

dr inż. **Grzegorz GINDA**¹
dr hab. inż. **Mariusz MAŚLAK**²

MAPY KOGNITYWNE DO EKSPERCKIEJ ANALIZY RELACJI POMIĘDZY CZYNNIKAMI RYZYKA I ICH ROLA W SZACOWANIU BEZPIECZEŃSTWA POŻAROWEGO

Cognitive maps for expert analysis of interrelations between the risk factors and their role in fire safety evaluation

Streszczenie

Zaprezentowano i przedyskutowano oryginalną technikę jakościowej i ilościowej oceny charakteru relacji pomiędzy zidentyfikowanymi a priori czynnikami determinującymi poziom bezpieczeństwa użytkowników budynku na wypadek rozgorzenia w nim pożaru. Proponowana metodologia bazuje na rekurencyjnej procedurze oceny, charakterystycznej dla analizy tak zwanych map kognitywnych. W pracy postuluje się zastąpienie klasycznego algorytmu obliczeń alternatywnym podejściem analitycznym wykorzystującym założenia procedury DEMATEL. Omawiane podejście pozwala na szczegółową analizę istotności relacji przyczynowo-skutkowych pomiędzy porównywanymi czynnikami. Punkt wyjścia do tej analizy stanowią odpowiednio ważne oceny eksperckie wykorzystujące wielostopniową skalę ocen. Zaproponowany model obliczeniowy można w łatwy sposób przystosować do badania informacji o charakterze niepewnym lub niepełnym. Szczególnym przypadkiem rozważań tego typu jest opisywany przez autorów w osobnych publikacjach przykład wykorzystujący opinie wyrażone poprzez liczby rozmyte [8] [9]. W ujęciu autorów reprezentacją mapy kognitywnej jest skierowany graf bezpośredniego wpływu, którego wierzchołki odwzorowują porównywane obiekty, natomiast krawędzie – relacje pomiędzy nimi. Relacje te nie muszą być jednokierunkowe, mogą bowiem odzwierciedlać potencjalne sprzężenia. Ostateczna ocena sumuje wpływy bezpośrednie i znacznie trudniej ujawniające się wpływy pośrednie. Dla lepszej czytelności otrzymanych wyników postuluje się wyznaczenie wartości progowej wykluczającej z dalszego badania relacje niewystarczająco istotne. Matematycznym reprezentantem wyspecyfikowanych map – grafów są skojarzone z nimi macierze wpływu, odpowiednio: bezpośredniego, pośredniego i całkowitego. Można również określić macierz całkowitego wpływu netto. Ideę zaproponowaną przez autorów ilustruje prosty przykład obliczeniowy bazujący na opinii pojedynczego eksperta. Założona struktura powiązań pomiędzy porównywanymi czynnikami nie zawiera sprzężeń, a oceny określono przy pomocy danych deterministycznych. Bardziej złożone przykłady zainteresowany czytelnik znajdzie w odrębnych opracowaniach autorów – artykułach i referatach zestawionych na końcu niniejszej pracy.

Summary

This paper presents and discusses the application of original qualitative and quantitative techniques for evaluating interrelations between factors identified as a priori and determining safety levels for building users in case of a fire. A recurrent numerical process, typical for cognitive map application, is normally used in such an evaluation. The authors suggest an alternative to the classic algorithm, by harnessing the DEMATEL method. The discussed approach appears easier to cope with and allows for a specific analysis of cause and effect relations between factors under consideration. The starting point for this approach is expert opinion applied on a multi-level evaluation scale. The algorithm can be easily adapted to examine uncertain or incomplete information e.g. application of fuzzy numbers [8] [9]. The cognitive process is represented by an impact-relations-map, whose vertices represent comparable factors and arcs reflect direct relationships between factors. Such relationships need not be one directional, they can mirror potential feedback to be incorporated in the analysis. The final evaluation sums up direct influences and the more difficult emerging indirect influences. For easier interpretation of data it is suggested that a threshold value is determined to limit superfluous information and therefore exclude factors with relationships not considered sufficiently intensive to afford clear and unequivocal deductions. The proposed maps are represented mathematically by relative matrices of direct, indirect and total influence. Moreover it is also possible to establish the net total matrix. The idea proposed by the authors is illustrated in this paper with the aid of a simple numerical example, dealing with a single expert opinion, in which the assumed influence structure between

¹ Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Nauk o Materiałach i Środowisku, ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, Polska; wkład procentowy w powstanie artykułu – 60%;

² prof. Politechniki Krakowskiej, Wydział Inżynierii Lądowej, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Polska; wkład procentowy w powstanie artykułu – 40%;

considered factors does not include feedback. Furthermore, only one deterministic data set is applied to express levels of direct influence. More advanced and complex examples are presented and discussed by the authors in other papers. Interested readers will find relevant details in the bibliography.

