

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2017), 26 (2), 159–170  
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2017), 26 (2)  
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2017), 26 (2), 159–170  
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2017), 26 (2)  
<http://iks.pn.sggw.pl>  
DOI 10.22630/PNIKS.2017.26.2.14

**Magdalena GICALA, Anna SOBOTKA**

Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Department of Geomechanics Civil Engineering and Geotechnics,  
AGH University of Science and Technology

## **Analiza rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych budynków z uwzględnieniem wymogów zrównoważonego rozwoju<sup>\*</sup>** **The analysis of construction and material solutions, taking into account the requirements of sustainable development**

**Słowa kluczowe:** zrównoważony rozwój, technologie budowania, analiza wielokryterialna  
**Key words:** sustainable development, building technologies, multi-criteria analysis

### **Wprowadzenie**

Analizy rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych budynków nie są nowością ani w Polsce, ani za granicą. Rozważania w tej materii prowadzi się, uwzględniając różne aspekty realizacji obiektów budowlanych, np.: technologiczne (Drozd, 2013), mikrośrodowiskowe (Rutkowska i Baryłka, 2011). Dynamiczny rozwój społeczno-gospodarczy oraz zmiany zachodzące w branży budownictwa wymuszają aktualiza-

cję badań, korygowanie listy czynników uwzględnianych w ocenie rozwiązań oraz poddawanie analizie krytycznej nowo powstających technologii budowania. Uzyskiwane wyniki poprzedzone coraz szerszymi analizami stanowią podstawy do określenia potencjału rozwojowego wybranych technologii lub wskazania ich mankamentów uwypuklających się w obliczu dynamicznych zmian w budownictwie. W związku z rosnącym zainteresowaniem problematyką zrównoważonego rozwoju szczególnego znaczenia nabiera wzajemny wpływ aspektów społeczno-ekonomiczno-środowiskowych na efektywność stosowanych technologii (Sedláková, Vilčeková i Burdová, 2015).

<sup>\*</sup>Pracę wykonano częściowo w ramach badań statutowych AGH w Krakowie – umowa 11.11.100.197.

Celem artykułu jest ocena trzech technologii realizacji budynków mieszkalnych (dwie tradycyjne i jedna nowatorska) z punktu widzenia kryteriów uwzględniających aspekty środowiskowe, socjalne i ekonomiczne. Ocenie podlegały przegrody budynku: ściany i stropodachy. Badania prowadzono na podstawie zapisów obecnie obowiązujących norm, aktów prawnych i materiałów branżowych, a oceny wybranych technologii dokonano przy użyciu analizy wielokryterialnej.

### Metodyka badań

Badania mające na celu ocenę wybranych technologii budowania przeprowadzono według następujących etapów:

1. Określenie celu i przedmiotu badań, tj. technologii budowania wybranych do oceny, w kontekście środowiskowo-społeczno-ekonomicznym (zrównoważonego rozwoju).
2. Zdefiniowanie czynników oceny, ich analiza i selekcja.
3. Identyfikacja czynników, tj. oszacowanie wartości ocen według uznanych i zalecanych metod.
4. Wybór sposobu analizy wielokryterialnej i oceny technologii metodą z grupy taksonomicznych, zwanej tutaj WAP, AHP (ang. *Analytic Hierarchy Process*), TOPSIS (ang. *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*).
5. Określenie wskaźników syntetycznych oceny, ich analiza i rankingowanie technologii.

Wybrano trzy technologie realizacji budynku: tradycyjną wykorzystującą ceramiczne materiały budowlane, o szkielecie drewnianym oraz najnowszą

