

EVALUACIJA EFIKASNOSTI CIRKULARNE EKONOMIJE U EU I SRBIJI PRIMENOM WINDOW DEA ANALIZE

EVALUATION OF CIRCULAR ECONOMY EFFICIENCY IN THE EU AND SERBIA USING WINDOW DEA ANALYSIS

ISIDORA GAČEŠA¹, GORDANA SAVIĆ², MILENA POPOVIĆ³

¹ Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, isidora.gacesa@fon.bg.ac.rs,  0009-0002-0907-7170

² Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, gordana.savic@fon.bg.ac.rs,  0000-0001-6233-1815

³ Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, milena.popovic@fon.bg.ac.rs,  0000-0002-2947-8054

Rezime: Ovaj rad analizira efikasnost zemalja Evropske unije i Srbije u primeni principa cirkularne ekonomije u periodu od 2010. do 2023. godine, korišćenjem dinamičkog DEA modela sa pokretnim vremenskim prozorima (Window DEA BCC). Evaluacija je izvršena na osnovu tri ulazna indikatora (potrošnje sirovina, zavisnosti od uvoza i emisije gasova sa efektom staklene bašte) i jednog izlaznog indikatora (produktivnosti resursa). Rezultati ukazuju na postojanje značajnih razlika u efikasnosti među analiziranim zemljama, kao i na vremensku dinamiku performansi. Srbija se ističe kao jedna od stabilnijih i efikasnijih zemalja, dok pojedine članice EU beleže značajne oscilacije ili pad u ostvarenim rezultatima (Luksemburg i Estonija).

Ključne reči: Cirkularna ekonomija, Window DEA, efikasnost, Evropska unija, Srbija.

Abstract: This paper analyzes efficiency of the European Union countries and Serbia in the domain of implementation of the circular economy practices from 2010 to 2023, by employing the Window DEA BCC analysis. The evaluation was conducted based on three input indicators (material footprint, material import dependency, and greenhouse gas emissions) and one output indicator (resource productivity). The obtained results suggest that there are significant differences between the analyzed countries. Serbia has stood out as one of the most stable and efficient countries, while some countries, such as Luxembourg and Estonia, have significant fluctuations or a drop in the results.

Keywords: Circular economy, efficiency, Window DEA, European Union, Serbia.

1. UVOD

Tradicionalni ekonomski sistemi u velikoj meri zasnivaju se na linearnom modelu poznatom kao pristup „otvorenog ciklusa“ („open-loop“) (Bongers & Casas, 2022). Ovaj model podrazumeva ekstrakciju prirodnih resursa koji se koriste u industrijskoj proizvodnji, a zatim, nakon što izgube upotrebnu vrednost, završavaju kao otpad. Takav pristup često se smatra izrazito neodrživim zbog velikog opterećenja koje nameće prirodnim ekosistemima, kao i zbog značajne količine otpada koja nastaje usled intenzivne potrošnje i procesiranja (Neves & Marques, 2022).

Kao odgovor na neefikasnost ovog modela i ograničenja prirodnog okruženja, razvijen je novi koncept koji polako preuzima dominantnu ulogu u svetskim ekonomijama — cirkularna ekonomija (CE) (Rizos et al., 2017). CE je često poznata i kao model „zatvorenog ciklusa“ („closed-loop“), jer ključni fokus stavlja na minimizaciju upotrebe neobrađenih resursa i smanjenje količine otpada. Za razliku od tradicionalnog pristupa, CE teži da produži životni vek sirovina i materijala održavajući njihovu upotrebnu vrednost kroz ponovnu upotrebu i recikliranje. Jedan od osnovnih ciljeva cirkularne ekonomije jeste postizanje veće resursne produktivnosti uz što je moguće manje štetnog uticaja na životnu sredinu (Tavera Roremo et al., 2021; Velenturf & Purnell, 2021). Njeni osnovni principi obuhvataju očuvanje resursa, unapređenje efikasnosti kroz reciklažu i ponovnu upotrebu, kao i redizajn procesa s ciljem smanjenja uticaja na životnu sredinu (de Oliveira & Oliveira, 2023).

