

Waldemar W. KOCZKODAJ *
Wojciech RADOMSKI **
Wojciech TROCHYMIAK **

ZASTOSOWANIE METODY PORÓWNANIA PARAMI DO OSZACOWANIA KRYTERIÓW PRZETARGOWYCH W MOSTOWNICTWIE

W artykule przedstawiono, w skróconej formie, teoretyczne podstawy metody porównania parami z elementami analizy zgodności ocen. Na podstawie przykładu (ocena projektów konkursowych mostu przez Wisłę w Płocku) pokazano jej możliwe praktyczne zastosowanie do określenia końcowych wag kryteriów występujących w przetargach mostowych. Zaprezentowano również wybrane aspekty opracowanego oprogramowania komputerowego.

1. WSTĘP

Rozwój mostownictwa to nie tylko wprowadzenie nowych rozwiązań materiałowych i konstrukcyjnych, ale także aspekty ekonomiczne, w tym nowe metody formułowania i ocen ofert przetargowych. Ma to szczególne znaczenie w Polsce wobec zmiany systemu gospodarczego na rynkowy.

Inne i nowe traktowanie przetargów, obiektywizacja kryteriów oceny ofert na budowę lub remont obiektów mostowych, będzie mieć w najbliższych latach decydujące znaczenie ekonomiczne, zwłaszcza wobec programu budowy sieci autostrad i dróg ekspresowych, wymagającego wznieśnięcia wielu konstrukcji mostowych oraz ogromnej skali potrzeb remontowych i modernizacyjnych w polskim mostownictwie.

W referacie przedstawiono próbę oceny kryteriów przetargowych - ich wzajemnych relacji - występujących w mostownictwie na przykładzie kryteriów przetargowych oceniających konkursowe projekty mostu przez Wisłę w Płocku [7].

Jednym z najistotniejszych wymagań trybu przetargowego jest konieczność ujawnienia w dokumentach przetargowych dokładnych danych na temat kryteriów i preferencji używanych do wyboru optymalnej oferty [2]. W związku z tym, zespół

* Knowledge-based Systems Laboratory, Computer Science, Laurentian University, USA

** Instytut Dróg i Mostów Politechniki Warszawskiej

formułujący kryteria przetargowe powinien używać najbardziej obiektywnych i najłatwiej mierzalnych kryteriów. Często jednak zachodzi konieczność ustalenia kryteriów trudnych do zmierzenia. Z tego powodu jest zalecane stosowanie wag.

W przetargach, w których występuje kilka kryteriów, jak również w przypadku gdy występuje bardzo rozbudowany model kryteriów (np. budowa mostów), powstaje problem oceny kryteriów. W obu przypadkach zespół formułujący kryteria przetargowe musi rozwiązać problem *które kryterium jest ważniejsze* lub *na ile jest ważniejsze*. Czyli musi określić ich wzajemne relacje.

Autorzy proponują metodę porównania parami do określenia końcowych wag kryteriów, które występują w przetargach mostowych, na podstawie względnych relacji między kryteriami. W artykule przedstawiono, w skróconej formie, teoretyczne podstawy prezentowanej metody, a na podstawie przykładu (rozdział 3) pokazano jej możliwe praktyczne zastosowanie. Zaprezentowano również odpowiednie oprogramowanie komputerowe umożliwiające poprowadzenie własnych ocen.

2. PODSTAWOWE POJĘCIA METODY PORÓWNYWANIA PARAMI

Metodologia porównania parami (po raz pierwszy udokumentowana przez Thurstone'a w 1927 r. [9]) może być z powodzeniem zastosowana jako miarodajna podstawa teoretyczna do oceny kryteriów przetargowych w budownictwie, w tym i budowie mostów.

Praktyczną i teoretyczną zaletą metodologii porównania parami jest jej prostota. Celem porównywania parami jest ustalenie względnej preferencji jednego z dwóch kryteriów w sytuacjach, w których jest niepraktyczne (lub czasami nawet bezsensowne) dochodzenie do absolutnych ocen kryteriów. W tym celu ekspert (lub zespół ekspertów) ocenia współczynniki względnych porównań $a_{ij} > 0$, które mają służyć jako aproksymacje ilorazów s_i/s_j nieznanymi (lub nawet nieokreślonych) bezwzględnych wartości kryteriów $s_i, s_j > 0$. Ilorazy s_i, s_j są również nazywane niekiedy *względnyimi wagami*. Współczynniki a_{ij} powinny spełniać pewne naturalne ograniczenia (np. $a_{ij} = 1, a_{ji} \cdot a_{ij} = 1$).

