

Primena TOPSIS metode za izbor merodavnog eVTOL vazduhoplova

VOJISLAV G. BOGDANOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Saobraćajni fakultet, Beograd

OLJA V. ČOKORILO, Univerzitet u Beogradu,

Saobraćajni fakultet, Beograd

BOJANA D. MIRKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Saobraćajni fakultet, Beograd

Stručni rad

UDC: 656.7.01

DOI: 10.5937/tehnika2403343B

U ovom radu primenjena je višeatributivna metoda TOPSIS u cilju poređenja parametara 53 eVTOL vazduhoplova (u projektnoj fazi) klase Vectored Thrust. Analiza obuhvata tri TOPSIS proračuna, u kojima se koriste tri različite metode ocene težinskih koeficijenata poredbenih kriterijuma (dve objektivne i jedna subjektivna metoda). U zavisnosti od preferencije kriterijuma poređenja određene na osnovu ovih metoda, rezultati proračuna predstavljaju relativne bliskosti idealnim rešenjima pomoću kojih se kreiraju rang liste alternativa, kao i konačna rang lista izračunata na osnovu prosečnih vrednosti ovih rezultata. Analizom je pokazano da svega 5 eVTOL vazduhoplova po svim proračunima, a ukupno 7 u konačnom poretku, ostvaruje rezultate veće od 0,5, što implicira da su bliže idealnim u odnosu na anti-idealna rešenja. Preostale alternative su bliže anti-idealnim rešenjima, gde čak 18 njih ne ostvaruje prosečni rezultat veći od 0,2. Rezultati analize daju jasnu sliku na aktuelnom tržištu eVTOL projekata u razvoju i pokazuju koji od njih se značajno ističu po zadatim kriterijumima.

Ključne reči: Urban Air Mobility, eVTOL, Vectored Thrust, TOPSIS, višeatributivno odlučivanje, vazduhoplov

1. UVOD

UAM (eng. Urban Air Mobility) predstavlja nov koncept vazdušnog saobraćaja u kom će se prevoz putnika i robe odvijati u i oko gusto naseljenih zona. U ovakvom saobraćajnom sistemu, vazduhoplovna prevozna sredstva, odnosno vazduhoplovi, moraju posedovati performanse koje im omogućavaju izvođenje vertikalnog poletanja i sletanja (eng. Vertical Take-off and Landing - VTOL). Pored ovoga, urbana okruženja zahtevaju još i smanjenje buke i emisije štetnih gasova, stoga se trenutnim stepenom tehnološkog razvoja u domenu pogona na električnu energiju i kapaciteta baterija teži ka razvoju VTOL vazduhoplova čije se kretanje realizuje iskorišćavanjem električne energije za sopstveni pogon (eVTOL). Značajno je pomenuti da kategorija eVTOL obuhvata i „hibridne električne“ va-

zduhoplove koji koriste kombinaciju električne energije i energije fosilnih goriva, ali i koncepte u razvoju koji razmatraju iskorišćenje vodonika kao izvora energije. U zavisnosti od konfiguracije pogonskog sistema EASA (eng. European Union Aviation Safety Agency) definiše sledeće kategorije eVTOL vazduhoplova [1]:

- Vectored Thrust: eVTOL vazduhoplovi koji poseduju krila radi efikasnijeg leta u krstarenju, a koriste isti pogonski sistem u fazama lebdjenja (tokom poletanja i sletanja) i krstarenja;
- Lift and Cruise: eVTOL vazduhoplovi koji poseduju krila radi efikasnijeg leta u krstarenju, a koriste odvojene pogonske sisteme tokom faza lebdjenja i krstarenja;
- Wingless: eVTOL vazduhoplovi koji ne poseduju krila za efikasan let u krstarenju, već koriste potisne sisteme sačinjene od više rotora koji omogućavaju vertikalni i horizontalni let.

Prema studiji EASA-e [1], sa aspekta putničkog saobraćaja (npr. povezivanje aerodroma sa opslužnim područjem, letove unutar urbanih jezgra, panoramsko razgledanje gradova, itd.) najpogodnija konfiguracija

Adresa autora: Vojislav Bogdanović, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, Vojvode Stepe 305

e-mail: vojibog@gmail.com

Rad primljen: 31.10.2023.

