

Anna Sobotka, Marta Pająk**

METODY WZMOCNIENIA POSADOWIENIA ZABYTKOWEGO BUDYNKU I ICH OCENA ZA POMOCĄ ANALIZY WIELOKRYTERIALNEJ**

1. Wstęp

Wykonanie wzmocnienia istniejących fundamentów, obejmujące prace fundamentowe i ziemne, stwarza potrzebę bardzo wnikliwego rozpoznania czynników, które warunkują możliwości wykonawcze prac. Przed przystąpieniem do obliczeń konstrukcyjnych wzmocnienia fundamentu, a następnie jego realizacji, bardzo ważnym etapem decyzyjnym jest racjonalny wybór rodzaju technologii palowania.

Wybór technologii palowania należy poprzedzić analizą obejmującą zestaw kryteriów warunkujących możliwie najkorzystniejszy sposób rozwiązania posadowienia przedstawionego obiektu. Kryteria te wynikają z warunków geoinżynierskich, charakteru inwestycji, parametrów konstrukcyjnych obiektu oraz warunków zewnętrznych. Na jednoczesne uwzględnienie aspektów technicznych, ekonomicznych, środowiskowych i innych, które powinno spełniać rozwiązanie problemu inżynierskiego, pozwala wielokryterialna analiza porównawcza.

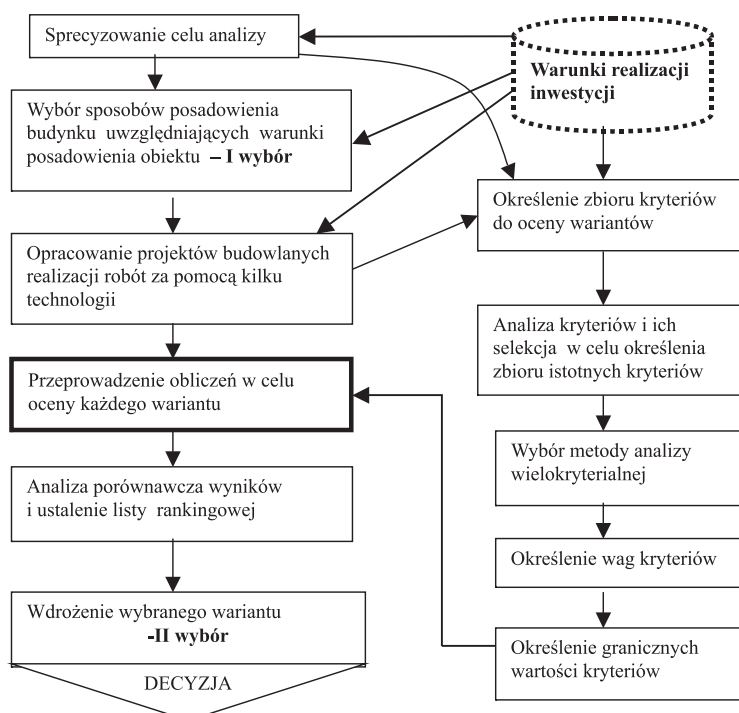
Artykuł obejmuje problematykę projektowania sposobu wzmocnienia posadowienia istniejącego budynku. Wzmocnienie posadowienia zabytkowego kościoła w danych warunkach gruntowych, technicznych i lokalizacyjnych można wykonać za pomocą kilku technologii: możliwe jest zastosowanie pali wciskanych Mega, pali iniekcyjnych Jet Grouting oraz pali formowanych świdrem ciągłym w technologii betonowania ciśnieniowego CFA. Wybór technologii palowania został dokonany za pomocą analizy wielokryterialnej uwzględniającej wiele istotnych kryteriów, którymi powinien kierować się podejmujący decyzje, tj. inwestor, a także projektant. Zakres artykułu obejmuje opis problemu, zastosowaną metodykę badań oraz wyniki i ich analizę.

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Praca wykonana w ramach pracy statutowej nr 11.11.100.197

2. Opis metodyki badań

Rozwiązanie złożonego problemu decyzyjnego, jakim jest wybór projektu rozwiązania problemu inżynierskiego, wymaga pewnego uporządkowanego toku postępowania. W artykule zastosowano metodykę przedstawioną na rysunku 1. Proponowana metodyka obejmuje dwa etapy wyboru rozwiązań. Każde zadanie stojące przed projektantem można wykonać za pomocą różnych rozwiązań konstrukcyjnych, materiałowych, technologicznych i organizacyjnych. Pierwsza naturalna selekcja dostępnych technologii następuje po analizie warunków realizacji, tj. np. w przypadku fundamentów — rodzaju gruntu w podłożu, typu obiektu, jego lokalizacji itd. Doświadczony projektant dokonuje selekcji możliwych rozwiązań niemal intuicyjnie. Selekcja ta (wybór I) prowadzi do ograniczenia liczby wariantów. Jest to ważne ze względu na ekonomiczność tej fazy projektowania inwestycji.



