przegląd organizacji

Miesięcznik TNOiK
Założył Karol Adamiecki w 1926 r.

SZACOWANIE CZASU REALIZACJI PROJEKTU PRZY NIEPRECYZYJNYCH ZMIENNYCH

https://doi.org/10.33141/po.2017.10.06

Przegląd Organizacji, Nr 10 (933), 2017, ss. 45-52
www.przegladorganizacji.pl
©Towarzystwo Naukowe Organizacji i Kierownictwa (TNOiK)

Iwona Pisz
Anna Chwastyk

Wprowadzenie

Znaczenie projektów w różnych obszarach działalności stale rośnie. Wynika to z wielu okoliczności, przede wszystkim z rosnącej złożoności i różnorodności problemów zarządzania oraz niestandardowych przedsięwzięć niezbędnych do ich rozwiązania. Podstawową cechą każdego projektu jest unikatowość, nowa wartość, jednorazowy charakter (Turner, 1993). Należy podkreślić, że przyszłe warunki realizacji danego projektu są trudne do przewidzenia i jednoznacznego zdefiniowania. Mamy tutaj do czynienia ze specyficznym otoczeniem danego projektu, tzw. rozmytym otoczeniem projektu. Oznacza to, że otoczenie projektu będące wielopłaszczyznowym, wieloaspektowym i złożonym zbiorem czynników jest złożone i zmienne, dynamiczne, co obciąża projekt rosnącą niepewnością i ryzykiem.

Projekty charakteryzuje wysoki poziom niepewności na początku ich realizacji. Wynika to z faktu, iż każdy projekt z założenia powinien dostarczać czegoś nowatorskiego, a więc obarczonego sporą dozą niewiedzy (Trocki i in., 2009). Menedżerowie projektów nabywają pełną wiedzę na koniec danego projektu, kiedy wszystkie pożądane i niepożądane zdarzenia miały już miejsce (Wyrozębski, 2014). Wówczas wiedza o projekcie jest pełna, znane są faktyczne czasy zadań, koszt realizacji projektu. Oznacza to, że wiedza o projekcie rośnie od niemal zera do umownego poziomu 100%. Z kolei to właśnie na początku projektu menedżerowie zmuszeni są podejmować najistotniejsze decyzje, które decydować będą o powodzeniu danego projektu (Pisz, Łapuńka, 2015). Głównym obszarem, który ma wpływ na jakość podejmowanych decyzji, jest planowanie przebiegu projektu. To szczególne zadanie, przed którym stają kierownicy projektów i osoby związane z ich realizacją, wymaga możliwie precyzyjnego szacowania w warunkach dużej niepewności oraz braku wystarczającej informacji (Barchański 2014; Pawlak, 2006; Trocki, Wyrozębski, 2015).

Celem pracy jest zaprezentowanie modelu referencyjnego rozwiązywania problemu szacowania realizacji projektu w warunkach niepewności i ryzyka, który obejmuje zbiór zmiennych decyzyjnych, w tym precyzyjnych i nieprecyzyjnych, opisujących projekt oraz zbiór ograniczeń łączących zmienne decyzyjne. Przedstawiono rozwiązanie problemu z zastosowaniem autorskiego podejścia będącego rozszerzeniem klasycznej metody ścieżki krytycznej (Critical Path Method – CPM) o skierowane liczby rozmyte (Ordered Fuzzy Numbers – OFN). Rozpatrywany w ramach pracy problem harmonogramowania projektu został zilustrowany na przykładzie obliczeniowym.

Szacowanie czasu projektu w warunkach niepewności i ryzyka

Realizacja projektu poprzedzona jest szeregiem działań, które decydują o sukcesie projektu. Podjęcie decyzji o rozpoczęciu, kontynuowaniu, czasowym wstrzymaniu lub zaprzestaniu realizacji danego projektu lub jego części wymaga od decydenta zbudowania precyzyjnego modelu decyzyjnego w aspekcie technicznym, a następnie finansowym. Jak wcześniej podkreślono, obszarem, który rzutuje na jakość podejmowanych decyzji w procesie zarządzania projektem, jest planowanie przebiegu projektu.

Proces planowania przebiegu projektu wymaga wykorzystywania różnorodnych informacji planistycznych, w tym informacji pewnych, niepewnych, pełnych i niepełnych dotyczących danego projektu, wymaga generowania nowej wiedzy o projekcie i środowisku podejmowanego projektu (Trocki, Wyrozębski, 2015).

W praktyce projektowej mamy najczęściej sytuacje związane z podejmowaniem decyzji w warunkach ryzyka i niepewności. W warunkach ryzyka decydent dysponuje informacjami umożliwiającymi przewidywanie różnych skutków możliwych wariantów działania, przy czym są to skutki niepewne, mogące się pojawić z większym lub mniejszym prawdopodobieństwem. Decyzje w warunkach ryzyka charakteryzują się tym, że skutki rozpatrywanych działań są niepewne, jednocześnie można oszacować prawdopodobieństwa, z jakimi niepewne skutki wystąpią. Planowanie przebiegu projektu w warunkach niepewności ma miejsce, gdy informacje dotyczące danego projektu są niekompletne, niepewne, możliwe są różne warianty działania i odmienne skutki. Cechą charakterystyczną podejmowania decyzji w warunkach niepewności jest fakt, że nie można zarówno obiektywnie, jak i subiektywnie określić prawdopodobieństwa ich wystąpienia. Problem niepewności dotyczy przede wszystkim zasobów niezbędnych do realizacji określonej czynności w projekcie, w tym zasobów technicznych, materiałowych, ludzkich, energetycznych, informacyjnych oraz towarzyszących im zdarzeń (wewnętrznych i zewnętrznych), mających wpływ na czas trwania poszczególnych pojedynczych czynności, a w konsekwencji na ciąg działań składających się na dany projekt (Trocki, Wyrozębski, 2015).