Rad prihvaćen: 22.12.2023.

eVTOL vazduhoplova je Vectored Thrust koja omogućava veće dolete i brzine leta. Upravo zbog toga, u ovom radu fokusiraćemo se na poređenje parametara 53 različita tipa Vectored Thrust eVTOL vazduhoplova. Parametri odabrani za poređenje su: ukupni kapacitet vazduhoplova (pilot + putnici), maksimalan dolet, maksimalna brzina i maksimalna masa plaćenog tereta (eng. Maximum Payload). Sam proces poređenja obuhvatao je primenu TOPSIS analize (eng. The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) [2], gde je svaki posmatrani tip vazduhoplova alternativa za sebe, dok su parametri kriterijumi po kojima se vrši poređenje. Rezultat analize predstavlja rang listu posmatranih tipova vazduhoplova u odnosu na odabrane kriterijume. Preciznije, ukupna mera kvaliteta određuje se na osnovu Euklidskog rastojanja svake alternative od idealnog rešenja (hipotetička alternativa koja ima najbolje vrednosti po svakom kriterijumu) i anti-idealnog rešenja (hipotetička alternativa koja ima najlošije vrednosti po svakom kriterijumu).

UAM je trenutno daleko od svoje potpune implementacije. Cilj je stvoriti bezbedan, ekološki prihvatljiv i efikasan transportni sistem koji istovremeno može smanjiti zagušenje saobraćaja u urbanim zonama (drumski i šinski saobraćaj). Proizvođači eVTOL vazduhoplova, najpre zbog konkurentnosti, uz skromnu transparentnost objavljuju parametre svojih vazduhoplova. Informacije ove prirode su od ključnog značaja pri definisanju regulative, posebno u domenu upravljanja vazдушnim saobraćajem u vazduhu i na vertiportima.

Trenutno, postojeći standardi i preporučena praksa, kao i regulativa nisu u potpunosti definisani od strane civilnih vazduhoplovnih vlasti, već postoje samo nacrti ili parcijalno objavljeni elementi regulative, koji su još u fazi razvoja i prilagođavanja. Samim tim, sa infrastrukturnog aspekta (kontrola letenja i vertiporti), ne postoje uslovi za stvaranje okruženja u kom bi se saobraćaj bezbedno odvijao.

Rezultati prikazani u ovom radu objedinjuju dostupne informacije o eVTOL projektima i jasno prikazuju stanje međusobnog odnosa vazduhoplova u odnosu na kriterijume poređenja. Takođe, daje se jasan uvid u opsege u kom se posmatrani parametri kreću, što može biti korisno za donosiocje odluka kako u pogledu odabira adekvatnog tipa eVTOL-a u cilju obavljanja željenih operacija, tako i u pogledu projektovanja potrebne infrastrukture (vazdušni prostor i vetriporti), kao i bezbednog upravljanja vazдушnim saobraćajem.

U poglavlju 2 prikazan je postupak prikupljanja podataka za analizu. Poglavlje 3 obuhvata detaljan opis primene TOPSIS metode. Zatim sledi diskusija rezultata u poglavlju 4 i zaključak rada.

2. PRIKUPLJANJE PODATAKA

Trenutno u svetu postoji više stotina projekata koji se bave razvojem eVTOL vazduhoplova. Odlična baza podataka kojoj se može besplatno pristupiti, a koja sadrži obimnu listu projekata, klasifikacije i osnovnih informacija o njima, kao i novosti koje se generalno tiču ove oblasti, nalazi se na internet stranici [3]. Do trenutka pisanja ovog rada, lista projekata vezanih za *Vectored Thrust* eVTOL-ove sadržala je ukupno 320 različitih vazduhoplova. Kod većine projekata urađen je samo konceptualni dizajn ili su kompletirani modeli u manjoj razmeri (prototipovi), dok postoji i određen broj „ugašenih“ projekata. Nijedan od vazduhoplova nije zvanično u eksploataciji, a svega nekoliko eVTOL-ova je u sertifikacionom procesu. Prema zvaničnim podacima iz 2023. godine [4] svega sedam eVTOL vazduhoplova je u procesu sertifikacije od strane međunarodnih vazduhoplovnih organizacija i civilnih vazduhoplovnih vlasti. Među ovim proizvođačima prednjači Joby Aviation koji je u julu 2023. godine započeo treću od ukupno pet faza sertifikacionog procesa kod FAA [5]. Sa druge strane ni civilne vazduhoplovne vlasti nemaju potpuno definisane standarde sertifikacije, već sarađuju sa proizvođačima u cilju realizacije kompletnog sertifikacionog plana. Sertifikacioni proces bi generalno trebao da obuhvata tri glavne faze [6]:

- Sertifikaciju tipa (eng. Type Certification) koja se tiče izdavanja potvrde o plovidbenosti;
- Sertifikaciju proizvodnje (eng. Production Certification) kojom se odobrava serijska proizvodnja tipa vazduhoplova koji ispunjava standarde definisane sertifikacijom tipa;
- Odobrenje o obavljanju komercijalnih usluga.

