

dr inż. Agata Czarnigowska^{1)*}

ORCID: 0000-0003-3715-3521

dr inż. Robert Bucoń¹⁾

ORCID: 0000-0002-9397-639X

inż. Jakub Gierat²⁾

Problemy wielokryterialnego wyboru „zielonych” rozwiązań budowlanych na przykładzie dachu domu szkieletowego

Problems of multicriteria selection of „green” building solutions on the example of a roof for a timber frame house

DOI: 10.15199/33.2022.12.17

Streszczenie. W artykule porównano rozwiązania projektowe elementu budynku mieszkalnego o drewnianej konstrukcji szkieletowej. Zastosowano podejście często prezentowane w literaturze, bazujące na indywidualnym zestawie kryteriów (koszt, wybrane parametry użytkowe, wpływ na środowisko) i użyciu przyjętej metody szeregowania rozwiązań. Przykład ten służy wskazaniu wad i zalet upraszczania analiz ilościowych przy wyborze rozwiązań technologiczno-materiałowych w budownictwie.

Słowa kluczowe: projektowanie budynków; analiza wielokryterialna; ślad węglowy; deklaracje środowiskowe; szkielet drewniany.

Abstract. This paper compares designs of an element of a timber frame residential building. The authors applied an approach common in the literature on the subject, based on an individual set of criteria (cost, selected performance parameters, environmental impact) and the use of a predefined method of ranking solutions. This case is a base for discussing the advantages and disadvantages of simplifying quantitative analyses when selecting material solutions in construction.

Keywords: building design; multi-criteria analysis; carbon footprint; environmental declarations; timber frame.

Wobec wyczerpywania zasobów naturalnych i coraz bardziej oczywistego zagrożenia ludzkości podejmowane są próby skierowania gospodarki na tory zrównoważonego rozwoju, w tym zrównoważonego budownictwa [1]. Jednym z aspektów jest ograniczanie negatywnego wpływu budynków na środowisko. Wpływ ten jest zwykle oceniany w ramach analizy cyklu życia (LCA). Do uzasadniania decyzji projektowych o wyborze materiałów i komponentów z uwzględnieniem ich wpływu na środowisko, częściej niż pełną LCA [2, 3] stosuje się metody uproszczone. Przyjmowane są własne zestawy kryteriów, dotyczących wybranych etapów cyklu życia, wyrażonych różnymi miernikami (w tym ocenami bazującymi na opinii ekspertów wyrażenymi w skali porządkowej). Oceny zgodne z poszczególnymi kryteriami rozważają osobno albo integrują je

w zbiorczą ocenę, dobierając mniej lub bardziej arbitralnie sposób ustalania wag kryteriów i techniki analizy [4, 5]. Podobne podejście stosuje się w ocenie całych budynków (systemy certyfikacji BREEAM, CASBEE, LEED itd. [6]). W takiej sytuacji dobór kryteriów i ich miar, a nawet sam wybór metody analizy wpływają na wyciągane wnioski [7]. Podobne podejście przyjęto w części analitycznej artykułu, gdzie zastosowano wielokryterialną metodę służącą wskazaniu najlepszego (spośród rozważanych) rozwiązania materiałowego przegrody budynku. W analizie zastosowano arbitralnie wybrane kryteria ilościowe związane z wpływem budynku na środowisko. Przykład ten służy wskazaniu wad i zalet upraszczania analiz ilościowych przy wyborze rozwiązań technologiczno-materiałowych w budownictwie.

Redukcja śladu węglowego budynków jako kryterium doboru rozwiązań materiałowych

Elementem LCA jest ocena śladu węglowego budynków, czyli ich bezpośredniego i pośredniego przyczyniania

się do globalnego ocieplenia. Szacuje się, że w 2020 r. emisja gazów cieplarnianych związana z budownictwem kubaturowym stanowiła aż 37% całkowitej światowej emisji, w tym 27% wiązało się z produkcją energii zużywanej w trakcie eksploatacji budynków (przede wszystkim ogrzewanie i chłodzenie), a 10% z produkcją materiałów na potrzeby budownictwa kubaturowego [8]. W związku z tym większość strategii rozwoju budownictwa skupia się na redukcji śladu węglowego w cyklu życia budynków [8, 9]. Największy potencjał redukcji tkwi w działaniach dotyczących operacyjnej fazy cyklu życia istniejących budynków, stąd choćby europejska Fala Renowacji [10]. Uzyskanie efektu zależy m.in. od przeprowadzenia głębokiej termomodernizacji (wyprodukowania i wbudowania dużej ilości produktów). Dodatkowo spodziewany rozwój miast sprawia, że zwiększa się zainteresowanie ograniczaniem wbudowanego śladu węglowego [11, 12].

