

GRZEGORZ GINDA*, MARIUSZ MAŚLAK**

EKSPERCKA ANALIZA RELACJI POMIĘDZY RÓŻNOŹRÓDŁOWYMI RYZYKAMI W KONTEKŚCIE WYMAGAŃ ZRÓWNOWAŻONEGO BUDOWNICTWA

EXPERT ANALYSIS OF DIFFERENT-SOURCED RISKS INTERRELATIONS IN CONTEXT OF SUSTAINABLE BUILDING REQUIREMENTS

Streszczenie

W artykule przedstawiono i przedyskutowano wielokryterialną metodykę oceny i porządkowania relacji pomiędzy różnoźródłowymi czynnikami ryzyka w procesie budowlanym w aspekcie wymogów zrównoważonego budownictwa. Zaproponowany algorytm obliczeń opiera się na uogólnieniu techniki analizy eksperckiej postulowanej w klasycznym podejściu *DEMATEL*.

Słowa kluczowe: ryzyko, relacja, macierz wpływu, mapa wpływu, oceny eksperckie, DEMATEL

Abstract

Multicriterial evaluation methodology, adequate for identification and for arrangement of different-sourced risks interrelations being specified in the building process has been presented and discussed in detail in context of sustainable building requirements. The design algorithm, proposed by the authors, is based on the generalisation of the expert-decision-approach, recommended in classical *DEMATEL* procedure.

Keywords: risk, relation, influence matrix, influence map, expert opinions, DEMATEL

* Dr inż. Grzegorz Ginda, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Zarządzania, Katedra Zarządzania w Energetyce.

** Dr hab. inż. Mariusz Maślak, prof. PK, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

Oznaczenia

C_i	– suma elementów i -tej kolumny macierzy \mathbf{T}
\tilde{C}_i	– rozmyta suma elementów i -tej kolumny macierzy $\tilde{\mathbf{T}}$
DEMATEL	– DE cision MA king T rial and E valuation L aboratory
E_N, E_T, E_X	– krawędzie grafów
H	– liczba ankietowanych niezależnych ekspertów
i	– indeks ($i = 1, 2, \dots, n$)
j	– indeks ($j = 1, 2, \dots, n$)
$\mathbf{I} = \mathbf{I}_{n \times n}$	– kwadratowa macierz jednostkowa o rozmiarze $n \times n$
m	– indeks ($m = 1, 2, \dots, H$)
n	– liczba analizowanych czynników ryzyka
Δn_{ij}	– elementy macierzy całkowitego wpływu netto
N	– pomniejszona o 1 liczba stopni zastosowanej skali ocen (ze względu na poziom zerowy)
$N(V, E_N)$	– graf całkowitego wpływu netto
R_i	– suma elementów i -tego wiersza macierzy \mathbf{T}
\tilde{R}_i	– rozmyta suma elementów i -tego wiersza macierzy $\tilde{\mathbf{T}}$
s^+	– wskaźnik pozycji
s^-	– wskaźnik relacji
\tilde{s}_i^+	– rozmyty wskaźnik pozycji
\tilde{s}_i^-	– rozmyty wskaźnik relacji
\mathbf{T}	– macierz całkowitego wpływu
$T(V, E_T)$	– skierowany graf całkowitego wpływu
$\Delta \mathbf{T}$	– macierz pośredniego wpływu
TFN	– trójkątna liczba rozmyta (<i>triangular fuzzy number</i>)
V	– wierzchołek grafu
\mathbf{X}	– macierz bezpośredniego wpływu
\mathbf{X}_{sr}	– grupowa, uśredniona macierz bezpośredniego wpływu
$\tilde{\mathbf{X}}$	– rozmyta macierz bezpośredniego wpływu
$\mathbf{X}^{(s)}$	– macierz stochastycznego bezpośredniego wpływu
$\bar{\mathbf{X}}$	– znormalizowana macierz bezpośredniego wpływu
$\tilde{\bar{\mathbf{X}}}$	– znormalizowana rozmyta macierz bezpośredniego wpływu
$X(V, E_X)$	– graf bezpośredniego wpływu
$0_{n \times n}$	– kwadratowa macierz zerowa o rozmiarze $n \times n$
λ	– maksymalna wierszowa i kolumnowa suma składników macierzy \mathbf{X}
δ	– wartość progowa intensywności całkowitego wpływu

1. Wstęp

Zgodnie z paradygmatem zrównoważonego budownictwa oczekuje się, że zarówno już eksploatowany, jak i nowo wznoszony obiekt budowlany spełni w sposób zadowalający szereg różnego typu wymogów odniesionych do jego użytkowania i oddziaływania z otoczeniem. Postulaty tego rodzaju należy wiązać nie tylko z potencjalnym użytkownikiem samej budowli, ale również z jej zarządcami na różnym szczeblu administracyjnym, co wynika z oczywistej interakcji budynku z obiektami zlokalizowanymi w najbliższym sąsiedztwie, tak w sensie architektoniczno-urbanistycznym, jak i społeczno-kulturowym. Poszczególnym oczekiwaniom z reguły przypisuje się określone miejsce w globalnej strukturze i hierarchii powiązań pomiędzy wyróżnionymi czynnikami determinującymi bezpieczeństwo obiektu i jego użytkowników [1]. Złożoność relacji wyspecyfikowanych w takiej sieci prowadzi do wniosku, że również ryzyka niedostatecznego wypełnienia postawionych zadań nie mogą być rozpatrywane jako wzajemnie niezależne, wiążą je bowiem analogiczne współzależności i sprzężenia, co w efekcie sprawia, że niektóre z nich należy traktować jako podstawowe, pozostałe natomiast jako wtórne względem poprzednich, generujące relatywnie mniejsze zagrożenia. Wiarygodna analiza istotności kolejnych ryzyk możliwa jest zatem dopiero po umiejscowieniu ich na mapie obrazującej wpływ badanego ryzyka na ryzyka pozostałe, warunkowane postawieniem wymagań innego rodzaju.

Celem niniejszego artykułu jest zaprezentowanie algorytmu postępowania pomocnego w tego typu analizie. Strukturę i hierarchię współzależności pomiędzy poszczególnymi ryzykami buduje się w oparciu o opinie niezależnych ekspertów. Pojedynczym opiniom przypisuje się z reguły wagę zależną od kompetencji danego eksperta, niemniej jednak podstawą do ostatecznego wnioskowania jest opinia zagregowana, stanowiąca niejako wypadkową różnego rodzaju preferencji i uwarunkowań.

Założmy, że odpowiedni poziom bezpieczeństwa zapewni właściwe zaprojektowanie budynku (**D** – *design*), a także sposób jego wznoszenia (**C** – *construction*) oraz użytkowania i utrzymywania (**U** – *using and maintenance*). Uwzględnia się przy tym następujące aspekty bezpieczeństwa:

- ogólne bezpieczeństwo konstrukcji (**SS** – *general structural safety*),
- bezpieczeństwo pożarowe (**FS** – *fire safety*),
- bezpieczeństwo użytkowania (**OS** – *occupational safety*),
- bezpieczeństwo dla higieny i zdrowia (**HH** – *hygienic and health safety*).

Na czynniki te na ogół mamy bezpośredni wpływ. Będą to zatem czynniki kontrolowalne, które możemy monitorować, aby w razie potrzeby wносить do nich uzasadnione korekty. Istnieje jednak cała grupa czynników w zasadzie pozostających poza tego typu kontrolą. Potraktujemy je jako czynniki wyjątkowe. Niektóre z nich będą miały charakter wewnętrzny (**I** – *internal*). Zaliczyć do nich trzeba na przykład ryzyko wystąpienia wad materiałowych, niezależnych od samego projektu budowlanego i trudnych do wykrycia podczas montażu. Pozostałym, takim jak chociażby ewentualność wystąpienia klęski żywiołowej (powódź, huragan itp.) czy katastrofy komunikacyjnej, przypiszemy charakter zewnętrzny (**E** – *external*).

Oczekuje się, że w konsekwencji przeprowadzonej analizy w sposób możliwie jednoznaczny uwidoczniły zostanie charakter poszczególnych relacji pomiędzy wyspecyfiko-

wanymi czynnikami badanych ryzyk, nie tylko w odniesieniu do ich roli w kształtowaniu globalnego poziomu bezpieczeństwa, ale również w aspekcie wyznaczenia kierunków wzajemnych oddziaływań determinujących interakcje typu *przyczyna–skutek*.