Rast globalne populacije, praćen značajnim povećanjem nivoa potrošnje, doveo je do planetarnog proboja CE, čineći ovaj relativno mladi koncept vitalnom strategijom u oblasti održivog razvoja i zaštite životne sredine. Brojni svetski akteri, među kojima su Kina, Japan i Evropska unija, već godinama integrišu CE u svoje ekonomske i ekološke politike i planove. Dok Kina posmatra CE kao sveobuhvatnu strategiju koja obuhvata kontrolu zagađenja i zaštitu životne sredine, evropske zemlje fokusiraju se na upravljanje otpadom i očuvanje prirodnih resursa (Bleischwitz et al., 2022; Bongers & Casas, 2022). Zanimljivo je da je najveća posvećenost i angažman u oblasti CE prisutan upravo u zemljama Evropske unije (Meseguer-Sánchez et al., 2021).

S obzirom na sve veći značaj CE, naročito među zemljama članicama EU, ključno je izvršiti evaluaciju ne samo načina na koji ove zemlje inkorporiraju cirkularnu ekonomiju u svoje politike, već i koliko su efikasne u upravljanju resursima i smanjenju otpada. Cilj ovog rada je da oceni performanse zemalja članica EU u implementaciji praksi CE, sa posebnim naglaskom na materijalni uticaj i produktivnost resursa. Da bi se to postiglo, u ovom radu primenjena je Analiza obavljanja podataka nad panel podacima (Window DEA metoda), koja omogućava dinamičku procenu i poređenje zemalja tokom vremena. Cilj je da se pruže značajni uvidi u efikasnost i održivost napora u oblasti cirkularne ekonomije širom EU, kao i da se identifikuju ključni faktori koji utiču na smanjenje uticaja na životnu sredinu i unapređenje ekonomskih rezultata.

2. OD STATIČNE KA DINAMIČKOJ ANALIZI: DEA U CIRKULARNOJ EKONOMIJI

U prethodnoj deceniji zabeležen je porast broja istraživanja koja primenjuju Analizu obavljanja podataka (DEA) kako bi evaluirala performanse članica Evropske unije pri implementaciji CE praksi. Većina studija implementira tradicionalne DEA modele poput BCC i CCR, često koristeći indikatore povezane sa generisanjem i upravljanjem otpadom, poput količine komunalnog ili ukupnog otpada na strani ulaza i stope reciklaže na strani izlaza (Horvat et al., 2023; Banjerdpaiboon & Limleamthong, 2023; Marques & Teixeira, 2022). Neka od analiziranih istraživanja proširila su navedeni pristup tako što su uključila indikatore povezane sa ekonomijom i inovacijama u poslovanju, poput bruto domaćeg proizvoda, energetske produktivnosti i tehnoloških ulaganja u domenu upravljanja otpadom (Nazarko et al., 2022; Marjanović et al., 2025). I dok se brojna istraživanja fokusiraju na statičku procenu efikasnosti, razmatrajući podatke za pojedinačne vremenske periode, svega nekoliko autora (Giannakitsidou et al., 2020; Milanović et al., 2022) primenilo je DEA pristup za kreiranje kompozitnog indeksa cirkularne ekonomije u svrhu šireg poređenja.

Dok se ranija istraživanja uglavnom fokusiraju na statičku procenu, u novijoj literaturi sve je prisutnija i dinamička procena performansi država tokom vremena primenom Window DEA metode. Ratner i koautori (2025) kombinuju Window DEA analizu sa modelima regiona sigurnosti kako bi evaluirali efikasnost članica EU u periodu od 2014. do 2021. godine na osnovu indikatora kao što su privatne investicije, broj zaposlenih u sektoru CE, kao i dodatna vrednost izlaza. Iako je došlo do pomaka ka dinamičkom pristupu evaluaciji performansi, većina razmatranih studija oslanja se pretežno na starije podatke, čije najsvežije observacije datiraju uglavnom iz 2021. godine, što je verovatno posledica nedostupnosti podataka za poslednjih nekoliko godina. U skladu sa tim, postoji prostor za dalje istraživanje vremenske dimenzije implementacije cirkularne ekonomije i identifikaciju faktora koji utiču na dosledne performanse, naročito primenom dinamičkih DEA modela kao što je Window DEA.

