

## **OPTIMALIZACJA PROJEKTOWANIA BUDYNKÓW PRZYJAZNYCH DLA ŚRODOWISKA Z WYKORZYSTANIEM OCENY LCA**

Arkadiusz WĘGLARZ\*, Piotr ZIEMBICKI\*\*

\* Politechnika Warszawska, Instytut Inżynierii Budowlanej  
al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa, e-mail: a.weglarz@il.pw.edu.pl

\*\* Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Środowiska  
ul. Prof. Z. Szafrana 15, 65-516 Zielona Góra, e-mail: P.Ziembicki@iis.uz.zgora.pl

**Streszczenie:** Artykuł zawiera podsumowanie wyników tematu badawczego PT7.1 Metody komputerowej optymalizacji projektowania budynków przyjaznych dla środowiska z wykorzystaniem oceny LCA realizowanego w ramach projektu: „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”. W wyniku prac badawczych zaktualizowano bazy dotyczące emisji CO<sub>2</sub> i skumulowanego zużycia energii dla głównych materiałów budowlanych w Polsce oraz sformułowano kilka zadań optymalizacyjnych, dla których następnie przeanalizowano możliwość zastosowania metod optymalizacji wielokryterialnej.

**Słowa kluczowe:** Metoda LCA, BIM, emisja CO<sub>2</sub>, energia skumulowana, optymalizacja wielokryterialna.

### **1. WSTĘP**

Celem naukowym tematu badawczego pt. „Metody komputerowej optymalizacji projektowania budynków przyjaznych dla środowiska z wykorzystaniem oceny LCA” było opracowanie metod komputerowej optymalizacji projektów budynków ekologicznych, czyli obiektów zapewniających właściwe warunki życia mieszkańców, przede wszystkim pod kątem komfortu cieplnego, a jednocześnie przyjaznych środowisku. Projektowanie budynków ekologicznych i energooszczędnych jest złożonym procesem kompleksowego kojarzenia wymogów architektoniczno-urbanistycznych, technologicznych, ekonomicznych i ekologicznych, co prowadzi do optymalizacji wielokryterialnej wymagającej użycia zaawansowanych metod komputerowych. Celem społeczno-ekonomicznym projektu badawczego było umożliwienie projektowania budynków optymalizującego ich negatywny wpływ na środowisko w całym cyklu życia (LCA).

### **2. BAZY DANYCH O WARTOŚCIACH EMISJI CO<sub>2</sub> I WARTOŚCIACH ENERGII SKUMULOWANEJ DLA GŁÓWNYCH TECHNOLOGII BUDOWLANYCH W POLSCE**

#### **2.1. Pozyskiwanie danych**

W literaturze technicznej można znaleźć wartości wskaźników skumulowanego zużycia energii (skumulowana energochłonność wyrobów) oraz emisji CO<sub>2</sub> dla większości podstawowych materiałów budowlanych. Należy przy tym pamiętać, że wskaźniki te nie są wartościami jednoznacznie określonymi. Porównując wartości określające energochłonność skumulowaną, w różnych krajach, można dostrzec znaczne różnice. Wynikają one głównie z różnic metodycznych, jak na przykład definicji granic systemu, różnic w pochodzeniu i energochłonności surowców, różnic energochłonności procesów produkcyjnych.

Istnieje szeroka gama programów komputerowych do obliczeń przy wykorzystaniu metody LCA, które posiadają swoje bazy danych do tego celu niezbędnych. W większości są to programy pisane na konkretny rynek i nie nadają się do wykorzystania w innym kraju. W związku z faktem, że efektem końcowym tematu badawczego miał być szeroko dostępny program komputerowy przeznaczony dla projektantów oraz inwestorów zdecydowano się zbierać dane korzystając z powszechnie dostępnej literatury oraz Internetu. Ze względu na globalizację światowej gospodarki dane zbierano zarówno ze źródeł krajowych [7],[8] jak i zagranicznych [4],[5],[6].

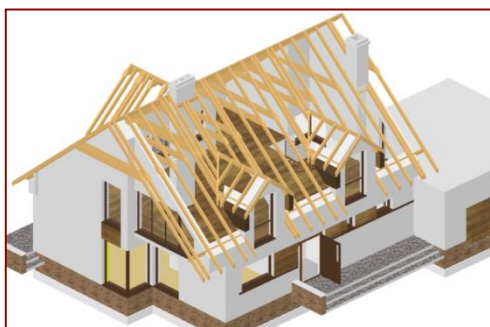
## 2.2. Bazy danych

Na podstawie zebranych informacji utworzono w programie Excel bazy danych. Bazy te zostały wykorzystane w dalszych etapach pracy badawczej, przy testowaniu procedur optymalizacyjnych i budowie aplikacji komputerowe LCA.

