstolicach, gmina Wieliczka. Celem badań było wykazanie możliwości ewakuacji osób przebywających na terenie placówki w czasie 5 minut od momentu ogłoszenia sygnału alarmowego.

1. EWAKUACJA W ZARYSIE

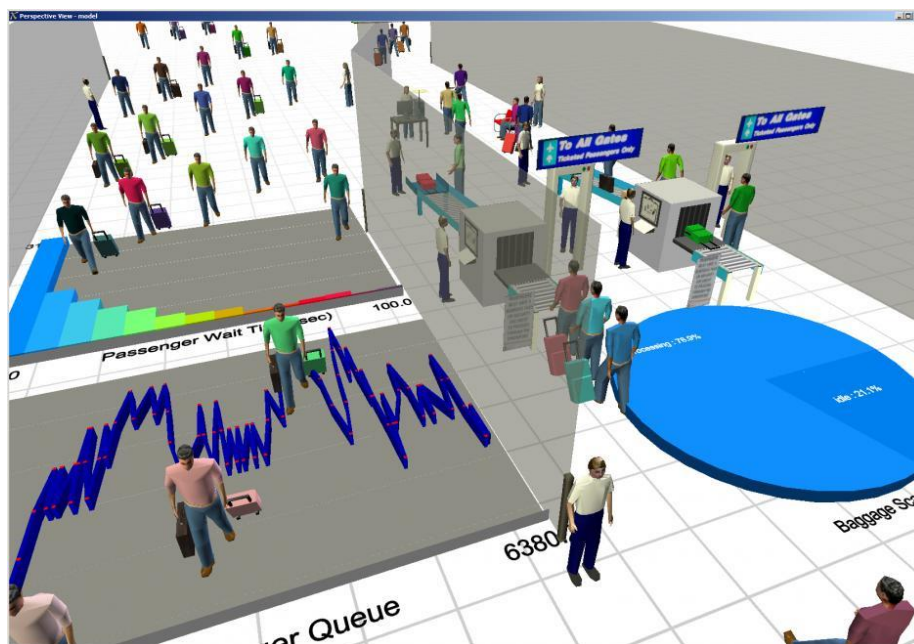
Poprzez ewakuację należy rozumieć „jeden ze sposobów ochrony ludności przed zagrożeniami, który polega na przemieszczaniu ludzi, zwierząt i/lub mienia ze strefy materializacji zagrożenia do miejsca bardziej bezpiecznego” (Gromek i in., 2017a, s. 75). Problematyka ewakuacji jest szeroko opisywana zarówno w polskiej, jak i światowej literaturze. P. Janik (2010) w swoim artykule omawia problematykę poprawnego wytyczania dróg ewakuacyjnych w budynkach. Na podobny problem w swojej pracy zwrócił również m.in. Ł. Chołuj. Autor zwraca uwagę, że bezpieczne warunki ewakuacji wynikają bezpośrednio z założeń przyjętego scenariusza pożarowego, a zapewnienie bezpiecznych warunków ewakuacji wynika z zależności wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji do dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji (Chołuj, 2012). W innych pracach ponadto szerzej omówiono problematykę ewakuacji osób z placówek użyteczności publicznej (Gromek i in., 2017a; 2017b; Kapałka, 2015; Pecio i Łącki, 2016; Wysocki, 2014), szpitali i obiektów służby zdrowia (Frączek i Pawlak, 2014; Orłowska i Cisek, 2016; Stankiewicz i Milewski, 2008) czy kopalń i obiektów górniczych (Grodzicki i Musioł, 2013; Kapusta i in., 2015; Szlązak i in., 2014). W literaturze – zwłaszcza anglojęzycznej – można ponadto zauważyć stale rosnące zainteresowanie tematyką zastosowania metod modelowania symulacyjnego do analizy i optymalizacji procesów ewakuacyjnych. W jednej z takich prac szczegółowo omówiono problematykę wykorzystania symulacji agentowej w modelowaniu procesów ewakuacji osób z budynków biurowych (Lin i in., 2010). Przegląd modeli służących optymalizacji czasu ewakuacji osób w sytuacji wystąpienia różnego rodzaju zagrożeń przedstawili z kolei Vermuyten i in. (2016). Podobne prace zaproponowali m.in. Gwynne i in. (1999) oraz Santos i Aguirre (2004).

Model symulacyjny ewakuacji szpitala psychiatrycznego przedstawił w swojej pracy m.in. zespół pod przewodnictwem prof. J. Mikulika (Mikulik i in., 2014). Autorzy na podstawie

modelu symulacyjnego utworzonego w oprogramowaniu FlexSim HealthCare zaproponowali procedury usprawnień aktualnie obowiązujących planów ewakuacyjnych co pozwoliło na skrócenie czasu opuszczania budynków szpitalnych z 48 minut do 23 minut dla wariantu nocnego oraz z 17 minut do 6 minut dla wariantu dziennego. W niniejszym artykule również wykorzystano oprogramowanie FlexSim, które szerzej omówiono w kolejnym rozdziale.