2. Metodyka analizy

2.1. Podejście deterministyczne

Proponowane podejście wykorzystuje metodę *DEMATEL* (*DECision MAKing Trial and Evaluation Laboratory*) zaproponowaną przez *Gabusa* i *Fontelę* [2]. Bazuje ona na badaniu istotności bezpośredniej relacji przyczynowo – skutkowej pomiędzy dwoma 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 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 skrajnej 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** $X(V, E_x)$. Wierzchołki grafu V oznaczają tu oceniane czynniki, łuki E_x natomiast relacje między porównywanymi czynnikami. Powyższy graf reprezentuje **kwadratowa macierz bezpośredniego wpływu** \mathbf{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 ($i, j = 1, 2, \dots, n$).

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** $T(V, E_T)$. 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:

$$\mathbf{T} = \bar{\mathbf{X}} + \Delta\mathbf{T} \quad (1)$$

gdzie:

$\bar{\mathbf{X}}$ – znormalizowana macierz bezpośredniego wpływu,

$\Delta\mathbf{T}$ – macierz pośredniego wpływu.

Znormalizowaną postać macierzy bezpośredniego wpływu \mathbf{X} , zawierającą jedynie elementy z przedziału $[0, 1]$, otrzymuje się z zależności:

$$\bar{\mathbf{X}} = \frac{1}{\lambda} \cdot \mathbf{X} \quad (2)$$

gdzie:

λ – maksymalna wierszowa i kolumnowa suma składników macierzy \mathbf{X} :

$$\lambda = \max \left\{ \max_i \sum_{j=1}^n x_{ij}, \max_j \sum_{i=1}^n x_{ij} \right\} \quad (3)$$

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

$$\mathbf{X}_{sr} = \frac{1}{H} \sum_{m=1}^H \mathbf{X}^m \quad (4)$$

gdzie:

\mathbf{X}^m – macierz bezpośredniego wpływu pochodząca 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]:

$$\Delta \mathbf{T} = \bar{\mathbf{X}}^2 + \bar{\mathbf{X}}^3 + \dots = \sum_{i=2}^{\infty} \bar{\mathbf{X}}^i \quad (5)$$

Zauważmy, że:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \bar{\mathbf{X}}^k = \mathbf{0}_{n \times n} \quad (6)$$

gdzie:

$\mathbf{0}_{n \times n}$ – macierz zerowa o rozmiarze $n \times n$. Poza tym zachodzi:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (\mathbf{I} + \bar{\mathbf{X}} + \bar{\mathbf{X}}^2 + \dots + \bar{\mathbf{X}}^k) = (\mathbf{I} - \bar{\mathbf{X}})^{-1} \quad (7)$$

przy czym $\mathbf{I} = \mathbf{I}_{n \times n}$ oznacza kwadratową macierz jednostkową o tym samym rozmiarze. A zatem, po uwzględnieniu (1) i (5) otrzymuje się:

$$\mathbf{T} = \bar{\mathbf{X}} + \bar{\mathbf{X}}^2 + \dots + \bar{\mathbf{X}}^k = \bar{\mathbf{X}}(\mathbf{I} + \bar{\mathbf{X}} + \dots + \bar{\mathbf{X}}^{k-1}) = \bar{\mathbf{X}}(\mathbf{I} - \bar{\mathbf{X}})^{-1} \quad (8)$$

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^+ oraz **relacją** s^- . **Pozycja** wyraża **znaczenie danego czynnika** w procesie wyznaczania struktury powiązań pomiędzy rozważanymi czynnikami. Jej wartość dla i -tego czynnika określa się z zależności:

$$s_i^+ = R_i + C_i \quad (9)$$

gdzie:

$$R_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad \text{– suma elementów } i\text{-tego wiersza, macierzy } \mathbf{T},$$

$$C_i = \sum_{j=1}^n t_{ji} \quad \text{– sumę elementów } i\text{-tej kolumny macierzy } \mathbf{T}.$$

Relacja wskazuje na charakter wzajemnych odniesień (**przyczynowy lub skutkowy**) pomiędzy porównywanymi czynnikami. Jej wartość wynika z różnicy:

$$s_i^- = R_i - C_i \quad (10)$$

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 jest odnoszony. 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:

$$\Delta n_{ij} = \begin{cases} t_{ij} - t_{ji} & \text{gdy } t_{ij} > t_{ji}, \\ 0 & \text{gdy } t_{ij} \leq t_{ji} \end{cases} \quad (11)$$

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

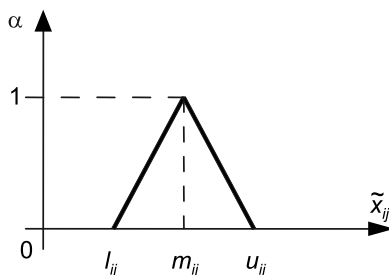
Mapa całkowitego wpływu może być jednak zbyt złożona. Prezentację rezultatów analizy ułatwia wtedy zastosowanie **wartości progowej intensywności całkowitego wpływu** δ , redukującej zbędną informację. Stosowanie takiego progu niejako odchudza mapę całkowitego wpływu, pozostawiając widoczną jedynie informację o wpływach o intensywności nie niższej niż δ . W rezultacie otrzymuje się zredukowaną postać mapy całkowitego wpływu. Opisuje ją skierowany graf całkowitego wpływu $\bar{\mathbf{T}}$, dla którego:

$$\bar{t}_{ij} = \begin{cases} t_{ij} & \text{gdy } t_{ij} \geq \delta, \\ 0 & \text{gdy } t_{ij} < \delta \end{cases} \quad (12)$$

2.2. Podejście uwzględniające niepewność ocen

Opinie ekspertów z reguły nie są formułowane w sposób bezdyskusyjny, a proponowane przez nich oceny relacji nie są przyjmowane przez nich samych jako pewniki. Każda ocena obarczona jest zwykle znaczną dozą niepewności będącej wypadkową różnego rodzaju wątpliwości jej autora. Poza tym trzeba przyjąć, że poszczególne grafy wpływów powstałe po obróbce danych pochodzących z ocen eksperckich nie są wolne od subiektywizmu wynikającego z preferencji ankietowanego. Z tego względu w dalszej analizie wykorzystane zostanie

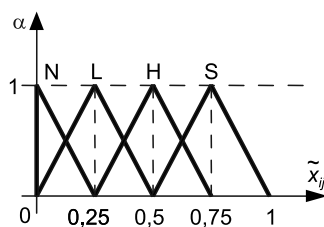
uogólnienie metody *DEMATEL*, zaproponowane przez Li i Wu [4], zgodnie z którym oceny relacji opisane w sposób deterministyczny przy pomocy liczb całkowitych zastąpione zostaną **ocenami rozmytymi**, wykorzystującymi typowe **zmienne lingwistyczne**. Zwykle używa się do tego zmiennych wyrażających poziomy rozmytej skali ocen, opisanej **trójkątnymi liczbami rozmytymi** (*TFNs – triangular fuzzy numbers*) – (rys. 1).



Rys. 1. Pojedyncza trójkątna liczba rozmyta stanowiąca podstawę opisu intensywności relacji pomiędzy porównywanymi czynnikami

Fig. 1. Singular triangular fuzzy number being the base applied for description of risks interrelation intensity between compared factors

Na rys. 2 przedstawiono interpretację najczęściej stosowanej czterostopniowej rozmytej skali ocen. Oznaczenie *N* wyraża tu brak wpływu (*none*), *L* – słaby (niski – *low*) wpływ, *H* – duży (wysoki – *high*) wpływ, *S* – skrajnie mocny wpływ (*strong*). Symbol α opisuje funkcję przynależności liczby *TFN*, zaś \tilde{x}_{ij} jest rozmytą oceną wpływu *i*-tego czynnika na *j*-ty czynnik.



Rys. 2. Typowa czterostopniowa rozmyta skala ocen

Fig. 2. Typical four-step fuzzy evaluation scale

Rozmytą macierz bezpośredniego wpływu $\tilde{\mathbf{X}}$ zwykle normalizuje się stosując maksymalną sumę wierszową górnych parametrów elementów macierzy \tilde{x}_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$):

$$\lambda = \max_i \sum_{j=1}^n \tilde{x}_{ij} \quad (13)$$

Po normalizacji ma ona zatem postać:

$$\bar{\bar{\mathbf{X}}} = \frac{1}{\lambda} \otimes \tilde{\mathbf{X}} \quad (14)$$

przy czym poszczególne elementy opisują trójwymiarowe wektory:

$$\bar{\bar{x}}_{ij} = \left(\frac{l_{ij}}{\lambda}, \frac{m_{ij}}{\lambda}, \frac{u_{ij}}{\lambda} \right) \quad (15)$$

