

Wybór zestawów maszyn do montażu elementów prefabrykowanych z zastosowaniem metody analizy hierarchicznej (AHP)

Daria Biskupska, Ewelina Tomaszewska, studentki, Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii w Płocku, opiekun naukowy: dr hab. inż. Roman Marcinkowski

1. Wprowadzenie

W artykule przedstawiono możliwość zastosowania metody AHP do podjęcia decyzji dotyczącej wyboru zestawu maszyn do montażu elementów prefabrykowanych. Wybór optymalnego zestawu maszyn wymaga uwzględnienia wielu determinant. Zaprezentowana metoda umożliwia ich analizę w celu podjęcia decyzji wyboru. Istotą metody AHP jest ocena wariantów rozwiązań dopuszczalnych poprzez pryzmat wielu kryteriów. Oceny wariantów (alternatyw) działania (decyzji) wprowadza się poprzez sprowadzenie ocen kryterialnych z odpowiednimi wagami do relatywnej skali z przedziału $\langle 0,1 \rangle$. Alternatywy generowane są poprzez ustalenie rozwiązań techniczno-organizacyjnych spełniających warunki dopuszczalności, którymi są: udźwig, wysokość podnoszenia i zasięg maszyny montażowej.

2. Niezbędne parametry techniczne maszyny montażowej

Wybór urządzeń montażowych do realizacji prac montażowych na danym placu budowy powinien być poprzedzony ustaleniem niezbędnych parametrów technicznych, jakimi mają się te urządzenia charakteryzować w najniekorzystniejszych możliwych sytuacjach ich pracy. Chodzi o określenie zbioru możliwych do zastosowania w danych warunkach urządzeń montażowych. Do parametrów tych należy niezbędny: udźwig – Q_{min} , wysięg – L_{min} i wysokość podnoszenia – H_{min} . Wyznaczamy je rozpatrując kilka sytuacji charakterystycznych w planowanym montażu – sytuacji, które generują najniekorzystniejsze sytuacje montażowe. Zidentyfikowanie tych sytuacji nie jest łatwe, szczególnie dla dźwigów przejezdnych. Trzeba

bowiem określić parametry $\{Q_{min}, L_{min}, H_{min}\}$ we wzajemnym związku, tak aby sprawdzić czy planowane do montażu urządzenie zapewni ich spełnienie.

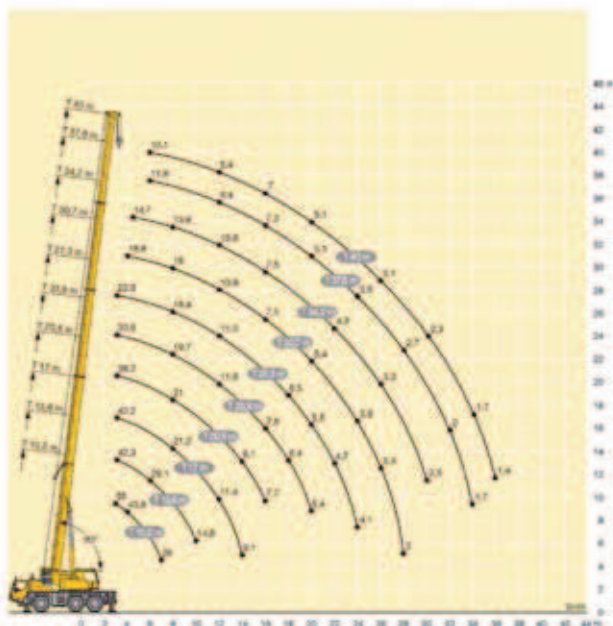
Żurawie wieżowe i dźwigi przejezdne mają sobie właściwe charakterystyki (rys. 1.1, 1.2) i mogą być stosowane, gdy możliwości techniczne charakteryzowane parametrami $\{Q, L, H\}$ przewyższają potrzebne $\{Q_{min}, L_{min}, H_{min}\}$. Podręczniki z zakresu technologii robót budowlanych np. [5, 6] identyfikują różne sytuacje montażowe i podają wiele zależności na określenie niezbędnych parametrów maszyny montażowej. Uogólnioną sytuację montażową przedstawiono na rysunku 2.