2. OPROGRAMOWANIE FLEXSIM

FlexSim 3D Simulation Software to zaawansowany, nowoczesny pakiet symulacyjny umożliwiający modelowanie, symulację oraz optymalizację złożonych procesów (Jurczyk, 2017). Najczęściej wspieranymi przez to oprogramowanie obszarami działalności przedsiębiorstw są produkcja, logistyka oraz usługi (Delgado i in., 2016; Dragović i in., 2017; Jia i in., 2015; Kłaś i in., 2017; Kłaś i Jurczyk, 2017; Kogut, 2017; Li i in., 2017; Szczepański i in., 2017). Narzędzie to, dzięki technologii OpenGL, wykorzystywanej głównie przez producentów gier komputerowych umożliwia budowę modelu trójwymiarowego oraz realistyczną wizualizację procesów (Rys. 1).



Rys. 1. Trójwymiarowy model przepływu pasażerów w terminalu lotniczym wykonany w FlexSim

Źródło: <https://www.talumis.com/wp-content/uploads/2013/12/flexsim5.jpg> (30.04.2018).

Na pierwszy rzut oka proces budowy modelu przypomina grę komputerową. W przeciwieństwie jednak do gier komputerowych procesowi budowy modelu symulacyjnego w FlexSim przyświeca konkretny cel, którym jest uzyskanie wymiernych, materialnych korzyści. Realistyczna wizualizacja procesów stanowi dodatkowy walor szczególnie ważny dla menedżerów i inżynierów młodego pokolenia. Proces budowy modelu symulacyjnego

w FlexSim polega na nanoszeniu odpowiednich obiektów na płaszczyznę modelu techniką „drag and drop” („przeciągnij i upuść”), a następnie odpowiednim łączeniu tych obiektów w system zgodnie z logiką przepływu i dalszej jego parametryzacji. Łatwość w obsłudze oraz przyjazny interfejs użytkownika sprawiają, że wystarczy kilka chwil, aby zbudować swój pierwszy model symulacyjny. Dostępne biblioteki obiektów zostały zaprojektowane w taki sposób, aby umożliwić użytkownikowi wierne odwzorowanie właściwości poszczególnych składowych rzeczywistego systemu przy jednoczesnym zachowaniu pełnej kontroli nad strukturą tworzonego modelu. Możliwe jest ponadto tworzenie własnych bibliotek obiektów 3D, dostosowanych do indywidualnych, unikalnych potrzeb, czy też budowa modeli w oparciu o istniejące plany CAD. Już sama nazwa oprogramowania FlexSim sugeruje jego dużą elastyczność w sensie użytkowania i zastosowań.

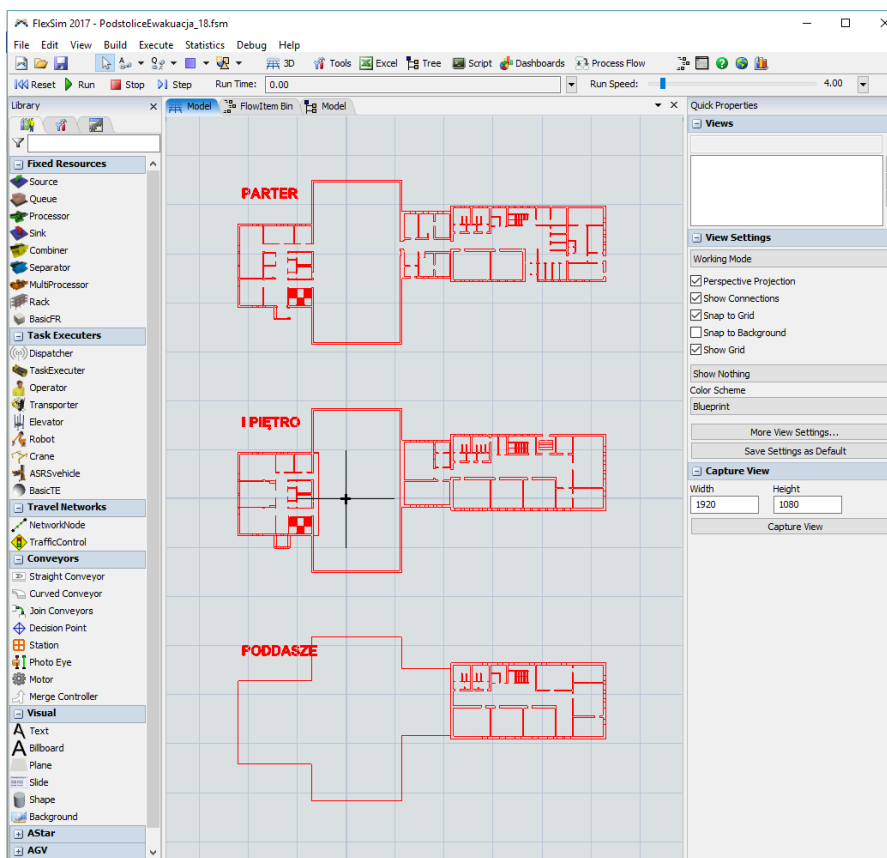
Możliwości obliczeniowe, jakie daje oprogramowanie FlexSim dodatkowo podnoszą użyteczność tego narzędzia. Rozbudowana warstwa numeryczna pozwala uzyskiwać niejednokrotnie zaskakujące rezultaty zarówno poprzez analizę wybranych scenariuszy, jak i pełny przegląd przestrzeni możliwych rozwiązań. Wbudowany moduł OptQuest® umożliwia uzyskanie rozwiązania optymalnego lub zbliżonego optymalnemu w stosunkowo krótkim czasie. Moduł ten został zaprojektowany przez trzech profesorów University of Colorado (OptTek, 2018), którzy łącząc matematykę, inżynierię i sztuczną inteligencję opracowali w latach 90-tych XX w. nowe metody optymalizacji złożonych systemów znanych pod nazwą optymalizacji symulacyjnej. Moduł Eksperimenter pozwala powtórzyć eksperyment symulacyjny zadaną liczbę razy ustalaną indywidualnie w zależności od złożoności problemu oraz stopnia zmienności poszczególnych parametrów go opisujących. Wreszcie moduł ExpertFit®, opracowany przez dr Averilla M. Lawa (Averill-Law, 2018), umożliwia odwzorowanie naturalnej zmienności modelowanych procesów poprzez dopasowanie odpowiednich rozkładów teoretycznych do danych empirycznych. Analizę wyników przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych ułatwiają ponadto dodawane do modelu wybrane wykresy i statystyki generowane dynamicznie.

