



**Jarosław Jabłonka<sup>1</sup>**

## **ANALIZA WYBRANYCH ALGORYTMÓW OBLICZENIOWYCH PRZYDATNYCH W PRZYPADKU AKCJI RATUNKOWYCH**

**Streszczenie:** W pracy podjęto analizę, w jakim stopniu wybrane heurystyki i algorytmy obliczeniowe mogą pomóc decydentom w zarządzaniu akcją ratunkową w przypadku zdarzenia o niskim prawdopodobieństwie i olbrzymich negatywnych skutkach. Algorytmy analizowane są pod względem jakości i ilości danych wejściowych, trudności obliczeniowych i czasu uzyskania rozwiązania.

**Słowa kluczowe:** ewakuacja, akcja ratownicza, algorytmy, heurystyka, zdarzenie o małym prawdopodobieństwie i dużych negatywnych skutkach

### **Wstęp**

W literaturze wyróżnia się trzy etapy w czasie akcji ewakuacyjnej: etap rozpoznania (od chwili wypadku do rozpoznania niebezpieczeństwa), etap decyzji (w czasie którego podejmowany jest wysiłek mający na celu zdecydowanie o dalszym postępowaniu) i etap działań (w czasie którego osoby ewakuują się – wybierając odpowiednią trasę – lub nie). Fazy te następują po sobie<sup>2</sup>. Można ten schemat przenieść na pozostałe zakresy analizy, tj. nie tylko ewakuacji, ale również zatrzymania wycieku substancji toksycznej czy pożaru, a także udzielenie pomocy medycznej poszkodowanym.

Klasę wypadków, do której w pracy się odniesiono, stanowią wydarzenia o niskim prawdopodobieństwie zajścia oraz o katastrofalnych skutkach. Przykładem takiego zdarzenia może być wyciek (głównie z nieumyślnej winy człowieka)

<sup>1</sup> Dr Jarosław Jabłonka, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej.

<sup>2</sup> L. Wang, Y. Lixing, G. Ziyou, L. Shukai, Z. Xuesong, *Evacuation planning for disaster responses: A stochastic programming framework*. „Transportation Research”, Part C (69), 2016, s. 150-172.

znacznej ilości chloru (10-20 t w ciągu 1-2 godzin) z cysterny znajdującej się na obrzeżach dużego miasta (jak Bielsko-Biała). Przy niekorzystnych warunkach atmosferycznych zasięg toksycznej chmury może sięgać 10 km i więcej, a na terenie zagrożonym utratą zdrowia i życia może znajdować się kilkadziesiąt tysięcy osób<sup>3</sup>. Z racji bardzo małego prawdopodobieństwa zdarzenia decydent nie dysponuje porównawczymi danymi historycznymi, które umożliwiłyby oszacowanie liczbowe prawdopodobieństwa takiego zdarzenia oraz dokonać miarodajnej prognozy skutków na podstawie analizy statystycznej dostępnych danych – głównie z powodu braku zbyt małej próbki danych<sup>4</sup>.

Rozpoznanie, decyzje i działania w przypadku akcji ratowniczej badanej klasy wypadków będą dotyczyły następujących kwestii:

1. Zatrzymanie wycieku substancji toksycznej (chloru), w tym dobranie odpowiedniej liczby i rodzajów wozów strażackich z załogami, wyznaczenie tras przejazdu wozów strażackich z remiz i miejsc stacjonowania na miejsce wypadku.
2. Ewakuacja ludzi z obszarów zagrożonych w tym wyznaczenie granicy, zależnej od rozwoju sytuacji, rozdzielającej obszar niezagrożony od zagrożonego, określenie dla poszczególnych miejsc terenu zagrożonego rodzaju ewakuacji (obowiązkowa, zalecana, dobrowolna<sup>5</sup>), wyznaczenie tras ewakuacji dla samochodów osobowych i ciężarowych, wyznaczenie tras dojazdowych i ewakuacji dla autokarów ewakuacyjnych, wyznaczenie tras ewakuacji dla pieszych, włącznie z wyznaczeniem miejsc zbiórek i miejsc tymczasowego pobytu, wyznaczenie miejsc do kierowania ruchem samochodowym i pieszym przez policję i tras dojazdu do tych miejsc.
3. Udzielanie pomocy medycznej poszkodowanym i ewakuacja rannych, w tym wyznaczenie tymczasowych miejsc pomocy medycznej (TMPM) na obszarze zagrożonym i tras dojazdu do nich i z powrotem, (w tych miejscach mogą być rozdawane maski), wyznaczenie docelowych miejsc pomocy medycznej (DMPM) na obszarze niezagrożonym i tras przejazdu tam i z powrotem, wyznaczanie tras przejazdu służb medycznych do rannych (wezwania na żądania) i wraz z poszkodowanymi do ustalonych miejsc pomocy medycznej.

Realizacja wszystkich, każdego z zadań z osobna, przyczynia się do osiągnięcia celu, jaki jest uratowanie jak największej liczby ludzi w jak najkrótszym czasie. Zwrócić należy uwagę, że poszczególne działania mogą być parami ze sobą w konflikcie, ze względu na korzystanie z tego samego zasobu, np. z tego samego odcinka trasy. Przejazdy pojazdów uprzywilejowanych, autokarów przeznaczonych do ewakuacji i pojazdów porządkowych generują dodatkowy ruch zarówno

---

<sup>3</sup> L. Brzozowska, *Modelowanie skutków uwolnień substancji niebezpiecznych w transporcie drogowym*, Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biała 2015.

<sup>4</sup> D.I. Heimann, *Computing risk profiles for composite low-probability high-consequence events*, „Annals of Operations Research”, (9), 1987, s. 545-560.