Schemat ten identyfikuje parametry dla dźwigu przejezdnego wykorzystywanego do montażu elementów na konstrukcji przesłaniającej (zmontowanej). Nietrudno spostrzec, że ustalenie niezbędnych parametrów technicznych dla żurawia przejezdnego jest zadaniem prostszym obliczeniowo i nie wymaga specjalnego wyjaśnienia.

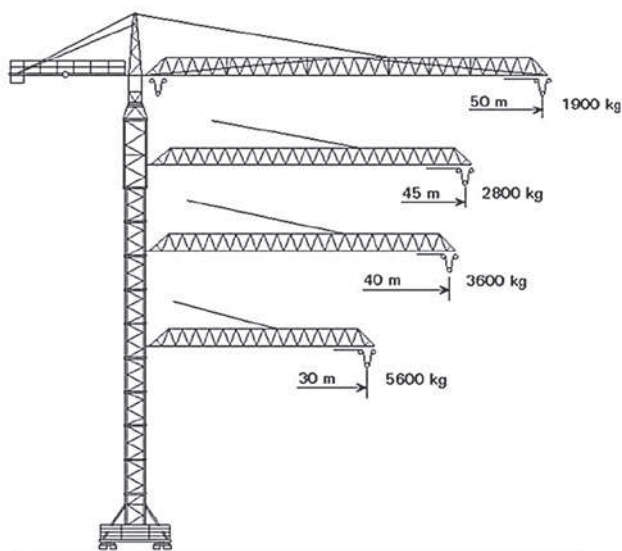
Niezbędny udźwig Q_{min} maszyny montażowej wynika z masy podnoszonego prefabrykatu, masy zawiesia i ewentualnej konstrukcji zabezpieczającej. Wyznaczamy go ze wzoru:

$$Q_{min} \geq [(Q_e + Q_z + Q_{dod}) / n] * S_0 * \gamma \quad (1)$$

gdzie: Q_e – ciężar elementu (prefabrykatu), Q_z – ciężar zawiesia, Q_{dod} – ciężar ewentualnej konstrukcji przesłaniającej element w czasie montażu rozpatrywanego elementu, S_0 – współczynnik nierównomierności obciążenia zastosowanych maszyn montażowych, γ – współczynnik rekompensujący inne oddziaływania nieuwzględniane w obliczeniach ($\gamma = 1,5$ – jeżeli uwzględ-



Rys. 1.1. Charakterystyka żurawia przejezdnego

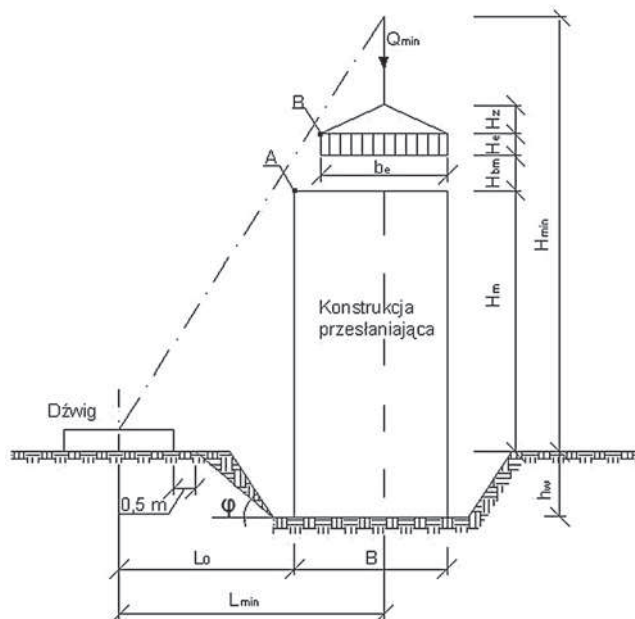


Rys. 1.2. Charakterystyka żurawia stacjonarnego

niano w sytuacji montażowej tylko ciężar własny elementu, $\gamma = 1,3$ – jeżeli uwzględniano ciężar własny i oddziaływania wiatru, $\gamma = 1,1$ – jeżeli uwzględniono ciężar własny, oddziaływania wiatru i siły bezwładności). Niezbędny zasięg (wysięg) L_{min} wynika z analizy sytuacji montażowej – kształtu zabudowy na planie. Rozpatrując uogólnioną sytuację (rys. 2) niezbędny wysięg można określić z warunku:

$$L_{min} \geq 0,5 \cdot b_m + 0,5 + \frac{h_w}{tg\varphi} + b - \frac{b_e}{2} \quad (2)$$

gdzie: b_m – szerokość maszyny montażowej (odległość pomiędzy zewnętrznymi obrzeżami podpór maszyny montażowej), b_e – szerokość montowanego ele-



