

EVALUACIJA EKOLOŠKE EFIKASNOSTI TRANSPORTA: PRIMENA EDAS METODE U IZBORU VIDOVA TRANSPORTA

EVALUATION OF TRANSPORT ENVIRONMENTAL EFFICIENCY: APPLICATION OF THE EDAS METHOD IN TRANSPORT MODE SELECTION

Natalija Kostić¹, Milorad Kilibarda², Vukašin Pajić³,

Milan Andrejić⁴

Originalni naučni rad

DOI: 10.5937/IASSEM25024K

Rezime: Efikasno planiranje i upravljanje transportom igra ključnu ulogu u smanjenju negativnog uticaja na životnu sredinu i unapređenju održivosti logističkih sistema. Transportni sektor značajno doprinosi emisijama gasova sa efektom staklene bašte, zagađenju bukom, vibracijama i generisanju otpada, zbog čega donošenje odluka o izboru vida transporta zahteva primenu višekriterijumske analize ekološke efikasnosti. U radu su alternative poređene primenom EDAS (eng. Evaluation Based on Distance from Average Solution) metode višekriterijumskog odlučivanja, prema ključnim kriterijumima kao što su emisije CO₂, ukupne emisije gasova sa efektom staklene bašte, potrošnja energije, nivo buke, vibracije i stepen dekarbonizacije transporta kroz prelazak na električna vozila i efikasnija goriva. Cilj rada je razvoj modela za podršku odlučivanju u evaluaciji ekološki održivih transportnih sistema, kroz sveobuhvatni okvir za ocenu različitih vidova transporta. Razvijeni model, pored unapređenja održivosti transporta, pruža i praktične alate za implementaciju politika i strategija koje smanjuju njegov negativan uticaj na životnu sredinu.

Ključne reči: Održivi transport, vidovi transporta, emisije CO₂, EDAS metoda

Abstract: Efficient planning and management of transport play a key role in reducing environmental impact and enhancing the sustainability of logistics systems. The transport sector significantly contributes to greenhouse gas emissions, noise pollution, vibrations, and waste generation. Therefore, decision-making regarding the choice of transport mode requires applying a multi-criteria analysis of environmental efficiency. In this paper, alternatives are compared using the EDAS (Evaluation Based on Distance from Average Solution) multi-criteria decision-making method, according to key criteria such as CO₂ emissions, total greenhouse gas emissions, energy consumption, noise level, vibrations, and the degree of transport decarbonization through the transition to electric vehicles and more efficient fuels. This research aims to develop a decision-support model for evaluating environmentally sustainable transport systems through a comprehensive framework for assessing different modes of transport. In addition to improving transport sustainability, the developed model also provides practical tools for implementing policies and strategies aimed at reducing its negative environmental impact.

Keywords: Sustainable transport, modes of transport, CO₂ emissions, EDAS method

¹MSc Natalija Kostić Saobraćajni fakultet Beograd <https://orcid.org/0009-0001-5386-9573> e-mail natalijakostic75@gmail.com

² Prof. dr Milorad Kilibarda, Saobraćajni fakultet, Beograd <https://orcid.org/0000-0003-3794-7380>

³ Docent dr Vukašin Pajić Saobraćajni fakultet Beograd <https://orcid.org/0000-0003-4918-4392>

⁴ Prof. dr Milan Andrejić, Saobraćajni fakultet Beograd <https://orcid.org/0000-0002-3711-2140>

1 UVOD

Ekološka održivost transportnih sistema predstavlja sve značajniji aspekt savremene logistike, naročito u svetlu globalnih inicijativa usmerenih ka smanjenju emisije gasova sa efektom staklene bašte. Sagorevanje fosilnih goriva u transportnim sredstvima ostaje dominantan izvor emisije ugljen-dioksida (CO₂), čime se transportni sektor pozicionira kao jedan od ključnih uzročnika zagađenja u logističkom lancu [1]. Prema podacima za 2022. godinu, transport je bio odgovoran za više od 20% ukupnih globalnih emisija CO₂, čime se rangira kao drugi najveći zagađivač među svim granama industrije [20].

Usmeravanje logističkih aktivnosti prema zelenim inicijativama predstavlja ključni korak u borbi protiv globalnog zagrevanja, koje je prvenstveno uzrokovano povećanom emisijom CO₂. Teretni transport, kao najintenzivniji segment logistike po pitanju emisija, stavlja u prvi plan potrebu za optimizacijom transportnih mreža, primenom ekološki prihvatljivih vidova transporta [1]. Pored ugljen-dioksida, transport značajno doprinosi i emisijama drugih gasova sa efektom staklene bašte, kao i dodatnom zagađenju kroz buku, vibracije i generisanje otpada. Ovi negativni uticaji zahtevaju donošenje odluka zasnovanih na višekriterijumskoj analizi ekološke efikasnosti različitih vidova transporta.

Ekološki uticaj logistike zavisi od nekoliko ključnih faktora, uključujući udaljenost na kojoj se teret prevozi, količinu i vrstu tereta, kao i izbor vida transporta. Tip prevoznog sredstva, vrsta korišćenog goriva, kao i stepen popunjenosti kapaciteta, direktno utiču na ukupne emisije i održivost procesa. Efikasno upravljanje tim parametrima predstavlja osnov za dizajniranje ekološki održivih logističkih sistema [1].