W Polsce wymagania związane z ograniczaniem śladu węglowego budynków zawarte są jedynie pośrednio,

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury

²⁾ Absolwent Politechniki Lubelskiej

^{*} Adres do korespondencji: a.czarnigowska@pollub.pl

w [13] w formie maksymalnej dopuszczalnej wartości współczynnika przenikania ciepła przez przegrody zewnętrzne oraz zapotrzebowania na energię pierwotną do ogrzewania i chłodzenia obliczaną wg uproszczonej metody [14]. Sprowadzają się więc do konieczności ograniczania emisji związanej z wybranymi aspektami fazy użytkowania obiektu. Nie ma jeszcze obowiązkowych wymagań dotyczących redukcji „wbudowanego śladu węglowego”, czyli stosowania materiałów, których produkcja, dostarczenie i wbudowanie (a także naprawy i wymiana, a ostatecznie rozbiórka i zagospodarowanie odpadów) wiąże się z mniejszą emisją gazów cieplarnianych. Poszukiwanie ulepszeń w tej dziedzinie zależy od dobrej woli inwestora, projektanta lub wykonawcy.

Deklaracje środowiskowe jako źródło danych do analiz wyboru rozwiązań materiałowych

Pomimo istnienia standardów dotyczących zakresu istotnych charakterystyk środowiskowych, metod ich pomiaru i przedstawiania (m.in. normy ISO 14025, EN 15804) wysiłek związany z analizą wpływu budynku na środowisko, w tym jego śladu węglowego, ciągle jest bardzo duży, choćby z uwagi na trudność w dostępie do danych [2, 3]. Ich źródłem mogą być dobrowolne deklaracje środowiskowe wyrobów (EPD) [15]. Liczba niezależnie zweryfikowanych i opublikowanych deklaracji EPD zwiększa się z każdym rokiem (w 2021 r. wynosiła ok. 10 tys. [16]). Są one udostępniane przez producentów oraz przez krajowych operatorów EPD. Instytut Techniki Budowlanej bezpośrednio upublicznił 207 deklaracji, w tym już wygasłe [17]. Udostępniają je także stowarzyszenia operatorów i przedsiębiorstwa (np. europejskie ECO Platform mające w bazie 3529 deklaracji [18]), sieć koordynowana przez niemiecki Instytut von Bauen und Umwelt [19], czy International EPD System [20]. W tematycznych bazach danych można też znaleźć opracowania o zakresie analogicznym do EPD, lecz dotyczące „przeciętnych” materiałów produkowanych w danym kraju (np. [19, 21]). Deklara-

cje EPD dotyczą niektórych etapów cyklu życia, w tym zawsze pozyskania surowców, ich dowiezienia do wytwórcy i produkcji wyrobów (etapy A1-A3). Niekiedy zawierają dane dotyczące transportu na budowę (A4) i montażu w obiekcie (A5) oraz oparte na indywidualnie przyjmowanych scenariuszach, a więc wprost nieporównywalne [16] wartości związane z etapami fazy C („końca życia”) i D (ponowne wykorzystanie, przetworzenie). Niedawne zmiany metodyczne (przyjęcie EN 15804-A2 w 2019 r.) powodują, że nowe EPD zawierają dane nieporównywalne z opracowanymi zgodnie z poprzednimi procedurami. Deklaracje są więc źródłem dalekim od doskonałości, ale jednocześnie stanowią powszechnie dostępną bazę danych.