Słowa kluczowe: pożar, bezpieczeństwo, mapa kognitywna, graf wpływu, DEMATEL;

Keywords: fire, safety, cognitive maps, influence map, DEMATEL;

Wprowadzenie

Poziom bezpieczeństwa użytkowników budynku w przypadku powstania pożaru zależy od wielu różnego typu czynników. Czynniki te przekładają się na potencjalne ryzyka związane z zagrożeniem życia i zdrowia ludzi, a także ze znacznymi stratami materialnymi i kulturowymi. Nie są one wzajemnie niezależne. Na ogół da się je pogrupować w zależności od źródła pochodzenia, specyfiki, podobnych możliwych konsekwencji czy chociażby rodzaju powodowanych skutków. W ramach poszczególnych grup czynników określa się pomiędzy nimi formalne relacje podrzędności i nadrzędności, w kontekście wyspecyfikowania ewentualnych ciągów logicznych typu przyczyna – skutek. W ujęciu globalnym dysponujemy zatem złożonym układem hierarchicznym o jednoznacznie określonej strukturze. Analizie tego typu układów autorzy niniejszego artykułu poświęcili osobną pracę [5], w której zaprezentowano sposób szacowania istotności poszczególnych czynników poprzez przypisanie im odpowiednio uzasadnionych wag określających pozycję badanego czynnika w ogólnym bilansie wpływów determinujących bezpieczeństwo. Zaproponowaną metodykę postępowania oparto na technikach analizy decyzyjnej. Pojedyncze oceny eksperckie były odpowiednio przetwarzane i agregowane do uzyskania uśrednionej oceny globalnej, której można przypisać odpowiedni poziom wiarygodności. Celem niniejszej pracy jest demonstracja podstaw modelu matematycznego umożliwiającego bardziej precyzyjne badanie charakteru poszczególnych relacji i ich względnego znaczenia w globalnej sieci powiązań. Rozpatrywane relacje wizualizowane są poprzez grafy z odpowiednio różnicowanymi krawędziami, a ich matematyczną reprezentację stanowią tak zwane macierze kognitywne. Takie podejście pozwala na efektywne zaadaptowanie do modelu uzyskanych wcześniej ocen eksperckich. W rezultacie otrzymuje się wynikowe macierze wpływu stanowiące podstawę do finalnego oszacowania istotności i kierunku badanej relacji. Chodzi o to, czy dany czynnik jest przyczyną, czy raczej skutkiem czynnika z nim porównywanego.

Trzeba podkreślić, że w praktyce inżynierskiej identyfikacja a priori charakteru badanych relacji wydaje się wysoce pożądana z uwagi na stworzenie realnej możliwości dostatecznie uzasadnionego doboru optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych, formalnych i funkcjonalnych. Zaproponowane podejście prowadzi do uzyskania oceny całościowej, uwzględniającej rozmaite wpływy otoczenia. Wy-

korzystanie dostępnych ocen eksperckich zwiększa przy tym jego elastyczność i raczej dodaje wiarygodności. Ze względu na potencjalne występowanie trudno mierzalnych oddziaływań pomiędzy badanymi czynnikami ich faktyczny wpływ na bezpieczeństwo nie jest bowiem łatwy do oceny w inny sposób, na przykład na drodze eksperymentalnej. Poza tym poszczególne czynniki mogą wpływać na bezpieczeństwo pożarowe zarówno w sposób bezpośredni, jak i wynikający z pośrednictwa innych czynników. W rezultacie struktura zależności między czynnikami oprócz jednokierunkowych zależności hierarchicznych może również obejmować różnego rodzaju sprzężenia.

1. Koncepcja mapy kognitywnej

Termin „mapy kognitywne” (ang. *cognitive maps*, CM) sugeruje związek z kognitywistyką, stosunkowo młodą dziedziną nauki wyodrębnioną z klasycznej logiki. Stawia sobie ona za cel możliwie precyzyjne modelowanie rozmaitych procesów myślowych, zwłaszcza w kontekście ich późniejszego odwzorowania przy tworzeniu obiektów sztucznej inteligencji. Stąd dążenie raczej do szczegółowej analizy struktury powiązań logicznych i ich wzajemnych oddziaływań kosztem precyzyjnego badania prawdziwości reguł matematycznych opisujących poszczególne wyodrębnione relacje. Mapy tego typu pierwotnie opracowano do modelowania decyzji politycznych [1]. Później, zwłaszcza po roku 2000, były one wykorzystywane do badania zagadnień decyzyjnych należących do różnych dziedzin nauki. W latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku [10] dostosowano je do aplikacji informacji o charakterze rozmytym. Tego rodzaju mapy (ang. *fuzzy cognitive maps*, FCM) nazywa się czasem rozmytymi mapami decyzji (ang. *fuzzy decision maps*, FDM) [11].

