

PRZEGLĄD NARZĘDZI WIELOATRYBUTOWEJ ANALIZY DECYZJI DO WYBORU WARIANTU INWESTYCJI W MIEJSKIEJ ENERGETYCE CIEPLNEJ

Grzegorz GINDA*, Dominika DAWIEC**

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Zarządzania,
Katedra Zarządzania Strategicznego

** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki
i Ochrony Środowiska, Katedra Surowców Energetycznych

Streszczenie: Komunalne systemy ciepłownicze polskich miast stanowią ważny element nie tylko infrastruktury technicznej. Ze względu na charakter realizowanej podstawowej usługi – dostarczania ciepła (a w przyszłości może również całorocznego komfortu) mogą być postrzegane jako istotna część społecznej infrastruktury miast, stwarzającej odpowiednie warunki do bytowania ludności oraz funkcjonowania obiektów infrastruktury społecznej i działalności przedsiębiorstw. Konieczność dostosowywania się przedsiębiorstwa ciepłowniczego do nowych wymagań pojawiających się wskutek zmian ekonomicznych, społecznych i środowiskowych, a coraz częściej także politycznych i prawnych, zachodzących w jego bliższym i dalszym otoczeniu, wymaga nowych inwestycji. Efekty ich realizacji mają jednak wielowymiarowy i w znacznej mierze trudno mierzalny charakter, zależą od upływającego czasu i złożonych uwarunkowań związanych z dążeniem do zapewnienia zrównoważonego rozwoju i bezpieczeństwa. Ich wiarygodna ocena wymaga więc zastosowania odpowiednich narzędzi. W rozdziale dokonano analizy przydatności w tym kontekście narzędzi wieloatrybutowej analizy decyzji, uwzględniając przy tym różne rodzaje takich narzędzi i uwarunkowania ich skutecznego wykorzystania. Wskazano także najbardziej obiecujące spośród nich.

Słowa kluczowe: energetyka cieplna, miasto, inwestycja, decyzja, ocena, wieloatrybutowa analiza, metoda, przegląd

1. Wprowadzenie

Z uwagi na uwarunkowania klimatyczne systemy ciepłownicze stanowią typowy element infrastruktury polskich miast. Ich zadanie polega zasadniczo na dostarczaniu w trakcie wielomiesięcznego sezonu grzewczego ciepła zapewniającego odpowiednie warunki bytowania ludności oraz funkcjonowania przedsiębiorstw i innych instytucji na obszarze miasta. Przy tym warto zwrócić uwagę na fakt, że obecnie systemy ciepłownicze polskich miast zostały w pewien sposób zobligowane do pełnienia ważnej

funkcji związanej z ochroną środowiska. Polega ona na wspomaganiu ograniczania niskiej emisji zanieczyszczeń generowanych przez przestarzałe, indywidualne urządzenia grzewcze opalane paliwami kopalnymi. Ustawa Prawo energetyczne z dnia 10 kwietnia 1997 r. (*Ustawa...* 1997) nakłada bowiem obowiązek przyłączania do sieci ciepłowniczych odbiorców, jeśli tylko istnieje taka możliwość.

Występowanie budynków wciąż niepodłączonych do sieci ciepłowniczych i pojawianie się nowych potencjalnych miejsc odbioru ciepła skutkuje inwestowaniem w nie przez przedsiębiorstwa zarządzające sieciami. Złożony charakter takich inwestycji wymaga przewidzenia zróżnicowanych scenariuszy inwestycyjnych i wielowymiarową ocenę ich potencjalnych efektów. Uwarunkowania lokalne i globalne powodują bowiem, że na efekty takich inwestycji ma wpływ wiele czynników o zróżnicowanym charakterze: politycznym, ekonomicznym, społecznym, technicznym, środowiskowym i prawnym. Efekty takie mogą mieć również trudno mierzalną naturę, a informacja na temat ich uwarunkowań ma często niedoskonały charakter. Dlatego w celu ich właściwego – holistycznego – ujęcia warto korzystać z możliwości strukturyzacji zagadnień rozwoju sieci ciepłowniczej dzięki zastosowaniu ramowej analizy PESTEL (*political economic social technical environmental legal analysis*) (Walsh 2005).

Wielowymiarowy charakter potencjalnych efektów inwestycji powoduje, że ich racjonalna ocena wymaga zastosowania specyficznych, uwzględniających ten fakt narzędzi. Wielu narzędzi dostarcza metodyka analizy decyzji (*decision analysis*) (Goodwyn i Wright 2016), w tym zwłaszcza – jej wieloatrybutowe ujęcie MADA (*multi-attribute decision analysis*). Ze względu na bogactwo narzędzi MADA dokonano w pracy ich przeglądu uwzględniającego również dostępność ich komputerowej implementacji oraz zastosowań do rozwiązywania zagadnień decyzyjnych związanych z miejską energetyką ciepłą. Na tej podstawie ostatecznie zarekomendowano najlepsze spośród nich.

W części drugiej omówiono podstawowe rodzaje metod MADA. Część trzecią poświęcono ich dotychczasowym zastosowaniom w miejskiej energetyce ciepłej. Pracę zwieńczono wnioskami na temat przydatności metod do oceny i analizy wariantów inwestycji.

2. Wieloatrybutowa analiza decyzji

Metodyce MADA poświęcono liczne, często bardzo obszerne opracowania (Ishizaka i Nemery 2013; Trzaskalik 2014; Greco i in. 2016). Zasadniczo wiąże się ona z analizą i oceną przyjętych wariantów postępowania (decyzji) – stanowiących przedmiot pewnej decyzji, opisywanych przez określony zestaw parametrów (atrybutów). Za Roy (2016) można stwierdzić, że istnieją cztery podstawowe zastosowania MADA określane mianem problematyk:

1. Opisu rozważanego zagadnienia (problematyka $P.\delta$).
2. Wyboru (najbardziej właściwego) wariantu decyzji (problematyka $P.\alpha$).
3. Grupowania (podobnych) wariantów decyzji (problematyka $P.\beta$).
4. Porządkowania (rangowania) wariantów decyzji (problematyka $P.\gamma$).