Rys. 1. Schemat metodyki wyboru najlepszego rozwiązania projektowego

Etap II obejmuje właściwą analizę wielokryterialną zaproponowanych projektów. Ten etap badań w prezentowanym przykładzie składa się z następujących kroków:

1. zestawienie kryteriów oceny wariantu projektowego. Są w nich kryteria techniczne, technologiczne, ekonomiczne i ekologiczne — selekcja zbioru kryteriów do charakterystycznych dla rozważanego przykładu;

2. ocena ważności wybranych kryteriów, ich ranking, oraz ocena wartości kryteriów niemierzalnych przez ekspertów;
3. wybór zbioru kryteriów do oceny wariantów projektowych z punktu widzenia kryteriów określających cechy techniczne i technologiczne; wykonanie polioptymalizacji metodą Baasa-Kwakernaaka właściwą dla ocen o charakterze liczb rozmytych [3];
4. analiza otrzymanych wyników;
5. wybór zbioru kryteriów do oceny najlepszych rozwiązań w aspekcie ekonomicznym i ekologicznym, wykonanie analizy wielokryterialnej z kodowaniem wartości kryteriów metodą Neumana-Morgensterna i wskaźnikiem syntetycznym sumującym [5];
6. podjęcie decyzji — wdrożenie wariantu projektu (rozwiązania).

Powyższa metodyka analizy wielokryterialnej ma charakter ogólny, może wykorzystywać różne metody oceny wartości kryteriów i rachunku wielokryterialnej optymalizacji.

3. Opis problemu inżynierskiego i sposobów jego rozwiązania

Wielokryterialnej analizie porównawczej poddano wybór sposobu realizacji wzmocnienia posadowienia obiektu zabytkowego — kościoła, zlokalizowanego w gęstej zabytkowej zabudowie Starego Miasta w Krakowie, z umieszczonym wokół pod powierzchnią terenu uzbrojeniem podziemnym (kable, rurociągi, kolektory kanalizacyjne itp.), znacznie utrudniającymi prace budowlane.

Z wyników badań zawartych w dokumentacji geologicznej wynika, że w podłożu przeważają grunty niespoiste [1]. Wyniki obliczeń konstrukcyjnych wykazały, że obciążenia obiektu przekazywane na fundament i podłoże gruntowe są bardzo duże. W związku z zagrożeniem bezpieczeństwa konstrukcji wywołanym złym stanem podłoża gruntowego w obrębie jednego z filarów oraz złego stanu tego filara konieczne było wykonanie odpowiedniego wzmocnienia istniejącego posadowienia bezpośredniego.

W wyniku analizy warunków gruntowych i realizacji robót oraz dostępnych technologii palowania, w celu wytypowania rozwiązania najlepszego według przyjętych kryteriów, w niniejszym opracowaniu do dalszych badań wybrano trzy następujące warianty wzmocnienia posadowienia [2]:

- 1) Mikropale formowane z betonu zbrojonego przy użyciu rury, profilu stalowego, kosza lub wiązki prętów stalowych. Mikropale są wykonywane jako wbijane, wciskane, wwi-browywane lub wkręcane. Do realizacji mikropali wykorzystywany jest sprzęt, który konstrukcyjnie i technologicznie może być dostosowywany do potrzeb i warunków konkretnego zadania.
- 2) Pale iniekcyjne Jet Grouting. Ich realizacja polega na niszczeniu struktury oraz odspajaniu gruntu i mieszaniu go ze spoiwem, a w efekcie na formowaniu w podłożu gruntowym elementów z gruntu zeskalonego spoiwem (najczęściej zaczynem cementowym). Podstawową zasadą tej technologii jest upłynnianie gruntu strumieniem cieczy wy-

tryskującej pod dużym ciśnieniem (do 80 MPa) z dysz żerdzi przesuwanej pionowo z równoczesnym obracaniem i mieszanie tego gruntu z czynnikiem wiążącym. Uformowane w ten sposób pale mogą być zbrojone stalowymi elementami.