Zastosowanie podejścia związanego z koncepcją mapy kognitywnej wiąże się ze specyfikacją następujących obiektów matematycznych:

- zbioru rozważanych n czynników – N ,
- macierzy powiązań pomiędzy czynnikami – E ,
- macierzy stanu – C ,
- funkcji progowej – f .

Macierz kwadratowa E ma wymiar $n \times n$ i wyraża strukturę bezpośredniego wpływu badanych czynników. Obrazem tej macierzy jest graf, którego wierzchołki odwzorowują rozpatrywane wpływy. Symbol C oznacza macierz wynikającą ze stopniowego przekształcania macierzy E . Ma ona przy tym zawsze ten sam rozmiar co macierz E . Funkcja pro-

gowa f ułatwia uwypuklenie różnic pomiędzy poszczególnymi czynnikami. W praktyce stosowane są różne postacie tej funkcji. Trzeba zaznaczyć, że od wyboru tej postaci zależy otrzymany wynik finalny. W wyborze odpowiedniej formy funkcji f pomagają wykorzystanie klasycznej analizy wrażliwości [2].

Początkowa forma macierzy stanu oznaczana jest jako $C^{(0)}$ i odpowiada macierzy jednostkowej I :

$$C^{(0)} = I \quad (1)$$

Postać końcową $C^{(T)}$ otrzymuje się na podstawie wielokrokowej procedury wykorzystującej formułę rekurencyjną:

$$C^{(t+1)} = f(C^{(t)} \cdot E) \quad \text{gdzie: } t = 0, 1, \dots, T \quad (2)$$

Postać $C^{(T)}$ odpowiada zatem macierzy otrzymanej w kroku $t = T$. Można przy tym wyróżnić dwa rodzaje stanów granicznych:

- stan ustalony związany ze stosowaniem tej samej postaci macierzy w kolejnych krokach procedury obliczeniowej:

$$C^{(T+1)} = C^{(T)} \quad (3)$$

- cykl stanu granicznego odpowiadający nieskończonemu cyklicznemu powtarzaniu sekwencji postaci $C^{(t)}$ w krokach $t = T, T+1, \dots, T+i \cdot (c-1), T+i \cdot c, T+i \cdot (c+1), \dots$:

$$C^{(T)} = C^{(T+i \cdot c)} \quad (4)$$

gdzie: i oznacza kolejne liczby naturalne $i = 1, 2, 3, \dots$

Miarą poszukiwanych wpływów jest zestaw wag w wyrażających całkowite oddziaływanie rozważanych czynników, to znaczy łączące wpływy zarówno bezpośrednie, jak i pośrednie. Zestaw ten opisuje wektor w o postaci:

$$w = \bar{z} + \bar{C}^{(T)} \cdot \bar{z} \quad (5)$$

W powyższej formule symbol \bar{z} oznacza znormalizowaną postać wektora nieujemnych wag z , który oddaje znaczenie rozważanych obiektów (wartości składowych wektora można wyznaczać, posługując się dowolnymi metodami), $\bar{C}^{(T)}$ stanowi znormalizowaną wierszowo postać końcowej macierzy stanu $C^{(T)}$. Do wyznaczenia składników wzoru (5) najczęściej wykorzystuje się następujące formuły:

$$\bar{z} = \frac{z}{\sum_{i=1}^n z_i} \quad (6)$$

$$\bar{C}^{(r)} = \frac{C^{(r)}}{\max_i \left\{ \sum_{j=1}^n c_{ij}^{(r)} \right\}} \quad (7)$$

Ostatnio [2] zwrócono uwagę na to, że przy założeniu liniowej postaci funkcji progowej f procedura obliczeniowa związana z zastosowaniem koncepcji macierzy kognitywnej staje się równoważna klasycznemu algorytmowi metodyki DEMATEL [4].

2. Podstawy metodyki DEMATEL

Podobnie jak procedury związane z analizą map kognitywnych, także metodyka DEMATEL (*DEcision MAKing Trial and Evaluation Laboratory*) wykorzystuje pojęcie bezpośredniego wpływu czynników. Bazuje ona przy tym na badaniu istotności bezpośredniej relacji przyczynowo-skutkowej pomiędzy dwoma porównywanymi czynnikami. Istnieją przy tym 3 możliwości opisu takiej relacji: pierwszy czynnik warunkuje drugi, drugi warunkuje pierwszy albo czynniki te wzajemnie na siebie nie wpływają. Możliwe jest również uwzględnienie wewnętrznego sprzężenia rozważanej relacji, to znaczy sytuacji gdy zachodzi ona w obu kierunkach. Do wyrażenia intensywności badanego wpływu na ogół wykorzystuje się $(N + 1)$ – stopniową skalę ocen, w której najniższy poziom wyraża całkowity brak jakiegokolwiek relacji (poziom zerowy), najwyższy zaś (poziom N -ty) odpowiada jej skrajnie dużej intensywności. Przykładowo, dla skali pięciostopniowej ($N = 4$) można przyjąć następującą interpretację pośrednich poziomów relacji:

- ($N = 1$) – niewielki bezpośredni wpływ pierwszego czynnika na drugi,
- ($N = 2$) – znaczący bezpośredni wpływ pierwszego czynnika na drugi,
- ($N = 3$) – bardzo duży bezpośredni wpływ pierwszego czynnika na drugi.

