



POLITECHNIKA POZNAŃSKA

**Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
INSTYTUT INŻYNIERII ŚRODOWISKA
I INSTALACJI BUDOWLANYCH**

Mgr inż. Bartosz RADOMSKI

**Metodyka projektowania
budynków mieszkalnych
o dodatnim bilansie energetycznym**

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Promotor

Prof. dr hab. inż. Tomasz MRÓZ

Poznań 2020

1. IDENTYFIKACJA PROBLEMU

W efekcie wyczerpywania się surowców naturalnych – będących nośnikami energii konwencjonalnej, wzrostu bogactwa społeczeństwa i łatwości pozyskiwania energii, a ponadto utrzymującego się od pewnego czasu trendu ograniczania zużycia energii pierwotnej pod każdą jej formą, powstają budynki zgodne z ideą zrównoważonego rozwoju. Budownictwo przyjazne środowisku oraz człowiekowi – realizowane zgodnie z powyższym założeniem – uwzględnia przeciwdziałanie nadmiernemu zubożeniu ośrodka naturalnego poprzez oszczędzanie jego zasobów, w tym paliw kopalnych, a także zapobieganie jego zanieczyszczeniu. Wzrost dobrobytu społeczeństwa następuje synergicznie z ochroną środowiska naturalnego przy zachowaniu harmonii. Istotną cechą idei zrównoważonego rozwoju jest więc jej wielopłaszczyznowość, czyli taki rozwój podstawowych elementów systemu kształtującego przyszłość społeczności ludzkiej, tj. środowiska, społeczeństwa i gospodarki, aby żaden z nich nie stanowił zagrożenia dla pozostałych. Nie ulega wątpliwości, że budownictwo kubaturowe ma wpływ na wyżej wymienione elementy.

Do aspektów środowiskowych kwalifikuje się cechy związane z obiektem budowlanym w pełnym cyklu jego życia, mogące oddziaływać na środowisko naturalne. Wśród nich najczęściej wymienia się, m.in. potencjały: wzmacniania efektu cieplarnianego, niszczenia warstwy ozonowej, eutrofizacji i zakwaszania, a ponadto mikroklimat, emisję ditlenku węgla oraz substancji niebezpiecznych, wytwarzanie odpadów, zużycie wody.

Do aspektów społecznych zalicza się, m.in. warunki mikroklimatu w pomieszczeniach i możliwość ich indywidualnej regulacji przez użytkownika, jakość powietrza wewnętrznego, wody pitnej, komfort akustyczny i wizualny, a ogólnie rzecz ujmując parametry komfortu klimatycznego, a także efektywne wykorzystanie powierzchni, adaptowalność, brak barier, publiczny dostęp do obiektu i bezpieczeństwo.

Wśród aspektów ekonomicznych wskazuje się wszystkie składowe związane z budynkiem w pełnym cyklu jego życia, wpływające na rozwój ekonomiczny otoczenia. Są to, m.in. analiza kosztów cyklu życia obiektu (LCA), pozwalająca na oszacowanie wszelakich kosztów związanych z obiektem, koszty inwestycyjne poszczególnego rozwiązania, opłaty eksploatacyjne itd.

Warto podkreślić, że budynki mieszkalne odgrywają ważną rolę w zużyciu energii na całym świecie. Budynek wykorzystuje energię przez całe swoje życie, tj. od budowy, poprzez użytkowanie, aż po rozbiórkę. Wysokoefektywny, zrównoważony obiekt powinna cechować wysoka wydajność energetyczna, minimalizacja wewnętrznych i zewnętrznych strat energii oraz utrzymanie pożądanych warunków komfortu klimatycznego przy niewielkim koszcie oraz przy minimalnym wpływie na środowisko. Coraz większą wagę przywiązuje się do metod służących poprawie efektywności wykorzystania paliw kopalnych lub zastępuje się ich zużycie odnawialnymi nośnikami energii. Synergia tych działań dla budownictwa mieszkalnego może przyczynić się do spadku udziału gospodarstw domowych w finalnym zużyciu energii pierwotnej, a tym samym do redukcji emisji gazów cieplarnianych do środowiska naturalnego, co jest zgodne – jak już wspomniano – z ideą zrównoważonego rozwoju.

W ramach przeciwdziałania zmianom klimatu konieczne jest wprowadzenie reform w procesie projektowania budynków mieszkalnych, poprzez:

- obniżenie zapotrzebowania na ciepło, chłód i energię elektryczną, na które wpływ ma: kształt, struktura i charakterystyka energetyczna budynku oraz jego techniczne wyposażenie,
- wykorzystanie niekonwencjonalnych i odnawialnych źródeł energii,
- zwiększenie sprawności systemów wykorzystywanych do zapewnienia komfortu klimatycznego w budynku,
- zwiększenie sprawności przetwarzania energii przez urządzenia wyposażenia domowego,
- umożliwienie dwukierunkowego przepływu energii w każdej z postaci,
- maksymalne wykorzystanie naturalnych (pasywnych) strategii wspomagania ogrzewania i chłodzenia oraz wykorzystania światła naturalnego.

Przygotowanie projektu budowlanego jest w istocie procesem rozwiązywania problemów decyzyjnych i dlatego wymaga twórczego myślenia. Dotychczas nie opracowano metodyki projektowania budynków mieszkalnych z otwartym zbiorem kryteriów decyzyjnych, która uwzględniałaby modelowanie preferencji decydenta wykorzystujące na ten cel badania statystyczne grupy decydentów. Brakuje także metodyki odnoszącej się do wzajemnej zależności kryteriów decyzyjnych. Konieczne jest więc opracowanie nowej metodyki projektowania budynków mieszkalnych uwzględniającej powyższe wytyczne, zgodnie z ideą zrównoważonego rozwoju, umożliwiającej obniżenie globalnej konsumpcji nieodnawialnej energii pierwotnej w sektorze gospodarstw domowych oraz – w oparciu o szereg kryteriów i parametrów, stanowiących zbiór otwarty – zgodnie z określoną preferencją decydenta przy wzięciu pod uwagę relacji występujących pomiędzy kryteriami decyzyjnymi. Wybór kompromisowego rozwiązania staje się problemem decyzyjnym. Wymaga użycia jednej (lub wielu) z wielokryterialnych metod wspomagania podejmowania decyzji. Celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest więc opracowanie nowatorskiej metodyki projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym.

2. TEZY ROZPRAWY

- 1) Proces projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym jest problemem wielokryterialnym, dla którego rozwiązania konieczne jest zastosowanie metodyki (algorytmu) uwzględniającej szereg zależnych od siebie zmiennych (kryteriów) decyzyjnych.
- 2) Kryteria decyzyjne mogą być wzajemnie od siebie zależne, przez co konieczne jest wyznaczenie relacji między nimi (wag relacji).
- 3) Wybór dopuszczalnych technicznie rozwiązań możliwy jest po stworzeniu modelu preferencji decydenta, którego budowa opiera się o badania wybranej grupy decydentów.
- 4) Skuteczność metodyki projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym powinna zostać zweryfikowana poprzez zastosowanie jej dla wybranego studium przypadku.

3. CELE BADAWCZE

Najważniejszym celem naukowym rozprawy doktorskiej jest opracowanie metodyki projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym zgodnych z zasadami zrównoważonego rozwoju. Stworzono więc otwarty zbiór kryteriów decyzyjnych i wybrano takie, które spełniają szereg postulatów czytelnych dla wszystkich uczestników procesu podejmowania decyzji (wyczerpujące, spójne i pozbawione redundancji). Kluczowym aspektem metodyki jest wyszczególnienie preferencji zależnych i niezależnych od decydenta. Pierwsze z nich wyznacza się, przeprowadzając ankietyzację grupy celowej (osób zainteresowanych budową budynków mieszkalnych) z zastosowaniem badań społecznych. Preferencje niezależne od decydenta polegają na określeniu zależności (relacji) pomiędzy poszczególnymi kryteriami oceny, które wyznacza się, przeprowadzając ankietyzację grupy ekspertów.

Dla realizacji celu naukowego pracy zidentyfikowano następujące zadania badawcze:

- 1) Określenie zasad projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym.
Zadanie miało charakter poznawczy i teoretyczny. Wykonano przegląd i analizę krytyczną literatury oraz norm, standardów projektowania. Sformułowano zasady i wytyczne projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym.
- 2) Opis powszechnie znanych wielokryterialnych metod wspomaganie podjęcia decyzji oraz wybór kilku z nich w celu budowy metodyki.
Zadanie miało charakter poznawczy i teoretyczny. Wykonano przegląd i opis znanych wielokryterialnych metod wspomaganie podejmowania decyzji oraz wybrano kilka z nich, które zostały użyte w celu budowy metodyki projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym.
- 3) Opracowanie metodyki projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym. Stworzono autorski algorytm metodyki projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym.
- 4) Budowa otwartego zbioru kryteriów decyzyjnych i wybór grupy kryteriów do dalszych analiz. Zadanie miało charakter poznawczy. Wykonano przegląd i opis matematyczny kryteriów decyzyjnych, które uporządkowano w grupy kryteriów głównych. Utworzono zbiór kryteriów głównych oraz przypisanych do nich podkryteriów decyzyjnych.
- 5) Identyfikacja relacji pomiędzy kryteriami decyzyjnymi – ankietyzacja zespołu ekspertów (metoda delficka) z wykorzystaniem metody DEMATEL. Zadanie miało charakter badawczy.
- 6) Określenie profilu preferencji decydenta – ankietyzacja grupy decydentów (metoda badań społecznych) z wykorzystaniem metody AHP/ANP. Zadanie miało charakter badawczy.
- 7) Weryfikacja metodyki projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym dla wybranych rzeczywistych obiektów. Zadanie miało charakter aplikacyjny.

4. WERYFIKACJA POSTAWIONYCH TEZ

4.1. Zasady projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym

Obowiązujące od 1 stycznia 2009 roku w Polsce Rozporządzenie Ministra Infrastruktury dotyczące metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku po raz pierwszy uporządkowało kwestie oceny energetycznej obiektów architektonicznych, która dotąd ograniczała się tylko do wskazania granicznych współczynników przenikania ciepła dla przegród zewnętrznych budynku i wskazówek jakościowych dotyczących konieczności stosowania rozwiązań ograniczających zużycie energii. Historia funkcjonowania rozporządzenia, wielokrotnie nowelizowanego, wskazuje, że tylko częściowo wykorzystano potencjał ograniczenia zużycia energii pierwotnej w sektorze środowiska zabudowanego.

Konieczne jest zatem wprowadzenie kolejnych działań obniżających intensywność energetyczną polskiej gospodarki w sektorze środowiska zabudowanego, w tym budownictwa mieszkalnego. Należy dążyć, by każdy nowy budynek mieszkalny i/lub modernizowany był projektowany jako obiekt o dodatnim bilansie energetycznym, wpływając bezpośrednio i znacząco na poprawę wskaźnika intensywności energetycznej gospodarki Polski.

W dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE z dnia 19 maja 2010 roku wprowadzono pojęcie budynku o niemal zerowym zużyciu energii (nZEB), czyli obiektu o bardzo wysokiej charakterystyce energetycznej obejmującej liczbowy wskaźnik zużycia energii pierwotnej wyrażony w kWh/m² na rok. Niemal zerowa lub bardzo niska ilość wymaganej energii powinna pochodzić w bardzo dużym stopniu z energii pozyskiwanej ze źródeł odnawialnych (w tym energii ze źródeł odnawialnych wytwarzanej na miejscu lub w pobliżu) oraz wynikać z zastosowania wydajnych rozwiązań instalacyjno-konstrukcyjnych. Określa tym samym minimalny standard nowo wznoszonych budynków, który w pełni obowiązuje od 1 stycznia 2019 roku dla obiektów zajmowanych przez władze publiczne oraz będące ich własnością, natomiast od 1 stycznia 2021 roku ma moc prawną dla wszystkich nowo budowanych budynków. Powyższa definicja nie precyzuje, czy projektowany obiekt powinien być samowystarczalny energetycznie, co oznacza, że dopuszczone jest bilansowanie energii produkowanej na miejscu i wyeksportowanej do sieci oraz dostarczanej z sieci.

Budynek mieszkalny zaprojektowany zgodnie z powyższymi dokumentami, wykazujący nawet zerowy bilans energetyczny nie może zwać się budynkiem zero energetycznym. Konieczne jest bilansowanie całkowitych potrzeb energetycznych obiektów mieszkalnych, co można wykonać, wykorzystując analizę bilansu energetycznego, będącą jedną z najczęściej stosowanych metod zarządzania energią.