- 3) Pale CFA formowane świdrem ciągłym, który jest wkręcany w podłoże gruntowe na określoną głębokość. Po osiągnięciu zamierzonego poziomu wkręcanie świdra jest wstrzymane i następuje jego wyciąganie bez obracania z jednoczesnym wtlaczaniem mieszanki betonowej przez rurę rdzeniową świdra. Po uformowaniu pala w mieszankę betonową wciskane jest zbrojenie. Stosowanie tej technologii wymaga dla stanowiska roboczego większej przestrzeni niż w sposobach wymienionych wyżej, ale w rozważanym przypadku istnieje możliwość jej zrealizowania.

W rzeczywistości wdrożona została koncepcja wzmocnienia posadowienia kościoła Świętego Piotra i Pawła za pomocą mikropali wciskanych typu Mega. Wykonano 25 pali o średnicy $\Phi = 35$ cm i nośności 400 kN każdy [4]. W proponowanych wariantowych projektach, na podstawie wykonanych obliczeń, wzmocnienie posadowienia zapewniłoby wykonanie 17 pali Jet Grouting o średnicy $\Phi = 600$ mm lub 12 pali CFA o średnicy $\Phi = 600$ mm. Wszystkie te rozwiązania zostały poddane analizie wielokryterialnej, także w celu oceny zasadności przyjętego w rzeczywistości rozwiązania.

Kryteria, będące cechami projektu, wybierane do analizy wielokryterialnej można pogrupować na techniczne, technologiczno-organizacyjne, ekonomiczne i ekologiczne. Spośród wymienionych grup wybrano kryteria przedstawione w tabeli 1. Zwrócono się do trzech ekspertów z dziedziny fundamentowania z prośbą o dokonanie oceny ich ważności.

TABELA 1
Oceny ważności kryteriów

Nr kryterium	Ekspert 1	Ekspert 2	Ekspert 3	Suma pkt	Pozycja Kryterium
K1 – ryzyko czasu	6	5	8	19	2
K2 – ryzyko nie osiągnięcia projektowanej nośności	8	7	6	21	1
K3 – możliwość rejestracji ciągłości pala w czasie realizacji	7	5	4	16	3
K4 – koszt wykonania robót	2	1	4	7	4
K5 – czas wykonywania pojedynczego pala	3	2	1	6	5
K6 – energochłonność	1	2	3	6	5

Eksperci dokonali oceny punktowej w skali 1:8 (im wyższa wartość punktowa, tym lepsza ocena), na podstawie której za najważniejsze uznaje się kryteria: K1 — jest to kryterium zwane ryzykiem czasu, oznaczające prawdopodobieństwo niedotrzymania terminu wykonania robót wskutek wystąpienia niekorzystnych zjawisk zewnętrznych i wewnętrznych

nych, jak np. nieterminowość dostaw mieszanki betonowej i inne, K2 — ryzyko nieosiągnięcia projektowanej nośności, oraz K3 — możliwości rejestracji ciągłości pała w czasie realizacji. Są to kryteria z grupy technologiczno-organizacyjnych.

3.1. Analiza wielokryterialna według kryteriów technologiczno-organizacyjnych i jej wyniki

Pierwszy etap analizy wielokryterialnej ograniczono do trzech kryteriów: K1, K2 i K3. Są to kryteria trudne do określenia w formie liczbowej. Ocenę wartości tych kryteriów także powierzono trzem ekspertom — E1, E2, E3, którzy dokonali oceny kryteriów w skali 1:10. Zaproponowane oceny kryteriów i ich ważności mają charakter subiektywny, nieostry. Takie oceny można opisać przy użyciu liczb rozmytych. W związku z tym do analizy wielokryterialnej przyjęto metodę Baasa-Kwakernaaka [3]. W metodzie tej dokonywany jest wybór rozwiązania optymalnego ze skończonego zbioru rozwiązań dopuszczalnych A (wariantów):

$$A = \{ A_1 A_2, \dots, A_k, \dots, A_N \}; k = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

za pomocą zbioru kryteriów

$$K(A) = \{ K_i(A) \}; i = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

W obliczeniach dla każdego wariantu uwzględniano wartości kryteriów i ich ważność (wagę) w_i ocenianą przez ekspertów. Ostatecznie wyznaczono łączną ocenę Z_r rozwiązania materiałowego (wariantu) z zależności:

$$Z_r = \sum_{i=1}^M (W_{rozmi} \cdot K_i(A)) \rightarrow MAX; \quad i = 1, \dots, M \quad (3)$$

gdzie:

- W_{rozmi} — ocena rozmyta ważności i -tego kryterium,
- K_i — ocena wartości i -tego kryterium.