Z oczywistych względów trzeba również założyć, że żaden czynnik nie wywiera bezpośredniego wpływu na samego siebie.

Kompletny zestaw ocen bezpośrednich relacji grupy n czynników jest zatem zbiorem $(n-1) \cdot n$ -elementowym. Opisuje go *mapa bezpośredniego wpływu* opracowana w postaci skierowanego grafu bezpośredniego wpływu $X(V_X, E_X)$. Wierzchołki grafu V_X oznaczają tu oceniane czynniki, łuki E_X natomiast relacje między porównywanymi czynnikami. Powyższy graf reprezentuje kwadratowa macierz bezpośredniego wpływu X o rozmiarze $n \times n$. Wyraz tej macierzy położony na przecięciu i -tego wiersza i j -tej kolumny wyraża przy tym bezpośredni wpływ i -tego czynnika na j -ty czynnik ($i, j = 1, 2, \dots, n$). Zauważmy, że graf bezpośredniego wpływu ma budowę analogiczną do struktury mapy kognitywnej,

natomiast macierz bezpośredniego wpływu \mathbf{X} stanowi z kolei odpowiednik macierzy połączeń \mathbf{E} .

Na łączny efekt relacji porównywanych czynników składa się część pochodząca od określonego powyżej jawnego wpływu bezpośredniego oraz część dodatkowa wynikająca z ukrytego wpływu pośredniego. Pełny opis całkowitego wpływu ma zatem postać skierowanego grafu całkowitego wpływu $T(V_T, E_T)$. Graf ten reprezentowany jest przez kwadratową macierz całkowitego wpływu \mathbf{T} , również o rozmiarze $n \times n$. Wyrazy macierzy \mathbf{T} mają interpretację analogiczną do odpowiadających im wyrazów macierzy \mathbf{X} . W konsekwencji:

$$\mathbf{T} = \bar{\mathbf{X}} + \Delta\mathbf{T} \quad (8)$$

gdzie symbol $\bar{\mathbf{X}}$ oznacza znormalizowaną macierz bezpośredniego wpływu, natomiast $\Delta\mathbf{T}$ – macierz pośredniego wpływu. Znormalizowaną postać macierzy bezpośredniego wpływu \mathbf{X} , zawierającą jedynie elementy z przedziału $(0,1)$, otrzymuje się z zależności:

$$\bar{\mathbf{X}} = \frac{1}{\lambda} \cdot \mathbf{X} \quad (9)$$

przy czym λ jest maksymalną wierszową i kolumnową sumą składników macierzy \mathbf{X} , taką, że:

$$\lambda = \max \left\{ \max_i \sum_{j=1}^n x_{ij}, \max_j \sum_{i=1}^n x_{ij} \right\} \quad (10)$$

Dysponowanie opiniami H niezależnych ekspertów pozwala na zbudowanie grupowej uśrednionej macierzy bezpośredniego wpływu \mathbf{X}_{sr} w postaci:

$$\mathbf{X}_{sr} = \frac{1}{H} \sum_{m=1}^H \mathbf{X}^m \quad (11)$$

gdzie \mathbf{X}^m jest macierzą bezpośredniego wpływu pochodzącą od m -tego eksperta ($m = 1, 2, \dots, H$).

Odnosząc się do pojedynczej opinii eksperckiej, macierz $\Delta\mathbf{T}$ zwykle konstruuje się sumując kolejne, wyższe niż pierwsza, potęgi macierzy $\bar{\mathbf{X}}$ [3]:

$$\Delta\mathbf{T} = \bar{\mathbf{X}}^2 + \bar{\mathbf{X}}^3 + \dots = \sum_{i=2}^{\infty} \bar{\mathbf{X}}^i \quad (12)$$

Zauważmy, że:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \bar{\mathbf{X}}^k = \mathbf{0}_{n \times n} \quad (13)$$

gdzie $\mathbf{0}_{n \times n}$ jest macierzą zerową o rozmiarze $n \times n$. Poza tym zachodzi:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \left(\mathbf{I} + \bar{\mathbf{X}} + \bar{\mathbf{X}}^2 + \dots + \bar{\mathbf{X}}^k \right) = (\mathbf{I} - \bar{\mathbf{X}})^{-1} \quad (14)$$

przy czym $\mathbf{I} = \mathbf{I}_{n \times n}$ oznacza kwadratową macierz jednostkową o tym samym rozmiarze. A zatem po uwzględnieniu (8) i (12) otrzymuje się:

$$\mathbf{T} = \bar{\mathbf{X}} + \bar{\mathbf{X}}^2 + \dots + \bar{\mathbf{X}}^k = \bar{\mathbf{X}} \left(\mathbf{I} + \bar{\mathbf{X}} + \dots + \bar{\mathbf{X}}^{k-1} \right) = \bar{\mathbf{X}} (\mathbf{I} - \bar{\mathbf{X}})^{-1} \quad (15)$$