Określimy kwadratową macierz $A (a_{ij})$ o wymiarach n na n jako macierz porównywania parami taką, że $a_{ij} > 0$ dla każdego $i, j = 1, \dots, n$, gdzie a_{ij} jest określoną przez eksperta względną preferencją kryterium s_i w stosunku do s_j .

Macierz porównań parami A ma elementy wzajemnie odwrotne (tzn. x oraz $1/x$) względem głównej przekątnej. Wszystkie elementy macierzy muszą spełniać $a_{ij} = 1/a_{ji}$ dla każdego $i, j = 1, \dots, n$ (wtedy oczywiście $a_{ii} = 1$ jako odwrotność samego siebie). Macierz porównywania parami A nazywa się *zgodną*, jeśli $a_{ik} = a_{ij} \cdot a_{jk}$ dla każdego $i, j, k = 1, \dots, n$ (równanie 1):

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

O ile każda macierz zgodna jest macierzą odwrotną, to przypadek odwrotny na ogół nie zachodzi. Macierze zgodne odzwierciedlają idealną sytuację, w której wszystkie oceny są zgodne (choć niekoniecznie dokładnie). Ilorazy $a_{ij} = s_i/s_j$ tworzą macierz porównania parami.

Problem pojawiający się w metodzie porównywania parami jest spowodowany na ogół brakiem zgodności macierzy porównania parami, które spotykamy w praktyce. Dla zadanej nie w pełni zgodnej macierzy A należy znaleźć zgodną macierz B (o tym samym wymiarze) tak aby różnica między A i B była jak najmniejsza (minimalna ze względu na użytą metrykę odległości między macierzami; jest nią w większości przypadków metryka euklidesowa lub Czebyszewa). Jednym z możliwych rozwiązań tego problemu jest propozycja Saaty'ego [7]. Niech $s = (s_1, \dots, s_n)$ będzie wektorem własnym macierzy A odpowiadającym σ , największej wartości własnej macierzy A . Co więcej, wektor s można wybrać tak, że będzie miał wszystkie składowe dodatnie.

Tablica 1. Skala porównań

Kod	Definicja intensywności lub ważności	Zastosowanie
1	Ważność jednakowa lub nieznana	Dwa kryteria wpływają jednakowo na funkcję celu lub brak wiedzy umożliwiający ich porównanie
2	Zauważalna przewaga jednego czynnika nad drugim	Doświadczenie i oceny nieco faworyzują jedno kryterium nad drugie
3	Zasadnicza albo duża przewaga jednego czynnika nad drugim	Doświadczenie i oceny faworyzują jedno kryterium nad drugie
4	Wykazana zdecydowana ważność	Kryterium jest mocno faworyzowane, a jego dominacja wykazana w praktyce
5	Absolutna ważność	Najwyższy stopień preferowania jednego kryterium nad drugie
Np. 2.4	Oceny pośrednie	Gdy wymagany jest kompromis

W metodzie porównania parami każde kryterium ocenia się oddzielnie w tej samej skali od 0 do 5 (zgodnie z ogólnie przyjętą intuicją 0 oznacza ocenę najgorszą a 5 najlepszą) natomiast odniesienie każdego kryterium do całości oceny oblicza się jako wagę przez porównanie ich parami w skali od 1 do 5 zestawioną w tablicy 1.

W wielu pracach, jak np. w [1], [4], [5] czy [6], przedstawiono przegląd piśmiennictwa i przytoczono kilka praktycznych zastosowań metody. Dla podkreślenia znaczenia metody należy przytoczyć również pracę [3], na podstawie której można stwierdzić, iż analiza zgodności jest bardzo skuteczną techniką zbierania informacji w systemach eksperckich.

3. ZASTOSOWANIE METODY PORÓWNIANIA PARAMI DO OSZACOWANIA KRYTERIÓW W PRZETARGACH MOSTOWYCH

Przykład zamieszczony w tym rozdziale mierza do ukazania sposobu budowania modelu jak i zalet samej metody.

W przypadku projektowania i budowy nowych mostów, ogłaszania przetargów na projektowanie i budowę mostów, ekspertyzy czy remontu występuje również problem ustalenia listy kryteriów i ich wzajemnych relacji.