Analizirajući izvore podataka, treba pomenuti da su određene informacije o eVTOL vazduhoplovima dostupne i na stranicama [7] i [8], kao i na zvaničnim internet stranicama proizvođača eVTOL vazduhoplova. U cilju provere tačnosti prikupljenih podataka korisno je pristupiti svakom od navedenih izvora.

U tabeli 1 prikazana je lista eVTOL vazduhoplova koji su obuhvaćeni TOPSIS analizom, kao i ulazni podaci o parametrima. Odabrani kriterijumi po kojima su poređeni eVTOL vazduhoplovi predstavljaju osnovne parametre objavljene od strane proizvođača, a to su: ukupni kapacitet vazduhoplova (pilot + putnici), maksimalan dolet (Nm), maksimalna brzina letenja (kt) i maksimalna masa plaćenog tereta (kg).

Na listi analiziranih eVTOL nalaze se vazduhoplovi čija je namena privatni i komercijalni transport putnika i robe, a među njima je i jedan sportski vazduhoplov namenjen trkama (Airspeeder Mk4). Sa aspekta upravljanja eVTOL-ovima, određeni projekti

podrazumevaju pilotiranje, ali i autonomni let ili daljinsko upravljanje.

Takođe, bitno je pomenuti da se na listi nalaze finalni projekti, kao i prototipovi vazduhoplova.

Tabela 1. Podaci o eVTOL vazduhoplovima

Odabrani eVTOL vazduhoplovi za TOPSIS analizu	Kapacitet [sedišta]	Dolet [NM]	Maksimalna brzina [kt]	Plaćeni teret [kg]
Ace VTOL Trinity (concept design)	7	109	191	1500
Advanced Research Foundation Cyclocar	6	270	135	600
Advanced System Engineering - FIPSI BX4	2	26	48	181
AIR AIR ONE (technology demonstrator)	2	96	134	250
Airbus Acubed Vahana Alpha Two (defunct)	1	27	119	90
Airbus Acubed Vahana Beta (concept design)	1	27	119	90
Airspace Experience Technologies (ASX) MOBi-One V1 (concept design)	4	56	130	200
Airspace Experience Technologies (ASX) MOBi-One V3 (concept design)	5	226	261	454
Airspace Experience Technologies (ASX) Sigma-6 (prototype)	8	174	174	454
Airspace Experience Technologies (ASX) Sigma-6 Cargo Drone (concept design)	1	661	174	454
Alauda Airspeeder Mk4 (hydrogen-electric)	1	162	194	85
Aliptera APV-1	2	417	210	635
AMSL Aero Vertua	5	540	162	500
ARC Aerosystems Starling Jet (concept design)	10	1303	400	980
Archer Aviation Midnight (production aircraft)	5	43	130	456
Baaz B5	5	162	162	600
Bartini (four passenger concept design)	4	297	162	400
Bartini (production aircraft)	4	297	162	400
CycloTech Passenger Demonstrator	4	46	81	400
Davies Tesla Concept Model V2	3	32	162	363
Detroit Flying Cars WD-1	2	348	109	227
EVA X01	2	135	216	250
IO Aircraft Challenger SC	6	799	400	907
Jetoptera J-2000	2	174	174	181
Joby Aviation S4 (production prototype)	5	87	174	453
Joby Aviation S4 2.0 (pre-production prototype)	5	130	174	840
Joby S2 (defunct)	2	173	173	180
Kozloff Ship to Shore Air Limo (SSAL)	6	52	120	544
Lilium Eagle (Defunct)	2	162	240	200
Limosa LimoConnect	7	130	174	499
Macchina Volantis Flying Car	5	864	150	570
Micor Technologies Advanced Individual VTOL Aircraft (AIVA)	1	47	108	110
Micor Technologies Variable Geometry VTOL aircraft (VAGEV)	2	76	108	100
Moller International Skycar® 200 (concept design)	2	377	210	181
Moller International Skycar® 400 (prototype)	4	651	287	326
Moller International Skycar® 600 LAMV (concept design)	6	652	348	567
Moller International Skycar® M900 (concept design)	9	869	220	998
Moscow Team AI Kamchatka	4	165	188	550
Odys Aviation Unnamed eVTOL	9	869	300	1134
Overair (Karem) Butterfly	6	87	174	499
Phractyl Macrobat	1	81	97	150
Plana CP-01	7	270	189	600
SASTRA University Mistral (concept design)	5	270	135	500
Scienex Flyter	2	81	65	250

3. ANALIZA I POREĐENJE PARAMETARA TOPSIS METODOM

TOPSIS analiza izvršena je pomoću alata Microsoft Excel 2016, u skladu sa opisom metode u algoritamskom obliku [9], u sedam koraka.