## 3. PARAMETRYZACJA OBIEKTOWA W PROCESIE OPTIMALIZACJI PROJEKTOWANIA ARCHITEKTONICZNO-BUDOWLANEGO

### 3.1. Proces parametryzacji

Przez proces parametryzacji projektu obiektu budowlanego należy rozumieć podział projektowanego budynku na elementy składowe w taki sposób, aby tym elementom (obiektom) można przypisać jednolite cechy określane przez wymierne wartości np. wymiary geometryczne elementu, waga elementu, skumulowane zużycie energii niezbędne do powstania elementu, skumulowaną emisję CO<sub>2</sub> niezbędną do powstania elementu itp. Takimi elementami (obiektami) może być fragment ściany, okno, ale również cały system grzewczy z wyodrębnionym źródłem ciepła. Zmiana materiałów, z jakich zbudowane są elementy powoduje automatyczne zmiany wartości parametrów opisujących elementy budynków. Cały proces parametryzacji jest niezbędny do przeprowadzenia w kolejnym etapie optymalnego wyboru wariantów techniczno-ekonomicznych projektowanego budynku według funkcji kryterium, których argumentami są wartości parametrów związane z wyodrębnionymi elementami (np. skumulowane zużycie energii). Celem badawczym było stworzenie lub wykorzystanie istniejącego narzędzia informatycznego, które w sposób w miarę automatyczny przeprowadziłoby proces parametryzacji obiektu budowlanego przy wykorzystaniu dokumentacji architektonicznej opracowanej w popularnym programie CAD.



Rys. 1. Przykładowy model budynku parterowego  
Fig. 1. An example of one-storey building

## 3.2. Modelowania w technice BIM

W wyniku analizy literatury ([2], [3]) dotyczącej zdefiniowanego wyżej problemu parametryzacji wybrano modelowanie BIM, jako najlepszy sposób opisu budynku umożliwiający zastosowanie w kolejnym etapie projektowania wielokryterialnych metod optymalizacyjnych.

## 4. METODY OPTIMALIZACJI WIELOKRYTERIALNEJ ZASTOSOWANE W PROCESIE PROJEKTOWANIA BUDYNKÓW PRZYJAZNYCH ŚRODOWISKU

### 4.1. Opis zadania optymalizacji wielokryterialnej

Punktem wyjścia metody optymalizacyjnej jest schemat ideowy budynku, który opisuje wszystkie elementy struktury budynku niezbędne do jego wzniesienia od momentu uzyskania pozwolenia na budowę do stanu z częściowym wykończeniem, np. dla budynku mieszkalnego jest to stan bez podłóg, drzwi wewnętrznych i białego montażu (najczęściej w takim stanie wykończenia przekazywane jest mieszkanie klientom przez deweloperów). Poziom szczegółowości podziału na elementy struktury budynku zależny jest od przyszłego użytkownika proponowanej w niniejszej pracy metody optymalizacyjnej i znacząco wpływa na jej dokładność. Dla każdego elementu struktury budynku (ściany strop, dach itp.) przyjęto możliwość wyboru wariantów materiałowych w określonej technologii. Na rys. 2 pokazano fragment schematu podziału budynku na elementy struktury. Zdaniem autorów taki podział jest wystarczający na osiągnięcie zadawalającego z punktu widzenia praktyki inżynierskiej poziomu dokładności obliczeń w metodzie optymalizacyjnej.

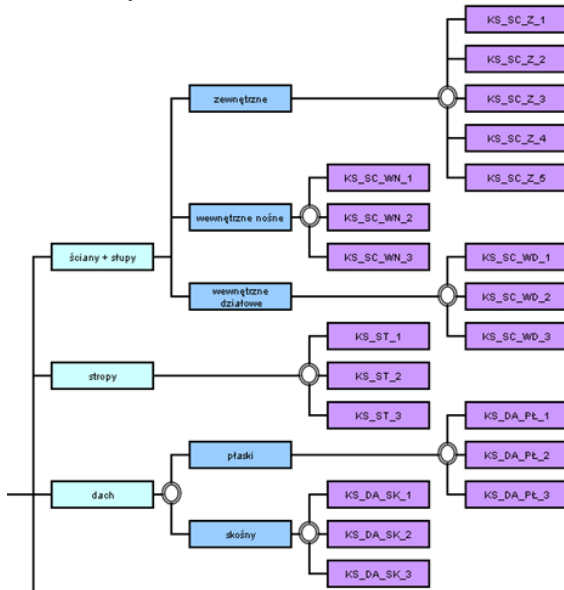
Schemat jest znanym z literatury dotyczącej badań operacyjnych drzewem decyzyjnym, gdzie na każdym łuku podawane są trzy obowiązkowe wielkości:

- $E_i$  – energia skumulowana, czyli suma całkowitego zużycia energii niezbędnej do wykonania elementu budynku i energii zużywanej przez budynek w czasie 50 lat eksploatacji z powodu istnienia tego konkretnego elementu struktury,
- $C_i$  – skumulowana emisja CO<sub>2</sub>, czyli całkowita emisja dwutlenku węgla z procesów prowadzących do powstania elementu struktury budynku (np. ścian) i emisji powstałej w wyniku użytkowania tego elementu przez zakładane 50 lat istnienia obiektu,
- $K_i$  – koszt wbudowania elementu struktury.

