



PRIMENA AHP METODE VIŠEKRITERIJUMSKE OPTIMIZACIJE ZA IZBOR KRANA NA VELIKIM INVESTICIONIM PROJEKTIMA

THE APPLICATION OF THE AHP METHOD FOR CRANE SELECTION IN LARGE INVESTMENT PROJECTS

NEVENA SIMIĆ¹, NATAŠA PRAŠČEVIĆ³, Marija Ivanović²

¹ Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, nsimic@grf.bg.ac.rs

² Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, natasa@grf.bg.ac.rs

³ Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, mpetrovic@grf.bg.ac.rs

Rezime: Izbor kрана na velikim investicionim projektima predstavlja rizičnu aktivnost za postizanje osnovnih ciljeva projekta. Kao posledica lošeg izbora kрана mogu se javiti kašnjenja zbog loše organizacije, kao i prekoračenja budžeta. Ustaljena praksa je da se izbor kрана vrši na osnovu najvećeg tereta koji se podiže i najvećeg radijusa dejstva kрана, iako je to često predmet kritike istraživača, kao i lica koja se time bave u praksi. Problem izbora kрана treba posmatrati kao problem višekriterijumske optimizacije. U ovom radu za izbor kрана na velikim građevinskim projektima korišćena je AHP metoda. Predloženi model primenjen je na studiji slučaja izgradnje jednog industrijskog objekta i dati su rezultati sa diskusijom.

Cljučne reči: AHP metoda, izbor kрана, višekriterijumska optimizacija.

Abstract: The selection of a crane on large investment projects is a risky activity to achieve the basic objectives of the project. As a consequence of poor choice of crane, there may be delays due to poor organization, as well as budget overruns. It is a well-established practice that the selection of a crane is made on the basis of the largest load being lifted and the largest radius of action of the crane, although this is often the subject of criticism by researchers as well as those who deal with it in practice. The problem of crane selection should be viewed as a problem of multi-criteria optimization. In this paper, the AHP method is used for the selection of cranes on large construction projects. The proposed model was applied to the case study of the construction of an industrial facility and the results are given with discussion.

Keywords: AHP method, crane selection, multi-criteria decision making

1. UVOD

Izbor odgovarajuće mehanizacije za vertikalni transport (pre svega kрана) se kod izgradnje velikih investicionih projekata s pravom obeležava kao rizična aktivnost. Kašnjenja zbog loše organizacije, kao i prekoračenja budžeta na ovim projektima se dešavaju veoma često. Imajući pre svega u vidu bezbednost na radu, kao i osnovne ciljeve svakog investicionog projekta (vreme, troškovi i kvalitet), izbor kрана na velikim projektima je izuzetno važna aktivnost kojoj se često ne posvećuje dovoljna pažnja.

Kran, kao mašina za unutrašnji transport materijala i elemenata objekta, predstavlja najbitniju mehanizaciju na gradilištu koja značajno utiče na budžet i rok za završetak određenog projekta. Neadekvatan izbor tipa i pozicije kрана na gradilištu može dovesti do poremećaja dinamičkog plana izvođenja radova i prekoračenja troškova.

Ustaljena praksa je da se izbor kрана vrši na osnovu najvećeg tereta koji se podiže i najvećeg radijusa dejstva kрана, iako je to često predmet kritike istraživača, kao i lica koji se time bave u praksi. Neretko, na investicionim projektima u Srbiji, zbog velike cene koštanja kрана, ovaj izbor se svodi na izbor kрана koji je u vlasništvu izvođača radova. Velika verovatnoća je da odabrani kran ne predstavlja najbolje rešenje za određeni problem unutrašnjeg transporta, tj. da bi se izbor drugog tipa kрана pokazao kao bolje rešenje čak i ako nije u vlasništvu izvođača radova, odnosno ako ga je neophodno kupiti ili iznajmiti.