Na podstawie przyjętej macierzy \mathbf{X} , po zbudowaniu macierzy $\Delta\mathbf{T}$ i \mathbf{T} , można wyznaczyć wartości wskaźników opisujących rolę i znaczenie rozpatrywanych czynników w kontekście oddziaływania bezpośredniego, pośredniego lub całkowitego. Dokonuje się tego, sumując lub odejmując od siebie zawartość i -tego wiersza oraz i -tej kolumny macierzy wyrażającej określony kontekst odpowiadający rozpatrywanemu i -temu czynnikowi. Wskaźniki te odniesione do macierzy \mathbf{T} nazywają się odpowiednio *pozycją* s_i^+ oraz *relacją* s_i^- . *Pozycja* wyraża znaczenie danego czynnika w procesie wyznaczania struktury powiązań pomiędzy rozważanymi czynnikami. Jej wartość dla i -tego czynnika określa się z zależności:

$$s_i^+ = R_i + C_i \quad (16)$$

gdzie $R_i = \sum_{j=1}^n t_{ij}$ stanowi sumę elementów i -tego wiersza, natomiast $C_i = \sum_{j=1}^n t_{ji}$ sumę elementów i -tej kolumny macierzy \mathbf{T} . *Relacja* wskazuje na charakter wzajemnych odniesień (*przyczynowy lub skutkowy*) pomiędzy porównywanymi czynnikami. Jej wartość wynika z różnicy:

$$s_i^- = R_i - C_i \quad (17)$$

Dodatnia wartość s_i^- potwierdza *przyczynowy charakter* badanego czynnika w stosunku do tego, który jest z nim porównywany. Z drugiej strony wartość ujemna oznacza, że badany czynnik *nie jest przyczyną, ale raczej skutkiem* czynnika, do którego się odnosi. Wartości bliskie zeru sugerują przy tym prawie neutralną relację pomiędzy badanymi czynnikami.

Alternatywnie, w przypadku relacji pomiędzy parą czynników, i -tym i j -tym, można określić *wynikową miarę całkowitego wpływu netto*. Miarę tę definiuje zależność:

$$\Delta n_{ij} = \begin{cases} t_{ij} - t_{ji} & \text{gdy } t_{ij} > t_{ji}, \\ 0 & \text{gdy } t_{ij} \leq t_{ji} \end{cases} \quad (18)$$

Mapę całkowitego wpływu netto wyraża skierowany graf całkowitego wpływu netto $N(V_N, E_N)$. Jego łuki E_N wskazują kierunek relacji i wypadkową intensywność całkowitego wpływu netto.

Mapa całkowitego wpływu może być jednak zbyt złożona. Prezentację rezultatów analizy ułatwia wtedy zastosowanie *wartości progowej intensywności całkowitego wpływu* δ , redukującej zbędną informację. Wartość progowa jest tu szczególną postacią funkcji progowej f wykorzystywanej przy badaniu macierzy kognitywnych. Stosowanie takiego progu niejako odchudza mapę całkowitego wpływu, pozostawiając widoczną jedynie informację o wpły-

wach o intensywności nie niższej niż δ . W rezultacie otrzymuje się zredukowaną postać mapy całkowitego wpływu. Opisuje ją skierowany graf całkowitego wpływu \bar{T} , dla którego:

$$\bar{t}_{ij} = \begin{cases} t_{ij} & \text{gdy } t_{ij} \geq \delta, \\ 0 & \text{gdy } t_{ij} < \delta \end{cases} \quad (19)$$

Z przedstawionego powyżej opisu wynika, że stosowana zastępczo klasyczna procedura algorytmu DEMATEL jest w rozpatrywanym przypadku łatwiejsza do praktycznej implementacji niż opisana w rozdziale 1. niniejszego opracowania metoda obliczeń oparta na bezpośredniej analizie macierzy kognitywnych. Znaczące ułatwienie jest tu bowiem wynikiem zastąpienia podejścia rekurencyjnego zwykłymi formułami analitycznymi.

3. Przykładowa ocena wzajemnych relacji dla wybranych czynników determinujących bezpieczeństwo w pożarze

Użyteczność opisanego powyżej algorytmu oceny wzajemnych relacji pomiędzy badanymi czynnikami zostanie zaprezentowana na prostym przykładzie. Załóżmy, że zbiór rozpatrywanych czynników jest ograniczony i składa się jedynie z następujących podstawowych uogólnionych grup:

- czynniki wynikające z zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych i sposobu użytkowania budynku – (B),
- czynniki warunkujące efektywne wykrycie pożaru i skuteczne zaalarmowanie użytkowników budynku – (W),
- czynniki wpływające na skuteczność zwalczania pożaru – (A),
- czynniki determinujące możliwości ewakuacji – (E).

