



UNIVERZITET U KRAGUJEVCU  
FAKULTET INŽENJERSKIH NAUKA

Jelena R. Nikolić

**ENERGETSKO PLANIRANJE KLIMATSKI  
NEUTRALNIH GRADOVA**

doktorska disertacija

Kragujevac, 2025



UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC  
FACULTY OF ENGINEERING

Jelena R. Nikolić

**ENERGY PLANNING FOR CLIMATE  
NEUTRAL CITIES**

Doctoral Dissertation

Kragujevac, 2025

<b>Autor</b>
Ime i prezime: Jelena Nikolić
Datum i mesto rođenja: 21.04.1994, Smederevska Palanka
Sadašnje zaposlenje: Univerzitet u Olborgu, Danska (Aalborg University, Denmark)
<b>Doktorska disertacija</b>
Naslov: Energetsko planiranje klimatski neutralnih gradova
Broj stranica: 132
Broj slika: 30
Broj bibliografskih podataka: 227
Ustanova i mesto gde je rad izrađen: Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac
Naučna oblast (UDK): Mašinsko inženjerstvo (620.92:711.4)
<b>Komentori:</b> dr Dušan Gordić, redovni profesor, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu dr Dubravka Živković, docent, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu
Broj i datum odluke Veća univerziteta o prihvatanju teme doktorske disertacije: IV-04-54/10, 04.02.2022.

*„All models are wrong, but some are useful.“*

G. Box

## Zahvalnica

Ova doktorska disertacija je nastala kao rezultat mojih doktorskih studija na Fakultetu inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu. U tom, ne tako kratkom procesu, imala sam sreće da upoznam ljude koji su nesebično delili svoje vreme, znanje i iskustva. I svima želim da se zahvalim.

Najpre, hvala mom mentoru, profesoru Dušanu Gordiću, na divnoj saradnji i na svim savetima i komentarima u toku celog ovog puta. Ovde ne mislim samo na komentare koji se direktno odnose na unapređenje ove studije, a oni su bili od izuzetne pomoći. Naprotiv, mislim i na komentare koji se odnose na sve pokušaje pisanja prvih radova, sve smernice za rad u nastavi i, pre svega, za jedno izuzetno mentorstvo i nesebičnu podršku i poverenje. Zatim, hvala mojoj komentorki Dubravki. Hvala za sve smernice, komentare, podršku, zagrljaje. Hvala što slušaš i hvala što podstičeš da rastem i da mislim. Zatim se zahvaljujem svim kolegama iz moje stare kancelarije: Rako, hvala za smeh i kasne razgovore. Jurke, hvala ti na svim rečima podrške i na prijateljstvu. Naco, Đina, hvala za svaki razgovor i za svaki srk kafe kada je on bio potreban. Vlado, drago mi je što sam imala priliku da ti budem koleginica. Uživala sam u svakom razgovoru, nazdravljanju i timskom radu i nadam se da ćemo i dalje, pod istim entuzijazmom, da smišljamo projektne ideje. Davore, tebi sam zahvalna za Elektropionir i za svo iskustvo i savete, sve preporučene filmove, knjige i inspiraciju! Vanja, Mlađo, Filipe, hvala za podršku! Radujem se nastavku saradnje sa svima vama.

Tiće, hvala što si izuzetan drug još od sedenja ispod petničke pečurke.

Hvala Živani, Strahinji, Nikoli i Isidori, jer smo zajedno proslavljali sve male (a i velike) životne promene i otvoreno delili sve stavove i strahove.

Hvala svim studentima!

Takođe, želim da se zahvalim i svim kolegama iz nove kancelarije, za znanje, vreme i podršku koji su mi bili potrebni da završim ovaj rad.

Hvala Anasu.

Na kraju, hvala mojoj mami Mirjani i mom tati Radiši za svaki trenutak kada mi nisu spustili slušalicu, već su me slušali i za svaki trenutak oslonca i ljubavi, a njih ima baš dosta.

**π**

Jelena Nikolić,  
decembar 2025. godine

## **Apstrakt**

Kako su gradovi prepoznati kao mogući nosioci energetske tranzicije, klimatska neutralizacija urbanih sredina predstavlja osnovni korak u borbi protiv klimatskih promena. S tim u vezi, cilj ove disertacije je definisanje replikabilne metodologije koja povezuje nacionalne ciljeve sa lokalnim kontekstom. Metodološki pristup integriše međusektorsko energetske modeliranje kroz primenu koncepta pametnih energetskih sistema i uključivanje građana u proces donošenja odluka. Metodologija obuhvata SWOT analizu, kreiranje referentnog i budućih scenarija, uz poštovanje principa pravednosti, kao i višekriterijumsku analizu sa uključivanjem zainteresovanih strana. Primena metodologije na studiji slučaja grada Kragujevca, Srbija, pokazuje da je trenutni energetske scenario počiva na upotrebi fosilnih goriva (81%) sa godišnjim emisijama CO<sub>2</sub> od 847 kt. Referentni Scenario, zasnovan na nacionalnim strategijama, smanjuje emisije na 560 kt, dok unapređeni scenario budućeg energetskog sistema grada, postiže 386,6 kt, uz povećanu integraciju OIE i efikasnosti sistema. Participativna analiza uključila je 132 ispitanika i pokazala da su najvažniji kriterijumi očekivani radni vek i efikasnost tehnologije, zatim troškovi održavanja i investicije, dok je kreiranje radnih mesta najmanje značajno. Studija slučaja pokazuje da kombinacija energetske efikasnosti, elektrifikacije, OIE i unapređenja efikasnosti daljinskog grejanja obezbeđuje značajno smanjenje emisija i troškova, uz očuvanje pouzdanosti i socioekonomske prihvatljivosti. Time se postavlja osnova za integrisane lokalne politike, jasne investicione planove i inkluzivne procese odlučivanja.

**Ključne reči:** energetske planiranje, klimatske neutralizacija, gradovi, urbane sredine, energetske modeliranje, dekarbonizacija.

## **Abstract**

As cities are recognized as potential drivers of the energy transition, achieving climate neutrality in urban areas represents a fundamental step in combating climate change. Accordingly, the aim of this dissertation is to define a replicable methodology that aligns national targets with local contexts. The methodological approach integrates cross-sectoral energy modeling through the application of smart energy system concepts and the inclusion of citizens in decision-making processes. The methodology comprises SWOT analysis, development of baseline and future scenarios under equity principles, and multi-criteria analysis involving relevant stakeholders. Application of the methodology to the case study of Kragujevac, Serbia, reveals that the current energy scenario relies heavily on fossil fuels (81%) with annual CO<sub>2</sub> emissions of 847 kt. Referent Scenario, based on national strategies, reduces emissions to 560 kt, while the enhanced Improved scenario of futuer energy system achieves 386.6 kt through increased integration of renewable energy sources and system efficiency. The participatory analysis, involving 132 respondents, indicates that the most important criteria are expected lifetime and technology efficiency, followed by maintenance and investment costs, while job creation is considered least significant. The case study demonstrates that a combination of energy efficiency, electrification, renewable energy, and improvements in district heating efficiency ensures substantial reductions in emissions and costs while maintaining reliability and socio-economic acceptability. This establishes a foundation for integrated local policies, clear investment plans, and inclusive decision-making processes.

**Keywords:** energy planning, climate neutrality, cities, urban areas, energy modeling, decarbonization.

## SADRŽAJ

Sadržaj.....	i
Spisak ilustracija .....	iii
Spisak tabela .....	iv
Spisak korišćenih skraćenica.....	v
Spisak korišćenih oznaka.....	vi
1. Uvodna razmatranja .....	1
1.1. Uvod .....	1
1.2. Osnovne pretpostavke .....	2
1.3. Organizaciona struktura disertacije .....	2
2. Pregled dosadašnjih istraživanja.....	4
3. Teorijska razmatranja.....	11
3.1. Upotreba primarne i finalne energije u svetu, Evropi i Republici Srbiji.....	11
3.1.1. Upotreba primarne energije .....	11
3.1.2. Upotreba finalne energije u svetu.....	13
3.2. Energetski potencijal OIE .....	15
3.3. Pregled tehnologija za proizvodnju, konverziju, skladištenje i uštedu energije	17
3.3.1. Pregled tehnologija za proizvodnju električne energije .....	17
3.3.2. Pregled tehnologija za centralizovanu proizvodnju toplotne energije .....	18
3.3.3. Tehnologije za konverziju biomase.....	20
3.3.4. Tehnologije za skladištenje energije.....	22
3.3.5. Tehnologije za proizvodnju sintetičkih goriva dobijenih pomoću električne energije .....	25
3.3.6. Tehnologije za sprovođenje mera energetske efikasnosti .....	26
3.4. Energetske politike i zakonske regulative u Evropi i Srbiji.....	28
3.4.2. Energetske politike u Srbiji .....	32
3.5. Energetsko planiranje i energetski modeli .....	33
3.6. Višekriterijumska analiza .....	39
4. Definisane metodologije .....	48
4.2. SWOT analiza.....	49
4.3. Kreiranje referentnog energetskog scenarija .....	51
4.3.1. Definisane energetske potrebe na nivou grada.....	51
4.3.2. Definisane postrojenja za proizvodnju energije .....	57
4.4. Definisane budućeg energetskog scenarija .....	59
4.5. EnergyPLAN .....	61
4.6. Participativni postupak za određivanje prioriteta.....	63
4.6.2. Definisane ekonomskih kriterijuma .....	65

4.6.3.	Definisanje društvenih kriterijuma.....	66
4.6.4.	Definisanje tehničkih i kriterijuma za zaštitu životne sredine.....	72
4.7.	Definisanje poredbenih indikatora u energetske scenarijima .....	73
5.	Primena predložene metodologije na studiji slučaja grada Kragujevca .....	75
5.1.	Opis analiziranog lokaliteta .....	75
5.2.	SWOT analiza na primeru grada Kragujevca .....	77
5.2.2.	Prednosti .....	78
5.2.3.	Nedostaci.....	79
5.2.4.	Mogućnosti.....	80
5.2.5.	Pretnje .....	81
5.3.	Kreiranje referentnog (baznog) energetske scenarija grada Kragujevca .....	82
5.3.1.	Definisanje sistema energetske snabdevanja u Kragujevcu .....	82
5.3.2.	Definisanje energetske potreba u referentnom scenariju.....	83
5.3.3.	Validacija referentnog modela.....	86
5.3.4.	Rezultati referentnog scenarija .....	87
5.4.	Definisanje budućeg energetske scenarija .....	89
5.4.1.	Scenario 1: Polazni scenario energetske budućnosti grada Kragujevca za 2045. godinu.....	89
5.4.2.	Scenario 2a: Predloženi energetske scenario grada Kragujevca za 2045 godinu .....	94
5.4.3.	Scenario 2b: Unapređenje scenarija 2a proširivanjem kapaciteta daljinskog grejanja za potrebe zagrevanja STV .....	97
5.4.4.	Uporedni prikaz i analiza predstavljenih mogućih scenarija energetske budućnosti grada Kragujevca .....	99
5.5.	Analiza mišljenja zainteresovanih strana i participativno određivanje prioriteta ugradnje predloženih mera.....	102
5.5.1.	Analiza mišljenja zainteresovanih strana.....	102
5.5.2.	Primena višekriterijumske analize na predloženom scenariju energetske budućnosti grada Kragujevca .....	103
6.	Zaključak.....	108
	Spisak korišćene literature .....	113
	PRILOG A: Energetske bilans – Scenario S (2045. godina): Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2040. godine sa projekcijama do 2050. ....	129
	Prilog B: Rezultati energetske simulacija Scenarija 1 .....	130
	Prilog C: Rezultati energetske simulacija Scenarija 2a.....	132
	Prilog D: Rezultati energetske simulacija Scenarija 2b .....	134

## SPISAK ILUSTRACIJA

Slika 2.1.	Evropski gradovi u kojima je analizirana dekarbonizacija u skladu sa nacionalnim energetske ciljevima .....	10
Slika 3.1.	Izvori primarne energije u svetu i Evropi u toku 2023. godine.....	11
Slika 3.2.	Proizvodnja primarne energije u Srbiji 2022 .....	12
Slika 3.3.	Upotreba finalne energije u sektorima na globalnom nivou (PWh) .....	13
Slika 3.4.	Procentualna raspodela korišćene energije u sektorima u Evropskoj Uniji (2022. godina) .....	13
Slika 3.5.	Upotreba finalne energije u različitim energetske sektorima u Republici Srbiji, u toku 2023. godine .....	14
Slika 3.6.	Određivanje potencijala OIE [62] .....	15
Slika 3.7.	Istorijski razvoj sistema daljinskog grejanja [81] .....	20
Slika 3.8.	Odabrani pilot gradovi Evropske Unije u okviru projekta 100 Klimatski-neutralnih i pametnih gradova do 2030 [127] .....	31
Slika 4.1.	Šematski prikaz korišćene metodologije .....	47
Slika 4.2.	Sprovođenje SWOT analize na lokalnom nivou .....	48
Slika 4.3.	Matrica SWOT analize sa pitanjima koja olakšavaju njeno razumevanje.....	49
Slika 4.4.	Koraci definisanja budućeg energetske scenarija .....	58
Slika 4.5.	Šematski prikaz pametnih energetske sistema i njihova međupovezanost u alatu EnergyPLAN (slika je usvojena iz [193]).....	60
Slika 4.6.	Grafički prikaz koraka tehničke simulacije softvera EnergyPLAN .....	61
Slika 4.7.	Kriterijumi prilikom definisanja redosleda prioriteta mera .....	64
Slika 5.1.	Lokacija grada Kragujevca u Republici Srbiji.....	72
Slika 5.2.	Dnevne temperaturne varijacije u Kragujevcu [189] .....	72
Slika 5.3.	Broj sunčanih i dana sa umerenom i potpunom oblačnošću po mesecima u Kragujevcu [203].....	73
Slika 5.4.	Matrica SWOT analize na primeru grada Kragujevca .....	74
Slika 5.5.	Poređenje statističkih podataka sa simulacionim podacima za referentni model 2019 .....	83
Slika 5.6.	Dijagram energetske tokova grada Kragujevca, 2019. god. (GWh).....	85
Slika 5.7.	Dijagram energetske tokova (GWh) za Scenario 1 grada Kragujevca, 2045 .....	90
Slika 5.8.	Dijagram energetske tokova (GWh) za Scenario 2a grada Kragujevca, 2045 .....	93
Slika 5.9.	Dijagram energetske tokova (GWh) za Scenario 2b grada Kragujevca, 2045 .....	95
Slika 5.10.	Usporedni prikaz rezultata analiziranih scenarija .....	97
Slika 5.11.	Upotreba tehnologija u sistemu daljinskog grejanja, Kragujevac 2045 .....	97
Slika 5.12.	Troškovi analiziranih scenarija po jediničnoj uštedi emisije CO <sub>2</sub> .....	98
Slika 5.13.	Ocenjivanje značaja kriterijuma iz ugla različitih zainteresovanih strana .....	100
Slika 5.14.	Predloženi redosled ugradnje novih tehnologija na rezultata višekriterijumske analize .....	104

## SPISAK TABELA

Tabela 3.1	Tehnički i teorijski potencijal OIE u svetu.....	16
Tabela 3.2	Pregled potencijala OIE u Republici Srbiji.....	16
Tabela 3.3	Tehnologije za proizvodnju električne energije .....	18
Tabela 3.4	Tehnologije za proizvodnju toplote energije u sistemima daljinskog grejanja 19	
Tabela 3.5	Procesi za konverziju biomase.....	21
Tabela 3.6	Tehnologije za konverziju biomase u termohemijskim procesima .....	21
Tabela 3.7	Pregled tehnologija za skladištenje električne energije .....	23
Tabela 3.8	Tehnologije za dobijanje sintetičkih goriva.....	26
Tabela 3.9	Najčešće zastupljene mere energetske efikasnosti u različitim energetskim sektorima 27	
Tabela 3.10	Razvijeni softverski paketi za analizi energetskih modela.....	35
Tabela 3.11	Pregled osnovnih metoda višekriterijumske analize korišćenih u energetskom planiranju [164], [166], [167] .....	40
Tabela 3.12	Kriterijumi za rangiranje alternativa prilikom primene višekriterijumske analize u oblasti energetskog planiranja .....	45
Tabela 4.2	Nominalni investicioni troškovi I troškovi održavanja za najčešće korišćene mere prilikom analize energetskih sistema [197] .....	66
Tabela 4.3	Faktori zaposlenosti prilikom ugradnje tehnologija za dekarbonizaciju [198] 67	
Tabela 4.4	Faktori konverzije usvojeni na osnovu [97] i [199].....	71
Tabela 5.1	Energetski potencijal biomase grada Kragujevca [106] .....	75
Tabela 5.2	Kapaciteti za proizvodnju energije u Srbiji i njihov udeo za grad Kragujevac 80	
Tabela 5.3	Upotreba energije u sektorima industrije i transporta na nivou grada Kragujevca (2019. god) .....	81
Tabela 5.4	Broj individualnih ložišta u Kragujevcu prema korišćenom energentu .....	81
Tabela 5.5	Ukupna količina finalne energije za zagrevanje prostora na nivou Kragujevca 82	
Tabela 5.6	Prosečne usvojene efikasnosti sistema grejanja .....	82
Tabela 5.7	Potrebna količina energije za zagrevanje STV.....	83
Tabela 5.8	Usvojeni proizvodni kapaciteti u Scenariju 1 .....	87
Tabela 5.9	Energetske potrebe grada Kragujevca u skladu sa Scenarijem 1.....	88
Tabela 5.10	Uticaj analiziranih budućih scenarija grada Kragujevca na tehno- ekonomske i društvene aspekte do 2045. godine.....	98
Tabela 5.11	Analiza predloženih kriterijuma na primeru Scenarija 2b.....	101
Tabela 5.12	Proizvodni kapaciteti tehnologija za proizvodnju, skladište i konverziju energije predloženi Scenarijem 2b.....	102
Tabela 5.13	Rangiranje predloženih mera na osnovu značaja kriterijuma iz ugla različitih zainteresovanih strana .....	103

## *SPISAK KORIŠĆENIH SKRAĆENICA*

CBAM	Mehanizam prekograničnog prilagođavanja (en. Carbon border adjustment mechanism)
CHP	kogeneracija (eng. combined heat and power)
DG	Daljinsko grejanje
EED	Direktiva o energetskej efikasnosti (eng. Energy Efficiency Directive)
e-fuels	e-goriva (eng. Electro fuels)
ETS	Sistem trgovine emisijama CO <sub>2</sub>
EU	Evropska Unija
GIS	Geografski Informacioni Sistemi
IEA	Međunarodna agencija za energetiku (eng. International Energy Agency)
INEKP	Integrisani Nacionalni Energetski i Klimatski Plan
MCDM	Višekriterijumska analiza (eng. Multicriteria decision making)
MILP	Model mešovitog celobrojnog nelinearnog programiranja (eng. mixed-integer linear programming)
NGO	Nevladine organizacije
OIE	Obnovljivi izvori energije
P-to-X	Tehnologije za konverziju električne energije (eng. Power-to-X)
PV paneli	Fotonaponski paneli
RED II	Direktiva o primeni OIE (eng. Renewable energy Directive)
SAD	Sjedninjene Američke Države
STV	Sanitarna topla voda
SWOT	Analiza snaga, slabosti, prilika i pretnji (eng. strenhgts, weaklesses, opportunities, Threats)
Te-To	Termoelektrana-toplana
UK	Ujedinjeno Kraljevstvo

## SPISAK KORIŠĆENIH OZNAKA

$C_{grad}$ [EUR]	trošak instalacije mere na nivou grada
$C_{nac}$ [EUR]	trošak instalacije planirane mere na nacionalnom nivou
$CO2_n$ [kg CO <sub>2</sub> /god]	godišnja emisija CO <sub>2</sub> u analiziranom sektoru, nakon ugradnje predložene mere
$CO2_{ref}$ [kg CO <sub>2</sub> /god]	godišnja emisija CO <sub>2</sub> u analiziranom sektoru, pre ugradnje mere
$CO2_s$ [kg CO <sub>2</sub> ]	ukupne godišnje emisije CO <sub>2</sub> iz sektora <i>s</i>
$\Delta CO2$ [kg CO <sub>2</sub> /god]	godišnje smanjenje emisije CO <sub>2</sub>
$E_{ind,grad_m}$ [GWh/god]	ukupna godišnja potreba za energentom <i>m</i> u sektoru industrije, na gradskom nivou
$E_{ind,zemlja_m}$ [GWh/god]	godišnja potreba za energentom <i>m</i> (ugalj, nafta, naftni derivati, prirodni gas...) u industriji na nacionalnom nivou
$E_{trans,grad_k}$ [GWh/god]	ukupna godišnja potreba za energentom <i>k</i> na gradskom nivou, koja se računa prema formuli
$E_{trans,zemlja_k}$ [GWh/god]	godišnja potreba za energentom <i>k</i> (prirodni gas, nafta i naftni derivati, vodonik...) u transportu na nacionalnom nivou
$E_{DG}$ [GWh/god]	ukupna finalna količina toplotne energije koja se dostavlja krajnjim korisnicima daljinskog grejanja
$E_{G\_total}$ [GWh/god]	ukupna potrebna količina energije za zadovoljenje toplotnih potreba za zagrevanje prostora u sektoru zgrada
$E_g$ [GWh/god]	predviđena potreba za energijom u sistemu daljinskog grejanja
$E_{h\_p}$ [GWh/god]	ukupna godišnja količina finalne energije potrebne za hlađenje sektora zgrada
$E_{hi}$ [GWh/god]	časovna količina finalne energije potrebne za hlađenje sektora zgrada
$E_{ind\_i\_p}$ [GWh/god]	ukupna količina primarne energije potrebne za zagrevanje sektora zgrada primenom individualnih ložišta
$E_{ind\_i}$ [GWh/god]	količina energije dobijena iz individualnog ložišta tipa <i>i</i>
$E_p^n$ [MWh]	godišnja potreba za energijom nakon instalacije predložene mere

$E_p^{ref}$ [MWh]	godišnja potreba energije u referentnom sistemu u analiziranom sektoru pre instalacije predložene mere
$e_t$ [kWh/h]	potrebe za toplotnom energijom na časovnom nivou
$E_{f_s}$ [GWh]	godišnja upotreba fosilnih goriva u sektoru s
$EF$ [kg CO <sub>2</sub> /god]	emisioni faktor za korišćeni energent
$E_{god}$ [GWh/god]	ukupna godišnja potreba za električnom energijom,
$E_{ind,total}$ [GWh/god]	ukupna količina finalne energije proizvedene u sistemu individualnih ložišta
$E_{ind,grad}$ [GWh/god]	ukupna godišnja potreba za energentima u sektoru industrije na gradskom nivou
$\Delta E_p$ [MWh]	godišnja ušteda energije
$e_{s,t}$ [GWh/h]	potreba za električnom energijom na časovnom nivou u sektoru s u času t
$E_{transg,grad}$ [GWh/god]	ukupna godišnja potreba za energentima na gradskom nivou
$GSS_{god}$ [°C]	Ukupan broj grejnih stepen sati na godišnjem
$I_{co_2}$ [CO <sub>2</sub> /stanovnik]	indikator emisije CO <sub>2</sub> po glavi stanovnika
$I_{f_g}$ [GWh/stanovnik]	indikator primene fosilnih goriva po glavi stanovnika
$K_{grad}$ [kW]	planirani kapaciteti predložene mere na nivou grada
$K_{nac}$ [kW]	planirani kapaciteti predložene mere na nacionalnom nivou.
$Q_{DG_f}$ [GWh/god]	ukupna potrebna količina finalne energije u sistemu daljinskog grejanja
$Q_{DG_p}$ [GWh/god]	ukupna potrebna količina energije u sistemu daljinskog grejanja
$s_i$ [%]	udeo individualnog ložišta tipa i u ukupnom broju individualnih ložišta u gradu
$u_{Dg}$ [%]	udeo daljinskog grejanja u ukupnim toplotnim potrebama za zagrevanje prostora u sektoru zgrada
$w_t$ [%]	udeo GSS u ukupnim grejnim stepen satima na godišnjem nivou
$\eta_{DGk}$ [%]	stepen korisnosti kotlova u sistemu daljinskog grejanja.
$\eta_{hi}$ [%]	koeficijent hlađenja
$\eta_i$ [%]	stepen korisnosti za tip individualnih ložišta i.
$\rho_{DG_m}$ [%]	gubici u toplotnoj distributivnoj mreži.
$GSS$ [°C]	grejni stepen sat
$HSS$ [°C]	stepen sat hlađenja

$n_{ij} [-]$	normalizovani faktor za svaku predloženu meru višekriterijumske analize
$P_{grad}$	broj stanovnika u gradu
$p_j [%]$	težinski faktor za svaki od kriterijuma višekriterijumske analize
$P_{zemlja}$	broj stanovnika u zemlji u kojoj se analizirani grad nalazi.
$R_i [-]$	rezultat WSM metode
$T_{gg} [^{\circ}C]$	temperatura granice grejanja
$T_{gh} [^{\circ}C]$	temperatura granice hlađenja
$T_s [^{\circ}C]$	spoljašnja temperatura
$T_{tk} [^{\circ}C]$	temperatura termičkog komfora grejanja
$T_{tkh} [^{\circ}C]$	temperatura termičkog komfora prilikom hlađenja

# 1. UVODNA RAZMATRANJA

## 1.1. Uvod

Borba sa klimatskim promenama predstavlja jedan od glavnih izazova današnjice. U naučnim krugovima je postignut konsenzus da je povećanje globalne temperature uzrokovano antropogenim delovanjem i emisijom gasova sa efektom staklene bašte usled povećanih energetske potreba. Na osnovu podataka Međunarodne agencije za energetiku (IEA), potreba za primarnom energijom se, od 1990. do 2019. godine, povećala za 65,79%. Na globalnom nivou, energija se još uvek većinski dobija sagorevanjem fosilnih goriva (84% ukupne primarne energije), zbog čega okretanje ka nisko-ugljeničnim gorivima predstavlja glavni cilj u zemljama širom sveta, ne bi li smanjile svoj ugljenični i ekološki otisak [1].

Kako više od 4,36 milijardi ljudi živi u urbanim sredinama [2], u gradovima se koristi 75% ukupne primarne energije u svetu [3]. Shodno tome, kada je reč o posledicama globalnog zagrevanja, energetske aktivnosti u gradovima su od značaja. Energetska tranzicija, koja podrazumeva postepeni prelazak na obnovljive izvore energije (OIE), predstavlja ključni element ka postizanju klimatske neutralnosti. Ovakav pristup nema samo pozitivan uticaj na životnu sredinu, već omogućava i sigurno snabdevanje energijom.

Na osnovu iskustava gradova u kojima se energetska tranzicija aktivno sprovodi, zaključuje se da ovaj proces zahteva vreme, kao i značajna finansijska ulaganja. Zato je važno da budući energetske sistemi budu planirani tako da uključuju adekvatan odabir tehnoloških, ekonomskih, društvenih i mera za zaštitu životne sredine. Dobar energetske plan može da obezbedi održivi prelazak na OIE, čak i u gradovima u kojima se korišćenje energije zasniva na upotrebi fosilnih goriva. Proučavanje urbanih energetske sistema treba da se zasniva na analizi ukupnog energetske bilansa grada, kao i mogućim energetske transformacijama unutar svih energetske sektora, pri tome budući predviđeni energetske sistem treba da ima najmanju moguću emisiju ugljen-dioksida (CO<sub>2</sub>), uz održivu upotrebu dostupnih tehnologija.

S tim u vezi, predmet rada i osnovni cilj doktorske disertacije je utvrđivanje metodologije za energetske planiranje klimatske neutralizacije u gradovima. Planiranje energetske budućnosti u gradovima treba da se zasniva pre svega na upotrebi niskougljeničnih energetske izvora i kreiranju pametnih energetske sistema, koji omogućavaju međusektorsku energetske razmenu, uzimajući u obzir društvene, ekonomske i kriterijume zaštite životne sredine. Ovakav pristup, baziran na sprezi predviđenog energetske modela i participativnog učešća građana u definisanju značaja kriterijuma, omogućiće postepeno i održivo postizanje ugljenične neutralnosti u gradovima, uz utvrđeni redosled prioriteta za sprovođenje predloženih mera.

## 1.2. Osnovne pretpostavke

Na osnovu analize dosadašnjih istraživanja utvrđeno je da je energetska planiranja na lokalnim nivoima značajno u ostvarivanju ciljeva energetske tranzicije i održivog razvoja, kako na nacionalnom, tako i na globalnom nivou. S tim u vezi, glavni doprinos doktorske disertacije je definisanje metodologije za proces ostvarivanja klimatske neutralizacije u gradovima, koja se zasniva na definisanju budućih energetske scenarija, kroz učešća svih zainteresovanih strana na lokalnom nivou. Za razliku od postojećih metodologija u ovom naučnom domenu, metodologija predložena u okviru ove doktorske disertacije se zasniva na skaliranju nacionalnih strategija na nivo grada, istovremeno podupirući nacionalne ciljeve iskorišćenjem potencijala lokalno specifičnih OIE, uz razmatranje mišljenja građana. Ovakva analiza rezultira sagledavanjem posledica promena u dva smera. Jedan se odnosi na sagledavanje uticaja nacionalnih strategija na lokalne nivoe, dok se drugi bazira na mogućnostima iskorišćenja lokalnih potencijala za ostvarivanje nacionalnih energetske ciljeva. Na ovaj način omogućeno je bolje razumevanje energetske promena, njihovog značaja i prilagođenosti lokalnim potrebama.

Pored toga, primena predložene metodologije na nivo grada u Republici Srbiji pruža uvid u proces i posledice energetske promena u zemljama Zapadnog Balkana, u kojima je energetska tranzicija još uvek u začetku. Takođe, analize studija slučaja su od značaja, jer je svaki grad jedinstveni energetska sistem, zbog čega rezultati pojedinačnih analiza doprinose proširivanju kataloga znanja u oblasti, rezultujući boljem razumevanju procesa klimatske neutralizacije.

Rezultati doktorske disertacije mogu biti od koristi donosiocima odluka prilikom kreiranja lokalnih energetske strategija za energetska održive gradove.

## 1.3. Organizaciona struktura disertacije

Prvo poglavlje doktorske disertacije prikazuje uvodna razmatranja, uz definisanje problema i značaja predloženog istraživanja, uz osvrt na polazne pretpostavke i doprinos rezultata doktorske disertacije.

Drugo poglavlje ovog rada prikazuje sistematičan pregled dosadašnjih istraživanja iz oblasti energetske planiranja. Treće poglavlje obuhvata teorijska razmatranja, čije je poznavanje i razumevanje bilo neophodno kako bi se definisala i primenila metodologija predložena u disertaciji. Ona obuhvataju sistematičan pregled dosadašnjih istraživanja u oblasti energetske planiranja na nacionalnim, regionalnim i lokalnim nivoima. Ovo poglavlje takođe pruža uvid u korišćenje primarne i finalne energije u svetu, Evropskoj Uniji (EU) i Republici Srbiji uz osvrt na potencijale OIE. Pored toga, u poglavlju su predstavljene tehnologije za proizvodnju, konverziju i skladištenje energije, koje su od značaja za proces planiranja budućih energetske promena. Pored toga poglavlje obuhvata i pregled literaturnih izvora koji mogu biti od značaja u boljem razumevanju tehnologija i mogućnostima njihove primene u energetske sistemima. Teorijska razmatranja obuhvataju i značaj energetske planiranja, postupak njegovog sprovođenja, prikaz razvijenih softverske alata, kao i mogućnost primene višekriterijumske analize u oblasti energetske planiranja. Radi boljeg razumevanja značaja sprovođenja istraživanja koje je predstavljeno u disertaciji, u ovom poglavlju prikazane su važeće energetske politike na različitim nivoima: evropskim, nacionalnim, regionalnim i lokalnim.

Definisanje metodologije za proces dekarbonizacije na lokalnim nivoima prikazano je u četvrtom poglavlju disertacije. Ovo poglavlje uključuje sve specifične korake koje je potrebno preduzeti kako bi proces energetske tranzicije na lokalnim nivoima bio u skladu sa nacionalnim energetske ciljevima. Prvi deo metodologije obuhvata izradu analize SWOT analize (eng. strenghts-weaknesses-opportunities-threats (SWOT)), nakon čega sledi prikaz koraka za definisanje referentnog energetskeg scenarija, koji služi kao polazna osnova prilikom analize i definisanja budućih energetskeg scenarija. Metodologijom je obuhvaćen opis alata koji je korišćen prilikom analize energetskeg modela. Na kraju, metodologija prikazuje korake za integraciju višekriterijumske analize i participativnog učešća građana u definisanju koraka za realizaciju predviđenog modela budućeg energetskeg scenarija.

Poglavlje pet prikazuje primenu svih koraka definisanih metodologijom na primeru grada u Republici Srbiji, uz analizu rezultata, praćenih adekvatnom diskusijom i mogućim pravcima budućih istraživanja.

Na osnovu dobijenih rezultata, poglavlje šest obuhvata zaključna razmatranja uz osvrt na potencijalne nedostatke prikazane metodologije.

## 2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Kako je dogovor o smanjenju emisija gasova sa efektom staklene bašte podstakao energetska tranziciju, energetska planiranja na različitim nivoima, od međunarodnih do lokalnih, postalo je predmet sve većeg broja naučnih istraživanja. Naučni doprinos u ovom kontekstu je od izuzetne važnosti, kako bi se pokazalo da je okretanje ka održivim energetska sistemima, koji su zasnovani na upotrebi održive energije, moguće. Iako se u stručnoj literaturi često ističe da je postizanje klimatskih ciljeva moguće kroz ugradnju velikih sistema obnovljivih izvora energije, nema jednoznačne definicije 100% obnovljivog energetska sistema [4]. U nekim slučajevima se ovaj pojam odnosi na tranziciju u elektroenergetskom sektoru, dok u nekim radovima obuhvata celokupni energetska sistem. Energetska tranzicija na globalnom nivou se, na osnovu dostignuća, može kategorisati u 4 perioda:

- 1890-1970, koje karakteriše primena uglja i parnih mašina,
- 1970-1980 kada su energetske promene bile usmerene ka upotrebi nafte i naftnoj krizi,
- 1980-2000, kada su se energetske promene podrazumevale diversifikaciju energetska izvora,
- 2000-sada kada su energetske promene zasnovane na integraciji niskougljeničnih energetska izvora i integraciji energetska sektora.

Poslednji period, u kome se društvo i sada nalazi, baziran je na dobrim modelima organizovanja, ekološkom upravljanju energijom, kao i industrijskim transformacijama [5].

U dosadašnjim naučnim radovima, energetska planiranje je uglavnom analizirano na nacionalnom nivou, dok se u obzir retko uzimao globalni nivo ili nivo koji je manji od nacionalnog [4]. Međutim, ovakve analize su od važnosti, zato što je promena sistema ka nisko-ugljeničnom složen proces, koji iziskuje promene u upotrebi tehnologija, zakona i zakonskih regulativa, kao i u različitim društvenim aspektima [6].

Mogućnost postizanja energetska sistema bez emisije CO<sub>2</sub> u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD) analizirali su Williams i saradnici [7]. U radu su, kroz 8 različitih modela, obuhvaćeni energetska sektori i industrija, jer se veruje da su odgovorni za 80% ukupne emisije CO<sub>2</sub>. Prvi preporučeni koraci u energetska tranziciji se zasnivaju na instalaciji više od 500 GW OIE (solarne i eolske energije), smanjenoj upotrebi uglja (<1% u ukupnoj proizvodnji energije) do 2030. godine, elektrifikaciji transportnog sektora i upotrebi toplotnih pumpi u zgradama. Dugoročno planiranje se zasniva na upotrebi novih goriva i tehnologija za sekvenciranje i odvajanje CO<sub>2</sub>. Ističe se da postizanje ovakvog scenarija podrazumeva upotrebu biomase i zemljišta za uzgoj biomase, ali se napominje da se na taj način smanjuje upotreba fosilnih i nuklearnih goriva i štetnih emisija. Procenjeno je da su troškovi ovog procesa 1\$ po stanovniku, što je omogućeno stalnim razvojem tehnologija i nižim cenama opreme, zbog čega se veruje da novac ne predstavlja problem u dostizanju cilja, već zakonodavne politike i regulative.

Analizu izvodljivosti za prelazak na energetska sistem koji se zasniva na potpunoj upotrebi OIE u jednoj kineskoj provinciji sprovedli su Bamisile i saradnici [8]. Rad obuhvata analizu elektroenergetska, industrijska i transportnog sektora za dve godine (2030. i 2050.),

kroz mogućnost primene hidro energije, energije vetra, solarne energije i biomase, kroz analizu scenarija u kojima se menja visina vodostaja. Ističe se da kritični višak električne energije proizvedene iz OIE treba da se koristi za proizvodnju vodonika, čime se može doprineti postizanju stabilnosti elektroenergetskog sistema. Pored toga, u radu je sistematizovan pregled dosadašnjih radova u oblasti dekarbonizacije na teritoriji Kine.

U radu u kome je ispitivana klimatski neutralna budućnost australijskog energetskeg sistema periodu od 2020-2029 [9], analizirana su tri scenarija. Najpre su modelirani regionalni sistemi, koji su se zatim spajali u integralnu energetske mrežu, zasnovanu na konceptu pametnog energetskeg sistema. Autori naglašavaju da je za regulisanje sistema neophodno skladištenje energije, dok se za nadoknadu razlike u potrebama i proizvodnju energije mogu koristiti biomasa i hidro energija. Pristup u kome se objedinjavaju energetske potrebe celog kontinenta smanjuje neravnomernost u generisanju obnovljive energije usled različitih vremenskih prilika u različitim regionima. Kreiranje super mreže koja obuhvata sve regione smanjuje emisiju CO<sub>2</sub> za 80%, kao i potrebu za skladištenjem energije, u poređenju sa rezultatima dobijenim pojedinačnom analizom regiona. Upotrebom OIE, električna energija se može proizvoditi bez emisije ugljen-dioksida, zbog čega se za javni, stambeni i transportni sektor, kao i industriju predlaže elektrifikacija.

Chowdhury i saradnici su analizirali elektroenergetski sistem 12 zemalja Južne Afrike [10], čija je proizvodnja energije još uvek bazirana na upotrebi uglja (60%). U radu su sveobuhvatnim modelima, koji su uključivali prostornu i vremensku varijabilnost elektroenergetskog sistema, ispitivane mogućnosti za smanjenje emisije CO<sub>2</sub> do 2040, kroz analizu troškova energenata, mogućnosti za skladištenje i prenos energije, kao i važećih zakonskih regulativa. Utvrđeno je da su potencijali za proizvodnju električne energije iz vetra i sunca veći od očekivanih elektroenergetskih potreba. Prilikom utvrđivanja potencijala obnovljivih izvora energije, izuzete su urbane gradske površine, zaštićena područja, kao i šume. Iako u ovom regionu hidroenergija ima veliki potencijal, u svim scenarijima gotovo polovina planiranih hidroenergetskih kapaciteta nije ekonomski opravdana. Sa druge strane, ukoliko se nastavi sadašnji trend razvoja tehnologija i troškova, očekuje se da će energija vetra i solarna energija postati ekonomski najprihvatljivije i da će postati dominantni energenti za proizvodnju električne energije u regionu.

Alizdeh i saradnici [11] su ispitivali mogućnosti za uključivanje OIE u energetske sistem Irana. Analizom ekonomskih tokova, rizika i prednosti utvrđeno je da će solarna energija i energija vetra u budućnosti biti visoko kotirani na lestvici prioriteta. Slična analiza sprovedena je i za elektroenergetski sistem Tajvana, koji uvozi više od 95% energije [12]. U radu se ističe da je u ovakvom, uvozno zavisnom sistemu, važno omogućiti održiv prelazak na OIE, uz jasno rangiranje prioriteta.

Za postizanje klimatski-neutralnog energetskeg sistema u Ekvadoru razmatrano je više perioda na osnovu kojih će 2050. godina da rezultira energetskeg sistemom koji se zasniva samo na upotrebi OIE [13]. Pretpostavlja se da će se, tokom godina, usvajanje državnih regulativa dešavati spontano, uz osnaživanje procesa energetske tranzicije. Ističe se da ova promena predstavlja složen društveno-ekonomski proces u kome se sve predložene mere moraju analizirati iz ugla svih zainteresovanih strana, kako bi njihova implementacija imala pozitivan efekat na kvalitet života građana.

Na nivou Evrope, energetska planiranja analizirano je na nivou EU, Ujedinjenog Kraljevstva (UK), Jugoistočne Evrope i Severozapadne Evrope, kao i Zapadnog Balkana.

Dugoročno planiranje energetskega sistema EU do 2050. godine, koje se zasniva na upotrebi obnovljivih izvora energije u elektroenergetskom i transportnom sektoru, ispitali su Potrč i saradnici [14]. Optimizacija, koja je zasnovana na dinamičkim promenama i analizi budućih energetskega tokova, koji uključuju unapređenje energetske efikasnosti, dostupnost obnovljivih izvora energije, kao i investicionih i proizvodnih troškova i primenu novih tehnologija, sprovedena je primenom modela mešovite celobrojne nelinearne programiranja (eng. mixed-integer linear programming (MILP)). Na osnovu rezultata može se zaključiti da će, prema ovom modelu, u prvim godinama najviše obnovljive energije nastajati iz vetra, dok će se učešće fotonaponskih panela povećati nakon 2030. godine. Do 2050. godine se očekuje da će solarni paneli proizvoditi 43% ukupne električne energije iz obnovljivih izvora. Kada je reč o transportnom sektoru, očekuje se da bioetanol može da zameni 85% naftnih derivata. U radu se ističe da će primena novih tehnologija imati veliki uticaj i na društveni aspekt, jer se očekuje da će njihova integracija u energetskega sistem da dovede do otvaranja više od 1.512.000 novih radnih mesta. Sa druge strane, Connolly i saradnici [15] su analizirali energetskega sistem EU koji, pored elektroenergetskog i transportnog sektora, uključuje i industriju i sektor zgrada. Sveobuhvatni pristup omogućava primenu pametnog energetskega sistema, čime se smanjuju toplotni gubici i povećava efikasnost. Istaknuto je da prikazani model ne predstavlja konačno rešenje, već utvrđuje korake čijim se sprovođenjem omogućava kreiranje efikasnog energetskega sistema. U ovoj analizi pokazano je da je u urbanim sredinama najprikladnije rešenje za dostizanje ugljenične neutralnosti zasnovano na kombinaciji daljinskog grejanja i toplotnih pumpi. Pored toga, pokazano je da je daljinsko grejanje energetskega efikasnije rešenje, sa manjom emisijom CO<sub>2</sub> od alternativnih rešenja u kojima se koristi prirodni gas. U transportnom sektoru se, pored upotrebe električnih vozila, predlaže upotreba vodonika i sintetičkih goriva, poput e-metana i e-metanola. U poređenju sa scenarijom u kom bi budući energetskega sistem ostao nepromenjen, predloženi način energetskega organizovanja bi mogao da poveća troškove za 10-15%. Međutim, treba uzeti u obzir da predloženi energetskega sistem može da doprinese otvaranju velikog broja novih radnih mesta. Autori ističu da je želja za postizanjem klimatski neutralnog društva visoko na lestvici za ostvarivanje ciljeva Pariškog sporazuma, ali da globalni cilj može da bude postignut samo uz aktivni doprinos svakog regiona i svake zemlje.

Energetskega sistem bez emisije ugljen-dioksida na nivou regiona Jugoistočne Evrope je moguć kroz izmene i povezivanje svih energetskega sektora. Analizom osetljivosti pokazano je da je održiva upotreba biomase u ovom delu Evrope ostvariva, kroz povećanje efikasnosti međusektorskom integracijom, jer se povećana upotreba biomase u sezonama suša, kada je nizak potencijal vodotokova, može nadomestiti tokom kišnih perioda kada je potencijal vodotokova značajan [16].

Chaudry i saradnici su analizirali energetskega snabdevanje jedne regije u UK [17], uz uslov postizanja nulte emisije ugljen-dioksida do 2050. godine. Proučavajući sistem transmisije i distribucije energije u elektrodistributivnom sistemu, utvrđeno je da je ekonomski najopravdanija mera elektrifikacija sektora grejanja, uz infrastrukturna unapređenja. Pri razmatranju i usvajanju ovih mera, autori ističu da je saradnja i uključivanje donosioca odluka važna, jer se samo tako može dostići neometena energetskega tranzicija.

Dekarbonizaciju Danske, kroz pristup primene pametnih energetske sistema, predstavili su Mathiesen i saradnici [18]. U studiji je prikazana analiza kombinovane upotrebe gasifikovane biomase, gasnog skladištenja, upotrebe električnih vozila i sintetičkih goriva u sektoru transporta. Napominje se da je kod složenih analiza, poput ove, neophodno uzeti u obzir predviđene uštede primarne energije, kroz unapređenje efikasnosti sistema. Energetska tranzicija u Danskoj je analizirana i u radu [19], za koji se može reći da predstavlja priručnik za planiranje budućih energetske sistema na nacionalnim nivoima. Predložena metodologija je sprovedena na primeru pomenute zemlje, uz osvrt na bazni (referentni) scenario, prelaznu godinu (2030.), kao i na 2045., za kada je predviđeno potpuno odricanje od upotrebe fosilnih goriva.

Mogućnost za postizanjem energetske sistema zasnovanog samo na upotrebi OIE u Makedoniji analizirali su Ćosić i saradnici [20]. Ostvarivanje ovog scenarija je moguće kroz visok stepen unapređenja energetske efikasnosti, integraciju energetske sektora i uz značajno iskorišćenje potencijala biomase, solarne i energije vetra, uključujući primenu novih tehnologija za skladištenje energije. U radu se navodi da je, za posmatrano podneblje, scenario u kome se 50% ukupne energije dobija iz OIE realističniji sa tehnokonomskog aspekta u poređenju sa sistemom koji se zasniva samo na upotrebi OIE.

U doktorskoj disertaciji Batas-Bjelića analiziran je elektroenergetski sistem Republike Srbije do 2030. godine, uz spregu softvera EnergyPLAN i GENOPT [21]. Metodologija se bazira na usklađivanju energetske politika Srbije i EU. Kroz spregnutu metodu, na bazi simulacija, model je optimizovan u zavisnosti od ekonomskog aspekta i emisije CO<sub>2</sub>.

Optimalni model budućeg elektrodistributivnog sistema u Rumuniji, definisan je promenom linearnog programiranja [22]. Elektroenergetski sistem ove zemlje za 2040. godinu, kada je planiran prestanak rada termoelektrana, analiziran je na osnovu energetske scenarija za 2020. i 2030. godinu. Nadoknada energije dobijane iz fosilnih goriva se može postići ukoliko se udeo OIE udvostruči do 2040, čime se emisije CO<sub>2</sub> može smanjiti za 87%.

Prina i saradnici [23] razvili su metodologiju za optimizaciju rezultata dobijenih softverom EnergyPLAN. Novi metodološki okvir zasnovan je na višekriterijumskoj optimizaciji budućih energetske scenarija. Autori su metodologiju primenili na analizi mogućnosti energetske tranzicije u Italiji do 2030. godine [24]. Budući energetski sistem, optimizovan u funkciji od minimalnih troškova i emisije, kreiran je u skladu sa državnim akcionim planom. Utvrđeno je da se, uz nepromenjene troškove energije, emisija CO<sub>2</sub> može smanjiti za 10%.

G. Parrado-Hernando i saradnici [25] su ispitivali mogućnost za postizanjem nisko-ugljeničnog energetske sektora u Španiji do 2050. godine, poredeći referentnu 2017. godinu sa 2030. i 2050. godinom. Pokazano je da Španija može dostići postavljene ciljeve, uz napomenu da se mogu pojaviti kritični sati za sigurno snabdevanje.

Kako gradovi imaju značajnu ulogu u predvođenju energetske tranzicije, oni su postali značajan predmet istraživanja u naučnim krugovima. Batulaga i Dhakal [26] su ispitivali mogućnosti za ostvarivanje energetske tranzicije do 2050. godine u najhladnijem glavnom gradu na svetu, Ulan Bator (orig. Ulaanbaatar) u Mongoliji, iz aspekta različitih zainteresovanih strana. Odgovori variraju u zavisnosti od ispitivane grupe, ali je pokazano da je najveći nedostatak u sprovođenju energetske tranzicije na primeru ovog grada leži u neusklađenosti između vladinih tela i različitih zainteresovanih strana, dok je politička nestabilnost identifikovana kao značajan rizik. Isti zaključci su izvedeni u radu gde je analizirana mogućnost postizanja brze dekarbonizacije u gradovima [27], uz osvrt na

značajne potencijale za unapređenje energetske efikasnosti u sektorima zgrada i saobraćaja, kao i iskorišćenja energetskeg potencijala otpada. Kao glavna prepreka za realizaciju ciljeva navodi se nedostatak delovanja svih zainteresovanih strana - od eksperata, predstavnika lokalnih zajednica i političara na gradskom nivou, jer je klimatska neutralizacija moguća samo kroz njihovo zajedničko delovanje. Grad Masdar u Ujedinjenim Arapskim Emiratima predstavlja primer novog, održivog i klimatski neutralnog grada [28]. Razvojni put ovog grada pokazuje da je realizacija energetskeg sistema bez emisija zasnovana na detaljnom dugoročnom planiranju, kroz uključivanje svih zainteresovanih strana i uz visoke investicione troškove.