Veliki broj istraživanja bavio se procedurama za izbor kрана na građevinskim projektima. U tim procedurama izbor kрана je definisan kao jedan od kritičnih faktora za dostizanje tradicionalnih ciljeva projekta (vreme, troškovi i kvalitet) (Hanna, 1999). Iz tog razloga, mnogi autori su tražili za modelom koji bi olakšao donošenje odluke o izboru najpovoljnijeg kрана i kao takav doprineo poboljšanju performansi

projekta (Warszawski, 2006, Chao, 1993, Gray and Little, 2006, Hanna, 1999, Huang, Wong and Tam, 2011).

Da bi se navedeni problem prevazišao, mnogi autori u svojim radovima napominju da problem izbora kрана treba posmatrati kao višekriterijumski problem, tj. da pri izboru kрана treba uzeti u obzir više kriterijuma. Za razvoj višekriterijumskog modela autori primenjuju različite metode (Chao, 1993, Hanna, 1999, Al-Hussein, 2012). Jedna od predloženih metoda jeste AHP (Analitički Hijerarhijski Proces). Ova metoda višekriterijumske optimizacije nalazi široku primenu u različitim segmentima upravljanja projektima u građevinarstvu (Al-Harbi, 2001, Temiz and Calis, 2017, Saaty, 1990, Lin, Wang and Yu, 2008, Cakmak and Cakmak, 2013, Nassar, Thabet and Beliveau, 2003, Shapira, Asce and Goldenberg, 2006).

Dalalah i ostali su primenili AHP metodu za odabir najboljeg kрана koji će služiti procesu izgradnje na prilično optimizovan način (Dalalah, Al-Oqla and Hayajneh, 2010). Analizirana su tri tipa kрана: toranjski, derik kрана i auto dizalice. Autori su definisali grupe kriterijuma sa podkriterijumima koji utiču na izbor kрана. Rangiranje kriterijuma je izvršeno primenom AHP metode. Prema Dalalahu i ostalima, najvažniji faktor koji utiče na izbor kрана je bezbednost. Za njim slede uslovi gradilišta, zahtevi projekta, kapaciteti kрана, i na kraju ekonomski faktor. Autori su u okviru rada razvijeni model za izbor najboljeg kрана primenili na jednu studiju slučaja kako bi prikazali funkcionisanje modela. Rezultati rada pokazuju da toranjski kran predstavlja najbolji izbor.

Skibnievski i Čao su analizirajući situaciju oko izbora povoljnije strategije između primene tradicionalnog ili polu-automatizovanog sistema toranjskog kрана za izgradnju poslovnog objekta visine 66 m formirali model primenom AHP metode sa pet hijerarhijskih nivoa. Model je zasnovan na modifikovanom i proširenom cost-benefit pristupu (Chao, 1993). Kriterijumi su hijerarhijski razvrstani na kriterijume vezane za troškove i kriterijume koji se tiču prednosti koje određeni tip kрана obezbeđuje. Skibnievski i Čao ističu da je dobra komunikacija između eksperata u procesu evaluacije neophodna kako bi se spojila sva potrebna ekspertna znanja koja će dovesti do efikasnog ocenjivanja alternativa. N. Prašćević i Ž. Prašćević (2016, 2017) su razvili postupak AHP sa rasplnutim (fuzzy) promenljivim i parametrima i primenili ga za rangiranje alternativa prilikom donošenja odluka u upravljanju građevinskim projektima.

Model za višekriterijumski izbor kрана na velikim građevinskim projektima zasnovan na AHP metodi predložen je i opisan u ovom radu u narednim odeljcima.

2. METODOLOGIJA

2.1. Predlog procedure za višekriterijumski izbor kрана

Na Slici 1 dat je šematski prikaz predložene metodologije.



Slika 1: Predložena metodologija

Pregledom literature i anketiranjem eksperata sa višegodišnjim iskustvom u izvođenju radova analizirani su kriterijumi za izbor kрана. Predloženi su sledeći kriterijumi koje treba uzeti u obzir prilikom izbora kрана: K1 – karakteristike projekta, K2 – troškovi, K3 – tehničke karakteristike mehanizacije, K4 – uticaj na životnu sredinu. Svaki od kriterijuma se sastoji od podkriterijuma. Kriterijumi sa svojim podkriterijumima dati su u Tabeli 1.