<sup>5</sup> V. Campos, R. Bandeira, A. Bandeira, *A Method for Evacuation Route Planning in Disaster Situations*, „Procedia – Social and Behavioral Sciences”, (54), 2012, s. 503-512.

w kierunku od obszaru niezagrażonego do zagrożonego, jak i w drugą stronę. Przejazd tym samym odcinkiem drogi pojazdu uprzywilejowanego i pojazdów cywilnych może skutkować zmniejszeniem tempa ewakuacji i/lub wydłużeniem czasu przejazdu pojazdu uprzywilejowanego. Aby zwiększyć przepustowość dróg, można wykorzystać pasy biegnące w kierunku przeciwnym (ang. *contraflow*). Te pasy można wykorzystać dla przejazdu pojazdów osobowych i ciężarowych, uprzywilejowanych i autokarów ewakuacyjnych, jak również do ewakuacji pieszych. Jeśli do ewakuacji ludności za pomocą autokarów wykorzystano pasy przeciwne (np. przejazd tylko dla autokarów), to zmniejszy to szybkość ewakuacji samochodami osobowymi. Przejście ludzi na drugą stronę ulicy lub przemarsz ludzi, gdy nie mieszczą się na chodniku, spowalnia ruch samochodowy.

Z kolei w sytuacji rzeczywistej, gdy dokonuje się analizy na bieżąco, nie trzeba brać pod uwagę tak dużej liczby wariantów. Z drugiej strony istnieje olbrzymia presja czasu na podjęcie decyzji. Z powodu dynamicznie rozwijającej się sytuacji nie jest możliwe uzyskanie pełnej wiedzy o sytuacji w chwilach podejmowania kolejnych decyzji. Dynamika wydarzeń sprawia, że fazy rozpoznania nakładają się na fazy decyzji, a te na fazy działań. Rozpoznania należy dokonywać cały czas, aby na bieżąco śledzić przebieg wydarzeń, w tym czasie należy podejmować decyzje w zależności od chwilowego stanu sytuacji i jej obrazu, jaki się ma w danej chwili. Ponadto w tym czasie należy również działać, a działania te wpływają na bieżącą sytuację. Innymi słowy, decyzje podejmowane są na podstawie danych niepewnych, niejasnych, nieprecyzyjnych, nieadekwatnych. Działania podjęte w wyniku tych decyzji podejmowane są z jeszcze większym opóźnieniem i być może z jeszcze większą nieadekwatnością. Aby zwiększyć skuteczność decyzji (i podjętych w ich wyniku działań), należałoby uwzględnić nie tylko aktualne dane, ale również pewną krótkoterminową prognozę zmian tych danych na czas działania, i potraktować zarówno dane uzyskane z obserwacji, jak i prognozę zmian jako dane wejściowe do dalszych analiz. Powstaje tu dodatkowe pytanie, czy – a jeśli tak, to w jaki sposób – prognozowane zmiany wpłyną na podjęte decyzje; innymi słowy, można zadać pytanie, jaka jest stabilność rozwiązań (decyzji) w zależności od warunków początkowych.

Istotną rolę w generowaniu rozwiązań skomplikowanych problemów stanowią heurystyki. Jak się zdaje, powinny być one stosowane, gdy nie ma się dostępu do rozwiązań optymalnych problemu – wówczas rozwiązanie generowane przez heurystykę powinno wskazywać na w miarę dobre rozwiązanie w rozsądnym czasie. Zaletami tak uzyskanych rozwiązań jest czas ich uzyskania i ich potencjalna bliska oczekiwanej poprawność. Zagrożeniem jest możliwość uzyskania rozwiązań niepoprawnych. Metody heurystyczne nie pozwalają na sprawdzenie optymalności proponowanych rozwiązań; może się też okazać, że rozwiązania sugerowane przez dwie różne heurystyki są ze sobą w sprzeczności. Wydawać by się mogło, że z powodu swoich wad heurystyki powinny zostać odrzucone. Jednakże są dwa argumenty przemawiające na ich korzyść. Pierwszy opiera się na tym, że w sytuacjach skomplikowanych można nie mieć dostępu do rozwiązań algorytmicznych. Powody mogą być różne: brak wystarczającego czasu na wykonanie koniecznych

obliczeń, brak dostępu do kluczowych danych, brak wymaganych mocy obliczeniowych komputera. Drugim argumentem jest to, że heurystyki są często podstawą akceptowanych algorytmów.

Heurystyki potrafią wskazać rozwiązania w krótkim czasie. Z kolei algorytmy obliczeniowe są zwykle bardziej wiarygodne niż heurystyki. W przypadku analizy zdarzenia czysto hipotetycznego, czas, wymagany na uzyskanie w programie komputerowym rozwiązania danego problemu nie odgrywa istotnej roli, więc heurystyki będą odgrywać rolę w poszukiwaniu lepszych algorytmów.

Problem ten jest szczególnie trudny w przypadku algorytmów klasy NP-trudnych, gdyż większa ilość dostępnego czasu niekoniecznie musi wpływać na istotną poprawę rozwiązania – poprawę uzyskuje się poprzez zmianę sposobu obliczeń. W przypadku zdarzenia rzeczywistego i podejmowania decyzji w czasie rzeczywistym heurystyki będą odgrywać rolę w znajdowaniu rozwiązań tam, gdzie nie dysponuje się rozwiązaniami algorytmicznymi – heurystyki odgrywać więc będą rolę uzupełniającą, wspomagającą. Wyniki obliczeń programów komputerowych są o tyle cenne, o ile są użyteczne w poznaniu złożonych relacji pomiędzy elementami systemu, co umożliwia właściwe zarządzanie akcją ratowniczą i ewakuacyjną w realnej sytuacji.

### **Sieć transportowa jako graf**

Sieć transportową można przedstawić modelowo jako graf, skierowany bądź nieskierowany, w którym miejsca ewakuowane, skrzyżowania ulic (dróg) oraz docelowe miejsca transportu (bezpieczne parkingi, szpitale itd.) są węzłami grafu, a połączenia między węzłami są krawędziami lub odcinkami. Trasa składa się połączonych ze sobą węzłów i krawędzi, przy czym początkiem i końcem trasy są węzły. Miejsca niebezpieczne to węzły zwane źródłami, a miejsca, które są celem transportu to ujścia. Każdej krawędzi można przyporządkować przepustowość, czas przejazdu czy różnego rodzaju koszty. Te wielkości mogą się zmieniać w czasie lub być stałe. Wielkość aktualnego przepływu istotnie zmienia czas przejazdu i uwzględnienie tego typu zależności ma wpływ na realistyczność analiz, z drugiej jednak strony powoduje to zwiększenie trudności obliczeniowej problemu<sup>6</sup>. W przypadku kolizji cysterny przewiduje się, że liczba węzłów i krawędzi może się wahać od kilkunastu do kilkudziesięciu.