Należy podkreślić, że projekt jako nowy, często innowacyjny ciąg działań, jest zbiorem czynności niezwykle trudnych do estymacji ze względu na brak wiedzy projektowej. Dodatkowo w trakcie realizacji projektu stosunkowo często pojawiają się nieprzewidziane zdarzenia, mające swoje źródła zarówno w mikro-, jak i makrootoczeniu projektu, które dodatkowo zwiększają niepewność szacowania czasu realizacji projektu (Janczura, Kuchta, 2012), będącą jedną z istotnych cech projektu. Stopień tej niepewności zmienia się podczas cyklu życia projektu – na początku cyklu jest on stosunkowo duży, natomiast w końcowej fazie cyklu spada niemal do zera (Pawlak, 2006).

Zróżnicowanie sytuacji planistycznych projektów doprowadziło do powstania różnorodnych koncepcji oraz modeli planowania i harmonogramowania projektów. Pierwszą grupę stanowią tzw. deterministyczne koncepcje i modele, do których zaliczyć można m.in.: metody harmonogramów/wykresów Gantta, metodę ścieżki krytycznej CPM, metodę MPM (Metra Potential Method), metodę łańcucha krytycznego CCS (Critical Chain Scheduling), metodę linii równowagi LOB (Line of Balance). Drugą grupę stanowią tzw. stochastyczne koncepcje i modele planowania i harmonogramowania projektów, które znajdują zastosowanie w warunkach ryzyka. Wymienić tu można m.in: metodę PERT (Program Evaluation and Review Technique), metodę GERT (Graphical Evaluation and Review Technique), metodę GERTS (Graphical Evaluation and Review Technique Simulation). Trzecią grupę stanowią tzw. sytuacyjne koncepcje i metody planowania i harmonogramowania projektów, znajdujące zastosowanie w planowaniu projektów w warunkach niepewności. Wyróżnić tu można m.in.: drzewa istotności (Relevance Tree), metody zwinne APM (Agile Project Management) (Trocki, Wyrozębski, 2015).

Problem badawczy

W niniejszej pracy przedstawiony zostanie model referencyjny problemu szacowania czasu realizacji projektu w warunkach niepewności i ryzyka, który obejmuje zbiór zmiennych decyzyjnych, w tym precyzyjnych i nieprecyzyjnych, opisujących projekt oraz zbiór ograniczeń łączących zmienne decyzyjne. Przyjmuje się, że dany projekt złożony jest z określonej liczby czynności. Kolejność realizacji czynności określona jest przez acykliczną sieć. Oznacza to, że struktura projektu ma charakter deterministyczny. Znane są ograniczenia wynikające z kolejności realizacji zadań projektowych. Przyjmuje się, że mają one charakter relacji silnych. Zakłada się brak dostępu do pełnej, jednoznacznej informacji o czasie trwania czynności w projekcie. Wielkości te określane są przez eksperta w oparciu o jego wiedzę i doświadczenie. Przyjmuje się, że czasy trwania poszczególnych czynności zdefiniowanych w ramach rozpatrywanego projektu mają nieprecyzyjny charakter i zostały opisane w postaci rozmytych czasów trwania za pomocą skierowanych liczb rozmytych.

Przedstawiony problem sprowadza się do poszukiwania odpowiedzi na następujące pytanie: czy istnieje możliwość opracowania harmonogramu realizacji projektu uwzględniającego zarówno precyzyjny, jak i nieprecyzyjny charakter zmiennych decyzyjnych? Jaki jest najkrótszy czas realizacji projektu? Jaki jest czas rozpoczęcia i zakończenia poszczególnych czynności w projekcie? Które czynności są krytyczne? Jaki jest ciąg czynności warunkujących terminową realizację projektu?

Zaprezentowane zagadnienie jest przykładem problemów złożonych, ujmujących dane nieprecyzyjne, wymagających rozwiązania z zastosowaniem specjalnych aparatów matematycznych. Klasyczne metody, takie jak metoda ścieżki krytycznej CPM, CCPM czy metoda PERT, nie uwzględniają niepewności, która wynika z braku dostępu do pewnych, precyzyjnych informacji. Wady klasycznych metod szacowania czasu projektu determinują potrzebę opracowania nowych bardziej efektywnych metod obliczeniowych (Chanas, Kamburowski, 1981; Chanas, Zieliński, 2001; Kuchta, 2001). Z analizy literatury tematu wynika, że podejmowane są próby uwzględnienia rozmytego otoczenia projektu, uwzględnienia danych zarówno pewnych, jak i niepewnych. W ostatnim czasie wzrosło zainteresowanie teorią zbiorów rozmytych, która daje podstawy formułowania zdarzeń o charakterze niepewnym. Świadczyć o tym mogą kolejne prace takich autorów, jak: S. Chanas, P. Zieliński (2001), Q. He i in. (2015), M. Janczura, D. Kuchta (2012), N. Johnson i in. 2016), D. Kuchta (2001), W. Kosiński i in. (2002), T. Liang

(2009), A. Nieto-Morote, F. Ruz-Vila (2011), I. Pisz (2009), L. Rutkowski (2006), A. Trivedi, A. Singh (2017), R. Wang, T. Liang (2004), C. Wei i in. (2007). Z drugiej strony opublikowane prace z zakresu skierowanych liczb rozmytych potwierdzają zwiększenie poziomu precyzyjności wykonywanych działań oraz możliwość rozwiązywania równań w zbiorze skierowanych liczb rozmytych, przemawiając tym samym za ich zastosowaniem w praktyce gospodarczej (Chwastyk, Kosiński, 2013; Chwastyk i in., 2015), w tym do problemu szacowania czasu trwania projektów w warunkach niepewności.