Svaki vid transporta poseduje specifične operativne i ekološke karakteristike, što za posledicu ima znatne razlike u njihovom ukupnom uticaju na životnu sredinu [12]. U zavisnosti od tipa i cilja transporta, drumski prevoz može biti najefikasniji, dok su u drugim slučajevima održivije alternative železnički, vodni ili intermodalni vidovi transporta.

Cilj ovog rada je razvoj modela za donošenje odluka koji omogućava procenu ekološke efikasnosti različitih vidova transporta. U tu svrhu primenjena je višekriterijumska metoda odlučivanja EDAS (eng. Evaluation Based on Distance from Average Solution), kojom se analiziraju četiri alternativna vida transporta tereta na relaciji Beč – Beograd: drumski, železnički, vazdušni i rečni. Svaka alternativa ocenjuje se prema unapred definisanim kriterijumima kako bi se identifikovalo najodrživije rešenje.

Kriterijumi obuhvataju direktne i indirektno emisije gasova sa efektom staklene bašte, potrošnju energije, nivo buke, vibracije i stepen dekarbonizacije. Za određivanje težina kriterijuma primenjena je metoda Fuzzy AHP (eng. Fuzzy Analytic Hierarchy Process). Ovaj pristup omogućava oblikovanje sveobuhvatnog okvira za procenu ekološke održivosti transportnih sistema, koji služi kao osnova za izbor rešenja sa manjim negativnim uticajem na životnu sredinu.

Rad je organizovan u šest poglavlja. Uvodno poglavlje definiše cilj istraživanja i ističe značaj ekološke efikasnosti u sektoru transporta. Drugo poglavlje daje pregled relevantne literature i dosadašnjih istraživanja u oblasti održive logistike. U trećem poglavlju predstavljena je metodologija, uključujući način definisanja vrednosti kriterijuma po alternativama, kao i opis FAZI AHP i EDAS metoda. Četvrto poglavlje prikazuje rezultate analize, dok peto donosi analizu osetljivosti na promene težinskih koeficijenata korišćenjem CRITIC i etiopijske metode. U poslednjem poglavlju predstavljeni su zaključci i pravci za budućih istraživanja.

2 PREGLED LITERATURE

Literatura koja se bavi izborom održivih vidova transporta obuhvata različite metodologije i pristupe, sa naglaskom na višekriterijumsko odlučivanje i analize koje integrišu ekološke, ekonomske i operativne aspekte. RAWEC metoda je primenjena u istraživanju koje analizira održivost različitih vidova transporta u Evropskoj uniji, obuhvatajući kriterijume kao što su potrošnja energije, emisija gasova sa efektom staklene bašte, broj saobraćajnih nesreća, kao i ekonomske i socijalne faktore poput zaposlenosti i prometa u sektoru transporta [16]. Prema dobijenim rezultatima železnički transport ostvaruje najbolje rezultate u pogledu održivosti, dok drumski transport beleži najnepovoljnije ocene u analiziranom skupu kriterijuma.

Sličan pristup primenjuje se u istraživanju koje koristi metode SWARA i MARCOS za rangiranje transportnih alternativa u trgovini sa zapadnom Evropom, upoređujući vazdušni, drumski, rečni i železnički transport prema devet kriterijuma, uključujući troškove, vreme transporta, trajanje carinske obrade, ukupno vreme isporuke, potrošnju energije, emisiju CO₂, fleksibilnost, kapacitet i izloženost saobraćajnim gužvama [15]. Rezultati potvrđuju da su cena i vreme dominantni faktori, dok je železnički transport na prvom mestu kada se prioritet dodeli ekološkim faktorima, što naglašava važnost pravilnog ponderisanja kriterijuma u odlučivanju.

Pored višekriterijumskih analiza, mnogi radovi bave se analizom uticaja transporta na životnu sredinu. Istraživanje koje analizira transportne tokove u e-trgovini između Kine i Singapura razmatra emisije CO₂ i logistiku poslednje milje, uz ekonomske i operativne aspekte [3]. Istraživanje koje se fokusira na optimizaciju emisija CO₂ u pomorskim lancima snabdevanja kroz dva studijska slučaja u Velikoj Britaniji koristi metodologiju VSM (eng. Value Stream Mapping) i ukazuje da direktna pomorska isporuka može smanjiti emisije za 16–21% [18].

Istraživanje koje analizira emisije CO₂, NO_x, SO₂ i PM u intermodalnim transportnim lancima razmatra mogućnosti smanjenja emisija upotrebom ekološki prihvatljivijih goriva, tehnologija smanjenja emisija i regulatornih promena [17]. Izveštaj OECD/ITF kombinuje makro i mikro pristupe kroz četvorostepeni analitički model za procenu mogućnosti optimizacije izbora vida transporta [4]. Istraživanje koje analizira primenu najčešće korišćenih alata za izračunavanje emisija gasova sa efektom staklene bašte u teretnom transportu ukazuje na razlike među alatima u pogledu preciznosti i usklađenosti sa međunarodnim standardima [14].

Za razliku od prethodnih radova koji su se uglavnom fokusirali na ekološku održivost iz perspektive pružalaca logističkih usluga ili njihovih korisnika, kao i na analizu različitih vidova transporta kroz ekonomske i operativne faktore, ovo istraživanje se bavi direktnim poređenjem ekološke efikasnosti različitih vidova transporta primenom višekriterijumskih metoda odlučivanja.