Przykład wyboru rozwiązania elementu budynku

Przedstawiony przykład pochodzi z pracy dyplomowej obronionej w Politechnice Lubelskiej [22]. Zadaniem autora było zaprojektowanie budynku jednorodzinnego o drewnianej konstrukcji szkieletowej oraz umotywowanie wyboru wariantów rozwiązań przegród zgodnie z indywidualnie ustalonymi kryteriami. Sytuacja decyzyjna dotyczyła indywidualnego inwestora, który określony efekt użytkowy chce osiągnąć możliwie małym kosztem i możliwie niewielkim negatywnym wpływem bu-

dynku na środowisko. Przedstawiono analizę jednej z przegród – dachu. Przyjęto zestaw pięciu kryteriów (tabela 1). Podstawą określenia wartości kryteriów K4 i K5 były deklaracje środowiskowe EPD opracowane wg EN 15804-A1, przy czym starano się wybierać wyroby produkowane w Polsce i na polski rynek przez konkretnych producentów, a w przypadku braku takich deklaracji dane dotyczące produktów z sąsiednich krajów, opracowane dla konkretnych producentów lub grup wyrobów różnych producentów. W tabeli 2 przedstawiono skład materiałowy wszystkich elementów składowych analizowanych przegród.

Do analizy porównawczej przygotowano trzy warianty przegród dachowych przeznaczonych do budynku o drewnianej konstrukcji szkieletowej i jednakowym współczynnikiem przenikania ciepła ($U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$). Ocena kryterium $j = 4$ obliczana jest z wzoru:

$$O_{i,4} = S_{e,i} \cdot M_{e,i} / \sum_{e=1}^r M_{e,i}$$

zaś kryterium $j = 5$ z wzoru:

$$O_{i,5} = \sum_{e=1}^r M_{e,i} \cdot G_{e,i}$$

gdzie:

$S_{e,i}/M_{e,i}/G_{e,i}$ – ocena odnawialności surowca [pkt]/masa [kg/m²]/wskaźnik GWP [CO₂/kg] e-tego elementu składowego i-tej przegrody dachowej.

Oceny wartości przyjętych kryteriów zestawiono w tabeli 3.

Tabela 1. Kryteria oceny komponentu [22]

Table 1. Component assessment criteria [22]

Symbol	Opis kryterium i sposobu jego oceny
K1 [zł/m ²]	koszt materiałów netto do wykonania 1 m ² przegrody, ustalony na podstawie cenników producentów lub hurtowni budowlanych, ceny styczeń 2022 r. Inwestor dąży do jego minimalizacji, mając ograniczone środki na budowę
K2 [kN/m ²]	ciężar dachu (obliczenia z uwzględnieniem wszystkich składowych przegrody, w tym całej konstrukcji); inwestor dąży do jego minimalizacji, traktując jako parametr wpływający na pracochłonność wykonania i czynnik pośrednio związany z negatywnym wpływem na środowisko (emisje w trakcie transportu, zużycie zasobów odnawialnych i nieodnawialnych)
K3 [pkt]	estetyka pokrycia dachu oceniana subiektywnie od 1 (ocena najniższa) do 5 (rozwiązanie uznane za najładniejsze); w obliczeniach ocena będzie traktowana jakby była wyrażona w skali ilorazowej
K4 [pkt]	odnawialność materiałów oceniana subiektywnie w skali 1 do 5, gdzie: 1 – źródła nieodnawialne, 2 – w większości ze źródeł nieodnawialnych, 3 – w przeważającej części z surowców odnawialnych, 4 – materiał z surowcami ze źródeł odnawialnych i recyklingu lub w całości z recyklingu, 5 – materiał w pełni ze źródeł odnawialnych; ocena ustalana jest w przypadku każdego z materiałów; wartość kryterium dla całej przegrody ustalono, ważąc oceny udziałem masy materiału w przegrodzie
K5 [kg ekw. CO ₂ /m ²]	ślad węglowy materiałów składowych wg deklaracji EPD; wartość odnosi się do faz: A1–A3, tj. dostawa surowców (A1), transport (A2), wytwarzanie (A3); w przypadku materiałów drewnopochodnych uwzględniony wychwyty CO ₂ .

Tabela 2. Charakterystyka materiałów użytych w wariantach przegród dachowych [22]

Table 2. Description of materials used in roof variants [22]