Korak 1. Polazeći od prvog koraka TOPSIS algoritma, potrebno je normalizovati polaznu matricu vektorskom normalizacijom, gde ima ukupno m alternativa i n kriterijuma:

$$X = \|x_{ij}\|_{m \times n}^{i=1, \dots, m, j=1, \dots, n} \quad (1)$$

$$R = \|r_{ij}\|_{m \times n}^{i=1, \dots, m, j=1, \dots, n} \quad (2)$$

Vrednosti r_{ij} dobijaju se primenjujući sledeći izraz za kriterijume koji se maksimiziraju:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, \forall K_j \in K' \quad (3)$$

Korak 2. U ovom koraku vrši se ponderisanje normalizovane matrice, odnosno uključivanje relativnih težina kriterijuma u matricu odlučivanja. Matrica R se transformiše u matricu V :

$$R = \|r_{ij}\|_{m \times n} \rightarrow V = \|v_{ij}\|_{m \times n} \quad (4)$$

Metode za određivanje težina kriterijuma mogu biti subjektivne i objektivne, a izbor metode i način određivanja relativnih težina kriterijuma direktno će uticati na konačan rang alternativa. Subjektivne metode se zasnivaju na oceni donosilaca odluke o važnosti kriterijuma, dok objektivne metode omogućavaju ocenjivanje važnosti kriterijuma na osnovu informacija koje su sadržane u polaznoj matrici odlučivanja. U ovom radu izvršeni su TOPSIS proračuni koristeći dve objektivne i jednu subjektivnu metodu.

Polazeći od pretpostavke da su svi kriterijumi podjednako važni, u prvom slučaju korišćena je objektivna metoda – metoda jednakih težina. Izraz za određivanje težinskih koeficijenata (w_j) kada zadatak sadrži n kriterijuma glasi:

$$w_j = \frac{1}{n}, j = 2, \dots, n \quad (5)$$

Za četiri kriterijuma, vrednosti težinskih koeficijenata iznosili su $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 0,25$. Proračun koji razmatra ovu metodu određivanja težinskih koeficijenata označen je kao TOPSIS I.

Druga objektivna metoda koja je primenjena u radu jeste metoda entropije, inače zasnovana na Šenonovoj definiciji entropije iz teorije informacija [10]. Ovom metodom težinski koeficijenti se izračunavaju na osnovu mere neodređenosti u informacijama iz polazne matrice odlučivanja. Nakon normalizacije vrednosti alternativa po svim kriterijumima,

potrebno je odrediti entropiju E_j svih alternativa po kriterijumu $K_j, j = 1, \dots, n$. U sledećem koraku određuje se stepen diverzifikacije d_j , na osnovu kojeg će se utvrditi vrednosti težinskog koeficijenta w_j tako što se stepen diverzifikacije za svaki kriterijum deli sumom svih stepena diverzifikacije.

$$E_j = -\varepsilon \sum_{i=1}^m r_{ij} \ln r_{ij}, j = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$d_j = 1 - E_j, j = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{k=1}^n d_k}, j = 1, \dots, n \quad (8)$$

Vrednosti entropije, stepena diverzifikacije i težine kriterijuma prikazane su u tabeli 2, a proračun koji razmatra metodu entropije nazvan je TOPSIS II.

Tabela 2. Entropija, stepen diverzifikacije i težine kriterijuma

	K1	K2	K3	K4
E_j	3,170	2,418	3,363	3,060
d_j	-2,170	-1,418	-2,363	-2,060
w_j	0,271	0,177	0,295	0,257

Subjektivna metoda koja je primenjena u TOPSIS proračunu jeste metoda direktnog određivanja težina. Ova metoda podrazumeva dodeljivanje važnosti kriterijuma na definisanim intervalnim skalama, na primer: 1-5, 1-7 ili 1-10; gde vrednost 1 predstavlja najmanju, a vrednost 5 najveću ocenu važnosti kriterijuma. U cilju proračuna težinskih koeficijenata, potrebno je prvo vrednovati kriterijume i izvršiti bodovanje istih.