Standardem wyprzedzającym polskie wymagania w zakresie efektywności energetycznej jest idea budownictwa pasywnego, zgodna z normami The Passive House Institute (PHI), która łączy wysoki komfort mieszkalny z bardzo niskim zużyciem energii. Budownictwo pasywne cechuje znakomita efektywność energetyczna, optymalny komfort cieplny i wysoki stopień zadowolenia użytkowników z warunków otaczających, a także

ochrona przed potencjalnymi szkodami wywołanymi nadmierną kondensacją pary wodnej. Budownictwo pasywne jest sprawdzonym, wysokoefektywnym standardem, stosowanym przez ponad 30 lat. Budynek zaprojektowany zgodnie z tym standardem powinien stanowić bazę wejściową, a także fundamentalne zasady projektowania budynków o dodatnim bilansie energetycznym. Priorytetem zawsze powinno być zachowanie zdrowego środowiska wewnątrz obiektu, przy jednoczesnej minimalizacji zużycia energii na ten cel, nigdy odwrotnie.

Budynki o niemal zerowym zużyciu energii (nZEB) oraz podstawowe budynki pasywne są już dziś – w procesie projektowania – traktowane jako etapy pośrednie. Dąży się do tego, by najnowsze rozwiązania bazowały na budownictwie zrównoważonym, wysoce efektywnym energetycznie, zapewniającym komfortowe parametry środowiska wewnętrznego, wspartym wykorzystaniem naturalnych i odnawialnych źródeł energii, co w efekcie prowadzi do ich dodatniego potencjału energetycznego, stają się one bowiem budynkami o dodatnim bilansie energetycznym. W pierwszej kolejności należy wykorzystać naturalne i pasywne źródła energii, a dopiero pozostałą część zapotrzebowania na energię należy pokryć z odnawialnych aktywnych źródeł energii. Odnawialne źródła energii powinny najpierw służyć do pokrycia minimalnych potrzeb energetycznych budynków pasywnych, natomiast w drugiej kolejności umożliwić wyprowadzenie energii w formie użytecznej poza granice bilansowe, tworząc tym samym budynki o dodatnim bilansie energetycznym, które są przedmiotem niniejszej rozprawy.

Podstawą do utworzenia standardów energetycznych budynków jest analiza bilansu energetycznego pozwalająca na ilościową ocenę przepływów energii w układach termodynamicznie otwartych (a w ten właśnie sposób można traktować budynek i jego najbliższe otoczenie). Analiza ta nie odróżnia jakości i praktycznej przydatności różnych postaci energii, np. 1 kW ciepła wysokoparametrowego jest „więcej wart” od 1 kW ciepła niskotemperaturowego. Równanie bilansu energii nie gwarantuje zadowalającej oceny sprawności energetycznej procesów termodynamicznych. W celu odróżnienia jakości i praktycznej przydatności różnych postaci energii oraz oceny sprawności energetycznej procesów termodynamicznych utworzono analizę egzergetyczną, uwzględniającą drugą zasadę termodynamiki, która określa, że wszelkie rzeczywiste procesy termodynamiczne zachodzące w przyrodzie są nieodwracalne, co oznacza, że są źródłem entropii. Nie ulega wątpliwości, że analiza egzergetyczna jest użytecznym narzędziem w pracach badawczych zmierzających ku zwiększaniu energooszczędności budownictwa mieszkaniowego w zakresie utrzymania warunków komfortu klimatycznego mieszkańców przy możliwie niskim zużyciu energii. Celem i wynikiem tego typu prac badawczych jest – przede wszystkim – zaprojektowanie obiektów i systemów energetycznych możliwie niskoegzergetycznych, czyli zmniejszających nakład energii przy wytwarzaniu i gospodarowaniu ciepłem oraz energią elektryczną.

W tej części pracy przedstawiono praktyczne zalecenia do zmniejszenia niedoskonałości procesów cieplnych oraz wskazówki projektowe dla projektantów budynków zrównoważonych. Przeprowadzony wnikliwy przegląd literatury potwierdził wysoką istotność egzergetyki w budownictwie. Przy analizie egzergetycznej można

zidentyfikować miejsca, w których dochodzi do jej największych strat i przeciwdziałać temu zjawisku. Analiza ta pozwala określić możliwości udoskonalenia procesów energetycznych, w tym odnawialnych źródeł energii. Zadanie kończy określenie zasad projektowania budynków o dodatnim bilansie energetycznym.

4.2. Opis powszechnie znanych wielokryterialnych metod wspomagania podjęcia decyzji oraz wybór kilku z nich w celu budowy metodyki

Proces projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie jest przedsięwzięciem niezwykle złożonym. Towarzyszą mu czynniki informacyjne, techniczne, energetyczne, egzergetyczne, ekonomiczne, społeczne i środowiskowe, wymagające nieustannego podejmowania decyzji w celu osiągnięcia zamierzonego celu, który można przecież zrealizować na wiele różnych sposobów. Sposoby te determinują rozwiązania (warianty), a wariantom towarzyszą wspomniane wyżej czynniki. Są to cechy mierzalne, ale również – niekiedy – trudno mierzalne, najczęściej oddziałujące na siebie wzajemnie. Wskazaniu najbardziej korzystnego wariantu (rozwiązania kompromisowego) towarzyszyć będzie określona sytuacja decyzyjna wynikająca z własności problemu, jak i kryteriów oceny. Wybór najlepszego wariantu wspomagają: wiedza, doświadczenie i intuicja, natomiast wraz z rosnącą złożonością i skalą problemów koniecznością staje się wsparcie decyzji metodami badań operacyjnych, czyli tak zwanymi wielokryterialnymi metodami wspomagania podjęcia decyzji. Ich użycie pozwala na wyznaczenie zbioru rozwiązań dopuszczalnych, a po wskazaniu kryteriów decyzyjnych i określeniu preferencji decydenta umożliwia wybór rozwiązania kompromisowego.

Z uwagi na złożone, wieloaspektowe oblicze celu głównego, jakim jest projektowanie budynków o dodatnim bilansie energetycznym, ma on bez wątpienia wielokryterialny charakter. Jego wielopłaszczyznowość, zróżnicowany kontekst decyzji, liczne współzależności oraz zapotrzebowanie na kompetencje sprawia, że na etapie planowania zaangażowanych jest wiele podmiotów. Osiągnięcie celu wymaga zatem uwzględnienia wiedzy z licznych obszarów, m.in. urbanistyki, gospodarki przestrzennej, obszaru oddziaływań, komfortu wizualnego, ekonomiki obiektu, technologii konstrukcyjnych, materiałów budowlanych, technologii technicznego wyposażenia budynku, ekologii, komfortu klimatycznego, a także bezpieczeństwa, socjologii oraz psychologii społecznej. Istotny jest ponadto niekwestionowany wpływ jednego obszaru na drugi, gdyż są one często bezpośrednio ze sobą skorelowane.

Niestety brakuje metodyki umożliwiającej zaprojektowanie budynku mieszkalnego o dodatnim bilansie energii, co utrudnia rozpoczęcie procesu budowlanego, zważywszy na szereg zmiennych decyzyjnych i preferencji decydenta (inwestora), który podejmuje ostateczne decyzje. Zespół sporządzający analizę wielokryterialną winien posiadać dostęp do zbioru informacji dotyczących wytycznych decydenta i samego projektu budynku, określić możliwe do zastosowania rozwiązania techniczne, wybrać zbiór kryteriów decyzyjnych i poprawnie zbudować model preferencji decydenta, na podstawie którego wybrane zostanie rozwiązanie kompromisowe.

Konieczne jest opracowanie metodyki projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym, zgodnych z ideą zrównoważonego rozwoju,

pozwalającej na obniżenie globalnej konsumpcji nieodnawialnej energii pierwotnej w sektorze gospodarstw domowych, w oparciu o szereg kryteriów i parametrów, stanowiących zbiór otwarty, zgodnie z określoną preferencją decydenta przy uwzględnieniu relacji występujących pomiędzy kryteriami decyzyjnymi. Wybór kompromisowego rozwiązania staje się problemem decyzyjnym, wymagającym użycia jednej (lub wielu) z wielokryterialnych metod wspomagania podejmowania decyzji.

W niniejszym rozdziale pracy omówiono powszechnie stosowane wielokryterialne metody wspomagania podjęcia decyzji. Przedstawiono mechanizmy grupowego wspomagania decyzji, które posłużyły w niniejszej pracy do agregacji indywidualnych ocen przeprowadzonych badań statystycznych. W dysertacji z uwagi na licznosc porównań parami kryteriów i podkryteriów decyzyjnych została wykorzystana formuła agregacyjna wykorzystująca koncepcję średniej geometrycznej do agregacji ocen dostarczonych przez każdego z K ekspertów oraz każdego z K decydentów. Dla badań społecznych (ankietyzacja decydentów) z wykorzystaniem metody logarytmicznych najmniejszych kwadrantów, zwanej również metodą średniej geometrycznej ocen zostały wyznaczone znormalizowane wagi preferencji (w_k) względem poszczególnych kryteriów decyzyjnych. Opisano technikę DEMATEL, a także metody AHP/ANP oraz TOPSIS. Docelowo w dysertacji wykorzystane zostanie podejście AHP-DEMATEL-TOPSIS. W celu porównania parami kryteriów decyzyjnych w oparciu o postawiony cel, to jest wybór budynku mieszkalnego o dodatnim bilansie energetycznym, wykorzystano metodę AHP/ANP oraz autorski kwestionariusz ankietyzacji grupy celowej – decydentów wyraźnie zainteresowanych budową przedmiotowych obiektów. Celem było wyznaczenie wag preferencji kryteriów (w_k). Następnie, by dokonać identyfikacji zależności między kryteriami decyzyjnymi wykorzystano technikę DEMATEL oraz autorski kwestionariusz badania zespołu ekspertów. Celem było wyznaczenie wag relacji kryteriów (v_i). Porównania parami wykonano w odniesieniu do wszystkich kombinacji wzajemnych powiązań pomiędzy elementami i ich grupami. Utworzono końcowy ranking dopuszczalnych i akceptowalnych rozwiązań, wykorzystując metodę TOPSIS.

4.3. Opracowanie metodyki projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym

Celem rozwiązania problemu decyzyjnego przedstawionego i udowodnionego w poprzednich rozdziałach niniejszej pracy zaproponowano zastosowanie nowatorskiej metodyki (algorytmu) projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym (rys. 4.3). Algorytm metodyki projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym składa się z **pięciu głównych etapów**.

ETAP I – budowa bazy danych wejściowych dla konkretnego przedsięwzięcia

Budowa bazy danych wejściowych realizowana jest zgodnie z podstawowymi zasadami projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym. Powstała ona dla konkretnego, analizowanego przypadku, na wstępnym etapie procesu projektowania. Uwzględnia, m.in.: klimat lokalny (dane meteorologiczne), lokalizację, orientację i położenie w terenie planowanego obiektu, szczegółowe wymagania komfortu klimatycznego, instrukcje i wytyczne inwestora, przewidywany sposób i profile

użytkowania obiektu, ograniczenia globalne i lokalne, w tym przepisy, dostęp do mediów, maksymalny czas i koszty realizacji przedsięwzięcia, akceptowalne przez decydenta idee projektowe i forma architektoniczna, a także wpływ budynku na środowisko zewnętrzne i wykorzystanie zasobów naturalnych, w tym rolę pasywnych systemów energetycznych oraz wprowadzenie energii odnawialnej. Baza danych wejściowych jest zbiorem otwartym, może zawierać różną ilość i jakość zmiennych, w zależności od stopnia skomplikowania obiektu oraz czasu na podjęcie kluczowych decyzji. Po skomponowaniu kompletnej bazy danych wejściowych dla analizowanego przypadku należy przejść do etapu drugiego. W przeciwnym razie należy uzupełnić bazę.

ETAP II – identyfikacja dopuszczalnych i akceptowalnych rozwiązań budynku mieszkalnego o dodatnim bilansie energii

Po etapie budowy bazy danych wejściowych dla konkretnej inwestycji należy przejść do etapu drugiego, czyli identyfikacji dopuszczalnych i akceptowalnych przez decydenta rozwiązań technicznych, realnych i dostępnych dla określonego przypadku, spełniających wcześniej narzucone wymagania, wytyczne i ograniczenia. Często zbiór dopuszczalnych wariantów jest skończony i dyskretny. W etapie tym wykorzystuje się dekompozycję diagnozy globalnej, tworząc macierz obserwacji ujmującą powyższe elementy. W ten sposób powstaje zbiór dopuszczalnych wariantów rozwiązań, po którego akceptacji można przejść do etapu trzeciego.