3 METODOLOGIJA

Odabir kriterijuma za analizu održivosti transportnih sistema zasnovan je na savremenim zahtevima ESG izveštavanja, sa posebnim akcentom na "E" komponentu koja se odnosi na ekološke aspekte poslovanja [23]. Kriterijumi koji su korišćeni u ovoj analizi uključuju direktne i indirektno emisije gasova sa efektom staklene bašte, potrošnju energije, buku, vibracije i stepen dekarbonizacije. Ovi pokazatelji se sve češće koriste u procenama održive mobilnosti i zelenih logističkih strategija, koje postaju standard u okviru evropskih i globalnih politika dekarbonizacije.

Emisije gasova sa efektom staklene bašte (GHG) obuhvataju gasove koji doprinose globalnom zagrevanju, među kojima je ugljen-dioksid (CO₂) najzastupljeniji, ali važnu ulogu imaju i metan (CH₄), azotni oksidi (N₂O), fluorovani gasovi i dr. Zbog njihovog uticaja na životnu sredinu, važno je uzeti u obzir sve ove emisije prilikom izračunavanja ukupnog uticaja

saobraćaja. Za analizu emisija korišćeni su TTW (eng. Tank-to-Wheel) i WTW (eng. Well-to-Wheel) pokazatelji, pri čemu TTW obuhvata direktne emisije iz sagorevanja goriva u vozilu, dok WTW uključuje i indirektne emisije nastale u procesu proizvodnje i distribucije goriva, čime se dobija celokupna slika ekološkog uticaja. Potrošnja energije direktno je povezana sa emisijama štetnih gasova, jer većina transportnih sistema zavisi od fosilnih goriva. Energetski efikasniji sistemi, poput železničkog i vodnog saobraćaja, troše manje energije po toni pređenog kilometra i imaju manji ekološki otisak u poređenju sa drumskim i vazdušnim transportom. Postoje različiti načini i metode za izračunavanje količine emisije štetnih materija ugljen-dioksida koje se emituju pri transportu, u cilju merenja i praćenja nivoa štetnih materija od strane davaoca logističkih usluga. Za potrebe ove analize korišćeni su različiti relevantni evropski i međunarodni standardi kako bi se obezbedila metodološka doslednost i uporedivost podataka između različitih vidova transporta. Emisije gasova sa efektom staklene bašte i potrošnja energije izračunati su u skladu sa standardom EN 16258:2012, koristeći odgovarajuće faktore konverzije vrste goriva i energenta [9, 19]. Podaci o udaljenosti i potrošnji goriva prikupljeni su uz pomoć softverskog alata EcoTransIT [6].

Buka, koja nastaje tokom transporta, predstavlja značajan ekološki problem, koji ima negativan uticaj na okolinu i zdravlje ljudi naročito u urbanim sredinama. Drumski i vazdušni transport stvaraju više buke, dok su železnički i vodni sistemi tiši. Procena buke izvršena je u skladu sa važećim regulativima za svaki vid transporta: EU Uredba 540/2014 za drumski, EU 1304/2014 za železnički, ICAO Annex 16 za avio saobraćaj i ES-TRIN za rečni [7, 8, 21, 22].

Vibracije koje nastaju tokom transporta mogu dovesti do erozije tla, oštećenja infrastrukture i narušavanja ekosistema, posebno kod drumskog i železničkog saobraćaja. Sistemi sa nižim nivoima vibracija povoljniji su sa aspekta ekološke održivosti. Procenjene su na osnovu međunarodnih standarda, uključujući ISO 2631 za uticaj na ljude, ISO 14837-1:2005 za prenos vibracija železničkog saobraćaja na okolne objekte, ISO 6954:2000 za vibracije na plovilima, kao i relevantne smernice iz ICAO Annex 16 koje se odnose na vazduhoplovstvo [8, 11].

Stepen dekarbonizacije transporta ogleda se u elektrifikaciji i prelasku na efikasnija goriva. Viši stepen dekarbonizacije znači manji uticaj na klimatske promene i veći doprinos zaštiti životne sredine. Predstavljen je kao procenat smanjenja emisija, izračunat upoređivanjem emisija ekvivalenta između tradicionalnih i ekološki prihvatljivijih varijanti transporta. Za vazdušni transport, primenjena je IATA metodologija za održivo avio-gorivo (SAF), usklađena sa ICAO CORSIA sistemom, koja omogućava izbegavanje dvostrukog računanja emisija [10].

Metodologija rada grafički je predstavljena na slici 1.



Slika 1 Metodologija rada

4 FAZI AHP METODA

Fuzzy AHP je metoda višekriterijumskog odlučivanja koja omogućava donošenje odluka u uslovima neizvesnosti i subjektivnosti. Nastala je kao proširenje klasične AHP metode kroz primenu fazi logike, pri čemu se precizne numeričke vrednosti zamenjuju fazi brojevima. Koriste se intervali, najčešće u obliku trougaonih fazi brojeva, koji mogu poboljšati tačnost procene rizika od strane stručnjaka i kvalitet izlaznih rezultata. U literaturi se mogu naći različiti modaliteti ove metode, a u ovom radu korišćena je Changova formulacija koja sadrži sledeće korake:

Korak 1: Kreiranje matrice uporednog poređenja kriterijuma $m \times m$, gde je m broj razmatranih kriterijuma. Svaki unos ajk matrice predstavlja „važnost“ j -og kriterijuma u odnosu na k -ti kriterijum i naziva se intezitet važnosti (značajnosti) kriterijuma. Relativna važnost između dva kriterijuma meri se prema numeričkoj skali, gde se pretpostavlja da je j -ti kriterijum jednak ili važniji od k -tog kriterijuma.

