WSPOMAGANIE DECYZJI LOKALIZACYJNYCH ŹRÓDEŁ WYTWÓRCZYCH METODAMI ANALIZY WIELOKRYTERIALNEJ

Autorzy: Alicja Stoltmann, Paweł Bućko, Izabela Sadowska, Marcin Jaskólski

("Rynek Energii" - luty 2016)

Słowa kluczowe: wielokryterialne metody podejmowania decyzji, Analytic Hierarchy Process, procesy inwestycyjne w elektroenergetyce

Streszczenie. Właściwa analiza lokalizacji źródła wytwórczego istotnie wpływa na pomyślność realizacji projektu inwestycyjnego. Na etapie planowania inwestycji, oprócz analizy opłacalności finansowej, należy uwzględnić wymagania dotyczące lokalizacji, które są regulowane prawnie. Ustawy: prawo energetyczne, prawo budowlane, prawo ochrony środowiska zawierają wytyczne, które należy uwzględnić przy planowaniu nowych inwestycji. Celem artykułu jest wskazanie kryteriów określających parametry lokalizacji inwestycji i wspomagających jej wybór w taki sposób, aby szanse na jej realizację były jak największe. Poszczególne funkcje kryterialne, ze względu na ich nieliniowy charakter, mogą przyjmować wartości decydujące o ich nie uwzględnieniu w procesie wyboru bądź zadecydować o konieczności rezygnacji z danej lokalizacji. Praca przedstawia opis programu wspomagającego decyzje o lokalizacji źródła wytwórczego energii elektrycznej. Podstawą działania programu jest dokonanie oceny poziomu zaawansowania poszczególnych etapów realizacji projektów budowlanych. Program określa również ryzyko nieuzyskania kompletu decyzji i pozwoleń, co prowadzi do nieplanowanego wydłużenia realizacji projektu lub do jego zamknięcia. Przeprowadzenie tego typu analizy jest ważne zarówno dla projektanta jak i dla inwestora, dostarcza bowiem wielu dodatkowych informacji przed podjęciem ostatecznych decyzji.

1. WSTĘP

Decyzje związane z wyborem lokalizacji i typu nowych źródeł wytwórczych energii elektrycznej podejmowane są po uwzględnieniu wielu rozwiązań i kryteriów ich oceny [1]. Według Konstytucji Rzeczypospolitej Polskiej, rozwój gospodarczy kraju musi odbywać się zgodnie z zasadą zrównoważonego rozwoju, którego definicję zawarto w ustawie Prawo ochrony środowiska [2]. Zakłada integrowanie działań politycznych, gospodarczych i społecznych tak, aby zaspokoić podstawowe potrzeby społeczności, przy jednoczesnej dbałości o stan środowiska naturalnego. Dlatego ważne jest, aby nowe źródło wytwórcze energii elektrycznej pokrywało zapotrzebowanie na energię przez odbiorców, jednocześnie w jak najmniejszym stopniu wpływając na poziom i jakość ich życia oraz otaczającego środowiska.

Przepisy prawne, definiujące zakres prac, jakie należy wykonać, aby budowa nowego źródła wytwórczego została zrealizowana, zostały zawarte w ustawach: Prawo energetyczne, Prawo budowlane, o ochronie przyrody oraz o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym [3-6]. Biorąc pod uwagę zróżnicowany zakres tematyczny w/w dokumentów, wybór lokalizacji źródła wytwórczego energii elektrycznej jest zagadnieniem wielowątkowym i wspomaganie decyzji metodami analizy wielokryterialnej znajduje tutaj zastosowanie.

2. WSPOMAGANIE DECYZJI METODAMI ANALIZY WIELOKRYTERIALNEJ

Wspomaganie decyzji jest procesem, który ma na celu dokonanie wyboru (podjęcie decyzji) [7].

Do wspomagania decyzji w elektroenergetyce stosuje się systemy o charakterze strategicznym, tj. o horyzoncie czasowym dłuższym niż 12 miesięcy. W tego typu systemach wspomagania decyzji grupa, w której każda osoba jest ekspertem w określonej dziedzinie wiedzy, dostarcza informacji wymaganych na potrzeby analizy. W zależności od potrzeb stosowane są metody jednokryterialne i wielokryterialne.

Metody wielokryterialne, w przeciwieństwie do metod jednokryterialnych, pozwalają na lepsze zrozumienie złożonego problemu decyzyjnego. Dlatego też opracowano wiele takich metod, których zadaniem jest wspomaganie podejmowania decyzji. Metody wielokryterialne można klasyfikować na wiele sposobów. W literaturze wymienia się metody: priorytetowe, rankingowe, odległości oraz łączone. Metodę należy wybrać w zależności od typu rozwiązywanego problemu. Metody wielokryterialne mogą być także klasyfikowane pod względem liczby decydentów, jako grupowe oraz indywidualne podejmowanie decyzji [8]. Metody wielokryterialne różnią się między sobą m.in. ilością i charakterem danych wejściowych, liczbą kryteriów oceny, pracochłonnością oraz sposobem prezentacji (czytelnością) wyników [9].

Jedną z najpopularniejszych metod analizy wielokryterialnej jest metoda hierarchicznej analizy problemów decyzyjnych AHP (ang. *Analytic Hierarchy Process*). Metoda ta opiera się na porównaniu parami kryteriów oraz wariantów decyzyjnych. Porównania te służą do utworzenia wektora skali, którego składowe wyznaczają ranking wariantów decyzyjnych. Problem decyzyjny przedstawiony jest w strukturze hierarchicznej. Na najwyższym poziomie hierarchii znajduje się cel główny, następnie znajdują się kryteria główne, wpływające bezpośrednio na realizację celu oraz kryteria cząstkowe, wpływające pośrednio na realizację celu. Najniższy poziom hierarchii zajmują warianty decyzyjne [10].