W konsekwencji dla wyrażenia **bezpośredniego wpływu rozmytego** stosuje się trzy nierozmyte macierze $\bar{\mathbf{X}}_l$, $\bar{\mathbf{X}}_m$ oraz $\bar{\mathbf{X}}_u$, których elementami są odpowiednio dolne (*lower*), pośrednie (*medium*) i górne (*upper*) wartości parametrów wyspecyfikowanej wcześniej liczby rozmytej (rys. 1). Taki sposób kwantyfikacji ułatwia wyznaczenie **mapy całkowitego rozmytego wpływu**. W tym celu formułę (8) stosuje się oddzielnie do każdej z powyższych macierzy, co daje:

$$\mathbf{T}_l = \bar{\mathbf{X}}_l \cdot (\mathbf{I} - \bar{\mathbf{X}}_l)^{-1} \quad \mathbf{T}_m = \bar{\mathbf{X}}_m \cdot (\mathbf{I} - \bar{\mathbf{X}}_m)^{-1} \quad \mathbf{T}_u = \bar{\mathbf{X}}_u \cdot (\mathbf{I} - \bar{\mathbf{X}}_u)^{-1} \quad (16)$$

W wyniku zastosowania powyższych zależności otrzymuje się **macierz rozmytego wpływu $\tilde{\mathbf{T}}$** o elementach:

$$\tilde{t}_{ij} = (t_{lij}, t_{mij}, t_{uij}) \quad (17)$$

Na podstawie wartości (17) otrzymuje się miary wskaźników **pozycji i relacji**:

$$\tilde{s}_i^+ = \tilde{R}_i \oplus \tilde{C}_i, \quad \tilde{s}_i^- = \tilde{R}_i - \tilde{C}_i \quad (18)$$

gdzie:

\tilde{R}_i – rozmyta suma składników *i*-tego wiersza macierzy $\tilde{\mathbf{T}}$,

\tilde{C}_i – rozmyta suma składników *i*-tej kolumny macierzy $\tilde{\mathbf{T}}$,

to znaczy:

$$\tilde{R}_i = \tilde{t}_{i1} \oplus \tilde{t}_{i2} \oplus \dots \oplus \tilde{t}_{in}, \quad \tilde{C}_i = \tilde{t}_{1i} \oplus \tilde{t}_{2i} \oplus \dots \oplus \tilde{t}_{ni} \quad (19)$$

Czytelna graficzna prezentacja wyników wymaga wcześniejszego wyostżenia (defuzyfikacji) rozmytych rezultatów obliczeń. W tym celu wykorzystuje się klasyczną metodę środka ciężkości. Zakłada się, że rozmyte wartości wskaźników **pozycji i relacji** przyjmują postać:

$$\tilde{s}_i^+ = (l_i^+, m_i^+, u_i^+), \quad \tilde{s}_i^- = (l_i^-, m_i^-, u_i^-) \quad (20)$$

Wtedy ich nierozmyte odpowiedniki opisują następujące formuły:

$$s_i^+ = m_i^+ + \frac{u_i^{+2} + 2 \cdot m_i^+ \cdot (l_i^+ - u_i^+) - l_i^{+2}}{3 \cdot (u_i^+ - l_i^+)}, \quad s_i^- = m_i^- + \frac{u_i^{-2} + 2 \cdot m_i^- \cdot (l_i^- - u_i^-) - l_i^{-2}}{3 \cdot (u_i^- - l_i^-)} \quad (21)$$

Analogiczna zależność może być wykorzystana do wyostżenia całkowitego wpływu:

$$t_{ij} = t_{mij} + \frac{t_{uij}^2 + 2 \cdot t_{mij} \cdot (t_{lij} - t_{uij}) - t_{lij}^2}{3 \cdot (t_{uij} - t_{lij})} \quad (22)$$

W celu otrzymanego nierozmytego odpowiednika t_{ij} można już wtedy zastosować wartość progową δ według (12).

Alternatywnym podejściem jest w tym przypadku generowanie **macierzy stochastycznego bezpośredniego wpływu** $\mathbf{X}^{(s)}$ z wykorzystaniem metody Monte Carlo (Tamura i Akazawa [5]).

3. Przykładowa analiza

Poniżej przedstawiono przykładową analizę charakteru relacji pomiędzy czynnikami wyspecyfikowanymi na początku niniejszej pracy [6]. Badanymi czynnikami są tu różnoźródłowe ryzyka. Do oceny wykorzystano opinie $H = 4$ ekspertów. Każdy z ankietowanych odpowiedzialny jest za ocenę wpływu związaną z pojedynczym kontekstem, z którym jest dobrze zaznajomiony. Opinie wyrażone przez poszczególnych ekspertów $\tilde{\mathbf{X}}^{(SS)}$, $\tilde{\mathbf{X}}^{(FS)}$, $\tilde{\mathbf{X}}^{(OS)}$, $\tilde{\mathbf{X}}^{(HH)}$ są następnie łączone w celu uzyskania oceny grupowej. Czyni się to zgodnie z formułą:

$$\tilde{\mathbf{X}} = \frac{1}{4} \otimes (\tilde{\mathbf{X}}^{(SS)} \oplus \tilde{\mathbf{X}}^{(FS)} \oplus \tilde{\mathbf{X}}^{(OS)} \oplus \tilde{\mathbf{X}}^{(HH)}) \quad (23)$$

3.1. Poszczególne oceny eksperckie

Założmy, że ekspert odpowiedzialny za aspekt analizy związany z **ogólnym bezpieczeństwem konstrukcji (SS)** uznał, że:

- ryzyko wynikające z projektowania D w niskim stopniu (**L**) wpływa na ryzyko związane z wykonawstwem C, w wysokim stopniu (**H**) zaś na ryzyko związane z użytkowaniem U, poza tym wewnętrzne I i zewnętrzne E wyjątkowe rodzaje ryzyka nie podlegają wpływowi ryzyka związanego z projektowaniem D (**N**),
- ryzyko związane z wykonawstwem C wpływa znacząco (**H**) na ryzyko związane z projektowaniem D, natomiast najmocniej (**S**) na ryzyko związane z użytkowaniem U, poza tym wpływa na wysokim poziomie (**H**) na rodzaj ryzyka wewnętrznego I oraz na niskim poziomie (**L**) na rodzaj ryzyka zewnętrznego E,
- ryzyko związane z użytkowaniem U wpływa mocno (**H**) na ryzyko związane z projektowaniem D i wykonawstwem C oraz słabo (**L**) na wewnętrzne I i zewnętrzne E rodzaje ryzyka,
- wewnętrzne ryzyko E wpływa słabo (**L**) na ryzyko projektowe D i wykonawcze C oraz w ogóle nie wpływa (**N**) na ryzyko związane z użytkowaniem U ani na zewnętrzne ryzyko E,
- zewnętrzne ryzyko E słabo (**L**) wpływa na ryzyko projektowe D i związane z użytkowaniem U oraz mocno (**H**) na ryzyko wykonawcze C, nie wpływa natomiast na ryzyko wewnętrzne I (**N**).

Oceny te zestawiono w tabeli 1. Ich komplet tworzy macierz bezpośredniego wpływu $\tilde{\mathbf{X}}^{(SS)}$ (24). Z uwagi na to, że poszczególne czynniki nie mogą wpływać bezpośrednio na siebie na przekątną główną macierzy $\tilde{\mathbf{X}}^{(SS)}$ wprowadzono zerowe liczby rozmyte $\tilde{0}$. Zwróć-

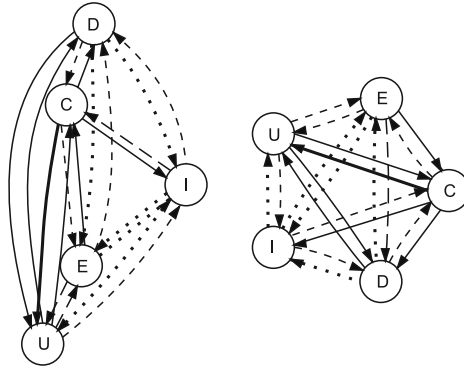
my uwagę, że intensywność relacji \tilde{x}_{ij} nie musi pokrywać się z intensywnością relacji pomiędzy tymi samymi czynnikami ale przebiegającej w przeciwnym kierunku, opisanej przez \tilde{x}_{ji} . Kolejność indeksów w opisie elementu macierzy determinuje zatem zwrot opisywanej relacji. Mapę bezpośredniego wpływu odpowiadającą macierzy (24) przedstawiono na dwa sposoby na rys. 3. Intensywność wpływu wyrażono przy tym rodzajami linii. Wartość N wyraża linia punktowa, L – linia kreskowa, H – cienka linia ciągła, zaś S – gruba linia ciągła.

Tabela 1

Zestaw ocen związanych z charakterem i intensywnością relacji pomiędzy rodzajami ryzyka, otrzymany dla aspektu ogólnego bezpieczeństwa konstrukcji.