Rys. 2. Schemat sytuacji montażowej dźwigu przejezdnego z oznaczeniami charakterystycznych danych

mentu, h_w – głębokość wykopu, φ – kąt odłamu gruntu przy naziemiu obciążonym.

Jeżeli w rozpatrywanej sytuacji nie występuje wykop, to odległość dźwigu od konstrukcji przesłaniającej L_0 ustala się na podstawie analizy sytuacji przestrzennej, optymalizując usytuowanie dźwigu w stosunku do konstrukcji przesłaniającej. Optymalizację umożliwia opracowany model i zaprojektowany przez autorów arkusz kalkulacyjny.

Aby możliwe było zamontowanie elementu na miejscu przeznaczenia muszą być spełnione trzy warunki:

– ze względu na wysokość montażu:

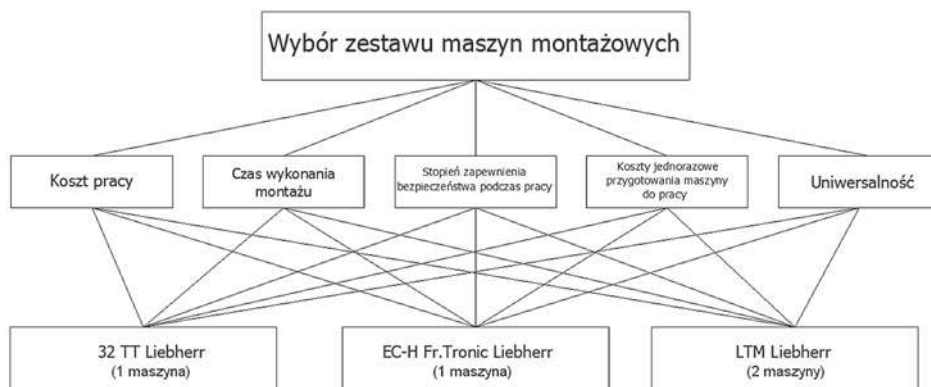
$$H_{min} \geq H_m + H_{bm} + H_e + H_z \quad (3)$$

– ze względu na gabaryty konstrukcji przesłaniającej (na rysunku 2 – bezpieczna odległość wysięgnika od punktu A):

$$\frac{H_{min}}{L_{min}} \geq \frac{H_m}{L_0} \Rightarrow H_{min} \geq L_{min} \cdot \frac{H_m}{L_0} \quad (4)$$

– ze względu na gabaryty montowanego elementu (na rysunku 2 – bezpieczna odległość wysięgnika od punktu B):

$$\begin{aligned} \frac{H_{min}}{L_{min}} &\geq \frac{H_m + H_{bm} + H_e}{L_{min} - \frac{b}{2}} \Rightarrow \\ \Rightarrow H_{min} &\geq \frac{L_{min} \cdot (H_m + H_{bm} + H_e)}{L_{min} - \frac{b}{2}} \quad (5) \end{aligned}$$



Rys. 3.
Struktura hierarchiczna wyboru zestawów maszyn do montażu elementów prefabrykowanych.
Źródło: opracowanie własne

Nietrudno zauważyć, że trzeci warunek jest nieistotny dla montowania elementów pionowych (np. słupów). Z powyższych zależności wynika, że usytuowanie dźwigu w stosunku do konstrukcji zmontowanej ma wpływ na niezbędną wysokość podnoszenia, która jest tu rozumiana jako konieczna w danych warunkach wysokość wzniesienia haka maszyny montażowej nad poziom stanowiska tej maszyny.