Popularnością pośród metod analizy wielokryterialnej cieszy się także metoda ELECTRE (ang. *Elimination et Choice Translating Reality*). W metodzie ELECTRE należy wyznaczyć dla każdej pary wariantów decyzyjnych: współczynnik zgodności, zbiór zgodności, poziom niezgodności, zbiór niezgodności i relację przewyższenia. W zależności od rozwiązywanego problemu stosuje się różne odmiany metody: ELECTRE Is (metoda wyboru), ELECTRE TRI (metoda sortowania), ELECTRE III (metoda rangowania) [11].

Niektóre metody, zamiast wskazywać najlepsze rozwiązanie, służą do badania relacji przewyższenia pomiędzy poszczególnymi wariantami decyzyjnymi. Do tego typu metod należy metoda PROMRTHEE (ang. *Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations*). Metoda ta bierze pod uwagę różnice pomiędzy ocenami wariantów dla wszystkich kryteriów. Im większa jest różnica pomiędzy ocenami, tym silniej preferowany jest jeden z

wariantów ze względu na dane kryterium. Metoda ta umożliwia wybór jednego wariantu (PROMETHEE I i II) oraz zbiór wariantów (PROMETHEE V) [12,13].

W rozwiązywaniu problemów wielokryterialnych zastosowanie znajduje również metoda TOPSIS (ang. *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*). W tej metodzie warianty decyzyjne porównywane są z abstrakcyjnymi ważonymi rozwiązaniami referencyjnymi - idealnym i antyidealnym. Uporządkowanie wariantów polega na obliczeniu odległości danego wariantu od rozwiązań referencyjnych i znalezieniu wartości miernika syntetycznego, który pozwala na końcowe uporządkowanie wariantów [14].

Wybór metody wielokryterialnej, odpowiedniej do rozwiązania danego problemu, sam w sobie jest zagadnieniem wielokryterialnym. W przedstawionym programie zastosowano metodę opartą na metodzie AHP, ponieważ pozwala na porównanie czynników mierzalnych (np. 2 lata) oraz niemierzalnych (np. brak monitoringów przyrodniczych), a także ze względu na brak możliwości ingerencji użytkownika programu w jej hierarchiczną strukturę.

3. WYBÓR LOKALIZACJI ŹRODŁA WYTWÓRCZEGO ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Oceniając lokalizację budowy źródła wytwórczego energii elektrycznej należy ocenić badane obszary ze względu na wiele aspektów. Pierwszym z nich jest możliwość wykorzystania właściwości danego obszaru. W przypadku farmy fotowoltaicznej są to badania nasłonecznienia terenu, dla elektrowni gazowej lub węglowej – dostępność surowca oraz możliwości chłodzenia, dla farmy wiatrowej jest to zbadanie możliwości wykorzystania energii wiatru. Procedura kompletowania dokumentów na potrzeby złożenia wniosku o wydanie decyzji o pozwoleniu na budowę dla nowych źródeł wytwórczych energii elektrycznej jest zbliżona dla różnych typów źródeł i pozwala na wnikliwą analizę rozpatrywanych lokalizacji. Należy osobno uzyskać decyzję o pozwoleniu na budowę dla źródła wytwórczego oraz dla linii elektroenergetycznej wyprowadzającej wytwarzaną moc elektryczną do sieci elektroenergetycznej.

Zgodnie z ustawą Prawo budowlane [4] wniosek o wydanie decyzji o pozwoleniu na budowę powinien zawierać: projekt architektoniczno-budowlany obiektu wraz z planem zagospodarowania terenu, oświadczenie o posiadanym prawie do dysponowania nieruchomością na cele budowlane, decyzję o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu, wyniki badań geologiczno-inżynierskich (w zależności od typu źródła wytwórczego).

Wykonanie projektu architektoniczno-budowlanego obiektu wraz z planem zagospodarowania terenu jest zagadnieniem wymagającym określenia sposobu produkcji energii elektrycznej, rozmieszczenia instalacji technicznej oraz doboru odpowiednich maszyn do wybranego terenu, np. mocy turbiny wiatrowej, jej wysokości i rozpiętości łopat, a także: rozmieszczenia turbin wiatrowych, liczby paneli fotowoltaicznych oraz ich usytuowania, rozmieszczenia budynków bloków elektrowni węglowych, hałdy węgla oraz chłodni kominowych itp.

Aby móc wykonać projekt architektoniczno-budowlany oraz niezbędne pomiary terenu, np. wietrzności lub nasłonecznienia, należy uzyskać prawo do dysponowania terenem na cele budowlane.

W fazie planowania i badań można zapewnić dostęp do terenu poprzez podpisanie umów dzierżawy terenu z właścicielami. Umowy te często zawierają zapisy co do współpracy z właścicielem po wybudowaniu źródła wytwórczego. Dla źródeł o większych powierzchniach terenu, po uzyskaniu pozwolenia na budowę inwestycji dokonuje się zakupu terenu.