3. METODOLOGIJA

Analiza obavljanja podataka (DEA) predstavlja neparametarsku tehniku linearnog programiranja koju su razvili Charnes, Cooper i Rhodes (1978), a koristi se za procenu efikasnosti srodnih entiteta, poznatih kao jedinice odlučivanja (Decision Making Units – DMU), koje koriste više raznorodnih ulaza za proizvodnju više raznorodnih izlaza. Ključna prednost DEA metode u odnosu na neke druge statističke pristupe za ocenu efikasnosti, poput stohastičke analize granice (SFA), jeste u tome što ne zahteva prethodno poznavanje oblika proizvodne funkcije i ne oslanja se na pretpostavke o distribuciji podataka, što je čini posebno pogodnom za primenu u složenim kontekstima kao što je cirkularna ekonomija (Zhu, 2020; Ji & Lee, 2010).

Osnovni DEA model, predstavljen 1978. godine, jeste CCR model, koji pretpostavlja konstantni prinos na obim, tj. da povećanje vrednosti ulaza rezultuje proporcionalnim povećanjem vrednosti izlaza. Manje od decenije kasnije razvijen je i BCC model, koji pretpostavlja varijabilni prinos na obim, a predstavili su ga Banker, Charnes i Cooper 1984. godine. Navedeni modeli konstruišu granicu efikasnosti, koja predstavlja deo po deo linearnu aproksimaciju određenju performansama najuspešnijih jedinica u posmatranom skupu, u odnosu na koju se vrši procena relativne efikasnosti svih ostalih jedinica. Efikasnost se izražava indeksom koji se dobija rešavanjem zasebnog problema linearnog programiranja za svaku jedinicu u posmatranom

skupu, pri čemu se određuju optimalne vrednosti težinskih koeficijenata za ulaze i izlaze (Farantos, 2015; Panwar et al., 2022). DEA modeli mogu biti ulazno ili izlazno orijentisani, u zavisnosti od toga da li je cilj minimizacija potrebnih ulaza ili maksimizacija proizvedenih izlaza (Gerami et al., 2022). Matematička formulacija CCR i BCC DEA modela u linearnoj formi prikazana je u Tabeli 1. U navedenoj notaciji svaka DMU ($j = 1, 2, \dots, n$) koristi m ulaza za proizvodnju s izlaza.

Tabela 1: CCR i BCC DEA modeli

CCR i BCC model		Notacija
$(max)h_k = \sum_{r=1}^s u_r y_{rk} + u^*, k = 1, \dots, n$	(1)	• x_{ij} – količina i-tog ulaza j-te DMU ($x_{ij} > 0$); • y_{rj} – količina r-tog izlaza j-te DMU ($y_{rj} > 0$); • h_k – relativna efikasnost (indeks) k-te DMU; • v_i – težinski koeficijent i-tog ulaza; • u_r – težinski koeficijent r-tog izlaza.
$p. o.$ $\sum_{i=1}^m v_i x_{ik} = 1$	(2)	
$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + u^* \leq 0, j = 1, \dots, n$	(3)	Ključnu razliku u matematičkoj formulaciji između CCR i BCC modela predstavlja korektivni faktor u^* u BCC modelu, čija se vrednost koristi za prilagođavanje ocene efikasnosti u zavisnosti od prinosa na obim. Konkretno: • Za $u^* < 0$, prinos na obim je nerastući. • Za $u^* > 0$, prinos na obim je neopadajući. • Za $u^* = 0$, BCC model postaje ekvivalentan CCR modelu, odnosno prinos na obim je konstantan.
$v_i \geq 0, i = 1, \dots, m$	(4)	
$u_r \geq 0, r = 1, \dots, s$	(5)	