Grafy można też interpretować bardziej abstrakcyjnie. Węzłom mogą odpowiadać pewne stany rzeczy (np. stan pacjenta), a krawędzie grafu będą informować o czasie przejścia z jednego stanu do drugiego wraz z prawdopodobieństwem przejścia między tymi stanami.

---

<sup>6</sup> U. Pyakurel, T.N. Dhamala, S. Dempe, *Efficient continuous contraflow algorithms for evacuation planning problems*. "Annals of Operations Research", 2017, s. 1-30.

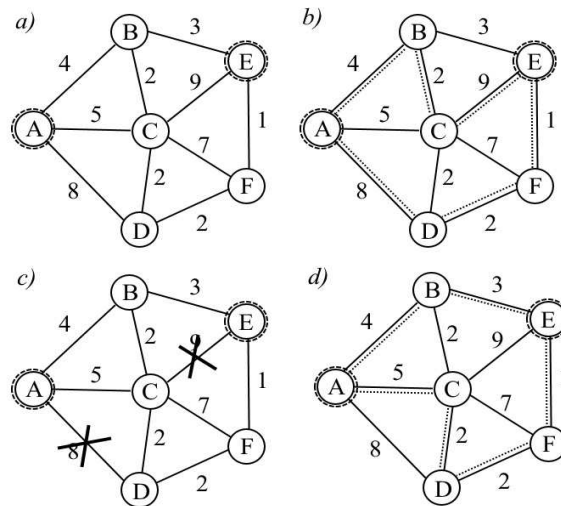
## Heurystyki

Ciąg wydarzeń może przebiegać zgodnie z dokonaną przez decydenta prognozą, ale może też od niej odbiegać. Niejednokrotnie zdarza się, że należy podjąć dobre decyzje i właściwe działania w bardzo krótkim czasie, na podstawie pobieżnego oglądu sytuacji. W takiej sytuacji z pomocą mogą przyjść różnego rodzaju heurystyki. Przedstawione poniżej heurystyki są stosowane w algorytmach przybliżonych.

### Znajdź jedno jakiegokolwiek rozwiązanie dopuszczalne i spróbuj je poprawić

Jest to powszechnie stosowana heurystyka – leży u podstaw wielu algorytmów, np. metody simpleks<sup>7</sup> czy algorytmu Forda-Fulkersona<sup>8</sup>. W prostych sytuacjach wystarczy kilka prób poprawiania rozwiązania, by otrzymać całkiem dobre rozwiązanie. Istotą pomysłu jest to, by nie szukać nowego rozwiązania od początku. Warto zwrócić uwagę, że początkowa propozycja rozwiązania problemu nie musi być nawet dopuszczalna – to dzięki poprawianiu można dojść do rozwiązania dopuszczalnego (czyli takiego, które spełnia warunki ograniczające).

### Metoda wąskiego gardła



Rysunek 1. Metoda znajdowania najkrótszych ścieżek w grafie niekierowanym: a) graf z wyróżnionymi dwoma węzłami, b) dwie ścieżki łączące wyróżnione węzły (o długościach 15 i 11), c) usuwanie „wąskich gardła”, d) nowe ścieżki łączące dwa wyróżnione węzły (o długościach 7 i 10)

Źródło: opracowanie własne.

<sup>7</sup> I. Adamiec-Wójcik, J. Jabłonka, *Badania operacyjne w transporcie*, Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biała 2015.

<sup>8</sup> J. Wojciechowski, K. Pieńkosz, *Grafy i sieci*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.

Ogólny schemat heurystyki jest następujący.

1. Znajdź jakiegokolwiek rozwiązanie problemu spełniające warunki ograniczające (tzw. rozwiązania dopuszczalne).
2. Znajdź słabe elementy w rozwiązaniu.
3. Usuń te elementy z pola swoich rozważań.
4. Znajdź inne rozwiązanie dopuszczalne problemu.
5. Porównaj ze sobą otrzymane rozwiązania i wybierz lepsze.

W algorytmie wyznaczającym  $k$  najkrótszych ścieżek w grafie<sup>9</sup> po wyznaczeniu (dowolnym)  $k$  ścieżek spełniających warunki ograniczające dla każdej ścieżki wyznaczana jest krawędź o najmniejszej przepustowości, tzw. wąsko gardło. Przy tworzeniu następnych  $k$  ścieżek analizuje się graf bez wyznaczonych krawędzi. Następnie w nowo utworzonym grafie szuka się  $k$  ścieżek spełniających warunki ograniczające. Kolejnym krokiem jest wybór spośród  $2k$  ścieżek  $k$  najkrótszych.

### Heurystyka oparta na generowaniu konfliktów

W swoim ogólnym sformułowaniu heurystyka ma następującą strukturę. 1. Znajdź rozwiązanie, ignorując część warunków ograniczających. 2. Zmiennej, która narusza najwięcej warunków ograniczających, przyporządkuj taką wartość, która zmniejsza ich liczbę<sup>10</sup>.

W przypadku bardziej szczegółowym, heurystyka może mieć następującą strukturę. 1. Podziel obszar ewakuacji na podobszary. 2. Dla każdego podobszaru utwórz plan ewakuacji, ignorując plany ewakuacji dla pozostałych podobszarów. 3. Po uwzględnieniu wszystkich planów ewakuacji może się zdarzyć, że na pewnych odcinkach zostały przekroczone maksymalne przepustowości. 4. Jeśli nie ma konfliktów (przekroczeń warunków ograniczających np. przepustowości), to zadanie zostało rozwiązane. 5. W przypadku konfliktów rozważ: a) wykorzystanie przeciwnych pasów ruchu, b) utwórz inny plan ewakuacji dla losowo wybranego podobszaru (co może generować inny konflikt). 6. Szukaj planów, aż cel zostanie osiągnięty.