3. STUDIUM PRZYPADKU

3.1. Budowa modelu symulacyjnego

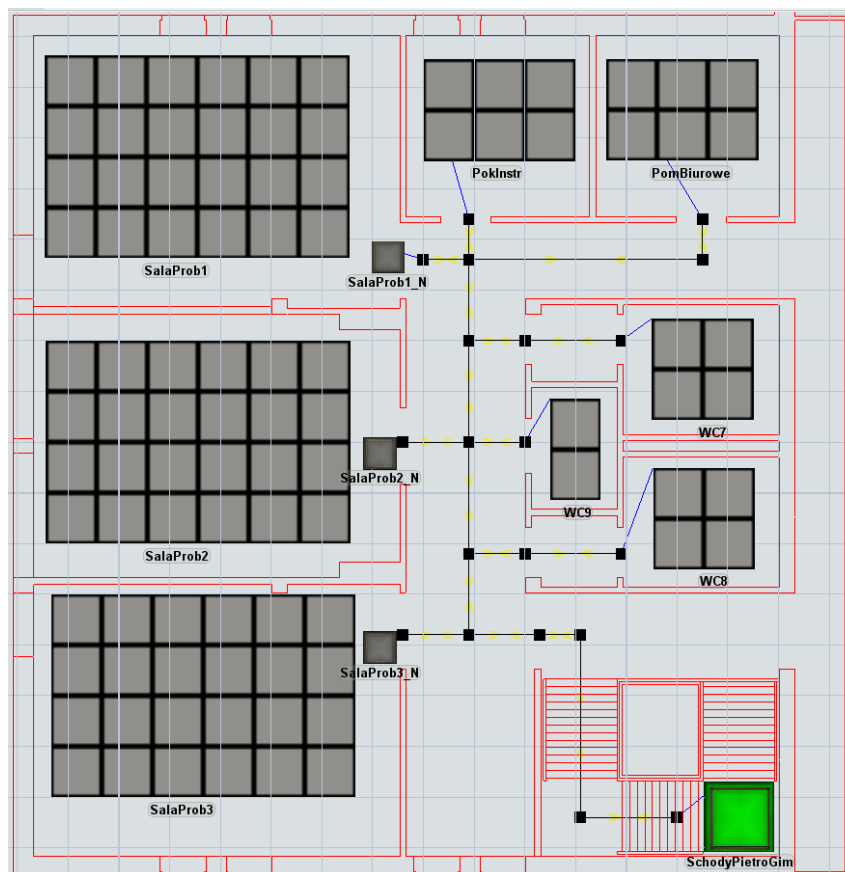
Oprogramowanie FlexSim zostało wykorzystane do modelowania procesu ewakuacji osób z budynku Szkoły Podstawowej im. Św. Kingi w Podstolicach, gmina Wieliczka. Pierwszym etapem prowadzonych analiz było odwzorowanie schematu konstrukcyjnego analizowanego budynku Szkoły Podstawowej w Podstolicach. Następnie utworzone plany

zostały zaimportowane do programu FlexSim i wykorzystane jako tło płaszczyzny modelowania (Rys. 2), na którą na dalszym etapie modelowania zostały następnie odpowiednie obiekty z dostępnej biblioteki obiektów 3D.



Rys. 2. Zaimportowane plany pomieszczeń jako tło płaszczyzny modelowania
Źródło: Opracowanie własne.

Odwzorowaniu dostępnych ciągów komunikacyjnych posłużyły aktualnie obowiązujące plany ewakuacyjne. W utworzonym modelu symulacyjnym ciągi komunikacyjne zostały zbudowane w postaci sieci połączonych ze sobą węzłów. Połączenia pomiędzy kolejnymi węzłami przyjmują postać ścieżek z zadaniem kierunkiem przepływu, czego przykład zaprezentowano na rysunku 3.

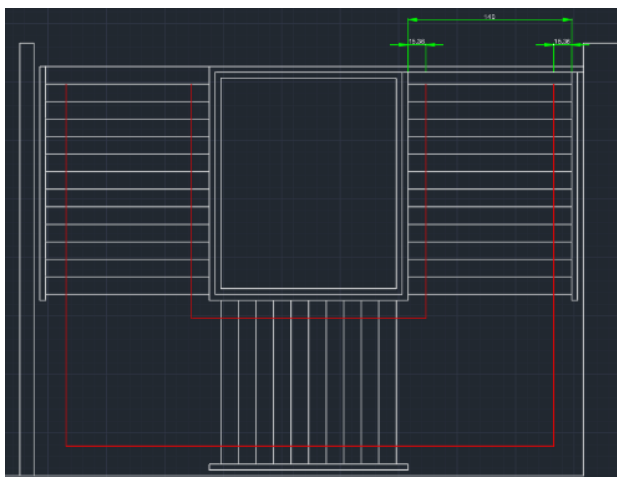


Rys. 3. Odwzorowanie ciągów komunikacyjnych w postaci sieci węzłów (fragment I piętra)
 Źródło: Opracowanie własne.