Za razliku od tradicionalne DEA metode, koja omogućava statičku procenu efikasnosti jedinica odlučivanja na osnovu podataka iz pojedinačnih vremenskih perioda, Window DEA analiza omogućava dinamičku evaluaciju performansi kroz vreme. Ovaj pristup posmatra svaku DMU kao zaseban entitet u svakom vremenskom intervalu, omogućavajući praćenje promena u efikasnosti uspostavljanjem pokretnih vremenskih prozora. Window DEA se zasniva na primeni istog DEA modela, najčešće CCR ili BCC modela, tokom više međusobno preklapajućih podperioda (prozora), pružajući uvid ne samo u prosečnu efikasnost već i u trendove njenog kretanja i stabilnost rezultata kroz vreme. Dinamički pristup evaluaciji omogućava istraživačima i donosiocima odluka da procene doslednost, identifikuju fluktuacije i bolje razumeju dugoročne obrasce u ostvarenim performansama (Ratner et al., 2025).

4. SPECIFIKACIJA MODELA I INDIKATORI

Za potrebe ovog istraživanja korišćen je ulazno-orijentisani Window DEA BCC model, kako bi se procenila relativna efikasnost zemalja članica Evropske unije u pogledu korišćenja resursa i ostvarene produktivnosti u okviru cirkularne ekonomije. Model BCC je odabran zbog pretpostavke varijabilnog prinosa na obim, koja je posebno pogodan za poređenju država različitih veličina i ekonomija. Pored zemalja članica EU, u analizu je uključena i **Republika Srbija**, sa ciljem da se sagleda njena pozicija u odnosu na evropske standarde u oblasti efikasnog korišćenja resursa. Analiza obuhvata period od 2010. do 2023. godine, pri čemu su definisani odgovarajući indikatori ulaza i izlaza u skladu sa raspoloživošću podataka iz evropske baze Eurostat. U skladu sa ciljem istraživanja, odabrana su tri indikatora ulaza i jedan indikator izlaza, koji omogućavaju evaluaciju materijalne efikasnosti posmatranih zemalja. Struktura baze podataka prikaza je u Tabeli 2.

Tabela 2: DEA ulazni i izlazni indikatori

Ulaz/Izlaz	Naziv indikatora	Jedinica mere	Opis	Izvor
Ulaz	Potrošnja sirovina (materijalni otisak)	kg po glavi stanovnika	Ukupna količina sirovina potrebna za potrošnju i investicije domaćinstava, preduzeća i vlada.	Eurostat
	Zavisnost od uvoza materijala	%	Pokazuje u kojoj meri se privreda oslanja na uvoz radi zadovoljenja svojih materijalnih potreba.	
	Emisije gasova sa efektom staklene bašte iz proizvodnih aktivnosti	kg po glavi stanovnika	Ilustruje nivo emisije GHG povezan sa domaćom proizvodnjom.	
Izlaz	Produktivnost resursa	EUR po kg	Meri koliko efikasno ekonomija koristi materijalne resurse za stvaranje dodate vrednosti.	Eurostat

Odabrani izlazni indikator, produktivnost resursa, predstavlja jedini direktan pokazatelj ostvarene dobiti sistema u okviru posmatranog modela. Iako se DEA modeli često koriste sa više izlaza, metodološki je prihvatljivo koristiti i samo jedan izlaz, ukoliko on jasno reprezentuje performanse sistema u odnosu na zadate ulaze, kao što je slučaj u prezentovanoj analizi. U konkretnom kontekstu, cilj istraživanja jeste da se oceni efikasnost upravljanja resursima, te je fokus na kvalitetnom odnosu između resursne potrošnje i ekonomskog učinka. Analiza je sprovedena korišćenjem DEA Excel Solver makroa.