Smanjenju emisije ugljen dioksida u gradovima je često pristupano kroz analizu samo jednog energetskeg sektora [29], [30] ili kroz analizu mogućnosti instaliranja pojedinačnih tehnologija, najčešće fotonaponskih (PV) panela ili solarnih kolektora [31]-[33]. Takođe, energetske planiranje na lokalnim nivoima je često razmatrano sa aspekta analize sektora grejanja [34], [35]. Utvrđivanje energetske potreba za grejanjem sa ciljem povećane upotrebe OIE na nivou grada, sprovedeno je na primeru Osjeka, Hrvatska [35]. Autori su analizirali više scenarija i utvrđeno je da daljinske grejanje ima značajnu ulogu u budućim energetskeg sistemima koji integrišu varijabilne OIE [6]. Iako pristupi u kojima se u obzir uzimaju samo određeni energetske sektori može da obezbedi smanjenje emisije, dugoročno posmatrano oni limitiraju iskorišćenje energetskeg potencijala gradova. Međusektorska integracija u procesu dekarbonizacije na lokalnim nivoima analizirana je na primeru više evropske gradova, kroz različite pristupe. U gradovima Zagreb, Hrvatska [36] i Frederikshavn, Danska [37] analizirani su lokalni potencijali i povezivanje različite sektora i upotreba tehnologija, kako bi se postigla integracija 100% obnovljive energetskeg sistema. Međutim, pri analizama su zanemareni nacionalni ciljevi, dok su posmatrane samo lokalne emisije u energetske intenzivnim sektorima poput industrije i transporta. Ovakav pristup može da rezultira nizom prepreka, jer je neophodno uvrstiti lokalne strategije u nacionalne interese i na taj način omogućiti finansijsku podršku na nacionalnom nivou [38]. Pored toga, svođenje nacionalne politika na lokalni nivo omogućava sagledavanje decentralizovanog karaktera energetskeg izvora i njihovo maksimalno iskorišćenje [39]. Slični zaključci su izvedeni na studiji slučaja grada Hjørring, Danska [40] gde je pokazano da su neophodni bolji kanali komunikacije na različite nivoima energetskeg planiranja i da je podsticanje lokalnog delovanja moguće ukoliko kreiranje dugoročne lokalne strategija postane obavezujuće. U prilog ovakvom pristupu govore i radovi gde je svođenje nacionalne strategije na lokalni nivo sprovedeno na primeru više gradova u Danskoj. Mogućnost postizanja klimatski neutralnog grada u Danskoj, prikazana je na primeru grada Olborga (orig. Aalborg) [41]. U radu je analiziran časovni i godišnji bilans energije, u zavisnosti od različite učešća apsorpcionih toplotne pumpe. Prikazana je tehnološko-ekonomska analiza za različite scenarije, koji podrazumevaju različite kapacitete vetro elektrana u zavisnosti od dostizanja pozitivnog godišnjeg bilansa električne energije iz OIE. Ovaj grad je takođe analiziran u radu u kome su ispitivane mogućnost formiranja pametnog energetskeg sistema zasnovanog na upotrebi OIE [42]. U ovom radu grad nije posmatran kao izolovana celina u državi, već je budući energetske sistem modeliran na osnovu ujednačene raspodele državnih energetskeg potreba, u zavisnosti od udela populacije. Studijama slučaja [41]-[44] je pokazano da uspostavljanjem pametnih energetskeg sistema, kroz razmatranje nacionalne strategija, može da se postigne značajna redukcija emisija i da gradovi mogu da predstavljaju uporišta energetske tranzicije i mesta u kojima se ostvaruju nacionalni energetske ciljevi. Istovremeno, kreiranje strateške energetskeg okvira grada može da doprinese racionalnijoj upotrebi zemljišta, energije i kreiranju novih politika.

Posledice nacionalnih politika na lokalni nivo analizirane su i na primeru drugih država u Evropi [45], [46] i ustanovljeno je da uspešno energetske planiranje u gradovima počiva na vezi između lokalnih i nacionalnih ciljeva kroz razmatranje energetskih sektora i uključivanje svih zainteresovanih strana. Jačanje razumevanja, saradnje i dijaloga ključni su u procesu ostvarivanja energetskih promena koje zahtevaju vreme, znanje i značajna finansijska ulaganja. Mogućnost dekarbonizacije energetskog sektora grada u Italiji analizirana je kroz integraciju različitih predloga energetskih sistema i teorijom odlučivanja uz korišćenje analize osetljivosti, koja se zasniva na prioritizaciji tehničkih aspekata [47]. Na primeru analiziranog grada pokazano je da je, uz utvrđivanje optimalnog rešenja, moguće postići klimatsku neutralnost na gradskom nivou.

Poređenjem simulacionih i optimizacionih modela na primeru studije slučaja [48] utvrđeno je kako pristup modeliranju utiče na kreiranje budućih energetskih sistema grada. Prikazano je da je za optimizacioni model potrebno više vremena i da je neophodno posedovanje znanja u oblasti optimizacije i primene ovih modela. Sa druge strane, simulacija korak-po-korak, u kojoj se posmatra uticaj određenih mera na posledice ponašanja sistema može da omogući uključivanje lokalnih aktera i bolje razumevanje sistema i kao takva, prihvatljivija je za lokalne donosioce odluka.

Novi alat za modeliranje energetskih sistema na lokalnom nivou predstavljen je na studiji slučaja opštine Oud-Heverle (orig. Oud-Heverlee), Belgija [49]. Razvijeni alat, MUSEPLAN, pojednostavljuje proces modeliranja i evaluacije scenarija, omogućavajući lokalnim planerima da aktivno učestvuju u planiranju energetskih sistema. Rad identifikuje četiri glavna izazova prilikom energetskog planiranja na lokalnom nivou: pristup podacima, dizajn i razvoj scenarija, svest o tehnologijama, i složenost postojećih alata. U preglednom radu [50] analizirane su 23 studije slučaja gradova koji teže ka postizanju klimatske neutralnosti. Za svaki od njih prikazane su tehnologije za proizvodnju i skladištenje energije, kao i njihov uticaj na redukciju energetskih potreba i emisije CO<sub>2</sub>. Odgovarajući odabir tehnologija je karakteristika svakog grada i zavisi od klimatskih faktora analiziranog područja, te se ne može smatrati da univerzalni model postoji. Zaključeno je da neuspeh ka realizaciji klimatske neutralnosti u gradovima nastaje kao posledica neadekvatne primene tehnologija i nedostatka sistema za monitoring gradskih energetskih mreža.

Analizom dosadašnjih literaturnih podataka utvrđeno je da je mogućnost dekarbonizacije u gradovima, kroz osvrt na nacionalne strategije, ispitivana na primeru više Evropskih gradova, prikazanih na slici 2.1.



Slika 2.1. Evropski gradovi u kojima je analizirana dekarbonizacija u skladu sa nacionalnim energetske ciljevima

Analizirani gradovi su uglavnom locirani u zemljama Zapadne Evrope, kao i u zemljama koje su već odmakle u procesu energetske tranzicije i čije su politike po tom pitanju jasno iskazane. Kao što se sa slike 2.1. može videti, energetske planiranja na nivou gradova do sada nije sprovedeno na primeru gradova Zapadnog Balkana, u zemljama čiji se energetske sektor značajno oslanja na upotrebu fosilnih goriva. Takođe, dosadašnja istraživanja se ne zasnivaju na metodologiji koja uključuje mišljenja različitih zainteresovanih strana u proces energetske promena grada u kome žive.

### 3. TEORIJSKA RAZMATRANJA

#### 3.1. Upotreba primarne i finalne energije u svetu, Evropi i Republici Srbiji

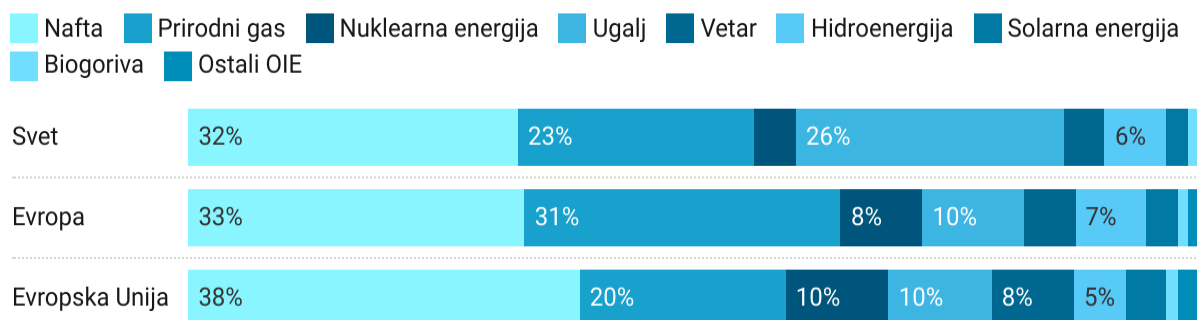
##### 3.1.1. Upotreba primarne energije

Kovid kriza, koja je tokom 2020. godine uticala, između ostalog, i na energetske sektor, izazvala je prividno smanjenje potrošnje primarne energije na globalnom nivou, kada je korišćeno 156,7 PWh [51]. Tokom 2021. godine zabeležen je ponovni rast u upotrebi primarne energije za 5,5% u odnosu na prethodnu godinu, što predstavlja do sada najveći zabeležen porast na godišnjem nivou. Međutim, ukoliko se potrošnja 2021. uporedi sa podacima iz 2019. godine, beleži se porast od 1,1% [52]. Sa druge strane, godišnja upotreba primarne energije po glavi stanovnika je u toku 2021. godine iznosila 20.848 kWh/stanovnik, dok je u 2019. godine jedinična potrošnja bila znatno viša, 21.009 kWh/stanovnik [53].

U ukupnom svetskom bilansu za 2021. godinu, najviše primarne energije je dobijeno upotrebom fosilnih goriva (82,28%), dok je udeo nuklearne energije iznosio 4,25 %, a OIE 13,47% [54]. U poređenju sa 2021. godinom, upotreba primarne energije na svetskom nivou je u 2023. godini povećana za 4%. Povećane potrebe za primarnom energijom zabeležene su na svim kontinentima (najviše na bliskom istoku, za 9%), izuzev Evrope, gde se beleži smanjenje za 6% [55]. U 2023. godini smanjena je upotreba fosilnih goriva za 0,81%, kao i nuklearne energije (za 0,29%).

Na nivou cele Evrope, tokom 2021. godine utrošeno je 29,99 PWh primarne energije, a na nivou zemalja EU 16,7 PWh. U toku 2023. godine došlo je do smanjenja upotrebe primarne energije, kako na nivou cele Evrope (4%), tako i na nivou EU (6%). U poređenju sa upotrebom primarne energije u toku 2005. godine, od svih zemalja EU, Grčka je ostvarila najveće smanjenje u upotrebi primarne energije (gotovo 30%), dok je porast zabeležen u Poljskoj (približno 6%) [56].

Uporedni prikaz energetskog miksa u upotrebi primarne energije, u svetu, Evropi i Evropskoj Uniji za 2023. godinu predstavljen je na slici 3.1.

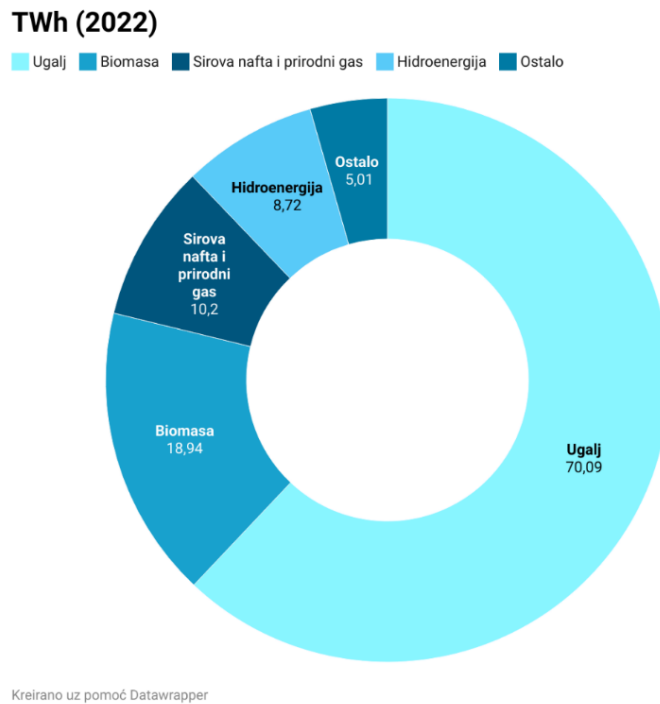


Created with Datawrapper

Slika 3.1. Izvori primarne energije u svetu i Evropi u toku 2023. godine

Prema energetsom bilansu Republike Srbije [57] u Srbiji je tokom 2022. godine ukupno korišćeno 187 TWh primarne energije, od čega najviše uglja (49 %), zatim nafte i naftnih derivata (32%), prirodnog gasa (8%) i hidro energije (6%).

Na osnovu poslednjih dostupnih rezultata<sup>1</sup>, prikazanih na slici 3.2., u Republici Srbiji je, u ukupnom bilansu proizvodnje primarne energije (163 TWh) najviše korišćen ugalj (70%), biomasa (17%), nafta i prirodni gas (10%), kao i hidroenergija (9%). Ostali energenti su korišćeni u zanemarljivim udelima [58].

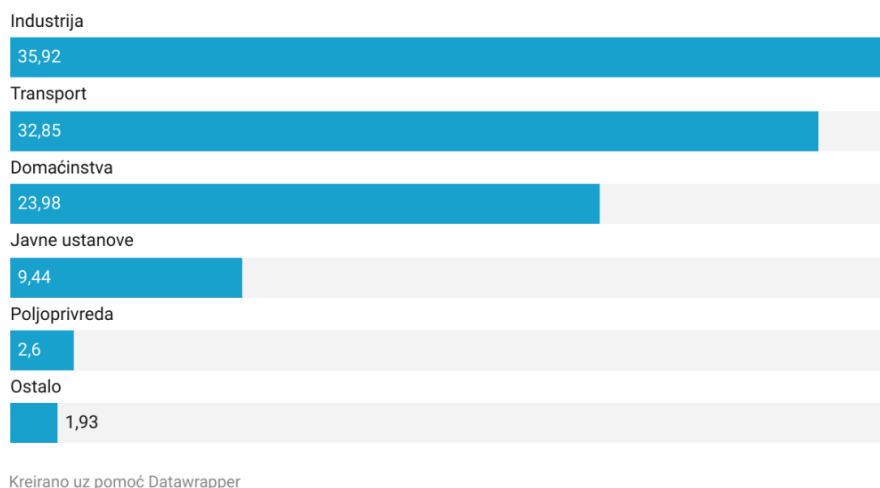


Slika 3.2. Proizvodnja primarne energije u Srbiji 2022

<sup>1</sup> Dostupni statistički podaci su prikupljeni i analizirani u julu 2025. godine

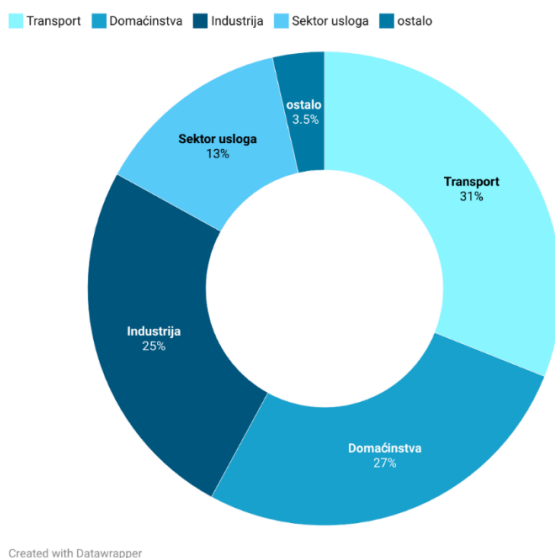
### 3.1.2. Upotreba finalne energije u svetu

Kada je u pitanju upotreba finalne energije, u toku 2023. godine na globalnom nivou je korišćeno 118 PWh, od čega najviše nafta i naftni derivati (47 PWh), električna energija (25,6 PWh) i prirodni gas (19,8 PWh). Značajna je upotreba biogoriva i otpada (11 PWh) i uglja (10 PWh), dok je najmanja ostvarena potreba za toplotnom energijom (4,2 PWh) [59]. Finalna energija je najviše korišćena u sektorima industrije, transporta i u domaćinstvima (slika 3.3.).



Slika 3.3. Upotreba finalne energije u sektorima na globalnom nivou (PWh)

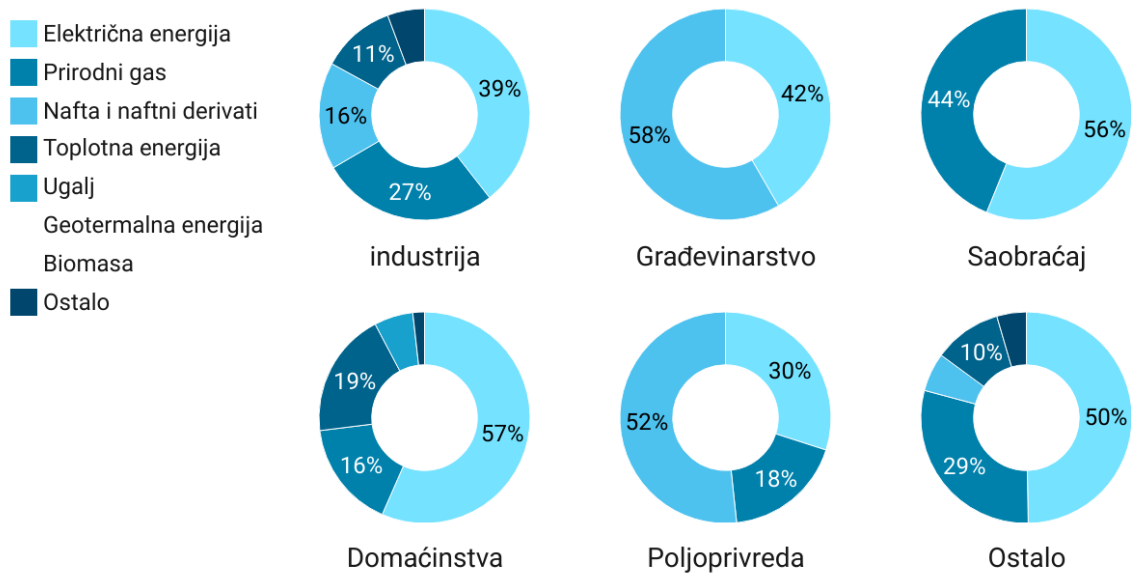
Na nivou EU u toku 2022 godine korišćeno je 10,5 PWh finalne energije, od čega najviše nafte i naftnih derivata (37%), električne energije (23%), prirodnog gasa (20%) [60]. Sa slike 3.4. se vidi da je najviše finalne energije korišćeno u sektoru transporta, industrije i u domaćinstvima.



Slika 3.4. Procentualna raspodela korišćene energije u sektorima u Evropskoj Uniji (2022. godina)

Na osnovu statističkih podataka dostupnih za Republiku Srbiju, u toku 2023. godine korišćeno je 109 TWh finalne energije [61]. Od ukupne finalne energije, potrebe za

električnom energijom su bile najveće (26%), zatim za naftom i naftnim derivatima (33%), biomasom (17%) i prirodnim gasom (13%). Potrebe za toplotnom energijom su iznosile 8% ukupne potražnje. Na slici 3.5. je prikazana procentualna raspodela upotrebe finalne energije u različitim sektorima.

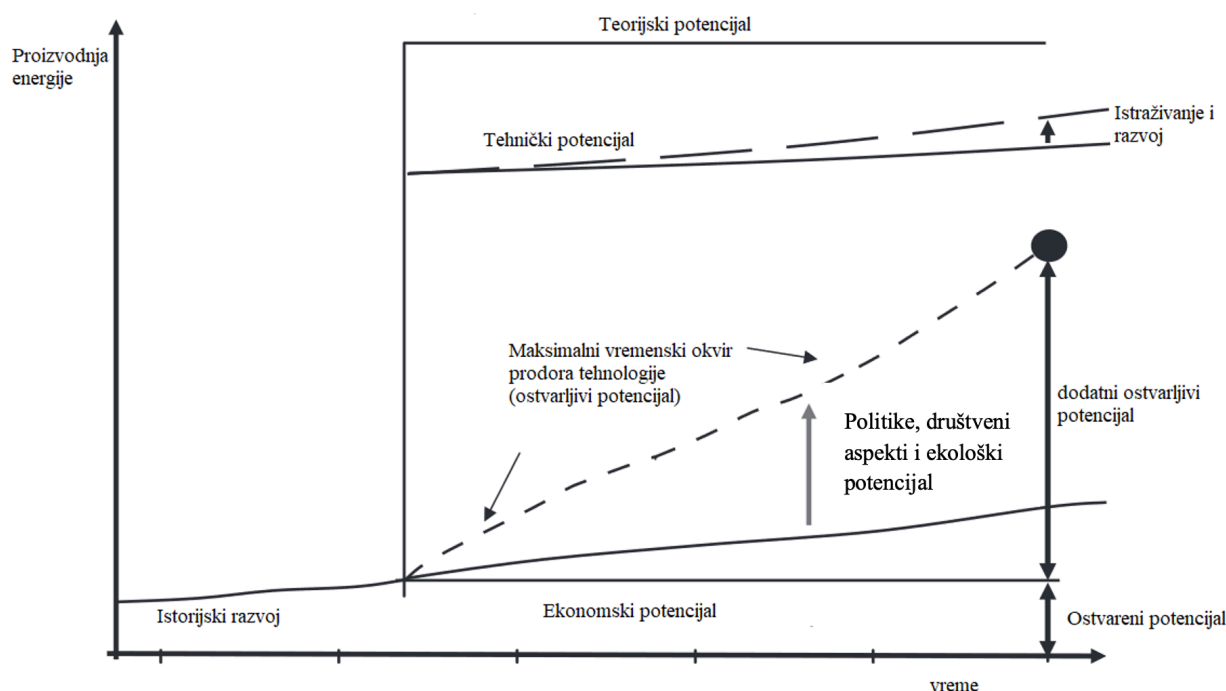


Created with Datawrapper

Slika 3.5. Upotreba finalne energije u različitim energetskektorima u Republici Srbiji, u toku 2023. godine

## 3.2. Energetski potencijal OIE

Potencijal OIE se može posmatrati sa aspekta teorijskog potencijala, koji predstavlja najveći mogući potencijal obnovljive energije u posmatranom regionu, uzimajući u obzir karakteristike lokaliteta. Sa druge strane, tehnički potencijal predstavlja onaj vid teorijskog potencijala koji je izvodljiv primenom dostupnih tehnologija. Dakle, on u obzir ne uzima samo karakteristike podneblja, već i određena ograničenja, poput mogućnosti upotrebe tehnologija, njihovu efikasnost ili dostupnost na posmatranoj lokaciji. Kada se u obzir uzmu ograničenja tržišta, društveni aspekt i politike, kao i ekološki potencijal<sup>2</sup> analiziranih lokaliteta, reč je o ostvarljivom potencijalu, čija gornja granica može da bude tehnički potencijal, ali je često niža od tehničkog potencijala (slika 3.6.).



Slika 3.6. Određivanje potencijala OIE [62]

U tabeli 3.1. prikazan je pregled tehničkog i teorijskog potencijala OIE na globalnom nivou, zasnovanim na [63]. Podaci u tabeli ukazuju na to da postoji značajna mogućnost za iskorišćenjem OIE, ali da se još uvek nisu prevazišle sve barijere za njihovim iskorišćenjem. Iskorišćenje potencijala OIE može biti povećano kroz ulaganje u nove tehnologije i istraživanja, kao i kroz podsticajne politike na svim nivoima. Sa druge strane, na osnovu literaturnog pregleda može se zaključiti da procenjene vrednosti tehničkog potencijala variraju u zavisnosti od literaturnog izvora, što u naučnim krugovima često pokreće pitanja korisnosti procena tehničkog potencijala [64], ali i ukazuje na potrebe za detaljnijim mapiranjem teritorijalno specifičnih OIE.

<sup>2</sup> Ekološki potencijal predstavlja potencijal posmatranog lokaliteta za proizvodnju energije iz OIE, uz minimalni uticaj na životnu sredinu, uz očuvanje biodiverziteta, zemljišta i vode i prirodnih ekosistema

Tabela 3.1 Tehnički i teorijski potencijal OIE u svetu

<i>Izvor</i>	<i>Tehnički potencijal [PWh]</i>	<i>Teorijski potencijal [PWh]</i>
Biomasa	69,44	805,55
Geotermalna energija	1388,89	3,8x10 <sup>7</sup>
Hidroenergija	13,89	41,67
Solarna energija	444,44	1,08x10 <sup>6</sup>
Energija vetra	166,67	1666,67

Na osnovu podataka prikazanim u Strategiji razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine [65] kao i u [66], ukupni godišnji raspoloživi tehnički potencijal u OIE je 108,57 TWh/godina (tabela 3.2.). Važno je napomenuti da je neiskorišćeni tehnički potencijal svih OIE 83,3 TWh/godina, što čini gotovo 50% ukupne finalne energije iskorišćene u Srbiji tokom 2021. godine.

Tabela 3.2 Pregled potencijala OIE u Republici Srbiji

	TWh/godina		%
	<i>Neiskorišćeni raspoloživi tehnički potencijal</i>	<i>Ukupni raspoloživi tehnički potencijal</i>	<i>Udeo neiskorišćenosti potencijala</i>
Biomasa	27,84	40,10	69
Hidro energija	8,96	19,54	46
Energija vetra	27,72	29,12	95
Energija sunca	17,6	17,7	99
Geotermalna energija	1,16	2,09	55

### 3.3. Pregled tehnologija za proizvodnju, konverziju, skladištenje i uštedu energije

#### 3.3.1. Pregled tehnologija za proizvodnju električne energije

Kao što je napomenuto u poglavlju 3.1.2, električna energija predstavlja jedan od najznačajnijih finalnih oblika energije u svetu. Tehnologije za njenu proizvodnju su, najčešće, kategorisane kao centralizovani ili decentralizovani sistemi za proizvodnju električne energije (tabela 3.3.). Centralizovani sistemi za proizvodnju električne energije se zasnivaju na proizvodnim jedinicama značajnih kapaciteta (>100 MW), u kojima se električna energija proizvodi za veći broj korisnika. U centralizovanim energetske sistemima balansiranje opterećenja i održavanje stabilnosti, kao i upravljanje proizvodnjom, najčešće je moguće unutar kontrolnih centara u samim postrojenjima. U ovom slučaju, proizvedena električna energija visokog napona se, visokonaponskim dalekovodima, prenosi do distributivnih mreža, a zatim do krajnjih korisnika koji su udaljeni od proizvodnih jedinica, zbog čega dolazi do gubitaka u prenosu energije. Kao najznačajnije prednosti centralizovanih sistema se ističu stabilnost mreže i nezavisnost od spoljašnjih vremenskih faktora, što doprinosi olakšanom balansiranju proizvodnje. Istovremeno, centralizovani sistemi su konvencionalni oblici proizvodnje električne energije zbog čega su deo postojećih i jasnih regulatornih okvira. Međutim, proizvodnja električne energije u centralizovanim jedinicama je još uvek najčešće u vezi sa upotrebom fosilnih goriva, što rezultira značajnim emisijama CO<sub>2</sub>. Upravo zbog toga dolazi do gašenja postojećih blokova termoelektrana, pogotovo onih koje se zasnivaju na upotrebi uglja. Sa druge strane, izgradnja centralizovanih sistema sa niskim emisijama, poput velikih hidroelektrana, nuklearnih, geotermalnih i centralizovanih koncentrisanih solarnih elektrana, zahteva značajne investicije i troškove održavanja. Istovremeno, njihova izgradnja je uslovljena postojanjem lokalnih specifičnosti, poput vodotokova ili značajnog geotermalnog potencijala, dok je primena nuklearne energije još uvek predmet polemika u mnogim zemljama, kao posledica istorijskih dešavanja, nuklearnih katastrofa i (još uvek nerešenog) pitanja odlaganja nuklearnog otpada.

Električna energija se takođe može proizvoditi u decentralizovanim sistemima, koji su najčešće uslovljeni teritorijalnim specifičnostima lokaliteta. Kao takvi, decentralizovani sistemi mogu da obezbede demokratizaciju energetske sektora i smanjivanje monopola nad proizvodnjom energije. Takođe, smanjuju uvoznju zavisnost i diversifikuju proizvodnju električne energije, čime se pozitivno utiče na sveobuhvatnu stabilnost snabdevanja zemlje. Proizvodne jedinice mogu da imaju različite proizvodne kapacitete, od nekoliko kW, do nekoliko MW. Najveći problem kod integracije decentralizovanih energetske sistema se ogleda u njihovoj varijabilnosti proizvodnje, koja zavisi od vremenskih uslova, iziskujući dodatna novčana ulaganja za skladištenje energije ili integraciju i kreiranje pametnih energetske sistema. Izgradnja velikih proizvodnih kapaciteta varijabilnih obnovljivih izvora energije, bez prethodnog strateškog planiranja, može negativno da se odrazi na postojeću elektrodistributivnu mrežu, izazivajući zagušenje. Međutim, upotreba decentralizovanih sistema je od izuzetne važnosti u borbi protiv klimatskih promena, jer njihova eksploatacija ne dovodi do povećanja emisije CO<sub>2</sub>. Takođe, decentralizovani energetske sistemi omogućavaju građansko učešće u procesima energetske promena i, kao takvi, mogu da doprinesu razvoju lokalnih zajednica i kreiranju lokalnih poslova. U slučajevima kada delovi zemlje nisu povezani sa

elektrodistributivnom mrežom, decentralizovani energetske sistemi mogu omogućiti lokalno snabdevanje, korišćenjem teritorijalno dostupnih OIE.

Tabela 3.3 Tehnologije za proizvodnju električne energije

<i>Tehnologija</i>	<i>Izvor energije</i>	<i>Efikasnost</i>	<i>Referenca</i>
<i>Centralizovani sistemi za proizvodnju energije</i>			
Termoelektrane	Ugalj, gas, biomasa	33-40%	[67]
Nuklearne elektrane	Uranijum	33-37%	[68]
Velike hidroelektrane	Energija rečnih vodotokova	90%	[69]
Geotermalne elektrane	Geotermalna energija	10-20%	[70]
Centralizovane koncentrišuće solarne elektrane	Solarna energija	15-25%	[71], [72]
<i>Decentralizovani sistemi za proizvodnju električne energije</i>			
Solarne elektrane	Solarna energija	15-20%	[73]
Vetroelektrane na kopnu	Eolska energija	35-45	[74], [75]
Vetroelektrane na moru	Eolska energija	40-50	[76], [77]
Male hidroelektrane	Energija (malih) rečnih vodotokova	60-90%	[69]
Energija talasa i plime i oseke	Energija talasa, plime i oseke	10-30% *	[78], [79]

\*tehnologije su još uvek u razvoju

### 3.3.2. Pregled tehnologija za centralizovanu proizvodnju toplotne energije

Toplotna energija se može proizvoditi u individualnim ložištima ili u centralizovanim postrojenjima za proizvodnju toplotne energije u sistemima daljinskog grejanja. Proizvodnja toplotne energije u sistemu daljinskog grejanja se ogleda u povećanoj ukupnoj efikasnosti u poređenju sa individualnim ložištima, pogotovo u gusto naseljenim sredinama ili industrijskim centrima. Sistem daljinskog grejanja se koristi kako bi se zadovoljile potrebe za toplotom za zagrevanjem prostora, zagrevanjem sanitarne potrošne tople vode ili u nisko temperaturnim industrijskim procesima. U ovim sistemima, toplotna energija se proizvodi u centralizovanim jedinicama, toplanima, i distributivnom cevnom mrežom se transportuje do krajnjih korisnika. Toplotni medijum u sistemima daljinskog grejanja je najčešće (vrela ili topla) voda i ona se, dovodnim vodom, dovodi do podstanica u zgradi krajnjih korisnika, gde predaje toplotu nosiocima toplote u zgradama u toplotnim razmenjivačima. Rashlađena voda se povratim vodom distributivne mreže vraća u toplanu gde se, dodavanjem nove količine toplote, postiže toplotni bilans u skladu sa količinom toplote koja je predata korisnicima i okolini u procesu distribucije, kao i krajnjim korisnicima.

Sistem daljinskog grejanja je prvi put primenjen krajem 19. veka [80] i tada je toplotni medijum bila vodena para. Ovakvi sistemi (tzv. „prva generacija daljinskog grejanja“) odlikovali su se visokim temperaturama ( $>200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) u dovodnom vodu i, kao glavni energent u toplanama je korišćen ugalj ili komunalni otpad. Kako su se ovi sistemi odlikovali velikim toplotnim gubicima, prvenstveno u sistemu transporta, vremenom je došlo do razvoja novih generacija daljinskog grejanja (slika 3.7.).

Vodena para je najpre zamenjena vrelom vodom („druga generacija daljinskog grejanja“), a zatim toplom („treća generacija daljinskog grejanja“). Smanjivanje temperature vode u dovodnom vodu rezultiralo je mogućom diversifikacijom toplotnih izvora, kao i iskorišćenjem otpadne toplote iz industrije i u ovoj (trećoj) generaciji daljinskog grejanja počinju da se koriste sistemi za monitoring i upravljanje potrošnjom energije. Naredna generacije daljinskog grejanja (tzv. „četvrta generacija daljinskog grejanja“) je od izuzetne važnosti kada je u pitanju povećana integracija OIE i proces dekarbonizacije<sup>3</sup>. Naime, četvrta generacija daljinskog grejanja (4GDH) se zasniva na primeni visoko efikasnih tehnologija i niskim gubicima u distributivnoj mreži, zbog smanjenja temperature u dovodnom vodu. Kako bi ovo bilo moguće, 4GDH podrazumeva upotrebu toplotne energije u zgradama visoke energetske efikasnosti i zato se analiza njene upotrebe još uvek često odnosi na sisteme budućnosti [81], u kojima postoji planiranje pametnih energetske sistema. Ovako planiran sistem daljinskog grejanja omogućava efikasnu i održivu upotrebu biomase, integraciju OIE, kao i upotrebu otpadne toplote iz industrije. Kako je temperatura vode uglavnom niža od  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , u ovim sistemima najčešće ne postoji potreba za dogrevanjem ili podizanjem temperature otpadne vode iz industrije. Takođe, omogućava integracije postrojenja za poligeneracije, u kojima se pored toplote primarno proizvodi gorivo. Primer ovakvog postrojenja je proces gasifikacije, u kome se primarno proizvodi etanol, ali se u sistemu daljinskog grejanja može koristiti generisana otpadna toplota.

Tehnologije koje se mogu koristiti za proizvodnju toplote u sistemima daljinskog grejanja prikazane su u tabeli 3.4. i detaljnije o načinima njihove eksploatacije se može pročitati u [80].

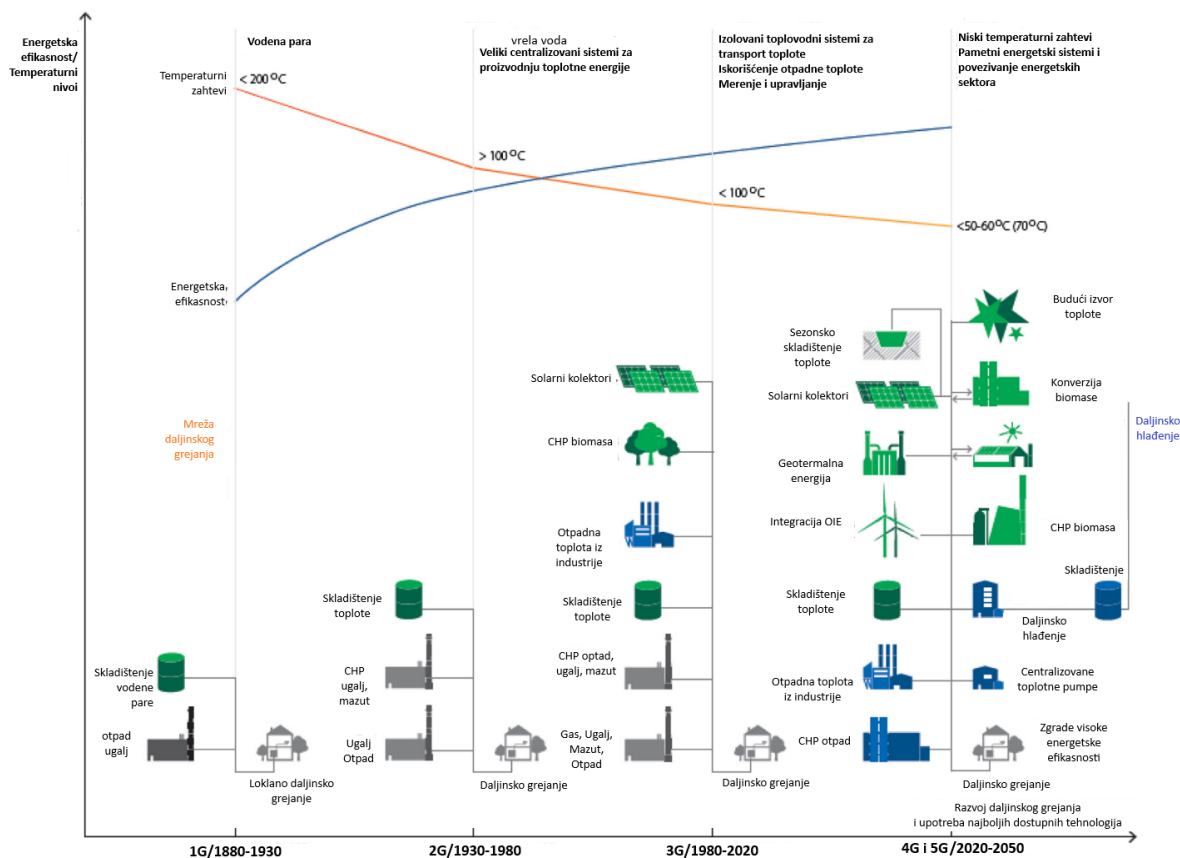
Tabela 3.4 Tehnologije za proizvodnju toplote energije u sistemima daljinskog grejanja

Kotlovi na čvrsta i tečna goriva
Kogeneraciona postrojenja (CHP (eng. Combined Heat and Power))
Spalionice otpada
Postrojenja za upotrebu otpadne toplote
Postrojenja za poligeneraciju
Geotermalno daljinsko grejanje
Toplotne pumpe (kompresione i apsorpcione) i čileri
Električni grejači tople vode
Nuklearno daljinsko grejanje
Solarna energija u sistemu daljinskog grejanja

Napominje se da u sistemima daljinskog grejanja veliku važnosti imaju sistemi za istovremenu proizvodnju toplotne i električne energije, tzv. kogeneraciona postrojenja

<sup>3</sup> U literaturi se može pronaći i termin „peta generacija daljinskog grejanja“. Autor ove doktorske disertacije smatra da, u osnovi, ne postoji značajna razlika u ovim pojmovima, i da se tzv. „peta generacija daljinskog grejanja“ zasniva na istim postulatima kao i „četvrta generacija daljinskog grejanja“.

(ili termoelektrane-toplane). Ova postrojenja se odlikuju daleko većim stepenima efikasnosti (80-90%) u poređenju sa postrojenjima za individualnu proizvodnju električne energije (<40%). Više o tehnologijama za istovremenu proizvodnju toplotne i električne energije može se pročitati u [82], kao i u [80].



Slika 3.7. Istorijski razvoj sistema daljinskog grejanja [81]

### 3.3.3. Tehnologije za konverziju biomase

Biomasa se kao energent može koristiti za proizvodnju električne i toplotne energije, kao i za generisanje novih goriva, primenom tehnologija za konverziju. Kako je biomasa gotovo ravnomerno rasprostranjena širom sveta, njena upotreba kao energenta je, takođe, široko rasprostranjena. S obzirom da ima ulogu u planiranju energetske sistema sa niskom emisijom ugljen-dioksida, od izuzetne je važnosti da njena upotreba ostane unutar granica koje se smatraju održivim (27 GJ/stanovniku godišnje) [83]. Shodno tome, neophodno je zameniti tehnologije za njenu konvencionalnu upotrebu (individualna ložišta, niskoefikasni kotlovi u centralizovanim sistemima), kao i tehnologije kojima se dobijaju neodrživa biogoriva prve generacije<sup>4</sup>, tehnologijama koje omogućavaju efikasnije i održivije iskorišćenje potencijala, kao i korišćenja otpadne toplote.

<sup>4</sup> Biogoriva prve generacije (bioetalol, biogas i biodizel) se smatraju neodrživim, zato što način uzgajanja biomase za njihovo generisanje ugrožava uzgajanje biomase za prehrambene potrebe. Biogoriva druge generacije se dobijaju iz neiskorišćenih delova biomase, kao i iz biomase koja nije namenjena u prehrambene svrhe i shodno tome se može smatrati održivom.

Procesi za konverziju biomase prikazane su u tabeli 3.5., a više o njima se može pročitati u [84] i u [85].

Tabela 3.5 Procesi za konverziju biomase

<i>Podela procesa</i>	<i>Tehnologije</i>	<i>Osnovne karakteristike</i>
Mehanički postupci za konverziju biomase	Proizvodnja peleta i briketa	Presovano usitnjeno drvo pogodno za upotrebu u kotlovima.
Termohemijski proces za konverziju biomase	Sagorevanje	Generisanje toplote dolazi usled oksidacije energetskih komponenti.
	Gasifikacija	Proces se odvija u ograničenom prisustvu kiseonika i predstavlja konverziju čvrste biomase u gasoviti energent niske toplotne moći.
	Piroliza	Proces se odvija u odsustvu kiseonika na temperaturama koje su više od 300 °C.
	Hidrotermalni procesi	Procesi se odvijaju u prisustvu vode pod visokim pritiskom i temperaturom i pogodni su za organski otpad.
	Hidroliza	Tehnologije u kojima se razlaže celuloza i može sluziti za dobijanje bioetanol.
Biohemijski procesi	Anaerobna digestija	Proces koji se odvija u potpunom odsustvu kiseonika, služi za dobijanje biogasa.
	Esterifikacija	Proces hemijske reakcije između alkoholnih jedinjenja i kiselina. Koristi se za proizvodnju biodizela.
	Fermentacija	Proces u kome mikroorganizmi konvertuju šećere u alkohol ili u kiselinu u uslovima bez kiseonika. Koristi se za proizvodnju bioetanol (najčešće prve generacije biogoriva).

Pored procesa za konverziju biomase, u energetskim sistemima je od važnosti i primena efikasnih tehnologija za konverziju biomase. Spisak tehnologija koje su zasnovane na termohemijskim procesima je prikazan u tabeli 3.6, a više o njima se može pronaći u knjizi [84] i u izveštaju [86].

Tabela 3.6 Tehnologije za konverziju biomase u termohemijskim procesima

<i>Proces na kome se zasniva tehnologija</i>	<i>Kategorizacija tehnologija</i>	<i>Podela tehnologija</i>
Tehnologije zasnovane na termohemijskim procesima	Tehnologije za sagorevanje biomase	Sagorevanje u stacionarnom sloju
		Sagorevanje u fluidizovanom sloju
	Tehnologije za gasifikaciju biomase	Gasifikacija u stacionarnom sloju
		Gasifikacija u fluidizovanom sloju

Biogoriva treće generacije su biogoriva dobijena od biljnih kultura koje se uzgajaju isključivo u tu svrhu, uključujući i alge.

Biogoriva četvrte generacije podrazumevaju biogoriva u za čiju proizvodnju je neophodno „hvatanje ugljenika“ (sekvstracija ugljen-dioksida). Više o njima se može pročitati u poglavlju 3.4.6.

### 3.3.4. Tehnologije za skladištenje energije

Kao što je u poglavlju 3.3.1. naglašeno, energetske sistemi koji se zasnivaju na upotrebi OIE, zbog prirode i varijabilnosti ovih izvora, moraju da uključuju i određene tehnologije kojima se omogućava skladištenje energije, kako bi se obezbedilo balansiranje proizvodnje i potrošnje.

Osnovna karakteristika tehnologija za skladištenje energije je sposobnost da sačuvaju višak proizvedene energije za kasniju upotrebu, čime se omogućava stabilnost i efikasnost energetskih sistema. Kada je u pitanju konverzija električne energije u druge vidove energije, u literaturi su ovi procesi najčešće nazivaju Power-to-X tehnologije (P-to-X), gde X može da predstavlja bilo koji oblik energije [87].

U zavisnosti od načina konverzije električne energije osnovna tehnologije za skladištenje se mogu podeliti na:

- mehaničke (konverzija električne energije u mehaničku, zatim mehaničke u električnu);
- termičke (električna energija se konvertuje u toplotnu energiju);
- elektrohemijske (električne baterije, čiji se rad zasniva na konverziji energije putem elektrohemijskih reakcija);
- hemijska skladištenja (konverzija električne energije za proizvodnju tečnih goriva, upotrebom poznatih hemijskih procesa).

Pregled tehnologija za skladištenje električne energije prikazan je u tabeli 3.7., a više o njima se može pročitati u izveštajima [88], [89], dok se o očekivanom razvoju tehnologija za skladištenje, kao i njihovim projektovanim budućim cenama više može pročitati u [90].

Tabela 3.7 Pregled tehnologija za skladištenje električne energije

<i>Način skladištenja</i>	<i>Tehnologija</i>	<i>Kratak opis</i>
Mehaničko skladištenje električne energije	Reverzibilne hidroelektrane	Višak električne energije iz mreže se koristi za prebacivanje vode iz donjeg u gornji rezervoar primenom turbomšina (pumpi). Sa druge strane, u slučajevima visoke potražnje električne energije, kao i usled nedostataka odgovarajućih količina energije iz OIE, potencijalna energija vode, prilikom prelaska iz gornjeg u gornji rezervoar, aktivira turbinu, usled čega dolazi do generisanja električne energije.
	Skladištenje komprimovanog vazduha	Viškovi proizvedene električne energije se koriste za proizvodnju komprimovanog vazduha, koji se kasnije koristi u gasnim turbinama za proizvodnju električne energije, kada njena proizvodnja iz OIE nije moguća [89].
	Skladištenje mehaničkih zamajaca upotrebom	U ovim sistemima električna energija se transformiše u kinetičku (rotacionu) energiju, motornim pokretanjem zamajca. Kada postoji potreba za električnom energijom, zamajac pokreće generator, čime dolazi do transformacije mehaničke energije u električnu. Glavna prednost ovog načina skladištenja je u brzom odzivu, kao i u dugom radnom veku tehnologije [89].
Elektrohemijsko skladištenje	Litijum-jonske baterije	Najčešći korišćeni način skladištenja električne energije u litijum-jonskim baterijama je u električnim vozilima. Tzv. „pametno punjenje“ omogućava iskorišćenje viškova proizvedene energije kada je ona jeftinija, primeno brzog punjenja električnih automobila, čime se postiže efekat balansnih jedinica. Takođe, u razvoju su tehnologije „iz vozila u mrežu“ (eng. vehicle to the grid (V2G)) koje omogućavaju da se energija skladištena u baterijama automobila po potrebi predaje mreži, kada je ona potrebna [91].

Nastavak tabele 3.7.

	Superkondenzatori i olovno-kiselinske baterije	Superkondenzatori omogućavaju trenutnu kompenzaciju napona i imaju kratak period punjenja i pražnjenja. U poređenju sa litijum-jonskim baterijama, imaju nižu specifičnu energiju. Često se koriste u kombinaciji sa olovno-kiselinskim baterijama, gde deluju kao međuspremnik i kompenzuju kratkoročne promene snage, čime se produžava radni vek baterije i omogućavaju njeni manji kapaciteti [89].
	Cink-brom baterije	Tzv. „tok baterije“ (eng. flow battery). Za razliku od ostalih baterija, ove baterije, umesto čvrstih elektroda, imaju elektrolite, odnosno tečnost [89].
	Vandijumske baterije	
Termalna skladištenja	Konverzija električne energije u toplotnu	Na primer, upotrebom električnih kotlova ili kompresionih toplotnih pumpi [92]
Hemijska skladištenja	Konverzija električne energije u gasovita goriva, najčešće primenom elektrolitičkih procesa	Proizvodnja vodonika (više o pravcima razvoja, kao i o načinima korišćenja se može pročitati [93])
Skladištenja pomoću superprovodljivih magneta	Superprovodljivo magnetno skladištenje energije	Naizmenična struja se najpre konvertuje u jednosmernu, pri tome dolazi do stvaranja magnetnog polja u superprovodljivoj zavojnici. Kada je potrebna, električna energija se u mrežu, iz zavojnica, vraća kroz pretvarač. Da bi ovo bilo moguće, neophodno je ostvariti uslove sa niskim temperaturama (približno -269 °C), što uzrokuje daleko više cene u poređenju sa ostalim tehnologijama za skladištenje električne energije [89].

Još jedan važan oblik skladištenja energije u energetske sistemima sa niskom emisijom CO<sub>2</sub> je skladištenje toplotne energije. Toplotna skladišta (toplotne baterije) omogućavaju skladištenje toplote kada je ona dostupna, kako bi se omogućilo njeno iskorišćenje kasnije. Sistemi toplotnog skladištenja su od izuzetne važnosti u sistemima daljinskog grejanja i hlađenja, jer omogućavaju integraciju OIE, kroz skladištenje energije i njeno iskorišćenje kada je ona potrebna za zadovoljenje korisničkih potreba [94]. Toplotna energija se može skladištiti u vidu:

- tzv „senzibionog skladištenja“ (eng. sensible heat storage), predajom toplote materijalu koji je apsorbuje,
- latentne toplote, pri tome dolazi do fazne transformacije,
- termohemijskog skladištenja, gde se energija oslobađa usled hemijskih reakcija.

Detaljniji opisi pomenutih tehnologija, kao i njihova primena se mogu pronaći u [80], [94], [95].

### 3.3.5. Tehnologije za proizvodnju sintetičkih goriva dobijenih pomoću električne energije

Sintetička goriva dobijena pomoću električne energije (eng. electro fuels (e-fuels)) su goriva nove generacije, čija je namena dekarbonizacija energetski intenzivnih sektora u kojima osnovni oblici OIE ne mogu direktno da se koriste, poput transporta ili industrije. Ova goriva se zasnivaju na održivoj upotrebi biomase, korišćenju viška proizvedene energije iz OIE za proces konverzije vode u vodonik, kao i korišćenju ugljen dioksida. Kako bi se sintetička goriva smatrala klimatski neutralnim, neophodna je sekvencijalna uklanjanja ugljen dioksida, kao i upotreba zelenog vodonika, koji je dobijen isključivo primenom OIE. Tehnologije za sekvencijalno hvatanje (eng. carbon capture) i upotrebu CO<sub>2</sub> su od izuzetne važnosti u procesima dekarbonizacije, pogotovo kada je u pitanju sektor industrije (hemija, industrija cementa i čelika), proizvodnje energije (termoelektrane i toplane) ili upotrebe biomase u procesima proizvodnje energije, kako bi se ona smatrala klimatski neutralnom. Sekvencijalna uklanjanja ugljenika ne utiče samo na smanjenje ukupnih emisija iz gasova nastalih kao produkt sagorevanja, već se on se kasnije koristi kao glavna komponenta za sintezu novih goriva. Više o tehnologijama za hvatanje, skladištenje i upotrebu ugljenika može se pročitati u [96].

Važno je napomenuti da se, na osnovu opsežne analize mogućih pravaca budućih energetske sistema [97], upotreba skladištenog zelenog vodonika uglavnom prvenstveno predlaže za sintezu novih goriva u odnosu na direktnu upotrebu u sektoru transporta. Na ovaj način se omogućava korišćenje održive količine biomase i generisanje potrebnih količina energije. Vodonik se može koristiti i za proizvodnju sintetičkih goriva bez upotrebe ugljenika iz sekvencijalne, već direktno upotrebom biomase, ali je ovaj proces manje efikasan [98].