– systemy budowy z użyciem spienionego polistyrenu. Badanie ma na celu uszeregowanie technologii od najlepiej do najgorzej spełniającej przyjęte kryteria analizy. Analizowano cztery obszary (charakterystykę cieplną, oddziaływania środowiskowe, koszty materiałowe  $1 \text{ m}^2$  przegrody ściennej i dachowej oraz czas budowy obiektu) obejmujące 12 kryteriów oceny wariantów, reprezentowanych przez wskaźniki ilościowe uzyskane w drodze kalkulacji bądź na podstawie danych opublikowanych w literaturze przedmiotu oraz w materiałach producentów branżowych. Obliczenia wykonano dla jednej fazy cyklu życia obiektu, tj. produkcji wyrobów budowlanych. W przypadku zrównoważonego budownictwa ich wybór do konkretnych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych ma największy wpływ na etapach wykonania i eksploatacji a także logistyki odzysku. Rozważane technologie charakteryzują się wielowymiarowymi efektami trudnymi do bezpośredniego ze sobą porównania. Zastosowano trzy różne metody analizy wielokryterialnej aby wykluczyć subiektywizm, zapewnić rzetelność wyników oraz uzyskać dodatkową wiedzę o czynnikach wyraźnie różnicujących wybrane technologie.

### Analiza ilościowa czynników

**Charakterystyka cieplna.** Jednym z aspektów budownictwa zrównoważonego jest efektywność energetyczna budynku mająca wydzźwięk środowiskowy, społeczny i ekonomiczny. W analizie przyjęto jako jej parametr współczynnik  $U$  przenikania ciepła przez przegrody.

TABELA 1. Układ warstw i charakterystyka cieplina przegród analizowanych technologii budowania (opracowanie własne)  
 TABLE 1. The structure of the layers and thermal characteristics of partition walls and roofs of analyzed building technologies (own elaboration)

Z materiałów ceramicznych Ceramic materials		Szkielet drewniany Timber frame		Systemy zabudowy oparte na spienionym polistyrenie Polystyrene prefabricates	
Grubość warstwy materiału Layer material thickness	$U$ [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Grubość warstwy materiału Layer material thickness	$U$ [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Grubość warstwy materiału Layer material thickness	$U$ [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
Ściana zewnętrzna / External wall					
Tynk cementowo-wapienny wewnętrzny Cement-lime plaster 1 cm/0,80	0,22	Płyty gipsowo-kartonowe Plasterboard 1,25 cm/0,25	0,23	Farba akrylowa Acrylic topcoat 0,5cm	0,08
		Mur z pustaków Hollow brick wall 29 cm/0,19		Tynk cementowo-wapienny wewnętrzny Cement-lime plaster 1 cm/0,8	
Samonośne profile styropianowe Self-supporting polystyrene monoblocks 12 cm/0,04	0,22	Szczelina powietrzna niewentylowana Not ventilated air gap 2,5 cm	0,23	Płyty gipsowo-kartonowe Plasterboard 1,25 cm/0,25	0,08
		Paroizolacja z folii polietylenowej Vapour-insulation foil 0,02 cm		Masa klejąca ze wtopioną siatką zbrojącą Adhesive mass with reinforced lattice 0,5 cm/0,8	
Tynk cementowo-wapienny zewnętrzny Cement-lime plaster 1,5 cm/0,80	0,22	Płyta z wełny mineralnej Mineral wool board 15 cm/0,037	0,23	Samonośne profile styropianowe Self-supporting polystyrene monoblocks 50 cm/0,04	0,08
		Płyta OSB OSB 1,5 cm/0,13		Masa klejąca ze wtopioną siatką zbrojącą Adhesive mass with reinforced lattice 0,5 cm/0,8	
		Folia wiatroizolacyjna Wind-insulation foil 0,05 cm			
		Elewacja z desek Wooden facade 2,4 cm/0,20			

TABELA cd.  
TABLE cont.