Zauważmy, że o ile przeznaczeniem trzech ostatnich rodzajów problematyki są konkretne działania na zbiorze wariantów decyzji, o tyle problematyka $P.\delta$ realizuje specyficzny cel wzbogacenia analizy rozważanego zagadnienia decyzyjnego, która może w przyszłości pozwolić na implementację jednej z pozostałych problematyk. Na uwagę zasługuje także możliwość wykorzystania kolejnych rodzajów problematyki MADA przez inne spośród nich. Na przykład w celu dokonania wyboru właściwego wariantu decyzji można posłużyć się wcześniej wyznaczonym rankingiem wariantów, a przy wyborze lub rangowaniu wariantów można wykorzystać wynik wcześniejszego ich grupowania.

W celu rozwiązania konkretnych zagadnień związanych z problematyką $P.\alpha$, $P.\beta$ i $P.\gamma$ opracowano liczne narzędzia MADA. Na podstawie wykorzystywanych przez nie zasad można je podzielić ramowo na cztery grupy (Ishizaka i Nemery 2013; Greco i in. 2016):

1. metody pełnej agregacji preferencji (*full preference aggregation*),
2. metody relacji przewyższania (*full preference aggregation*),
3. metody poziomu aspiracji i odniesienia,
4. metody o odmiennym charakterze.

Najbardziej popularne metody MADA należą do pierwszych trzech grup. Dlatego w dalszej części pracy przede wszystkim takim właśnie metodom poświęcono najwięcej miejsca.

2.1. Metody pełnej agregacji preferencji

Idea pełnej agregacji preferencji wiąże się z koncepcjami wieloattributowej teorii wartości MAVT (*multi-attribute value theory*) i użyteczności MAUT (*multi-attribute utility theory*) Keeneya i Raiffy (1976). Polega ona na wykorzystaniu do oceny wariantów decyzji, zwykle ważonej, addytywnej lub multiplikatywnej agregacji cząstkowych preferencji wariantów decyzji. Z uwagi na miejsce pochodzenia tej idei określa się ją amerykańską szkołą analizy decyzji.

Jednym z najpowszechniej stosowanych narzędzi, bezpośrednio implementujących powyższą ideę, jest proste addytywne ważenie SAW (*simple additive weighting*), które wykorzystuje formuły addytywne. Istnieje także jego, znacznie mniej popularny, multiplikatywny odpowiednik w postaci prostego multiplikatywnego ważenia SMW (*simple multiplicative weighting*).

Jeżeli chodzi o bardziej złożone metody, to dominuje spośród nich pod względem popularności analiza hierarchiczna procesów AHP (*analytic hierarchy process*) Saaty'ego (2012). Wydaje się, że poza jej uniwersalnym charakterem podstawowy powód takiej jej pozycji stanowi wykorzystanie prostego mechanizmu oceny – porównań parami ułatwiającego korzystanie z informacji o niedoskonałym charakterze oraz prostota obliczeń i strukturyzacji problemów decyzyjnych, wykorzystująca hierarchiczne zależności między komponentami modelu problemu. Zaproponowana przez Saaty'ego metodyka pozwala także uwzględnić bardziej złożone – dwukierunkowe relacje między komponentami modelu. Osiąga się to dzięki zastąpieniu hierarchicznej

struktury ich powiązań strukturą sieciową, wykorzystywaną przez sieciowy odpowiednik AHP w postaci analizy sieciowej procesów ANP (*analytic network process*) (Saaty i Vargas 2011). Ważnym atutem powyższych metod jest ogólnie dostępne oprogramowanie, wszechstronnie wspomagające realizację złożonych analiz. Na przykład zajmująca się ich popularyzacją fundacja Creative Decisions Foundations udostępnia w tym celu oprogramowanie *SuperDecisions* (<http://www.superdecisions.com/>).

Pośród pozostałych narzędzi pełnej agregacji preferencji wyróżniają się metody doskonalące metodykę wykorzystywaną w metodzie AHP. Należy do nich metoda MACBETH (*measuring attractiveness by a categorical based evaluation technique*) (Bana e Costa i Vansnick 1994) oraz REMBRANDT (*ratio estimation in magnitudes or decibels to rate alternatives which are non-dominated*) Lootsmy (1992). Jednak ze względu na bardziej złożony charakter, w odróżnieniu od pierwowzoru, ich zastosowanie jest możliwe jedynie dzięki wykorzystaniu specjalistycznego oprogramowania.

Podsumowując tematykę metod wykorzystujących ideę pełnej agregacji preferencji, można stwierdzić, że ich zasadnicze przeznaczenie polega na porządkowaniu – rangowaniu wariantów decyzji. Metody te wykazują również kompensacyjny charakter, który polega na możliwości poprawienia ogólnej oceny wariantu ustępującego pod względem pewnych atrybutów wariantowi innemu dzięki przewadze wynikającej z lepszej oceny pod względem określonych atrybutów. Warto zwrócić uwagę na fakt, że taka cecha metod nie jest mile widziana w przypadku poszukiwania globalnie najlepszych wariantów decyzji.

2.2. Metody relacji przewyższania

Relacja przewyższania pozwala identyfikować przypadki rodzaju dominacji poszczególnych wariantów decyzji nad innymi wariantami. W celu stwierdzenia, czy między wariantami porównywanymi w ramach pary rzeczywiście ona zachodzi, zwykle wykorzystywane są szczegółowe relacje odpowiadające znacznej przewadze jednego wariantu nad drugim (relacja preferencji) oraz identyczności (relacja nierozróżnialności) oraz nieporównywalności wariantów (relacja nieporównywalności) porównywanych wariantów. Z uwagi na europejskie pochodzenie metody te tworzą tzw. europejską szkołę wieloattributowego wspomaganie decyzji.