Osnovna podela sintetičkih goriva, sa osnovnim karakteristikama, prikazana je u tabeli 3.8., a detaljnije o svim tehnologijama se može pročitati u [98]. U ovom izveštaju su, pored opisa svih tehnologija, prikazani i dijagrami njihovih energetske tokova koji omogućavaju olakšano razumevanje procesa.

Tabela 3.8 Tehnologije za dobijanje sintetičkih goriva

<i>Tehnologija</i>	<i>Kratak opis tehnologije</i>
Fermentacija*	Upotreba poljoprivrednih ostataka biomase i električne energije iz OIE u fermenteru, gde se sintetišu metanol ili etanol. Radi povećanja efikasnosti procesa, električna energija se može koristiti u procesima elektrolize i dobijeni vodonik, zajedno sa nusproduktima fermentacije (lignin i šećeri), nakon procesa gasifikacije, hemijskom sintezom generišu metanol.
Hemijska obrada biomase vodonikom (eng. bioenergy hydrogenation)	U osnovi, čvrsta biomasa se, dodavanjem toplote, u procesu gasifikacije konvertuje u gasovito stanje, nakon čega se, dodavanjem zelenog vodonika u procesu hemijske sinteze dobijaju metanol ili metan <sup>5</sup> .
Hidrogenizacija ugljen-dioksida (CO <sub>2</sub> hydrogenation)	U ovom slučaju, biomasa se koristi u kogeneracionim postrojenjima za proizvodnju toplotne i električne energije. Tehnologijama za hvatanje i korišćenje ugljenika (eng. carbon capture and utilization), ugljen-dioksid nastao kao produkt sagorevanja biomase se meša sa zelenim vodonikom, pri tome hemijskom sintezom generišu sintetička goriva, poput metanola i metana. U slučaju kada se ne koristi biomasa u ložištima, ugljen dioksid se može dobijati tehnologijama za direktno hvatanje CO <sub>2</sub> iz atmosfere.
CO-elektroliza	Ovaj proces je veoma sličan procesu hidrogenizacije ugljen-dioksida, pri tome se umesto ovog gasa za sintezu goriva koristi ugljen-monoksid. Ugljen-dioksid, koji je dobijen tehnologijama za direktno hvatanje ili tehnologijama za hvatanje CO <sub>2</sub> na mestu emisije, se u istom elektrolizeru za proizvodnju vodonika, razlaže na ugljen monoksid. Sintetički gas iz elektrolizera se procesima hemijske sinteze konvertuje u metanol ili metan.

Osnovna razlika u poređenju sa fermentacijom pomenutom u poglavlju 3.3.3. odnosi se na prirodu nastanka električne energije, koja treba da bude iz OIE, kao i u mogućnosti dalje sinteze e-metanola dodavanjem vodonika.

### 3.3.6. Tehnologije za sprovođenje mera energetske efikasnosti

Mere energetske efikasnosti predstavljaju upotrebu tehnologija, promenu energetske tokova i promenu ponašanja sa ciljem smanjenja upotrebe energije, uz ostvarivanje istih ili unapređenih performansi energetske sistema i usluga. Mere za unapređenje energetske efikasnosti predstavljaju osnovi korak kada je u pitanju energetska tranzicija, jer dovode do smanjenja baznih energetske potreba, čime se smanjuje potreba za dodatnom proizvodnjom energije, a ubrzava se postizanje klimatske neutralnosti, kao primarnog cilja. U dugoročnim energetske planovima, pretpostavlja se da unapređenje energetske efikasnosti može da smanji buduće emisije CO<sub>2</sub> za do 25% [99]. Tabela 3.9.

<sup>5</sup> Za dobijanje metana potrebna je dodatna količina električne energije za kompresiju gasa. Takođe, za proces dobijanja metana umesto procesa gasifikacije se može koristiti proces anaerobne digestije.

sumira sve najčešće korišćene mere energetske efikasnosti u različitim sektorima potrošnje energije.

Tabela 3.9 Najčešće zastupljene mere energetske efikasnosti u različitim energetske sektorima

<i>Sektor</i>		<i>Mera</i>	<i>Ref.</i>
Zgradarstvo	Domaćinstva	Ugradnja izolacije i efikasne stolarije	[100]- [103]
		Primena efikasnih načina gradnje	
		Visoko-efikasni sistemi grejanja, ventilacije i klimatizacije	
		Energetski efikasni električni uređaji	
		Primena LED rasvete	
		Primena termoregulacije	
		Primena OIE	
	Javne zgrade	Primena efikasnog sistema grejanja (daljinsko grejanje, toplotne pumpe, efikasni kotlovi)	[100], [104], [105]
		HVAC sistemi sa rekuperacijom toplote	
		Ugradnja izolacije i efikasne stolarije	
		Primena visokoefikasne rasvete	
		Promena kontrolnih i mernih sistema	
		Sistemi za uštedu tople vode	
		Upotreba kogeneracije	
		Upotreba efikasnih električnih uređaja	
		Primena termoregulacije	
		Primena OIE	
	Transport		Provera pritisaka u pneumaticima
		Zamena vozila efikasnijim	
		Upotreba efikasnijih vidova prevoza	
		Ekonomični načini vožnje (eng. eco driving)	
Industrija		Primena efikasnog sistema za toplotu/hlađenje (zamena kotlova, zamena gorionika, ugradnja SCADA sistema, izolacija kotla, zamena neispravnih elemenata u parnom sistemu)	[107], [108]
		Rekuperacija otpadne toplote	
		Ugradnja skladištenja toplote	
		Izgradnja kogeneracije	
		Primena termoregulacije i zonske regulacije	
		Elektrifikacija proizvodnih procesa	
		Automatizacija proizvodnog procesa	
		Primena apsorpcionih rashladnih sistema	
		Smanjenje curenja komprimovanog vazduha	
		Upotreba efikasnih pumpi i elektromotora	
		Upotreba frekventnih regulatora	
		Upotreba efikasne rasvete	
		Upotreba OIE	
	Upotreba toplotnih pumpi		

Ušteda energije u sektoru zgrada ima važnu ulogu u Evropskim programima i politikama, jer se u zgradama koristi gotovo 40% ukupne primarne energije u Evropi [104]. Promocija pasivnih kuća (passive house) [109], (skoro) neto-nultih kuća ((n)ZEB) [110] i najava obaveznih zgrada neto-nulte emisije, od izuzetnog je značaja zbog mogućnosti ostvarivanja vrlo niskih ili nultih emisija u ovom sektoru.

Sa druge strane, u analizama mogućih energetske ušteda, sektor industrije poseduje značajan potencijal, jer mere energetske efikasnosti mogu rezultirati uštedama električne i toplotne energije za do 15%, i 30% respektivno [107].

Pored mogućih ušteda u svakom navedenom sektoru, važno je napomenuti da se ostvarivanje klimatski neutralnih gradova zasniva na efikasnim sistema daljinskog grejanja. Kao što je prikazano u poglavlju 3.3.2 efikasni sistemi daljinskog grejanja omogućavaju povezivanje sektora, kroz primenu otpadne toplote iz industrije, upotrebu obnovljivih izvora energije i naprednih tehnologija. Nove generacije daljinskog grejanja podrazumevaju rad u niskotemperaturnim režimima, kojima se smanjuju toplotni gubici u distributivnoj mreži, čime se unapređuje sveobuhvatna energetska efikasnost sistema [111].

### 3.4. Energetske politike i zakonske regulative u Evropi i Srbiji

Na nivou Evropske Unije, ostvarivanje održive energetske budućnosti počiva na usvojenim aktima i pravnim regulativama, koje se zasnivaju na smanjenju emisija gasova sa efektom staklene bašte i upotrebi obnovljivih izvora energije. Energetske politike promovišu diversifikaciju snabdevanja, čime se smanjuje zavisnost od uvoza energenata, ali i utiču na smanjenje energetske siromaštva.

Evropski zeleni dogovor (eng. The European Green Deal) [112] je primarna, dugoročna strategija Evropske Unije, koja za cilj ima postizanje klimatski neutralnog kontinenta do 2050. godine. Sprovođenje dogovora podrazumeva usaglašavanje politika na nivou svih zemalja EU i kandidatima za članstvo, kroz usklađivanje zakonodavnih okvira koji se baziraju na konceptu održivog razvoja i smanjenja emisija sa efektom staklene bašte. Svih 27 država članica se obavezalo da će smanjiti svoje emisije za najmanje 55% do 2030. godine, u poređenju sa emisijama iz 1990. godine. Evropski zeleni dogovor otvara nove mogućnosti za inovacije, investicije i kreiranje novih poslova. Takođe, na nivou Evropske Unije usvojeni su različiti zakonodavni okviri i regulative, kojima se podstiče ostvarivanje ciljeva. Skupom propisa pod nazivom „Čista energija za sve Evropljane“ (eng. Clean energy for all Europeans) [113], usvojenih 2019. godine, pospešuje se dekarbonizacija EU u skladu sa Evropskim zelenim dogovorom. Ovim paketom mera se promovišu obnovljiva energija, energetska efikasnost i konkurentnost tržišta električne energije. Paketom se podržava razvoj energetske zajednice građana koje omogućavaju građanima da sami proizvode, koriste i razmenjuju proizvedenu energiju na lokalnim nivoima, ujedno štiteći prava potrošača. Direktiva o obnovljivoj energiji (eng. Renewable Energy Directive (2009/28/EC)-RED II) [114] podstiče upotrebu OIE, sa ciljem da, do 2030. godine, više od 32% energije u EU bude dobijeno primenom OIE, integracijom energetske sektora i unapređenjem energetske efikasnosti. RED II definiše održivo korišćenje energije, sa posebnim osvrtom na biogoriva, i podstiče aktivno uključivanje građana u energetske tranzicije, unapređenjem prava, smanjenjem birokratije i promovisanjem koncepta zajednice OIE. Direktiva o energetske efikasnosti (eng. Energy Efficiency Directive (2012/27/EU)-EED) [115] predstavlja dokument kojim se promoviše unapređenje energetske efikasnosti, radi smanjenja potrebe za energijom, i smanjenjem energetske

siromaštva. Ovom direktivom su obuhvaćeni, pored sektora zgradarstva, i ostali energetske sektori i njome se promovira uspostavljanje koncepta energetskog menadžmenta. Dekarbonizacija u saobraćaju podstaknuta je Uredbom o postavljanju standarda performansi emisija CO<sub>2</sub> za nova putnička vozila i za nova laka komercijalna vozila (eng. Setting CO<sub>2</sub> emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles (2019/631EU)) [116], koja se zasniva na planovima za smanjenje emisija CO<sub>2</sub> iz putničkih vozila (za 10g CO<sub>2</sub>/km), kroz prilagođavanje proizvodnih linija budućih vozila, uz poštovanje postavljenih ciljeva. Na ovaj način se teži ka promovisanju vozila sa niskim emisijama. Takođe, regulativom se podstiče upotreba električnih i hibridnih vozila.

Dekarbonizacija industrijskog sektora je najpre podstaknuta 2005. godine uvođenjem ETS sistema trgovine emisijama CO<sub>2</sub>, koji obuhvata energetske intenzivne sektore. Pravni osnov na kom počiva ova inicijativa je Direktiva za uspostavljanje trgovanja emisijama gasova sa efektom staklene bašte unutar Energetske Zajednice (eng. Directive on establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 91/61/EC) [117]. Suštinski trgovine emisijama se zasnivaju na trgovini emisijskim dozvolama u skladu sa emisijama. Naime, zagađivači mogu da kupuju dozvole po unapred definisanoj ceni, ukoliko je njihova emisija veća od dozvoljene, ili da ih prodaju, ukoliko je ostvarena godišnja emisija manja od predviđene. Međutim, kako bi se sprečilo „curenje ugljenika“, odnosno premeštanje proizvodnje u zemlje u kojima energetske politike ne predviđaju trgovine emisijama, u toku 2023. godine usvojena je Uredba o mehanizmu prekograničnih prilagođavanja CO<sub>2</sub> emisija-CBAM (eng. Carbon border adjustment mechanism) [118]. Ova direktiva se zasniva na napati taksi uvezene robe na tržište EU u zavisnosti od njenog ugljeničnog otiska. Na ovaj način teži se ostvarivanju ciljeva Pariškog sporazuma<sup>6</sup> i dekarbonizacije na globalnom nivou, kroz podsticanje proizvodnje niskougljeničnih proizvoda i izvan granica EU. Sa sličnim ciljevima kao Evropski zeleni dogovor, u toku 2023. godine predstavljen je Industrijski zeleni dogovor (eng. The Industrial Green Deal) [119], čiji je cilj ojačanje konkurentnosti industrije EU, uvođenjem novih zakona baziranih na industrijskim proizvodnjama bez emisija, kao i pružanju finansijske podrške za uspostavljanje proizvodnje zasnovane na održivim tehnologijama. Takozvanim „Evropskim klimatskim zakonom“ („European climate law“ (2021/1119 EU)) [120] osigurava se odgovornost i obavezuju zemlje Evropske Unije, kao i države članice, da usklade svoje politike sa merama dekarbonizacije i promovisanja koncepta održivog razvoja, kroz kontinuirano unapređenje politika i uključivanja građana u procese donošenja odluka.

Na osnovu podataka koje je predstavila IEA gradovi su odgovorni za 70% ukupne globalne emisije CO<sub>2</sub> koja nastaje kao posledica upotrebe energije [121]. Kako se gradovi i dalje smatraju pogodnim za unapređenje društvenog blagostanja, očekuje se da će se proces urbanizacije nastaviti i u budućnosti, sa udelom urbane populacije većim od 68% do 2050. godine [122]. Shodno tome, može se reći da gradovi predstavljaju polaznu tačku globalnog energetskog sistema u borbi protiv klimatskih promena, jer imaju veliki potencijal za smanjenje emisije i veoma su značajni u postizanju ciljeva dogovorenih Evropskim zelenim sporazumom i Pariškim sporazumom. Iako zagađenje u gradovima, uzrokovano povećanom potrebom za energijom, može da dovede, ne samo do povećanja globalne

---

<sup>6</sup> Jedan od ciljeva Pariškog sporazuma, koji je potpisan 2016. godine, zasniva se na kontrolisanju prosečne globalne temperature, koja ne sme biti viša od 2°C u poređenju sa preindustrijskim dobom, kroz smanjenje emisija gasova sa efektom staklene bašte.

temperature, već i do zdravstvenih problema stanovnika, dobro isplanirani i organizovani gradovi istovremeno mogu da predstavljaju i rešenje ovih problema [123]. U skladu sa tim, Evropska komisija je usvojila Strateški plan za energetske tehnologije (eng. Strategic Energy Technology Plan-SET Plan) u okviru koga su gradovi prepoznati kao važne karike u lancu uspostavljanja dekarbonizacije. U okviru SET-a razvijena je akcija 3.2 „Pametni gradovi i zajednice“ [124], gde gradovi, uspostavljanjem dugoročnih urbanih strategija, predstavljaju značajne učesnike u procesu dekarbonizacije. Pored toga, značaj energetske tranzicije u gradovima je značajan, jer se promenama u energetskom sistemu utiče i na zdravlje građana, kvalitet njihovih života, kao i na razvoj i unapređenje zelene ekonomije [125]. Kao odgovor ovim težnjama, 2014. godine, u Kopenhagenu, oformljena je Alijansa klimatski-neutralnih gradova (eng. The carbon neutral cities alliance), kojoj je pristupilo sedamnaest gradova, iz devet zemalja širom sveta. Sa teritorije Evrope Alijansi je pripadalo pet gradova (Berlin, Kopenhagen, London, Oslo i Stokholm) [126]. Uviđajući značaj ovog pitanja, Evropska Unija je, zatim, pokrenula Misiju za klimatski-neutralne i pametne gradove [127], u okviru Horizon Europe istraživačkog programa, sa idejom realizacije konkretnih rešenja, kroz istraživanje i inovacije, međusektorsku saradnju i uključivanje građana. Glavni ciljevi misije ovog programa odnose se na postizanje klimatski-neutralnih gradova do 2030., koji će pružati primere dobre prakse za razvoj gradova do 2050 godine. U aprilu 2022. godine, Evropska komisija je objavila listu sto gradova koji će učestvovati u ovoj misiji (slika 3.8.). Pored gradova u Evropskoj Uniji, projektu su priključeni i gradovi: Sarajevo (Bosna i Hercegovina), Reykjavik (Island), Istanbul i Izmir (Turska), Bristol i Glasgow (Ujedinjeno Kraljevstvo).

Takođe, Evropska Unija je pokrenula podršku za kreiranje klimatske neutralnosti u gradovima, kroz finansiranje projekata u okviru poziva Towards Climate-Neutral and Socially Innovative Cities [128]. Projekti treba da odgovore na sve izazove energetske tranzicije, ali i da integrišu sve ciljeve održivog razvoja, kroz ravnomernu rasprostranjenost širom Evrope. Na ovaj način doprinosi se postizanju klimatske neutralnosti do 2030. godine u gradovima-učesnicima. Primer finansijski podržanog projekta je NetZeroCities [129], koji pruža podršku gradovima u prevazilaženju strukturalnih, institucionalnih i kulturoloških barijera u dostizanju klimatske neutralnosti.



Slika 3.8. Odabrani pilot gradovi Evropske Unije u okviru projekta 100 Klimatski-neutralnih i pametnih gradova do 2030 [127]

Svi primeri dobre prakse u postizanju klimatske neutralizacije zasnovani su na dobrim nacionalnim i lokalnim politikama, koje podražavaju uključivanje OIE na gradskim nivoima [130]. Kada je reč o uspostavljanju sistema klimatski neutralnih gradova, potrebno je osvrnuti se i na međunarodni Standard ISO 37101 [131], koji primenjuje sveobuhvatni pristup uspostavljanja zahteva sistema upravljanja održivog razvoja u zajednicama, uključujući i gradove. Ovaj standard ne poredi postignuća u gradovima, već predstavlja vid pomoći za formiranje održivih zajednica. Sa druge strane, indikatori primene sistema upravljanja na nivou održivih gradova i zajednica definisani su standardima ISO 37120 [132] i ISO 37122 [133]. Indikatori predstavljeni u ovim standardima mogu da posluže kao merljivi pokazatelji razvoja grada u postizanju željenih ciljeva u oblasti kvaliteta života i održivosti.

### 3.4.2. Energetske politike u Srbiji

Republika Srbija je 2012. godine stekla status kandidata za članstvo u EU, čime se obavezala da će uskladiti svoje zakonodavne okvire u oblasti energetike, klimatskih promena i životne sredine sa evropskim. Shodno tome, 2015. godine Republika Srbija se izjasnila da će do 2030. godine smanjiti svoju emisiju za 9,8% u poređenju sa emisijama zabeleženim tokom 1990. godine, podnošenjem nameravanog nacionalnog utvrđenog doprinosa. Kasnije je ova ambicija povećana na 13,2% u poređenju sa nivoom emisija iz 2010. godine, kroz podnošenje ažuriranja Nacionalnog utvrđenog doprinosa 2017. godine [134]. Deklaracijom iz Sofije o Zelenoj agendi za zapadni Balkan [135], 2020. godine, Republika Srbija se obavezala da će „u potpunosti prihvatiti Zelenu agendu za zapadni Balkan“, kroz usklađivanje sa zakonom o klimatskim promenama EU, definisanje ciljeva u oblasti dekarbonizacije i klimatskih promena, usvajanje Integrisanog Nacionalnog Energetskog i Klimatskog Plana (INEKP) i usvajanje EU šeme za trgovanje emisijama. Pored toga, ovim dokumentom Srbija se obavezala i za unapređenje u oblastima pravedne energetske tranzicije, energetske efikasnosti, energetskog siromaštva i implementacije OIE, kao i na ukidanje subvencije za fosilna goriva. Usvojenim Zakon o izmenama i dopunama Zakona o energetici [136] uređuju se energetske politike i regulative, uslovi za sigurno i kvalitetno snabdevanje energijom, kao i tržište električnom energijom, uz zaštitu prava potrošača. Pored električne energije, Zakon propisuje i delovanja u oblastima toplotne energije, kroz uređivanje proizvodnje, prenosa i snabdevanja energijom. Zakonom o energetskoj efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije [137] definišu se mogućnosti za efikasnu upotrebu energije, kroz politike, sistem energetskog menadžmenta, eko-dizajna i osnivanje Uprave za finansiranje i podsticanje energetske efikasnosti. Cilj Zakona je postizanje smanjenja potrošnje energije, ostvarivanje sigurnog snabdevanja, smanjenje uticaja na klimu, smanjenje energetskog siromaštva i poboljšanje uslova za ekonomski razvoj. Usvajanjem Zakona o klimatskim promenama [138] određeni su sistemi za smanjenje emisija GHG, proces izdavanja dozvola za emisije gasova sa efektom staklene bašte, kao i za praćenje i izveštavanje državne strategije o niskougljeničnom razvoju zemlje. Ovaj Zakon utiče na smanjenje antropogenih emisija gasova sa efektom staklene bašte na isplativ i ekonomski opravdan način. Tokom 2023. godine usvojen je Zakon o izmenama i dopunama Zakona o korišćenju OIE [139], kojim je uređena primena OIE. Zakonom se definiše udeo OIE u bruto finalnoj potrošnji energije, podsticaji za proizvodnju električne energije iz OIE, garancije porekla i mogućnosti primene OIE u sektoru transporta. Pored toga, ovim Zakonom se prvi put u srpsko zakonodavstvo uvodi mogućnost proizvodnje električne energije za sopstvene potrebe građana, kroz pojam kupca-proizvođača i zajednice OIE i energetske zajednice građana. Pored navedenih usvojenih Zakona, Republika Srbija je u avgustu 2024. godine usvojila INEKP Republike Srbije za period do 2030. godine, sa projekcijama do 2050. godine [140]. Dokument treba da predstavlja jasno definisane mere za smanjenje emisija CO<sub>2</sub>, kroz procese dekarbonizacije, primene OIE i unapređenja energetske efikasnosti. U skladu sa ciljevima predstavljenim u INEKP u julu 2024. godine predstavljen je nacrt Strategije Energetike Republike Srbije do 2040. sa projekcijama do 2050. godine [141].

Na nivou gradova u Republici Srbiji proces klimatske neutralizacije podstaknut je uvođenjem sistema energetskog menadžmenta u gradovima i opštinama. Na osnovu Zakona o energetskoj efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije [137], sve lokalne samouprave sa više od 20.000 stanovnika su u obavezi da usvoje Programe energetske efikasnosti, kojima se promovira racionalna upotreba energije na lokalnom nivou.

Usled nepostojanja dodatnih strateških dokumenata kojima se dugoročno planira energetska tranzicija na gradskim nivoima, dodatne analize koje usklađuju nacionalne strategije i lokalne potencijale su od izuzetnog značaja.

### 3.5. Energetsko planiranje i energetski modeli

Energetsko planiranje predstavlja proces razvoja dugoročnih strategija koje će pomoći kreiranju budućih energetskih sistema. Energetsko planiranje je neophodno kako bi se kreirale održive energetske politike, jer uključuje različite faktore uticaja, i objedinjuje različite sektore [142]. Od značaja je da proces energetskog planiranja i ulazni podaci budu transparentni, jer se na taj način omogućava poboljšanje budućih scenarija, kroz eventualnu izmenu parametara i unapređenje metodologije [143]. Modeliranje klimatski neutralne budućnosti zasnovano je na tri ključne faze:

- 1) Uvodna faza podrazumeva analizu energetskih sistema sa neznatnim udelom OIE u kojima najčešće nema problema u odzivu sistema. Ovakve slučajeve karakteriše brzo i lako utvrđivanje ušteda energenata na godišnjim nivoima, bez zahteva za kompleksnim energetskim modelima.
- 2) Faza uključivanja OIE u značajnim razmerama podrazumeva dodatno uključivanje OIE u sisteme koji već poseduju značajne udele OIE u energetskom miksu. U ovakvim sistemima, zbog svoje varijabilnosti, OIE imaju značajan uticaj na elektroenergetski sistem, pa je neophodna upotreba skladištenja energije, kako bi se postigao odgovarajući odziv sistema. Određivanje ušteda na godišnjem nivou zahteva detaljnije analize, u kojima se mora pratiti varijabilnost proizvodnje/traznje na časovnim nivoima.
- 3) Faza postizanja klimatski neutralnog energetskog sistema odnosi se na sistem koji je zasnovan samo na upotrebi OIE. U ovim scenarijima investicioni troškovi se ne porede sa troškovima upotrebe konvencionalnih tehnologija za proizvodnju energije, već se porede tehnologije primene OIE. Ove tehnologije objedinjuju konverziju, skladištenje i sveobuhvatno povećanje efikasnosti sistema. Klimatski neutralni sistemi zahtevaju kompleksnu analizu na časovnim nivoima i podrazumevaju formiranje pametnih energetskih mreža [144].

Prilikom energetskog planiranja koriste se energetski modeli, koji predstavljaju merljivu analizu energetskih scenarija kroz sagledavanje ključnih pitanja i mogu služiti za razrešenje i prognoziranje ili za optimizaciju energetskih sistema. Na osnovu načina modeliranja, razlikuju se dva osnovna pristupa „odozgo-na-dore“ ili „odozgo-na-dole“, ali je moguća i kombinacija ovih modela [21]. Princip „odozdo-na-gore“ podrazumeva prikupljanje svih podataka na nivoima realne potrošnje u svim sektorima, nakon čega se formira slika o funkcionisanju celog sistema. Ovakav pristup je često vrlo složen, a na nivou gradova i država često ne postoje adekvatna merenja koja bi omogućila prikupljanje svih podataka, kako na nivoima tehnologija, tako i investiciono-operativnih ulaganja. Princip „odozdo-na-gore“ se često koristi kod modela simulacije ili optimizacije. Sa druge strane pristup „odozgo-na-dole“ sistem posmatra kao celinu, koja se zatim fragmentiše na manje podsisteme. Analizi svakog sistema se pristupa na isti način, dok se ne obezbede podaci o svim potrebnim sektorima. Glavni nedostatak ovog pristupa se ogleda u tome što

nema dovoljno informacija o tehničkim aspektima sistema, a same informacije su najčešće vrlo opšte. Proces energetskeg planiranja uključuje analizu:

- energetskeg bilansa i statistike,
- energetskeg zahteva svih sektora,
- energetskeg potreba budućnosti,
- mogućnosti za proizvodnju, konverziju i skladištenje energije,
- energetskeg scenarija budućnosti,
- finansijskeg tokova energetskeg sistema i njihov uticaj na životnu sredinu.

Kreiranje modela najpre zahteva definisanje problema, kroz određivanje ciljeva koje model treba da dostigne i uz usvajanje određenih pretpostavki. Razvoj modela počiva na naučnim osnovama i najčešće uključuje razvoj računarskeg modela. Energetski model treba verifikovati i uporediti ga sa empirijskeg podacima, nakon čega sledi analiza različitih scenarija i primena modela [145]. Na globalnom nivou, postoji veliki broj računarskeg modela, koji se mogu koristiti za analizu energetskeg sistema na različitim nivoima. Ovi modeli mogu biti:

- simulacioni, kojima se pokazuje kako posmatrani energetski sistem odgovara energetskeg potrebama,
- modeli scenarija, koji se koriste za analizu dugoročnih planiranja i najčešće analiziraju očekivane godišnje promene u definisanom dugoročnom intervalu,
- modeli ravnoteže, koji pokazuju promene u snabdevanju, potražnji i cenama energenata (u ove modele najčešće spadaju i „odozdo-na-dole“ operacioni modeli),
- optimizacioni modeli, koji su najčešće simulacioni u kojima se optimizuju posmatrani sistemi u zavisnosti od funkcije cilja [144].

Optimizacioni modeli su često primenjivani u akademskim studijama, dok su modeli scenarija najčešće primenjivani pri strukturiranju energetskeg strategija, jer pružaju lakšu replikaciju i interpretaciju [48]. Na osnovu literaturnih prikaza [21], [144], [146], [147] u tabeli 3.11. su sumirani najčešće korišćeni, dostupni, kompjuterskeg modeli za regionalne, nacionalne ili lokalne energetskeg sistema i njihove osnovne karakteristike.

Tabela 3.10 Razvijeni softverski paketi za analizi energetskih modela

<i>Naziv modela</i>	<i>Karakteristike</i>	<i>Ref.</i>
Balmorel	Zasniva se na linearnom programiranju otvorenog koda u GAMS-u i, kao takav, besplatan je za korišćenje. Predstavlja delimični model ravnoteže za analizu elektroenergetskog sistema i sistema kogeneracije. Može se primenjivati kako za dugoročna planiranja, tako i za kratkoročne operacione analize. Korišćen je za analizu više nacionalnih sistema.	[148]
EnergyPRO	Profesionalni softver za modelovanje i optimizaciju složenih energetskih sistema. Omogućava detaljnu tehno-ekonomsku analizu sistema koji kombinuju različite izvore energije, uključujući solarnu energiju, kogeneraciju, vetroelektrane, toplotne pumpe i skladištenje energije. Koristi se za identifikaciju optimalne konfiguracije sistema, procene isplativost investicija i simuliranje rad u realnim tržišnim uslovima. Dostupne su probne verzije softvera na upit, kao i studentske verzije po promotivnim cenama.	[149]
MESSAGEix	Zasniva se na dinamičkom modeliranju i optimizacijama sistema u Python-u. Omogućava modeliranje u okviru energije, klime i zaštite životne sredine. Licenca za akademska istraživanja je besplatna. Korišćen je za analizu nacionalnih nivoa i za analize prilikom donošenja politika i strateških dokumenata.	[150]
EMCAS	Zasnovan je na modeliranju agenata i simulacijama koje uključuju analize transmisionih tokova i analize zahteva i odgovora energetskih sistema. Dostupne su probne verzije softvera. Korišćen je za analizu energetskih sistema na nivoima država, regiona, ali i većih celina.	[151]

Nastavak tabele 3.10.

EnergyPLAN	Zasnovan je na analitičkom programiranju i omogućava optimizaciju energetskeg sistema u tako da smanji izvoz/uvoz električne energije i upotrebu fosilnih goriva. Omogućava jednostavan unos podataka o primenjenim tehnologijama, proizvodnji, cenama i potrebama za energijom u posmatranom energetskeg sistema. Dostupna je besplatna verzija programa uz prikaz dosadašnjih istraživanja. Korišćen je za analizu kako lokalnih, tako i nacionalnih i kontinentalnih energetskeg sistema.	[152]
GTMax	Zasniva se na pristupu linearnog programiranja i omogućava analizu elektroenergetskeg sistema i sistema daljinskog grejanja, uz mogućnost simuliranja upotrebe svih tehnologija za skladištenje i konverziju energije, izuzev vodonika. Cilj je omogućavanje maksimalnih priloga elektroenergetskeg sistema uz pronalaženje mogućnosti za održavanjem minimalnih troškova. Na upit su dostupne besplatne verzije softvera.	[153]
LEAP	Zasniva se na različitim metodologijama: za definisanje potražnje energije koristi se pristup odozdona-gore, dok se za makroekonomsko modeliranje i krajnju upotrebu energije koristi princip odozdona-dole. Omogućava simulaciju dugoročnih integrisanih energetskeg scenarija, uz praćenje i predviđanje promena na godišnjim nivoima, kako u energetskeg smislu, tako i kroz analizu emisija i zagađenja. Omogućena je besplatna, godišnja, licenca za akademski istraživački rad, na upit. Korišćen je za analize na lokalnim, državnim i regionalnim energetskeg sistemima.	[154]
TIMES	Zasniva se kodiranjem u softverskeg paketu GAMS, uz dostupnost koda na GitHub-u. Model uključuje sve tokove energije, od primarne energije preko konverzije i transformacije do energije koju koriste krajnji potrošači. Ovaj model se zasniva na odnosima između generisanja i korišćenja energije u matematičkeg, ekonomskeg i inženjerskeg smislu. Korišćen je za analize na lokalnim, državnim i regionalnim energetskeg sistemima.	[155]

Nastavak tabele 3.10.

NEMS	Zasniva se na pisanju koda i zahteva značajnu veštinu u programiranju. Dostupna je početna verzija, koja se može unaprediti. Ovo je integralni model koji objedinjuje energetske snabdevanje, konverziju energije, zahteve za energijom, kao i analizu tržišta. Korišćen je za analizu više energetske sistema, prvenstveno u SAD.	[156]
STREAM	Zasniva se na popunjavanju Excel fajla i predstavlja statički model koji pruža informacije o celokupnom energetske sistemu u posmatranoj godini. Korisnik zadaje energetske potrebe i načine snabdevanja. Dostupan je na sajtu Tehničkog Univerziteta Danske i do sada je korišćen za analizu više energetske sistema, prvenstveno u ovoj državi.	[157]
H2RES	Zasniva se na linearnom otimizacionom programu u softverskom paketu Python i časovnoj rezoluciji potražnje i proizvodnje energije. Uključuje sve energetske sektore, uzimajući u obzir tehnologije za proizvodnju, skladištenje i konverziju energije. Program omogućava optimizaciju modela u zavisnosti od troškova. Model se može besplatno preuzeti i izmene zahtevaju određene programske veštine. Do sada je primenjivan na analizama nacionalnih, regionalnih i ostrvskih energetske sistema.	[158]
HOMER	Zasnovan na okruženju koje je lako za korišćenje, i simulira i optimizuje energetske sisteme koji uključuju PV panele, energiju vetra, hidro energiju, fosilna goriva, ali i skladištenja energije. Sistem se optimizuje u skladu sa ekonomskom i tehničkom izvodljivošću. Dostupan je za korišćenje i do sada je imao primenu u više energetske sistema širom sveta, a najčešće u lokalnim energetske sistemima.	[159]
TRNSYS	Zasniva se na primeni otvorenog koda i moguće je simulirati sve energetske sisteme, izuzev sektora transporta. Model može da simulira većinu termičkih i obnovljivih izvora energije izuzev nuklearne, energije talasa i hidroenergije. Najčešće se koristi na nivou mikro postrojenja (zgrada, industrijskih postrojenja), ali je njegova primena moguća i na lokalnim nivoima za analizu integracije OIE i snabdevanja toplotom. Dostupne su komercijalne i studentske verzije po pristupačnijoj ceni.	[160]

Nastvak tabele 3.10.

nPROenergy	Zasnovan je na planiranju i simulaciji energetskih sistema u zgradama i urbanim četvrtima, sa posebnim fokusom na sisteme grejanja i hlađenja, obnovljive izvore energije i nove tehnologije poput vodonika, toplotnih pumpi i sezonskih skladišta. Omogućava korisnicima da kreiraju profil potrošnje energije, dimenzionišu mreže daljinskog grejanja, optimizuju temperaturne režime i prečnike cevi. Dostupna je probna verzija softvera na upit.	[161]
RETSscreen	Zasniva se na okruženju koje je lako za korišćenje i kao takvo omogućava donosiocima odluka da brzo odrede i optimizuju tehnička rešenja. Uključuje energetsku efikasnost, OIE, kogeneracije, kao i analize energetskih performansi sistema. Dostupan je zainteresovanim stranama, uz određenu novčanu nadoknadu, dok je zvanična univerzitetska verzija povoljnija. Može se koristiti na svim nivoima energetskih sistema, a razvijena je i nova verzija koja omogućava praćenje dekarbonizacije u industriji.	[162]

Analiza mogućnosti postizanja klimatski neutralnog energetskeg sistema zahteva modele kod kojih je moguća časovna simulacija proizvodnje i potrošnje energije [144]. Ovo je od posebnog značaja zato što su OIE promenljivi i potrebno je sagledati energetske sistem koji je dovoljno fleksibilan da na najbolji način odgovori potražnji za proizvedenom energijom. U tom smislu je potrebno obezbediti sistem u kome dolazi do najmanjih viškova proizvedene energije, odnosno sistem koji je u tehničkom smislu optimalan. Bez simulacija na časovnom nivou nemoguće je ispitivati pametne energetske mreže, kao ni adekvatne tehnologije za skladištenje električne i toplotne energije. Detaljna časovna analiza moguća je u modelima EnergyPLAN, Leap, Balmorel, H2RES, EnergyPRO i Homer.

### 3.6. Višekriterijumska analiza

Postizanje klimatski neutralnog grada zasnovano je na odabiru više tehnologija, pri tome treba uzeti u obzir njihov uticaj na životnu sredinu, ekonomske, kao i društvene parametre. U zemljama u kojima je proizvodnja energije zasnovana na upotrebi fosilnih goriva energetske tranzicije treba približiti svim slojevima društva i učiniti je što prihvatljivijom. Shodno tome, važno je da se prilikom odabira tehnologija i mera za unapređivanje energetskeg sistema u obzir uzmu mišljenja svih zainteresovanih strana poput donosioca odluka na nivou lokalnih samouprava, akademske zajednice, građana i nevladinog sektora. Višekriterijumska analiza (eng. multi-criteria decision making (MCDM)) spada u granu operacionih istraživanja i za cilj ima pronalazak optimalnog rešenja u složenim scenarijima koji uključuju različite indikatore, suprotstavljene stavove i kriterijume. Upravo zbog toga je višekriterijumska analiza postala sve popularnija u svim nivoima energetskeg planiranja, jer omogućava donosiocima odluka da istovremeno sagledaju više kriterijuma [163].

Na osnovu podataka prikazanih u preglednom radu Kumara i saradnika [164], metode višekriterijumske analize, u oblastima energetskeg planiranja, se mogu podeliti u 3 opšte grupe:

- metode zasnovani na merenju korisnosti (eng. value measurement models),
- metode kompromisa na osnovu cilja, težnji i referentnog nivoa (eng. goal, aspiration and reference level models),
- metode rangiranja (eng. outranking models).

Podela osnovnih modela unutar grupa, kao i njihova najčešća primena u oblasti energetskeg menadžmenta, prikazani su u tabeli 3.11. Kao što je u tabeli prikazano, svaka pomenuta metoda ima svoje polje primene, prednosti, kao i nedostatke. Međutim, često se za rešavanje istog problema može koristiti više od jedne metode, čime se mogu dobiti dosledniji rezultati [165]

Tabela 3.11 Pregled osnovnih metoda višekriterijumske analize korišćenih u energetsom planiranju [164], [166], [167]

Višekriterijumska analiza				
<i>Kategorija</i>	<i>Metoda</i>	<i>Prednosti</i>	<i>Nedostaci</i>	<i>Primena u energetsom planiranju</i>
Metode zasnovane na merenju korisnosti	Weighted Sum Model (WSM) / Weighted Product Model (WPM)	Jednostavan proračun, Prigodna za jednodimenzione probleme, Omogućava saradnju između više zainteresovanih strana	Osnovna procena mišljenja pri donošenju odluka	Strukturna optimizacija
		Prigodna za jednodimenzione probleme	Nemogućnost integracije više stavova	Energetsko planiranje
		Omogućava saradnju između više zainteresovanih strana	Može da dovede do nejasnih rezultata	Energetska efikasnost
			Kriterijumi treba da budu međusobno nezavisni	Određivanje lokacije OIE
	Multi-attribute Utility Theory (MAUT)	Uzima u obzir nesigurnost i stavove donosioca odluka	Potrebno je mnogo ulaznih parametara	Planiranje gradova
		Uporedo izračunavanje prioriteta za sve alternative	Poteškoća prilikom dobijanja preciznih podataka od donosioca odluka	Ekonomске regulative

Nastavak tabele 3.11.

		Dinamička promena vrednosti usled različitih uticaja	Ishod metode je neizvestan	Državne regulative
	Analzytical hierarchy process (AHP)/Analytic Network Process (ANP)	Jednostavna primena	Kod AHP kriterijumi treba da budu međusobno nezavisni	Upravljanje resursima
		Ukazuje na nedoslednost pri donošenju odluke	Složenost metode otežava primenu	Energetsko planiranje
		Objedinjuje kvalitativne i kvantitativne informacije	Kada postoji mnogo alternativa, donosioca odluka i kriterijuma proces je kompleksan	Logistika i transport
		Zasnovano na hijerarhijskoj strukturi, čime se omogućava transparentnosti kriterijuma	ne uzima u obzir razlike i neizvesnosti, kao ni subjektivnost ispitanika	Korporativne regulative i strategije
Metode kompromisa	VišeKriterijumska Optimizacija i kompromisno Rešenje (VIKOR)	Unapređena verzija TOPSIS metode	Nedostatak fleksibilnosti	Energetske politike
		određuje odnos pozitivnog i negativnog najboljeg rešenja, čime uklanja spoljašnje uticaje		
		Omogućava rešavanje problema i kada su kriterijumi neusaglašeni i nemerljivi		

Nastavak tabele 3.11.

	Simple Additive Weighting (SAW)	U obzir uzima sve kriterijume i atribute	Često ne otkriva realne situacije	Energetsko planiranje
		Omogućava lak proračun	Sve vrednosti kriterijuma moraju biti pozitivne i maksimalne	Prioritizacija OIE
		omogućava intuitivno donošenje odluka		
	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)	Omogućava osnovno rangiranje	Ne uzima razliku između negativnih i pozitivnih vrednosti	Upravljanje vodenim resursima
		Koristi sve dodeljene informacije	Vrednosti atributa moraju biti monotono rastuće ili opadajuće	Energetski menadžment
		Broj koraka ostaje isti, nezavisno od broja atributa		
		Informacije mogu biti nezavisne		
Modeli rangiranja	Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE)	Kriterijumi ne moraju biti proporcionalni	Neodređen način dodeljivanja težinskih faktora kriterijumima	Zaštita životne sredine
		Može isključiti nerelevantne alternative i time smanjiti broj podataka	Problem se ne može razložiti	Logistika
		Uključuje odlučivanje na nivou grupe	Komplikovana metoda koja najčešće zahteva angažovanje stručnjaka	Transport

Nastavak tabele 3.11.

		Omogućava analizu kako kvalitativnih, tako i kvantitativnih podataka		Energetsko planiranje
Elimination and Choice Translating Reality (Élimination Et Choix Traduisant la Réalité -ELECTRE)		U obzir uzima i kvalitativne i kvantitativne kriterijume	Rezultati se ne mogu lako objasniti	Energetski menadžment
		U obzir uzima nesigurnost i neodređenost	Prednosti i mane alternativa se ne mogu direktno identifikovati, niti se mogu odrediti uticaji	Finansije
		Teorijski, broj kriterijuma je neograničen	Nemogućnost primene prilikom rešavanja problema u kojima odnosi afiniteta nisu unapred određeni	Odabir tehnologija

Pored osnovnih modela, u literaturi su korišćeni i tzv. rasplinite (fuzzy) metode (neizrazite metode), koje za cilj imaju otklanjanje pojedinih nedostataka primarnih metoda, u slučaju nepotpunih ili nejasnih informacija [168]. Na primer, hibridna fuzzy LHFS metoda (eng. linguistic hesitant fuzzy set) je korišćena za prioritizaciju OIE na primeru studije slučaja jedne kineske regije [169]. Kao glavni atribut primene ove metode navodi se otklanjanje slučajnosti i nejasnoća nastalih zbog subjektivnih stavova donosioca odluka. Utvrđivanje i rangiranje svih poteškoća za ostvarivanje energetskeg sistema sa značajnim udelom OIE, može se postići primenom hibridne metode koja uključuje CRITIC i Fuzzy-TOPSIS [170]. Pomenuta metoda je sprovedena na primeru Gane, uz isticanje da se u budućim istraživanjima treba oslanjati i na ostale MCDM metode. Za razmatranje instalacije različitih tehnologija za korišćenje energije talasa u energetskeg planiranju primenjivana je hibridna metoda koja uključuje FDM (eng. fuzzy delphy method) i PROMETHEE, uz analizu 52 kriterijuma. Prilikom ove analize najpre su određeni najvažniji kriterijumi primenom FDM, dok je za analizu modela korišćena PROMETHEE metoda. Energetski sistemi u ruralnim područjima, sa težnjom dostizanja energetskeg sistema koji se zasniva na upotrebi 100% OIE, analizirani su na primeru Pakistana. U radu je korišćena hibridna metodologija koja je uključivala časovnu optimizaciju i fuzzy AHP metodu. Fuzzy AHP korišćen je i sa geografskim informacionim sistemom (GIS) i Bajesovom mrežom [171], sa ciljem ispitivanja energetskeg scenarija. GIS je u kombinaciji sa višekriterijumskom analizom korišćen i radi utvrđivanja mogućnosti za instalaciju turbina na moru na primeru više evropskeg zemalja [172]. Analiza mogućnosti korišćenja OIE u Iranu uključivala je primenu hibridne metode ANP i analize Korisnosti, mogućnosti, troškova i rizika (eng. benefit, opportunity, cost, risk (BOCR)). Za razliku od uobičajene podele kriterijuma u višekriterijumskoj analizi, prikazanih u tabeli 3.12, u ovom radu su kriterijumi razvrstani u skladu sa BOCR analizom, na osnovu čega su tehnologije rangirane primenom ANP metode [11]. Hibridna višekriterijumska metoda za utvrđivanje optimalne lokacije za proizvodnju vodonika primenom PV panela korišćena je prilikom analize potencijala Uzbekistana [173]. Integracijom različitih MCDM metoda postignuta je pouzdanost u dobijanju složenog rešenja.

Poređenjem različitih hibridnih metoda radi utvrđivanja adekvatne inovativne metode za analizu investicionog planiranja za OIE, utvrđeno je da rešenja dobijena različitim metodama mogu biti prilično koherentna [174].

Iako se u literaturi u oblasti energetskeg planiranja koriste različite metode višekriterijumske analize, treba istaći da je AHP fleksibilna, intuitivna metoda koja objedinjuje subjektivne i objektivne mere prilikom ocenjivanja [172]. Analizom 86 radova publikovanih u priznatim međunarodnim časopisima u periodu od 2001-2018 utvrđeno je da se u više od 50% publikovanih radova koristi AHP metoda, zbog toga što je lako razumljiva, a primenljiva i kod kompleksnih problema [175]. Ovo je potvrđeno u preglednim radovima u kojima je analizirana upotreba višekriterijumske analize u oblasti održivog energetskeg razvoja [166], [176]- [178].

Pored AHP metode, u oblasti OIE u objavljenoj literaturi najviše su korišćene ANP, ELECTRE i TOPSIS [178]. Međutim, kao što je pokazano u radu [163], WSM je jednostavnija za razumevanje i korišćenje, i rezultati se ne razlikuju značajno u poređenju sa AHP metodom.

Na osnovu dosadašnjih literaturnih istraživanja u oblasti primene višekriterijumske analize u energetskeg planiranju, kriterijumi za rangiranje alternativa se najčešće svrstavaju u četiri kategorije, prikazane u tabela 3.12.

Tabela 3.12 Kriterijumi za rangiranje alternativa prilikom primene višekriterijumske analize u oblasti energetskeg planiranja

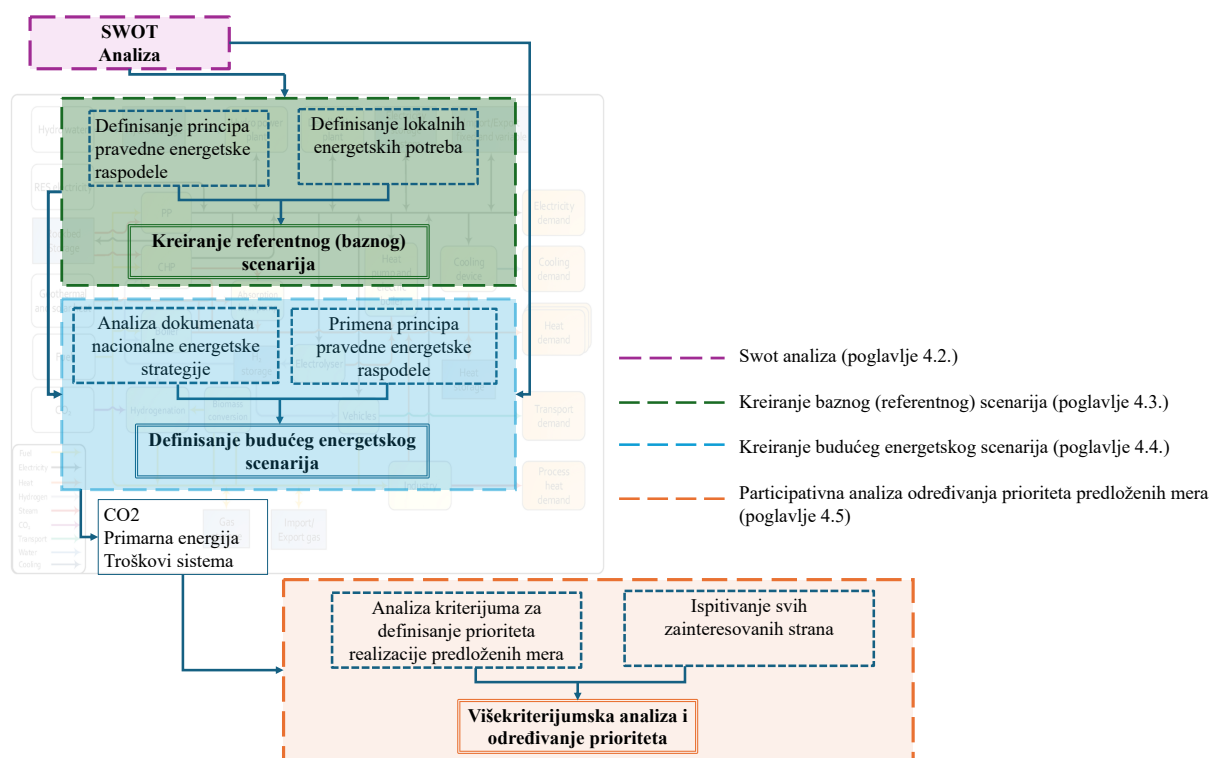
<i>Kategorija</i>	<i>Kriterijumi</i>	<i>Referenca</i>
Tehnički kriterijumi	Pouzdanost	[179], [180]
	Efikasnost tehnologije	[177], [179], [181]
	Bezbednost	[166], [179], [182]
	Poznavanje inovativnih tehnologija	[11], [180]
	Stepen razvoja tehnologije	[177], [181]-[183]
	Faktor kapacitivnosti	[177], [181]
	Rizik pri radu	[168]
	Pouzdanost pri radu	[168], [182]
	Vreme instalacije	[168]
	Mogućnost predviđanja performansi	[168]
	Posedovanje lokalnog tehničkog znanja	[168], [183]
	Primena lokalno dostupnih energetskeg izvora	[11]
	Nestabilnost energetskeg tržišta	[11]
	Upotreba primarne energije	[182]
Mogućnost popravke sistema usled kvara	[183]	
Ekonomski kriterijumi	Investicioni trošak	[11], [166], [168], [177], [179]- [183]
	Operacioni troškovi i troškovi održavanja	[11], [177], [179], [181]-[183]
	Period otplate investicije	[166], [168], [177], [180], [182]
	Troškovi energije	[11], [166], [177], [181], [182]
	Dostupnost fondova	[11], [168]
	Neto-sadašnja vrednost	[166], [168], [182]

Nastavak tabele 3.12.