Donosilac odluke koristi trougaonu AHP skalu poređenja $bij = (ajj, bij, cij$ za ocenu relativne važnosti kriterijuma, prikazanu u Tabeli 1, koja uzima u obzir subjektivnost i neizvesnost u procesu donošenja odluka.

Lingvistička skala (relativni značaj atributa)	Trougaona fazi skala	Trougaona recipročna skala
Jednako	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
Podjednako važno	(1/2, 1, 3/2)	(2/3, 1, 2)
Slabo važnije	(1, 3/2, 2)	(1/2, 2/3, 1)
Znatno važnije	(3/2, 2, 5/2)	(2/5, 1/2, 2/3)
Vrlo znatno važnije	(2, 5/2, 3)	(1/3, 2/5, 1/2)
Apsolutno važnije	(5/2, 3, 7/2)	(2/7, 1/3, 2/5)

Tabela 14 Fazi skala poređenja značaja elemenata [2]

Korak 2: Sumiranje redova matrice trougaonih brojeva nakon čega se dobija vrednost RS_i i normalizacija te vrednosti. Vrednost fazi opsega u odnosu na svaki kriterijum izračunava se korišćenjem formula (2) i (3).

$$RS_i = \sum_{j=1}^n M_{ij} = (\sum_{j=1}^n a_{ij}, \sum_{j=1}^n b_{ij}, \sum_{j=1}^n c_{ij},) \quad (2)$$

Za svaku komponentu trougaonog broja normalizujemo vrednosti prema formuli:

$$S_i = \frac{RS_i}{\sum_{j=1}^n S_j} = \left[\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n c_{kj}}, \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n b_{kj}}, \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}}{\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n a_{kj}} \right], i = 1, \dots, n \quad (3)$$

Korak 3: Određivanje verovatnoće da je fazi broj $S_i \geq S_j$.

$$V(S_i \geq S_j) = \begin{cases} 1, & \text{ako je } b_i \geq b_j \\ \frac{a_j - c_i}{(b_i - c_i) - (b_j - a_j)}, & \text{ostalo} \end{cases}$$

Korak 4: Određivanje vektora prioriteta $W = (w_1, \dots, w_n)^T$ matrice poređenja fazi vrednosti.

Izlazni rezultat ovog modela je vrednost prioriteta – značaja S_i svakog elementa, odnosno kriterijuma ($i = 1 - C1, i = 2 - C2, i = 3 - C3, i = 4 - C4, i = 5 - C5, i = 6 - C6$) [2].

5 EDAS METODA

U ovom poglavlju predstavljena je EDAS metoda višekriterijumskog odlučivanja, koja se koristi za rangiranje m alternativa na osnovu n definisanih kriterijuma. Zasniva se na proceni pozitivnog i negativnog odstupanja svake alternative u odnosu na prosečno rešenje. Najbolja alternativa ima najveće pozitivno i najmanje negativno odstupanje [5]. Primena metode prikazana je kroz sledećih sedam koraka:

Korak 1: Formiranje matrice odlučivanja X na sledeći način:

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

gde x_{ij} predstavlja rejting performance i -te alternative prema j -tom kriterijumu.

Korak 2: Određivanje prosečnog rešenja u odnosu na sve kriterijume primenom sledeće formule:

$$x_j^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*) \quad (5)$$

Gde je

$$x_j^* = \frac{\sum_{i=1}^m x_{ij}}{m} = \left(\frac{\sum_{i=1}^m x_{i1}}{m}, \frac{\sum_{i=1}^m x_{i2}}{m}, \dots, \frac{\sum_{i=1}^m x_{im}}{m} \right), j = 1, \dots, n \quad (6)$$

Korak 3: Izračunavanje pozitivnih rastojanja (PD) i negativnih rastojanja (ND) od prosečnog rešenja

$$PD = [pd_{ij}]_{m \times n} \quad (7)$$

$$ND = [nd_{ij}]_{m \times n} \quad (8)$$

Ove vrednosti se izračunavaju u zavisnosti da li je u pitanju kriterijum maksimizacionog (max) ili minimizacionog (min) tipa.

Ako je j -ti kriterijum maksimizacionog tipa, onda se pozitivno rastojanje pd_{ij}^+ izračunava na sledeći način:

$$pd_{ij}^+ = \frac{\max(0, (x_{ij} - x_j^*))}{x_j^*}, j \in \Omega_{max} \quad (9)$$

gde Ω_{max} predstavlja set kriterijuma maksimizacionog tipa.

Ako je j -ti kriterijum maksimizacionog tipa, negativno rastojanje nd_{ij}^+ se izračunava po formuli:

$$nd_{ij}^+ = \frac{\max(0, (x_j^* - x_{ij}))}{x_j^*}, j \in \Omega_{max} \quad (10)$$

gde Ω_{max} predstavlja set kriterijuma maksimizacionog tipa.