Należy zaznaczyć jedną istotną kwestię, jaka została uwzględniona w przypadku utworzonych planów, a która dotyczyła przede wszystkim prędkości chodu człowieka oraz sposobu wytyczania ścieżek chodu osób w obrębie analizowanej placówki.

Prędkość chodu osób ustalono w oparciu o badania L.E. Hendersona (University of Sydney). Stwierdzono, że pieszy przemieszcza się z własną prędkością, która jest dla niego komfortowa. Prędkość ta jest zależna od wieku, płci, otoczenia, pory dnia i przeciętnie wynosi 1,34 m/s (Henderson, 1971; Henderson i Jenkins, 1974; Henderson i Lyons, 1972).

Szerokość ścieżek dla osób poruszających się przez korytarze i klatki schodowe, czyli liczbę osób mogących iść równolegle, obliczono w oparciu o wymiary cech antropometrycznych człowieka oraz elementy modelu J. Paulsa dotyczącego klatek schodowych (Pauls, 1987). Podczas swoich badań J. Pauls ustalił, że podczas schodzenia schodami osoby kołyszą się do przodu, do tyłu i na boki oraz starają się nie dotykać ścian i siebie nawzajem. Pauls wprowadził tzw. „efekt krawędzi”, w którym założono, że szerokości klatek schodowych należy pomniejszyć obustronnie o 15,36 cm podczas obliczania przepływów w związku z kołysaniem się ludzi podczas ruchu w dół (Rys. 4).



Rys. 4. Wytyczenie ścieżki na klatce schodowej z zastosowaniem efektu krawędzi
Źródło: Opracowanie własne.

Po uwzględnieniu wymiarów związanych z efektem krawędzi uzyskano dostępną przestrzeń na klatce schodowej wynoszącą 110 cm.

Na podstawie danych antropometrycznych zawartych w normie PN EN 547-3+A1:2010 dotyczącej wymiarów cech antropometrycznych człowieka można obliczać np. minimalne wymiary otworów dostępu. Dane antropometryczne wynikają z pomiarów przeprowadzonych dla połączonej populacji europejskiej kobiet i mężczyzn i wg nich szerokość między łokciami osoby dorosłej wynosi 54,5 cm.

Posiadając rzeczywiste szerokości ciągów komunikacyjnych budynku oraz znając szerokość ciała człowieka ustalono ile osób może poruszać się równolegle wzdłuż korytarzy lub klatek schodowych. Poniżej przykładowe obliczenie dla środkowej klatki piętra I.

$$\text{liczba osób} = \text{dostępna szerokość klatki} \div \text{szerokość ciała człowieka}$$

$$\text{liczba osób} = 110 \div 54,5 = 2,02 \approx 2$$

Podstawowym parametrem, który determinuje ruch w modelu jest odstęp na krawędzi pomiędzy poruszającymi się obiektami. Odstęp ten determinuje, aby osoby przemieszczały się w sposób jak najbardziej rzeczywisty zachowując odpowiednie odległości pomiędzy sobą, odpowiednią prędkość oraz tworząc kolejki w miejscach o mniejszej szerokości. Odstęp ten obliczono na podstawie badań przeprowadzanych przez D. Helbinga, J. Paulsa oraz firmę KONE zajmującą się badaniem strumienia przemieszczających się osób w miejscach największego tranzytu oraz dostarczaniem rozwiązań usprawniających (Helbing i in., 2000; Pauls, 1987; KONE, 2009). Powyższe badania przygotowano na podstawie pomiarów i obserwacji, a ich wyniki dostarczają takich danych jak np.: wielkość najbardziej efektywnego przepływu osób przypadająca na 1 metr szerokości korytarza, klatki lub drzwi wyrażaną w os./sek., która jest kluczową wartością przy obliczaniu wyżej opisanego odstępu.

Najbardziej efektywny przepływ strumienia ludzi uzyskuje się przy przepływie:

- 1,18 os./sek. w przypadku klatek schodowych (wg badań Paulsa),
- 0,73 os./sek. w przypadku drzwi (wg badań Helbinga),
- 0,83 os./sek. w przypadku przewężeń wynikających z przeszkód (wg badań KONE).

Przy obliczaniu odstepu i tempa pomiędzy poruszającymi się obiektami w modelu posłużono się poniższymi wzorami:

$$\text{tempo}(\text{obliczone dla badanej szerokości}) = \text{szerokość} * \text{tempo}(\text{wg. badań})$$

$$\text{tempo}(\text{obliczone dla 1 osoby}) = \frac{1}{\text{tempo}(\text{obliczone dla badanej szerokości})}$$

$$\text{odstęp} = \text{tempo}(\text{obliczone dla 1 osoby}) * \text{prędkość obiektu}$$

Wyniki obliczeń wykonane dla klatek schodowych, drzwi wyjściowych oraz drzwi wewnątrz budynku zaprezentowano w tabeli 1.