Z materiałów ceramicznych Ceramic materials		Szkielet drewniany Timber frame		Systemy zabudowy oparte na spienionym polistyrenie Polystyrene prefabricates	
Grubość warstwy materiału Layer material thickness	$U$ [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Grubość warstwy materiału Layer material thickness	$U$ [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Grubość warstwy materiału Layer material thickness	$U$ [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
Grubość przegrody Wall thickness [cm]	43,50	Grubość przegrody Wall thickness [cm]	22,72	Grubość przegrody Wall thickness [cm]	55,25
Masa przegrody Wall mass [kg·m <sup>-2</sup> ]	307,86	Masa przegrody Wall mass [kg·m <sup>-2</sup> ]	122,00	Masa przegrody Wall mass [kg·m <sup>-2</sup> ]	66,92
Przegroda dachowa / Roof					
Belki stropowe Beams 0,20	0,18	Dach jak w rozwiązaniu budynku z materiałów ceramicznych Roof such as in the design solution with ceramic materials	0,18	Farba akrylowa Acrylic topcoat 0,5 cm	0,08
Płyty gipsowo-kartonowe Plasterboard 1,25 cm/0,25				Tynk cementowo-wapienny wewnętrzny Cement-lime plaster 1,0 cm/0,8	
Paroizolacja z folii polietylenowej Vapour-insulation foil 0,02				Płyty gipsowo-kartonowe Plasterboard 1,25 cm/0,25	
Płyta z wełny mineralnej Mineral wool board 20 cm/0,035				Masa klejąca ze wtopioną siatką zbrojącą Adhesive mass with reinforced lattice 0,5 cm/0,8	
Legary Joists 0,20				Samonośne profile polistyrenowe Self-supporting polystyrene monoblocks 50 cm/0,04	

Folia dachowa o wysokiej paroprzepuszczalności High permeability foil 0,05 cm		0,18		0,08	
Konstrukcja dachu – łąty, kontrłaty Roof structure 0,20		0,18		0,08	
Blacha dachowa Roof sheet 0,7 cm/58		0,18		0,08	
Klej Adhesive 0,5 cm/0,036		0,18		0,08	
Blacha dachowa Roof sheet 0,7 cm/58		0,18		0,08	
Dach jak w rozwiązaniu budynku z materiałów ceramicznych Roof such as in the design solution with ceramic materials					

W tabeli 1 zawarto charakterystykę poszczególnych przegród analizowanych systemów i obliczone według PN-EN ISO 6946:2008 ich wartości. Nie uwzględniano w obliczeniach podłogi na gruncie, zakładając to samo rozwiązanie we wszystkich technologiach. Trzecia analizowana technologia, jeszcze niezbyt rozpowszechniona (Technologia M3System), nawiązuje do stosowanych już w latach 50. ubiegłego wieku systemów z elementami styropianowymi jako formą wypełnianą mieszanką betonową (Izodom, Thermomur). Są to samonośne systemy zabudowy wykorzystujące spieniony polistyren, wzmocnione siatką z włókna szklanego (poza ścianami szczytowymi, niebędącymi elementami powtarzalnych łuków i wykonanymi w technologii murowanej z bloczków z betonu komórkowego), pełniące jednocześnie funkcje konstrukcyjną i izolacyjną. Elementy dostarczane na miejsce budowy w postaci prefabrykatów wymagają jedynie scalenia, co znacząco skraca czas budowy, który wynosi około 2–3 miesięcy. Nadmienić należy, że wartość współczynnika  $U$  dla przegród uzależniona jest od temperatury pomieszczeń, jakie te przegrody wydzielają z przestrzeni. Zakładając te same układy warstw ścian i dachu we wszystkich pomieszczeniach, należy uwzględnić wymagania jak dla pomieszczeń o najwyższej temperaturze, z uwagi na odpowiadającą im najmniejszą wartość  $U$ .

W technologii wykorzystującej szkielet drewniany otrzymuje się wartość  $U$  zbliżoną do uzyskanej w technologii z zastosowaniem ceramicznych materiałów przy niemal dwa razy mniejszej grubości ściany. Najmniejsza jego wartość odpowiada przegrodom realizo-

wanym trzecią technologią, co wynika z parametrów materiału zasadniczego i jego grubości.