Ryzyko	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>U</i>	<i>I</i>	<i>E</i>
<i>D</i>	–	L	H	N	N
<i>C</i>	H	–	S	H	L
<i>U</i>	H	H	–	L	L
<i>I</i>	L	L	N	–	N
<i>E</i>	L	H	L	N	–

$$\tilde{\mathbf{X}}^{(SS)} = \begin{bmatrix} \tilde{0} & L & H & N & N \\ H & \tilde{0} & S & H & L \\ H & H & \tilde{0} & L & L \\ L & L & N & \tilde{0} & N \\ L & H & L & N & \tilde{0} \end{bmatrix} \quad \text{gdzie } \tilde{0} = (0,0,0) \quad (24)$$

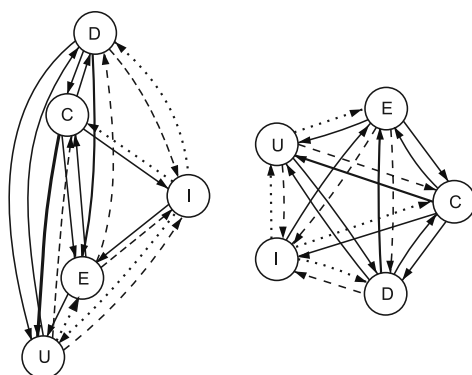


Rys. 3. Alternatywne sposoby prezentacji mapy bezpośredniego wpływu rodzajów ryzyka dla aspektu **ogólnego bezpieczeństwa konstrukcji (SS)**

Fig. 3. Alternative ways of direct influence map presentation for risks interrelations specified with respect to the context of **general structural safety (SS)**

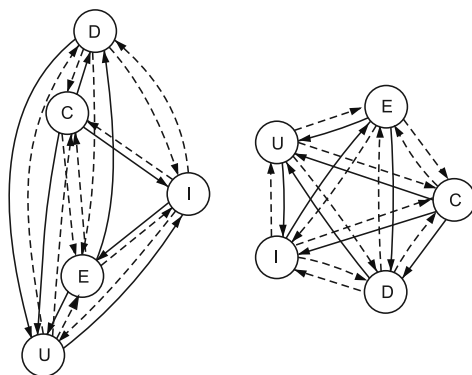
Analogicznie dla **aspektu bezpieczeństwa pożarowego (FS)** na podstawie oceny eksperta otrzymano macierz (25) oraz mapę przedstawioną na dwa sposoby na rys. 4:

$$\tilde{\mathbf{X}}^{(FS)} = \begin{bmatrix} \tilde{0} & H & H & L & S \\ H & \tilde{0} & S & H & H \\ H & L & \tilde{0} & L & N \\ L & L & L & \tilde{0} & H \\ L & H & H & L & \tilde{0} \end{bmatrix} \quad (25)$$



Rys. 4. Alternatywne sposoby prezentacji mapy bezpośredniego wpływu rodzajów ryzyka dla aspektu **bezpieczeństwa pożarowego (FS)**

Fig. 4. Alternative ways of direct influence map presentation for risks interrelations specified with respect to the context of **fire safety (FS)**



Rys. 5. Alternatywne sposoby prezentacji mapy bezpośredniego wpływu rodzajów ryzyka dla aspektu **bezpieczeństwa użytkowania budynku (OS)**

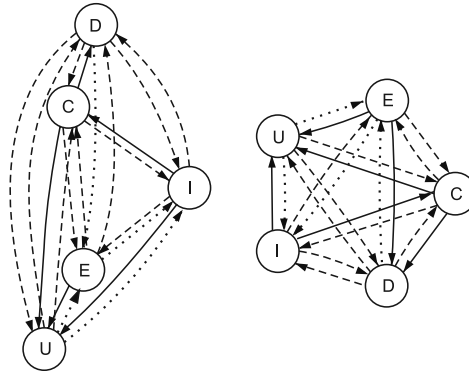
Fig. 5. Alternative ways of direct influence map presentation for risks interrelations specified with respect to the context of **occupational safety (OS)**

Wyniki pochodzące od eksperta reprezentującego aspekt **bezpieczeństwa użytkowania budynku (OS)** zestawiono w macierzy (26) i zilustrowano mapą przedstawioną na rys. 5:

$$\tilde{\mathbf{X}}^{(OS)} = \begin{bmatrix} \tilde{0} & L & H & L & L \\ H & \tilde{0} & H & H & L \\ L & L & \tilde{0} & H & L \\ L & L & L & \tilde{0} & H \\ H & L & H & L & \tilde{0} \end{bmatrix} \quad (26)$$

Komplet ocen eksperckich dopełnia macierz (27) i mapa z rys. 6 sumujące wyniki uzyskane od ankietowanego przypisanego do aspektu **bezpieczeństwo dla higieny i zdrowia (HH)**.

$$\tilde{\mathbf{X}}^{(HH)} = \begin{bmatrix} \tilde{0} & L & L & L & N \\ H & \tilde{0} & H & L & L \\ L & L & \tilde{0} & N & N \\ L & H & H & \tilde{0} & L \\ L & L & H & N & \tilde{0} \end{bmatrix} \quad (27)$$



Rys. 6. Alternatywne sposoby prezentacji mapy bezpośredniego wpływu rodzajów ryzyka dla aspektu **bezpieczeństwa dla higieny i zdrowia (HH)**

Fig. 6. Alternative ways of direct influence map presentation for risks interrelations specified with respect to the context of **hygienic and health safety (HH)**

3.2. Algorytm postępowania dla wybranego aspektu oceny bezpieczeństwa

W dalszej części prezentacji szczegółowy opis toku postępowania ograniczono do analizy pojedynczego aspektu bezpieczeństwa. Niech takim wybranym aspektem będzie **ogólne bezpieczeństwo konstrukcji (SS)**. Po zastosowaniu pięciostopniowej skali ocen, opisaną w punkcie 2.1 niniejszej pracy, macierz bezpośredniego wpływu (24) przybiera postać:

$$\tilde{\mathbf{X}}^{(SS)} = \begin{bmatrix} (0,0,0) & \left(0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}\right) & \left(\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}\right) & \left(0,0, \frac{1}{4}\right) & \left(0,0, \frac{1}{4}\right) \\ \left(\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}\right) & (0,0,0) & \left(\frac{1}{2}, \frac{3}{4}, 1\right) & \left(\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}\right) & \left(0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}\right) \\ \left(\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}\right) & \left(\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}\right) & (0,0,0) & \left(0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}\right) & \left(0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}\right) \\ \left(0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}\right) & \left(0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}\right) & \left(0,0, \frac{1}{4}\right) & (0,0,0) & \left(0,0, \frac{1}{4}\right) \\ \left(0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}\right) & \left(\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}\right) & \left(0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}\right) & \left(0,0, \frac{1}{4}\right) & (0,0,0) \end{bmatrix} \quad (28)$$

Maksymalna wartość sumy wierszowej dotyczącej górnego parametru trójkątnych rozmytych ocen analizowanych relacji odpowiada drugiemu wierszowi i wynosi $\lambda = 3$. Znormalizowana rozmyta macierz bezpośredniego wpływu przedstawia się więc następująco:

$$\bar{\tilde{\mathbf{X}}}^{(SS)} = \begin{bmatrix} (0,0,0) & \left(0, \frac{1}{12}, \frac{1}{6}\right) & \left(\frac{1}{12}, \frac{1}{6}, \frac{1}{4}\right) & \left(0,0, \frac{1}{12}\right) & \left(0,0, \frac{1}{12}\right) \\ \left(\frac{1}{12}, \frac{1}{6}, \frac{1}{4}\right) & (0,0,0) & \left(\frac{1}{6}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}\right) & \left(\frac{1}{12}, \frac{1}{6}, \frac{1}{4}\right) & \left(0, \frac{1}{12}, \frac{1}{6}\right) \\ \left(\frac{1}{12}, \frac{1}{6}, \frac{1}{4}\right) & \left(\frac{1}{12}, \frac{1}{6}, \frac{1}{4}\right) & (0,0,0) & \left(0, \frac{1}{12}, \frac{1}{6}\right) & \left(0, \frac{1}{12}, \frac{1}{6}\right) \\ \left(0, \frac{1}{12}, \frac{1}{6}\right) & \left(0, \frac{1}{12}, \frac{1}{6}\right) & \left(0,0, \frac{1}{12}\right) & (0,0,0) & \left(0,0, \frac{1}{12}\right) \\ \left(0, \frac{1}{12}, \frac{1}{6}\right) & \left(\frac{1}{12}, \frac{1}{6}, \frac{1}{4}\right) & \left(0, \frac{1}{12}, \frac{1}{6}\right) & \left(0,0, \frac{1}{12}\right) & (0,0,0) \end{bmatrix} \quad (29)$$