2.1. Wybór zestawu maszyn montażowych wg wielu kryteriów

Po określeniu niezbędnych parametrów technicznych, jakim musi odpowiadać zestaw maszyn montażowych, następuje proces rozpatrywania kryteriów dodatkowych. Są to kryteria dobierane indywidualnie w zależności od potrzeb. W niniejszym artykule wyodrębniono pięć, które uznano za najistotniejsze. Są to: koszt pracy, koszty jednorazowe przygotowania maszyn do pracy, czas wykonania montażu, stopień zapewnienia bezpieczeństwa podczas pracy oraz uniwersalność maszyn.

Koszty pracy maszyn wyznacza się na podstawie efektywnego czasu pracy maszyn wyrażonego w maszynogodzinach (m-g). Do kosztów jednorazowych zaliczamy dostarczenie sprzętu na budowę, transport po zakończeniu robót na budowie, montaż i demontaż, załadunek i wyładunek sprzętu na środki transportu (jeżeli nie jest to sprzęt samojezdny). Dobierając zestawy do wykonania montażu, należy zapoznać się z aktualnymi cenami panującymi na rynku i dokonać analizy kosztów związanych między innymi z transportem biorąc pod uwagę odległość od bazy jednostki do placu budowy oraz metodę transportu.

Kolejnym czynnikiem wpływającym na wybór żurawia jest **czas wykonania montażu**. Od niego zależy m.in. końcowy koszt prac oraz czas zrealizowania budowy. Na czas wykonania montażu składa się szereg czynników, m.in.: wydajność urządzenia, szybkość obrotu i podnoszenia elementów, sposób oraz tempo montowania. Ze względu na niewymierność kryterium, można jedynie w przybliżeniu oszacować, który zestaw maszyn wykona montaż w krótszym czasie.

Stopień zapewnienia bezpieczeństwa podczas pracy jest następnym kryterium uwzględnianym przy doborze urządzeń. Ten parametr zależy m.in. od: awaryjności żurawia, dokładności i czułości przyrządów pomiarowych oraz od typu maszyny (stacjonarna lub mobilna).

O uniwersalności żurawia decyduje jego wszechstronność zastosowania do różnych technologii i systemów budowlanych. Żuraw uniwersalny umożliwia pracę na różnych wysokościach, jest przystosowany do trudnych warunków drogowych i terenowych oraz do częstych zmian miejsc pracy.

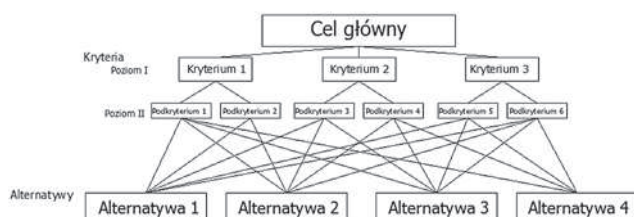
Istotę podejścia do problemu decyzyjnego przedstawiono na przykładzie. Przyjmijmy, że wykonawca ma 3 możliwości realizacji montażu. Pierwszy wariant to zastosowanie do montażu pojedynczego żurawia górnoobrotowego wieżowego odciągowego EC-H Fr.Tronic Liebherr. Drugim wariantem jest żuraw wieżowy szybkomontowalny dolnoobrotowy 32 TT Liebherr, natomiast jako trzeci wariant wybrano dwa żurawie samojezdne teleskopowe LTM Liebherr. Celem analizy jest wybór optymalnego zestawu urządzeń montażowych, który zapewni sprawne przeprowadzenie procesu budowlanego. Schemat struktury problemu przedstawiono na rysunku 3. Poszukiwane rozwiązanie jest rozpatrywane na podstawie zestawionych ze sobą w jednym rzędzie kryteriów.

3. Istota metody AHP (Analytic Hierarchy Process)

Analityczny Proces Hierarchiczny (AHP) to jedna z najszybciej rozwijających się w ostatnich latach i najbardziej znanych w świecie metod matematycznych, stosowanych do rozwiązywania wielokryterialnych problemów decyzyjnych.

Metoda pozwala na wybór optymalnego rozwiązania spośród zdefiniowanych alternatyw. Niesie za sobą wiele korzyści, m.in.: redukuje problem wielokryterialny do szeregu prostych porównań parami kryteriów i wariantów, daje możliwość łącznej analizy kryteriów wymiernych i niewymiernych oraz eliminuje ryzyko wpływu na decyzję uprzedzeń i manipulacji.