Taką heurystykę zastosowano w rozwiązywaniu zadania polegającego na ewakuacji w określonym czasie wszystkich ludzi (od 50.000 do 1.000.000) zamieszkujących duży obszar. Zaletą proponowanej heurystyki<sup>11</sup> jest jej duża skalowalność.

### Analiza wybranych zagadnień algorytmicznych

#### Wyznaczanie najkrótszych ścieżek w sieci

Z algorytmicznego punktu widzenia problem wyznaczenia tras przejazdu jednostek strażackich rozwiązuje się algorytmami wyznaczającymi najkrótszą ścieżkę w grafie skierowanym (złożonym z pewnej liczby węzłów i łączących je krawędzi) lub, w ogólniejszej postaci, za pomocą algorytmów wyznaczających  $k$  naj-

---

<sup>9</sup> V. Campos, R. Bandeira, A. Bandeira, *A Method for Evacuation Route Planning in Disaster Situations*, „Procedia - Social and Behavioral Sciences”, (54), 2012, s. 503-512.

<sup>10</sup> S. Minton, *Minimizing conflicts: a heuristic repair method for constraint satisfaction and scheduling problems*, „Artificial Intelligence” (58), 1992, s. 161-205.

<sup>11</sup> V. Pillaca, P. Van Hentenryck, C. Even, *A conflict-based path-generation heuristic for evacuation planning*. „Transportation Research” Part B, (83), 2016, s. 136-150.

krótszych ścieżek (ang. *k*-shortest paths) – ta druga sytuacja może mieć miejsce, gdy wozy strażackie z jednego miejsca będą przejeżdżać różnymi drogami. W swojej najprostszej postaci problem najkrótszej ścieżki polega na znalezieniu takiej ścieżki, dla której jej długość, interpretowana np. jako czas przejazdu, jest najkrótsza. Tak postawiony problem jest łatwy do rozwiązania, ponieważ jest rozwiązywalny w czasie wielomianowym. Do tej samej klasy łatwości należy również problem znalezienia *k* najkrótszych ścieżek w grafie.

W literaturze rozważa się również problem najkrótszej ścieżki, w którym krawędziom przyporządkowuje się nie tylko czasy przejazdów, ale również koszty przejazdów. Kosztem przejazdu wozu strażackiego na danym odcinku w obszarze objętym chmurą toksyczną może być liczba osób znajdujących się w zatrzymanych pojazdach na tym odcinku (z czym będzie się wiązać narażenie ludzi na działanie toksycznej chmury). Tak postawiony problem należy do problemów łatwych algorytmicznie. Jednakże, jeśli narzucimy warunek ograniczający na czas przejazdu: by wóz strażacki dotarł na miejsce w zadanym z góry przedziale czasowym (ang. *constrained shortest path problem*, CST), to problem staje się NP-trudny, co oznacza, że czas rozwiązania problemu jest co najmniej wykładniczy i że nie istnieje efektywna procedura rozwiązania problemu<sup>12</sup>.

Brak efektywnej procedury rozwiązywania problemu oznacza w szczególności, że dla dużej liczby danych wejściowych znalezienie rozwiązania optymalnego w rozsądnym czasie jest niemożliwe. Otrzymane rozwiązanie będzie „wystarczająco dobre”, ponieważ poszukiwania coraz to lepszych rozwiązań należy w pewnym momencie zakończyć. Za pomocą tzw. równoległego algorytmu impulsowego (ang. *parallel pulse algorithm*), znaleziono optymalne rozwiązanie w krótkim czasie dla 40.000 węzłów i 800.000 krawędzi<sup>13</sup>. Idea algorytmu jest taka, że „wysyłane” są przez sieć impulsy, które rozchodzą się od źródła do ujścia. Dzięki odpowiednim funkcjom agregującym skojarzonym z impulsem zbierane są informacje o sieci, a po ewentualnej modyfikacji impulsu tworzy się sukcesywnie rozwiązanie. Jak widać jest tu realizowana heurystyka znajdowania rozwiązań i ich poprawiania. Za pomocą tego algorytmu można rozwiązywać również problem z trasą szybkiego ruchu tranzytowego, który polega na znalezieniu zbioru tras i częstotliwości kursowania tak, by koszty operacyjne i pasażerskie (np. czas przejazdu) były minimalne, a przy tym, by spełnione były pewne ograniczenia techniczne nałożone na częstotliwości przejazdów czy przepustowości odcinków.

### **Wielkości niepewne**

Wyrażenie typu „około 10” można traktować jako niepewność, tak jak się ją rozumie w teorii niepewności (czy tak jak się ją rozumie w teorii zbiorów rozmytych), lub jako zmienną z pewnym rozkładem prawdopodobieństwa, przy czym

---

<sup>12</sup> R.L. Graham, *Kombinatoryczna teoria szeregowania*, [w:] *Matematyka współczesna. Dwanaście esejów*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 1983, s. 200-229.

<sup>13</sup> L. Lozano, A.L. Medaglia, *On an exact method for the constrained shortest path problem*, “Computers & Operations Research” (40), 2013, s. 378-384.

różnice pojęciowe są istotne. Zmienna niepewna (ang. *uncertain variable*) odpowiada stopniowi przekonania, ale nie należy jej utożsamiać z prawdopodobieństwem subiektywnym<sup>14</sup>. Zmienna niepewna jest w dużym stopniu niezależna od danych empirycznych, podczas gdy prawdopodobieństwo subiektywne w dużym stopniu odnosi się do obserwowanych częstości. Jeśli dysponuje się danymi empirycznymi, to należy posługiwać się modelami stochastycznymi (probabilistycznymi), jeśli jednak nie dysponuje się (wiarygodnymi) danymi statystycznymi i szacunek jest dokonywany zgodnie z wiedzą ekspercką, to można się odwołać do niepewności (ang. *uncertainty*). Na przykład przepustowości dróg, czasy przejazdu czy liczba osób mających być ewakuowanych należałoby traktować jako wielkości niepewne, również z tego powodu, że zachowanie kierowców w sytuacji zagrożenia (w tym paniki) może w znacznym stopniu odbiegać od zachowania typowego, obserwowanego w sytuacji niezagrażającej zdrowiu i życiu. Istnieje zapotrzebowanie na badania obejmujące różne niepewne dane wejściowe powiązane z ich złożonymi interakcjami w ramach ogólnych ram zarządzania systemami w celu podjęcia decyzji w zakresie planowania ewakuacji przy wykorzystaniu dobrze skoordynowanego tranzytu publicznego<sup>15</sup>.