#### **Oddziaływania środowiskowe.**

Analizę oddziaływań środowiskowych zgodnie z założeniem ograniczono jedynie do fazy pierwszej cyklu życia budynku, czyli fazy wyrobu, obejmującej dostawę surowców, ich transport oraz wytwarzanie gotowych elementów (PN-EN 15643-2:2011). Informacje środowiskowe dotyczące wyrobów budowlanych charakterystycznych dla wybranego rozwiązania konstrukcyjno-materiałowego umożliwiają przyjęcie

kryteriów oceny technologii i ich porównanie na podstawie danych ilościowych uzyskanych z deklaracji środowiskowych wyrobów III typu lub innych modułów zgodnych z wymaganiami PN-EN 15804:2012. Wartości wskaźników stanowiących kryteria (tab. 2) określono w następujący sposób:

1) gromadzenie danych o wartościach wskaźników skumulowanego równoważnego oddziaływania na środowisko dla wybranych materiałów zastosowanych w analizowanych technologiach na podstawie dostępnych w literaturze wyników badań (np. Górzyński, 2007) oraz

TABELA 2. Obciążenia środowiska materiałami powierzchni użytkowej w rozważanych technologiach (opracowanie własne)

TABLE 2. Environmental loads of materials of usable area in the considered technologies (own elaboration)

Kategorie obciążenia Load category	Technologia / Technology		
	z ceramicznych materiałów ceramic materials	ze szkieletem drewnianym timber frame	z samonośnymi profilami ze spienionego polistyrenu polystyrene prefabricates
Zużycie energii pierwotnej Use of primary energy [MJ]	3887,91	3098,92	5521,97
Zużycie surowców mineralnych Use of raw materials [kg]	870,74	175,44	348,47
Zużycie słodkiej wody netto Net use of fresh water	7662,73	9609,41	6642,26
Potencjał cieplarniany Global warming potential [kg CO <sub>2</sub> ]	268,74	-222,42	242,22
Potencjał uszczuplenia warstwy ozonowej Ozone depletion [kg CF-C11]	2,66E-05	3,31E-05	5,14E-05
Potencjał zakwaszenia Acidification potential [kg SO <sub>2</sub> ]	2,41	1,78	1,02
Potencjał eutrofizacji Eutrophication potential [kg PO <sub>4</sub> ]	0,88	0,73	0,35
Ilość odpadów Waste disposed [Mg]	1,25	0,15	0,74

danych producentów (deklaracje środowiskowe wyrobów III typu) –  $k_{ij}$ ;

2) obliczenie materiałochłonności, tj. zużycia poszczególnych materiałów na 1 m<sup>2</sup> przegrody ściennej i dachowej dla każdej technologii budowania –  $m_j$ ;

3) określenie obciążeń środowiska materiałami użytymi do realizacji 1 m<sup>2</sup> przegród ściennych i dachowych analizowanych technologii, stosując zależność  $p_{ij} = k_{ij}m_j$ ;

4) obliczenie wartości obciążeń środowiska w rozważanych kategoriach materiałami 1 m<sup>2</sup> przegrody stanowiących sumę obciążeń środowiska jej składnikami, co określono przy zastosowaniu zależności z pkt 3;

5) obliczenie łącznych wartości oddziaływań środowiskowych generowanych przez zasadnicze elementy budynku (ściany zewnętrzne i dach) badanych technologii na 1 m<sup>2</sup> powierzchni użytkowej (przyjęto założenie, że 1 m<sup>2</sup> powierzchni użytkowej budynku odpowiada 1,5 m<sup>2</sup> powierzchni ścian zewnętrznych oraz analogicznie dla przegrody dachowej).

Zastosowano oznaczenia:  $k_{ij}$  – wskaźnik skumulowanego równoważnego oddziaływania na środowisko jednostkowej ilości  $j$ -tego materiału w  $i$ -tej kategorii;  $m_j$  – ilość  $j$ -tego materiału w 1 m<sup>2</sup> powierzchni przegrody;  $p_{ij}$  – wartość obciążenia środowiska  $j$ -tym materiałem w  $i$ -tej kategorii dla 1 m<sup>2</sup> przegrody;  $P_{it}$  – obciążenia środowiska materiałami 1 m<sup>2</sup> przegrody realizowanej  $t$ -tą technologią w  $i$ -tej kategorii;  $i$  – numer analizowanej kategorii,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $j$  – numer materiału warstwy przegrody,  $j = 1, 2, \dots, m$ .