Potrzeba matematycznego ujęcia zjawisk nieprecyzyjnych towarzyszących szacowaniu czasu realizacji projektów stała się punktem wyjścia do wprowadzenia koncepcji skierowanych liczb rozmytych. Opracowany w ramach pracy model referencyjny rozpatrywanego problemu decyzyjnego uwzględnia precyzyjny i nieprecyzyjny charakter zmiennych decyzyjnych. W celu rozwiązania danego problemu postuluje się zastosowanie zmodyfikowanej metody ścieżki krytycznej wykorzystującej koncepcję skierowanych liczb rozmytych do opisu zmiennych decyzyjnych o nieprecyzyjnym charakterze – czasu trwania czynności w projekcie. W dalszej części pracy przedstawione zostanie autorskie podejście do szacowania czasu projektu, które może znaleźć zastosowanie we wszystkich sytuacjach, w których wykorzystuje się podejścia deterministyczne. Proponowane podejście oferuje większe możliwości analizy rzeczywistości projektowej. Wykorzystanie koncepcji skierowanych liczb rozmytych pozwala na zobrazowanie niepełnej wiedzy na temat czasu trwania czynności w projekcie.

Koncepcja skierowanych liczb rozmytych

Pojęcie zbiorów rozmytych (*fuzzy sets*) powstało dzięki pracom L. Zadeha (1965) jako uogólnienie klasycznej koncepcji zbioru. Zbiorem rozmytym A w pewnej niepustej przestrzeni X nazywamy zbiór par $A = \{(x, \mu_A(x)); x \in X\}$, w którym $\mu_A : X \to [0,1]$ jest funkcją przynależności zbioru rozmytego. Funkcja ta każdemu elementowi $x \in X$ przypisuje jego stopień przynależności do zbioru rozmytego A.

Liczby rozmyte są to normalne, wypukłe zbiory rozmyte zdefiniowane w zbiorze liczb rzeczywistych, mające ciągłe funkcje przynależności (Rutkowski, 2006, s. 74). Liczba rozmyta, a tym samym jej funkcja przynależności, może mieć dwie podstawowe interpretacje. Może oznaczać stopień, w jakim x posiada pewną cechę, lub może oznaczać możliwość, z jaką pewna nieznana jeszcze w pełni wielkość przyjmie wartość X. Za pomocą liczby rozmytej decydent może wyrazić niepełną wiedzę o danej wielkości, podając przedział wszystkich możliwych jej realizacji, zapisując to w postaci funkcji przynależności – subiektywnej informacji reprezentowanej przez stopień możliwości wystąpienia tych realizacji. Stopnie możliwości przyjmują wartości z przedziału [0,1], gdzie 0 wyraża całkowitą niemożliwość, zaś wartość 1 wyraża pełną możliwość.

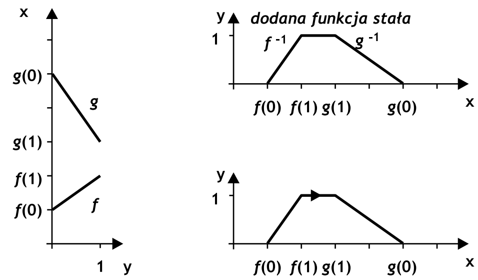
Trójkątną liczbę rozmytą zapisujemy jako trójkę liczb rzeczywistych $[a, b, c]$, gdzie $a < b < c$. Funkcja przynależności trójkątnej liczby rozmytej przyjmuje następującą postać:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & dla \quad x < a \\ \dfrac{x-a}{b-a} & dla \quad a \le x < b \\ \dfrac{c-x}{c-b} & dla \quad b \le x < c \\ 0 & dla \quad x \ge c \end{cases} \tag{1}$$

Wygenerowanie przez eksperta trójkątnej liczby rozmytej jako oszacowania rozkładu możliwych wartości pewnej nieznanej wielkości oznacza, że ekspert uważa, iż wartości poniżej a i powyżej c są niemożliwe, wartość b jest możliwa w stopniu 1, a pozostałe wartości w różnym stopniu, ale tym większym, im bliższe są liczbie b.

Pojęcie skierowanej liczby rozmytej (Ordered Fuzzy Numer – OFN), którego autorami są P. Prokopowicz, D. Ślęzak oraz W. Kosiński (Kosiński i in., 2002), powstało w celu wyeliminowania problemów związanych z liczbami rozmytymi, między innymi problemu zwiększania się nieprecyzyjności wraz z liczbą wykonywanych działań oraz braku rozwiązań nawet równań liniowych w zbiorze liczb rozmytych.

Skierowaną liczbą rozmytą A nazywamy uporządkowaną parę (f, g) funkcji ciągłych $f, g : [0,1] \to R$. Pełny opis działań na skierowanych liczbach rozmytych w ich ogólnej postaci oraz ich własności można znaleźć między innymi w pracy A. Chwastyk i W. Kosińskiego (2013). Wśród ogromnej różnorodności skierowanych liczb rozmytych tylko pewna ich część odpowiada klasycznym liczbom rozmytym. Zbiór par funkcji ciągłych, gdzie jedna z funkcji jest rosnąca, a druga malejąca, a ponadto funkcja rosnąca przyjmuje zawsze wartości mniejsze lub równe od drugiej, jest podzbiorem zbioru skierowanych liczb rozmytych, który reprezentuje klasę wszystkich ciągłych wypukłych liczb rozmytych. Nazywamy je właściwymi skierowanymi liczbami rozmytymi. Konstrukcja funkcji przynależności dla tak zdefiniowanej skierowanej liczby rozmytej przedstawiona jest na rysunku 1.