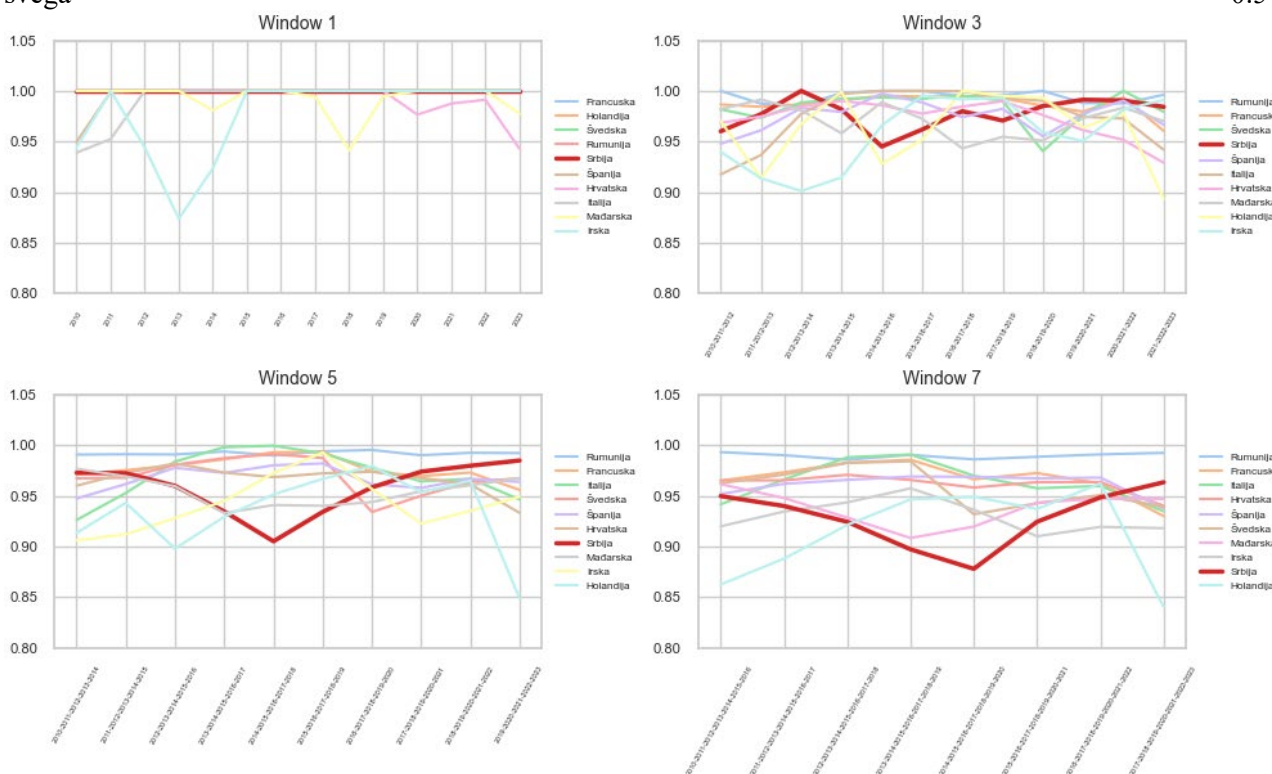
4. ANALIZA REZULTATA

U okviru sprovedenog istraživanja izvršena je detaljna evaluacija efikasnosti upravljanja resursima zemalja Evropske unije i Republike Srbije korišćenjem Window DEA BCC modela u četiri vremenska režima: sa dužinom prozora od 1, 3, 5 i 7 godina. Ovakav metodološki pristup omogućio je višedimenzionalno sagledavanje performansi, kako kroz godišnje fluktuacije, tako i kroz dugoročne obrasce ponašanja, čime su identifikovani periodi stabilnosti i tranzicije, ali i potencijalne strukturne slabosti u kontekstu cirkularne ekonomije. Pregled promene indeksa efikasnosti po prozorima dat je na Slici 1.