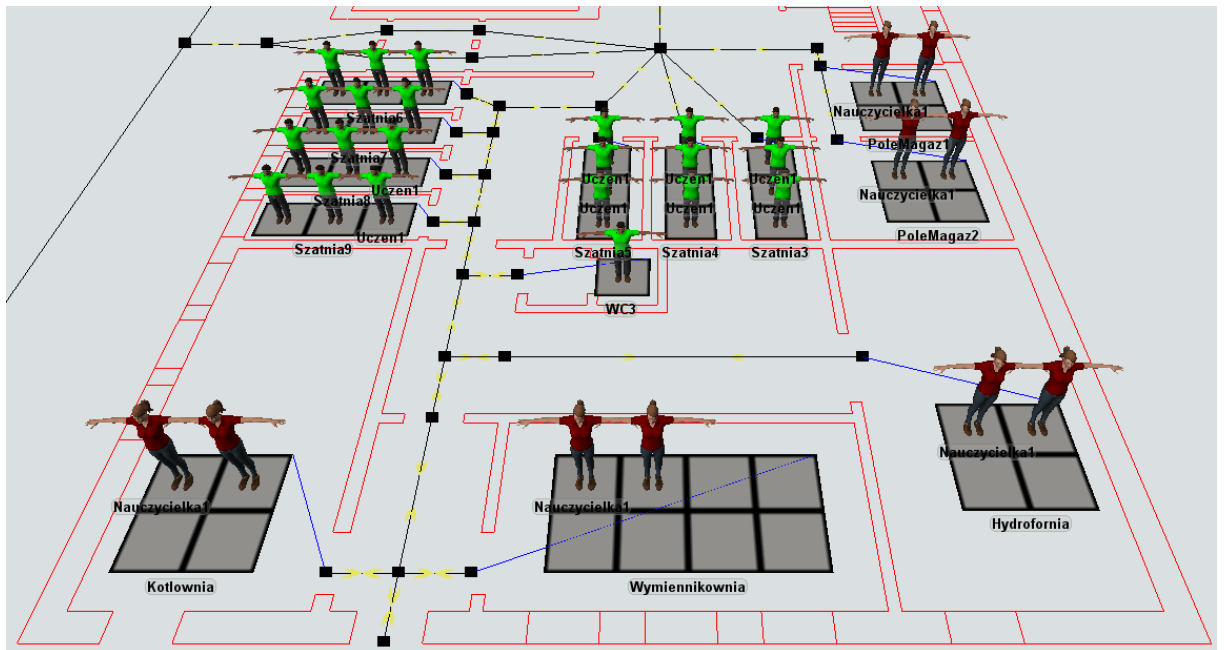
Tabela 1. Wyniki obliczeń dla klatki schodowej

Przeszkoda	szerokość [m]	prędkość obiektu [m/s]	tempo (wg badań dla 1 m szer.) [os./sek.]	tempo (obliczone dla badanej szerokości) [os./sek.]	tempo (obliczone dla 1 osoby) [os./sek.]	odstęp [m]
klatka schodowa (Gimnazjum)	1,09	1,34	1,18	1,29	0,78	1,04
klatka schodowa (SP)	0,79	1,34	1,18	0,94	1,07	1,43
drzwi wyjściowe (Gimnazjum)	1,89	1,34	0,73	1,38	0,72	0,97
drzwi wyjściowe (SP – obok sali gimnastycznej)	1,00	1,34	0,73	0,73	1,37	1,84
drzwi wyjściowe (SP – na wysokości klatki schodowej)	1,90	1,34	0,73	1,39	0,72	0,97
drzwi wyjściowe (SP – kotłownia)	1,00	1,34	0,73	0,73	1,37	1,84
drzwi wyjściowe (SP – między kotłownią i wymiennikownią)	1,00	1,34	0,73	0,73	1,37	1,84
drzwi wyjściowe (I piętro)	1,00	1,34	0,73	0,73	1,37	1,84
drzwi wewnątrz budynku (I piętro)	1,00	1,34	0,73	0,73	1,37	1,84

Źródło: Opracowanie własne.

W modelu zostały utworzone dwa dodatkowe rodzaje elementów przepływu obrazujące osoby, jakie mogą przebywać w budynku Szkoły Podstawowej w Podstolicach. Utworzonymi elementami przepływu są obiekty „Uczeń” oraz „Nauczycielka”. Uogólniając utworzone elementy przepływu obrazują zachowanie dzieci oraz dorosłych.

Utworzone elementy przepływu zostały następnie przypisane do odpowiednich pomieszczeń w budynku, czego przykładowy efekt można zaobserwować na rysunku 5.



Rys. 5. Elementy przepływu przypisane do odpowiedniej lokalizacji – miejsca przebywania
Źródło: Opracowanie własne.