ETAP III – wybór zbioru kryteriów decyzyjnych i identyfikacja relacji między kryteriami

Na tym etapie należy dokonać wyboru zbioru kryteriów i podkryteriów decyzyjnych. W zaproponowanej metodyce zostały one zdekomponowane i wyselekcjonowane na podstawie obszernego przeglądu literatury. Następnie wykorzystano metodę DEMATEL w celu identyfikacji relacji pomiędzy wszystkimi kryteriami i podkryteriami oceny oraz określenia wag tych relacji, które wyznacza się przy pomocy metody delfickiej, to jest badania grupy ekspertów. Należy zebrać oceny dokonane przez wybranych ekspertów oraz przeprowadzić analizę statystyczną. Krok ten realizuje jeden z najważniejszych celów badawczych niniejszej rozprawy doktorskiej. Wyznaczone wagi relacji zostaną wykorzystane w ostatnim kroku proponowanej metodyki. W przypadku akceptacji zbioru kryteriów decyzyjnych należy przejść do etapu czwartego metodyki, w przeciwnym razie należy dostosować zbiór kryteriów decyzyjnych.

ETAP IV – określenie profilu preferencji decydenta

Następnie po dokonaniu wyboru akceptowalnego zbioru kryteriów decyzyjnych trzeba określić profil preferencji decydenta, który sporządza się przy pomocy metody badań społecznych, to jest ankietyzacji grupy celowej. Należy wykonać pomiar statystyczny reprezentatywnej zbiorowości, pozyskać odpowiedzi oraz przeprowadzić analizę statystyczną. Jest to jeden z celów badawczych niniejszej rozprawy doktorskiej. Po analizie zebranych danych powstaje docelowy profil preferencji decydenta, obejmujący przyporządkowanie bezpośrednich wag do wybranych wcześniej kryteriów i podkryteriów decyzyjnych. W przypadku akceptacji utworzonego profilu należy przejść do etapu piątego

metodyki, w przeciwnym razie należy przeprowadzić ponownie ankietyzację bądź rozszerzyć lub zawęzić grupę celową.

ETAP V – wybór rozwiązania kompromisowego

Ostatnim etapem metodyki jest obliczenie wartości zmiennych oraz wybór rozwiązania kompromisowego. Najpierw należy wyznaczyć docelowe wartości wag kryteriów decyzyjnych, które oblicza się na podstawie wcześniej uzyskanych wag relacji oraz priorytetów decydentów. Następnie trzeba obliczyć wartości zmiennych charakteryzujące poszczególne warianty rozwiązań, a także zestawić dopuszczalne minimalne i maksymalne wartości dla poszczególnych wskaźników. Obliczone wartości zmiennych (wskaźników) poddaje się normalizacji. Po znormalizowaniu wskaźników wszystkie podkryteria oceny mają charakter stymulant. Następnie trzeba dokonać przemnożenia uzyskanych wartości po normalizacji przez docelowe wagi kryteriów oceny.

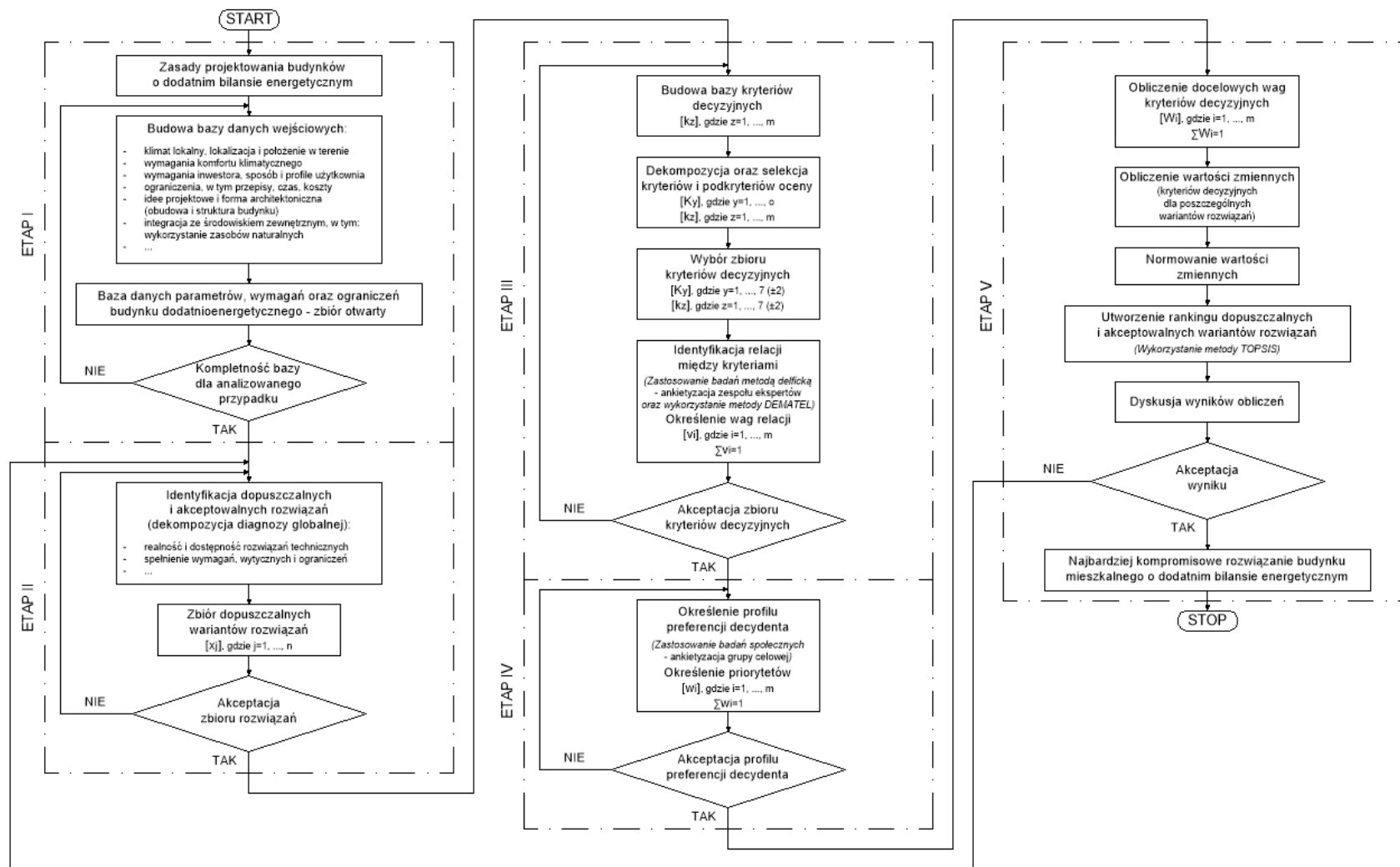
W celu utworzenia rankingu dopuszczalnych i akceptowalnych wariantów rozwiązań wykorzystano metodę TOPSIS, służącą również do identyfikacji teoretycznego rozwiązania (wariantu) idealnego oraz antyidealnego. Za jej pomocą określa się odległość między wektorami wartości opisujących dany wariant a wektorami odpowiadającymi wariantowi idealnemu oraz wariantowi antyidealnemu. Wariantem najkorzystniejszym jest ten, którego wektor wartości ma jednocześnie najmniejszą odległość od wektora wariantu idealnego oraz największą odległość od wektora wariantu antyidealnego. Następnie przeprowadzona zostaje dyskusja wyników obliczeń, akceptacja wyniku analizy i wybór kompromisowego rozwiązania budynku mieszkalnego o dodatnim bilansie energetycznym. W przypadku braku akceptacji wyniku przeprowadzonej analizy należy cofnąć się do kroku 2, rozszerzyć zbiór dopuszczalnych wariantów rozwiązań i/lub dokonać zmiany zbioru kryteriów decyzyjnych i/lub wyznaczyć nowy profil preferencji decydenta.

Efektem zastosowania proponowanego algorytmu jest wybór najbardziej kompromisowego rozwiązania budynku mieszkalnego o dodatnim bilansie energetycznym dla wcześniej ustalonej bazy danych wejściowych (parametrów, wymagań oraz ograniczeń), propozycji wariantów rozwiązań spełniających powyższe wytyczne oraz dla precyzyjnie określonego profilu preferencji decydenta.

4.4. Proponowany zbiór kryteriów decyzyjnych

Proces projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym ma charakter niezwykle złożony, zależny od wielu wytycznych, ograniczeń oraz wymagań, będąc wypadkową wielu czynników (cech), dla których można znaleźć synergiczne rozwiązanie kompromisowe. Istotne jest stworzenie zbioru kryteriów i podkryteriów oceny, które najlepiej scharakteryzują problem decyzyjny.

Kryterium stanowi narzędzie oceny wariantu decyzji w określonym aspekcie. Przy użyciu odpowiedniej skali pomiaru, związanej z danym kryterium, możliwe jest przyporządkowanie określonemu wariantowi zadowalającej oceny. Pozwala ona na porównanie ze sobą różnych dopuszczalnych wariantów z uwagi na określony aspekt. Kryteria z kolei umożliwiają ustalenie preferencji lokalnych, czyli wzajemnych dominacji poszczególnych wariantów decyzyjnych w świetle tych kryteriów/podkryteriów.



Rys. 4.3. Metodyka projektowania budynku mieszkalnego o dodatnim bilansie energetycznym

Istotnym aspektem jest liczba kryteriów, która w wielokryterialnych problemach decyzyjnych nie może być zbyt wysoka. Należy dążyć, by maksymalna liczba porównywanych ze sobą kryteriów nie przekraczała 7 ± 2 . W tym celu trzeba zastosować odpowiednią dekompozycję i selekcję zbioru potencjalnych kryteriów i pogrupować je na podzbiory o pokrewnym charakterze. W ramach poszczególnych głównych kryteriów decyzyjnych (grup kryteriów) wyróżniono określoną liczbę kryteriów podrzędnych (podkryteriów), które umożliwiają precyzyjne uporządkowanie rozpatrywanych wariantów pod kątem realizacji nadrzędnego celu analizy.

Celem odpowiedniego skategoryzowania czynników (cech oceny) przyjęto następujący zbiór sześciu głównych kryteriów decyzyjnych:

- kryterium techniczne,
- kryterium energetyczne,
- kryterium egzergetyczne,
- kryterium ekonomiczne,
- kryterium społeczne,
- kryterium środowiskowe.

Przedstawione w kolejnych częściach dysertacji podkryteria oceny mogą należeć równocześnie do dwóch lub większej ilości kryteriów głównych. Nie ma jednolitych standardów, według których jednoznacznie klasyfikuje się wszelkie wchodzące w grę kryteria decyzyjne. Zależnie od potrzeb, w każdej z grup głównych kryteriów można przyjąć określoną liczbę podkryteriów, ich właściwy dobór merytoryczny ma zasadnicze znaczenie z punktu widzenia wyboru przeprowadzenia analizy wielokryterialnej, co zawsze powinno ściśle uwzględniać specyfikę problemu decyzyjnego. Zbiór kryteriów powinien być tak dobrany, by stanowił właściwą reprezentację interesów decydentów i aspektów analizowanego problemu decyzyjnego. Właściwie dobrane kryteria powinny gwarantować kompleksową ocenę wariantów decyzyjnych, a ponadto charakteryzować się przejrzystością i precyzyjnym zdefiniowaniem ich zakresu, celem uniknięcia wzajemnej redundancji, czyli nadmiarowości – nakładania się.

Wielokryterialna analiza decyzyjna bazuje na nadaniu wszystkim kryteriom oceny niemianowanych wartości liczbowych, dzięki temu możliwe jest ich wzajemne porównanie i ocena wariantów z uwzględnieniem cech ilościowych, wyrażonych wielkościami liczbowymi oraz cech jakościowych, których bezpośrednio nie da się wyrazić za pomocą wielkości liczbowych. Cechy niemierzalne (jakościowe) podlegają kwantyfikacji, wskutek czego zostają wyrażone za pomocą wielkości liczbowych, a można to uczynić np. przez arbitralne wprowadzenie skali ocen, na podstawie doświadczenia eksperta, opinii grup ekspertów, czy też w drodze ankietyzacji w określonych grupach społecznych.

Wybór poszczególnych podkryteriów oceny ze zbioru kryteriów głównych jest otwarty i – w zależności od skali prowadzonych analiz, wymagań, wytycznych i ograniczeń, a także od identyfikacji dopuszczalnych i akceptowalnych rozwiązań – zostaje wspólnie uzgadniany przez decydenta i analityka. Zgodnie z powyższym do każdej grupy kryteriów głównych wybrano 5 podkryteriów oceny i zestawiono je w tab. 4.4.