Ustalenie poziomu niepewności należy do wiedzy eksperckiej – i żeby uwzględnić ten aspekt przy poszukiwaniu najkrótszych ścieżek, ale też maksymalnych przepływów, (o czym później) powstał problem tzw.  $\alpha$ -najkrótszej ścieżki, gdzie  $\alpha \in [0; 1]$  jest z góry zadany stopniem ufności (przyjmuje się arbitralnie). Praktyczne znaczenie  $\alpha$ -najkrótszej ścieżki jest następujące. Dla danego  $\alpha$  ma się nadzieję, że otrzyma się najmniejszą długość  $T$  (oznaczoną jako  $T\alpha$ ) i ścieżkę  $P_0$ , gdzie niepewna długość ścieżki  $P_0$  jest mniejsza niż  $T\alpha$  z poziomem ufności  $\alpha$  – wtedy ścieżka  $P_0$  jest  $\alpha$ -najkrótszą ścieżką. Istnieje efektywny algorytm rozwiązujący ten problem<sup>16</sup>. W zależności od wartości  $\alpha$  mogą być wyznaczone różne  $\alpha$  – najkrótsze ścieżki oraz ich długości.

### Wyznaczanie maksymalnego przepływu w sieci

Problem ewakuacji można przedstawić w dość ogólny sposób. Każdej grupie ludzi można przyporządkować instrukcję ewakuacji<sup>17</sup>, zawierającą trasę ewakuacji oraz sposób ewakuacji (pieszo, samochodem osobowym, autokarem, pociągiem) wraz z czasem jej rozpoczęcia (w cytowanej pracy nie rozważa się sposobu ewakuacji). Załóżmy dla uproszczenia, że znana jest liczba ludności na obszarze zagrożonym, którą należy ewakuować z ustalonych wcześniej miejsc zbiórek do miejsc bezpiecznych. Każda grupa (choćby jednoosobowa) – związana z miejscem zbiórki –

---

<sup>14</sup> L. Baoding, *Uncertainty Theory*, Heidelberg New York Dordrecht, Springer, London 2010.

<sup>15</sup> Y. Lv, X.D. Yan, W. Sun, Z.Y. Gao, *A risk-based method for planning of bus-subway corridor evacuation under hybrid uncertainties*. „Reliability Engineering and System Safety”, (139), 2015, s. 188-199.

<sup>16</sup> Y. Sheng, G. Yuan, *Shortest path problem of uncertain random network*, “Computers & Industrial Engineering”, (99), 2016, s. 97-105.

<sup>17</sup> O.L. Huijbregtse, S.P. Hoogendoorn, A. Hegyi, M.C.J. Bliemer, *A method to optimize evacuation instructions*. „OR Spectrum”, (33), 2011, s. 595-627.



otrzymuje swoją instrukcję ewakuacji, która zawiera czas rozpoczęcia ewakuacji, sposób ewakuacji oraz trasę (wraz z punktem docelowym). Należy znaleźć optymalne instrukcje ewakuacyjne dla każdej grupy, przy czym maksymalizowany jest stopień dopasowania zbioru instrukcji ewakuacyjnych. Wartość liczbowa stopnia dopasowania wyliczana jest na podstawie wykonanych symulacji komputerowych i funkcji celu. Funkcją celu może być na przykład szybkość przybywania ludzi do miejsc bezpiecznych. Tak sformułowany problem jest NP-trudny.

Problem ewakuacji można potraktować jako problem o maksymalnym przepływie w grafie skierowanym. W klasycznym ujęciu jest to problem algorytmicznie łatwy, który rozwiązuje się w czasie wielomianowym. Stosując teorię niepewności wobec danych liczbowych można analogicznie do problemu  $\alpha$ -najkrótszej ścieżki postawić problem  $\alpha$ -maksymalnego przepływu<sup>18</sup>. Rozwiązanie zależy od poziomu ufności  $\alpha$ .

Wykorzystanie przeciwnych pasów ruchu (ang. *contraflow*) może zwiększyć przepustowość odcinków dróg i w konsekwencji przepustowość sieci. W rzeczywistej sytuacji na drodze należałoby dokonać szeregu czynności, które wymagają czasu i są uzależnione od szerokości drogi, liczby pojazdów i ich rodzajów. Wykonanie tych czynności wymaga czasu i zaplanowania, gdzie skierować pojazdy. W algorytmach wyliczających przepustowość sieci często przyjmuje się dla uproszczenia, że czas odwrócenia pasa ruchu wynosi zero. Pobieżna analiza wskazuje, że czas ten będzie co najmniej liniowo zależał od liczby pojazdów znajdujących się na tym pasie. W przypadku prostych sieci (grafów), jak choćby takich, które mają tylko jedno źródło i jedno ujście, istnieją efektywne algorytmy. Jednakże dla grafów z wieloma źródłami i ujściami problem ten staje się NP-trudny<sup>19</sup>. Również NP-trudny jest problem wyznaczający maksymalny przepływ w sieci z odwracalnymi krawędziami w zadanym z góry czasie. Istnieją też algorytmy przybliżone z dobrymi przybliżeniami, które znajdują rozwiązania w czasie wielomianowym.