Obzirom da se radi o novom konceptu vazdušnog saobraćaja, usvojeno je da za prve korisnike eVTOL vazduhoplova, kao i za organizacije koje se budu bavile upravljanjem saobraćaja i opslugom eVTOL vazduhoplova na zemlji kriterijum maksimalne brzine neće biti najznačajniji parametar. Svakako da je vazdušni saobraćaj efikasniji kada se transport odvija u što kraćem vremenskom periodu, ali je za ovaj vid prevoza, ključni prioritet bezbednost, a ne brzina.

Stoga su svi ostali kriterijumi smatrani kao značajniji. Sa druge strane, pretpostavljeno je da ovakav vid saobraćaja neće biti masovan, bar ne u svojim početnim fazama eksploatacije. *Vectored Thrust* eVTOL projekti generalno razmatraju prevoz do pet lica uključujući pilota, dok svega nekoliko projekata razmatra prevoz dvocifrenog broja lica¹. Takode, očekuje se da prvi korisnici eVTOL vazduho-

¹ aeroG Aviation aG-4 Liberty, ARC Aerosystems Starling Jet, IO Aircraft Chippewa 350E, IO Aircraft Chippewa 350M, Kelekona Unnamed eVTOL, NEAE-GSI eVTOL-BUS, NEAE-GSI eVTOL-Taxi, University of Illinois Illini Air Shuttle

plova budu lica sa većom platežnom moći ili biznis putnici. Imajući sve ovo u vidu, usvojeno je da kriterijum ukupnog kapaciteta bude manje važan u odnosu na maksimalan dolet i maksimalan plaćeni teret. Preostala dva kriterijuma su razmatrana sa podjednako važnošću i dodeljen im je maksimalan broj bodova. Raspodela bodova i odgovarajući težinski koeficijenti kriterijuma dati su u tabeli 3, a proračun u kome se težinski koeficijenti određuju na ovaj način nazvan je TOPSIS III.

Tabela 3. Dodeljivanje bodova po kriterijumima i vrednosti težinskih koeficijenata w_j

Kriterijumi	Skala: 1-5	
	Bodovi	w_j
Ukupan kapacitet	4	0,2353
Maksimalni dolet	5	0,2941
Maksimalna brzina	3	0,1765
Plaćeni teret	5	0,2941

Metodom jednakih težina kriterijuma ne izražava se preferentnost određenog kriterijuma u odnosu na ostale, pa su sa ovog aspekta svi kriterijumi ravnopravni. U metodi entropije kriterijumi maksimalne brzine i ukupnog kapaciteta su značajniji za razliku od preostala dva kriterijuma. Sa druge strane, metodom direktnog određivanja težina istaknuta je preferentnost kriterijuma doleta i plaćenog tereta u odnosu na

kriterijume ukupnog kapaciteta i maksimalne brzine. Analiza će pokazati kako svaki od ovih pristupa utiče na raspodelu pozicija u rangui za svaku od posmatranih alternativa.

Korak 3. Nakon ponderisanja normalizovane matrice, potrebno je odrediti idealno i anti-idealno rešenje. Idealno rešenje (A^+) predstavlja vektor čije su koordinate sve najbolje vrednosti alternativa po kriterijumima. U razmatranom slučaju kriterijumi su maksimizacionog tipa, pa će idealno rešenje predstavljati maksimum po svakom od kriterijuma. Sa druge strane, kod anti-idealnog rešenja (A^-) vektor će imati koordinate minimalnih vrednosti alternativa po svim kriterijumima. Matematički zapis oba vektora dat je sledećim formulama, pri čemu su skupovi K' i K'' skupovi kriterijuma koji se maksimiziraju i minimiziraju, respektivno:

$$A^+ = \left(\left(\max_i v_{ij} \mid \forall K_j \in K' \right), \left(\min_i v_{ij} \mid \forall K_j \in K'' \right) \right) = (v_1^+, v_2^+, \dots, v_j^+, \dots, v_n^+), i = 1, \dots, m \quad (9)$$

$$A^- = \left(\left(\min_i v_{ij} \mid \forall K_j \in K' \right), \left(\max_i v_{ij} \mid \forall K_j \in K'' \right) \right) = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_n^-), i = 1, \dots, m \quad (10)$$

Vrednosti vektora A^+ i A^- za svaki od TOPSIS proračuna prikazani su u tabeli 4.