Rys. 1. Konstrukcja funkcji przynależności dla skierowanej liczby rozmytej (f, g)
Źródło: opracowanie własne

Należy podkreślić, że graficznie pary funkcji (f, g) i (g, f) nie różnią się. Jednak definiują one dwie skierowane liczby rozmyte różniące się tak zwaną orientacją lub inaczej skierowaniem, która na wykresach jest oznaczona strzałką. Z rysunku 1 wynika, że w określeniu funkcji przynależności skierowanej liczby rozmytej $A = (f, g)$ pojawiają się cztery parametry: $f(0), f(1), g(1), g(0)$. Jeśli funkcje f i g reprezentujące gałęzie skierowanej liczby rozmytej A są liniowe, to czwórka liczb $(f(0), f(1), g(1), g(0))$ jednoznacznie reprezentuje tę liczbę. Tak zdefiniowany zbiór właściwych skierowanych liczb rozmytych odpowiada zbiorowi klasycznych trapezoidalnych liczb rozmytych. Przyjmując, dodatkowo, że $f(1) = g(1)$, otrzymamy podzbiór zbioru OFN odpowiadających klasycznym trójkątnym liczbom rozmytym. Nazywamy je wówczas trójkątnymi skierowanymi liczbami rozmytymi. Przyjmując, że $A = (a_1, a_2, a_2, a_3)$ i $B = (b_1, b_2, b_2, b_3)$ są trójkątnymi skierowanymi liczbami rozmytymi, wówczas działania takie jak dodawanie i odejmowanie- zdefiniowane są następująco:

$$A + B = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_2 + b_2, a_3 + b_3) \tag{2}$$

$$A - B = (a_1 - b_1, a_2 - b_2, a_2 - b_2, a_3 - b_3) \tag{3}$$

Interpretacja OFN może być zgodna z ogólną ideą klasycznych liczb rozmytych, przy czym wzbogacona jest o dodatkową informację związaną ze skierowaniem. Na rysunku 2a przedstawiona jest liczba rozmyta, będąca interpretacją opinii eksperta na temat czasu potrzebnego do wykonania pewnego procesu – „około 3 dni". Przedziały są dobrane przez eksperta i uwzględniają niepewność dotyczącą czasu trwania zadania. Należy podkreślić, że używając skierowanych liczb rozmytych, możemy dodatkowo uwzględnić opinię eksperta dotyczącą dynamiki zmiany tej wartości: „około 3 dni z tendencją rosnącą" (rys. 2b) lub „około 3 dni z tendencją malejącą"(rys. 2c), co daje przewagę nad wyrażaniem opinii ekspertów za pomocą klasycznych liczb rozmytych. Ta właściwość skierowanych liczb rozmytych stwarza duże możliwości modelowania rzeczywistości uwzględniającej niepewność, w tym środowiska projektowego.

Ważną rolę w zastosowaniach skierowanych liczb rozmytych pełnią funkcjonały, które liczbie rozmytej przyporządkowują liczbę rzeczywistą. Model konstrukcji funkcjonałów wyostrzania przedstawiony w pracy W. Kosińskiego i innych (2009) pozwala na uzyskanie wielu funkcjonałów wyostrzania, zarówno liniowych, jak i nieliniowych. Otrzymane w ten sposób funkcjonały wyostrzania nie są jednak wrażliwe na skierowanie, tzn. $\phi(f, g) = \phi(g, f)$, które jest istotną cechą skierowanych liczb rozmytych. Tego typu funkcjonały rozważane były w pracy T. Bednarka i innych (2014). Niestety, większość przedstawionych tam funkcjonałów nie jest wrażliwa na skierowanie w przypadku OFN odpowiadającym klasycznym trójkątnym liczbom rozmytym.

W pracy zaproponowano nowy rodzaj funkcjonału wyostrzania wrażliwego na skierowanie. Niech $A = (a_1, a_2, a_2, a_3)$ będzie trójkątną skierowaną liczbą rozmytą. Funkcjonał wyostrzania przyjmuje postać:

$$\phi_t(A) = \frac{a_1 + a_2 + 2a_3}{4} \tag{4}$$

Należy dodać, że tego typu funkcjonał jest funkcjonałem wyostrzania wrażliwym na skierowanie również w przypadku OFN odpowiadającym klasycznym trójkątnym liczbom rozmytym.

Zmodyfikowana metoda ścieżki krytycznej ze skierowanymi liczbami rozmytymi

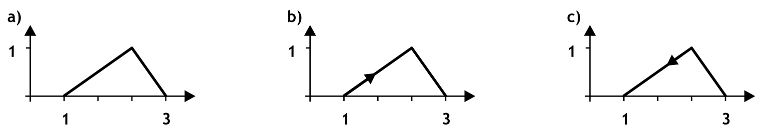
Proponowana koncepcja rozszerzonej metody ścieżki krytycznej ze skierowanymi liczbami rozmytymi bazuje na idei klasycznej ścieżki krytycznej CPM oraz metodzie rozmytej ścieżki krytycznej przedstawionej w pracy A. Chanas i P. Zielińskiego (2001). Nowością jest zastosowanie skierowanych liczb rozmytych do opisu niepewności w zakresie czasu trwania czynności w projekcie. Przedsięwzięcie opisane jest jako sieć acykliczna $S = (V, A, T)$, gdzie $V = \{1, 2, ..., n\}$ jest zbiorem wierzchołków (zdarzeń), $A \subset N \times N$ jest zbiorem łuków (czynności), T_{ij} jest czasem wykonania zadania (i, j) wyrażonym za pomocą trójkątnej skierowanej liczby rozmytej. W niniejszej pracy przyjęto, że sieć projektu jest reprezentowana przez model AOA (Activity On Arc) – czynność na łuku. Niech wierzchołki sieci będą ponumerowane tak, aby dla każdego łuku (i, j) zachodziło $i < j$. Oznaczmy:

$P(i) = \{k \in V | (k, i) \in A\}$ – zbiór poprzedników,

$S(i) = \{k \in V | (i, k) \in A\}$ – zbiór następników dla pewnego $i \in V$.

Proponowane podejście do szacowania czasu realizacji projektu uwzględniające zmienne decyzyjne o nieprecyzyjnym czasie trwania czynności projektowych składa się z następujących etapów:

1. Identyfikacja czynności w projekcie.
2. Zdefiniowanie relacji kolejnościowych pomiędzy czynnościami.
3. Oszacowanie czasu trwania czynności z zastosowaniem trójkątnych skierowanych liczb rozmytych.