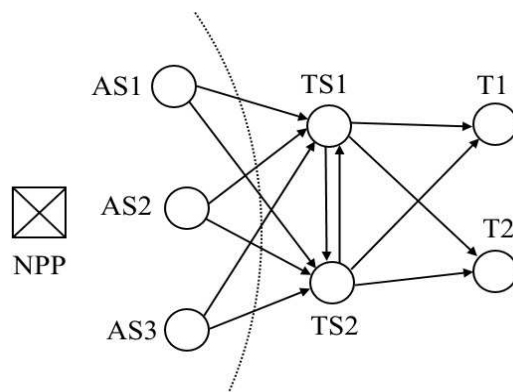
Zadanie maksymalnego przepływu można rozwiązać za pomocą metody programowania całkowitoliczbowego o parametrach zadanych przedziałami i o wspólnym prawdopodobieństwie nałożonym na prawe strony warunków ograniczających<sup>20</sup> (ang. *interval-parameter joint-probabilistic integer programming*, IJIP). Gdy nie można sztywno narzucić warunków ograniczających na przykład na przepustowość poszczególnych odcinków, dobrym wyjściem jest nałożenie na wybrane odcinki warunków probabilistycznych związane z możliwością przekroczenia dopuszczalnych (czy szacowanych) wartości. Czyni się to po to, aby można było odzwierciedlić ryzyko tych naruszeń.

---

<sup>18</sup> S. Ding, *The  $\alpha$ -maximum flow model with uncertain capacities*, "Applied Mathematical Modelling", (39), 2015, s. 2056-2063.

<sup>19</sup> U. Pyakurel, T.N. Dhamala, S. Dempe, *Efficient continuous contraflow algorithms for evacuation planning problems*, "Annals of Operations Research", 1-30, 2017.

<sup>20</sup> Y. Lv, G.H. Huangb, L. Guob, Y.P. Li, C. Daid, X.W. Wange, W. Sunb, *A scenario-based modeling approach for emergency evacuation management and risk analysis under multiple uncertainties*, "Journal of Hazardous Materials", (246-247), 2013, s. 234-244.



Rysunek 2. Schemat sieci transportowej: NPP – miejsce emisji skażenia, AS1, AS2, AS3 – źródła ewakuacji, TS1, TS2 – miejsca tymczasowej zbiórki, T1, T2 – miejsca docelowej ewakuacji. Linia kropkowana wyznacza obszar skażenia.

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Lv Y. i in., 2013.

Metoda IJIP może być stosowana do ułatwienia generowania szeregu rozwiązań alternatywnych, które skupiają się przede wszystkim na: (1) zaplanowaniu tras ewakuacyjnych w celu zagwarantowania maksymalnej liczby ludzi ewakuowanych ze strefy zagrożenia w ograniczonym czasie trwania, (2) zaproponowaniu optymalnego algorytmu generowania schematów ewakuacji przy niepewnych cechach systemu oraz (3) analizowaniu ryzyka naruszenia systemu w celu zwiększenia możliwości reagowania na katastrofy w różnych możliwych scenariuszach. Rozważane scenariusze różnią się przewidywaną liczbą ludzi ewakuowanych oraz współczynnikami zachorowalności i śmiertelności wśród ewakuowanych ludzi. Dzięki metodzie IJIP nie obserwuje się znacznego zwiększenia czasu obliczeń przy analizie wielu scenariuszy. Przedstawiona w artykule sieć, przedstawiona na Rys. 2, składa się z 7 węzłów i 12 krawędzi, czyli o wiele mniej niż w sieci w przykładzie z cysterną. Powstaje pytanie badawcze, na ile metoda IJIP byłaby przydatna w analizach bardziej skomplikowanych sytuacji.

Inny model ewakuacji rannych<sup>21</sup> analizuje scenariusze, mające pomóc poszkodowanym, udzielając im stosownej pomocy. Stopień skomplikowania prezentowanego modelu przedstawia się w ilości rodzajów danych wejściowych, które dotyczą: typów pacjentów (ze względu na dolegliwości); miejsc, do których ma być skierowana pomoc medyczna; tymczasowych miejsc pomocy medycznej (TMPM) i szpitali – (liczby łóżek), a w przypadku szpitali również liczby sali operacyjnych; liczby lekarzy poszczególnych specjalności; przyporządkowania typów pacjentów poszczególnym lekarzom-specjalistom; karetek pogotowia ratunkowego – całkowita pojemność; czasu oczekiwania pacjentów na pomoc w tymczasowym miejscu pomocy medycznej w zależności od typu pacjenta; czasu przewozu pacjentów do TMPM-ów i szpitali oraz czasu oczekiwania na komplek-

<sup>21</sup> S. Jin, J. Sukjae, K. Jangyeop, K. Kyungsup, *A logistics model for the transport of disaster victims with various injuries and survival probabilities*, "Ann Oper Res" (230), 2015, s. 17-33.

sową pomoc w szpitalu. Istotną rolę odgrywają warunki ograniczające, określające relacje między liczbą lekarzy określonych specjalności, liczbą sali zabiegowych a liczbą pacjentów, którym pomoc medyczna może być udzielona. Ponadto model wymaga określenia prawdopodobieństwa przeżycia pacjentów w zależności od ich typu, przedziału czasowego (związanego z czasem przewozu) i tego, czy pacjent jest przewożony do TMPM czy do szpitala. W pracy rozważa się cztery scenariusze: (1) wszyscy pacjenci mają takie samo prawdopodobieństwo przeżycia, niezależnie od obrażeń, (2) pacjenci mają różne prawdopodobieństwa przeżycia, zależnie od stopnia obrażeń, (3) występują opóźnienia w transporcie (np. dwukrotne wydłużenie czasu) oraz z powodu zakłóceń komunikacyjnych pewne odcinki dróg są niedostępne, (4) wszyscy lekarze z TMPM-ów i szpitali współpracują ze sobą w zakresie leczenia. Rozważa się również kombinacje różnych scenariuszy: (2) + (3), (2) + (4), (3) + (4) i (2) + (3) + (4). Dla każdego wariantu wylicza się procent pacjentów, którzy przeżyli. W analizie przypadku rozważa się 1400 rannych podzielonych na 12 typów, TPMP-ów jest 12, a szpitali 3. Wyniki dla każdego scenariusza otrzymuje się na średniej klasy komputerze w kilka minut. W przypadku wycieku chloru z cysterny można dodatkowo rozważyć 3 strefy stężenia chlorem i czas przebywania rannego w danej strefie.