Otrzymane wartości nie wskazują jednoznacznie rozwiązania optymalne-

go. W zależności od analizowanej kategorii obciążenia warianty uzyskują zróżnicowane wyniki. Można jednak zauważyć, że technologia 2 ma w czterech (na osiem) kryteriach najkorzystniejsze wyniki, a najslabsze wyniki w pięciu kryteriach otrzymała technologia 1. Wyniki analizy wskazują na efektywne wdrażanie zasad proeko-logicznych w nowych technologiach i zbliżanie poziomu obecnego stanu budownictwa w Polsce do standardów budownictwa zrównoważonego. Innowacyjne rozwiązania nie pozostają bez wad, mają jednak wiele zalet trudnych do uzyskania w tradycyjnych technologiach.

**Koszty materiałowe przegrody ściennej i dachowej.** Korzystając z dostępnych cenników materiałów budowlanych i cenników udostępnionych przez producentów oraz kalkulacji materiałochłonności przeprowadzonych przy szacowaniu wartości wektorów obciążenia środowiska, określono ceny materiałów potrzebnych do wykonania 1 m<sup>2</sup> przegrody (ściennej i dachowej), a następnie przeliczono na 1 m<sup>2</sup> powierzchni użytkowej obiektu (tab. 3).

Rozbieżności cen są znaczne. W celu pełniejszej oceny kosztowej technologii należy uwzględnić koszty budowy i eksploatacji obiektów budowlanych, pomimo że koszt materiałów ma zasadnicze znaczenie w prowadzonej ocenie.

**Czas budowy obiektu.** Czas budowy nie stanowi czynnika *stricte* wynikającego z wymogów zrównoważonego rozwoju, ale warto go uwzględnić w aspekcie pracochłonności i zaangażowania zasobów ludzkich, uciążliwości środowiskowych (otoczenia budowy) oraz oczekiwania na zamieszkanie przez inwestora-użytkownika. Czas realizacji

TABELA 3. Kalkulacja cen materiałów przegród ściennych i dachowych w analizowanych technologiach w przeliczeniu na jednostkę powierzchni użytkowej (PU) (opracowanie własne)

TABLE 3. Price calculations of wall and roof materials in the analyzed technologies per unit of usable area (UA) (own elaboration)

Technologia realizacji obiektu Building technology	Cena materiałów powierzchni ściany zewnętrznej Price of materials external wall area [PLN]	Cena materiałów powierzchni przegrody dachowej Price of materials roof area [PLN]	Cena materiałów przegrody ściennej PU Price of external wall materials per UA [PLN]	Cena materiałów przegrody dachowej na PU Price of roof materials per UA [PLN]	Cena materiałów przegród na PU Price of wall and roof materials per UA [PLN]
Ceramiczne materiały budowlane Ceramic materials	137,00	135,48	205,50	203,22	408,72
Szkielet drewniany Timber frame	250,65	135,48	375,98	203,22	579,20
Polistyren spieniony Polystyrene prefabricates	121,02	142,44	181,54	213,67	395,20

determinowany jest specyficznymi dla każdej inwestycji warunkami wykonania robót, ale też i typem przyjętej technologii budowania. Oszacowany czas budowy dla prowadzonych badań zawiera tabela 4.

### Analiza wielokryterialna

Złożony charakter zagadnienia zrównoważonego rozwoju skutkuje wieloaspektową analizą przyjętych technologii realizacji obiektu. W tabeli 4 zestawiono parametry przyjęte do analizy wielokryterialnej oraz ich dane ilościowe dla każdej technologii. Wszystkie kryteria mają charakter destymulant i ich optymalne wartości dążą do minimum.

Analiza wariantów pierwszą metodą – WAP (Żabicki i Gardziejczyk, 2014), polega na budowie skalaru, którego liczbowa

wartość określa wskaźnik oceny wariantu. Kalkulację wskaźników syntetycznych poprzedza się ustaleniem wag kryteriów (tab. 5), stosując metodę porównań parami, której rezultat uzależniony jest od preferencji decydenta. Wyznaczono sześć wskaźników syntetycznych: multiplikacyjny (W1), sumacyjny (W2) i addytywny (W3) skorygowane, średnie ważone: arytmetyczna (W4), harmoniczna (W5) i geometryczna (W6) – tabela 6.