	Predviđeno vreme eksploatacije	[182], [183]
Kriterijumi zaštite životne sredine	Emisija SO <sub>2</sub>	[168], [179], [182]
	Emisija NO <sub>x</sub>	[166], [168], [179], [181], [182]
	Emisija PM čestica	[166], [168], [179], [182]
	Emisija CO <sub>2</sub>	[166], [168], [177], [181], [182]
	Emisija CO	[166], [182]
	Upotreba zemljišta	[11], [168], [177], [179], [181], [182]
	Potreba za odlaganjem otpada	[168]
	Očuvanje biodiverziteta	[166]
	Korišćenje ograničenih resursa	[166]
	Nivo zagađenja bukom	[166], [182]
Društveni kriterijumi	Društvena prihvatljivost	[11], [166], [168], [177], [179], [181], [183]
	Mogućnost zapošljavanja	[11], [166], [168], [177], [179], [180]-[183]
	Regionalni razvoj	[11], [180], [182], [183]
	Političko prihvatanje	[168], [177]
	Usklađenost sa nacionalnim energetske politikama	[11], [168]
	Razvoj alternativnih izvora koji imaju dobit za životnu sredinu	[11]
	Utica na razvoj turizma	[183]

## 4. DEFINISANJE METODOLOGIJE

Metodologija prikazana u ovoj doktorskoj disertaciji se odnosi na definisanje budućeg energetskeg scenarija u procesu dekarbonizacije grada, koji je u skladu sa strateškim nacionalnim ciljevima.



Slika 4.1. Šematski prikaz korišćene metodologije

Kao što je prikazano na slici 4.1., prvi korak metodologije se odnosi na sprovođenje SWOT analize, radi sagledavanja svih okolnosti u analiziranom gradu. Zatim se, na osnovu dobijenih rezultata i analize podataka o energetskeg potrebama u svim sektorima (domaćinstva, javne zgrade, transport, industrija), kreira referentni (bazni) scenario. Ovaj scenario predstavlja trenutne energetske potrebe grada i on služi kao prvi korak u analizi planova i očekivanih promena u budućim energetskeg sistemima. Scenariji budućih energetskeg sistema su definisani na osnovu analize strateških energetskeg dokumenata zemlje u kojoj se analizirani grad nalazi, kao i na osnovu ispitivanja i utvrđivanja mogućnosti za iskorišćenje svih lokalnih potencijala.

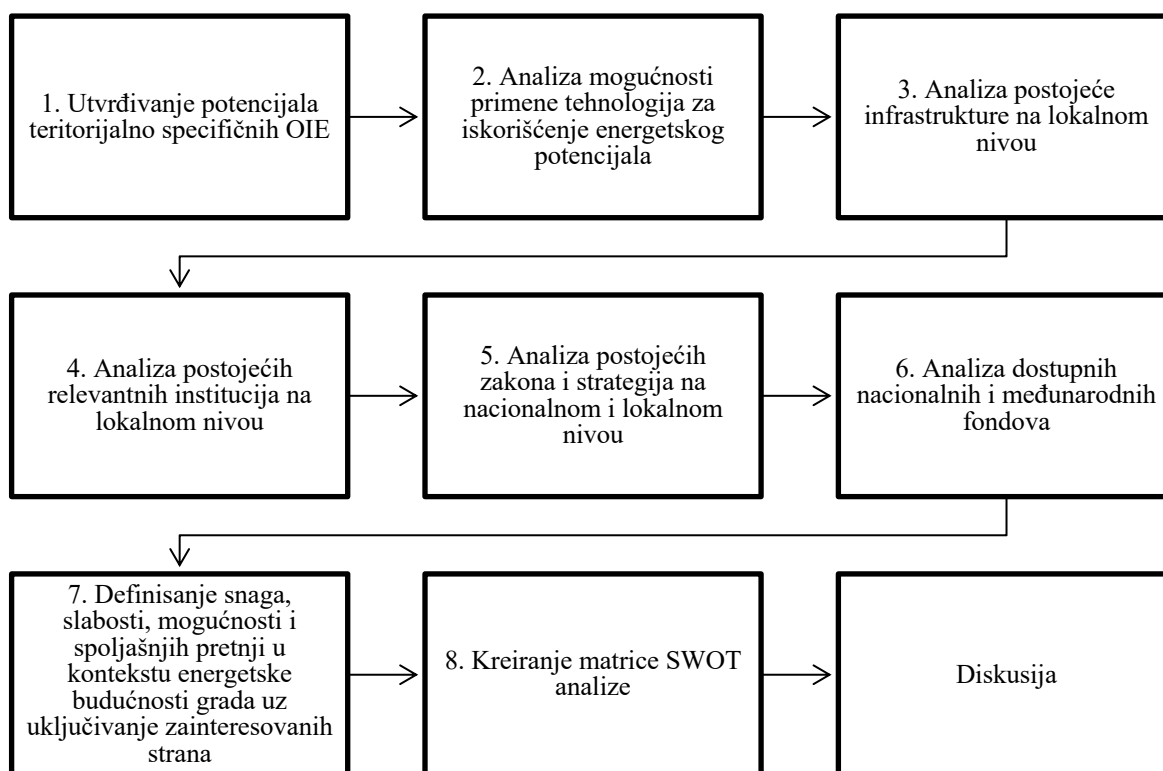
Metodologija se zasniva na utvrđivanju principa pravednosti u definisanju energetskeg potreba gradske sredine, koji omogućavaju jednake uslove za sve gradove u zemlji. Iako se predložene mere zasnivaju na odredbama definisanim nacionalnim dokumentima, čime se povećavaju prilike za njihovu realizaciju, redosled implementacije mera određen je analizom mišljenja zainteresovanih strana o značaju posledica predloženih mera na društveni, ekonomski i aspekt životne sredine. S tim u vezi, prikazana metodologija u predstavlja spregu energetskeg modela i participativnog učešća svih zainteresovanih strana u procesu klimatske neutralizacije. Kroz uspostavljanje jasnih principa i definisanje granica energetskeg modela grada, prikazana metodologija je replikabilna u

svim studijama slučaja i može se primenjivati na svim nivoima urbanih sredina, od urbanih gradskih celina [184], do celokupnih gradova [185]. Kao takva, može poslužiti donosiocima odluka za kreiranje lokalnih strateških dokumenata.

## 4.2. SWOT analiza

Prilikom analiza energetske sistema na gradskim nivoima potrebno je sagledati sve lokalne specifičnosti, pravne okvire i moguće prepreke, kako bi se u obzir uzele sve potencijalne okolnosti i razmotrile sve mogućnosti za integraciju OIE i smanjenjem emisije ugljen-dioksida. Kao jedan od alata koji se može koristiti za sveobuhvatno razumevanje karakteristika grada u kontekstu energetskog planiranja je analiza snaga, slabosti, prilika i pretnji (SWOT). Ova analiza omogućava identifikaciju unutrašnjih faktora (snaga i slabosti), kao i spoljašnjih okolnosti (prilike i pretnje) koje mogu da utiču na ostvarivanje procesa dekarbonizacije u gradovima [186].

Sprovođenje SWOT analize u kontekstu energetskih promena na gradskim nivoima je moguće uz sprovođenje koraka prikazanim na slici 4.2. [187].

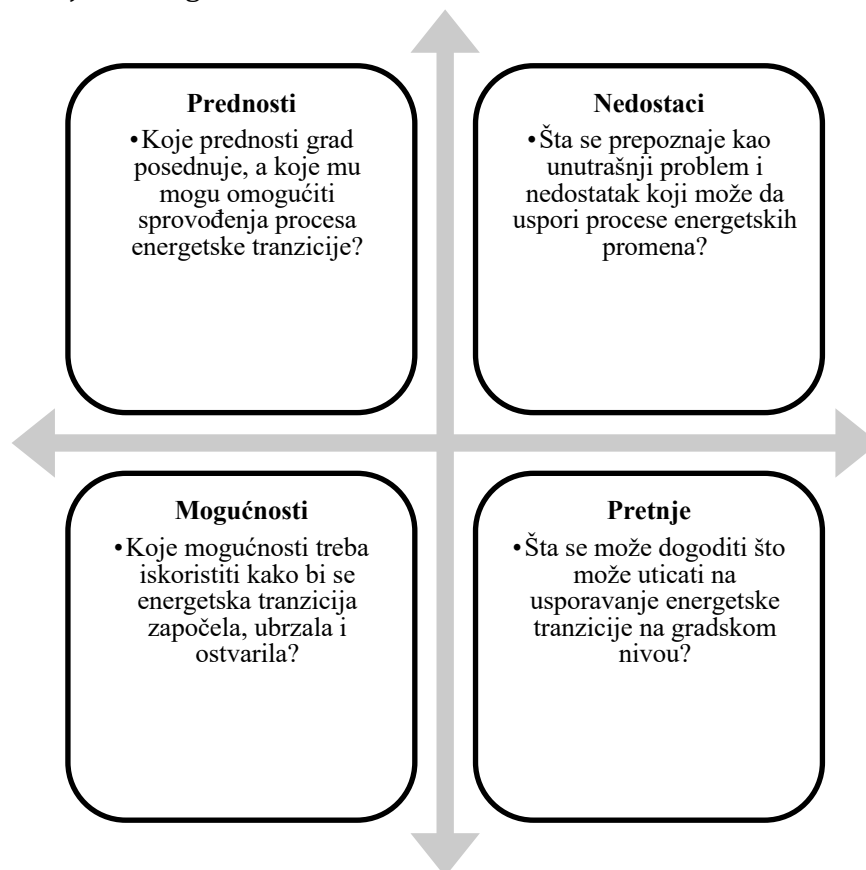


Slika 4.2. Sprovođenje SWOT analize na lokalnom nivou

Analizom dostupnih podataka i specifičnosti lokaliteta, potrebno je utvrditi potencijale teritorijalno dostupnih OIE. U ovu svrhu se može koristiti analiza dostupnih krovnih površina, kako bi se razmotrila mogućnost iskorišćenja solarnog potencijala. Krovne površine se mogu odrediti primenom Geografskog Informacionog Sistema (GIS) ili uvođenjem i usvajanjem pretpostavki na osnovu statističkih podataka o broju postojećih

zgrada i njihovom periodu gradnje. Takođe, potrebno je razmotriti mogućnosti instalacije drugih vidova OIE, poput vetroelektrana, geotermalne energije ili energije rečnih vodotokova, kao i potencijal biomase. Nakon analize energetskeg potencijala, potrebno je utvrditi koje se tehnologije mogu uključiti u formiranje pametnog energetskeg sistema, kako bi se omogućilo maksimalno iskorišćenje teritorijalno specifičnih OIE. S tim u vezi je neophodno razmotriti postojeću infrastrukturu u gradu, poput centralizovanih sistema za proizvodnju energije, elektrodistributivne mreže, centara za obradu podataka (data centri), gradskih deponija, mogućnosti iskorišćenja otpadne toplote iz industrije i slično. Prilikom analize budućih energetskeg sistema u obzir je važno uzeti i postojanje univerzitetskih centara ili drugih institucija koje su od značaja u oblasti, jer je saradnja lokalnih donosioca odluka i lokalnih eksperata od izuzetne važnosti u smislu obuhvata svih relevantnih parametara i razumevanja lokalnih problema. Kako bi predloženi energetske sistemi bili u skladu sa globalnim, evropskim i nacionalnim ciljevima, predloženi scenariji budućih energetskeg sistema treba da odgovore na nacionalnu strategiju i da budu u skladu sa važećim regulativama. Takođe, na ovaj način se obezbeđuje mogućnost dobijanja sredstava iz nacionalnih i međunarodnih fondova za realizaciju predloženih rešenja.

Nakon analize, potrebno je predstaviti sve utvrđene unutrašnje i spoljašnje faktore koji mogu doprineti, ili otežati, realizaciju energetskeg scenarija budućnosti svim zainteresovanim stranama na lokanom nivou, uključujući građane, akademsku zajednicu, nevladine organizacije i lokalne donosiocce odluka. Kao rezultat zajedničke saradnje, kreirana matrica SWOT analize (prikazana na slici 4.3.) treba da posluži kao predmet za dalju diskusiju u kojoj se pronalaze načini za prevazilaženje unutrašnjih slabosti i spoljašnje pretnje, kao i da se pronađu najbolji načini za iskorišćenje unutrašnjih i spoljašnjih potencijala i mogućnosti.



Slika 4.3. Matrica SWOT analize sa pitanjima koja olakšavaju njeno razumevanje

### 4.3. Kreiranje referentnog energetskog scenarija

Kreiranje referentnog energetskog modela predstavlja prvi korak u analizi gradskih energetskih sistema. Referentni, odnosno bazni model, predstavlja trenutni energetski model grada za poslednju godinu za koju su dostupni podaci. Referentni model služi kao osnova za modeliranje budućih energetskih sistema, ali i za praćenje promena očekivanih indikatora. S tim u vezi, neophodno je koncizno definisanje granica analiziranog sistema grada i, u skladu sa tim, potreba svih energetskih sektora. Kako je potrebno definisati metodologiju koja može biti korišćena, ne samo u jednom gradu, već lako ponovljiva na svim studijama slučaja, kreiranje scenarija se zasniva na usvajanju određenih pretpostavki. Naime, kako gradovi predstavljaju deo države u kojoj se nalaze, ne treba ih posmatrati kao izdvojeno energetsko ostrvo, već kao deo slagalice za realizaciju nacionalnih energetskih ciljeva. S tim u vezi, neophodno je uvrstiti određena ograničenja kada je u pitanju definisanje energetskih potreba (potreba za električnom energijom, toplotnom energijom u sistemu daljinskog grejanja, ukupnim energetskim potrebama u sektorima industrije, transporta i u domaćinstvima). Takođe, ograničenja su neophodna i u slučaju definisanja postojećih proizvodnih kapaciteta i uspostaviti vezu između nacionalnog energetskog sistema i energetskog sistema na lokalnim, gradskim nivoima.

#### 4.3.1. Definisanje energetskih potreba na nivou grada

Prilikom definisanja energetskih potreba grada neophodno je usvojiti principe pravednosti [42], kojima se omogućava da svi gradovi u zemlji imaju jednake uslove za realizaciju procesa klimatske neutralizacije. Naime, kako se produkti sektora industrije ne koriste samo unutar gradova u kojima se fizički proizvode, uspostavljanje principa pravednosti se zasniva na ravnomernoj raspodeli potrošnje energenata u skladu sa udelom stanovnika u analiziranom gradu. S tim u vezi, energetske potrebe industrije se mogu definisati na osnovu izraza (1):

$$E_{ind, grad} = \sum_{m=1}^M E_{ind, grad, m} \quad (1)$$

gde su:

$E_{ind, grad}$  [GWh/god] – ukupna godišnja potreba za energentima u sektoru industrije na gradskom nivou,

$E_{ind, grad, m}$  [GWh/god] – ukupna godišnja potreba za energentom  $m$  u sektoru industrije, na gradskom nivou, koja se računa prema formuli:

$$E_{ind,grad_m} = E_{ind,zemlja_m} \frac{P_{grad}}{P_{zemlja}} \quad (2)$$

gde su:

$E_{ind,zemlja_m}$  [GWh/god] – godišnja potreba za energentom  $m$  (ugalj, nafta, naftni derivati, prirodni gas...) u industriji na nacionalnom nivou,

$P_{grad}$  – broj stanovnika u gradu,

$P_{zemlja}$  – broj stanovnika u zemlji u kojoj se analizirani grad nalazi.

Isti principi pravednosti usvojen su i za sektor transporta (izraz (3)), jer se očekuje da stanovnici i dobra putuju i izvan geografskih granica samog grada. Ovaj pristup omogućava pravednu distribuciju emisija centralizovanih emitera, čiji se produkti koriste na nivou cele zemlje i izvan njenih granica.

$$E_{trans,grad} = \sum_{k=1}^K E_{trans,grad_k} \quad (3)$$

gde su:

$E_{trans,grad}$  [GWh/god] – ukupna godišnja potreba za energentima na gradskom nivou,

$E_{trans,grad_k}$  [GWh/god] – ukupna godišnja potreba za energentom  $k$  na gradskom nivou, koja se računa prema formuli.

$$E_{trans,grad_k} = E_{trans,zemlja_k} \cdot \frac{P_{grad}}{P_{zemlja}} \quad (4)$$

gde je:

$E_{trans,zemlja_k}$  [GWh/god] – godišnja potreba za energentom  $k$  (prirodni gas, nafta i naftni derivati, vodonik...) u transportu na nacionalnom nivou.

Ukupne godišnje potrebe za električnom energijom na gradskom nivou definisane su u zavisnosti od ukupnih godišnjih časovnih potreba u svim sektorima i mogu se odrediti primenom izraza (5):

$$E_{god} = \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^{8784} e_{s,t} \quad (5)$$

gde su:

$E_{god}$  [GWh/god] – ukupna godišnja potreba za električnom energijom,

$S$  – skup svih energetske sektora (transport, industrija, javne zgrade i domaćinstva) uključujući gubitke u distributivnoj mreži,

$t$  – časovi u godini od 1 do 8784, uključujući sate u prestupnoj godini,

$e_{s,t}$  [GWh] – potreba za električnom energijom na časovnom nivou u sektoru  $s$  u času  $t$ .

Sa druge strane, podaci o upotrebi energije u sistemu daljinskog grejanja, individualnim ložištima, kao i podaci o energetske potrebama svih javnih institucija, odgovaraju realnim energetske potrebama u gradu tokom analizirane godine. Informacije o korišćenju energije u ovim sektorima se mogu dobiti na upit, kontaktirajući predstavnike sistema daljinskog grejanja, kao i predstavnike lokalnih institucija i gradske energetske menadžere. U određenim slučajevima, ovi podaci mogu biti javno dostupni u vidu godišnjih izveštaja ili energetske programa. Dostupni podaci se uglavnom odnose na ukupne godišnje potrebe za energijom.

Kada je u pitanju količina potrebne energije u sistemu daljinskog grejanja u obzir je potrebno uzeti, ne samo energetske potrebe u domaćinstvima, već i gubitke u distributivnoj mreži. S tim u vezi, ukupna količina potrebne finalne toplotne energije u daljinskom grejanju je definisana kao:

$$Q_{DGf} = E_{DG} / (1 - \rho_{DGm}) \quad (6)$$

gde su:

$Q_{DGf}$  [GWh/god] – ukupna potrebna količina finalne energije u sistemu daljinskog grejanja,

$E_{DG}$  [GWh/god] – ukupna finalna količina toplotne energije koja se dostavlja krajnjim korisnicima daljinskog grejanja,

$\rho_{DGm}$  [%] – gubici u toplotnoj distributivnoj mreži.

Prilikom utvrđivanja ukupne količine energenata koja je potrebna da bi se zadovoljile energetske potrebe daljinskog grejanja u obzir je potrebno uzeti i gubitke u kotlovima:

$$Q_{DGp} = Q_{DGf} / \eta_{DGk} \quad (7)$$

gde su:

$Q_{DGp}$  [GWh/god] – ukupna potrebna količina energije u sistemu daljinskog grejanja

$\eta_{DGk}$  [%] – stepen korisnosti kotlova u sistemu daljinskog grejanja.

Kako kreiranje energetskih sistema teži temporalnom uspostavljanju energetskog bilansa (najčešće na časovnom nivou), potrebno je definisati količine toplote koje daljinsko grejanje treba da obezbedi u okviru svakog analiziranog sata. Časovna distribucija toplotne energije može se odrediti na osnovu spoljašnje temperature. Za ovu svrhu se može koristiti metod grejnog stepen sata (izrazi (8)-(12)). Grejni stepen sat se koristi za analizu uticaja temperaturnih varijacija na definisanje energetskih potreba i određuje se na časovnom nivou, kao razlika između referentne temperature komfora tokom grejne sezone i spoljašnje temperature, kada je ona niža od temperature granice grejanja (izraz 8). Granica grejanja je jedinstvena za svaki region u zavisnosti od društvenih faktora, energetskog snabdevanja i karakteristike temperaturnih promena [188].

$$GSS = \begin{cases} T_{tk} - T_s, & T_s < T_{gg} \\ 0 & T_s \geq T_{gg} \end{cases} \quad (8)$$

gde su:

$GSS$  [°C] – grejni stepen sat,

$T_{tk}$  [°C] – temperatura termičkog komfora grejanja,

$T_s$  [°C] – spoljašnja temperatura,

$T_{gg}$  [°C] – temperatura granice grejanja.

Podaci o spoljašnjim temperaturama na časovnom nivou u toku godina su dostupni na sajtu [189] i mogu se odrediti za bilo koji grad u svetu.

Ukupan broj grejnih stepen sati na godišnjem ( $GSS_{god}$ ) nivou se određuje kao:

$$GSS_{god} = \sum_{t=1}^{8784} GSS_t \quad (9)$$

Zatim je za svaki sat potrebno odrediti udeo GSS u ukupnim grejnim stepen satima na godišnjem nivou (10):

$$w_t = \frac{GSS}{GSS_{god}} \quad (10)$$

Na kraju, potrebe za toplotnom energijom na časovnom nivou definisane su kao:

$$e_t = Q_{DGf} \cdot w_t \quad (11)$$

Kada sistem daljinskog grejanja treba da zadovolji energetske potrebe koje nisu uslovljene spoljašnjim uslovima, poput zagrevanja sanitarne tople vode ili za potrebe industrijskih procesa, procentualna količina energije treba da bude dostupna u svakom trenutku u toku dana. Ovo, tzv. "bazno", opterećenje varira u zavisnosti od energetskih potreba i karakteristika je svakog grada. Najčešća bazna opterećenja variraju između 20-25% i prosečna bazna opterećenja za zemlje EU se mogu pronaći [190]. Časovne potrebe za toplotnom energijom se tada definišu kao:

$$e_t = Q_{DGf} \cdot \left( \frac{\alpha}{8784} + (1 - \alpha) \cdot w_t \right) \quad (12)$$

gde je:

$\alpha$  [%] – udeo energije za zadovoljenje baznog opterećenja.

Analiza individualnih ložišta često nije transparentna i u tom slučaju se koriste dostupni statistički podaci na nacionalnom nivou. Naime, ukoliko je poznat procenat različitih sistema grejanja u domaćinstvima, uključujući sistem daljinskog grejanja i različite vidove individualnih ložišta, količina toplotne energije koja se koristi za zagrevanje domaćinstava, koji nisu priključeni na sistem daljinskog grejanja, se može odrediti primenom formula (13)-(16):

$$E_{G\_total} = \frac{E_{DG}}{u_{Dg}} \quad (13)$$

gde su:

$E_{G\_total}$  [GWh/godina] – ukupna potrebna količina energije za zadovoljenje toplotnih potreba za zagrevanje prostora u sektoru zgrada,

$u_{Dg}$  [%] – udeo daljinskog grejanja u ukupnim toplotnim potrebama za zagrevanje prostora u sektoru zgrada.

Shodno tome, ukupna količina finalne energije proizvedene u sistemu individualnih ložišta ( $E_{ind\_total}$  [GWh/godina]) se može odrediti kao:

$$E_{ind\_total} = E_{G\_total} - E_{DG} \quad (14)$$

Dok se količina energije dobijene iz svakog tipa individualnih ložišta određuje kao:

$$E_{ind\_i} = E_{ind\_total} \cdot s_i \quad (15)$$

gde su:

$E_{ind\_i}$  [GWh/godina] – količina energije dobijena iz individualnog ložišta tipa  $i$ ,

$s_i$  [%] – udeo individualnog ložišta tipa  $i$  u ukupnom broju individualnih ložišta u gradu,

$i$  – tip individualnog ložišta (npr. kotao na čvrstu biomasu, prirodni gas, mazut, ugalj, električni kotlovi ili toplotne pumpe).

Količina energenata potrebnih za zadovoljenje ukupnih energetske potrebe za zagrevanjem zgrada primenom sistema individualnih ložišta se može odrediti kao:

$$E_{ind\_i\_p} = \sum \frac{E_{ind\_i}}{\eta_i} \quad (16)$$

gde su:

$E_{ind\_i\_p}$  [GWh/godina] – ukupna količina primarne energije potrebne za zagrevanje sektora zgrada primenom individualnih ložišta,

$\eta_i$  [%] – stepen korisnosti za tip individualnih ložišta  $i$ , ili koeficijent grejanja u sučaju toplotnih pumpi.

Kako je, kao i u slučaju daljinskog grejanja, potrebno odrediti časovne potrebe za toplotnom energijom za korišćenje individualnih ložišta, moguće je primeniti formule (7)-(11), pri tome je, umesto finalne energije u sistemu grejanja potrebno uzeti u obzir potrebnu finalnu energiju u individualnim ložištima.

U zemljama u kojima postoji potreba za hlađenjem zgrada, određivanje potrebne količine energije se može sprovesti poštujući iste principe kao i prilikom definisanja časovne potrebe za grejanjem, pri tome se u obzir, umesto grejnog stepena sata, koristi stepen sat hlađenja:

$$HSS = \begin{cases} T_s - T_{tgh}, & T_s > T_{gh} \\ 0 & T_s \leq T_{gh} \end{cases} \quad (17)$$

gde su:

$HSS$  [°C] – stepen sat hlađenja,

$T_{tkh}$  [°C] – temperatura termičkog komfora hlađenja,

$T_{gh}$  [°C] – temperatura granice hlađenja.

Ukupna količina finalne energije potrebna za hlađenje sektora zgrada može se odrediti na osnovu izraza:

$$E_{h.p} = \sum_{i=1}^{8784} \frac{E_{hi}}{\eta_{hi}} \quad (18)$$

gde su:

$E_{h.p}$  [GWh/godina] – ukupna godišnja količina finalne energije potrebne za hlađenje sektora zgrada,

$E_{hi}$  [GWh/godina] – časovna količina finalne energije potrebne za hlađenje sektora zgrada,

$\eta_{hi}$  [%] – koeficijent hlađenja.

Napominje se da je hlađenje u industrijskim procesima najčešće uključeno u postojeće potrebe za električnom energijom.

#### 4.3.2. Definisanje postrojenja za proizvodnju energije

Kako se u zemljama u kojima je energetska tranzicija u začetku, proizvodnja električne energije još uvek zasniva na primeni konvencionalnih sistema za proizvodnju energije, prilikom analize dekarbonizacije u gradovima važno je u obzir uzeti udele u centralizovanim proizvodnim jedinicama. Na ovaj način se omogućava da se emisije ugljen-dioksida iz postrojenja koja koriste fosilna goriva ravnomerno rasporede u svim gradovima, kao i da se iskoriste prednosti centralizovanih postrojenja OIE, poput velikih i reverzibilnih hidroelektrana elektrana, geotermalnih elektrana ili nuklearnih elektrana, kada su one zastupljene tehnologije. Udeli pomenutih proizvodnih postrojenja, kako u količini proizvedene energije, tako i u količini upotrebe primarne energije, treba da budu definisani na osnovu udela broja građana analiziranog grada u ukupnoj populaciji zemlje u kojoj se analiziran grad nalazi (na isti način kao što je definisana energetska potreba u sektorima industrije i transporta, (poglavljju 4.3.1.)). Energenti koji su korišćeni za proizvodnju potrebne količine električne energije u referentnoj godini se mogu utvrditi na osnovu statističkih podataka i godišnjeg energetskeg bilansa zemlje. Ovi podaci su najčešće dostupni na nacionalnom nivou i prezentovani u statističkim energetskegim biltenima zemlje, ali se podaci o energetskegim miksu za svaku zemlju mogu pronaći i na sajtu Međunarodne agencije za energetiku [191].

Udeo postojećih decentralizovanih energetskegih sistema u zemlji se ne uzima u obzir prilikom kreiranja energetskegog scenarija na lokalnom nivou, izuzev ako postojeći kapaciteti nisu instalirani unutar granica grada koji je predmet analize. Opravdanost ovakve odluke leži u potrebi za maksimalnim iskorišćenjem teritorijalno dostupnih OIE u blizini mesta gde se električna energija proizvodi, čime se smanjuje mogućnost ostvarivanja negativnih posledica instalacije OIE na zagušenje mreže. Sa druge strane, ukoliko unutar granica grada postoje instalirani kapaciteti OIE, u obzir je potrebno uzeti njihove kapacitete, kao i vremenske uslove od kojih njihova proizvodnja zavisi. Vremenski uslovi za proizvodnju električne energije iz vetroelektrana ili solarnih elektrana su

karakteristika svakog podneblja i njihova istorijska časovna godišnja varijabilnost je dostupna na [189].

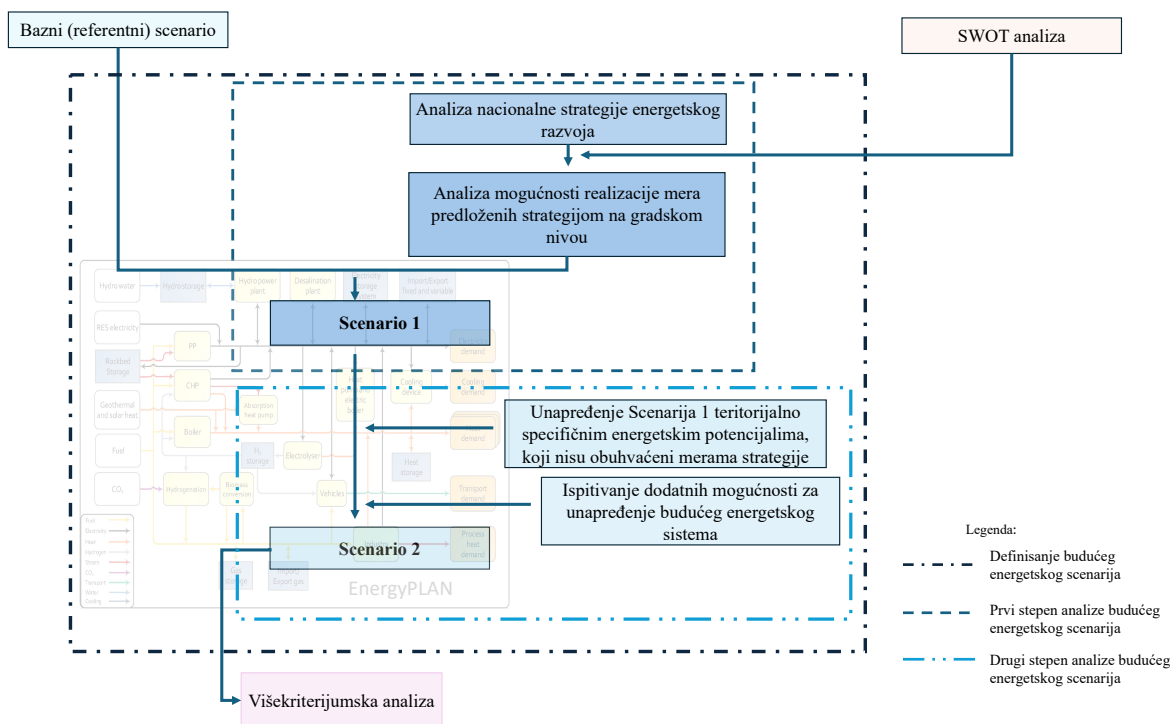
Kako je u poglavlju 4.3.1. već napomenuto, prilikom analize energetske sistema, važno je posmatrati vremenski bilans na časovnom nivou. Shodno tome, potrebno je odrediti količinu energije koja je bila proizvedena u toku svakog sata u analiziranoj godini. Istorijski podaci o časovnoj distribuciji proizvodnje električne energije, angažovanim proizvodnim kapacitetima i količini uvezene i izvezene energije za svaku evropsku zemlju su dostupni na [192].

Proizvodnja toplotne energije u gradu iz sistema daljinskog grejanja odgovara toplotnim potrebama krajnjih korisnika i efikasnosti sistema. Proizvodni kapaciteti u referentnom energetske sistema se definišu na osnovu snaga kotlova, kogeneracionih postrojenja ili spalionica otpada, koji su deo postojećeg sistema daljinskog grejanja. Takođe, potrebno je odrediti i količinu toplote koja se dostavlja sistemu daljinskog grejanja, poput otpadne ili geotermalne toplote. Radi analize energetske bilansa na godišnjem nivou, potrebno je utvrditi kapacitete skladišta toplote, kao i kapacitete solarnih kolektora i toplotnih pumpi, jer ove tehnologije omogućavaju bolju integraciju OIE i omogućavaju smanjenje upotrebe fosilnih goriva. Podaci o udelima energenata, zajedno sa sveobuhvatnom efikasnošću sistema daljinskog grejanja, uglavnom su dostupni na upit.

Nakon kreiranja i generisanja podataka za energetske model u toku referentne godine, potrebno je uporediti dobijene podatke sa statističkim podacima o potrošnji primarne energije u gradu. Validacija dobijenih rezultata služi kao potvrda dobro definisanog referentnog modela, i kao takav, kreirani model može poslužiti kao osnova za kreiranje budućih energetske scenarija i analizu uticaja integracije novih mera.

## 4.4. Definisiranje budućeg energetskeg scenarija

Budući energetskeg scenarij grada se definiše sprovođenjem dvostepene analize, kao što je prikazano na slici 4.4.



Slika 4.4. Koraci definisanja budućeg energetskeg scenarija

Planiranje energetske tranzicije na lokalnom nivou koje je u skladu sa nacionalnim ciljevima povećava mogućnost njene realizacije. S tim u vezi, najpre je neophodno analizirati mere koje su predložene strateškim energetskeg dokumentima zemlje u kojoj se analizirani grad nalazi. Za potrebe analize evropskih gradova moguće je analizirati Integrisane energetske i klimatske nacionalne planove, jer, kao što je naznačeno u poglavlju 3.4., sve zemlje članice, kao i zemlje koje su u kandidaturi za članstvo, su se obavezale na izradu ovog dokumenta. Pored toga, zvanične energetske strategije zemalja se najčešće zasnivaju na scenarijima predstavljenim u ovom dokumentu. Usvajanje podataka prikazanih u strateškim dokumentima je od posebne važnosti zato što se njima predviđaju buduće očekivane energetske potrebe zemlje. S tim u vezi, primenom principa pravedne energetske raspodele, koji su prikazani u poglavlju 4.2., omogućeno je definisanje budućih energetskeg potreba grada. Na ovaj način se reguliše da grad i u budućnosti bude prepoznat kao deo veće energetske celine, istovremeno ograničavajući mogućnost „nepravedne“ raspodele resursa, kao i suboptimizacije sistema. Dakle, za utvrđivanje budućih energetskeg potreba grada u upotrebi električne energije, kao i industrije i transporta, mogu se primenjivati formule (1)-(4). Pri tome se, umesto trenutnih, koriste projektovane buduće potrebe za energentima u pomenutim sektorima, kao i predviđeni budući broj stanovnika. Planirani broj stanovnika je najčešće moguće odrediti na predvideti zvaničnih statističkih dokumenata.

Kada je u pitanju potreba za toplotnom energijom, ona se određuje na osnovu planiranog godišnjeg procenta stope unapređenja energetske efikasnosti u sektoru zgrada kao:

$$E_g = E_{DG} - E_{DG} \cdot m^k \quad (19)$$

gde su:

$E_g$  [GWh/godina]- predviđena potreba za energijom u sistemu daljinskog grejanja,

$m$  [-] – broj godina u kojima se očekuje ostvarivanje predviđene godišnje stope unapređenja energetske efikasnosti,

$k$  [%] – procentualno očekivano godišnje unapređenje energetske efikasnosti.

Na isti način se mogu odrediti promene u potrebama za toplotnom energijom u individualnim ložištima, pri tome se umesto finalne energije potrebne za zagrevanje zgrada priključenih na sistem daljinskog grejanja ( $E_{DG}$ ), koristi ukupna potrebna količina energije za zadovoljenje toplotnih potreba u zgradama sa individualnim sistemom grejanja ( $E_{ind\_total}$  [GWh/godina]).

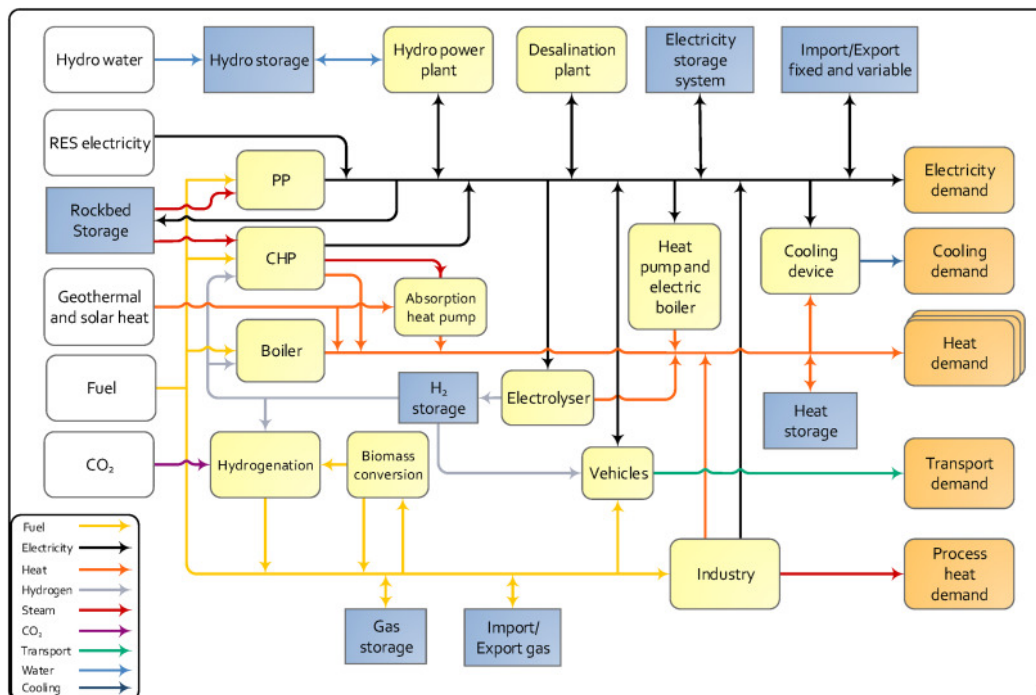
Pored definisanih energetske potreba, Scenario 1 budućeg energetskeg sistema grada se zasniva na definisanju proizvodnih kapaciteta varijabilnih OIE. U ovu svrhu se mogu koristiti podaci prikupljeni prilikom izrade SWOT analize (poglavlje 4.2), a koji se odnose na određivanje potencijala za instaliranje teritorijalno specifičnih OIE. Naime, u ovom stepenu analize budućih energetskeg sistema, razmatra se mogućnost instaliranja novih kapaciteta OIE predviđenim nacionalnom energetskeg strategijom, koji su definisani u skladu sa principom pravedne energetske raspodele, a odnose se na one oblike OIE koje je moguće instalirati unutar granica grada. Takođe, ovaj scenario obuhvata definisane udele svih predloženih mera, ukoliko je njihova integracija moguća na nivou analiziranog grada (poput upotrebe toplotnih pumpi, planiranih sistema za skladište energije, solarni kolektori, geotermalna energija i slično).

Nakon utvrđivanja posledica nacionalnog strateškog dokumenta na energetskeg tranziciju na nivou grada, pristupa se kreiranju Scenarija 2 budućeg energetskeg sistema. U ovom stepenu analize, ispituju se dodatne mogućnosti za dekarbonizaciju na gradskom nivou, uključujući sve one mere koje su teritorijalno specifične, a koje nisu obuhvaćene strategijom. Napominje se da sve mere predložene u Scenariju 2 treba da budu u skladu sa važećim zakonskim regulativama i preporukama.

Svi podaci definisani pri kreiranju budućih energetskeg sistema poslužiće kao ulazni podaci u odgovarajući softverski paket, dok će izlazni podaci iz simulacija poslužiti kao ulazni podaci u participativnom postupku određivanja prioriteta, odnosno višekriterijumsku analizu.

## 4.5. EnergyPLAN

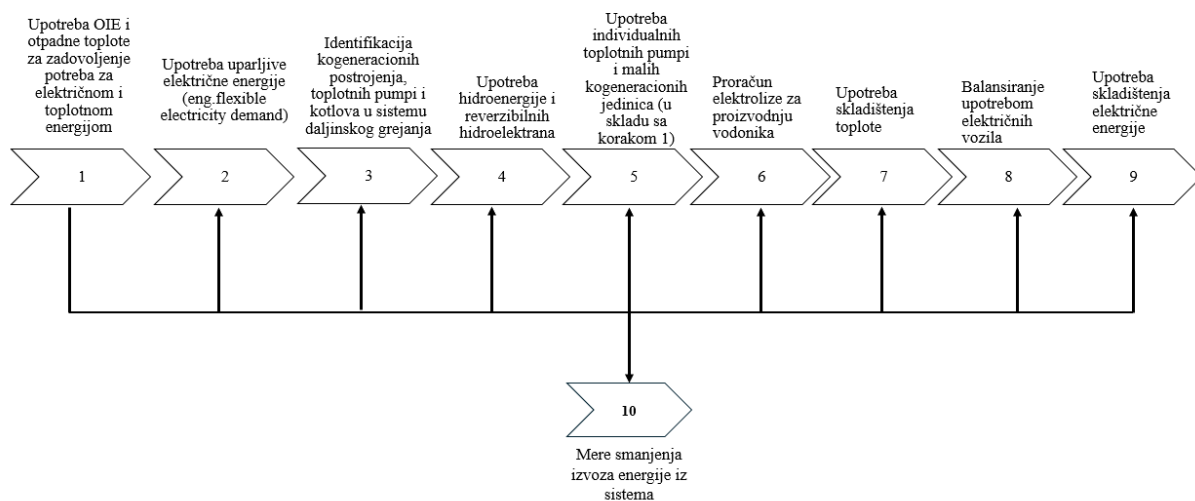
Kako bi se primenio i razumeo koncept kreiranja pametnih energetske sistema, za potrebe ove doktorske disertacije korišćen je EnergyPLAN [193]. EnergyPLAN je simulacioni alat koji omogućava analizu energetske razmene među svim energetske sektorima (proizvodnja energije, industrije, transporta, sistema za grejanje i hlađenje), kao i prilikom konverzije goriva (slika 4.5.). Opravdanost korišćenja ovog alata zasniva se na činjenici da je do 2022. godine bio korišćen u preko 315 objavljenih naučnih radova u oblasti energetske planiranja na lokalnim, nacionalnim ili internacionalnim nivoima [194].



Slika 4.5. Šematski prikaz pametnih energetske sistema i njihova međupovezanost u alatu EnergyPLAN (slika je usvojena iz [193])

Kako bi se postigli principi pametnih energetske sistema, EnergyPLAN analizira razmenu energije svih sektora na časovnom nivou tokom cele godine. Ova analiza uključuje primenu toplotnih pumpi, individualnih ložišta, sistema za centralizovanu proizvodnju toplotne i električne energije, upotrebu OIE, korišćenje otpadne toplote, konverziju biomase, elektrolizu i tehnologije za sekvestraciju i skladištenje ugljenika. Da bi simuliranje ponašanja sistema bilo moguće, neophodno je najpre definisati proizvodne kapacitete, gubitke sistema, kao i časovnu potrebu i proizvodnju energije. Nakon toga, EnergyPLAN prikazuje podatke o upotrebi primarne energije, emisijama CO<sub>2</sub>, troškovima sistema, kao i sveobuhvatni energetske bilans u toku cele godine. Časovna rezolucija omogućava analizu časovnih, dnevnih, nedeljnih i sezonskih razlika u potrebama i proizvodnju energije, pri tome EnergyPLAN ne uzima u obzir samo električnu energiju, već i časovni energetske bilans u sistemu daljinskog grejanja i hlađenja, gasifikacije, kao u procesima elektrolize i hidrogenizacije.

Iako EnergPLAN ne omogućava endogenu sistemsku optimizaciju, na osnovu zadatih parametara sistema<sup>7</sup> EnergyPLAN definiše optimalno korišćenje energije unutar sistema, u smislu maksimalnog iskorišćenja proizvedene količine energije iz OIE (strategija tehnička simulacija (u softveru: Technical simulation strategy)) ili upotrebe najjeftinije dostupne električne energije, na osnovu definisanja cena na tržištu električne energije (tržišno-ekonomska simulacija (u softveru: Market-economuc simulation strategy)). Simulacije sprovedene u ovoj doktorskoj disertaciji zasnovane su na tehničkim simulacijama u kojima se prioritet daje električnoj energiji koja se proizvodi iz lokalno dostupnih OIE. U primeru analiziranog grada, tehnički pristup simulaciji se zasniva na određivanju prioriteta proizvodnih jedinica u sistemu daljinskog grejanja (slika 4.6). Pri tome, prioritet ima korišćenje solarnih kolektora, industrijske otpadne toplote, korišćenje toplote iz spalionica otpada, toplote iz kogeneracionih postrojenja, toplotnih pumpi i kotlova za vršno opterećenje, respektivno. EnergyPLAN zatim uzima u obzir mogućnost upotrebe uparljive potražnje električne energije radi uspostavljanja boljeg bilansa između potražnje i proizvodnje energije.



Slika 4.6. Grafički prikaz koraka tehničke simulacije softvera EnergyPLAN

Kako bi se povećala lokalna upotreba OIE i smanjila količina energije koja se u sistemu ne može direktno koristiti, korišćenje toplotnih pumpi će imati prednost u trenucima kada je proizvodnja električne energije obilna. Povećana upotreba toplotnih pumpi dovodi do smanjenja proizvodnje električne energije iz kogeneracije (TE-TO), zbog smanjenja toplotnog opterećenja. S druge strane, u situaciji kada postoji neiskorišćeni kapacitet TE-TO, koristi se skladištenje toplote, koje omogućava maksimalno iskorišćenje toplotnih kapaciteta, korišćenje električne energije i smanjenje izvoza električne energije. Energija rečnih vodotokova se zatim koristi kako bi se smanjila upotreba kondenzacionih termoelektrana, ali i kao potencijalni vid stabilizacije mreže.

U slučaju postojanja elektrolitičkih postrojenja, pretpostavlja se da se oni koriste za proizvodnju vodonika kada postoji višak električne energije u sistemu i kada se vodonik može skladištiti. Višak toplote iz elektrolize može se iskoristiti u sistemu daljinskog

<sup>7</sup> Iako su optimizacioni modeli dominantni u polju istraživanja energetskih sistema, njihova kompleksnost može da uzrokuje nejasnu interpretaciju rezultata. Pored toga, veća kompleksnost sistema često ne garantuje njihovu veću preciznost [195].

grejanja. Kada je reč o skladištenju električne energije (baterijsko skladištenje, reverzibilne hidroelektrane i slično), skladište se puni kada postoji višak električne energije koji se ne može iskoristiti za prethodno pomenute procese, a pražnjenjem skladišta dolazi do smanjenja uvoza električne energije i smanjenja proizvodnje iz jedinica koje koriste fosilna goriva.

Kao završni korak ove vrste simulacije, smanjenje izvoza električne energije može se postići i smanjenjem proizvodnje iz obnovljivih izvora, smanjenjem proizvodnje iz TE-TO, a uz povećanje proizvodnje toplote iz vršnih kotlova ili zamenom kotlova na fosilna goriva električnim kotlovima. Korisnik može definisati redosled kojim se ove mere primenjuju.

Više o načinima rada softvera EnergyPLAN i strategijama njegovog korišćenja se može pročitati u [193] i [196].

#### 4.6. Participativni postupak za određivanje prioriteta

Predloženi budući energetska scenario se zasniva na usvajanju više mera, koje zajedno rezultiraju energetska sistemom sa manjom emisijom CO<sub>2</sub> u poređenju sa referentnom godinom. Međutim, važno je napomenuti da je dekarbonizacija dugoročan proces, koji rezultira i društvenim promenama koje treba prihvatiti.

S tim u vezi, uključivanje građana u procese donošenja odluka prilikom kreiranja budućih energetska sistema je od izuzetne važnosti. Budući energetska scenario treba da bude prikazan tako da nedvosmisleno ukaže na posledice primene novih tehnologija, posmatrajući ekonomske, društvene i kriterijume životne sredine. Zbog toga se, kao poslednji korak metodologije, predlaže primena višekriterijumske analize i participativno učešće svih zainteresovanih strana za utvrđivanje redosleda implementacije predloženih mera.

Višekriterijumska analiza korišćena je u procesu energetska planiranja na više nivoa [179] i u procesu donošenja odluka mogu se koristiti njene različite metode (Poglavlje 3.6). Za potrebe ove disertacije, predlaže se primena WSM metode (eng. weight sum method), jer zbog jednostavne primene može da bude replicirana u različitim studijama slučaja i time doprinese boljoj integraciji učešća građana u proces donošenja odluka. Rangiranje predloženih mera zasnovano je na jednačini 20:

$$R_i = \sum_{j=1}^n p_j \cdot \bar{n}_{ij} \quad \text{za } i=1 \text{ to } m \quad (20)$$

gde su:

$R_i$  [-] - rezultat WSM metode; veći rezultat ukazuje na prednost pri rangiranju,

$n$  [-] - broj kriterijuma,

$m$  [-] - broj predloženih mera

$p_j$  [%] - težinski faktor za svaki od kriterijuma,

$n_{ij}$  [-] - normalizovani faktor za svaku predloženu meru.

Normalizovani faktor za svaku od mera određuje se u zavisnosti od toga da li je poželjni rezultat najviši u opsegu rezultata dobijenih simulacijom ili najniži. Kada je najniža

vrednost najpoželjnija, normalizovana vrednost  $\overline{n_{lj}}$  predstavlja odnos minimalne vrednosti svih predloženih mera i vrednosti dobijene za posmatranu meru. Kod kriterijumima gde je najviša vrednost najpoželjnija, normalizovana vrednost  $\overline{n_{lj}}$  predstavlja odnos dobijene vrednosti za posmatranu meru i maksimalne vrednosti svih predloženih mera u okviru posmatranog kriterijuma.