Po jej rozbiciu na trzy nierozmyte składniki i zastosowaniu formuł (16) otrzymuje się następujące postacie składników rozmytej macierzy całkowitego wpływu:

$$\mathbf{T}_l^{(SS)} = \begin{bmatrix} 0,0769 & 0,0071 & 0,0851 & 0,0005 & 0 \\ 0,0993 & 0,0147 & 0,1774 & 0,0845 & 0 \\ 0,0922 & 0,0851 & 0,0218 & 0,0071 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0082 & 0,0845 & 0,0147 & 0,0070 & 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\mathbf{T}_m^{(SS)} = \begin{bmatrix} 0,0631 & 0,1321 & 0,2126 & 0,0397 & 0,0287 \\ 0,2695 & 0,1160 & 0,3340 & 0,2138 & 0,1208 \\ 0,2442 & 0,2347 & 0,1087 & 0,1315 & 0,1119 \\ 0,1110 & 0,1040 & 0,0455 & 0,0211 & 0,0124 \\ 0,1538 & 0,2165 & 0,1657 & 0,0499 & 0,0318 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\mathbf{T}_u^{(SS)} = \begin{bmatrix} 0,4127 & 0,5415 & 0,6231 & 0,3856 & 0,3439 \\ 0,8218 & 0,6029 & 0,8845 & 0,6614 & 0,5381 \\ 0,7401 & 0,7232 & 0,5522 & 0,5417 & 0,4860 \\ 0,4845 & 0,4719 & 0,4322 & 0,2550 & 0,2956 \\ 0,6046 & 0,6508 & 0,6197 & 0,4245 & 0,2975 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Na ich podstawie, przy pomocy wzorów (18), określono rozmyte wartości wskaźników pozycji \tilde{s}_i^+ i relacji \tilde{s}_i^- . Otrzymane rezultaty zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Rozmyte wartości wskaźników \tilde{s}_i^+ i \tilde{s}_i^- dla aspektu ogólnego bezpieczeństwa konstrukcji (SS)

Ryzyko	\tilde{s}_i^+	\tilde{s}_i^-
D	(0,3081; 1,3182; 5,3710)	(-2,9634; -0,3654; 2,0995)
C	(0,5677; 1,8579; 6,4994)	(-2,6143; 0,2507; 3,3174)
U	(0,5056; 1,6978; 6,1555)	(-2,9057; -0,0355; 2,7442)
I	(0,0993; 0,7503; 4,2078)	(-2,2684; -0,1619; 1,8401)
E	(0,1146; 0,9238; 4,5587)	(-1,8468; 0,3121; 2,5973)

Nierozmyte wartości tych wskaźników otrzymano po zastosowaniu formuł (21). Zestawiono je w tabeli 3. Natomiast składniki macierzy całkowitego wpływu \mathbf{T} prezentuje formuła (37).

Tabela 3

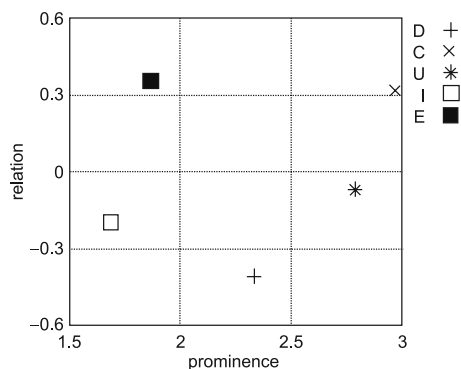
Nierozmyte wartości wskaźników \tilde{s}_i^+ oraz \tilde{s}_i^- dla aspektu ogólnego bezpieczeństwa konstrukcji (SS)

Ryzyko	\tilde{s}_i^+	\tilde{s}_i^-
D	2,3325	-0,0409
C	2,9750	+0,3179
U	2,7863	-0,0656
I	1,6858	-0,1967
E	1,8658	+0,3542

Elementy macierzy całkowitego wpływu \mathbf{T} , obliczone na podstawie zależności (22), zestawiono poniżej.

$$\mathbf{T}^{(SS)} = \begin{bmatrix} 0,1612 & 0,2269 & 0,3069 & 0,1419 & 0,1242 \\ 0,3969 & 0,2445 & 0,4653 & 0,3199 & 0,2196 \\ 0,3588 & 0,3477 & 0,2276 & 0,2267 & 0,1993 \\ 0,1985 & 0,1919 & 0,1592 & 0,0920 & 0,1027 \\ 0,2556 & 0,3173 & 0,2667 & 0,1604 & 0,1097 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Interpretacja wyników zebranych w tabeli 3 jest możliwa po wykonaniu wykresu pokazującego zależność wskaźników **relacji** (*relation*) od wskaźników **pozycji** (*prominence*) (rys. 7).



Rys. 7. Zależność wskaźników **relacji** od wskaźników **pozycji** dla aspektu **ogólnego bezpieczeństwa konstrukcji (SS)**

Fig. 7. Dependence between the indices: the relation versus the prominence, with respect to the context of **general structural safety (SS)**

Jak widać, dzięki przetransformowanym ocenom ekspertów, w przypadku aspektu **ogólnego bezpieczeństwa konstrukcji budynku (SS)**, ryzyko związane z wykonawstwem C oraz ryzyko zewnętrzne E **mogą być traktowane jako przyczynowe (stanowią raczej przyczynę)** dla pozostałych rodzajów ryzyka. Pozostałe ogólne rodzaje ryzyka stanowią w tym przypadku **wyraźne skutki wpływu powyższych dwóch rodzajów ryzyka**. Najbardziej **pod wpływem przyczyn** pozostaje ryzyko związane z projektowaniem D.

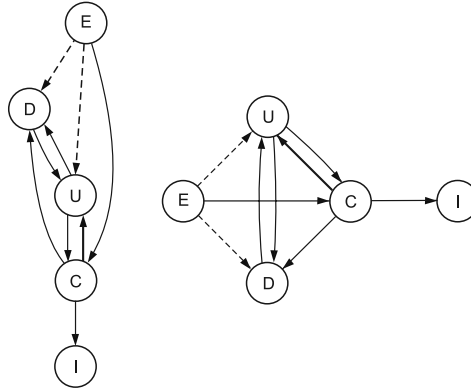
Postać macierzy $\mathbf{T}^{(SS)}$, wyspecyfikowanej zależnością (33), potwierdza występowanie sprzężeń pomiędzy poszczególnymi rodzajami ryzyka w kontekście całkowitego wpływu. Intensywność relacji całkowitego wpływu waha się przy tym znacząco – od 0,0920 do 0,4653. W celu zwiększenia czytelności struktury wpływów wykorzystano progową wartość δ , ograniczając prezentowaną informację jedynie do najsilniejszych relacji. Jako próg istotności zastosowano średnią arytmetyczną elementów macierzy $\mathbf{T}^{(SS)}$:

$$\delta = \frac{1}{n \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad (34)$$

Po wykonaniu obliczeń otrzymano wartość $\delta = 0,2329$. Na tej podstawie wyznaczono zredukowaną postać macierzy całkowitego wpływu $\bar{\mathbf{T}}^{(SS)}$:

$$\bar{\mathbf{T}}^{(SS)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0,3069 & 0 & 0 \\ 0,3969 & 0,2445 & 0,4653 & 0,3199 & 0 \\ 0,3588 & 0,3477 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,2556 & 0,3173 & 0,2667 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

Macierz ta odpowiada **mapie całkowitego wpływu** przedstawionej na rys. 8. Różne rodzaje linii odpowiadają przy tym następującym przedziałom intensywności całkowitego wpływu ogólnego ryzyka: linia kreskowa – do 0,3, cienka ciągła – do 0,4, zaś ciągła gruba – powyżej 0,4.



Rys. 8. Alternatywne sposoby prezentacji zredukowanej mapy całkowitego wpływu ogólnego ryzyka dla aspektu **ogólnego bezpieczeństwa konstrukcji (SS)**

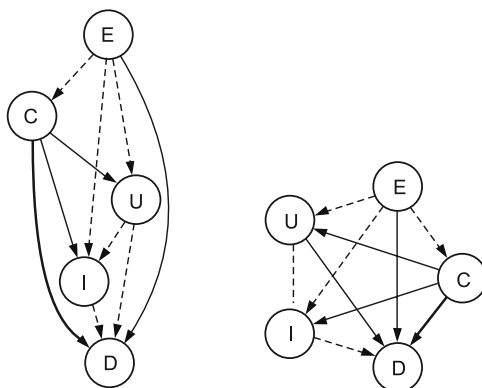
Fig. 8. Alternative ways of the reduced total influence map presentation for risks interrelations specified with respect to the context of **general structural safety (SS)**

Jest oczywiste, że w przypadku aspektu **ogólnego bezpieczeństwa konstrukcji (SS)** ryzyko zewnętrzne E wpływa na inne rodzaje ogólnego ryzyka z wyjątkiem ryzyka wewnętrznego I. Przy tym najbardziej pod jego wpływem pozostaje ryzyko związane z wykonawstwem C. Ryzyko związane z projektowaniem D wpływa na ryzyko związane z użytkowaniem U. Występuje również sprzężenie pomiędzy tymi dwoma rodzajami ryzyka. Ryzyko związane z użytkowaniem U jest sprzężone z ryzykiem wynikającym z wykonawstwa C. Ryzyko wynikające z wykonawstwa C wpływa również na ryzyko związane z projektowaniem D, a także na ryzyko wewnętrzne I. W największym jednak stopniu wpływa na ryzyko wynikające z użytkowania U.