U analizi sa prozorom dužine 1 godine, gde se efikasnost posmatra za svaku godinu pojedinačno, zabeležene su izražene varijacije u performansama među zemljama. Srbija se u ovom modelu izdvojila kao izuzetno stabilna i visoko efikasna jedinica, sa indeksom efikasnosti koji se tokom svih godina kreće oko 0.99, čime se pozicionira izuzetno blizu DEA granice efikasnosti. Uz nju, Francuska, Holandija, Španija i Švedska beleže savršene vrednosti indeksa (1), što ukazuje na trajnu optimalnost u odnosu između ulaza i izlaza. Na suprotnoj strani nalaze se Luksemburg i Estonija - Luksemburg, koji uprkos snažnoj ekonomiji beleži indekse od svega 0.77 do 0.61 u poslednjim godinama, dok Estonija ostvaruje skromne vrednosti u rasponu od 0.58 do 0.75, što ukazuje na potencijalno neefikasnu potrošnju resursa u odnosu na generisanu dodatnu vrednost.

Prelaskom na Window analizu sa dužinom prozora od 3 godine, efikasnost se posmatra kroz trogodišnje vremenske intervale, što omogućava identifikaciju tranzicionih obrazaca. Na primer, Kipar beleži rast indeksa sa 0.64 (2010–2012) na čak 0.84 (2013–2015), nakon čega sledi blagi pad, što ukazuje na promenljivost performansi. Litvanija, koja se u prethodnoj analizi nalazila među neefikasnim zemljama, zadržava indekse između 0.67 i 0.76 kroz sve prozore, bez značajnog napretka. Luksemburg i dalje beleži pad, sa 0.95 na 0.53, potvrđujući obrazac strukturne nestabilnosti. Srbija se ponovo svrstava među najefikasnije, sa indeksom od 0.99 u četvrtom i desetom prozoru, dok se u ostalim kreće između 0.96 i 0.98, što ukazuje na visok stepen stabilnosti i sposobnost sistema da amortizuje spoljne uticaje.

Analize sa prozorima dužine 5 i 7 godina pružaju dublji uvid u dugoročnu postojanost performansi. U okviru petogodišnjih prozora, Francuska i Rumunija beleže prosečne indekse od 0.97 i više, dok Španija i Švedska održavaju efikasnost iznad 0.96. Rumunija se posebno ističe konzistentnošću - kroz svih deset prozora indeks se kreće između 0.99 i 1.00, čime se pozicionira kao najsistematичniji lider u upravljanju resursima među zemljama EU. Suprotno tome, Luksemburg beleži kontinuirani pad sa 0.93 na 0.53 u poslednjem prozoru, dok Estonija tek u završnim intervalima dostiže indeks iznad 0.68, iako je startovala sa svega 0.57.



Slika 1: Prosečna vrednost indeksa efikasnosti kroz različite vremenske prozore

U analizi sa prozorom dužine 7, koja služi za ispitivanje dugoročnih performansi država, dobijeni rezultati dodatno diferenciraju zemlje. Francuska i Švedska beleže prosečne indekse efikasnosti iznad 0.96, dok Rumunija ostaje sa vrednošću približnom 0.99 čak i u najdužem vremenskom intervalu. S druge strane, Luksemburg pada na vrednost od 0.51 u poslednjem prozoru, što predstavlja najniži indeks među svim analiziranim zemljama. Češka i Slovačka pokazuju pozitivne trendove, sa rastom indeksa od približno 0.69 ka 0.79, što ukazuje na postepenu stabilizaciju njihovih modela cirkularne ekonomije.

Srbija, iako ni u jednoj analizi nije dostigla indeks efikasnosti od tačno 1, beleži konstantno visoke vrednosti. U jednogodišnjem prozoru indeks je praktično konstantan (~0.99), dok u trogodišnjim prozorima varira između 0.945 i 0.999. U analizi sa dužinom prozora od 5 godina, indeks efikasnosti Srbije kreće se između 0.905 i 0.985, dok u sedmogodišnjim prozorima ne pada ispod 0.877. Ova postojanost performansi, uz blage padove u dužim vremenskim intervalima, može se tumačiti kao posledica rasta emisija ili povećanog uvoza sirovina, koji nisu u potpunosti kompenzovani rastom dodate vrednosti u vidu veće produktivnosti resursa. Ipak, činjenica da efikasnost u najdužem prozoru ostaje iznad 0.88 svedoči o otpornosti sistema cirkularne ekonomije i potencijalu za dugoročni prelazak na cirkularne prakse, uz dodatne strateške intervencije.