Tabela 1: Kriterijumi i podkriterijumi

Kriterijumi	Podkriterijumi
K1 - Karakteristike projekta	Uslovi tla (nosivost tla u odnosu na opterećenja od kрана) Lokacijski uslovi (pozicija kрана i prostor za transport, montažu i demontažu kрана)
K2 –Troškovi	Koštanje radnog sata mehanizacije Kh Transport Montaža i demontaža Održavanje i amortizacija
K3 - Tehničke karakteristike mehanizacije	Pouzdanost Nosivost kрана Visina dohvata kрана Radijus dejstva
K4 - Uticaj na životnu sredinu	Potrošnja energije (u zavisnosti od pogonskog sredstva) Emisija CO ₂ Bezbednost i zdravlje ljudi

Predloženi model razmatra prethodno navedene kriterijume na osnovu ulaznih podataka. Ulazni podaci na kojima se zasniva evaluacija kriterijuma su: projektna dokumentacija, tehničke specifikacije proizvođača mehanizacije i baza istorijskih podataka sa prethodnih projekata. Evaluacija kriterijuma podrazumeva najpre određivanje najznačajnijeg kriterijuma koji najviše utiče na izbor kрана. Sledeći korak je određivanje najznačajnije alternative rangiranjem alternativa po kriterijumima. Kada je određen najznačajniji kriterijum i alternative rangirane po kriterijumima sledi određivanje cilja tj. izbor kрана.

3. AHP METODA

Analički hijerarhijski proces (AHP) je metoda višekriterijumskog odlučivanja čiju je matematičku i idejnu osnovu razvio Thomas Saaty (Saaty, 1990, Saaty, 2015). Osnovni princip ove metode je razlaganje složenog problema u hijerarhiju. Na vrhu hijerarhije je postavljen cilj, a kriterijumi, podkriterijumi i alternative su razloženi na više hijerarhijskih nivoa. Zaključivanje se vrši poređenjem elemenata u parovima na svakom hijerarhijskom nivou u odnosu na element na višem nivou, korišćenjem osnovne Saatijske skale. Osnovna skala koja se koristi za poređenje elemenata sastoji se od kvalitativnih ocena kojima odgovaraju numeričke vrednosti (1, 3, 5, 7, 9). Pored njih, postoje i srednje vrednosti (2, 4, 6, 8). Krajnji rezultat poređenja su vektori relativnog značaja (prioriteta) kriterijuma i alternativa u odnosu na cilj.

Rezultati poređenja elemenata na jednom hijerarhijskom nivou formiraju matrice poređenja A , gde element a_{ij} predstavlja odnos kriterijuma i prema kriterijumu j . Ukoliko ima n kriterijuma, matrica poređenja je kvadratna matrica reda n . Kako bi se očuvala konzistentnost odlučivanja, elementi a_{ij} predstavljaju recipročnu vrednost odgovarajućih elemenata a_{ji} . Elementi na dijagonali matrice jednaki su 1. Pri idealno konzistentnom vrednovanju, matrica A bi se dobila iz odnosa relativnih težinskih koeficijenata kriterijuma:

$$A = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & w_2/w_n \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & w_n/w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{2n} \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{nn} \end{bmatrix},$$

gde je w_i relativni težinski koeficijent elementa i .

Postoji više definisanih metoda za određivanje težinskih koeficijenata $W^T = [w_1, \dots, w_n]$. Saaty je predložio da se najpre odredi sopstvena vrednost λ_{\max} matrice A . Uzimajući u obzir da važi:

$$\begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & w_2/w_n \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & w_n/w_n \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_n \end{bmatrix} = \lambda * \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_n \end{bmatrix},$$

vektor sopstvenih vrednosti matrice se može definisati kao vektor približnih vrednosti težinskih koeficijenata W^T .

Jedna od pomenutih metoda za dobijanje vektora W jeste rešavanje sistema linearnih jednačina:

$$A \cdot W = \lambda \cdot W \text{ ili } (A - \lambda \cdot I) \cdot W = 0, \quad (1)$$

gde je I jedinična matrica.