Można wyróżnić dwie podstawowe rodziny metod tej grupy (Figueira i in. 2016; Brans i De Smet 2016): ELECTRE (*elimintion et choix traduisant réalité*) oraz PROMETHEE (*preference ranking organization method for enrichment evaluation*). Co prawda, dostępnych jest także wiele innych metod wykorzystujących ideę relacji przewyższania, ale mają one pochodny charakter. W ramach obu rodzin metod są obecne ich warianty, które w odróżnieniu od metod wykorzystujących ideę pełnej agregacji preferencji oferują nie tylko możliwości rangowania, ale również grupowania wariantów decyzji i bezpośredniej rekomendacji najbardziej odpowiedniego spośród nich.

Metody rodziny ELECTRE bazują na bezpośrednim porównywaniu wariantów decyzji w kontekście ich cząstkowych ocen wyrażonych poziomami ich atrybutów. Przy tym jest możliwe stosowanie różnych mechanizmów zapobiegających

w wątpliwych przypadkach zbyt pochopnemu uznaniu przewagi jednego wariantu decyzji nad drugim. Należą do nich progi (*threshold*): preferencji, nierozróżnialności i weta. Ostateczna decyzja na temat szczegółowej relacji zachodzącej pomiędzy porównywanymi wariantami decyzji zostaje podejmowana na podstawie relacji zachodzącej między dwoma wskaźnikami: zgodności (*concordance index*) i niezgodności (*discordance index*). Warto zauważyć, że wykorzystywanie przez rodziny metod ELECTRE mechanizmu porównań parami sprzyja możliwości bezpośredniego porównywania wariantów decyzji także w kontekście atrybutów trudno mierzalnych.

W przypadku metod rodziny PROMETHEE porównania wariantów dokonuje się nie na podstawie poziomów ich atrybutów, ale wykorzystuje się do tego różnice poziomów atrybutów. Przy tym w celu sprowadzenia wszystkich częściowych ocen wariantów decyzji do wspólnego mianownika różnice te wyraża się wartościami z obustronnie domkniętego przedziału $[0; 1]$. Przekształcenia bezwzględnej wartości różnicy do liczby z przedziału jednostkowego dokonuje się dzięki zastosowaniu specyficznej formuły unitaryzacyjnej, która może przyjmować różne, zarówno ciągłe, jak i nieciągłe (schodkowe) postacie 0 – także uwzględniające wartości progowe preferencji i weta. Do określenia postaci szczegółowych relacji łączących warianty decyzji wykorzystuje się pojęcie ważonego przepływu preferencji (*preference flow*). W przypadku określonej pary wariantów decyzji może on przyjmować postać pozytywną (*positive preference flow*), wynikającą z częściowej przewagi nad drugim wariantem, oraz negatywną (*negative preference flow*), stanowiącą rezultat częściowej przewagi wariantu drugiego. Rodzinę metod PROMETHEE wyposażono również w zaawansowane narzędzie graficzne GAIA (*geomotrical analysis interactive aid*), przeznaczone do interaktywnej wizualizacji wyników analizy.

Ze względu na żmudny charakter analiz i obliczeń zastosowanie metod relacji przewyższania wymaga wspomagania komputerowego. Na szczęście dostępne jest oprogramowanie implementujące metody. Dobry przykład takich narzędzi stanowi atrakcyjna – nie tylko wizualnie – aplikacja Visual PROMETHEE (dostępna pod adresem: <http://www.promethee-gaia.net/phone/visual-promethee.html>), autorstwa Bertranda Mareschala – jednego z czołowych badaczy zaangażowanych w proces rozwoju metody PROMETHEE.

2.3. Metody poziomów aspiracji i odniesienia

Pośród narzędzi tego rodzaju szczególną uwagę warto poświęcić zwłaszcza dwóm metodom: TOPSIS (Hwang i Yoon 1981) i VIKOR (Opricović 1990). Wykorzystują one ideę poziomów aspiracji i odniesienia dzięki zastosowaniu par abstrakcyjnych obiektów – wzorca (*ideal*) i antywzorca (*anti-ideal*). Podstawową zaletę tych metod, a zarazem zasadniczą przyczynę jej popularności stanowi wykorzystywanie geometrycznej interpretacji podobieństwa obiektów. Korzystają one bowiem ze specyficznej reprezentacji wariantów decyzji w postaci punktów w wielowymiarowej przestrzeni ich atrybutów. W rezultacie pozwala to wyrażać podobieństwo wariantów decyzji (także w odniesieniu do wzorca i antywzorca) za pomocą odległości reprezentujących je punktów. Ponadto metody te nie wymagają złożonych obliczeń.

Nazwy obu powyższych metod czytelnie oddają ich podstawowe przeznaczenie. W przypadku pierwszej z nich, określanej jako metoda porządkowania wariantów decyzji na podstawie podobieństwa do wzorca (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), chodzi o porządkowanie (rangowanie) wariantów decyzji. W przypadku drugiej – wielokryterialnej optymalizacji i kompromisowego rozwiązywania (*VIseKryterijumska Optimizacija i Kompromisno Resenje*) – o kompromisowe wskazywanie najbardziej właściwego wariantu lub wariantów decyzji.

Porządkowanie wariantów decyzji w metodzie TOPSIS odbywa się na podstawie specyficznej metryki, wykorzystującej euklidesowe odległości punktów reprezentujących warianty decyzji w wielowymiarowej przestrzeni odpowiednio unormowanych atrybutów od wzorca i antywzorca. VIKOR operuje na nieunormowanych wartościach atrybutów wariantów decyzji. W celu wskazania najbardziej odpowiednich wariantów decyzji wykorzystywane są trzy ich specyficzne rankingi. Przy tym w metodzie uwzględnia się możliwość stosowania weta ze strony niekorzystnych atrybutów i związanej z nim analizy wrażliwości. Metoda również dba o to, by ostatecznie rekomendowany wariant decyzji lub ostatecznie rekomendowane warianty decyzji wykazywały znaczącą przewagę nad innymi wariantami.

Można także wyróżnić jeszcze inne narzędzia wykorzystujące ideę poziomów aspiracji i odniesienia. Na przykład Konarzewska-Gubała (2009) zaproponowała w tym kontekście metodę BIPOLAR, łączącą pewne cechy metodyki poziomów odniesienia i metod rodziny ELECTRE.