Lokalizacja źródła wytwórczego powinna być uwzględniona w miejscowych planach zagospodarowania przestrzennego [15]. Ze względu na stosunkowo niewielkie pokrycie terytorium kraju planem zagospodarowania przestrzennego oraz czasochłonny proces uchwalania początkowo studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego a następnie miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego możliwe jest uzyskanie decyzji o lokalizacji inwestycji celu publicznego (dla inwestycji celu publicznego) lub decyzji o warunkach zabudowy (dla inwestycji innych niż celu publicznego). Decyzje te mają na celu ustalenie, czy dana inwestycja nie naruszy ładu przestrzennego. Aby decyzję uzyskać nie jest konieczne posiadanie prawa do terenu na cele budowlane. To, czy przedsięwzięcie jest inwestycją celu publicznego, określa ustawa o gospodarce nieruchomościami [16]. W przypadku, gdy na terenie planowanej lokalizacji istnieje plan zagospodarowania przestrzennego, który nie uwzględnia budowy nowego źródła wytwórczego, należy podjąć działania, aby uchwalić nowy plan zagospodarowania przestrzennego, począwszy od uchwalenia studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego. Uchwalenie nowego planu oraz studium znacznie wydłuża proces inwestycyjny, ponieważ wymaga wykonania wielu opracowań oraz zakłada udział społeczeństwa w procedurze jego uchwalania.

Aby uzyskać decyzję o warunkach zabudowy lub aby inwestycja została uwzględniona w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego, należy wcześniej uzyskać decyzję o środowiskowych uwarunkowaniach zgody na realizację przedsięwzięcia (w skrócie: decyzja środowiskowa). Wymagane jest uzyskanie decyzji środowiskowej dla przedsięwzięć mogących zawsze lub potencjalnie znacząco oddziaływać na środowisko. Do takich przedsięwzięć, zgodnie z rozporządzeniem w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko [17], zaliczane są niektóre źródła wytwórcze energii elektrycznej. Procedurę uzyskiwania decyzji środowiskowej zawarto w ustawie Prawo ochrony środowiska [2]. Ustawa wymaga, aby wniosek o wydanie decyzji środowiskowej był poprzedzony oceną oddziaływania na środowisko, która zawiera raport oddziaływania na środowisko. Zakres raportu ustalany jest indywidualnie w zależności od rodzaju i wielkości inwestycji. Raport zawiera między innymi informacje o możliwym oddziaływaniu inwestycji na środowisko. Aby zebrać potrzebne informacje do wykonania raportu należy przeprowadzić monitoringi przyrodnicze oraz określić czy planowany teren inwestycji nie znajduje się na terenach chronionych przyrodniczo, obszarze Natura2000 lub, w przypadku emisji hałasu, zbyt blisko zabudowań ludzkich lub siedlisk zwierząt.

Umiejscowienie inwestycji w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego, uzyskanie warunków lokalizacji inwestycji lub decyzji o warunkach zabudowy, uzyskanie decyzji środowiskowej oraz posiadanie prawa do dysponowania terenem na cele budowlane umożliwia inwestorowi wystąpienie o wydanie warunków technicznych przyłączenia do sieci elektroenergetycznej, które określają miejsce przyłączenia i maksymalną moc, która może zostać wprowadzona do systemu elektroenergetycznego [15]. Przedsiębiorstwo energetyczne po dokonaniu analizy możliwości przyłączenia nowego źródła wytwórczego w danym rejonie sieci elektroenergetycznej wydaje warunki przyłączenia. Po uzyskaniu warunków przyłączenia i spełnieniu wymagań w nich zawartych [18] następuje podpisanie umowy przyłączeniowej.

Analiza lokalizacji źródła wytwórczego pozwala na weryfikację analizy finansowej opłacalności inwestycji, wykonanej w trakcie planowania inwestycji. Wartość mocy, która może zostać wprowadzona do sieci elektroenergetycznej, pozwala na dokładne oszacowanie okresu zwrotu nakładów inwestycyjnych. W przypadku farmy wiatrowej ilość produkowanej mocy zależna jest od warunków wietrzności oraz od liczby turbin wiatrowych. W trakcie analizy lokalizacji wykonuje się pomiary wietrzności oraz rozpatruje się rozstawienie turbin na danym terenie, co pozwala na oszacowanie przyszłych zysków. Zyski ze sprzedaży produkowanej energii pomniejszone są o koszty eksploatacyjne oraz o podatek od nieruchomości oraz koszty dzierżawy [19].

Jak można zauważyć zarówno procedura uzyskania decyzji o pozwoleniu na budowę oraz podpisanie umowy przyłączeniowej podzielone jest na wiele zadań, które są ze sobą powiązane i bezpośrednio wpływają na sukces budowy nowego źródła wytwórczego energii elektrycznej.

4. CHARAKTERYSTYKA PROGRAMU

Przedstawiony program jest narzędziem wspomagającym decyzje związane z lokalizacją źródeł wytwórczych energii elektrycznej. Może zostać użyty do wyboru najlepszej lokalizacji źródła wytwórczego lub do porównania i oceny projektów, będących w różnych fazach realizacji. W przypadku porównania projektów należy zebrać wymagane informacje od poszczególnych osób, odpowiedzialnych za realizację poszczególnych zadań projektowych. Pogram umożliwia także oszacowanie ryzyka niepowodzenia projektu.

Program wykonano w arkuszu kalkulacyjnym MS Excel z użyciem programowania VBA. W programie zastosowano metodę opartą na metodzie analitycznego procesu hierarchicznego (z ang. *Analytic Hierarchy Process* - AHP), która wykorzystuje opinie ekspertów do ustalenia przewagi poszczególnych kryteriów oraz wyznaczenia najlepszego rozwiązania.