Dodatkowo może być:

- $O_i$  – wielkość odpadów powstałych w procesie produkcji i eksploatacji danego elementu struktury budynku,

- $P_i$  – preferencje inwestora – określane kolejnością preferowanych wariantów, wartość 1 oznacza najbardziej preferowany przez inwestora lub projektanta wariant materiałowy.



Rys. 2. Fragment schematu ideowego budynku.  
Fig. 2. An extract of a block diagram of the building

Zadanie decyzyjne polega na wyborze takiego wariantu konstrukcyjno – materiałowego całego budynku, dla którego osiągnięte jest minimum, co najmniej trzech (może być więcej) funkcji kryterium:

- $E$  – całkowitego skumulowanego zużycia energii w cyklu życia budynku,
- $C$  – całkowitej skumulowanej emisji dwutlenku węgla w cyklu życia budynku,
- $K$  – sumarycznego kosztu wykonania obiektu.

Przy założeniu, że obiekt analizy zostanie wybudowany to znaczy zostaną wybrane technologie wykonania wszystkich elementów budynku.

Ogólny model matematyczny zadania ma postać:

$$\begin{cases} \min E = \sum_{i=1}^n E_i \\ \min E = \sum_{i=1}^n C_i \\ \min E = \sum_{i=1}^n K_i \end{cases} \quad (1)$$

Dane dotyczące:  $E_i$  – energii skumulowanej i  $C_i$  – skumulowanej emisji  $CO_2$ , pobierane są z wyżej opisanych baz danych.

Dane dotyczące kosztów danych elementów ( $K_i$ ) są uzyskiwane z dostępnych na rynku katalogów cen: materiałów budowlanych, pracy sprzętu i robocizny. Inne

dane dotyczące kryteriów optymalizacji zdefiniowanych przez projektanta lub inwestora są uzyskiwane z odpowiednich ogólnodostępnych baz danych, roczników statystycznych lub danych otrzymanych od potencjalnych wykonawców inwestycji.

#### 4.2. Zastosowane metody rozwiązywania zadania optymalizacji wielokryterialnej

Spośród zaawansowanych matematycznie metod oceny wielokryterialnej, w oparciu o [1], wybrano do dalszej analizy następujące metody: Sumy ważonej, ELECTRE, Punktu idealnego, Entropii, AHP oraz metodę wykorzystującą elementy logiki rozmytej, ponieważ:

- mogą obejmować wszystkie rozpatrywane kryteria,
- szeregują jednoznacznie wybór wariantu najlepszego spośród dostępnych wariantów,
- prowadzą do rozwiązania w sposób nieskomplikowany, ze stosunkowo niewielką liczbą obliczeń,
- obiektywizują oceny ekspertów.

### 5. APLIKACJA KOMPUTEROWA LCA

#### 5.1. Opis programu

Aplikacja LCA to narzędzie do wielokryterialnej analizy wariantów, w szczególności przeznaczone do oceny cyklu życia obiektu budowlanego. Składa się z dwóch modułów: obliczeniowo-analitycznego oraz z kalkulatora  $CO_2$  i zużycia energii skumulowanej.

Narzędzie pozwala na ocenę zaproponowanych wariantów w oparciu o następujące metody optymalizacyjne:

- Sumy ważonej,
- ELECTRE,
- Punktu idealnego,
- Entropii,
- Zbiory rozmyte.

Standardowo ocena wariantów konstrukcyjno-materiałowych dokonywana jest w oparciu o predefiniowane kryteria, którymi są:

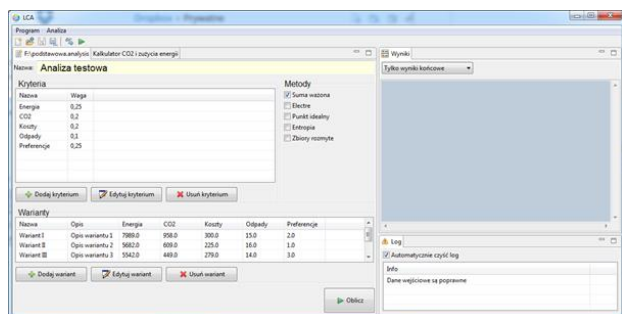
- $E$  – skumulowana energia całkowita,
- $C$  – skumulowana emisja  $CO_2$ ,
- $K$  – koszty inwestycyjne,
- $O$  – odpady,
- $P$  – preferencje inwestora.