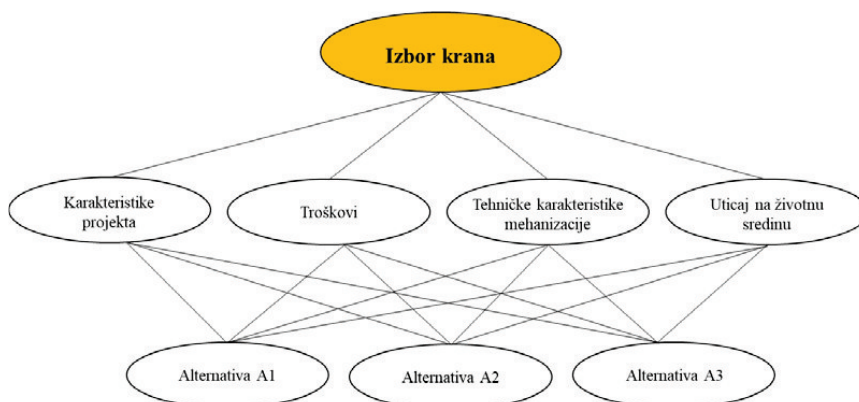
Kako bi elementi vektora W bili jedinstvene vrednosti, oni se normalizuju tako što se podele svojom sumom. Potom se vrši množenje vektora W sa težinskim koeficijentom elementa na višem hijerarhijskom nivou koji je u procesu poređenja upotrebljen kao kriterijum, ponavljajući postupak od viših ka nižim nivoima. Kompozitni relativni težinski koeficijenti elemenata na nižim nivoima se određuju pomoću težinskih koeficijenata koji se sračunavaju za svaki element na datom nivou. Kada je postupak sproveden do najnižeg hijerarhijskog nivoa (alternativa), definišu se kompozitni težinski koeficijenti za svaku alternativu. Zbir kompozitnih koeficijenata iznosi 1. Kao rezultat sprovedenog postupka dobijaju se dve ključne informacije za proces odlučivanja: značaj svake alternative u odnosu na cilj i rangiranje alternativa prema značaju.

4. PRIMER SA REZULTATIMA I DISKUSIJOM

Studija slučaja izgradnje industrijskog objekta kod koga je proces izbora kрана ranije završen i čije je izvođenje još uvek u toku korišćena je kako bi se pokazala predložena metodologija. Kранovi koji su izabrani da opslužuju gradilište su u vlasništvu izvođača radova. Osnovna svrha modela je ocena da li je usvojeno rešenje zaista najbolja opcija, tj. u kojoj meri je prilikom izbora kрана moguće uzeti u obzir i druge kriterijume koji bi možda vodili do izbora drugog rešenja i pospešili dostizanje osnovnih ciljeva projekta.

Izabrani kранovi su tipa Liebherr LM 120 HC i postavljeni su tako da je visinska razlika između kрана dovoljna da ne postoje prostorni sukobi niti sučeljavanja. Visina objekta iznosi 55.95 m. Krovna i fasadna konstrukcija su projektovane kao noseća čelična konstrukcija. Objekat ima kružni poprečni presek prečnika 38.5 m. U blizini objekta nema susednih objekata koji bi ograničavali izbor kрана. Sva skladišta i zone montaže nalaze se uz sam objekat.

AHP model se sastoji od tri alternative A1, A2 i A3 i četiri kriterijuma. Hijerarhijska struktura modela je prikazana na Slici 2.



Slika 2: Hijerarhijska dekompozicija modela

Na Slici 2 su lako uočljiva tri nivoa modela. Najviši nivo predstavlja cilj problema - izbor kрана, na drugom nivou su četiri kriterijuma koji doprinose cilju i na trećem nivou su tri alternative. Kriterijumi sa svojim podkriterijumima detaljnije su opisani u Tabeli 1. Vrednosti podkriterijuma za kriterijum K2 (Troškovi) sračunate su za sve alternative pomoću poznatih formula za proračun koštanja radnog sata mehanizacije (Kh). U obzir su uzete činjenice da li je kран u vlasništvu Izvođača ili ga je potrebno iznajmiti. Potrošnje energije u zavisnosti od pogonskog sredstva sračunate su takođe pomoću pomenutih formula. Vrednosti emisije SO₂ određene su pomoću predložene metodologije (Bouferguene et al., 2013). Sve ostale potrebne vrednosti preuzete su iz tehničkih specifikacija proizvođača mehanizacije. Kvalitativni podkriterijumi su svedeni na kvantitativne ocenama nezavisnih eksperata. Svakom podkriterijumu dodeljene su ocene od 1 do 5. Ocene definišu u kojoj meri je neka alternativa zadovoljila određeni podkriterijum, gde 1 predstavlja ocenu dovoljno, a 5 ocenu odlično.