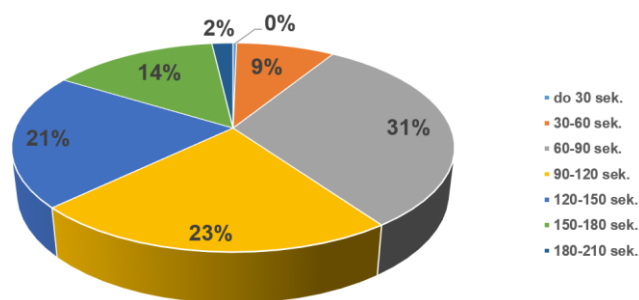
3.2. Wyznaczenie scenariuszy ewakuacji

Przy wykorzystaniu oprogramowania FlexSim 3D Simulation Software zbudowano model symulacyjny odwzorowujący przepływy osób przebywających w budynku Szkoły Podstawowej w Podstolicach. Przygotowany model symulacyjny pozwala na obliczenie czasu ewakuacji osób przebywających na terenie budynku od momentu opuszczenia przez nich zajmowanego pomieszczenia do momentu dotarcia do wyznaczonej strefy bezpieczeństwa. Przeanalizowano trzy najbardziej prawdopodobne warianty:

1. Maksymalne zapełnienie wszystkich sal dydaktycznych w budynku – możliwe do wystąpienia w czasie trwania zajęć dydaktycznych, przy jednoczesnym pominięciu alokacji uczniów w pomieszczeniach takich jak szatnie, toalety itp.
2. Losowe zapełnienie wszystkich sal dydaktycznych, z jednoczesnym uwzględnieniem alokacji uczniów w pomieszczeniach takich jak szatnie, toalety itp. – możliwe do wystąpienia w czasie trwania przerw między zajęciami dydaktycznymi.
3. Maksymalne zapełnienie wszystkich pomieszczeń w budynku – możliwe do wystąpienia np. przy okazji organizacji gminnych/powiatowych zawodów sportowych lub konkursów.

W każdym z wyznaczonych scenariuszy założono, że osoby opuszczające najwyższą kondygnację budynku opuszczają go przemieszczając się jedyną dostępną klatką schodową na najniższą kondygnację, a następnie do najbliższego wyjścia z budynku. Sugerowane założenie ma na celu zmniejszenie obciążenia jedynego wyjścia zlokalizowanego na środkowej kondygnacji.

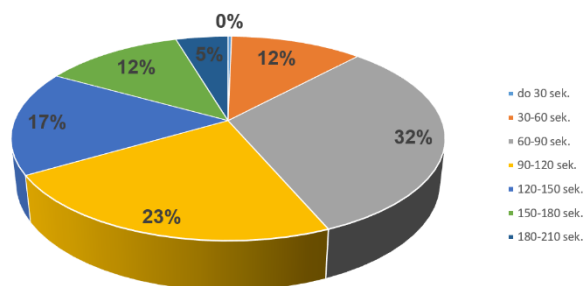
Na rysunku 6 przedstawiono wyniki, jakie uzyskano z symulacji wariantu 1. Tempo, z jakim poruszają się osoby wychodzące z budynku Szkoły Podstawowej jest wysokie – licząc od momentu opuszczenia sal ćwiczeniowych do momentu dotarcia do jednej z dwóch wyznaczonych stref bezpiecznych w ciągu pierwszych 60 sekund placówkę jest w stanie opuścić około 9% osób w niej przebywających. W kolejnej minucie placówkę może jednak opuścić kolejne aż 54% osób w niej przebywających. Najdłuższy czas ewakuacji dla tego wariantu wyniósł 189 sekund.



Rys. 6. Tempo opuszczania budynku – wariant 1

Źródło: Opracowanie własne.

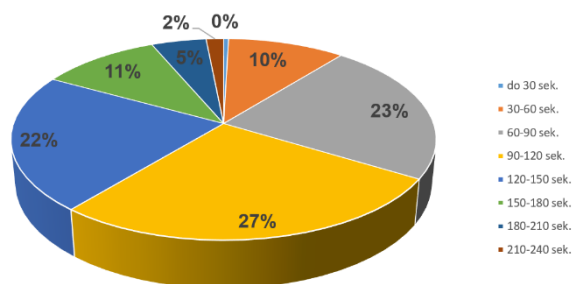
Na rysunku 7 przedstawiono wyniki, jakie uzyskano z symulacji wariantu 2. Tempo, z jakim poruszają się osoby wychodzące z budynku Szkoły Podstawowej również i w tym wypadku jest wysokie – licząc od momentu opuszczenia sal ćwiczeniowych do momentu dotarcia do jednej z dwóch wyznaczonych stref bezpiecznych w ciągu pierwszych 60 sekund placówkę jest w stanie opuścić około 12% osób w niej przebywających. W kolejnej minucie placówkę może jednak opuścić kolejne aż 55% osób w niej przebywających. Najdłuższy czas ewakuacji dla tego wariantu wyniósł 195 sekund.



Rys. 7. Tempo opuszczania budynku – wariant 2

Źródło: Opracowanie własne.

Na rysunku 8 przedstawiono wyniki, jakie uzyskano z symulacji wariantu 3. Tempo, z jakim poruszają się osoby wychodzące z budynku Szkoły Podstawowej również i w tym wypadku jest wysokie – licząc od momentu opuszczenia sal ćwiczeniowych do momentu dotarcia do jednej z dwóch wyznaczonych stref bezpiecznych w ciągu pierwszych 60 sekund placówkę jest w stanie opuścić około 11% osób w niej przebywających. W kolejnej minucie placówkę może jednak opuścić kolejne aż 50% osób w niej przebywających. Najdłuższy czas ewakuacji dla tego wariantu wyniósł 221 sekund.



Rys. 8. Tempo opuszczania budynku – wariant 3

Źródło: Opracowanie własne.