AHP tworzą trzy podstawowe zasady. Są to: dekompozycja problemu, wyrażanie opinii przez porównania i hierarchiczna kompozycja (synteza) priorytetów. Dekompozycja problemu polega na budowie problemu w postaci hierarchicznej (rys. 2). Cel nadrzędny umieszczany jest na szczycie hierarchii, kolejny poziom zajmują kryteria, następny podkryteria, które dzielą się na kolejne podkryteria. Decyzje alternatywne (warianty) tworzą najniższy poziom tej struktury. Po dokonaniu dekompozycji problemu należy skonstruować macierz porównań (o wymiarach $n \times n$, w której wierszom i kolumnom odpowiadają elementy odpowiednich poziomów struktury hierarchicznej). Niezbędne jest wykonanie $n \times (n - 1)/2$ porównań. Elementy porównuje się parami, na każdym poziomie struktury hierarchicznej, w stosunku do wspólnego kryterium położonego bezpośrednio powyżej. Porównania te mają na celu oszacowanie oddziaływania lokalnych kryteriów na kryterium nadrzędne.



Rys. 4. Hierarchia decyzyjna AHP. Źródło: opracowanie własne

AHP umożliwia wprowadzenie relatywnej skali ocen do porównania pojęć kwantytatywnych i kwalitatywnych. Bazą są opinie uczonych i ekspertów, pomiary i dane statystyczne niezbędne do podjęcia decyzji. Głównym problemem tej metody jest pomiar czynników kwalitatywnych. Aby dokonać pomiaru niepolichalnych kryteriów i celów, opinie wyrażane dotychczas słownie należy przedstawić w postaci numerycznej, np. posługując się fundamentalną skalą porównań Saaty'ego (tabela 1).

Mimo, że porównań parami dokonują eksperci mający wiedzę z danego zakresu, mogą oni błędnie ocenić sytuację i przyznać ocenę nieadekwatną do stanu rzeczy. Sprawdzenie spójności ocen odbywa się poprzez obliczenie wskaźnika i współczynnika konsekwencji. Aby wyeliminować niezgodności obliczany jest współczynnik konsekwencji CR według zależności:

$$CR = \frac{CI}{RI} \cdot 100\% \quad (6)$$

gdzie R to indeks losowy, zależny od stopnia macierzy n , przybierający wartości $0 \div 1,45$, natomiast CI to wskaźnik konsekwencji określany z zależności:

$$CI = \frac{(\lambda_{maks} - n)}{(n - 1)} \quad (7)$$

gdzie: λ_{maks} to maksymalna wartość własna macierzy. Jeżeli wartość współczynnika CI nie przekracza 0,1, to znaczy, że oceny ekspertów są zgodne.

Tabela 1. Skala porównań Saaty'ego. Źródło: opracowanie własne na podstawie Geoff Coyle: *Practical Strategy*. Open Access Material. AHP

Wartość	Określenie
9	Przewaga jednego czynnika nad drugim jest absolutna i potwierdzona w najwyższym stopniu
7	Jeden czynnik jest bardzo silnie przedkładany nad drugi i praktyka potwierdza tą przewagę
5	Osąd i doświadczenie silnie przekładają jeden czynnik nad drugi
3	Osąd i doświadczenie nieznacznie przekładają jeden czynnik nad drugi
1	Oba czynniki w jednakowym stopniu przyczyniają się do osiągnięcia celu
2, 4, 6, 8	Wartości pośrednie stosuje się tylko w razie konieczności

Podstawowe zalety, które zadecydowały o propozycji zastosowania metody AHP dla rozwiązania problemu postawionego w artykule, to:

- prostota oraz wysoka efektywność w rozwiązywaniu problemów;
- dzięki uporządkowaniu kryteriów w jednym poziomie możliwe jest klarowne spojrzenie na rozwiązywany problem;
- wyeliminowanie ryzyka manipulacji lub uprzedzenia podczas dokonywania decyzji;
- od decydenta nie jest wymagana znajomość mechanizmów działania AHP. Zadanie to przejmują programy eksperckie, takie jak Expert Choice oraz pochodne;
- podjęte decyzje posiadają racjonalne uzasadnienie w postaci obliczeń i działań.