Pozitivno rastojanje pd_{ij}^- , ako je j -ti kriterijum minimizacionog tipa, računa se na sledeći način:

$$pd_{ij}^- = \frac{\max(0, (x_j^* - x_{ij}))}{x_j^*}, j \in \Omega_{min} \quad (11)$$

gde Ω_{min} predstavlja set kriterijuma minimizacionog tipa.

Negativno rastojanje nd_{ij}^- j -tog kriterijuma minimizacionog tipa, izračunava se po formuli:

$$nd_{ij}^- = \frac{\max(0, (x_{ij} - x_j^*))}{x_j^*}, j \in \Omega_{min} \quad (12)$$

gde Ω_{min} predstavlja set kriterijuma minimizacionog tipa.

Korak 4: Težinske sume pozitivnih rastojanja pd_{ij} i negativnih rastojanja nd_{ij} alternativa, formiraju se primenom sledećih formula:

$$SP_i = \sum_{j=1}^n W_j pd_{ij}, i=1, \dots, m; \quad (13)$$

$$SN_i = \sum_{j=1}^n W_j nd_{ij}, i=1, \dots, m; \quad (14)$$

gde je w_j težina kriterijuma j .

Korak 5: Normalizacija pozitivnih SP_i i negativnih SN_i suma se računa na sledeći način:

$$NSP_i = \frac{SP_i}{\max_i(SP_i)}, i=1, \dots, m; \quad (15)$$

$$NSN_i = 1 - \frac{SN_i}{\max_i(SN_i)}, i=1, \dots, m; \quad (16)$$

Korak 6: Izračunavanje srednje vrednosti (AS_i) za sve alternative po formuli:

$$AS_i = \frac{1}{2} (NSP_i + NSN_i), i=1, \dots, m; \quad (17)$$

gde je $0 \leq AS_i \leq 1$.

Korak 7: Rangiranje alternativa prema opadajućoj srednjoj vrednosti AS. Alternativa sa najvećom vrednošću AS_i je najbolja.

6 REZULTATI

U cilju određivanja relativne važnosti kriterijuma, formirana je matrica parnog poređenja korišćenjem Fuzzy AHP metode. Kriterijumi su definisani na osnovu relevantnih studija i savremenih zahteva ESG izveštavanja, pri čemu je poseban akcenat stavljen na ekološke aspekte transporta. Matrica je formirana na osnovu stručne procene značaja svakog kriterijuma, koristeći lingvističku skalu koja je transformisana u trouglaste fuzzy brojeve, prikazane u Tabeli 2.

Kriterijum	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	(1,1,1)	(1, 3/2, 2)	(2,5/2,3)	(2,5/2,3)	(1/2, 1, 3/2)	(1/2, 1, 3/2)
C2	(1/2, 2/3, 1)	(1,1,1)	(1, 3/2, 2)	(1, 3/2, 2)	(2/5,1/2,2/3)	(1/2, 2/3, 1)
C3	(1/3,2/5,1/2)	(1/2, 2/3, 1)	(1,1,1)	(1/2,1,3/2)	(1/3,2/5,1/2)	(1/3,2/5,1/2)
C4	(1/3,2/5,1/2)	(1/2, 2/3, 1)	(2/3,1,2)	(1,1,1)	(1/3,2/5,1/2)	(1/3,2/5,1/2)
C5	(2/3, 1, 2)	(3/2,2,5/2)	(2,5/2,3)	(2,5/2,3)	(1,1,1)	(2/3, 1, 2)
C6	(2/3, 1, 2)	(1, 3/2, 2)	(2,5/2,3)	(2,5/2,3)	(1/2, 1, 3/2)	(1,1,1)

Tabela 2 Matrica poređenja kriterijuma

Rezultati primene Fuzzy AHP metode daju težinske kriterijuma C1 - 0.261, C2 - 0.135, C3 - 0.023, C4 - 0.046, C5 - 0.274, C6 - 0.261. Vrednosti kriterijuma po alternativama, koje služe kao ulazni podaci za EDAS metodu, prikazane su u Tabeli 3

	CO ₂ eTTW (kg CO ₂ e)	Potrošnja energije (kWh)	Nivo buke (dB)	Vibracije (m/s ²)	Dekarbonizacija (%)	CO ₂ eWTW (kg CO ₂ e)
A1	512.64	8198.4	81	0.8	40.74	622.08
A2	210.18	3361.34	83	0.9	37.99	255.05
A3	6767.04	89376	90	0.3	19.6	8256.64
A4	486.26	7776.52	75	0.5	80.52	590.07

Tabela 3 Matrica poređenja kriterijuma

U Tabeli 4 prikazane su vrednosti pozitivnih (PD) i negativnih rastojanja (ND) od prosečnog rešenja za svaki kriterijum.

	pd1	pd2	pd3	pd4	pd5	pd6	nd1	nd2	nd3	nd4	nd5	nd6
A1	0.743	0.698	0.015	0.000	0.000	0.744	0.000	0.000	0.000	0.280	0.089	0.744
A2	0.895	0.876	0.000	0.000	0.000	0.895	0.000	0.000	0.009	0.440	0.150	0.895
A3	0.000	0.000	0.000	0.520	0.000	0.000	2.394	2.289	0.094	0.000	0.562	0.000
A4	0.756	0.714	0.088	0.200	0.801	0.757	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.757

Tabela 4 Vrednosti pozitivnih (PD) i negativnih rastojanja (ND) od prosečnog rešenja

Vrednosti izračunate primenom formula od koraka 4 do 7 EDAS metode, prikazane su u tabeli 5.