Poniżej przedstawiono tabelę zawierającą etapy wspomagania decyzji z podziałem na te, które realizowane są przez program, a które przez eksperta.

Tabela 1. Etapy wspomagania decyzji

Etap 1.	Budowa modelu	***Program*** *zawiera pytania podzielne na bloki tematyczne*
Etap 2.	Określenie dominacji kryteriów	***Ekspert*** *odpowiadając na pytania wprowadza oceny odpowiadające dominacji poszczególnych kryteriów*
Etap 3.	Raport wyników	***Program*** *na podstawie algorytmu określa poziom zaawansowania projektów i ryzyko niepowodzenia, przedstawia wyniki w postaci raportu*
Etap 4.	Analiza wyników	***Ekspert*** *dokonuje analizy otrzymanych wyników*

4.1 Budowa modelu

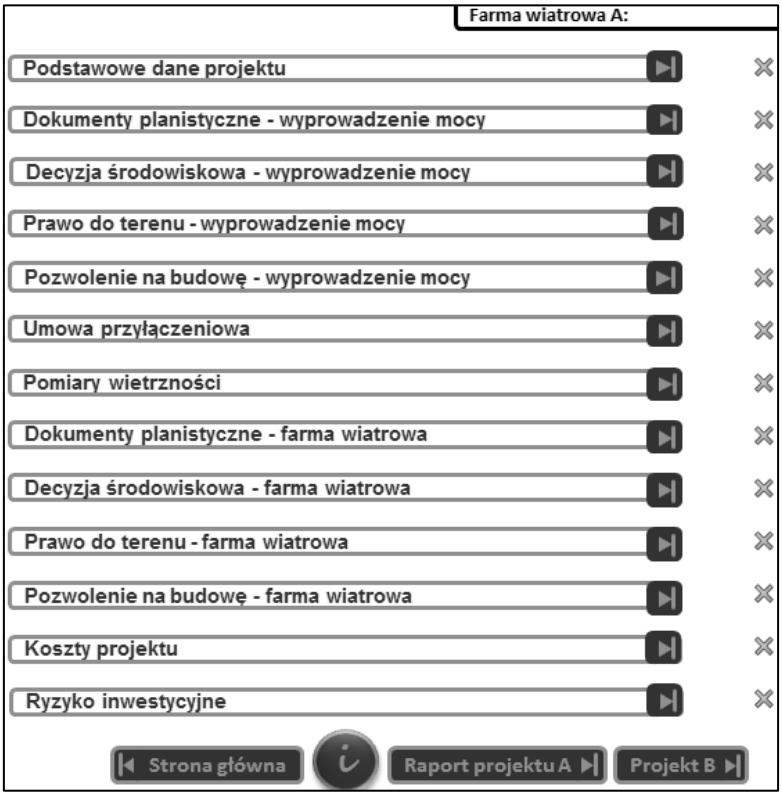
Zgodnie z założeniem metody AHP, proces decyzyjny należy rozpocząć od przedstawienia problemu jako hierarchii kryteriów, wariantów decyzyjnych oraz celu głównego. Na szczycie hierarchii znajduje się cel główny. W tym przypadku jest to projekt, który ma największe szanse na realizację, bądź lokalizacja dla której uzyskanie wszelkich decyzji i pozwoleń do uzyskania decyzji o pozwoleniu na budowę będzie obarczone najmniejszym ryzykiem niepowodzenia.

Aby wyznaczyć najlepszą lokalizację bądź wskazać, który projekt ma większe szanse na realizację, opracowano kryteria wpływające na osiągnięcie celu głównego. Kryteria podzielono na główne oraz cząstkowe. W niniejszym artykule dokonano opisu programu dla przypadku porównania projektów dwóch farm wiatrowych. Nazwy projektów oraz dane inwestora zmieniono.

Dla porównania projektów budowy farm wiatrowych, kryteria główne stanowią: uzyskanie dokumentów planistycznych, decyzji środowiskowej oraz prawa do terenu zarówno dla wyprowadzenia mocy produkowanej przez farmę wiatrową, jak i dla obszaru farmy. Kryterium główne to także koszty projektu, komplet pomiarów wietrzności oraz ryzyko inwestycyjne.

Na rys. 1 przedstawiono pierwszą kartę programu, wyświetlaną po wyborze typu źródła wytwórczego. Karta służy użytkownikowi do przemieszczania się pomiędzy poszczególnymi zagadnieniami, a także przedstawia zestawienie kryteriów głównych, wykorzystywanych w

analizie metodą AHP. Krzyżyki z prawej strony karty symbolizują niewypełnienie poszczególnych kart z pytaniami, a także blokują możliwość wyświetlenia raportu. Na dole każdej karty znajduje się przycisk z symbolem „*i*”, po kliknięciu którego wyświetla się informacja dotycząca tematyki danej karty. Karty te mają charakter informacyjny, uszczegóławiają zagadnienie, a także zawierają odwołania do poszczególnych aktów prawnych w razie, gdyby użytkownik chciał lepiej zapoznać się z daną tematyką.