4. AHP bazą do wyboru optymalnego zestawu maszyn montażowych

Wszelkich obliczeń potrzebnych do ustalenia najbardziej odpowiedniego zestawu maszyn problemu opisanego w pkt 1.1. dokonano przy użyciu programu Make It Rational (dostępnego w bezpłatnej wersji testowej na stronie <http://makeitrational.com/>). MakeItRational to bazujący na algorytmie AHP system służący do wspierania i dokumentowania wielokryterialnych procesów decyzyjnych.

W wyniku zastosowania tego prostego narzędzia, przeprowadzono analizę oraz sporządzono szczegółowy raport.

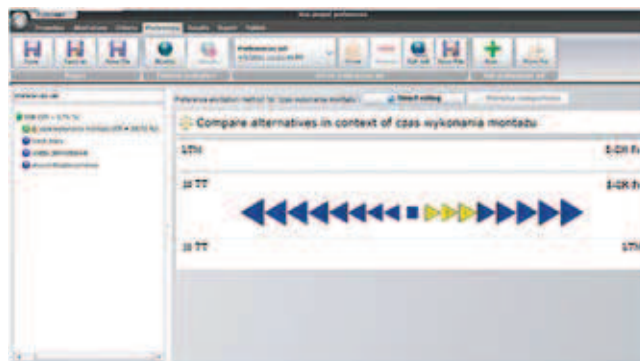
Pierwszym etapem pracy z programem jest ustalenie stopnia ważności założonych kryteriów w aspekcie głównego celu. Stopień ten ustala się porównując parami między sobą wszystkie kryteria posilkując się dziewięciostopniową skalą (tabela 1). Przykładowo na rysunku 5. ukazane jest porównanie, które z dwóch kryteriów: koszt pracy i czas wykonania montażu, w większym stopniu wpływa na całość procesu budowlanego. Poprzez stosowanie porównań parami jako głównej metody oceny, program wyznacza stopień dominacji danego czynnika nad drugim jako miarę siły preferencji decydenta w odniesieniu do rozważanych kryteriów (tabela 2).

Tabela 2. Zestawienie stopni dominacji kryteriów Źródło: opracowanie własne na podstawie programu Make It Rational

Kryteria	Stopnie dominacji
Koszt pracy względem uniwersalności	2:1
Koszt pracy względem kosztów jednorazowych przygotowania maszyny do pracy	4:1
Stopień zapewnienia bezpieczeństwa podczas pracy względem kosztów pracy	3:1
Koszt pracy względem czasu wykonania	3:1
Uniwersalność względem kosztów jednorazowych przygotowania maszyny do pracy	2:1
Stopień zapewnienia bezpieczeństwa podczas pracy względem uniwersalności	4:1
Czas wykonania względem uniwersalności	3:1
Stopień zapewnienia bezpieczeństwa podczas pracy względem kosztów jednorazowych przygotowania maszyny do pracy	5:1
Czas wykonania względem kosztów jednorazowych przygotowania maszyny do pracy	4:1
Stopień zapewnienia bezpieczeństwa podczas pracy względem czasu wykonania	2:1



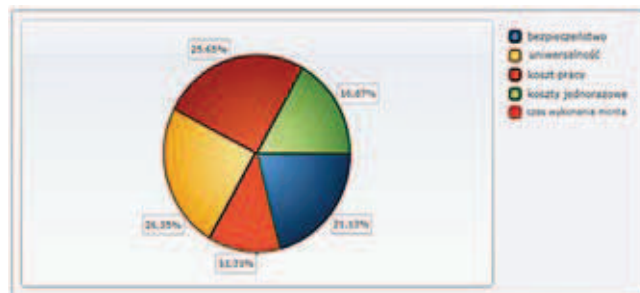
Rys. 5. Porównanie parami kryteriów. Źródło: opracowanie własne na podstawie programu Make It Rational



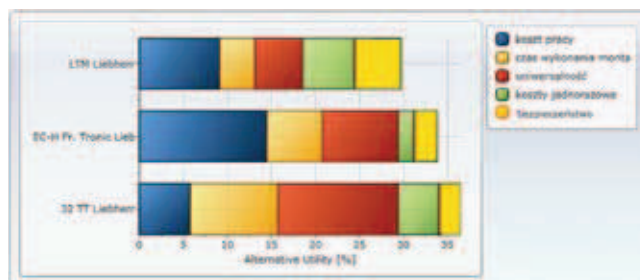
Rys. 6. Porównanie wariantów w aspekcie kryterium. Źródło: opracowanie własne na podstawie programu Make It Rational