Rys. 2. a) Klasyczna liczba rozmyta - ,,około 3 dni", b) funkcja przynależności odpowiadająca trójkątnej skierowanej liczbie rozmytej (1,3,3,4) - tendencja rosnąca, c) funkcja przynależności odpowiadająca skierowanej liczbie rozmytej (4,3,3,1) - tendencja malejąca
Źródło: opracowanie własne

4. Wyznaczenie najwcześniejszego czasu T_i^e rozpoczęcia poszczególnych zdarzeń $i \in V$ dla $i = 2, 3, \ldots, n$ zgodnie z formułą:

$$T_i^e = \boldsymbol{max}_{k\in P(i)} \{T_k^e + T_{ki}\} \tag{5}$$

gdzie dodawanie wykonywane jest zgodnie z wzorem (2), *max* w tym przypadku oznacza wybór czasu wykonania czynności, dla której liczba rzeczywista $\phi_t\,(T_k^e + T_{ki})$ obliczona zgodnie ze wzorem (4) przyjmuje wartość największą. Dla pierwszego zdarzenia przyjmuje ona wartość $T_1^e = (0{,}0{,}0{,}0)$.

5. Wyznaczenie najpóźniejszego czasu rozpoczęcia poszczególnych zdarzeń T_i^l dla $i = n - 1, n - 2, \ldots, 1$ za pomocą formuły:

$$T_i^l = \boldsymbol{min}_{k\in S(i)} \{ T_k^l - T_{ik}\} \tag{6}$$

gdzie odejmowanie wykonywane jest zgodnie z wzorem (3), *min* w tym przypadku oznacza wybór czasu wykonania czynności, dla której $\phi_t(T_k^l + T_{ik})$ przyjmuje wartość najmniejszą. Przy czym $T_n^l = T_n^e$.

6. Wyznaczenie zapasu czasu czynności za pomocą formuły $Z(i, j) = T_j^l - T_i^e - t_{ij}$.
7. Wyznaczenie ścieżki krytycznej projektu. Czynność $(i, j) \in A$ nazywamy krytyczną, gdy $Z(i, j) = (0{,}0{,}0{,}0)$. Niech P oznacza zbiór wszystkich ścieżek w sieci S z wierzchołka 1 do n. Ścieżkę $p \in P$ nazywamy krytyczną, gdy czynności należące do tej ścieżki są krytyczne. Ścieżka krytyczna jest najdłuższą sekwencją czynności realizowanych w danym projekcie. Determinuje całkowity czas trwania projektu.

Przykład obliczeniowy

Celem przykładu jest ilustracja sposobu definiowania parametrów projektu w zadanym modelu referencyjnym problemu decyzyjnego.

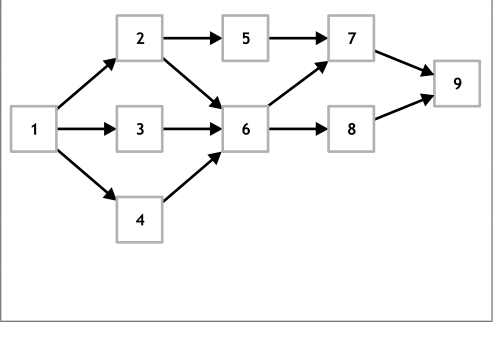
Rozpatrywany projekt składa się z dziewięciu czynności $V = \{1,2,3,4,5,6,7,8,9\}$ będących w relacji opisującej kolejność wykonywania danych czynności $A = \{(1,2), (1,3), (1,4), (2,5), (2,6), (3,6), (4,6), (5,7), (6,7), (6,8), (7,9), (8,9)\}$.

W tabeli 1 przedstawiono sieć projektu oraz informacje dotyczące czasów trwania czynności projektu. Przyjęto, że parametry projektu są niepewne, dlatego zostały one określone przez eksperta w postaci skierowanych liczb rozmytych. Czasy trwania czynności wyrażone są w umownych jednostkach czasu u.j.c. Za pomocą trójkątnych skierowanych liczb rozmytych wyrażono opinię eksperta uwzględniającą niepewność dotyczącą czasu trwania czynności projektowych wzbogaconą o dynamikę zmiany jego wartości. W rozpatrywanym przykładzie czasy trwania czynności (1,2), (1,3), (2,5), (2,6), (4,6), (5,7), (6,8), (7,9), (8,9) obrazują nieprecyzyjny charakter zmiennych z wyraźną tendencją rosnącą. Przykładowo czas trwania czynności (2,6) wynosi „około 5 u.j.c. z tendencją rosnącą" wyrażony jako (4,5,5,7) u.j.c. Oznacza to, że czas realizacji danej czynności poniżej 4 u.j.c. i powyżej 7 u.j.c. jest niemożliwy. Wartość 5 u.j.c. jest najbardziej prawdopodobna, a pozostałe wartości są prawdopodobne w różnym stopniu, ale tym większym, im bliższe są 5 u.j.c. Pozostałe czynności w danym projekcie charakteryzują się czasami trwania z tendencją malejącą. Oznacza to w praktyce, że czas trwania danej czynności może ulec skróceniu do wartości nie większej niż wartość dolna skierowanej liczby rozmytej będącej interpretacją czasu trwania danej czynności. Zgodnie z przyjętym podejściem w pierwszej kolejności należy wyznaczyć najwcześniejszy termin rozpoczęcia poszczególnych zdarzeń, dokonując operacji na liczbach skierowanych reprezentujących niepewne czasy trwania czynności w projekcie (wzór (5)). Poniżej przedstawiono kilka początkowych obliczeń dla zdarzeń w sieci. Zgodnie z założeniem 4 etapu szacowania czasu realizacji projektu $T_1^e = (0{,}0{,}0{,}0)$. Z diagramu projektu wynika, że czynności 2,3,4,5 mają tylko po jednym poprzedniku, zatem:

$$T_2^e = \boldsymbol{max}_{k\in P(2)} \{ T_k^e + T_{k2}\} = T_1^e + T_{12} = (0{,}0{,}0{,}0) + (2{,}3{,}3{,}5) = (2{,}3{,}3{,}5)$$
$$T_3^e = T_1^e + T_{13} = (0{,}0{,}0{,}0) + (1{,}2{,}2{,}3) = (1{,}2{,}2{,}3)$$
$$T_4^e = T_1^e + T_{14} = (0{,}0{,}0{,}0) + (5{,}2{,}2{,}1) = (5{,}2{,}2{,}1)$$
$$T_5^e = T_2^e + T_{25} = (2{,}3{,}3{,}5) + (4{,}5{,}5{,}6) = (6{,}8{,}8{,}11)$$

Tab. 1. Diagram sieciowy projektu wraz z estymacją czasu trwania czynności w u.j.c.