	S _{Pi}	NS _{Pi}	S _{Ni}	NS _{Ni}	A _{Si}
A1	0.483	0.001	0.232	0.787	0.394
A2	569.068	1.000	0.295	0.729	0.864
A3	0.015	0.000	1.089	0.000	0.000
A4	491.430	0.864	0.198	0.818	0.841

Tabela 5 Rangiranje alternativa primenom EDAS metode

Na osnovu rezultata rangiranja koji su prikazani u tabeli 5 najbolja opcija je železnički transport, na drugom mestu je rečni, zatim drumski dok je vazdušni najlošije ocenjen.

7 ANALIZA OSETLJIVOSTI

U ovom poglavlju ispituje se analiza osetljivosti rezultata na promenu težina kriterijuma, koje su definisane objektivnim metodama entropije i CRITIC (eng. CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation). Ove metode zanemaruju mišljenje donosilaca odluka, a težinski koeficijenti se određuju putem matematičkih jednačina.

7.1 CRITIC metoda

CRITIC metoda određuje objektivne težinske faktore kriterijuma analizom matrice odlučivanja, uzimajući u obzir kontrast i konflikt između kriterijuma. Kontrast se izračunava pomoću standardnih odstupanja normalizovanih vrednosti i koeficijenta korelacije između kriterijuma [13]. Proces određivanja težina kriterijuma metodom CRITIC obuhvata šest koraka:

Korak 1: Normalizacija matrice odlučivanja, pri čemu se za svaki kriterijum x_j definiše funkcija pripadnosti r_{ij} , koja vrednosti kriterijuma prevodi na interval $[0, 1]$. Elementi normalizovane matrice računaju se sledećom formulom:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (18)$$

gde su: $x_j^{\max} = \max(x_{ij}, i = 1, \dots, m)$ i $x_j^{\min} = \min(x_{ij}, i = 1, \dots, m)$

Vrednost r_{ij} pokazuje koliko je neka alternativa blizu idealne vrednosti x_j^{\max} i koliko udaljena od anti-idealne vrednosti x_j^{\min} .

Korak 2: Na osnovu vrednosti r_{ij} formira se vektor kriterijuma, gde svaki vektor ima standardno odstupanje σ_j , koje predstavlja meru odstupanja vrednosti alternativa za dati kriterijum od neke srednje vrednosti, a računa se prema sledećoj jednačini:

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (r_{ij} - r_{ij}^-)^2} \quad (19)$$

Gde je n broj kriterijuma, a r_{ij}^- aritmetička sredina elementa normalizovane matrice.

Korak 3: Definisane matrice $n \times n$ sa elementima R_{jk} koji predstavljaju koeficijente linearne korelacije r_j i r_k , a n predstavlja broj alternative. Elementi matrice R_{jk} primenom jednačine:

$$R_{jk} = \frac{n \sum r_j r_k - \sum r_j \sum r_k}{\sqrt{n \sum r_j^2 - (\sum r_j)^2} \sqrt{n \sum r_k^2 - (\sum r_k)^2}} \quad (20)$$

Korak 4: Mera konflikta kriterijuma j u odnosu na ostale kriterijume u datoj situaciji odlučivanja određuje se primenom sledeće formule:

$$\sum_{k=1}^n (1 - R_{jk}) \quad (21)$$

Korak 5: Određivanje količine informacija C_j u odnosu na svaki kriterijum, kombinacijom prethodno navedenih veličina σ_j i r_{ij} , na sledeći način:

$$C_j = \sigma_j \sum_{i=1}^m (1 - r_{ij}) \quad (22)$$

Korak 6: Težinski koeficijenti kriterijuma računaju se normalizacijom vrednosti C_j po formuli:

$$w_j = \frac{c_j}{\sum_{i=1}^n c_j} \quad (23)$$

7.2 Metoda entropije

Prema Šenonu entropija je mera neodređenosti informacije, predstavljena funkcijom verovatnoće. Zasniva na variranju Šenonovog merenja količine informacije unutar matrice odlučivanja, gde se entropija definiše kao očekivani informacioni sadržaj događaja [13]. Određivanje vrednosti težina kriterijuma primenom metode entropije realizuje se putem sledećih šest koraka:

Korak 1: Linearna normalizacija matrice odlučivanja izračunavanjem norme r_{ij} na sledeći način:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (24)$$

za svako i i j .

Korak 2: Određivanje entropije za svaki kriterijum. Primenom Šenonove relacije entropijska vrednost e_j za svaki kriterijum može se definisati na sledeći način:

$$e_j = -k \sum_{j=1}^n [r_{ij} \ln(r_{ij})] \quad (25)$$

Gde je $k = \frac{1}{\ln(n)}$, konstanta koja se uvodi kako bi se obezbedilo da se sve vrednosti e_j nalaze u intervalu $[0,1]$.