Dzięki zastosowaniu zależności (11) otrzymano **macierz całkowitego wpływu netto**:

$$\Delta \mathbf{n}^{(SS)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,1700 & 0 & 0,1176 & 0,1279 & 0 \\ 0,0518 & 0 & 0 & 0,0674 & 0 \\ 0,0565 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,1313 & 0,0976 & 0,0674 & 0,0577 & 0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Mapę całkowitego wpływu netto odpowiadającą tej macierzy pokazano na rys. 9. Wykorzystane przy tym rodzaje linii odpowiadają intensywności całkowitego wpływu netto wynoszącej odpowiednio: do 0,10 – linia kreskowa, do 0,15 – cienka linia ciągła oraz powyżej 0,15 – gruba linia ciągła.



Rys. 9. Mapa całkowitego wpływu netto ogólnych rodzajów ryzyka dla aspektu **bezpieczeństwa konstrukcji (SS)**

Fig. 9. Total netto-influence map identified for risks interrelations specified with respect to the context of **general structural safety (SS)**

Struktura całkowitego wpływu netto potwierdza wnioski wysnute przy okazji omawiania grafu (mapy) z rys. 7. Wskazuje ona na przyczynową rolę zarówno ryzyka zewnętrznego E, jak i ryzyka wynikającego z wykonawstwa C. Ponadto wskazuje na mieszaną rolę ryzyka wynikającego z użytkowania U oraz wyraźnie skutkowy charakter pozostałych rodzajów ryzyka.

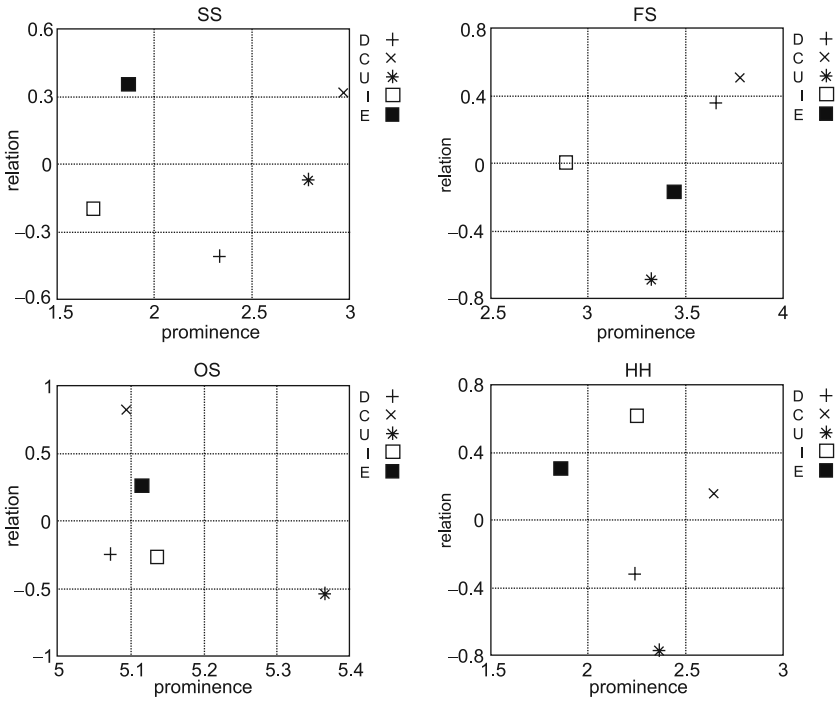
3.3. Wyniki uzyskane po analizie wszystkich aspektów bezpieczeństwa

Rezultaty odpowiadające innym aspektom bezpieczeństwa (odpowiednio **FS**, **OS** i **HH** – patrz rozdział 2.1) otrzymano w podobny sposób. Na Rys. 10 przedstawiono uzyskane wykresy **zależności relacja–pozycja**, a na rys. 11 **zredukowane mapy całkowitego wpływu**.

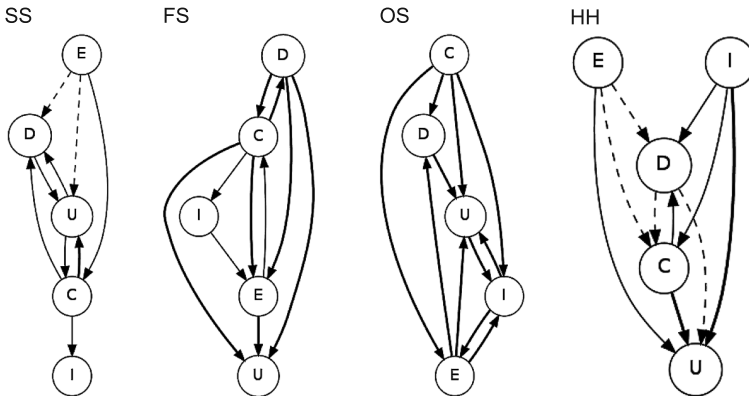
Przedstawione wykresy potwierdzają przyczynowy charakter ryzyka wynikającego z wykonawstwa C. Zewnętrzne ryzyko E także stanowi często przyczynę, z wyjątkiem wymiaru bezpieczeństwa pożarowego (**FS**). Jedynie ryzyko wynikające z użytkowania U stanowi niewątpliwie skutek. Pozostałe rodzaje ryzyka stanowią skutek w przeważającej liczbie przypadków.

Otrzymane mapy (struktury) całkowitego wpływu potwierdzają występowanie sprzężeń pomiędzy:

- ryzykiem wynikającym z użytkowania U a ryzykiem związanym projektowaniem D i wykonawstwem C w przypadku **ogólnego bezpieczeństwa konstrukcji (SS)**,
- ryzykiem związanym z wykonawstwem C a ryzykiem wynikającym z projektowania D i ryzykiem zewnętrznym E w przypadku **bezpieczeństwa pożarowego (FS)**,
- ryzykiem wewnętrznym I a ryzykiem wynikającym z użytkowania U i ryzykiem zewnętrznym E w przypadku **bezpieczeństwa użytkowania (OS)**,
- ryzykiem wynikającym z projektowania D a ryzykiem związanym z wykonawstwem C w przypadku aspektu **higieny i zdrowia użytkowników (HH)**.



Rys. 10. Wykresy zależności **relacja–pozycja** uzyskane dla poszczególnych aspektów bezpieczeństwa
 Fig. 10. Dependences between the indices: **the relation versus the prominence**, obtained for particular examined aspects of safety evaluation



Rys. 11. Zredukowane mapy całkowitego wpływu dla wszystkich analizowanych aspektów bezpieczeństwa
 Fig. 11. Reduced total infuse maps obtained for each examined aspect of safety evaluation

Najsilniejsze relacje całkowitego wpływu pojawiają się w przypadku aspektów **bezpieczeństwa pożarowego (FS)** oraz **użytkowania i utrzymania budynku (OS)**. Najsłabsze relacje towarzyszą aspektowi **ogólnego bezpieczeństwa konstrukcji (SS)**.