Analiza wariantów metodą AHP, opracowana przez Saaty’ego, polega na dekompozycji problemu na jego podstawowe elementy składowe, co umożliwia wyznaczenie rozwiązania na podstawie wiedzy eksperckiej lub preferencji decydenta (Skorupka i Duchaczek, 2010). Uzyskano rankingi alternatyw z perspektywy każdego kryterium na podstawie wektorów własnych macierzy porównań oraz określono wagi poszczególnych



TABELA 4. Zestawienie kryteriów oceny wariantów i ich wartości (opracowanie własne)

TABLE 4. Summary of variants evaluation criteria and their values (own elaboration)

Nr	Kryterium Criterion	Technologia Technology		
		1	2	3
K1	Współczynnik przenikania ciepła ściany zewnętrznej Heat transfer coefficient of external wall	0,22	0,23	0,08
K2	Masa ściany zewnętrznej The mass of external wall [kg]	307,86	122,00	66,92
K3	Zużycie energii pierwotnej Use of primary energy [MJ]	3887,91	3098,92	5521,97
K4	Zużycie surowców mineralnych Net use of fresh water	870,74	175,44	348,47
K5	Zużycie słodkiej wody netto Net use of fresh water	7662,73	9609,41	6642,26
K6	Potencjał cieplarniany Global warming potential [kg CO <sub>2</sub> ]	268,74	-222,42	242,22
K7	Potencjał uszczerbienia warstwy ozonowej Ozone depletion [kg CF-C11]	2,66E-05	3,31E-05	5,14E-05
K8	Potencjał zakwaszenia Acidification potential [kg SO <sub>2</sub> ]	2,41	1,78	1,02
K9	Potencjał eutrofizacji Eutrophication potential [kg PO <sub>4</sub> ]	0,88	0,73	0,35
K10	Ilość odpadów Waste disposed [Mg]	1,25	0,15	0,74
K11	Cena materiałów przegród na jednostkę powierzchni użytkowej Price of wall and roof materials per usable area [PLN]	408,72	579,20	395,20
K12	Czas realizacji [miesiąc] Execution duration [month]	24	5	3

TABELA 5. Wagi kryteriów (K1–K12) przyjęte w metodzie WAP (opracowanie własne)

TABLE 5. Weights of the criteria (K1–K12) adopted in the WAP method (own elaboration)

K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12
0,09	0,06	0,14	0,14	0,08	0,08	0,05	0,08	0,08	0,09	0,11	0,03

TABELA 6. Zestawienie wyników metody WAP (opracowanie własne)

TABLE 6. Summary of results of the WAP method (own elaboration)

Technologia Technology	Wskaźnik syntetyczny Synthetic indicator					
	W1	W2	W3	W4	W5	W6
1	2,47E-21	0,47	3,94E-02	0,47	2,48E-02	0,24
2	5,32E-16	0,76	6,36E-02	0,76	6,78E-01	0,72
3	3,05E-18	0,70	5,86E-02	0,70	2,85E-02	0,45

kryteriów. Na podstawie uzyskanych wektorów priorytetów sporządzono na koniec globalny ranking przedstawiony w tabeli 7.

sza wartość  $-d_t^-$ ) od rozwiązania najgorszego (Mierzyńska, 2011) – tabela 8.

TABELA 7. Wyznaczenie wektorów priorytetu, ranking technologii (opracowanie własne)

TABLE 7. Calculation of priority vectors, ranking of technologies (own elaboration)

T	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	P
	waga kryterium / criterion weight (importance)												
	0,076	0,073	0,145	0,146	0,078	0,069	0,047	0,065	0,076	0,077	0,110	0,037	
1	0,25	0,143	0,297	0,10	0,30	0,17	0,54	0,16	0,21	0,10	0,33	0,11	0,223
2	0,25	0,286	0,594	0,62	0,16	0,67	0,30	0,30	0,24	0,65	0,14	0,41	0,368
3	0,50	0,571	0,109	0,28	0,54	0,17	0,16	0,54	0,55	0,25	0,52	0,48	0,362

T – technologia/technology, P – ogólny priorytet/overall priority.