Alternative koje se razmatraju u predmetnoj studiji slučaja su: A1 – toranjski kран Liebherr 130 ES-V 6, A2 – kран Potain MCT 178, A3 – postojeće rešenje (dva kрана tipa Liebherr LM 120 HC). Treća alternativa

su dva kрана koja su u vlasništvu Izvođača, a prve dve su kranovi koji su dostupni Izvođaču za iznajmljivanje na tržištu Srbije.

Procenjivanje alternativa i međusobno poređenje kriterijuma izvršeno je anketiranjem nezavisnih eksperata. Anketirana su tri nezavisna eksperta sa dugogodišnjim iskustvom u izgradnji investicionih projekata. Dva eksperta su građevinske struke, dok je jedan mašinske struke, što je dobra kombinacija s obzirom na predmet problema. Svaki ekspert vrši procene kriterijuma poređenjem parova kriterijuma. Poređenja kriterijuma svakog eksperta obrazuju poredbenu matricu. Normalizovani sopstveni vektor matrice poređenja predstavlja vektor težinskih koeficijenata kriterijuma za svakog eksperta. Finalni težinski koeficijenti kriterijuma predstavljaju aritmetičku sredinu ako se uzme u obzir jednako učešće eksperata (Cho and Cho, 2008).

Tabela 2: Prosečni težinski koeficijenti kriterijuma

ω_1	ω_2	ω_3	ω_4
0,0709	0,2180	0,5255	0,1856

Iz Tabele 2 se može zaključiti da tehničke karakteristike mehanizacije (kriterijum K3) sa 52.55% i dalje imaju vodeći značaj pri izboru kрана. Pokazalo se takođe da kriterijumi K2 (troškovi) i K4 (uticaj na životnu sredinu) sa 17.32% i 16.99% respektivno, takođe značajno utiču na izbor kрана na gradilištu.

Naredni korak je procena alternative za svaki pojedinačni kriterijum imajući u vidu cilj modela. Ove procene alternativa u odnosu na kriterijum su elementi u matricama poređenja alternativa. Alternative su rangirane prema svakom od kriterijuma u Tabeli 3. Rangiranje je izvršeno na osnovu sopstvenih vektora poredbenih matrica alternativa.

Tabela 3: Matrica rangiranja alternativa po kriterijumima

	K1	K2	K3	K4
A1	0.083	0.057	0.057	0.074
A2	0.193	0.295	0.649	0.643
A3	0.724	0.649	0.295	0.283

U Tabeli 4 prikazano je finalno rangiranje alternativa na osnovu finalnog vektora prioriteta za alternative (sopstvenog vektora cilja). Sopstveni vektor cilja određen je množenjem sopstvenog vektora poredbene matrice kriterijuma i matrice rangiranja alternativa po kriterijumima.

Tabela 4: Finalno rangiranje alternativa

A1	A2	A3
0,0618	0,5382	0,4000

Iz tabele 4 se može zaključiti da je, uzimajući u obzir težinske koeficijente kriterijuma, alternativa A2 najbolje rangirana, a da za njom sledi alternativa A3. Ovo pokazuje da alternativa A2 predstavlja kran koji najbolje zadovoljava višekriterijumski postavljen problem izbora kрана primenom metode AHP. Postojeće rešenje (alternativa A3) je najbolje rešenje u pogledu troškova s obzirom da nema troškova iznajmljivanja mehanizacije, ali kada se uzmu u obzir i drugi kriterijumi, ona ne predstavlja optimalno rešenje.