Czynność (i, j)	***Czas trwania czynności*** T_{ij}	***Czynność*** (i, j)	***Czas trwania czynności*** T_{ij}
(1,2)	(2,3,3,5)	(4,6)	(5,6,6,8)
(1,3)	(1,2,2,3)	(5,7)	(7,8,8,11)
(1,4)	(5,2,2,1)	(6,7)	(8,7,7,5)
(2,5)	(4,5,5,6)	(6,8)	(8,9,9,11)
(2,6)	(4,5,5,7)	(7,9)	(8,9,9,10)
(3,6)	(8,5,5,4)	(8,9)	(11,12,12,15)



Źródło: opracowanie własne

W węźle sieci projektu (zdarzenie numer 6) zbiega się realizacja kilku równoległych czynności, tj. czynności (2,6), (3,6), (4,6). Stąd:

$$T_6^e = max_{k \in P(6)} \{T_k^e + T_{k6}\} = max \{T_2^e + T_{26}, T_2^e + T_{36}, T_4^e + \\ + T_{46}\} = max \{(2,3,3,5) + (4,5,5,7),(1,2,2,3) + \\ + (8,5,5,4),(5,2,2,1) + (5,6,6,8)\} = \\ = max \{(6,8,8,12),(9,7,7,7),(10,8,8,9)\}$$

Przy obliczaniu najwcześniejszego terminu rozpoczęcia tego zdarzenia należy wybrać czas, dla którego funkcjonał wyostrzania (wzór (4)) przyjmuje wartość największą:

$$\phi_t (6,8,8,12) = \frac{6 + 8 + 2 \cdot 12}{4} = 9,5$$
$$\phi_t (9,7,7,7) = 7,5$$
$$\phi_t (10,8,8,9) = 9$$

Zatem najwcześniejszy termin rozpoczęcia zdarzenia numer 6 przyjmuje wartość $T_6^e = (6,8,8,12)$. W podobny sposób należy dokonać obliczeń dla pozostałych zdarzeń w rozpatrywanej strukturze projektu.

Krok 5 proponowanego podejścia pozwala na wyznaczenie najpóźniejszego terminu rozpoczęcia dla zdarzeń węzłowych. Obliczenia na tym etapie przeprowadza się w przeciwną stronę, zgodnie ze wzorem (6). Za wartość T_n^l przyjmuje się najwcześniejszy terminu rozpoczęcia ostatniej czynności, tzn. $T_n^l = T_n^e$. W rozpatrywanym przypadku oznacza to, że $T_9^e = (25,29,29,38)$. Kolejno wyznaczano charakterystyki czasowe dla poszczególnych zdarzeń w rozpatrywanym projekcie. Zdarzenia 8 i 7 posiadają po jednym następniku, zatem:

$$T_8^l = min_{k \in S(8)} \{T_k^l - T_{8k}\} = T_9^l - T_{89} = (25,29,29,38) - \\ - (11,12,12,15) = (14,17,17,23)$$
$$T_7^l = min_{k \in S(7)} \{T_k^l - T_{7k}\} = T_9^l - T_{79} = (25,29,29,38) - \\ - (8,9,9,10) = (17,20,20,28)$$

Zdarzenie 6 poprzedza realizację dwóch równoległych czynności. Wówczas przy obliczaniu najpóźniejszego terminu rozpoczęcia należy wybrać czas, dla którego funkcjonał wyostrzania przyjmuje wartość najmniejszą:

$$T_6^l = min_{k \in S(6)} \{T_k^l - T_{6k}\} = min \{T_7^l - T_{67}, T_8^l - T_{68}\} = \\ min \{(17,20,20,28) - (8,7,7,5),(14,17,17,23) - \\ - (8,9,9,11)\} = \\ = min \{(9,13,13,23),(6,8,8,12)\}$$
$$\phi_t (9,13,13,23) = 17; \quad \phi_t (6,8,8,12) = 9,5, \quad \text{zatem} \\ T_6^l = (6,8,8,12)$$

Po wyznaczeniu najpóźniejszych terminów rozpoczęcia zdarzeń w projekcie należy wyznaczyć zapas czasy dla poszczególnych czynności projektu (krok 6). W tabelach 2 i 3 przedstawiono wyniki tych obliczeń.

Z analizy uzyskanych rozwiązań wynika, że najkrótszy termin realizacji rozpatrywanego projektu przyjmuje wartość (25,29,29,38) u.j.c. Oznacza to, że czas realizacji projektu poniżej 25 u.j.c. i powyżej 38 u.j.c. jest niemożliwy. Wartość 29 u.j.c. jest najbardziej prawdopodobna, a pozostałe wartości są prawdopodobne w różnym stopniu, ale tym większym, im bliższe są 29 u.j.c. Czynności krytyczne to (1,2), (2,6), (6,8) i (8,9). W analizowanej sieci projektu wyróżniona została jedna ścieżka krytyczna złożona z czynności łączących zdarzenia 1–2–6–8–9.