Tab. 4.4. Zbiór wybranych kryteriów decyzyjnych

Lp.	Grupa kryteriów	Symbol grupy	Kryterium	Symbol kryterium	Preferencja	Przedział wartości	Odwołanie
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	Kryterium techniczne	k_T	Współczynnik kształtu budynku (A/V)	$k_{T A/V,i}$	malejąca	(0, 1>	4.1.7
2			Całkowity czas realizacji budynku (T_{BUD})	$k_{T T,BUD,i}$	malejąca	(0, 1>	4.1.8
3			Utrudnienia realizacyjne (U_{REAL})	$k_{T U,REAL,i}$	malejąca	(0, 1>	4.1.10
4			Całkowita żywotność budynku (T_{ZYCIA})	$k_{T T,ZYCIA,i}$	rosnąca	(0, 1>	4.1.14
5			Całkowita żywotność instalacji OZE (T_{OZE})	$k_{T T,OZE,i}$	rosnąca	(0, 1>	4.1.15
6	Kryterium energetyczne	k_{EN}	Całkowity wskaźnik zużycia energii pierwotnej (EP_{TOTAL})	$k_{EN EP,TOTAL,i}$	malejąca	(0, 1>	4.2.2
7			Całkowity wskaźnik zużycia energii użytkowej (EU_{TOTAL})	$k_{EN EU,TOTAL,i}$	malejąca	(0, 1>	4.2.3
8			Całkowity wskaźnik zużycia energii końcowej (EK_{TOTAL})	$k_{EN EK,TOTAL,i}$	malejąca	(0, 1>	4.2.4
9			Całkowity wskaźnik ilości pozyskanej energii użytkowej odnawialnej (EU_{OZE})	$k_{EN EU,OZE,i}$	rosnąca	(0, 1>	4.2.5
10			Całkowity wskaźnik ilości wyprowadzonej energii końcowej odnawialnej (EK_{OZE})	$k_{EN EK,OZE,i}$	rosnąca	(0, 1>	4.2.6
11	Kryterium egzergetyczne	k_{EG}	Suma strat egzergii budynku i jego instalacji (B_{W+Z})	$k_{EG B,W+Z,i}$	malejąca	(0, 1>	4.3.2
12			Suma egzergii wygenerowanej przez OZE ($B_{GEN,OZE}$)	$k_{EG B,GEN,OZE,i}$	rosnąca	(0, 1>	4.3.3
13			Skumulowane zużycie egzergii pierwotnej (B_{P^*})	$k_{EG B,P,i^*}$	malejąca	(0, 1>	4.3.4.A
14			Stopień wykorzystania pozyskanej energii odnawialnej (WYK_{OZE})	$k_{EG WYK,OZE,i}$	rosnąca	(0, 1>	4.3.5
15			Wykorzystanie naturalnych strategii grzania, chłodzenia i oświetlenia (N_{ST})	$k_{EG N,ST,i}$	rosnąca	(0, 1>	4.3.6
16	Kryterium ekonomiczne	k_{EK}	Wewnętrzna stopa zwrotu dla OZE (IRR_{OZE})	$k_{EK IRR,OZE,i}$	rosnąca	(0, 1>	4.4.3
17			Całkowity koszt operacyjny (TOC)	$k_{EK TOC,i}$	malejąca	(0, 1>	4.4.4.A
18			Analiza kosztów życia budynku (LCC)	$k_{EK LCC,i}$	malejąca	(0, 1>	4.4.5
19			Całkowity koszt inwestycyjny prosty (K_{INW})	$k_{EK K,INW,i}$	malejąca	(0, 1>	4.4.6
20			Dynamiczny koszt jednostkowy instalacji OZE (DGC_{OZE})	$k_{EK DGC,OZE,i}$	malejąca	(0, 1>	4.4.7
21	Kryterium społeczne	k_{SP}	Spełnienie parametrów komfortu cieplnego (KC)	$k_{SP KC,i}$	rosnąca	(0, 1>	4.5.2
22			Spełnienie parametrów jakości powietrza (JP)	$k_{SP JP,i}$	rosnąca	(0, 1>	4.5.3
23			Spełnienie parametrów komfortu akustycznego (KA)	$k_{SP KA,i}$	rosnąca	(0, 1>	4.5.4
24			Spełnienie parametrów komfortu wizualnego (KW)	$k_{SP KW,i}$	rosnąca	(0, 1>	4.5.5
25			Oddziaływanie budynku i jego instalacji na otoczenie (O_{OT})	$k_{SP O,OT,i}$	malejąca	(0, 1>	4.5.13
26	Kryterium środowiskowe	k_{SS}	Analiza cyklu życia budynku (LCA)	$k_{SS LCA,i}$	malejąca	(0, 1>	4.6.1
27			Wskaźnik emisji ditlenku węgla (E_{CO2})	$k_{SS E,CO2,i}$	malejąca	(0, 1>	4.6.2
28			Koherentność odnawialnych źródeł energii (K_{OZE})	$k_{SS K,OZE,i}$	rosnąca	(0, 1>	4.6.4
29			Czas zwrotu energii z OZE (EPBT)	$k_{SS EPBT,i}$	malejąca	(0, 1>	4.6.5
30			Czas zwrotu emisji gazów cieplarnianych z OZE (GPBT)	$k_{SS GPBT,i}$	malejąca	(0, 1>	4.6.7

4.5. Identyfikacja relacji pomiędzy kryteriami decyzyjnymi – ankietyzacja zespołu ekspertów (metoda delficka) z wykorzystaniem metody DEMATEL

W celu oceny zależności pomiędzy poszczególnymi kryteriami oceny wykorzystano metodę DEMATEL. Podmiotem oceniającym, zgodnie z ideą metody delfickiej jest grupa ekspertów, którą poddano ankietyzacji, wykorzystując autorski kwestionariusz ekspercki.

4.5.1. Budowa kwestionariusza

Ocena intensywności wpływu pomiędzy poszczególnymi kryteriami i podkryteriami decyzyjnymi wymagała udziału ekspertów. Ich opinie są z reguły odmienne, a stanowiska zbudowane na podstawie rozmaitych priorytetów, systemów wartości, kompetencji, zasobów wiedzy czy wykształcenia i doświadczenia. W tym celu należało – w pierwszej kolejności – stworzyć kwestionariusz ekspercki, wybrać grupę celową (zespół ekspertów), przeprowadzić badania ankietowe i – na końcu – przeprowadzić analizę statystyczną.

Zgodnie z metodą DEMATEL oraz metodą analitycznego procesu sieciowego (ANP) należało porównać ze sobą wszystkie kryteria i podkryteria oceny, zarówno w ramach poszczególnych grup kryteriów decyzyjnych, jak i każdego podkryterium oceny. Do porównania elementów w parach zastosowano dyskretną i nieujemną ocenę, to jest 9-stopniową skalę. Należało porównać ze sobą 6 głównych kryteriów decyzyjnych oraz 30 podkryteriów. Łączna liczba porównań wyniosła 450. Liczba porównań jest równa $L=n*(n-1)/2$, gdzie n – liczba porównań. Dla tak dużej liczby obserwacji należało odpowiednio i przejrzysto przygotować kwestionariusz ekspercki. Respondent, wykorzystując stopień relacji (skalę relacji / wpływu) służący do oceny porównań parami i interpretowany w sposób przedstawiony w kwestionariuszu został poproszony o przyporządkowanie dla każdej pary wartości relacji (określenie intensywności wpływu) – od absolutnego wpływu (-9/+9) do braku wpływu (0), która według niego przyczynia się do osiągnięcia celu, to jest wyboru najkorzystniejszego rozwiązania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym.

Ważnym elementem przeprowadzonych badań metodą delficką jest prawidłowy dobór próby i jakości respondentów, czyli osób które posiadają odpowiednią wiedzę oraz doświadczenie w analizowanej tematyce. Na potrzeby niniejszej dysertacji przygotowany kwestionariusz ekspercki skierowano do ekspertów w dziedzinach architektury i urbanistyki, budownictwa, inżynierii środowiska lub energetyki. Dobór grupy respondentów dla badania był celowy i ściśle zdefiniowany – stanowią ją osoby zatrudnione w jednostkach naukowych, jednostkach badawczych oraz funkcjonujące w biznesie, które z racji swoich zainteresowań, wiedzy i doświadczenia należy uznać za ekspertów.

Dystrybucję ankiet eksperckich dokonano z podziałem na trzy kategorie:

- 1) source_a – eksperci z Politechniki Poznańskiej – 16 osób
- 2) wersja_1 – eksperci z innych uczelni i jednostek badawczych – 57 osób
- 3) ver_1 – specjalistów branżowych – 15 osób

4.5.2. Analiza statystyczna

Na 88 rozdystrybuowanych kwestionariuszy eksperckich zebrano wypełnionych 31 sztuk, co stanowi 35,2% skuteczności dystrybucji ankiet. Wynik ten – z uwagi na czasochłonność

wypełniania ankiet i skierowanie ich do ekspertów piastujących wysokie stanowiska naukowe oraz specjalistów w biznesie – należy uznać za zadowalający. Zebrane dane zostały poddane dalszej analizie statystycznej w programie MS Excel.

4.5.3. Wyznaczenie wektorów wag współzależności wybranych kryteriów oceny

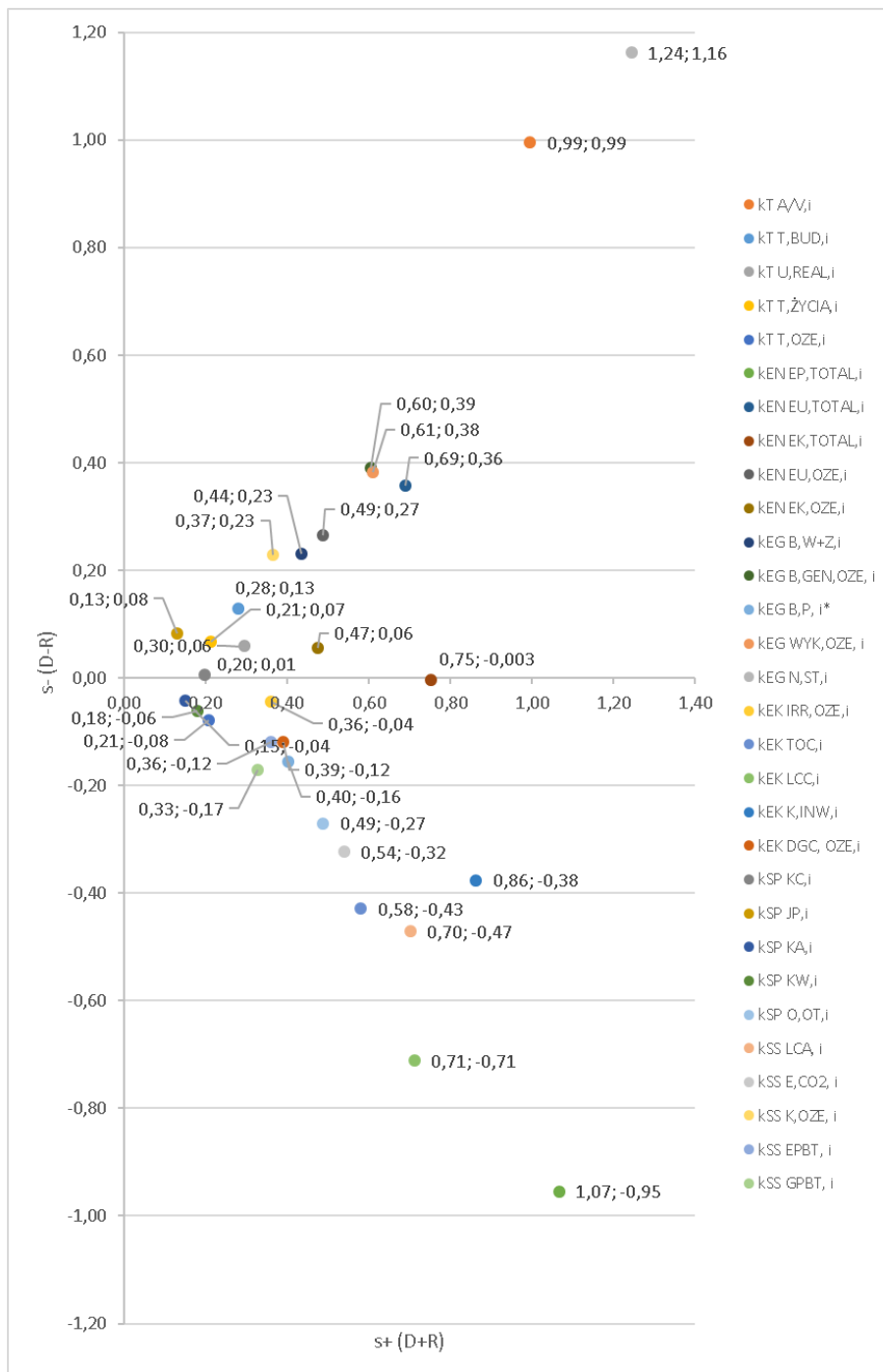
W celu wyznaczenia intensywności wpływu poszczególnych kryteriów i podkryteriów decyzyjnych na pozostałe postanowiono wykorzystać średnią geometryczną z uzyskanych ocen w wyniku przeprowadzonego badania metodą delficką. Uznano, że jeżeli dla danej pary kryteriów decyzyjnych większość ekspertów (minimum 16 z 31 przebadanych) wskaże wartość relacji wynoszącą „0”, wówczas przyjmuje się, że te kryteria nie wykazują względem siebie wpływu (czyli mamy do czynienia z brakiem wpływu).