Težinski faktori za svaki od predloženih kriterijuma se najčešće određuje anketiranjem svih zainteresovanih strana na nivou grada, uključujući akademsku zajednicu, nevladine organizacije, lokalne donosioce odluka i građane, koji značaj predloženih kriterijuma ocenjuju u zavisnosti od ličnih afiniteta. Radi boljeg razumevanja i olakšanog popunjavanja ankete, ispitanici mogu ocenjivati značaj zadatih kriterijuma ocenama od 1-5, nakon čega je potrebno normalizovati dobijene vrednosti tako da odgovaraju procentualnim težinskim faktorima primenom formule:

$$p_j = \frac{x_i}{\sum_{j=1}^n x_j} \quad (21)$$

Gde je:

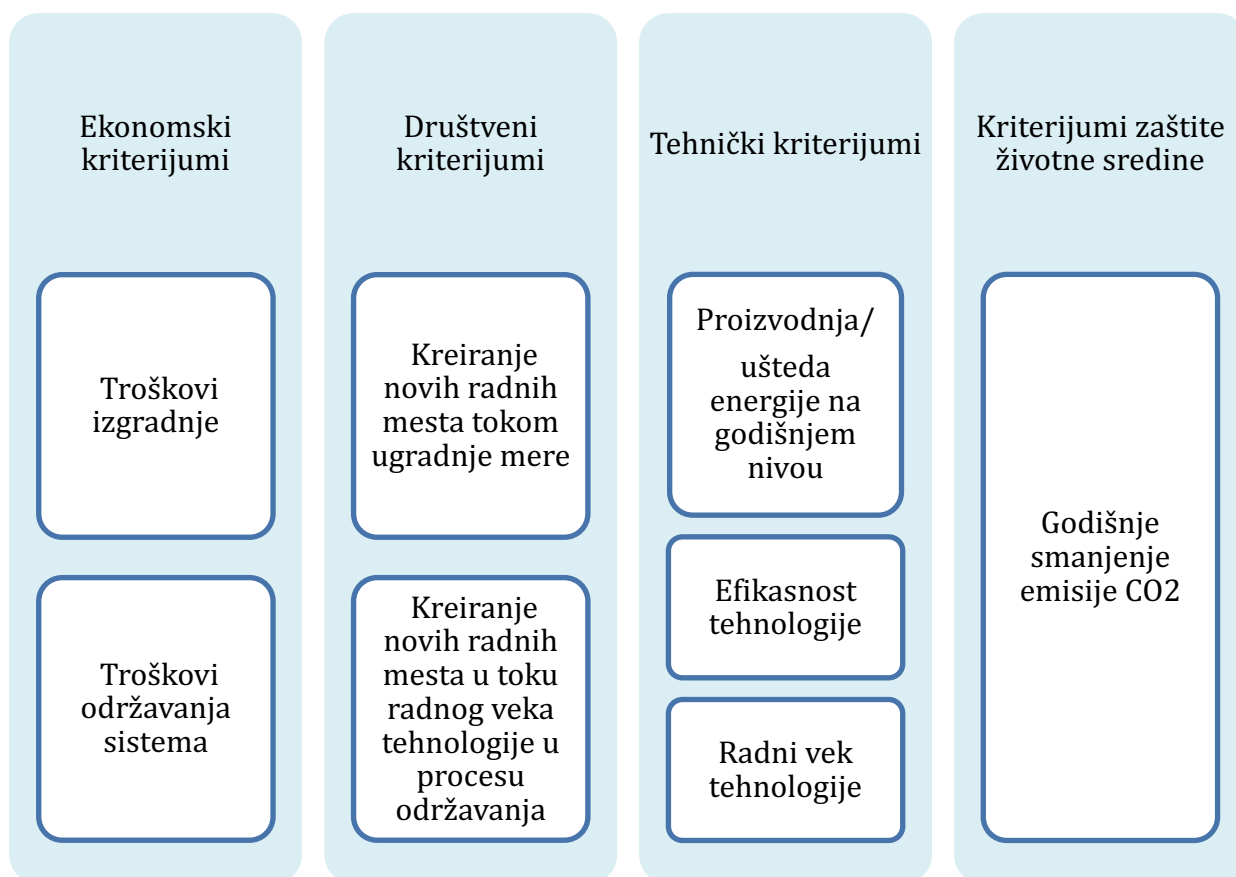
$n$  [-] – broj kriterijuma,

$x_i$  [-] – ocena za kriterijum  $i$

Kako bi rangiranje predloženih mera bilo moguće, neophodno je definisati značajne kriterijume. Kriterijumi koji se koriste u procesu energetske tranzicije na nivou gradova prikazani su na slici 4.7. Ovakav pristup omogućava transparentno prikazivanje posledica novih mera dekarbonizacije, što rezultira boljem razumevanju sistema koji se ne zasnivaju na upotrebi fosilnih goriva. On je od izuzetne važnosti, jer omogućava građanima da sagledaju nove mogućnosti i da razumeju energetske tranziciju i sve promene koje ona sa sobom nosi<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> O značaju uključivanja građana u proces kreiranja energetske budućnosti govori „Teorija svesnog izbora“ (eng. „Choice Awareness Theory“) [144]



Slika 4.7. Kriterijumi prilikom definisanja redosleda prioriteta mera

#### 4.6.2. Definisane ekonomskih kriterijuma

Kao što je prethodno napomenuto, svodenje nacionalne strategije na gradski nivo omogućava da energetska tranzicija na nivou grada bude podržana nacionalnim ciljevima i na taj način lakše ostvarljiva. Pored toga, ovakav pristup omogućava da definisanje troškova bude sprovedeno u skladu sa planiranim budžetom. S tim u veži, troškovi izgradnje se mogu odrediti primenom formule:

$$C_{grad} = C_{nac} \cdot \frac{K_{grad}}{K_{nac}} \quad (22)$$

gde su:

$C_{grad}$  [EUR] – trošak instalacije mere na nivou grada,

$C_{nac}$  [EUR] – trošak instalacije planirane mere na nacionalnom nivou,

$K_{grad}$  [kW] – planirani kapaciteti predložene mere na nivou grada,

$K_{nac}$  [kW] – planirani kapaciteti predložene mere na nacionalnom nivou.

Kada planirani budžet nije poznat, mogu se koristiti predviđene cene prikazane u Katalogu tehnologija [197], čiji je autor Danska energetska agencija. Da bi se omogućila relevantna i uporediva ekonomska procena nije potrebno da predviđeni troškovi instalacije tehnologije budu konvertovani u ekvivalentnu vrednost u lokalnoj valuti zemlje na koju se analiza odnosi, jer se prilikom sprovođenja višekriterijumske analize posmatraju odnosi vrednosti.

U istom katalogu se mogu pronaći vrednosti troškova održavanja sistema, kao i očekivani radni vek tehnologije i njena efikasnost. U tabeli 4.1. prikazane su pomenute vrednosti za najčešće korišćene tehnologije predviđene za 2050. godinu.

#### 4.6.3. Definisavanje društvenih kriterijuma

Za određivanje novih radnih mesta prilikom instalacije i održavanja predloženih mera, može se koristiti faktor zaposlenosti (FZ). Vrednosti ovog faktora za najčešće korišćene tehnologije su prikazane u tabeli 4.2. i vrednosti su usvojene iz [198].

Tabela 4.2 Nominalni investicioni troškovi i troškovi održavanja za najčešće korišćene<sup>9</sup> mere prilikom analize energetske sistema [197]

[2020-EUR]	<i>Investicioni troškovi [MEUR/jedinični kapacitet]</i>	<i>Fiksni troškovi održavanja [EUR/godini]</i>	<i>Fiksni troškovi održavanja u odnosu na investicione troškove</i>	<i>Radni vek [godina]</i>
Mala kogeneracija	0,90	9.039	1,00%	25
Velika kogeneraciona postrojenja	0,73	24.245	3,31%	25
Skladištenje toplote	3,04	8.807	0,29%	40
Spalionica otpada	214,00	4.918.099	2,30%	25
Toplotna pumpa u sistemu DG	2,34	12.229	0,52%	25
Kotlovi u sistemu DG	0,05	1.808	3,40%	25
Električni kotlovi	0,14	978	0,71%	25
Termoelektrane	0,589	20.166	3,42%	25
Industrijska kogeneracija (električna energija)	60,6		2,15%	31
Vetroturbine na kopnu	1,09	22.630	2,08%	30
Vetroturbine na moru	1,64	48.925	2,98%	30
Fotonaponski paneli	0,41	7.500	1,83%	40
Energija talasa	1,70	33.496	1,97%	30
Solarni kolektori	346,02	63	0,00%	30
Sezonsko skladištenje toplote	0,48	3.072	0,64%	25
Postrojenje za proizvodnju biogasa	115,70	7.144.322	6,17%	20
Postrojenje za gasifikaciju	1,60	25.627	1,61%	20
Skladištenje vodonika	16,05	1.437	0,01%	47,5
Individualni kotlovi	4,19	331	7,92%	20
Individualne toplotne pumpe	7,87	212	2,69%	16
Baterije	0,27	0,57	0,21%	30

<sup>9</sup> U katalogu se mogu prinaći podaci i o ostalim merama, koje nisu prikazane u Tabeli 4.1.

Tabela 4.3 Faktori zaposlenosti prilikom ugradnje tehnologija za dekarbonizaciju [198]

<i>Tehnologija</i>	<i>Jedinica</i>	<i>FZ prilikom izgradnje i ugradnje tehnologije</i>	<i>FZ prilikom rada i održavanja</i>
<b>Tehnologije za proizvodnju električne energije</b>			
Krovne fotonaponske elektrane	Radno mesto/MWel	26	1,4
Vetroelektrane na kopnu	Radno mesto/MWel	3,2	0,3
Vetroelektrane na moru	Radno mesto/MWel	8	0,2
Akumulacione hidroelektrane	Radno mesto/MWel	7,4	0,2
Geotermalne elektrane	Radno mesto/MWel	6,8	0,4
Gasne turbine	Radno mesto/MWel	1,3	0,14
Kogeneraciona postrojenja (biomasa)	Radno mesto/MWel	4,04	0,12
Spalionice otpada (TE-TO)	Radno mesto/MWel	3,22	0,12

Nastavak tabele 4.2.

**Tehnologije za proizvodnju toplotne energije**

Solarni kolektori	Radno mesto/MWth	6,3	0,85
Električni kotao u sistemu DG	Radno mesto/MWth	0,98	0,12
Električni kotao-individualni sistem grejanja	Radno mesto/MWth	0,98	0,17
Geotermalna energija u sistemu DG	Radno mesto/MWth	3,93	0,46
Toplotna pumpa u sistemu DG	Radno mesto/MWth	3,93	0,46
Kotao na biomasu u sistemu DG	Radno mesto/MWth	13,43	0,4
Toplotna pumpa-domaćinstva	Radno mesto/MWth	3,93	0,23
Kotao na biomasu-domaćinstva	Radno mesto/MWth	20,15	0,6
Kotao na biogas-domaćinstva	Radno mesto/MWth	20,15	0,91

Nastavak tabele 4.2.

<b>Skladišta energije i proizvodnja goriva</b>			
Baterijsko skladištenje energije	Radno mesto/MWel	10,8	0,4
Baterijsko skladištenje- domaćinstva	Radno mesto/MWel	21,6	0,8
Reverzibilne hidroelektrane	Radno mesto/MWel	14,8	0,4
Skladištenje komprimovanog vazduha	Radno mesto/MWel	10,8	0,4
Skladištenje toplote	Radno mesto/MWth	0,15	0,01
Skladištenje metana	Radno mesto/MWel	0,12	0,01
Skladištenje vodonika	Radno mesto/MWel	0,03	0,002
Elektroliza	Radno mesto/MWel	1,3	0,12

MWel-električne energije

MWth- MW toplotne energije

#### 4.6.4. Definisanje tehničkih i kriterijuma za zaštitu životne sredine

Radi kvantifikovanja efikasnosti predloženih mera, neophodno je odrediti uštedu energije u poređenju sa referentnim sistemom za svaku meru. Ušteda energije za svaku meru se može odrediti kao:

$$\Delta E_p = E_p^{ref} - E_p^n \quad (23)$$

gde su:

$\Delta E_p [MWh]$  – godišnja ušteda energije,

$E_p^{ref} [MWh]$  – godišnja potreba energije u referentnom sistemu u analiziranom sektoru pre instalacije predložene mere,

$E_p^n [MWh]$  – godišnja potreba za energijom nakon instalacije predložene mere.

Prilikom proračuna  $E_p^n [MWh]$  i  $E_p^{ref} [MWh]$  za mere koje se zasnivaju na zameni tehnologija efikasnijim, u obzir je potrebno uzeti gubitke koji se javljaju u sistemu.

Procenjeno smanjenje emisije CO<sub>2</sub> definiše se uzimajući u obzir emisioni factor energenta koji se koristi i količinu korišćene energije, kao:

$$\Delta CO_2 = CO_{2,ref} - CO_{2,n} \quad (24)$$

gde su:

$\Delta CO_2 [kg CO_2/god]$  – godišnje smanjenje emisije CO<sub>2</sub>,

$CO_{2,ref} [kg CO_2/god]$  – godišnja emisija CO<sub>2</sub> u analiziranom sektoru, pre ugradnje mere,

$CO_{2,n} [kg CO_2/god]$  – godišnja emisija CO<sub>2</sub> u analiziranom sektoru, nakon ugradnje predložene mere,

pri tome je:

$$CO_2 = E_p \cdot EF \quad (25)$$

gde je EF [kg CO<sub>2</sub>/god] emisioni faktor za korišćeni energent (tabela 4.3.).

Tabela 4.4 Faktori konverzije usvojeni na osnovu [97] i [199]

Energent	Ugalj*	Nafta I naftni derivati	Prirodni gas	Električna energija
EF [kg/GJ]	95	74	56,7	Videti u [200]

\*Emisije uglja zavise od kvaliteta i tipa ovog energenta. Na primer, prilikom korišćenja lignita iznosi emituje se 101 kg/GJ, a prilikom korišćenja smeđeg uglja 94 kg/GJ.

Očekivana efikasnost svih tehnologija, čija se upotreba očekuje do 2050. godini se može pronaći u Pravilniku o energetske sertifikaciji zgrada [199] i u katalogu tehnologija [197]. Kako bi određivanje prioriteta bilo moguće, potrebno je normalizovati proizvodne kapacitete, te se za svaku predloženu meru utvrditi posledice instalacije jedinične proizvodne snage (MW) na posmatrane kriterijume<sup>10</sup>.

#### 4.7. Definisane poredbenih indikatora u energetske scenarijima

Kako se potrebna količina energije u scenarijima definiše principom pravedne energetske raspodele, koja zavisi od broja stanovnika u gradu, potrebno je uvesti poredbene indikatore, koji će omogućiti praćenje energetske promena u definisanom sistemu. S tim u vezi, indikatori predloženi u ovoj disertaciji zasnivaju se na promenama u upotrebi fosilnih goriva po glavi stanovnika (jednačina 26), kao i u definisanju jediničnih emisija CO<sub>2</sub> (jednačina 27).

$$I_{fg} = \frac{\sum_{s=1}^n E f_s}{P_{grad}} \quad (26)$$

gde su:

$I_{fg}$  [GWh/stanovnik] – indikator primene fosilnih goriva po glavi stanovnika,

$E f_s$  [GWh] – godišnja upotreba fosilnih goriva u sektoru  $s$ ,

$n$  – ukupan broj analiziranih sektora (proizvodnja energije, industrija, transport, javni i stambeni sektor).

$$I_{co2} = \frac{\sum_{s=1}^n CO_{2s}}{P_{grad}} \quad (27)$$

gde su:

$I_{co2}$  [CO<sub>2</sub>/stanovnik] – indikator emisije CO<sub>2</sub> po glavi stanovnika,

$CO_{2s}$  [kg CO<sub>2</sub>] – ukupne godišnje emisije CO<sub>2</sub> iz sektora  $s$ .

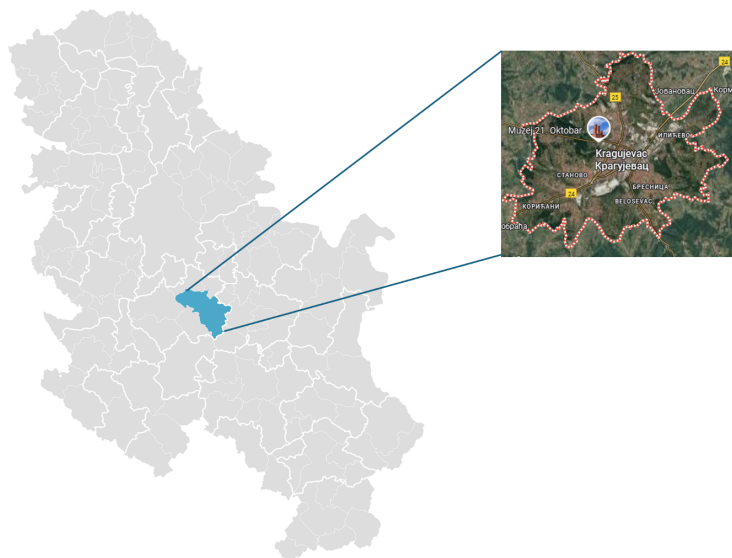
<sup>10</sup> Primer primene višekriterijumske analize na nivou grada, sa normalizovanim vrednostima za definisanje kriterijuma prikazan je u radu [201]

## 5. PRIMENA PREDLOŽENE METODOLOGIJE NA STUDIJI SLUČAJA GRADA KRAGUJEVCA

Metodologija, razvijena i prikazana u poglavlju 4, primenjena je na primeru grada Kragujevca, Republika Srbija. Ovo poglavlje, na primeru konkretne urbane sredine, prikazuje primenu teorijskih okvira, od utvrđivanja zatečenog stanja do kreiranja budućih scenarija i prioritizaciju konkretnih mera, ukazujući na relevantnost sprovedenih koraka u kontekstu gradskog energetskeg planiranja.

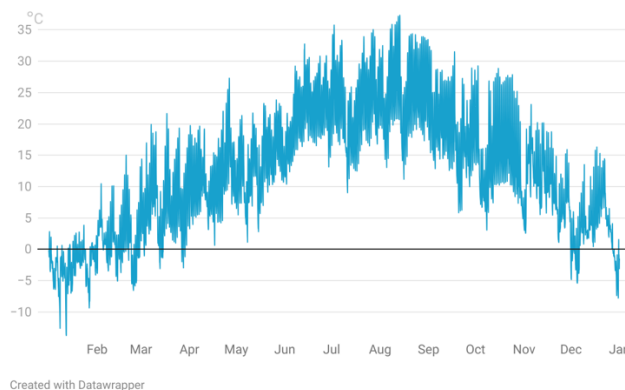
### 5.1. Opis analiziranog lokaliteta

Grad Kragujevac ( $44^{\circ} 02'$  severne geografske širine i  $20^{\circ} 92'$  istočne geografske dužine) se nalazi u Centralnoj Srbiji, u Šumadijskom okrugu, i predstavlja njen administrativni, obrazovni, industrijski, kulturni i zdravstveni centar (slika 5.1).



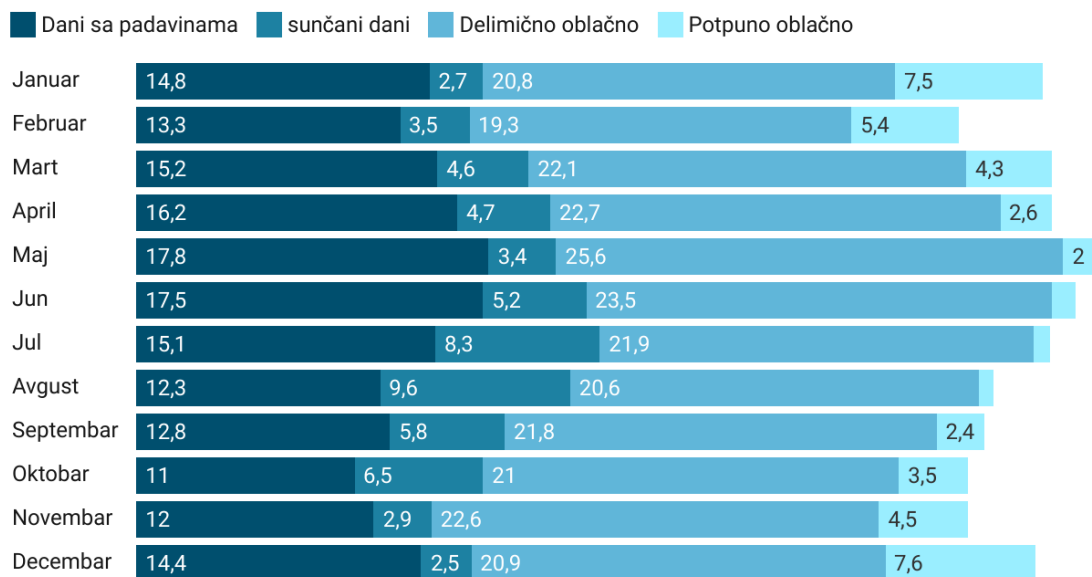
Slika 5.1. Lokacija grada Kragujevca u Republici Srbiji

Ukupni zemljišni fond kojim grad raspolaže je 83.475 ha, od čega 36,1% pripada urbanoj zoni grada [106]. Grad Kragujevac je pod uticajem umereno-kontinentalne klime, sa prosečnom temperaturom vazduha od  $11,5^{\circ}\text{C}$ . Temperaturne varijacije na časovnom nivou tokom 2019. godine su prikazane na slici 5.2.



Slika 5.2. Dnevne temperaturne varijacije u Kragujevcu [189]

Prosečan broj sunčanih dana po mesecima je prikazan na slici 5.3., pri tome je prosečan broj sunčanih sati 5,5 časova dnevno. Najveći broj sunčanih sati je u toku meseca juna (prosečno 8,8 časova), dok je mesec sa najmanjim brojem sunčanih sati decembar (prosečno 2,1 časova dnevno) [202].



Kreirano uz pomoć Datawrapper

Slika 5.3. Broj sunčanih i dana sa umerenom i potpunom oblačnošću po mesecima u Kragujevcu [203]

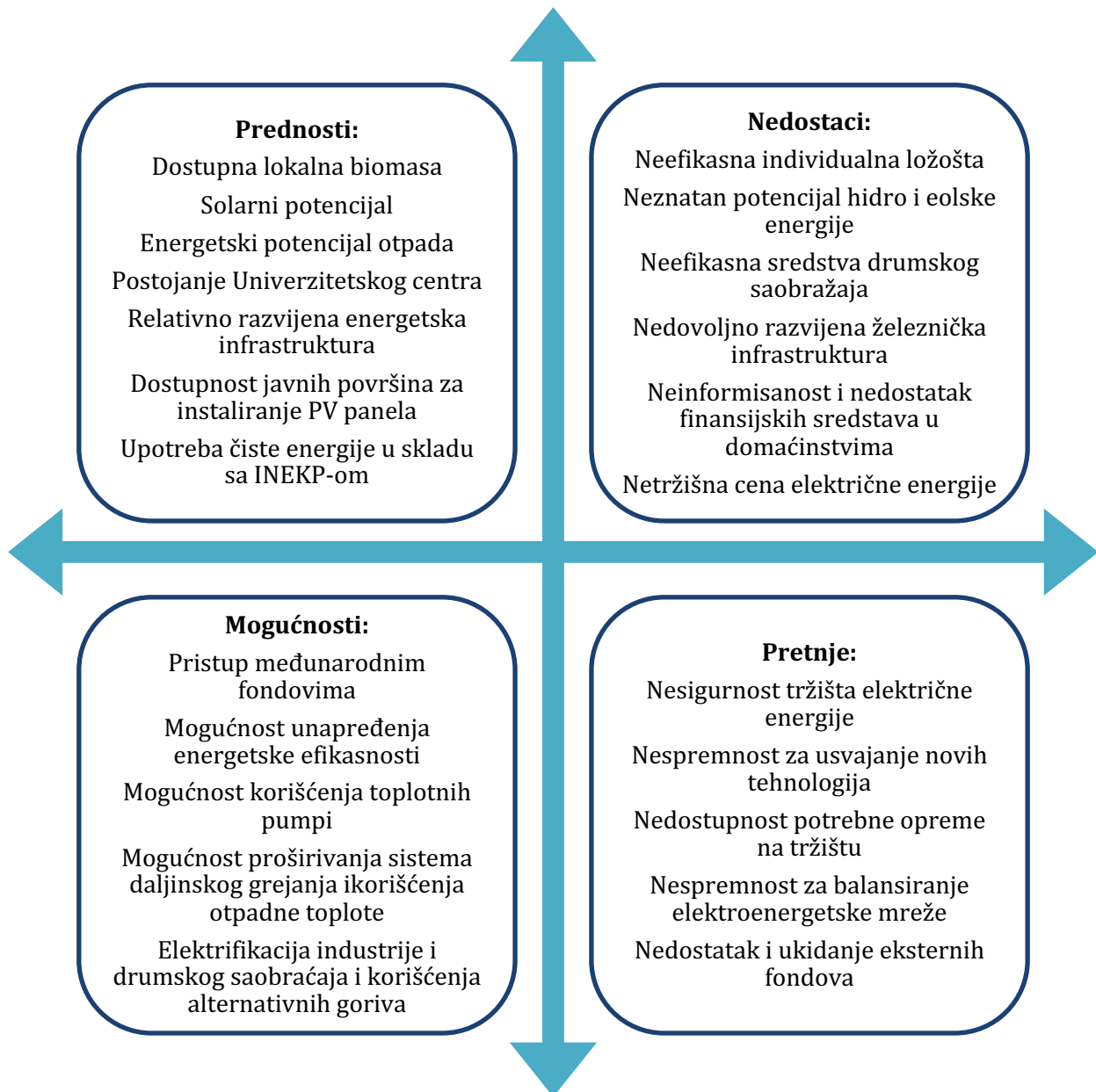
Zaključno sa novembrom 2022. godine, Kragujevac je imao pet industrijskih zona, sa ukupno 748 ha površine, od čega je 8% raspoloživo za nove poslovne subjekte [204].

Na osnovu popisa stanovništva iz 2022. godine, u urbanom delu grada je živelo 146.315 stanovnika [205], dok se prema projekcijama u narednom periodu očekuje smanjenje broja stanovnika. Očekivano smanjenje do 2032. godine iznosi 5,3%, dok se do 2052. očekuje smanjenje od 17% u broju stanovnika u poređenju sa 2022. godinom [206].

## 5.2. SWOT analiza na primeru grada Kragujevca

Prilikom sprovođenja SWOT analize u procesu dekarbonizacije grada, neophodno je holistički sagledati zatečeno stanje uključujući postojeću infrastrukturu, potencijale i moguće pravce razvoja energetskog sektora, uz osvrt na dugoročne nacionalne ciljeve, kao što je pokazano u poglavlju 4.2., a u skladu sa slikom 4.2.

Na osnovu dostupnih podataka i analize postojećih zakonskih okvira, kreirana je SWOT matrica za grad Kragujevac i prikazana je na slici 5.4.



Slika 5.4. Matrica SWOT analize na primeru grada Kragujevca

## 5.2.2. Prednosti <sup>11</sup>

### *Potencijal biomase*

U Srbiji 60% ukupnog energetskeg potencijala OIE čini biomasa. S obzirom da se analizirani grad nalazi u Šumadijskom okrugu, na njegovoj teritoriji postoji značajan potencijal biomase (tabela 5.1.). Kao što je napomenuto u poglavlju 3, upotreba biomase se može smatrati OIE jedino ukoliko je njen način primene u skladu sa održivim upravljanjem resursima.

Tabela 5.1 Energetski potencijal biomase grada Kragujevca [106]

Vrsta biomase	MWh
Poljoprivredni ostaci uzgoja žitarica	81.912,24
Ostaci rezidbe plantažno uzgajanog voća	24.814,01
Potencijal biogasa dobijenog iz stajnjaka	110.267,01
Šumska biomasa	96.455

### *Solarni potencijal*

U Kragujevcu, prosečna količina solarne energije pri optimalnom uglu jedinične površine solarnih prijemnika iznosi 1.544 kWh/m<sup>2</sup>. Ukoliko se u obzir uzme raspoloživost krovnih površina, može se reći da grad Kragujevac poseduje značajni solarni potencijal.

### *Energetski potencijal otpada*

U Kragujevcu se godišnje odlaže ukupno 128.687,39 t otpada (od čega 37% komunalnog otpada). Rezultati dosadašnjih publikacija [106] pokazuju da se na gradskoj deponiji generiše 574 m<sup>3</sup>/h deponijskog gasa, što potencijalno odgovara postrojenja za istovremenu proizvodnju toplotne i električne energije kapaciteta od 600 kW. Međutim, ova količina otpada se može koristiti i u spalionicama otpada.

### *Postojanje Univerziteta i Centra za energetske efikasnost*

Zaposleni sa Univerziteta u Kragujevcu mogu da ponude stručnu podršku i analize u oblasti OIE, primenjujući pristup koji uključuje više različitih disciplina. Na Fakultetu inženjerskih nauka formiran je Centar za energetske efikasnost, koji se bavi savetovanjem, promocijom energetske odgovornog upravljanja i primenom OIE. Pored toga, centar izrađuje projekte za poboljšanje energetske efikasnosti u industriji i u građevinskom sektoru. Od početka 2024. godine funkcioniše i Centar za cirkularnu ekonomiju, koji pruža podršku u procesu smanjenja emisije CO<sub>2</sub> iz industrijskih pogona.

---

<sup>11</sup> Rezultati SWOT analize, sprovedeni na nivou analiziranog grada publikovani su u radu [187].

## *Energetska infrastruktura*

Sistem daljinskog grejanja u Kragujevcu uključuje šest kotlarnica ukupne instalisane snage od 432 MW. Na daljinsku mrežu, dužine 81 km, priključeno je 22.000 korisnika [207].

Gasna infrastruktura grada Kragujevca obuhvata više od 290 km distributivne mreže. Grad je povezan sa elektroenergetskom mrežom Srbije putem dva dalekovoda, napona 400 kV [106].

### *Dostupnost javnih površina za ugradnju OIE*

Procenjuje se da je ukupna površina krovova javnih institucija u Kragujevcu 45.600 m<sup>2</sup>, i da je godišnji potencijal proizvodnje električne energije okvirno 670,5 MWh [105]. Površine krovova javnih institucija ili parking prostora se mogu koristiti za zajednička građanska ulaganja u projekte OIE.

### *Energija u skladu sa INEKP Republike Srbije*

INEKP Republike Srbije za period do 2030. godine, sa projekcijama do 2050, ističe značaj unapređenja energetske efikasnosti, povećanu integraciju OIE i redukciju upotrebe fosilnih goriva. U tom kontekstu, proces klimatske neutralizacije Kragujevca je u skladu sa nacionalnom strategijom, te predstavlja pravac razvoja grada u koji je potrebno usmeriti stručnost, iskustvo i dostupne resurse.

## 5.2.3. Nedostaci

### *Zastarela i neefikasna individualna grejna tela*

U Srbiji, više od 70% domaćinstava van sistema daljinskog grejanja poseduje zastarela individualna ložišta niske efikasnosti, koristeći najčešće čvrsta goriva [208]. Ovakva situacija doprinosi zagađenju vazduha tokom grejne sezone, kao i neodrživom korišćenju biomase u gradu.

### *Potencijal hidro energije i energije vetra*

Za razliku od solarnog potencijala, u Kragujevcu hidroenergija i energija vetra imaju ograničen potencijal. Karakteristike vetrova u ovom području su srednje brzine, između 1,5-2,9 m/s, koje nisu dovoljne za efikasnu proizvodnju električne energije. Vodotokovi u gradu nemaju dovoljan energetski potencijal za izgradnju hidroelektrana [106].

### *Drumski saobraćaj*

Gradski vozni park karakteriše prosečna starost automobila od 15 godina, kao i značajna upotreba dizel motora [105].

### *Neinformisanost nedostatak i finansijskih sredstava*

Na osnovu rezultata sprovedene ankete [209], u Republici Srbiji 58% domaćinstava navodi da nema dovoljno finansijskih sredstava za zamenu niskoefikasnih grejnih tela, dok skoro 26% ispitanika nije pokazalo zainteresovanost za primenu ove mere. Rezultati ukazuju na nizak nivo informisanosti, ograničene budžete građana, kao i nedovoljnu institucionalnu podršku i dostupnost informacija o mogućim subvencijama u polju energetske efikasnosti.

### *Neusaglašenost energetske politika*

Grad Kragujevac je, u decembru 2022. godine, usvojio *Program energetske efikasnosti za period 2023–2025* [105], koji predstavlja strateški dokument namenjen stvaranju uslova za ispunjenje zakonskih obaveza u oblasti energetike, efikasnog korišćenja energije i primene obnovljivih izvora na nivou grada, sa posebnim osvrtom na javne institucije. Iako su dokumentom obuhvaćene energetske potrebe javnog sektora, potencijalne uštede i karakteristike lokalne zajednice, primećuje se da među predloženim merama praktično nema ni jedne mere ugradnje OIE. Ovakav pristup otvara pitanje usklađenosti energetske ciljeva grada sa ciljevima Republike Srbije u procesu dekarbonizacije.

### *Troškovi električne energije*

U toku 2022. godine, cena električne energije za domaćinstva u Srbiji je bila značajno niža u poređenju sa evropskim prosekom [210]. Premda je puna komercijalna cena znatno viša [211], način obračuna koji se primenjuje kompromituje ekonomsku opravdanost investiranja u OIE.

## 5.2.4. Mogućnosti

### *Međunarodni fondovi*

Povećana integracija OIE i niskougljeničnih tehnologija u gradovima su jedni od važnijih ciljeva EU. U tom kontekstu, finansijska podrška klimatske neutralizacije u gradovima se može ostvariti, ne samo iz nacionalnog budžeta, već i kroz učešće u međunarodnim projektima i kroz fondove EU [212], kreditne linije Evropske banke za obnovu i razvoj [213], kao i kroz uspostavljanje bilateralne saradnje kroz podršku nemačke razvojne saradnje [214] i sl.

### *Otpadna toplota iz državnog data centra*

U toku 2020. godine u Kragujevcu je sa radom počeo prvi srpski Data centar. U ovakvim postrojenjima, prilikom obaveznog hlađenja serverske opreme dolazi do stvaranja znatne količine otpadne toplote, koja efikasno može biti iskorišćena u sistemu daljinskog grejanja.

### *Unapređenje energetske efikasnosti*

Grad Kragujevac, kao industrijski centar, poseduje značajan potencijal za unapređenje energetske efikasnosti u proizvodnim procesima. Industrijski sektor koristi značajne količine energije, a optimizacija potrošnje, kroz primenu novih tehnologija i upravljanje resursima može doprineti ostvarivanju ekonomskih, ekoloških i društvenih koristi. Moguće mere za efikasnije korišćenje energije zasnivaju se na upotrebi otpadne toplote, optimizaciji proizvodnih procesa, kao i primeni toplotnih pumpi koje omogućavaju efikasno korišćenje niskotemperaturne energije, kao što je prikazano u [215].

### *Elektrifikacija sektora saobraćaja i industrije*

Elektrifikacija industrije i drumskog saobraćaja je od izuzetne važnosti u procesu klimatske neutralizacije urbanih sredina. Ovakva transformacija omogućava efikasnije korišćenje OIE, posebno kada se kombinuje sa razvojem pametnih energetskih sistema, doprinoseći stabilnosti sistema i maksimalnoj iskorišćenosti dostupnih OIE.

Pored elektrifikacije, moguće je koristiti alternativna goriva, prikazana u poglavlju 3.3.5. Zeleni vodonik se može koristiti u industriji, transportu i u elektranama i njegova primena je u skladu sa ciljevima definisanim u INEKP.

## 5.2.5. Pretnje

### *Nestabilnost energetskog tržišta*

Povećana potražnja za energijom, pogotovo u trenucima kada vremenski uslovi nisu pogodni za proizvodnju energije primenom OIE, može dovesti do nestabilnosti proizvodnje, kao i povećanih cena električne energije. Pored toga, kriza u Ukrajini je dovela do nestašica gasa u Evropi, uzrokujući značajne promene u cenama, što se odrazilo na privredu, ali i na ekonomiju uopšte. Ovaj istorijski trenutak je pokazao da je težnja ka uspostavljanju nezavisnog energetskog sistema koji se zasniva na upotrebi OIE od nacionalne važnosti.

Iako integracija OIE doprinosi energetske nezavisnosti, proces energetske tranzicije je dugotrajan i u oslanja se na upotrebu fosilnih goriva.

### *Komercijalna dostupnost opreme*

Kako se proces energetske dekarbonizacije sprovodi u zemljama širom sveta, beleži se povećana potražnja za potrebnom opremom. Kao posledica toga, određene tehnologije mogu biti nedostupne na tržištu, kao što je zabeleženo u toku 2022. godine, kada se u Srbiji više meseci čekalo na isporuku solarnih sistema.

## *Balansiranje elektroenergetske mreže*

Povećana primena varijabilnih OIE zahteva razvoj dodatnih kapaciteta za skladištenje energije, kao i razvoj mreže, kako bi se obezbedilo sigurno snabdevanje.

## *Ukidanje eksternih fondova*

Ukidanje ili smanjenje međunarodnih fondova moglo bi negativno uticati na realizaciju projekata usmerenih ka dekarbonizaciji energetske sektora i unapređenju energetske efikasnosti.

Rezultati SWOT analize, nastali kao rezultat rada grupe istraživača na Fakultetu inženjerskih nauka [187], omogućavaju sistematski prikaz trenutne situacije u gradu Kragujevcu i predstavljaju polaznu osnovu za analizu budućih energetske scenarija. Nakon analize trenutnih nedostataka i mogućih pretnji na proces energetske tranzicije, postojeće mogućnosti i potencijale treba usmeriti ka kreiranju održivog strateškog okvira za dekarbonizaciju na nivou grada. S tim u vezi, budući energetske scenariji Kragujevca treba da budu izrađeni tako da omoguće maksimalno iskorišćenje potencijala na gradskom nivou, poput solarnih potencijala, potencijala biomase i otpada, kao i mogućnosti za povećanje energetske efikasnosti i upotrebe otpadne toplote.

Pored toga, nedostatke poput neefikasnih individualnih ložišta ili drumskog saobraćaja, u budućem energetske scenariju treba videti kao priliku za unapređenje sistema grejanja, kroz unapređenje energetske efikasnosti, proširivanje sistema daljinskog grejanja i upotrebu efikasnijih vozila i goriva nove generacije.

Istovremeno, kako bi se obezbedila finansijska sigurnost u procesu sprovođenja energetske tranzicije, energetske sistem grada treba da bude podržan nacionalnim strategijama i u skladu sa predviđenim budžetima.

### 5.3. Kreiranje referentnog (baznog) energetske scenarija grada Kragujevca

Kao što je prikazano u poglavlju 4. doktorske disertacije, kreiranje baznog energetske scenarija predstavlja polaznu osnovu za kreiranje energetske scenarija budućnosti. Naime, ovaj scenario služi kao referentna tačka u odnosu na koju se prate promene u potrošnji energije i emisija CO<sub>2</sub>, ali i za validaciju modela, kao potvrdu da bazni model predstavlja verodostojni prikaz stanja i da se, kao takav, može koristiti za buduće analize.

#### 5.3.1. Definisavanje sistema energetske snabdevanja u Kragujevcu

Određivanje proizvodnih kapaciteta na nivou grada se zasniva na primeni principa pravedne energetske raspodele na nivou države, o kojima je bilo reči u poglavlju 4.3. Naime, kako se proizvodnja električne energije u Srbiji i dalje zasniva na primeni fosilnih goriva u termoelektranama, radi pravedne raspodele postojećih emisija, proizvodni kapaciteti koji pripadaju gradu su definisani na osnovu udela broja stanovnika u Kragujevcu u poređenju sa brojem stanovnika u Srbiji. Pored toga, deo elektroenergetske sistema u Srbiji čine akumulacione i protočne hidroelektrane, koje

takođe predstavljaju centralizovane sisteme za proizvodnju električne energije i njihov udeo, kao i udeo reverzibilne hidroelektrane „Bajina bašta“, usvojen je primenom istih principa. Proizvodni kapaciteti su definisani na osnovu udela u proizvodnim kapacitetima koji su prikazani na zvaničnoj internet stranici Elektroprivrede Srbije [216], dok su udeli energenata koji se koriste za proizvodnju električne energije u proizvodnim kapacitetima definisani na osnovu statističkih podataka prikazanim u energetsom bilansu Republike Srbije u toku 2019. godine [217]. Ova godina je usvojena kao referentna, jer je poslednja za koju su dostupni svi potrebni podaci, a ne obuhvata kovid krizu ili havarije u elektroenergetskom sektoru. Sa druge strane, postojeći proizvodni kapaciteti u sistemu daljinskog grejanja usvojeni su na osnovu podataka dostupnim na zvaničnoj internet stranici društva sa ograničenom odgovornošću „Energetika“, čija je osnovna delatnost proizvodnja i distribucija toplotne energije [218]. Podaci o upotrebi energenata u sistemu daljinskog grejanja definisani su na osnovu energetske bilansa preduzeća, dobijenog na upit. Usvojeni proizvodni kapaciteti za grad Kragujevac prikazani su u tabeli 5.2.

Tabela 5.2 Kapaciteti za proizvodnju energije u Srbiji i njihov udeo za grad Kragujevac

	Srbija	Kragujevac
Broj stanovnika	6.647.003	146.315 (2,2 % populacije)
Proizvodni kapaciteti (MW)		
Termoelektrane	4.437	98
Hidroelektrane	3.015	66,37
Reverzibilne hidroelektrane	614 (630 GWh)	13,52 (13,87 GWh)
Gradske toplane		432,65

### 5.3.2. Definisane energetske potrebe u referentnom scenariju

Podaci o energetske potrebama industrijskog sektora usvojeni su na osnovu Statističkih podataka o potrošnji energije u Srbiji u toku 2019. godine [217], a na osnovu udela o pravednoj raspodeli energije i primenom formula (1-2). Na isti način su definisane energetske potrebe transportnog sektora, pri tome su korišćene formule (3-4). Podaci o energetske potrošnji u pomenutim sektorima na nivou Srbije, ali i grada Kragujevca su prikazani u tabeli 5.3.

Tabela 5.3 Upotreba energije u sektorima industrije i transporta na nivou grada Kragujevca  
(2019. god)

	Srbija	Kragujevac
Broj stanovnika	6.647.003	146.315
Industrija (GWh)		
Električna energija	9.035	199
Ugalj	1.576	35
Nafta i naftni derivati	3.171	70
Prirodni gas	6.124	135
Čvrsta biomasa	2.022	45
Transport (GWh)		
Električna energija	384	8,5
Nafta i naftni derivati	28.566	629
Prirodni gas	305	6,72

Podaci o upotrebi energije u javnim zgradama definisani su na osnovu javno dostupnih podataka u okviru Programa energetske efikasnosti grada Kragujevca [105].

Kako za grad Kragujevac ne postoje podaci o potrošnji toplotne energije u domaćinstvima, usvojene su određene pretpostavke na osnovu dostupnih statističkih podataka. Naime, na osnovu sprovedenog istraživanja [219] utvrđen je udeo sistema grejanja u domaćinstvima u Srbiji. Kako je istraživanje zasnovano na analizi sistema grejanja koje obuhvata 1.100 domaćinstava u zemlji, prikazani podaci se mogu smatrati statistički relevantnim i udeli prikazani u radu su korišćeni i na nivou grada. Takođe, rezultati prikazani u radu koji se odnose na udeo domaćinstava priključenih na sistem daljinskog grejanja (38 %) i domaćinstvima sa individualnim grejanjem (62 %) korespondira sa zvaničnim podacima Republičkog zavoda za statistiku [220]. U skladu sa statističkim analizama, utvrđeni broj domaćinstava sa individualnim sistemom grejanja, usvojen za nivo grada Kragujevca prikazan je u tabeli 5.4.

Tabela 5.4 Broj individualnih ložišta u Kragujevcu prema korišćenom energentu

Tip individualnog sistema grejanja u zavisnosti od korišćenog energenta	Broj domaćinstava
Električna energija	3.529
Biomasa	22.150
Prirodni gas	9.724
Ugalj	370

Na osnovu statističkih podataka za grad Kragujevac [220] usvojeno je da je prosečna grejna površina domaćinstva 75,27 m<sup>2</sup> i da je prosečna količina energije potrebna za

zagrevanje domaćinstava 150 kWh/m<sup>2</sup>, u skladu sa nacionalnim prosekom [221]. Uzimajući u obzir broj domaćinstava sa svakim sistemom grejanja, kao i potrebnu količinu energije za zagrevanje javnih zgrada, u tabeli 5.5 je prikazana količina energije potrebna za zadovoljenje toplotnih potreba na nivou grada Kragujevca.

Tabela 5.5 Ukupna količina finalne energije za zagrevanje prostora na nivou Kragujevca

Tip grejanja	Domaćinstva (GWh)	Javne zgrade (GWh)	Ukupna količina potrebne (finalne) energije za zagrevanje zgrada (GWh)
Daljinsko grejanje	238,73	13,46	252,19
Električna energija	39,85	6,72	46,57
Biomasa	250,1	2,25	252,34
Prirodni gas	109,79	6,96	116,75 <sup>12</sup>
Ugalj	4,18	1,69	5,87
Lož ulje	0	0,44	0,44

Usvojene efikasnosti sistema grejanja su prikazane u tabeli 5.6, a usvojene su na osnovu opsega prikazanih u [199].

Tabela 5.6 Prosečne usvojene efikasnosti sistema grejanja

Tip grejanja	Usvojena efikasnost (%)
Električna energija	100
Biomasa	75
Prirodni gas	90
Ugalj	75
Lož ulje	85

Podaci o potrebnoj količini energije za zagrevanje sanitarne tople vode (STV) usvojeni su na osnovu baze podataka Odysee-Mure [222]. Podaci prikazani u bazi se odnose energetska potrebu na nivou cele Srbije, ali se može pretpostaviti da se potreba za STV može odrediti primenom pravedne energetske raspodele, u skladu sa brojem stanovnika. Iako grad Kragujevac poseduje sistem daljinskog grejanja, STV se zagreva primenom

<sup>12</sup> Količina prirodnog gasa dobijena na ovaj način ne odstupa značajno od stvarne potrošnje ovog energenta u toku 2019. godina (podaci dobijeni na upit u Javnom preduzeću „Srbija gas“). Međutim, kako bi metodologija bila replikabilna i u ostalim gradovima u Srbiji, predlaže se korišćenje statističkih podataka za svaki grad.

individualnih grejača tople vode, najčešće električne energije i prirodnog gasa (tabela 5.7.)

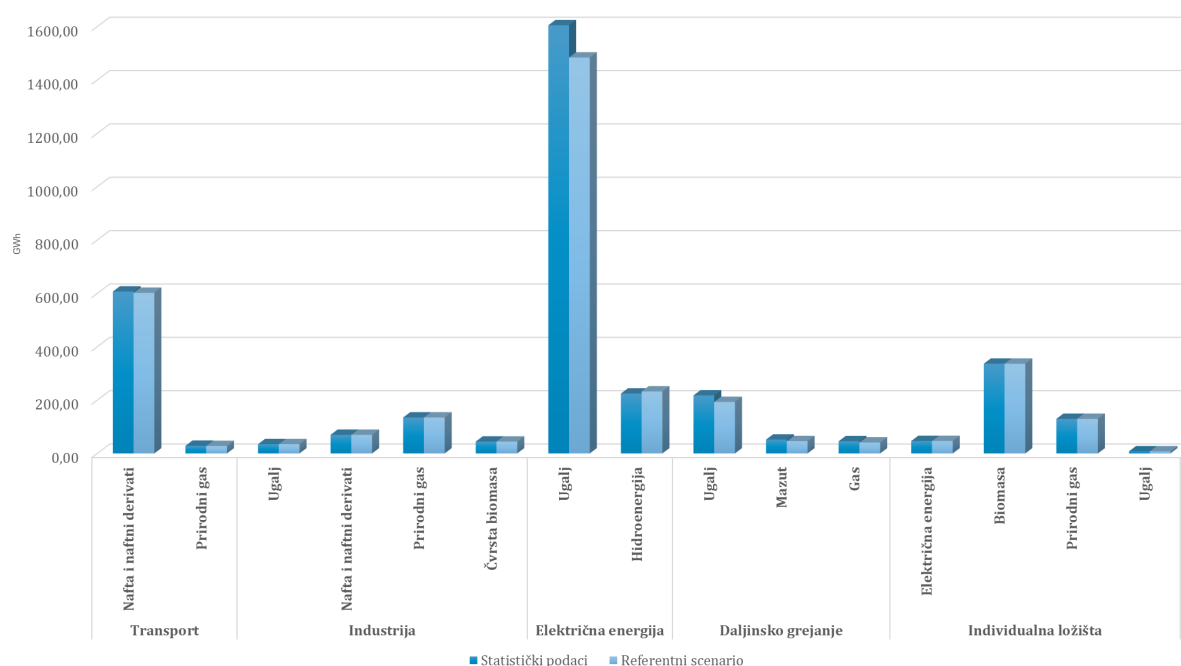
Tabela 5.7 Potrebna količina energije za zagrevanje STV

Energent	Količina energije potrebna za zagrevanje STV (GWh)
Električna energija	96,61
Prirodni gas	2,29
Ostalo*	2,51

\*solarni kolektori i toplotna energija iz individualnih sistema grejanja

### 5.3.3. Validacija referentnog modela

Nakon definisanja proizvodnih kapaciteta i energetske potrebe analiziranog grada, kreiran je energetski scenario koji je simuliran primenom softverskog paketa EnergyPLAN. Kako bi se potvrdila verodostojnost kreiranog modela, potrebno je uporediti podatke dobijene primenom softverskog paketa EnergyPLAN sa statističkim podacima prikupljenim na nivou grada. Validacija dobijenog modela predstavljena je na slici 5.5, gde je prikazana upotreba primarne energije u različitim sektorima. Kao što se sa slike može uočiti, u poređenju sa statističkim podacima, najizraženija razlika se pojavljuje u elektroenergetskom sektoru i primeni uglja. Ova razlika se može objasniti činjenicom da EnergyPLAN, u definisanom scenariju, računa primarnu količinu energije samo za potrebe analiziranog sistema, dok realni statistički podaci uključuju količinu proizvedene električne energije koju Srbija razmenjuje sa ostalim zemljama Energetske Zajednice, moguće promene u načinu rada unutar blokova termoelektrana, kao i povećane gubitke unutar sistema uzrokovane kvarovima.