Tabela 4. Vrednosti idealnog i anti-idealnog rešenja za kriterijume TOPSIS I, TOPSIS II i TOPSIS III

Kriterijumi	TOPSIS I: Metoda jednakih težina kriterijuma				TOPSIS II: Metoda entropije				TOPSIS III: Metoda direktnog određivanja težina kriterijuma			
	K1	K2	K3	K1	K2	K3	K1	K2	K3	K1	K2	K3
A^+	0,072	0,114	0,072	0,072	0,114	0,072	0,072	0,114	0,072	0,072	0,114	0,072
A^-	0,007	0,002	0,009	0,007	0,002	0,009	0,007	0,002	0,009	0,007	0,002	0,009

Korak 4. U narednom koraku, određuje se udaljenost alternativa od idealnog rešenja (S^+) i anti-idealnog rešenja (S^-) na osnovu Euklidskog rastojanja u n -dimenzionalnom kriterijumskom prostoru:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, i = 1, \dots, m \quad (11)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, \dots, m \quad (12)$$

Korak 5. U preposlednjem koraku izračunava se relativna bliskost alternativa idealnom rešenju pomoću sledeće formule, pri čemu je $0 \leq C_i \leq 1$:

$$C_i = S_i^- / (S_i^- + S_i^+), i = 1, \dots, m \quad (13)$$

Iz ove relacije zaključuje se da je alternativa relativno bliža A^+ što je C_i bliža jedinici.

Korak 6. Poslednji korak podrazumeva pronalazjenje najbolje alternative A^* i rangiranje alternativa A_i prema odgovarajućim vrednostima C_i u opadajućem nizu kako bi se dobio ukupan poredak (od najbolje do najlošije alternative).

$$A^* = \{A_i^* \mid C_i^* = \max_i C_i\} \quad (14)$$

Korak 7. Ovaj korak nije deo standardnog algoritma TOPSIS, već je dodat u svrhu izračunavanja najbolje alternative i konačnog ranga po sva tri proračuna. Da bi se došlo do odgovora na ovo pitanje jedan od načina je izračunavanje prosečne vrednosti relativnih bliskosti idealnom rešenju za svaku od alternativa, a potom i rangiranje prosečnih vrednosti $\bar{A}_i$ u opadajućem poretku:

$$\bar{A}_i = \frac{\sum_{j=1}^n C_{ij}}{k}, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n, k = n \quad (15)$$

$$\bar{A}^* = \max_i \bar{A}_i, i = 1, \dots, m \quad (16)$$

4. REZULTATI I DISKUSIJA

U ovom poglavlju predstavljeni su rezultati proračuna i kratka diskusija o njima.

U tabeli 5 prikazane su rang liste u zavisnosti od korišćenih metoda određivanja težinskih koeficijenata kriterijuma, kao i konačna rang lista dobijena na osnovu prosečnih vrednosti relativnih bliskosti alternativa od idealnih rešenja.

Tabela 5. Rezultati TOPSIS proračuna sa konačnom rang listom (u rastućem poretku)