Element		S _{ei} [pkt]	G _{ei} [kg ekw. CO ₂ /kg] A1-A3	Surowiec	Źródło danych
Konstrukcja	tarcica sosnowa skandynawska (Szwecja, Norwegia, Finlandia)	5	-1,46*	drewno	Danish Technological Institute, MD20002 EN
	LVL Steico, Steico Sp. z o.o., Czarna Woda	3	-0,93*	drewno, żywice syntetyczne	Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) EPD-STE-20190005-IBC1-DE
	belki dwuteowe Steico Joist/Wall, Steico Sp. z o.o., Czarna Woda	3	-0,64*	drewno, żywice syntetyczne, płyta pilśniowa	Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) EPD-STE-20190106-IBC1-DE
Poszycie	płyta OSB, Swiss Krono Sp. z o.o., Żary	3	-1,45*	drewniane ścinki spajane klejem lub żywicą	Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) EPD-KRO-20200203-IBD1-DE
	płyta G-K, Saint Gobain Rigips, fabryka w Pińczowie	2	0,18*	gips naturalny/syntetyczny, włókna celulozy	ITB RIGIPS systems with gypsum plaster boards RIGIPS PRO and RIGIPS 4PRO™
	STEICOUNiversal płyta izolacyjna/poszycie, Steico Sp. z o.o.	3	-0,48*	włókno drzewne, siarczan glinu, parafina, kleje	Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) EPD-STE-20190106-IBC1-DE
Termoizolacja	węlna skalna twarda, Rockwool (dane uśrednione z 3 fabryk)	2	1,27	bazalt, dolomit, gabro, wapień, żużel, żywica	IBU EPD-DRW-20180119-IBC1-DE
	węlna skalna miękka, Rockwool (dane uśrednione z 3 fabryk)	2	1,27	bazalt, dolomit, gabro, wapień, żużel, żywica	EPD-DRW-20180065-IBC1-DE
	węlna konopna z odpadami tekstylnymi firmy KOBE s.r.o., Czechy	5	-0,63*	włókna konopne z lub bez włókien poliestrowych	EPD International AB, registration number: S-P-02290
	maty Steicoflex, Steico Sp. z o.o., Czarków	4	-0,57*	włókno poliolefinowe, drzewne, siarczan amonu	Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) EPD-STE-20200175-IBA1-DE
Izolacja/Ruszt	wiatroizolacja – membrana FPO/TPO Bauder THERMOFIN F 15	1	2,39	włóknina szklana powlekana olefiną	EPD-BAU-20130189-IBCC-DE
	paroizolacja poddasza VARIO® XTRA Membrane, S-G Isover	1	5,88	poliamid z włókniną poliestrową	EPD International AB, registration number: S-P-01141
	ruszt stalowy do płyt G-K, Saint-Gobain Rigips, fabryka w Płocku	5	2,47	kształtowniki stalowe zimnocięte	ITB RIGIPS systems with gypsum plaster boards RIGIPS PRO and RIGIPS 4PRO™
Pokrycie	blachodachówka, Dachy Prószyński	2	2,27	ruda żelaza, powłoka (tworzywo sztuczne)	Environmental Product Declaration Type III ITB No. 098/2019
	dachówka ceramiczna Braas, dane dot. produkcji w Niemczech	1	0,29	głina, szkliwo (krzemionka, topniki i tlenku glinu)	EPD-BRA-20170030-ICD1-DE
	gont drewniany	5	-0,99*	drewno	brak EPD, wartość szacowana z literatury

* Ilość dwutlenku węgla wyemitowana przy produkcji płyt konopnych i elementów z tarcicy drzewnej jest wartością ujemną z racji pochłaniania go przez drzewo podczas jego wzrostu

Analizę przeprowadzono przy użyciu wielokryterialnej metody PROMETHEE II [23]. W pierwszym etapie wykonano normalizację wartości i-tych przegród j-tych kryteriów o charakterze stymulanty: $R_{ij} = (O_{ij} - \min O_{ij}) / (\max O_{ij} - \min O_{ij})$ i destymulanty: $R_{ij} = (\max O_{ij} - O_{ij}) / (\max O_{ij} - \min O_{ij})$. Następnie porównano analizowane warianty w odniesieniu do przyjętych kryteriów. Wyniki zestawiono w tabeli 4.