Slika 5.5. Poređenje statističkih podataka sa simulacionim podacima za referentni model 2019

#### 5.3.4. Rezultati referentnog scenarija

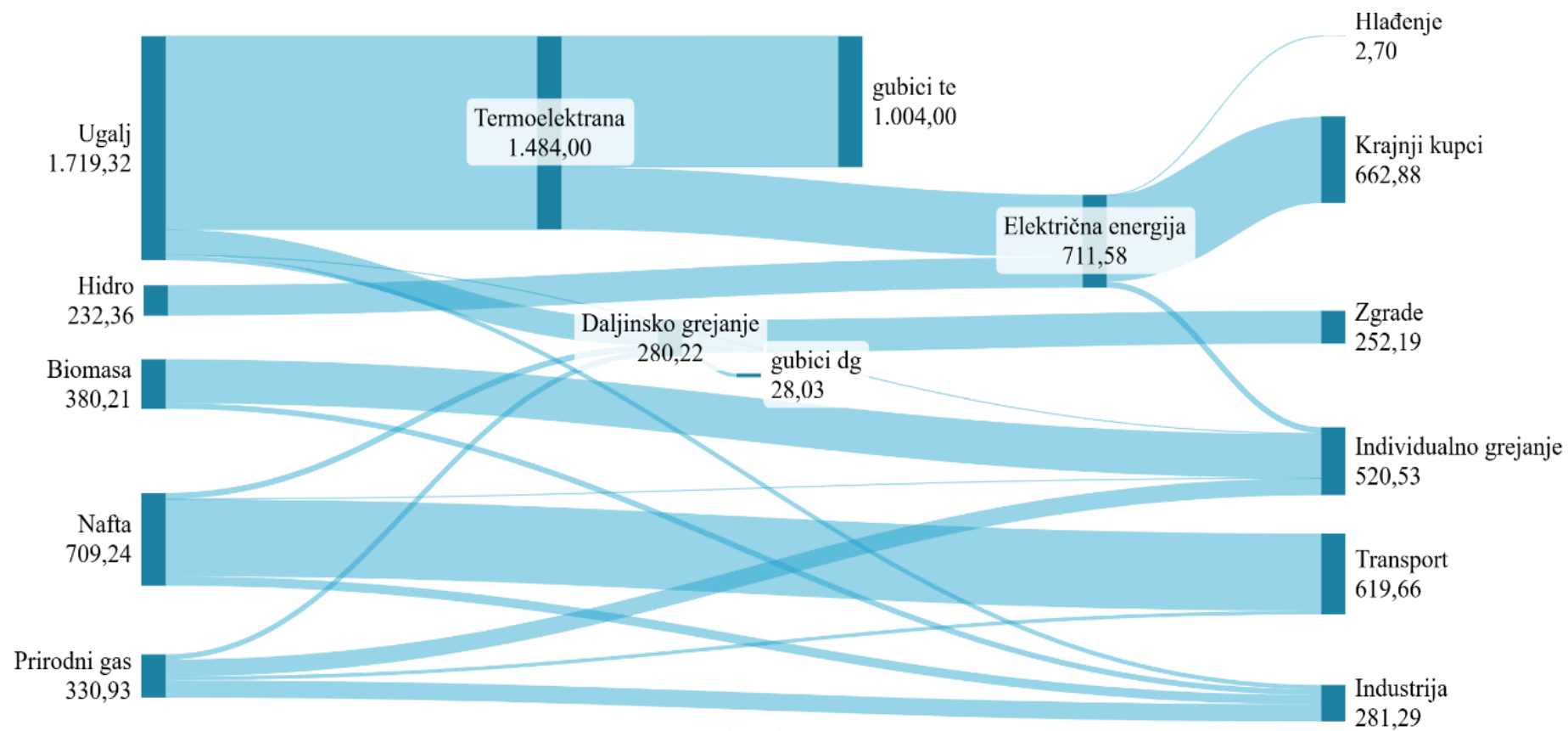
Rezultati energetskog modeliranja Referentnog scenarija, prikazani na dijagramu tokova (slika 5.6) pokazuju da je u Kragujevcu energetsko snabdevanje u toku 2019. godine još uvek visoko zavisilo od upotrebe fosilnih goriva (81% u ukupnoj primarnoj energiji)<sup>13</sup>.

Kao što se sa dijagrama uočava, najviše fosilnih goriva (uglja) je korišćeno u procesima proizvodnje električne energije, u niskoefikasnim termoelektranama (usvojena prosečna efikasnost je 40%, iako je u efikasnost termoelektrana uglavnom niža). Takođe, značajne količine fosilnih goriva korišćene su u sistemu daljinskog grejanja (ugalj, prirodni gas i mazut), kao i u sektoru transporta (nafta i naftni derivati i prirodni gas (5%)). Sektor industrije je zasnovan na upotrebi prirodnog gasa (47%), nafte i naftnih derivata (25%), uglja (12%). Udeo biomase u industrijskim procesima iznosio je 16%.

U toku 2019. godine postojali su i određeni udeli OIE u ukupnom energetskom miksu (16% primarne energije), prvenstveno iz centralizovanih hidroelektrana za proizvodnu električne energije, kao i biomase. Međutim, na nivou analiziranog grada, biomasa se najčešće koristi u čvrstom obliku, u individualnim ložištima koja se odlikuju niskom efikasnošću, zbog čega se njena primena ne može smatrati održivom. Ukupna godišnja upotreba fosilnih goriva po glavi stanovnika iznosila je 0,0189 GWh/stanovniku. Ukupna godišnja emisija ugljen-dioksida u definisanom referentnom sistemu iznosile su 847,84 kt, odnosno 6,65 t CO<sub>2</sub>/stanovniku.

---

<sup>13</sup> Napominje se da je od referentne 2019. godine do 2025. godine (godina pisanja disertacije) povećan udeo OIE u proizvodnji električne energije na nivou grada Kragujevca. Ova promena se može smatrati posledicom uvođenja koncepta kupca-proizvođača o okviru Zakona o korišćenju obnovljivih izvora energije [223]. Pored toga, u toku 2022. godine u sistemu daljinskog grejanja je zamenjen deo kotlova na ugalj kotlovima na prirodni gas.



Slika 5.6. Dijagram energetskega toka grada Kragujevca, 2019. god. (GWh)

## 5.4. Definisiranje budućeg energetskeg scenarija

### 5.4.1. Scenario 1: Polazni scenario energetske budućnosti grada Kragujevca za 2045. godinu

Definisiranje budućeg energetskeg scenarija grada zasniva se na analizi strateških nacionalnih energetskeg dokumenata. U Republici Srbiji na snazi je Strategija energetskeg razvoja do 2040. godine sa projekcijama do 2050. godine (u daljem tekstu *Strategija*) [141], kao i Integrisani nacionalni energetske i klimatske plan (u daljem tekstu *INEKP*) [140]. Pomenuti dokumenti imaju za cilj da predstavljaju scenarije promena energetskeg sistema Srbije, sa posebnim osvrtom na „postizanje energetske bezbednosti, konkurentnosti i dekarbonizacije sistema“. U okviru Strategije, predstavljena su tri moguća scenarija energetskeg razvoja zemlje:

- Scenario u kome se pretpostavlja da će se energetska budućnost zasnivati na principima i praksi današnjice kako u pogledu energetskeg potreba, tako i u pogledu proizvodnje energije (eng. business as usual),
- Scenario S (predloženi scenario) - predviđa transformaciju energetskeg sistema kroz ambiciozno unapređenje energetske efikasnosti, iskorišćenja otpadne toplote i integracije OIE
- Scenario S-N - analizira mogućnost integracije nuklearne energije u elektroenergetski sistem Srbije.

Za potrebe ove doktorske disertacije, korišćena su predviđanja prikazana u „Scenariju S“ Strategije, a koja se odnose na 2045. godinu<sup>14</sup>.

Usvojeni proizvodni kapaciteti termoelektrana definisani su u skladu sa planiranim merama izgradnje novih, efikasnijih, proizvodnih blokova i očekivanim prestankom rada postojećih, i primenom principa pravedne energetske raspodele. U skladu sa strategijom, očekuje se da će blokovi u Termoelektrani Kolubara A i Morava prestati sa radom. Takođe, postojeći termoblokovi TENT A1 i A2, kao i dva termobloka Kostolac A će biti obnovljeni, dok se očekuje izgradnja novog bloka B3 u okviru termoelektrane Kostolac B, sa bruto snagom 350 MW. Pored toga, očekuje se izgradnja novih postrojenja gasnih elektrana snage 350 MWel, u Vojvodini, zbog povlačenja postojećih, kao i izgradnja novih u blizini Niša, snage 150 MWel.

Scenario 1 grada Kragujevca takođe obuhvata udele hidroelektrana, kod kojih se očekuje revitalizacija postojećih i izgradnja novih proizvodnih kapaciteta. Očekivano ukupno povećanje snage obnovom postojećih je 77,7 MW, dok su predviđeni kapaciteti novih hidroelektrana 375 MW na teritoriji Srbije.

Usvojene instalirane snage za termoelektrane, termoelektrane-toplane<sup>15</sup>, udeli korišćenih energenata, kao i kapaciteti varijabilnih OIE prikazani su u tabeli 5.8.

---

<sup>14</sup> Scenario S-N nije predmet ove doktorske disertacije, jer je njen cilj analiza mogućnosti decentralizacije energetskeg sistema i iskorišćenja lokalnih potencijala. Nuklearne elektrane predstavljaju centralizovane proizvodne sisteme, najčešće značajnih kapaciteta.

<sup>15</sup> U okviru unapređenog sistema daljinskog grejanja

Tabela 5.8 Usvojeni proizvodni kapaciteti u Scenariju 1

Centralizovani sistemi za proizvodnju energije				
Tehnologija	Kapacitet (MW)		Udeo energenata (%)	
Termoelektrana	112,1		Prirodni gas	22%
			Ugalj	71%
			Biomasa	7%
Termoelektrana toplana	30,4	Daljinsko grejanje	Prirodni gas	92%
Kotlovi	110		Biomasa	8%
OIE				
Tehnologija	Kapaciteti (MW)		Očekivana proizvodnja (GWh)	
Solarni paneli	172,5		246,98	
Hydroenergija	68,7		319,52	

Buduće energetske potrebe u sektorima definisane su na osnovu energetskog bilansa, prikazanom u Strategiji <sup>16</sup>, primenom postulata pravedne energetske raspodele (videti poglavlje 4)<sup>17</sup> za sektore industrije i transporta, kao i za definisanje upotrebe energenata u centralizovanim sistemima za proizvodnju električne energije. Energetske potrebe u ostalim sektorima su definisane u skladu sa predloženim merama, pri tome su usvojene one koje se direktno mogu ugraditi na analiziranom lokalitetu. Sve predložene mere su skalirane u skladu sa principima pravedne energetske raspodele, na osnovu očekivanog broja stanovnika u Kragujevcu u predviđenoj populaciji stanovnika u Republici Srbiji u toku analizirane 2045. godine.

Shodno tome, promene u energetskom sistemu koje su obuhvaćene Scenarijem 1 budućeg energetskog sistema grada Kragujevca su:

- povećana potreba za električnom energijom u svim sektorima i njeno moguće uparivanje potražnje do 25% (tzv. fleksibilnost sistema),
- povećana energetska efikasnost u sektoru zgradarstva i to 1% godišnje do 2030 i 2% godišnje od 2030. do 2045. godine za sektor domaćinstva i 3% na godišnjem nivou do 2030. godine i 6% godišnje nakon toga za sektor javnih zgrada,
- povećan udeo toplotnih pumpi (15% toplotnih energetske potrebe u domaćinstvima i 25% u javnim zgradama); U domaćinstvima toplotne pumpe menjaju individualna ložišta koja koriste lož ulje i ugalj i po 50% ložišta na prirodni gas i biomasu,
- povećan udeo električnih vozila, definisan na osnovu očekivanog porasta potrebe za električnom energijom u sektoru transporta,
- u domaćinstvima 5% STV zagrevaće se solarnim kolektorima,
- solarni kolektori će biti korišćeni i u sistemu daljinskog grejanja, prema predviđenom udelu,

<sup>16</sup> Tabela A.11. Scenarija S Strategije je prikazana u Prilogu A

<sup>17</sup> Napominje se da je broj stanovnika za 2045 godinu određen na osnovu interpolacije u skladu sa predviđenim brojem stanovnika za 2030 i 2050 godinu za grad Kragujevac.

- kapaciteti i proizvodnja OIE usvojeni su na osnovu mogućnosti korišćenja teritorijalno dostupnih OIE (usvojeni su udeli za solarne panele; vetro turbine nisu uzete u obzir, zbog specifičnosti urbanog lokaliteta i njegovog zanemarljivog eolskog potencijala),
- kako je planirana izgradnja reverzibilne elektrane Bistrica, usvojen je udeo koji odgovara gradu, radi balansiranja instaliranog kapaciteta OIE,
- potreba za biogorivima je usvojena na Strategije. Napominje se da je upotreba biomase ograničena na količinu koja predstavlja energetske potencijal biomase grada Kragujevca. Ova odluka je opravdana činjenicom da je energetske potencijal biomase grada Kragujevca manji od količine biomase koja se globalno može smatrati održivom u sektoru energetike (27 GJ/stanovnik godišnje) [30,47,48],
- unapređenje sistema daljinskog grejanja i instaliranje kogeneracionih kotlova za istovremenu proizvodnju toplotne i električne energije.

Očekivane energetske potrebe u svim analiziranim sektorima, u skladu sa merama predloženim Strategijom, prikazane su u tabeli 5.9.

Tabela 5.9 Energetske potrebe grada Kragujevca u skladu sa Scenarijem 1

Očekivani broj stanovnika	Srbija	Kragujevac
	5.450.542	127.587 (2,3% populacije u zemlji)
Energent	Energetske potrebe	
	Srbija (TWh/god)	Kragujevac (GWh/god)
Električna energija	42,6	997,2
<i>Industrija</i>		
Ugalj	2,4	55,73
Nafta i naftni derivati	5,2	121,25
Prirodni gas	9,1	213,65
Biomasa	1,1	25,4
Električna energija	15,9	
Vodonik	0,6	15,16
<i>Transport</i>		
Biodizel	0,5	12,09
Benzin i nafta	17,14	401,33
Prirodni gas	0,1	1,5
Vodonik	4,1	96
Električna energija	5,5	128,69
<b>Kragujevac</b>		
<i>Individualna ložišta</i>		
Tip individualnog ložišta	Potrebna energija (GWh/god)	Efikasnost sistema
Prirodni gas	38,49	0,9
Biomasa	108,85	0,75
Toplotne pumpe	104,28	3
Električni kotlovi	125	1
<i>Daljinsko grejanje</i>		
Daljinsko grejanje	166,9	0,75

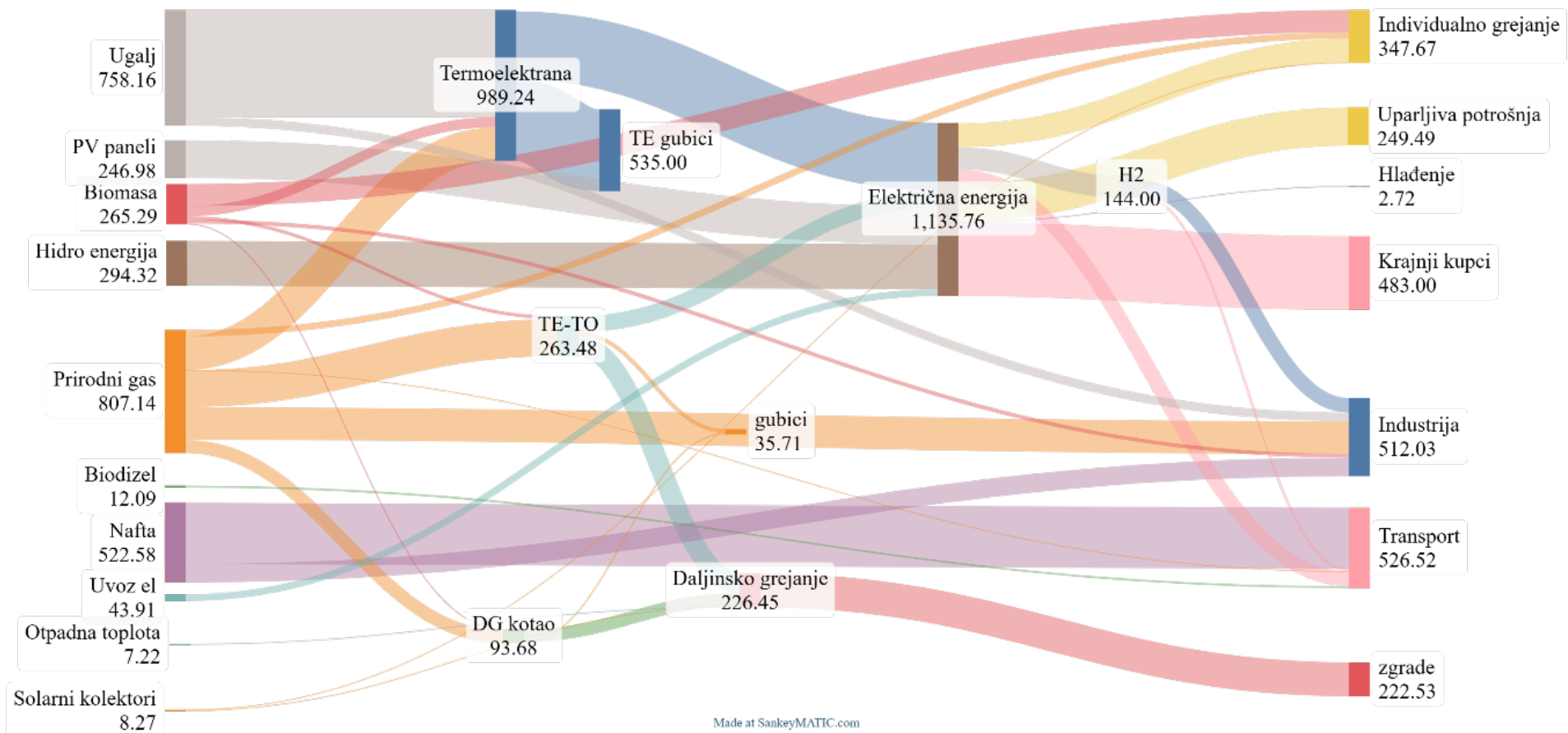
Na osnovu ulaznih podataka, i rezultata simulacionog modela (Prilog B), kreiran je dijagram energetske tokova (slika 5.7.) za Scenario 1, budućeg energetske sistema grada Kragujevca.

Energetski sistem Scenarija 1 rezultira ukupnim godišnjim emisijama CO<sub>2</sub> od 560 kt, odnosno 4,4 t/stanovniku. Udeo fosilnih goriva u ukupnoj energetske proizvodnji na godišnjem nivou iznosi 72% , odnosno 0,0163 GWh/stanovnik.

Sa druge strane, beleži se povećana upotreba OIE u proizvodnji električne energije, prvenstveno fotonaponskih panela.

Iako je cilj Strategije prestanak korišćenja uglja i unapređenje energetske nezavisnosti, sa dijagrama se uočava da je proizvodnja energije i u toku 2045. godine visoko zavisna od upotrebe fosilnih goriva. Takođe, u sistemu daljinskog grejanja prirodni gas predstavlja dominantni energent.

S tim u vezi, u okviru disertacije se predlaže unapređenje pretpostavljenog scenarija, merama koje su u duhu Strategije i važećih energetske politika u Republici Srbiji, a u saglasnosti sa predviđenim ciljevima, kojima se omogućava dodatno iskorišćenje lokalnih energetske potencijala.



Slika 5.7. Dijagram energetske tokova (GWh) za Scenario 1 grada Kragujevca, 2045

#### 5.4.2. Scenario 2a: Predloženi energetska scenario grada Kragujevca za 2045 godinu

Analizom lokalnih karakteristika grada Kragujevca utvrđeno je da, pored mera predloženih Strategijom, grad poseduje potencijal za sprovođenje aktivnosti koje bi mogle dodatno doprineti procesu dekarbonizacije. S obzirom na to da je upravljanje otpadom već duži niz godina značajan izazov za grad, Scenario 2 predviđa izgradnju postrojenja za spaljivanje otpada. Pored toga, u gradu se nalazi centar za obradu podataka (Data centar Republike Srbije), koji zahteva kontinuirano hlađenje elektronskih jedinica. Otpadna toplota, nastala kao rezultat hlađenja, može se iskoristiti u sistemu daljinskog grejanja uz upotrebu toplotnih pumpi. Kako se očekuje izgradnja novog stambenog bloka u neposrednoj blizini data centra, generisana otpadna toplota može se koristiti lokalno, čime se smanjuju gubici u transportu toplote.

Dakle, u poređenju sa Scenarijem 1, Scenario 2a budućeg energetska sistema grada Kragujevca razmatra mogućnosti uvođenja novih mera prilagođenih teritorijalnim specifičnostima grada, koje, ili nisu obuhvaćene Strategijom, ili su ambicioznije od onih koje su predložene u okviru pomenute Strategije. U skladu s tim, u Scenariju 2a se očekuju sledeća dodatna unapređenja:

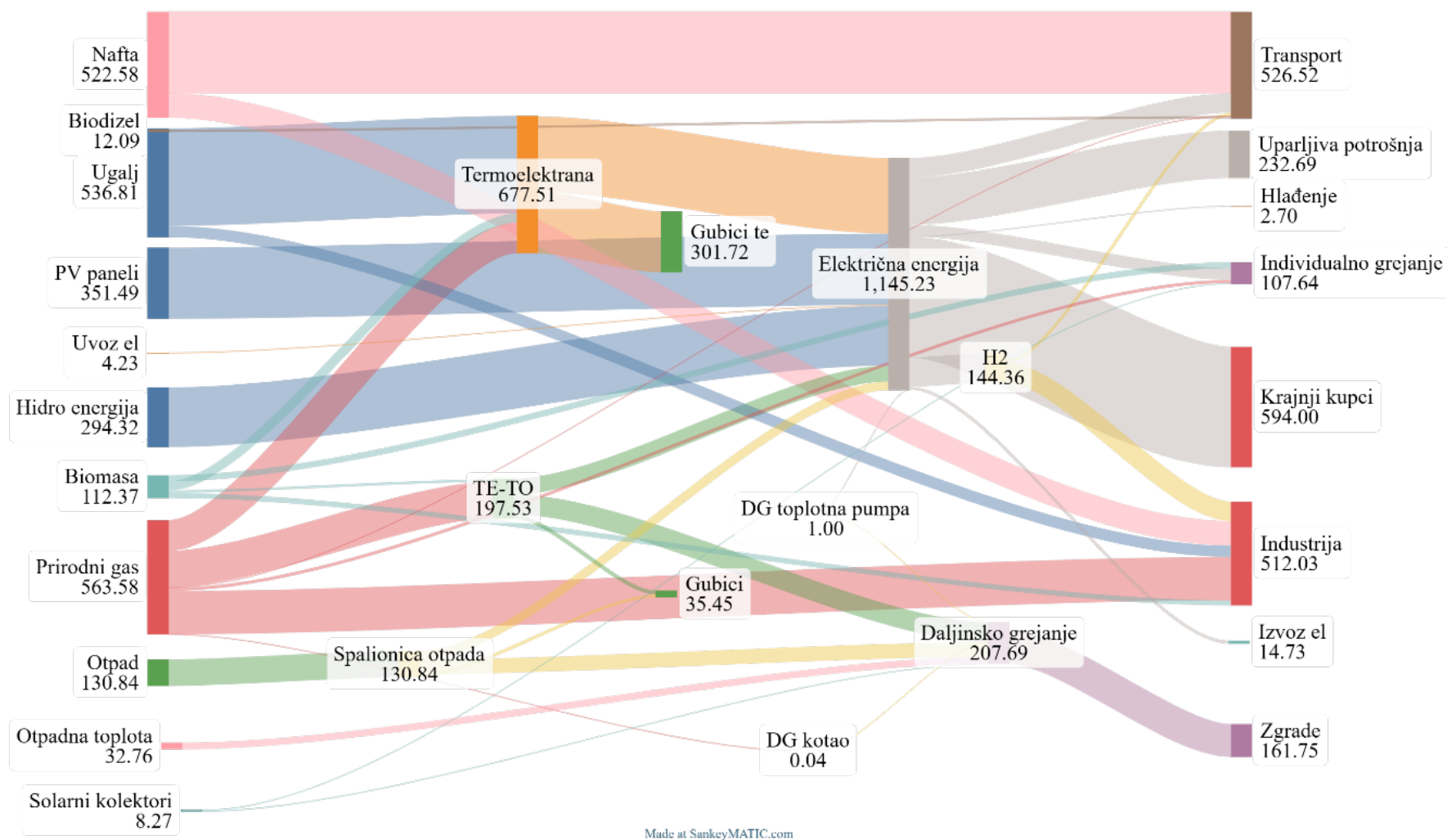
- obnova svih stambenih objekata kako bi se dostigao nivo energetske efikasnosti definisan nacionalnim propisima za postojeće zgrade ( $75 \text{ kWh/m}^2$ ), u okviru Pravilnika o energetska efikasnosti zgrada [199]. Ovaj nivo unapređenja zasniva se na pretpostavci da će novoizgrađeni objekti tokom analiziranog perioda koristiti znatno manje energije, što omogućava niži prag efikasnosti za postojeće zgrade. Prethodne studije pokazale su da je postizanje klimatske neutralnosti do 2050. godine moguće ukoliko 90% zgrada bude podvrgnuto dubinska renovaciji (do 90% uštede energije) [224],
- instalirani kapacitet fotonaponskih elektrana zasniva se na pretpostavci da će sva domaćinstva postati kupci-proizvođači sa sistemima od 5 kW, dok će sve postojeće fabrike u industrijska zoni instalirati sisteme od 150 kW, u skladu sa važećim regulatornim ograničenjima. Kapacitet PV sistema na javnim zgradama zasniva se na analizi površine krovova,
- deo centralizovanih jedinica za daljinska grejanje biće unapređen tehnologijama za kombinovanu proizvodnju električne i toplotne energije,
- otpadna toplota iz gradskog centra za obradu podataka koristiće se u sistemu daljinskog grejanja,
- predlaže se izgradnja spalionice otpada za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije, uz projekcije koje uzimaju u obzir povećanu stopu reciklaže otpada,
- integracija sezonskog skladištenja toplotne energije u sistem daljinskog grejanja,
- otpadna toplota iz procesa proizvodnje vodonika i gasifikacije koristiće se u sistemu daljinskog grejanja,
- dodatna gasifikacija biomase (ukupna količina korišćenja biomase u gradu odgovaraće održivom potencijalu korišćenja ovog energenta),

- očekuje se dodatno povećanje kapaciteta toplotnih pumpi u individualnim domaćinstvima za 18% u odnosu na Scenario 1.

U suštini, Scenario 2a se zasniva na analizi potencijala za diversifikaciju toplotnih izvora u sistemu daljinskog grejanja. Ispitivanje ovakvih mogućnosti je od značaja, jer mogu doprineti pouzdanosti i energetske nezavisnosti sistema grejanja, potencijalno vodeći ka optimizaciji troškova proizvodnje [225].

Energetski sistem Scenarija 2 rezultira ukupnim godišnjim emisijama CO<sub>2</sub> od 429,39 kt, odnosno 3,37 t/stanovniku. Udeo fosilnih goriva u ukupnoj energetske proizvodnji na godišnjem nivou iznosi 62% , odnosno 0,012 GWh/stanovnik.

Na osnovu ulaznih podataka i rezultata simulacionog modela (Prilog C), kreiran je dijagram energetske tokova za Scenario 2a, prikazan na Slici 5.8.



Slika 5.8. Dijagram energetskega toka (GWh) za Scenarij 2a grada Kragujevca, 2045

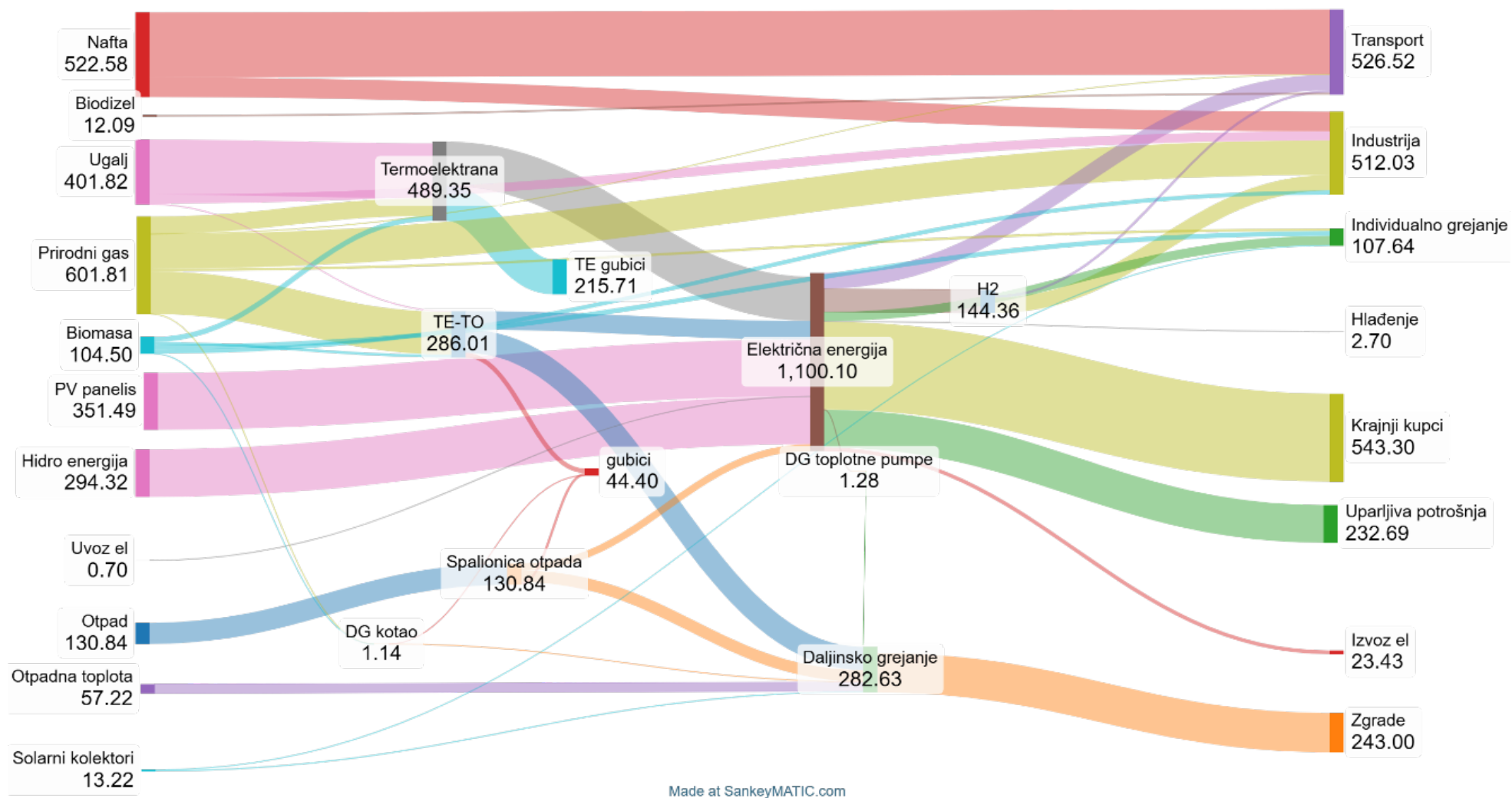
#### 5.4.3. Scenario 2b: Unapređenje scenarija 2a proširivanjem kapaciteta daljinskog grejanja za potrebe zagrevanja STV

Iako Strategija predviđa korišćenje solarnih kolektora u sistemima daljinskog grejanja, u Kragujevcu se sanitarna topla voda najčešće zagreva pomoću individualnih električnih grejača, čak i u domaćinstvima koja su priključena na sistem daljinskog grejanja. Stoga se zaključuje da primena solarnih kolektora u sistemu daljinskog grejanja grada Kragujevca nije opravdana, budući da tokom letnjih meseci, kada je solarni energetska potencijal najviši, ne postoji potreba za toplotom.

Kako potražnja za toplotnom energijom tokom letnjih meseci u okviru sistema daljinskog grejanja može omogućiti značajniju integraciju otpadne toplote, OIE (posebno fotonaponskih panela, čija je proizvodnja električne energije najizraženija tokom letnjeg perioda) i toplotnih pumpi u sistem daljinskog grejanja, zahvaljujući prisustvu baznog opterećenja tokom cele godine, Scenario 2b ispituje mogućnost proširivanja kapaciteta daljinskog grejanja potrebama za zagrevanje STV. Ovaj sistem, čiji je dijagram energetskih tokova predstavljen na slici 5.9, rezultira ukupnim godišnjim emisijama CO<sub>2</sub> od 386,8 kt, odnosno 3,03 t/stanovniku.

Udeo fosilnih goriva u ukupnoj energetskoj proizvodnji na godišnjem nivou iznosi 60%, odnosno 0,01 GWh/stanovnik.

Rezultati simulacionog modela za Scenario 2b su prikazani u Prilogu D.



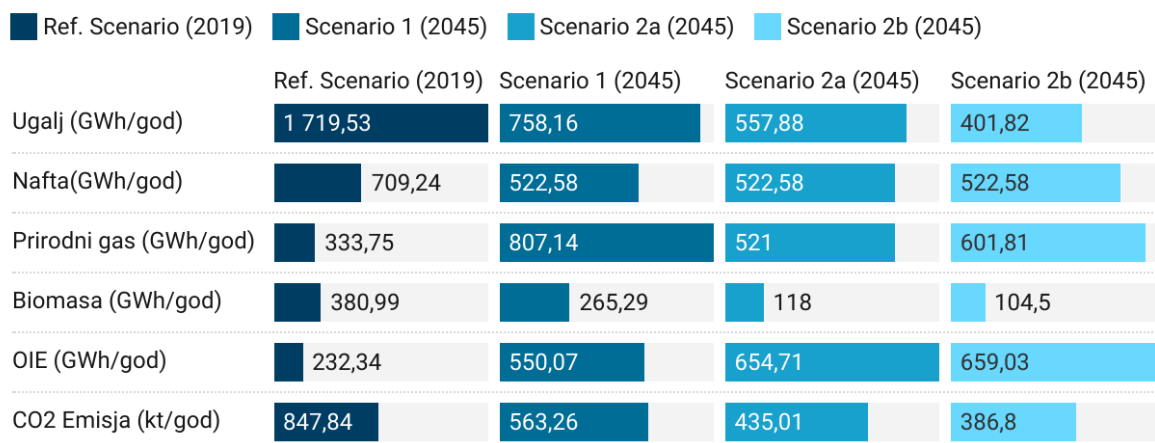
Slika 5.9. Dijagram energetskega toka (GWh) za Scenarij 2b grada Kragujevca, 2045

#### 5.4.4. Uporedni prikaz i analiza predstavljenih mogućih scenarija energetske budućnosti grada Kragujevca

Uticaj nacionalnih politika na nivo grada, predstavljen Scenarijem 1, pokazuje da se, na nivou Kragujevca, može očekivati smanjenje upotrebe uglja (za 56%), nafte (za 93%) i biomase (za 30%) u poređenju sa referentnim sistemom. Sa druge strane, očekuje se povećana upotreba prirodnog gasa (142%), kao i upotreba OIE (za 137% u ukupnom energetsom miksu). Pomenute promene u energetsom sistemu rezultiraju smanjenjem ukupne emisije CO<sub>2</sub> za 33% na godišnjem nivou, odnosno za 287 kt/godina. U poređenju sa Scenarijem 1, Scenario 2a se razlikuje po ambicioznijoj stopi obnove zgrada, kao i većim iskorišćenjem solarnog potencijala. Pored toga, ovaj Scenario uključuje i specifičnosti grada, pa je predložena izgradnja spalionice otpada. Energetski potencijal otpada na je procenjen na 130 GWh/godina, a električna i toplotna efikasnost njenog kogeneracionog postrojenja na 55% i 33%, respektivno. Scenario 1a takođe obuhvata mogućnost upotrebe otpadne toplote iz gradskog data centra u sistemu daljinskog grejanja. Ukupna količina energije koja se može isporučiti sistemu daljinskog grejanja procenjena je na 42 GWh/godišnje. Dodatno unapređenje sistema daljinskog grejanja se odnosi na instalaciju toplotne pumpe kapaciteta 0,5 MWel, kao i izgradnju skladištenja toplote (0,4 GWh). Takođe, u poređenju sa Referentnim Scenarijem u Scenariju 2a se očekuje zamena ložišta u sistemu daljinskog grejanja efikasnijim postrojenjem za istovremenu proizvodnju toplotne i električne energije. Predviđena je zamena 30% kapaciteta postojećih kotlova. U ukupnom energetsom miksu Scenarija 2a, udeo uglja iznosi 21%, nafte i naftnih derivata 20%, prirodnog gasa 20%, biomase 12%, dok je upotreba OIE 26%. Ukupno posmatrano, u poređenju sa Scenarijem 1, upotreba fosilnih goriva je smanjena za 10% (20% u poređenju sa Referentnim Scenarijem).

Međutim, ukoliko se sistem daljinskog grejanja proširi i za potrebe zagrevanja STV za domaćinstva koja su deo mreže (uz zadržavanje svih ostalih pretpostavki i karakteristika Sistema 2a), upotreba fosilnih goriva u Sistemu 2b se dodatno smanjuje za 2%, dok se udeo OIE povećava za 1%. U ovom Scenariju je upotreba uglja za 27% manja u poređenju sa Scenarijem 2a, dok se beleži porast u upotrebi prirodnog gasa (za 1%). Ovo se može objasniti činjenicom da bazno opterećenje, odnosno konstantna potreba za toplotnom energijom, utiče na povećano angažovanje kogeneracionih postrojenja, što uzrokuje smanjene potrebe za kapacitetima termoelektrana, kao i bolju integraciju OIE, prvenstveno solarnih panela u toku letnjih meseci. Ova promena takođe utiče na povećanje angažovanja toplotnih pumpi za 1% a godišnjem nivou. Scenario 2b rezultira ukupnim smanjenjem godišnjih emisija CO<sub>2</sub> za 461 kt u poređenju sa Referentnim Scenarijem. Povećana integracija OIE rezultira i promenama u količini električne energije koju sistem razmenjuje sa okruženjem. Poredeći tri prikazana scenarija, Scenario 1 zahteva najviše uvoza energije (42 GWh/god (4% ukupnih godišnjih potreba) i u ovom Scenariju grad ne proizvodi električnu energiju koju može da preda okruženju. Sa druge strane, u Scenariju 2a, količina energije koju sistem treba da uveze se smanjuje na 4 GWh na godišnjem nivou, dok sistem može da izveze 15 GWh električne energije. Povećana integracija OIE, analizirana kroz Scenario 2b omogućava dodatno smanjenje uvozne zavisnosti (0,7 GWh/god), dok se mogući izvoz energije procenjuje na 2%, odnosno 23,43 GWh.

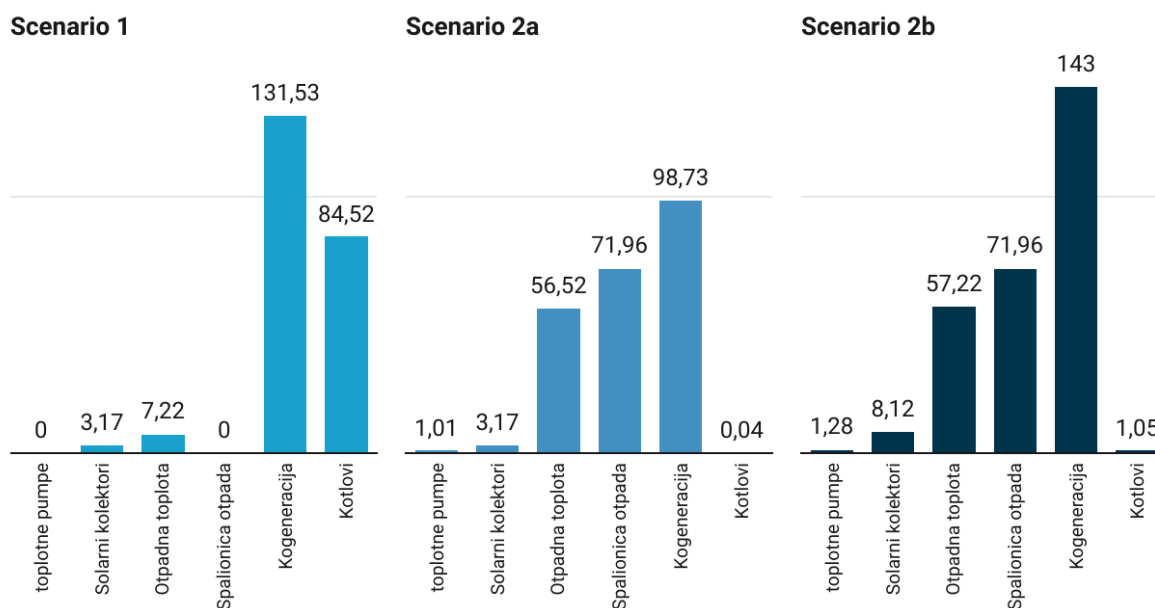
Uporedni prikaz korišćenja energenata u svim analiziranim scenarijima prikazan je na slici 5.10.



Slika 5.10. Uporedni prikaz rezultata analiziranih scenarija

Kako se sistem grejanja u Referentnom Scenariju zasniva na upotrebi fosilnih goriva u sistemu daljinskog grejanja i niskoefikasnih individualnih ložišta, on u velikoj meri utiče na proces dekarbonizacije grada. S tim u vezi analize mogućeg proširivanja energetske izvora u ovom sektoru su od izuzetne važnosti. Poređenje daljinskog grejanja u svim analiziranim scenarijima energetske budućnosti grada, uz osvrt na upotrebu i integraciju različitih tehnologija, prikazano je na slici 5.11.

## (GWh/god)



Kreirano uz pomoć Datawrapper

Slika 5.11. Upotreba tehnologija u sistemu daljinskog grejanja, Kragujevac 2045

Uviđa se da proširivanje sistema daljinskog grejanja za potrebe zagrevanja STV pozitivno utiče na integraciju solarnih kolektora i toplotnih pumpi. Sa druge strane, povećano je angažovanje kogeneracionih postrojenja, kao kotlova. Međutim, u ovom scenariju (Scenarij 2b) se, u poređenju sa Scenarijem 2a, smanjuje proizvedena količina toplote koju sistem ne može iskoristiti, za 30 GWh na godišnjem nivou.

Pored analiziranih parametara, u obzir je potrebno uzeti i uticaj analiziranih Scenarija na društvene i ekonomske faktore (tabela 5.10).

Tabela 5.10 Uticaj analiziranih budućih scenarija grada Kragujevca na tehno-ekonomske i društvene aspekte do 2045. godine

	Nova radna mesta (izgradnja)	Nova radna mesta (održavanje)	Troškovi održavanja (kEUR/god)	Investicioni troškovi (MEUR)
<b>Scenario 1</b>	6.236	288	3,22	530,76
<b>Scenario 2a</b>	9.119	414	5,52	692,59
<b>Scenario 2b</b>	9.119	414	5,52	737,71

U pogledu kreiranja novih radnih mesta, Scenariji 2a i 2b nude bolje mogućnosti u poređenju sa Scenarijem 1, ali su istovremeno troškovi održavanja i investicioni troškovi viši. Realizacija Sistema 2b zahteva najveća novčana ulaganja, ali istovremeno omogućava i najveće smanjenje emisije CO<sub>2</sub>. Ukoliko se u obzir uzmu troškovi investicije i održavanja sistema na godišnjem nivou, Scenario 1 rezultira najvećim ulaganjem po jediničnom smanjenju emisija CO<sub>2</sub>, dok je Scenario 2b ekonomski najprihvatljiviji u tom smislu (slika 5.12).



Slika 5.12. Troškovi analiziranih scenarija po jediničnoj uštedi emisije CO<sub>2</sub>

Na osnovu svega navedenog, kao i na osnovu rezultata prikazanih u radu [185] Scenario 2b je definisan kao najpoželjniji budući energetska scenario grada Kragujevca za 2045. godinu.

## 5.5. Analiza mišljenja zainteresovanih strana i participativno određivanje prioriteta ugradnje predloženih mera

### 5.5.1. Analiza mišljenja zainteresovanih strana

Zainteresovane strane, čije je mišljenje ispitivano prilikom sprovođenja ovog istraživanja, grupisane u četiri kategorije:

- javna uprava (lokalni donosioci odluka),
- zaposleni u akademskim institucijama (akademska zajednica),
- nevladine organizacije (NGO),
- građani [201].

Mapiranje, odnosno utvrđivanje zainteresovanih strana i kreiranje liste kontakata, je obavljeno u periodu od jula do septembra 2024. godine. Kako se disertacija zasniva na utvrđivanju posledica nacionalnih strateških okvira na dekarbonizaciju u gradovima, predstavnici lokalnih javnih institucija i donosioci odluka su mapirani na teritoriji cele Srbije, kao i pripadnici nevladinih organizacija. Kontaktirane zainteresovane strane iz akademskih institucija su iz oblasti energetike, energetskog planiranja i energetske tranzicije. Sa druge strane, ispitivani građani su stanovnici grada Kragujevca.

Kako bi se osiguralo što veće učešće zainteresovanih strana u ispitivanju, sve grupe su popunjavale kratak upitnik o značaju kriterijuma prilikom sprovođenja mera energetske tranzicije. Upitnik je sadržao ukupno 8 pitanja u kojima su ispitanici ocenjivali značaj predloženih kriterijuma ocenama od 1 do 5 (1-potpuno nevažno; 5- izuzetno važno). Analizirani kriterijumi za svaku meru su definisani kao:

- proizvodnja/ušteda finalne energije na godišnjem nivou,
- investicioni troškovi,
- smanjenje emisije ugljen-dioksida na godišnjem nivou,
- kreiranje novih radnih mesta prilikom konstrukcije i ugradnje OIE,
- kreiranje novih radnih mesta prilikom održavanja,
- očekivani radni vek tehnologije,
- efikasnost tehnologije,
- troškovi održavanja.

Upitnik je sproveden u aprilu 2025. godine i popunilo ga je ukupno 132 ispitanika i to 51% građana, 23% zaposlenih u akademskim institucijama; 9% angažovanih u nevladinom sektoru i 17% zaposlenih u javnim institucijama. Prosečno vreme popunjavanja upitnika je iznosilo 2 minuta i 24 sekunde.

Rezultati ankete su pokazali da je prilikom analize mišljenja predstavnika lokalnih donosioca odluka najznačajniji kriterijum efikasnost tehnologije (prosečno ocenjen sa 4,79), zatim proizvodnja/ušteda energije (4,74) i troškovi održavanja (4,68), dok kreiranje novih radnih mesta ima najmanji značaj. Predstavnici akademske zajednice ocenili su troškove održavanja i očekivani radni vek tehnologija kao najznačajnije (ocena 4,4), praćene proizvodnjom/uštedom energije (4,3). Predstavnici nevladinih organizacija su ocenili proizvodnju/uštedu energije kao najznačajniji kriterijum (prosečna ocena 4,64), praćen smanjenjem emisije CO<sub>2</sub> i troškovima održavanja (4,45). Na kraju, građani ocenjuju očekivani radni vek kao kriterijum koji treba da ima najviše značaja prilikom rangiranja mera (4,7), praćen efikasnošću tehnologije (4,6) i proizvodnjom energije (4,5).

Kreiranje novih radnih mesta u svim ispitivanim kategorijama je ocenjeno kao najmanje značajan kriterijum u procesu energetske tranzicije, iako se u javnom diskursu često pokreće kao pitanje. Komparativni prikaz značaja kriterijuma je prikazan na slici 5.13.

	Proizvodnja finalne energije	Investicioni troškovi	Smanjenje emisije CO2	Nova radna mesta-izgradnja	Nova radna mesta-održavanje	Efikasnost tehnologije	Očekivani radni vek tehnologije	Troškovi održavanja
građani	4,5	4,2	4,2	3,5	3,6	4,6	4,7	4,3
javna uprava	4,74	4,47	4,47	4,21	4,26	4,79	4,53	4,68
NVO	4,64	4,27	4,45	3,91	3,73	4,36	4,36	4,45
akademiska zajednica	4,3	4,1	4	3,1	3,2	4,2	4,4	4,4

Kreirano uz pomoć Datawrapper

Slika 5.13. Ocenjivanje značaja kriterijuma iz ugla različitih zainteresovanih strana

Ukoliko se u obzir uzmu mišljenja svih zainteresovanih strana, kreiranje novih radnih mesta prilikom konstrukcije i ugradnje mera ocenjeno je prosečnom ocenom 3,6, nova radna mesta prilikom održavanja 3,64, efikasnost tehnologija 4,53, očekivani radni vek tehnologije 4,56 i troškovi održavanja sa 4,39.

Na osnovu sprovedene ankete, a primenom jednačine 21 utvrđeni su težinski faktori za svaki kriterijum .

#### 5.5.2. Primena višekriterijumske analize na predloženom scenariju energetske budućnosti grada Kragujevca

Scenario 2b koji je izbran kao predloženi referentni scenario budućnosti je moguće ostvariti kroz implementaciju i ugradnju mera prikazanih u tabeli 5.11. U tabeli su takođe prikazani uticaji ugradnje predloženih mera na posmatrane kriterijume.

Tabela 5.11 Analiza predloženih kriterijuma na primeru Scenarija 2b

	Proizvedena (Uštedena) energija	Očekivani radni vek (godina)	Investicioni troškovi (Meur)	CO <sub>2</sub> uštede (kt/god)	Nova radna mesta - konstrukcija	Nova radna mesta - održavanje	Operacioni troškovi i troškovi održavanja (1000 eur/god)	Efikasnost
toplotne pumpe individualno	143,60	16,00	75,34	8,15	276,57	16,19	2029,48	3,50
PV javne zgrade	0,82	40,00	0,23	0,63	14,82	0,80	4,28	0,16
PV domaćinstva	401,50	40,00	153,60	307,55	6240,00	336,00	2136,00	0,16
PV industrija	7,90	40,00	2,01	6,05	127,40	6,86	36,75	0,16
solarni kolektori individualno	5,10	30,00	0,86	3,91	19,09	2,58	6,02	0,50
solarni kolektori DH	3,17	30,00	14,04	0,65	311,50	42,03	0,10	0,18
spalionica otpada	115,14	25,00	40,00	47,76	88,40	4,02	1111,22	0,88
skladištenje toplote	4362,00	40,00	1,3080	0,00	654,30	43,62	3,84	0,98
industrijska kogeneracija	60,00	25,00	4,68	31,79	16,16	0,48	110,59	0,88
otpadna toplota	57,22	25,00	3,21	11,68	0,00	0,00	0,10	1,00
toplotna pumpa DG	1,38	25,00	1,38	0,28	6,68	0,78	3,62	3,50

Kako bi se utvrdio redosled implementacije predloženih mera, najpre je potrebno sagledati uticaj ugradnje jediničnih proizvodnih kapaciteta (MW) za svaku predloženu meru na analizirane kriterijume. Kapaciteti proizvodnih tehnologija u Scenariju 2b su predstavljeni u tabeli 5.12.