TABELA 8. Wyniki metody TOPSIS (opracowanie własne)

TABLE 8. The results of the TOPSIS method (own elaboration)

Wyniki metody TOPSIS The results of TOPSIS method			
Technologia Technology	$d_t^-$	$d_t^+$	$d_t$
1	0,00255	0,37287	0,00678
2	0,35740	0,03414	0,91281
3	0,24661	0,23760	0,50931

Optymalna wartość wyniku analizy każdą z rozważanych metod mierza do maksimum. Poszukuje się wariantu osiągnącego największe wartości: wskaźników syntetycznych (metoda 1), wektora priorytetu (metoda 2) oraz względnej bliskości do rozwiązania optymalnego  $d_t$  (metoda 3). W tabeli 9 przedstawiono wyniki trzech metod analizy wielokryterialnej wykorzystanych w opracowaniu.

TABELA 9. Zestawienie wyników metod analizy wielokryterialnej (opracowanie własne)

TABLE 9. Summary of the results of multi-criteria analysis (own elaboration)

Technologia Technology	WAP						AHP	TOPSIS
	W1	W2	W3	W4	W5	W6		
1	2,47E-21	0,47	3,94E-02	0,47	2,48E-02	0,24	0,223	0,00678
2	5,32E-16	0,76	6,36E-02	0,76	6,78E-01	0,72	0,368	0,91281
3	3,05E-18	0,70	5,86E-02	0,70	2,85E-02	0,45	0,362	0,50931

Istotą metody TOPSIS jest wyznaczenie tej spośród analizowanych alternatyw, która jest najbliższa (najmniejsza wartość  $-d_t^+$ ) rozwiązaniu optymalnemu ( $d_t$ ), spełniającemu wymagane kryteria w możliwie największym zakresie, i jednocześnie najbardziej oddalona (najwięk-

## Podsumowanie

Analiza wielokryterialna, w której przewagę stanowią kryteria środowiskowe, pozwoliła nie tylko na dokonanie wyboru technologii realizacji obiektu w jak najmniejszym stopniu negatywnie

oddziałującej na środowisko naturalne, ale także sklasyfikowanie materiałów na zalecane, pośrednie i niezalecane przy wykonywaniu obiektów próśrodowiskowych oraz ocenę stopnia wdrożenia standardów zrównoważonego rozwoju w nowo powstałych technologiach. Z badań wynika, że technologia z zastosowaniem szkieletu drewnianego jest najbardziej zbliżoną do rozwiązania optymalnego. Spośród dwóch pozostałych technologii rozwiązanie 1 jest bardziej oddalone od rozwiązania 2, które uzyskało najlepsze noty. Przyjmuje się, że technologia wykorzystująca ceramiczne materiały budowlane nie spełnia w zadowalającym stopniu standardów budownictwa zrównoważonego. Decyduje o tym m.in. zużycie znacznych ilości surowców i generowanie odpadów. Pośrednią w ocenie jest technologia 3 wykorzystująca samonośne systemy zabudowy z użyciem spienionego polistyrenu. Z uwagi na niektóre kryteria uzyskuje ona wyniki bardzo zbliżone do technologii przodującej w zestawieniu, co potwierdza próby wdrażania idei również w nowo powstających rozwiązaniach.