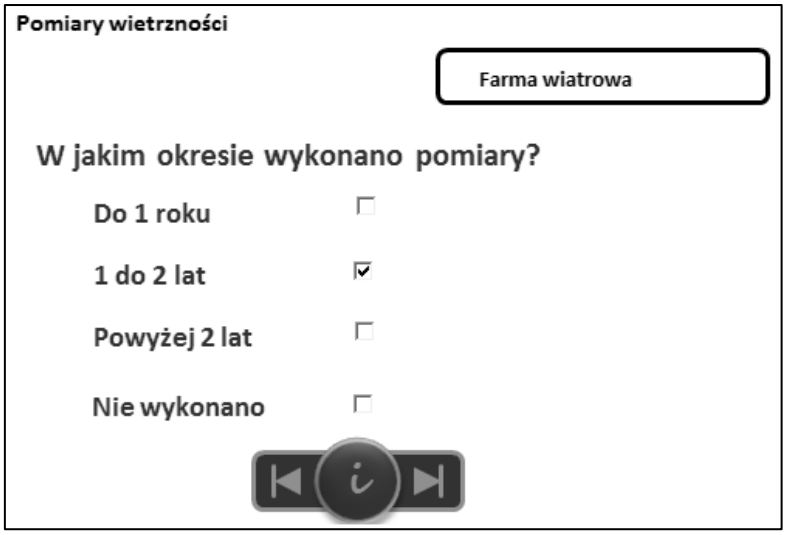


Rys. 1. Karta programu komputerowego do porównania projektów budowy farm wiatrowych

4.2 Określenie dominacji kryteriów

Wagi poszczególnych kryteriów głównych zależą od oceny eksperta, który prowadzony jest przez program poprzez odpowiadanie na pytania pogrupowane zgodnie z rys. 1. Przykładowo, gdy dany projekt posiada komplet pomiarów wietrzności, kryterium to nie ma takiego samego wpływu na realizację celu głównego jak w przypadku, gdy takowych pomiarów jeszcze nie wykonano. Posiadanie bądź nie posiadanie kompletu pomiarów wietrzności jest kryterium głównym analizy. Brak kompletu pomiarów wietrzności nie oznacza jednak, że nie podjęto jakichkolwiek działań w celu ich wykonania. Działania te określają kryteria cząstkowe, np. czas wykonania pomiarów, odległość urządzeń pomiarowych od planowanej wysokości turbiny wiatrowej lub procedurę dążącą do uzyskania pozwolenia na postawienie masztu pomiarowego. Dlatego też użytkownik powinien posiadać komplet informacji dotyczących porównywanych projektów, co w rzeczywistości, przy dużej liczbie jednocześnie realizowanych projektów, nie jest zadaniem łatwym.

Użytkownik programu odpowiadając na pytania w poszczególnych grupach nie ma możliwości podglądu tego, jak jego odpowiedź wpłynie na późniejszy wynik analizy. Udzielenie odpowiedzi odbywa się poprzez zaznaczenie dostępnych opcji (Rys. 2). Wyjątkiem jest karta dotycząca kosztów projektu, w której należy wpisać konkretne kwoty. Dzięki temu zmniejszono możliwość manipulacji wynikami.



Rys. 2. Zrzut ekranu karty określającej stopień realizacji kryterium *pomiary wietrzności* w przypadku braku kompletności pomiarów

Liczba odpowiedzi, jakich należy udzielić, zależna jest od stanu zaawansowania prac w poszczególnych projektach. Przykładowo, posiadając prawo do dysponowania terenem na cele budowlane, nie ma konieczności udzielania dalszych odpowiedzi na pytania określające stan zaawansowania prac dążących do uzyskania tego prawa. Każda udzielona odpowiedź jest przez program odpowiednio punktowana. Następnie program dokonuje porównania parami kryteriów głównych oraz kryteriów cząstkowych w oparciu o skalę porównań parami stworzoną przez T. L. Saaty'ego [10]. Wyniki porównania parami umieszczone zostały w macierzy porównań parami **A** typu (n x n), wzór 1. Macierz porównań parami składa się z n jedynek umieszczonych na głównej diagonalnej. Porównania dokonuje się poprzez wskazanie wpływu elementów z lewej strony macierzy na elementy znajdujące się na górze macierzy, zgodnie z udzielonymi odpowiedziami przez użytkownika. Poniżej głównej diagonalnej znajdują się odwrotności porównań parami.

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \qquad (1)$$

Ze względu na odwrotności porównań parami, i-ty wiersz jest odwrotnością i-tej kolumny, a więc zachodzi równość:

$$\boldsymbol{Aw} = n\boldsymbol{w} \qquad (2)$$

gdzie:

$\boldsymbol{w}$ – wektor kolumnowy o składowych $w_1, w_2, \ldots, w_n$

Następnie program wyznacza wektor priorytetów poszczególnych kryteriów ze względu na cel główny analizy, poprzez wyznaczenie składowych wektora własnego $\boldsymbol{w}$. Aby go wyznaczyć należy zastosować wzór:

$$\boldsymbol{w} = \sum_{j=1}^{n} w_j a_{ij} \qquad (3)$$

W ten sposób określone wagi służą do wyznaczenia poziomu zaawansowania projektu.

4.3 Raport wyników

Celem analiz wielokryterialnych jest wskazanie najlepszego rozwiązania spośród analizowanych wariantów decyzyjnych. Dla zagadnień dotyczących wyboru lokalizacji budowy źródeł wytwórczych energii elektrycznej zdecydowano się przedstawić wyniki analizy w postaci raportu, tak aby umożliwić użytkownikowi analizę jego poszczególnych części.