W kolejnym kroku należało sporządzić macierz bezpośredniego wpływu, znormalizowaną macierz bezpośredniego wpływu oraz macierz całkowitego wpływu. Wszystkie utworzone macierze wykonano dla kryteriów głównych oraz dla podkryteriów oceny.

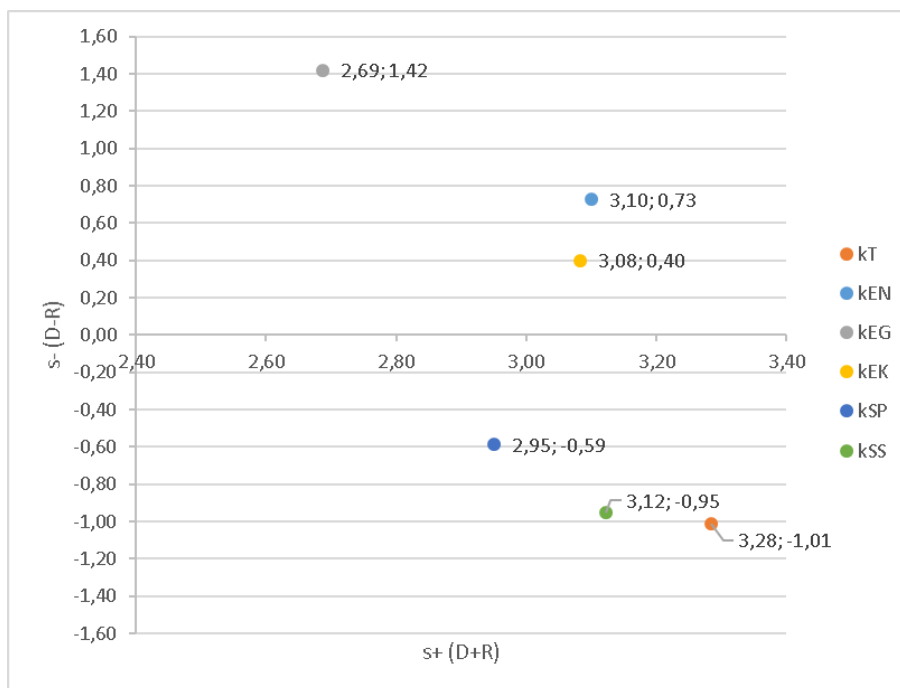
W tab. 4.5.3.A przedstawiono rolę i znaczenie poszczególnych komponentów w kontekście oddziaływania całkowitego. Wskaźnik „s+” („D+R”) definiuje pozycję, prominencję i wpływ brutto, natomiast wskaźnik „s-” („D-R”), określa relację i/lub wpływ netto. Im wyższa wartość wskaźnika „s+” dla danego kryterium/podkryterium, tym wykazuje ono wyższy poziom wzajemnych powiązań z innymi kryteriami/podkryteriami. Oba wskaźniki stanowią stymulanty, pierwszy o preferencji rosnącej (im wyższa wartość wskaźnika, tym większe znaczenie parametru), drugi określający charakter skutkowy ($s- < 0$) lub przyczynowy ($s- > 0$). W tab. 4.5.3.A wyjustowano czynniki o charakterze przyczynowym ($s- > 0$), natomiast kursywą zaznaczono kryteria o charakterze skutkowym ($s- < 0$). Tworząc kompozycję kryteriów głównych i podkryteriów oceny, opisujących budynki o dodatnim bilansie energii na wykresie ciągu przyczynowo-skutkowego (rys. 4.5.3.A) i (rys. 4.5.3.B), można wykazać hierarchię oraz korelację pomiędzy poszczególnymi elementami.

Tab. 4.5.3.A. Rola i znaczenie poszczególnych kryteriów głównych oraz podkryteriów oceny

	D+R		D-R			D+R		D-R	
	s+	s-	s+	s-		s+	s-	s+	s-
KT	3,28	-1,01	KT A/V,i	0,99	0,99	KT T,BUD,i	0,28	0,13	
KEN	3,10	0,73	KT T,U,REAL,i	0,30	0,06	KT T,ZYCIA,i	0,21	0,07	
KEG	2,69	1,42	KT T,OZE,i	<i>0,21</i>	<i>-0,08</i>	KEN EP,TOTAL,i	<i>1,07</i>	<i>-0,95</i>	
KEK	3,08	0,40	KEN EU,TOTAL,i	0,69	0,36	KEN EK,TOTAL,i	<i>0,75</i>	<i>-0,003</i>	
KSP	<i>2,95</i>	<i>-0,59</i>	KEN EU,OZE,i	0,49	0,27	KEN EK,OZE,i	0,47	0,06	
KSS	<i>3,12</i>	<i>-0,95</i>	KEG B,W+Z,i	0,44	0,23	KSP KC,i	0,20	0,01	
			KEG B,GEN,OZE, i	0,60	0,39	KSP JP,i	0,13	0,08	
			KEG B,P, i*	<i>0,40</i>	<i>-0,16</i>	KSP KA,i	<i>0,15</i>	<i>-0,04</i>	
			KEG WYK,OZE, i	0,61	0,38	KSP KW,i	<i>0,18</i>	<i>-0,06</i>	
			KEG N,ST,i	1,24	1,16	KSP O,OT,i	<i>0,49</i>	<i>-0,27</i>	
			KEK IRR,OZE,i	<i>0,36</i>	<i>-0,04</i>	KSS LCA, i	<i>0,70</i>	<i>-0,47</i>	
			KEK TOC,i	<i>0,58</i>	<i>-0,43</i>	KSS E,CO2, i	<i>0,54</i>	<i>-0,32</i>	
			KEK LCC,i	<i>0,71</i>	<i>-0,71</i>	KSS K,OZE, i	0,37	0,23	
			KEK K,INW,i	<i>0,86</i>	<i>-0,38</i>	KSS EPBT, i	<i>0,36</i>	<i>-0,12</i>	
			KEK DGC, OZE,i	<i>0,39</i>	<i>-0,12</i>	KSS GPBT, i	<i>0,33</i>	<i>-0,17</i>	



Rys. 4.5.3.B. Klasyfikacja podkryteriów



Rys. 4.5.3.A. Klasyfikacja kryteriów głównych

Metoda DEMATEL w niniejszej dysertacji posłużyła do wyznaczenia wartości wag relacji dla poszczególnych kryteriów i podkryteriów decyzyjnych. Znormalizowane wartości wag relacji zachodzących między kryteriami głównymi oraz podkryteriami oceny przedstawiono w tab. 4.5.3.B. Wyjustowano względne wagi, dla których wartość wynosi ponad 15% dla kryteriów głównych oraz ponad 3,5% dla podkryteriów oceny.

Tab. 4.5.3.B. Znormalizowane wagi obrazujące znaczenie i relacje dla poszczególnych kryteriów głównych oraz podkryteriów oceny.

kT	0,17	kT A/V,i	0,072
kEN	0,23	kT T,BUD,i	0,027
kEG	0,17	kT U,REAL,i	0,027
kEK	0,21	kT T,ŻYCIA,i	0,024
kSP	0,10	kT T,OZE,i	0,020
kSS	0,13	kEN EP,TOTAL,i	0,036
		kEN EU,TOTAL,i	0,047
		kEN EK,TOTAL,i	0,043
		kEN EU,OZE,i	0,038
		kEN EK,OZE,i	0,033
kEG B,W+Z,i	0,035	kSP KC,i	0,022
kEG B,GEN,OZE, i	0,045	kSP JP,i	0,021
kEG B,P, i*	0,026	kSP KA,i	0,019
kEG WYK,OZE, i	0,045	kSP KW,i	0,020
kEG N,ST,i	0,085	kSP O,OT,i	0,027
kEK IRR,OZE,i	0,027	kSS LCA, i	0,031
kEK TOC,i	0,028	kSS E,CO2, i	0,028
kEK LCC,i	0,027	kSS K,OZE, i	0,033
kEK K,INW,i	0,039	kSS EPBT, i	0,025
kEK DGC, OZE,i	0,027	kSS GPBT, i	0,023

Po przeprowadzeniu analizy wykonanej metodą DEMATEL można dokładnie scharakteryzować relacje lub ich brak, jakie zachodzą pomiędzy poszczególnymi kryteriami głównymi i podkryteriami oceny dla procesu projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym. Należy uwzględnić wszystkie zależności, jakie występują pomiędzy poszczególnymi kryteriami i podkryteriami oceny. Zaletą wykorzystywanej metody jest jej przejrzystość w odzwierciedlaniu wzajemnych relacji między szerokim zestawem elementów. Analityk – na podstawie ocen wyrażonych przez ekspertów w odpowiedzi zwrotnej – może zgłaszać swoje uwagi dotyczące efektów (kierunek i istotność) między czynnikami.

Najbardziej istotnymi kryteriami/podkryteriami oceny są te posiadające silny charakter przyczynowy i to one właśnie, w największym stopniu, wpływają na pozostałe kryteria/podkryteria oceny. Oznacza to, że te kryteria obrazują czynniki, na których – w pierwszej kolejności – należy skupić się podczas projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energii, są priorytetowe i w ich obrębie trzeba szukać dalszego potencjału poprawy. Na podstawie przeprowadzonej analizy analityk może usunąć ze zbioru kryteriów/podkryteriów te, które wykazują silny charakter skutkowy, co oznacza, że wpływ na nie mają także inne kryteria/podkryteria. Te same kryteria/podkryteria mogą również pozostać w zbiorze kryteriów/podkryteriów oceny, stanowiąc wartość dodaną dla decydenta (szerszy zbiór kryteriów decyzyjnych), dzięki czemu decydent ma świadomość, że zostały rozpatrzone wszystkie czynniki (cechy) mające wpływ na proces projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym.

A zatem narzędzie w postaci metody DEMATEL spełniło oczekiwaną funkcję i umożliwiło identyfikację zależności między kryteriami i podkryteriami oceny. Uzyskane wyniki posłużą w kolejnych częściach pracy jako wagi relacji, które zostaną wykorzystane w metodyce projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym.

4.6. Określenie profilu preferencji decydenta – ankietyzacja grupy decydentów (metoda badań społecznych) z wykorzystaniem metody AHP/ANP

Metoda badań społecznych – ankietyzacja grupy celowej – ma na celu agregację ocen cząstkowych (czyli określenie bezpośrednich wag kryteriów i podkryteriów decyzyjnych – preferencji decydenta) dla dopuszczalnych wariantów rozwiązań budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym – w ten sposób tworzony jest model preferencji decydenta.

4.6.1. Budowa kwestionariusza

W celu utworzenia modelu preferencji decydenta należało pozyskać informacje o preferencjach poszczególnych decydentów dotyczących wyboru budynku mieszkalnego o dodatnim bilansie energetycznym, a konkretnie uzyskać wagi dla poszczególnych kryteriów decyzyjnych. W tym celu należało – w pierwszej kolejności – stworzyć kwestionariusz preferencji decydenta, wybrać grupę celową (osoby wyraźnie zainteresowane budową budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym, to jest projektanci, wykonawcy, inwestorzy (deweloper), studenci, aktualni i przyszli użytkownicy, architekci, audytorzy energetyczni i inni) oraz osoby, które w tego typu obiektach aktualnie zamieszkują, a następnie przeprowadzić badania ankietowe i dokonać analizy statystycznej.

Postanowiono, by decydenci porównali ze sobą kryteria główne oraz podkryteria oceny w ramach danego kryterium głównego. Do porównania elementów w parach zastosowano, zgodnie z metodą analitycznej hierarchii oraz metodą analitycznego procesu sieciowego (AHP/ANP), dyskretną i nieujemną ocenę, to jest 9-stopniową skalę Saaty'ego, która symbolizuje stopień przewagi (skalę dominacji / preferencji) jednego z kryterium oceny, rozpatrywanych w ramach pary, na drugie, wraz ze stopniem „1”, odpowiadającym braku przewagi – oba kryteria mają takie samo znaczenie. Należało porównać ze sobą 6 głównych kryteriów decyzyjnych oraz po 5 podkryteriów oceny w każdym z kryteriów głównych (30 podkryteriów). Łączna liczba porównań wyniosła 75. Respondent, wykorzystując stopień przewagi (skalę dominacji / preferencji), służący do oceny porównań parami i interpretowany w sposób przedstawiony w kwestionariuszu został poproszony o przyporządkowanie dla każdej pary wartości relacji (określenie przewagi ważności), od absolutnie większego znaczenia (-9/+9) do równowagi znaczenia – takie samo znaczenie (1). Dokonywane oceny parami mają na celu wyłonienie kryteriów decyzyjnych o najwyższej istotności według danego respondenta, co przyczynia się do osiągnięcia celu, to jest wyboru najkorzystniejszego rozwiązania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym.