TOPSIS	TOPSIS I		TOPSIS II		TOPSIS III		$\bar{A}_i$	
Odabrani eVTOL vazduhoplovi za TOPSIS analizu	Rang	C_I	Rang	C_{II}	Rang	C_{III}	$C_{I,II,III}$	Rang
Terrafugia TF-2 tiltrotor (defunct)	20	0,300	18	0,327	18	0,281	0,303	20
Baaz B5	21	0,280	20	0,320	21	0,265	0,289	21
Overair (Karem) Butterfly	22	0,274	19	0,322	24	0,246	0,281	22
SASTRA University Mistral (concept design)	23	0,273	26	0,295	22	0,264	0,277	23
University of Maryland Starling (concept design)	25	0,262	22	0,304	23	0,247	0,271	24
Moscow Team AI Kamchatka	24	0,263	23	0,302	26	0,242	0,269	25
Kozloff Ship to Shore Air Limo (SSAL)	26	0,260	24	0,301	25	0,243	0,268	26
Bartini (four passenger concept design)	27	0,252	29	0,267	27	0,238	0,252	27
Bartini (production aircraft)	27	0,252	29	0,267	27	0,238	0,252	27
Joby Aviation S4 (production prototype)	30	0,243	27	0,287	30	0,216	0,249	29
Uber Elevate eCRM-003	31	0,237	28	0,282	32	0,209	0,243	30
Moller International Skycar® 200 (concept design)	29	0,244	34	0,247	29	0,222	0,237	31
TCab Tech E20	32	0,231	31	0,267	31	0,212	0,237	32
Vertical Aerospace VX4 (production model)	33	0,224	32	0,260	33	0,207	0,230	33
Archer Aviation Midnight (production aircraft)	34	0,221	33	0,258	34	0,203	0,227	34
Lilium Eagle (Defunct)	35	0,208	35	0,247	37	0,156	0,204	35
EVA X01	36	0,190	36	0,227	39	0,146	0,188	36
Detroit Flying Cars WD-1	37	0,187	43	0,165	35	0,192	0,181	37
Davies Tesla Concept Model V2	38	0,172	37	0,206	38	0,148	0,175	38
CycloTech Passenger Demonstrator	39	0,169	38	0,193	36	0,162	0,174	39
Jetoptera J-2000	41	0,158	41	0,180	40	0,128	0,156	40
Joby S2 (defunct)	42	0,157	42	0,179	41	0,127	0,154	41
Alauda Airspeeder Mk4 (hydrogen-electric)	40	0,158	39	0,184	44	0,119	0,154	42
Airspace Experience Technologies (ASX) MOBi-One V1 (concept design)	43	0,152	40	0,181	42	0,127	0,153	43
Umiles Next Integrity 3	44	0,137	44	0,160	43	0,123	0,140	44
AIR AIR ONE (technology demonstrator)	45	0,122	45	0,142	45	0,103	0,122	45
VRCO NeoXCraft	46	0,089	46	0,107	47	0,072	0,089	46
Scienex Flyter	47	0,082	50	0,089	46	0,082	0,084	47
Micor Technologies Variable Geometry VTOL aircraft (VAGEV)	48	0,079	47	0,093	48	0,061	0,078	48
Airbus Acubed Vahana Alpha Two (defunct)	49	0,072	48	0,090	51	0,047	0,069	49
Airbus Acubed Vahana Beta (concept design)	49	0,072	48	0,090	51	0,047	0,069	49
Phractyl Macrobat	52	0,063	52	0,073	50	0,052	0,063	51
Micor Technologies Advanced Individual VTOL Aircraft (AIVA)	51	0,063	51	0,078	53	0,043	0,062	52
Advanced System Engineering - FIPSI BX4	53	0,055	53	0,062	49	0,053	0,056	53

Nakon tri TOPSIS proračuna zaključuje se da svega 5 alternativa (9%) ostvaruje vrednosti relativnih bliskosti idealnom rešenju većih od 0,5 po svim metodama. ARC Aerosystems Starling Jet (concept design) predstavlja ubedljivo najbolji tip eVTOL vazduhoplova i jedina je alternativa sa rezultatom većim od 0,8 u sva tri slučaja (0,823, 0,806 i 0,809). Pored nje još samo drugorangirana alternativa Odys Aviation Unnamed eVTOL u sva tri slučaja postiže rezultat veći od 0,71 (0,718, 0,737 i 0,710). eVTOL vazduhoplovi Moller International Skycar® M900 (concept design), IO Aircraft Challenger SC i XTI Aircraft TriFan 600 su preostala 3 tipa koji u sva tri proračuna imaju rezultat bliži idealnom u odnosu na anti-idealno rešenje, a u konačnom poretku zauzimaju treću, četvrtu i petu poziciju, respektivno. U konačnom rang, prosečne vrednosti veće od 0,5 imaju još i alternative Ace VTOL Trinity (concept design) i Moller International Skycar® 600 LAMV (concept design), a zauzimaju šesto i sedmo mesto. Prva je bliža idealnom rešenju u odnosu na anti-idealno u slučaju TOPSIS I i TOPSIS II, dok je druga alternativa bliža idealnom rešenju samo u slučaju TOPSIS III. Sve ostale alternative su po svakom proračunu bliže anti-idealnom rešenju, a čak 18 njih ne ostvaruje prosečni rezultat veći od 0,2.

Na osnovu dobijenih rezultata, može se zaključiti da se metodom entropije ostvaruju veće vrednosti relativnih bliskosti alternativa u odnosu na idealno rešenje. Kod čak 45 od 53 alternative ova vrednost je veća u slučaju TOPSIS II nego što je to slučaj kod TOPSIS I i TOPSIS III. Sa druge strane, kod TOPSIS I vrednosti relativnih bliskosti su veće u odnosu na TOPSIS III, pa se može zaključiti da metoda jednakih težina kriterijuma u ovom slučaju daje veće vrednosti relativnih bliskosti alternativa idealnom rešenju u odnosu na metodu direktnog određivanja težina kriterijuma.