Bazując na funkcji preferencji $P_j(a, b) = 0$ dla $R_{a,j} - R_{b,j} \leq 0$, pozostałe wyniki pozostają bez zmian zgodnie z $P_j(a, b) = R_{a,j} - R_{b,j} > 0$. Wartości ważonej różnicy funkcji preferencji obliczono wg wzoru $P(a, b) = \sum_{j=1}^n w_j \cdot P_j(a, b) / \sum_{j=1}^n w_j$, gdzie: $\sum_{j=1}^n w_j = 1$. Zagregowane dane preferencji zestawiono w tabeli 5. Obliczono pozytywne oraz negatywne przepływy preferencji $\varphi^+(i) = \sum_{j=1}^m P(a, b) / (m - 1)$, $\varphi^-(i) = \sum_{j=1}^m P(b, a) / (m - 1)$, gdzie $(a \neq b)$, a następnie

na podstawie funkcji preferencji netto $\varphi(i) = \varphi^+(i) - \varphi^-(i)$ ustalono pozycję rankingową poszczególnych wariantów (tabela 6). Zwycięzcą okazał się dach o konstrukcji z przetworzonego drewna, izolowany płytami drewnopochodnymi i kryty gontem.

Dyskusja i wnioski

Zrównoważone budownictwo to nie prosty wybór materiału czy komponentu budowlanego o mniejszym śladzie węglowym [9]. Od lat opracowuje się metodę analiz cyklu życia, mierniki obejmujące różne aspekty wpływu na środowisko, zbiera dane umiarkowane prowadzenie takich analiz i tworzy narzędzia komputerowe zmniejszające zaporowy wysiłek związany z kompletnym studium LCA [24]. Motywacją do wykonywania pełnych analiz jest jednak ograniczona, ponieważ inwestorzy nie zamawiają ich, jeśli nie muszą.

W niewielu krajach zamierza się wprowadzić obowiązkowe analizy LCA w przypadku planowania przedsięwzięć budowlanych [24, 25]. Analiza LCA budynku jest w praktyce opracowaniem o charakterze naukowym i o jednostkowym zastosowaniu. Na wyniki wpływają założenia dotyczące m.in. długości okresu eksploatacji budynku (np. w przypadku budynków drewnianych w [2, 3] przyjmowano różne okresy eksploatacji – odpowiednio 50 i 100 lat), żywotności komponentów budynku, sposobu zagospodarowania odpadów z rozbiórki (fazy C i D). Na wyliczenie najistotniejszej w emisji CO₂ i zużyciu energii fazy eksploatacji mają też wpływ założenia związane ze źródłami energii – „szkodliwość” tych źródeł prawdopodobnie znacznie zmieni się na przestrzeni 50 ÷ 100 lat istnienia obiektu. Podobnie jest w przypadku analizy śladu wę-

Tabela 3. Warianty konstrukcji dachu – wartości kryteriów na 1 m² przegrody [22]

Table 3. Roof variants – criteria values per 1 m² [22]

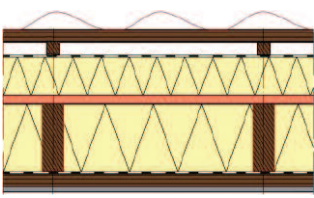
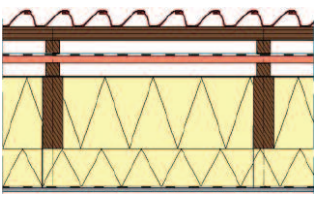
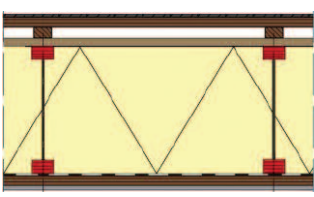
i	Schemat wariantu	e	Nazwa elementu składowego	M _{ei} [kg/m ²]	O _{i,1} [zł/m ²]	O _{i,2} [kN/m ²]	O _{i,3} [pkt]	O _{i,4} [pkt]	O _{i,5} [CO ₂ /m ²]
1	 grubość = 371,5 mm	1	blachodachówka Pruszyński	4,50	201,63	0,54	3	2	10,22
		2	wiatroizolacja Thermofin F15	1,60				1	3,82
		3	welna Rockwool Hardrock 90 mm	13,95				2	17,72
		4	welna Rockwool Steprock 160 mm	6,24				2	7,92
		5	konstrukcja/łaty-tarcica sosnowa	11,48				5	-16,76
		6	deskowanie-tarcica sosnowa 19 mm	8,84				5	-12,92
		7	paroizolacja VARIO XTRA	0,10				1	0,59
		8	płyta G-K Rigips 12,5 mm	8,20				2	1,48
		średnia:							
2	 grubość = 407,5 mm	1	dachówka ceramiczna Braas	60,00	256,5	1,02	5	1	17,40
		2	wiatroizolacja Thermofin F15	1,60				1	3,82
		3	płyta OSB 15 mm	9,22				3	-13,37
		4	welna konopna 290 mm	10,15				5	-6,40
		5	konstrukcja/łaty-tarcica sosnowa	13,25				5	-19,34
		6	paroizolacja VARIO XTRA	0,10				1	0,59
		7	ruszt stalowy Rigips	1,50				1	3,71
		8	płyta G-K Rigips 12,5 mm	8,20				2	1,48
		średnia:							
3	 grubość = 364,5 mm	1	gont drewniany	7,00	362,3	0,46	4	5	-6,93
		2	poszycie Steicouniversal 22 mm	5,23				3	-2,51
		3	belki SteicoJoist/Wall 60/240 mm	5,49				3	-3,51
		4	maty izolacyjne Steicoflex 240 mm	14,4				5	-8,21
		5	fornir LVL	2,60				3	-2,42
		6	łaty-tarcica sosnowa	3,38				5	-4,94
		7	paroizolacja VARIO XTRA	0,10				1	0,59
		8	płyta G-K Rigips 12,5 mm	8,20				2	1,48
		średnia:							