Ważnym elementem przeprowadzonych badań społecznych metodą ankietyzacji jest prawidłowy dobór próby i jakości respondentów, czyli osób które rzetelnie wypełnią ankietę, poświęcając jej uwagę i należy czas, a także posiadają zdefiniowane zdanie w badanej tematyce. Na potrzeby niniejszej dysertacji przygotowany kwestionariusz preferencji decydenta skierowano do osób wyraźnie zainteresowanych budową budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym (zgodnie z odpowiedziami na pytanie nr 11 – 79,2% jest zainteresowanych budową takiego budynku, natomiast tylko 15,1% decydentów nie) oraz osób, które w tego typu obiektach aktualnie zamieszkują (zgodnie z odpowiedziami na pytanie nr 11 – 5,7%). Grupę respondentów dla przeprowadzonego badania stanowili projektanci, wykonawcy, inwestorzy (deweloper), studenci kierunku Inżynieria Środowiska, aktualni i przyszli użytkownicy, architekci, audytorzy energetyczni i inni. Dobór grupy respondentów w zależności od kategorii był ściśle określony (BUDMA 2019 / PIBP) lub losowy (WOIIB / RI).

Dystrybucję ankiet preferencji decydenta dokonano z podziałem na cztery kategorie:

- 1) ankiety w wersji fizycznej – rozdane podczas targów branżowych BUDMA 2019 w czasie prezentacji Autora niniejszej dysertacji, dotyczącej instalacji technicznego wyposażenia budynków w obiektach pasywnych – 60 sztuk
- 2) source_a – dystrybucja poprzez Wielkopolską Okręgową Izbę Inżynierów Budownictwa (WOIIB) – bez limitu
- 3) wersja_1 – dystrybucja poprzez czasopismo „Rynek Instalacyjny” (RI) – bez limitu
- 4) ver_1 – dystrybucja poprzez bazę certyfikowanych projektantów Polskiego Instytutu Budownictwa Pasywnego (PIBP) oraz osoby z otoczenia budownictwa pasywnego – 15 sztuk

4.6.2. Analiza statystyczna

Zebrano 53 poprawnie wypełnione ankiety, co stanowi zadowalającą próbę. Pozyskane dane zostały poddane analizie statystycznej w programie MS Excel.

Postanowiono poddać analizie statystycznej dane z podziałem na określoną grupę respondentów i dla danej grupy w załączniku 2C przedstawiono rozkład częstości ocen dokonanych przez poszczególnych decydentów. Wyszczególniono następujące grupy:

- Projektant/Architekt
- Wykonawca
- Aktualny użytkownik
- Przyszły użytkownik
- Inwestor (deweloper)

4.6.3. Wyznaczenie wektorów wag współzależności wybranych kryteriów oceny

W celu wyznaczenia wektorów wag wybranych kryteriów oceny postanowiono przeprowadzić analizę AHP/ANP z wykorzystaniem średniej geometrycznej. W pierwszej kolejności obliczenia przeprowadzono, uwzględniając wszystkich przebadanych respondentów (decydentów) – tab. 4.6.3.A. Kolejno (tab. 4.6.3.B.) wyznaczono wektory wag wybranych kryteriów oceny z podziałem na określoną grupę respondentów i dla danych grup przeprowadzono analizę AHP/ANP, uwzględniono następujące grupy przebadanych respondentów (decydentów):

- Projektant/Architekt
- Wykonawca
- Aktualny/Przyszły użytkownik
- Inwestor (deweloper)

Wyniki skomentowano.

Tab. 4.6.3.A. Wektory wag dla głównych kryteriów oceny – wszyscy decydenci

Grupa kryterium [-]	Nazwa kryterium oceny [-]	Znormalizowana w ramach grupy [-]	Surowa wartość [-]
Kryterium główne	Kryterium techniczne	0,14159	0,070797
	Kryterium energetyczne	0,23588	0,117942
	Kryterium egzergetyczne	0,18417	0,092085
	Kryterium ekonomiczne	0,25527	0,127637
	Kryterium społeczne	0,07976	0,03988
	Kryterium środowiskowe	0,10332	0,051659

4.7. Weryfikacja metodyki projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym dla rzeczywistych obiektów

W celu potwierdzenia stosowalności zaproponowanej metodyki projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym wykonano cztery przykłady obliczeniowe. Pierwszy polegający na wyborze najkorzystniejszego rozwiązania budynku mieszkalnego jednorodzinne – o dodatnim bilansie energetycznym – z wcześniej utworzonego zbioru dopuszczalnych rozwiązań (zważywszy na dwa różne modele preferencji decydenta, odpowiednio „Aktualny/przyszły użytkownik” oraz „Projektant/Architekt”). Ponadto uwzględniono zbiór podkryteriów decyzyjnych. Drugi przykład obliczeniowy jest analogiczny do pierwszego, jednak wzięto pod uwagę wyłącznie podkryteria oceny wykazujące charakter przyczynowy, zamiast całkowitego zbioru wyselekcjonowanych podkryteriów decyzyjnych. Efektem trzeciego i czwartego przykładu obliczeniowego jest wybór najkorzystniejszego rozwiązania budynku mieszkalnego wielorodzinnego, odpowiednio dla przykładu trzeciego z uwzględnieniem całego zbioru podkryteriów decyzyjnych, natomiast dla przykładu czwartego uwzględniono wyłącznie podkryteria oceny wykazujące charakter przyczynowy analogicznie jak w przypadku przykładu nr 2. Wszystkie obiekty zostały zaprojektowane zgodnie z przedstawionymi w niniejszej pracy zasadami projektowania budynków o dodatnim bilansie energetycznym.

Tab. 4.6.3.B. Wektory wag dla wszystkich podkryteriów oceny – wszyscy decydenci

Grupa kryterium [-]	Nazwa podkryterium oceny [-]	Znormalizowana w ramach grupy [-]	Surowa wartość [-]	Znormalizowana w ramach całości [-]
Kryterium techniczne	Współczynnik kształtu budynku (A/V)	0,1835	0,012991	0,025982
	Całkowity czas realizacji budynku (TBUD)	0,12383	0,008767	0,017534
	Utrudnienia realizacyjne (UREAL)	0,12981	0,00919	0,01838
	Całkowita żywotność budynku i jego instalacji technicznych (TŻYCIA)	0,29753	0,021064	0,042128
	Całkowita żywotność instalacji OZE (TOZE)	0,26534	0,018785	0,03757
Kryterium energetyczne	Całkowity wskaźnik zużycia energii pierwotnej (EPTOTAL)	0,12019	0,014176	0,028352
	Całkowity wskaźnik zużycia energii użytkowej (EUTOTAL)	0,29045	0,034256	0,068512
	Całkowity wskaźnik zużycia energii końcowej (EKTOTAL)	0,14817	0,017475	0,03495
	Całkowity wskaźnik ilości pozyskanej energii użytkowej odnawialnej (EUOZE)	0,24136	0,028467	0,056934
	Całkowity wskaźnik ilości wyprowadzonej energii końcowej odnawialnej (EKOZE)	0,19983	0,023568	0,047136
Kryterium egzergetyczne	Suma strat egzergii budynku i jego instalacji (BW+Z)	0,2147	0,019771	0,039542
	Suma egzergii wygenerowanej przez OZE (BGEN,OZE)	0,15147	0,013948	0,027896
	Skumulowane zużycie egzergii pierwotnej (BP*)	0,09422	0,008676	0,017352
	Stopień wykorzystania pozyskanej energii odnawialnej (WYKOZE)	0,23019	0,021197	0,042394
	Wykorzystanie naturalnych strategii grzania, chłodzenia i oświetlenia (NST)	0,30942	0,028493	0,056986
Kryterium ekonomiczne	Wewnętrzna stopa zwrotu dla OZE (IRROZE)	0,13842	0,017667	0,035334
	Całkowity koszt operacyjny (TOC)	0,16395	0,020926	0,041852
	Analiza kosztów życia budynku (LCC)	0,2721	0,03473	0,06946
	Całkowity koszt inwestycyjny prosty (KINW)	0,30949	0,039502	0,079004
	Dynamiczny koszt jednostkowy instalacji OZE (DGCOZE)	0,11604	0,014811	0,029622
Kryterium społeczne	Spełnienie parametrów komfortu cieplnego (KC)	0,28195	0,011244	0,022488
	Spełnienie parametrów jakości powietrza (JP)	0,33185	0,013234	0,026468
	Spełnienie parametrów komfortu akustycznego (KA)	0,15547	0,0062	0,0124
	Spełnienie parametrów komfortu wizualnego (KW)	0,11349	0,004526	0,009052
	Oddziaływanie budynku i jego instalacji na otoczenie (OOT)	0,11723	0,004675	0,00935
Kryterium środowiskowe	Analiza cyklu życia budynku (LCA)	0,2497	0,012899	0,025798
	Wskaźnik emisji ditlenku węgla (ECO2)	0,21675	0,011197	0,022394
	Koherentność odnawialnych źródeł energii (KOZE)	0,17314	0,008944	0,017888
	Czas zwrotu energii z OZE (EPBT)	0,20004	0,010334	0,020668
	Czas zwrotu emisji gazów cieplarnianych z OZE (GPBT)	0,16038	0,008285	0,01657

4.7.1. Budynek mieszkalny jednorodzinny – wybór rozwiązania (wszystkie wybrane podkryteria decyzyjne)

Zastosowano metodykę projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym w celu wyboru najkorzystniejszego rozwiązania dla budynku mieszkalnego jednorodzinnego, zważywszy na dwa różne modele preferencji decydenta, uwzględniono wszystkie wybrane podkryteria decyzyjne. Zidentyfikowano trzy rozwiązania techniczne, dopuszczalne zgodnie z przedstawionymi w niniejszej pracy zasadami i wytycznymi projektowania budynków o dodatnim bilansie energetycznym. Trzeba podkreślić, że wszystkie z przyjętych wariantów rozwiązań spełniają wytyczne standardu budynku pasywnego zgodnie z The Passive House Institute (PHI) – standard *Passive House Plus* (PH Plus).

Dyskusja wyników obliczeń

Tab. 4.7.1. Końcowy ranking wariantów

Lp.	Wariant	Współczynnik rankingowy Ri		
		Grupa decydent	Grupa Użytkownik	Grupa Projektant/Architekt
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	Wariant II	0,764	0,773	0,773
2	Wariant I	0,259	0,258	0,268
3	Wariant III	0,226	0,212	0,208

Najbardziej kompromisowym rozwiązaniem budynku mieszkalnego jednorodzinnego o dodatnim bilansie energetycznym jest budowa obiektu zgodna z wariantem nr II. Taki sam wynik uzyskano dla wszystkich trzech grup decydentów, z delikatnymi różnicami wartości pomiędzy poszczególnymi grupami, co było spowodowane różnymi preferencjami decydentów. Pozostałe dwa warianty są zdecydowanie gorszymi rozwiązaniami z punktu widzenia przeprowadzonej analizy wielokryterialnej i plasują się na podobnym poziomie wartości oceny.

Rozwiązanie zgodne z wariantem nr II w przeważającej ilości kryteriów decyzyjnych było rozwiązaniem idealnym, zgodnie z metodą TOPSIS, odpowiednio wobec 30 podkryteriów oceny, w grupie „Decydent” dla 26 podkryteriów, w grupie „Aktualny/Przyszły użytkownik” dla 23 podkryteriów oraz w grupie „Projektant/Architekt” dla 20 podkryteriów. Kompromisowe rozwiązanie było zdecydowanie najlepsze w wielu podkryteriach oceny, zwłaszcza w takich jak *Analiza kosztów życia budynku (LCC)*, *Stopień wykorzystania pozyskanej energii odnawialnej (WYK_{OZE})*, *Dynamiczny koszt jednostkowy instalacji OZE (DGC_{OZE})*, *Wskaźnik emisji ditlenku węgla (E_{CO2})*, *Całkowity wskaźnik zużycia energii użytkowej (EU_{TOTAL})*, *Całkowity wskaźnik zużycia energii końcowej (EK_{TOTAL})*, *Całkowita żywotność budynku (T_{ZYCIA})*, *Koherentność odnawialnych źródeł energii (KOZE)*. Kompromisowe rozwiązanie okazało się jednak w kilku podkryteriach oceny rozwiązaniem najdalszym od idealnego, m.in. w *Całkowity koszt inwestycyjny prosty (K_{INW})*, *Współczynnik kształtu budynku (A/V)*. Zastosowanie proponowanej metodyki projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym pozwala analitykowi i decydentowi na szczegółową analizę wyboru kompromisowego wariantu z grupy dopuszczalnych rozwiązań, uwzględniając przyjęte modele preferencji decydenta i wybrane do analizy kryteria decyzyjne oraz na obiektywny wybór rozwiązania najbardziej kompromisowego.