Pored pojedinačnih evaluacija, dodatna ključna zapažanja odnose se na grupne obrasce efikasnosti unutar geografskih i ekonomskih blokova. Baltičke zemlje, tj. Estonija, Letonija i Litvanija, pokazuju postojanu, ali skromnu efikasnost, sa indeksima najčešće u rasponu od 0.68 do 0.88, bez jasnog pomaka ka granici efikasnosti. Države srednje Evrope, poput Češke, Poljske i Slovačke, beleže blagi rast u dužim vremenskim intervalima, što može ukazivati na postepenu konsolidaciju i kontinuirano poboljšanje usvojenih praksi. Mediteranske zemlje, među kojima su Grčka, Italija i Portugalija, beleže visoke vrednosti indeksa u kraćim prozorima (često iznad 0.95), praćene fluktuacijama u analizama sa dužim intervalima, što se može povezati sa spoljnim zavisnostima i cikličnim ekonomskim uticajima. Mađarska i Hrvatska u kraćim prozorima dostižu gotovo savršenu efikasnost, dok u dužim režimima beleže vrednosti između 0.92 i 0.97, što ukazuje na povremene promene u praksama upravljanja resursima.

Sveobuhvatna analiza potvrđuje da kombinacija različitih vremenskih režima omogućava ne samo ocenu trenutnih performansi, već i detekciju trajnih obrazaca koji odražavaju institucionalnu stabilnost, fleksibilnost ekonomije i stratešku usmerenost ka održivoj potrošnji. Na taj način, kroz integrisanu analizu moguće je jasno razlikovati zemlje koje efikasnost postižu povremeno od onih koje je uspešno održavaju kroz vreme - među koje se, bez sumnje, ubraja i Srbija.

5. ZAKLJUČAK

Sprovedena analiza omogućila je sveobuhvatnu procenu efikasnosti zemalja Evropske unije i Srbije u upravljanju resursima u okviru cirkularne ekonomije primenom dinamičkog Window DEA BCC modela. Rezultati su pokazali značajne razlike u performansama među državama, kako u kraćim, tako i u dužim vremenskim intervalima. Posebno su iznenađujući rezultati za Srbiju, koja je demonstrirala vrlo visoke i stabilne performanse tokom čitavog posmatranog perioda, što ukazuje na postojanje institucionalnih i ekonomskih kapaciteta za održivu tranziciju ka cirkularnim praksama i ostvarivanje potpune efikasnosti. Suprotno tome, pojedine zemlje, poput Luksemburga i Estonije, pokazale su nisku i nestabilnu efikasnost, što ukazuje na potrebu za dodatnim strateškim intervencijama. Glavna prednost primenjenog pristupa ogleda se u mogućnosti uočavanja vremenskih obrazaca ponašanja i procene dugoročnih performansi sistema, dok je jedno od ograničenja oslanjanje na dostupne podatke i indikatore korišćene u analizi. Budući pravci istraživanja uključivali bi uvrštavanje drugih indikatora u analizu, koji su dostupni u okviru Eurostat baze i drugih izvora. Takođe, potencijalno bi bilo korisno razmotriti primenu Malmkvistovih indeksa za kvantifikaciju promene ukupne faktorske produktivnosti kroz vreme i identifikaciju faktora koji utiču na promenu produktivnosti.