2.4. Pozostałe metody

Na podstawie prac Trzaskalika (2014) oraz Greco i in. (2016) można wyróżnić trzy grupy innych metod: interaktywnych, werbalnych oraz wykorzystujących reguły decyzyjne i specyficzne reprezentacje niedoskonałości dostępnej informacji. Ze względu na złożoność zastosowanie powyższych metod wymaga wspomaganie komputerowego.

Metody interaktywne zostały opracowane w celu rozwiązywania problemów złożonych i niedostatecznie określonych, w warunkach informacji o niedoskonałym charakterze i w związku z tym wymagających stopniowego odkrywania wiedzy na ich temat. Zasadniczo służą one do oceny i wyboru wariantów decyzji. Wykorzystują w tym celu wieloetapową interakcję z decydentem, która obejmuje wielokrotne powtarzanie dwóch faz. Pierwsza polega na aktualizacji informacji dzięki dialogowi z decydentem, a druga – na obliczeniach wykorzystujących pozyskane informacje. Istnieje szereg narzędzi implementujących taką ideę, np. STEM-DPR (Nowak 2008).

Metody werbalne implementują ideę werbalnej analizy decyzji VDA (*verbal decision analysis*). W metodach tych wykorzystywana jest wyłącznie jakościowa – wyrażana werbalnie – ocena wariantów decyzji. Dzięki jej zastosowaniu można rozwiązywać zagadnienia wyboru i grupowania wariantów decyzji. Na przykład do realizacji pierwszego z powyższych zadań można posłużyć się metodą ZAPROS LM (ros. Метод ЗАПРОС – ЗАмкнутые ПРОцедуры у Опорных Ситуаций) Laricheva i Moshkovicha (1997), a drugiego – metodą ORCLASS (Ashimhmin i Furems 2006).

Pośród metod korzystających z reguł decyzyjnych i specyficznej reprezentacji niedoskonałej informacji wyróżnia się oparte na dominacji podejście wykorzystujące zbiory przybliżone (*dominance-based rough set approach*) Greco i in. (2002). Za jego pomocą można rozwiązywać zagadnienia o różnym charakterze: problematyki wyboru, rangowania i grupowania wariantów decyzji. Interesujące możliwości analizy daje także rodzina metod określana mianem stochastycznej analizy wielokryterialnej akceptowalności SMAA (*stochastic multicriteria acceptability analysis*) Landhelmy i Salminen (2010). Polegają one na eksploracji przestrzeni wag dla określenia preferencji odpowiadających określonej pozycji poszczególnych wariantów decyzji w ich rankingu. Podejście jest stosowane wieloetapowo. Poszczególne etapy służą stopniowej rozbudowie dostępnej informacji dzięki np. bardziej dokładnym pomiarom lub określeniu preferencji decydentów. Ostateczna decyzja jest podejmowana dopiero na etapie, na którym pozwalają na to dostępne zasoby informacji.

3. Zastosowania MADA w miejskiej energetyce ciepłej

Poniżej dokonano krótkiego przeglądu kilkudziesięciu przypadków zastosowań metody MADA w miejskiej energetyce ciepłej, zidentyfikowanych na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury. Wykorzystano w tym celu przede wszystkim bibliograficzną bazę Scopus (<https://www.scopus.com>).

3.1. Metody pełnej agregacji preferencji

Pośród podejść wykorzystujących ideę pełnej agregacji preferencji dominuje metoda AHP. Z metody skorzystano także w przypadku rozpatrywania różnych kontekstów zrównoważonego rozwoju. Na przykład Wang i in. (2019) dokonali oceny skuteczności partnerstwa prywatno-publicznego w aspekcie inwestycji w czyste zrównoważone systemy ciepłownicze. Laktuka i in. (2021) podjęli próbę oceny stopnia uwagi regionalnych i lokalnych strategii podnoszenia efektywności ogrzewania oraz chłodzenia w aspekcie intensyfikacji zrównoważonego rozwoju miast, zaś Balode i in. (2021) dowiedli przewagi systemów ciepłowniczych nad indywidualnymi systemami grzewczymi. Pellegrini i in. (2019) sklasyfikowali potencjalne rozwiązania techniczne, ułatwiające transformację systemów ciepłowniczych w systemy zrównoważone.

Z AHP skorzystano także do oceny systemów ciepłowniczych wykorzystujących energię geotermalną (Eltez i in. 1999) oraz oceny programów zarządzania inwestycjami strony popytowej (Lee i in. 2007) i inżynierskiej wartości różnych konfiguracji systemów dostarczających ciepło i chłód dzięki zastosowaniu pomp ciepła wykorzystujących wodę morską (Shu i in. 2010).

Metoda okazała się również właściwym narzędziem do wspomagania optymalizacji: lokalizacji ciepłowni (Geri i in. 2018), efektywności energetycznej systemu ciepłowniczego (Skiba i in. 2021) oraz systemu integrującego sieć ciepłowniczą z siecią energetyczną (Arslan i in. 2021). W tym ostatnim przypadku umiejętnie połączono zastosowanie AHP z zastosowaniem metody TOPSIS.

Metoda okazała się również skuteczna w odniesieniu do rozwiązywania zagadnienia wyboru odpowiedniego źródła ciepła dla systemu ciepłowniczego (Dytczak i Ginda 2006; Fang i Wang 2014). Wykorzystano ją także – razem z systemem informacji przestrzennej GIS (*geographical information system*), siecią bayesowską i analizą obwiedni danych DEA (*data envelopment analysis*) – do wspólnej implementacji zrównoważonej karty wyników BSC (*balanced score chart*), wspomagającej strategiczne zarządzanie systemem ciepłowniczym (Bazil i in. 2021).

Z kolei Bilić i in. (2020) wykorzystali metodę SAW do wieloatrybutowej oceny przydatności geotermalnych wód w kontekście wykorzystania ich m.in. do celów ciepłowniczych.