4.7.2. Budynek mieszkalny jednorodzinny – wybór rozwiązania (podkryteria decyzyjne z charakterem przyczynowym)

Zastosowano metodykę projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym w celu wyboru najkorzystniejszego rozwiązania dla budynku mieszkalnego jednorodzinnego, zważywszy na dwa różne modele preferencji decydenta, z uwzględnieniem wyłącznie podkryteriów decyzyjnych o charakterze przyczynowym. Przyjęto te same – jak w przykładzie poprzednim – dopuszczalne technicznie rozwiązania. Wszystkie z przyjętych wariantów rozwiązań spełniają wytyczne standardu budynku pasywnego zgodnie z The Passive House Institute (PHI) – standard *Passive House Plus* (PH Plus).

Dyskusja wyników obliczeń

Tab. 4.7.2. Końcowy ranking wariantów

Lp.	Wariant	Współczynnik rankingowy Ri		
		Grupa decydent	Grupa Użytkownik	Grupa Projektant/Architekt
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	Wariant II	0,849	0,800	0,826
2	Wariant I	0,266	0,305	0,272
3	Wariant III	0,118	0,154	0,137

Najbardziej kompromisowym rozwiązaniem budynku mieszkalnego jednorodzinnego o dodatnim bilansie energetycznym, uwzględniając wyłącznie podkryteria decyzyjne o charakterze przyczynowym, jest budowa obiektu zgodna z wariantem nr II. Taki sam wynik uzyskano dla wszystkich trzech grup decydentów, z delikatnymi różnicami wartości pomiędzy poszczególnymi grupami, co było spowodowane różnymi preferencjami decydentów. Pozostałe dwa warianty są gorszymi rozwiązaniami z punktu widzenia przeprowadzonej analizy wielokryterialnej. W porównaniu z przykładem 6.1 różnica między najkorzystniejszym wariantem a pozostałymi dopuszczalnymi rozwiązaniami zmniejszyła się. Spowodowane jest to tym, że najlepszy wariant w mniejszej względnej ilości podkryteriów oceny jest rozwiązaniem idealnym.

Rozwiązanie zgodne z wariantem nr II nadal w przeważającej ilości kryteriów decyzyjnych było rozwiązaniem idealnym, niemniej wobec wybranych 14 podkryteriów oceny o charakterze przyczynowym okazało się rozwiązaniem idealnym dla 11 podkryteriów w grupie „Decydent” oraz grupie „Aktualny/Przyszły użytkownik”, natomiast w grupie „Projektant/Architekt” dla 12 podkryteriów. Kompromisowe rozwiązanie okazało się zdecydowanie najlepsze w wielu podkryteriach oceny, zwłaszcza w takich jak *Całkowita żywotność budynku (T_{ZYCIA})*, *Koherentność odnawialnych źródeł energii (K_{OZE})*, *Suma strat energii budynku i jego instalacji (B_{w+z})*, *Stopień wykorzystania pozyskanej energii odnawialnej (WYK_{OZE})*, *Całkowity wskaźnik zużycia energii użytkowej (EU_{TOTAL})*. Kompromisowe rozwiązanie było również w kilku podkryteriach oceny rozwiązaniem najdalszym od idealnego, m.in. *Współczynnik kształtu budynku (A/V)*, *Całkowity wskaźnik ilości pozyskanej energii użytkowej odnawialnej (EU_{OZE})*. W wielokryterialnym wspomaganie decyzji generalnie chodzi o wybór wariantu kompromisowego, powyższa analiza z użyciem mniejszej ilości kryteriów decyzyjnych (wyłącznie charakter przyczynowy) potwierdziła prawidłowość wyboru rozwiązania kompromisowego.

4.7.3. Budynek mieszkalny wielorodzinny – wybór rozwiązania (wszystkie wybrane podkryteria decyzyjne)

Zastosowano metodykę projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym w celu wyboru najkorzystniejszego rozwiązania dla budynku mieszkalnego wielorodzinnego, zważywszy na dwa różne modele preferencji decydenta, ponadto uwzględniono wszystkie wybrane podkryteria decyzyjne. Zidentyfikowano trzy rozwiązania techniczne, dopuszczalne zgodnie z przedstawionymi w niniejszej pracy zasadami i wytycznymi projektowania budynków o dodatnim bilansie energetycznym. Trzeba podkreślić, że wszystkie z przyjętych wariantów rozwiązań spełniają wytyczne standardu budynku pasywnego zgodnie z The Passive House Institute (PHI) – standard *Passive House Plus* (PH Plus).

Dyskusja wyników obliczeń

Tab. 4.7.3. Końcowy ranking wariantów

Lp.	Wariant	Współczynnik rankingowy Ri		
		Grupa decydent	Grupa Użytkownik	Grupa Projektant/Architekt
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	Wariant I	0,597	0,615	0,602
2	Wariant II	0,568	0,553	0,573
3	Wariant III	0,414	0,427	0,412

Najbardziej kompromisowym rozwiązaniem budynku mieszkalnego wielorodzinnego o dodatnim bilansie energetycznym jest budowa obiektu zgodna z wariantem nr I. Tuż za nim plasuje się wariant nr II. Taki sam wynik uzyskano dla wszystkich trzech grup decydentów, z delikatnymi różnicami wartości pomiędzy poszczególnymi grupami, co było spowodowane różnymi preferencjami decydentów. W zasadzie dla grupy decydent oraz grupy Projektant/Architekt oba warianty, tj. nr I i nr II są tożsame. Trzeci wariant jest gorszym rozwiązaniem z punktu widzenia przeprowadzonej analizy wielokryterialnej.

Rozwiązanie zgodne z wariantem nr I w porównaniu z wariantem nr II w mniejszej ilości kryteriów decyzyjnych jest rozwiązaniem idealnym, zgodnie z metodą TOPSIS, odpowiednio, w grupie „Decydent” w 19 do 21 podkryteriów, w grupie „Aktualny/Przyszły użytkownik” w 17 do 23 podkryteriów oraz w grupie „Projektant/Architekt” w 18 do 23 podkryteriów. Wariant nr I nie jest zdecydowanie najlepszy w żadnym z podkryteriów oceny. Jedynym podkryterium oceny, w którym posiada przewagę ponad 10% jest *Całkowita żywotność instalacji OZE (T_{OZE})*. Oba rozwiązania są bardzo do siebie podobne, stąd tak bardzo podobna jest ich ocena. Klasyfikacja wariantu nr I na pierwszej lokacie ma miejsce z uwagi na docelowe wagi poszczególnych podkryteriów oceny przypisane przez określone grupy decydentów. W przypadku tak małej różnicy pomiędzy dwoma wariantami rozwiązań budynków korzystne jest przeprowadzenie analizy dla zawężonego zbioru podkryteriów oceny. Zastosowanie proponowanej metodyki projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym pozwala analitykowi i decydentowi na szczegółową analizę wyboru kompromisowego wariantu z grupy dopuszczalnych rozwiązań, uwzględniając przyjęte modele preferencji decydenta i wybrane do analizy kryteria decyzyjne oraz na obiektywny wybór rozwiązania najbardziej kompromisowego.

4.7.4. Budynek mieszkalny wielorodzinny – wybór rozwiązania (podkryteria decyzyjne z charakterem przyczynowym)

Zastosowano metodykę projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym w celu wyboru najkorzystniejszego rozwiązania dla budynku mieszkalnego wielorodzinnego, zważywszy na dwa różne modele preferencji decydenta, z uwzględnieniem wyłącznie podkryteriów decyzyjnych o charakterze przyczynowym. Przyjęto te same – jak w trzecim przykładzie – dopuszczalne technicznie rozwiązania. Wszystkie z przyjętych wariantów rozwiązań spełniają wytyczne standardu budynku pasywnego zgodnie z The Passive House Institute (PHI) – standard *Passive House Plus* (PH Plus).

Dyskusja wyników obliczeń

Tab. 4.7.4. Końcowy ranking wariantów

Lp.	Wariant	Współczynnik rankingowy Ri		
		Grupa decydent	Grupa Użytkownik	Grupa Projektant/Architekt
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	Wariant I	0,631	0,622	0,617
2	Wariant II	0,589	0,547	0,578
3	Wariant III	0,407	0,448	0,418

Najbardziej kompromisowym rozwiązaniem budynku mieszkalnego wielorodzinnego o dodatnim bilansie energetycznym, uwzględniając wyłącznie podkryteria decyzyjne o charakterze przyczynowym, jest budowa obiektu zgodna z wariantem nr I. Mimo zawężonego zbioru podkryteriów oceny tuż za nim plasuje się wariant nr II. Taki sam wynik uzyskano dla wszystkich trzech grup decydentów, z delikatnymi różnicami wartości pomiędzy poszczególnymi grupami, co było spowodowane różnymi preferencjami decydentów. Nadal dla grupy „Decydent” oraz grupy „Projektant/Architekt” oba warianty, tj. nr I i nr II sytuują się w bliskim sąsiedztwie w klasyfikacji (różnica <10%). Trzeci wariant jest gorszym rozwiązaniem z punktu widzenia przeprowadzonej analizy wielokryterialnej.

Podobnie jak w przykładzie 3 rozwiązanie zgodne z wariantem nr I w porównaniu z wariantem nr II w mniejszej ilości kryteriów decyzyjnych jest rozwiązaniem idealnym, zgodnie z metodą TOPSIS, odpowiednio, w grupie „Decydent” w 9 do 12 podkryteriów, w grupie „Aktualny/Przyszły użytkownik” w 7 do 12 podkryteriów oraz w grupie „Projektant/Architekt” w 7 do 12 podkryteriów. Wariant nr I nie jest zdecydowanie najlepszy w żadnym z podkryteriów oceny. Najwyższa pozycja spowodowana jest najbliższą odległością wariantu nr I w stosunku do rozwiązania idealnego i daleką odległością od rozwiązania antyidealnego. W wielokryterialnym wspomaganie decyzji chodzi o wybór wariantu kompromisowego, powyższa analiza z użyciem mniejszej ilości kryteriów decyzyjnych (wyłącznie charakter przyczynowy) potwierdziła prawidłowość wyboru rozwiązania kompromisowego.

5. PODSUMOWANIE

5.1. Spełnienie założonego celu

Problematyką niniejszej rozprawy doktorskiej jest projektowanie budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym. Podstawowym celem pracy było utworzenie autorskiego rozwiązania – wiarygodnej i skutecznej metodyki projektowania przedmiotowych obiektów. W szerokim przeglądzie literatury scharakteryzowano rolę i kierunek rozwoju sektora budownictwa do standardu obiektów o dodatnim bilansie energetycznym. Bazą dla budynków tego typu powinien być standard obiektów pasywnych, zgodnych z PHI, cechujący się najwyższą efektywnością energetyczną. Dlatego szczegółowo wskazano istotność stosowania bilansów energetycznych, które należy traktować jako punkt wyjścia przy aplikacji rozwiązań energooszczędnych. W niniejszej pracy przybliżono także szereg udoskonaleń dla budynków tradycyjnych, cech charakteryzujących budynki przyszłości. Ponadto przedstawiono proces projektowania obiektów mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym, wyszczególniono opis sytuacji decyzyjnej, w której rozwiązaniu należy zastosować jedną (lub wiele) z metod wspomaganie podjęcia decyzji. Przeprowadzono przegląd metod wielokryterialnego wspomaganie podjęcia decyzji i wybrano te najbardziej właściwe, najpełniej opisujące badany problem. Udowodniono, że dotychczas nie opracowano kompletnej metodyki wsparcia procesu decyzyjnego z otwartym zbiorem kryteriów decyzyjnych dla projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym, a tym bardziej metody uwzględniającej zależność kryteriów decyzyjnych, a bez wątpienia jest to konieczne do aplikacji – zważywszy na aktualną tendencję w projektowaniu i budowie, a także z uwagi na złożoność procesu decyzyjnego przy ogromnym wyborze potencjalnie poprawnych rozwiązań.

Przeprowadzona analiza literaturowa wykazała, że:

- Obserwuje się kierunek rozwoju sektora budownictwa do ograniczenia zużycia energii pierwotnej, wzrostu efektywności przetwarzania energii stosowanych rozwiązań technicznego wyposażenia budynku, wykorzystywania odnawialnych źródeł energii w zgodzie z ideą zrównoważonego rozwoju.
- Obecnie projektowane budynki muszą spełniać rozporządzenia obowiązujące dla danego kraju, modyfikowane celem poprawy efektywności energetycznej prowadzącej do zmniejszenia zużycia energii w środowisku zabudowanym.
- Prawidłowa selekcja, wybór i ocena kryteriów decyzyjnych powinna być przeprowadzona w początkowej fazie inwestycji budowlanej.
- Konieczne jest poszukiwanie kompromisowych rozwiązań dla konkretnego przypadku oraz stosowanie szeregu kryteriów decyzyjnych, zgodnych z preferencją określonego decydenta. Obecne badania pobieżnie traktują tę tematykę, co więcej nie wykazano dotąd wzajemnych korelacji pomiędzy wybranymi kryteriami oceny, przy czym istnieje jeszcze mnóstwo aspektów do dalszej eksploracji.