Tablica 2. Główne kryteria oceny projektów mostu w Płocku

Nazwa kryteriów	wagi-p
Konstrukcja ustroju nośnego (<i>konstr.</i>)	3
Technologia budowy (<i>technol.</i>)	2
Architektura i estetyka (<i>a-i-est.</i>)	1
Utrzymanie i ochrona środowiska (<i>u-i-srod</i>)	1
Koszty budowy (<i>koszt</i>)	2
Sumarycznie	9

Autorzy artykułu jako punkt wyjścia do swoich rozważań przyjęli kryteria oceny projektów na budowę mostu przez Wisłę w Płocku [7]. Zaproponowano tam około 30 kryteriów pogrupowanych na 5 głównych grup zestawionych w tablicy 2. Każdej grupie kryteriów przydzielono wagi punktowe zestawione w kolumnie „wagi-p”.

Z uwagi na ograniczoną objętość referatu do dalszych rozważań przyjęto tylko jedną grupę kryteriów zatytułowanych *konstrukcja ustroju nośnego*. W tablicy 3 zamieszczono pełny zestaw kryteriów wchodzący w skład wspomnianej grupy.

Chcąc zademonstrować działanie metody porównania parami postanowiono dokonać pewnego porównania kryteriów z tablicy 3 i określić ich wzajemne relacje. Prezentowane w referacie oceny uwzględniają analizę zgodności ocen, która zwiększa ich precyzję. Analizę zgodności ocen i dochodzenie do dokładniejszych relacji przedstawiono między innymi w [3], [4] czy [6]. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że prezentowane oceny są jedynie opinią autorów, dokonane w celu zilustrowania metody i jako takie nie pretendują do bezpośredniego zastosowania (użycie końcowych wag może mieć praktyczny sens jedynie po wprowadzeniu porównań parami przez odpowiednią komisję ekspertów z danego problemu). Głównym celem zamieszczonego przykładu jest zaprezentowanie różnych aspektów metody porównania parami.

Tablica 3. Kryteria ocen przyjęte w przykładzie

Konstrukcja ustroju nośnego (<i>konstr.</i>)
Poprawność proponowanej koncepcji (p-i-nov.)
Poprawność ukształtowania (p-ukst.)
Poprawność stosowania materiałów (p-mat.)
Nowoczesność ustroju nośnego (nowocz.)

Wytrż. ekspl., trwałość i niez. (wytrż.)
Wytrzymalność eksploatacyjna (eksploat)
Trwałość konstrukcji (trwalose)
Niezawodność konstrukcji (niezaw.)
CieŜar własny (cieŜar)
Mały cieŜar konstrukcji (c-maly)
Przeciętny cieŜar konstrukcji (c-prz.)
DuŜy cieŜar konstrukcji noŝnej (c-duzy)
Ogólne wraŜenie (wraŜenie)
Ogólne wraŜenie - korzystne (w-korz.)
Ogólne wraŜenie - przeciętne (w-przec.)
Ogólne wraŜenie - nie dobre (w-slabo)

Na rys. 1 pokazano model kryteriów z grupy *konstr* (cały model kryteriów jest w posiadaniu autorów).

Rys. 2 zawiera macierz względnych porównań (po analizie zgodności ocen patrz rysunki 4a do 4f). Zastosowano skalę z tablicy 1. W przedstawionym przypadku największą wagę przyłożono do kryterium *poprawność proponowanej konstrukcji (p-i-nov.)*, które oceniono z wagą 1.5 w porównaniu do *wytrzymalności eksploatacyjnej, trwałości i niezawodności (wytrż.)*. Przyjęto również, że *cieŜar własny konstrukcji (cieŜar)* jest mniej waŜny w porównaniu do dwóch poprzednich kryteriów.

	p-i-nov.	wytrż.	cieŜar	wraŜenie
p-i-nov.	1.00	1.50	2.00	4.00
wytrż.		1.00	1.50	3.00
cieŜar			1.00	2.00
wraŜenie				1.00

Rys. 2. Względna ocena grupy kryteriów nazwana *konstr.*

Natomiast waŜność kryterium *p-i-nov.* w stosunku do *cieŜar* została ustalona na 2 co odpowiada w tablicy 1 określeniu *zanuŜalna przewaga jednego kryterium nad drugim*. Kryterium *wytrż.* względem *cieŜar* zostało określone na 1.5 (jako ocena kompromisowa między 1 i 2). Ostatnim kryterium w grupie *o-konc.* jest *ogólne wraŜenie (wraŜenie)*. Jest ono związane z subiektywnym odczuciem kaŜdego ocenianego projekt i dlatego jego waŜność jest niŜsza. *P-i-nov.* są duŜo waŜniejsze niŜ *wraŜenie*. (co odpowiada w tablicy 1 poziomowi 4). *Wytrż.* w stosunku do *wra .* ustalono na 3 a *cie .* zostało ocenione jako bardziej ważne ni  *wra .*, co zostało uwzględnione przez wsp czynn k 2 w ostatniej kolumnie trzeciego wiersza.