Podstawowe etapy postępowania w metodzie Baasa-Kwakernaaka obejmują:

- zdefiniowanie zbioru rozwiązań dopuszczalnych, rozważanych kryteriów oraz przyjętych punktowych skal dla oceny rozwiązań dopuszczalnych i ważności kryteriów;
- wykonanie oceny punktowej rozwiązań dopuszczalnych względem poszczególnych kryteriów przez wszystkich ekspertów oraz ważności kryteriów (tab. 1 i 2);
- utworzenie macierzy Saaty'ego ocen rozwiązań i ważności kryteriów; obliczenie współrzędnych wektorów własnych oraz unormowanych wektorów własnych dla macierzy ocen rozwiązań oraz ważności kryteriów;

- obliczenie współrzędnych charakterystycznych wykresów funkcji przynależności rozmytych ocen rozwiązań oraz ważności kryteriów (tab. 3);
- wykonanie obliczeń dla wszystkich rozwiązań dopuszczalnych względem wszystkich kolejnych kryteriów;
- obliczenie sumy rozmytych ocen rozwiązań oraz ważności kryteriów;
- obliczenie unormowanych funkcji przynależności ocen kryterium zastępczego dla pojedynczego rozwiązania oraz dla wszystkich rozwiązań (tab. 4);
- defuzyfikacja rozmytych ocen kryterium dla wszystkich rozwiązań zastępczych metodą wyznaczania położenia środka ciężkości pól pod wykresami funkcji przynależności;
- zestawienie deterministycznych wartości ocen kryterium zastępczego dla wszystkich rozważanych rozwiązań oraz ich wartości unormowanych (tab. 5).

TABELA 2

Oceny rozwiązań dopuszczalnych względem poszczególnych kryteriów niewymiernych w skali 1:10 punktów

K1	A1	A2	A3	K2	A1	A2	A3	K3	A1	A2	A3
E1	1	10	7	E1	1	9	10	E1	2	10	10
E2	2	9	8	E2	3	10	9	E2	4	9	9
E3	3	8	6	E3	2	8	10	E3	3	10	8

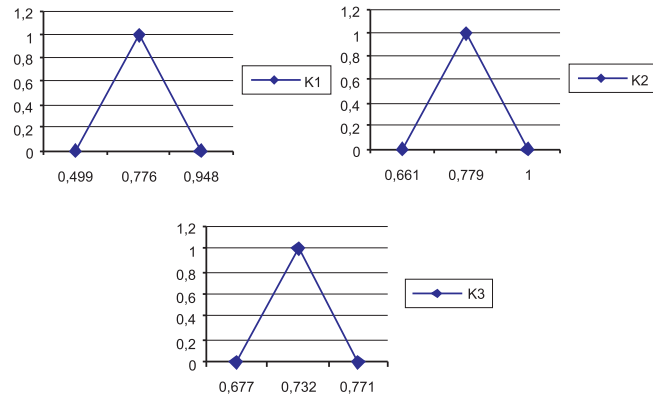
A1 — wykonanie mikropali wciskanych typu Mega,
 A2 — wykonanie pali iniekcyjnych Jet Grouting,
 A3 — wykonanie pali formowanych świdrem ciąglym CFA.

TABELA 3

Współrzędne charakterystyczne wykresów funkcji przynależności dla rozmytych ważności kryteriów

Współrzędne charakterystyczne	Kryterium		
	K1	K2	K3
Vmin	0,499	0,661	0,677
Vmod	0,776	0,779	0,732
Vmax	0,948	1,00	0,771

Przedstawione w tabeli 3 wyniki co do kolejności w istotności analizowanych kryteriów pokrywają się z oceną z tabeli 1 (K2, K1, K3). Oceny rozmyte ważności kryteriów w sposób graficzny przedstawiono na rysunku 2.