Przypisanie wag poszczególnym czynnikom nie jest łatwe. Nadając wagę, można jednak precyzyjniej podjąć decyzję, uwzględniając stopień istotności (ważność) poszczególnych kryteriów. Dla prawidłowego dokonania porównań istotne jest posiadanie wiedzy teoretycznej lub praktycznej w zakresie analizowanych zagadnień.

Następną czynnością, po oszacowaniu stosunków wagowych wszystkich kryteriów względem siebie, jest analiza przyjętych wariantów. Program prowadzi decydenta poprzez serię porównań parami jako ocen dotyczących rozważanych wariantów z uwagi na spełnienie wymagań każdego z kryteriów (odpowiadających czynnikiem wpływu). Są to tzw. preferencje lokalne, które mówią o udziale każdego z wariantów



Rys. 7. Priorytety kryteriów. Źródło: Opracowanie własne na podstawie programu Make It Rational



Rys. 8. Analiza użyteczności wariantów. Źródło: opracowanie własne na podstawie programu Make It Rational

w osiągnięciu rozwiązania problemu rozważanego. Na rysunku 6. zobrazowano porównanie dwóch zestawów maszyn w aspekcie kryterium, jakim jest czas wykonania montażu.

Jedną z najważniejszych cech programu jest możliwość natychmiastowego obliczenia stopnia niespójności (niezgodności) ocen pozyskanych od decydenta. Gdy niespójność ocen wynosi poniżej 10%, użytkownik może obliczyć wskaźniki preferencji dla rozważanych kryteriów, a następnie dla wariantów. Najlepszy wariant to ten, który uzyskał najwyższy wskaźnik preferencji (przewyższania pozostałych wariantów). Gdy niespójność wynosi powyżej 10%, należy powtórzyć zbieranie danych od decydenta, aby wykręć, które oceny są niezgodne.

Na zakończenie analizy problemu decyzyjnego dokonywana jest synteza wszystkich zebranych danych, aby wyznaczyć ogólny ranking wariantów decyzyjnych. W wyniku przeprowadzonych ustaleń otrzymano procentową ocenę użyteczności wariantów (Alternative Utility) (rys. 7) dla ustalonych priorytetów kryteriów (rys. 8). Wariantem optymalnym w analizowanym przykładzie jest 32 TT Liebherr, a kryterium, które o tym zadecydowało to uniwersalność.

5. Zakończenie

W artykule, na przykładzie doboru zestawu maszyn do montażu, zaprezentowano sposób postępowania w praktycznym zastosowaniu metody AHP. Wyjaśniono zasadę działania analizy hierarchicznej oraz pokazano jej działanie. Na przedstawionym przykładzie widać, że metodę AHP można stosować wszechstronnie, wszędzie tam, gdzie potrzebny jest wielokryterialny wybór (szczególnie w sytuacjach konfliktowych). Reasumując, zastosowanie omówionej metody do rozwiązywania procesów decyzyjnych jest znacznie lepsze od rozwiązań czysto intuicyjnych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Zieliński B., Wybór podwykonawców projektu z zastosowaniem metody analizy hierarchicznej, Przegląd Budowlany Nr 7-8/2011
- [2] AHP pomoże podjąć każdą decyzję. Akademia Wiedzy, BCC, 2008
- [3] Saaty T. L., The Analytic Hierarchy Process. New York, McGraw Hill, 1980
- [4] Saaty T. L., Decision Making for Leaders. Belmont, California: Life Time Learning Publications, 1985
- [5] Dyżewski A., Technologia i organizacja budowy, Warszawa 1989/91
- [6] Martinek W., Nowak P., Woyciechowski P., Technologia robót budowlanych, Warszawa 2010

Producent markowych konferencji
oraz autorskich produktów dla środowiska
architektoniczno-budowlanego.

degustacja na www.infoinvest.pl
tel. 22 532 14 00

info invest
inwestycje i usługi

info invest
pracownia eventów