Korak 3: Određivanje stepena divergencije d_j u odnosu na prosečnu količinu informacije sadržanu u svakom kriterijumu primenom sledeće formule:

$$d_j = 1 - e_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (26)$$

Korak 4: Izračunavanje vrednosti težina kriterijuma aditivnom normalizacijom stepena divergencije d_j , koji predstavlja predstavljaju istovremeno i intenzitet kontrasta kriterijuma C_j prema ostalim kriterijumima. Zatim se vrši objedinjavanje pomoću sledeće formule:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^n d_j} \quad (27)$$

Vrednosti težinskih koeficijenata za kriterijume C1 do C6, određene primenom CRITIC i metode entropije, su sledeće: za CRITIC, težine su 0.135, 0.134, 0.118, 0.251, 0.227 i 0.135, dok su za ENTROPIJU vrednosti 0.243, 0.229, 0.082, 0.097, 0.105 i 0.243. Na osnovu ovih vrednosti, alternative su rangirane primenom EDAS metode, na isti način kao u poglavlju 3.3. Rezultati vrednosti ASi alternative i njihov rang za sve tri metode određivanja težinskih koeficijenata (FUZZY AHP, CRITIC i metoda entropije) prikazani su u tabeli 6.

Alternativa	FUZZY AHP		CRITIC		ENTROPHY	
	ASi	Rang	ASi	Rang	ASi	Rang
A1	0.394	3	0.376	3	0.408	3
A2	0.864	1	0.826	2	0.882	1
A3	0.000	4	0.000	4	0.000	4
A4	0.841	2	0.872	1	0.849	2

Tabela 6 Rangiranje alternativa za različite vrednosti težinskih koeficijenata

Na osnovu vrednosti ASi alternativa za svaku primenjenu metodu određivanja težina kriterijuma prikazane u tabeli 16, zaključuje se da se rang alternativa ne menja značajno. Železnički transport je prema metodama FUZZY AHP i CRITIC rangiran na prvom mestu, dok je rečni transport na drugom. Kod primene Entropy metode došlo je do zamene mesta između železničkog i rečnog transporta, pri čemu je rečni transport zauzeo prvo, a železnički drugo mesto. Drumski i vazdušni transport ostali su na poslednja dva mesta u svim metodama.

8 ZAKLJUČAK

Razvijeni model za procenu ekološke efikasnosti različitih vidova transporta, zasnovan na višekriterijumskoj EDAS metodi, omogućava sveobuhvatnu analizu uticaja transportnih sistema na životnu sredinu. Kombinovanjem sa metodom Fuzzy AHP, precizno su određeni

težinski koeficijenti kriterijuma, čime je dodatno unapređena objektivnost i pouzdanost evaluacije. Metodološki okvir ovakvog pristupa omogućava donošenje odluka u pogledu održivosti i ekološke efikasnosti pojedinih transportnih rešenja.

Rezultati analize pokazuju da železnički i rečni transport ostvaruju najpovoljnije performanse u domenu ekološke održivosti, zahvaljujući nižim emisijama gasova sa efektom staklene bašte, manjoj potrošnji energije, kao i smanjenom nivou buke i vibracija. Nasuprot tome, drumski i vazdušni transport identifikovani su kao vidovi sa izraženijim negativnim uticajem na životnu sredinu, posebno kada je reč o emisijama CO₂ i potrošnji fosilnih goriva.

Jedno od ograničenja istraživanja odnosi se na vrednosti kriterijuma buke i vibracija, gde su korišćene maksimalne vrednosti definisane važećim standardima, umesto podataka dobijenih direktnim merenjem ili simulacijama za specifične transportne scenarije. Iako se oslanjanje na preporučene vrednosti iz relevantne literature može smatrati opravdanim u ovoj fazi, ono ipak može dovesti do određenih odstupanja u tačnosti konačnih rezultata, s obzirom na to da ne odražava u potpunosti specifične uslove i tehničke karakteristike transportnih sistema.

U cilju daljeg unapređenja preciznosti i promenljivosti modela, u narednim fazama istraživanja planira se razvoj i implementacija simulacija koje će omogućiti procenu nivoa buke i vibracija u konkretno definisanim operativnim uslovima. Pored toga, predviđeno je i proširenje modela na analizu intermodalnih transportnih lanaca, koji kombinuju više vidova transporta, čime bi se dodatno proširio domet i korisnost razvijenog metodološkog okvira. Takođe, planira se testiranje modela na realnim studijama slučaja, kako bi se potvrdila njegova validnost i praktična primena u donošenju strategija održive logistike i transporta.