Tabela 5.12 Proizvodni kapaciteti tehnologija za proizvodnju, skladište i konverziju energije predloženi Scenarijem 2b

Predložene mere	MW
toplotne pumpe domaćinstva*	70
PV javne zgrade	0,57
PV domaćinstva	240
PV industrija	5
solarni kolektori domaćinstva*	3
solarni kolektori DH*	49
spalionica otpada*	8,2
skladištenje toplote*	436
industrijska TE-TO	4
toplotna pumpa DG*	1,7
otpadna toplota	Obuhvata otpadnu toplotu iz procesa elektrolize, gasifikacije i iz data centra
*termički kapaciteti	

Nakon normalizacije uticaja predloženih mera na analizirane kriterijume, potrebno je primeniti jednačinu (20), pri tome su kriterijumi sa najpoželjnijom najnižom vrednošću investicioni troškovi i troškovi održavanja, dok je kod svih ostalih kriterijuma najpoželjnija najveća vrednost.

Na osnovu analize mišljena različitih zainteresovanih strana, redosled implementacije predloženih mera je prikazan u tabeli 5.13.

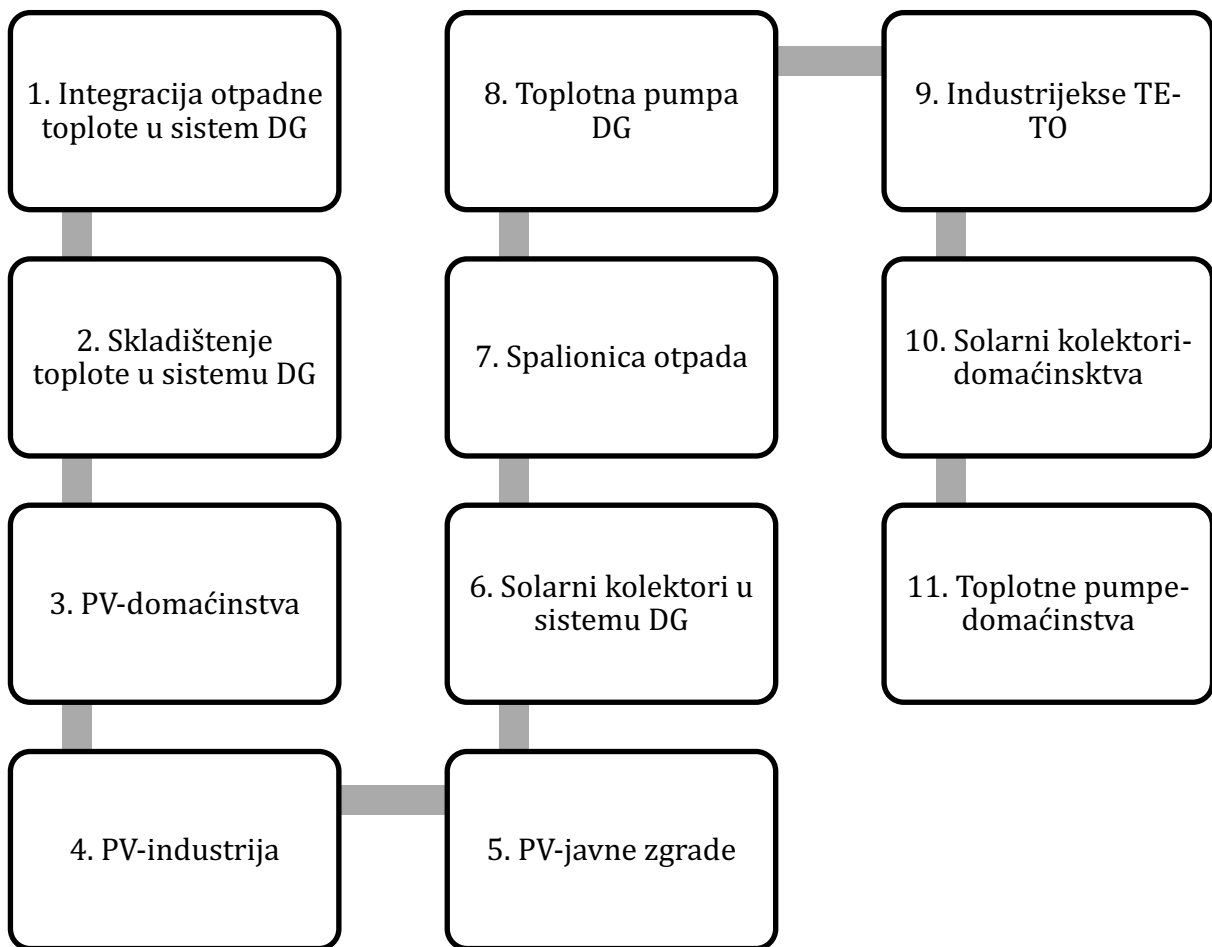
Tabela 5.13 Rangiranje predloženih mera na osnovu značaja kriterijuma iz ugla različitih zainteresovanih strana

	Građani	Javna uprava	NVO	Akadska zajednica
Skladištenje toplote DG	1	2	2	2
Otpadna toplota	2	1	1	1
PV domaćinstva	3	3	3	3
PV industrija	4	4	4	4
PV javne zgrade	5	5	5	5
Solarni kolektori DG	6	6	6	6
Spalionica otpada	7	7	7	8
Toplotna pumpa DG	8	8	8	7
Industrijska kogeneracija	9	9	9	9
Solarni kolektori domaćinstva	10	10	10	10
Toplotne pumpe domaćinstva	11	11	11	11

Kao što se iz priložene tabele može zaključiti, redosled ugradnje predloženih mera se neznatno razlikuje u zavisnosti od grupe ispitanika. Uzimajući u obzir mišljenja svih zainteresovanih strana, predloženi redosled ugradnje novih tehnologija, zasnovan na rezultatima Scenarija 2b, prikazan je na slici 5.14.

Redosled mera predložen ovom metodologijom omogućava postepenu integraciju OIE u energetske sistem grada. U ovakvom pristupu, najpre se predlaže upotreba otpadne toplote i ova mera predstavlja značajan korak u smanjenju emisije CO<sub>2</sub> i upotrebe fosilnih goriva. Otpadna toplota predstavlja količinu energije koja nastaje kao nusproizvod u procesima energetske proizvodnje i konverzije i s tim u vezi njena upotreba u velikoj meri doprinosi povećanju efikasnosti, ne samo sistema daljinskog grejanja, već i energetskog sistema kao celine. Efikasnost sistema daljinskog grejanja se unapređuje i ugradnjom toplotnog skladišta, što se predlaže kao drugi korak u procesu klimatske neutralizacije grada. Dugoročno posmatrano, skladištenje energije omogućava korišćenje energije iz varijabilnih OIE za procese proizvodnje toplotne energije tehnologijama koje omogućavaju fleksibilnost (poput toplotnih pumpi) i njeno korišćenje kada je ona potrebna. Na ovaj način skladištenja toplote doprinose boljoj integraciji OIE. Upotreba PV panela na krovovima domaćinstava, javnih zgrada i industrije utiče na smanjenje proizvodnje električne energije iz termoelektrana. Istovremeno, instaliranje solarnih panela omogućava proces demokratizacije energetskog sektora i ujedinjavanje različitih zainteresovanih strana u proces energetske tranzicije, kroz deljenje energije u okviru energetskih zajednica [226]. Zatim se predlaže primena solarnih kolektora u sistemu daljinskog grejanja, kao i izgradnja spalionice otpada. Predloženi sistem sa instaliranim kapacitetima PV panela može koristiti višak proizvedene energije za rad toplotnih pumpi u sistemu daljinskog grejanja, što se predlaže kao osmi korak u procesu. Na kraju se

predlaže integracija industrijske kogeneracije, kao i ugradnja solarnih kolektora i toplotnih pumpi u sistemu individualnih ložišta.



Slika 5.14. Predloženi redosled ugradnje novih tehnologija na rezultata višekriterijumske analize

## 6. ZAKLJUČAK

Kako se, na globalnom nivou, u gradovima koristi značajna količina energije, proces njihove klimatske neutralizacije je od značaja za borbu protiv klimatskih promena i prestanak korišćenja fosilnih goriva. Međutim, pošto su gradovi delovi većih energetske sistema zemalja u kojima se nalaze, ovaj proces mora da bude u skladu sa nacionalnim ciljevima i planovima, kako bi se osigurala njegova realizacija. S tim u vezi, uspostavljanje jasnih metodoloških okvira, koji se mogu primeniti u svim gradovima, je od izuzetne važnosti. Osnovni cilj ove doktorske disertacije se ogleda u definisanju metodologije za proces klimatske neutralizacije u gradovima, koja je zasnovana na upotrebi energetske izvora sa niskom emisijom CO<sub>2</sub>, kreiranju pametnog energetske sistema i uključivanju mišljenja građana prilikom sprovođenja odluka.

Metodološki pristup se zasniva na sprezi predviđenog budućeg energetske modela grada i participativnog učešća građana u definisanju značaja kriterijuma prilikom ugradnje novih mera obuhvaćenih modelom, čime se omogućava postepeno i održivo sprovođenje energetske tranzicije. Skaliranjem nacionalnih ciljeva na lokalni nivo omogućava se, ne samo postizanje principa pravedne energetske raspodele, već i sprovođenje dvosmerne analize u kojoj se prati:

- 1) uticaj nacionalnih strategija na lokalne nivoe,
- 2) mogućnost ostvarivanja nacionalnih ciljeva maksimalnim iskorišćenjem lokalnih energetske potencijala.

Ovaj pristup je zasnovan na tri osnovne hipoteze:

- Uspešno sprovođenje energetske tranzicije i zamena konvencionalnih energetske sistema je moguće isključivo kroz sagledavanje kompleksne veze između svih energetske sektora,
- Optimalno tehničko rešenje koje omogućava integraciju OIE je zasnovano na kreiranju pametnih energetske sistema i međusektorske razmene energije,
- Učešćem svih zainteresovanih strana (javna uprava i donosioci odluka, akademska zajednica, građani i nevladine organizacije), može se obezbediti objektivnost u definisanju značaja različitih kriterijuma koji mogu uticati na proces ugradnje i realizacije mera predloženih energetske modelom.

Kako bi se obezbedio celovit pristup energetske modeliranju, prvi deo doktorske disertacije, pored pregleda dosadašnjih istraživanja iz oblasti i teorijskih razmatranja u pogledu energetske modeliranja i upotrebe participativnog pristupa građana u energetske sektoru, obuhvata i sveobuhvatni pregled tehnologija za proizvodnju, konverziju i skladištenje energije, važećih energetske politika i potreba za energijom na različitim nivoima (evropski, nacionalni, lokalni). Kroz pregled i upućivanje na značajne literaturne izvore, ovaj deo rada predstavlja opsežni katalog znanja, koji se može koristiti kao polazna osnova boljeg razumevanja mogućnosti i značaja sprovođenja energetske promena na lokalnom nivou.

U drugom delu disertacije je predstavljena metodologija koja uključuje analizu tehničkih mogućnosti za dekarbonizaciju u gradovima, kao i društvenu komponentu. Definisana metodologija se sastoji od sledećih koraka:

- sprovođenje SWOT analize (detaljno opisana u poglavlju 4.2),
- kreiranje referentnog (baznog) scenarija grada (poglavlje 4.3),
- definisanje budućeg energetskeg scenarija grada (poglavlje 4.4)
- sprovođenje višekriterijumske analize za definisanje prioriteta na osnovu participativnog učešća građana (poglavlje 4.5).

SWOT analiza predstavlja prvi korak metodologije, jer omogućava sveobuhvatno sagledavanje lokalnih specifičnosti koje mogu pomoći ili stati na put energetske promene u gradu. U doktorskoj disertaciji su predstavljeni jasni koraci koje treba sprovesti kako bi se obezbedilo prikupljanje svih podataka za kreiranje krajnje matrice. Ovako prikazani podaci omogućavaju diskusiju i jasan uvid u zatečeno stanje grada, kao i moguće potencijale i prepreke za ostvarivanje budućih ciljeva.

Nakon prikupljanja podataka, kreiranje referentnog (baznog) scenarija predstavlja prvi korak u analizi energetskeg modela ispitivanog grada. Ovaj model služi kao polazna osnova za modeliranje budućih energetskeg sistema i praćenje promena energetskeg indikatora, ali i za uspostavljanje jasnih postulata za energetske modeliranje na lokalnim nivoima. U referentnom modelu su definisane granice grada koje omogućavaju da metodologija bude primenjena u bilo kom gradu u zemlji, uz uspostavljanje principa pravednosti. Naime, kako su gradovi deo zemlje u kojoj se nalaze, definisanje energetskeg potreba grada treba da bude sprovedeno tako da svi gradovi u zemlji imaju jednake prilike za ostvarivanje procesa klimatske neutralizacije. S tim u vezi, energetske potrebe u energetske intenzivnim sektorima, poput industrije i transporta treba da budu raspoređene jednako u celoj zemlji. Opravdanost ovakve odluke se objašnjava činjenicom da se produkti sektora industrije ne koriste samo unutar gradova gde se fizički proizvode, kao i da ljudi i dobra putuju i van granica grada. Sa druge strane, energetske potrebe u sektoru grejanja i zgrada predstavljaju karakteristike svakog analiziranog lokaliteta. Na isti način treba pristupiti i definisanju proizvodnih kapaciteta u slučajevima centralizovane proizvodnje energije. U zemljama u kojima se proizvodnja energije većinski zasniva na upotrebi fosilnih goriva, prilikom analize gradova potrebno je uračunati udele grada u centralizovanim proizvodnim kapacitetima. Udeli za sektore industrije i transporta, kao i proizvodnih jedinica, se definišu u skladu sa udelom broja stanovnika u gradu u ukupnom broju stanovnika u zemlji.

Po završetku kreiranja referentnog scenarija, pristupa se definisanju budućeg energetskeg scenarija grada uz poštovanje pomenutih principa pravednosti. Definisanje budućih scenarija je proces koji se sastoji iz više koraka i zasnovano je na analizi dokumenata nacionalne strategije energetskeg razvoja i analizi mogućnosti ugradnje mera predloženih strategijom na nivou analiziranog lokaliteta. Nakon utvrđivanja posledica nacionalnog strateškog dokumenta na energetske tranziciju na nivou analiziranog grada (Scenario 1), pristupa se kreiranju Scenarija 2 budućeg energetskeg sistema grada. U okviru ovog scenarija se ispituju dodatne mogućnosti za dekarbonizaciju na lokalnom nivou, uključujući sve lokalne specifičnosti i potencijale koji nisu obuhvaćeni strategijom, pri čemu sve predložene mere treba a budu u skladu sa važećim propisima i preporukama.

Kako bi se prikazale posledice realizacije budućih scenarija i svih mera predloženim scenarijima, definisani su sledeći kriterijumi:

- ekonomski - investicioni troškovi i troškovi održavanja,
- društveni - izgradnja novih radnih mesta,

- tehnički - proizvodnja (ušteda) energije, efikasnosti i radni vek tehnologija,
- kriterijumi životne sredine - smanjenje emisije CO<sub>2</sub>.

Jasnim definisanjem i kvantifikovanjem predloženih kriterijuma omogućava se transparentnost i uključivanje građana u proces donošenja odluka. S tim u vezi, primenom višektiterijumske analize i participativnim učešćem građana, može se definisati najpoželjniji scenario, a kasnije i definisati redosleda kojim predložene mere treba da se sprovedu.

Metodologija, razvijena u ovoj doktorskoj disertaciji, je sprovedena i testirana na studiji slučaja grada Kragujevca, Srbija. Rezultati sprovedene SWOT analize na nivou grada prikazani su u poglavlju 4.2 ove doktorske disertacije i publikovani su u radu [187]. Za potrebe analize Referentnog Scenarija, kao i mogućih budućih energetske scenarija grada, korišćen je softverski paket EnergyPLAN. Rezultati referentnog modela koji se odnosi na 2019. godinu, upućuju na visoku zavisnost energetske sektora grada od fosilnih goriva (81% u ukupnoj primarnoj energiji). U Referentnom modelu najviše fosilnih goriva je korišćeno za proizvodnju potrebne količine električne energije, ali i u sektoru transporta i industrije. Sektor daljinskog grejanja je takođe zasnovan na upotrebi fosilnih goriva. Sa druge strane, u toku analizirane godine korišćeni su i OIE. Međutim, njihova primena se većinski zasnivala na upotrebi biomase u niskoeffikasnim individualnim ložištima. Ovakav sistem rezultirao je godišnjom emisijom CO<sub>2</sub> od 847 kt (6,6k5 t CO<sub>2</sub>/stanovnik) i upotrebi fosilnih goriva od 0,0189 GWh/stanovniku.

Prilikom kreiranja Scenarija 1 budućeg energetske sistema grada, korišćena su predviđana prikazana u važećim strateški dokumentima Republike Srbije (Strategija i INEKP). Ovim scenarijem se predviđaju unapređenja postojećih proizvodnih kapaciteta za proizvodnju električne energije, povećano učešće OIE (prvenstveno PV panela), kao i povećana stopa unapređenja energetske efikasnosti (Scenario je detaljno opisan u poglavlju 5.4.1 disertacije). Iako je cilj Strategije napuštanje korišćenja fosilnih goriva, uz smanjenje emisije, rezultati pokazuju da ovaj Scenario rezultira ukupnom godišnjom upotrebom fosilnih goriva od 72%, odnosno 0,0163 GWh/ stanovnik. Godišnje emisije u ovom scenariju iznose 560 kt CO<sub>2</sub> (odnosno 4,4 t/stanovniku).

Shodno tome, u Scenariju 2a predviđena su dodatna unapređenja budućeg energetske sistema koja se odnose na dodatno povećanje energetske efikasnosti zgrada (u skladu sa važećim Pravilnikom o energetske efikasnosti zgrada), povećanu upotrebu PV panela i solarnih kolektora, unapređenje sistema daljinskog grejanja i izgradnju spalionice otpada (poglavlje 5.4.2). Ovakvo unapređenje sistema doprinosi dodatnom smanjenju emisije CO<sub>2</sub>, koja na godišnjem nivou iznosi 429,4 kt (3,37 t/stanovnik), dok je upotreba fosilnih goriva smanjena na 62% ukupnog energetske miksa.

Za razliku od Scenarija 2a, Scenario 2b podrazumeva proširivanje kapaciteta daljinskog grejanja za proces zagrevanje sanitarne tople vode. Ovakav sistem rezultira ukupnim godišnjim emisijama CO<sub>2</sub> od 386,6 kt (3,03 t/stanovniku), kao i upotrebom fosilnih goriva od 0,01 GWh/stanovnik.

Ukoliko se porede troškovi realizacije pomenutih scenarija, uviđa se da je Scenario 1 najskuplji u pogledu smanjenja emisije CO<sub>2</sub>, dok dodatna unapređenja energetske scenarija smanjuju trošak po jedinici smanjenje emisije CO<sub>2</sub>. Takođe, Scenariji 2a i 2b su povoljniji u smislu mogućnosti za formiranje novih radnih mesta, ali su ukupni troškovi održavanja kao i investicioni troškovi u ovim scenarijima viši u poređenju sa Scenarijem 1.

Na osnovu ispitivanja mišljenja zainteresovanih strana, Scenario 2b je definisan kao najpoželjniji i rezultati ove studije su publikovani u [185].

Redosled sprovođenja mera definisanih Scenarijem 2b određen je participativnim učešćem svih zainteresovanih strana, kroz definisanje značaja kriterijuma i upotrebu višekriterijumske analize. Ispitivanje je obuhvatalo analizu mišljenja 132 ispitanika, koji su bili predstavnici lokalne samouprave, akademske zajednice, nevladinih organizacija i građana. Rezultati su pokazali da se značaj kriterijuma neznatno razlikuje od grupe ispitanika, ali da su, ukoliko se u obzir uzmu svi učesnici, očekivani radni vek i efikasnost tehnologije ocenjeni kao najznačajniji kriterijumi, praćeni troškovima održavanja i investicionim troškovima, dok je kreiranje novih radnih mesta označeno kao najmanje važan kriterijum (zabeleženo u okviru svih grupa ispitanika).

Ovakav pristup je omogućio objektivno sagledavanje mišljenja stanovnika grada o značaju posledica sprovođenja energetske tranzicije i ovi podaci su usvojeni kao polazni osnov za određivanje prioriteta predloženih mera. Rezultati pokazuju da integrisanje otpadne toplote treba da bude kotirano visoko na lestvici prioriteta, kao i instaliranje toplotnog skladištenja u okviru sistema daljinskog grejanja i ugradnja PV panela, praćeno izgradnjom spalionice otpada. Zatim se predlaže ugradnja toplotnih pumpi i solarnih kolektora.

Međutim, napominje se da je proces energetske tranzicije dugoročan i da nije linearan, te se mogu očekivati odstupanja od predloženog redosleda mera. S tim u vezi, prioritet izgradnje predloženih mera treba da bude posmatran kao predlog i kao polazna osnova prilikom realizacije novih energetske sistema. Promene u redosledu mogu biti diktirane i dostupnostima finansijske podrške i, kao što je prikazano u SWOT analizi, svaku priliku treba okrenuti ka ostvarivanju cilja. Takođe, primena višekriterijumske analize može da ima višestruku ulogu pri uključivanju građana, jer se određivanjem prioriteta mogu definisati najpogodniji scenariji i omogućiti *Teorija svesnog izbora*.

Takođe se napominje da, iako je Scenario 2b, predstavljen u ovoj doktorskoj disertaciji, napredniji od ambicioznog scenarija predstavljenog u Strategiji i INECPu, jasno je da se i dalje oslanja na korišćenje fosilnih goriva, naročito u sektorima industrije, saobraćaja i proizvodnje električne energije. Tokom analiza sprovedenih u ovom istraživanju, korišćenje tehnologija za sekvencijalnu skladištenje ugljen-dioksida (CCS), kao i implementacija tehnologija za proizvodnju elektro-goriva nove generacije, nije uzeto u obzir, budući da se ove tehnologije samo površno pominju u relevantnim strateškim dokumentima. Na osnovu toga se može zaključiti da one nisu deo utvrđenih energetske i političke ciljeva zemlje. Međutim, ako se uzmu u obzir troškovi emisije ugljen-dioksida, za koje se predviđa da će dostići 500 EUR/t CO<sub>2</sub> do 2044. godine [227]<sup>18</sup>, može se očekivati dodatni trošak od 194,5 miliona EUR na godišnjem nivou u okviru Scenarija 2b. Poređenja radi, očekivani godišnji troškovi ugljeničnih taksi u Scenariju 1 iznose 285 miliona EUR u 2045. godini. Dakle, iako Scenario 2b podrazumeva veća investiciona ulaganja, on dugoročno rezultira smanjenjem godišnjih troškova povezanih sa emisijama. U skladu s tim, ovo istraživanje predlaže uspostavljanje nacionalnog fonda, po uzoru na koncept kompenzacije emisija ugljen-dioksida, koji bi podržavao razvoj projekata dekarbonizacije u energetski intenzivnim sektorima, posebno na lokacijama gde je njihova primena najopravdanija. Pored toga, ovaj fond bi mogao doprineti razvoju nauke i tehnološkog napretka u oblastima energetike, obnovljivih izvora energije, hvatanja i skladištenja ugljen-dioksida, kao i sinteze elektro-goriva.

---

<sup>18</sup> Očekuje se stabilna cena ugljeničnih taksi u periodu 2025-2030 od 70 EUR/tCO<sub>2</sub> ali i njihov značajni skok nakon ovog perioda .

S tim u vezi, buduća istraživanja treba da obuhvate mogućnosti iskorišćenja potencijala naprednih tehnologija i njihovu ulogu u postizanju potpune klimatske neutralizacije u gradovima, kao i analizu ekonomskih tokova za optimalno iskorišćenje pomenutog fonda. Značaj sprovedenog istraživanja se takođe ogleda da se potvrdi hipoteza u definisanju replikabilne metodologije koja je primenljiva na različite urbane sredine, čime se omogućava povezivanje nacionalnih ciljeva sa lokalnim specifičnostima. Rezultati istraživanja pružaju osnovu za kreiranje lokalnih energetske politika i strategija, uz naglasak na participativni pristup koji povećava prihvatljivost predloženih mera. Sprovedeno istraživanje potvrđuje da je proces klimatske neutralizacija gradova ostvariv kroz kombinaciju tehničkih, ekonomskih i društvenih mera, uz aktivno učešće lokalne zajednice. Predloženi pristup predstavlja značajan korak ka održivom razvoju i može poslužiti kao model za druge urbane sredine koje teže smanjenju emisija i povećanju energetske efikasnosti.

## SPISAK KORIŠĆENE LITERATURE

- [1] International Energy Agency, *Shaping a secure and sustainable energy future for all*. Dostupno na: <https://www.iea.org/>
- [2] Our World in Data, *Number of people living in urban and rural areas, World*. Dostupno na: <https://ourworldindata.org/grapher/urban-and-rural-population>
- [3] International Energy Agency, *Empowering Urban Energy Transitions*. Dostupno na: <https://www.iea.org/reports/empowering-urban-energy-transitions>
- [4] K. Hansen, C. Breyer, and H. Lund, "Status and perspectives on 100% renewable energy systems," *Energy*, vol. 175, pp. 471–480, May 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.03.092.
- [5] C. Wang, J. Zhan, and Z. Xin, "Comparative analysis of urban ecological management models incorporating low-carbon transformation," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 159, p. 120190, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.techfore.2020.120190.
- [6] R. Nakano, T. Miwa, and T. Morikawa, "Comparative Analysis on Citizen's Subjective Responses Related to Their Willingness to Pay for Renewable Energy in Japan Using Latent Variables," *Sustainability*, vol. 10, no. 7, p. 2423, July 2018, doi: 10.3390/su10072423.
- [7] J. H. Williams *et al.*, "Carbon-Neutral Pathways for the United States," *AGU Adv.*, vol. 2, no. 1, Mar. 2021, doi: 10.1029/2020AV000284.
- [8] O. Bamisile *et al.*, "A 2030 and 2050 feasible/sustainable decarbonization perusal for China's Sichuan Province: A deep carbon neutrality analysis and EnergyPLAN," *Energy Convers. Manag.*, vol. 261, p. 115605, June 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115605.
- [9] B. Lu, A. Blakers, M. Stocks, C. Cheng, and A. Nadolny, "A zero-carbon, reliable and affordable energy future in Australia," *Energy*, vol. 220, p. 119678, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.119678.
- [10] A. F. M. K. Chowdhury *et al.*, "Enabling a low-carbon electricity system for Southern Africa," *Joule*, vol. 6, no. 8, pp. 1826–1844, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.joule.2022.06.030.
- [11] R. Alizadeh, L. Soltanisehat, P. D. Lund, and H. Zamanisabzi, "Improving renewable energy policy planning and decision-making through a hybrid MCDM method," *Energy Policy*, vol. 137, p. 111174, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.enpol.2019.111174.
- [12] H.-C. Lee and C.-T. Chang, "Comparative analysis of MCDM methods for ranking renewable energy sources in Taiwan," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 92, pp. 883–896, Sept. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.05.007.
- [13] D. Icaza, D. Borge-Diez, and S. P. Galindo, "Proposal of 100% renewable energy production for the City of Cuenca- Ecuador by 2050," *Renew. Energy*, vol. 170, pp. 1324–1341, June 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.02.067.
- [14] S. Potrč, L. Čuček, M. Martin, and Z. Kravanja, "Sustainable renewable energy supply networks optimization – The gradual transition to a renewable energy system within the European Union by 2050," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 146, p. 111186, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111186.
- [15] D. Connolly, H. Lund, and B. V. Mathiesen, "Smart Energy Europe: The technical and economic impact of one potential 100% renewable energy scenario for the

- European Union," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 1634–1653, July 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.02.025.
- [16] D. F. Dominković *et al.*, "Zero carbon energy system of South East Europe in 2050," *Appl. Energy*, vol. 184, pp. 1517–1528, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.03.046.
- [17] M. Chaudry, L. Jayasuriya, and N. Jenkins, "Modelling of integrated local energy systems: Low-carbon energy supply strategies for the Oxford-Cambridge arc region," *Energy Policy*, vol. 157, p. 112474, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112474.
- [18] B. V. Mathiesen *et al.*, "Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions," *Appl. Energy*, vol. 145, pp. 139–154, May 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.075.
- [19] H. Lund *et al.*, "Smart energy Denmark. A consistent and detailed strategy for a fully decarbonized society," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 168, p. 112777, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112777.
- [20] B. Ćosić, G. Krajačić, and N. Duić, "A 100% renewable energy system in the year 2050: The case of Macedonia," *Energy*, vol. 48, no. 1, pp. 80–87, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.06.078.
- [21] I. Batas-Bjelić, "Spregnuta metoda za optimalno planiranje održivih energetske sistema na bazi simulacija," Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2016.
- [22] N. E. Koltsaklis, A. S. Dagoumas, G. Seritan, and R. Porumb, "Energy transition in the South East Europe: The case of the Romanian power system," *Energy Rep.*, vol. 6, pp. 2376–2393, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.egy.2020.07.032.
- [23] M. G. Prina, M. Lionetti, G. Manzolini, W. Sparber, and D. Moser, "Transition pathways optimization methodology through EnergyPLAN software for long-term energy planning," *Appl. Energy*, vol. 235, pp. 356–368, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.10.099.
- [24] M. G. Prina, G. Manzolini, D. Moser, R. Vaccaro, and W. Sparber, "Multi-Objective Optimization Model EPLANopt for Energy Transition Analysis and Comparison with Climate-Change Scenarios," *Energies*, vol. 13, no. 12, p. 3255, June 2020, doi: 10.3390/en13123255.
- [25] G. Parrado-Hernando, P. Antun, F. Fernando, M. G. Luis Javier, and D. Neven, "A novel approach to represent the energy system in integrated assessment models," *Energy*, vol. 258, p. 124743, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.124743.
- [26] S. Battulga and S. Dhakal, "Stakeholders' perceptions of sustainable energy transition of Ulaanbaatar city, Mongolia," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 189, p. 114020, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.114020.
- [27] L. Gomez Echeverri, "Investing for rapid decarbonization in cities," *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, vol. 30, pp. 42–51, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.cosust.2018.02.010.
- [28] S. Griffiths and B. K. Sovacool, "Rethinking the future low-carbon city: Carbon neutrality, green design, and sustainability tensions in the making of Masdar City," *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 62, p. 101368, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.erss.2019.101368.

- [29] M. C. Coelho, J. Mesquita, E. Macedo, and J. Macedo, "Decarbonising mobility in port cities," *Transp. Res. Procedia*, vol. 78, pp. 304–310, 2024, doi: 10.1016/j.trpro.2024.02.039.
- [30] S. Misanovic, P. Zivanovic, K. Stojanovic, and S. Sofijanic, "Pathway of reducing CO<sub>2</sub> emission and harmful exhaust gases in transport by using electric buses-the example of Belgrade," *Therm. Sci.*, no. 00, pp. 246–246, 2024, doi: 10.2298/TSCI240713246M.
- [31] D. Lauka, K. Haine, J. Gusca, and D. Blumberga, "Solar energy integration in future urban plans of the South and Nordic cities," *Energy Procedia*, vol. 152, pp. 1127–1132, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.09.137.
- [32] M. M. Akrofi and M. Okitasari, "Integrating solar energy considerations into urban planning for low carbon cities: A systematic review of the state-of-the-art," *Urban Gov.*, vol. 2, no. 1, pp. 157–172, June 2022, doi: 10.1016/j.ugj.2022.04.002.
- [33] B. Nastasi, "Solar Energy Technologies in Sustainable Energy Action Plans of Italian Big Cities".
- [34] J. Kalina, "Planning energy transition and decarbonisation of district heating systems in Poland," 2025.
- [35] T. Novosel, T. Pukšec, G. Krajačić, and N. Duić, "Role of District Heating in Systems with a High Share of Renewables: Case Study for the City of Osijek," *Energy Procedia*, vol. 95, pp. 337–343, Sept. 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.09.019.
- [36] I. Bačeković and P. A. Østergaard, "A smart energy system approach vs a non-integrated renewable energy system approach to designing a future energy system in Zagreb," *Energy*, vol. 155, pp. 824–837, July 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.05.075.
- [37] P. A. Østergaard and H. Lund, "A renewable energy system in Frederikshavn using low-temperature geothermal energy for district heating," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 2, pp. 479–487, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.03.018.
- [38] S. Cajot, M. Peter, J.-M. Bahu, F. Guignet, A. Koch, and F. Maréchal, "Obstacles in energy planning at the urban scale," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 30, pp. 223–236, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.scs.2017.02.003.
- [39] M. Kleinebrahm, J. M. Weinand, E. Naber, R. McKenna, and A. Ardone, "Analysing municipal energy system transformations in line with national greenhouse gas reduction strategies," *Appl. Energy*, vol. 332, p. 120515, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120515.
- [40] L. Krog, "How municipalities act under the new paradigm for energy planning," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 47, p. 101511, May 2019, doi: 10.1016/j.scs.2019.101511.
- [41] P. Alberg Østergaard, B. V. Mathiesen, B. Möller, and H. Lund, "A renewable energy scenario for Aalborg Municipality based on low-temperature geothermal heat, wind power and biomass," *Energy*, vol. 35, no. 12, pp. 4892–4901, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.energy.2010.08.041.
- [42] J. Z. Thellufsen *et al.*, "Smart energy cities in a 100% renewable energy context," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 129, p. 109922, Sept. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109922.
- [43] D. Drysdale, B. Vad Mathiesen, and H. Lund, "From Carbon Calculators to Energy System Analysis in Cities," *Energies*, vol. 12, no. 12, p. 2307, June 2019, doi: 10.3390/en12122307.

- [44] S. Ben Amer, J. S. Gregg, K. Sperling, and D. Drysdale, "Too complicated and impractical? An exploratory study on the role of energy system models in municipal decision-making processes in Denmark," *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 70, p. 101673, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.erss.2020.101673.
- [45] D. Maya-Drysdale, L. Krog Jensen, and B. Vad Mathiesen, "Energy Vision Strategies for the EU Green New Deal: A Case Study of European Cities," *Energies*, vol. 13, no. 9, p. 2194, May 2020, doi: 10.3390/en13092194.
- [46] K. Gupta, K. Karlsson, and E. O. Ahlgren, "City energy planning: Modeling long-term strategies under system uncertainties," *Energy Strategy Rev.*, vol. 56, p. 101564, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.esr.2024.101564.
- [47] A. Menapace *et al.*, "The design of 100 % renewable smart urban energy systems: The case of Bozen-Bolzano," *Energy*, vol. 207, p. 118198, Sept. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118198.
- [48] R. M. Johannsen, M. G. Prina, P. A. Østergaard, B. V. Mathiesen, and W. Sparber, "Municipal energy system modelling – A practical comparison of optimisation and simulation approaches," *Energy*, vol. 269, p. 126803, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.126803.
- [49] R. M. Johannsen *et al.*, "Developing energy system scenarios for municipalities - Introducing MUSEPLAN," *Smart Energy*, vol. 14, p. 100141, May 2024, doi: 10.1016/j.segy.2024.100141.
- [50] K. R. Ullah, V. Prodanovic, G. Pignatta, A. Deletic, and M. Santamouris, "Technological advancements towards the net-zero energy communities: A review on 23 case studies around the globe," *Sol. Energy*, vol. 224, pp. 1107–1126, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.06.056.
- [51] N. Sönnichsen, "Primary energy consumption worldwide from 2000 to 2021," Statista. Dostupno na: <https://www.statista.com/statistics/265598/consumption-of-primary-energy-worldwide/>
- [52] Our World in Data, *Primary energy consumption*. Dostupno na: [https://ourworldindata.org/grapher/primary-energy-cons?tab=chart&country=SRB~Africa~HRV~OWID\\_WRL](https://ourworldindata.org/grapher/primary-energy-cons?tab=chart&country=SRB~Africa~HRV~OWID_WRL)
- [53] Our World in Data, *Per capita primary energy consumption by source, 2021*. Dostupno na: [https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-energy-stacked?time=latest&country=~OWID\\_WRL](https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-energy-stacked?time=latest&country=~OWID_WRL)
- [54] H. Ritchie and P. Rosado, "Energy Mix," *Our World Data*, 2020, Dostupno na: <https://ourworldindata.org/energy-mix>
- [55] Our World in Data, *Energy Institute - Statistical Review of World Energy – with major processing by Our World in Data*. Dostupno na: <https://ourworldindata.org/grapher/primary-energy-consumption-by-region?tab=table&time=2021..latest&focus=~Asia+Pacific+%28EI%29>.
- [56] European Environment Agency, *Primary and final energy consumption in Europe*. Dostupno na: <https://www.eea.europa.eu/ims/primary-and-final-energy-consumption>
- [57] "Energetski bilans Republike Srbije za 2022. godinu." Dostupno na: [https://www.mre.gov.rs/extfile/sr/1144/energetski\\_bilans\\_rs\\_za\\_2022\\_0.pdf](https://www.mre.gov.rs/extfile/sr/1144/energetski_bilans_rs_za_2022_0.pdf)
- [58] Republički zavod za statistiku Srbije, *Statistički kalendar Republike Srbije 2025*, Beograd, 2025.

- Dostupno na: <https://publikacije.stat.gov.rs/G2025/Pdf/G202517018.pdf>
- [59] International Energy Agency, *World energy mix*. Dostupno na: <https://www.iea.org/world/energy-mix>
- [60] European Commission, *EU energy in figures, Statistical pocketbook 2024*. Dostupno na: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/993e1f3f-89d1-11ef-a67d-01aa75ed71a1>
- [61] *Statistički kalendar Republike Srbije, 2025*. Beograd: Republički zavod za statistiku, 2025. Dostupno na: <https://publikacije.stat.gov.rs/G2025/Pdf/G20255718.pdf>
- [62] G. Resch, A. Held, T. Faber, C. Panzer, F. Toro, and R. Haas, "Potentials and prospects for renewable energies at global scale," *Energy Policy*, vol. 36, no. 11, pp. 4048–4056, Nov. 2008, doi: 10.1016/j.enpol.2008.06.029.
- [63] G. Resch, A. Held, F. A. Toro, and M. Ragwitz, "Assessment of the potentials for renewable energy sources," in *The Hydrogen Economy*, 1st ed., M. Ball and M. Wietschel, Eds., Cambridge University Press, 2009, pp. 135–167. doi: 10.1017/CBO9780511635359.006.
- [64] P. Moriarty and D. Honnery, "What is the global potential for renewable energy?," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 244–252, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.151.
- [65] "Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine." "Službeni glasnik RS", broj 101, Dec. 08, 2015.
- [66] Ž. Đurišić and B. Škrbić, "Potencijal energije sunca i vetra za strateško planiranje dekarbonizacije proizvodnje električne energije u Srbiji," *Energ. Ekon. Ekol.*, vol. XXIV, no. 4, pp. 1–11, Dec. 2022, doi: 10.46793/EEE22-4.01D.
- [67] L. Brkić, T. Živanović, and D. Tuca, *Termoelektrane*. Beograd: Mašinski fakultet u Beogradu, 2015.
- [68] D. Feretić, *Uvod u nuklearnu energetiku*. 2010.
- [69] P. Lako and M. Koyama, *Hydropower, Technology Brief*. IEA-ETSAP and IRENA, 2015. Dostupno na: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA-ETSAP\\_Tech\\_Brief\\_E06\\_Hydropower.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA-ETSAP_Tech_Brief_E06_Hydropower.pdf)
- [70] IRENA, *Geothermal Power: Technology Brief*. International Renewable Energy Agency, 2017. Dostupno na: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Aug/IRENA\\_Geothermal\\_Power\\_2017.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Aug/IRENA_Geothermal_Power_2017.pdf)
- [71] IEA-ETSAP and IRENA, *Concentrating Solar Power Technology Brief*, Jan. 2013. Dostupno na: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2013/IRENA-ETSAP-Tech-Brief-E10-Concentrating-Solar-Power.pdf?rev=be5667ad3dd844348f0aa144e557a85a>
- [72] IRENA, *Renewable energy benefits: Leveraging local capacity for concentrated solar power*. Abu Dabi: International Renewable Agency, 2025.
- [73] IRENA, *Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation: paper)*. Abu Dabi: International Renewable Energy Agency, 2019. Dostupno na: <https://www.irena.org/>

- [/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA\\_Future\\_of\\_Solar\\_PV\\_2019.pdf](#)
- [74] IRENA, *Wind energy*, Dostupno na: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy>
- [75] IRENA, *Future of wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation paper)*. Abu Dabi: International Renewable Energy Agency, 2019.
- [76] EPO and IRENA, *Patent insight report: Offshore wind energy*. Vienna: European Patent Office, 2023.
- [77] IRENA and GWEC, *Enabling frameworks for offshore wind scaleup: Innovations in permitting*, International Renewable Energy Agency, Abu Dabi, 2023.
- [78] R. Kempener and F. Neumann, *Tidal Energy, Technology brief*. Abu Dabi: International Renewable Energy Agency, 2014. Dostupno na: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2014/Tidal\\_Energy\\_V4\\_WEB.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2014/Tidal_Energy_V4_WEB.pdf)
- [79] K. Ruud and F. Neumann, *Wave energy, Technology Brief*. Abu Dabi: International Renewable Energy Agency, 2014. Dostupno na: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2014/Wave-Energy\\_V4\\_web.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2014/Wave-Energy_V4_web.pdf)
- [80] S. Frederiksen and S. Werner, *District Heating and Cooling*, First. Lund, Sweden: Studentlitteratur AB, 2013.
- [81] H. Lund *et al.*, "4th Generation District Heating (4GDH)," *Energy*, vol. 68, pp. 1–11, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.02.089.
- [82] Davor Končalović, "Metodologija za određivanje kogeneracionog potencijala toplana," University of Kragujevac, Kragujevac, 2014.
- [83] H. Lund *et al.*, "Smart energy Denmark. A consistent and detailed strategy for a fully decarbonized society," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 168, p. 112777, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112777.
- [84] V. Vukašinović, *Tehnologije korišćenja biomase*. Kragujevac: Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, 2022.
- [85] H. Lund *et al.*, "The role of sustainable bioenergy in a fully decarbonised society," *Renew. Energy*, vol. 196, pp. 195–203, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.06.026.
- [86] IEA-ETSAP and IRENA, *Biomass for Heat and Power, Technology Brief*, 2015. Dostupno na: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA-ETSAP\\_Tech\\_Brief\\_E05\\_Biomass-for-Heat-and-Power.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA-ETSAP_Tech_Brief_E05_Biomass-for-Heat-and-Power.pdf)
- [87] G. Müller, F. Kullmann, J. Linssen, and D. Stolten, "The costs of future energy technologies: A comprehensive review of power-to-X processes," *J. CO2 Util.*, vol. 92, p. 103019, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.jcou.2025.103019.
- [88] IRENA, *Electricity Storage Valuation Framework: Assessing system value and ensuring project viability*. Abu Dabi: International Renewable Energy Agency, 2020. Dostupno na: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA\\_storage\\_valuation\\_2020.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_storage_valuation_2020.pdf)

- [89] IRENA, *Electricity Storage Technology Brief*. Abu Dabi: IEA-ETSAP and International Renewable Energy Agency, 2012. Dostupno na: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2012/IRENA-ETSAP-Tech-Brief-E18-Electricity-Storage.pdf>
- [90] H. Lund, P. A. Østergaard, M. Yuan, P. Sorknæs, and J. Z. Thellufsen, "Energy balancing and storage in climate-neutral smart energy systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 209, p. 115141, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.rser.2024.115141.
- [91] IRENA, *Electric Vehicles, Technology Brief*, International Renewable Energy Agency, Abu Dabi, 978-92-95111-00-4, 2017. Dostupno na: [https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2017/02/IRENA Electric Vehicles 2017.pdf](https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2017/02/IRENA_Electric_Vehicles_2017.pdf)
- [92] Md. N. I. Maruf, G. Morales-España, J. Sijm, N. Helistö, and J. Kiviluoma, "Classification, potential role, and modeling of power-to-heat and thermal energy storage in energy systems: A review," *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 53, p. 102553, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102553.
- [93] IRENA, *Global trade in green hydrogen derivatives: Trends in regulation, standardisation and certification*. Abu Dabi: International Renewable Energy Agency, 2024.
- [94] V. Sihvonen *et al.*, "Role of power-to-heat and thermal energy storage in decarbonization of district heating," *Energy*, vol. 305, p. 132372, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.132372.
- [95] IRENA, *Innovation outlook: Thermal Energy Storage*, International Renewable Energy Agency, Abu Dabi, 978-92-9260-279-6, 2020. Dostupno na: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA Innovation Outlook TES 2020.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Innovation_Outlook_TES_2020.pdf)
- [96] Lyons, M., P., Durrant, and Kochhar, *Reaching Zero with Renewables: Capturing Carbon*. Abu Dabi: International Renewable Agency.
- [97] H. Lund *et al.*, *IDAs Klimasvar 2045: Sådan bliver vi klimaneutrale*. Aalborg: The Danish Society of Engineers (IDA), 2021. Dostupno na: <https://vbn.aau.dk/da/publications/idas-klimasvar-2045-s%C3%A5dan-bliver-vi-klimaneutrale>
- [98] Brian Vad Mathiesen *et al.*, "CEESA 100% Renewable Energy Transport Scenarios towards 2050," Department of Development and Planning Aalborg University, Aalborg, 978-87-91404-35-1, 2014. Dostupno na: [https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/220812561/CEESA WP2 Final Report.pdf](https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/220812561/CEESA_WP2_Final_Report.pdf)
- [99] IRENA, *Solutions to integrate high shares of variable renewable energy (Report to the G20 Energy Transitions Working Group (ETWG))*, International Renewable Energy Agency, Abu Dabi 2019. Dostupno na: [https://www.irena.org/-/media/files/irena/agency/publication/2019/jun/irena\\_g20\\_grid\\_integration\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/files/irena/agency/publication/2019/jun/irena_g20_grid_integration_2019.pdf)
- [100] USAID, *Overview of Energy-Efficient Technologies*, Dostupno na: <https://www.usaid.gov/energy/efficiency/basics/technologies>
- [101] D. Končalović, **J. Nikolic**, V. Vukasinovic, D. Gordić, and D. Živković, "Possibilities for Deep Renovation in Multi-Apartment Buildings in Different Economic

- Conditions in Europe,” *Energies*, vol. 15, no. 8, p. 2788, Apr. 2022, doi: 10.3390/en15082788.
- [102] M. I. Khan and S. G. Al-Ghamdi, “Hydrogen economy for sustainable development in GCC countries: A SWOT analysis considering current situation, challenges, and prospects,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 48, no. 28, pp. 10315–10344, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.033.
- [103] Energy Star, *Energy Efficiency*, Dostupno na: [https://www.energystar.gov/about/how\\_energy\\_star\\_protects\\_environment/energy\\_efficiency](https://www.energystar.gov/about/how_energy_star_protects_environment/energy_efficiency)
- [104] D. D’Agostino, B. Cuniberti, and P. Bertoldi, “Energy consumption and efficiency technology measures in European non-residential buildings,” *Energy Build.*, vol. 153, pp. 72–86, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.07.062.
- [105] Fakultet tehničkih nauka Kosovska Mitrovica, *Program energetske efikasnosti grada Kragujevca za period 2023-2025. sa planom energetske efikasnosti za 2023. god*, 2022.  
Dostupno na: [http://www.eupropisi.com/dokumenti/KG\\_039A\\_2022\\_001.pdf](http://www.eupropisi.com/dokumenti/KG_039A_2022_001.pdf)
- [106] Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, *Program energetske efikasnosti grada Kragujevca za period 2018-2020 godine*, Kragujevac 2018.  
Dostupno na: [https://www.eupropisi.com/dokumenti/efikasnostKG11\\_18.pdf](https://www.eupropisi.com/dokumenti/efikasnostKG11_18.pdf)
- [107] M. Josijevic, V. Sustersic, and D. Gordic, “Ranking energy performance opportunities obtained with energy audit in dairies,” *Therm. Sci.*, vol. 24, no. 5 Part A, pp. 2865–2878, 2020, doi: 10.2298/TSCI191125100J.
- [108] LIR Evolucija, *Primjeri mjera poboljšanja energetske efikasnosti u drvnjoj i metaloprerađivačkoj industriji*, Dostupno na: <https://www.vladars.net/sr-SP-Cyrl/Vlada/Ministarstva/mper/eef/brosure/Documents/PrimjeriMjeraPobolj%C5%A1anjaEEuDrvnjojMetaloprera%C4%91iva%C4%8DkojIndustriji.pdf>
- [109] Passive House Institute, *The independent institute for outstanding energy efficiency in buildings*. Dostupno na: <https://passivehouse.com/>
- [110] European Commission, *Nearly zero-energy buildings*. Dostupno na: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings_en)
- [111] H. Lund *et al.*, “Perspectives on fourth and fifth generation district heating,” *Energy*, vol. 227, p. 120520, July 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120520.
- [112] European Commission, *European Green Deal*. Dostupno na: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en)
- [113] European Commission, *Clean energy for all Europeans*. Dostupno na: [https://energy.ec.europa.eu/index\\_en](https://energy.ec.europa.eu/index_en)
- [114] “Renewable Energy Directive (Directive 2018/2001/EU).” European Commission, Dec. 2018. Dostupno na: [https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en)
- [115] “Energy efficiency directive (2012/27/EU).” European Commission, 2012.
- [116] “REGULATION (EU) 2019/631 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 17 April 2019 setting CO2 emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles, and repealing Regulations

- (EC) No 443/2009 and (EU) No 510/2011.” Official Journal of the European Union, Apr. 17, 2019. Dostupno na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02019R0631-20210301>
- [117] “Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC.” Official Journal of the European Union, Oct. 13, 2003.
- [118] “Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a carbon border adjustment mechanism.” European Commission, July 14, 2021. Dostupno na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0564>
- [119] European Commission, *The Green Deal Industrial Plan*. Dostupno na: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/green-deal-industrial-plan\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/green-deal-industrial-plan_en)
- [120] “REGULATION (EU) 2021/1119 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 (‘European Climate Law’).” Official Journal of the European Union, June 30, 2021. Dostupno na: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj>
- [121] International Energy Agency, *Cities are in the frontline for cutting carbon emissions, new IEA report finds*. Dostupno na: <https://www.iea.org/news/cities-are-in-the-frontline-for-cutting-carbon-emissions-new-iea-report-finds>
- [122] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, and Population Division, *World urbanization prospects: the 2018 revision*. 2019.
- [123] M. J. Nieuwenhuijsen, “Urban and transport planning pathways to carbon neutral, liveable and healthy cities; A review of the current evidence,” *Environ. Int.*, vol. 140, p. 105661, July 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.105661.
- [124] Integrated SET-Plan, “SET-Plan ACTION n°3.2 Implementation Plan-Europe to become a global role model in integrated, innovative solutions for the planning, deployment, and replication of Positive Energy Districts,” June 2018. Dostupno na: <https://jpi-urbaneurope.eu/wp-content/uploads/2021/10/setplan-smartcities-implementationplan-2.pdf>
- [125] D. B. Eggertsson, “The Reykjavik Green Deal: on the carbon neutral city and public health,” *Lancet Planet. Health*, vol. 5, no. 2, p. e71, Feb. 2021, doi: 10.1016/S2542-5196(21)00009-7.
- [126] United Nations Climate Change, *Carbon Neutral Cities Alliance*. Dostupno na: <https://unfccc.int/news/carbon-neutral-cities-alliance>
- [127] European Commission, *EU Mission: Climate-Neutral and Smart Cities*. Dostupno na: [https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe/eu-missions-horizon-europe/climate-neutral-and-smart-cities\\_en](https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe/eu-missions-horizon-europe/climate-neutral-and-smart-cities_en)
- [128] European Commission, *Towards Climate-Neutral and Socially Innovative Cities*. Dostupno na: <https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020-LC-GD-1-2-2020/en>
- [129] European Commission, *Accelerating cities’ transition to net zero emissions by 2030*. Dostupno na: <https://cordis.europa.eu/project/id/101036519>

- [130] IRENA, "Rise of renewables in cities: Energy solutions for the urban future," International Renewable Energy Agency, Abu Dabi, 2020. Dostupno na: <https://www.irena.org/publications/2020/Oct/Rise-of-renewables-in-cities>
- [131] International Standard, *Sustainable development in communities — Management system for sustainable development — Requirements with guidance for use*. Feb. 15, 2016.
- [132] International Standard, *Sustainable development of communities Indicators for city services and quality of life*.
- [133] International Standard, *Sustainable cities and communities — Indicators for smart cities*.
- [134] UNDP Serbia, *Nacionalno utvrđeni doprinos (NDC) Republike Srbije za period 2021 – 2030. godine*. Dostupno na: [https://www.klimatskeprome.rs/wp-content/uploads/2022/09/NDC\\_Serbia\\_serbian.pdf](https://www.klimatskeprome.rs/wp-content/uploads/2022/09/NDC_Serbia_serbian.pdf)
- [135] Regional Cooperation Council, *Deklaracija iz Sofije o Zelenoj agendi za zapadni Balkan*. Dostupno na: [https://www.mei.gov.rs/upload/documents/eu\\_dokumenta/2020/deklaracija-iz-sofije-o-zelenoj-agendi-za-zapadni-balkan-srp.pdf](https://www.mei.gov.rs/upload/documents/eu_dokumenta/2020/deklaracija-iz-sofije-o-zelenoj-agendi-za-zapadni-balkan-srp.pdf)
- [136] "Zakon o energetici", Sl. glasnik RS br. 145/2014, 95/2018 - dr. zakon, 40/2021, 35/2023 - dr. zakon, 62/2023 i 94/2024." Službeni glasnik RS br. 145/2014, 95/2018 - dr. zakon, 40/2021, 35/2023 - dr. zakon i 62/2023. Dostupno na: <https://www.mre.gov.rs/extfile/sector/sr/170/2/Zakon%20o%20energetici.pdf>
- [137] "Zakon o energetskej efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije, Sl. glasnik RS 35/2023." Službeni glasnik RS 35/2023. Dostupno na: [https://www.mre.gov.rs/extfile/sector/sr/103/9/zakon\\_o\\_energetskej\\_efikasnosti\\_i\\_racionalnoj\\_upotrebi\\_energije\\_1.pdf](https://www.mre.gov.rs/extfile/sector/sr/103/9/zakon_o_energetskej_efikasnosti_i_racionalnoj_upotrebi_energije_1.pdf)
- [138] "Zakon o klimatskim promenama." Službeni glasnik RS 26/2021. Dostupno na: <https://www.paragraf.rs/propisi/zakon-o-klimatskim-promenama.html>
- [139] "Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije, 'Sl. glasnik RS', br. 40/2021 i 35/2023." Službeni glasnik RS 35/2023.
- [140] "Integrirani Nacionalni energetske i klimatske plan Republike Srbije za period do 2030. godine, sa projekcijama do 2050 . godine." June 13, 2023. Dostupno na: <https://www.mre.gov.rs/tekst/1115/-integrirani-nacionalni-energetske-i-klimatske-plan-republike-srbije-za-period-do-2030-sa-vizijom-do-2050-godine.php>
- [141] "Javne konsultacije i javne rasprave o nacrtu Strategije razvoja energetike Republike Srbije do 2040. godine sa projekcijama do 2050. godine," Ministarstvo rudarstva i energetike Republike Srbije. Dostupno na: <https://www.mre.gov.rs/tekst/sr/5910/-javne-konsultacije-na-nacrt-strategije-razvoja-energetike-rs-do-2040-sa-projekcijama-do-2050godine-sa-pratecim-izvestajem-o-spu.php>
- [142] IAEA Office of Public Information and Communication, *IAEA Methodologies and Models for Sustainable Energy Planning*. Dostupno na: <https://www.iaea.org/sites/default/files/19/02/iaea-methodologies-and-models-for-sustainable-energy-planning.pdf>
- [143] B. Pavlović, "Modeliranje i simulacija energetske tranzicije u sektoru domaćinstava," Univerzitet u Beogradu, Beograd, 2022.