Podsumowanie

Oszacowanie czasu trwania czynności wymaga od kierownictwa projektu przyjęcia określonej metody, techniki czy podejścia. Planowanie czasu jest obok planowania terminów jednym z ważnych fundamentów szacowania kosztów i ustalania obowiązujących terminów. Główne źródła złożoności problemu szacowania czasu realizacji projektów wynikają m.in. z działania w warunkach ryzyka i niepewności przy ograniczonym dostępie do precyzyjnych danych oraz wielopoziomowości podejmowanych decyzji. Dobór odpowiedniego podejścia szacowania czasu realizacji projektu jest zdeterminowany jakością posiadanej informacji zarówno o planowanym

Tab. 2. Charakterystyki czasowe rozpatrywanego projektu w odniesieniu do zdarzeń w u.j.c.

Zdarzenie	Najpóźniejszy czas rozpoczęcie zdarzenia *i*	Najwcześniejszy czas rozpoczęcie zdarzenia *i*
1	(0,0,0,0)	(0,0,0,0)
2	(2,3,3,5)	(2,3,3,5)
3	(-2,3,3,8)	(1,2,2,3)
4	(1,2,2,4)	(5,2,2,1)
5	(10,12,12,17)	(6,8,8,11)
6	(6,8,8,12)	(6,8,8,12)
7	(17,20,20,28)	(13,16,16,22)
8	(14,17,17,23)	(14,17,17,23)
9	(25,29,29,38)	(25,29,29,38)

Źródło: opracowanie własne

Tab. 3. Charakterystyki czasowe danego projektu w odniesieniu do czynności w u.j.c.

Czynność	Zapas czasu $Z(i,j)$	Wyostrzony zapas czasu $\phi(Z(i,j))$	Czynność krytyczna/niekrytyczna
(1,2)	(0,0,0,0)	0	krytyczna
(1,3)	(-3,1,1,5)	2	niekrytyczna
(1,4)	(-4,0,0,3)	0,5	niekrytyczna
(2,5)	(4,4,4,6)	5	niekrytyczna
(2,6)	(0,0,0,0)	0	krytyczna
(3,6)	(-3,1,1,5)	2	niekrytyczna
(4,6)	(-4,0,0,3)	0,5	niekrytyczna
(5,7)	(4,4,4,6)	5	niekrytyczna
(6,7)	(3,5,5,11)	7,5	niekrytyczna
(6,8)	(0,0,0,0)	0	krytyczna
(7,9)	(4,4,4,6)	5	niekrytyczna
(8,9)	(0,0,0,0)	0	krytyczna

Źródło: opracowanie własne

projekcie, jak i informacji historycznej – wiedzy projektowej. Dostępność informacji jest istotnym kryterium oceny możliwości zastosowania danego podejścia.

W pracy zaproponowano metodę szacowania czasu realizacji projektu w oparciu o dane nieprecyzyjne w warunkach zmieniającego się otoczenia (warunki ryzyka i niepewności) z zastosowaniem aparatu matematycznego w postaci skierowanych liczb rozmytych. Czasy realizacji czynności projektowych modeluje się w tym przypadku za pomocą trójkątnych skierowanych liczb rozmytych. Skierowana liczba rozmyta reprezentuje wszystkie możliwe czasy trwania czynności w projekcie oraz stopień prawdziwości rozpatrywanego zjawiska. Pozwala ona w przejrzysty sposób prezentować kilka informacji jednocześnie, a określone działania arytmetyczne na skierowanych liczbach matematycznych umożliwiają łatwą ich agregację.

Przedstawione podejście do szacowania czasu trwania projektu w warunkach ograniczonego dostępu do informacji wykorzystuje metodę ścieżki krytycznej oraz koncepcję skierowanych liczb rozmytych. Rozszerzona metoda ścieżki krytycznej została poddana weryfikacji na danych testowych. Przedstawione podejście jest jednym z niewielu podejść do proaktywnego harmonogramowania projektów uwzględniającego dane nieprecyzyjne. Zastosowanie opracowanej metody w praktyce zarządzania projektami może przyczynić się w znaczący sposób do zwiększenia powodzenia realizacji projektów. Proponowane podejście może mieć szerokie zastosowanie w problemach szacowania projektów różnego typu, zarówno w projektach produkcyjnych, budowlanych, IT, logistycznych, w projektach małych, średnich i dużych.

Opracowane podejście stanowi propozycję alternatywnego do stosowanych tradycyjnych podejść do szacowania czasu projektu w teorii i praktyce modelu decyzyjnego rozszerzającego zakres jego potencjalnych zastosowań w wybranym obszarze decyzyjnym, szczególnie tych o charakterze innowacyjnym o dużym nakładzie finansowym.

Model referencyjny przedstawiony w pracy może być łatwo rozszerzany o nową wiedzę, w ramach której definiować można mieszczące się w zadanych ramach hybrydy modeli problemów decyzyjnych dotyczących zarządzania projektami. Dalszym kierunkiem badań będzie rozszerzenie danego podejścia o analizę stochastycznych relacji czynności w projekcie z wykorzystaniem koncepcji logiki słabej „soft logic". Opracowanie spójnej koncepcji analizowanego zagadnienia stanowić będzie odpowiedź na problem radzenia sobie z niepewnością estymacji trwania czynności oraz kolejności ich realizacji w projekcie.

dr inż. Iwona Pisz
Uniwersytet Opolski
Wydział Ekonomiczny
e-mail: ipisz@uni.opole.pl

dr Anna Chwastyk
Politechnika Opolska
Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki
e-mail: a.chwastyk@po.opole.pl

Bibliografia

[1] Barchański B. (2014), *Wybrane aspekty szacowania czasów trwania czynności w projektach*, „Nauki o Zarządzaniu", Vol. 20, Nr 3, s. 9–21.

[2] Bednarek T., Kosiński W., Węgrzyn-Wolska K. (2014), *On Orientation Sensitive Defuzzification Functionals*, [in:] L. Rutkowski, M. Korytkowski, R. Scherer, R. Tadeusiewicz, L. Zadeh, J. Zurada (eds.), *Artificial Intelligence and Soft Computing, Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 8468, Springer International Publishing, Berlin, pp. 653–664.

[3] Chanas S., Kamburowski J. (1981), *The Use of Fuzzy Variables in PERT*, „Fuzzy Sets and Systems", Vol. 5, No. 1, pp. 1–19.