3.2. Metody relacji przewyższania

Zastosowanie metod relacji przewyższania w miejskiej energetyce ciepłej reprezentują metody ELECTRE i PROMETHEE. Z pierwszej z nich skorzystali Grujić i in. (2014) do określenia właściwych źródeł ciepła dla systemu ciepłowniczego Belgradu, a Mróz (2008) – do planowania systemu ciepłowniczego. Metoda PROMETHEE posłużyła Ghafghaziemu i in. (2010) do oceny przydatności źródeł ciepła w ujęciu scenariuszowym, Fang i Wang (2014) wykorzystali ją – wspólnie z AHP – przy wyborze źródła ciepła, a Ziemele i in. (2014) – razem z TOPSIS – w trakcie scenariuszowej optymalizacji sterowania systemem ciepłowniczym.

3.3. Metody poziomów aspiracji i odniesienia

Pośród metod wykorzystujących poziomy aspiracji i odniesienia w kontekście miejskiej energetyki ciepłej dominują zastosowania metody TOPSIS. Jednocześnie stanowią one najchętniej wykorzystywane tu narzędzie. Zdecydowanie najwięcej takich zastosowań metody dotyczy optymalizacji: zintegrowanych systemów wytwarzających w skojarzeniu ciepło i energię elektryczną (He i in. 2008; Arslan i in. 2021; Wu i in. 2022), podsystemu systemu ciepłowniczego (Wu i in. 2020), sieci zasilanej w ciepło z dwóch źródeł energii (Zhao i in. 2021), urządzeń przeznaczonych do systemów ciepłowniczych zaopatrujących w ciepło tereny mieszkalne (Wu i in. 2021), udziału przemysłowego ciepła odpadowego i energii dostarczanej przez pompy ciepła do systemu ciepłowniczego, który skutkowałby efektem bliskim neutralności węglowej przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów (Yuan i in. 2021).

Kolejne zastosowania TOPSIS dotyczą zagadnień technologicznych, w tym zwłaszcza oceny i doboru źródeł ciepła dla miejskich systemów ciepłowniczych. W ramach tej tematyki zrealizowano wieloscenariuszową ocenę i dokonano wyboru technologii i źródeł ciepła dla miejskiego systemu ciepłowniczego (Boran 2013; Polikarpova i in. 2019), przeprowadzono ocenę technologii stosowanych w systemach ciepłowniczych (Streimikiene i Balezentiene 2014), analizę kogeneracyjnego systemu energetycznego zasilającego sieć ciepłowniczą w ciepło i energię elektryczną i zarekomendowano jego właściwy kształt (Cimdina i in. 2014). Za pomocą metody wspomagano także analizę problematyki transformacji energetycznej. W jej ramach rozpatrzono określenie struktury bezemisyjnego (w sensie unikania konieczności

nabywania uprawnień do emisji gazów cieplarnianych) systemu ciepłowniczego (Ziemele i in. 2016) i określono docelowe źródło energii dla systemu ciepłowniczego funkcjonującego na terenie jednostki samorządowej (Prodanuks i Blumberga 2018).

Zastosowanie metody ułatwiło również rozwiązywanie zagadnień zrównoważonego rozwoju w systemach ciepłownicznych. Na przykład Prodanuks i Blumberga (2018) zwrócili uwagę na fundamentalny wpływ rozwoju systemów ciepłownicznych na kształtowanie i rozwój miejskich planów energii, a Laktuka i in. (2021) – wspomagając się dodatkowo metodą AHP – przeprowadzili próbę oceny stopnia uwagi poświęconej w regionalnych i lokalnych strategiach energetycznych potencjałowi możliwości intensyfikacji zrównoważonego rozwoju miast dzięki podnoszeniu efektywności ogrzewania i chłodzenia. Natomiast Abokersh i in. (2021) podjęli tematykę wspomagania procesu upowszechnienia budownictwa blisko zeroenergetycznego NZEB (*nearly zero energy buildings*) za pomocą solarnych systemów ciepłownicznych SDHS (*solar district heating system*) i ostatecznie – dzięki zastosowaniu modelu uczenia maszynowego integrującego wielokryterialną optymalizację z wieloattributową analizą decyzji – określili właściwą skalę systemu SDHS i dowiedli ich pozytywnej roli w realizacji celów zrównoważonego rozwoju. Z kolei dodatkowe – równoległe – zastosowanie metody VIKOR i jeszcze kilku innych narzędzi pozwoliło Wen i in. (2021) udowodnić przyjazny dla środowiska charakter systemów ciepłownicznych jako źródła energii dla duńskich gospodarstw domowych.

Poza wspomnianym wspólnym zastosowaniem metody z AHP do realizacji idei BSC (Bazil i in. 2021) okazała się ona również użyteczna w innych kontekstach zarządzania systemami ciepłowniczymi. Na przykład w celu wspomagania poszukiwań optymalnego trybu sterowania systemem ciepłowniczym zasilającym nowe budynki zintegrowano TOPSIS z PROMETHEE (Ziemele i in. 2014), a z samej metody skorzystano w celu wspomagania ograniczania emisji zanieczyszczeń generowanych przez przedsiębiorstwo ciepłownicze, dzięki odpowiedniemu ukształtowaniu taryf opłat za energię ciepłą, sprzyjającemu wzrostowi efektywności energetycznej i wykorzystaniu odnawialnych źródeł energii w systemie ciepłowniczym (Ziemele i in. 2014a).

3.4. Metody o innym charakterze

Wśród pozostałych metod w miejskiej energetyce cieplnej stosowana jest metoda SMAA. Została ona wykorzystana przez Kontu i in. (2015) do wskazania właściwego źródła ciepła dla planowanego osiedla domów jednorodzinnych, którym finalnie okazał się system ciepłowniczy wytwarzający z biomasy ciepło w skojarzeniu z energią elektryczną. Kirppu i in. (2018) użyli jej do wieloattributowej oceny zeroemisyjnych, a więc neutralnych węglowo technologii wytwarzania ciepła. Wang i in. (2018) zastosowali metodę do wielokryterialnej stochastycznej oceny systemów ciepłownicznych, natomiast Pinto i in. (2019) przeprowadzili za jej pomocą ocenę neutralnych węglowo technologii dla systemów ciepłownicznych.