Jedynki wydrukowane tustym drukiem na g wnej przekątnej są dowolnymi wartościami ponieważ reprezentuj  wgl dny stosunek jakieg s kryterium do samego siebie. Wartości poniżej g wnej przekątnej nie musz  być wpisane przez użytkownika. Są one odwrotnościami odpowiednich wartości w górnym trójkącie macierzy (patrz macierz **A** w rozdziale 2).

Uważny czytelnik może być zaintrygowany (jeśli nie skłonny do podejrzliwości), w jaki sposób uzyskano takie wartości jak 1.50 czy 2.00 jako relatywne oceny. W rzeczywistości ich wartości początkowe były inne. Wartości te zostały uściśnione przez analizę zgodności ocen (kolejne etapy dochodzenia do otrzymanych wartości, w skrótej formie, pokazano na rys. 4a do 4f), a końcowe wagi obliczone przez program. Należy zauważyć, iż oceny względne niewymiernych kryteriów (jak np. *ogólne wrażenie*) odzwierciedlają nie tylko niedokładną lub nieprecyzyjną wiedzę lecz również niezgodność w naszych własnych ocenach. Poprawianie dokładności wiedzy przez sprawdzanie niezgodności ocen ekspertów (zwane również *podejściem wymuszania zgodności ocen*) jest nie tylko pożądane lecz często konieczne. Dostępnym problemem ten był przedstawiony między innymi w [5].

W praktyce niezgodność ocen jest nie do uniknięcia, gdy co najmniej trzy czynniki są niezależnie porównywane każdy z każdym. Przyjęto, że miarą niezgodności ocen jest wskaźnik niezgodności, który w rozpatrywanym przykładzie zmieniany jest z początkowej wartości 0.50 (rys. 4a) poprzez 0.38 (rys. 4c) do wartości końcowej 0.11 (rys. 4e).

4. WNIOSKI

Niniejsza praca prezentuje podstawy teoretyczne oraz przykład zastosowania teorii do budowy modelu oceny kryteriów w przetargach mostowych. Przykład pokazuje jak można otrzymać końcowe wagi stosując metodę porównania parami, ale nie pretendej do tego, by być gotowym przepisem do budowania takiego modelu. Należy podkreślić, iż model kryteriów przetargowych może być konstruowany na wiele różnych sposobów. Jednakże, każdy z nich powinien zawierać czynniki mierzalne i niemierzalne.

Prezentowane sposób pozwala na szybkie i dokładniejsze utworzenie rozbudowanej listy kryteriów z oszacowaniem wektora wag. Analiza zgodności oszacowań i ich poprawianie jest oprogramowana i jej używanie jest wysoce automatyzowane (poprawki można nanosić przy pomocy myszy lub użyć klawiatury).

Metoda porównywania parami jest narzędziem, które może używać każdy inżynier i projektant, szczególnie jeśli jest dostępna na komputerze osobistym. Jest to elastyczne i wydajne narzędzie do oceny skomplikowanych modeli i należy się spodziewać, że będzie miało coraz więcej zastosowań w przyszłości.

Przedstawione wyniki (rys. 1, 3, 4) otrzymano przy zastosowaniu programu komputerowego *The Concluder*.

LITERATURA

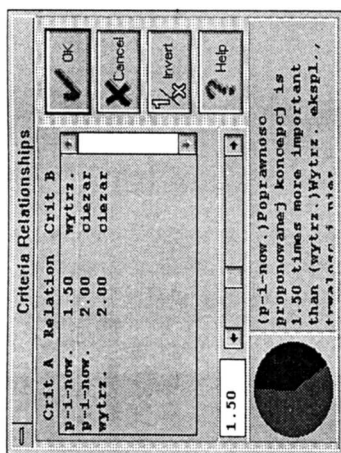
- [1] DUSZAK Z., KOCZKODAJ W. W., The Generalization of a New Definition of Consistency for Pairwise Comparisons. *Information Processing Letters*, Vol. 52, 1994, pp. 273-276.
- [2] GRZESZCZYK T., Podręcznik Zamówień Publicznych. Polskie procedury. Zarys systemu. *Biblioteka menagera i bankowca*, Warszawa 1995.