## Literatura

- Drozd, W. (2013). Przegrody pionowe w budownictwie mieszkaniowym jednorodinnym. *Przegląd Budowlany*, 84(4), 32-37.
- Górzyński, J. (2007). *Podstawy analizy środowiskowej wyrobów i obiektów*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- Mierzyńska, D. (2011). Wielowymiarowa analiza dobrobytu społeczno-ekonomicznego w Polsce. *Prace i Materiały Wydziału Zarządzania Uniwersytetu Gdańskiego*, 9(4/8), 421-434.
- PN-EN 15643-2:2011. *Zrównoważoność obiektów budowlanych. Ocena budynków. Część 2: Zasady oceny właściwości środowiskowych*.
- PN-EN 15804:2012. *Zrównoważoność obiektów budowlanych. Deklaracje środowiskowe wyrobów. Podstawowe zasady klasyfikacji wyrobów budowlanych*.
- PN-EN ISO 6946:2008. *Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania*.
- Rutkowska, G. i Baryłka, K. (2011). Analiza wpływu materiałów budowlanych na mikrośrodowisko budynków mieszkalnych. *Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 20, 3(53), 174-182.
- Sedláková, A., Vilčeková, S. i Burdová, E.K. (2015). Analysis of material solutions for design of construction details of foundation, wall and floor for energy and environmental impacts. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(5), 1323-1332.
- Skorupka, D. i Duchaczek, A. (2010). Zastosowanie metody AHP w optymalizacji procesów decyzyjnych związanych z realizacją przedsięwzięć logistycznych. *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych im. gen. T. Kościuszki*, 3, 54-62.
- Technologia M3System [b.d.]. *O firmie. Technologia*. Pobrane z: <http://www.m3system.pl> (dostęp: 22.10.2016).
- Żabicki, P. i Gardziejczyk, W. (2014). Zagadnienia normalizacji kryteriów w analizach wielokryterialnych w projektowaniu dróg. *Budownictwo i Architektura*, 13(4), 325-333.

## Streszczenie

**Analiza rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych budynków z uwzględnieniem wymogów zrównoważonego rozwoju.** Celem opracowania jest charakterystyka rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych przegród budowlanych (ścian i dachu) uwzględniająca założenia zrównoważonego rozwoju. Analizie poddano trzy technologie realizacji obiektów, w tym dwie tradycyjne wykorzystujące ceramiczne materiały budowlane i szkielet drewniany oraz jedną nowatorską z zastosowaniem spienionego polistyrenu. Warianty oceniano według 12 czynników charakteryzujących najważniejsze obszary zrównoważonego budownic-

twą. Punktem wyjścia do analizy wielokryterialnej było stwierdzenie braku wyraźnej przewagi jednego z analizowanych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych nad pozostałymi pod względem omawianych czynników. Dokonano porównania rozwiązań metodami WAP, AHP oraz TOPSIS, aby znaleźć technologię najlepiej spełniającą założenia analizy. W rezultacie przeprowadzonych badań stwierdzono, że rozwiązanie wykorzystujące szkielet drewniany jest najlepsze, co potwierdzono trzykrotnie (w każdej metodzie analizy wielokryterialnej). Wyniki umożliwiają porównanie technologii, pośrednio – wskazanie materiałów budowlanych spełniających założenia zrównoważonego rozwoju oraz określenie stopnia ich wdrożenia w nowo tworzonych technologiach.

## Summary

### **The analysis of construction and material solutions, taking into account the requirements of sustainable development.**

The aim of the study is to characterize the construction and material solutions of building partitions (walls and roof), which takes into account the sustainable development. The analysis includes three technologies – two traditional variants, using ceramic materials and timber frame and one innovative

solution based on the expanded polystyrene. These solutions were assessed according to 12 factors, characterizing the most important areas of sustainable development. We observed no clear advantage of one of the analyzed construction-material solutions over the remaining in terms of these factors, what was the starting point for the multi-criteria analysis. A solutions comparison was made using WAP, AHP and TOPSIS methods and technology that best meets the analysis assumptions, was searched. As a result of the study, it was found the dominance of solution using timber frame, three times confirmed (in each method multi-criteria analysis). The results make it possible to compare the technologies, indirectly – indicate building materials, which meet the assumptions of sustainable development and determine degree of implementation of sustainable development in emerging technologies.

### **Authors' address:**

Magdalena Gicala, Anna Sobotka  
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
Wydział Górnictwa i Geoinżynierii  
Katedra Geomechaniki, Budownictwa  
i Geotechniki  
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland  
e-mail: mgicala@agh.edu.pl  
sobotka@agh.edu.pl