### **Decyzje centralne a decyzje podejmowane lokalnie**

Celem działań decydenta jest uratowanie jak największej liczby ludzi. Zachowanie ludzi jest istotnym czynnikiem mającym wpływ na skuteczność decyzji i działań służb ratowniczych. Z jednej strony ludzie są obiektem decyzji i działań – to dla ich dobra (jako ogółu) podejmuje się takie a nie inne decyzje i działania. Z drugiej strony, ratowani ludzie również podejmują samodzielne decyzje i działania, których wpływ na uratowanie przez nich życia i zdrowia może być różny.

Centralny decydent, z racji dostępu do informacji o całym systemie, może podjąć lepsze decyzje niż decydent lokalny, który ma wiedzę o swoim otoczeniu i nie musi orientować się dobrze w wiedzy o całym systemie. Lokalnymi decydentami są członkowie załogi systemu (strażacy, lekarze, policjanci i in.) oraz osoby przebywające na obszarze zagrożonym. Są oni – w przeciwieństwie do decydenta centralnego – poddani oddziaływaniu środowiska z obszaru zagrożonego, na przykład toksycznej chmurze, temperatury, oddziaływaniu innych ludzi (fizycznemu i społecznemu) itd. Te oddziaływania mogą niekorzystnie wpływać na ich procesy decyzyjne oraz działania, ale też – z drugiej strony – wcześniej niż centralny decydent są w stanie wychwycić istotne dla przeżycia sygnały ze środowiska. Istnieje jednak groźba, że decyzje lokalnych decydentów podjęte bez koordynacji decydenta centralnego, mogą być nieskuteczne czy wręcz kontr-skuteczne (tj. przynoszące więcej negatywnych skutków niż gdyby nie podjęli decyzji). Dla przykładu, w sytuacji gdy dwóch decydentów lokalnych zdecyduje o zmianie kierunku ruchu pasa drogi – każdy niezależnie od siebie i w stosunku do innego pasa, to w wyniku ich decyzji i działań otrzyma się sytuację gorszą niż przed podjęciem decyzji, gdyż nie nastąpiła poprawa przepustowości w żadnym kierunku, a przy tym wystąpią dodatkowe komplikacje w ruchu na skrzyżowaniu).

Z drugiej strony, decyzje dokonywane na miejscu mogą być bardziej adekwatne z powodu szybkiej reakcji (tzn. ta sama decyzja podjęta później – potwierdzona przez decydenta centralnego – nie byłaby tak skuteczna, byłaby spóźniona).

Można by w tym miejscu przytoczyć przykład tłumu, który wpadł w panikę, i zamiast się rozdzielić przemieszcza się jedną drogą, powodując duże lokalne zagęszczenia (w wyniku których ludzie się tratują)<sup>22</sup>. Gdy decyzje poszczególnych osób są podejmowane niezależnie od wyborów innych ludzi, to należy się spodziewać równomiernych rozkładów, na przykład w przypadku dwóch dróg ewakuacji najbardziej prawdopodobny scenariusz jest taki, że grupa ludzi wybrałaby w połowie przypadków jedną drogę, a druga połowa drugą drogę. To rozwiązanie może nie być optymalne (gdy drogi mają różne przepustowości i na jednej z nich nastąpiłoby przekroczenie tej wartości), ale niewątpliwie jest lepsze niż wtedy, gdy cała grupa wybiera tylko jedną drogę (z powodu potencjalnie większego przekroczenia przepustowości drogi). Decyzje głównego decydenta powinny pójść w tym kierunku, by wskazywać decydom lokalnym takie rozwiązania i koordynować decyzje i działania przez nich podjęte, aby uzyskać rozwiązania lepsze niż te, które by uzyskali na podstawie analizy danych z najbliższego swojego otoczenia.

### **W kierunku rozwiązania kompleksowego**

Wymienione na początku trzy obszary akcji ratowniczej, mianowicie zatrzymanie wycieku substancji toksycznej (chloru), ewakuacja ludzi z obszarów zagrożonych oraz udzielanie pomocy medycznej poszkodowanym i ewakuacja rannych wymagają kompleksowego potraktowania. W sytuacji hipotetycznej jedną z możliwych propozycji znalezienia scenariuszy w sytuacji katastrofy spowodowanej wyciekiem znacznej ilości chloru w obszarze gęsto zaludnionym byłaby następująca. 1. Znalezienie rozwiązań dla poszczególnych problemów:  $P_1, P_2, \dots, P_n$ . Poszukiwane algorytmy i otrzymane rozwiązania będą zależeć od danych wejściowych: ich liczbie i charakteru (w tym ich niepewności), a także od celów analizy scenariuszowej uzyskanych rozwiązań. 2. Tworzenie kolejnych problemów, łącząc ze sobą kolejno rozwiązane wcześniej problemy, uwzględniając uzyskane wcześniej rozwiązania i analizy scenariuszy. 3. W trakcie rozwiązywania coraz to bardziej skomplikowanych problemów algorytmicznych pojawiać się będą kluczowe trudności. Pokonywanie tych trudności będzie wymagało stosowania różnego rodzaju heurystyk. 4. Nie ma gwarancji na to, że całościowo ujęty problem da się rozwiązać w sposób optymalny albo przynajmniej wystarczająco dobry. Może być też tak, że warunki narzucone w zadaniu są niemożliwe do utrzymania i że nie można (w sensownym czasie) otrzymać wystarczająco dobrego rozwiązania. Minimalne oczekiwania, jakie tu można sformułować to (a) jak najlepsze zrozumienie wzajemnych powiązań elementów w systemie i (b) uzyskanie umiejętności sterowania

---

<sup>22</sup> Por. też. Y. Han, L. Hong, P. Moore, *Extended route choice model based on available evacuation route set and its application in crowd evacuation simulation*, "Simulation Modelling Practice and Theory", (75), 2017, s. 1-16.

systemem w takim zakresie, w jakim się go rozumie, aby uratować jak najwięcej ludzi.