- [3] HERMAN M., KOCZKODAJ W. W., Monte Carlo Study of Pairwise Comparisons. *Information Processing Letters*, 57, 1996, pp. 25-29.
- [4] KOCZKODAJ W. W., TROCHYMIK W., Zastosowanie analizy zgodności ocen w metodzie porównania parami do oszacowania autostradowych kryteriów przetargowych. *Inżynieria i Budownictwo*, LII, 1996, nr 9.
- [5] KOCZKODAJ W. W., TROCHYMIK W., An Expert System for Construction Tendering Process. *Proceedings of the Third Biennial European Joint Conference on Engineering Systems Design and Analysis: ESDA '96*, The American Society of Mechanical Engineers, 1996, pp. 79-86.
- [6] KOCZKODAJ W. W., A New Definition of Consistency of Pairwise Comparisons. *Mathematical and Computer Modelling*, 18(7), 1993, pp. 79-84.
- [7] KONKURS NR 1 Związku Mostowców Rzeczypospolitej Polskiej. Projekt koncepcyjny drogowej przeprawy mostowej przez rzekę Wiśłę w Płocku. *Kryteria oceny*, Płock 1996.
- [8] SAATY T.L., A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structure. *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 15, 1977, pp. 234-281.
- [9] THURSTONE L., A Law of Comparative Judgments. *Psychological Reviews*, Vol. 34, 1927, pp. 273-286.
- [10] USTAWA z dnia 10 czerwca 1994 roku o zamówieniach publicznych. *Dziennik Ustaw*, Nr 76, poz. 344.

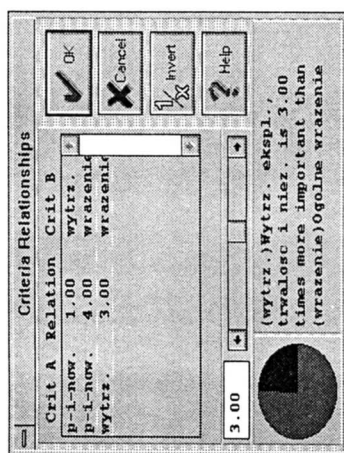
APPLICATION OF PAIRWISE COMPARISONS METHOD TO EVALUATION OF CRITERIA FOR BIDDING PROCESS IN BRIDGE ENGINEERING

Summary

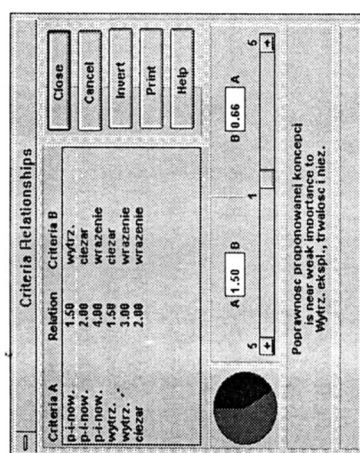
A consistency-driven pairwise comparisons method, suitable for the evaluation of criteria in a bidding process in bridge engineering, is briefly characterized according to its theoretical and practical aspects. The practical aspects are exemplified and described on the basis of the criteria considered during the judgement of the bridge designs entered in a competition for the construction of a new bridge over the Vistula River in Plock. Special attention is given to the weights of the criteria.