9 LITERATURA

- [1] Bouchery, Y., Corbett, C. J., Fransoo, J. C., & Tan, T. (2017). *Sustainable Supply Chains*. Springer series in supply chain management.
- [2] Chang, D.-Y. & Beijing Materials College. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. In *European Journal of Operational Research* (Vol. 95, pp. 649–655).
- [3] Cheah, L., & Huang, Q. (2021). Comparative Carbon Footprint Assessment of Cross-Border E-Commerce Shipping Options. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2676(1), 584–595.
- [4] Corporate Partnership Board, The International Transport Forum, Halbesma, S., Merk, O., Grenier, M., Hoff, C., Hristeva, P., Liang, E., Riel, M.-L., Li, Y., Visser, J., Xue, A., Perkins, S., & Collins, E. (2022). *Mode choice in freight transport*. OECD Publishing. Dostupno na: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/mode-choice-freight-transport.pdf>
- [5] Ecer, F. (2017). THIRD-PARTY LOGISTICS (3PLS) PROVIDER SELECTION VIA FUZZY AHP AND EDAS INTEGRATED MODEL. *Technological and Economic Development of Economy*, 24(2), 615–634. <https://doi.org/10.3846/20294913.2016.1213207>
- [6] EcoTransIT World - Emission Calculator, 2020. Dostupno na: <https://www.ecotransit.org/en/emissioncalculator/> (Pristupano: 29.03.2025)
- [7] European Committee for Drawing up Standards in the Field of Inland Navigation (CESNI). (n.d.). *European Standard laying down technical requirements for Inland Navigation vessels (ES-TRIN)*, 2025/1 ed.
- [8] International Civil Aviation Organization. (2017). *Annex 16 — Environmental Protection Volume I: Aircraft Noise*, Vol. 8, July 2017. International Civil Aviation Organization. Dostupno na:

https://www.iacm.gov.mz/app/uploads/2018/12/an_16_V1_Environmental-Protection_8ed_2017_rev.-12_01.07.17.pdf

- [9] Guidelines for Measuring and Managing CO₂ Emission from Freight Transport Operations, Cefic and ECTA, issue 1, march 2011, Dostupno na: <https://www.ecta.com/wp-content/uploads/2021/03/ECTA-CEFIC-GUIDELINE-FOR-MEASURING-AND-MANAGING-CO2-ISSUE-1.pdf>
- [10] IATA Sustainable Aviation Fuel (SAF). (n.d.). IATA Sustainable Aviation Fuel (SAF) Accounting and Reporting Methodology.
- [11] Khan, D., & Burdzik, R. (2023). Measurement and analysis of transport noise and vibration: A review of techniques, case studies, and future directions. In *Measurement* (Vol. 220, p. 113354). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113354>
- [12] McKinnon, A., Browne, M., Piecyk, M., & Whiteing, A. (2015). *Green Logistics: Improving the Environmental Sustainability of Logistics*. 3rd edition. Kogan Page eBooks. Dostupno na: <https://westminsterresearch.westminster.ac.uk/item/q2x4q/green-logistics-improving-the-environmental-sustainability-of-logistics-3rd-edition>
- [13] Milićević, M., Župac G., „Objektivni pristup određivanju težina kriterijuma”, (2012), VOJNOTEHNIČKI GLASNIK/MILITARY TECHNICAL COURIER., Vol. LX, No. 1, 39–56
- [14] Olivari, E., Caballini, C., & Lluch, X. (2024). How to calculate GHG emissions in freight transport? A review of the main existing online tools. *Case Studies on Transport Policy*, 19, 101343. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2024.101343>
- [15] Pajić, V., Andrejić, M., & Kilibarda, M. (2022). Sustainable transportation mode selection from the freight forwarder's perspective in trading with western EU countries. *Sustainable Futures*, 4, 100090. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2022.100090>
- [16] Petrović, N., Jovanović, V., Marković, S., Marinković, D., & Petrović, M. (2024). Multicriteria Sustainability Assessment of Transport Modes: A European Union case study for 2020. *Journal of Green Economy and Low-Carbon Development*, 3(1), 36–44. <https://doi.org/10.56578/jgelcd030104>
- [17] Ramalho, M. M., & Santos, T. A. (2021). Numerical modeling of air pollutants and greenhouse gases emissions in intermodal transport chains. *Journal of Marine Science and Engineering*, 679. <https://doi.org/10.3390/jmse9060679>
- [18] Rigot-Muller, P., Lalwani, C., Mangan, J., Gregory, O., & Gibbs, D. (2013). Optimising end-to-end maritime supply chains: a carbon footprint perspective. *The International Journal of Logistics Management*, 24(3), 407–425. <https://doi.org/10.1108/ijlm-01-2013-0002>
- [19] Schmied, M., INFRAS – Forschung und Beratung, Knörr, W., & ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. (2012). Calculating GHG emissions for freight forwarding and logistics services in accordance with EN 16258 – Terms, Methods, Examples. In C. Friedl (Ed.), & L. Hepburn (Trans.), *European Association for Forwarding, Transport, Logistics and Customs Services (CLECAT)*. https://www.clecat.org/media/CLECAT_Guide_on_Calculating_GHG_emissions_for_freight_forwarding_and_logistics_services.pdf
- [20] Statista. (2022). Global distribution of CO₂ emissions 2022, by sector. Dostupno na <https://www.statista.com/statistics/1129656/global-share-of-co2-emissions-from-fossil-fuel-and-cement/>
- [21] The European Commission. (2014). *Commission Regulation (EU) No 1304/2014 on the technical specification for interoperability relating to the subsystem 'rolling stock — noise.'* In *Official Journal of the European Union*, Vol. L 356–L 422.

- [22] The European Parliament and the Council of the European Union. (2014). Regulation (EU) No 540/2014 of the European Parliament and of the Council. In *Official Journal of the European Union*, 158, 131–195.
- [23] Zeng, H., Li, R. Y. M., & Zeng, L. (2022). Evaluating green supply chain performance based on ESG and financial indicators. *Frontiers in Environmental Science*, 10.