W przypadku porównywania planowanych lokalizacji stan zaawansowania poszczególnych prac będzie jednakowo niski. Dlatego też, aby porównać planowane lokalizacje budowy należy oszacować ryzyko niepowodzenia realizacji projektu. Karty ryzyka zostały podzielone na te związane z przygotowaniem i realizacją inwestycji. Każde ryzyko wyznaczane jest jako ryzyko rezydualne to znaczy takie, które pozostaje po podjęciu wszystkich możliwych bądź wszystkich uzasadnionych ekonomicznie kroków zmierzających do jego uniknięcia. Identyfikacji ryzyka dokonano uwzględniając najważniejsze zagrożenia mogące spowodować niepowodzenie uzyskania poszczególnych decyzji lub pozwoleń. Ryzyko rezydualne R określone jest przez prawdopodobieństwo wystąpienia ryzyka P (prawie pewne, prawdopodobne, umiarkowanie możliwe, mało prawdopodobne, prawie niemożliwe, brak), skutek wystąpienia ryzyka S (katastrofalny, poważny, umiarkowany, mało znaczący, nieznaczny, brak wpływu na projekt) oraz ocenę obecnych mechanizmów kontrolnych MK (kluczowe mechanizmy kontrolne zostały wdrożone i funkcjonują, jak je określono; pewne, minimalne mechanizmy kontrolne istnieją; mechanizmy kontrolne w zakresie zidentyfikowanego ryzyka bardzo minimalistyczne; brak mechanizmów kontrolnych)[20].

Formułę służącą do określenia ryzyka rezydualnego przedstawiono poniżej:

$$R = P \cdot S - MK \; [-] \qquad (4)$$

Program umożliwia wygenerowanie raportu dla jednego bądź kilku projektów lub lokalizacji. Raport dla jednego projektu lub dla jednej lokalizacji może służyć do dokonania analizy za-

awansowania poszczególnych zadań projektowych oraz dla oszacowania ryzyka niepowodzenia projektu będącego w danej fazie realizacji bądź projektu planowanego.

Raport składa się z czterech części (Rys. 3.). Pierwsza część zawiera zestawienie głównych założeń projektów, określając ich moc, liczbę turbin wiatrowych oraz ich lokalizację.

W części drugiej zestawiono stany zaawansowania projektów w poszczególnych zadaniach projektowych. Przedstawiono także całkowity stan zaawansowania projektów.

W trzeciej części raportu zestawiono koszty realizacji projektów. Jak wspomniano, metoda AHP pozwala na porównanie czynników mierzalnych oraz niemierzalnych, jednakowoż ze względu na późniejsze analizy raportu zdecydowano się wyszczególnić poszczególne koszty. Program, w obecnej formie, nie posiada możliwości przeprowadzenia analizy opłacalności finansowej budowy źródeł wytwórczych.

Ostatnia, czwarta, część raportu zawiera wyszczególnione ryzyka niepowodzenia projektów. Obok listy ryzyk występujących w danym projekcie umieszczono informację o wielkości danego ryzyka („*bardzo duże*", „*duże*", „*średnie*") oraz ikonkę obrazującą wpływ ryzyka na powodzenie projektu. W przypadku gdy analizowane są same lokalizacje, bez uwzględnienia konkretnych projektów, ilość ryzyk o bardzo dużym lub dużym stopniu może doprowadzić do rezygnacji z danej lokalizacji.

RAPORT

Ocena projektów budowy farmy wiatrowej

1. Założenia projektów

	Projekt A	Projekt B
Farma wiatrowa	Farma wiatrowa 1	Farma wiatrowa 2
Symbol projektu	FW-1	FW-2
Planowana moc	42 MW	26 MW
Ilość turbin	21	8
Inwestor	Firma X	Firma X
Lokalizacja		
Województwo	zachodniopomorskie	warmińsko-mazurskie
Powiat	xx	xx
Gmina	yy	yy

2. Stan zaawansowania projektów

	FW-1	FW-2
Dokumenty planistyczne - wyprowadzenie mocy	100 %	0 %
Decyzja środowiskowa - wyprowadzenie mocy	0 %	100 %
Prawo do terenu - wyprowadzenie mocy	100 %	0 %
Decyzja o pozwoleniu na budowę - wyprowadzenie mocy	67 %	0 %
Decyzja o pozwoleniu na budowę - zasilanie rezerwowe potrzeb własnych	0 %	0 %
Decyzja o pozwoleniu na budowę - rozbudowa stacji GPZ	0 %	0 %
Umowa przyłączeniowa	95 %	20 %
Pomiary wietrzności	100 %	60 %
Dokumenty planistyczne - farma wiatrowa	100 %	0 %
Decyzja środowiskowa - farma wiatrowa	100 %	50 %
Prawo do terenu - farma wiatrowa	30 %	100 %
Pozwolenie na budowę - farma wiatrowa	0 %	0 %
Stan zaawansowania projektu	**64,9** %	**30,0** %

str. 1

3. Porównanie kosztów projektów

	FW-1	FW-2	
Przygotowanie projektu	0,145	0,07	[mln zł/MW]
Cena mocy zainstalowanej	0,609	0,294	[mln zł/MW]
Koszty operacyjne	5,28	2,56	[mln zł/MW]
FLEOH (P50)	3000	2500	[h]
Koszty budowy	5,9598	8,4	[mln zł/MW]