- [144] H. Lund, *Renewable Energy Systems: a smart energy systems approach to the choice and modeling of 100% renewable solutions*, Second. Elsevier, 2015.
- [145] U.S. Environmental Protection Agency, *Council for Regulatory Environmental Modeling, "Guidance on the Development, Evaluation, and Application of Environmental Models*. Dostupno na: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-04/documents/cred\\_guidance\\_0309.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-04/documents/cred_guidance_0309.pdf)
- [146] D. Connolly, H. Lund, B. V. Mathiesen, and M. Leahy, "A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 4, pp. 1059–1082, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.09.026.
- [147] "Other Tools Links to Energy System Analysis Models." Dostupno na: <https://www.energyplan.eu/othertools/>
- [148] "Baltimore Energy system model." Dostupno na: <https://baltimore.com/>
- [149] EMD international, *EnergyPRO*. Dostupno na: <https://www.emd-international.com/software/energypro>
- [150] International Institute for Applied Systems Analysis, *Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact (MESSAGEix)*. Dostupno na: <https://iiasa.ac.at/models-tools-data/messageix>
- [151] The Center for Energy, Environmental, and Economic Systems Analysis, *Electricity Market Complex Adaptive System (EMCAS)*. Dostupno na: <https://ceesa.es.anl.gov/projects/emcas.html>
- [152] Aalborg University, "EnergyPLAN: Advanced Energy System Analysis Computer Model." Dostupno na: <https://energyplan.eu/>
- [153] Center for Energy, Environmental, and Economic Systems Analysis (CEEESA), *Generation and Transmission Maximization (GTMax) Model*. Dostupno na: <https://ceesa.es.anl.gov/projects/Gtmax.html>
- [154] LEAP, *LEAP: the Low Emissions Analysis Platform*. Dostupno na: <https://leap.sei.org/default.asp?action=introduction>
- [155] Energy Technology Systems Analysis Program, *TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System)*. Dostupno na: <https://iea-etsap.org/index.php/etsap-tools/model-generators/times>
- [156] U.S. Energy Information Administration, *Download the National Energy Modeling System (NEMS)*. Dostupno na: [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/info\\_nems\\_archive.php](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/info_nems_archive.php)
- [157] Technical University of Denmark, *The STREAM modelling tool*. Dostupno na: <https://www.esymodels.man.dtu.dk/stream>
- [158] H2RES, *H2RES-Energy system modelling software*. Dostupno na: <https://h2res.org>
- [159] HOMER Software, *Homer (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources)*. Dostupno na: <https://users.homerenergy.com/>
- [160] TRNSYS, *TRNSYS Transient System Simulation Tool*. Dostupno na: <https://www.trnsys.com/index.html>
- [161] nPro.energy, *nPRO*. Dostupno na: <https://www.npro.energy>

- [162] Government of Canada, *RETSscreen*. Dostupno na: <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>
- [163] J. Nikolic, D. Gordic, N. Jurisevic, V. Vukasinovic, and D. Milovanović, “Energy auditing of indoor swimming facility with multi-criteria decision analysis for ranking the proposed energy savings measures,” *Energy Effic.*, vol. 14, no. 4, p. 36, Apr. 2021, doi: 10.1007/s12053-021-09949-w.
- [164] A. Kumar *et al.*, “A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, pp. 596–609, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.191.
- [165] H. S. Dhiman, D. Deb, V. Muresan, and M.-L. Unguresan, “Multi-Criteria Decision Making Approach for Hybrid Operation of Wind Farms,” *Symmetry*, vol. 11, no. 5, p. 675, May 2019, doi: 10.3390/sym11050675.
- [166] M. Budimirka, “Application of Multicriteria Decision Analysis in Planning and Operation of Small Hydropower Plants,” University of Novi Sad, Novi Sad, 2016.
- [167] W. Ma, Y. Du, X. Liu, and Y. Shen, “Literature review: Multi-criteria decision-making method application for sustainable deep-sea mining transport plans,” *Ecol. Indic.*, vol. 140, p. 109049, July 2022, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109049.
- [168] C. Kahraman and İ. Kaya, “A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 37, no. 9, pp. 6270–6281, Sept. 2010, doi: 10.1016/j.eswa.2010.02.095.
- [169] J. Yuan, C. Li, W. Li, D. Liu, and X. Li, “Linguistic hesitant fuzzy multi-criterion decision-making for renewable energy: A case study in Jilin,” *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 3201–3214, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.038.
- [170] D. Asante *et al.*, “Prioritizing strategies to eliminate barriers to renewable energy adoption and development in Ghana: A CRITIC-fuzzy TOPSIS approach,” *Renew. Energy*, vol. 195, pp. 47–65, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.06.040.
- [171] M. Mrówczyńska *et al.*, “A new fuzzy model of multi-criteria decision support based on Bayesian networks for the urban areas’ decarbonization planning,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 268, p. 116035, Sept. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.116035.
- [172] H. Díaz and C. Guedes Soares, “A novel multi-criteria decision-making model to evaluate floating wind farm locations,” *Renew. Energy*, vol. 185, pp. 431–454, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2021.12.014.
- [173] H. Ao Xuan, V. Vu Trinh, K. Techato, and K. Phoungthong, “Use of hybrid MCDM methods for site location of solar-powered hydrogen production plants in Uzbekistan,” *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 52, p. 101979, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.101979.
- [174] J. Zhong, X. Hu, S. Yuksel, H. Dincer, and G. G. Ubay, “Analyzing the Investments Strategies for Renewable Energies Based on Multi-Criteria Decision Model,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 118818–118840, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3005064.
- [175] M. Shao, Z. Han, J. Sun, C. Xiao, S. Zhang, and Y. Zhao, “A review of multi-criteria decision making applications for renewable energy site selection,” *Renew. Energy*, vol. 157, pp. 377–403, Sept. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.04.137.

- [176] S. D. Pohekar and M. Ramachandran, "Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 8, no. 4, pp. 365–381, Aug. 2004, doi: 10.1016/j.rser.2003.12.007.
- [177] M. Bortoluzzi, C. Correia de Souza, and M. Furlan, "Bibliometric analysis of renewable energy types using key performance indicators and multicriteria decision models," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 143, p. 110958, June 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110958.
- [178] E. Ilbahar, S. Cebi, and C. Kahraman, "A state-of-the-art review on multi-attribute renewable energy decision making," *Energy Strategy Rev.*, vol. 25, pp. 18–33, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.esr.2019.04.014.
- [179] B. A. Shimray, K. M. Singh, and R. K. Mehta, "A survey of Multi-Criteria Decision Making Technique used in Renewable Energy Planning," vol. 25, no. 1, 2017.
- [180] M. Lak Kamari, H. Isvand, and M. Alhuyi Nazari, "Applications of multi-Criteria Decision-Making (MCDM) Methods in Renewable Energy Development: A Review," *Renew. Energy Res. Appl.*, vol. 1, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.22044/rera.2020.8541.1006.
- [181] H.-C. Lee and C.-T. Chang, "Comparative analysis of MCDM methods for ranking renewable energy sources in Taiwan," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 92, pp. 883–896, Sept. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.05.007.
- [182] C. Wimpler, G. Hejazi, E. de O. Fernandes, C. Moreira, and S. Connors, "Multi-Criteria Decision Support Methods for Renewable Energy Systems on Islands," *J. Clean Energy Technol.*, vol. 3, no. 3, pp. 185–195, 2015, doi: 10.7763/JOCET.2015.V3.193.
- [183] S. Nasrollahi, A. Kazemi, M.-H. Jahangir, and S. Aryaee, "Selecting suitable wave energy technology for sustainable development, an MCDM approach," *Renew. Energy*, vol. 202, pp. 756–772, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2022.11.005.
- [184] **J. Nikolic**, J. Z. Thellufsen, P. Sorknæs, P. T. Madsen, and L. S. Nørgaard, "Let's make PED work - How current knowledge can contribute to future positive energy districts," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 132, p. 106817, Sept. 2025, doi: 10.1016/j.scs.2025.106817.
- [185] **J. R. Nikolic**, D. R. Gordic, D. N. Zivkovic, and I. R. Batas-Bjelic, "Cities in energy transition: Local responses to national challenges", *Thermal Science*, 2025, online first <https://doi.org/10.2298/TSCI250526175N>
- [186] R.-R. Schmidt and B. Leitner, "A collection of SWOT factors (strength, weaknesses, opportunities and threats) for hybrid energy networks," *Energy Rep.*, vol. 7, pp. 55–61, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.09.040.
- [187] **J. Nikolić**, D. Gordic, V. Vukašinić, M. Josijević, and D. Živković, "Planiranje energetske budućnosti grada: SWOT analiza – Studija slučaja grada Kragujevca," *Energ. Ekon. Ekol.*, vol. 25, no. 2, pp. 22–28, 2023, doi: 10.46793/EEE23-2.22N.
- [188] D. Gordic, **J. Nikolic**, and V. Vukasinovic, "Influence of global warming on primary energy consumption for heating and cooling in public buildings," *Therm. Sci.*, vol. 23, no. Suppl. 5, pp. 1719–1726, 2019, doi: 10.2298/tsci190527383g.
- [189] "Renewables.ninja." Dostupno na: <https://www.renewables.ninja>
- [190] "Energy Models," Heat Roadmap Europe. Dostupno na: <https://heatroadmap.eu/energy-models/>

- [191] International Energy Agency, *Countries and regions*. Dostupno na: <https://www.iea.org/countries>
- [192] "Energy-Charts." Dostupno na: <https://energy-charts.info/?l=en&c=DE>
- [193] H. Lund, J. Z. Thellufsen, P. A. Østergaard, P. Sorknæs, I. R. Skov, and B. V. Mathiesen, "EnergyPLAN – Advanced analysis of smart energy systems," *Smart Energy*, vol. 1, p. 100007, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.segy.2021.100007.
- [194] P. A. Østergaard, H. Lund, J. Z. Thellufsen, P. Sorknæs, and B. V. Mathiesen, "Review and validation of EnergyPLAN," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 168, p. 112724, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112724.
- [195] J. Priesmann, L. Nolting, and A. Praktiknjo, "Are complex energy system models more accurate? An intra-model comparison of power system optimization models," *Appl. Energy*, vol. 255, p. 113783, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113783.
- [196] H. Lund and J. Z. Thellufsen, "EnergyPLAN, Advanced Energy Systems Analysis Computer Model, Documentation version 16.3," Aalborg University, Jan. 2024. Dostupno na: <http://www.energyplan.eu/>
- [197] Energistyrelsen, *Technology Catalogues*. Dostupno na: <https://ens.dk/en/analyses-and-statistics/technology-catalogues>
- [198] M. Ram, J. C. Osorio-Aravena, A. Aghahosseini, D. Bogdanov, and C. Breyer, "Job creation during a climate compliant global energy transition across the power, heat, transport, and desalination sectors by 2050," *Energy*, vol. 238, p. 121690, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.121690.
- [199] "Pravilnik o energetske efikasnosti zgrada." Službeni glasnik RS br. 61/2011. Dostupno na: [https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik\\_o\\_energetske\\_efikasnosti\\_zgrada.html](https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik_o_energetske_efikasnosti_zgrada.html)
- [200] D. Gordic, **J. Nikolic**, V. Vukasinovic, M. Josijevic, and A. D. Aleksic, "Offsetting carbon emissions from household electricity consumption in Europe," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 175, p. 113154, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113154.
- [201] **J. Nikolic**, D. Gordić, V. Vukašinović, D. Končalović, M. Josijevic, and D. Živković, "Energetska budućnost gradova: Šta je važno sa stanovišta različitih zainteresovanih strana," *Energ. Ekon. Ekol.*, vol. XXVII, no. 3, pp. 1–6, 2025, doi: 10.46793/EEE25-3.01N.
- [202] "Geografski podaci," Kragujevac online. Dostupno na: <https://www.kragujevaconline.rs/o-kragujevcu/kg-info/geografski-podaci>
- [203] meteoblue, *Simulirani istorijski podaci o klimi i vremenu za Kragujevac*. Dostupno na: [https://www.meteoblue.com/sr/vreme/historyclimate/climatemodelled/kragujevac\\_Srbija\\_789128](https://www.meteoblue.com/sr/vreme/historyclimate/climatemodelled/kragujevac_Srbija_789128)
- [204] Republički zavod za statistiku Srbije, *Pregled industrijskih zona po opštinama u Republici Srbiji*. Dostupno na: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNDMONTNmMmQtYWRhZC00ZDAwLWJlOWItOGJjNTA3NDYwZDQ1IiwidCI6ImJhZGVlOWNiLWU4MjMtNDlmMy1iZWYyLWdiOTlkMjU4ZTA0YiIsImMiOiJ9>

- [205] Republički zavod za statistiku Srbije, *Popis 2022-Excel tabele, Srbija Popis 2022*. Dostupno na: <https://popis2022.stat.gov.rs/sr-Latn/popisni-podaci-eksel-tabele/>
- [206] D. Paunovic Radulovic, "Projekcije stanovništva Republike Srbije 2022-2052." Republicki zavod za statistiku, 2024.
- [207] "Energetika d.o.o." Dostupno na: <http://www.energetika-kragujevac.com/tehnickisistem.php>
- [208] B. Pavlović, D. Ivezić, and M. Živković, "Transition pathways of household heating in Serbia: Analysis based on an agent-based model," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 163, p. 112506, July 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112506.
- [209] B. Pavlović, D. Ivezić, and M. Živković, "Challenges of Energy Transition in the Individual Heating Sector," *Energ. Ekon. Ekol.*, vol. XXIV, no. 1, pp. 17–21, 2022, doi: 10.46793/EEE22-1.17P.
- [210] Eurostat, *Electricity price statistics*. Dostupno na: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity\\_price\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics)
- [211] I. Batas Bjelić and D. Molnar, "Puna cena električne energije proizvedene iz lignita u Srbiji," *Energ. Ekon. Ekol.*, vol. XXIII, no. 4, pp. 38–44, 2021, doi: 10.46793/EEE21-4.38B.
- [212] European Commission, *Funding opportunities, European Structural and Investment Funds*. Dostupno na: [https://commission.europa.eu/eu-regional-and-urban-development/topics/cities-and-urban-development/funding-cities\\_en](https://commission.europa.eu/eu-regional-and-urban-development/topics/cities-and-urban-development/funding-cities_en)
- [213] European Bank for reconstruction and Development, *Project finance* Dostupno na: <https://www.ebrd.com/work-with-us/project-finance.html>
- [214] "Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH." Dostupno na: <https://nemackasaradnja.rs/giz/>
- [215] D. Živković, D. Končalović, V. Vukašinić, M. Josijević, and D. Gordić, "Integracija toplotnih pumpi u postojeći energetska sistem u malim i srednjim preduzećima," *Energ. Ekon. Ekol.*, vol. XXIV, no. 3, pp. 32–38, 2022, doi: 10.46793/EEE22-3.32Z.
- [216] Elektroprivreda Srbije, *Proizvodni kapaciteti*. Dostupno na: <https://www.eps.rs/lat/Stranice/Kapaciteti-ElEn.aspx>
- [217] Republički zavod za statistiku Srbije, *Bulletin Energy Balances, 2019*. Beograd, 2021.
- [218] Energetika d.o.o, *Tehnički sistemi*. Dostupno na: <https://www.energetika-kragujevac.com/tehnickisistem.php>
- [219] B. Pavlović, D. Ivezić, and M. Živković, "State and perspective of individual household heating in Serbia: A survey-based study," *Energy Build.*, vol. 247, p. 111128, Sept. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111128.
- [220] Republički zavod za statistiku Srbije, *Broj i površina stambenih jedinica*. Dostupno na: <https://data.stat.gov.rs/Home/Result/3104040101?languageCode=sr-Latn>
- [221] Serbia Energy, *Serbia, Average annual heating consumption is close to 150 kWh per square meter*. Dostupno na: <https://serbia-energy.eu/serbia-average-annual-heating-consumption-is-close-to-150-kwh-per-square-meter/>
- [222] Enerdata, *Odyssey database, The EU database on energy efficiency data and indicators*. Dostupno na: <https://odyssey.enerdata.net>

- [223] "Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije," "Sl. glasnik RS", br. 40/2021 i 35/2023.
- [224] B. Fulop and N. Harmathy, "A review of the energy retrofitting goal and methods of the building stock across the European Union," *Therm. Sci.*, vol. 29, no. 1 Part B, pp. 455–475, 2025, doi: 10.2298/TSCI240528219F.
- [225] I. Shesho, E. Lazova-Kochov, M. Uler-Zefikj, and R. Filkoski, "Sensitivity analysis for integration of renewable energy sources into district heating systems," *Therm. Sci.*, vol. 29, no. 2 Part A, pp. 1033–1042, 2025, doi: 10.2298/TSCI240528236S.
- [226] **J. Nikolic**, K. Sperling, P. Sorkneas, H.-J. Kooij, M. Gerritsen, and M. L. Ørsted Clemmensen, "Energy Communities in Serbia and Europe: A Comparative Analysis of Regulatory Frameworks," *Energ. Ekon. Ekol.*, vol. XXVII, no. 1, pp. 48–54, 2025, doi: 10.46793/EEE25-1.48N.
- [227] Enerdata, *Carbon price forecast under the EU ETS*. Dostupno na: <https://www.enerdata.net/publications/executive-briefing/carbon-price-projections-eu-ets.html>

**PRIOLOG A: ENERGETSKI BILANS – SCENARIO S (2045. GODINA): STRATEGIJA RAZVOJA ENERGETIKE REPUBLIKE SRBIJE DO 2040. GODINE SA PROJEKCIJAMA DO 2050.**

[1000 ten]	Ugalj	Nafta	Derivati nafte	Prirodni gas	Električna energija	Hidro-potencijal	Geotermalna energija	Biomasa*	Biogorivo	Biogas	Energija vetra	Solarna energija	Komunalni čvrsti otpad	Vodonik	Toplotna energija	Ukupno
Proizvodnja	3.094,6	148,0	-	188,2	-	1.087,5	79,3	1.274,4	-	18,3	1.316,0	1.403,1	78,4	-	223,0	8.732,2
Uvoz	170,1	2.334,9	726,8	2.865,1	-	-	-	-	44,4	-	-	-	-	-	-	6.319,8
Izvoz	-	-	-135,0	-	-74,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ukupno raspoloživa energija za potrošnju	3.264,7	2.482,9	591,8	3.053,2	-74,6	1.087,5	79,3	1.274,4	44,4	18,3	1.316,0	1.403,1	78,4	-	223,0	14.842,4
Rafinerije	-	- 2.482,9	2.533,7	-85,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-34,6
SNR postrojenja i industrijske energane	-37,7	-	-17,7	-39,4	10,8	-	-	-12,2	-	-7,1	-	-	-	-	-	-209,6
Postrojenja za proizvodnju el. energije	- 2.840,5	-	-	-892,2	4.774,2	-1.087,5	-	-267,6	-	-	-1.316,0	-1.321,9	-54,9	223,0	-	-2.689,9
Toplane	-	-	-	-387,3	-12,8	-	-	-71,1	-	-	-	-29,2	-23,5	-	489,4	-34,5
Visoka peć	-166,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-166,2
Proizvodnja vodonika	-	-	-	-269,1	-	-	-	-	-	-	-	-	188,3	-	-80,8	-
Sopstvena potrošnja	-2,2	-	-98,0	-133,4	-292,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-49,8	-575,6
Gubici u transportu i distribuciji	-0,9	-	-	-21,1	-437,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-75,1	-534,1
Proizvodnja energije transformacijom	- 3.047,4	- 2.482,9	2.418,0	-1.558,9	3.773,9	-1.087,5	-	188,3	-	-	-350,9	-	-	-	-	-4.153,4
Domaćinstva	-	-	48,2	168,8	1.217,4	-	-	39,6	-	-	-	-	-	-	-	487,6
Javni i komercijalni sektor	-	-	106,5	207,6	605,5	-	-	31,5	-	-	-	-	-	-	-	1.045,0
Saobraćaj	-	-	1.474,2	5,5	472,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.352,2
Industrija	204,7	-	445,4	784,8	1.363,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.137,0
Poljoprivreda	-	-	100,3	17,4	40,1	-	-	8,1	1,2	-	4,5	-	-	-	-	171,6
Finalna potrošnja u neenergetske svrhe	12,9	-	835,1	310,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.158,4
Energija raspoloživa za finalnu potrošnju	217,5	-	3.009,8	1.494,7	3.699,3	-	79,3	923,5	44,4	11,2	-	51,6	-	411,1	746,6	10.688,9



Output specifications

KG\_2045a.txt

The EnergyPLAN model 16.22



	District Heating Production																							RES specification								
	Gr.1				Gr.2										Gr.3									RES specification								
	District heating kW	Solar kW	CSHP kW	DHP kW	District heating kW	Solar kW	CSHP kW	CHP kW	HP kW	ELT kW	Boiler kW	EH kW	Storage kW	Bal-ance kW	District heating kW	Solar kW	CSHP kW	CHP kW	HP kW	ELT kW	Boiler kW	EH kW	Storage kW	Bal-ance kW	RES1 Wind MW	RES2 Photo MW	RES3 River MW	RES4-7 Total MW				
January	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64977	434	0	35924	0	822	27802	0	0	-3	0	13	12	0	25			
February	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49889	779	0	28648	0	822	19720	0	0	-79	0	24	15	0	39			
March	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49346	1092	0	26293	0	823	21217	0	0	-79	0	33	15	0	48			
April	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17933	387	0	10399	0	820	6849	0	0	-521	0	32	14	0	46			
May	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	822	0	0	0	-822	0	30	16	0	47			
June	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	826	0	0	0	-826	0	37	16	0	52			
July	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	818	0	0	0	-818	0	38	11	0	49			
August	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	822	0	0	0	-822	0	39	9	0	49			
September	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	821	0	0	0	-821	0	33	8	0	41			
October	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19073	723	0	13567	0	822	4421	0	0	-461	0	30	7	0	37			
November	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41600	496	0	30255	0	822	10116	0	0	-89	0	15	12	0	27			
December	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61419	434	0	35141	0	822	25022	0	0	0	0	13	13	0	26			
Average	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25334	361	0	14998	0	822	9599	0	0	-446	0	28	12	0	41			
Maximum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	109058	49444	0	38000	0	1532	81766	0	0	822	0	142	20	0	159			
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1532	0	0	1	0	1			
Total for the whole year														222,53	3,17	0,00	131,74	0,00	7,22	84,32	0,00	-3,92	0	247	109	0	356					
GWh/year	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00																		
Own use of heat from industrial CHP: 0,00 GWh/year																																
ANNUAL COSTS (1000 EUR)																																
Total Fuel ex Ngas exchange =															NATURAL GAS EXCHANGE																	
Uranium =															Boilers kW	CHP3 kW	PP CAES kW	Indi-vidual kW	Trans- port kW	Indu. Var. kW	Demand Sum kW	Blo- gas kW	Syn- gas kW	CO2Hy gas kW	SynHy gas kW	SynHy gas kW	Stor- age kW	Sum kW	Im- port kW	Ex- port kW		
Coal =															January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Average	Maximum	Minimum	Total for the whole year		
FuelOil =															28419	20158	21688	7001	0	0	0	0	0	0	4519	10341	25578	9812	83583	0	86,19	
Gasoil/Diesel=															66100	52712	48379	19134	0	0	0	0	0	0	24964	55670	64660	27595	69920	0	242,40	
Petrol/JP =															29767	26737	19903	21435	23068	20765	22415	23758	26864	27511	29333	29891	25118	55555	0	220,63		
Gas handling =															7191	6797	5933	4850	3231	3231	3231	3231	3231	3231	4780	5969	6808	4869	9444	3231	42,77	
Biomass =															171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	171	1,50		
Food income =															24323	24323	24323	24323	24323	24323	24323	24323	24323	24323	24323	24323	24323	24323	24323	213,65		
Waste =															155971	130898	120398	76913	50792	48489	50139	51483	54588	86267	125807	151431	91888	214192	27724	807,14		
Total Ngas Exchange costs =															0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	
Marginal operation costs =															155971	130898	120398	76913	50792	48489	50139	51483	54588	86267	125807	151431	91888	214192	27724	807,14		
Total Electricity exchange =															155971	130898	120398	76913	50792	48489	50139	51483	54588	86267	125807	151431	91888	214192	27724	807,14		
Import =															155971	130898	120398	76913	50792	48489	50139	51483	54588	86267	125807	151431	91888	214192	27724	807,14		
Export =															0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bottleneck =															0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fixed imp/ex=															0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total CO2 emission costs =															0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total variable costs =															0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fixed operation costs =															77413	5389	445914	528715														
Annual Investment costs =															77413	5389	445914	528715														
TOTAL ANNUAL COSTS =															77413	5389	445914	528715														
RES Share:	28,1 Percent of Primary Energy				51,2 Percent of Electricity										580,0 GWh electricity from RES																	

09-september-2025 [20:57]

PRIOLOG C: REZULTATI ENERGETSKIH SIMULACIJA SCENARIJA 2A

Input										KG_2045b.txt										The EnergyPLAN model 16.22																	
Electricity demand (GWh/year):		Flexible demand		200,00		Fixed demand		591,03		Fixed imp/exp.		0,00		Electric heating + HP		62,29		Transportation		128,69		Electric cooling		2,70		Total		984,71									
District heating (GWh/year)		Gr.1		Gr.2		Gr.3		Sum		District heating demand		0,00		0,00		161,75		161,75		Solar Thermal		0,00		0,00		3,17		3,17									
Industrial CHP (CSHP)		0,00		0,00		0,00		0,00		Demand after solar and CSHP		0,00		0,00		158,58		158,58		Wind		0 kW		0,00		GWh/year		0,00									
Photo Voltaic		245520 kW		351,49		GWh/year		0,00		stabilisation		0,00		River Hydro		19559 kW		108,98		GWh/year		0,00		share		0,00		0,00									
River Hydro		0 kW		0		GWh/year		0,00		Hydro Power		49160 kW		185,97		GWh/year		0		GWh/year		0		GWh/year		0		GWh/year									
Geothermal/Nuclear		0 kW		0		GWh/year		0		GWh/year		0		GWh/year		0		GWh/year		0		GWh/year		0		GWh/year		0									
Group 2:		kW-e		kJ/s		elec.		Ther		COP		Group 3:		kW-e		kJ/s		elec.		Ther		COP		Group 4:		kW-e		kJ/s		elec.		Ther		COP			
CHP		0		0		0,40		0,50		Heat Pump		0		0		0		0,90		3,00		Boiler		0		0		0		0							
CHP		123754		154693		0,40		0,50		Heat Pump		500		1750		3,50		Boiler		462650		0,90		Condensing		123754		0,55		0,55							
Heats storage: gr.2:		0 MWh		gr.3:		4362 MWh		Fixed Boiler: gr.2:		0,0		Per cent		gr.3:		0,0		Per cent		Electricity prod. from		CSHP		Waste (GWh/year)		Gr.1:		0,00		0,00							
Gr.2:		0,00		0,00		0,00		Gr.3:		0,00		43,18		Regulation Strategy:		Technical regulation no. 2		CEEP regulation		000000000		Minimum Stabilisation share		0,00		Stabilisation share of CHP		0,00		Minimum CHP gr 3 load		0 kW					
Minimum PP		0 kW		Heat Pump maximum share		1,00		Maximum import/export		0 kW		Distr. Name :		Hour_nordpool.bt		Addition factor		0,00		EUR/MWh		Multiplication factor		0,00		Dependency factor		0,00		EUR/MWh pr. MW							
Average Market Price		0		EUR/MWh		Gas Storage		0		MWh		Syngas capacity		6657		kW		Biogas max to grid		0		kW		Fuel Price level:		Capacities		Storage		Efficiencies							
Elec. Storage		kW-e		MWh		Elec. Ther.		0,80		Charge 1:		29070		27740		0,80		Discharge 1:		29070		0,90		Charge 2:		1900		91		0,80							
Discharge 2:		1900		0,90		Electrolysers:		30630		346		0,77		0,05		Rockbed Storage:		0		0		1,00		CAES fuel ratio:		0,000		(GWh/year)		Coal		Oil		Ngas		Biomass	
Transport		0,00		401,33		1,50		0,00		Household		0,00		0,00		15,55		29,80		Industry		55,73		121,25		213,65		25,40		Various		0,00		0,00		0,00	

Output WARNING!!: (1) Critical Excess; (3) PP/Import problem

Demand	District Heating										Consumption										Production										Balance					Exchange									
	Distr. heating		Production								Elec. demand	Flex.& Transp.	Elec-trolleyser	Hydro EH	Tur-bine	Hy-dro RES	Geo-thermal	Waste+ CSHP	CHP	PP	Stab-Load %	Imp kW	Exp kW	CEEP kW	EEP kW	Payment Imp	Exp																		
	kW	kW	Solar kW	CSHP kW	DHP kW	CHP kW	HP kW	ELT kW	Boiler kW	EH kW																		Ba-lance kW	MW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	1000 EUR	1000 EUR				
January	47230	433	13805	0	32069	120	822	41	0	-59	77	37419	12014	16435	4708	134	97	31	24816	0	4915	26	58	100	3242	11	11	0	0	0	0														
February	36263	777	13805	0	22003	259	823	0	0	-1403	75	37471	9272	16453	3677	1621	1167	49	22834	0	4915	18	49	100	175	789	789	0	0	0	0														
March	35868	1089	13805	0	21076	416	825	0	0	-1343	65	37419	9217	16505	3538	3515	2531	62	24234	0	4915	17	27	100	4	3201	3201	0	0	0	0														
April	13035	386	13805	0	7230	133	820	0	0	-9338	65	37372	3344	16395	1370	3049	2195	60	20521	0	4915	6	36	100	0	2521	2521	0	0	0	0														
May	0	0	13805	0	0	0	819	0	0	-14624	68	37417	0	16386	0	2460	1771	60	21118	0	4915	0	38	100	0	1776	1776	0	0	0	0														
June	0	0	13805	0	0	0	827	0	0	-14632	65	37469	0	16534	0	4240	3053	68	19267	0	4915	0	31	100	0	2650	2650	0	0	0	0														
July	0	0	13805	0	0	0	821	0	0	-14626	65	37419	0	16426	0	4577	3295	65	19070	0	4915	0	33	100	0	2559	2559	0	0	0	0														
August	0	0	13805	0	0	0	822	0	0	-14627	65	37419	0	16436	0	5188	3736	65	17458	0	4915	0	36	100	0	2935	2935	0	0	0	0														
September	0	0	13805	0	0	0	822	0	0	-14626	64	37419	0	16430	0	3525	2538	55	20178	0	4915	0	41	100	0	2324	2324	0	0	0	0														
October	13863	722	13805	0	6625	117	818	0	0	-8224	65	37371	3550	16351	1315	3004	2163	50	21125	0	4915	5	44	100	48	1299	1299	0	0	0	0														
November	30238	495	13805	0	16483	175	822	6	0	-1548	65	37469	7720	16435	3044	262	189	34	21143	0	4915	13	57	100	239	34	34	0	0	0	0														
December	44644	433	13805	0	29404	169	822	11	0	0	73	37371	11372	16435	4448	0	0	32	22286	0	4915	24	58	100	2002	0	0	0	0	0	0														
Average	18414	360	13805	0	11240	115	822	5	0	-7933	68	37419	4704	16435	1840	2635	1897	52	21171	0	4915	9	42	100	482	1677	1677	0	0	0	0														
Maximum	79271	36098	13805	0	127179	1750	1532	2802	0	47805	100	90218	20107	30630	10419	30970	30970	219	49160	0	4915	102	122	100	28333	59087	59087	0	0	0	0														
Minimum	0	0	13805	0	0	0	0	0	0	-74540	34	22769	0	0	0	0	0	1	0	0	4915	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0														
GWh/year	161,75	3,17	121,26	0,00	98,73	1,01	7,22	0,04	0,00	-69,69	594	328,69	41,32	144,36	16,16	23,15	16,67	460	185,97	0,00	43,18	79	373	4,23	14,73	14,73	0,00	1000	EUR	0															
FUEL BALANCE (GWh/year):										Waste/ CAES BioCon- Electro- Wind										PV and Wind off										Industry					Imp/Exp Corrected		CO2 emission (kt):								
DHP		CHP2		CHP3		Boiler2		Boiler3		PP		Geo/Nu. Hydro		HTL		Etc.ly.		version		Fuel		Wind		CSP		Wave		Hydro		Solar.Th.		Transp. househ.		Various		Total		Imp/Exp		Corrected		Total		Net	
Coal	-	-	3,95	-	0,00	481,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Oil	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
N.Gas	-	-	181,67	-	0,04	151,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Biomass	-	-	11,85	-	0,00	45,32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Renewable	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
H2 etc.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Biofuel	-	-	-	-	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Nuclear/CCS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Total	-	-	197,47	-	0,05	677,51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Output specifications


KG\_2045b.txt

The EnergyPLAN model 16.22



District Heating Production														RES specification															
Gr.1				Gr.2										Gr.3						RES specification									
District heating kW	Solar kW	CSHP kW	DHP kW	District heating kW	Solar kW	CSHP kW	CHP kW	HP kW	ELT kW	Boiler kW	EH kW	Storage kW	Balance kW	District heating kW	Solar kW	CSHP kW	CHP kW	HP kW	ELT kW	Boiler kW	EH kW	Storage MW	Balance kW	RES1 Wind MW	RES2 Photo MW	RES3 River MW	RES4 4-7 MW	Total RES MW	
January	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47230	433	13805	32069	120	822	41	0	4348	-59	0	19	12	0	31	
February	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36263	777	13805	22003	259	823	0	0	4348	-1403	0	34	15	0	49	
March	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35868	1089	13805	21076	416	825	0	0	4336	-1343	0	47	15	0	62	
April	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13035	386	13805	7230	133	820	0	0	4355	-9338	0	45	14	0	60	
May	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13805	0	0	819	0	0	4362	-14624	0	43	16	0	60	
June	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13805	0	0	827	0	0	4362	-14632	0	52	16	0	68	
July	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13805	0	0	821	0	0	4362	-14626	0	54	11	0	65	
August	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13805	0	0	822	0	0	4362	-14627	0	56	9	0	65	
September	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13805	0	0	822	0	0	4362	-14626	0	46	8	0	55	
October	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13863	722	13805	6625	117	818	0	0	4361	-8224	0	42	7	0	50	
November	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30238	495	13805	16483	175	822	6	0	4358	-1548	0	22	12	0	34	
December	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	44644	433	13805	29404	169	822	11	0	4351	0	0	19	13	0	32	
Average	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18414	360	13805	11240	115	822	5	0	4356	-7933	0	40	12	0	52	
Maximum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79271	36098	13805	127179	1750	1532	2802	0	4362	47805	0	202	20	0	219	
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13805	0	0	0	0	0	4082	-74540	0	0	1	0	1	
Total for the whole year																													
GWh/year	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	161,75	3,17	121,26	98,73	1,01	7,22	0,04	0,00	-69,69	0	351	109	0	460		
Own use of heat from industrial CHP: 0,00 GWh/year																													
ANNUAL COSTS (1000 EUR)															NATURAL GAS EXCHANGE														
Total Fuel ex Ngas exchange =	57373			DHP & Boilers kW	CHP2 kW	PP CAES kW	Individual kW	Trans port kW	Indu. Var. kW	Demand Sum kW	Bio-gas kW	Syn-gas kW	CO2Hy gas kW	SynHy gas kW	SynHy gas kW	Storage kW	Sum kW	Import kW	Export kW										
Uranium =	0			January	42	59006	23651	4541	171	24323	111733	0	5459	0	0	0	106275	106275	0										
Coal =	7203			February	0	40485	19681	3486	171	24323	88145	0	5459	0	0	0	82687	82687	0										
FuelOil =	11305			March	0	38780	11136	3448	171	24323	77858	0	5459	0	0	0	72399	72399	0										
Gasoil/Diesel=	0			April	0	13304	14712	1253	171	24323	53762	0	5459	0	0	0	48304	48304	0										
Petrol/JP =	38865			May	0	0	15511	0	171	24323	40005	0	5459	0	0	0	34546	34546	0										
Gas handling =	0			June	0	0	12402	0	171	24323	36896	0	5459	0	0	0	31437	31437	0										
Biomass =	0			July	0	0	13559	0	171	24323	38052	0	5459	0	0	0	32594	32594	0										
Food income =	0			August	0	0	14535	0	171	24323	39028	0	5459	0	0	0	33569	33569	0										
Waste =	0			September	0	0	16722	0	171	24323	41215	0	5459	0	0	0	35757	35757	0										
Total Ngas Exchange costs =	10951			October	0	12191	17943	1333	171	24323	55960	0	5459	0	0	0	50502	50502	0										
Marginal operation costs =	0			November	6	30329	23075	2907	171	24323	80810	0	5459	0	0	0	75352	75352	0										
Total Electricity exchange =	0			December	11	54103	23603	4292	171	24323	106502	0	5459	0	0	0	101044	101044	0										
Import =	0			Average	5	20682	17203	1770	171	24323	64153	0	5459	0	0	0	58695	58695	0										
Export =	0			Maximum	2864	234009	49666	7621	171	24323	265352	0	5459	0	0	0	259893	259893	0										
Bottleneck =	0			Minimum	0	0	0	0	171	24323	24493	0	5459	0	0	0	19035	19035	0										
Fixed imp/ex=	0			Total for the whole year																									
Total CO2 emission costs =	0			GWh/year	0,04	181,67	151,11	15,55	1,50	213,65	563,52	0,00	47,95	0,00	0,00	0,00	0,00	515,57	515,57	0,00									
Total variable costs =	68324																												
Fixed operation costs =	4218																												
Annual Investment costs =	619703																												
TOTAL ANNUAL COSTS =	692245																												
RES Share:	38,1 Percent of Primary Energy			62,9 Percent of Electricity			719,3 GWh electricity from RES																		09-september-2025 [21:13]				



Output specifications				KG_2045b_DHW_chp.txt										The EnergyPLAN model 16.22														
District Heating Production																		RES specification										
Gr.1				Gr.2								Gr.3								RES specification								
District heating kW	Solar kW	CSHP kW	DHP kW	District heating kW	Solar kW	CSHP kW	CHP kW	HP kW	ELT kW	Boiler kW	EH kW	Storage kW	Ba-lance kW	District heating kW	Solar kW	CSHP kW	CHP kW	HP kW	ELT kW	Boiler kW	EH kW	Storage MW	Ba-lance kW	RES1 Wind MW	RES2 Photo MW	RES3 River MW	RES4 1-4-7 MW	Total MW
January	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66937	433	13885	51188	160	822	471	0	4287	-22	0	19	12	0	31
February	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42302	777	13885	26974	319	823	142	0	4333	-618	0	34	15	0	49
March	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37057	1089	13885	21216	487	825	191	0	4317	-635	0	47	15	0	62
April	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15900	1049	13885	5406	146	821	0	0	4356	-5407	0	45	14	0	60
May	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7377	997	13885	0	0	818	0	0	4362	-8323	0	43	16	0	60
June	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7377	1209	13885	0	0	827	0	0	4362	-8544	0	52	16	0	68
July	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7377	1251	13885	0	0	821	0	0	4362	-8579	0	54	11	0	65
August	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7377	1298	13885	0	0	822	0	0	4362	-8628	0	56	9	0	65
September	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7377	1073	13885	0	0	821	0	0	4362	-8401	0	46	8	0	55
October	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33843	984	13885	21924	206	817	234	0	4267	-4206	0	42	7	0	50
November	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48704	495	13885	33587	235	823	360	0	4297	-680	0	22	12	0	34
December	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50274	433	13885	34911	195	821	28	0	4338	1	0	19	13	0	32
Average	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27664	924	13885	16280	145	822	119	0	4334	-4511	0	40	12	0	52
Maximum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	140804	4828	13885	153673	1750	1532	38285	0	4362	96043	0	202	20	0	219
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7377	0	13885	0	0	0	0	0	3676	-97100	0	0	1	0	1
Total for the whole year	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	243,00	8,12	121,96	143,00	1,28	7,22	1,05	0,00	-39,63	0	351	109	0	460	
Own use of heat from industrial CHP: 22,50 GWh/year																												
ANNUAL COSTS (1000 EUR)																												
Total Fuel ex Ngas exchange =				55446																								
Uranium =				0																								
Coal =				5276																								
Fuel/Oil =				11305																								
Gasoil/Diese)=				0																								
Petrol/JP =				38865																								
Gas handling =				0																								
Biomass =				0																								
Food income =				0																								
Waste =				0																								
Total Ngas Exchange costs =				11666																								
Marginal operation costs =				0																								
Total Electricity exchange =				0																								
Import =				0																								
Export =				0																								
Bottleneck =				0																								
Fixed imp/ex=				0																								
Total CO2 emission costs =				0																								
Total variable costs =				67113																								
Fixed operation costs =				15208																								
Annual Investment costs =				655317																								
TOTAL ANNUAL COSTS =				737637																								
RES Share: 40,0 Percent of Primary Energy 65,2 Percent of Electricity 715,8 GWh electricity from RES																												
09-september-2025 [21:44]																												

## **Biografija autorke**

Jelena Nikolić je rođena 21. aprila 1994. godine u Smederevskoj Palanci. Osnovnu školu „J.J. Zmaj“ u Svilajncu je završila kao nosilac Vukove diplome. Školovanje je potom nastavila u Prvoj Kragujevačkoj gimnaziji, koju je završila sa odličnim uspehom. Osnovne i master studije je završila na Fakultetu inženjerskih nauka u Kragujevcu. U toku akademske 2017/1028 godine u zimskom semestru je boravila na Univerzitetu u Vroclavu, Poljska. Nakon završetka master studija sa prosečnom ocenom 9,53, upisala je doktorske studije, pod mentorstvom profesora Dušana Gordića. Njena master teza je nagrađena Teslinom nagradom za najbolji studentski rad koju dodeljuje fondacija Nikola Tesla i Elektromašingradnja doo..

U periodu od 2019-2024 godine na Fakultetu inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu je radila, najpre kao istraživač pripravnik, a zatim kao istraživač saradnik i bila je učesnik na međunarodnim projektima i projektima Resornog Ministarstva. U toku ovog perioda učestvovala je u izvođenju vežbi, kao saradnik u nastavi.

Od 2024. godine zaposlena je na Univerzitetu u Olborgu u Danskoj (Aalborg University), gde je angažovana na evropskim projektima u oblasti energetskeg planiranja na lokalnim nivoima, sa posebnim fokusom na pozitivne energetske distrikte i na energetske zajednice. Do sada je publikovala 3 rada u međunarodnim časopisima sa SCI liste, kao prvi autor, a koautor je brojnih publikacija u istaknutim časopisima i u časopisima od nacionalnog značaja.

U časopisu Energy Strategy Reviews (IF 9.9) radi kao pomoćnik glavnog urednika od Novembra 2025. godine.

## **ИЗЈАВА АУТОРА О ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Изјављујем да докторска дисертација под насловом:

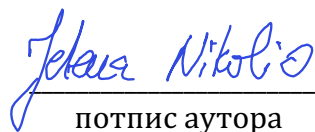
### **ЕНЕРГЕТСКО ПЛАНИРАЊЕ КЛИМАТСКИ НЕУТРАЛНИХ ГРАДОВА**

представља *оригинално ауторско дело* настало као резултат *сопственог истраживачког рада*.

*Овом Изјавом такође потврђујем:*

- да сам *једини аутор* наведене докторске дисертације,
- да у наведеној докторској дисертацији *нисам извршио/ла повреду* ауторског нити другог права интелектуалне својине других лица,

У Олборгу, 07.12.2025. године,

  
\_\_\_\_\_

потпис аутора

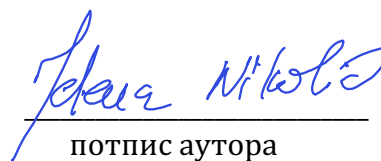
**ИЗЈАВА АУТОРА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ  
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Изјављујем да су штампана и електронска верзија докторске дисертације под  
насловом:

**ЕНЕРГЕТСКО ПЛАНИРАЊЕ КЛИМАТСКИ НЕУТРАЛНИХ ГРАДОВА**

истоветне.

У Олборгу, 07.12.2025. године,

  
потпис аутора

## ИЗЈАВА АУТОРА О ИСКОРИШЋАВАЊУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ја, Јелена Николић,

дозвољавам

не дозвољавам

Универзитетској библиотеци у Крагујевцу да начини два трајна умножена примерка у електронској форми докторске дисертације под насловом:

### **ЕНЕРГЕТСКО ПЛАНИРАЊЕ КЛИМАТСКИ НЕУТРАЛНИХ ГРАДОВА**

и то у целини, као и да по један примерак тако умножене докторске дисертације учини трајно доступним јавности путем дигиталног репозиторијума Универзитета у Крагујевцу и централног репозиторијума надлежног министарства, тако да припадници јавности могу начинити трајне умножене примерке у електронској форми наведене докторске дисертације путем преузимања.

Овом Изјавом такође

дозвољавам

не дозвољавам<sup>19</sup>

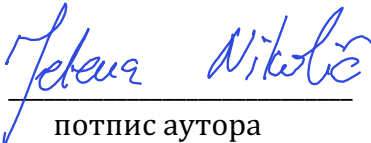
припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од следећих *Creative Commons* лиценци:

---

<sup>19</sup> Уколико аутор изабере да не дозволи припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци, то не искључује право припадника јавности да наведену докторску дисертацију користе у складу са одредбама Закона о ауторском и сродним правима.

- 1) Ауторство
- 2) Ауторство - делити под истим условима
- 3) Ауторство - без прерада
- 4) Ауторство - некомерцијално
- 5) Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима
- 6) Ауторство - некомерцијално - без прерада<sup>20</sup>

У Олборгу, 7.12.2025. године,

  
потпис аутора

---

<sup>20</sup> Молимо ауторе који су изабрали да дозволе припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци да заокруже једну од понуђених лиценци. Детаљан садржај наведених лиценци доступан је на: <http://creativecommons.org.rs/>