Z punktu widzenia tematyki rozpatrywanej w pracy na szczególną uwagę zasługuje odosobniony w kontekście praktycznych zastosowań metodyki MADA przypadek wykorzystania SMAA do oceny wariantów potencjalnych inwestycji w miejskim systemie ciepłowniczym (Wang i in. 2017).

4. Podsumowanie

Współczesne zagadnienia decyzyjne w ciepłownictwie mają bardzo złożony charakter, gdyż ich rozwiązania uwarunkowane są wieloma specyficznymi czynnikami, np. wielodzielnością zaangażowaniem licznych interesariuszy, wielowymiarowością i trudnomierzalnością (przynajmniej niektórych) kryteriów oceny, celów i oddziaływań z wielowymiarowym otoczeniem czy niepewnością co do charakteru ich uwarunkowań w przyszłości. Ich rozwiązywanie nie może więc polegać jedynie na intuicji, gdyż wymaga przeprowadzania skomplikowanych analiz. Na szczęście metodyka MADA dostarczyła wielu zróżnicowanych narzędzi do wspomagania takich analiz.

Z przeprowadzonego przeglądu literatury na temat zastosowań MADA w miejskiej energetyce ciepłej wynika, że pomimo dużo wcześniejszej i dłużej dostępności dojrzałych metod, w miejskiej energetyce ciepłej zainteresowano się nimi stosunkowo niedawno, bo dopiero na przełomie XX i XXI wieku. Co więcej, większość takich ich zastosowań dotyczy ostatnich kilku lat i następujących zagadnień: ocena i optymalizacja miejskich systemów ciepłowniczych, wybór właściwej technologii (w tym również źródła) ciepła, a także implementacji zrównoważonego rozwoju i transformacji energetycznej. Część zastosowań dotyczyła też zarządzania systemem i przedsiębiorstwem ciepłowniczym.

W praktyce wykorzystano w tym celu narzędzia reprezentujące każdy z wyróżnionych na początku podrozdziału 2 rodzajów metod MADA. Najczęstsze zastosowanie znalazły przy tym metody dwóch grup – poziomów aspiracji i odniesienia (TOPSIS) i pełnej agregacji preferencji (AHP). Spośród pozostałych częściej wykorzystywanych metod wyróżniają się – PROMETHEE w grupie metod relacji przewyższania, a w grupie innych metod – SMAA.

Tylko w jednym z zastosowań – dotyczącym użycia ostatniego z ww. narzędzi – pojawił się bezpośrednio kontekst oceny i wyboru inwestycji w miejskim systemie ciepłowniczym. Charakter i praktyka stosowania innych narzędzi MADA sugerują jednak możliwość wykorzystania w tym celu także – bardziej intuicyjnych – narzędzi innych grup, w tym metod AHP, TOPSIS i PROMETHEE, a zwłaszcza niedocenianego narzędzia – metody VIKOR – umiejętnie uzupełniającej metodykę poziomów aspiracji i odniesienia o rodzaj analizy wrażliwości i pojęcie weta. Z kolei w przypadku konieczności uwzględniania niehierarchicznych – wielokierunkowych sprzężeń zachodzących między zróżnicowanymi czynnikami warunkującymi ocenę wariantów decyzji istnieje możliwość stosowania ulepszanego wariantu metody AHP w postaci ANP.

Ostatecznie można więc stwierdzić, że metodyka MADA ma jeszcze wiele do zaoferowania w kontekście wspomaganie analizy złożonych wariantów inwestycji realizowanych w miejskich systemach ciepłowniczych, tym bardziej że istnieją również liczne możliwości łączenia różnych narzędzi. Na przykład w razie konieczności uzupełnienia metod ilościowych, takich jak narzędzia wykorzystujące poziomy aspiracji i odniesienia czy SAW, o możliwość uwzględniania czynników trudno mierzalnych – bezpieczeństwa, komfortu, nastrojów społecznych etc., warto skorzystać z możliwości wiarygodnego przetworzenia opinii eksperckich za pomocą metod porównywania parami, np. AHP lub ANP. Z podobnej możliwości warto także skorzystać w przypadku

obiektywizacji wag określających znaczenie poszczególnych wymiarów analizy inwestycji, co można znaleźć w wielu najnowszych pracach (Fang i Wang 2014; Ziemele i in. 2014; Arslan i in. 2021; Bazil i in. 2021; Laktuka i in. 2021). Interesującym potencjalnym zabiegiem wzbogacającym analizy wariantów inwestycji może się również okazać wykorzystanie specyficznego rodzaju analizy wrażliwości dzięki równoległemu, niezależnemu zastosowaniu różnych metod MADA, jak to przykładowo uczynili Wen i in. (2021).

Warto także zauważyć, że niewątpliwy atut metodyki MADA w odniesieniu do analizy i wyboru wariantów inwestycji w miejskich sieciach ciepłowniczych może stanowić – zwłaszcza w przypadku stosowania bardziej złożonych i zaawansowanych metod – szeroka dostępność ich obliczeniowych implementacji, które obszernie zaprezentowano np. w książce Ishizaki i Nemery’ego (2013).

Literatura

- Abokersh M.H., Gangwar S., Spiekman M., Vallès M., Jiménez L., Boer D., 2021, *Sustainability insights on emerging solar district heating technologies to boost the nearly zero energy building concept*, Renewable Energy, 180, s. 893–913.
- Arslan A.E., Arslan O., Kandemir S.Y., 2021, *AHP–TOPSIS hybrid decision-making analysis: Simav integrated system case study*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 145, 3, s. 1191–1202.
- Ashimhmin I., Furems E., 2006, *UniComBOS – Intelligent Decision Support System for multi-criteria comparison and choice*, Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 13, 2/3, s. 147–157.
- Balode L., Dolge K., Blumberga D., 2021, *The contradictions between district and individual heating towards green deal targets*, Sustainability (Switzerland), 13, 6, art. 3370.
- Bana e Costa C.A., Vansnick J.-C., 1994, *MACBETH – An interactive path towards the construction of cardinal value functions*, International Transactions in Operational Research, 1, 4, s. 489–500.
- Bazil G.D., Adilova S.K., Abzhanova L.K., Sugurova L.A., Yerzhanova M.E., 2021, *Fuzzy simulation of organizational adjustment processes management based on heat supply balanced scorecard*, Innovative Infrastructure Solutions, 6, 2, art. 77.
- Bilić T., Raos S., Ilak P., Rajšl I., Pašičko R., 2020, *Assessment of Geothermal Fields in the South Pannonian Basin System Using a Multi-Criteria Decision-Making Tool*, Energies, 13, 5, art. 1026.
- Boran F.E., 2013, *A multidimensional analysis to evaluate district heating systems*, Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy, 8, 2, s. 122–129.
- Brans J.-P., De Smet Y., 2016, *PROMETHEE Methods*, [w:] *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, ed. S. Greco, M. Ehrgott, J. Figueira, Springer, New York, s. 187–219.