Tabela 4. Różnice znormalizowanych wartości kryteriów (R_{a,j} – R_{b,j})

Table 4. Differences between normalized criteria values (R_{a,j} – R_{b,j})

Porównywane warianty		j = 1	j = 2	j = 3	j = 4	j = 5
a	b					
i = 1	i = 2	0,342	0,857	-1,000	0,572	-0,628
i = 1	i = 3	1,000	-0,143	-0,500	-0,428	-1,000
i = 2	i = 1	-0,342	-0,857	1,000	-0,572	0,628
i = 2	i = 3	0,658	-1,000	0,500	-1,000	-0,372
i = 3	i = 1	-1,000	0,143	0,500	0,428	1,000
i = 3	i = 2	-0,658	1,000	-0,500	1,000	0,372

Tabela 5. Zagregowane dane funkcji preferencji

Table 5. Aggregated values of the preference function

Porównywane warianty		j = 1	j = 2	j = 3	j = 4	j = 5	P(a, b)
a	b	w ₁ = 0,20	w ₁ = 0,14	w ₁ = 0,10	w ₁ = 0,25	w ₁ = 0,31	
i = 1	i = 2	0,068	0,120	0,000	0,143	0,000	0,331
i = 1	i = 3	0,200	0,000	0,000	0,000	0,000	0,200
i = 2	i = 1	0,000	0,000	0,100	0,000	0,195	0,295
i = 2	i = 3	0,132	0,000	0,050	0,000	0,000	0,182
i = 3	i = 1	0,000	0,020	0,050	0,107	0,310	0,487
i = 3	i = 2	0,000	0,140	0,000	0,250	0,115	0,505

głowego materiałów budowlanych, np. drewno uważane jest za materiał przyszłości, zasób odnawialny o „ujemnym śladzie węglowym”. Drzewa magazynują atmosferyczny dwutlenek węgla – więcej, niż zostaje wyemitowane w produkcji materiałów budowlanych z ich drewna. CO₂ tkwi w drewnie póki nie zgnije lub nie zostanie spalone. Wbudowane może przetrwać wiele dziesięcioleci. Scenariusze fazy D przyjmowane w deklaracjach EPD pro-

Tabela 6. Wartości ważonych funkcji preferencji, przepływów preferencji i ranking wariantów

Table 6. Values of the weighted preference functions, preference flows and variant ranking

P(a, b)		b			φ ⁺⁽ⁱ⁾	φ ^{- (i)}	φ(i)	Ranking
a		i = 1	i = 2	i = 3				
a	i = 1	0,000	0,331	0,200	0,266	0,391	-0,125	2
	i = 2	0,295	0,000	0,182	0,238	0,418	-0,180	3
	i = 3	0,487	0,505	0,000	0,496	0,191	0,305	1

ducentów materiałów z drewna naturalnego i przetworzonego zakładają, że materiał z rozbiórki można wykorzystać ponownie w oryginalnej postaci lub przetworzyć na produkty drewnopochodne (dodatkowy „ujemny ślad węglowy” wynika z zbilansowania niewielkiej emisji towarzyszącej przygotowaniu tego materiału do użytku i „zaoszczędzeniu” przez niewyprodukowanie materiałów z nowego surowca). Inne scenariusze zakładają spalanie z odzyskiem energii lub kompostowanie z odzyskiem metanu i jego spalaniem w celu produkcji energii. Wykorzystanie tej biomasy ma zastąpić spa-