### Podsumowanie

Żądanie rozwiązania optymalnego dla danej sytuacji w sieci transportowej może być wymaganiem nierealistycznym z kilku zasadniczych powodów: (1) dane wejściowe obarczone są różnego rodzaju błędami, co powoduje, że należy je traktować w sposób szacunkowy; (2) problemy są na tyle skomplikowane algorytmicznie, że uzyskanie rozwiązania w sensownym czasie jest praktycznie niemożliwe, zwłaszcza przy dużej liczbie danych wejściowych; (3) algorytmy odnoszą się do sytuacji w pewnym uproszczonym zakresie, więc nawet gdyby decydent dysponował rozwiązaniem optymalnym, to mogłoby to nie być rozwiązanie optymalne dla (nieuproszczonej) sytuacji rzeczywistej. Wykorzystanie wielkości niepewnych (a także wielkości rozmytych) zmniejsza presję na dokładność danych kosztem niepewności (rozmycia) otrzymanego rozwiązania. Ponadto, w takim podejściu istnieje ryzyko, że uzyskane rozwiązanie może naruszać warunki ograniczające<sup>23</sup>.

Chcąc reagować adekwatnie do sytuacji, zalecane byłoby dysponowanie różnego rodzaju prawdopodobnymi scenariuszami. Takie podejście jeszcze bardziej komplikuje obliczenia i tym bardziej skłania do poszukiwania algorytmów przybliżonych. Tu jednak pojawia się pytanie o przydatność takich algorytmów. Istnieje ryzyko, że otrzymane dzięki nim rozwiązania wystarczająco dobre w rozsądnym czasie będą wskazywać na błędne decyzje i w związku z tym będą podejmowane niewłaściwe działania. Pojawiają się dodatkowe problemy metadecyzyjne: czy „uściślić” dane wejściowe tak, by dokładniej odpowiadały rzeczywistej sytuacji, czy konstruować algorytmy dla coraz bardziej skomplikowanych sytuacji, czy godzić się na krótszy czas pracy programu, by móc szybciej działać itp.

### Bibliografia:

- Adamiec-Wójcik I., Jabłonka J., *Badania operacyjne w transporcie*, Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biała 2015.
- Baoding L., *Uncertainty Theory*, Heidelberg New York Dordrecht, Springer, London 2015.
- Brzozowska L., *Modelowanie skutków uwolnień substancji niebezpiecznych w transporcie drogowym*, Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biała 2015.
- Campos V., Bandeira R., Bandeira A., *A Method for Evacuation Route Planning in Disaster Situations*, “Procedia - Social and Behavioral Sciences”, (54), 2012.
- Ding S., *The  $\alpha$ -maximum flow model with uncertain capacities*, “Applied Mathematical Modelling” (39), 2015.
- Graham R.L., *Kombinatoryczna teoria szeregowania*, [w:] *Matematyka współczesna. Dwanaście esejów*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1983.

---

<sup>23</sup> Y. Lv, X. D. Yan, W. Sun, Z. Y. Gao, *A risk-based method for planning of bus-subway corridor evacuation under hybrid uncertainties*. „Reliability Engineering and System Safety”, (139), 2015, s. 188-199.

- Han Y., Hong L., Moore P., *Extended route choice model based on available evacuation route set and its application in crowd evacuation simulation*, "Simulation Modelling Practice and Theory", (75), 2017.
- Heimann D.I., *Computing risk profiles for composite low-probability high-consequence events*, "Annals of Operations Research", (9), 1987.
- Huibregtse O. L., Hoogendoorn S. P., Hegyi A., Bliemer M. C. J., *A method to optimize evacuation instructions*. "OR Spectrum" (33), 2011.
- Jin S., Sukjae J., Jangyeop K., Kyungsup K., *A logistics model for the transport of disaster victims with various injuries and survival probabilities*. "Ann Oper Res" (230), 2015.
- Li W., Lixing Y., Ziyu G., L. Shukai, Z. Xuesong, *Evacuation planning for disaster responses: A stochastic programming framework*, "Transportation Research" Part C (69), 2016.
- Lozano L., Medaglia A. L., *On an exact method for the constrained shortest path problem*. "Computers & Operations Research", (40), 2013.
- Lv Y., Huangb G. H., Guob L., Li Y. P., Daid C., Wange X. W., Sunb W., *A scenario-based modeling approach for emergency evacuation management and risk analysis under multiple uncertainties*. "Journal of Hazardous Materials", (246-247), 2013.
- Lv Y., Yan X.D., Sun W., Gao Z.Y., *A risk-based method for planning of bus-subway corridor evacuation under hybrid uncertainties*, "Reliability Engineering and System Safety" (139), 2015.
- Minton S., *Minimizing conflicts: a heuristic repair method for constraint satisfaction and scheduling problems*. "Artificial Intelligence", (58), 1992.
- Pillaca V., Van Hentenryck P., Even C., *A conflict-based path-generation heuristic for evacuation planning*. "Transportation Research" Part B (83), 2016.
- Pyakurel U., Dhamala T.N., Dempe S., *Efficient continuous contraflow algorithms for evacuation planning problems*, "Annals of Operations Research", 2017.
- Sheng Y., Yuan G., *Shortest path problem of uncertain random network*, "Computers & Industrial Engineering" (99), 2016.
- Wojciechowski J., Pieńkosz K., *Grafy i sieci*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.

## Abstract

### Analysis of selected computational algorithms in the case of rescue operations

The selected heuristics and computational algorithms are analyzed as tools to help decision-makers to manage rescue operations in low-probability high-consequence events. They are analyzed in terms of quality and quantity of input data, computational complexity and time to obtain a solution.

**Keywords:** evacuation, rescue operation, algorithms, heuristics, low-probability high-consequence event