5. ZAKLJUČAK

U radu je izvršeno poređenje 53 eVTOL vazduhoplova klase Vectored Thrust na osnovu četiri kriterijuma: ukupni kapacitet vazduhoplova (pilot + putnici), maksimalni dolet, maksimalna brzina i maksimalna masa plaćenog tereta. Primenom višeatributivne metode TOPSIS kroz tri proračuna, koristeći različite metode određivanja težinskih koeficijenata, pokazana je dominantnost 5 najbolje rangiranih alternativa koje u svakom proračunu ostvaruju rezultate bliže idealnom u odnosu na anti-idealno rešenje. Među analiziranim alternativama izdvajaju se ARC Aerosystems Starling Jet i Odys Aviation kao prvorangirana i drugorangirana, respektivno, sa značajno boljim rezultatima u odnosu na ostale. U konačnoj rang listi, generisanoj na

osnovu prosečnih vrednosti relativnih bliskosti alternativa idealnim rešenjima po svakom proračunu, ukupno 7 alternativa ostvaruje vrednosti veće od 0,5, što potvrđuje da je preostalih 46 alternativa bliže anti-idealnom rešenju. Rezultati u ovom radu daju jasan uvid u kom smeru se razvijaju Vectored Thrust eVTOL vazduhoplovi i njihove performanse ukoliko ispune sve sertifikacione zahteve. Ovo može biti korisno donosiocima odluka kako sa stanovišta planiranja i upravljanja vazdušnim saobraćajem ili projektovanjem vertiporta, tako i sa aspekta potencijalnih korisnika eVTOL vazduhoplova prilikom odabira merodavnog vazduhoplova. Takođe, u radu je opisano trenutno stanje u kome se nalaze proizvođači eVTOL vazduhoplova u postupku sertifikacije, što trasira dug period za potpunu primenu koncepta UAM i integraciju u postojeći sistem vazdušnog saobraćaja.

LITERATURA

- [1] European Union Aviation Safety Agency (EASA), Study on Societal Acceptance of Urban Air Mobility in Europe Cologne, Germany; 2021. <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/uam-full-report.pdf>
- [2] Hwang C. L., Yoon K. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, Springer, New York, 1981.
- [3] Electric VTOL News. Virginia, USA; 2023. <https://evtol.news/>
- [4] Jaclyn Trop, Robb Report, These 7 eVTOLs Will Be Flying in the Next Two Years 2023. <https://robbreport.com/motors/aviation/gallery/evtols-certified-two-years-1234835345/vertical-aerospace-2/>
- [5] Joby Aviation, Joby Completes Submission of Stage Three Certification Plans to the FAA. Santa Cruz, California, USA; 2023. <https://www.jobyaviation.com/news/joby-completes-submission-stage-three-certification-plans/>
- [6] Baker McKenye, Regulation and Certification of Electric Vertical Take-off and Landing (eVTOL) Aircraft Washington, DC, USA; 2022 <https://www.bakermckenzie.com/en>
- [7] Future Flight 2023 <https://www.futureflight.aero/>
- [8] Transport Up 2023 <https://transportup.com/>.
- [9] Dimitrijević B. *Višeatributivno Odlučivanje – primene u saobraćaju i transportu*, Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet, Beograd, 2023.
- [10] Shannon CE. A Mathematical Theory of Communication, *Bell System Technical Journal*, Vol. 27, pp. 379–423, 1948.

SUMMARY

APPLICATION OF THE TOPSIS METHOD FOR SELECTING AN EVTOL AIRCRAFT

In this research, we employed the multi-attribute method TOPSIS to evaluate and compare the parameters of 53 Vectored Thrust eVTOL aircraft. The analysis encompassed three separate TOPSIS computations, each of them utilizing distinct approach to evaluate the weight coefficients of the comparison criteria (criteria preference determined by one subjective and two objective methods). The three computations yield the results as a measure of the relative closeness to the positive ideal solutions for all alternatives, allowing for the ranking of the alternatives from the closest to the farthest. The final ranking was determined from the average values of the computation results. The analysis revealed that, across all computations, only five eVTOL aircraft achieved scores exceeding 0.5, while in the final ranking, seven eVTOLs had average scores greater than 0.5. Conversely, all remaining eVTOLs achieved scores closer to the negative ideal solution (lower than 0.5), with as many as 18 of them failing to attain an average result greater than 0.2. The results of the analysis offer a comprehensive overview of the observed eVTOL projects, indicating which ones stand out based on the specified criteria.

Key Words: Urban Air Mobility, eVTOL, Vectored Thrust, TOPSIS, Multi Attribute Decision Making, Aircraft