[4] Chanas S., Zieliński P. (2001), *Critical Path Analysis in the Network with Fuzzy Activity Times*, „Fuzzy Sets and Systems", Vol. 122, No. 2, pp. 195–204.

[5] Chwastyk A., Kosiński W. (2013), *Fuzzy Calculus with Applications*, „Mathematica Applicanda", Vol. 41, No. 1, pp. 47–96.

[6] Chwastyk A., Pisz I., Łapuńka I. (2015), *Ocena opłacalności projektów inwestycyjnych z zastosowaniem skierowanych liczb rozmytych*, „Ekonomika i Organizacja Przedsiębiorstwa", Nr 12, s. 3–18.

[7] He Q., Luo L., Hu Y., Chan A.P.C (2015), *Measuring the Complexity of Mega Construction Projects in China – A fuzzy Analytic Network Process Analysis*, „International Journal of Project Management", Vol. 33, No. 3, pp. 549–563.

[8] Janczura M., Kuchta D. (2012), *Harmonogramowanie reaktywne a ryzyko w projekcie*, Studia Ekonomiczne, Zeszyty Naukowe Wydziałowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, Nr 97, s. 253–269.

[9] Johnson N., Creasy T., Fan Y. (2016), *Recent Trends in Theory Use and Application within the Project Management Discipline*, „Journal of Engineering, Project, and Production Management", Vol. 6, No. 1, pp. 25–52.

[10] Kosiński W., Piasecki W., Wilczyńska-Sztyma D. (2009), *On Fuzzy Rules and Defuzzification Functionals for Ordered Fuzzy Numbers*, [in:] T. Burczyński, W. Cholewa, W. Moczulski (eds.), Proc. of AI-Meth'2009 Conference, AI-METH Series, Gliwice, pp. 161–178.

[11] Kosiński, W. (2004), *On Defuzzyfication of Ordered Fuzzy Numbers*, [in:] L. Rutkowski (ed.), *Artificial Intelligence and Soft Computing – ICAISC 2004*, *Lecture Notes on Artificial Intelligence*, Vol. 3070, Springer, Berlin, pp. 326–331.

[12] Kosiński, W., Prokopowicz P., Ślęzak D. (2002), *Fuzzy Numbers with Algebraic Operations: Algorithmic Approach*, [in:] M. Kłopotek, S.T. Wierzchoń, M. Michalewicz (eds.), *Intelligent Information Systems 2002, Proc. IIS'2002,* Physica Verlag, Sopot, June 3–6, pp. 311–320.

[13] Kuchta D. (2001), *Use of Fuzzy Numbers in Project Risk (Criticality) Assessment*, „International Journal of Project Management", Vol. 19, No. 5, pp. 305–310.

[14] Liang T.-F. (2009), *Application of Fuzzy Sets to Multi-objective Project Management Decisions*, „International Journal of General Systems", Vol. 38, No. 3, pp. 311–330.

[15] Nieto-Morote A., Ruz-Vila F. (2011), *A Fuzzy Approach to Construction Project Risk Assessment*, „International Journal of Project Management", Vol. 29, No. 2, pp. 220–231.

[16] Pawlak M. (2006), *Zarządzanie projektami*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa.

[17] Pisz I. (2009), *Applying Fuzzy Logic and Soft Logic to Logistics Projects Modeling*, [in:] M. Fertsch, K. Grzybowska, A. Stachowiak (eds.), *Modeling of Modern Logistics Enterprises*, Monograph, Publishing House of Poznan University of Technology, Poznań, pp. 201–210.

[18] Pisz I., Łapuńka I. (2015), *Zarządzanie projektami w logistyce*, Difin, Warszawa.

[19] Rutkowski L. (2006), *Metody i techniki sztucznej inteligencji*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa.

[20] Trivedi A., Singh A. (2017), *A Hybrid Multi-objective Decision Model for Emergency Shelter Location-relocation Projects Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process and Goal Programming Approach*, „International Journal of Project Management", Vol. 35, No. 5, pp. 827–840.

[21] Trocki M., Grucza B., Ogonek K. (2009), *Zarządzanie projektami*, PWE, Warszawa.

[22] Trocki M., Wyrozębski P. (red.), (2015), *Planowanie przebiegu projektów*, Oficyna Wydawnicza Szkoła Główna Handlowa w Warszawie, Warszawa.

[23] Turner J.R. (1993), *The Handbook of Project Based Management: Improving the Processes for Achieving Strategic Objectives*, McGraw-Hill, London.

[24] Wang R.C., Liang T.F. (2004), *Project Management Decisions with Multiple Fuzzy Goals*, „Construction Management & Economics", Vol. 22, No. 10, pp. 1047–1056.

[25] Wei C.C., Liang G.S., Wang M.J.J. (2007), *A Comprehensive Supply Chain Management Project Selection Framework under Fuzzy Environment*, „International Journal of Project Management", Vol. 25, No. 6, pp. 627–636.

[26] Wyrozębski P. (2014), *Zarządzanie wiedzą projektową*, Difin, Warszawa.

[27] Zadeh L.A. (1965), *Fuzzy Sets*, „Information and Control", Vol. 8, No. 3, pp. 338–353.

Approach to Project Time Estimation with Imprecise Input Data

Summary

Summary: The paper presents the essence and significance of the project time estimation under uncertainty and risk using ordered fuzzy numbers. The proposed approach is based on a fuzzy model of uncertainty using ordered fuzzy numbers as imprecise data – duration times. The presented extended critical path method is a new approach that has not been presented so far in the literature of the subject. The authors present the implementation of the approach on an example. The advantages of the proposed approach have been outlined in the paper. The proposed approach can find practical applications in decision-making problems under conditions of risk and uncertainty, supporting decision-makers in the planning and scheduling phase of projects. It seems to be an effective tool for supporting decision-making in the design of complex projects with high levels of risk and uncertainty.

Keywords

project, uncertainty, ordered fuzzy number, extended CPM