3.4. Szczegółowa analiza wyników

Do analizy szczegółowej wykorzystano agregację bezpośrednich wpływów rozmytych. Zagregowana macierz bezpośredniego wpływu ma postać:

$$\tilde{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} (0,0,0) & \left(\frac{1}{16}, \frac{5}{16}, \frac{9}{16}\right) & \left(\frac{3}{16}, \frac{7}{16}, \frac{11}{16}\right) & \left(0, \frac{3}{16}, \frac{7}{16}\right) & \left(\frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}\right) \\ \left(\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}\right) & (0,0,0) & \left(\frac{3}{8}, \frac{5}{8}, \frac{7}{8}\right) & \left(\frac{3}{16}, \frac{7}{16}, \frac{11}{16}\right) & \left(\frac{1}{16}, \frac{5}{16}, \frac{9}{16}\right) \\ \left(\frac{1}{8}, \frac{3}{8}, \frac{5}{8}\right) & \left(\frac{1}{16}, \frac{5}{16}, \frac{9}{16}\right) & (0,0,0) & \left(\frac{1}{16}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}\right) & \left(0, \frac{1}{8}, \frac{3}{8}\right) \\ \left(0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}\right) & \left(\frac{1}{16}, \frac{5}{16}, \frac{9}{16}\right) & \left(\frac{1}{16}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}\right) & (0,0,0) & \left(\frac{1}{8}, \frac{5}{16}, \frac{9}{16}\right) \\ \left(\frac{1}{16}, \frac{5}{16}, \frac{9}{16}\right) & \left(\frac{1}{8}, \frac{3}{8}, \frac{5}{8}\right) & \left(\frac{3}{16}, \frac{7}{16}, \frac{11}{16}\right) & \left(0, \frac{1}{8}, \frac{3}{8}\right) & (0,0,0) \end{bmatrix} \quad (37)$$

Maksymalna suma wierszowa górnych parametrów ocen rozmytych stanowiących elementy macierzy wynosi $\lambda = 2\frac{7}{8}$. Stąd znormalizowaną macierz bezpośredniego wpływu opisuje zależność:

$$\bar{\tilde{\mathbf{X}}} = \begin{bmatrix} (0,0,0) & \left(\frac{1}{46}, \frac{5}{46}, \frac{9}{46}\right) & \left(\frac{3}{46}, \frac{7}{46}, \frac{11}{46}\right) & \left(0, \frac{3}{46}, \frac{7}{46}\right) & \left(\frac{1}{23}, \frac{2}{23}, \frac{4}{23}\right) \\ \left(\frac{2}{23}, \frac{4}{23}, \frac{6}{23}\right) & (0,0,0) & \left(\frac{3}{23}, \frac{5}{23}, \frac{7}{23}\right) & \left(\frac{3}{46}, \frac{7}{46}, \frac{11}{46}\right) & \left(\frac{1}{46}, \frac{5}{46}, \frac{9}{46}\right) \\ \left(\frac{1}{23}, \frac{3}{23}, \frac{5}{23}\right) & \left(\frac{1}{46}, \frac{5}{46}, \frac{9}{46}\right) & (0,0,0) & \left(\frac{1}{46}, \frac{2}{23}, \frac{4}{23}\right) & \left(0, \frac{1}{23}, \frac{3}{23}\right) \\ \left(0, \frac{2}{23}, \frac{4}{23}\right) & \left(\frac{1}{46}, \frac{5}{46}, \frac{9}{46}\right) & \left(\frac{1}{46}, \frac{2}{23}, \frac{4}{23}\right) & (0,0,0) & \left(\frac{1}{23}, \frac{5}{46}, \frac{9}{46}\right) \\ \left(\frac{1}{46}, \frac{5}{46}, \frac{9}{46}\right) & \left(\frac{1}{23}, \frac{3}{23}, \frac{5}{23}\right) & \left(\frac{3}{46}, \frac{7}{46}, \frac{11}{46}\right) & \left(0, \frac{1}{23}, \frac{3}{23}\right) & (0,0,0) \end{bmatrix} \quad (38)$$

Po opisanych wcześniej przekształceniach otrzymuje się rozmytą macierz całkowitego wpływu $\tilde{\mathbf{T}}$ opisaną następującymi składowymi nierozmytymi:

$$\mathbf{T}_l = \begin{bmatrix} 0,0063 & 0,0254 & 0,0719 & 0,0032 & 0,0444 \\ 0,0944 & 0,0078 & 0,1410 & 0,0687 & 0,0290 \\ 0,0458 & 0,0235 & 0,0068 & 0,0234 & 0,0035 \\ 0,0043 & 0,0244 & 0,0281 & 0,0022 & 0,0442 \\ 0,0289 & 0,0459 & 0,0733 & 0,0045 & 0,0024 \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$\mathbf{T}_m = \begin{bmatrix} 0,0868 & 0,1750 & 0,2350 & 0,1239 & 0,1372 \\ 0,2766 & 0,1145 & 0,3319 & 0,2245 & 0,1840 \\ 0,1942 & 0,1675 & 0,0927 & 0,1374 & 0,0975 \\ 0,1622 & 0,1723 & 0,1779 & 0,0590 & 0,1556 \\ 0,1908 & 0,1973 & 0,2428 & 0,1097 & 0,0605 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$\mathbf{T}_u = \begin{bmatrix} 0,6718 & 0,8004 & 0,9340 & 0,7003 & 0,7062 \\ 1,0454 & 0,7949 & 1,1590 & 0,9021 & 0,8606 \\ 0,8196 & 0,7709 & 0,7064 & 0,6907 & 0,6511 \\ 0,8052 & 0,7876 & 0,8731 & 0,5556 & 0,7123 \\ 0,8554 & 0,8338 & 0,9566 & 0,7012 & 0,5739 \end{bmatrix} \quad (41)$$

Rozmyte i nierozmyte wartości wskaźników **pozycji i relacji** zawarto w tabeli 4.

Tabela 4

Rozmyte i nierozmyte wartości wskaźników pozycji i relacji dla kompletu analizowanych aspektów bezpieczeństwa

Ryzyko	\tilde{s}_i^+	\tilde{s}_i^-	s_i^+	s_i^-
D	(0,3312, 1,6688, 8,0105)	(-4,0462, -0,1526, 3,6330)	3,3368	-0,1885
C	(0,4682, 1,9587, 8,7500)	(-3,6467, 0,3047, 4,6351)	3,7256	0,4310
U	(0,4244, 1,7702, 8,2682)	(-4,5262, -0,3910, 3,3177)	3,4876	-0,5331
I	(0,2056, 1,3819, 7,2842)	(-3,4468, 0,0726, 3,6318)	2,9572	0,0858
E	(0,2790, 1,4364, 7,4254)	(-3,3490, 0,1663, 3,7974)	3,0469	0,2048

Nierozmyta macierz całkowitego wpływu przybiera zatem postać:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0,2549 & 0,3336 & 0,4137 & 0,2758 & 0,2959 \\ 0,4721 & 0,3057 & 0,5439 & 0,3984 & 0,3579 \\ 0,3532 & 0,3206 & 0,2686 & 0,2838 & 0,2507 \\ 0,3239 & 0,3281 & 0,3597 & 0,2056 & 0,3041 \\ 0,3584 & 0,3590 & 0,4243 & 0,2718 & 0,2123 \end{bmatrix} \quad (42)$$

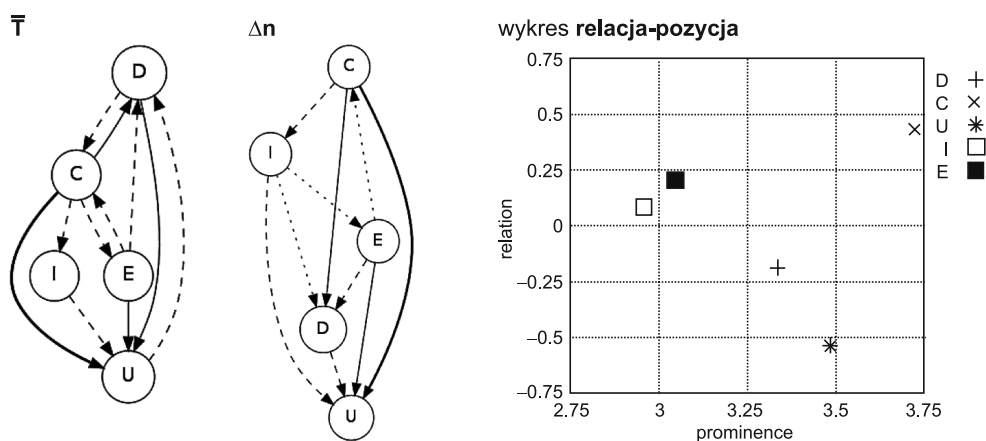
Średnia z wartości elementów macierzy wynosi $\delta = 0,3310$ (patrz formuła (34)). Stąd zredukowana macierz całkowitego wpływu ogólnych rodzajów ryzyka:

$$\bar{\mathbf{T}} = \begin{bmatrix} 0 & 0,3336 & 0,4137 & 0 & 0 \\ 0,4721 & 0 & 0,5439 & 0,3984 & 0,3579 \\ 0,3532 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3597 & 0 & 0 \\ 0,3584 & 0,3590 & 0,4243 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (43)$$

Macierz całkowitego wpływu netto wyraża formuła:

$$\Delta \mathbf{n} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0,0604 & 0 & 0 \\ 0,1385 & 0 & 0,2233 & 0,0703 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0480 & 0 & 0,0758 & 0 & 0,0322 \\ 0,0624 & 0,0011 & 0,1735 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (44)$$

Mapy całkowitego wpływu i odpowiadające im wykresy zależności pomiędzy wskaźnikami **relacji** i **pozycji** przedstawiono na rys. 12. Kreskowa linia na mapie całkowitego wpływu $\bar{\mathbf{T}}$ ilustruje całkowite wpływy o intensywności do 0,4, cienka ciągła linia – do 0,5, zaś gruba ciągła – powyżej 0,5.