- Cimdina G., Slisane D., Ziemele J., Vitolins V., Vigants G., Blumberga D., 2014, *Sustainable Development of Renewable Energy resources. Biomass cogeneration plant*, [w:] *9th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2014, 22–23 May 2014, Vilnius, Lithuania*: Selected Paper, ed. D. Cygas, T. Tollazzi, <http://enviro2014.vgtu.lt/Abstracts/6/256.html> [dostęp: 20.12.2021].
- Dytczak M., Ginda G., 2006, *Benefits and costs in selecting fuel for municipality heating systems with the analytic hierarchy process*, *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 15, 2, s. 165–177.
- Eltez A., Kilkis I.B., Eltez M., 1999, *AHP approach for evaluating geothermal district energy systems*, *ASHRAE Transactions*, 15, 2.
- Fang F., Wang N., 2014, *Optimal hierarchical decision-making for heat source selection of district heating systems*, *Mathematical Problems in Engineering*, art. 594862.
- Figueira J.R., Mousseau V., Roy B., 2016, *ELECTRE Methods*, [w:] *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, ed. S. Greco, M. Ehrgott, J. Figueira, Springer, New York, s. 155–185.
- Geri F., Sacchelli S., Bernetti I., Ciolli M., 2018, *Urban-rural bioenergy planning as a strategy for the sustainable development of inner areas: A GIS-based method to chance the forest chain*, [w:] *Green Energy and Technology*, s. 539–550, https://doi.org/10.1007/978-3-319-75774-2_36 [dostęp: 20.12.2021].
- Ghafghazi S., Sowlati T., Sokhansanj S., Melin S., 2010, *A multicriteria approach to evaluate district heating system options*, *Applied Energy*, 87, 4, s. 1134–1140.
- Goodwyn P., Wright G., 2016, *Analiza decyzji*, Wolters Kluwer SA, Warszawa.
- Greco S., Ehrgott M., Figueira J.R. (ed.), 2016, *Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys*, Springer, New York.
- Greco S., Matarazzo B., Słowiński R., 2002, *Rough approximation by dominance relations*, *International Journal of Intelligent Systems*, 17, 153–171.
- Grujić M., Ivezić D., Živković M., 2014, *Application of multi-criteria decision-making model for choice of the optimal solution for meeting heat demand in the centralized supply system in Belgrade*, *Energy*, 67, s. 341–350.
- He L., Lu Z., Pan L., Zhao H., Li X., Zhang J., 2019, *Optimal Economic and Emission Dispatch of a Microgrid with a Combined Heat and Power System*, *Energies*, 12, 4, s. 604.
- Hwang C.L., Yoon K., 1981, *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, Springer-Verlag, New York.
- Ishizaka A., Nemery P., 2013, *Multi-Criteria Decision Analysis. Methods and Software*, Wiley.
- Keeney R.L., Raiffa H., 1976, *Decisions with multiple objectives: Preferences and value tradeoffs*, Cambridge University Press.
- Kirppu H., Lahdelma R., Salminen P., 2018, *Multicriteria evaluation of carbon-neutral heat-only production technologies for district heating*, *Applied Thermal Engineering*, 130, s. 466–476.
- Konarzewska-Gubała E., 2009, *Bipolar: Multiple Criteria Decision Aid Using Bipolar Reference System*, LAMSADE, Cashier et Documents, 56, Paris.

- Kontu K., Rinne S., Olkkonen V., Lahdelma R., Salminen P., 2015, *Multicriteria evaluation of heating choices for a new sustainable residential area*, Energy and Buildings, 93, 169–179.
- Laktuka K., Pakere I., Lauka D., Blumberga D., Volkova A., 2021, *Long-term policy recommendations for improving the efficiency of heating and cooling*, Environmental and Climate Technologies, 25, 1, s. 392–404.
- Landhelma R., Salminen P., 2010, *Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis (SMAA)*, [w:] *Trends in Multiple Criteria Decision Analysis*, ed. S. Greco, M. Ehrgott, J. Figueira, Springer, New York, s. 285–315.
- Larichev O.I., Moshkovich H.M., 1997, *Verbal Decision Analysis for Unstructured Problems*, Kluwer Academic Press, Boston.
- Lee D.K., Park S.Y., Park S.U., 2007, *Development of assessment model for demand-side management investment programs in Korea*, Energy Policy, 35, 11, s. 5585–5590.
- Lootsma F.A., 1992, *The REMBRANDT system for multi-criteria decision analysis via pairwise comparisons or direct rating*, Report 92-05, Faculteit der Technische Wiskunde en Informatica, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Mróz T.M., 2008, *Planning of community heating systems modernization and development*, Applied Thermal Engineering, 28, 14–15, s. 1844–1852.
- Nowak M., 2008, *Interaktywne wielokryterialne wspomaganie decyzji w warunkach ryzyka. Metody i zastosowania*, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Katowicach, Katowice.
- Opricović S., 1990, *Programski paket VIKOR za visekriterijumsko kompromisno rangiranje*, SYM-OP-IS.
- Pellegrini, M., Bianchini A., Guzzini A., Sacconi C., 2019, *Classification through analytic hierarchy process of the barriers in the revamping of traditional district heating networks into low temperature district heating: an Italian case study*, International Journal of Sustainable Energy Planning and Management, 20, s. 51–66.
- Pinto G., Abdollahi E., Capozzoli A., Savoldi L., Lahdelma R., 2019, *Optimization and Multicriteria Evaluation of Carbon-neutral Technologies for District Heating*, Energies, 12, 9, art. 1653.
- Polikarpova I., Lauka D., Blumberga D., Vigants E., 2019, *Multi-Criteria Analysis to Select Renewable Energy Solution for District Heating System*, Environmental and Climate Technologies, 23, 3, s. 101–109.
- Prodanuks T., Blumberga D., 2018, *Methodology of municipal energy plans. Priorities for sustainability*, Energy Procedia, 147, s. 594–599.
- Roy B., 2016, *Paradigms and Challenges*, [w:] *Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys*, ed. S. Greco, M. Ehrgott, J. Figueira, Springer, New York, s. 19–39.
- Saaty T.L., 2012, *Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process*, Springer, New York.
- Saaty T.L., Vargas L., 2011, *Decision Making with the Analytic Network Process*, Springer, New York.