Moduł kalkulatora  $CO_2$  i zużycia energii pozwala na obliczenie zużycia skumulowanej energii oraz emisji  $CO_2$  w procesie budowy i eksploatacji budynku. Zużycie to wyznaczane jest w następujących kategoriach:

- Maszyny,
- Materiały,
- Ściany,
- Stropy i dachy,

- Okna,
- Transport,
- Eksploatacja-paliwo,
- Eksploatacja-energia.

Program zawiera bazę danych słownikowych, z której pobierane są dane dotyczące jednostkowego zużycia skumulowanej energii oraz emisji CO<sub>2</sub>. Na rys. 3 pokazano okno aplikacji LCA.



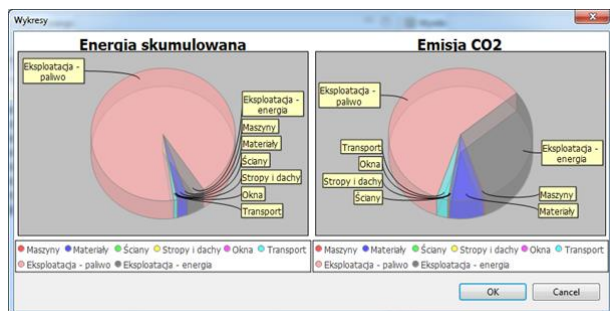
Rys. 3. Okno aplikacji LCA  
Fig. 3. LCA application window

## 5.2. Wyniki działania programu LCA

Wyniki obliczeń wyświetlane są na karcie wyników. Ich szczegółowość zależna jest od ustawienia listy rozwijanej. Dostępne są następujące ustawienia:

- Tylko wyniki końcowe,
- Wyniki pośrednie i końcowe.

Wyniki obliczeń mogą być zapisane w zewnętrznym pliku tekstowym. Część wyników (z kalkulatora CO<sub>2</sub>) prezentowana jest na wykresach ( patrz rys. 4)



Rys. 4. Przykładowy wykres wyników z Kalkulatora CO<sub>2</sub>  
Fig. 4. Sample results graph from the CO<sub>2</sub> Calculator

## 6. PODSUMOWANIE

Zastosowanie systemów BIM w procesie parametryzacji obiektowej oraz w metodzie poliolotymalnego projektowania budynków przyjaznych środowisku wydają się być właściwe. Problemem przy wdrożeniu tych systemów jest brak bezbłędnej współpracy aplikacji BIM z innymi aplikacjami wykorzystywanymi w procesie

projektowym. Dlatego zbudowano program komputerowy wykorzystujący metodę LCA, dane z systemów BIM oraz metody optymalizacyjne, który w sposób bezpośredni może być używany przez projektantów nowych budynków.

## COMPUTER OPTIMIZATION METHODS IN DESIGNING ENVIRONMENTALLY FRIENDLY BUILDING USING THE LCA EVALUATION

**Summary:** The article presents a summary of the results within the research topic PT7.1 Computer optimization methods in designing environmentally friendly building using the LCA evaluation realized within the framework of a research project called “Innovative means and effective methods for improving safety and durability of construction works and transport infrastructure in the strategy of sustainable development”. As a result of the research update of the database on CO<sub>2</sub> emissions and cumulative energy consumption for the main construction materials in Poland was made. Also a several optimization tasks were formulated and afterwards analyzed in terms of the possibility of using multi-criteria optimization methods.

## Literatura

- [1] Książek M., *Wielokryterialna ocena rozwiązań projektowych budynków*, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska Wydział Inżynierii Lądowej, Warszawa 2010.
- [2] Eastman C., *Building Information Modeling: Case Studies*, pobrano z: <http://dcom.arch.gatech.edu/class/BIMCaseStudies/>, 10, Marzec 2010,
- [3].GSA., *BIM Library*, pobrano z: <http://www.gsa.gov/portal/content/103735>, 7, Marzec
- [4]<<https://www.bsria.co.uk/bookshop/search/?advanced=1&wf%5bq1%5d=Prof+Hammond>
- [5]. Hammond G., Jones C., *Inventory of Carbon and Energy (ICE)*, Version 1.6a., 2008
- [6] Blanchard S., Reppe P., *Life Cycle Analysis of a Residential Home in Michigan* 1998,
- [7] Górzyński J., *Podstawy analizy środowiskowej wyrobów i obiektów*, WNT, 2007
- [8]. Piasecki M., *Instrukcja oceny energetyczno-środowiskowej budynku w oparciu o uproszczoną metodę E-audyty*