5. ZAKLJUČAK

U predloženom modelu izbora kрана na velikim investicionim projektima problem izbora kрана razmatran je kao problem višekriterijumske optimizacije. Za određivanje optimalnog rešenja korišćena je AHP metoda. Model koji je predstavljen u ovom radu primenjen je na studiji slučaja izgradnje jednog industrijskog objekta. Evaluacija modela izvršena je na osnovu definisanih kriterijuma, dostupnih ulaznih podataka i procena nezavisnih eksperata. Pored tehničkih karakteristika mehanizacije, uzeti su u obzir i kriterijumi vezani za karakteristike projekta, troškove i uticaj na životnu sredinu. Rangiranjem kriterijuma primenom AHP metode pokazano je da kriterijum koji se odnosi na tehničke karakteristike mehanizacije učestvuje u procesu selekcije sa 52.55%, ali i da ne treba zanemariti i druge kriterijume kao što su troškovi i uticaj na životnu sredinu. Optimalna alternativa prikazane studije slučaja je kran sa приметno višim troškovima u odnosu na troškove ostalih alternativa, ali koji znatno bolje zadovoljava ostale definisane kriterijume.

LITERATURA

- [1] Al-Harbi, K. M. A. (2001). Application of the AHP in project management. *International Journal of Project Management*, 19, pp. 19–27.
- [2] Al-Hussein et al. (2012). An algorithm for mobile crane selection and location on construction sites. *Construction Innovation*, 1 (2), 91-105.
- [3] Bouferguene, A. et al. (2013). Productivity and CO₂ emission analysis for tower crane utilization on high-rise building projects. *Automation in Construction*, 31, 255–264.
- [4] Cakmak, P. I. and Cakmak, E. (2013). An Analysis of Causes of Disputes in the Construction Industry Using Analytical Network Process. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 109, 183–187.
- [5] Chao, L. (1993). Evaluation of advanced construction technology with AHP method. *Journal of Construction Engineering and Management*, 118 (3), 577–593.
- [6] Cho, Y. and Cho, K. (2008). A loss function approach to group preference aggregation in the AHP. *Computers and Operations Research*, 35 (3), 884–892.
- [7] Dalalah, D., Al-oqla, F. and Hayajneh, M. (2010). Application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) in Multi- Criteria Analysis of the Selection of Cranes. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 4 (5), 567–578
- [8] Hanna (1999). A fuzzy logic approach to the selection of cranes. *Automation in Construction*, 8 (5), 597–608.
- [9] Gray, C. and Little, J. (2006). A systematic approach to the selection of an appropriate crane for a construction site. *Construction Management and Economics*, 3 (2), 37–41.
- [10] Huang, C., Wong, C. K. and Tam, C. M. (2011). Optimization of tower crane and material supply locations in a high-rise building site by mixed-integer linear programming. *Automation in Construction*, 20 (5), 571–580.
- [11] Lin, C., Wang, W. and Yu, W. (2008). Improving AHP for construction with an adaptive AHP approach (A³). *Automation in Construction*, 17 (2), 180–187.
- [12] Nassar, K., Thabet, W. and Beliveau, Y. (2003). A procedure for multi-criteria selection of building assemblies. *Automation in Construction*, 12 (5), 543–560.
- [13] Prašević, N., Prašević, Ž. (2016). Application of Fuzzy AHP method Based on Eigenvalues for Decision Making in Construction Industry, *Technical Gazette*, 23(1), 57-64.
- [14] Prašević, N., Prašević, Ž. (2017). Application of Fuzzy AHP for Ranking and Selections of Alternatives in Construction Project Management, *Journal of Civil Engineering and Management*, 23 (8), 1123-3730.
- [15] Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 48, 9-26.
- [16] Saaty, T. L. (2015). Axiomatic foundation of the Analytic Hierarchy Process. *Management Science*, 32 (7), 841–855.
- [17] Shapira, A., Asce, M. and Goldenberg, M. (2006). AHP-Based Equipment Selection Model for Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131 (12), 1263–1273.
- [18] Temiz, I. and Calis, G. (2017). Selection of Construction Equipment by Using Multi-criteria Decision Making Methods. *Procedia Engineering*, 196, 286–293.
- [19] Warszawski, A. (2006). Expert systems for crane selection. *Construction Management and Economics*, 8 (2), 179-190.