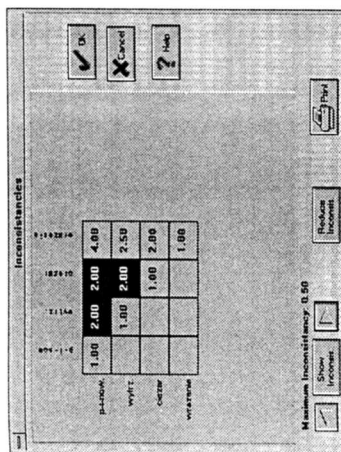
Rys. 4b



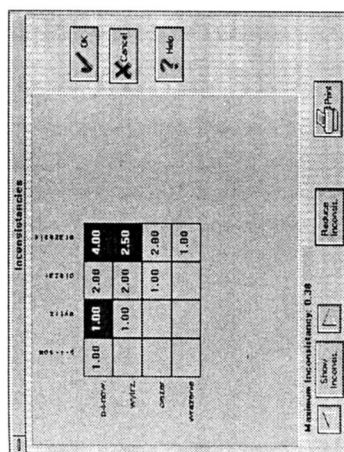
Rys. 4d



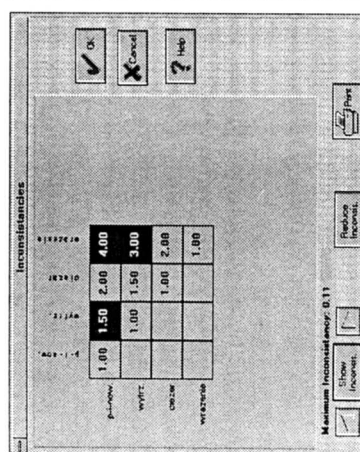
Rys. 4f



Rys. 4a

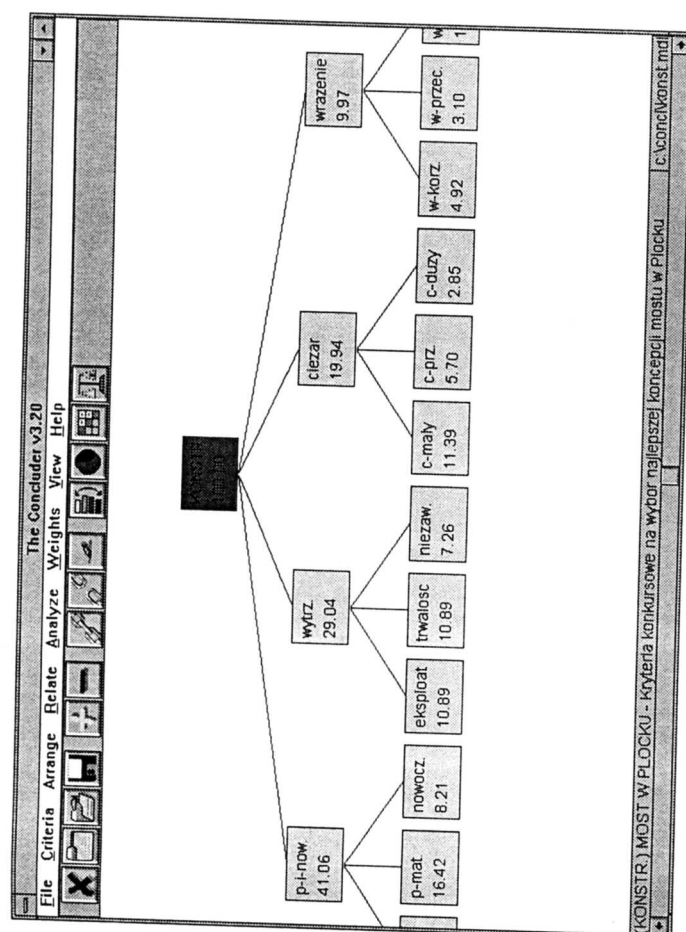


Rys. 4c

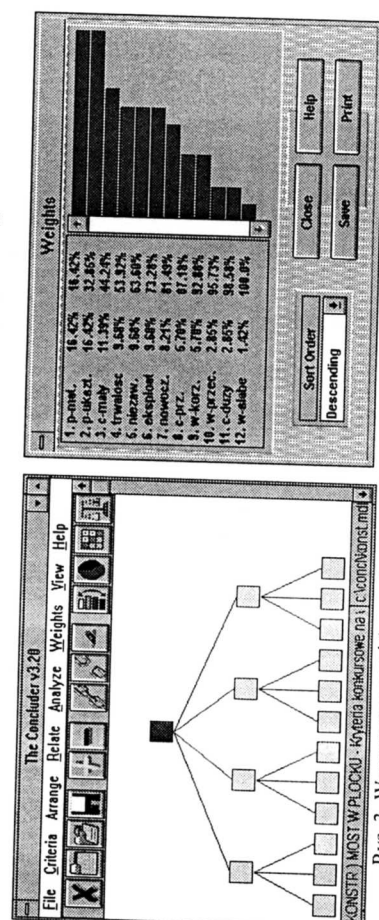


Rys. 4e

Rys. 4. Kolejne etapy oceny kryteriów grupy *konstr* z uwzględnieniem analizy zgodności ocen (wskaźnik niezgodności od 0.50 do 0.11)



Rys. 1. Model kryteriów z grupy konstrukcja ustroju nośnego



Rys. 3. Wyznaczone wagi (rysunek prawy) dla całej grupy kryteriów *konstr* (rysunek lewy)