3.3. Zestawienie wyników symulacji

Podsumowując wyniki uzyskane z analizy przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych należy stwierdzić, że wszystkie osoby jakie przebywają na terenie Szkoły Podstawowej mogą ją opuścić w ciągu 4 minut od momentu rozpoczęcia ewakuacji.

W przypadku wariantu 1 czas opuszczenia części budynku przeznaczonej dla Gimnazjum przedstawia się następująco: osoby przebywające na I piętrze opuszczają je kierując się do jedynej klatki schodowej w ciągu maksymalnie 55 sekund, natomiast maksymalny czas ewakuacji dla tej części budynku wynosi 169 sekund. W przypadku części przeznaczonej dla Szkoły Podstawowej osoby przebywające na poddaszu opuszczają je w ciągu maksymalnie 85 sekund udając się na niższe kondygnacje. Osoby przebywające na I piętrze opuszczają budynek w ciągu maksymalnie 189 sekund, co odpowiada maksymalnemu czasowi ewakuacji wszystkich osób z budynku.

W przypadku wariantu 2 czas opuszczenia części budynku przeznaczonej dla Gimnazjum przedstawia się następująco: osoby przebywające na I piętrze opuszczają je kierując się do jedynej klatki schodowej w ciągu maksymalnie 62 sekund, natomiast maksymalny czas ewakuacji dla tej części budynku wynosi 137 sekund. W przypadku części przeznaczonej dla Szkoły Podstawowej osoby przebywające na poddaszu opuszczają je w ciągu maksymalnie 92 sekund udając się na niższe kondygnacje. Osoby przebywające na I piętrze opuszczają budynek w ciągu maksymalnie 195 sekund, co odpowiada maksymalnemu czasowi ewakuacji wszystkich osób z budynku.

W przypadku wariantu 3 czas opuszczenia części budynku przeznaczonej dla Gimnazjum przedstawia się następująco: osoby przebywające na I piętrze opuszczają je kierując się do jedynej klatki schodowej w ciągu maksymalnie 85 sekund, natomiast maksymalny czas ewakuacji dla tej części budynku wynosi 159 sekund. W przypadku części przeznaczonej dla Szkoły Podstawowej osoby przebywające na poddaszu opuszczają je w ciągu maksymalnie 96 sekund udając się na niższe kondygnacje. Osoby przebywające na I piętrze

opuszczają budynek w ciągu maksymalnie 173 sekund, natomiast maksymalny czas ewakuacji wszystkich osób z budynku wynosi 221 sekund.

Zestawienie wyników zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie wyników

Parametr	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3
Liczba osób w budynku	326	326	454
Czas opuszczenia I piętra Gimnazjum [s]	55	62	85
Czas ewakuacji całego Gimnazjum [s]	169	137	159
Czas opuszczenia poddasza [s]	85	92	96
Czas ewakuacji I piętra Szkoły Podstawowej [s]	189	195	173
Czas ewakuacji całej Szkoły Podstawowej [s]	189	195	221

Źródło: Opracowanie własne.

4. PODSUMOWANIE

Opracowanie modelu ewakuacji osób z budynku placówki oświatowej w środowisku Flexsim 3D Simulation Software jest pionierskim projektem tego rodzaju w Europie Środkowo-Wschodniej. Autorska metodologia pozwoliła na właściwe odwzorowanie systemu, jakim jest budynek Szkoły Podstawowej im. Św. Kingi w Podstolicach, co umożliwiło uzyskanie wiarygodnych rezultatów.

Na podstawie przeprowadzonych badań sugeruje się modyfikację aktualnie obowiązującego planu ewakuacji osób przebywających na najwyższej kondygnacji budynku w taki sposób, że przechodzą one klatką schodową nie na I piętro, a następnie do wyjścia ewakuacyjnego, lecz przemieszczają się na parter a dopiero z niego jednym z dostępnych trzech wyjść ewakuacyjnych do wyznaczonej strefy bezpieczeństwa.

Praca realizowana w ramach grantu dziekańskiego nr 15.11.200.329

LITERATURA

1. Chołuj, Ł. (2012). Bezpieczna ewakuacja a założenia scenariusza pożarowego. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, 3, 127–130.
2. Delago, L.C., Machado, M.E., de Brito, F.O., Landgraf, G.C., de Andrade Schroeder, M., Torezzan, C. (2016). Learning Lean philosophy through 3D game-based simulation. *Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference*, 3385–3392.
3. Dragović, B., Tzannatos, E., Park, N.K. (2017). Simulation modelling in ports and container terminals: Literature overview and analysis by research field, application area and tool. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 29(1), 4–34.