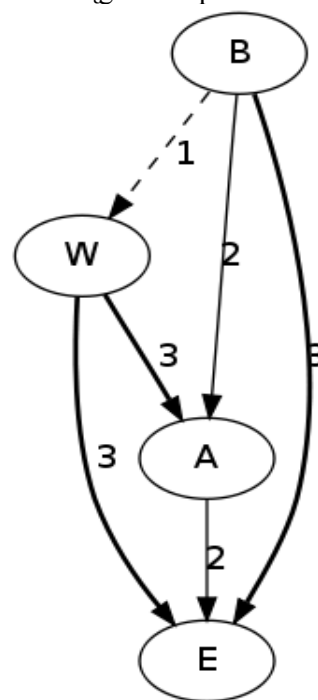
Do oceny intensywności bezpośredniego wpływu porównywanych czynników wykorzystano opinie pojedynczego eksperta. Wybrano przy tym czterostopniową skalę ocen 0-3.

Ekspert ocenił, że:

- czynniki z grupy (B) w jedynie niewielkim stopniu wpływają na czynniki z grupy (W), co oznacza ocenę na poziomie 1, w wyraźnie większym stopniu na czynniki z grupy (A) – zaproponowano ocenę 2, natomiast ich wpływ na czynniki z grupy (E) jest skrajnie wysoki – ocena 3.
- czynniki z grupy (W) wpływają w skrajnie dużym stopniu zarówno na czynniki z grupy (A) jak i czynniki z grupy (E) – obie oceny na poziomie 3.
- czynniki z grupy (A) w znaczący sposób wpływają na czynniki z grupy (E) – zaproponowano ocenę 2.

Na ryc. 1 zaprezentowano graf bezpośredniego wpływu otrzymany na podstawie powyższych ocen.

Do rozróżnienia intensywności relacji wykorzystano w nim łuki narysowane liniami o różnych krojach. Przerwana linia kreskowa odpowiada zatem intensywności relacji bezpośredniego wpływu na poziomie 1, cienka linia ciągła – na poziomie 2, natomiast pogrubiona linia ciągła – na poziomie 3.



Ryc. 1. Graf bezpośredniego wpływu dla porównywanych czynników

Fig. 1. The graph of direct influence specified for compared factors

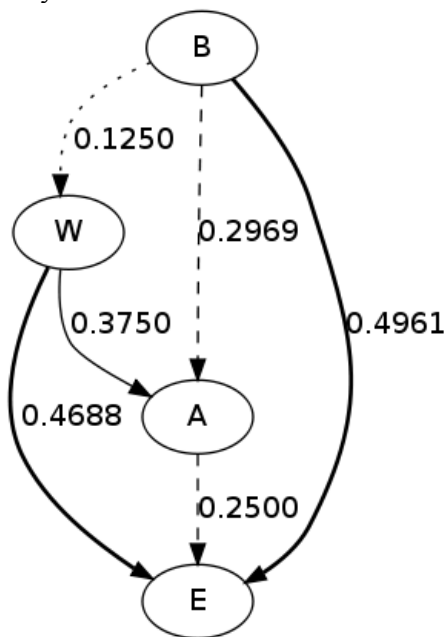
Takiej postaci grafu odpowiada następująca macierz bezpośredniego wpływu:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 3 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Zauważmy, że w powyższym grafie nie wyspecyfikowano żadnych sprzężeń toteż wszystkie relacje są jednokierunkowe. Znormalizowaną postać macierzy A otrzymano na podstawie maksymalnej wierszowej i kolumnowej sumy jej elementów. Wynosi ona 8 i jest osiągana w przypadku ostatniej z kolumn macierzy. Następnie, na podstawie zależności (15), wyznacza się macierz całkowitego wpływu T . Ponieważ przyjęta przez eksperta struktura bezpośredniego wpływu nie zawierała żadnych sprzężeń, macierz ta ma postać identyczną jak macierz całkowitego wpływu netto Δn . Ostatecznie:

$$\Delta n = T = \begin{bmatrix} 0 & 0,1250 & 0,2969 & 0,4961 \\ 0 & 0 & 0,3750 & 0,4688 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2500 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Macierzom tym odpowiada skierowany graf, stanowiący jednocześnie graf całkowitego wpływu oraz graf całkowitego wpływu netto. Przedstawiono go na ryc. 2.