4. Ryzyka niepowodzenia projektów

FW-1

Ryzyko wystąpienia protestów społecznych mających wpływ na otoczenie projektu	Bardzo duże
Ryzyko wystąpienia zażaleń/odwołań/zaskarżeń w procedurze uzyskania pozwolenia na budowę w zakresie farmy wiatrowej	Bardzo duże
Ryzyko wystąpienia zażaleń/odwołań/zaskarżeń w procedurze uzyskania DUŚ w zakresie farmy wiatrowej	Bardzo duże
Ryzyko przekroczenia terminu uzyskania pozwolenia na budowę w zakresie wyprowadzenia mocy	Duże
Ryzyko wystąpienia zażaleń/odwołań/zaskarżeń w procedurze uzyskania pozwolenia na budowę w zakresie wyprowadzenia mocy	Duże

FW-2

Ryzyko wystąpienia zażaleń/odwołań/zaskarżeń w procedurze uzyskania pozwolenia na budowę w zakresie farmy wiatrowej	Bardzo duże
Ryzyko ograniczenia ilości turbin (zmniejszenia planowanej mocy)	Bardzo duże
Ryzyko wystąpienia zażaleń/odwołań/zaskarżeń w procedurze uzyskania DUŚ w zakresie farmy wiatrowej	Bardzo duże
Ryzyko nieuzyskania DUŚ w zakresie farmy wiatrowej	Bardzo duże
Ryzyko nieuzyskania pozwolenia na budowę w zakresie farmy wiatrowej	Duże
Ryzyko uzyskania niekorzystnych (z ograniczeniami) warunków przyłączenia do sieci elektroenergetycznej	Duże
Ryzyko przekroczenia terminu uzyskania pozwolenia na budowę w zakresie wyprowadzenia mocy	Średnie

Opracowujący

Zatwierdzający

str. 2

Rys. 3. Widok ekranu przedstawiający raport dla oceny projektów budowy dwóch farm wiatrowych

4.4 Analiza wyników

Ostatnim etapem wspomagania decyzji jest analiza wyników zawartych w raporcie wygenerowanym przez program. Analiza raportu wykonywana jest zarówno przez ekspertów, jak i przez inwestora. Jednak to ekspert odpowiadając na pytania ma szeroki podgląd na strukturę programu.

W przedstawionym przykładzie porównano projekty budowy dwóch farm wiatrowych, będących w różnych fazach przygotowania.

Dokonując analizy otrzymanego raportu (Rys. 3) może zastanowić fakt, że pomimo posiadania niektórych dokumentów wymaganych do złożenia wniosku o pozwolenie na budowę stan zaawansowania punktu dotyczącego pozwolenia na budowę dla obszaru farmy wiatrowej jest równy zero. Jest to spowodowane strukturą programu. Użytkownik odpowiadając na pytanie: „*Czy Inwestor posiada ostateczną decyzję o pozwoleniu na budowę dla farmy wiatrowej?*" ma do wyboru odpowiedzi „*tak*" lub „*nie*". Gdy odpowiedź jest negatywna użytkownik przechodzi do karty z pytaniami cząstkowymi, dotyczącymi wyboru projektanta, posiadanym projekcie budowlanym, złożeniu wniosku o wydanie decyzji. Dlatego też, należy dokonać analizy wszystkich punktów przedstawionych w części drugiej raportu.

Program może być wykorzystywany także do monitorowania stanu, w którym znajdują się poszczególne projekty. Z uwagi na długi czas przygotowania inwestycji i dużą liczbę osób zaangażowanych w realizację projektów jest to funkcja bardzo przydatna, ponieważ pozwala na bieżący monitoring postępów pracy zespołów projektowych.

5. PODSUMOWANIE

Przedstawiony w artykule program służy do wspomagania decyzji lokalizacyjnych źródeł wytwórczych energii elektrycznej. Program znajduje zastosowanie w analizie planowanych lokalizacji oraz w analizach porównawczych projektów budowy, będących w pewnych stadiach przygotowania.

Aby porównać realizowane projekty, należy odpowiedzieć na szereg pytań zadawanych przez program, dotyczących poszczególnych projektów i prac wykonanych w poszczególnych obszarach. W celu porównania planowanych lokalizacji większą wagę należy przyłożyć do wypełnienia kart ryzyka niepowodzenia projektu, ponieważ stany zaawansowania projektów będą na równie niskim poziomie. Pytania zadawane użytkownikowi opracowane zostały na podstawie wymagań, jakie stawiane są inwestorom i które opisane zostały w ustawodawstwie polskim. W artykule przedstawiono opis podstawowych wymagań stawianych przed inwestorami wraz ze wskazaniem poszczególnych aktów prawnych, które niniejsze wymagania regulują.

Odpowiedzi udzielane przez użytkownika są przetwarzane przez program, opracowany w skoroszycie kalkulacyjnym MS Excel, którego działanie oparte zostało na metodzie AHP oraz kodach w języku programowania VBA. Program oparto na metodzie AHP ze względu na to, że umożliwia porównanie czynników mierzalnych i niemierzalnych, oraz ze względu na możliwość przekształcenia odpowiedzi użytkownika na późniejsze porównanie parami danych zagadnień (kryteriów).

W wyniku analizy dokonanej przez program, użytkownik otrzymuje dwustronicowy raport zawierający dane projektu, stany zaawansowania projektu w poszczególnych zadaniach projektowych, zestawienie kosztów projektu oraz kartę ryzyka, wskazującą największe zagrożenia dla realizacji projektu. To, w jaki sposób użytkownik wykorzysta dane zawarte w raporcie, zależy od jego doświadczenia i znajomości tematyki.