4. Frączek, M., Pawlak, K. (2014). Podstawowe możliwości grupy ewakuacji medycznej brygady zmechanizowanej w zakresie ratownictwa medycznego. *Logistyka*, 4, 289–302.
5. Grodzicka, A., Musioł, D. (2013). Ewakuacja górników drogami ucieczkowymi – wybrane wyniki badań ankietowych. *Górnictwo i Geologia*, 8(1), 41–52.
6. Gromek, P., Jarzynka, K., Grabowska, I. (2017a). Ewakuacja I stopnia placówki oświatowej – podejście projektowe. Wprowadzenie. *Zeszyty Naukowe SGSP*, 61(2), 73–87.
7. Gromek, P., Jarzynka, K., Grabowska, I. (2017b). Ewakuacja I stopnia placówki oświatowej – podejście projektowe. Część 2. *Zeszyty Naukowe SGSP*, 63(3), 7–19.
8. Gwynne, S., Galea, E.R., Owen, M., Lawrence, P.J., Filippidis, L. (1999). A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment. *Building and environment*, 34(6), 741–749.
9. Helbing, D., Farkas, I., Vicsek, T. (2000). Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407, 487–490.
10. Henderson, L.F. (1971). The statistics of crowd fluids. *Nature*, 229, 381–383.
11. Henderson, L.F., Jenkins, D.M. (1974). Response of pedestrians to traffic challenge. *Transportation Research*, 8(1), 71–74.
12. Henderson, L.F., Lyons, D.J. (1972). Sexual differences in human crowd motion. *Nature*, 240, 353–355.
13. Janik, P. (2010). Ewakuacja z obiektów - przejście i dojście ewakuacyjne. *Materiały Budowlane*, 7, 62–63.
14. Jia, H.M., Yu, K.C., Zhang, J.C. (2015). The simulation and optimization on the certain type fuel pump assembly line balance based on FlexSim. *Applied Mechanics and Materials*, 741, 850–855.
15. Jurczyk, K. (2017). Granie w symulacje. *KAIZEN*, 2, 50–52.
16. Kapałka, M. (2015). Symulacyjne wsparcie systemów kierowania ruchem pieszych w obiektach publicznych. *Symulacja w Badaniach i Rozwoju*, 6(2), 79–88.
17. Kapusta, M., Skrzypkowski, K., Zagórski, K. (2015). Ewakuacja i transport osób poszkodowanych podczas katastrof górniczych. *Logistyka*, 4, 9093–9101.
18. Kłaś, M., Jurczyk, K. (2017). Modelowanie i symulacja systemów kolejkowych w środowisku FlexSim – studium przypadku. *Studies & Proceedings of Polish Association For Knowledge Management*. 84, 41–53.

19. Kłaś, M., Kardos, S., Moens, D.J. (2017). Technologie symulacyjne w branży chemicznej – stadium przypadku. *Polska Chemia – Magazyn Polskiej Izby Przemysłu Chemicznego*, 2, 48–49.
20. Kogut, K. (2017). Efektywne modele. *KAIZEN*, Nr 4, 58–62.
21. KONE. (2009). Planning Guide For People Flow in transit stations, KONE Corporation.
22. Li, W., Li, Y., Yu, P., Gong, J., Shen, S., Huang, L., Liang, J. (2017). Modeling, simulation and analysis of the evacuation process on stairs in a multi-floor classroom building of a primary school. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 469, 157–172.
23. Lin, Y., Fedchenia, I., LaBarre, B., Tomastik, R. (2010). Agent-based simulation of evacuation: An office building case study. W: W.W.F. Klingsch, Ch. Rogsch, A. Schadschneider, M. Schreckenberg (red.), *Pedestrian and evacuation dynamics 2008* (347–357). Springer, Berlin, Heidelberg.
24. Mikulik, J., Cempel, W., Kracik, S., Dąbal, D. (2014). A simulation model for emergency evacuation time and low-cost improvements of a hospital facility using FlexSim Healthcare: a case study. W: J. Korbicz, M. Kowal (red.), *Intelligent Systems in Technical and Medical Diagnostics* (333–342). Springer, Berlin, Heidelberg.
25. Orłowska, I, Cisek, M. (2016). Praktyczne aspekty ewakuacji ludzi ze szpitali. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, 41(1), 97–106.
26. Pauls, J. (1987). Calculating evacuation times for tall buildings. *Fire Safety Journal*, 12(3), 213–236.
27. Pecio, M., Łącki, K. (2016). Badania rzeczywistych czasów przemieszczania się dzieci w trakcie ewakuacji z budynków przedszkolnych. *Zeszyty Naukowe SGSP*, 57(1), 106–118.
28. PN-EN 547-3+A1:2010 Bezpieczeństwo maszyn – Wymiary ciała ludzkiego – Część 3: Dane antropometryczne.
29. Santos, G., Aguirre, B.E. (2004). A critical review of emergency evacuation simulation models. *DRC Preliminary Papers*, 339, 1–53.
30. Stankiewicz, G., Milewski, R. (2008). Ewakuacja medyczna MEDEVAC. *Zeszyty Naukowe WSOWL*, 3, 20–31.
31. Szczepański, E., Żak, J., Jacyna-Gołda, I., Murawski, J. (2017). Simulation Support of Freight Delivery Schedule in Urban Areas. *Procedia Engineering*, 187, 520–525.

32. Szlązak, J., Grodzicka, A., Musioł, D. (2014). Ocena metod wyznaczania dróg ucieczkowych na wypadek zagrożenia pożarowego w kopalni. *Wiadomości Górnicze*, 65(7–8), 378–385.
33. Vermuyten, H., Beliën, J., De Boeck, L., Reniers, G., Wauters, T. (2016). A review of optimisation models for pedestrian evacuation and design problems. *Safety Science*, 87, 167–178.
34. Wysocki, M. (2014). Poprawa bezpieczeństwa osób z niepełnosprawnością podczas ewakuacji z obiektów użyteczności publicznej. *Materiały Budowlane*, 10, 29–31.
35. www.averill-law.com/about/ (09.05.2018).
36. www.opttek.com/about/history/ (09.05.2018).
37. www.talumis.com (30.04.2018).