Rys 2. Oceny rozmyte ważności kryteriów przedstawione w sposób graficzny

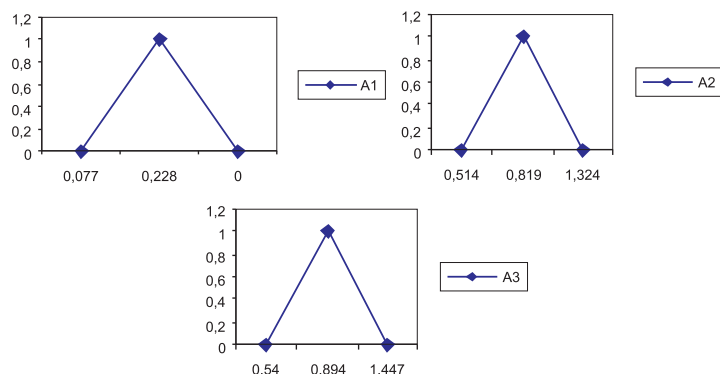
TABELA 4

Unormowane funkcje przynależności ocen kryterium zastępczego dla wszystkich rozwiązań dopuszczalnych

Wartość α -przekroju	Rozwiązanie dopuszczalne					
	A1		A2		A3	
	L	P	L	P	L	P
0,0	0,077	0,497	0,514	1,324	0,540	1,447
0,1	0,089	0,462	0,539	1,268	0,568	1,377
0,2	0,101	0,429	0,566	1,202	0,599	1,313
0,3	0,113	0,398	0,593	1,145	0,632	1,252
0,4	0,127	0,368	0,621	1,089	0,664	1,193
0,5	0,141	0,345	0,651	1,039	0,699	1,137
0,6	0,157	0,319	0,681	0,992	0,734	1,085
0,7	0,173	0,292	0,714	0,946	0,770	1,033
0,9	0,190	0,269	0,748	0,901	0,811	0,985
0,9	0,209	0,248	0,783	0,859	0,853	0,938
1,0	0,228	0,228	0,819	0,819	0,894	0,894

Przedstawione w tabeli 5 wyniki wskazują, że najkorzystniejsze jest zastosowanie pali formowanych świdrem ciągłym w technologii betonowania ciśnieniowego CFA. Wykonanie wzmocnienia posadowienia palami iniekcyjnymi Jet Grouting otrzymało również zbliżoną wysoką ocenę.

Na rysunku 3 przedstawiono graficznie funkcje przynależności ocen rozwiązań względem kryterium zastępczego.



Rys. 3. Graficzne przedstawienie funkcji przynależności ocen rozwiązań względem kryterium zastępczego

TABELA 5

Wartości ocen kryterium zastępczego dla analizowanych rozwiązań dopuszczalnych

Rozwiązanie	Ocena względem kryterium zastępczego	Unormowana ocena względem kryterium zastępczego
A1	0,272	1,000
A2	0,863	3,173
A3	0,947	3,482

3.2. Analiza wielokryterialna według kryteriów ekonomicznych i ekologicznych i jej wyniki

Kryteria ekonomiczne, tzn. koszt, a do tej kategorii można także zaliczyć czas wykonania robót, są podstawowymi kryteriami optymalnego wyboru dla decydentów (inwestora i zarządzającego przedsięwzięciem). Ważne są dzisiaj także kryteria związane z ochroną środowiska. Dlatego analizowane warianty wzmocnienia posadowienia poddane zostaną kolejnej analizie uwzględniającej: koszt wykonania robót — K4, czas wykonania pojedynczego pala — K5, oraz energochłonność — K6. Wartości kryteriów zawiera tabela 6. Koszt K4 obejmuje koszty bezpośrednio uwzględniające robociznę, materiały i pracę sprzętu.

Energochłonność K6 wykonania pali policzono jako sumę zużycia energii:

- do wyprodukowania materiałów na pale (betonu, cementu, stali),
- podczas transportu materiałów na budowę,
- przez zestaw maszyn zastosowany do wykonywania pali na placu budowy.

Wskaźniki zużycia energii (zużywanej przy wydobyciu surowców i wyprodukowaniu materiału) przyjęto dla: stali 25,1 MJ/kg, betonu 0,72 MJ/kg i cementu 2,2 MG/kg, transportu 13,79 MJ/tonokm oraz paliwa do napędu zastosowanego sprzętu 29 MJ/l.