Zaletą programu jest jego szeroki zakres obejmujący wszystkie zagadnienia, jakie należy wziąć pod uwagę planując budowę nowego źródła wytwórczego. Jest to program przyjazny dla użytkownika, wymagający jednak dużej ilości wiedzy i danych do wprowadzenia. Dlatego też, podczas wprowadzania danych do programu, należy zasięgnąć opinii wszystkich osób należących do zespołu projektowego.

Należy zaznaczyć, że program obecnie jest w trakcie testowania i rozbudowy, np. zakresu badanych źródeł wytwórczych energii elektrycznej lub możliwości zagospodarowania ciepła odpadowego. Dlatego, w swojej obecnej formie, nie nadaje się jeszcze do użytku komercyjnego.

LITERATURA

[1] Yatsalo B., Didenko V., Gritsyuk S.: *A Framework for Multi-Criteria Decision Analysis*. Int. J. Comput. Intell. Syst. 2015, nr 8, str. 467–489.

[2] Ustawa z dn. 27 kwietnia 2001 r. *Prawo ochrony środowiska* (Dz.U.2001 Nr 62 poz. 627, z późn. zm.).

[3] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. *Prawo energetyczne* (Dz.U. 1997 nr 54 poz. 348, z późn. zm.).

[4] Ustawa z dn. 7 lipca 1994 r. *Prawo budowlane* (Dz.U. 1974 Nr 89 poz. 414, z późn. zm.).

[5] Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody (Dz.U. 2004 nr 92 poz. 880, z późn. zm.).

[6] Ustawa z dnia 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym (Dz.U. 2003 nr 80 poz. 717, z późn. zm.).

[7] Kozielecki J.: *Psychologiczna teoria decyzji*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe Warszawa, 1977.

[8] Pohekar S. D., Ramachandran M.: *Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review*. Renew. Sustain. Energy Rev 2004, nr 8, str. 365–381.

[9] Książek M.: *Analiza porównawcza wybranych metod wielokryterialnych oceny przedsięwzięć inwestycyjnych*. Budownictwo i inżynieria środowiska 2011, nr 2, str. 555–561.

[10] Saaty T. L.: *How to make a decision*. Eur. J. Oper. Res. 1990, nr 48, str. 9–26,.

[11] Roy B.: *The outranking foundations aproach and the methods*. Theory Decis. 1991, nr 31, str. 49–73.

[12] Salminen P., Hokkanen J., Lahdelma R.: *Comparing multicriteria methods in the context of environmental problems*. Eur. J. Oper. Res 1998, nr 104, str. 485–496.

[13] Brans J. P., Vincke P.: *A Preference Ranking Organisation Method*: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). Manage. Sci. 1985, nr 31, str. 647–656.

[14] Marković Z.: *Modification of topsis method for solving of multicriteria task*s. Yugosl. J. Oper. Res. 2010, nr 20, str 117–143.

[15] Suska-Szczerbicka M., Weiss E.: *Ocena opłacalności przedsięwzięcia inwestycyjnego produkcji energii elektrycznej farmy wiatrowej*. Rynek Energii 2013, nr 1, str. 1–9.

[16] Ustawa z dn. 21 sierpnia 1997 r o gospodarce nieruchomościami (Dz.U. 1997 Nr 115 poz. 741, z późn. zm.).

[17] 'Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 9 listopada 2010 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko (Dz.U. 2010 nr 213 poz. 1397).

[18] Buchta F.: *O mapie przyjaznych lokalizacji źródeł wytwórczych w KSE*. Rynek Energii 2011, nr 2.

[19] Pesta R.: *Analiza opłacalności budowy farmy wiatrowej o mocy 40 MW*. Rynek Energii 2009, nr 1.

[20] Skorupka D., Kuchta D., Górski M.: *Zarządzanie ryzykiem w projekcie*. Wrocław: 2012 Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych imienia generała Tadeusza Kościuszki.

MULTI-CRITERIA DECISION SUPPORT METHODS FOR ELECTRICITY GENERATION PLANT LOCALIZATION

Key words: multiple criteria decision making methods, Analytic Hierarchy Process, investment processes in power industry

Summary. Analysis of the electricity generation sources location significantly affects the success of the investment project. At the planning phase, except for feasibility studies, requirements regarding the location regulated by law should be also considered. During planning new investments a number of guidelines should be taken into account. The guidelines are included in the act on energy law, construction law, environmental law and others. This article aims to identify important issues which are to be considered in planning the location of investments so that the chances of its realization could be the greatest. The issues are presented in the form of criteria for the investment localization parameters which due to non-linear type may be negligible or prompt to abandon the location. The paper presents a description of the program supporting a decision maker in terms of deciding the location of electricity generation sources. The basis of the program is to assess the level of advancement of individual stages of construction projects. The program also defines the risk of failure to obtain a set of decisions and permits, leading to unplanned extension of the project or to its closure. Carrying out the type of analysis in question is important for both the designer and for investors because it provides plenty of additional information before making the final decision.

Alicja Stoltmann, mgr inż., wykładowca Katedra Elektroenergetyki, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska. e-mail: alicja.stoltmann@pg.gda.pl

Paweł Bućko, dr hab. inż., adiunkt, Katedra Elektroenergetyki, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska. e-mail: pawel.bucko@pg.gda.pl

Izabela Sadowska, dr inż., adiunkt, Katedra Elektroenergetyki, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska. e-mail: izabela.sadowska@pg.gda.pl

Marcin Jaskólski, dr inż., adiunkt, Katedra Elektroenergetyki, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska. e-mail: marcin.jaskolski@pg.gda.pl