lanie paliw kopalnych (a więc ograniczyć uwalnianie CO₂, który od milionów lat był wyłączony z obiegu) i również ma jeszcze „ujemny ślad węglowy”, choć wobec planów całkowitego odejścia od paliw kopalnych ślad ten będzie co najwyżej „zerowy” [12]. Dążenie do zwiększenia wykorzystania drewna w budownictwie oznacza jednak zwiększenie popytu wobec ograniczonych zasobów. Drewno jest materiałem odnawialnym, ale o kilkudziesięcioletnim „cyklu produkcyjnym”. Wobec zmian klimatu, środowiskowe koszty pozyskania nowego drewna (tworzenia i utrzymania upraw leśnych) mogą negatywnie odbić się zarówno na jego walorach, jak i na poleganiu na lasach jako „bronii” w walce z globalnym ociepleniem. Stąd znaczenie strategicznego planowania zrównoważonej gospodarki leśnej [26 – 29].

Poszukując odpowiedzi na pytania: czy budynek drewniany jest lepszy od murowanego? oraz czy budynek pasywny jest lepszy od energooszczędnego?, należy testować różne (liczne) scenariusze i brać pod uwagę niepewność danych wejściowych, a odpowiedź nie będzie uniwersalna [2, 3]. Podobnie jest w przypadku porównania rozwiązań projektowych poszczególnych elementów budynku.

Przedstawiona w artykule wycinka i uproszczona analiza porównawcza elementów budynku jest jeszcze bardziej wrażliwa na założenia niż kompletne analizy LCA, które bazują na znormalizowanych metodach (w tym oceny wpływu niepewności założeń na wynik) i jednolitym zakresie kryteriów. Zaprezentowany sposób porównania rozwiązań projektowych może być użyteczny tylko w kontekście określonej sytuacji decyzyjnej. Subiektywne oceny niektórych kryteriów, ich dobór, wagi, wybór metody szeregowania wariantów łatwo zakwestionować. Nawet używanie danych ilościowych z deklaracji środowiskowych EPD pozornie zwiększa precyzję wyliczeń: wybór źródła danych ma wpływ na wyniki [30]: identyczne co do cech użytkowych materiały, lecz pochodzące od różnych producentów i zastosowane w obiektach o róż-

nej lokalizacji (kraj, region) znacznie mogą się różnić wpływem na środowisko.

Literatura

- [1] Goh CS, Chong HY, Jack L, Mohd Faris AF. Revisiting triple bottom line within the context of sustainable construction: A systematic review. *J Clean Prod.* 2019; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119884>.
- [2] Lewandowska A, Noskowiak A, Pajchrowski G, Strykowski W, Witczak A. Środowiskowa ocena cyklu życia modelowych budynków drewnianych i murowanych jako przykład zastosowania techniki LCA. Poznań: ITD. 2012.
- [3] Środowiskowe aspekty nowoczesnego budownictwa drewnianego. Warszawa: KAPE; 2019.
- [4] Bucoń R, Czarnigowska A. Selecting Criteria for Assessing „Environmentally-Friendly” Material Options in Construction: Part I. In: Serrat C, Casas, JR, Gibert V, editors. *Current Topics and Trends on Durability of Building Materials and Components.* 2022; https://www.scipedia.com/public/Draft_Content_901761139.
- [5] Gicala M, Sobotka A. Analiza rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych budynków z uwzględnieniem wymogów zrównoważonego rozwoju. *Prz Nauk Inż. Kszt Środ.* 2017; <https://doi.org/0.22630/PNIKS.2017.26.2.14>.
- [6] Hagedorn M, Ksit B. Analiza wytycznych certyfikacji zrównoważono-ekologicznej na podstawie użytkowanych budynków. *Przegląd Budowlany.* 2021; 5-6: 54-59.
- [7] Gajzler M, Dziadosz A, Szymański P. Problemy wyboru metody wspomagającej podejmowanie decyzji w budownictwie. *Czas Tech.* 1-B. 2010; 2 (107): 71 – 84.
- [8] 2021 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi: UNEP, 2021. <https://globalabc.org/resources/publications/2021-global-status-report-buildings-and-construction>.
- [9] Zerowy ślad węglowy budynków. Mapa drogowa dekarbonizacji budownictwa do roku 2050, PSBE, 2021. <https://plgbc.org.pl/zrównowazone-budownictwo/dekarbonizacja-budownictwa>.
- [10] Komunikat Komisji COM/2020/662 Fala renowacji na potrzeby Europy – ekologiczna budynków, tworzenie miejsc pracy, poprawa jakości życia.
- [11] Bringing embodied carbon upfront. Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon, WGBC, 2019. <https://www.worldgbc.org/embodied-carbon>.
- [12] City Policy Framework for Dramatically Reducing Embodied Carbon. CNCA, 2021. <https://www.embodiedcarbonpolicies.com>.
- [13] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, t.j. Dz.U. 2019 poz. 1064 z późn. zm.
- [14] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z 27 lutego 2015 r. w sprawie metodo-