W celu sprowadzenia wartości wszystkich kryteriów wyrażonych w jednostkach naturalnych do wartości niemianowanych zastosowano kodowanie metodą Neumana-Morgensterna [5]. Do obliczenia oceny syntetycznej zastosowano wskaźnik sumacyjny. Wartość większa wskaźnika oznacza rozwiązanie lepsze. W tym etapie oceny wariantów uznano, że kryteria oceny są równorzędne pod względem istotności (tab. 6). Otrzymane wyniki w tabeli 6 wskazują, że z punktu widzenia zbioru kryteriów ekonomiczno-ekologicznych najlepszym rozwiązaniem są pale Mega. Decyduje o tym najniższa energochłonność, ale i najmniejszy koszt. Natomiast pale iniekcyjne Jet Grouting są rozwiązaniem prawie równorzędnym.

TABELA 6

Oceny projektów posadowienia wg kryteriów ekonomicznych i ekologicznych

Wariant	Miary wariantów według kryteriów cząstkowych			Zakodowane miary wariantów według kryteriów cząstkowych			Ocena syntetyczna
	K6 [zł]	K7 [min]	K8 [MJ]	K6	K7	K8	J
A1 (Mega)	8 000	600	86 627	0	1	0	2
A2 (iniekcyjne)	8 650	60	178 427	0,0,8375	0,9474	0,1529	1,9378
A3 (CFA)	12 000	30	195 000	1	0	1	1

4. Podsumowanie i wnioski

Przy rozwiązywaniu problemów inżynierskich można wykorzystywać obecnie różnorodne rozwiązania konstrukcyjne, materiałowe i technologiczne, spośród których można wybierać najlepsze w danych warunkach. W przedstawionym w artykule przykładzie dokonano oceny możliwych do zastosowania technologii wzmocnienia posadowienia przy użyciu analizy wielokryterialnej z punktu widzenia najpierw kryteriów technologiczno-organizacyjnych, a następnie ekonomicznych i ekologicznych. Według pierwszej grupy kryteriów najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie pali CFA, a następnie Jet Grouting, a nie pali Mega, za pomocą których wykonano wzmocnienie posadowienia obiektu. Pale wiercone CFA oraz pale iniekcyjne Jet Grouting w porównaniu z palami wciskanymi Mega umożliwiłyby zapewnienie stateczności obiektu budowlanego mniejszą liczbą pali. Kolejną zaletą byłoby skrócenie czasu wykonania prac fundamentowych, ponieważ realizacja pojedynczego pala iniekcyjnego Jet Grouting oraz pala CFA trwa średnio kilkadziesiąt minut. W praktycznej realizacji przy wykonywaniu mikropali Mega wystąpiły trudności związane przede wszystkim z osiągnięciem zaprojektowanej głębokości (tylko około 20% pali Mega osiągnęło zaprojektowaną głębokość). Proces realizacji pali iniekcyjnych oraz pali CFA ograni-

cza do minimum roboty dodatkowe, takie jak: wykopy, konstrukcje wsporcze (a jest to techniczna konieczność w czasie realizacji mikropali wciskanych). W drugiej ocenie z punktu widzenia kryteriów czasu, kosztów i energochłonności najlepszym rozwiązaniem jest jednak zastosowanie pali Mega, głównie z racji najmniejszych kosztów i energochłonności zastosowanych materiałów i wykonania pali.

W analizowanym przypadku przy spełnieniu obu grup kryteriów zastosowanie pali iniekcyjnych Jet Grouting jest rozwiązaniem najlepszym, zwłaszcza że uzyskały wyższą ocenę według kryteriów technologicznych niż pale Mega i bardzo zbliżoną do pali CFA. Ostatecznego wyboru rozwiązania do wdrożenia dokonuje decydent w oparciu o wyniki — w tym przypadku wielokryterialnej analizy porównawczej.

LITERATURA

- [1] *Szwabowski J., Deszcz J.*: Metody wielokryterialnej analizy porównawczej. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2001
- [2] *Fuksa M., Żmudziński Z., Barycz S.*: Charakterystyka podłoża gruntowego i sposoby przebudowy fundamentów zabudowy Starego Miasta w Krakowie, Przegląd Budowlany, nr 8/9, 1985
- [3] *Kaczmarczyk S.*: Wzmacnianie fundamentów w budynkach zabytkowych, XX Ogólnopolska Konferencja: Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła-Ustroń, marzec 2005, s. 137–146
- [4] *Nikiel G.*: Analiza wielokryterialna w projektowaniu procesów wytwarzania — wybrane zagadnienia. Raport z badań własnych. Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała, 2004
- [5] Wojewódzki Konserwator Zabytków — Kościół Świętego Piotra i Pawła w Krakowie, dokumentacja historyczno-konserwatorska