Rys. 12. Łączna mapa (struktura) całkowitego wpływu dla wszystkich analizowanych aspektów bezpieczeństwa

Fig. 12. Joint total influence map obtained for all examined aspects of safety evaluation

Uzyskane rezultaty jeszcze raz potwierdzają fakt, że ryzyko związane z wykonawstwem C stanowi podstawową przyczynę występowania innych ryzyk. Wpływa ono bowiem na wszystkie rodzaje ryzyk, z wyjątkiem zewnętrznego ryzyka E. Przy tym najsilniejszemu wpływowi podlega ryzyko wynikające z użytkowania budynku U. Ryzyko wynikające z oddziaływania otoczenia E stanowi kolejną przyczynę. Wpływa ono na ryzyko wynikające z projektowania D, użytkowania U, a nawet wykonawstwa budynku C. Ryzyko wynika-

jące z czynników wewnętrznych I stanowi w nieco większym stopniu przyczynę niż skutek. W największym stopniu wpływa ono na ryzyko wynikające z użytkowania budynku U. Wynikowa mapa wpływu netto wskazuje na wpływ ryzyka wynikającego z wewnętrznych czynników I na ryzyko pochodzące z otoczenia E oraz ryzyko wynikające z projektowania D.

Pozostałe rodzaje ryzyka są skutkami. Ryzyko użytkowania U stanowi najbardziej wyraźny skutek. Wpływa ono jedynie w niewielkim stopniu na ryzyko związane z projektowaniem D i znajduje się pod wpływem ryzyk innych rodzajów. Ryzyko wynikające z projektowania D wpływa jedynie na ryzyko związane z wykonawstwem budynku C i znajduje się pod wpływem innych rodzajów ryzyka z wyjątkiem ryzyka wynikającego z czynników wewnętrznych I.

Rezultaty obliczeń ujawniły występowanie znaczącego sprzężenia całkowitego wpływu pomiędzy:

- ryzykiem wynikającym z wykonawstwa C i ryzykiem związanym z otoczeniem E,
- ryzykiem związanym z wykonawstwem C a ryzykiem wynikającym z projektowania budynku D,
- ryzykiem wynikającym z projektowania D a ryzykiem związanym z użytkowaniem budynku U.

Mapa całkowitego wpływu netto potwierdza również występowanie pośredniego sprzężenia pomiędzy ryzykiem wynikającym z wykonawstwa C a ryzykiem związanym z czynnikami wewnętrznymi I, jak również innego - pomiędzy ryzykiem wynikającym z czynników wewnętrznych I oraz ryzykiem wynikającym z oddziaływania otoczenia E.

4. Wnioski

Zastosowane w niniejszej pracy podejście analityczne, oparte na algorytmie obliczeniowym wynikającym z klasycznej metodyki *DEMATEL*, pozwoliło na wiarygodną identyfikację oraz ocenę istotności i kierunku wzajemnych relacji pomiędzy różnoźródłowymi ryzykami determinującymi globalny poziom bezpieczeństwa budynku i jego użytkowników z punktu widzenia wymogów zrównoważonego budownictwa. Użyteczność wykorzystanego narzędzia badawczego, bazującego na odpowiedniej syntezie i transformacji uzyskanych ocen eksperckich, jest szczególnie istotna w obszarze analiz wielokryterialnych, w ramach których niezbędne jest kojarzenie i porównywanie czynników o różnym charakterze i pochodzeniu, tak aby wypracować ujednoliconą ocenę lokującą rozpatrywany rodzaj ryzyka w globalnej hierarchii i strukturze powiązań. Ekspert oceniający realny poziom bezpieczeństwa obiektu i/lub jego użytkownika uzyskuje w efekcie odpowiednie mapy relacji wyrażone w dwojaki sposób:

- poprzez wynikowy **graf skierowany**, w którym wagę każdej relacji odzwierciedla opis skojarzonej z nią krawędzi (zilustrowany rodzajem linii wykorzystanej do wizualizacji grafu), natomiast kierunek wzajemnego oddziaływania (przyczynowy lub skutkowy) obrazuje zwrot tej krawędzi,
- poprzez wykres **relacja–pozycja**, na którym położenie rozpatrywanego czynnika, w kontekście położenia innych badanych czynników, określa jego rolę w generowaniu ryzyka wypadkowego warunkującego efektywny stopień zagrożenia.

Dostępność tego typu informacji umożliwia koordynację różnego rodzaju działań ukierunkowanych na zapewnienie optymalnego poziomu bezpieczeństwa przy minimalizowaniu nieuchronnych kosztów oraz czasu realizacji. Ułatwia ona także wypracowanie kompromisu pomiędzy rozwiązaniami projektowymi, wykonawczymi i użytkowymi, postulowanymi do zastosowania w budynku.

Jeśli przyjąć, że wejściowe oceny eksperckie wykorzystane w niniejszej pracy są wiarygodne, to rezultaty uzyskane na wyjściu potwierdzają przyczynowy wpływ ryzyka wynikającego z wykonawstwa C na inne rodzaje ryzyka. Ponieważ ryzyko to ma charakter kontrolowalny, jego wpływ można i należy ograniczać. Służy temu przede wszystkim właściwe przygotowanie i monitoring procesu wznoszenia budynku. Z drugiej jednak strony niekontrolowalny charakter innych rodzajów ryzyka – przykładowo wynikającego z czynników wewnętrznych I lub zewnętrznych środowiskowych E – sprawia, że wpływ tych ryzyk w naturze trudno jest ograniczyć.

Ujawnione sprzężenie pomiędzy ryzykiem wynikającym z wykonawstwa C a ryzykiem związanym z projektowaniem D wskazuje na możliwość podwyższenia realnego poziomu bezpieczeństwa dzięki odpowiedniej koordynacji procesów projektowania i realizacji budynku pod kątem wykorzystania synergii ich pozytywnych efektów. Natomiast sprzężenie wpływu ryzyka związanego z wykonawstwem C z ryzykiem wynikającym z czynników wewnętrznych I sugeruje możliwość podwyższenia stopnia bezpieczeństwa poprzez bardzo staranny dobór wykonawców, środków technicznych, komponentów budowlanych, dostawców itp.

Charakter metody **DEMATEL** sprawia, że warto rozważyć jej zastosowanie do rozwiązywania innych zadań związanych z wiarygodną oceną bezpieczeństwa. Taką możliwość potwierdzają na przykład prace [7, 8]. W ocenie autorów w pełni uzasadnione wydaje się zatem stwierdzenie, że dzięki niej w łatwy sposób można uzyskać informacje ułatwiające podejmowanie w procesie budowlanym właściwych decyzji realizacyjnych. Niewątpliwie informacje takie byłyby trudno dostępne przy wykorzystaniu jedynie tradycyjnych podejść analitycznych.

Praca została wykonana w ramach projektu N **N506 243938** finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- [1] Ginda G., Maślak M., *Ekspertcka hierarchia atrybutów w ocenie bezpieczeństwa pożarowego użytkowników budynków*, Czasopismo Techniczne, 13-B/2006, 59-77.
- [2] Gabus A., Fontela E., *World Problems, An invitation to Further Thought Within the Framework of DEMATEL*, Batelle Institute, Geneva Research Centre, Geneva, Switzerland 1972.
- [3] Dytczak M., *Wybrane metody rozwiązywania wielokryterialnych problemów decyzyjnych w budownictwie*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2010.
- [4] Lin C., Wu W., *A Fuzzy Extension of the DEMATEL Method for Group Decision-Making*, European Journal of Operational Research, vol. 156, 2004, 445-455.
- [5] Tamura H., Akazawa K., *Stochastic DEMATEL for structural modeling of a complex problematique for realizing safe, secure and reliable society*, Journal of Telecommunications and Information Technology, vol. 4, 2005, 139-146.

- [6] Ginda G., Maślak M., *Multi-dimensional risk interdependence analysis for buildings and building users*, w: Der Kiureghian A. (Ed.), Proceedings of the 16th IFIP WG 7.5 Working Conference “Reliability and Optimisation of Structural Systems”, Yerevan, Armenia, June 24–27, 2012,
- [7] Ginda G., Maślak M., *Application of FDM-based Approach for Assessment of Influence of Fire Safety Factors*, w: Boustras G., Boukas N. (Eds), Proceedings of the 1st International Conference on Safety and Crisis Management in the Construction, Tourism and SME Sectors (CoSaCM), Nicosia, Cyprus, June 24–28, 2011, BrownWalker Press, Boca Raton, Florida, USA 2012, 570-579,
- [8] Ginda G., Maślak M., *Feedback-Aware Role Identification for Building Fire Safety Factors*, Proceedings of the 6th International ASRANet Conference “Integrating Structural Analysis, Risk & Reliability”, London–Croydon, Great Britain, July 2–4, 2012, paper 64.