logii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej, Dz. U. 2015 poz. 376 z późn. zm.

- [15] Duraó V, Silvestre JD, Mateus R, de Brito J. Assessment and communication of the environmental performance of construction products in Europe: Comparison between PEF and EN 15804 compliant EPD schemes. *Res ConsRec* 2020; <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104703>.
- [16] Anderson J, Moncaster A. Embodied carbon, embodied energy and renewable energy: a review of Environmental Product Declarations. *Proc Inst Civ Eng Struct Build.* 2022; <https://doi.org/10.1680/jstbu.21.00160>.
- [17] <https://www.itb.pl/epd.html>, dostęp maj 2022.
- [18] <https://www.eco-platform.org/epd-data.html>, dostęp maj 2022.
- [19] <https://ibu-epd.com>, dostęp maj 2022.
- [20] <https://www.environdec.com>, dostęp maj 2022.
- [21] <https://www.oekobaudat.de/>, dostęp maj 2022.
- [22] Gierat J. Projekt jednorodzinny budynek mieszkalny o konstrukcji szkieletowej drewnianej z doбором rozwiązań materiałowych. Praca dyplomowa inżynierska. Promotor: R. Bucoń. Politechnika Lubelska, 2022.
- [23] Ishizaka A, Nemety P. Multi-criteria decision analysis. Chichester: Wiley, 2013.
- [24] Zimmermann RK, Bruhn S, Birgisdóttir H. BIM-based life cycle assesment of buildings – an investigation of industry practice and needs. *Sustainability* 2021; <https://doi.org/10.3390/su13105455>.
- [25] Birgisdóttir H, Rasmussen FN. Development of LCAByg: A National Life Cycle Assessment Tool for Buildings in Denmark. *IOP Conf Series Earth Env Sci.* 2019; <https://doi.org/10.1088/1755-1315/290/1/012039>.
- [26] Wang H, Takano A, Tamura K. An attempt to create the holistic flow chart of forest resources. *IOP Conf S Earth Env Sci.* 2020; <https://doi.org/10.1088/1755-1315/588/4/042039>.
- [27] Kaliszewski A. Cele polityki leśnej w Polsce w świetle aktualnych priorytetów leśnictwa w Europie. Część 5. Ku nowej strategii rozwoju leśnictwa w Polsce. *Leśne Prace Badawcze.* 2018; 79 (4): 355 – 364.
- [28] Lier M, Köhl M, Korhonen KT, Linser S, Prins K, Talarczyk A. The New EU Forest Strategy for 2030: A New Understanding of Sustainable Forest Management? *Forests.* 2022; <https://doi.org/10.3390/f13020245>.
- [29] Diaz DD, Loreno S, Ettl GJ, Davies B. Tradeoffs in Timber, Carbon, and Cash Flow under Alternative Management Systems for Douglas-Fir in the Pacific Northwest. *Forests.* 2018; <https://doi.org/10.3390/f9080447>.
- [30] Tomaszewska J, Bekierski D, Piasecki M. Deklaracje środowiskowe wyrobów budowlanych narzędziem wspierającym rozwój zrównoważonego budownictwa. *Przegląd Budowlany.* 2017; 10: 34 – 36.

Badania finansowane z Funduszu Nauki FN-10 oraz Funduszu Dyscypliny FD-20/IL-4/010, FD-20/IL-4/011, Politechnika Lubelska.

Przyjęto do druku: 24.10.2022 r.