Mając na uwadze powyższe spostrzeżenia oraz biorąc pod uwagę możliwości przeprowadzania wieloaspektowych analiz, w pracy przedstawiono propozycję innowacyjnego podejścia do projektowania obiektów, możliwego do aplikacji na etapie koncepcji budowlanej – stworzono metodykę projektowania budynków o dodatnim bilansie energetycznym. Opiera się ona na zaproponowanym algorytmie, składającym się z 5 etapów.

Pierwszy to budowa bazy danych wejściowych dla konkretnego przedsięwzięcia, drugi – identyfikacja dopuszczalnych i akceptowalnych rozwiązań budynku mieszkalnego o dodatnim bilansie energetycznym. Trzecim, ważnym etapem, okazało się utworzenie zbioru kryteriów decyzyjnych i wybór takich, które spełniają szereg postulatów, cechujących się wyczerpującym charakterem, spójnością i brakiem redundancji. Na tym etapie pracy badawczej należało zidentyfikować relację między kryteriami decyzyjnymi, które wyznaczono, przeprowadzając ankietyzację grupy ekspertów przy zastosowaniu badań metodą delficką. Czwarty etap polegał na określeniu preferencji decydenta, wskazano je, przeprowadzając ankietyzację grupy celowej (osób wyraźnie zainteresowanych budową przedmiotowych obiektów) z zastosowaniem badań społecznych. Algorytm kończy etap piąty, w którym obliczono wartości zmiennych, poddano je normalizacji oraz utworzono ranking dopuszczalnych i akceptowalnych wariantów rozwiązań, zwieńczony wyborem rozwiązania kompromisowego. Przygotowany algorytm wskazuje konieczność zmian w klasycznym projektowaniu budynków mieszkalnych, przy uwzględnieniu kryteriów decyzyjnych, wykazujących względem siebie zależność. Proponowana metodyka polega na połączeniu trzech metod wielokryterialnego wspomaganie podjęcia decyzji: metody DEMATEL – użytej do wyznaczenia relacji między kryteriami decyzyjnymi, metody AHP/ANP – zastosowanej w celu zbudowania modelu preferencji decydenta oraz metody TOPSIS – wykorzystanej, by stworzyć ranking dopuszczalnych i akceptowalnych wariantów rozwiązań.

Proponowana metodyka została przetestowana na czterech przykładach obliczeniowych obejmujących wybór kompromisowego rozwiązania jednorodzinne i wielorodzinne budynku mieszkalnego o dodatnim bilansie energetycznym. Pierwszy i trzeci przykład – z uwzględnieniem wszystkich wcześniej wyselekcjonowanych kryteriów decyzyjnych oraz drugi i czwarty – z uwzględnieniem wyłącznie kryteriów decyzyjnych wykazujących charakter przyczynowy. Wszystkie przypadki przeanalizowano dla dwóch różnych modeli preferencji decydenta, odpowiednio „Aktualny/Przyszły użytkownik”, „Projektant/Architekt” oraz porównawczo dla wszystkich przebadanych decydentów. W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano uszeregowanie końcowe analizowanych wariantów od rozwiązania najbardziej preferowanego do najmniej akceptowanego. Zastosowana metodyka dla wybranych studiów przypadku wykazała swoją stosowność. Trzeba podkreślić, że opracowana metodyka ułatwia proces projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym, który jest procesem niezwykle złożonym.

5.2. Weryfikacja postawionych tez

W pracy przedstawiono autorskie rozwiązania, które doprowadziły do udowodnienia sformułowanych tez:

- 1) Proces projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym jest przedsięwzięciem wielokryterialnym, dla którego rozwiązania konieczne okazało się zastosowania metodyki (algorytmu) uwzględniającej szereg zależnych od siebie zmiennych (kryteriów) decyzyjnych.
- 2) Kryteria decyzyjne mogą być wzajemnie od siebie zależne, przez co konieczne jest wyznaczenie relacji między nimi (wag relacji). W tym celu zastosowano metodę

DEMATEL, która okazała się skutecznym narzędziem wykorzystującym przeprowadzone badania statystyczne zespołu ekspertów (metoda delficka).

- 3) Wybór dopuszczalnych technicznie rozwiązań zależy od modelu preferencji decydena, które skutecznie wyznaczono, stosując metodę AHP/ANP w oparciu o przeprowadzone badania statystyczne grupy decydentów wyraźnie zainteresowanych budową przedmiotowych obiektów (metoda badań społecznych).
- 4) Zweryfikowano stosowalność metodyki (algorytmu) projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym dla wybranego studium przypadku – rzeczywistych obiektów w standardzie pasywnym.

Wielokryterialne metody wspomagania podjęcia decyzji zostały wykorzystane do stworzenia metodyki projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym. W tym celu konieczne stało się stworzenie zunifikowanego algorytmu uwzględniającego identyfikację zbioru dopuszczalnych rozwiązań, kryteriów i podkryteriów oceny, wyznaczenie relacji między nimi oraz budowa modelu preferencji decydena. Skuteczne wykorzystanie algorytmu wymaga wyznaczenia wag relacji dla poszczególnych kryteriów decyzyjnych w oparciu o badania metodą delficką wybranej grupy ekspertów oraz obliczenia wag preferencji w oparciu o badania statystyczne decydentów. Uwzględnienie relacji pomiędzy kryteriami decyzyjnymi wpływa na wybór kompromisowego rozwiązania, mimo utworzenia modelu preferencji decydena. Operatywność zaproponowanej metodyki powinna zostać zweryfikowana poprzez zastosowanie dla wybranego studium przypadku – rzeczywistego obiektu – co z powodzeniem uczyniono.

5.3. Wnioski ogólne i rekomendacje końcowe

Za istotne, ważne, oryginalne osiągnięcia metodyczne i praktyczne, uznaje się:

a) osiągnięcia metodyczne

- opracowanie metodyki projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym,
- sformułowanie zagadnienia projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym jako wielokryterialnego problemu decyzyjnego, możliwego do rozwiązania poprzez użycie odpowiednich metod i otwartego zbioru kryteriów decyzyjnych,
- zdefiniowanie wspólnych kryteriów oceny jako reprezentatywnych dla danego aspektu problemu oraz ich wzajemna korelacja,
- skonstruowanie metody uwzględniającej wzajemne relacje kryteriów decyzyjnych, z wykorzystaniem metody delfickiej (badanie grupy ekspertów),
- opracowanie modeli preferencji decydena dla różnych grup celowych na podstawie przeprowadzonych badań społecznych (ankietyzacji) wśród osób wyraźnie zainteresowanych budową przedmiotowych budynków,
- sprawdzenie zaproponowanej metodyki projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym dla wybranych studiów przypadku – rzeczywistych obiektów,
- stworzenie rekomendacji końcowych.

b) osiągnięcia praktyczne

- przetestowanie zaproponowanej metodyki projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym dla wybranych studiów przypadku – rzeczywistych obiektów, uzyskanie satysfakcjonujących wyników,
- wskazanie praktycznych możliwości zastosowania proponowanej metodyki na wczesnym etapie koncepcji potencjalnej inwestycji,
- wyznaczenie kryteriów oceny posiadających silny charakter przyczynowy, które, w największym stopniu, wpływają na pozostałe kryteria oceny, co oznacza, że te kryteria obrazują czynniki, na których – w pierwszej kolejności – należy skupić się podczas projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energii, są one bowiem priorytetowe i w ich obrębie trzeba szukać dalszego potencjału poprawy,
- opracowana metodyka może być stosowana – między innymi – przez inwestora indywidualnego, deweloperów, przyszłego użytkownika, władze miasta, podmioty użyteczności publicznej, sektora prywatnego oraz przez inne grupy celowe,
- proponowana metodyka projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym jest uniwersalna, posiada otwarty zbiór kryteriów oceny i może być stosowana w każdym miejscu na świecie oraz – co szczególnie istotne – warto ją wykorzystywać dla innych aplikacji, m.in. budynków użyteczności publicznej i/lub przy kompleksowej modernizacji energetycznej istniejących budynków.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury oraz analizy studium przypadków zgodnie z utworzoną metodyką projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym można sformułować następujące **rekomendacje**:

- Każdy budynek mieszkalny aspirujący do miana budynku o dodatnim bilansie energetycznym musi być budynkiem energooszczędnym, jest to warunek konieczny, lecz niewystarczający i nie każdy budynek energooszczędny będzie obiektem o dodatnim bilansie energetycznym.
- Warunkiem koniecznym dla budynku o dodatnim bilansie energetycznym jest zabudowa technologii pozyskiwania energii z otoczenia oraz możliwości jej dalszego dystrybuowania.
- Magazynowanie sezonowego nadmiaru pozyskanej energii i wykorzystanie jej na cele konsumpcyjne w okresie niedoboru przy obecnie dostępnych na rynku technologiach jest mało efektywne i charakteryzuje się dużymi stratami energii.
- Efektywną metodą wyboru kompromisowego wariantu rozwiązania jest ocena z zastosowaniem preferencji wszystkich podmiotów zainteresowanych potencjalną inwestycją.
- Ocenę można przeprowadzać całościowo, z uwzględnieniem wspólnego profilu preferencji dla wszystkich decydentów lub w rozbiciu na poszczególne grupy celowe.
- W metodyce należy uwzględnić szerokie spektrum podmiotów, których problem dotyczy.
- Podczas wykonywania obliczeń przez analityka proponuje się przedstawienie pozostałym podmiotom ujęte kryteria oceny oraz przeprowadzenie dialogu, celem potencjalnego uzupełnienia lub redukcji kryteriów wziętych do analizy.

- Proponuje się systematyczne uaktualnianie bazy proponowanych wariantów rozwiązań, mając na uwadze dynamicznie rozwijający się rynek nowych technologii.
- Dla każdej projektowanej inwestycji przedstawia się indywidualnie określony profil preferencji decydenta oraz podmiotów zainteresowanych, z uwagi na uwarunkowania i priorytety lokalne, a także ze względu na wzrost świadomości społeczeństwa.
- Przeprowadzone badania metodą delficką (ankietyzacja zespołu ekspertów) są zunifikowane i można je stosować również dla innego typu budownictwa.
- Proponuje się aktualizację przeprowadzonych badań metodą delficką z uwagi na zmieniające się tendencje rynkowe – co pięć lat.
- W przypadku trudności związanych z zebraniem kompletu danych do podjęcia analizy, a zwłaszcza odpowiednio przypisanej wagi dla kryterium decyzyjnego oraz znalezienia jego relacji z pozostałymi kryteriami, a także odpowiedniego opisu wariantów rozwiązań, proponuje się zastosowanie metody przewyższania.
- W przypadku analiz innych przykładów inwestycji budowlanych wnioski nie muszą się pokrywać z powyższymi rekomendacjami.
- Zaproponowana metodyka projektowania budynków mieszkalnych o dodatnim bilansie energetycznym może być pomocna na etapie weryfikacji prac konkursowych podjętych przy przetargach publicznych w celu wyłonienia najkorzystniej zaprojektowanego obiektu.

5.4. Kierunki dalszych badań

Należy zwrócić uwagę, iż pomimo analizy, której przedmiotem były wyłącznie budynki mieszkalne, aplikacyjność metodyki można rozszerzyć o pozostałe typy obiektów. W tym celu należałoby ponownie przeprowadzić badania statystyczne grupy celowej (decydentów). Zaproponowana w pracy metodyka w przyszłości może zostać rozbudowana o dostosowanie algorytmu w celu przeprowadzenia analizy możliwości wyboru kompromisowego rozwiązania przy głębokiej modernizacji istniejących budynków do standardu budynku o dodatnim bilansie energii. Wybór kryteriów decyzyjnych można dostosować pod określony profil preferencji decydenta, zważywszy na różnice w postrzeganiu pewnych prawidłowości występujące dla różnych populacji na poziomie województwa, kraju czy kontynentu i/lub dla innej grupy celowej.

Wyselekcjonowaną grupę podkryteriów decyzyjnych można zmodyfikować poprzez wprowadzenie dodatkowych lub zmianę istniejących podkryteriów, które mogą mieć wpływ na ważność określonego wskaźnika ujętego w analizie. W fazie planowania inwestycji zaproponowaną metodykę można zintegrować z systemem modelowania informacji o budynkach (BIM) celem uzyskania pełnej charakterystyki przedmiotowego obiektu, co może skutkować lepszą propozycją potencjalnie możliwych wariantów rozwiązań oraz wyników ściśle określających wpływ podjętego działania na efekt końcowy.