LITERATURA

- Banjerdpai boon, A., & Limleamthong, P. (2023). Assessment of national circular economy performance using super-efficiency dual data envelopment analysis and Malmquist productivity index: Case study of 27 European countries. *Heliyon*, 9(6), e16584. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16584>
- Bleischwitz, R., Yang, M., Huang, B., Xu, X., Zhou, J., McDowall, W., & Yong, G. (2022). The circular economy in China: Achievements, challenges and potential implications for decarbonisation. *Resources, Conservation and Recycling*, 183, 106350. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106350>

- Bongers, A., & Casas, P. (2022). The circular economy and the optimal recycling rate: A macroeconomic approach. *Ecological Economics*, 199, 107504. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107504>
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429–444. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)
- de Oliveira, C. T., & Oliveira, G. G. A. (2023). What circular economy indicators really measure? An overview of circular economy principles and sustainable development goals. *Resources, Conservation and Recycling*, 190, 106850. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106850>
- Gerami, J., Mozaffari, M. R., Wanke, P. F., & Souza, F. B. de. (2022). A novel slacks-based model for efficiency and super-efficiency in DEA-R. *Operational Research*, 22, 3373–3410. <https://doi.org/10.1007/s12351-021-00679-6>
- Giannakitsidou, O., Giannikos, I., & Chondrou, A. (2020). Ranking European countries on the basis of their environmental and circular economy performance: A DEA application in MSW. *Waste Management*, 109, 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.055>
- Horvat, A. M., Radovanov, B., Stojić, D., Sedlak, O., & Bobera, D. (2023). Assessing circular economy performance of European countries and Serbia using data envelopment analysis. *The European Journal of Applied Economics*, 20(2), 1–11.
- Ji, Y. B., & Lee, C. (2010). Data envelopment analysis. *The Stata Journal*, 10(2), 267–280. <https://doi.org/10.1177/1536867X1001000207>
- Marjanović, I., Stanković, J. J., Östh, J., Marković, M., & Stanojević, M. (2025). Insight into territorial efficiency of circular economy through data envelopment analysis. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1494184. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1494184>
- Marques, A. C., & Teixeira, N. M. (2022). Assessment of municipal waste in a circular economy: Do European Union countries share identical performance? *Cleaner Waste Systems*, 3, 100034. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100034>
- Meseguer-Sánchez, V., Gálvez-Sánchez, F. J., Molina-Moreno, V., & Wandosell-Fernández-de-Bobadilla, G. (2021). The main research characteristics of the development of the concept of the circular economy concept: A global analysis and the future agenda. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 704387. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.704387>
- Milanović, T., Savić, G., Martić, M., Milanović, M., & Petrović, N. (2022). Development of the waste management composite index using DEA method as circular economy indicator: The case of European Union countries. *Polish Journal of Environmental Studies*, 31(1), 771–784. <https://doi.org/10.15244/pjoes/139896>
- Nazarko, J., Chodakowska, E., & Nazarko, Ł. (2022). Evaluating the transition of the European Union member states towards a circular economy. *Energies*, 15(11), 3924. <https://doi.org/10.3390/en15113924>
- Neves, S. A., & Marques, A. C. (2022). Drivers and barriers in the transition from a linear economy to a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 341, 130865. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130865>
- Panwar, A., Olfati, M., Pant, M., & Snasel, V. (2022). A review on the 40 years of existence of data envelopment analysis models: Historic development and current trends. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(3), 5397–5426.
- Ratner, S. V., Lychev, A. V., Krivonozhko, V. E., & Balashova, S. A. (2025). Governmental effectiveness in the transition to a circular economy: Dynamic DEA model. *Unconventional Resources*, 6, 100161. <https://doi.org/10.1016/j.uncres.2025.100161>
- Rizos, V., Tuokko, K., & Behrens, A. (2017). The circular economy: A review of definitions, processes and impacts. *CEPS Papers*, (12440).
- Tavera Romero, C. A., Castro, D. F., Ortiz, J. H., Khalaf, O. I., & Vargas, M. A. (2021). Synergy between circular economy and Industry 4.0: A literature review. *Sustainability*, 13(8), 4331. <https://doi.org/10.3390/su13084331>
- Velenturf, A. P., & Purnell, P. (2021). Principles for a sustainable circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1437–1457. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.018>
- Zhu, J. (2020). DEA under big data: Data enabled analytics and network data envelopment analysis. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03668-8>