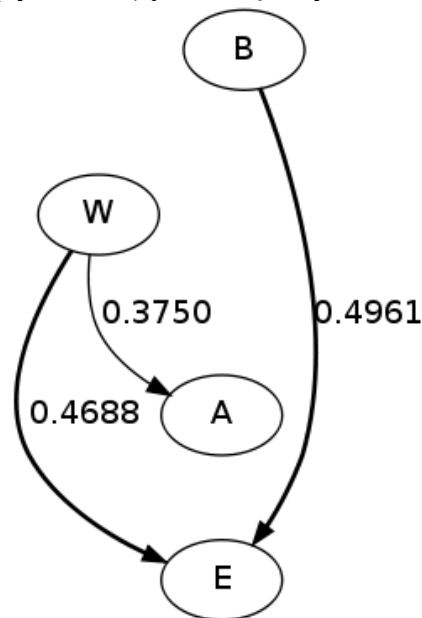
Ryc. 2. Mapa całkowitego wpływu, w rozpatrywanym przykładzie równoważna mapie całkowitego wpływu netto

Fig. 2. The total influence map, in considered example it is the equivalent of total net influence map

Mapa wpływu przedstawiona na ryc. 2 potwierdza, że o bezpieczeństwie użytkowników budynku na wypadek rozgorzenia w nim pożaru najbardziej decydują czynniki grupy (B). Wpływają one bowiem na wszystkie pozostałe czynniki, stanowiąc dla nich przyczynę (a nie skutek). Z drugiej strony jest jasne, że czynniki grupy (E) stanowią oczywisty efekt oddziaływania wszystkich pozostałych czynników. Czynniki grupy (W) stanowią bardziej przyczynę niż skutek, gdyż poza czynnikami z grupy (E) wpływają również na czynniki z grupy (A). Z kolei czynniki należące do grupy (A) stanowią bardziej skutek niż przyczynę, gdyż znajdują się pod wpływem dwóch ewidentnych przyczyn – czynników z grup (B) i (W), a wpływają jedynie, i to stosunkowo słabo, na czynniki z grupy (E). Zwróćmy uwagę, że graf – mapa z ryc. 2 pozwala na bardziej precyzyjną ocenę w stosunku do tej, którą można otrzymać na podstawie grafu zaprezentowanego na ryc. 1. Przykładem na to jest ilościowe wyróżnienie relacji $(B) \rightarrow (E)$ w porównaniu z ocenionymi wstępnie przez eksperta w podobny sposób relacjami $(W) \rightarrow (E)$ i $(W) \rightarrow (A)$. Analogiczny wniosek można wyciągnąć, porównując intensywność relacji $(B) \rightarrow (A)$ oraz $(A) \rightarrow (E)$.

Mapę całkowitego wpływu netto można zmodyfikować w celu wyciągnięcia bardziej czytelnych wniosków. W tym celu używa się progu intensywności całkowitego wpływu (ewentualnie całkowite-

go wpływu netto). Dzięki zastosowaniu takiego progu pozbywa się z grafu luków odpowiadających relacjom o najmniejszej, podprogowej intensywności. Załóżmy dla przykładu, że wartość progu całkowitego wpływu wynosi $\delta = 0.3$. W rezultacie, wychodząc z mapy przedstawionej na ryc. 2, otrzymuje się zredukowaną mapę całkowitego wpływu (całkowitego wpływu netto) pokazaną na ryc. 3.



Ryc. 3. Zredukowana mapa całkowitego wpływu (całkowitego wpływu netto) po zastosowaniu progu $\delta = 0.3$

Fig. 3. The reduced total (net) influence map after $\delta = 0.3$ threshold application

Mapa ta potwierdza wcześniejsze spostrzeżenie, że czynniki z grupy (W) rzeczywiście stanowią przyczynę znacząco wpływającą zarówno na czynniki z grupy (A), jak i z grupy (E). Z drugiej strony widać, że czynniki z grupy (A) stanowią znaczący efekt oddziaływania czynników z grupy (W), ale nie wpływają odpowiednio wyraźnie na czynniki z grupy (E).

Zaprezentowany powyżej przykład dyskutowany był przez autorów bardziej szczegółowo podczas obrad konferencji w Nikozji [6]. Autorzy pragną jednak zwrócić uwagę zainteresowanego czytelnika na przykład znacznie bardziej rozbudowany, uwzględniający wewnętrzne sprzężenia oraz rozmyty charakter dostępnej informacji. Został on wstępnie pokazany na konferencji IFIP WG 7.5 w ormiańskim Erywaniu [9], a następnie, po odpowiedniej obróbce, opublikowany w „Czasopiśmie Technicznym” [8]. Niezależnie, na konferencji sieci ASRA-Net w Londynie [7], analizowano przykład oparty na analogicznych założeniach i metodyce postępowania, niemniej jednak uwzględniający i kwantyfikujący relacje pomiędzy znacznie większą liczbą czynników, o odpowiednio bardziej złożonej strukturze powiązań.