- Shu H., Duanmu L., Zhang C., Zhu Y., 2010, *Study on the decision-making of district cooling and heating systems by means of value engineering*, Renewable Energy, 35, 9, s. 1929–1939.
- Skiba M., Mrówczyńska M., Sztubecka M., Bazan-Krzywoszańska A., Kazak J.K., Leśniak A., Janowiec F., 2021, *Probability estimation of the city's energy efficiency improvement as a result of using the phase change materials in heating networks*, Energy, 228, art. 120549.
- Streimikiene D., Balezentiene L., 2014, *Comparative assessment of heat generation technologies in district heat sector of Lithuania*, Transformations in Business and Economics, 13, 2, s. 161–173.
- Trzaskalik T., 2014, *Wielokryterialne wspomaganie decyzji, przegląd metod i zastosowań*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, 74, s. 239–263.
- Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne, Dz.U. nr 54, poz. 48 z późn. zm.
- Walsh P.R., 2005, *Dealing with the uncertainties of environmental change by adding scenario planning to the strategy reformulation equation*, Management Decision, 43, 1, s. 113–122.
- Wang H., Duanmu L., Lahdelma R., Li X., 2017, *Developing a multicriteria decision support framework for CHP based combined district heating systems*, Applied Energy, 205, s. 345–368.
- Wang H., Lahdelma R., Salminen P., 2018, *Stochastic multicriteria evaluation of district heating systems considering the uncertainties*, Science and Technology for the Built Environment, 24, 8, s. 830–838.
- Wang N., Chen X., Wu G., 2019, *Public private partnerships, a value for money solution for clean coal district heating operations*, Sustainability (Switzerland), 11, 8, art. 2386.
- Wen Q., Yan Q., Qu J., Liu Y., 2021, *Fuzzy ensemble of multi-criteria decision making methods for heating energy transition in danish households*, Mathematics, 9, 19, art. 2420.
- Wu Z., Sha L., Zhang Y., 2022, *Simulation and experiment investigation of a heating and power double function system with multi-objective optimization*, Sustainable Energy Technologies and Assessments, 49, art. 101768.
- Wu Z., Wang Y., You S., Zhang H., Zheng X., Guo J., Wei S., 2020, *Thermo-economic analysis of composite district heating substation with absorption heat pump*, Applied Thermal Engineering, 166, art. 114659.
- Wu Z., You S., Zhang H., Wang Y., Jiang Y., Liu Z., Sha L., Wei S., 2021, *Experimental investigations and multi-objective optimization of an air-source absorption heat pump for residential district heating*, Energy Conversion and Management, 240, art. 114267.
- Yuan M., Thellufsen J.Z., Sorknæs P., Lund H., Liang Y., 2021, *District heating in 100% renewable energy systems: Combining industrial excess heat and heat pumps*, Energy Conversion and Management, 244, art. 114527.

- Zhao J., Li Y., Li J., Li Z., 2021, *Operation Characteristic Analysis and Parameter Optimization of District Heating Network with Double Heat Sources*, [w:] *The 2020 International Symposium on Geographic Information, Energy and Environmental Sustainable Development 26–27 December 2020, Tianjin, China*, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 772, 1, art. 012077.
- Ziemele J., Pakere I., Blumberga D., 2016, *The future competitiveness of the non-Emissions Trading Scheme district heating systems in the Baltic States*, *Applied Energy*, 162, s. 1579–1585.
- Ziemele J., Pakere I., Talcis N., Blumberga D., 2014, *Multi-criteria analysis of district heating systems in baltic states*, *Energy Procedia*, 61, s. 2172–2175.
- Ziemele J., Vigants G., Vitolins V., Blumberga D., Veidenbergs I., 2014a, *District heating systems performance analyses. Heat energy tariff*, *Environmental and Climate Technologies*, 13, 1, s. 32–43.

A SURVEY OF TOOLS FOR MULTIATTRIBUTE DECISION ANALYSIS FOR THE CHOICE OF INVESTMENT OPTION IN MUNICIPAL DISTRICT HEATING SYSTEMS

Summary: Municipal heating systems of Polish cities are an important element not only of the technical infrastructure. Due to the nature of the basic service provided – heat supply (and, in the future, also year-round comfort), they can be perceived as an important part of the social infrastructure of cities, creating appropriate conditions for the existence of the population, the functioning of social infrastructure facilities and business activities. The necessity to adapt a heating company to changes in requirements arising as a result of economic, social, environmental, and more and more often – also political and legal – changes taking place in the immediate and further surroundings of a heating company, requires the swift implementation of investments in district heating systems. The effects of such investments, however, are multidimensional and, to a large extent, difficult to measure, depending on the passage of time and complex conditions related to the pursuit for sustainable development and safety. Therefore, their reliable assessment requires the use of appropriate tools. This was why the usefulness of multi-attribute decision analysis tools in this context was discussed in the paper. Various kinds of such tools and the conditions for their effective use were presented. The most promising of them were also identified.

Keywords: municipal district heating, investment, decision, assessment, multi-attribute analysis, method, survey

Publikacja została sfinansowana przez Akademię Górniczo-Hutniczą im. Stanisława Staszica w Krakowie (subwencja na utrzymanie i rozwój potencjału badawczego).