4. Uwagi końcowe

Wydaje się, że analiza map kognitywnych (CMs), zwanych czasem mapami decyzyjnymi (DMs), i/lub ich rozmytych odpowiedników (FDMs) stanowi interesujące i uniwersalne narzędzie do badań nad budową oraz charakterem potencjalnych łańcuchów przyczynowo-skutkowych użytecznych przy odwzorowywaniu struktury relacji pomiędzy zidentyfikowanymi a priori różnego typu czynnikami determinującymi bezpieczeństwo pożarowe. Dzięki zastąpieniu złożonej i rekurencyjnej klasycznej procedury obliczeniowej znacznie prostszą procedurą alternatywną, opartą na analitycznym algorytmie metodyki DEMATEL, można wydatnie ułatwić proces samej oceny, czyniąc go dostępnym dla szerszego grona zainteresowanych badaczy i praktyków. Warto przy tym zauważyć, że zastosowanie powyższego algorytmu przynosi dodatkowe korzyści. Wiąże się one przede wszystkim z możliwością przeprowadzenia analizy wielowymiarowej oraz wykorzystania odpowiednio ważonych opinii grup ekspertów.

Rysunki zamieszczone w niniejszej pracy wygenerowano przy użyciu środowiska *Graphviz* stanowiącego wolne oprogramowanie FLOSS, dostępne w sieci Internet (<http://www.graphviz.org>).

Powyższą pracę przygotowano dzięki finansowemu wsparciu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, w ramach projektu badawczego N N506 243938.

Literatura

1. Axelrod R. *Structure of decision, cognitive maps of political elite*. Princeton University Press, London, 1976.
2. Chen W.H., Yu R., Tzeng G.H., *Comparison between DEMATEL method and fuzzy decision maps: a sensitive analysis approach*. Proceedings of the International Symposium on Management Engineering, Waseda University, Kitakyushu, Japan, 2008.
3. Dytczak M., *Wybrane metody rozwiązywania wielokryterialnych problemów decyzyjnych w budownictwie*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole, 2010.
4. Gabus A., Fontela E., *World problems an invitation to further thought within the framework of DEMATEL*. Battelle Geneva Research Centre, Geneva, Switzerland, 1972.
5. Ginda G., Maślak M., *Ekspercka hierarchia atrybutów w ocenie bezpieczeństwa pożarowego użytkowników budynków*, „Czasopismo Techniczne”, z. 13-B/2006, 59-77.
6. Ginda G., Maślak M., *Application of FDM-based approach for assessment of influence of fire safety factors*, Proceedings of the 1st International Conference on Safety and Crisis Man-

agement in the Construction, Tourism and SMEs Sectors (CoSaCM), Nicosia, Cyprus, June 24-28, 2011, BrownWalker Press, Boca Raton, Florida, USA, 2012, 570-579,

7. Ginda G., Maślak M., *Feedback-aware role identification for building fire safety factors*, Proceedings of 6th International ASRANet Conference *Integrating Structural Analysis, Risk & Reliability*, London – Croydon, Great Britain, July 2-4, 2012, paper 64,
8. Ginda G., Maślak M., *Ekspercka analiza relacji pomiędzy różnorodnymi ryzykami w kontekście wymagań zrównoważonego budownictwa*, „Czasopismo Techniczne”, z. 4-B/2012,
9. Ginda G., Maślak M., *Multi-dimensional risk interdependence analysis for buildings and building users*, w: Proceedings of the sixteenth working conference of the International Federation of Information Processing (IFIP), Working Group 7.5 on Reliability and Optimization of Structural Systems, Yerevan, Armenia, June 24-27, 2012, Der Kiureghian A., Hajian A. (Eds.), American University of Armenia Press, Yerevan, Armenia, 2012, 119-126,
10. Kosko B., *Fuzzy cognitive maps*, ‘International Journal of Man-Machine Studies’, vol. 24, 1986, 65-75,
11. Tzeng G.-H., Chen W.-H., Yu R., Shih M.-L., *Fuzzy decision maps: a generalization of the DEMATEL methods*, ‘Soft Computing’, vol. 14, 2010, 1141-1150.

dr inż. Grzegorz Ginda – jest inżynierem budownictwa i absolwentem Politechniki Opolskiej. W 1999 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta w Akademii Techniczno-Humanistycznej w Białymostku. Interesuje się zagadnieniami analizy eksperckiej, w tym w szczególności metodami oceny bezpieczeństwa pożarowego budynków i związanym z nimi wielokryterialnym wspomaganie decyzyjne.

dr hab. inż. Mariusz Maślak, prof. PK – jest profesorem w Katedrze Konstrukcji Metalowych na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej. W pracy naukowej zajmuje się doskonaleniem metod projektowania i oceny stanu technicznego różnego typu konstrukcji stalowych oraz analizą ich niezawodności. W szczególności interesuje go modelowanie odpowiedzi ustrojów nośnych konstrukcji budowlanych na ekspozycję ogniową, a także specyfikacja i kalibracja miar wykorzystywanych do oceny bezpieczeństwa w pożarze oraz badanie relacji między nimi. Jest członkiem IAFSS (*International Association for Fire Safety Science*).